

การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
อันเนื่องมาจากการขันตกรู

THE STUDY ON ROTATING UNBALANCE IN HARD DISK DRIVE
DUE TO SCREW TIGHTENING

สามารถ มุ่งโตกลาง
SAMART MUNGTO'KLANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMUTL-2009-EN-M-030-107

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

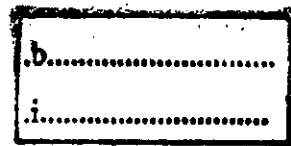
การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
อันเนื่องมาจากการขันสกรู

THE STUDY ON ROTATING UNBALANCE IN HARD DISK DRIVE
DUE TO SCREW TIGHTENING



สามารถ มุ่งโตกลาง
SAMART MUNGTOKLANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....104509
วัน,เดือน,ปี..... 4 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-030-107

**THE STUDY ON ROTATING UNBALANCE IN HARD DISK DRIVE
DUE TO SCREW TIGHTENING**

SAMART MUNGTOKLANG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-030-107




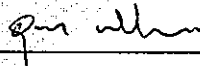
COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อันเนื่องมาจากการขันสกรู
Thesis Title The Study on Rotating Unbalance in Hard Disk Drive Due to Screw Tightening
นักศึกษา นายสามารถ มุ่งโตกลาง
รหัสประจำตัว 50060322
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อุษณัต พิณโสภณ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-030-107

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ผศ.มณฑล	ใจกุล	
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยนันท์	
ผศ.ดร.อุษณัต	พิณโสภณ	


วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นคิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์อันเนื่องมาจากการขันสกรู
นักศึกษา	นาย สามารถ มุ่ง โตกลาง
รหัสนักศึกษา	50060322
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อนุวัต พิณโสภณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษถึงความไม่สมดุลของชุดแผ่นคิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์อันเนื่องมาจากการขันสกรูในกระบวนการการผลิต ในขั้นตอนการผลิตฮาร์ดดิสก์นั้นชุดแผ่นคิสก์จะถูกประกอบเข้ากับแกนหมุนด้วยการขันสกรู หลังจากนั้นชุดแผ่นคิสก์จะถูกปรับสมดุลเพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นอีกครั้งและตรวจสอบความสมดุลเป็นครั้งสุดท้าย แต่จากข้อมูลของกระบวนการการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายนี้ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่ามีการขันสกรูที่เกี่ยวเนื่องกับการควบคุมแรงสกรู โดยได้อธิบายว่าการที่สกรูแม้จะถูกขันด้วยแรงบิดที่เท่ากันอาจจะมีค่าของแรงที่มีค่าไม่เท่ากันในสกรูแต่ละตัว ค่าของแรงสกรูที่ไม่เท่ากันนี้อาจเป็นผลทำให้ชุดแผ่นคิสก์เกิดการเสียรูปร่างและเคลื่อนตัว ส่งผลให้จุดศูนย์กลางมวลของชุดแผ่นคิสก์เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสาเหตุของความไม่สมดุลของชุดแผ่นคิสก์ภายใต้สมมติฐานแรงของสกรูที่ไม่เท่ากันภายใต้แรงบิดขันที่เท่ากัน โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาความไม่สมดุลภายใต้การกำหนดเงื่อนไขให้ภาระของสกรูแต่ละตัวมีค่าต่างกัน ผลที่ได้จากการคำนวณได้ถูกเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดนั้น ผลจากการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 43% แต่พฤติกรรมการเกิดความไม่สมดุลในทุกกรณีของการทดลองและการคำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

คำสำคัญ: ความไม่สมดุล, ฮาร์ดดิสก์, การขันสกรู, หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title	The study on Rotating Unbalance in Hard Disk Drive due to Screw Tightening
Student	Mr. Samart Mungtoklang
Student ID.	50060322
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Unnat Pinsopon

ABSTRACT

This research presents the study on the unbalance of the rotating disks in hard disk drive caused by the manufacturing process. In the hard disk manufacturing process, the disks are assembled to the spindle with screws. The disk-spindle mechanism is then balanced until the unbalance level is within the acceptable limit. The screws are then finally tightened with higher torque, and the disk-spindle mechanism is balance checked. The unbalance in disk-spindle mechanism is usually found to be increased after the final screw tightening process. From the previous studies on screw tightening, it is found that screws tightened with the same torque may not have the same preload forces. This difference in screw preload forces may result in the unbalance of the disk-spindle mechanism. The cause of the increase in disk-spindle unbalance under the assumption of different screw preload forces of the screws under the same tightening torque is investigated in this research. Finite element technique was used to calculate for the unbalance of the disk-spindle mechanism under the various values of preloads of each screw. The results from computer simulations were then compared with the experimental ones. In the worst case, the result from computer simulation differs from the experimental one by 43%. However the results from both sources always agree on the same trend.

Keywords: Unbalance, Hard Disk Drive, Screw tightening, Finite Element Technique.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อุन्नัต พิณโสภณ และ อาจารย์ ภูติท ชัยคิดพัฒนกุล ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รวมทั้งเพื่อนๆ ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดีตลอดมาจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สามารถ มุ่งโตกลาง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	9
3.1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	9
3.1.1 บทบาทและความสำคัญของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	9
3.1.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	10
3.1.3 กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	13
3.1.4 ความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	14
3.2 แรงบิดและแรงในสกรู.....	16
3.2.1 คำจำกัดความและส่วนต่างๆ ของเกลียว.....	17
3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและแรงในสกรู.....	18
3.2.3 การควบคุมแรงในสกรู.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ความไม่สมดุล.....	23
3.3.1 ความหมายของความไม่สมดุล.....	24
บทที่ 4 การคำนวณหาค่าความไม่สมดุล.....	29
4.1 การจำลองชุดแผ่นดิสก์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	29
4.1.1 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดแผ่นดิสก์.....	30
4.1.2 การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์และเงื่อนไขในการจำลอง.....	31
4.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง.....	35
4.2 การคำนวณหาค่าความไม่สมดุล.....	40
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	48
5.1 บทนำ.....	48
5.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	48
5.3 วิธีการทดลอง.....	48
5.4 ผลการทดลอง.....	49
5.4.1 ผลการทดลองในกรณีที่ 1.....	49
5.4.2 ผลการทดลองในกรณีที่ 2.....	53
5.4.3 ผลการทดลองในกรณีที่ 3.....	57
5.4.4 ผลการทดลองในกรณีที่ 4.....	61
5.4.5 ผลการทดลองในกรณีที่ 5.....	65
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	69
5.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณ.....	71
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลและสรุปผล.....	76
6.1 วิเคราะห์ผล.....	76
6.1 สรุปผล.....	76
บรรณานุกรม.....	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง.....	80
ภาคผนวก ข ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง.....	89
ภาคผนวก ค ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	120
ประวัติผู้เขียน.....	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พฤติกรรมความไม่สมดุลในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์.....	15
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์สำหรับสกรูและบ่าสกรู.....	22
4.1 ค่าคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลอง.....	30
4.2 ระยะเวลาเลื่อนตัวเปรียบเทียบเกี่ยวกับจำนวนเอลิเมนต์.....	34
4.3 จำนวนเอลิเมนต์และจำนวน โหนดของแบบจำลอง.....	35
4.4 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 1.....	42
4.5 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 2.....	43
4.6 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 3.....	44
4.7 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 4.....	45
4.8 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 5.....	46
5.1 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1.....	50
5.2 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3.....	51
5.3 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว.....	52
5.4 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1.....	54
5.5 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4.....	55
5.6 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว.....	56
5.7 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1.....	58
5.8 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4.....	59
5.9 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว.....	60
5.10 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1.....	62
5.11 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2.....	63
5.12 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว.....	64
5.13 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1.....	66
5.14 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5.....	67
5.15 ค่าความ ไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว.....	68
5.16 ค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่สมดุลจากการทดลอง.....	70
5.17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่สมดุล (mg-cm).....	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 รูปทรงภายนอกของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั่วไป (ด้านหน้า).....	11
3.2 รูปทรงภายนอกของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั่วไป (ด้านหลัง).....	11
3.3 โครงสร้างภายในของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั่วไป.....	12
3.4 กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน.....	13
3.5 ตำแหน่งที่วัดความไม่สมดุลในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์.....	14
3.6 พฤติกรรมความไม่สมดุลในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์.....	15
3.7 ลักษณะเกลียว.....	17
3.8 ส่วนต่างๆ ของสกรู.....	17
3.9 ผังวัตถุอิสระที่จุดใดๆ บนเกลียว.....	18
3.10 ผังวัตถุอิสระของเกลียวแบบมีขด.....	21
3.11 ความไม่สมดุลแบบสถิต (Static Unbalance).....	24
3.12 ความไม่สมดุลแบบคู่ควบของแผ่นจานหมุน (Couple Unbalance).....	26
3.13 ความไม่สมดุลแบบคู่ควบ (Couple Unbalance).....	26
3.14 ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance).....	27
3.15 เวกเตอร์การสมดุลของแรง 3 แรง.....	27
4.1 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไป.....	29
4.2 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดแผ่นดิสก์.....	30
4.3 ลักษณะการประกอบเข้าด้วยกันของแบบจำลองชุดแผ่นดิสก์.....	31
4.4 ตำแหน่งรูสกรูของชุดแผ่นดิสก์.....	31
4.5 ลักษณะการกำหนดการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	31
4.6 ลักษณะการกำหนดความดันที่รูสกรู.....	32
4.7 ลักษณะการยึดแผ่นรองแผ่นล่างสุดไม่ให้เคลื่อนที่.....	32
4.8 จุดพิจารณาบนแผ่นดิสก์ทั้ง 4 จุด.....	33
4.9 ระยะเคลื่อนตัวเปรียบเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์.....	34
4.10 ลักษณะเอลิเมนต์ของแบบจำลอง.....	35
4.11 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %.....	36
4.12 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %.....	36
4.13 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %.....	36
4.14 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %.....	36
4.15 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5.....	67
5.15 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว.....	68
5.16 ค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่สมดุลจากการทดลอง.....	70
5.17 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงภาระสกรู 1 ตัว.....	72
5.18 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงภาระสกรู 2 ตัว.....	72
5.19 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงภาระสกรู 3 ตัว.....	73
5.20 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงภาระสกรู 4 ตัว.....	73
5.21 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงภาระสกรู 5 ตัว.....	74

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

λ	มุมหกลัด (องศา)
P	ระยะพิทช์ (mm)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (mm)
d_r หรือ d_1	เส้นผ่านศูนย์กลางรอง (mm)
d_p หรือ d_2	เส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ (mm)
L	ระยะหกลัด (mm)
2α	มุมของเกลียว (องศา)
μ	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส
μ_c	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานป่าสกรู
d_c	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของป่าสกรู (mm)
T	แรงบิดของสกรู (N-mm)
F	แรงในสกรู (N)
K	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด
ω	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
F	ค่าแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (N)
M	มวลแผ่นจานกลม (kg)
m	มวลขนาดเล็ก (kg)
r	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นจานกลม (m)
e	การเยื้องจุดศูนย์กลางของมวลจากแกนหมุน (m)
R	ตำแหน่งหรือพิทช์ (m)
u	ระยะขจัด (m)
V	ปริมาตร (m ³)
U	ความไม่สมดุล (kg-m)

ตัวห้อย

c	ป่าสกรู	I	เริ่มต้น
u	นำโหนดขึ้น	N	โหนด
d	นำโหนดลง	D	ดิสก์
E	เอลิเมนต์		

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงที่ผ่านมา ประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว กล่าวคือ ทางด้านของความจุข้อมูล จำนวนร่องเก็บข้อมูลในหนึ่งหน่วยความยาวแนวรัศมี (Track Per Inch) เพิ่มขึ้นไปมากกว่า 25,000 ร่องในปัจจุบัน ทางด้านของความไว ความเร็วรอบของมอเตอร์ ปัจจุบันขึ้นไปถึง 10,000 รอบต่อนาที และจำนวนแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ก็เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อ TPI (Track Per Inch) และความเร็วยุโรปของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ การสั่นสะเทือนใดๆ ของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์จึงเป็นปัญหาสำคัญ เพราะการสั่นสะเทือนเนื่องจากความไม่สมดุลจะมีความรุนแรงมากขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น และการสั่นสะเทือนในแนวรัศมีทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างแผ่นดิสก์และหัวอ่าน ขณะที่หัวอ่านกำลังอ่านหรือเขียนข้อมูล ทำให้การอ่านหรือการเขียนข้อมูลผิดพลาด ดังนั้นการสั่นสะเทือนของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์จึงเป็นปัญหาสำคัญที่อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จำเป็นต้องแก้ไข

การวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มักจะชี้สาเหตุของปัญหาว่าเกิดจากคุณภาพของวัตถุดิบและส่วนประกอบของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน อย่างเช่น Hredzak and Guo [1] กล่าวว่า สาเหตุหนึ่งของการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของมวลของชิ้นส่วนที่หมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ และ จูติมา จินคนาวาน [2] พบว่าการสั่นสะเทือนในแนวระนาบของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน เกิดจากการแกว่งของแกนหมุนเป็นสาเหตุหลัก เป็นต้น การวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาและวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์

การสั่นสะเทือนของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ก็เป็นอีกปัญหาหนึ่ง ที่ภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ให้ความสนใจและต้องการหาสาเหตุของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดังกล่าวแล้ววิเคราะห์หาวิธีแก้ไขปรับปรุงเพื่อให้การสั่นสะเทือนใดๆ ที่เกิดขึ้นนั้นลดลง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เพิ่มขึ้นจากการขึ้นสกรูแน่น โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการคำนวณเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง ซึ่งปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่

นิยมมากขึ้นทั้งสถาบันการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมทั่วไป ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และโปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก และกว้างขวางยิ่งขึ้น การใช้งานจึงสะดวกรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการไม่มากนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เพิ่มขึ้นจากการขันสกรู โดยที่แรงของสกรูแต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการจำลองการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวของชุดแผ่นดิสก์และกำหนดหาความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากนั้นทำการทดลองขันสกรูเพื่อตรวจสอบความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากกรณีดังกล่าว

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อพิจารณากระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้ว ชุดแผ่นดิสก์จะถูกประกอบเข้ากับแกนหมุนด้วยการขันสกรูหลวมและทำการปรับสมดุลเพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายและตรวจสอบความสมดุล แต่ปรากฏว่าความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ขั้นตอนที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นก็คือขั้นตอนการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ในขั้นตอนนี้จะขันสกรูด้วยเครื่องจักร โดยควบคุมแรงบิดของสกรูแต่ละตัวให้เท่ากัน ซึ่งแรงบิดจริงที่ขันสกรูอาจไม่เท่ากันและจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตและพบว่าม้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงสกรู [3, 4] โดยได้อธิบายว่าการที่สกรูเมื่อกขันด้วยแรงบิดที่เท่ากันอาจจะมีค่าของแรงที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละตัวได้ ซึ่งเป็นผลทำให้ชุดแผ่นดิสก์เกิดการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวส่งผลให้จุดศูนย์กลางมวลของชุดแผ่นดิสก์เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น แต่ในกระบวนการผลิตไม่สามารถวัดแรงของสกรูโดยตรงได้ จึงไม่สามารถควบคุมแรงของสกรูแต่ละตัวให้เท่ากันได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ ศึกษาถึงความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้วที่เพิ่มขึ้นจากการขันสกรูแน่น โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2. คำนวณหาค่าความไม่สมดุลแบบสถิตที่เกิดขึ้นจากการชันสกรู โดยที่แรงของสกรูแต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ทดลองหาค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากการชันสกรู โดยที่แรงบิดของสกรูแต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน
4. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษากระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสิกส์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
2. สร้างแบบจำลองโดยใช้ต้นแบบจากชุดแผ่นคิสิกส์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
3. ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์หาขนาดของการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวเนื่องจากการชันสกรู
4. คำนวณหาค่าความไม่สมดุลจากขนาดของการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัว
5. ทำการทดลองหาค่าความไม่สมดุลเนื่องจากการชันสกรู
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและการคำนวณ
7. สรุปผลการศึกษาและวิจัย

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและปัญหาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา โครงสร้างของวิทยานิพนธ์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความไม่สมดุลและการสั่นสะเทือนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

บทที่ 3 กล่าวถึงบทบาทและความสำคัญของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ส่วนประกอบและโครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ และกระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสิกส์และแกนหมุน คำจำกัดความและส่วนต่างๆ ของเกลียว แรงบิดสกรูและแรงในสกรู และการควบคุมแรงในสกรู ความหมายของความไม่สมดุล ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ พฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสิกส์

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวของชุดแผ่นคิสิกส์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การคำนวณหาค่าความไม่สมดุลและผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองหาความไม่สมดุล อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง และผลที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

1. ได้ทราบถึงพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากการชันสกรู โดยที่แรงของสกรู แต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน

2. ได้ทราบว่าแรงของสกรูแต่ละตัวมีผลต่อความไม่สมดุล

3. สามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นแนวทางเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและหาวิธีแก้ไขความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นให้ลดลงอีกต่อไป

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การสั่นสะเทือนใดๆ ของระบบดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์นั้นเป็นปัญหาสำคัญ เพราะการสั่นสะเทือนเนื่องจากความไม่สมดุลจะมีความรุนแรงมากขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น และการสั่นสะเทือนในแนวรัศมีทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแผ่นดิสก์และหัวอ่าน ขณะที่หัวอ่านกำลังอ่านหรือเขียนข้อมูล ทำให้การอ่านหรือการเขียนข้อมูลผิดพลาด ดังนั้นการสั่นสะเทือนของระบบดิสก์และแกนหมุนในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์จึงเป็นปัญหาสำคัญที่อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องแก้ไข

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B. Hredzak, and G. Guo [1] ได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Active Balancing Technique เพื่อช่วยลดความไม่สมดุลที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่นำมาเปรียบเทียบกับวิธี Traditional Passive Balancing Methods วิธีการดังกล่าวใช้การฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่ในมอเตอร์แกนหมุนแบบอสมมาตร เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะกระทำต้านกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เป็นสาเหตุมาจากความไม่สมดุล ซึ่งจะช่วยให้ลดการสั่นสะเทือนลงได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากเทคนิคมีความเหมาะสมสำหรับการลดความไม่สมดุลที่มีขนาดเล็กๆ ยิ่งกว่านั้นเทคนิคนี้ยังสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของความไม่สมดุลที่มีสาเหตุมาจากการกระทบกระเทือนอย่างกะทันหันจากสิ่งต่างๆ ภายนอกไปยังฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้อีกด้วย ข้อดีของเทคนิคนี้ก็คือ ไม่ต้องแก้ไขปรับเปลี่ยนมอเตอร์แกนหมุน ข้อเสียก็คือแรงที่สร้างขึ้นนั้นค่อนข้างน้อย ดังนั้นเทคนิคนี้ควรใช้สำหรับการแก้ไขความไม่สมดุลที่มีขนาดเล็กๆ เท่านั้น

ฐิติมา จินตนาวัน [2] ได้ศึกษาการสั่นสะเทือนทางกลของระบบคอมพิวเตอร์ Hard Disk Drives (HDD) จากการศึกษาพบว่า การสั่นสะเทือนในแนวระนาบของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน เกิดจากการแกว่งของแกนหมุน เป็นสาเหตุหลัก แม้ว่าปัจจุบัน มีการนำเอา Fluid Dynamic Bearings (FDB) มาใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนดังกล่าว และ FDB Spindle ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีเสียงเสียดกว่า Ball Bearing Spindle ที่มีใช้ในปัจจุบัน แต่ FDB Spindle ยังมีปัญหาเรื่องการรั่วไหลของของเหลวในแบร์ริง

S. Lim [5] ได้ทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพและความแม่นยำของสมการของแบบจำลองระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยได้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบแกนหมุนและ

โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงได้ของทุกชิ้นส่วนประกอบ ผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันว่าสมการของแบบจำลองระบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ มีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพียงพอ และจากการทดลองยังสังเกตได้ว่า แผ่นดิสก์ที่วางซ้อนกันในระบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะเกิดการสั่นสะเทือนคู่ควบปรากฏขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งมีความสำคัญมากที่จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความสามารถในการออกแบบสำหรับระบบที่มีความเร็วและความหนาแน่นในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สูง

ชิต เหล่าวัฒนา และ ฉัฐพงศ์ วุฒิกกร [6] ได้นำแนวทางซิกซ์ซิกม่ามาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพระบบการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์แกนหมุน เพื่อลดค่าใช้จ่ายและความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ขั้นตอนการศึกษาทั้งหมดแบ่งเป็นสี่ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการวัดผล ขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการปรับปรุง และขั้นตอนการควบคุม โดยศึกษาผ่านโมเดลซีดี 18 แอลพี และจากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการวัดนี้ขาดคุณสมบัติที่สำคัญอยู่สองประการ ได้แก่ คุณสมบัติเชิงเส้นตรงและคุณสมบัติความแม่นยำ โดยแบร์ริงเป็นส่วนประกอบหลักที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว

G. H. Jang, S. H. Lee, and M. S. Jung [7] ได้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนที่รองรับ โดยบอลแบร์ริงและเพลลาที่เปลี่ยนแปลงได้โดยใช้หลักการของ Hamilton , วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ การสังเคราะห์โครงสร้างย่อย เพื่อจะทำนายลักษณะการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ถูกต้อง พบว่าการเปลี่ยนแปลงได้ในระบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์และสภาวะขอบเขตของเพลลาคือตัวแปรที่จะทำนายความถี่ธรรมชาติ วิธีนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อจะทำนายลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบต่างๆ ที่คล้ายกับระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนที่รองรับ โดยบอลแบร์ริงและเพลลาที่เปลี่ยนแปลงได้ อย่างเช่น อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดีและดีวีดี

C. W. Tseng, J. Y. Shen, and I. Y. Shen [8] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายการสั่นสะเทือนแบบอิสระและการสั่นสะเทือนแบบถูกบังคับของระบบมอเตอร์แกนหมุนและเพลลาหมุนที่ติดตั้งอยู่บนโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงได้ และได้ทำการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการวัดการตอบสนองเชิงความถี่ที่มอเตอร์แกนหมุนที่รองรับด้วย Fluid Dynamic Bearings (FDB) พบว่าการทดลองการวัดการตอบสนองเชิงความถี่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับการทำนายทางทฤษฎีไม่เฉพาะในความถี่เท่านั้นแต่ยังรวมถึงขนาดแอมพลิจูดด้วย

X. D. Xu, H. P. Lee, and C. Lu [9] ได้ทำการศึกษาการส่งผ่านพลังงานสำหรับระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน โดยใช้เทคนิคความเข้มข้นของโครงสร้าง (Structural Intensity Technique) เพื่อที่จะบ่งบอกขนาดและทิศทางของการไหลของพลังงานการสั่นสำหรับระบบที่หมุนตัว พบว่าชนิดที่แตกต่างกันของการหมุนทำให้พลังงานกระจายไปในเส้นทางที่แตกต่างกัน ซึ่งเทคนิคความเข้มข้นของโครงสร้างจะเป็นตัวช่วยเหลือผู้ออกแบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในการควบคุมและการแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของระบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

J. Y. Shen, C. W. Tseng, and I. Y. Shen [10] ได้ทำการศึกษาการสั่นสะเทือนของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนกับ โครงฐานผ่านบอลแบร์ริงและผ่านทาง Hydrodynamic แบร์ริง โดยมีเป้าหมายหลักๆ คือ เป้าหมายแรกจะต้องได้สมการเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนแบบอิสระและแบบบังคับของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนและ โครงฐาน โดยการ ใช้วิธี Lagrangian เป้าหมายที่สองจะพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบกับ การทดลอง พบว่าการทำนายความถี่ธรรมชาติทางทฤษฎีนั้น สอดคล้องกับการวัดทาง การทดลอง โดยมีผลต่างไม่เกิน 5% สำหรับมอเตอร์แกนหมุนที่รองรับโดยบอลแบร์ริง และการจำลองเชิงตัวเลขของมอเตอร์แกนหมุนกับ Hydrodynamic แบร์ริง ยังบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงได้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์แกนหมุน

อภิรัฐ ศิลป์พินิจ นูรินทร์ โพธิ์ชัย ปางริย์ ถาวรล้ำเลิศ และ นภคณัย อาชวาคม [11] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสถียรภาพของมอเตอร์แกนหมุนชนิด Fluid Dynamic Bearing (FDB) โดยใช้การกระตุ้นทางไฟฟ้ากับมอเตอร์แกนหมุนเพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่และความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างมอเตอร์ พบว่าเมื่อความถี่ของไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นตรงกับความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างมอเตอร์จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเสถียรภาพที่สูงผิดปกติ ดังนั้นเมื่อทราบถึงความถี่ธรรมชาติและทิศทางของแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน ณ ความถี่ธรรมชาตินั้นๆ ก็จะช่วยให้สามารถออกแบบมอเตอร์ให้มีการสั่นสะเทือนและเสถียรภาพที่ลดลงได้ โดยการออกแบบคัดแปลง โครงสร้างของมอเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการตรงกันของความถี่กระตุ้นจากแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมบุรณ์กับความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างของมอเตอร์ หรือ เปลี่ยนแปลง โครงสร้างของมอเตอร์ให้มีการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงในแนว Radial หรือ Tangential ที่น้อยลง ส่งผลให้เสียงที่แพร่ออกมาลดลงตาม

N. Tandon, V. V. P. Rao, and V. P. Agrawal [12] ได้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากความเร็วที่แตกต่างกันของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟในคอมพิวเตอร์ ความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์ถูกคำนวณทางทฤษฎีและ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และถูก พิสูจน์โดยการทดสอบแบบจำลอง ซึ่งความถี่ธรรมชาติชุดแรกของจานแผ่นดิสก์ที่ได้จากการวัดคือ 359, 525, 650 และ 1080 Hz และวัดแอมพลิจูดการสั่นของจานแผ่นดิสก์ได้ระยะจาก 0.8 ถึง 6.09 ไมครอน ระดับเสียงของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟโดยปราศจากฝาครอบบนสุดคือ 46 และ 62.5 dB สำหรับความเร็ว 5400 และ 15,000 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการวัดได้แสดงว่าแหล่งต้นกำเนิดเสียงรบกวนหลักในฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟความเร็วต่ำคือแชน Actuator บนจานแผ่นดิสก์ ในทางตรงข้ามในกรณีของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟความเร็วสูง แหล่งต้นกำเนิดหลักคือเสียงรบกวนจากอากาศปั่นป่วนในจานแผ่นดิสก์ เสียงรบกวนที่สร้างโดยฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความถี่ 2-8 kHz

Y. Yan, F. Gao, and F. F. Yap [13] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไอเคิลโหมด โดยได้อธิบายว่าสมการของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนคือสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะการส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปยังโครงฐาน ซึ่งภายหลังกลายเป็นแหล่งที่ปล่อยเสียงรบกวน และได้สรุปว่าความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์มีความสัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของส่วนที่หุคหนึ่งและมีบทบาทสำคัญในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปยังส่วนที่หุคหนึ่งผ่านทางบอลแบร์ริง ผลลัพธ์การจำลองยังแสดงว่าความไม่สมดุลคือกุญแจในการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือน

การวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาและวิเคราะห์ถึงความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขันสกรูในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เพิ่มขึ้นจากการขันสกรู โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการคำนวณเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

3.1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ปัจจุบันนี้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หรือ พีซี (Personal Computer – PC) ได้กลายเป็นอุปกรณ์สามัญประจำบ้านไปแล้ว หลายคนใช้คอมพิวเตอร์เพื่อพิมพ์เอกสาร รายงาน เล่นเกม และอีกจำนวนไม่น้อยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อเข้าสู่สังคมออนไลน์อย่างอินเทอร์เน็ต แต่ไม่ว่าคุณจะนำคอมพิวเตอร์ไปใช้ในกิจกรรมใดก็ตาม โดยพื้นฐานแล้วสิ่งที่คอมพิวเตอร์ต้องกระทำอยู่ตลอดเวลา ก็คือ การประมวลผลข้อมูล ในแง่ของซอฟต์แวร์นั้น การประมวลผลข้อมูล ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของการประมวลผล ซึ่งต้องอาศัยชุดคำสั่งหรือโปรแกรมและส่วนของข้อมูลที่จะถูกประมวลผล ด้วยเหตุนี้เอง หน่วยความจำ (Memory unit) จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์มาตั้งแต่ยุคเริ่มแรก

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทำหน้าที่เป็นหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งหน่วยความจำนั้นเป็นชื่อเรียกรวมๆ ของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลไว้ ไม่สำคัญว่าข้อมูลเหล่านั้นจะอยู่ได้ถาวรหรือไม่ หน่วยความจำในยุคแรกของคอมพิวเตอร์มีแต่ชนิดที่ต้องใช้ไฟเลี้ยงไว้ตลอดเวลา เรียกว่า Volatile memory การปิดเครื่องจะส่งผลให้ข้อมูลและโปรแกรมต่างๆ หายหมดเมื่อเปิดเครื่องใหม่ในแต่ละครั้งผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลและโปรแกรมเข้าสู่ระบบด้วยตัวเอง เพื่อให้โปรแกรมและข้อมูลเข้าไปพร้อมดำเนินงานอยู่ในหน่วยความจำ

เมื่อการใช้งานคอมพิวเตอร์เป็นไปด้วยความยากลำบากอย่างนั้น ในเวลาต่อมา ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นหน่วยความจำที่สามารถเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้แม้ปราศจากไฟเลี้ยง (Non-Volatile memory) อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบไม่ได้นำฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มาทดแทนหน่วยความจำประเภท Volatile memory แต่จะใช้งานควบคู่กันไป โดยการเก็บข้อมูลและโปรแกรมอย่างถาวรนั้นเป็นหน้าที่ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ และเมื่อต้องการนำข้อมูลเข้าสู่การประมวลผลก็จะโหลดข้อมูลจากฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้ามาอยู่ในหน่วยความจำ Volatile memory ที่ต้องทำเช่นนี้เพราะฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีประสิทธิภาพในด้านความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลและอัตราการส่งผ่านข้อมูลต่ำมากเมื่อเทียบกับพวก Volatile memory

3.1.1 บทบาทและความสำคัญของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนามาอย่างยาวนาน และอยู่คู่กับคอมพิวเตอร์จนกลายเป็นศูนย์กลางของการจัดเก็บข้อมูลที่อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลประเภทอื่นมีอาจเทียบได้ ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีบทบาทต่อคอมพิวเตอร์ในแง่มุมต่างๆ ต่อไปนี้

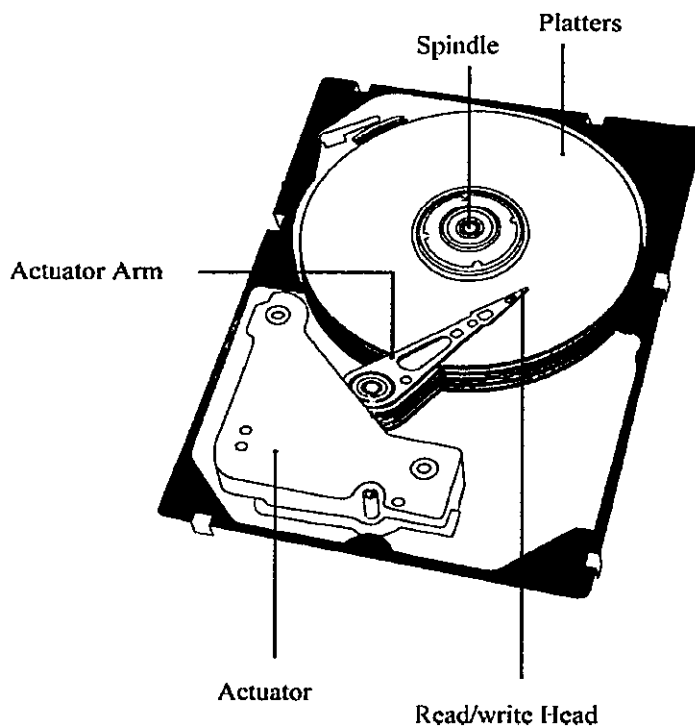
1. ความจุ เมื่อมีความต้องการที่จะติดตั้ง โปรแกรม หรือจัดเก็บ ไฟล์เอกสารที่สร้างจาก แอปพลิเคชันต่างๆ สิ่งที่ใช้ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกๆ ก็คือพื้นที่ว่างที่เหลืออยู่ในฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ เพราะฉะนั้นความจุของฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์จึงเป็นตัวกำหนดว่าระบบจะมีความจุมากน้อยเพียงไร

2. ประสิทธิภาพของระบบ ความเร็วของฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบไม่ยิ่งหย่อนไปกว่า CPU หรือ RAM (Random Access Memory) เพราะนอกจากฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์จะเป็นอุปกรณ์หลักสำหรับจัดเก็บข้อมูลแล้ว ระบบปฏิบัติการรุ่นใหม่ก็มักจะนำเนื้อที่ของฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์มาใช้เป็นหน่วยความจำของระบบด้วยเราเรียกหน่วยความจำที่เกิดจากการนำ RAM มาใช้งานร่วมกับพื้นที่บนฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์นี้เรียกว่า หน่วยความจำเสมือน (Virtual memory) โดยเมื่อมีความต้องการใช้งานหน่วยความจำมากกว่าปริมาณ RAM ที่มีอยู่ ข้อมูลบางส่วนใน RAM จะถูกย้ายไปพักในฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ การย้ายข้อมูลไปมาระหว่างฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์กับหน่วยความจำนี้เองที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

3. ความน่าเชื่อถือของระบบ ในความรู้สึกของหลายๆ คนนั้นสิ่งที่มีค่ามากที่สุดสำหรับระบบคอมพิวเตอร์หนึ่งๆ นั้นมิใช่ฮาร์ดแวร์หรืออุปกรณ์ราคาแพง แต่คือบรรดาข้อมูลที่เพียรพยายามสร้างขึ้นมาเป็นเวลาแรมเดือนแรมปีต่างหาก ดังนั้นฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่รับผิดชอบในเรื่องนี้จึงมีส่วนสำคัญอย่างมาก และอาจใช้เป็นเครื่องตัดสินได้ทีเดียวว่าระบบใดจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่ากัน

3.1.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์

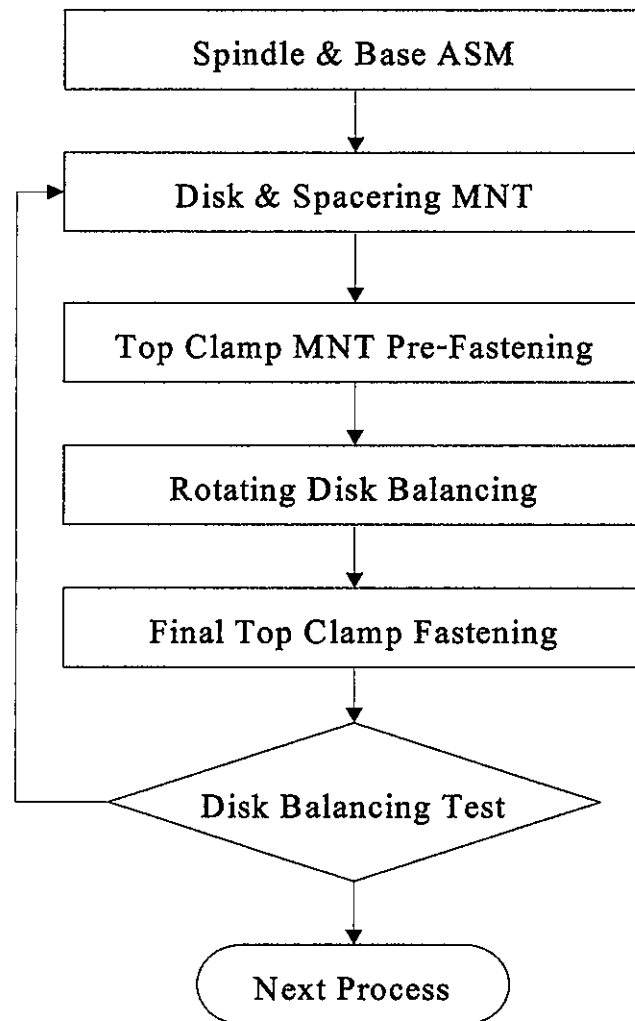
ถ้ามองจากรูปร่างนอกแล้วฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หนึ่งทีค่อนข้างลึกลับ จึงไม่ค่อยมีใครให้ความสนใจกับโครงสร้างและการทำงานภายในตราบดีที่ฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ยังคงอ่านเขียนและจัดเก็บข้อมูล ได้ตามปกติ ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์จะประกอบไปด้วยชุดแผ่นจานกลมที่มีลักษณะแข็งและแบนราบ เรียกว่า ชุดแผ่นดิสก์ (Platter) ซึ่งทำจากแก้วหรือโลหะผสมของอลูมิเนียม พื้นผิวทั้ง 2 ด้านของชุดแผ่นดิสก์ แต่ละแผ่นจะถูกเคลือบไว้ด้วยสารที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ชุดแผ่นดิสก์เหล่านี้ถูกเจาะรูที่กึ่งกลางและยึดติดเข้าด้วยกันกับแกนหมุนที่เรียกว่า สปินเดิล (Spindle) โดยมีสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor) เป็นตัวขับเคลื่อนให้ชุดแผ่นดิสก์ทุกแผ่นหมุนไปพร้อมกันและด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน อัตราเร็วในการหมุนแผ่นจานนี้นิยมบอกเป็นความเร็รรอบ นั่นคือจำนวนรอบต่อนาที (Round Per Minute – RPM) และอาจแตกต่างกันไปในฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ของแต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่น มีตั้งแต่หลายพันไปจนถึงเป็นหมื่นรอบต่อ นาที ในปัจจุบัน



รูปที่ 3.3 โครงสร้างภายในของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั่วไป

การอ่านและการเขียนข้อมูลบนพื้นผิวของแผ่นดิสก์จะกระทำโดยหัวอ่านและเขียน (Read/Write head) ซึ่งติดอยู่ที่ปลายของแขนแอคทีวเอเตอร์ (Actuator arm) โดยในระหว่างการทำงานนั้นหัวอ่านและเขียนจะลอยอยู่ห่างจากแผ่นดิสก์ประมาณ 0.5 ไมครอน ด้วยแรงยกของอากาศที่เกิดจากการหมุนชุดแผ่นดิสก์ แขนทั้งหมดยื่นออกมาจากส่วนที่เรียกว่า แอคทีวเอเตอร์ (Actuator) ซึ่งแอคทีวเอเตอร์นี้เองที่เป็นตัวควบคุมให้หัวอ่านเคลื่อนที่ไปมาในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์ และทำให้การเข้าถึงข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทำได้ในลักษณะที่ไม่ต้องเป็นไปตามลำดับ (Random access)

โดยทั่วไปแล้วหัวอ่านจะมีจำนวนเป็น 2 เท่าของจำนวนแผ่นดิสก์ อย่างเช่นฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีแผ่นดิสก์จำนวน 3 แผ่น ก็จะมีพื้นผิวทั้งสิ้น 6 พื้นผิวดังกันและปกติจะใช้หัวอ่านจำนวน 6 หัวอ่าน เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นดิสก์หนึ่งๆ ต้องการหัวอ่านจำนวน 2 หัวเพื่ออ่านและเขียนข้อมูลแต่ละพื้นผิวหรือแต่ละด้านของแผ่นดิสก์ แต่มีบางกรณีพื้นผิวของแผ่นดิสก์ก็ไม่ได้ถูกใช้งานครบทุกด้าน เหตุผลก็คือเพื่อให้ได้ความจุของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตามที่ผู้ผลิตต้องการ



รูปที่ 3.4 กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน

3.1.3 กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

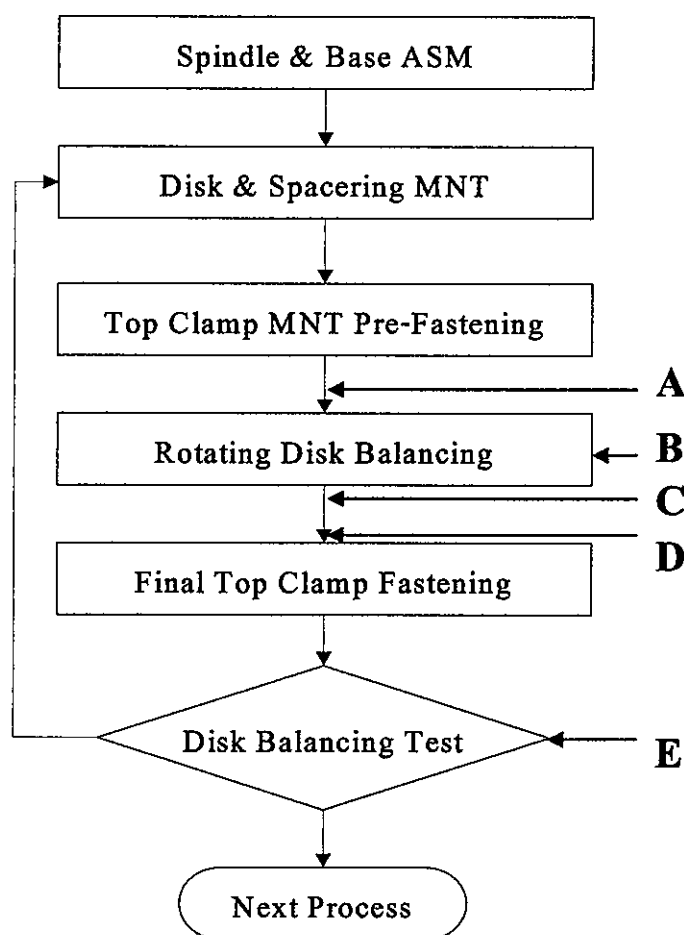
กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนเริ่มจากการประกอบมอเตอร์แกนหมุนเข้ากับโครงฐาน (Spindle & Base ASM) และชั้นสกรูที่ฐานของมอเตอร์ ต่อมาจะประกอบชุดแผ่นดิสก์และแผ่นรองเข้ากับมอเตอร์แกนหมุน (Disk & Spacering MNT) โดยจะสลัดแผ่นรองไว้ระหว่างแผ่นดิสก์แต่ละแผ่น จากนั้นประกอบแผ่นยึดแผ่นดิสก์ (Top clamp) บนแผ่นดิสก์แผ่นบนสุดแล้วขันสกรูทั้ง 6 ตัว บนแผ่นยึดแผ่นดิสก์ (ชั้นหลวง) เพื่อยึดชุดแผ่นดิสก์และแผ่นรอง (Spacer) ให้ติดกับมอเตอร์แกนหมุน (Top clamp MNT Pre-Fastening) ต่อมาเป็นการปรับสมดุล (Rotating Disk Balancing) เพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งกำหนดไว้ที่ 10 mg-cm เมื่อชุดแผ่นดิสก์ถูกปรับสมดุลแล้วจะทำการขัน Preload ที่สกรู 3 ตัว บนแผ่นยึดแผ่นดิสก์เพื่อไม่ให้ชุดแผ่นดิสก์เคลื่อนตัวได้ และขัน Preload ที่สกรูทั้ง 6 ตัวอีกครั้งก่อนการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย จากนั้นจะทำการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย (Final Top clamp Fastening)

ขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบความสมดุลของชุดแผ่นดิสก์ (Disk Balancing Test) ถ้าความไม่สมดุลของชุดแผ่นดิสก์มีค่าเกินกว่าที่กำหนด 50 mg-cm ก็จะถูกล้างกลับไปยังขั้นตอน (Disk & Spacing MNT) เพื่อเริ่มกระบวนการขันสกรูและปรับสมดุลอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตที่กล่าวมาข้างต้น ชุดแผ่นดิสก์จะถูกประกอบเข้ากับมอเตอร์แกนหมุนด้วยการขันสกรูหลวมและทำการปรับสมดุลเพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายและตรวจสอบความสมดุล แต่ปรากฏว่าความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ซึ่งจะได้อีกกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.1.4 ความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ความไม่สมดุลเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งการสั่นสะเทือนใดๆ ที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นด้วย เช่น ความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล การอ่านและการเขียนข้อมูลของหัวอ่าน และยังเป็นปัญหาในการพัฒนาประสิทธิภาพและสมรรถนะของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วย ปัญหาความไม่สมดุลเป็นปัญหาที่ภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ให้ความสนใจและจำเป็นต้องได้รับการแก้ไข

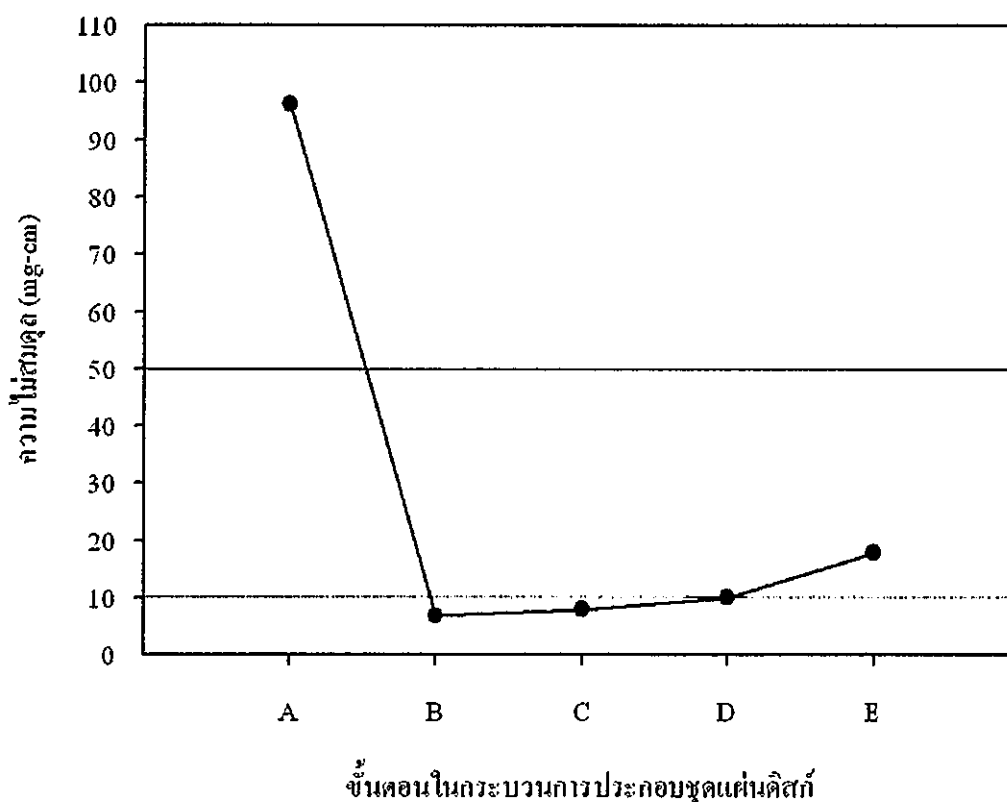


รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่วัดความไม่สมดุลในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์

การศึกษาพฤติกรรมความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟในแต่ละขั้นตอนในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์คังได้แสดงในรูปที่ 3.5 และค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการวัดคังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 พฤติกรรมความไม่สมดุลในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์

ตำแหน่งที่วัดในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์	ความไม่สมดุลเฉลี่ย (mg-cm)
A. ก่อนการปรับสมดุล	96.300
B. ในขั้นตอนการปรับสมดุล	6.840
C. หลังการขึ้น Preload ที่สกรู 3 ตัว	7.980
D. หลังการขึ้น Preload ที่สกรู 6 ตัว	10.066
E. หลังการขึ้นสกรูแน่นครั้งสุดท้าย	17.940



รูปที่ 3.6 พฤติกรรมความไม่สมดุลในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์

ความไม่สมดุลที่เกิดในฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟมาจากหลากหลายสาเหตุ เช่น การกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของมวลของชิ้นส่วนที่หมุนตัวในฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟ ชนิดของแบร์ริง เป็นต้น เมื่อได้ศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และแกน

หมุนคังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งชุดแผ่นดิสก์จะถูกประกอบเข้ากับแกนหมุนด้วยการขันสกรูหลวม และทำการปรับสมดุลเพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายและตรวจสอบความสมดุล แต่ปรากฏว่าความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย (E) ซึ่งขั้นตอนที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นก็คือขั้นตอนการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ในขั้นตอนนี้จะขันสกรูด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติโดยควบคุมแรงบิดของสกรูแต่ละตัวให้เท่ากัน ซึ่งแรงบิดจริงที่ขันสกรูแต่ละตัวอาจไม่เท่ากันส่งผลโดยตรงทำให้แรงของสกรูแต่ละตัวไม่เท่ากันและจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตและพบว่ามิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงในสกรู โดยได้อธิบายว่าการที่สกรูแม้จะถูกขันด้วยแรงบิดที่เท่ากันอาจจะมีค่าของแรงที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละตัวได้ [3, 4] แต่ในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์นั้น ไม่สามารถวัดแรงของ สกรู โดยตรงได้ จึงไม่สามารถควบคุมแรงของสกรูแต่ละตัวให้เท่ากันได้ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความไม่สมดุลดังกล่าว

ดังนั้นสมมติฐานในงานวิจัยนี้คือ เมื่อแรงสกรูบนแผ่นฮาร์ดดิสก์แต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน จะส่งผลให้ชุดแผ่นดิสก์เกิดการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวขึ้นทำให้จุดศูนย์กลางของชุดแผ่นดิสก์เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลเป็นผลทำให้เกิดความ ไม่สมดุล ซึ่งจะได้ทำการจำลองชุดแผ่นดิสก์โดยใช้หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาลักษณะการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวจากนั้นจะนำข้อมูลการเสีรูปร่างและเคลื่อนตัวของชุดแผ่นดิสก์ไปคำนวณหาความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น สุดท้ายทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมความ ไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจริง

