

การปรับความสมดุลการหมุนของดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

นางสาวเกศรินทร์ บรรลุศิลป์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DISK BALANCE ADJUSTMENT IN HARD DISK DRIVE

Miss Kesirin Bunlusin



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

เกศรินทร์ บรรลุศิลป์ : การปรับความสมดุลการหมุนของดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (DISK BALANCE ADJUSTMENT IN HARD DISK DRIVE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร, 117 หน้า.

ความไม่สมดุลของดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อให้การอ่านเขียนข้อมูลขณะหมุนด้วยด้วยเร็วรอบสูงมีความเสถียรและแม่นยำ ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องปรับเพื่อให้ความไม่สมดุลของดิสก์ให้มีค่าน้อยเข้าใกล้ศูนย์ที่สุด เพื่อให้เกิดความสมดุล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการวัดและปรับความสมดุลของดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เนื่องจากกระบวนการนี้มีอัตราผลผลิตต่ำและเวลาในกระบวนการเป็นคอขวดเนื่องจากจำนวนของครั้งการเคาะขึ้นงานเพื่อการปรับสมดุลของดิสก์ไม่เท่ากัน การปรับปรุงกระบวนการผลิตนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์ทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ (1) รูปแบบการวางแผ่นดิสก์และแกนของสปินเดิลมอเตอร์ 5 รูปแบบ (2) ปัจจัยมุมมองในการเคาะ 2 ระดับ (3) ความสูงของฟินเคาะที่ 2 ระดับ วิเคราะห์ผลข้อมูลโดยวิธีการทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า มี 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับสมดุลของดิสก์คือ รูปแบบการวางดิสก์ให้ชิดขอบแกนของสปินเดิลหนึ่งด้าน และที่มุมมองในการเคาะ 0 องศา จะให้ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์น้อยที่สุด สามารถลดค่าเฉลี่ยในการเคาะเพื่อปรับความสมดุลจาก 7 ครั้ง เป็น 5 ครั้ง อัตราผลผลิตเพิ่มจาก 97.45% เป็น 99.30% ทำให้ผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์เพิ่มขึ้น 72.33%

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อผู้นิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5371499921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: DISK BALANCE / HARD DISK DRIVES / CENTRIFUGAL FORCE

KESIRIN BUNLUSIN: DISK BALANCE ADJUSTMENT IN HARD DISK DRIVE.

ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI POORJINDANET, Ph.D., 117 pp.

The Unbalance in a Hard Disk Drive (HDD) is the key factor in affecting the performance of a HDD to be effective in stability and accuracy of the read-write operation while rotating at high speed. In the production process the unbalance value of a HDD is used to achieve after correction an unbalance value of zero.

The objective of this research is to increase the efficiency of disk balance adjustment process. Due to the low process yield compared to other existing models, as well as the long cycle time of the testing process considered as the bottleneck, the repeating hitting number of each drive until a positive balance result is reached and recorded as the performance of disk balance adjustment process. The studies of 3 main factors which are influencing the numbers of hitting processes are (1) the position of the disk and the gap between the disk and the spindle motor at 5 levels, (2) the hitting angle at 2 levels and (3) the pin height at 2 levels. The experiments are designed and performed based on the statistical at a significant level of 0.05. Based on the experiments results, the conclusion is that there are 2 main influencing factors. One is adjusting the position of the disk by creating a gap between the disk and the spindle motor in same direction for both disks. The second is performing the hitting under an angle of 0 degree. After performing tests under the new conditions and by counting the average hitting cycles, the final test results shows a major decrease from 7 to only 5 cycles and the yield of unbalance adjustment process is improved from 97.45% to 99.30%. With other words, the process efficiency is improved with 72.33%.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานวิจัยนี้ได้มาด้วยความอนุเคราะห์อย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาและ แสดงความคิดเห็น แก้ไขข้อบกพร่อง จนงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทรธิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติตเจริญ และ รองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกศึกษ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจ แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้บริหารและโรงงานกรณีศึกษาที่ช่วยสนับสนุนงานวิจัย ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลอง การเก็บข้อมูล ทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยสนับสนุนให้ คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	9
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
1.6 ขั้นตอนและแผนดำเนินงานวิจัย	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 หลักการทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์	12
2.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบวงกลม (Circular motion).....	14
2.2.1 วัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่	15
2.2.2 ความเร่งสู่ศูนย์กลาง (a_c).....	16
2.2.3 การหาแรงที่ให้วัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลม	17
2.2.4 อัตราเร็วเชิงมุม (Angular speed)	17
2.3 การสั่นสะเทือน.....	19
2.3.1 ที่มาของการสั่นสะเทือน (Vibration Source).....	19