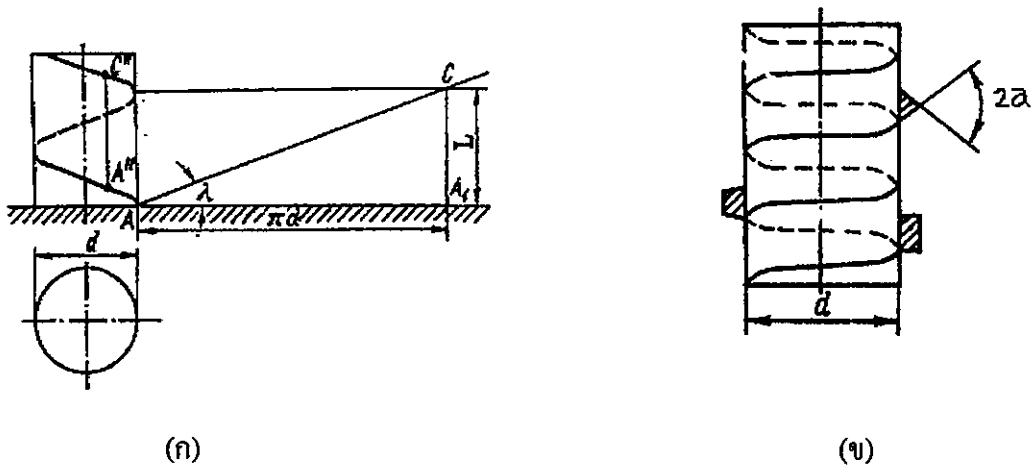
3.2 แรงบิดและแรงในสกรู

เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ต่างๆ จะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ จำนวนมากที่ยึดอยู่ด้วยกัน วิธีการยึดชิ้นส่วนมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน ชิ้นส่วนอุปกรณ์บางชิ้นต้องการความสะดวกในการประกอบติดตั้ง โดยชิ้นส่วนต้องไม่เกิดการเสียหาย ชิ้นส่วนมีขนาดเล็กและมีพื้นที่จำกัด ซึ่งต้องการการจับยึดชิ้นส่วนเหล่านั้นอย่างเหมาะสม

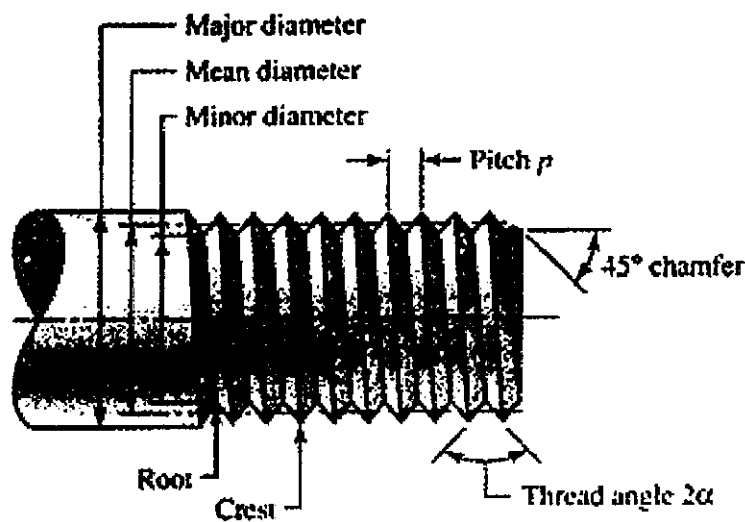
สกรู เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่นับว่ามีความสำคัญในการจับยึดชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน บางครั้งยังอาจใช้สกรูในการปรับอย่างละเอียดของมาตรวัดต่างๆ ด้วย การยึดด้วยสกรูมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งานในอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และสามารถใช้ได้กับงานชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังมีราคาถูก หามาใช้ได้ง่าย เนื่องจากมีขนาดเป็นมาตรฐานและมีกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง แต่สกรูก็มีข้อเสียอยู่อย่างหนึ่งคือ จะมีความเค้นหนาแน่นมากที่บริเวณยอดเกลียวและ โคนเกลียว ซึ่งเป็นจุดอ่อนเมื่อใช้งานภายใต้แรงเปลี่ยนแปลง

3.2.1 คำจำกัดความและส่วนต่างๆ ของเกลียว

เกลียวคือผิวฮิลิก (Helical surface) ที่พื้นเวียนรอบรูปทรงกระบอกหรือรูปทรงกรวย การพิจารณาผิวฮิลิกเกิดขึ้นได้อย่างไร ให้นำทรงกระบอกตรงมา แล้วพันรอบทรงกระบอกด้วยสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านฐาน AA_1 ยาวเท่ากับเส้นรอบวงของทรงกระบอก (πd) และความสูง $A_1C = L$ ดังรูปที่ 3.7 (ก) ด้านตรงข้ามมุมฉาก AC จะทำให้เกิดฮิลิก (Helix) บนผิวทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.7 (ข) แล้วเคลื่อนรูประนาบนี้ไปตามแนวฮิลิก โดยรูปดังกล่าวยังคงอยู่ในระนาบของภาคตัดตามแนวแกน ด้านข้างของรูประนาบจะทำให้เกิดผิวฮิลิกขึ้นบนรูปทรงกระบอก λ ซึ่งเป็นมุมระหว่างฐานของสามเหลี่ยมกับด้านตรงข้ามมุมฉากในรูปที่ 3.7 (ก) เรียกว่า มุมมหิดล (Lead angle) ซึ่งเกลียวที่ปรากฏบนรูปทรงกระบอกเรียกว่า เกลียวตรง ส่วนเกลียวที่ปรากฏบนรูปทรงกรวยเรียกว่า เกลียวเรียว



รูปที่ 3.7 ลักษณะเกลียว



รูปที่ 3.8 ส่วนต่างๆ ของสกรู

จากรูปที่ 3.8 จะให้คำจำกัดความของชื่อส่วนต่างๆ ดังนี้

พิทช์ (Pitch - p) คือ ระยะห่างระหว่างยอดเกลียวหนึ่ง ไปถึงยอดเกลียวถัดไปที่อยู่ติดกัน โดยมักจะบอกหน่วยเป็นจำนวนพิทช์ใน 1 นิ้ว

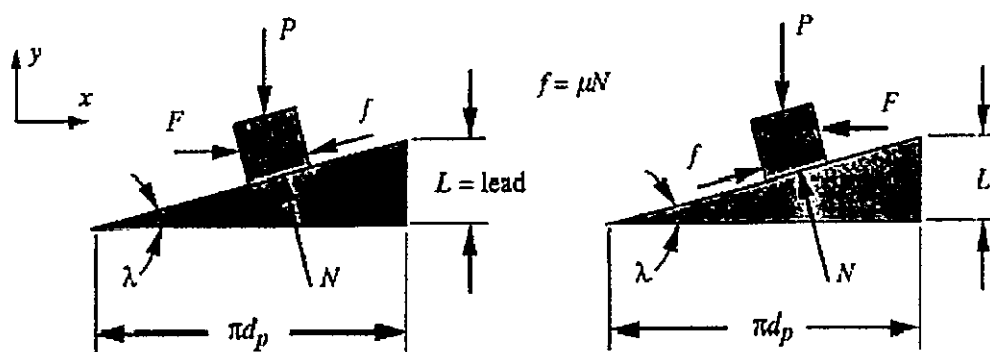
เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (Major diameter - d) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของส่วนที่เป็นเกลียว

เส้นผ่านศูนย์กลางรอง (Minor diameter - d_1 หรือ d_2) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของส่วนที่เป็นเกลียว

เส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ (Pitch diameter - d_p หรือ d_2) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรอง

ระยะหีด (Lead - L) คือ ระยะที่จุดๆ หนึ่งบนยอดเกลียวเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนเมื่อหมุนเกลียวครบ 1 รอบ

มุมของเกลียว (Thread angle - 2α) คือ มุมของร่องเกลียว



(ก) นำโหลดขึ้น

(ข) นำโหลดลง

รูปที่ 3.9 ผังวัตถุอิสระที่จุดใดๆ บนเกลียว

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและแรงในสกรู

ถ้าคลีเกลียวของสกรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p ออกมา 1 รอบ จะได้ระยะนาบเฉียง ซึ่งทำมุม λ กับระยะนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกน ดังรูปที่ 3.9 จะได้ว่ารูปสามเหลี่ยมที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi d_p} \quad (3.1)$$

เมื่อพิจารณาผังวัตถุอิสระในรูปที่ 3.9 (ก) สามารถหาแรงลัพธ์ในสภาวะสมดุลได้ดังนี้

สมดุลแรงตามแนวแกน x จะได้

$$\sum F_x = 0 = F - f \cos \lambda - N \sin \lambda = F - \mu N \cos \lambda - N \sin \lambda \quad (3.2)$$

และจะได้

$$F = N(\mu \cos \lambda + \sin \lambda) \quad (3.3)$$

สมดุลแรงตามแนวแกน y จะได้

$$\sum F_y = 0 = N \cos \lambda - f \sin \lambda - P = N \cos \lambda - \mu N \sin \lambda - P \quad (3.4)$$

และจะได้

$$N = \frac{P}{(\cos \lambda - \mu \sin \lambda)} \quad (3.5)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับการนำโหลกลง พิจารณารูปที่ 3.9 (ข) จะได้

สมดุลแรงตามแนวแกน x จะได้

$$\sum F_x = 0 = -F + f \cos \lambda - N \sin \lambda = -F + \mu N \cos \lambda - N \sin \lambda \quad (3.6)$$

และจะได้

$$F = N(\mu \cos \lambda - \sin \lambda) \quad (3.7)$$

สมดุลแรงตามแนวแกน y จะได้

$$\sum F_y = 0 = N \cos \lambda + f \sin \lambda - P = N \cos \lambda + \mu N \sin \lambda - P \quad (3.8)$$

และจะได้

$$N = \frac{P}{(\cos \lambda + \mu \sin \lambda)} \quad (3.9)$$

เมื่อ μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส แทนค่า N ที่ได้จากสมการ (3.5) แทนลงในสมการ (3.3) จะได้

$$F = P \frac{(\mu \cos \lambda + \sin \lambda)}{(\cos \lambda - \mu \sin \lambda)} \quad (3.10)$$

ดังนั้นแรงบิดของสกรู T_{s_u} มีค่าเท่ากับ

$$T_{s_u} = F \frac{d_p}{2} = \frac{P d_p}{2} \frac{(\mu \cos \lambda + \sin \lambda)}{(\cos \lambda - \mu \sin \lambda)} \quad (3.11)$$

สามารถนำสมการ (3.11) มาเขียนใหม่ให้อยู่ในเทอมของ L โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ (3.1) จะได้

$$T_{s_u} = \frac{P d_p}{2} \frac{(\mu \pi d_p + L)}{(\pi d_p - \mu L)} \quad (3.12)$$

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของการต้านการหมุนของสกรูที่จะต้องนำมาคิดด้วยก็คือ โมเมนต์บิดที่เกิดจากบ่าหรือหัวสกรู โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานบ่าสกรู μ_c และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบ่าสกรู d_c ซึ่งโมเมนต์บิดที่เกิดจากบ่าสกรูคือ

$$T_c = \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (3.13)$$

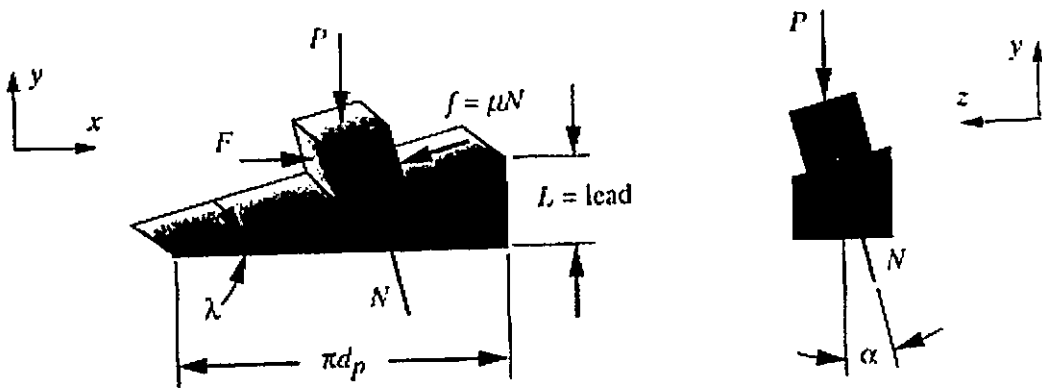
ดังนั้นแรงบิดรวมของสกรูในการนำโหลดขึ้น คือ

$$T_u = T_{s_u} + T_c = \frac{P d_p}{2} \frac{(\mu \pi d_p + L)}{(\pi d_p - \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (3.14)$$

และในทำนองเดียวกันแรงบิดรวมของสกรูในการนำไหลลดลง คือ

$$T_d = T_{s_d} + T_c = \frac{Pd_p (\mu\pi d_p - L)}{2 (\pi d_p + \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (3.15)$$

สมการดังกล่าวในข้างต้นได้รับการพัฒนาสำหรับเกลียวที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยม แต่ในกรณีที่มีรูปทรงแบบมียอด แรงกระทำจะมีมุมเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนของเกลียวไป ดังได้แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 พังวัดคุณสมบัติของเกลียวแบบมียอด

ดังนั้นแรงบิดรวมของสกรูสามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$T_u = T_{s_u} + T_c = \frac{Pd_p (\mu\pi d_p + L \cos \alpha)}{2 (\pi d_p \cos \alpha - \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (3.16)$$

และในทำนองเดียวกัน

$$T_d = T_{s_d} + T_c = \frac{Pd_p (\mu\pi d_p - L \cos \alpha)}{2 (\pi d_p \cos \alpha + \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (3.17)$$

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับความเรียบของพื้นผิว ความเที่ยงตรง และระดับของการหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยทั่วๆ ไปจะเปลี่ยนแปลงระหว่างประมาณ 0.04 ถึง 0.25 ภายใต้สภาวะการใช้งานธรรมดาและมีการหล่อลื่น

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์สำหรับสกรูและปาสกรู

วัสดุ	เหล็กกล้า	ทองเหลือง	บรอนซ์	เหล็กหล่อ
เหล็กกล้า (แข็ง)	0.15 – 0.25	0.15 – 0.23	0.15 – 0.19	0.15 – 0.25
เหล็กกล้า (หล่ออ่อน)	0.11 – 0.17	0.10 – 0.16	0.10 – 0.15	0.11 – 0.17
บรอนซ์	0.08 – 0.12	0.04 – 0.06	-	0.06 – 0.09

3.2.3 การควบคุมแรงในสกรู

ในส่วนนี้จะพิจารณาวิธีการที่ทำให้มั่นใจได้ว่าได้มีการกำหนดแรงดึงเบื้องต้นในสกรูอย่างเที่ยงตรง เมื่อนำชิ้นงานมาประกอบเข้าด้วยกันและยึดด้วยสกรู ถ้าสามารถวัดความยาวของสกรูในขณะที่จับยึดชิ้นงานได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า ไมโครมิเตอร์ จะสามารถคำนวณระยะการยึดตัวของสกรูอันเนื่องมาจาก Preload ได้จากสูตร $\delta = Fl/AE$ จากนั้นให้ขันสกรูเข้าไปจนกระทั่งได้ระยะ δ จะทำให้มั่นใจได้ว่าการยึดชิ้นงานเป็นไปตาม Preload ที่ต้องการ

โดยทั่วไปแล้วจะไม่สามารถวัดระยะการยึดตัวของสกรูได้ ทั้งนี้เนื่องจากเกลียวที่ส่วนปลายของสกรูจะฝังอยู่ในชิ้นงาน และไม่สามารถมองเห็นได้ ในกรณีนี้ถ้าต้องการให้การจับยึดชิ้นงานมีแรงกระทำในเบื้องต้นตามที่ต้องการ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ประแจวัด โมเมนต์บิด (Torque wrench) ในการขันสกรูให้เกิดการยึดตัวออกเป็นระยะ δ ก็จะได้แรงบิดที่ทำให้มีแรงดึงในเบื้องต้นเป็นไปตามที่ต้องการ

การควบคุมแรงในสกรูโดยอ้างอิงจากแรงบิดของสกรูนั้นจะพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีได้มากถึง $\pm 30\%$ [3, 4] และถึงแม้จะมีการหล่อลื่นที่สกรูแล้วความผิดพลาดก็สามารถเกิดขึ้นได้มากถึง $\pm 15\%$ แต่ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องคำนึงถึงความสะอาดเป็นอย่างมาก สกรูที่ใช้ซึ่งไม่ได้รับการหล่อลื่น ทำให้แรงที่เกิดขึ้นบนสกรูแต่ละตัวอาจจะมีขนาดแตกต่างกันได้ถึง $\pm 30\%$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและแรงในสกรูสามารถอธิบายได้ด้วยสมการข้างล่างดังนี้

$$T = F \frac{d_p}{2} \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \tan \lambda)} + F \frac{d_c}{2} \mu_c \quad (3.18)$$

เมื่อ T คือแรงบิดของสกรู F คือแรงในสกรู และเมื่อ d_p และ d_c ต่างกันน้อยมาก จึงกำหนดให้ d_p ประมาณเท่ากับ d และ d_c มีค่าประมาณเท่ากับ $1.5d$ ซึ่งสามารถเขียนสมการ (3.18) ใหม่ได้ดังนี้

$$T \cong F \frac{d}{2} \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \tan \lambda)} + F \frac{(1+1.5)d}{2} \mu_c \quad (3.19)$$

และจะได้

$$T \cong KFd \quad (3.20)$$

เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดมีค่าเท่ากับ

$$K \cong \left[0.50 \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \tan \lambda)} + 0.625 \mu_c \right] \quad (3.21)$$

จากสมการ (3.21) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด K ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ และ μ_c ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสกรูแต่ละตัวก็จะส่งผลถึงแรงบิดของสกรูแต่ละตัวด้วย ดังนั้นสมมติฐานได้ว่าสาเหตุที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายอาจเนื่องมาจากการขันสกรูด้วยแรงบิดที่เท่ากันแต่แรงของสกรูแต่ละตัวนั้นอาจไม่เท่ากัน

3.3 ความไม่สมดุล

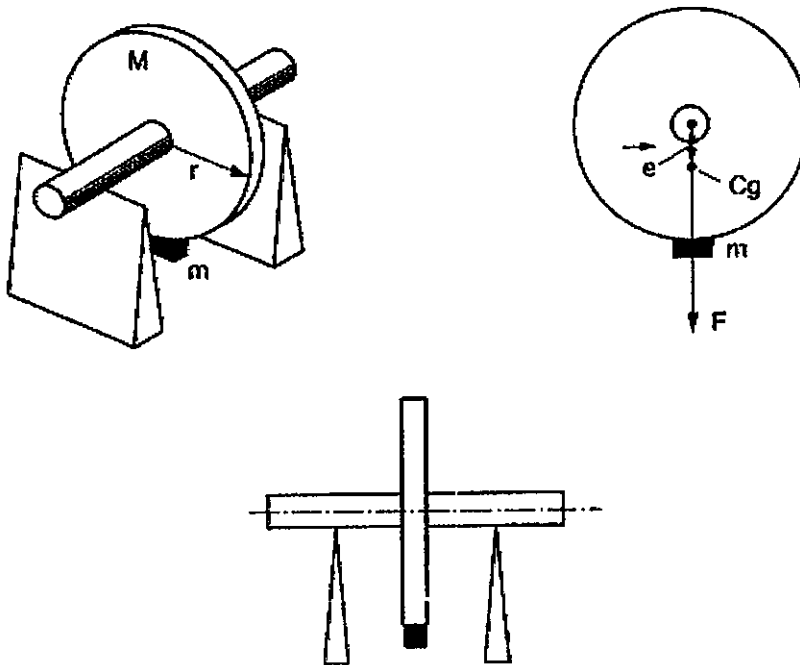
ความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้น เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในขณะที่หมุนและส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการอ่านและเขียนข้อมูลลดลงและส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนที่รองรับชิ้นส่วนที่หมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วย เช่น แบร์ริงฐานรองรับชุดแผ่นดิสก์ และนอกจากนี้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอาจจะส่งพลังงานในรูปการสั่นสะเทือนไปสู่ชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ติดตั้งอยู่ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นและก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นได้

ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์กำลังหมุน ถ้าชิ้นส่วนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความไม่สมดุลขึ้น อาจทำให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นทำงานบกพร่องหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้ ซึ่งเทคนิคและวิธีการที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์อยู่ในสถานะสมดุลนั้น ในปัจจุบันได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การทำให้ชิ้นส่วนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์อยู่ในสถานะสมดุลจะช่วยป้องกันการชำรุดของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นได้ และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วย โดยในบทความนี้จะได้ยกตัวอย่างความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลหมุนทั่วไปเพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจ ซึ่งจะอธิบายความหมายของความไม่สมดุล พร้อมทั้งลักษณะการเกิดความไม่สมดุลในแต่ละแบบ

3.3.1 ความหมายของความไม่สมดุล

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) จะเกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนมีการหมุน แรงเหวี่ยงนี้จะกระทำต่อมวลของส่วนหมุน โดยพยายามเหวี่ยงมวลต่างๆ ออกจากแนวแกนหมุนเป็นวงกลม เมื่อชิ้นส่วนนั้นมีมวลเท่ากันตลอด แรงเหวี่ยงนั้นก็กระทำต่อจุดศูนย์กลางของส่วนหมุนเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนหมุนนั้นอยู่ในสภาพสมดุล แต่ถ้าหากส่วนใดส่วนหนึ่งเกิดมีมวลมากกว่าส่วนอื่นๆ ภายในชิ้นส่วนหมุนนั้น แรงเหวี่ยงนี้ก็กระทำต่อมวลของส่วนนั้นมากกว่าส่วนอื่นๆ และแรงเหวี่ยงนี้จะพยายามดึงชิ้นส่วนทั้งระบบไปทางใดทางหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น

เมื่อพิจารณาหลักการง่ายๆ ของความไม่สมดุล โดยศึกษาจากแผ่นจานกลมที่มีมวล M หมุนรอบแกนหมุน ถ้ามีมวลขนาดเล็ก m ที่มีระยะห่าง r จากจุดศูนย์กลางของแผ่นจานกลม จะทำให้แผ่นจานกลมเกิดความไม่สมดุลขึ้น ความไม่สมดุลแบบนี้เรียกว่า ความไม่สมดุลแบบสถิต (Static Unbalance) แสดงดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความไม่สมดุลแบบสถิต (Static Unbalance)

จากรูปที่ 3.11 เมื่อแผ่นจานหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ทำให้สามารถคำนวณหาค่าแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง F ได้จากสมการ

$$F = mr\omega^2 \text{ (N)} \quad (3.22)$$

และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (F) นี้ เป็นแรงที่เกิดจากการเอียงจุดศูนย์กลางของมวลจากแกนหมุน (e) ดังนั้นจะได้

$$F = Me\omega^2 \text{ (N)} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.22 และจากสมการที่ 3.23 พิจารณาในลักษณะของการเอียงศูนย์กลางของมวล m จะได้ความไม่สมดุลจำเพาะ (Specific Unbalance) ของแผ่นจานหมุน หน่วยเป็น (g-mm/kg) ดังนี้

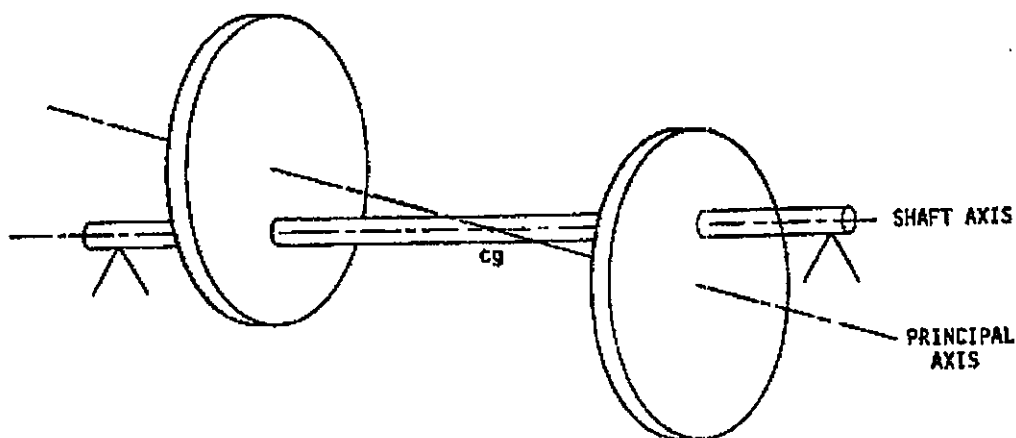
$$e = \frac{mr}{M} \text{ (g-mm/kg) หรือ } (\mu\text{m}) \quad (3.24)$$

ความไม่สมดุลจำเพาะ (e) ในทางปฏิบัตินั้นจะมีประโยชน์ใช้สำหรับอ้างอิงและเปรียบเทียบความไม่สมดุลของชิ้นส่วนหมุน หรือใช้สำหรับหาขนาดมวลของแผ่นจานหมุน จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น พอจะสรุปได้ว่าความไม่สมดุลมีผลมาจาก

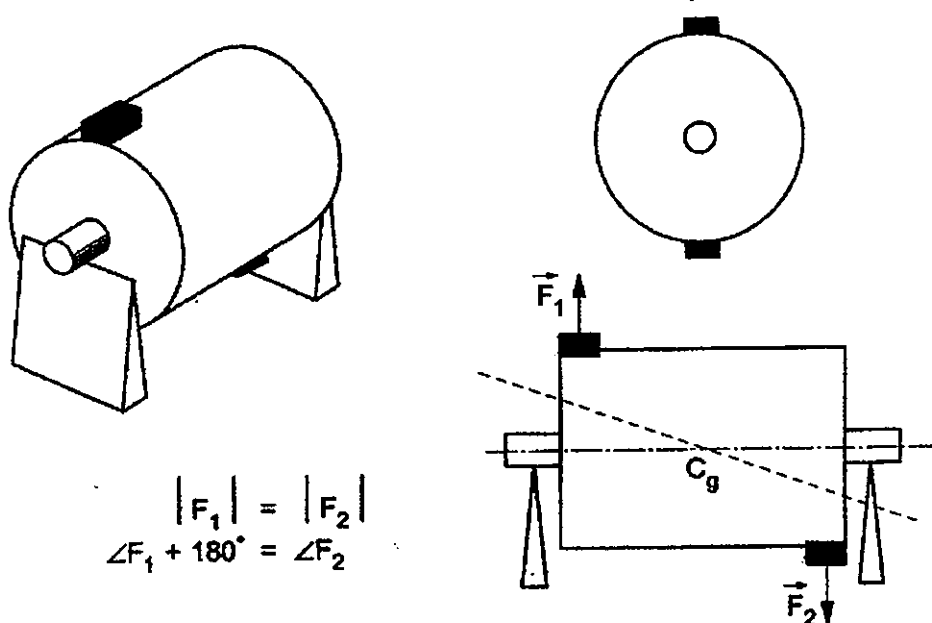
1. ความเร็วเชิงมุมของแผ่นจานหมุน (ω)
2. ระยะห่างของแรงกระทำ (r)
3. มวลที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนหมุนนั้น (m)

ความไม่สมดุลของเครื่องจักรกลหมุนนั้นจะมีผลทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องจักรหมุนนั้นเกิดการชำรุดเสียหายได้ โดยการแก๊วหรือลดค่าการสั่นสะเทือนเนื่องจากความไม่สมดุลนั้นคือต้องทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนั้นอยู่ในสถานะสมดุลให้ได้ หรืออย่างน้อยให้ใกล้เคียงที่สุด โดยทำการเพิ่มมวลที่ด้านตรงกันข้ามกับตำแหน่งที่เกิดความไม่สมดุล หรือลดมวลส่วนเกินในตำแหน่งที่เกิดความไม่สมดุล

ชิ้นส่วนในเครื่องจักรกลหมุนส่วนใหญ่ เช่น ใบพัดเครื่องสูบ และล้อช่วยแรงนั้นเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะของมวลรวมเป็นกลุ่มเดียวกัน แต่ชิ้นส่วนหมุนบางชนิดจะมีลักษณะของมวลแตกกระจายตามความยาวของแกนหมุน เช่น โรเตอร์ที่มีความหนาหรือยาวการกระจายของมวลผ่านจุดศูนย์กลางของโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงสองแรงมีขนาดเท่ากันแต่กระทำในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบขึ้นเมื่อโรเตอร์มีการหมุนเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และในรูปที่ 3.13 ความไม่สมดุลแบบนี้เรียกว่า ความไม่สมดุลคู่ควบ (Couple Unbalance) การแก๊วหรือลดปัญหาเพื่อให้โรเตอร์อยู่ในสถานะสมดุลจะต้องคำนึงถึงแรงโมเมนต์ด้วย ซึ่งจะต้องทำให้เกิดความสมดุลแบบ 2 ระนาบ โดยที่ผลรวมของโมเมนต์รอบแกนจะต้องเท่ากับศูนย์หรือใกล้เคียง



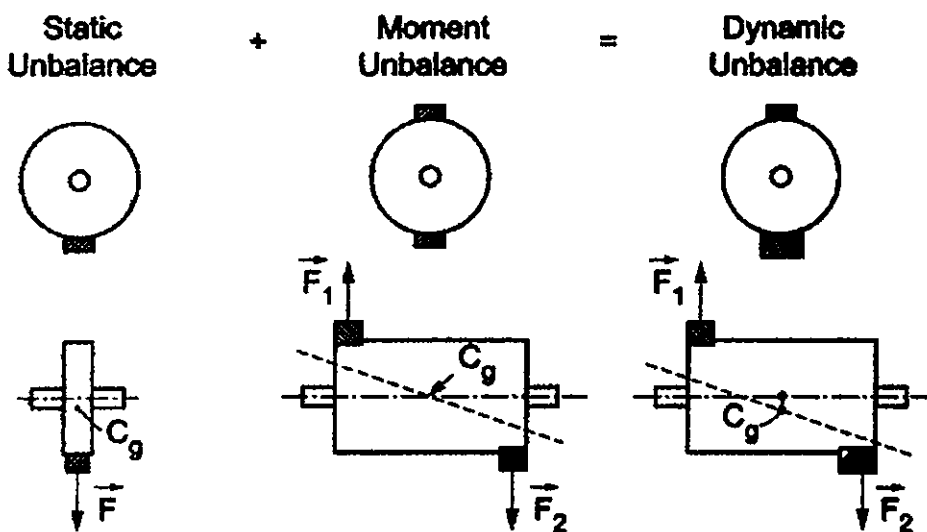
รูปที่ 3.12 ความไม่สมดุลแบบคู่ควบของแผ่นจานหมุน (Couple Unbalance)



$$\begin{aligned} |F_1| &= |F_2| \\ \angle F_1 + 180^\circ &= \angle F_2 \end{aligned}$$

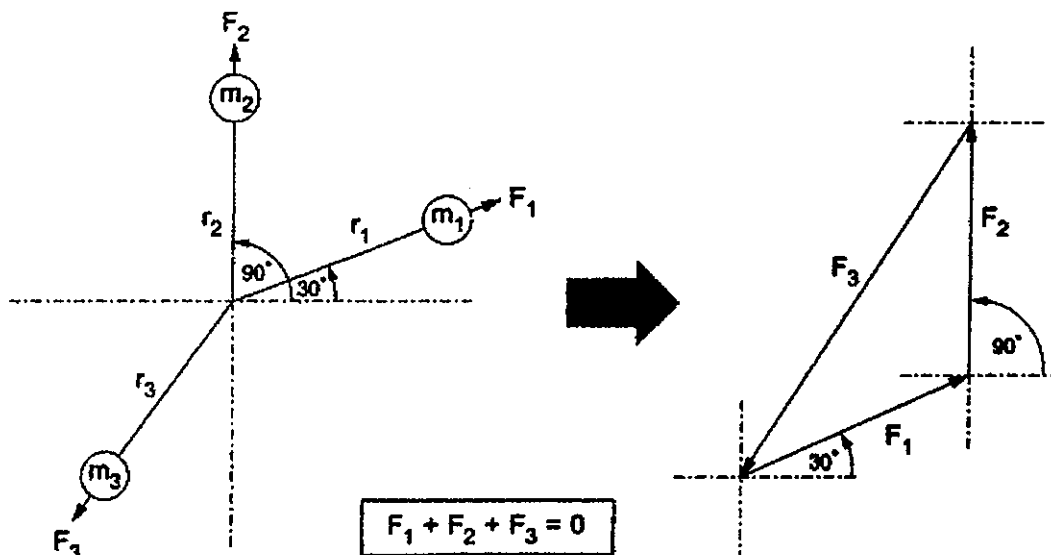
รูปที่ 3.13 ความไม่สมดุลแบบคู่ควบ (Couple Unbalance)

เมื่อชุดโรเตอร์เกิดความไม่สมดุลรวมทั้ง 2 แบบคือ เป็นทั้งแบบสถิตและแบบคู่ควบพร้อมกันในเวลาเดียวกันนี้ จะเรียกความไม่สมดุลแบบนี้ว่า ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance) ซึ่งทำให้จุดศูนย์กลางเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปตามแรง ซึ่งแรง F_1 จะไม่เท่ากับแรง F_2 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในการแก้ไขทำให้โรเตอร์เกิดความสมดุลนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการปรับดุลภาพแบบ 2 ระนาบนี้



รูปที่ 3.14 ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance)

ความสมดุลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหมุนในอุดมคตินั้น เครื่องจักรกลหมุนจะอยู่ในสภาวะสมดุลได้โดยผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทั้งหมดรวมกันแบบเวกเตอร์ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เวกเตอร์การสมดุลของแรง 3 แรง

ในทางปฏิบัติแล้ว ถึงแม้บริษัทผู้ออกแบบผลิตเครื่องจักรกลหมุนจะมีการเพื่อกำหนดค่าต่างๆ ไว้ เช่น ระยะการรูน การแกว่งเชิงแนวศูนย์กลางเพลลา การไม่ตรงแนวแกนเพลลา การขยายตัวของชิ้นส่วนกลไกต่างๆ ภายในเครื่องจักรกลนั้น ก็ไม่สามารถทำให้เครื่องจักรอยู่ในสภาวะสมดุลที่สมบูรณ์เป็นศูนย์ได้ ฉะนั้นในการผลิตเครื่องจักรกลหมุนและการบำรุงรักษาจะพิจารณาถึงระดับการสมดุลที่เหมาะสมและความรุนแรงของการสั่นสะเทือน โดยคำนึงถึงสมรรถนะและต้นทุนในการผลิตเครื่องจักรกลนั้นๆ ด้วย

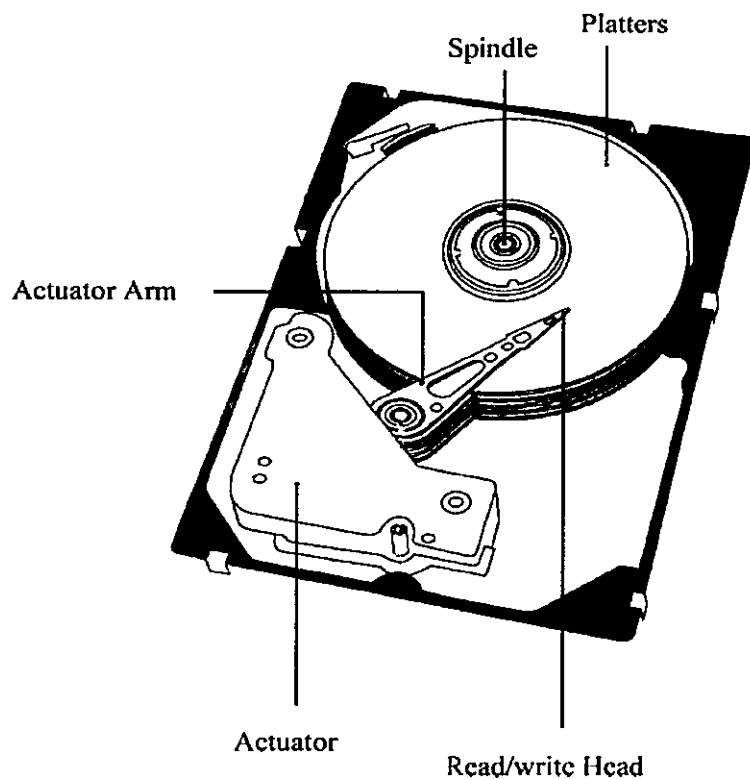
บทที่ 4

การคำนวณหาค่าความไม่สมดุล

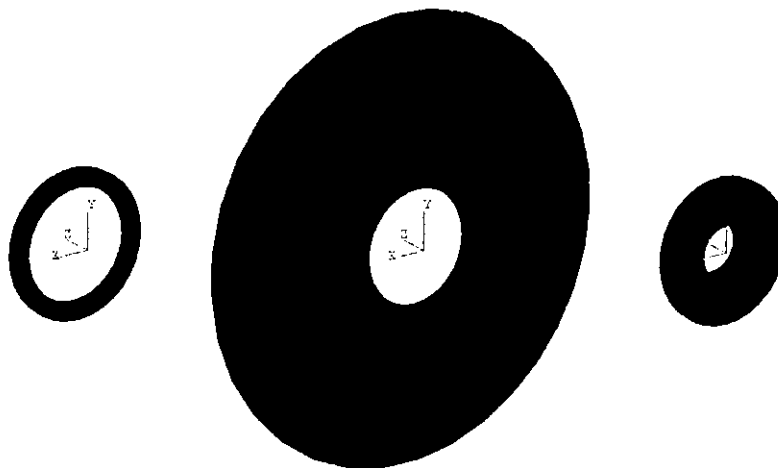
4.1 การจำลองชุดแผ่นดิสก์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้าน Computer Aided Design (CAD) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรมขนาดเล็กทั่วไป ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก และกว้างขวางยิ่งขึ้น การใช้งานจึงสะดวกรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก

การศึกษากระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์และองค์ประกอบทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีความสำคัญอย่างยิ่งก่อนการจำลองการเสีรูปร่างและการเคลื่อนตัวของชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ องค์ประกอบทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นจะประกอบไปด้วย ชุดหัวอ่าน ชุดแกนหมุน และชุดแผ่นดิสก์ ดังได้แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยทั่วไป



(ก) แผ่นรอง (ข) แผ่นดิสก์ (ค) แผ่นยึดแผ่นดิสก์

รูปที่ 4.2 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดแผ่นดิสก์

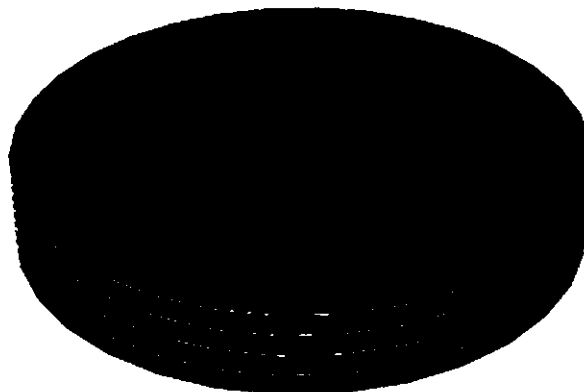
4.1.1 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดแผ่นดิสก์

แบบจำลองของชุดแผ่นดิสก์นั้นจะมีส่วนประกอบหลักๆ ดังต่อไปนี้ แผ่นรอง (Spacers) แสดงในรูปที่ 4.2 (ก) แผ่นดิสก์ (Disks) แสดงในรูปที่ 4.2 (ข) และแผ่นยึดแผ่นดิสก์ (Top Clamp) แสดงในรูปที่ 4.2 (ค) ซึ่งโมเดลของชุดแผ่นดิสก์จะใช้อัตราส่วนของแบบ 1:1 กับชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว และมีค่าคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองดังตารางที่ 4.1

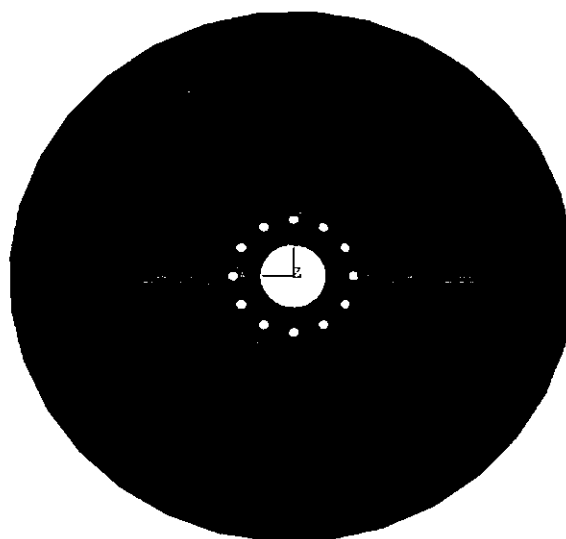
ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลอง

แบบจำลอง	แผ่นยึดแผ่นดิสก์	แผ่นดิสก์	แผ่นรอง
ชนิดของวัสดุ	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม
Young's modulus (E)	75 GPa	75 GPa	65 GPa
Poisson's Ratio (ν)	0.33	0.33	0.30

ชุดแผ่นดิสก์จะประกอบด้วย แผ่นดิสก์ 5 แผ่น แผ่นรอง 5 ตัว และแผ่นยึดแผ่นดิสก์ 1 ตัว ซึ่งจะประกอบเข้าด้วยกัน โดยจะเริ่มด้วยแผ่นรองจะอยู่ด้านล่างสุดจากนั้นก็ซ้อนทับด้วยแผ่นดิสก์แล้วจะซ้อนทับกันจนครบ 5 ชุด และสุดท้ายที่บนสุดจะปิดด้วยแผ่นยึดแผ่นดิสก์เพื่อยึดชุดแผ่นดิสก์ให้ติดกับชุดแกนหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะการประกอบเข้าด้วยกันของแบบจำลองชุดแผ่นดิสก์



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งรูตรูของชุดแผ่นดิสก์

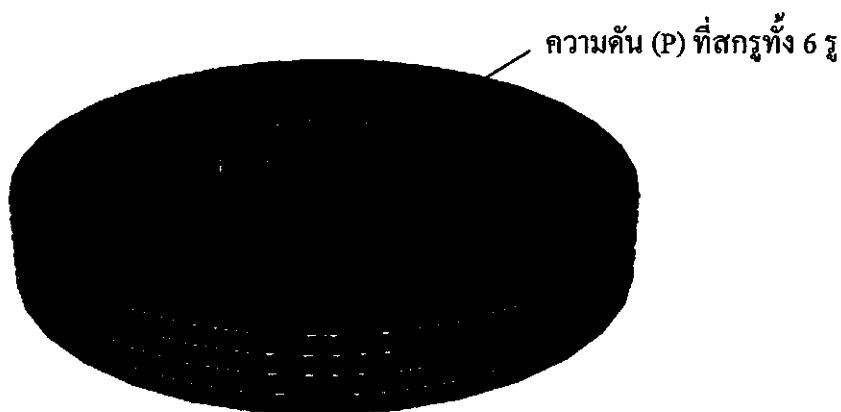
4.1.2 การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์และเงื่อนไขในการจำลอง

ในการวิเคราะห์แบบจำลองของชุดแผ่นดิสก์ โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ STATIC และกำหนดขั้นตอนการวิเคราะห์จำนวน 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 4.5

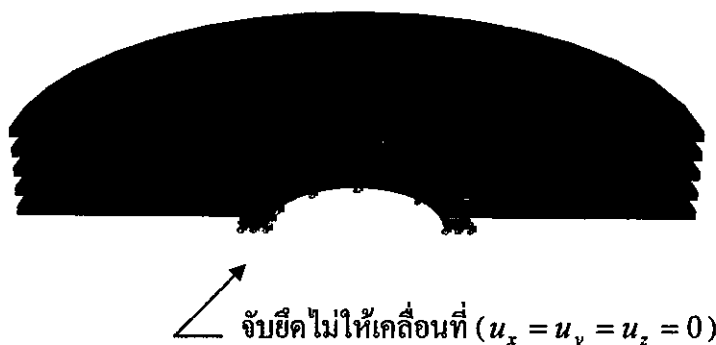
Name	Procedure	Ngeom	Time
Initial	(Initial)	N/A	N/A
Contact	Static, General	OFF	1
Load	Static, General	OFF	1

รูปที่ 4.5 ลักษณะการกำหนดการวิเคราะห์แบบจำลอง

กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง และจากสมมุติฐานที่ว่าสาเหตุที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายอาจเนื่องมาจากการขันสกรูโดยควบคุมแรงบิดอาจทำให้แรงในสกรูแต่ละตัวอาจไม่เท่ากัน แต่กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์ไม่สามารถวัดแรงในสกรูแต่ละตัวโดยตรงได้ทำให้ไม่ทราบว่าแรงในสกรูแต่ละตัวแตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขันสกรูโดยจะกำหนดเงื่อนไขให้ภาระของสกรูแต่ละตัวไม่เท่ากัน ในกรณีนี้ได้จำลองการเสียรูปและการเคลื่อนตัวของชุดแผ่นดิสก์ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยได้กำหนดภาระเป็นแบบความดันที่รูสกรูบนแผ่นยึดแผ่นดิสก์จำนวน 6 รู ดังแสดงตามรูปที่ 4.6 (คำนวณหาแรงสกรูที่ได้จากสมการที่ (3.20) และ (3.21) และหาความดันโดยแรงสกรูหารด้วยพื้นที่ที่รับแรงสกรู ซึ่งแรงบิดสูงสุดที่ใช้ขันสกรูจะมีค่าเท่ากับค่าความดัน 100%) และจะยึดแผ่นรองแผ่นล่างสุดไม่ให้เคลื่อนที่ ดังแสดงตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ลักษณะการกำหนดความดันที่รูสกรู



รูปที่ 4.7 ลักษณะการยึดแผ่นรองแผ่นล่างสุดไม่ให้เคลื่อนที่

พิจารณาแบ่งสกรูออกเป็น 2 กลุ่ม (ตำแหน่งรูสกรูตามรูปที่ 4.4) ซึ่งจะทำการจำลอง 5 กรณีด้วยกัน

กรณีที่ 1 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,5,6 และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่ สกรู 4

กรณีที่ 2 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4 และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่ สกรู 5,6

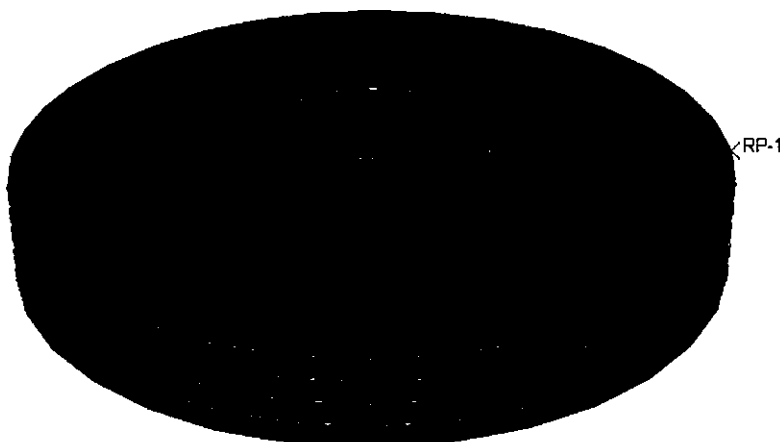
กรณีที่ 3 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 1,2,6 และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัวได้แก่ สกรู 3,4,5

กรณีที่ 4 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 2,3 และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่ สกรู 1,4,5,6

กรณีที่ 5 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 1 และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่ สกรู 2,3,4,5,6

ภาวะของสกรูทั้ง 2 กลุ่มสามารถต่างกันได้มากถึง 60% หรือก็คือ $\pm 30\%$ ตามที่ได้กล่าว แล้วในบทที่ผ่านมา ดังนั้นจึงกำหนดให้สกรูกลุ่มที่ 1 มีความคั่นคงที่ที่ 100% (เท่ากับแรงบิดสูงสุดที่ใช้ขันสกรู) และสกรูกลุ่มที่ 2 มีความคั่น 40% (เท่ากับ 40% ของแรงบิดสูงสุดที่ใช้ขันสกรู) เพื่อให้ภาวะของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันมากที่สุด 60% แล้วเพิ่มความคั่นสกรูกลุ่มที่ 2 ขึ้นเรื่อยๆ ครั้งละ 10% เพื่อให้ภาวะของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลง

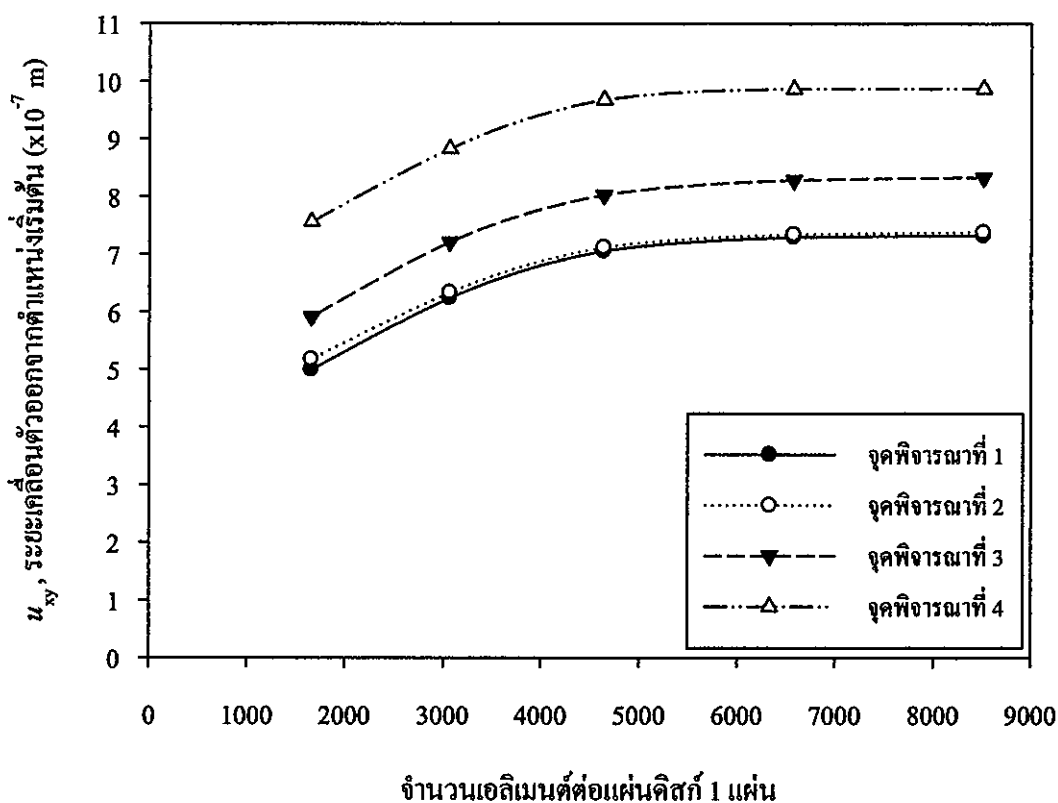
การสร้างเอลิเมนต์จะมีชนิดของเอลิเมนต์ให้เลือกใช้ในโปรแกรม ABAQUS ลักษณะของเอลิเมนต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแบบจำลอง ขนาดเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กจะให้ความแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ แต่การกำหนดขนาดเอลิเมนต์นั้นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลอง โดยได้เลือกการจำลองในกรณีที่ 3 ให้ภาวะสกรูทั้ง 2 กลุ่ม ต่างกัน 60% แล้วกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าต่างกัน เพื่อพิจารณาระยะเคลื่อนตัว $u_{xy} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ ของจุดพิจารณาบนแผ่นดิสก์ทั้ง 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ผลที่ได้จากการจำลองดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 จุดพิจารณาบนแผ่นดิสก์ทั้ง 4 จุด

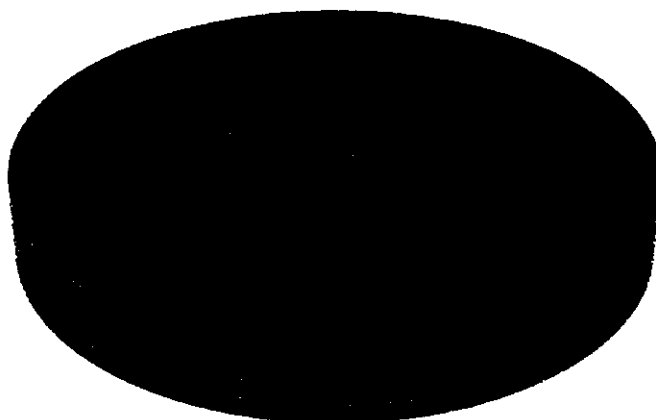
ตารางที่ 4.2 ระยะเคลื่อนตัวเปรียบเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์

จำนวนเอลิเมนต์ต่อ แผ่นคิสิก 1 แผ่น	u_{xy} , ระยะเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งเริ่มต้น ($\times 10^{-7}$ m)			
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
1656	4.9940	5.1740	5.9110	7.5600
3064	6.2410	6.3350	7.2070	8.8290
4640	7.0550	7.1170	8.0280	9.6810
6580	7.2920	7.3400	8.2850	9.8690
8514	7.3240	7.3790	8.3350	9.8740



รูปที่ 4.9 ระยะเคลื่อนตัวเปรียบเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9 จะพบว่าที่จำนวนเอลิเมนต์ 4640, 6850 และ 8514 เอลิเมนต์ มีระยะการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกัน ที่จำนวนเอลิเมนต์ 6850 เอลิเมนต์ แตกต่างจากที่ 4640 เอลิเมนต์ มากสุด 3.25% และที่ 8514 เอลิเมนต์ แตกต่างจากที่ 6850 เอลิเมนต์ มากสุด 0.60% จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นระยะเคลื่อนตัวก็จะไม่เปลี่ยนแปลงจากที่ 6850 เอลิเมนต์ ดังนั้นที่จำนวนเอลิเมนต์ 6850 เอลิเมนต์ จึงมีความแม่นยำเพียงพอและเหมาะสมกับแบบจำลองชุดแผ่นคิสิกนี้



รูปที่ 4.10 ลักษณะเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

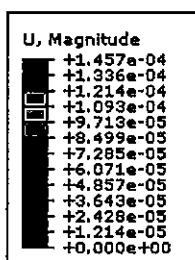
ในกรณีนี้ได้กำหนดชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบ (Element type) C3D8R: An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control. ซึ่งจะได้จำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนด ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 จำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดของแบบจำลอง

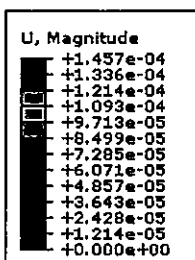
แบบจำลอง	จำนวนเอลิเมนต์	จำนวนโหนด
แผ่นยึดแผ่นดิสก์	3696	5040
แผ่นดิสก์แผ่นที่ 1	6580	13536
แผ่นดิสก์แผ่นที่ 2	6580	13536
แผ่นดิสก์แผ่นที่ 3	6580	13536
แผ่นดิสก์แผ่นที่ 4	6580	13536
แผ่นดิสก์แผ่นที่ 5	6580	13536
แผ่นรองแผ่นที่ 1	704	1320
แผ่นรองแผ่นที่ 2	704	1320
แผ่นรองแผ่นที่ 3	704	1320
แผ่นรองแผ่นที่ 4	704	1320
แผ่นรองแผ่นที่ 5	704	1320

4.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง

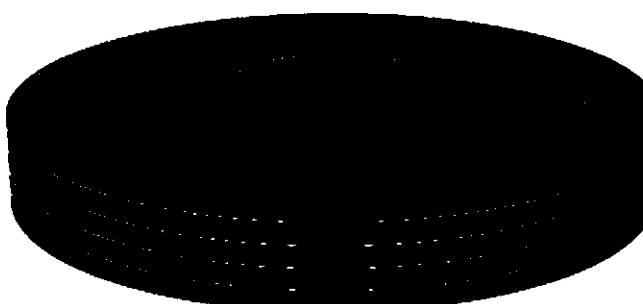
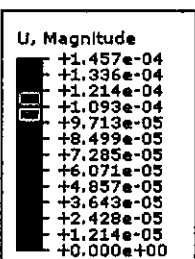
ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการเสียดรูปและการเคลื่อนตัวของชุดแผ่นดิสก์ทั้ง 5 กรณีได้แสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.25 (ผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก)



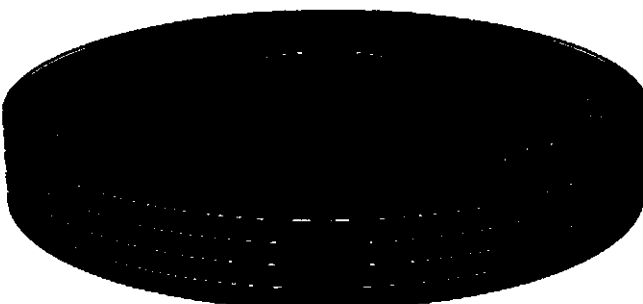
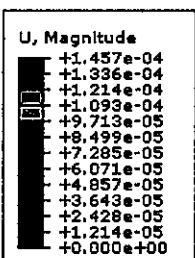
รูปที่ 4.11 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



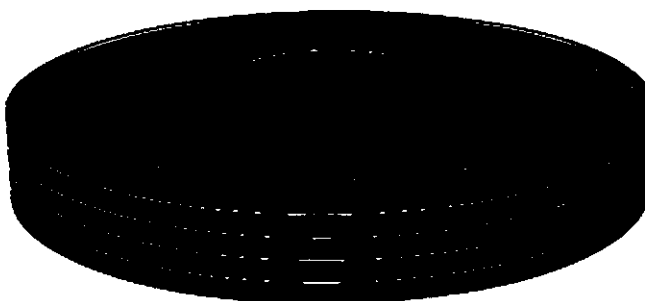
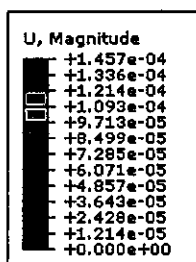
รูปที่ 4.12 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



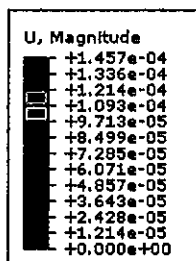
รูปที่ 4.13 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



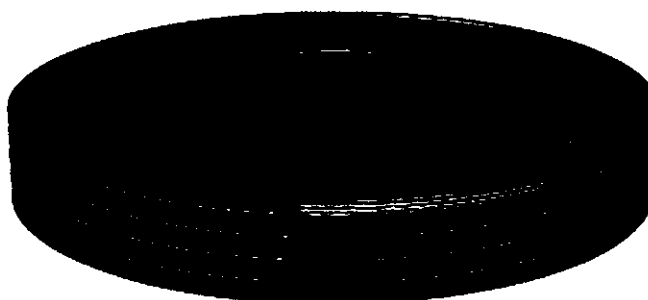
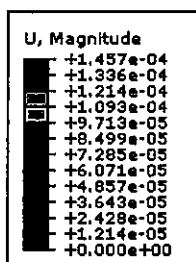
รูปที่ 4.14 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



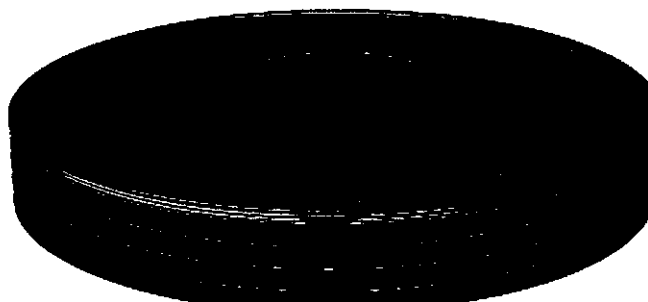
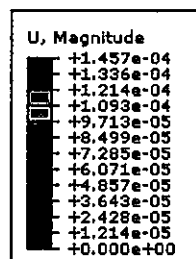
รูปที่ 4.15 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความคืบแตกต่างกัน 40 %



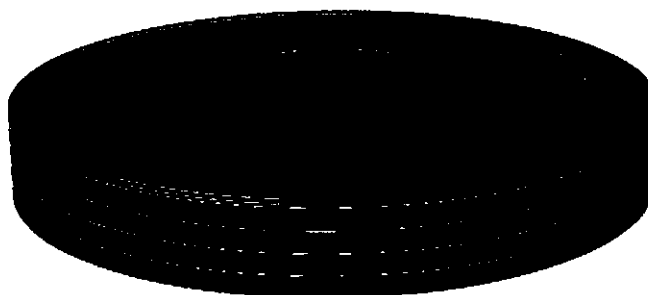
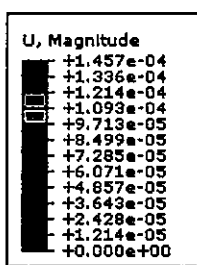
รูปที่ 4.16 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความคืบแตกต่างกัน 20 %



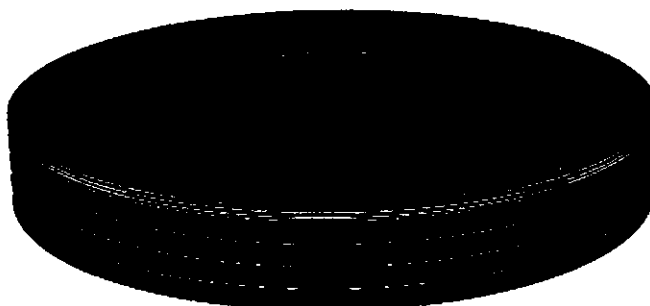
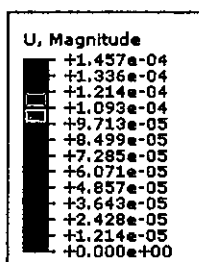
รูปที่ 4.17 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความคืบแตกต่างกัน 60 %



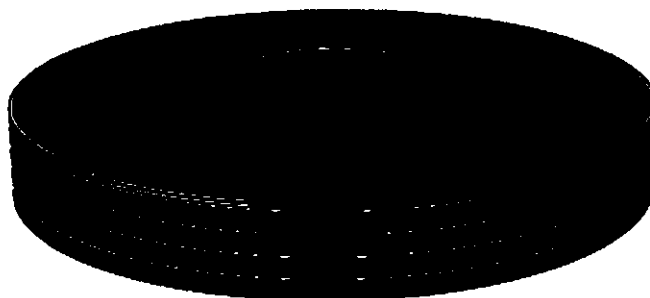
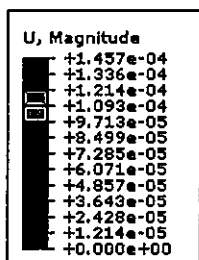
รูปที่ 4.18 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความคืบแตกต่างกัน 40 %



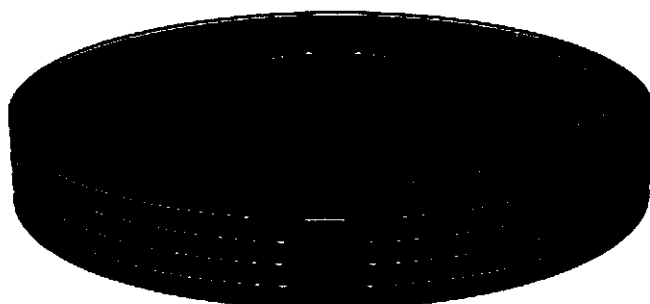
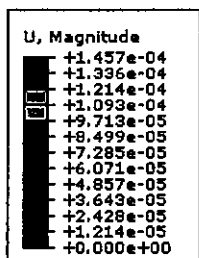
รูปที่ 4.19 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



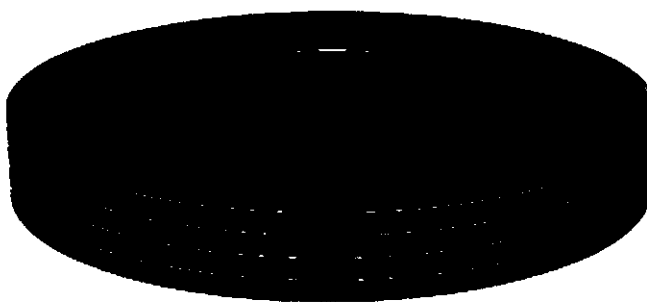
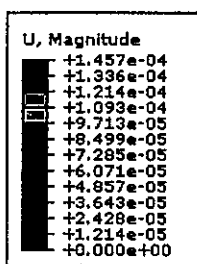
รูปที่ 4.20 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



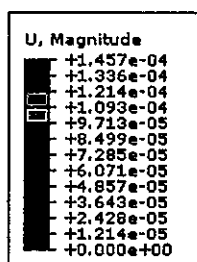
รูปที่ 4.21 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



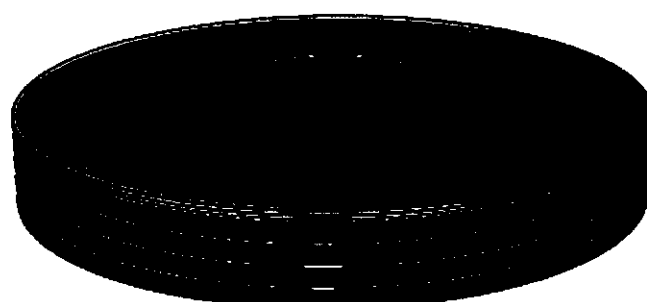
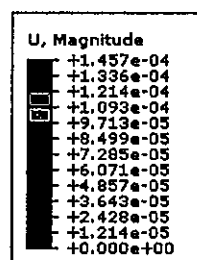
รูปที่ 4.22 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



รูปที่ 4.23 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



รูปที่ 4.24 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



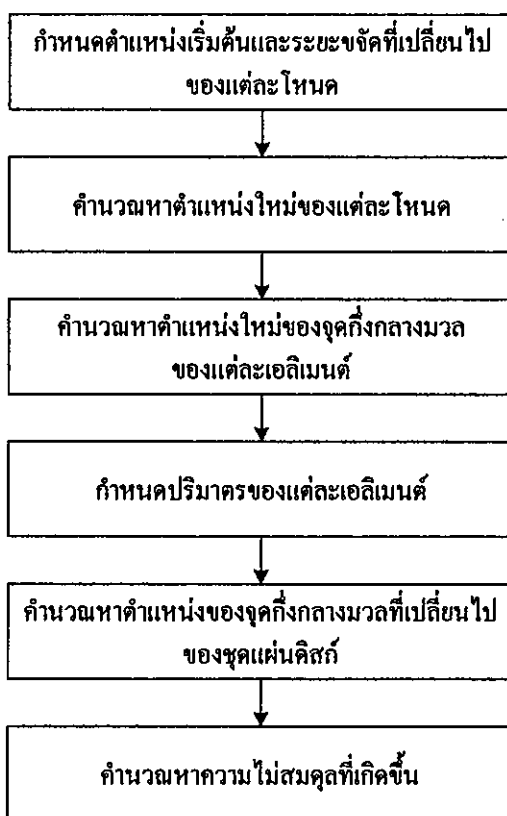
รูปที่ 4.25 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %

จากผลลัพธ์การจำลองทั้ง 5 กรณีที่ได้แสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.25 จะเห็นว่าทั้ง 5 กรณีจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยด้านที่ได้รับความดันมากจะมีการเสียรูปและเคลื่อนตัวมากกว่าด้านที่ได้รับความดันน้อย การเสียรูปทั้ง 2 ด้านของชุดแผ่นดิสก์จะต่างกันมากที่สุดในกรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันต่างกัน 60 % การเสียรูปของแผ่นดิสก์ทั้ง 5 แผ่นจะมีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด ต่างกันเพียงขนาดการเสียรูป แผ่นดิสก์แผ่นบนสุดจะเสียรูปตามแนวแกนหมุน (แกน z) มากที่สุดเพราะว่าแผ่นดิสก์แผ่นบนสุดจะรองรับแผ่นยึดแผ่นดิสก์ที่มีภาระกระทำอยู่ แผ่นดิสก์แผ่นที่ 2 ถึงแผ่นที่ 5 จะเสียรูปตามแนวแกนน้อยและใกล้เคียงกัน ซึ่งแผ่นดิสก์แผ่นที่ 2 และ 3 จะเสียรูปและเคลื่อนตัวตามแนวระนาบ x-y มากที่สุดนั่นเพราะว่าทั้งสองแผ่นจะเสียรูปและเคลื่อนตัวออกจากแผ่นดิสก์แผ่นที่ 1 และ 4 ตามลำดับ จากการเสียรูปและเคลื่อนตัวดังกล่าวส่งผลทำให้จุดกึ่งกลางมวลของแผ่นดิสก์แต่ละแผ่นเคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลทำให้ชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์

ไครฟ์เกิดความไม่สมดุลขึ้น ซึ่งจะได้นำผลลัพธ์จากการจำลองที่เกิดขึ้นจากกรณีดังกล่าวไปคำนวณหาความไม่สมดุลในหัวข้อถัดไป

4.2 การคำนวณหาความไม่สมดุล

หลังจากที่ได้ผลลัพธ์และข้อมูลการเสียรูปและการเคลื่อนตัวของชุดแผ่นคิส์ที่ต้องการจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS แล้ว จะได้นำข้อมูลดังกล่าวนี้มาคำนวณหาตำแหน่งใหม่ของจุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นคิส์และหาค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากการขันสกรูโดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ จะได้แสดงขั้นตอนการคำนวณดังรูปที่ 4.26 ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.26 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความไม่สมดุล

ขั้นตอนที่ 1. กำหนดตำแหน่งเริ่มต้น \bar{R}_i และระยะขจัดที่เปลี่ยนไปของแต่ละโหนด \bar{u} โดยที่ข้อมูลตำแหน่งเริ่มต้นและระยะขจัดที่เปลี่ยนไปของแต่ละโหนดได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS

$$\bar{R}_i = R_{x_i} \hat{i} + R_{y_i} \hat{j} + R_{z_i} \hat{k} \quad (4.1)$$

$$\bar{u} = u_x \hat{i} + u_y \hat{j} + u_z \hat{k} \quad (4.2)$$

ขั้นตอนที่ 2. คำนวณหาตำแหน่งใหม่ของแต่ละ โหนด \bar{R}_N โดยที่ตำแหน่งใหม่ของแต่ละ โหนดได้มาจากการนำตำแหน่งเริ่มต้นรวมกับระยะขจัดที่เปลี่ยนไปของแต่ละ โหนด ดังสมการ ที่ 4.3

$$\bar{R}_N = \bar{R}_I + \bar{u} = R_{x_N} \hat{i} + R_{y_N} \hat{j} + R_{z_N} \hat{k} \quad (4.3)$$

ขั้นตอนที่ 3. คำนวณหาตำแหน่งใหม่ของจุดกึ่งกลางมวลของแต่ละเอลิเมนต์ \bar{R}_E โดยที่ ตำแหน่งใหม่ของจุดกึ่งกลางมวลของแต่ละเอลิเมนต์สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.4 (จากรูป ที่ 4.10 จะเห็นว่าเอลิเมนต์มีขนาดเล็กมากและมีรูปทรงใกล้เคียงกับรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยม ดังนั้น ประเมินให้เอลิเมนต์มีรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมและคำนวณหา \bar{R}_E ได้ดังสมการ 4.4)

$$\bar{R}_E = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{R}_{N_i}}{8} = R_{x_E} \hat{i} + R_{y_E} \hat{j} + R_{z_E} \hat{k} \quad (4.4)$$

ขั้นตอนที่ 4. กำหนดปริมาตรของแต่ละเอลิเมนต์ V_E โดยที่ปริมาตรของแต่ละเอลิเมนต์ ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS

ขั้นตอนที่ 5. คำนวณหาตำแหน่งของจุดกึ่งกลางมวลที่เปลี่ยนไปของชุดแผ่นดิสก์ \bar{R}_D โดยที่ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางมวลที่เปลี่ยนไปสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.5

$$\bar{R}_D = \frac{\int \bar{R}_E dV_E}{\int dV_E} = R_{x_D} \hat{i} + R_{y_D} \hat{j} + R_{z_D} \hat{k} \quad (4.5)$$

เมื่อระยะทางในแนวแกนหมุน (แกน z) ไม่มีผลกับความไม่สมดุลสถิต ดังนั้นพิจารณาเฉพาะ ระยะบนระนาบ x-y

$$R_{D_{xy}} = \sqrt{(R_{x_D})^2 + (R_{y_D})^2} \quad (4.6)$$

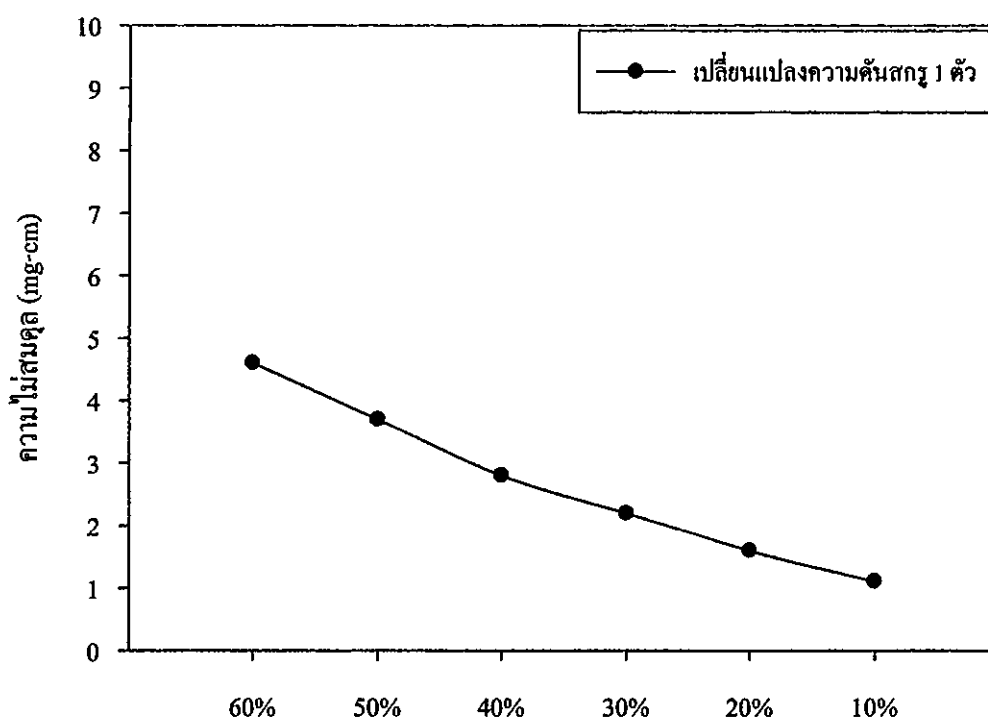
ขั้นตอนที่ 6. คำนวณหาความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น U โดยที่ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นได้มา จากการนำตำแหน่งจุดกึ่งกลางมวลที่เปลี่ยนไปของชุดแผ่นดิสก์บนระนาบ x-y ($R_{D_{xy}}$) คูณกับ น้ำหนักของชุดแผ่นดิสก์ M

$$U = R_{D_{xy}} M \quad (4.7)$$

ผลที่ได้จากการคำนวณหาความไม่สมดุลของชุดแผ่นคิสก์จากการกำหนดให้สกรูกลุ่มที่ 1 มีความดันคงที่ที่ 100% และสกรูกลุ่มที่ 2 มีความดัน 40% เพื่อให้ภาระของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันมากที่สุด 60% แล้วเพิ่มความดันสกรูกลุ่มที่ 2 ขึ้นเรื่อยๆ ครึ่งละ 10% เพื่อให้ภาระของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลง ซึ่งได้ทำการจำลองและคำนวณหาความไม่สมดุล 5 กรณีด้วยกัน ดังได้แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.4 ถึงตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.4 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัว ได้แก่สกรู 1,2,3,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัว ได้แก่สกรู 4

ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)
1. ความดันต่างกัน 60%	4.600
2. ความดันต่างกัน 50%	3.698
3. ความดันต่างกัน 40%	2.800
4. ความดันต่างกัน 30%	2.198
5. ความดันต่างกัน 20%	1.598
6. ความดันต่างกัน 10%	1.107

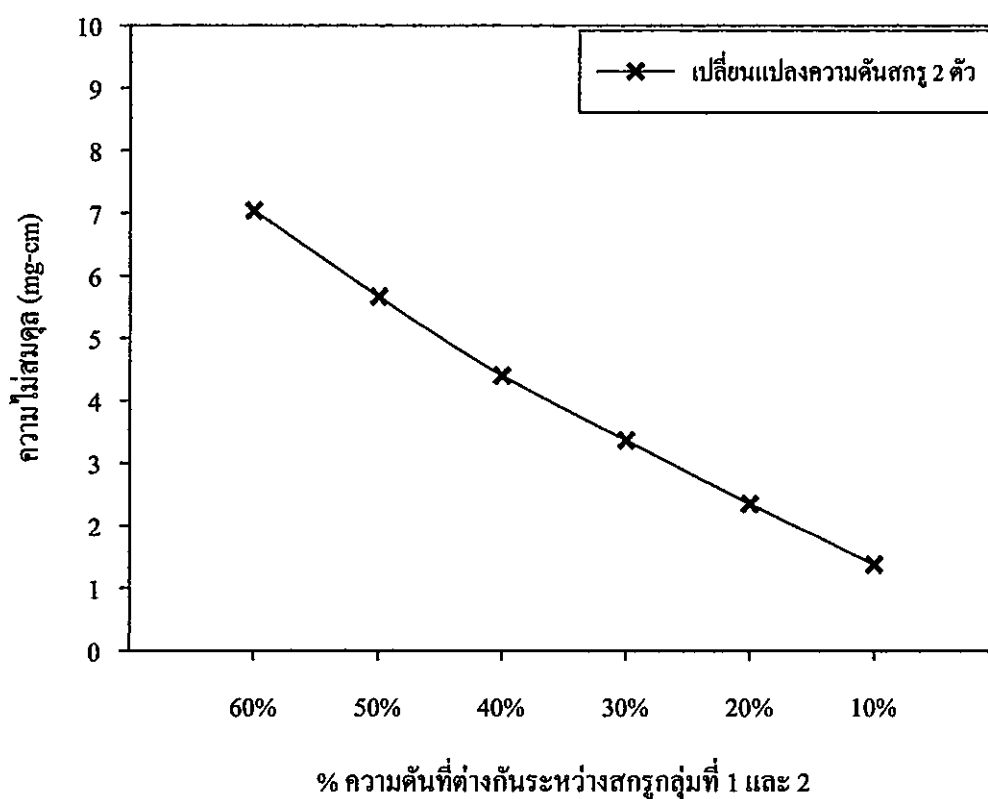


% ความดันที่ต่างกันระหว่างสกรูกลุ่มที่ 1 และ 2

รูปที่ 4.27 ความไม่สมดุลในกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว

ตารางที่ 4.5 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความคั่นสกรู 2 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 5,6

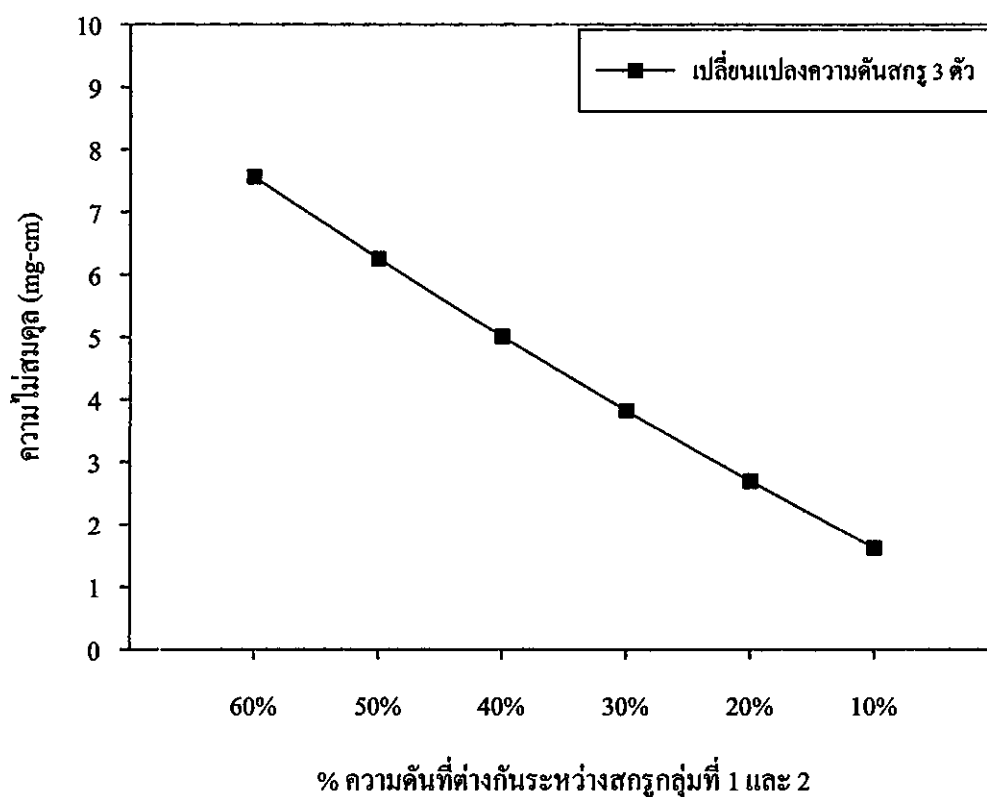
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)
1. ความคั่นต่างกัน 60%	7.041
2. ความคั่นต่างกัน 50%	5.665
3. ความคั่นต่างกัน 40%	4.403
4. ความคั่นต่างกัน 30%	3.365
5. ความคั่นต่างกัน 20%	2.352
6. ความคั่นต่างกัน 10%	1.379



รูปที่ 4.28 ความไม่สมดุลในกรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความคั่นสกรู 2 ตัว

ตารางที่ 4.6 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความคั่นสกรู 3 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 1,2,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5

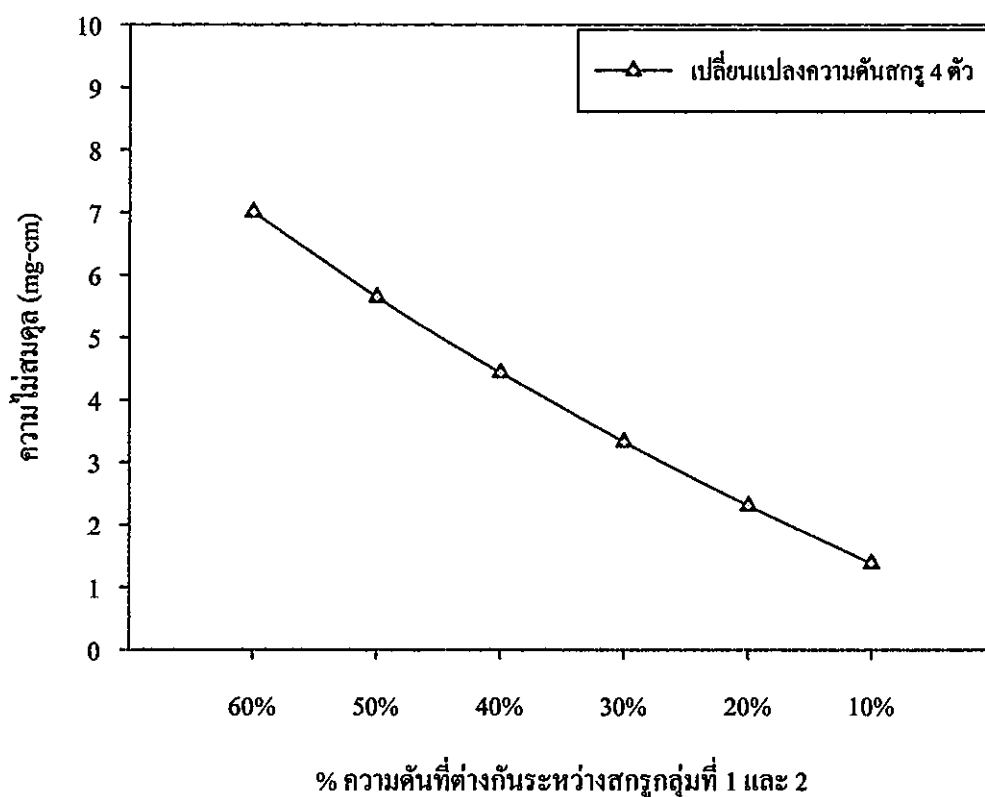
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)
1. ความคั่นต่างกัน 60%	7.565
2. ความคั่นต่างกัน 50%	6.253
3. ความคั่นต่างกัน 40%	5.010
4. ความคั่นต่างกัน 30%	3.827
5. ความคั่นต่างกัน 20%	2.697
6. ความคั่นต่างกัน 10%	1.626



รูปที่ 4.29 ความไม่สมดุลในกรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความคั่นสกรู 3 ตัว

ตารางที่ 4.7 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความคั่นสกรู 4 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 2,3 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,4,5,6

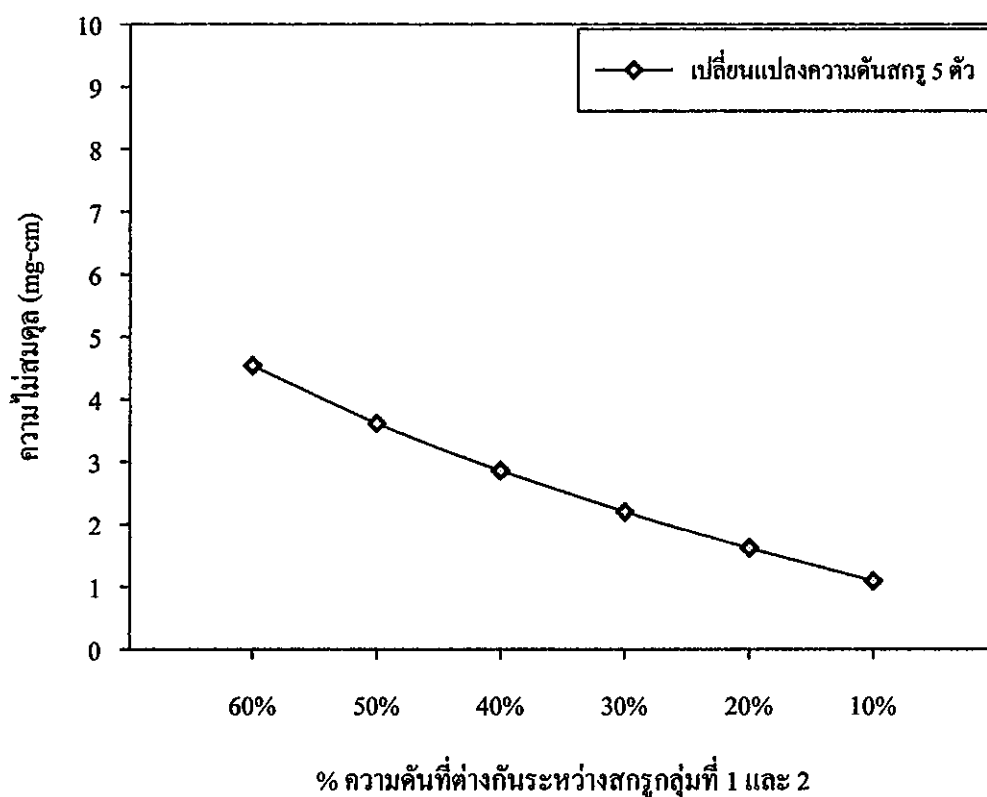
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)
1. ความคั่นต่างกัน 60%	7.000
2. ความคั่นต่างกัน 50%	5.644
3. ความคั่นต่างกัน 40%	4.432
4. ความคั่นต่างกัน 30%	3.326
5. ความคั่นต่างกัน 20%	2.307
6. ความคั่นต่างกัน 10%	1.381



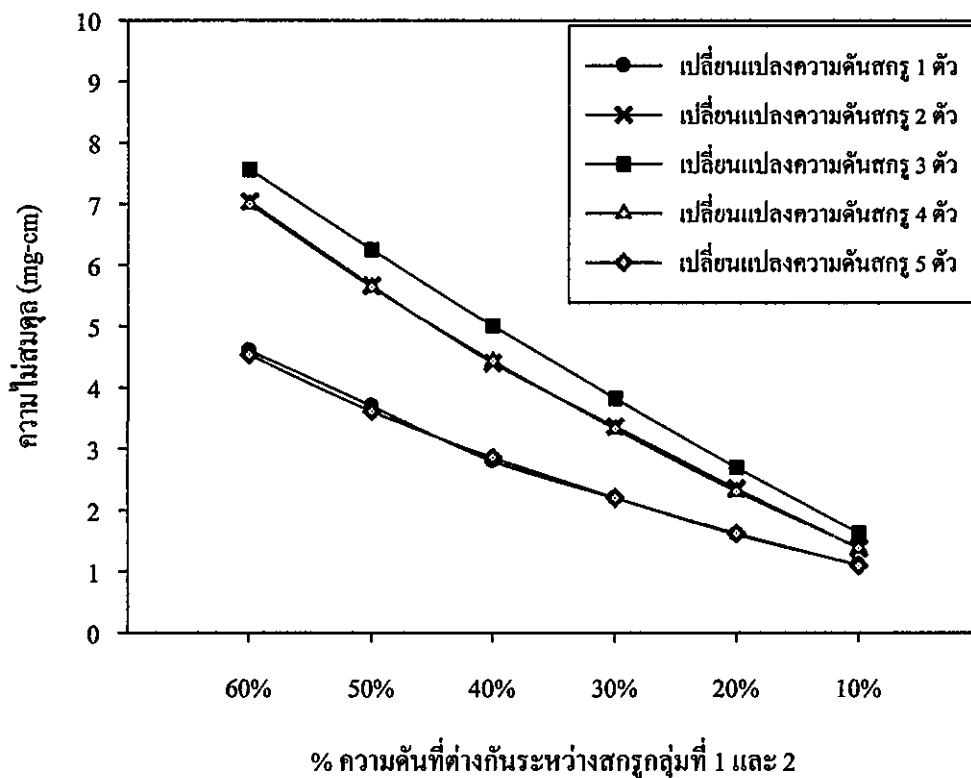
รูปที่ 4.30 ความไม่สมดุลในกรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความคั่นสกรู 4 ตัว

ตารางที่ 4.8 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 1 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 2,3,4,5,6

ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)
1. ความดันต่างกัน 60%	4.537
2. ความดันต่างกัน 50%	3.614
3. ความดันต่างกัน 40%	2.858
4. ความดันต่างกัน 30%	2.202
5. ความดันต่างกัน 20%	1.618
6. ความดันต่างกัน 10%	1.095



รูปที่ 4.31 ความไม่สมดุลในกรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว



รูปที่ 4.32 ความไม่สมดุลในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของความไม่สมดุลในทุกกรณีจะมีลักษณะคล้ายกัน เมื่อสกรูกลุ่มที่ 1 และสกรูกลุ่มที่ 2 มีความดันแตกต่างกัน 60% จะส่งผลให้จุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นคัสต์เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลมากที่สุดจึงทำให้มีค่าความไม่สมดุลมากที่สุดและเมื่อความดันของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ความไม่สมดุลก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว เมื่อสกรูกลุ่มที่ 1 และสกรูกลุ่มที่ 2 มีความดันแตกต่างกัน 60% จะมีค่าความไม่สมดุลมากที่สุดถึง 7.565 mg-cm และรองลงมาก็คือกรณีเปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 และ 4 ตัว ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน และน้อยที่สุดก็คือกรณีเปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 และ 5 ตัว และทั้ง 2 กรณีก็จะมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

ผลการจำลองและการคำนวณหาความไม่สมดุลดังกล่าวนี้ ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าความดันของสกรูแต่ละตัวหรืออีกนัยหนึ่งคือแรงในสกรูแต่ละตัวมีค่าต่างกันก็จะส่งผลทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นได้ ซึ่งจะได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจริงในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากการชันสกรูด้วยภาระของสกรูที่มีขนาดต่างกัน โดยเงื่อนไขในการทดลองนั้นจะคล้ายกับเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะทำให้การทดลองการชันสกรูด้วยแรงบิดของสกรูแต่ละตัวต่างกันในกระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสก์และแกนหมุน

5.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จริงในกระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสก์และมีลักษณะเฉพาะของบริษัทผู้ผลิตฮาร์ดคิสก์จึงไม่สามารถเปิดเผยรูปร่างและรายละเอียดได้ ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่

1. ฮาร์ดคิสก์ไครฟ์ที่ผ่านการประกอบชุดแผ่นคิสก์และแกนหมุนเรียบร้อยแล้ว
2. เครื่องมือชันสกรูแผ่นซีดีแผ่นคิสก์
3. เครื่องปรับสมดุล
4. เครื่องจักรชันสกรูอัตโนมัติ
5. เครื่องทดสอบความสมดุล

5.3 วิธีการทดลอง

ในกระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสก์และแกนหมุนจะไม่สามารถวัดแรงในสกรูแต่ละตัวโดยตรงได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยกำหนดเงื่อนไขให้ภาระเป็นแบบแรงบิดของสกรูแต่ละตัวไม่เท่ากัน เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น เงื่อนไขในการทดลองถูกกำหนดให้คล้ายกับเงื่อนไขในการคำนวณ โดยพิจารณาแบ่งสกรูออกเป็น 2 กลุ่ม (ตำแหน่งรูสกรูตามรูปที่ 4.4) ซึ่งจะทำให้การทดลอง 5 กรณีด้วยกัน

- กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัว และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัว
- กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัว และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัว
- กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัว และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว
- กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัว และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัว
- กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัว และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัว

โดยชั้นสกรูกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงบิดคงที่ที่ 100% และเปลี่ยนแปลงแรงบิดของสกรูกลุ่มที่ 2 จากน้อยไปหามาก เพื่อให้ภาระของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง แล้วศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากกรณีดังกล่าว จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ซึ่งทำการทดลองกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ 5 ตัว และมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1. ทดสอบค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ก่อนการขันสกรูแน่น เพื่อหาค่าความไม่สมดุลที่คงค้างมาจากขั้นตอนก่อนหน้าการทดลอง

ขั้นตอนที่ 2. ขันสกรูกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงบิด 100% และขันสกรูกลุ่มที่ 2 ด้วยแรงบิด 40% เพื่อให้สกรูทั้ง 2 กลุ่มมีแรงบิดต่างกัน 60% ซึ่งเป็นกรณีที่ภาระของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันมากที่สุด แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุลที่เกิดเนื่องจากการขันสกรู

ขั้นตอนที่ 3. ขันสกรูกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงบิด 100% และขันสกรูกลุ่มที่ 2 เพื่อเพิ่มแรงบิดเป็น 60% เพื่อให้สกรูทั้ง 2 กลุ่มมีแรงบิดต่างกันลดลงเหลือ 40% แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุลที่เกิดจากการขันสกรู

ขั้นตอนที่ 4. ขันสกรูกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงบิด 100% และขันสกรูกลุ่มที่ 2 เพื่อเพิ่มแรงบิดเป็น 80% เพื่อให้สกรูทั้ง 2 กลุ่มมีแรงบิดต่างกันลดลงเหลือ 20% แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุลที่เกิดจากการขันสกรู

ขั้นตอนที่ 5. ขันสกรูกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงบิด 100% และขันสกรูกลุ่มที่ 2 เพื่อเพิ่มแรงบิดเป็น 100% เพื่อให้สกรูทั้ง 2 กลุ่มมีแรงบิดเท่ากัน แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุลที่เกิดจากการขันสกรู

หลังจากทำการทดลองจนครบทั้ง 5 ขั้นตอนแล้ว ก็จะย้อนกลับไปทำการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 จนครบทั้ง 5 กรณี ซึ่งจะได้แสดงผลการทดลองในหัวข้อถัดไป

5.4 ผลการทดลอง

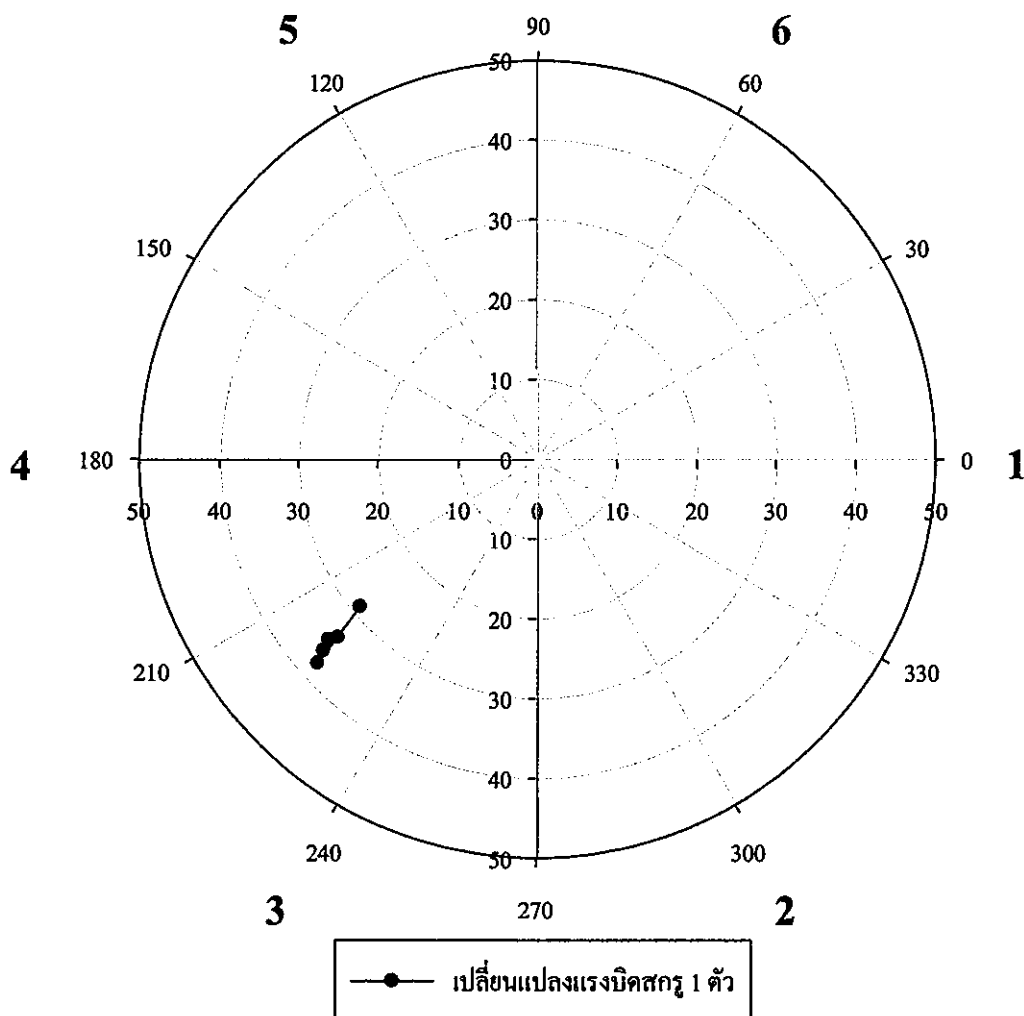
5.4.1 ผลการทดลองในกรณีที่ 1 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัว และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัว

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว โดยพิจารณามุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นเลือกกลุ่มสกรูที่อยู่ในทิศทางเดียวกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเป็นสกรูกลุ่มที่ 1 ซึ่งเลือกสกรูจำนวนสกรู 5 ตัวติดกัน โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 1 เป็น 100% และเลือกสกรูกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นสกรูตัวที่เหลือและอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 2 เป็น 40% ในขั้นตอนที่ 2 และเพิ่มแรงบิดขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นตอนต่อๆ มา เพื่อให้แรงบิดระหว่างสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ตัวอย่างผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 6

ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	28.8	220
2. แรงบิดต่างกัน 60%	37.5	223
3. แรงบิดต่างกัน 40%	35.9	222
4. แรงบิดต่างกัน 20%	34.5	221
5. แรงบิดต่างกัน 0%	33.4	222