2.3.2 รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Type)	20
2.3.3 ค่าในการวัดการสั่นสะเทือน	22
2.3.4 หน่วยวัดการสั่นสะเทือน (Vibration Measurement Unit)	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	31
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	36
3.1.1 วัสดุ	36
3.1.2 อุปกรณ์	36
3.2 ข้อกำหนด ปัจจัยควบคุมในการทดลอง	36
3.3 การวางแผนการทดลอง	36
3.3.1 ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม	37
3.3.2 จำนวนการทดลอง	37
3.3.3 การหาจำนวนชิ้นงานตัวอย่างในการทดลอง	37
3.4 วิธีการทดลอง	38
3.4.1 วิธีการการทดลองระยะห่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในของดิสก์	38
3.4.2 วิธีการทดลองมุมมองค่าในการเคาะ	38
3.4.3 วิธีการทดลองความสูงของพินเคาะ	39
3.5 วิธีการวิเคราะห์ผลของข้อมูล	39
3.6 การนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิต	40
บทที่ 4 ผลการวิจัย	41
4.1 ผลการหาจำนวนชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละการทดลอง	41
4.2 ผลของอิทธิพลของปัจจัย Format, Degree และ H ที่มีผลต่อการเคาะ	42

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธี General Linear Model	43
4.2.2 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง	45
4.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ	94
4.5 การทดสอบยืนยันผล และผลการทดสอบยืนยันผล	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการวิจัย	101
5.2 อภิปรายผลของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์	102
5.2.1 ผลของปัจจัยระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนของสปินเดิลมอเตอร์	102
5.2.2 ผลของปัจจัยมุมมองศานในการเคาะ	103
5.3 งานวิจัยที่ควรศึกษาต่อในอนาคต	103
รายการอ้างอิง	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	117

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เวลาในการทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ของแต่ละชั้นตอน.....	8
ตารางที่ 2 แบบจำลองการทดลองระยะช่องว่างระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของแผ่นดิสก์ (C).....	9
ตารางที่ 3 แบบจำลองมุมมองศาในการเคาะ (D).....	10
ตารางที่ 4 แบบจำลองความสูงของ Hitting Pin (H)	10
ตารางที่ 5 ระดับการทดลองของปัจจัยระยะช่องว่าง ระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของดิสก์	33
ตารางที่ 6 ระดับการทดลองของปัจจัยมุมมองศาในการเคาะ	34
ตารางที่ 7 ระดับการทดลองของปัจจัยความสูงของพินเคาะ	35
ตารางที่ 8 ปัจจัยนำเข้าและระดับของปัจจัยในการทดลอง	37
ตารางที่ 9 ผลการจากการนำเข้าปัจจัย F, Degree และ H จากการออกแบบการทดลองแบบ General Full Factorial Design	42
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบสมมติฐานค่ามัธยฐานปัจจัยนำเข้า Clearance.....	51
ตารางที่ 11 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H1	53
ตารางที่ 12 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H2	55
ตารางที่ 13 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D180 H1	57
ตารางที่ 14 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D180 H2	59
ตารางที่ 15 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D0 H1	61
ตารางที่ 16 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D0 H2	63
ตารางที่ 17 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D180 H1	65
ตารางที่ 18 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D180 H2	67

ตารางที่ 19 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D0 H1.....	69
ตารางที่ 20 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D0 H2.....	71
ตารางที่ 21 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H1	73
ตารางที่ 22 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H2	75
ตารางที่ 23 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D0 H1.....	77
ตารางที่ 24 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D0 H2.....	79
ตารางที่ 25 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D180 H1	81
ตารางที่ 26 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D180 H2	83
ตารางที่ 27 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D0 H1.....	85
ตารางที่ 28 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D0 H2.....	87
ตารางที่ 29 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D180 H1	89
ตารางที่ 30 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D180 H2	91
ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความสมดุลจากการเคาะ	93
ตารางที่ 32 ผลการทดสอบการปรับค่าความสมดุลของดิสก์เพื่อทดสอบยืนยันผล	96
ตารางที่ 33 อัตราผลผลิตเปรียบเทียบก่อนการทดลองและผลการทดลอง	100