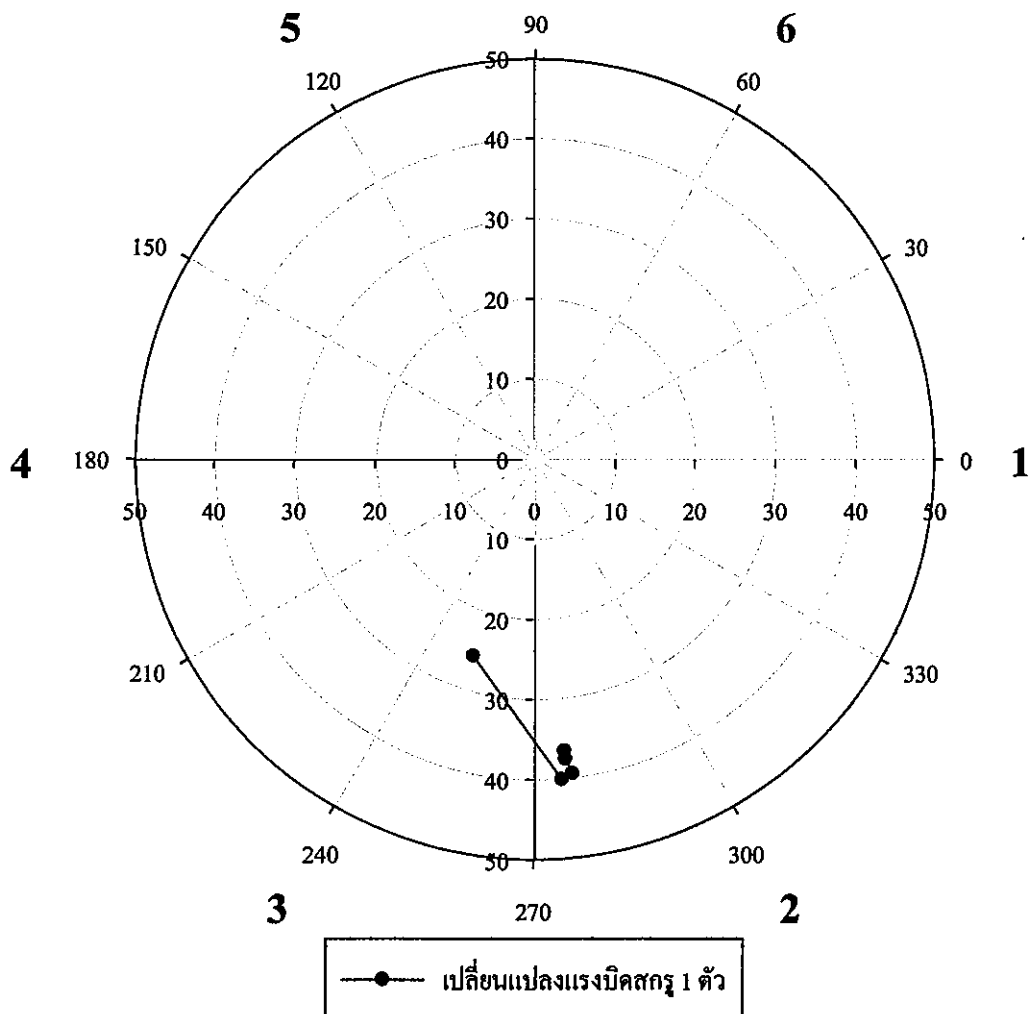


รูปที่ 5.1 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.2 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3

กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 6

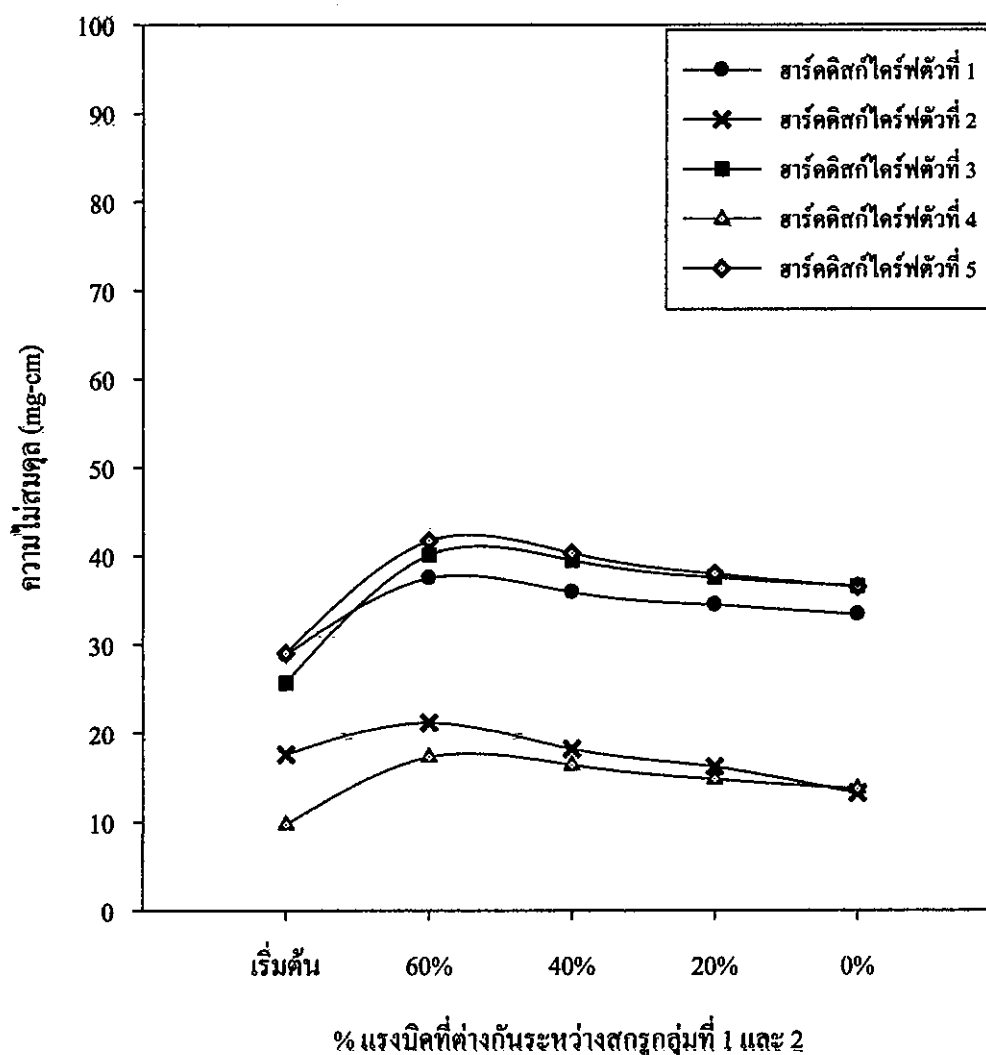
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	25.7	253
2. แรงบิดต่างกัน 60%	40.1	275
3. แรงบิดต่างกัน 40%	39.5	277
4. แรงบิดต่างกัน 20%	37.6	276
5. แรงบิดต่างกัน 0%	36.6	276



รูปที่ 5.2 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3

ตารางที่ 5.3 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัว

ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	28.8	17.6	25.7	9.7	29.0
2. แรงบิดต่างกัน 60%	37.5	21.2	40.1	17.3	41.7
3. แรงบิดต่างกัน 40%	35.9	18.2	39.5	16.4	40.3
4. แรงบิดต่างกัน 20%	34.5	16.2	37.6	14.8	38.0
5. แรงบิดต่างกัน 0%	33.4	13.2	36.6	13.7	36.5



รูปที่ 5.3 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

จากการทดลองในกรณีที่ 1 ซึ่งเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว (ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข) จะพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการทดลอง และเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% (ขั้นตอนที่ 2) ค่าความไม่สมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม จากนั้นเมื่อขันสกรูให้แรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลงในขั้นตอนต่อๆ มา ค่าความไม่สมดุลก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัวจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่มีบางกรณีที่ทิศทางของค่าความไม่สมดุลมีมุมเฟสต่างออกไปจากมุมเฟสเดิม เช่น กรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3 (ตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2) จะเห็นว่าเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% (ขั้นตอนที่ 2) ค่าความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นจากเดิม 25.7 mg-cm เป็น 40.1 mg-cm แต่มุมเฟสของค่าความไม่สมดุลเปลี่ยนไปจากเดิม 253 องศา เป็น 275 องศา ซึ่งเปลี่ยนไปมากถึง 22 องศา อาจเนื่องมาจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูตัวที่ 1 และสกรูตัวที่ 2 มีค่ามากกว่าแรงบิดที่ขันสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้แรงในสกรูตัวที่ 1 และแรงในสกรูตัวที่ 2 มีค่ามากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ด้วย จึงทำให้ความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นและมีทิศทางไปในทิศทางดังกล่าว แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ได้คาดการณ์ไว้ ค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว สามารถนำมาเขียนกราฟรวมกันได้ดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3

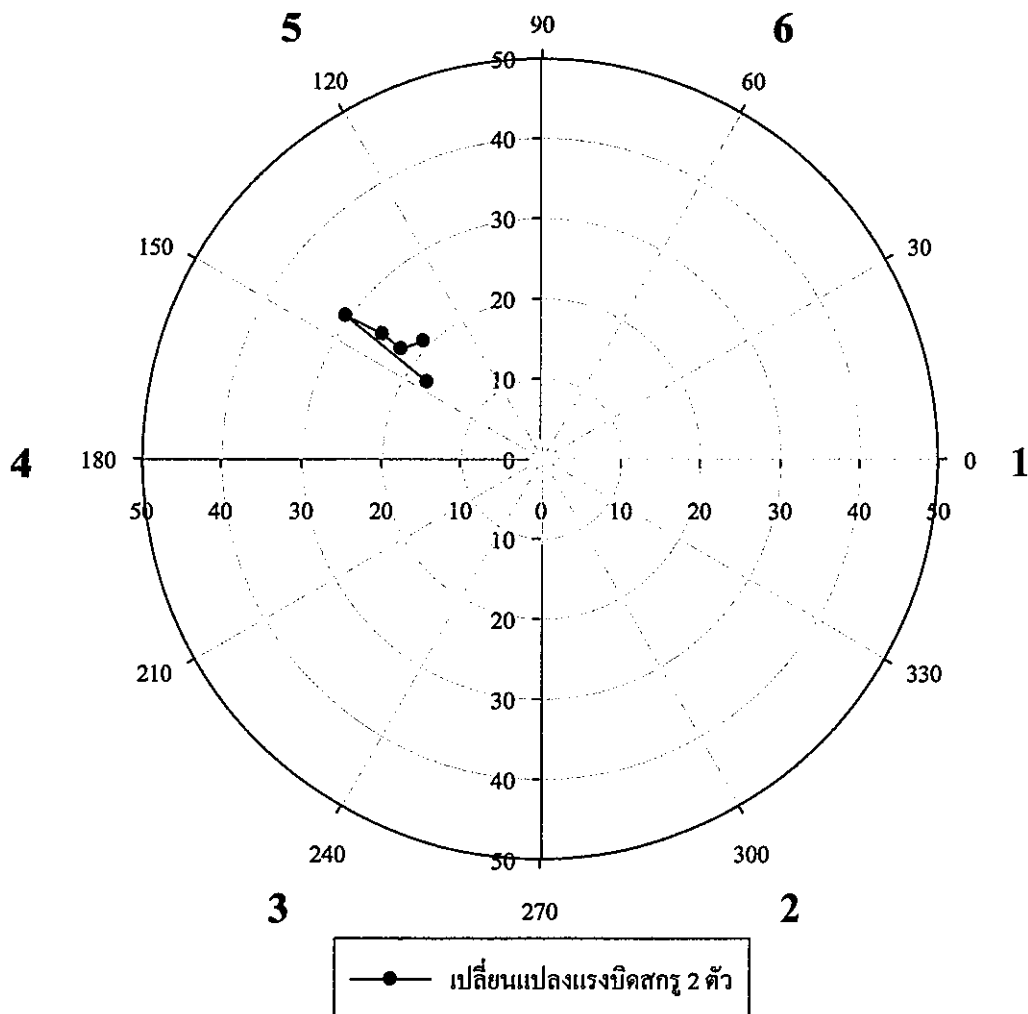
5.4.2 ผลการทดลองในกรณีที่ 2 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัว และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัว

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว โดยพิจารณามุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นเลือกกลุ่มสกรูที่อยู่ในทิศทางเดียวกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเป็นสกรูกลุ่มที่ 1 ซึ่งเลือกสกรูจำนวนสกรู 4 ตัวติดกัน โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 1 เป็น 100% และเลือกสกรูกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นสกรูตัวที่เหลือและอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 2 เป็น 40% ในขั้นตอนที่ 2 และเพิ่มแรงบิดขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นตอนต่อๆ มา เพื่อให้แรงบิดระหว่างสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ตัวอย่างผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 1,2

ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	17.1	146
2. แรงบิดต่างกัน 60%	30.3	144
3. แรงบิดต่างกัน 40%	25.2	142
4. แรงบิดต่างกัน 20%	22.2	142
5. แรงบิดต่างกัน 0%	20.7	135

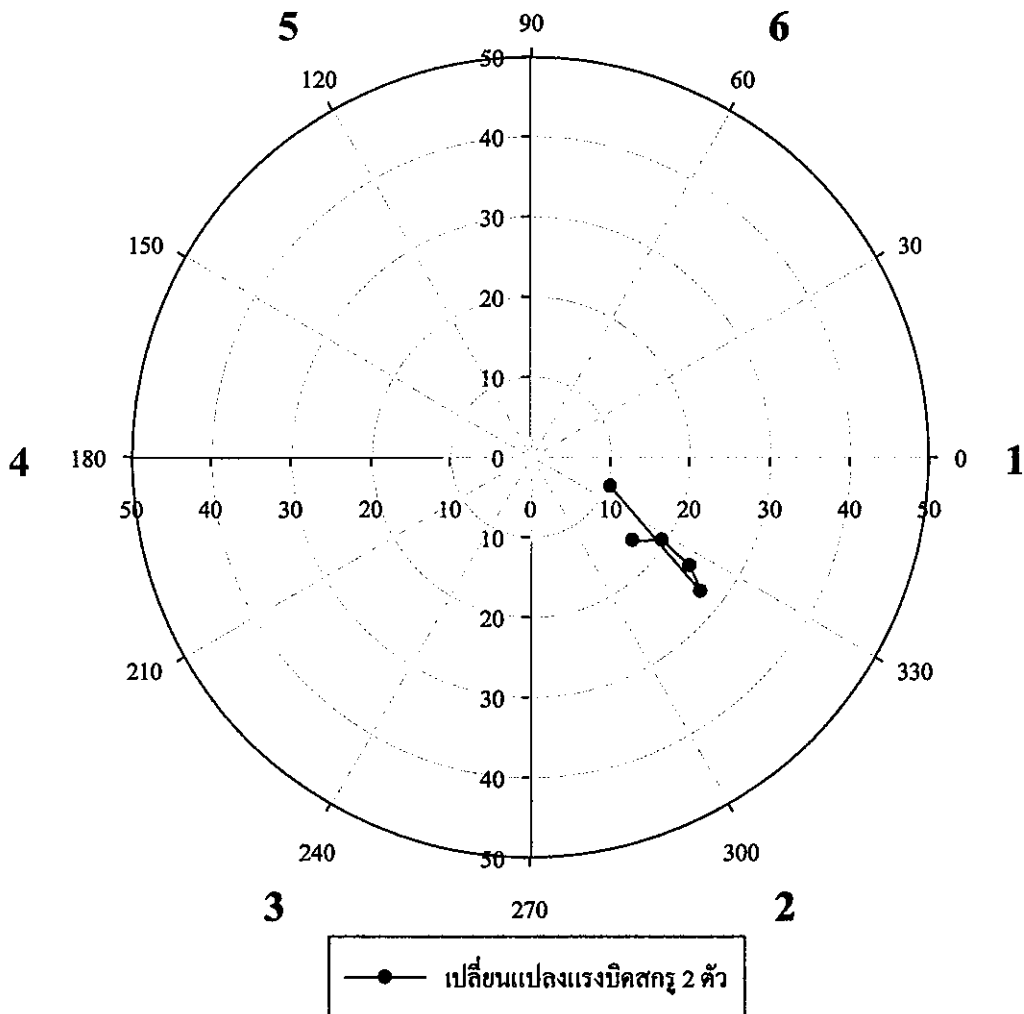


รูปที่ 5.4 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.5 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4

กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 4,5

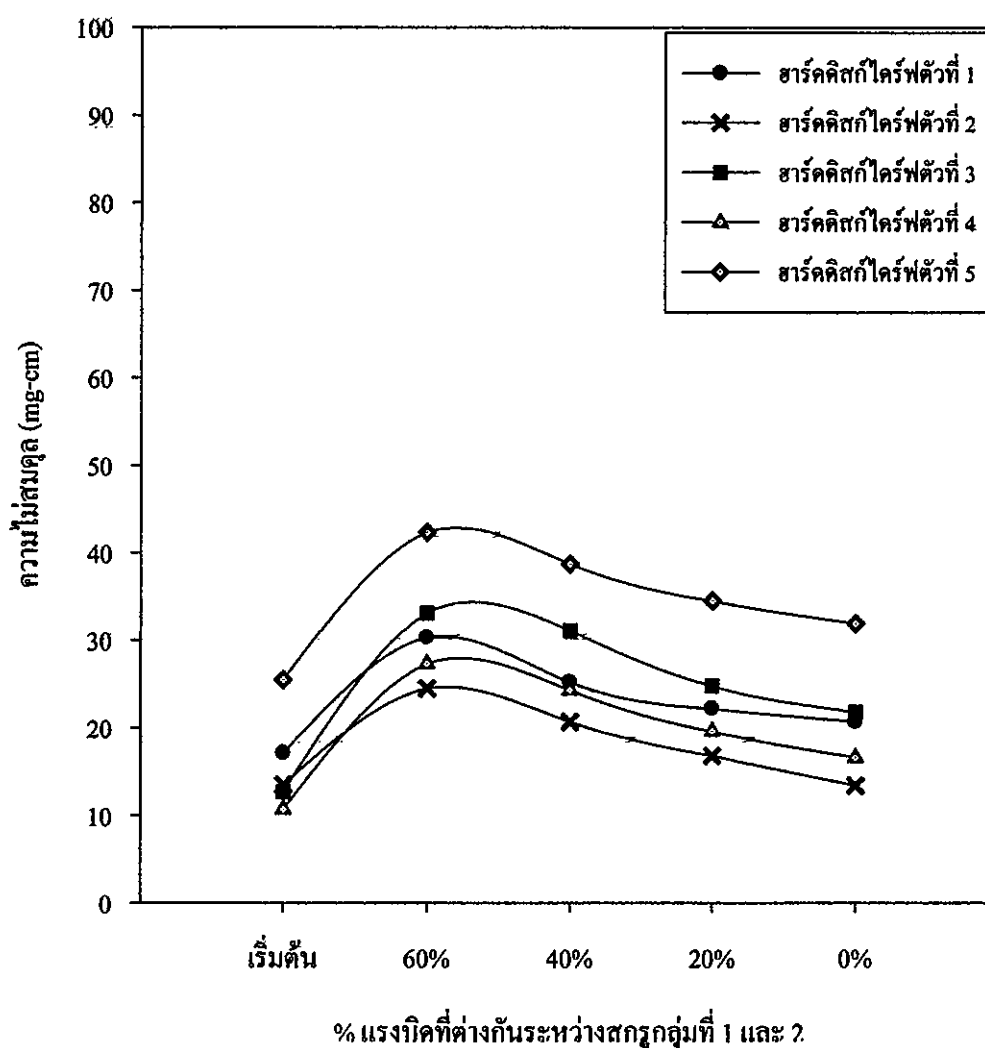
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	10.7	340
2. แรงบิดต่างกัน 60%	27.3	322
3. แรงบิดต่างกัน 40%	24.3	326
4. แรงบิดต่างกัน 20%	19.6	328
5. แรงบิดต่างกัน 0%	16.6	321



รูปที่ 5.5 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 5.6 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัว

ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	17.1	13.5	12.7	10.7	25.5
2. แรงบิดต่างกัน 60%	30.3	24.5	33.1	27.3	42.3
3. แรงบิดต่างกัน 40%	25.2	20.7	31.1	24.3	38.7
4. แรงบิดต่างกัน 20%	22.2	16.8	24.8	19.6	34.5
5. แรงบิดต่างกัน 0%	20.7	13.4	21.8	16.6	31.9



รูปที่ 5.6 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

จากการทดลองในกรณีที่ 2 ซึ่งเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว (ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข) จะพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการทดลอง และเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% (ขั้นตอนที่ 2) ค่าความไม่สมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม จากนั้นเมื่อขันสกรูให้แรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลงในขั้นตอนต่อๆ มา ค่าความไม่สมดุลก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัวจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่มีบางกรณีที่ทิศทางของค่าความไม่สมดุลมีมุมเฟสต่างออกไปจากมุมเฟสเดิม เช่น กรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4 (ตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.5) จะเห็นว่าเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% ค่าความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นจากเดิม 10.7 mg-cm เป็น 27.3 mg-cm แต่มุมเฟสของค่าความไม่สมดุลเปลี่ยนไปจากเดิม 340 องศา เป็น 322 องศา ซึ่งเปลี่ยนไปมากถึง 18 องศา อาจเนื่องมาจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูตัวที่ 2 และสกรูตัวที่ 3 มีค่ามากกว่าแรงบิดที่ขันสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้แรงในสกรูตัวที่ 2 และแรงในสกรูตัวที่ 3 มีค่ามากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ด้วย จึงทำให้ความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นและมีทิศทางไปในทิศทางดังกล่าว แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ได้คาดการณ์ไว้ ค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว สามารถนำมาเขียนกราฟรวมกันได้ดังตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6

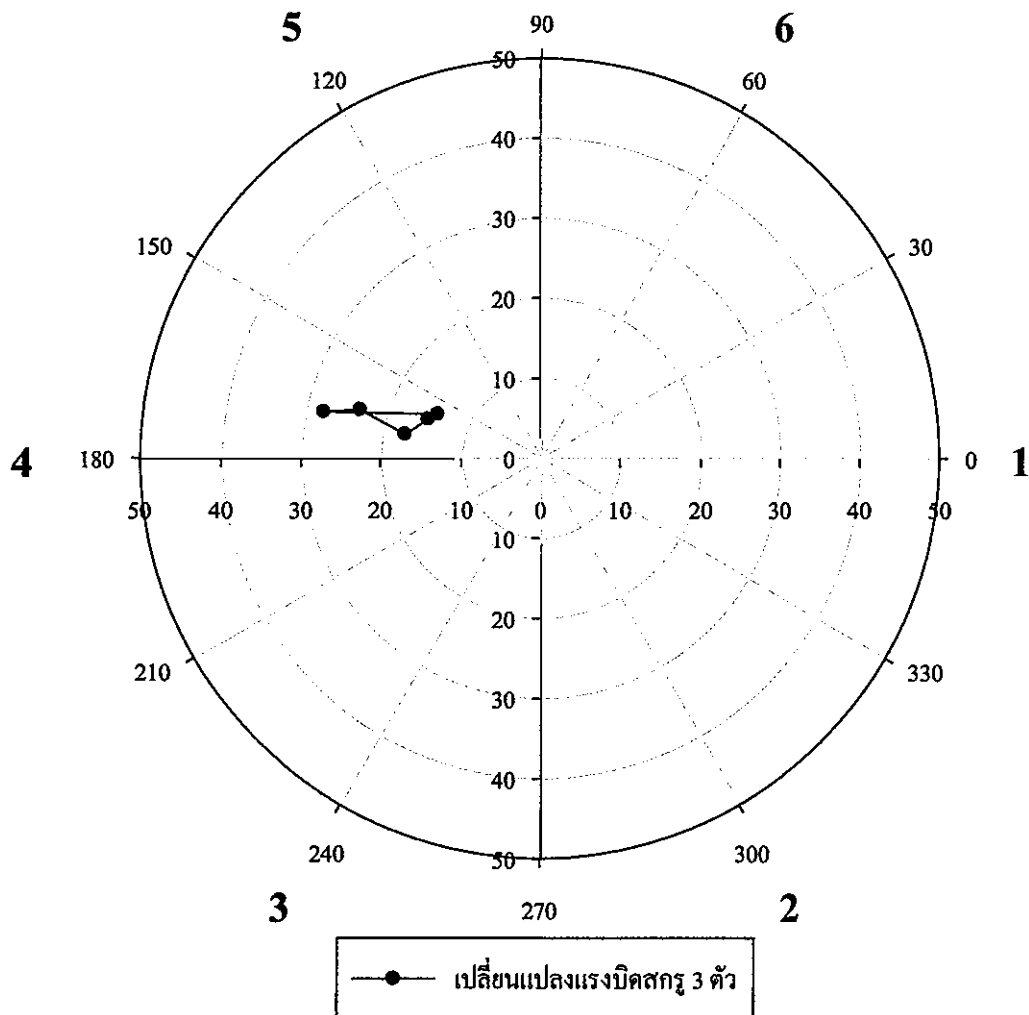
5.4.3 ผลการทดลองในกรณีที่ 3 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัว และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว โดยพิจารณามุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นเลือกกลุ่มสกรูที่อยู่ในทิศทางเดียวกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเป็นสกรูกลุ่มที่ 1 ซึ่งเลือกสกรูจำนวนสกรู 3 ตัวติดกัน โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 1 เป็น 100% และเลือกสกรูกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นสกรูตัวที่เหลือและอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 2 เป็น 40% ในขั้นตอนที่ 2 และเพิ่มแรงบิดขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นตอนต่อๆ มา เพื่อให้แรงบิดระหว่างสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ตัวอย่างผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 1

กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัว ได้แก่สกรู 3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว ได้แก่สกรู 1,2,6

ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	14.0	157
2. แรงบิดต่างกัน 60%	27.7	168
3. แรงบิดต่างกัน 40%	23.3	165
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.2	170
5. แรงบิดต่างกัน 0%	14.9	161

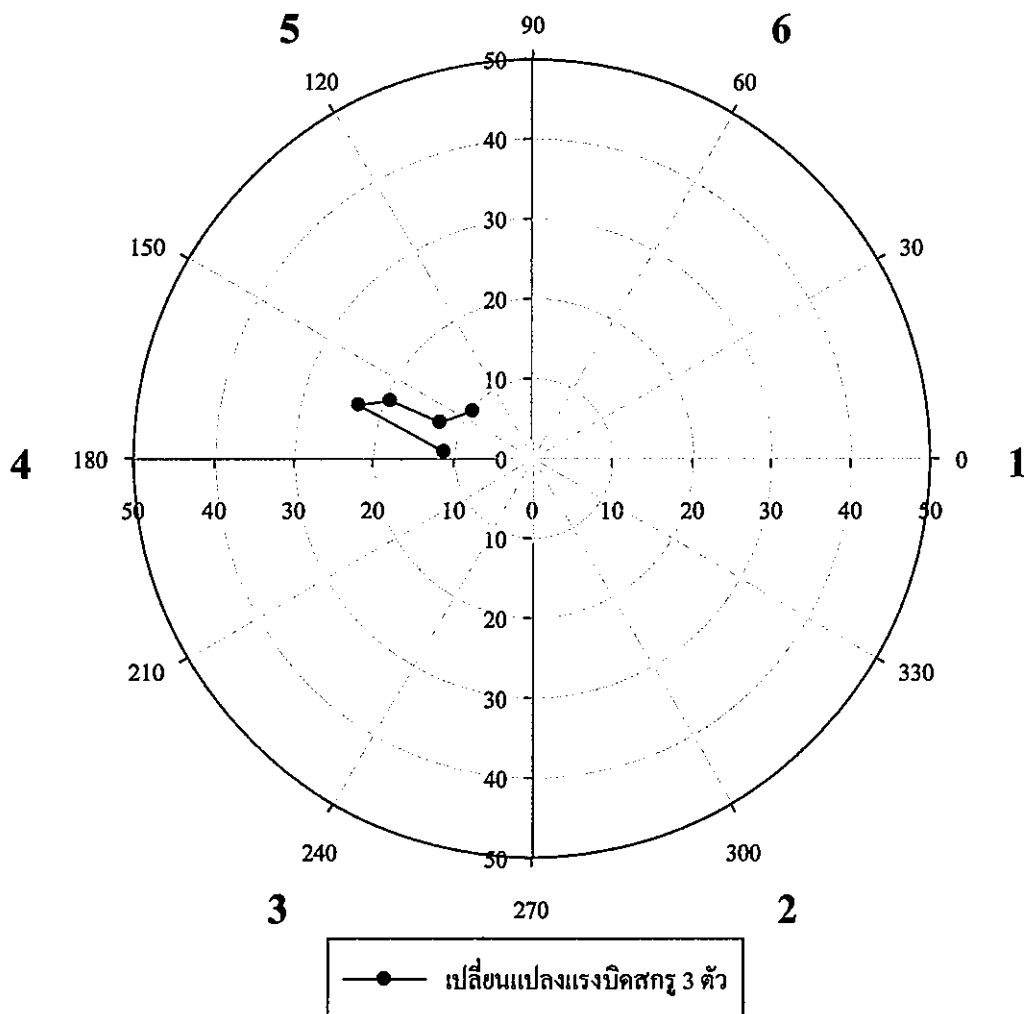


รูปที่ 5.7 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.8 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 4

กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 1,2,6

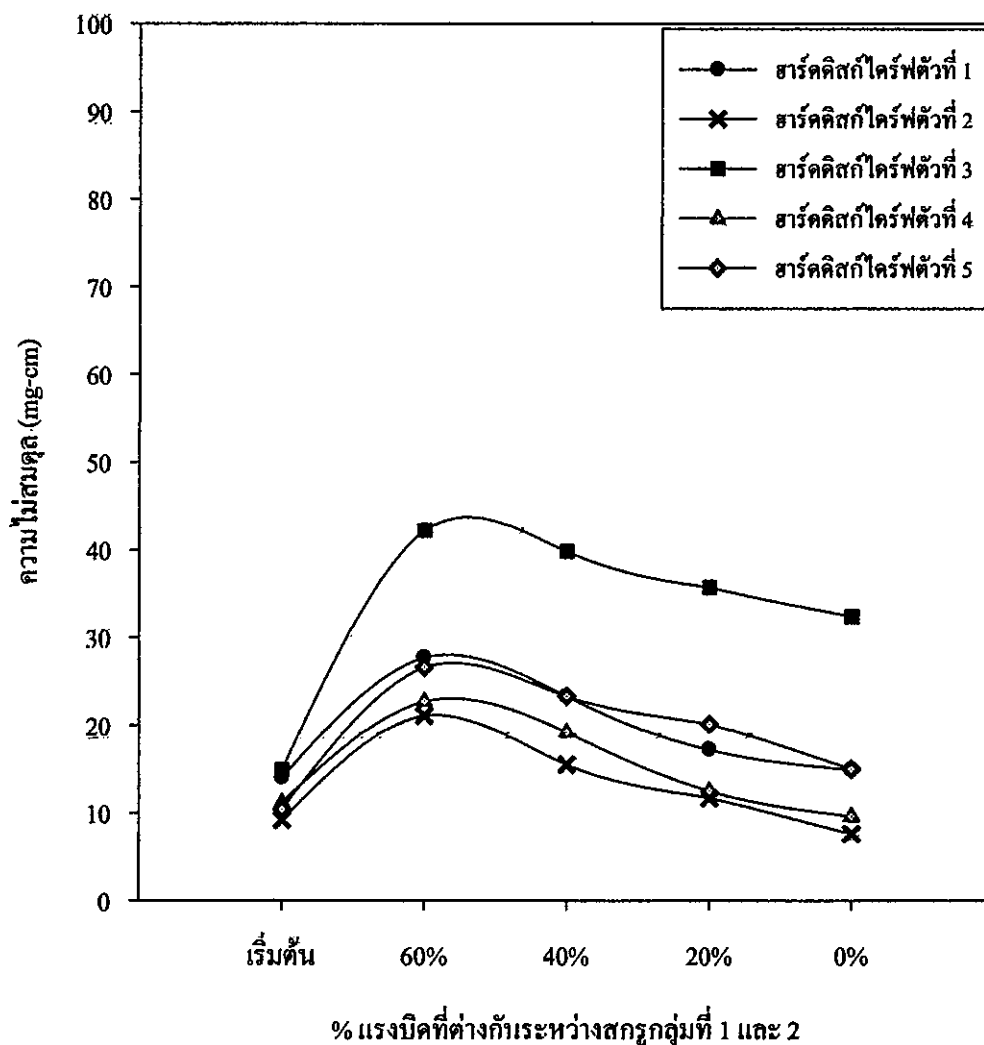
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	11.2	176
2. แรงบิดต่างกัน 60%	22.7	163
3. แรงบิดต่างกัน 40%	19.2	158
4. แรงบิดต่างกัน 20%	12.5	159
5. แรงบิดต่างกัน 0%	9.6	142



รูปที่ 5.8 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 5.9 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว

ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	14.0	9.2	14.9	11.2	10.4
2. แรงบิดต่างกัน 60%	27.7	21.1	42.2	22.7	26.6
3. แรงบิดต่างกัน 40%	23.3	15.5	39.8	19.2	23.3
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.2	11.7	35.7	12.5	20.1
5. แรงบิดต่างกัน 0%	14.9	7.6	32.4	9.6	15.0



รูปที่ 5.9 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

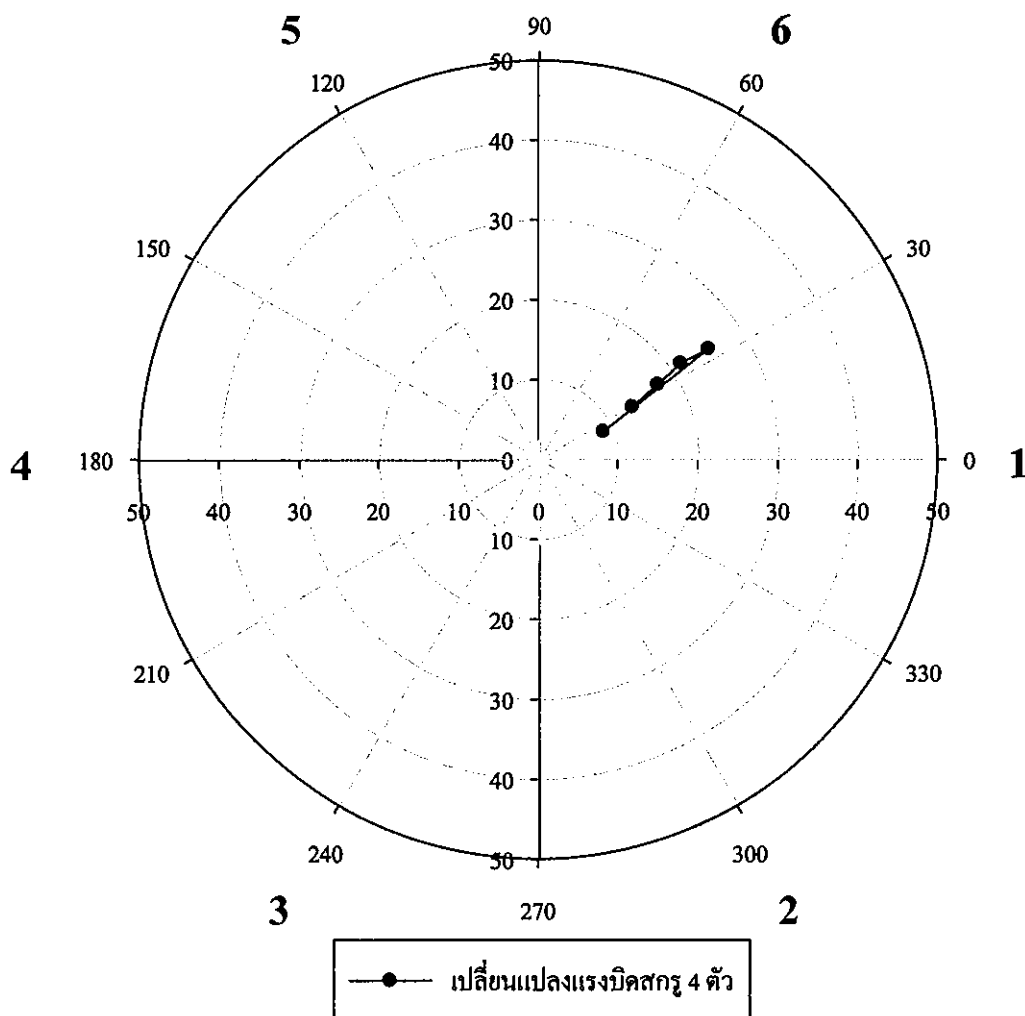
จากการทดลองในกรณีที่ 3 ซึ่งเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว (ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข) จะพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการทดลอง และเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% (ขั้นตอนที่ 2) ค่าความไม่สมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม จากนั้นเมื่อขันสกรูให้แรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลงใน ขั้นตอนต่อๆ มา ค่าความไม่สมดุลก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม ซึ่ง ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัวจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่มีบางกรณีที่ทิศทางของค่าความไม่สมดุลมีมุม เฟสต่างออกไปจากมุมเฟสเดิม เช่น กรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4 (ตารางที่ 5.8 และรูปที่ 5.8) จะเห็นว่าเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มจากแรงบิดต่างกัน 20% (ขั้นตอนที่ 4) ไปเป็นแรงบิดต่างกัน 0% (ขั้นตอนที่ 5) ค่าความไม่สมดุลลดลงจากเดิม 12.5 mg-cm เป็น 9.6 mg-cm แต่มุมเฟสของค่า ความไม่สมดุลเปลี่ยนไปจากเดิม 159 องศา เป็น 142 องศา ซึ่งเปลี่ยนไปถึง 17 องศา อาจ เนื่องมาจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูตัวที่ 1 และสกรูตัวที่ 6 มีค่ามากกว่าแรงบิดที่ขันสกรูตัวอื่นๆ ซึ่ง ทำให้แรงในสกรูตัวที่ 1 และแรงในสกรูตัวที่ 6 มีค่ามากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ด้วย จึงทำให้ความไม่ สมดุลมีค่าลดลงและมีทิศทางไปในทิศทางดังกล่าว แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ได้ คำนวณไว้ ค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว สามารถนำมาเขียนกราฟรวมกันได้ ดังตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.9

5.4.4 ผลการทดลองในกรณีที่ 4 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัว และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัว

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว โดยพิจารณามุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นเลือกกลุ่มสกรูที่อยู่ใน ทิศทางเดียวกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเป็นสกรูกลุ่มที่ 1 ซึ่งเลือกสกรูจำนวนสกรู 2 ตัวติดกัน โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 1 เป็น 100% และเลือกสกรูกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นสกรู ตัวที่เหลือและอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้ แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 2 เป็น 40% ในขั้นตอนที่ 2 และเพิ่มแรงบิดขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นตอนต่อๆ มา เพื่อให้แรงบิดระหว่างสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ตัวอย่างผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 5.10 และตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.10 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 1
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 1,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 2,3,4,5

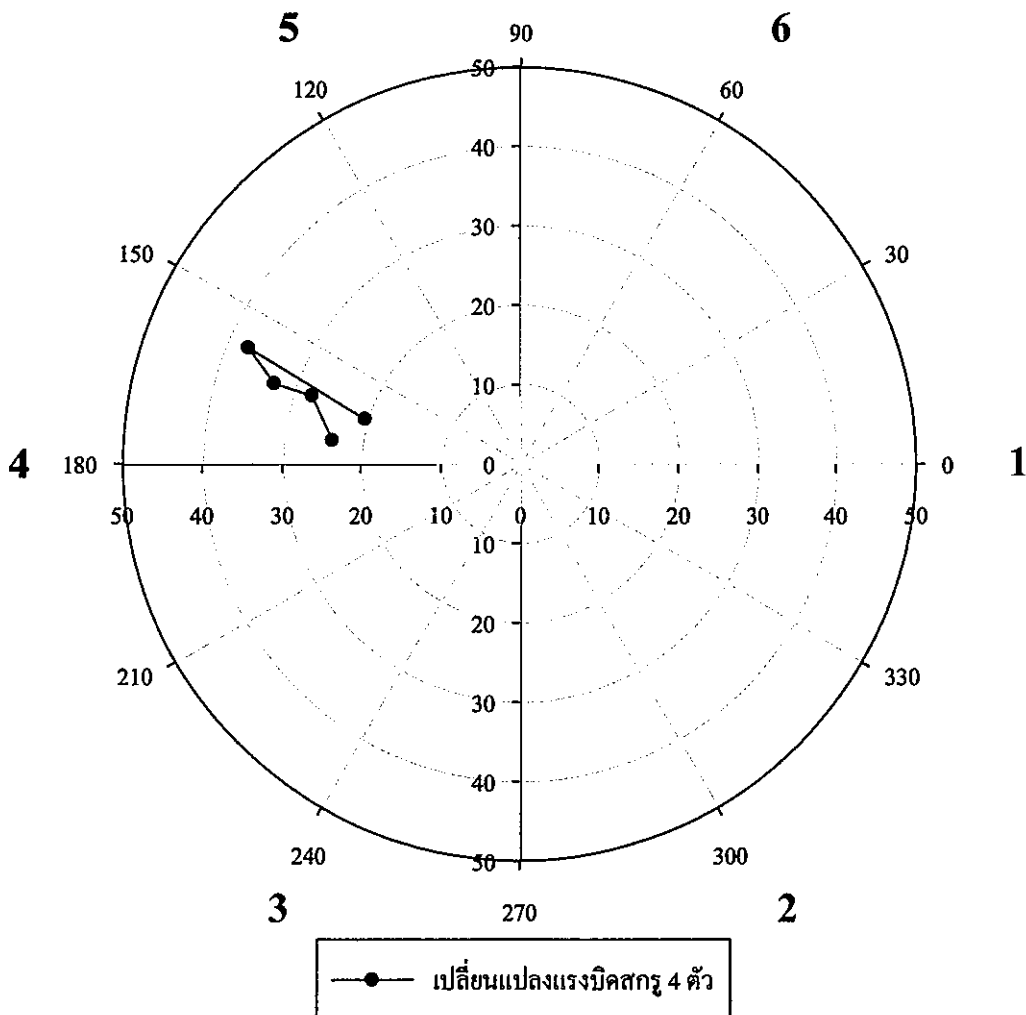
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	8.9	23
2. แรงบิดต่างกัน 60%	25.4	33
3. แรงบิดต่างกัน 40%	21.5	34
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.7	32
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.5	29



รูปที่ 5.10 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 1

ตารางที่ 5.11 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณี 4 ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 2
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,6

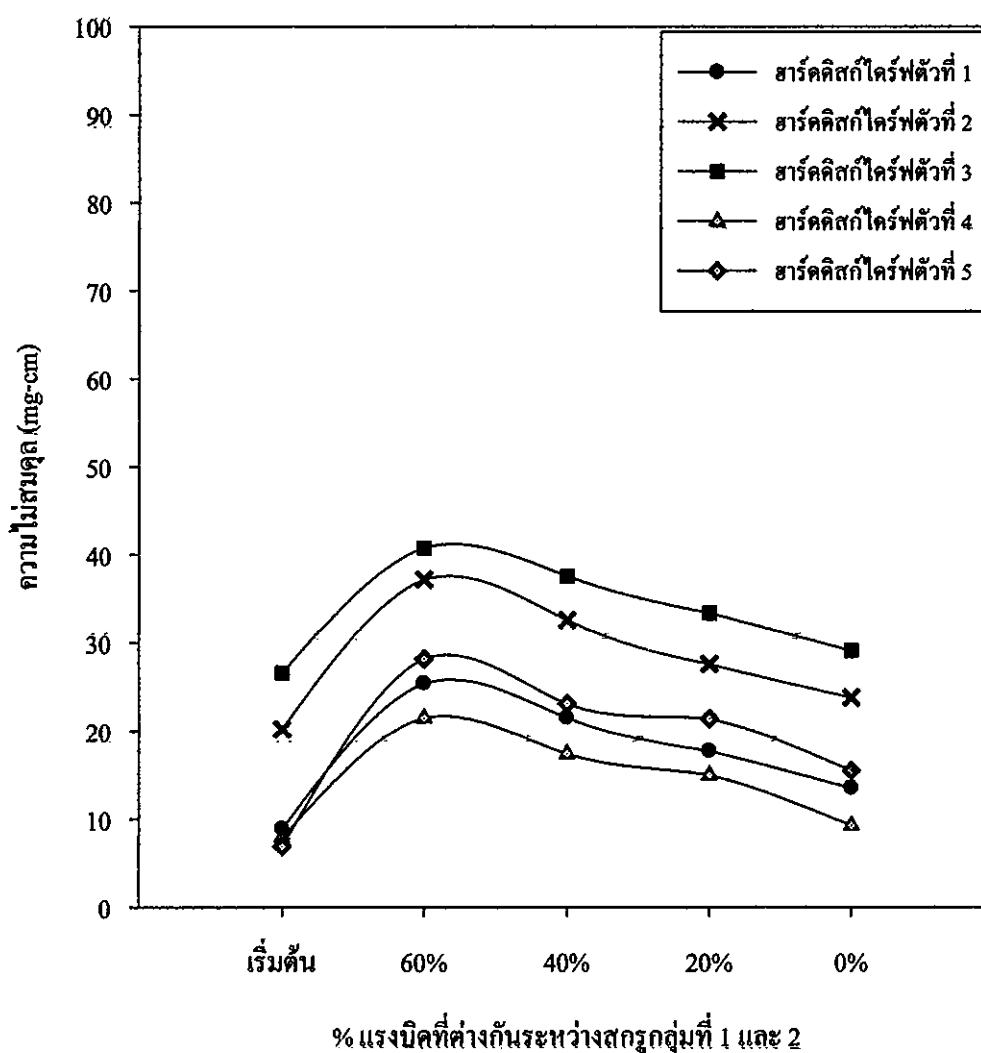
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	20.2	164
2. แรงบิดต่างกัน 60%	37.2	157
3. แรงบิดต่างกัน 40%	32.6	162
4. แรงบิดต่างกัน 20%	27.6	162
5. แรงบิดต่างกัน 0%	23.8	173



รูปที่ 5.11 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 2

ตารางที่ 5.12 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัว

ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	8.9	20.2	26.6	7.9	6.9
2. แรงบิดต่างกัน 60%	25.4	37.2	40.8	21.5	28.2
3. แรงบิดต่างกัน 40%	21.5	32.6	37.6	17.4	23.1
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.7	27.6	33.4	15.0	21.4
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.5	23.8	29.1	9.3	15.5



รูปที่ 5.12 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

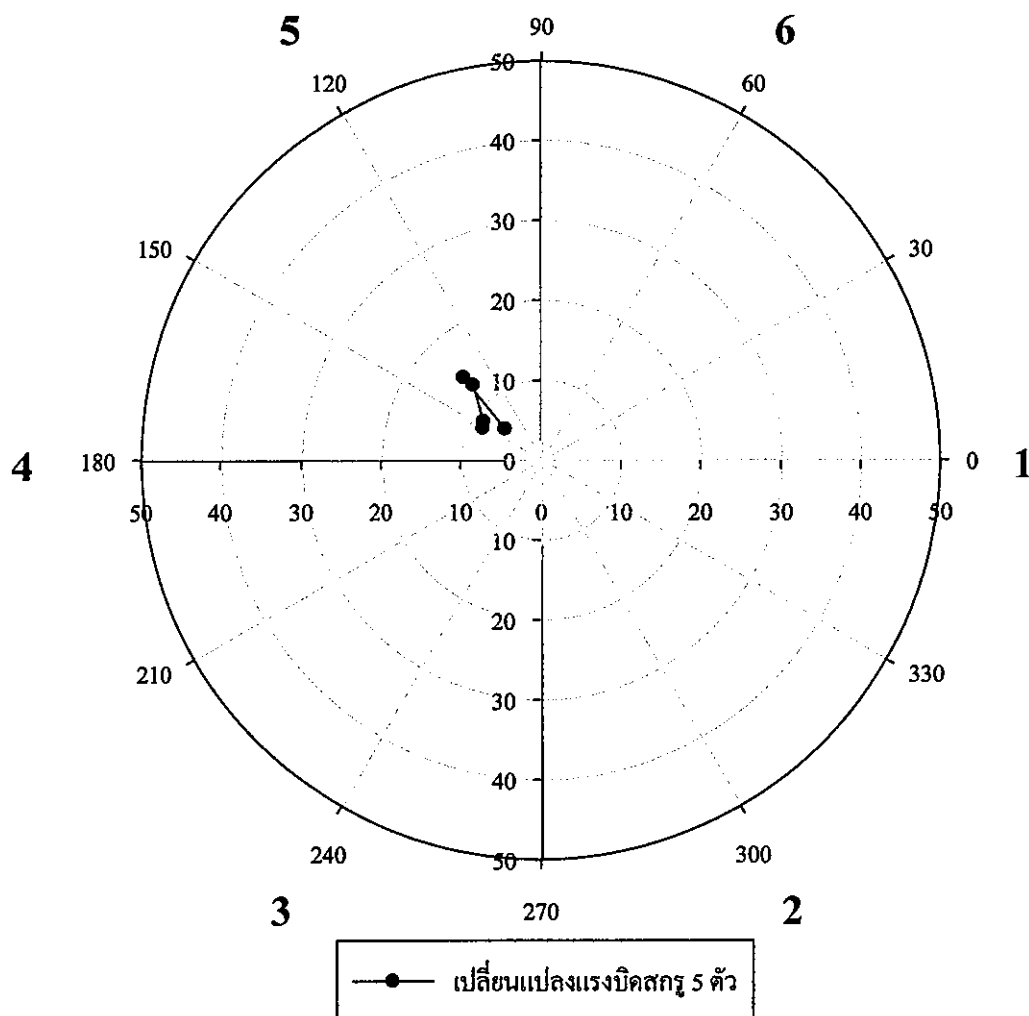
จากการทดลองในกรณีที่ 4 ซึ่งเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว (ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข) จะพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการทดลอง และเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% (ขั้นตอนที่ 2) ค่าความไม่สมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม จากนั้นเมื่อขันสกรูให้แรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลงในขั้นตอนต่อๆ มา ค่าความไม่สมดุลก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัวจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่มีบางกรณีที่ทิศทางของค่าความไม่สมดุลมีมุมเฟสต่างออกไปจากมุมเฟสเดิม เช่น กรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2 (ตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.11) จะเห็นว่าเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มจากแรงบิดต่างกัน 20% (ขั้นตอนที่ 4) ไปเป็นแรงบิดต่างกัน 0% (ขั้นตอนที่ 5) ค่าความไม่สมดุลลดลงจากเดิม 27.6 mg-cm เป็น 23.8 mg-cm แต่มุมเฟสของค่าความไม่สมดุลเปลี่ยนไปจากเดิม 162 องศา เป็น 173 องศา ซึ่งเปลี่ยนไปถึง 11 องศา อาจเนื่องมาจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูตัวที่ 2 และสกรูตัวที่ 3 มีค่ามากกว่าแรงบิดที่ขันสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้แรงในสกรูตัวที่ 2 และแรงในสกรูตัวที่ 3 มีค่ามากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ด้วย จึงทำให้ความไม่สมดุลมีค่าลดลงและมีทิศทางไปในทิศทางดังกล่าว แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ได้คาดการณ์ไว้ ค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว สามารถนำมาเขียนกราฟรวมกันได้ ดังตารางที่ 5.12 และรูปที่ 5.12

5.4.5 ผลการทดลองในกรณีที่ 5 สกรูกลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัว และสกรูกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัว

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว โดยพิจารณามุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นเลือกกลุ่มสกรูที่อยู่ในทิศทางเดียวกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นเป็นสกรูกลุ่มที่ 1 ซึ่งเลือกสกรูจำนวนสกรู 1 ตัวติดกัน โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 1 เป็น 100% และเลือกสกรูกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นสกรูตัวที่เหลือและอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับมุมเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้แรงบิดที่ขันสกรูกลุ่มที่ 2 เป็น 40% ในขั้นตอนที่ 2 และเพิ่มแรงบิดขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นตอนต่อๆ มา เพื่อให้แรงบิดระหว่างสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ตัวอย่างผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 5.13 และตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.13 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1
 กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,6

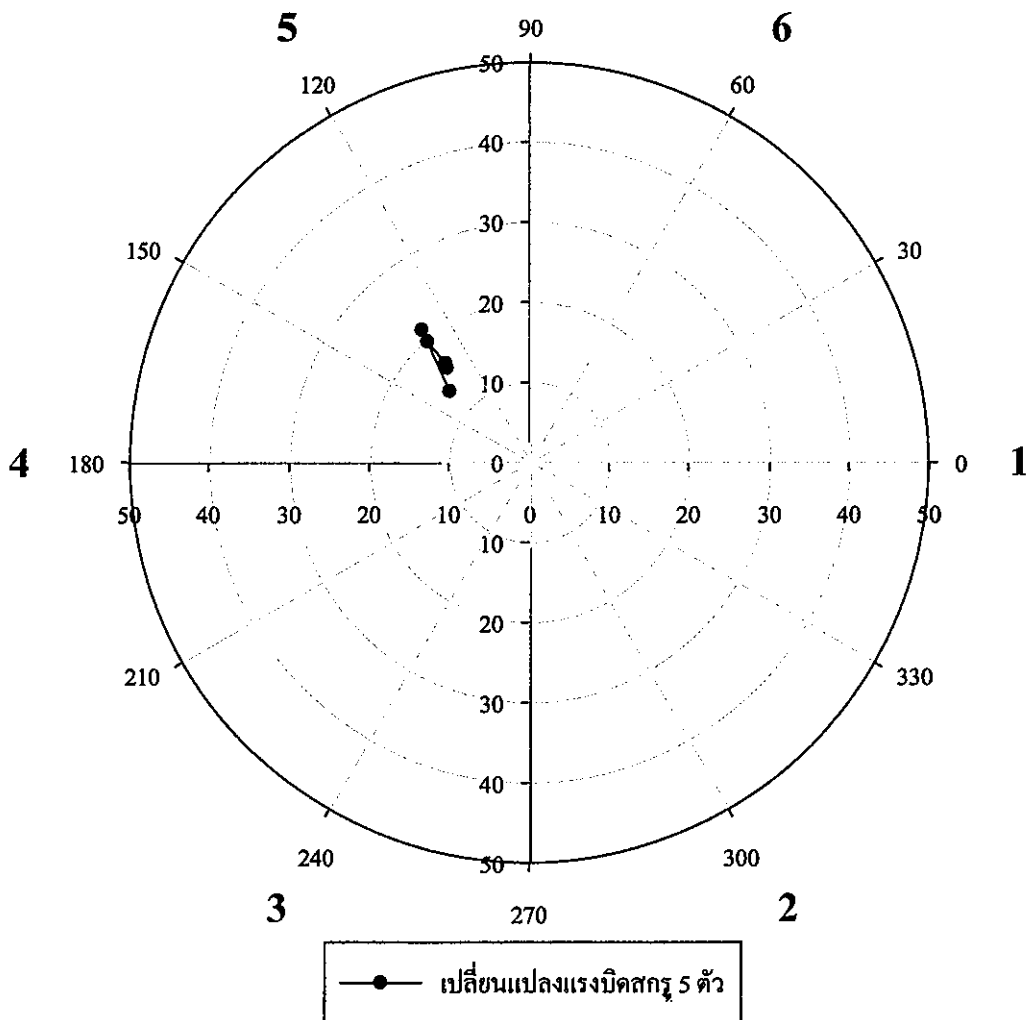
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	5.9	139
2. แรงบิดต่างกัน 60%	14.1	133
3. แรงบิดต่างกัน 40%	12.6	132
4. แรงบิดต่างกัน 20%	8.6	146
5. แรงบิดต่างกัน 0%	8.2	151



รูปที่ 5.13 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.14 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5
 กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,6

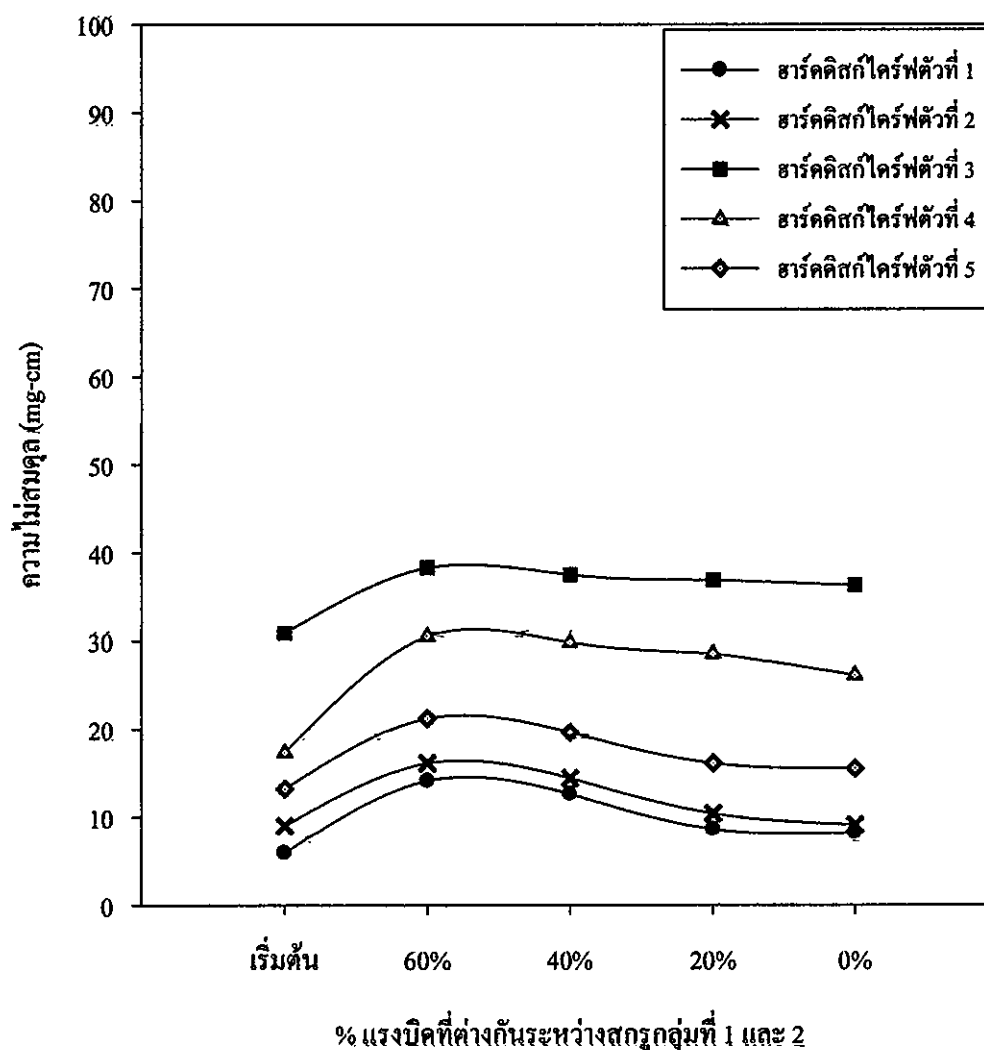
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	13.2	138
2. แรงบิดต่างกัน 60%	21.2	129
3. แรงบิดต่างกัน 40%	19.6	130
4. แรงบิดต่างกัน 20%	16.1	130
5. แรงบิดต่างกัน 0%	15.5	131



รูปที่ 5.14 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5

ตารางที่ 5.15 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัว

ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	5.9	9.0	30.9	17.3	13.2
2. แรงบิดต่างกัน 60%	14.1	16.1	38.3	30.5	21.2
3. แรงบิดต่างกัน 40%	12.6	14.4	37.5	29.8	19.6
4. แรงบิดต่างกัน 20%	8.6	10.4	36.9	28.5	16.1
5. แรงบิดต่างกัน 0%	8.2	9.1	36.3	26.1	15.5



รูปที่ 5.15 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

จากการทดลองในกรณีที่ 5 ซึ่งเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว (ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข) จะพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการทดลอง และเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มด้วยแรงบิดต่างกัน 60% (ขั้นตอนที่ 2) ค่าความไม่สมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม จากนั้นเมื่อขันสกรูให้แรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลงในขั้นตอนต่อๆ มา ค่าความไม่สมดุลก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย และมีทิศทางไปในทิศทางเดิม ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัวจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่มีบางกรณีที่ทิศทางของค่าความไม่สมดุลมีมุมเฟสต่างออกไปจากมุมเฟสเดิม เช่น กรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1 (ตารางที่ 5.13 และรูปที่ 5.13) จะเห็นว่าเมื่อขันสกรูทั้ง 2 กลุ่มจากแรงบิดต่างกัน 40% (ขั้นตอนที่ 3) ไปเป็นแรงบิดต่างกัน 20% (ขั้นตอนที่ 4) ค่าความไม่สมดุลลดลงจากเดิม 12.6 mg-cm เป็น 8.6 mg-cm แต่มุมเฟสของค่าความไม่สมดุลเปลี่ยนไปจากเดิม 132 องศา เป็น 146 องศา ซึ่งเปลี่ยนไปถึง 14 องศา อาจเนื่องมาจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูตัวที่ 2 และสกรูตัวที่ 3 มีค่ามากกว่าแรงบิดที่ขันสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้แรงในสกรูตัวที่ 2 และแรงในสกรูตัวที่ 3 มีค่ามากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ด้วย จึงทำให้ความไม่สมดุลมีค่าลดลงและมีทิศทางไปในทิศทางดังกล่าว แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ได้คาดการณ์ไว้ ค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว สามารถนำมาเขียนกราฟรวมกันได้ ดังตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.15

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการขันสกรู เมื่อขันสกรูในขั้นตอนที่ 2 ความไม่สมดุลก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสกรูทั้ง 2 กลุ่มมีแรงบิดต่างกัน 60 % เมื่อแรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลงในขั้นตอนต่อๆ มา ความไม่สมดุลก็จะลดลงด้วย ผลการทดลองส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายๆ กัน แต่มีผลการทดลองบางกรณีที่แตกต่างจากผลการทดลองอื่นๆ

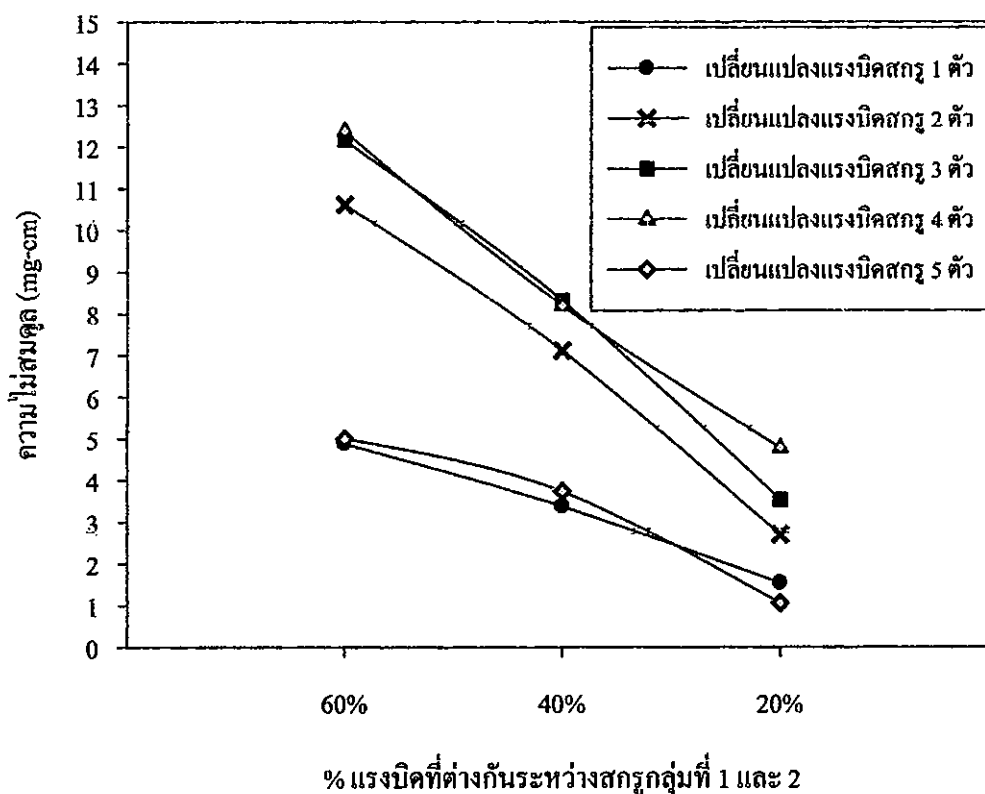
เมื่อพิจารณาค่าความไม่สมดุลในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นค่าความไม่สมดุลคงค้างมาจากขั้นตอนก่อนหน้าเปรียบเทียบกับค่าความไม่สมดุลในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งเป็นค่าความไม่สมดุลหลังจากขั้นตอนการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์จริง จะเห็นว่าค่าความไม่สมดุลในขั้นตอนที่ 5 ที่มีค่ามากกว่าค่าความสมดุลในขั้นตอนที่ 1 ตั้งแต่ 5 mg-cm ขึ้นไป มีมากถึง 40% ของผลการทดลอง นั้นแสดงว่าถึงแม้จะขันสกรูทุกตัวด้วยแรงบิดเท่ากัน แต่ก็ยังทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นจากเดิมได้ อาจเนื่องมาจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูแต่ละตัวมีค่าต่างกัน และหรือการขันสกรูทุกตัวด้วยแรงบิดเท่ากันแต่แรงของสกรูแต่ละตัวอาจไม่เท่ากัน

นำค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองการขันสกรูด้วยแรงบิดของสกรูแต่ละตัวต่างกัน (ค่าความไม่สมดุลในขั้นตอนที่ 2,3 และ 4) มาลบกับค่าความไม่สมดุลที่เกิดจากการขันสกรูด้วยแรงบิดที่เท่ากัน (ค่าความไม่สมดุลในขั้นตอนที่ 5) จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่

สมมูลที่เกิดจากภาระที่ต่างกันของสกรูทั้ง 2 กลุ่ม ดัง ได้แสดงตารางที่ 5.16 และนำไปเขียนกราฟ ดัง ได้แสดงในรูปที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่สมมูลจากการทดลอง

ภาระของสกรูทั้ง 2 กลุ่ม	ความไม่สมมูลจากการทดลอง (mg-cm)				
	จำนวนสกรูที่เปลี่ยนแปลงแรงบิด				
	1 ตัว	2 ตัว	3 ตัว	4 ตัว	5 ตัว
แรงบิดต่างกัน 60%	4.880	10.620	12.160	12.380	5.000
แรงบิดต่างกัน 40%	3.380	7.120	8.320	8.200	3.740
แรงบิดต่างกัน 20%	1.540	2.700	3.540	4.780	1.060



รูปที่ 5.16 ค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่สมมูลจากการทดลอง

จากตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.16 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของความไม่สมมูลในทุกกรณีจะมีลักษณะคล้ายกันเมื่อสกรูกลุ่มที่ 1 และสกรูกลุ่มที่ 2 มีแรงบิดแตกต่างกัน 60% จะมีค่าความไม่สมมูลมากที่สุดและเมื่อแรงบิดของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ความไม่สมมูลก็จะลดลงด้วย

เช่นกัน ซึ่งในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว เมื่อสกรูกลุ่มที่ 1 และสกรูกลุ่มที่ 2 มีแรงบิดแตกต่างกัน 60% จะมีค่าความไม่สมดุลมากที่สุดถึง 12.380 mg-cm และรองลงมาก็คือกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัวซึ่งใกล้เคียงกับกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว และต่อมาก็คือกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัวและน้อยที่สุดก็คือกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 และ 5 ตัว และทั้ง 2 กรณีก็จะมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

ผลการทดลองหาความไม่สมดุลดังกล่าวนี้ได้นำมาแสดงให้เห็นแล้วว่าแรงบิดของสกรูแต่ละตัวหรืออีกนัยหนึ่งคือแรงในสกรูแต่ละตัวมีค่าต่างกันทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นได้

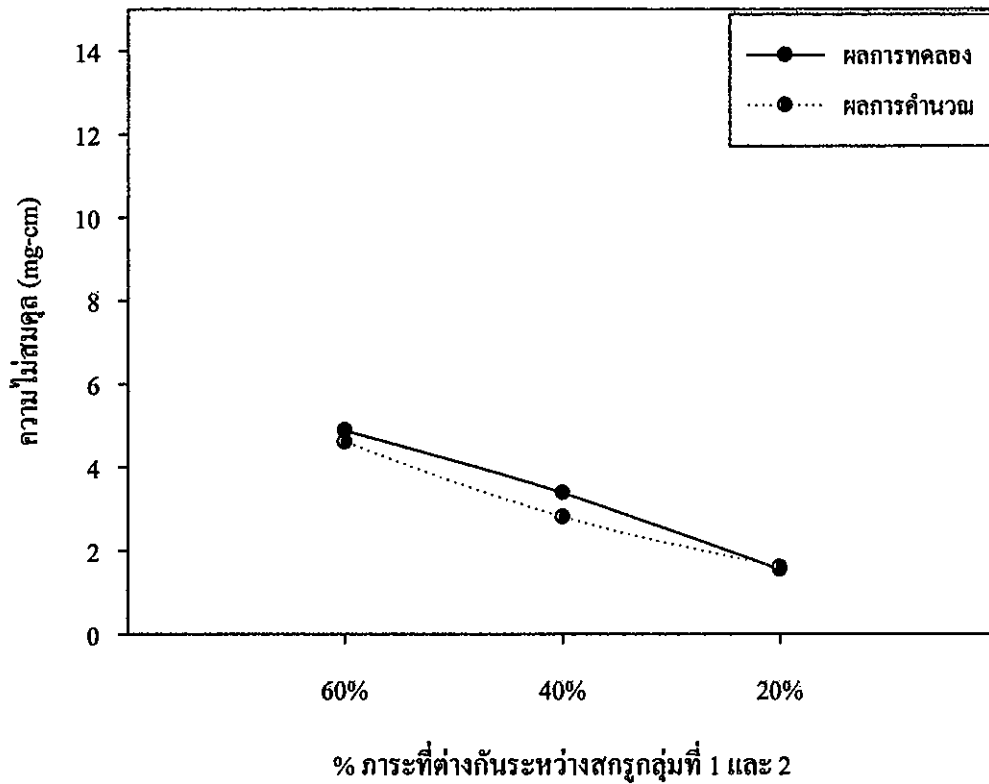
5.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณ

นำผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกันดังได้แสดงในตารางที่ 5.17 และรูปที่ 5.17 ถึง 5.21

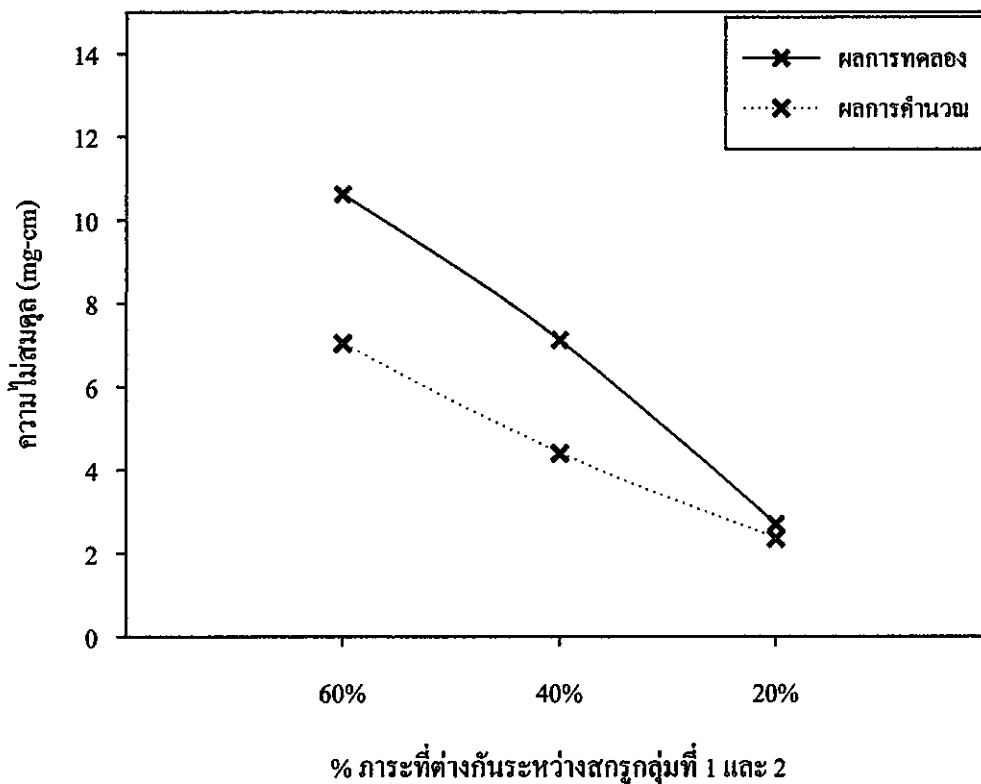
ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลต่างของความไม่สมดุล (mg-cm)

ภาวะสกรู ทั้ง 2 กลุ่ม	จำนวนสกรูที่เปลี่ยนแปลงภาวะ									
	1 ตัว		2 ตัว		3 ตัว		4 ตัว		5 ตัว	
	ท	ค	ท	ค	ท	ค	ท	ค	ท	ค
ต่างกัน 60%	4.880	4.600	10.620	7.041	12.160	7.565	12.380	7.000	5.000	4.537
ต่างกัน 40%	3.380	2.800	7.120	4.403	8.320	5.010	8.200	4.432	3.740	2.858
ต่างกัน 20%	1.540	1.598	2.700	2.352	3.540	2.697	4.780	2.307	1.060	1.618

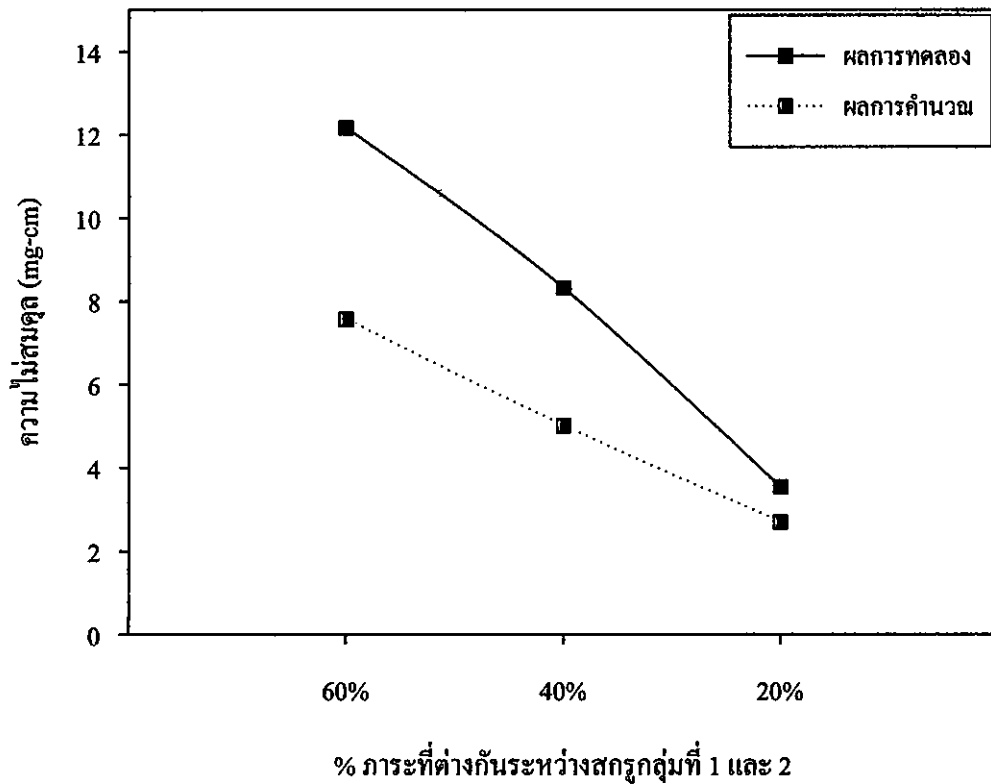
***หมายเหตุ “ท” หมายถึง ผลการทดลอง, “ค” หมายถึง ผลการคำนวณ



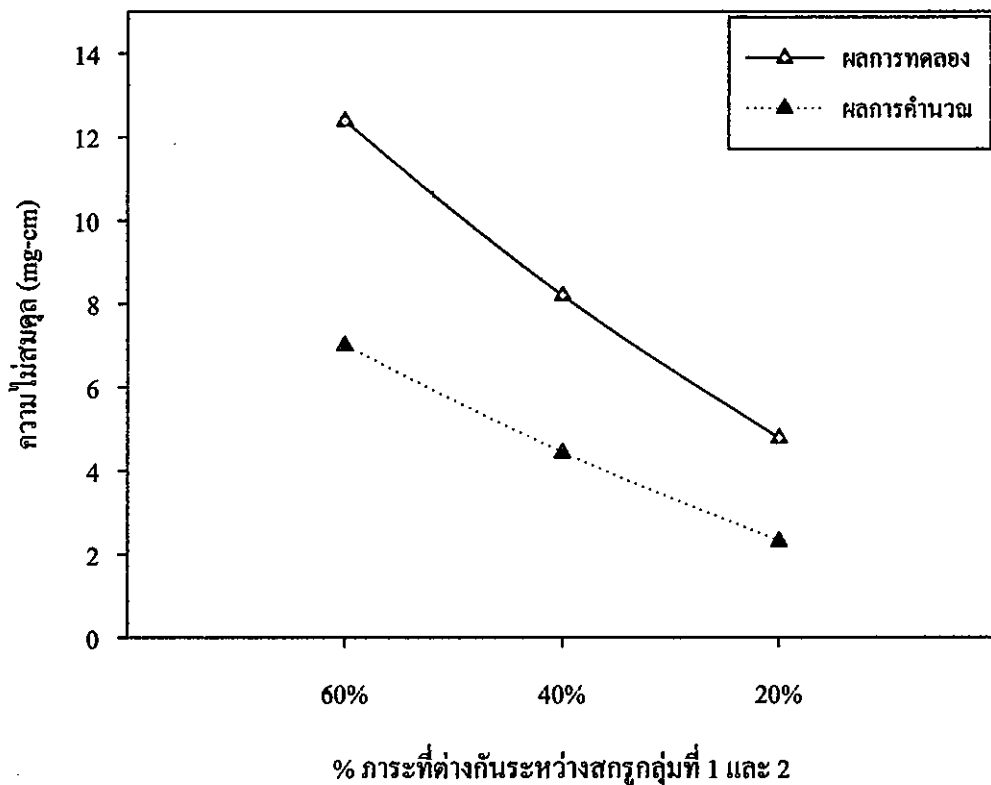
รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงภาวะสกรู 1 ตัว



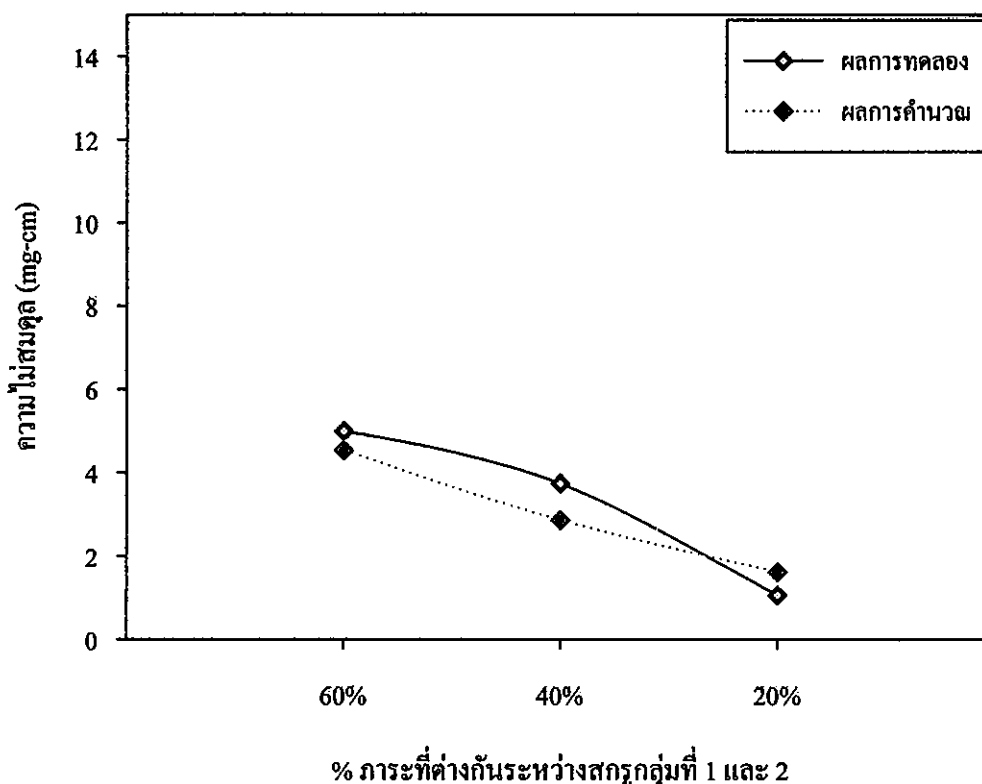
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงภาวะสกรู 2 ตัว



รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงภาวะสกรู 3 ตัว



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงภาวะสกรู 4 ตัว



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบความไม่สมดุลจากกรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงภาระสกรู 5 ตัว

จากการเปรียบเทียบความไม่สมดุลจากผลการทดลองและผลการคำนวณ จะเห็นว่าผลการทดลองและผลการคำนวณมีแนวโน้มของค่าความไม่สมดุลเป็นไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกัน ในกรณีที่ 1 (รูปที่ 5.17) ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าความไม่สมดุลใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความไม่สมดุลคลาดเคลื่อนกันมากที่สุดเพียง 0.580 mg-cm (คลาดเคลื่อน 17%) ที่ภาระต่างกัน 40% ในกรณีที่ 2 (รูปที่ 5.18) ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าความไม่สมดุลสอดคล้องกัน ซึ่งค่าความไม่สมดุลคลาดเคลื่อนกันมากที่สุด 3.579 mg-cm (คลาดเคลื่อน 33%) ที่ภาระต่างกัน 60% ในกรณีที่ 3 (รูปที่ 5.19) ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าความไม่สมดุลสอดคล้องกัน ซึ่งค่าความไม่สมดุลคลาดเคลื่อนกันมากที่สุด 4.595 mg-cm (คลาดเคลื่อน 37%) ที่ภาระต่างกัน 60% ในกรณีที่ 4 (รูปที่ 5.20) ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าความไม่สมดุลสอดคล้องกัน ซึ่งค่าความไม่สมดุลคลาดเคลื่อนกันมากที่สุด 5.380 mg-cm (คลาดเคลื่อน 43%) ที่ภาระต่างกัน 60% ในกรณีที่ 5 (รูปที่ 5.21) ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าความไม่สมดุลใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความไม่สมดุลคลาดเคลื่อนกันมากที่สุดเพียง 0.882 mg-cm (คลาดเคลื่อน 23%) ที่ภาระต่างกัน 40% ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ค่าคุณสมบัติของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใช้ในการคำนวณ

ผลการคำนวณและผลการทดลองหาความไม่สมดุลดังกล่าวนั้น ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ภาระของสกรูแต่ละตัวหรืออีกนัยหนึ่งคือแรงในสกรูแต่ละตัวมีค่าต่างกันส่งผลให้จุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นดิสก์เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลจึงทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นได้

ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการขันสกรูในกรณีที่ได้พิจารณานี้สามารถแก้ไขให้ความไม่สมดุลลดลงได้โดยขันสกรูด้านตรงข้ามเพิ่ม ซึ่งจะสังเกตได้จากผลการทดลอง เช่น เมื่อพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นในทิศทางของสกรูกลุ่มที่ 1 ก็จะต้องขันสกรูกลุ่มที่ 2 เพิ่มเพื่อให้แรงบิดของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลงทำให้ความไม่สมดุลนั้นลดลงตามไปด้วย

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลและสรุปผล

6.1 วิเคราะห์ผล

จะเห็นว่าผลการทดลองและผลการคำนวณมีแนวโน้มของค่าความไม่สมดุลเป็นไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกัน ซึ่งยืนยันได้ว่าเมื่อแรงในสกรูแต่ละตัวมีค่าต่างกันทั้งเนื่องจากแรงบิดจริงที่ขันสกรูแต่ละตัวไม่เท่ากันและความเสียดทานของสกรูแต่ละตัวไม่เท่ากันก็ส่งผลทำให้จุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นดิสก์เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลเป็นสาเหตุทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นได้ ค่าความไม่สมดุลที่มากที่สุดเกิดขึ้นจากการขันสกรูด้วยภาระของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันมากที่สุด 60% และค่าความไม่สมดุลจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อภาระของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง การคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 43% ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ค่าคุณสมบัติของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใช้ในการคำนวณ

ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการขันสกรูในกรณีที่ได้พิจารณานี้สามารถแก้ไขให้ความไม่สมดุลลดลงได้โดยขันสกรูด้านตรงข้ามเพิ่ม ซึ่งจะสังเกตได้จากผลการทดลอง เช่น เมื่อพบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นในทิศทางของสกรูกลุ่มที่ 1 ก็จะต้องขันสกรูกลุ่มที่ 2 เพิ่มเพื่อให้แรงบิดของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลงทำให้ความไม่สมดุลนั้นลดลงตามไปด้วย

6.2 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการคำนวณและทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลเนื่องจากการขันสกรู พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจนนำไปสู่การหาวิธีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความไม่สมดุลลง จากการคำนวณและทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. แรงของสกรูแต่ละตัวมีผลต่อจุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นดิสก์ ซึ่งจุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นดิสก์จะเคลื่อนตัวไปในทิศ ทางของสกรูตัวที่ได้รับแรงมากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นในทิศ ทางของสกรูตัวที่ได้รับแรงมาก

2. ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการขันสกรูในกรณีที่ได้พิจารณานี้สามารถแก้ไขให้ความไม่สมดุลลดลงได้โดยขันสกรูด้านตรงข้ามเพิ่ม

3. ผลการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 43% แต่สามารถใช้งานได้จริง พฤติกรรมการเกิดความไม่สมดุลได้ เพราะว่าผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

บรรณานุกรม

- [1] B. Hredzak, and G. Guo, "Investigation of the feasibility of active balancing of hard disk drives," *Mechatronics*, Vol.14, pp. 853–859, 2004.
- [2] จูติมา จินตนาวัน, "การสันสะเทือนทางกลของระบบคอมพิวเตอร์ Hard Disk Drives," *วารสารสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย ปีที่ 1 ฉบับที่ 1* หน้า 54-60 มีนาคม 2544.
- [3] T. H. Lambert, "Effect of Variation in the Screw Thread Coefficient of Friction on Clamping Force of Bolted Connection," *J. Mech Eng. Sci.*4, pp. 401, 1962.
- [4] R. L. Noton, *Machine Design An Integrated Approach Second Edition*. Prentice-Hall International,
- [5] S. Lim, "Finite Element Analysis of Flexural Vibrations in Hard Disk Drive Spindle Systems," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 233, No. 4, pp. 601-616, 2000.
- [6] ชิต เหล่าวัฒนา และ ธีรพงศ์ วุฒิกิจ, "การปรับปรุงคุณภาพการวัดความถี่สะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์โดยผ่านแนวทางจิกส์จิกม่า" *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2544*.
- [7] G. H. Jang, S. H. Lee, and M. S. Jung, "Free Vibration Analysis of A Spinning Flexible Disk-Spindle System Supported by Ball Bearing and Flexible Shaft Using The Finite Element Method and Substructure Synthesis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251, No. 1, pp. 59-78, 2002.
- [8] C. W. Tseng, J. Y. Shen, and I. Y. Shen, "Vibration of Rotating-Shaft HDD Spindle Motors With Flexible Stationary," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 2 pp. 794-799, Mar 2003.
- [9] X. D. Xu, H. P. Lee, and C. Lu, "Numerical study on energy transmission for rotating hard disk systems by structural intensity technique," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 639-652, 2004.
- [10] J. Y. Shen, C. W. Tseng, and I. Y. Shen, "Vibration of rotating disk/spindle systems with flexible housing/stator assemblies," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 271, pp. 725-756, 2004.

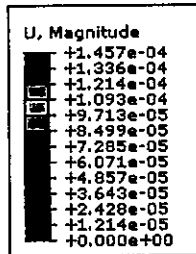
- [11] อภิรัฐ ศิลปะพินิจ, บุรินทร์ โพธิ์ชัย, ปาจารย์ ถาวรล้ำเลิศ และ นกคณัช อาชวาคม, “การศึกษาการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงรบกวนของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 วันที่ 17 – 19 ตุลาคม 2549.
- [12] N. Tandon, V. V. P. Rao, and V. P. Agrawal, “Vibration and noise analysis of computer hard disk drives,” *Measurement*, Vol. 39, pp. 16-25, 2006.
- [13] Y. Yan, F. Gao, and F. F. Yap, “Numerical model of spindle/disks assembly–shaft–housing system for vibro-acoustic analysis of HDD in idle mode,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 438-462, 2006.
- [14] J. P. Yang, and S. X. Chen, “Vibration predictions and verifications of disk drivespindle system with ball bearings,” *Computers and Structures*, Vol. 80, pp. 1409-1418, 2002.
- [15] L. M. Xu, and N. Guo, “Modal Testing and Finite Element Modelling of Subsystem in Hard Disk Drive,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 4, pp. 747-764, 2003.
- [16] C. Siebenhaar, “Precise adjustment method using stroke impulse and friction,” *Precision Engineering*, Vol. 28, pp. 194-203, 2004.
- [17] N. Ajavakom, T. Jintanawan, P. Singhatanadgid, and P. Sripakagorn, “On investigation of Vibro - Acoustics of FDB spindle motors for hard disk drives,” *Microsyst Technol*, Vol. 13, pp. 1281-1287, 2007.
- [18] เศษ พุทธเจริญทอง, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อส่งเสริมกรุงเทพ, 2548.
- [19] ปราโมทย์ เศษอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [20] พร้อมเลิศ หล่อวิจิตร, ฝา HardDisk. กรุงเทพฯ : โปรวิชั่น, 2545.
- [21] ประดิษฐ์ หมุ่มเมืองสอง, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2550.
- [22] V. Wowk, *Machinery Vibration : Balancing*. McGraw-Hill, 1994.
- [23] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, การออกแบบเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2545.
- [24] ชิกเลย์, โจเซฟ เอควาร์ด, การออกแบบเครื่องจักรกล 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ที่อป, 2548.
- [25] จำรูญ ตันคพิศาลกุล, การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 2. กรุงเทพฯ : ว. เพ็ชรสกุล, 2542.

ภาคผนวก

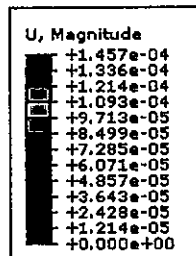
ภาคผนวก ก.
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง

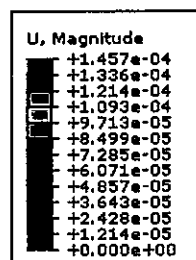
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการเสียดรูปและการเคลื่อนตัวของชุดแผ่นคิส์ทั้ง 5 กรณีได้แสดงในรูปที่ 1.1 ถึง 1.30



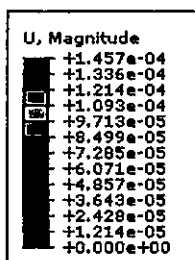
รูปที่ 1.1 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



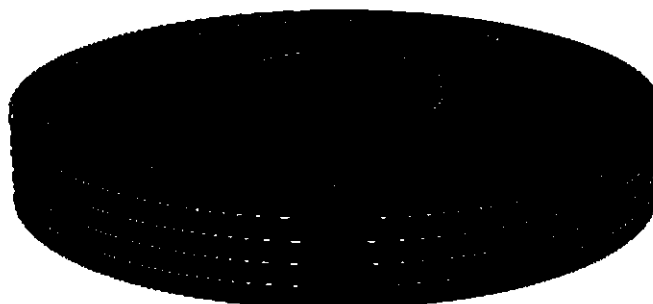
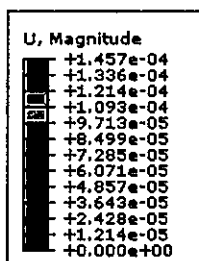
รูปที่ 1.2 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 50 %



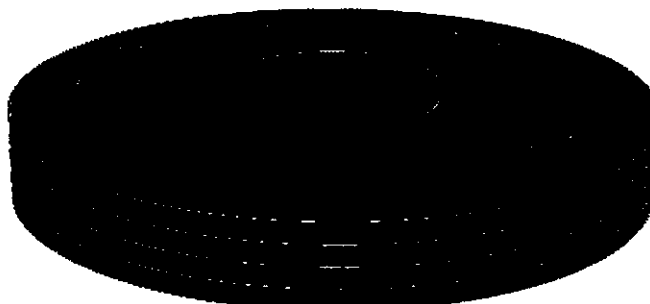
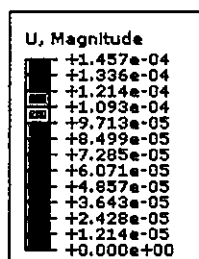
รูปที่ 1.3 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



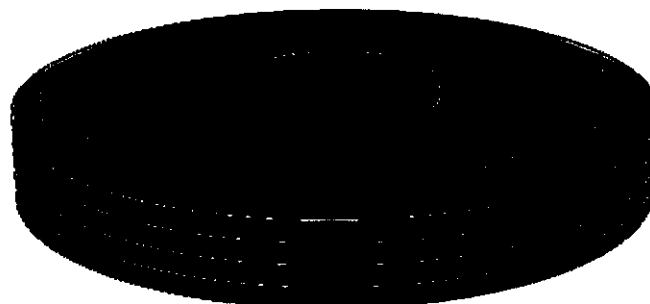
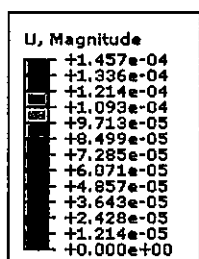
รูปที่ 1.4 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 30 %



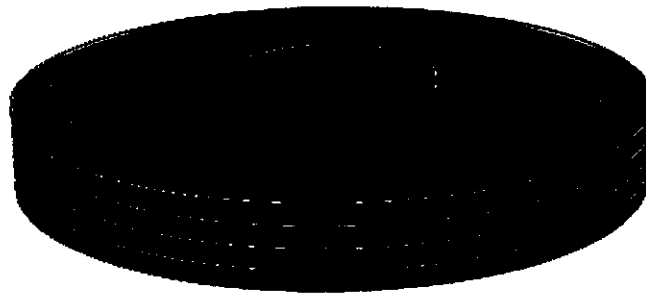
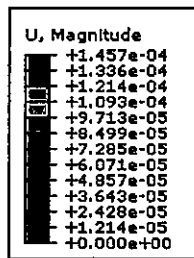
รูปที่ 1.5 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



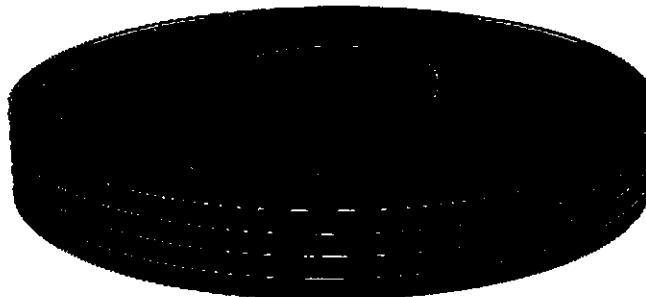
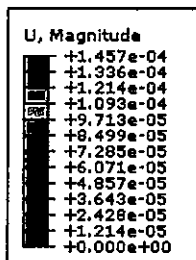
รูปที่ 1.6 กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 1 ตัว ความดันแตกต่างกัน 10 %



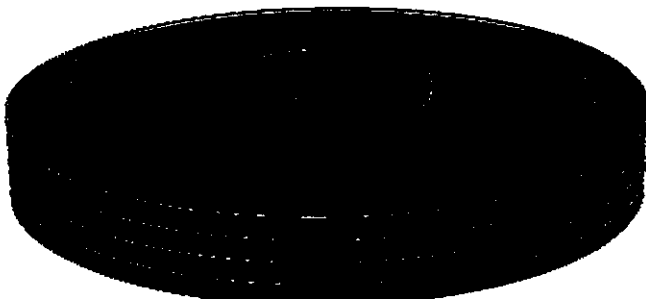
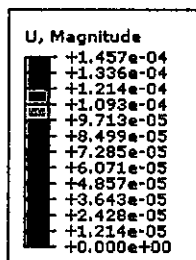
รูปที่ 1.7 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



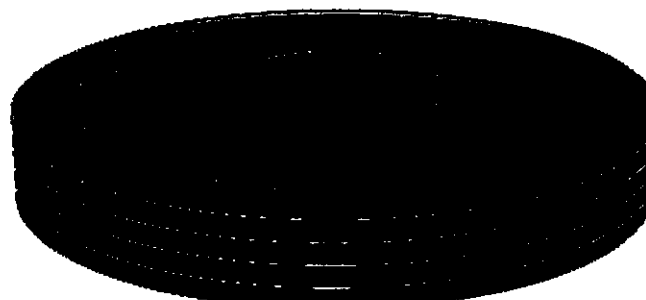
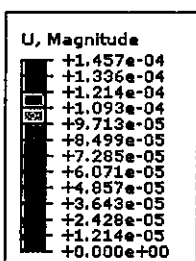
รูปที่ 1.8 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความค้ำสกรู 2 ตัว ความค้ำแตกต่างกัน 50 %



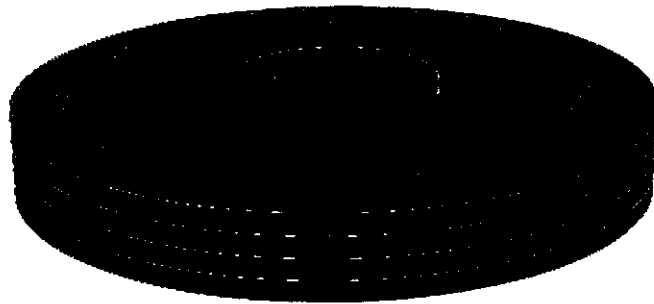
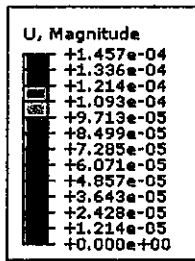
รูปที่ 1.9 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความค้ำสกรู 2 ตัว ความค้ำแตกต่างกัน 40 %



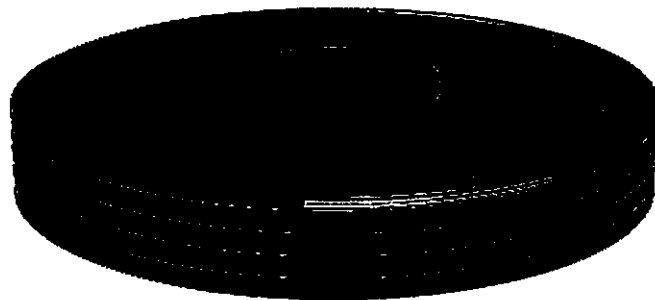
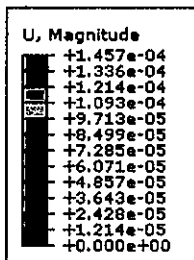
รูปที่ 1.10 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความค้ำสกรู 2 ตัว ความค้ำแตกต่างกัน 30 %



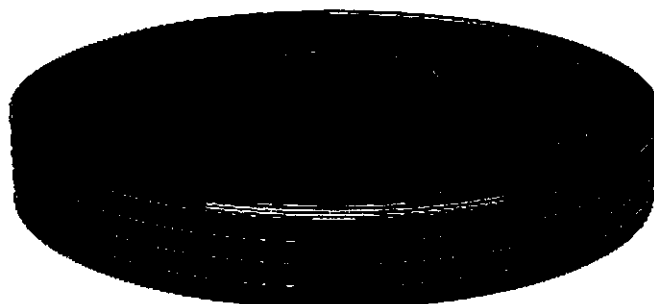
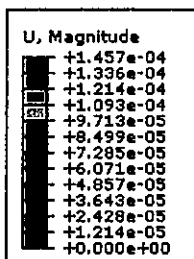
รูปที่ 1.11 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความค้ำสกรู 2 ตัว ความค้ำแตกต่างกัน 20 %