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1	กระบวนการประกอบไดรฟ์ (HDE Flow Process Chart).....	3
รูปที่ 2	การทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์.....	4
รูปที่ 3	ลักษณะความไม่สมดุลและเป้าหมายในการปรับความสมดุลของดิสก์.....	5
รูปที่ 4	อุปกรณ์หลักของชุดหัวเคาะของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์	6
รูปที่ 5	แผนภาพแสดงอัตราผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์	7
รูปที่ 6	แผนภาพแสดงข้อมูลจำนวนการเคาะของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์	8
รูปที่ 7	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และหลักในการหมุน	12
รูปที่ 8	ลักษณะการหมุนที่สมดุลและไม่สมดุล	13
รูปที่ 9	หลักในการวัดความสมดุลของดิสก์	13
รูปที่ 10	แรงกระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนววงกลมในระนาบระดับ	14
รูปที่ 11	วัตถุเคลื่อนที่ในแนววงกลมในระนาบด้วยอัตราเร็วคงตัว	15
รูปที่ 12	การเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ในแนววงกลมทำให้เกิดความเร่ง	16
รูปที่ 13	การเคลื่อนที่แบบวงกลมทำให้มุมที่จุดศูนย์กลางเปลี่ยนแปลง	18
รูปที่ 14	อัตราส่วนระหว่างส่วนโค้งที่รองรับมุมกับรัศมีของวงกลม	18
รูปที่ 15	การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของ เครื่องจักร	21
รูปที่ 16	การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน.....	21
รูปที่ 17	การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน	22
รูปที่ 18	รอบของการเคลื่อนที่ (Cycle of Motion)	23
รูปที่ 19	ประเภทของแอมพลิจูด	23
รูปที่ 20	ความถี่ธรรมชาติของสปริง	25

รูปที่ 21	ระยะทางในการเคลื่อนที่ของเพลลาต่อการหมุน 1 รอบ	26
รูปที่ 22	ข้อมูลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของดิสก์.....	32
รูปที่ 23	ข้อมูลช่องว่างระหว่างดิสก์กับแกนสปินเดิลมอเตอร์	32
รูปที่ 24	แสดงการทำงานของอุปกรณ์ผลักดิสก์.....	38
รูปที่ 25	จำนวนชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองในแต่ละการทดลอง	41
รูปที่ 26	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย General Linear Model	43
รูปที่ 27	ผลของปัจจัยหลักที่มีต่อจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน	44
รูปที่ 28	ผลของปัจจัยร่วมที่มีต่อจำนวนครั้งในของการเคาะชิ้นงาน	45
รูปที่ 29	ผลการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าตกค้าง	46
รูปที่ 30	กราฟทดสอบความเป็นอิสระแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าส่วนตกค้างกับความ ความต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล	47
รูปที่ 31	กราฟทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนระหว่าง ค่าส่วนตกค้างกับ จำนวนครั้งของการเคาะ	48
รูปที่ 32	ผลการทดสอบสมมติฐานแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ ของปัจจัย Clearance ด้วยวิธี Kruskal-Wallis Test.....	50
รูปที่ 33	การกระจายตัวของค่ามัธยฐานด้วยวิธี Mood Median Test.....	50
รูปที่ 34	แถบสีระดับในการเคาะและความหมายในการอ่านกราฟ	52
รูปที่ 35	การเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ	95
รูปที่ 36	กราฟแสดงอัตราการผลิตเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง	97
รูปที่ 37	การกระจายตัวค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของ กระบวนการปัจจุบันและผลการศึกษา	98
รูปที่ 38	ผลการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความ สมดุลของดิสก์ของกระบวนการปัจจุบันและผลการศึกษา	99
รูปที่ 39	ลักษณะการผลักดิสก์ให้น้ำหนักรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง	102