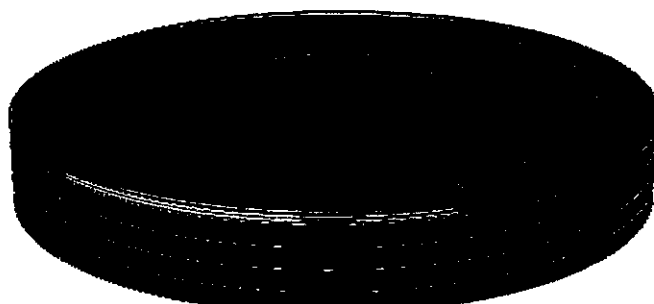
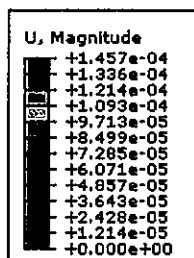
รูปที่ 1.12 กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 2 ตัว ความดันแตกต่างกัน 10 %



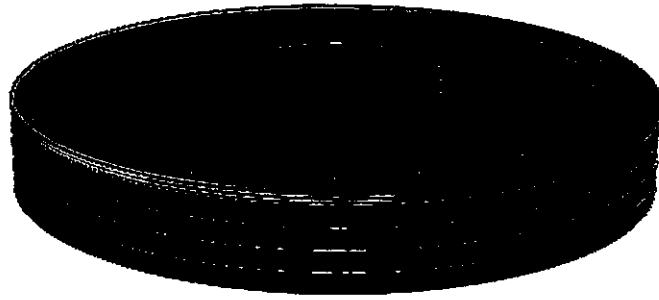
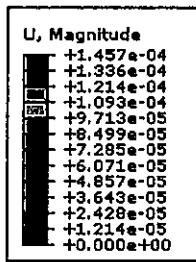
รูปที่ 1.13 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



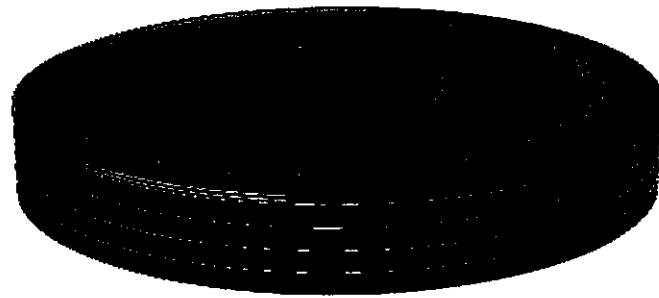
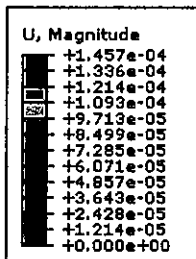
รูปที่ 1.14 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 50 %



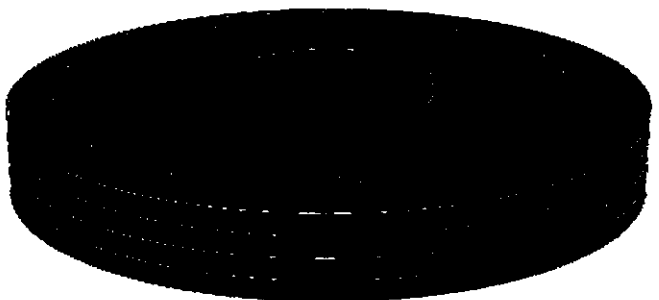
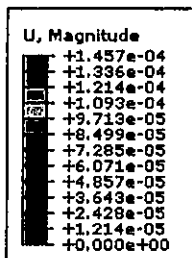
รูปที่ 1.15 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



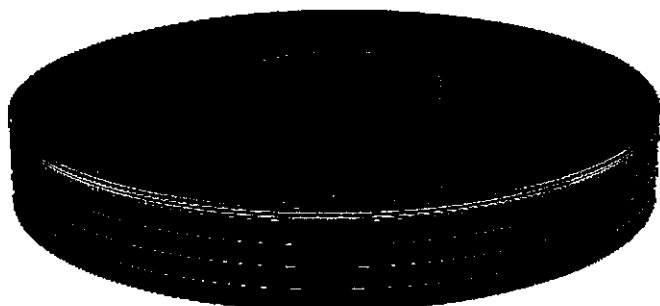
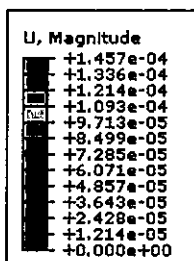
รูปที่ 1.16 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 30 %



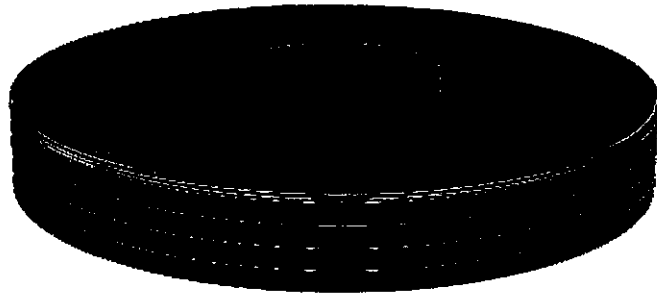
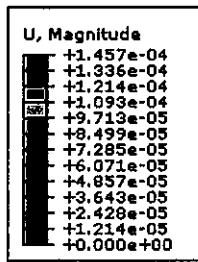
รูปที่ 1.17 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



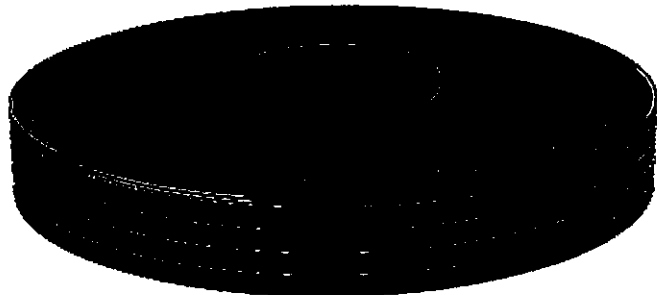
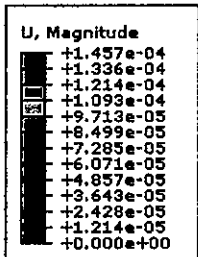
รูปที่ 1.18 กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 3 ตัว ความดันแตกต่างกัน 10 %



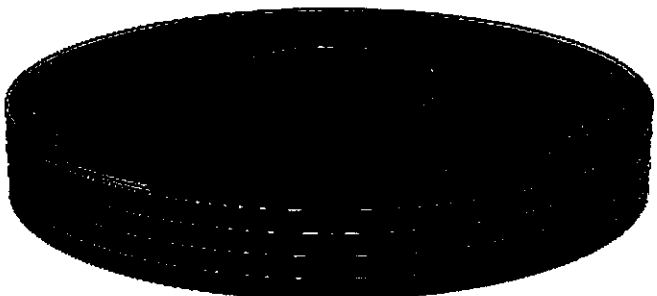
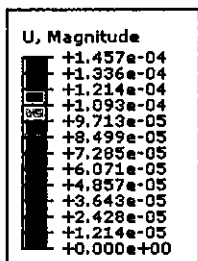
รูปที่ 1.19 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



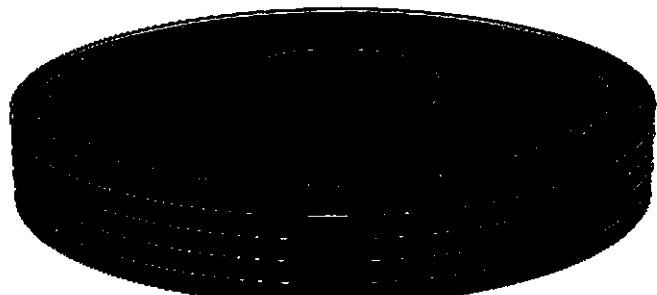
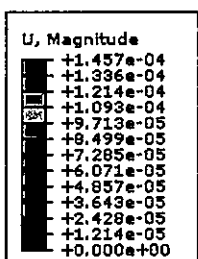
รูปที่ 1.20 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 50 %



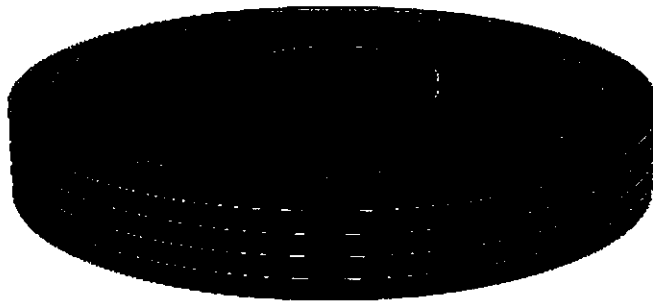
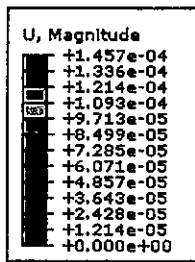
รูปที่ 1.21 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



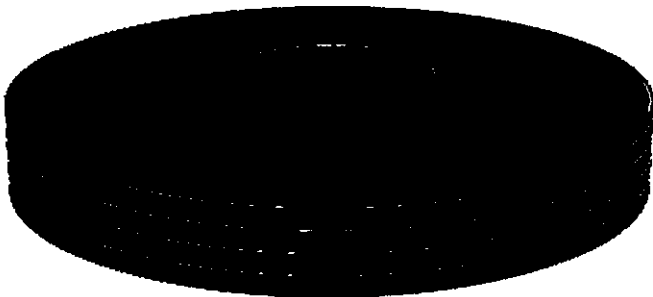
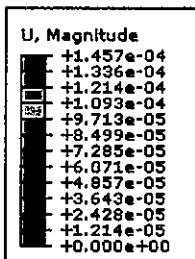
รูปที่ 1.22 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 30 %



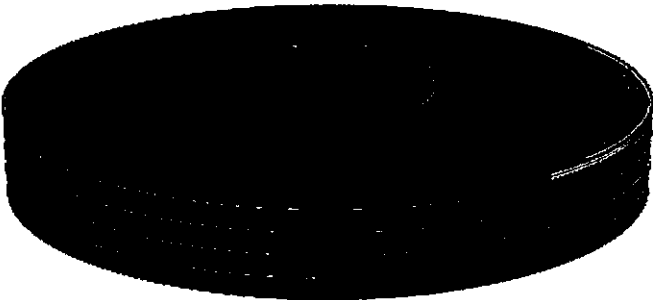
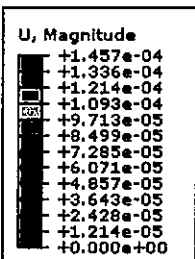
รูปที่ 1.23 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



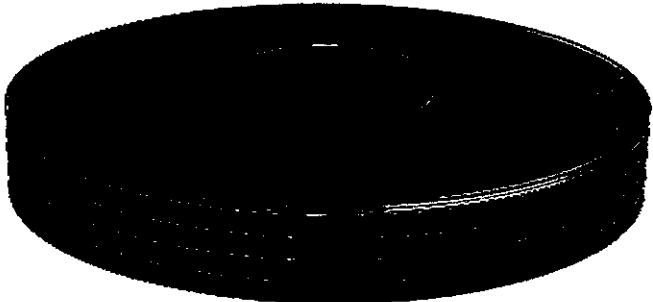
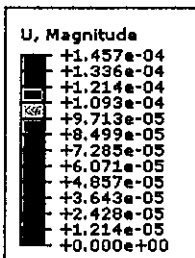
รูปที่ 1.24 กรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 4 ตัว ความดันแตกต่างกัน 10 %



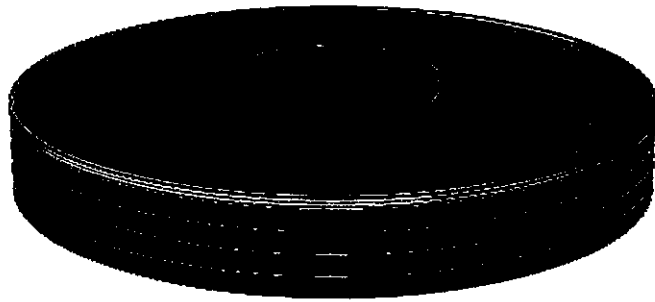
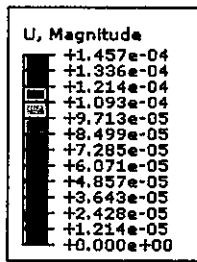
รูปที่ 1.25 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 60 %



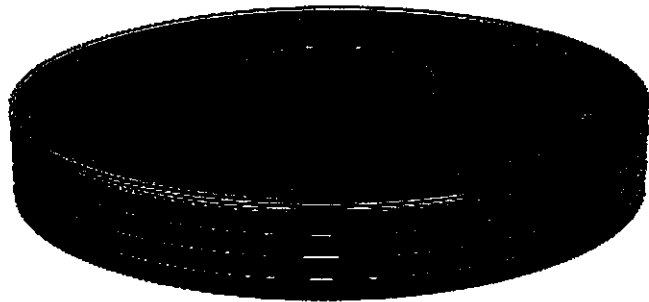
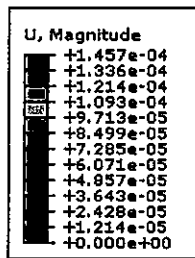
รูปที่ 1.26 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 50 %



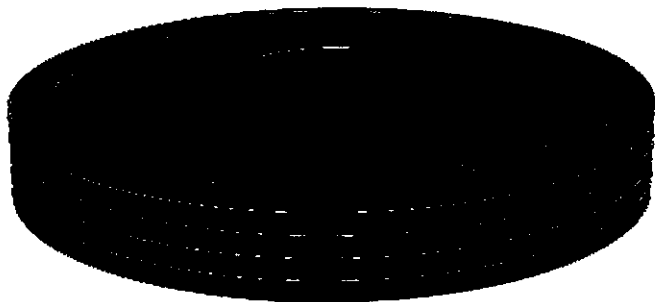
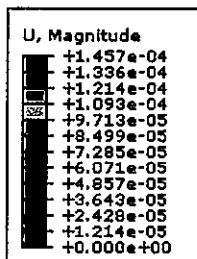
รูปที่ 1.27 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 40 %



รูปที่ 1.28 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 30 %



รูปที่ 1.29 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 20 %



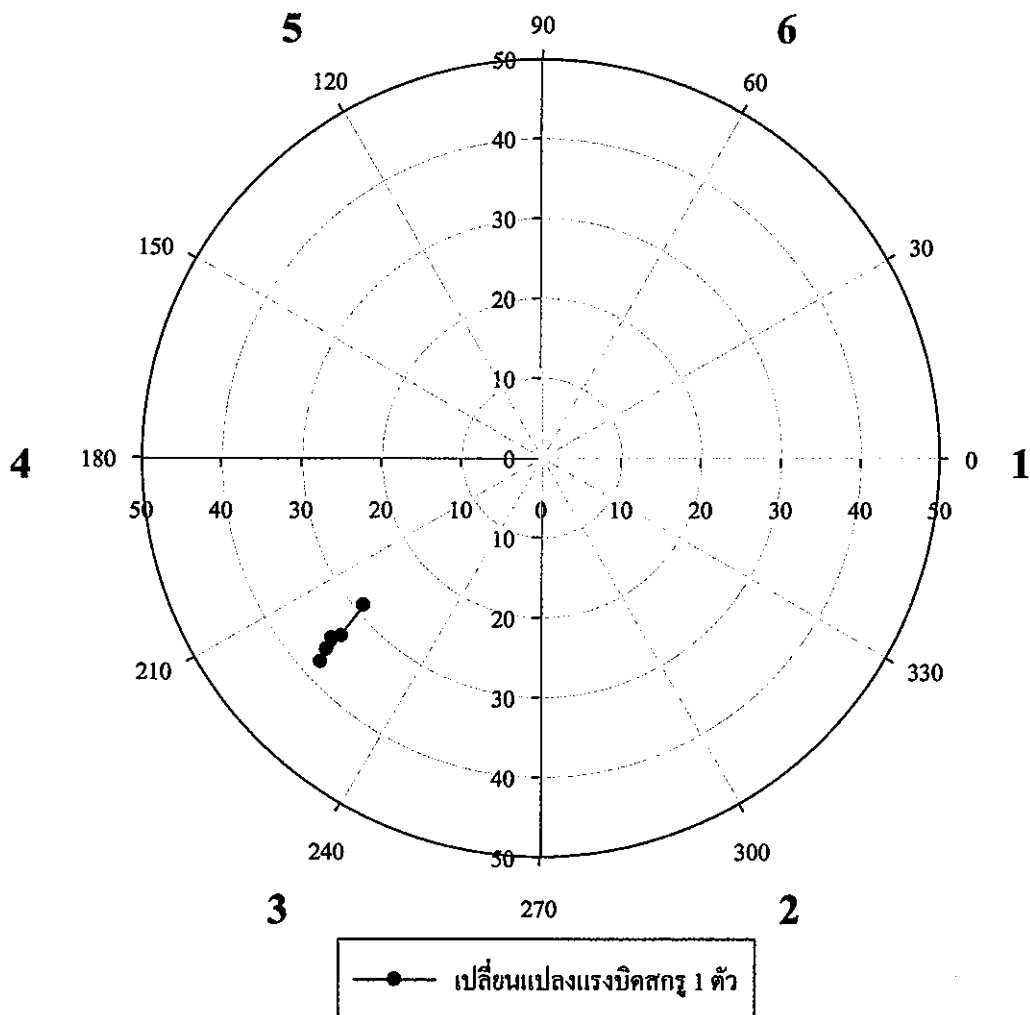
รูปที่ 1.30 กรณีที่ 5 เปลี่ยนแปลงความดันสกรู 5 ตัว ความดันแตกต่างกัน 10 %

ภาคผนวก ข.
ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2.1 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 1
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 6

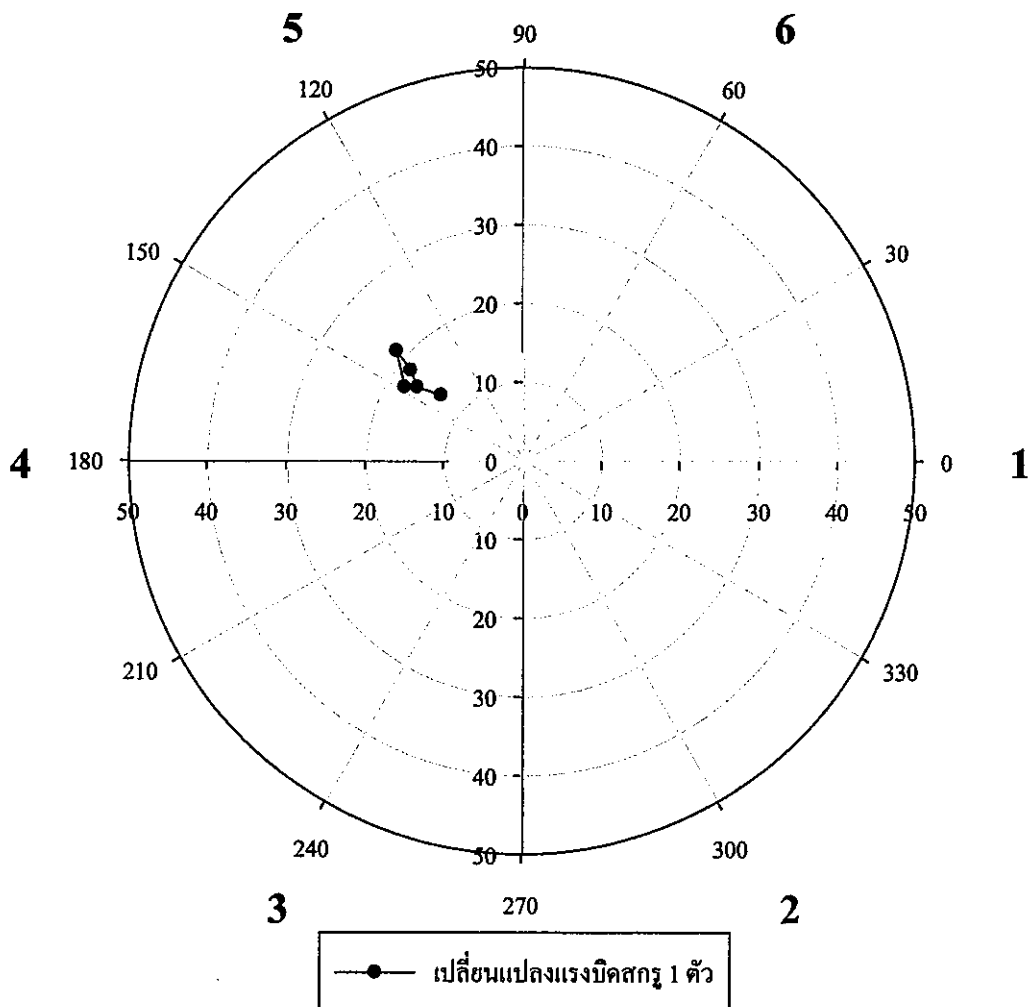
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	28.8	220
2. แรงบิดต่างกัน 60%	37.5	223
3. แรงบิดต่างกัน 40%	35.9	222
4. แรงบิดต่างกัน 20%	34.5	221
5. แรงบิดต่างกัน 0%	33.4	222



รูปที่ 2.1 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 1

ตารางที่ 2.2 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,3,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 2

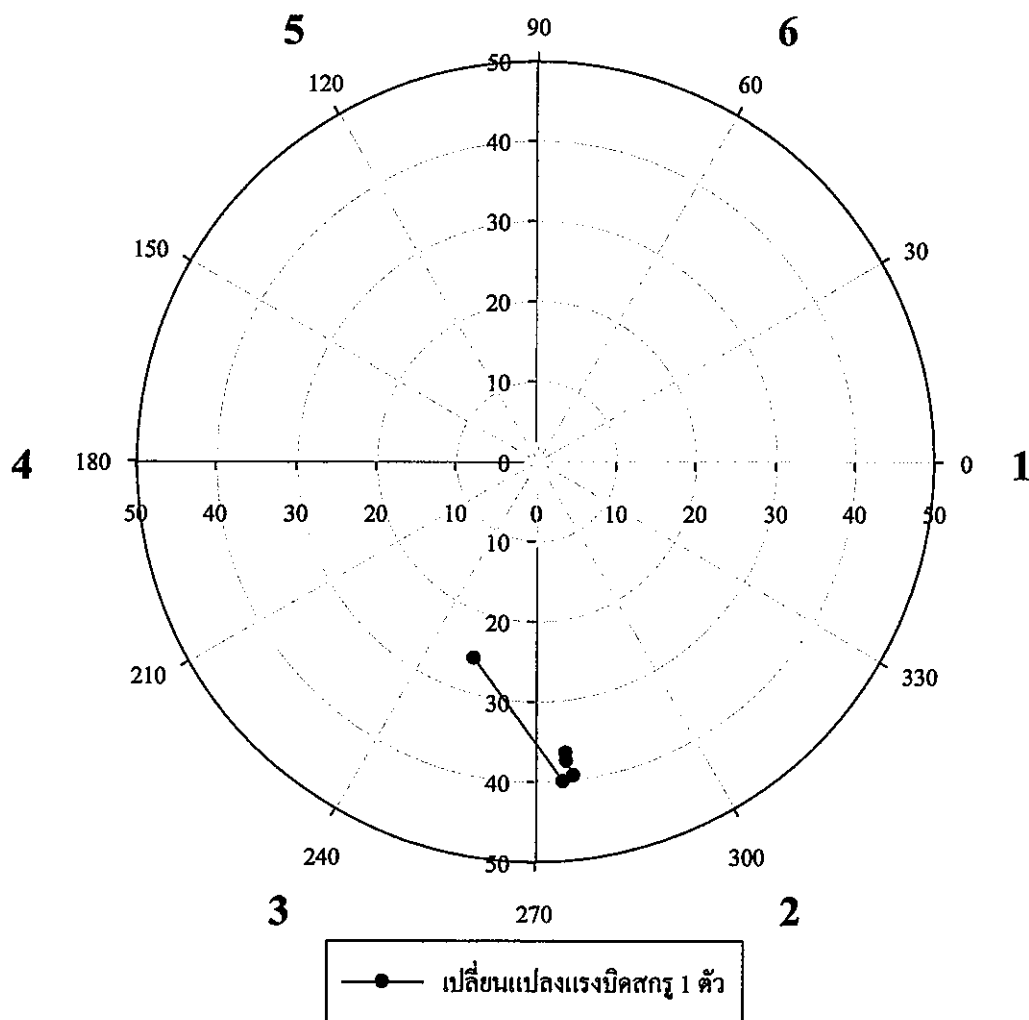
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	17.6	148
2. แรงบิดต่างกัน 60%	21.2	139
3. แรงบิดต่างกัน 40%	18.2	141
4. แรงบิดต่างกัน 20%	16.2	145
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.2	141



รูปที่ 2.2 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2

ตารางที่ 2.3 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 6

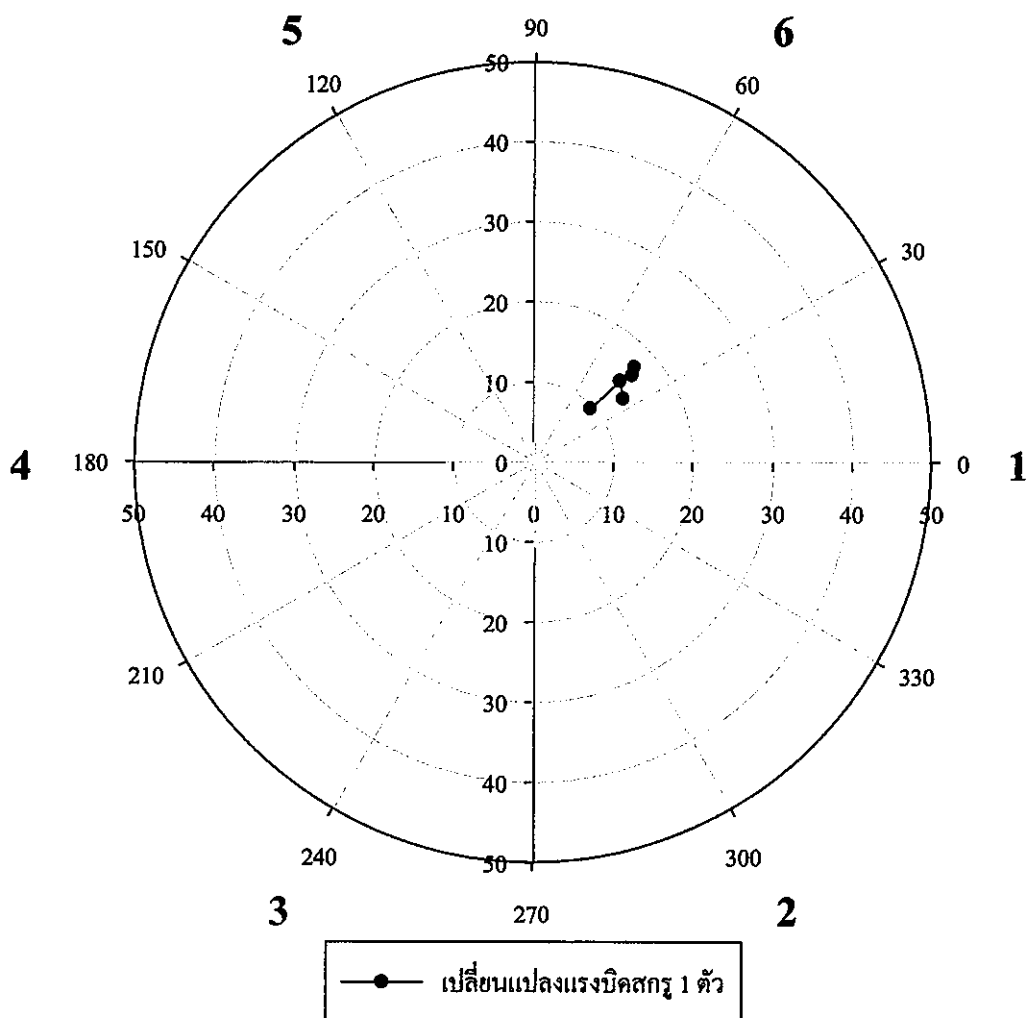
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	25.7	253
2. แรงบิดต่างกัน 60%	40.1	275
3. แรงบิดต่างกัน 40%	39.5	277
4. แรงบิดต่างกัน 20%	37.6	276
5. แรงบิดต่างกัน 0%	36.6	276



รูปที่ 2.3 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแรงแบบแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3

ตารางที่ 2.4 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 4
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 3

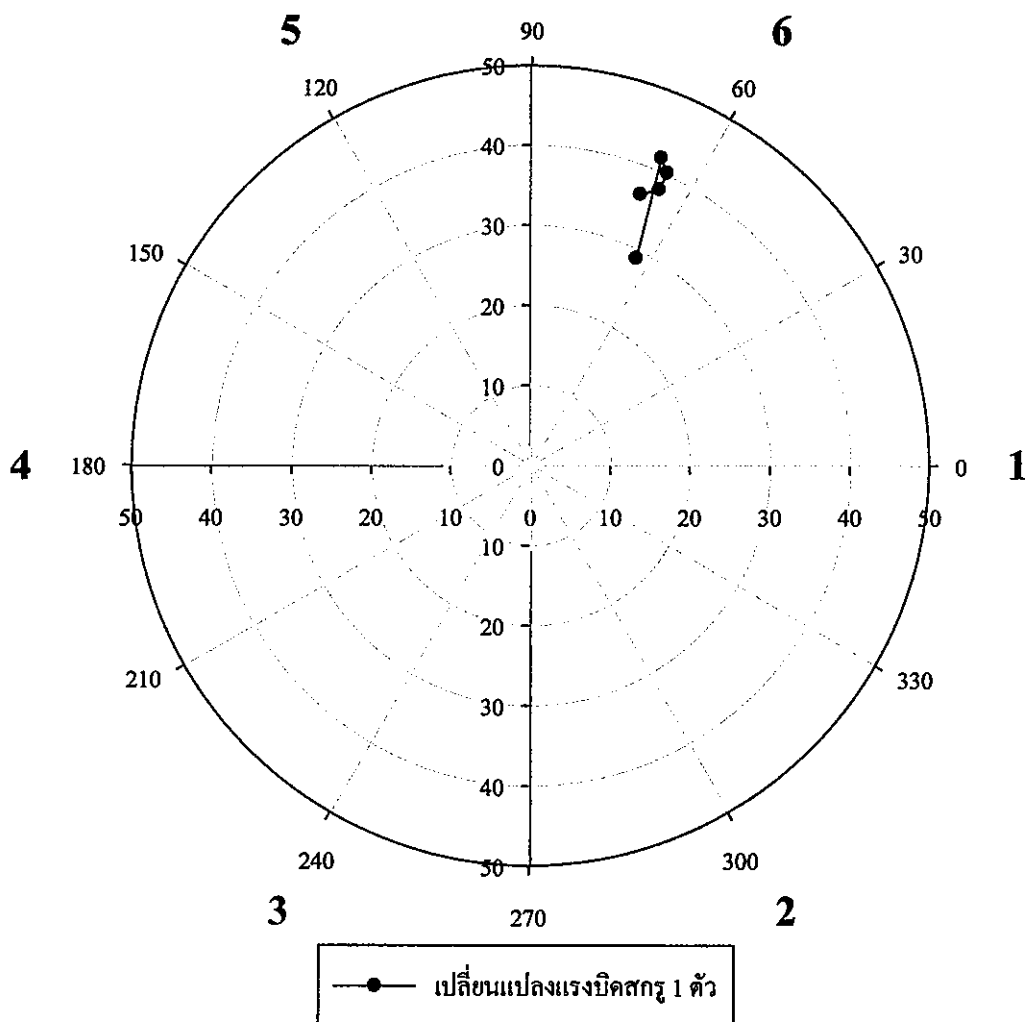
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	9.7	43
2. แรงบิดต่างกัน 60%	17.3	43
3. แรงบิดต่างกัน 40%	16.4	41
4. แรงบิดต่างกัน 20%	14.8	43
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.7	35



รูปที่ 2.4 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 2.5 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 3

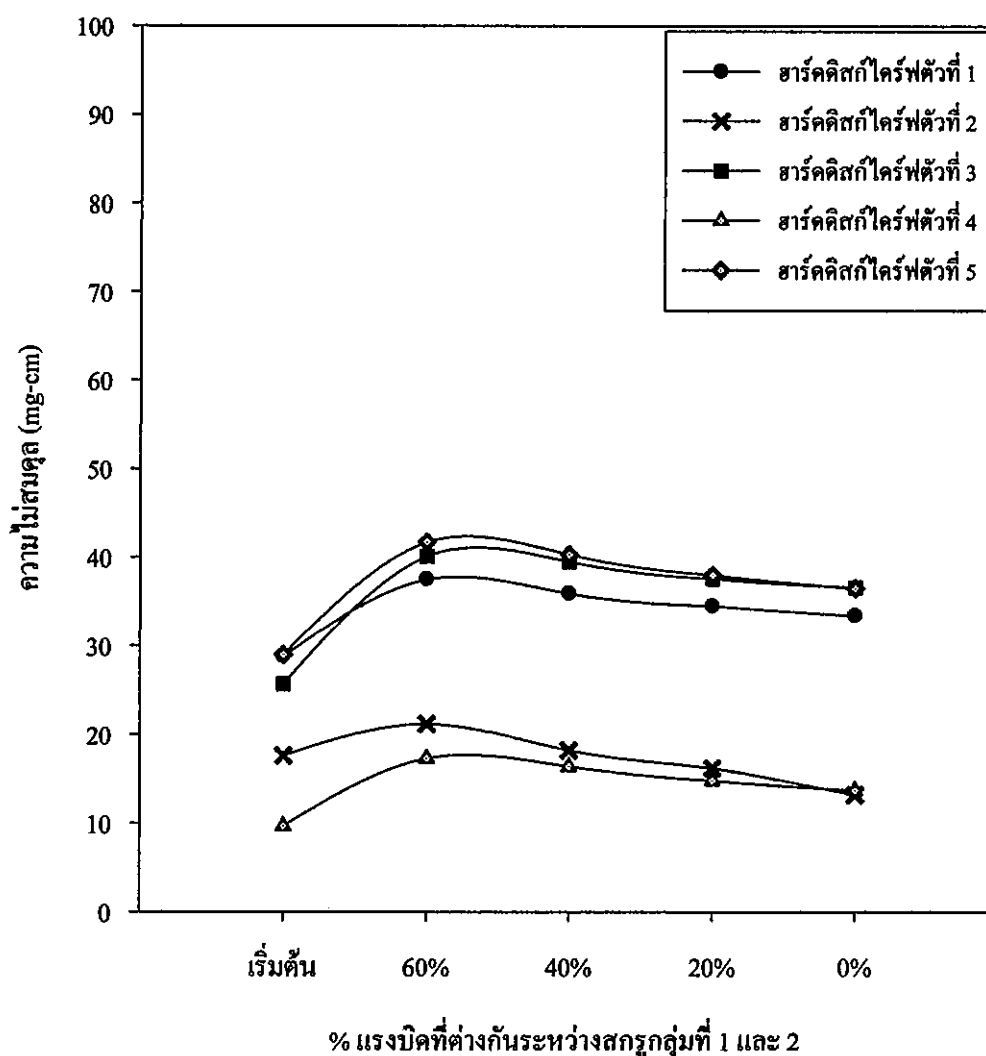
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	29.0	63
2. แรงบิดต่างกัน 60%	41.7	67
3. แรงบิดต่างกัน 40%	40.3	65
4. แรงบิดต่างกัน 20%	38.0	65
5. แรงบิดต่างกัน 0%	36.5	68



รูปที่ 2.5 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 1 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5

ตารางที่ 2.6 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 5 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 1 ตัว

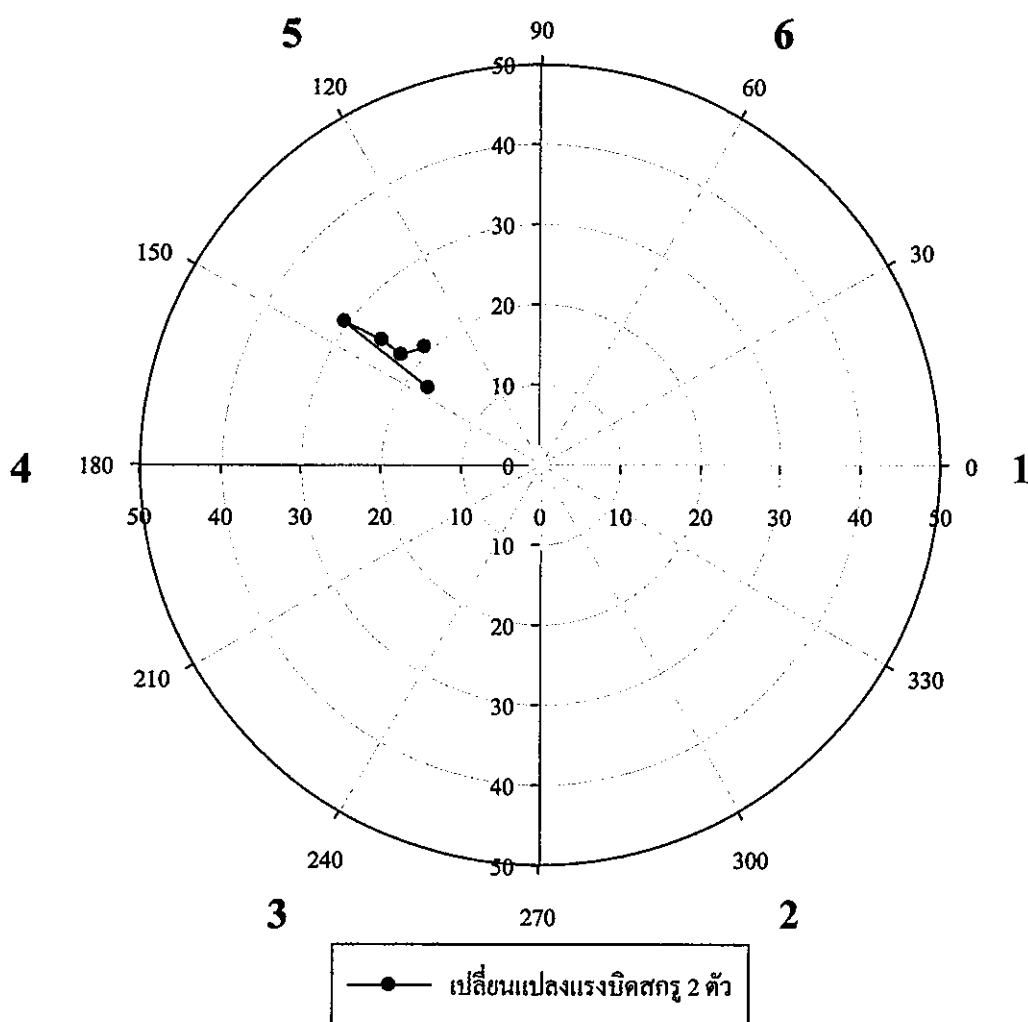
ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	28.8	17.6	25.7	9.7	29.0
2. แรงบิดต่างกัน 60%	37.5	21.2	40.1	17.3	41.7
3. แรงบิดต่างกัน 40%	35.9	18.2	39.5	16.4	40.3
4. แรงบิดต่างกัน 20%	34.5	16.2	37.6	14.8	38.0
5. แรงบิดต่างกัน 0%	33.4	13.2	36.6	13.7	36.5



รูปที่ 2.6 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

ตารางที่ 2.7 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัว ได้แก่สกรู 3,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัว ได้แก่สกรู 1,2

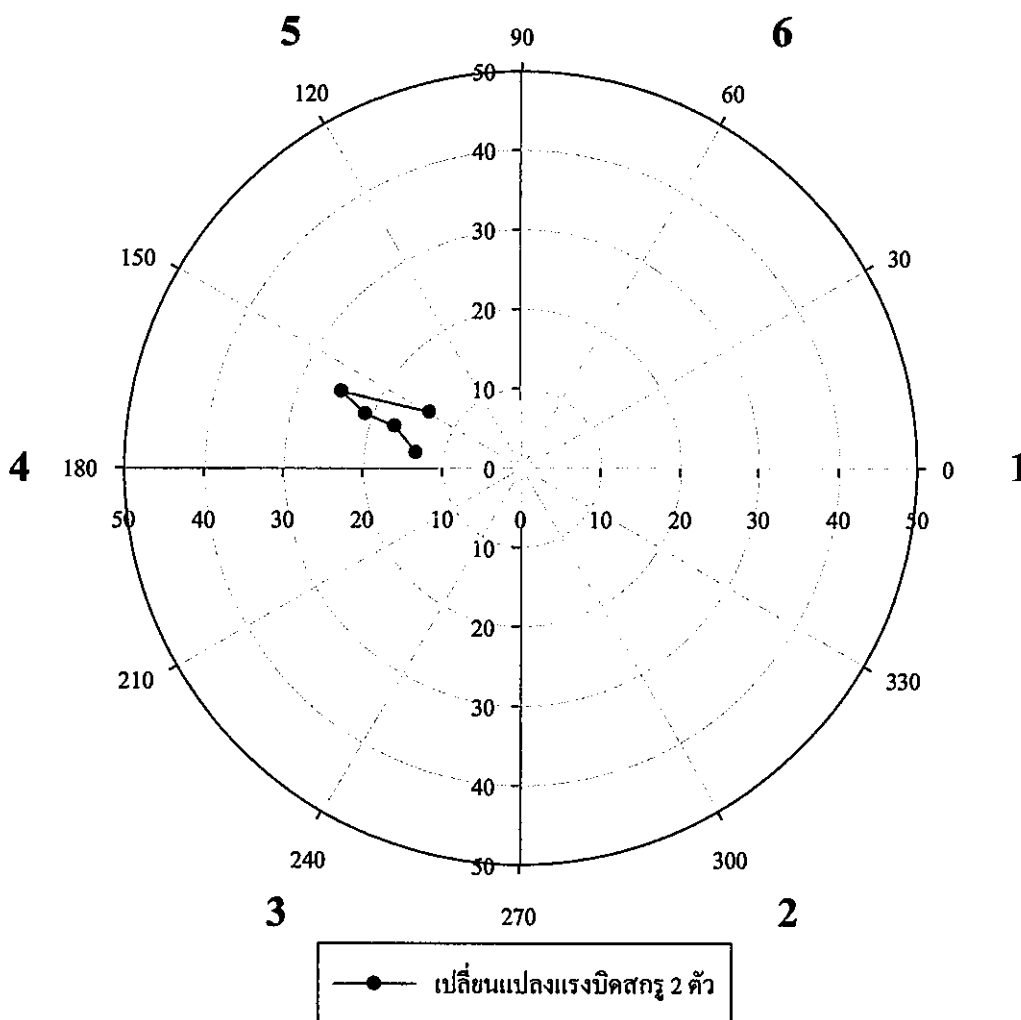
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	17.1	146
2. แรงบิดต่างกัน 60%	30.3	144
3. แรงบิดต่างกัน 40%	25.2	142
4. แรงบิดต่างกัน 20%	22.2	142
5. แรงบิดต่างกัน 0%	20.7	135



รูปที่ 2.7 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 2.8 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 1,2

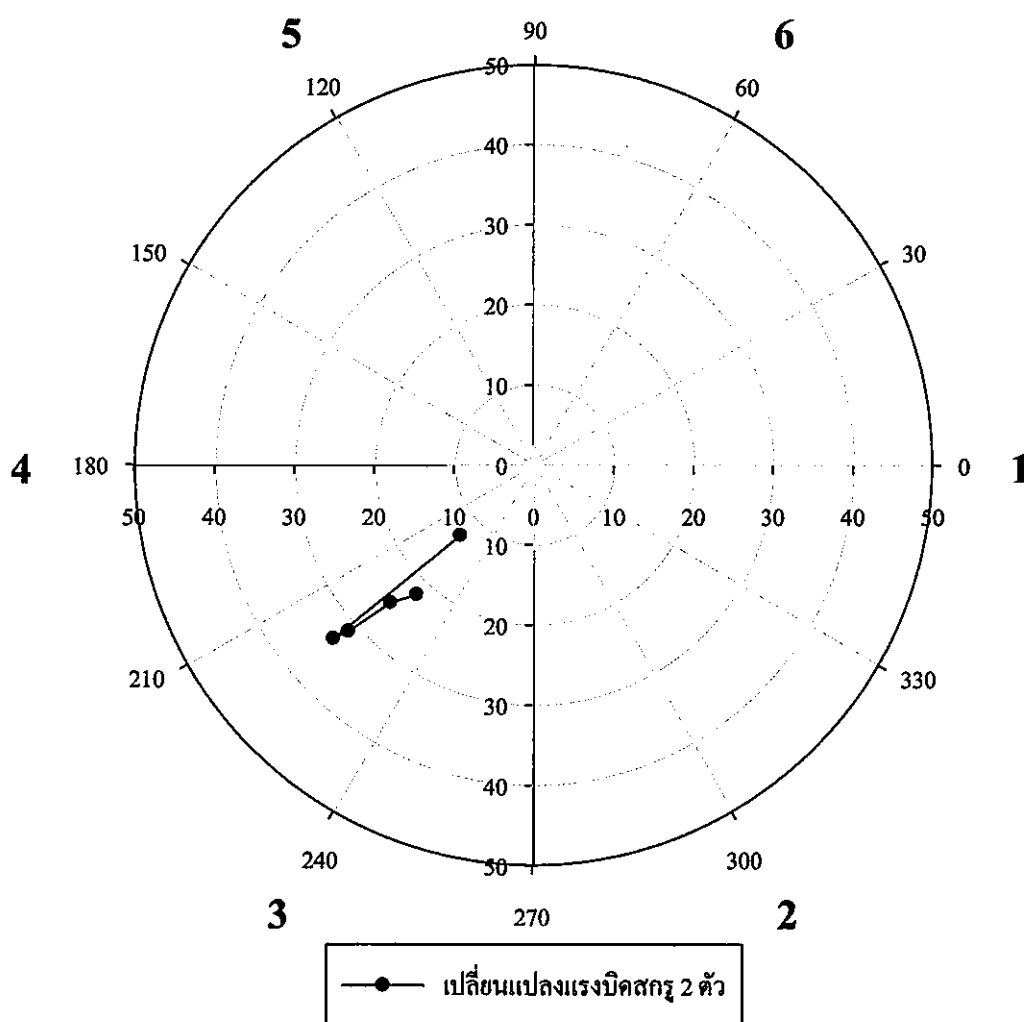
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	13.5	149
2. แรงบิดต่างกัน 60%	24.5	157
3. แรงบิดต่างกัน 40%	20.7	161
4. แรงบิดต่างกัน 20%	16.8	162
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.4	172



รูปที่ 2.8 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2

ตารางที่ 2.9 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 2,3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 1,6

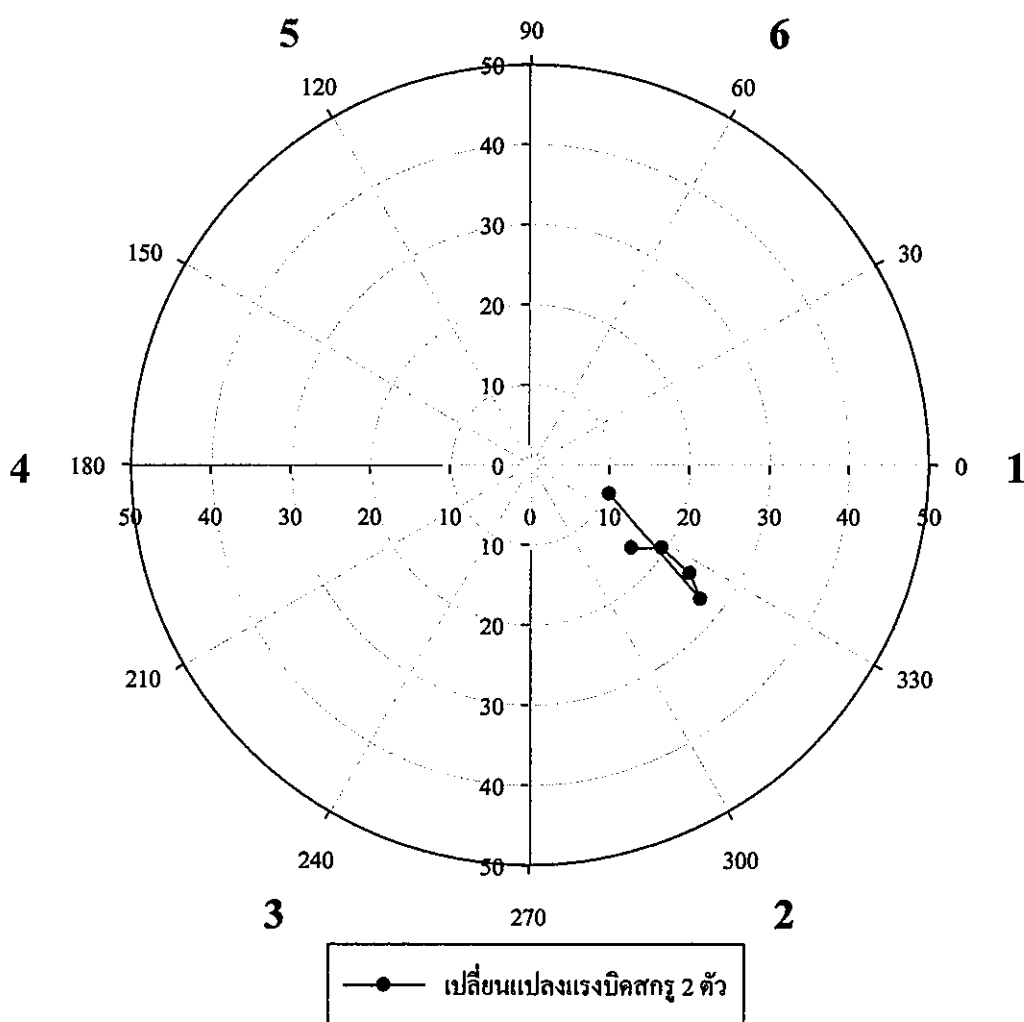
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	12.7	224
2. แรงบิดต่างกัน 60%	33.1	221
3. แรงบิดต่างกัน 40%	31.1	222
4. แรงบิดต่างกัน 20%	24.8	224
5. แรงบิดต่างกัน 0%	21.8	228



รูปที่ 2.9 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3

ตารางที่ 2.10 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 4,5

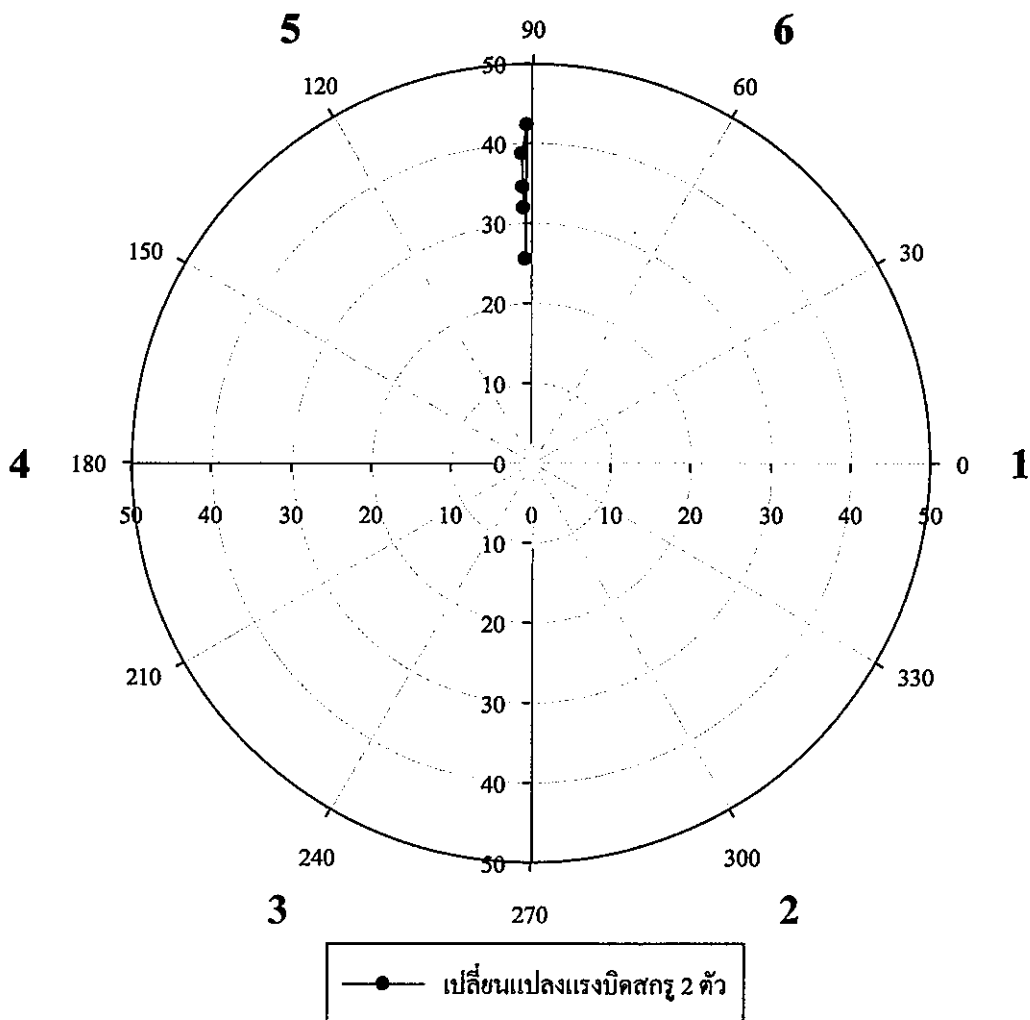
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	10.7	340
2. แรงบิดต่างกัน 60%	27.3	322
3. แรงบิดต่างกัน 40%	24.3	326
4. แรงบิดต่างกัน 20%	19.6	328
5. แรงบิดต่างกัน 0%	16.6	321



รูปที่ 2.10 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 2.11 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,4,5,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 2,3

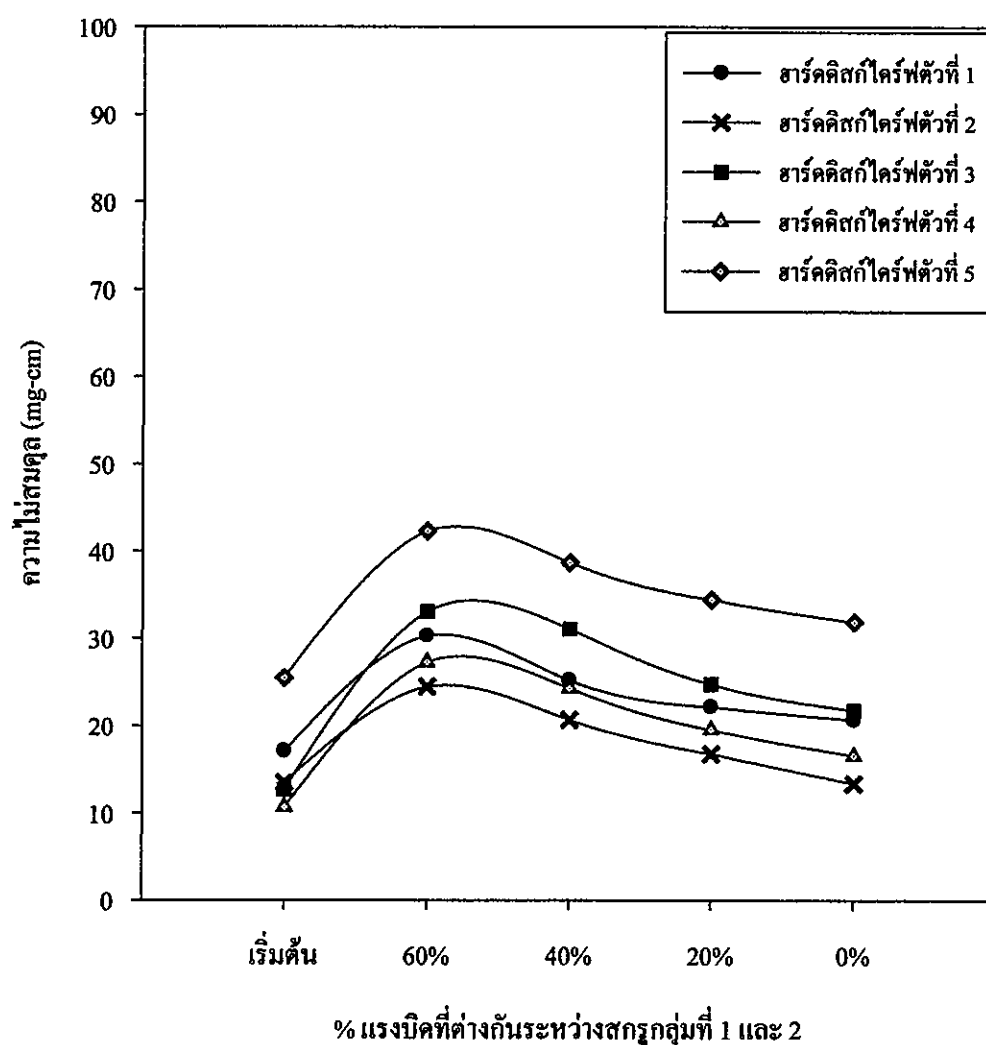
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	25.5	92
2. แรงบิดต่างกัน 60%	42.3	91
3. แรงบิดต่างกัน 40%	38.7	92
4. แรงบิดต่างกัน 20%	34.5	92
5. แรงบิดต่างกัน 0%	31.9	92



รูปที่ 2.11 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 2 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 5

ตารางที่ 2.12 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 4 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 2 ตัว

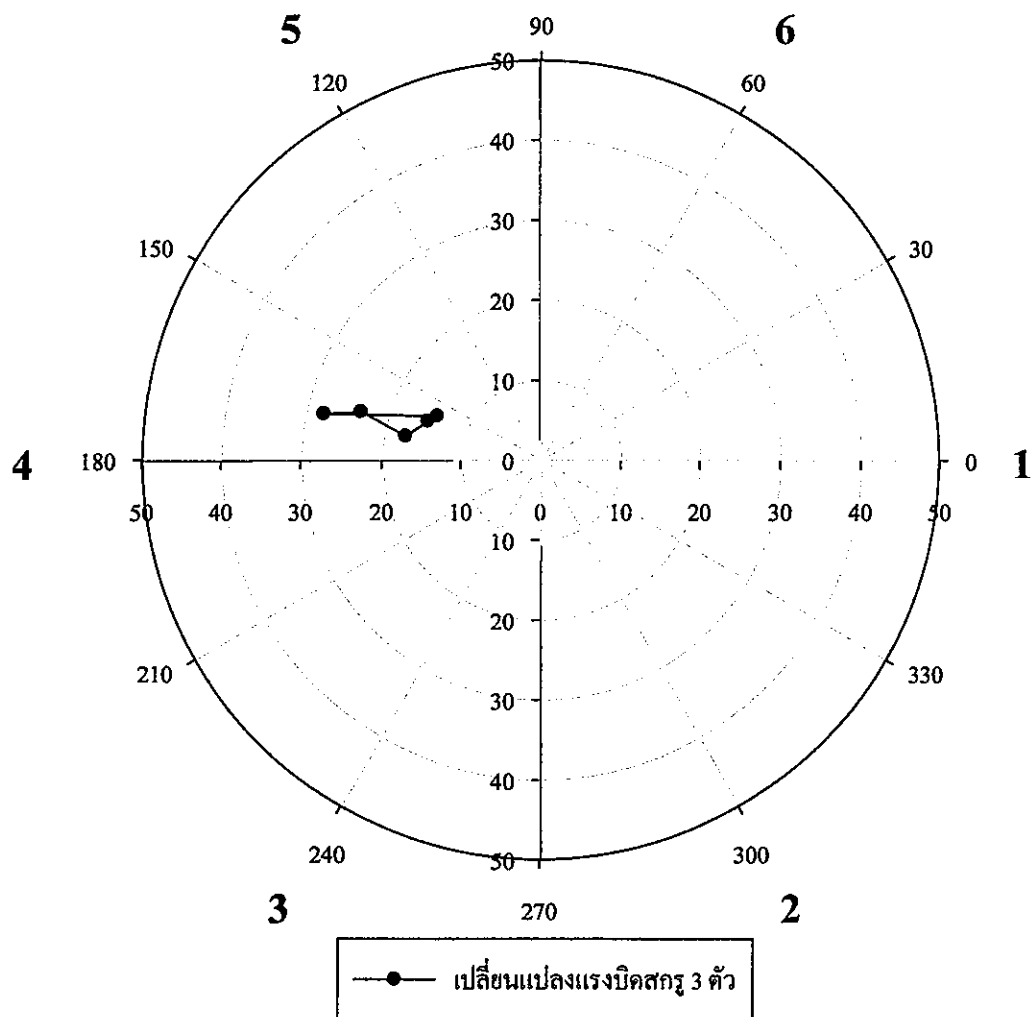
ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	17.1	13.5	12.7	10.7	25.5
2. แรงบิดต่างกัน 60%	30.3	24.5	33.1	27.3	42.3
3. แรงบิดต่างกัน 40%	25.2	20.7	31.1	24.3	38.7
4. แรงบิดต่างกัน 20%	22.2	16.8	24.8	19.6	34.5
5. แรงบิดต่างกัน 0%	20.7	13.4	21.8	16.6	31.9



รูปที่ 2.12 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

ตารางที่ 2.13 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 1
กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัว ได้แก่สกรู 3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว ได้แก่สกรู 1,2,6

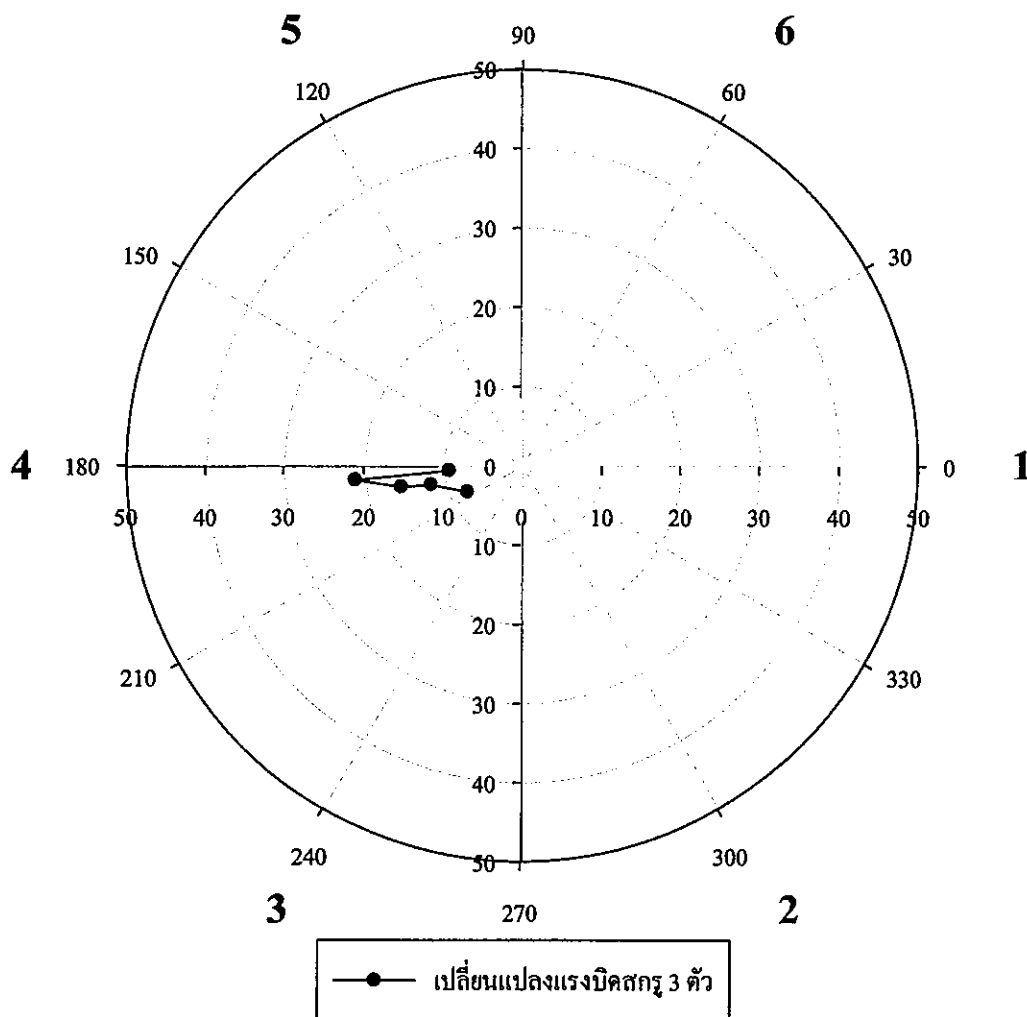
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	14.0	157
2. แรงบิดต่างกัน 60%	27.7	168
3. แรงบิดต่างกัน 40%	23.3	165
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.2	170
5. แรงบิดต่างกัน 0%	14.9	161



รูปที่ 2.13 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 2.14 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 2
 กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 1,2,6

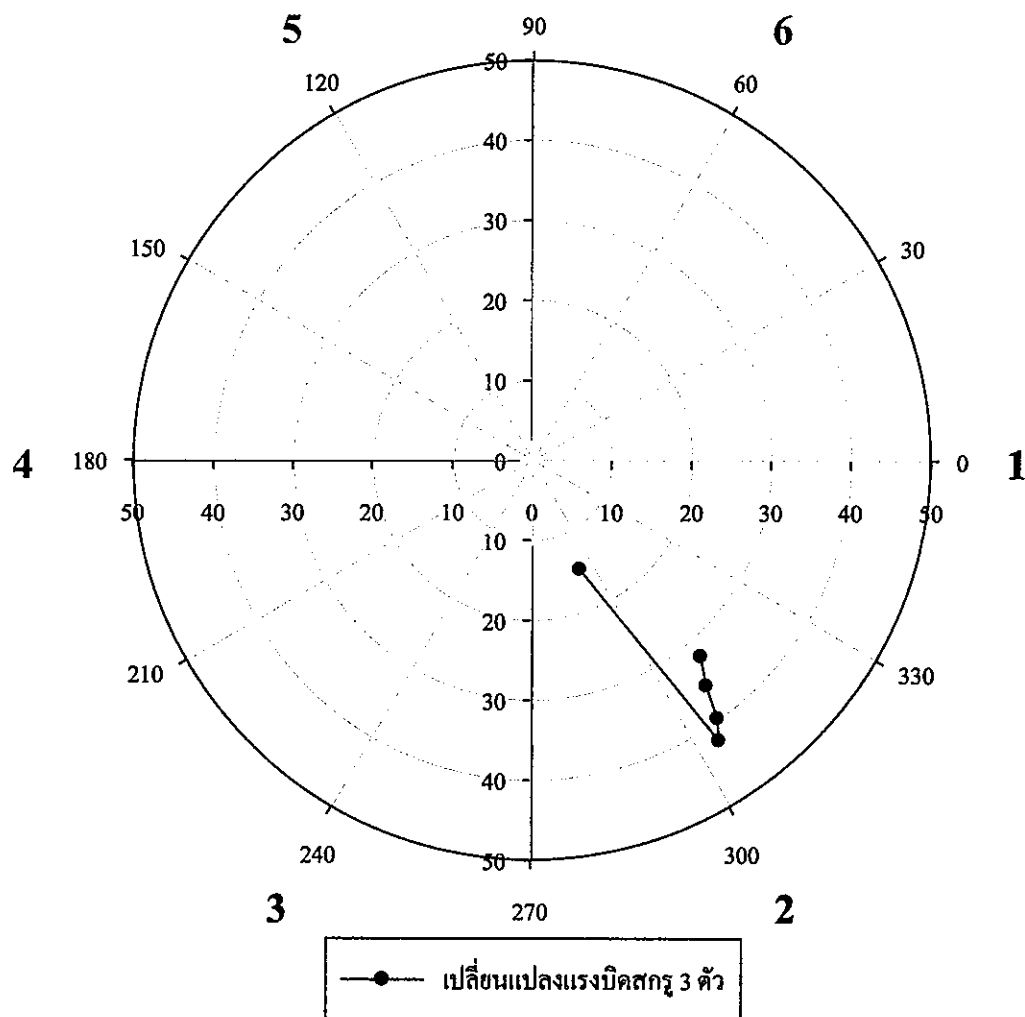
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	9.2	184
2. แรงบิดต่างกัน 60%	21.1	185
3. แรงบิดต่างกัน 40%	15.5	190
4. แรงบิดต่างกัน 20%	11.7	192
5. แรงบิดต่างกัน 0%	7.6	206



รูปที่ 2.14 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตัวที่ 2

ตารางที่ 2.15 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 3
กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัว ได้แก่ สกรู 1,2,3 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว ได้แก่ สกรู 4,5,6

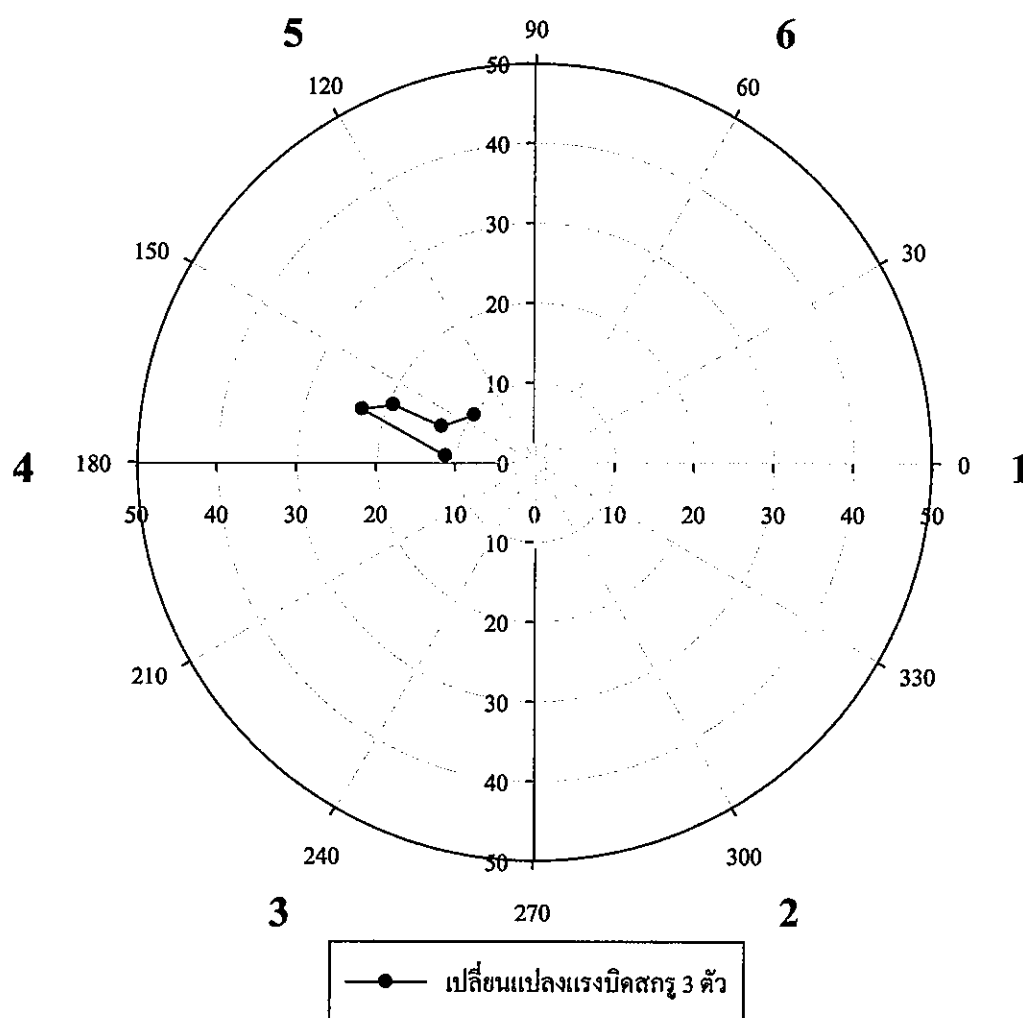
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	14.9	294
2. แรงบิดต่างกัน 60%	42.2	304
3. แรงบิดต่างกัน 40%	39.8	306
4. แรงบิดต่างกัน 20%	35.7	308
5. แรงบิดต่างกัน 0%	32.4	311



รูปที่ 2.15 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 3

ตารางที่ 2.16 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4
กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 1,2,6

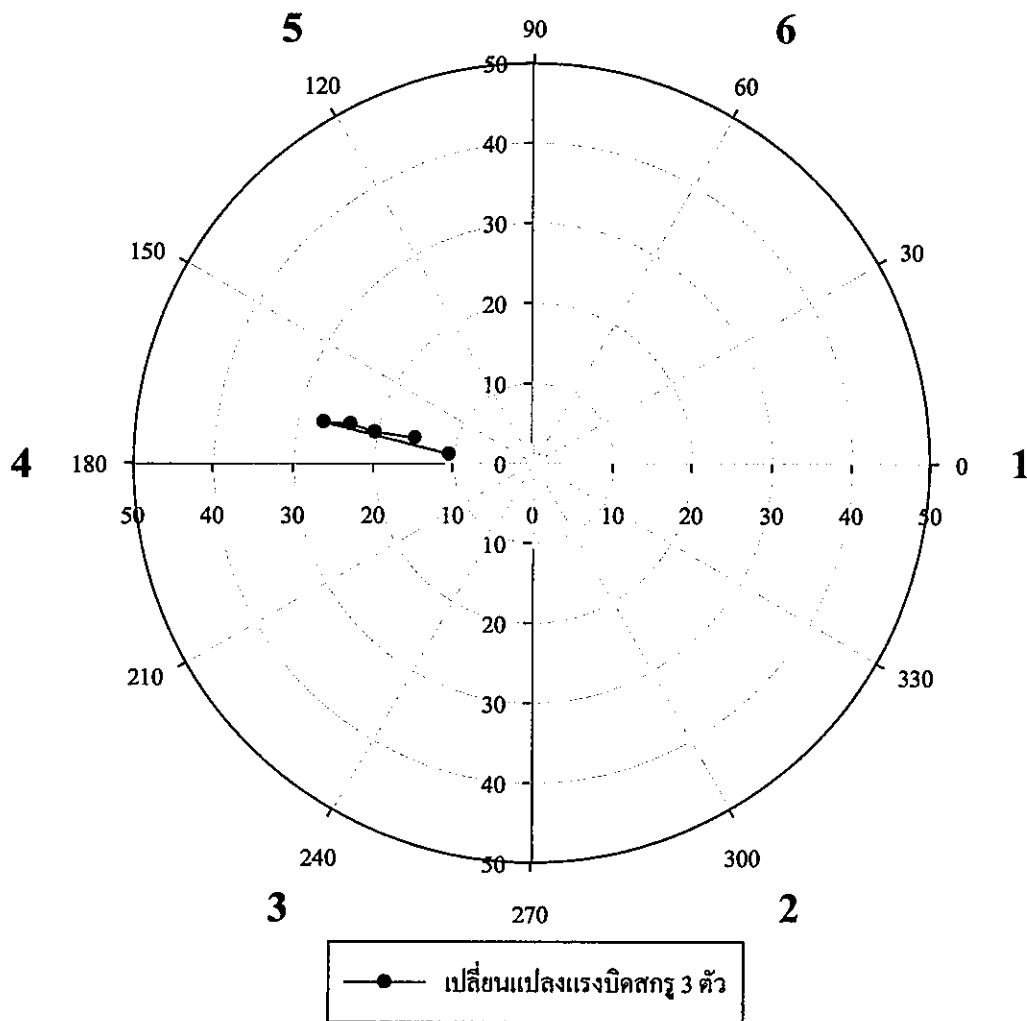
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	11.2	176
2. แรงบิดต่างกัน 60%	22.7	163
3. แรงบิดต่างกัน 40%	19.2	158
4. แรงบิดต่างกัน 20%	12.5	159
5. แรงบิดต่างกัน 0%	9.6	142



รูปที่ 2.16 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 2.17 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณี 3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 5
 กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 3,4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัวได้แก่สกรู 1,2,6

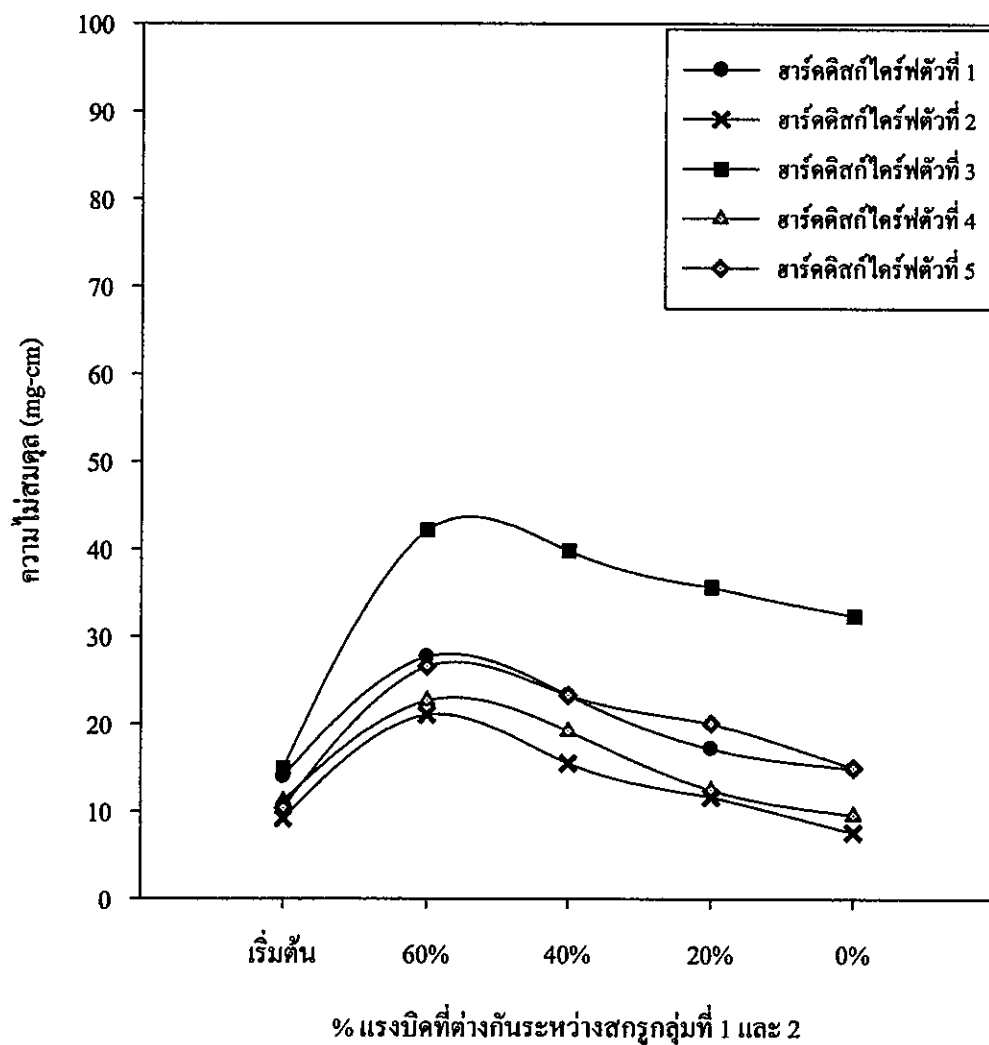
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	10.4	174
2. แรงบิดต่างกัน 60%	26.6	169
3. แรงบิดต่างกัน 40%	23.3	168
4. แรงบิดต่างกัน 20%	20.1	169
5. แรงบิดต่างกัน 0%	15.0	168



รูปที่ 2.17 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 3 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 5

ตารางที่ 2.18 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 3 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 3 ตัว

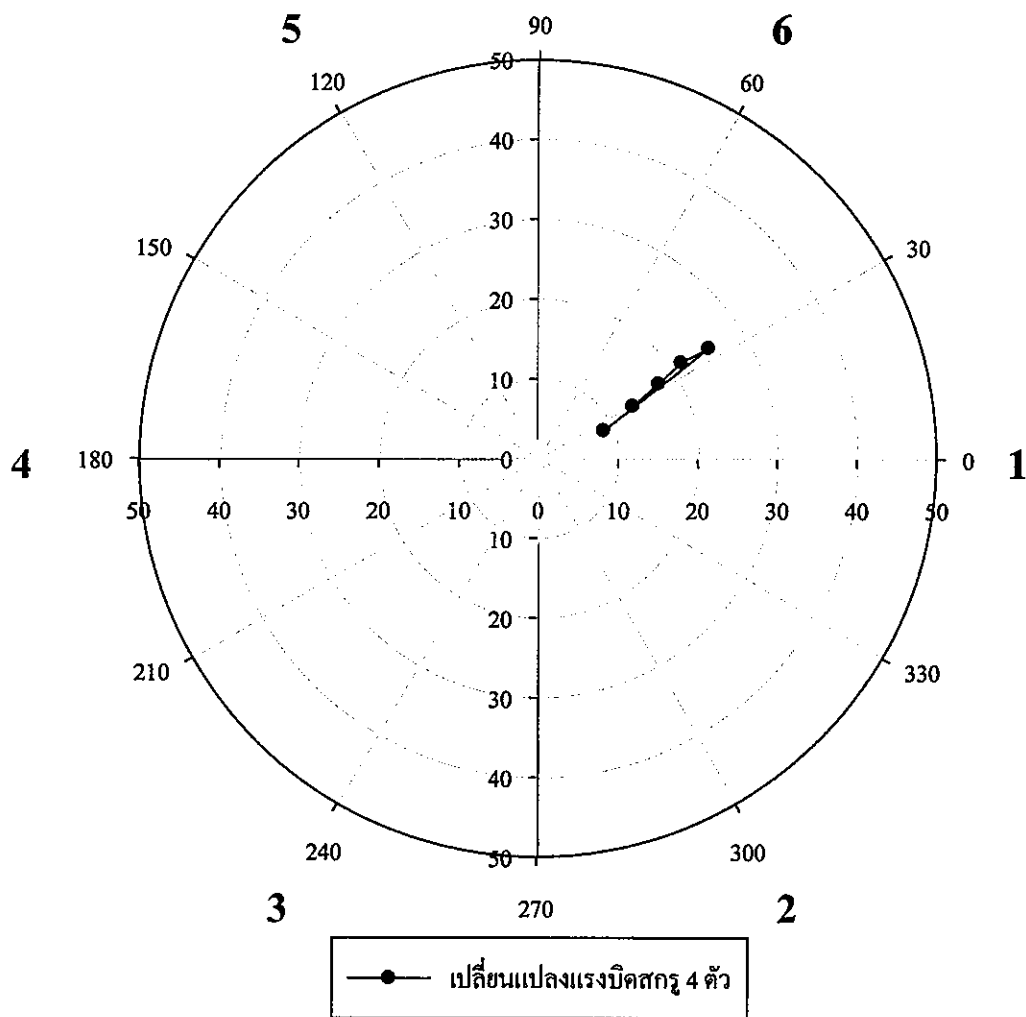
ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	14.0	9.2	14.9	11.2	10.4
2. แรงบิดต่างกัน 60%	27.7	21.1	42.2	22.7	26.6
3. แรงบิดต่างกัน 40%	23.3	15.5	39.8	19.2	23.3
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.2	11.7	35.7	12.5	20.1
5. แรงบิดต่างกัน 0%	14.9	7.6	32.4	9.6	15.0



รูปที่ 2.18 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 3 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

ตารางที่ 2.19 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัว ได้แก่สกรู 1,6 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัว ได้แก่สกรู 2,3,4,5

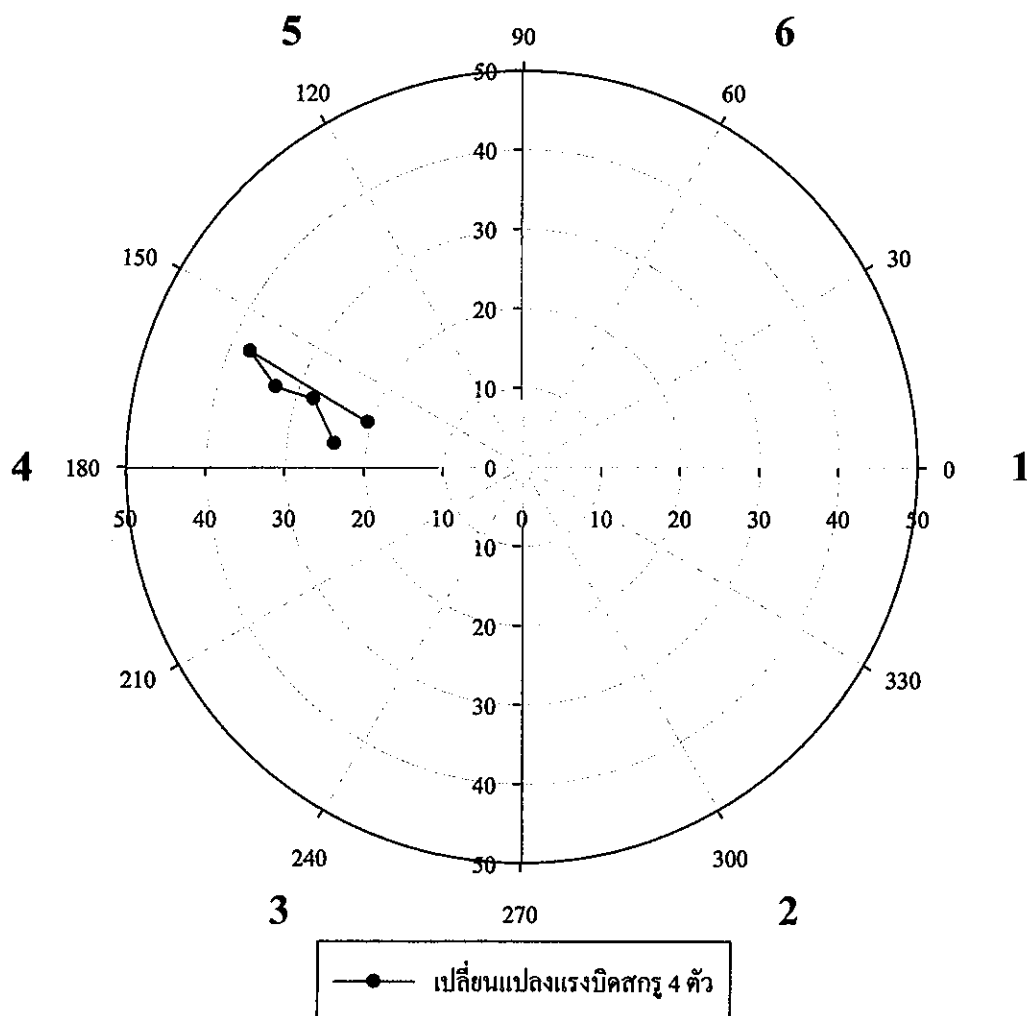
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	8.9	23
2. แรงบิดต่างกัน 60%	25.4	33
3. แรงบิดต่างกัน 40%	21.5	34
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.7	32
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.5	29



รูปที่ 2.19 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 2.20 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,6

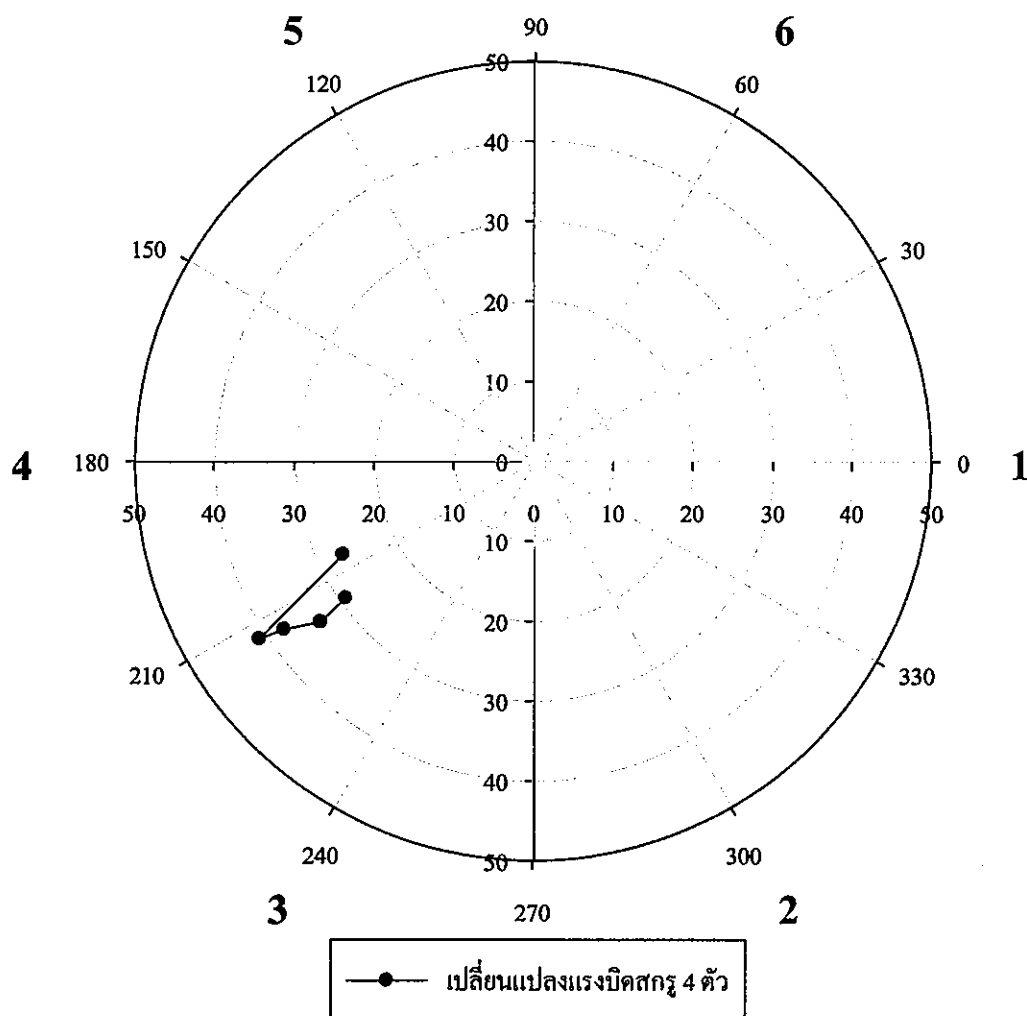
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	20.2	164
2. แรงบิดต่างกัน 60%	37.2	157
3. แรงบิดต่างกัน 40%	32.6	162
4. แรงบิดต่างกัน 20%	27.6	162
5. แรงบิดต่างกัน 0%	23.8	173



รูปที่ 2.20 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2

ตารางที่ 2.21 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 3,4 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,5,6

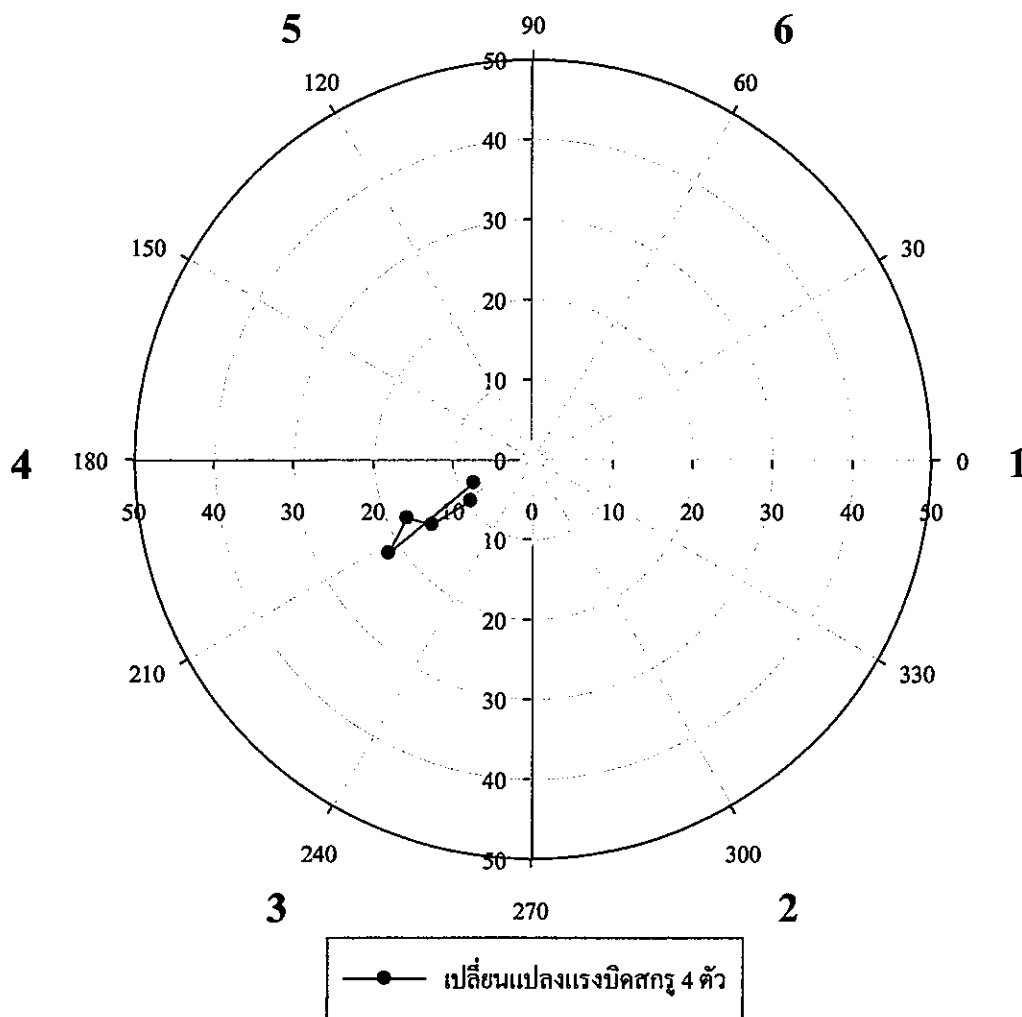
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	26.6	206
2. แรงบิดต่างกัน 60%	40.8	213
3. แรงบิดต่างกัน 40%	37.6	214
4. แรงบิดต่างกัน 20%	33.4	217
5. แรงบิดต่างกัน 0%	29.1	216



รูปที่ 2.21 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 3

ตารางที่ 2.22 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวได้แก่สกรู 3,4 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัวได้แก่สกรู 1,2,5,6

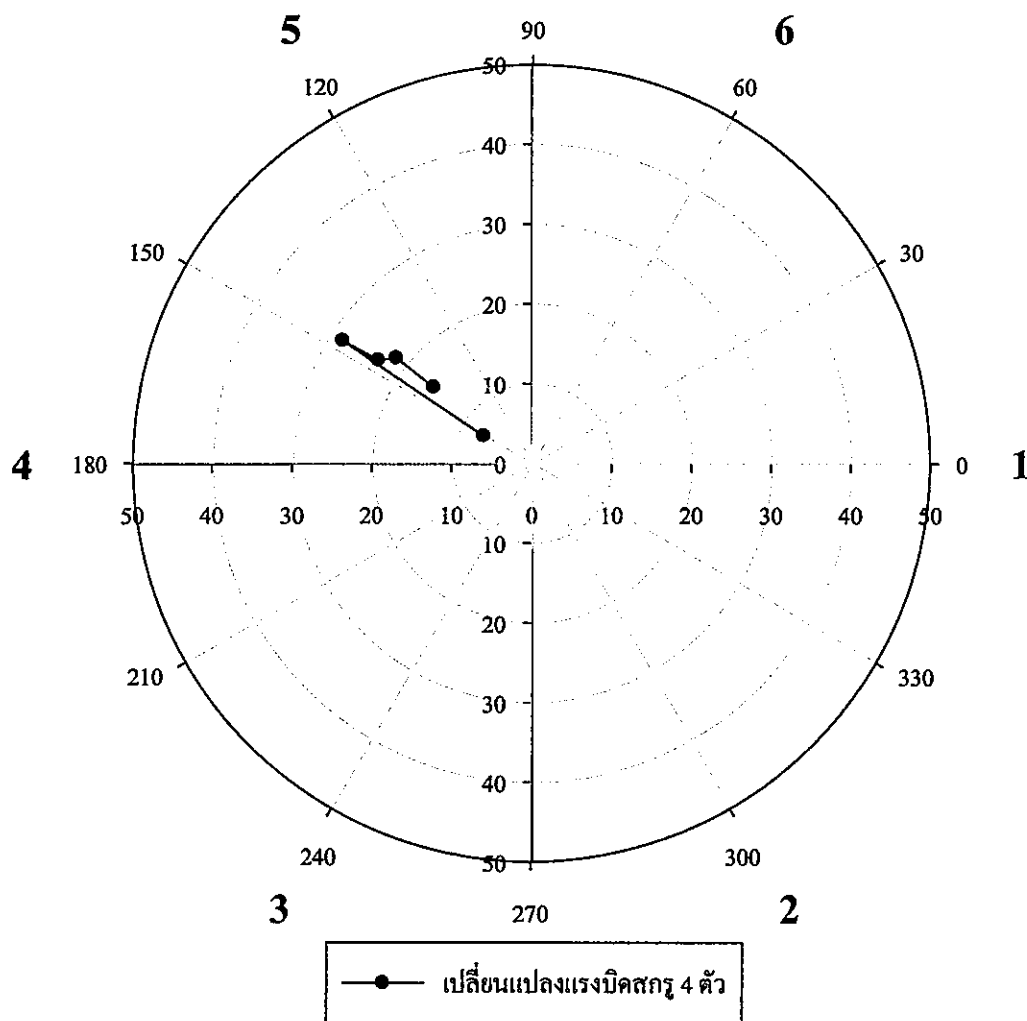
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	7.9	202
2. แรงบิดต่างกัน 60%	21.5	213
3. แรงบิดต่างกัน 40%	17.4	205
4. แรงบิดต่างกัน 20%	15.0	213
5. แรงบิดต่างกัน 0%	9.3	214



รูปที่ 2.22 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 2.23 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 4 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 5
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัว ได้แก่สกรู 4,5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัว ได้แก่สกรู 1,2,3,6

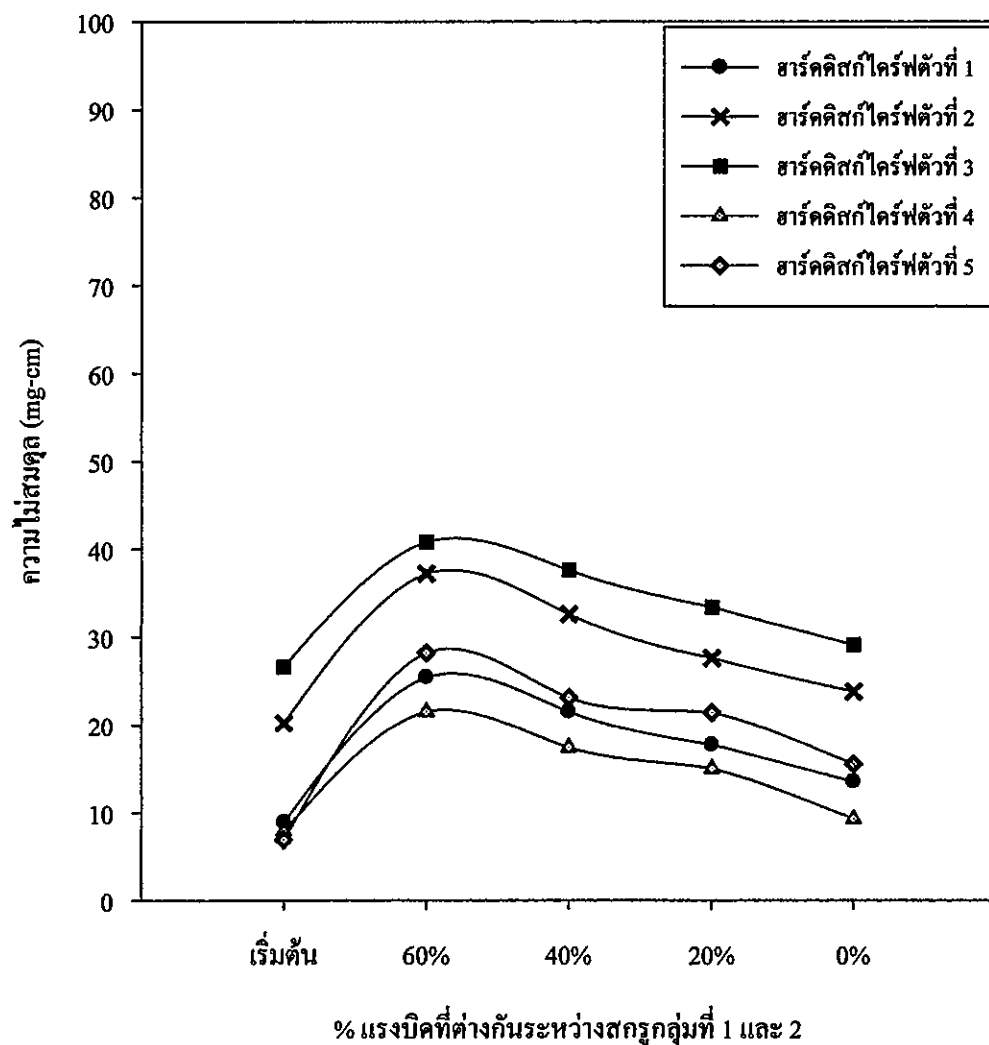
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	6.9	150
2. แรงบิดต่างกัน 60%	28.2	147
3. แรงบิดต่างกัน 40%	23.1	146
4. แรงบิดต่างกัน 20%	21.4	142
5. แรงบิดต่างกัน 0%	15.5	142