รูปที่ 40 ตำแหน่งที่มุมเคาะ 103



บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการส่งออกของประเทศไทย ด้วยอัตราการส่งออกที่สูงจากการที่มีผู้ผลิตรายใหญ่เข้ามาตั้งฐานการผลิตเป็นจำนวนมาก ทำให้ประเทศไทยจัดว่าเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ด้วยการแข่งขันกันด้านเทคโนโลยีและวงจรชีวิตที่สั้นสำหรับสินค้าประเภทนี้ ทำให้ผู้ผลิตต้องปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตเพื่อตอบสนองและเติมเต็มความต้องการของผู้บริโภคให้เพียงพออยู่เสมอ กลยุทธ์อย่างหนึ่งที่น่าสนใจในการแข่งขันคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเพื่อพัฒนาคุณภาพการผลิต เพิ่มกำลังการผลิต และลดต้นทุนการผลิต โดยการรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ลดของเสียเพื่อให้มีผลผลิตมากและลดระยะเวลาในการซ่อมแซมของเสีย จึงถือว่าเป็นกลยุทธ์หนึ่งในลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

1.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) ขายส่งออกต่างประเทศ โดยมีผลิตภัณฑ์หลักอยู่ 3 กลุ่มคือ ขนาด 3.5 นิ้ว 2.5 นิ้ว และกลุ่ม 2.5 นิ้ว สำหรับแม่ข่าย ซึ่งแบ่งกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ 1. กระบวนการประกอบหัวอ่านเขียน (Head Stack Assembly Process : HSA) 2. กระบวนการประกอบไดรฟ์ (Hard Disk Enclosure Process : HDE) 3. กระบวนการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive : HDD) ส่วนกระบวนการวัดและปรับค่าความไม่สมดุลของดิสก์ (Disk Balancer) จะเป็นกระบวนการหนึ่งในกระบวนการประกอบไดรฟ์ (HDE) ซึ่งผู้วิจัยจะทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการนี้

ผลิตภัณฑ์ของโรงงาน

ในปัจจุบันโรงงานดำเนินการผลิต ผลิตภัณฑ์หลัก ๆ อยู่ 3 ผลิตภัณฑ์ คือ

1. ผลิตภัณฑ์ขนาด 2.5 นิ้ว สำหรับคอมพิวเตอร์พกพา (Mobile Product)
2. ผลิตภัณฑ์ขนาด 2.5 นิ้ว สำหรับเครื่องแม่ข่าย (Enterprise Product)
3. ผลิตภัณฑ์ขนาด 3.5 นิ้ว สำหรับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั่วไป (Desktop Product)