รูปที่ 2.23 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 4 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 5

ตารางที่ 2.24 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 2 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 4 ตัว

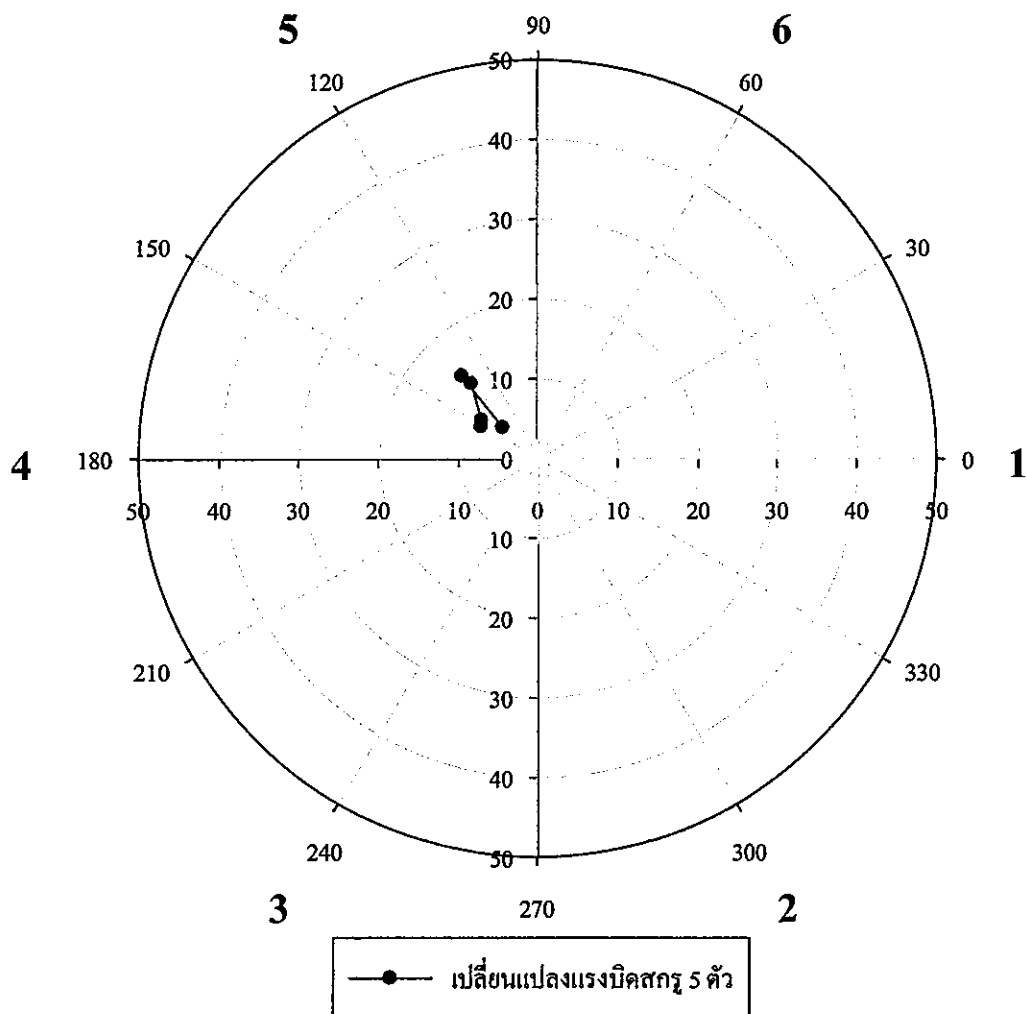
ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	8.9	20.2	26.6	7.9	6.9
2. แรงบิดต่างกัน 60%	25.4	37.2	40.8	21.5	28.2
3. แรงบิดต่างกัน 40%	21.5	32.6	37.6	17.4	23.1
4. แรงบิดต่างกัน 20%	17.7	27.6	33.4	15.0	21.4
5. แรงบิดต่างกัน 0%	13.5	23.8	29.1	9.3	15.5



รูปที่ 2.24 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 4 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

ตารางที่ 2.25 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 1
 กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,6

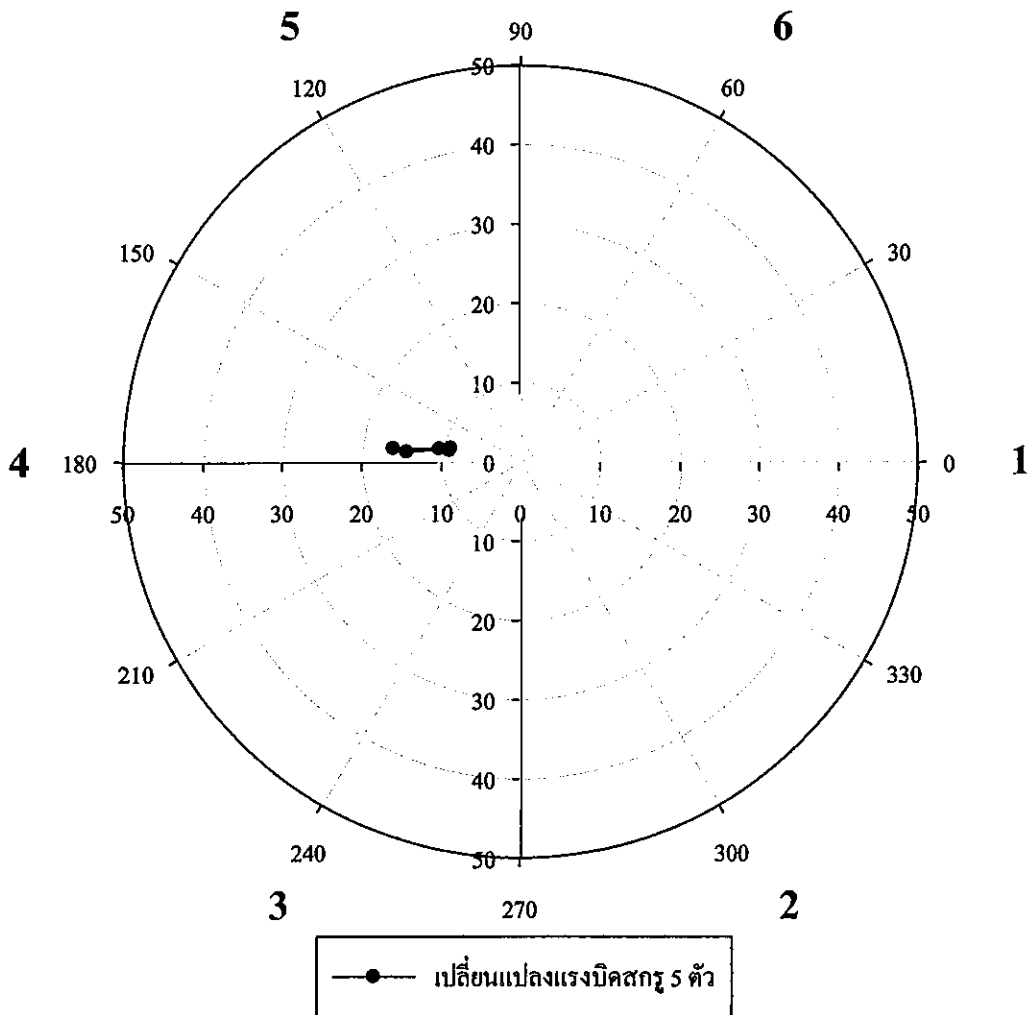
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	5.9	139
2. แรงบิดต่างกัน 60%	14.1	133
3. แรงบิดต่างกัน 40%	12.6	132
4. แรงบิดต่างกัน 20%	8.6	146
5. แรงบิดต่างกัน 0%	8.2	151



รูปที่ 2.25 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 1

ตารางที่ 2.26 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2
 กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 4 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,5,6

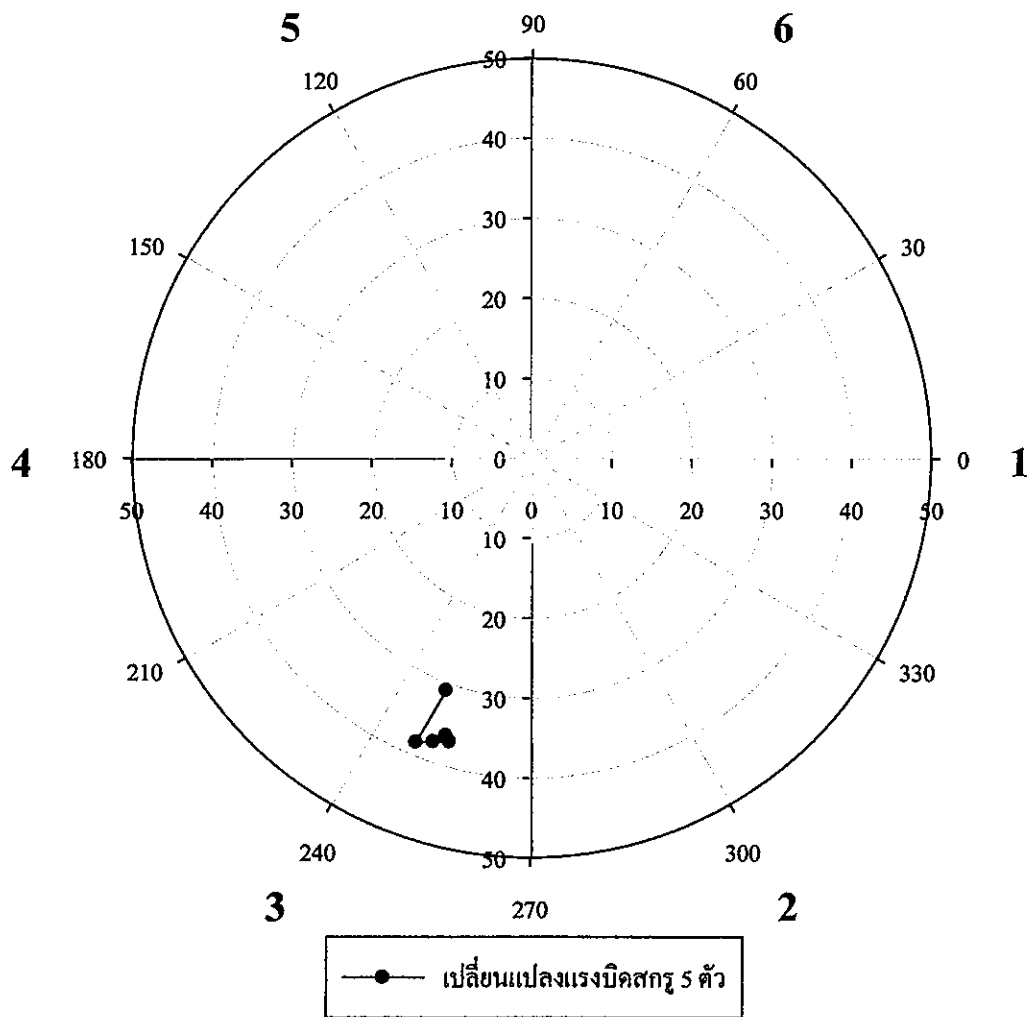
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	9.0	169
2. แรงบิดต่างกัน 60%	16.1	174
3. แรงบิดต่างกัน 40%	14.4	175
4. แรงบิดต่างกัน 20%	10.4	171
5. แรงบิดต่างกัน 0%	9.1	171



รูปที่ 2.26 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวที่ 2

ตารางที่ 2.27 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 3
กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 3 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,4,5,6

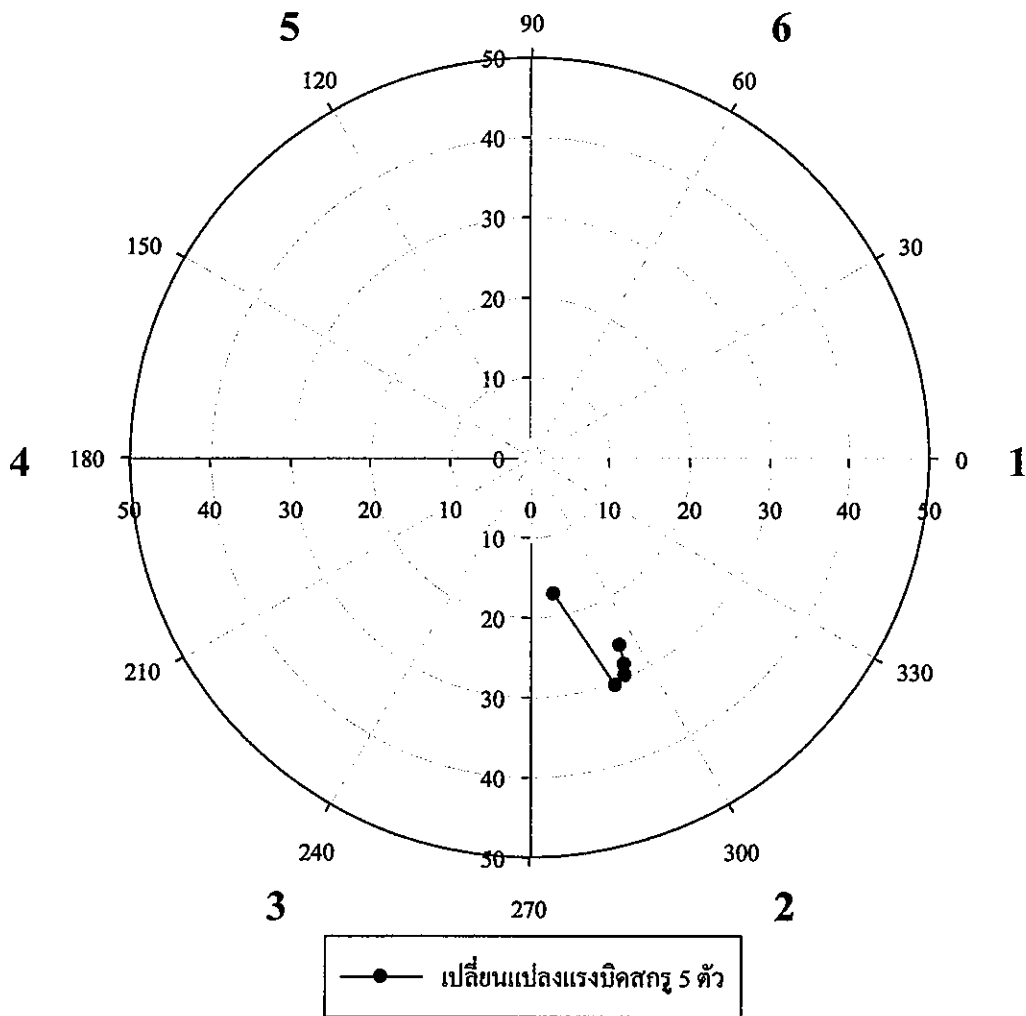
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	30.9	250
2. แรงบิดต่างกัน 60%	38.3	248
3. แรงบิดต่างกัน 40%	37.5	251
4. แรงบิดต่างกัน 20%	36.9	254
5. แรงบิดต่างกัน 0%	36.3	253



รูปที่ 2.27 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 3

ตารางที่ 2.28 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณี 5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 4
 กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 2 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,3,4,5,6

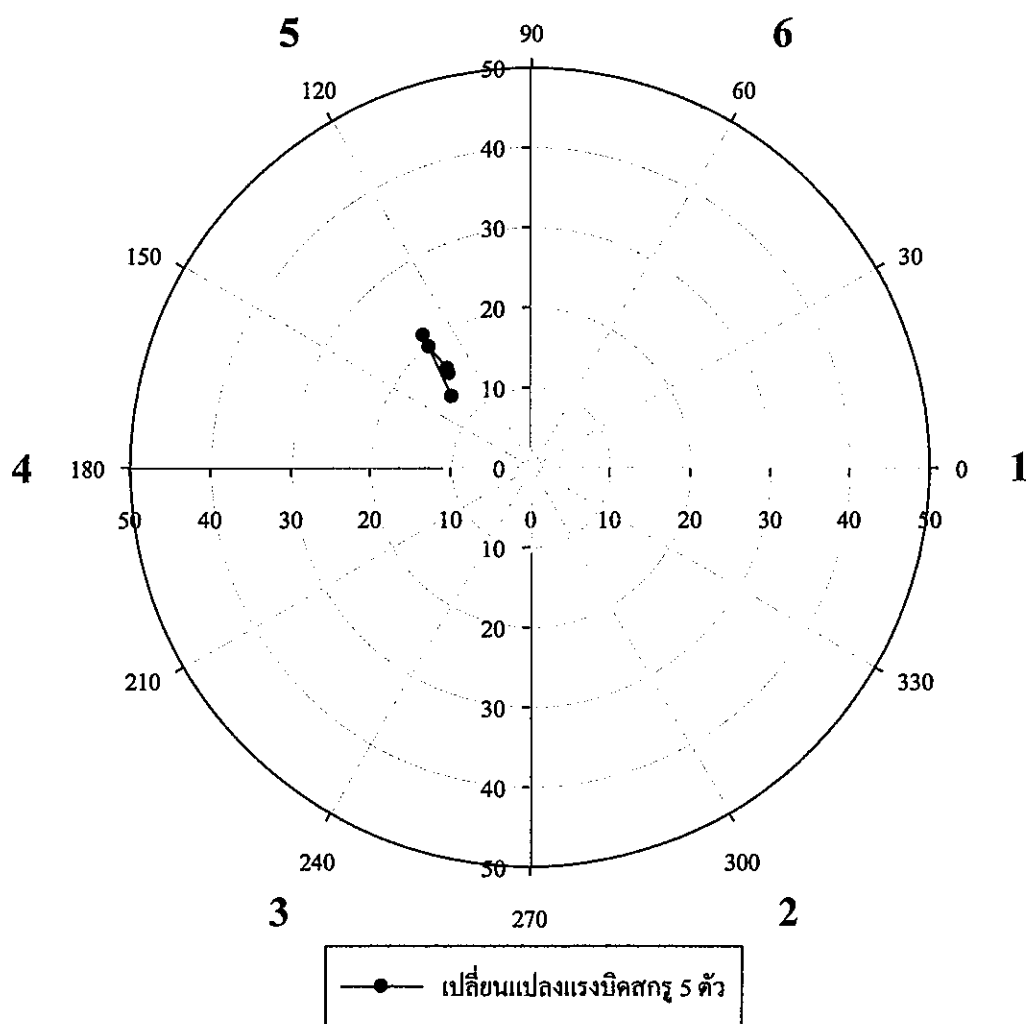
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	17.3	280
2. แรงบิดต่างกัน 60%	30.5	291
3. แรงบิดต่างกัน 40%	29.8	294
4. แรงบิดต่างกัน 20%	28.5	295
5. แรงบิดต่างกัน 0%	26.1	296



รูปที่ 2.28 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 4

ตารางที่ 2.29 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 5
กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวได้แก่สกรู 5 และกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัวได้แก่สกรู 1,2,3,4,6

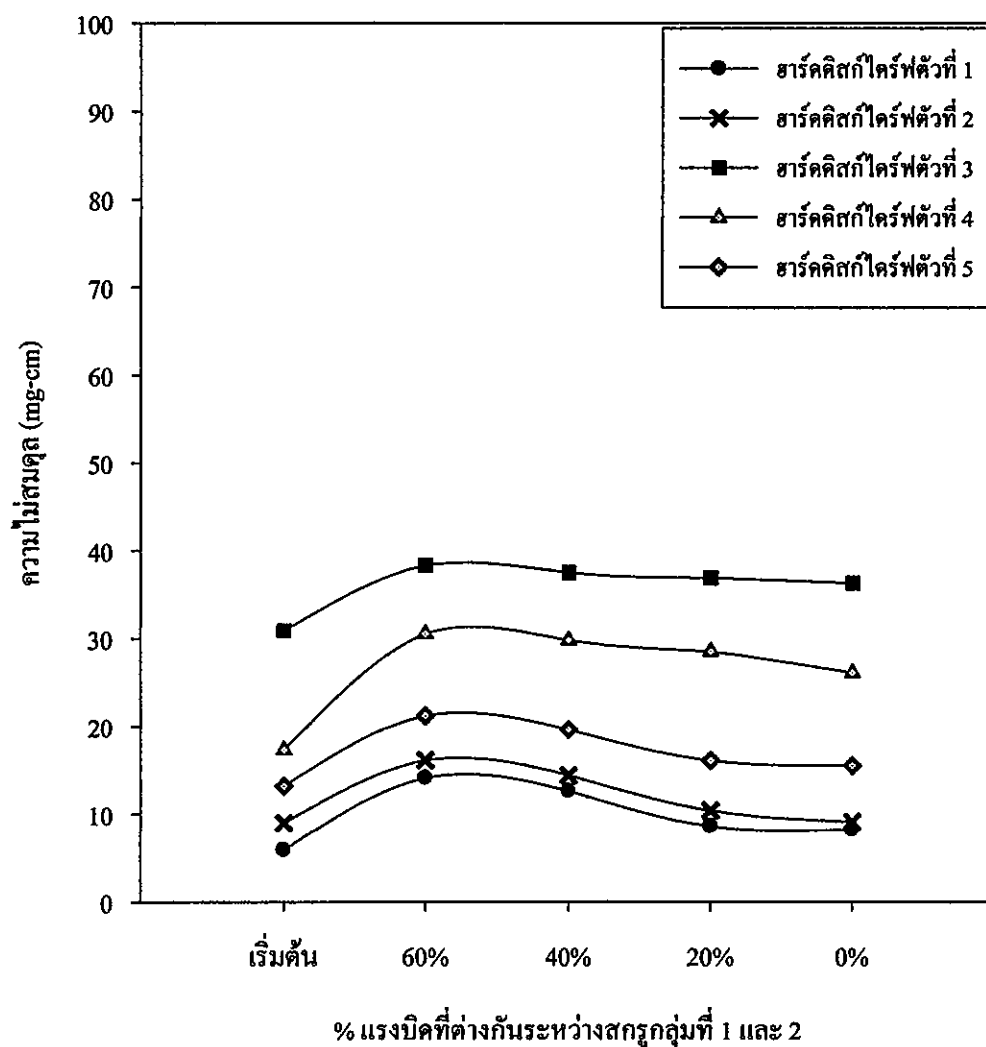
ผลจากการคำนวณ	ความไม่สมดุล (mg-cm)	มุมเฟส (องศา)
1. ก่อนการทดลอง	13.2	138
2. แรงบิดต่างกัน 60%	21.2	129
3. แรงบิดต่างกัน 40%	19.6	130
4. แรงบิดต่างกัน 20%	16.1	130
5. แรงบิดต่างกัน 0%	15.5	131



รูปที่ 2.29 ความไม่สมดุลในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดสกรู 5 ตัว ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 5

ตารางที่ 2.30 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว
กลุ่มที่ 1 สกรู 1 ตัวและกลุ่มที่ 2 สกรู 5 ตัว

ผลจากการทดลอง	ความไม่สมดุล (mg-cm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
1. ก่อนการทดลอง	5.9	9.0	30.9	17.3	13.2
2. แรงบิดต่างกัน 60%	14.1	16.1	38.3	30.5	21.2
3. แรงบิดต่างกัน 40%	12.6	14.4	37.5	29.8	19.6
4. แรงบิดต่างกัน 20%	8.6	10.4	36.9	28.5	16.1
5. แรงบิดต่างกัน 0%	8.2	9.1	36.3	26.1	15.5



รูปที่ 2.30 ค่าความไม่สมดุลที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มี 5 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทั้ง 5 ตัว

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200
โทร.(053)944176-7 โทรสาร (053)217287

Engineering Journal Chiang Mai University, Thailand.
Tel.+66(53)944176-7 Fax.+66(53)Fax 217287

ที่ ศธ 6393(14).1(5)/145

31 ส.ค. 2552

เรื่อง คอบรับบทความทางวิชาการ

เรียน คุณสามารถ นุ่งโคกลาง

ตามที่ท่านได้ส่งบทความทางวิชาการ เรื่อง “การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ อันเนื่องมาจากการขันสกรูโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์” เพื่อนำพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นั้น

ทางบรรณาธิการได้พิจารณา และมีความเห็นว่าบทความของท่านมีความเหมาะสมที่จะลงพิมพ์ เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เล่มที่ 16 (2) May - August 2009 ทั้งนี้ หากการพิมพ์วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นที่เรียบร้อย จะได้นำส่งวารสารดังกล่าวให้ท่านต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์อันเนื่องมาจากการขันสกรูโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์

The study on Rotating Unbalance in Hard Disk Drive due to Screw Tightening Using the Finite Element Method

สามารถ มุ่งโตกลาง¹ อุन्नัต พินโสภณ¹ ปัญญา สิงห์นาม²

Samart Mungtoklang¹ Unnat Pinsopon¹ Panya Singhnam²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²บริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สดอเรีย เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด จ.ปราจีนบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาดังความไม่สมดุลของชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์อันเนื่องมาจากการขันสกรูในกระบวนการการผลิต ชุดแผ่นดิสก์จะถูกประกอบเข้ากับแกนหมุนด้วยการขันสกรู และทำการปรับสมดุลเพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายและตรวจสอบความสมดุล แต่ปรากฏว่าความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย บทความนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์จากแบบจำลองและใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ ผลจากการคำนวณได้ถูกเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง พบว่าการที่สกรูแม้จะถูกขันด้วยแรงบิดที่เท่ากันอาจจะมีค่าของแรงที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละตัวทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น ผลจากการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 28.5% แต่พฤติกรรมการเกิดความไม่สมดุลในทุกกรณีของการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

คำสำคัญ: ความไม่สมดุล, ฮาร์ดดิสก์, การขันสกรู, หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

This paper presents the study on the unbalance of the rotating disks in hard disk drive caused by the manufacturing process. The disks are assembled to the spindle with screws. The disk-spindle mechanism is then balanced until the unbalance level is within the acceptance limit. The screws are then finally tightened with higher torque, and the unbalance in disk-spindle mechanism is found to be increased after the process. This paper is to investigate the reason of the increase of unbalance. The unbalance of the disk-spindle is computer simulated using finite element technique. It is found that screws tightened at the same torque may not have the same preload force. The differences in preload forces result in the unbalance. The results from computer simulation differ from the experimental results by 28.5%, however the results from both sources agree on the same trend.

Keywords: Unbalance, Hard Disk Drive, Screw tightening, Finite Element Technique.

1. บทนำ

ในช่วงที่ผ่านมา ประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว กล่าวคือ ทางด้านของความจุข้อมูล จำนวนร่องเก็บข้อมูลในหนึ่งหน่วยความยาวแนวรัศมี (Track Per Inch) เพิ่มขึ้นไปมากกว่า 25,000 ร่องในปัจจุบัน ทางด้านของความไว ความเร็วรอบของมอเตอร์ ปัจจุบันขึ้นไปถึง 10,000 รอบต่อวินาที เมื่อ TPI (Track Per Inch) และความเร็วยรอบของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ การสั่นสะเทือนใดๆ ของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์ ที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์จึงเป็นปัญหาสำคัญ เพราะการสั่นสะเทือนเนื่องจากความไม่สมดุลจะมีความรุนแรงมากขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น และการสั่นสะเทือนในแนวรัศมีทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแผ่นดิสก์และหัวอ่าน ขณะที่หัวอ่านกำลังอ่านหรือเขียนข้อมูล ทำให้การอ่านหรือการเขียนข้อมูลผิดพลาด ดังนั้นการสั่นสะเทือนของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์จึงเป็นปัญหาสำคัญที่อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์จำเป็นต้องแก้ไข

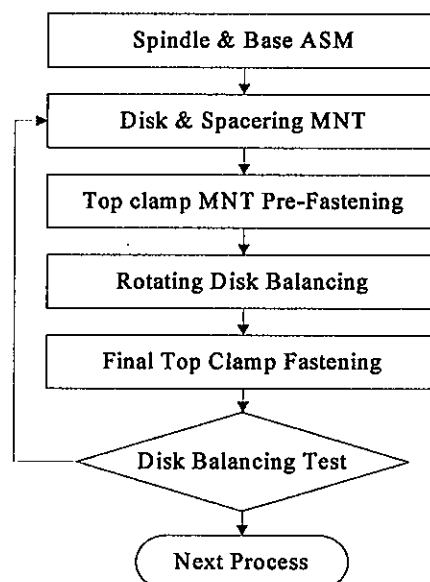
การวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุนในฮาร์ดดิสก์มักจะชี้สาเหตุของปัญหาว่าเกิดจากคุณภาพของวัตถุดิบและส่วนประกอบของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกน อย่างเช่น Branislav Hredzak [1] กล่าวว่า สาเหตุหนึ่งของการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของมวลของชิ้นส่วนที่หมุนในฮาร์ดดิสก์ และ จูตีมาจินคนาวัน [5] พบว่าการสั่นสะเทือนในแนวระนาบของระบบชุดแผ่นดิสก์และแกนหมุน เกิดจากการแกว่งและ precession ของแกนหมุนเป็นสาเหตุหลัก เป็นต้น การวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาและวิเคราะห์ถึงความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์

ในบทความนี้จะศึกษาถึงความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ที่เพิ่มขึ้นจากการขันสกรูแน่น โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งสถาบันการศึกษาและ

ภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และ โปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก การใช้งานสะดวก รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำและเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก

2. กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์

กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์กับแกนหมุน เริ่มจากการประกอบแกนหมุนยึดเข้ากับ โครงฐาน (Spindle & Base ASM) ต่อมาจะประกอบแผ่นดิสก์และแผ่นรองเข้ากับแกนหมุน (Disk & Spacing MNT) จากนั้นประกอบแผ่นยึดแผ่นดิสก์ (Top clamp) แล้วขันสกรูหลวม เพื่อยึดแผ่นดิสก์และแผ่นรอง (Spacer) ให้ติดกับแกนหมุน (Top clamp MNT pre-fastening) ต่อมาเป็นการปรับสมดุล (Rotating Disk Balancing) เมื่อชุดแผ่นดิสก์ถูกปรับสมดุลแล้วจะทำการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย (Final Top clamp fastening) ขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบความสมดุลของชุดแผ่นดิสก์ (Disk Balancing Test) ถ้าความไม่สมดุลของชุดแผ่นดิสก์มีค่าเกินกว่าที่กำหนดก็จะถูกส่งกลับไปยังขั้นตอน (Disk & Spacing MNT) เพื่อเริ่มกระบวนการขันสกรูและปรับสมดุลอีกครั้ง ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการประกอบชุดแผ่นดิสก์กับแกนหมุน

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตที่กล่าวมาข้างต้น ชุดแผ่นดิสก์จะถูกประกอบเข้ากับแกนหมุนด้วยการขัน สกรูหลวมและทำการปรับสมดุลเพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายและตรวจสอบความสมดุล แต่ปรากฏว่าความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ขั้นตอนที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นก็คือขั้นตอนการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ในขั้นตอนนี้จะขันสกรูด้วยเครื่องจักร โดยควบคุมแรงบิดของสกรูแต่ละตัวให้เท่ากัน จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่าการที่สกรูแม่จะถูกขันด้วยแรงบิดที่เท่ากันอาจจะมีค่าของแรงที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละตัวได้ [2, 3] แต่ในกระบวนการการผลิตไม่สามารถวัดแรงของสกรู โดยตรงได้ จึงไม่สามารถควบคุมแรงของสกรูแต่ละตัวให้เท่ากัน ได้

3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและแรงสกรู

การควบคุมแรงของสกรู โดยอ้างอิงจากแรงบิดของสกรูนั้นจะพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีได้มากถึง ±30% [2, 3] และถึงแม้จะมีการหล่อลื่นที่สกรูแล้วความผิดพลาดก็สามารถเกิดขึ้นได้มากถึง ±15% แต่ในการผลิตฮาร์ดดิสก์ต้องคำนึงถึงความสะอาดเป็นอย่างมาก สกรูที่ใช้จึงไม่ได้รับการหล่อลื่น ทำให้แรงที่เกิดขึ้นบนสกรูแต่ละตัวอาจจะมีขนาดแตกต่างกันได้ถึง ±30% ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและแรงสกรูสามารถอธิบายได้ด้วยสมการข้างล่างดังนี้

$$T_i \cong K_i F_i d \tag{1}$$

$$K_i \cong \left[0.50 \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu \tan \lambda} + 0.625 \mu_c \right] \tag{2}$$

เมื่อ

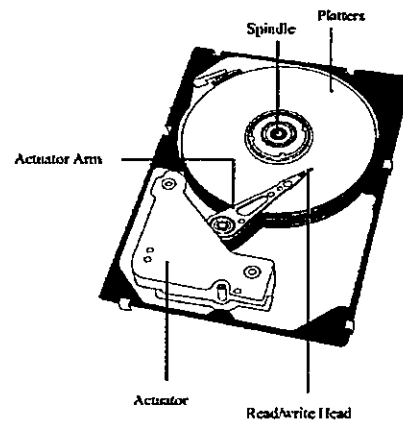
- T_i = Torque
- F = Screw force
- K_i = Torque coefficient
- d = diameter
- λ = Lead angle
- α = Radial angle of thread

$$\mu = \mu_c = \text{Friction coefficient}$$

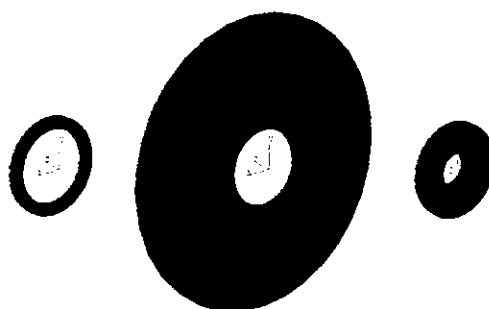
จากสมการ (2) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด K_i ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสกรูแต่ละตัวก็จะส่งผลถึงแรงบิดของสกรูแต่ละตัวด้วย ดังนั้นสมมุติฐานได้ว่าสาเหตุที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายอาจเนื่องมาจากการขันสกรูด้วยแรงบิดที่เท่ากันแต่แรงของสกรูแต่ละตัวนั้นอาจไม่เท่ากัน

4. การจำลองความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

องค์ประกอบทั่วไปของฮาร์ดดิสก์นั้นจะประกอบไปด้วย ชุดหัวอ่าน, ชุดแกนหมุน และชุดแผ่นดิสก์ ดังได้แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไป

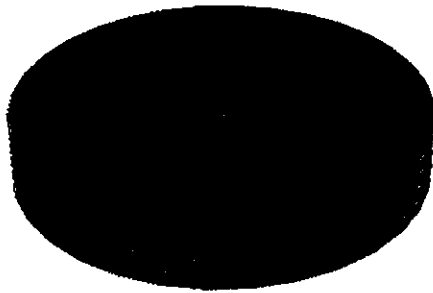


(ก) แผ่นรอง (ข) แผ่นดิสก์ (ค) แผ่นยึดแผ่นดิสก์

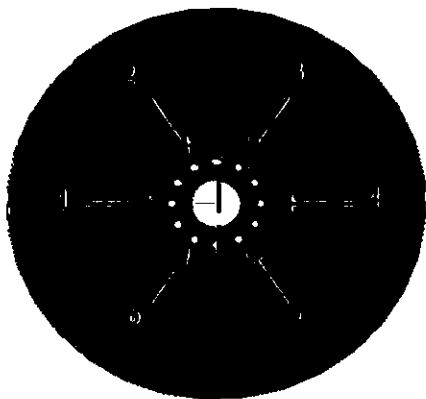
รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของชุดแผ่นดิสก์

โมเดลของชุดแผ่นคิสก์นั้นจะมีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้ แผ่นรอง (Spacers) แสดงในรูปที่ 3 (ก) แผ่นคิสก์ (Disks) แสดงในรูปที่ 3 (ข) และแผ่นยึดแผ่นคิสก์ (Top Clamp) แสดงในรูปที่ 3 (ค)

ชุดแผ่นคิสก์จะประกอบด้วย แผ่นคิสก์ 5 แผ่น แผ่นรอง 5 ตัว และแผ่นยึดแผ่นคิสก์ 1 ตัว ลักษณะการประกอบกันของชุดแผ่นคิสก์จะเริ่มด้วยแผ่นรองอยู่ด้านล่างสุดจากนั้นจะซ้อนทับด้วยแผ่นคิสก์แล้วจะสลับกันจนครบ 5 ชุด และที่บนสุดจะปิดด้วยแผ่นยึดแผ่นคิสก์เพื่อยึดชุดแผ่นคิสก์ให้ติดกับชุดแกนหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงลักษณะของชุดแผ่นคิสก์

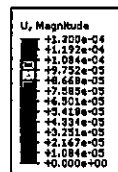


รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งรูสกรูของชุดแผ่นคิสก์

จากสมมุติฐานที่ว่าสาเหตุที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายอาจเนื่องมาจากการขันสกรูด้วยแรงบิดที่เท่ากันแต่แรงของสกรูแต่ละตัวอาจไม่เท่ากัน แต่กระบวนการประกอบชุด

แผ่นคิสก์ไม่สามารถวัดแรงของสกรูแต่ละตัวโดยตรงได้ทำให้ไม่ทราบค่าแรงของสกรูแต่ละตัวแตกต่างกันหรือไม่ จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลโดยกำหนดให้แรงของสกรูแต่ละตัวไม่เท่ากัน

ในกรณีนี้ได้กำหนดการเป็นแบบความดันที่รูสกรูบนแผ่นยึดแผ่นคิสก์จำนวน 6 รู (คำนวณหาความดันจากแรงสกรูที่ได้จากสมการที่ (1) และ (2)) และยึดแผ่นรองแผ่นล่างสุดไม่ให้เคลื่อนที่ พิจารณาแบ่งสกรูออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกได้แก่สกรูที่ 1, 2 และ 6 กลุ่มที่สองสกรูที่ 3, 4 และ 5 (ตำแหน่งรูสกรูตามรูปที่ 5) ภาวะของสกรูทั้งสองกลุ่มสามารถต่างกันได้มากถึง 60% หรือก็คือ $\pm 30\%$ ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นจึงกำหนดให้สกรูกลุ่มแรกมีความดันคงที่ 100% สกรูกลุ่มที่สองมีความดัน 40% เพื่อให้ภาวะของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันมากที่สุด 60% แล้วเพิ่มความดันสกรูกลุ่มที่สองขึ้นเพื่อให้ภาวะของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลง แล้วศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้ในกรณีสกรูทั้งสองกลุ่มมีความดันต่างกัน 60% แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งได้ขยายอัตราการเสียรูป (Deformation Scale Factor) เป็น 50 เท่า เพื่อให้เห็นรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะเห็นว่าด้านที่มีความดันมากจะมีการเสียรูปมากกว่าด้านที่มีความดันน้อย การเสียรูปของแผ่นคิสก์ทั้ง 5 แผ่นจะมีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด ต่างกันเพียงขนาดการเสียรูป



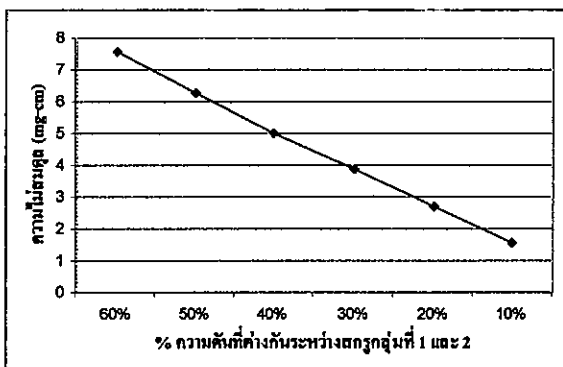
รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์กรณีความดันต่างกัน 60%

หลังจากที่ได้ผลลัพธ์และข้อมูลที่ต้องการออกมาจากโปรแกรม ABAQUS แล้ว จะได้นำข้อมูลดังกล่าวมานั้น

มาคำนวณหาตำแหน่งใหม่ของจุดกึ่งกลางมวลและค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะได้แสดงขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1. กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและระยะขจัดที่เปลี่ยนไปของแต่ละโหนด
- ขั้นตอนที่ 2. คำนวณหาตำแหน่งใหม่ของแต่ละโหนด
- ขั้นตอนที่ 3. คำนวณหาตำแหน่งของจุดกึ่งกลางมวลของแต่ละเอลิเมนต์
- ขั้นตอนที่ 4. คำนวณหาปริมาตรของแต่ละเอลิเมนต์
- ขั้นตอนที่ 5. คำนวณหาตำแหน่งของจุดกึ่งกลางมวลที่เปลี่ยนไปของชุดแผ่นคิสก์
- ขั้นตอนที่ 6. คำนวณหาความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น

นำผลที่ได้จากการคำนวณหาความไม่สมดุลมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าเมื่อสกรูกลุ่มแรกและสกรูกลุ่มที่สองมีความดันแตกต่างกัน 60% จะมีความไม่สมดุลมากที่สุดถึง 7.565 mg-cm และเมื่อความดันของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันน้อยลง ความไม่สมดุลก็จะลดลงด้วยเช่นกัน โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น



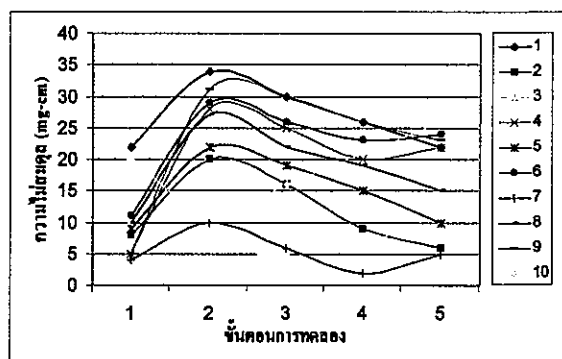
รูปที่ 7 แสดงกราฟความไม่สมดุล ในกรณีต่างๆ

5. การทดลองและผลการทดลอง

ในกระบวนการประกอบชุดแผ่นคิสก์จะไม่สามารถวัดแรงของสกรูแต่ละตัวโดยตรงได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยกำหนดให้ภาระเป็นแบบแรงบิดของสกรู

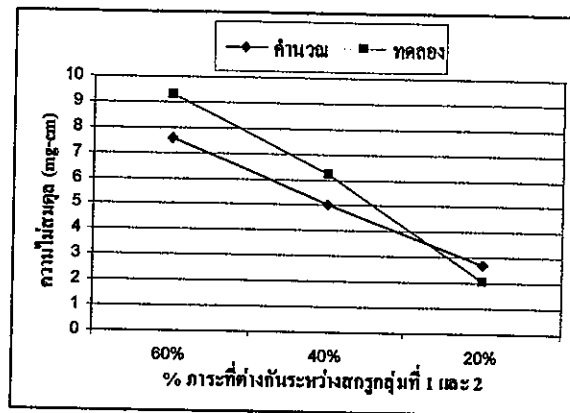
แต่ละตัวไม่เท่ากัน เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น เจื่อน ใจในการทดลองถูกกำหนดให้คล้ายกับเจื่อน ใจในการคำนวณเพื่อที่จะนำมาทดสอบความถูกต้องของการคำนวณด้วยผลการทดลอง โดยพิจารณาแบ่งสกรูออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกสกรูที่ 1, 2 และ 6 กลุ่มที่สองสกรูที่ 3, 4 และ 5 (ตำแหน่งสกรูตามรูปที่ 5) โดยขันสกรูกลุ่มแรกด้วยแรงบิดคงที่ 100% และเปลี่ยนแปลงแรงบิดของสกรูกลุ่มที่สองจากน้อยไปหามาก เพื่อหาความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นแล้วนำไปเปรียบเทียบกับกรคำนวณ ซึ่งทำการทดลองกับฮาร์ดดิสก์ 10 ตัว และมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1. ทดสอบค่าความไม่สมดุลก่อนการขันสกรูแน่น
- ขั้นตอนที่ 2. ขันสกรูกลุ่มแรกด้วยแรงบิด 100% และกลุ่มที่สองด้วยแรงบิด 40% เพื่อให้สกรูทั้งสองกลุ่มมีแรงบิดต่างกัน 60% แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุล
- ขั้นตอนที่ 3. ขันสกรูกลุ่มที่สองเพิ่มแรงบิดเป็น 60% เพื่อให้สกรูทั้งสองกลุ่มมีแรงบิดต่างกันลดลงเหลือ 40% แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุล
- ขั้นตอนที่ 4. ขันสกรูกลุ่มที่สองเพิ่มแรงบิดเป็น 80% เพื่อให้สกรูทั้งสองกลุ่มมีแรงบิดต่างกันลดลงเหลือ 20% แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุล
- ขั้นตอนที่ 5. ขันสกรูกลุ่มที่สองเพิ่มแรงบิดเป็น 100% เพื่อให้สกรูทั้งสองกลุ่มมีแรงบิดเท่ากัน แล้วทดสอบค่าความไม่สมดุล



รูปที่ 8 แสดงกราฟความไม่สมดุลจากการทดลอง

ผลจากการทดลองของฮาร์ดดิสก์ทั้ง 10 ตัวได้แสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการชันสกรู เมื่อชันสกรูในขั้นตอนที่ 2 ความไม่สมดุลก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสกรูทั้งสองกลุ่มมีแรงบิดต่างกัน เมื่อแรงบิดของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลงในขั้นตอน ต่อๆ มา ความไม่สมดุลก็จะลดลงด้วย ผลการทดลองส่วนใหญ่จะมีลักษณะเหมือนกัน แต่มีบางกรณี เช่น ผลการทดลองของฮาร์ดดิสก์ตัวที่ 10 จะมีลักษณะลดลงในขั้นตอนที่ 2 แล้วจากนั้นก็เพิ่มขึ้นในขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 นั้น เพราะว่าเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นก่อนการชันสกรูแน่นในขั้นตอนที่ 1 และเฟสของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากการชันสกรูแน่นในขั้นตอนที่ 2 มีมุมตรงกันข้ามทำให้ความไม่สมดุลทั้งสองหักล้างกัน



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความ ไม่สมดุล

นำผลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยผลต่างของความไม่สมดุลที่เกิดจากภาระที่ต่างกันของสกรูทั้งสองกลุ่มแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 9 จะเห็นว่าผลการทดลองกับผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ค่าคุณสมบัติของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใช้ในการคำนวณ

ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการชันสกรูในกรณีที่ได้พิจารณาสามารถแก้ไขให้ความไม่สมดุลลดลงได้โดยชันสกรูด้านตรงข้ามเพิ่ม ซึ่งจะสังเกตได้จากผลการทดลอง (รูปที่ 8) เช่น เมื่อชันสกรูกลุ่มที่สองเพิ่มเพื่อให้แรงบิดของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลงทำให้ความไม่สมดุลนั้นลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุล

ภาระของสกรูทั้ง 2 กลุ่ม	ความไม่สมดุล (mg-cm)	
	คำนวณ	ทดลอง
แตกต่างกัน 60%	7.565	9.3
แตกต่างกัน 40%	5.011	6.2
แตกต่างกัน 20%	2.698	2.1

6. สรุป

จากการศึกษาและวิเคราะห์ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการชันสกรูทำให้ทราบว่า

1. แรงของสกรูแต่ละตัวมีผลต่อจุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นดิสก์ ซึ่งจุดกึ่งกลางมวลจะเคลื่อนตัวไปในทิศทางของสกรูตัวที่ได้รับแรงมากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความไม่สมดุล
2. ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการชันสกรูในกรณีที่ได้พิจารณานี้สามารถแก้ไขให้ความไม่สมดุลลดลงได้โดยชันสกรูด้านตรงข้ามเพิ่ม
3. การใช้หลักการ ไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 28.5% แต่สามารถใช้การอ้างอิงพฤติกรรมในการเกิดความไม่สมดุลได้

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบินที่กข้อมูลและการประยุกต์ใช้งานสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท อีตาชิ โกลบอล สคอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Branislav Hredzak and Guoxiao, Investigation of the feasibility of active balancing of hard disk drives, *Mechatronics* 14, pp. 853-859, 2004.
- [2] T. H. Lambert, Effect of Variation in the Screw Thread Coefficient of Friction on Clamping Force of Bolted Connection, *J. Mech Eng. Sci.* 4, p. 401, 1962.
- [3] Robert L. Norton., *Machine Design An Integrated Approach Second Edition*, Prentice-Hall International, p. 854
- [4] V. Wowk., *Machinery Vibration : Balancing*, McGraw-Hill, Inc. p. 57
- [5] จูติมา จินตนาวัน, การสั่นสะเทือนทางกลของระบบคอมพิวเตอร์ Hard Disk Drives (HDD), วารสารสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 54-60, มีนาคม, 2544.
- [6] ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
- [7] ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [8] เศษ พุทธเจริญทอง, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัทพิมพ์ดี จำกัด, กทม. 2541
- [9] บรรจบ อรชร, กลศาสตร์ของแข็ง, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัทพิมพ์ดี จำกัด, กทม. 2541

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย สามารถ มุ่งโตกลาง
วัน เดือน ปีเกิด	26 ตุลาคม 2525
ที่อยู่	215 ม. 5 ต. ลำคองหษ์ อ. โนนสูง จ. นครราชสีมา 30160 โทร. 085-4945101, E-mail: heavy3340@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544 - 2545	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างจักรกลหนัก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
พ.ศ. 2547 - 2549	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550 - 2552	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2546 – 2547	ตำแหน่ง ช่างบริการแทรกเตอร์ บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด (คลองหลวง, ปทุมธานี.)

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นคิส์ก์ในฮาร์ดคิส์ก์อันเนื่องมาจากการขันสกรูโดยใช้
หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์