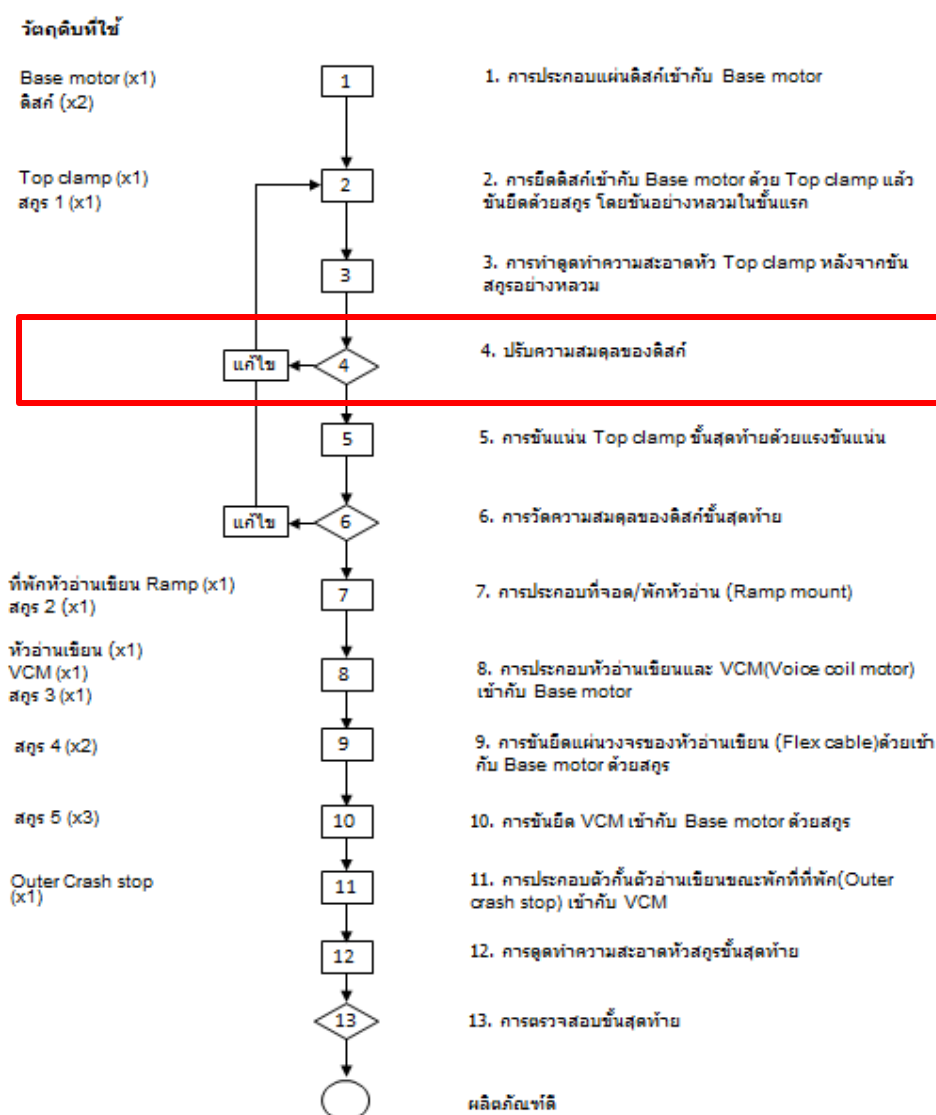
ปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าการใช้งานของคอมพิวเตอร์กลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำเนินชีวิต เมื่อก้าวถึงคอมพิวเตอร์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นส่วนประกอบหลักสำคัญ ซึ่งทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูล ผู้ใช้งานมีความต้องการให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุข้อมูลได้มาก และการตอบสนองอ่านเขียนที่เร็ว ซึ่งผู้ผลิตต้องพัฒนาคุณสมบัตินี้ให้ตอบสนองต่อความต้องการ และด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุได้มากถึงระดับเทอราไบต์ ที่ความเร็วรอบในการหมุน 7200 รอบต่อนาที ทำให้ความสมดุลของดิสก์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งในการบันทึก อ่านและเขียนข้อมูล ซึ่งหากดิสก์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูง ไม่สมดุลหรือไม่เสถียร การอ่านเขียนข้อมูลก็อาจมีความผิดพลาดสูงเช่นกัน

1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานกรณีศึกษาได้ออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อพัฒนาคุณภาพในการอ่านเขียนข้อมูล ด้วยโดยควบคุมความเสถียรในการหมุนของดิสก์ หรือที่เรียกว่าความสมดุลของดิสก์ให้อยู่ในระดับที่ส่งผลต่อการอ่านเขียนด้วยความเร็วรอบสูงน้อยที่สุด แต่เนื่องจากกระบวนการประกอบมีความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น คน เครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน รวมทั้งลักษณะของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลในชิ้นงาน เพื่อเป็นการควบคุมเรื่องความสมดุลของดิสก์ให้มีประสิทธิภาพ ในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา มีขั้นตอนหนึ่งเพื่อทำหน้าที่ในการปรับความสมดุลของดิสก์ให้อยู่ในค่ายอมรับได้ก่อนที่จะส่งไปยังกระบวนการถัดไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการการันตีเรื่องความไม่สมดุลของดิสก์ที่จะส่งผลต่อการอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทางโรงงานกรณีศึกษาเรียกว่ากระบวนการนี้ว่ากระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์ โดยหน้าที่หลักของกระบวนการนี้คือ วัดและปรับความไม่สมดุลของดิสก์ (Unbalance value) ที่เกิดจากกระบวนการประกอบ เพื่อให้ความสมดุลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนที่จะส่งไปยังกระบวนการประกอบถัดไป โดยค่าความสมดุลของดิสก์ที่ถูกค้ำกำหนดคือ ค่าความสมดุลของดิสก์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 mg-cm แต่กระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์ถูกกำหนดไว้ที่ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 mg-cm ในจำนวนเคาะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 23 ครั้ง การปรับความสมดุลของดิสก์ในกระบวนการนี้จะเรียกว่าการเคาะ ซึ่งมาจากเสียงและลักษณะการทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการนี้

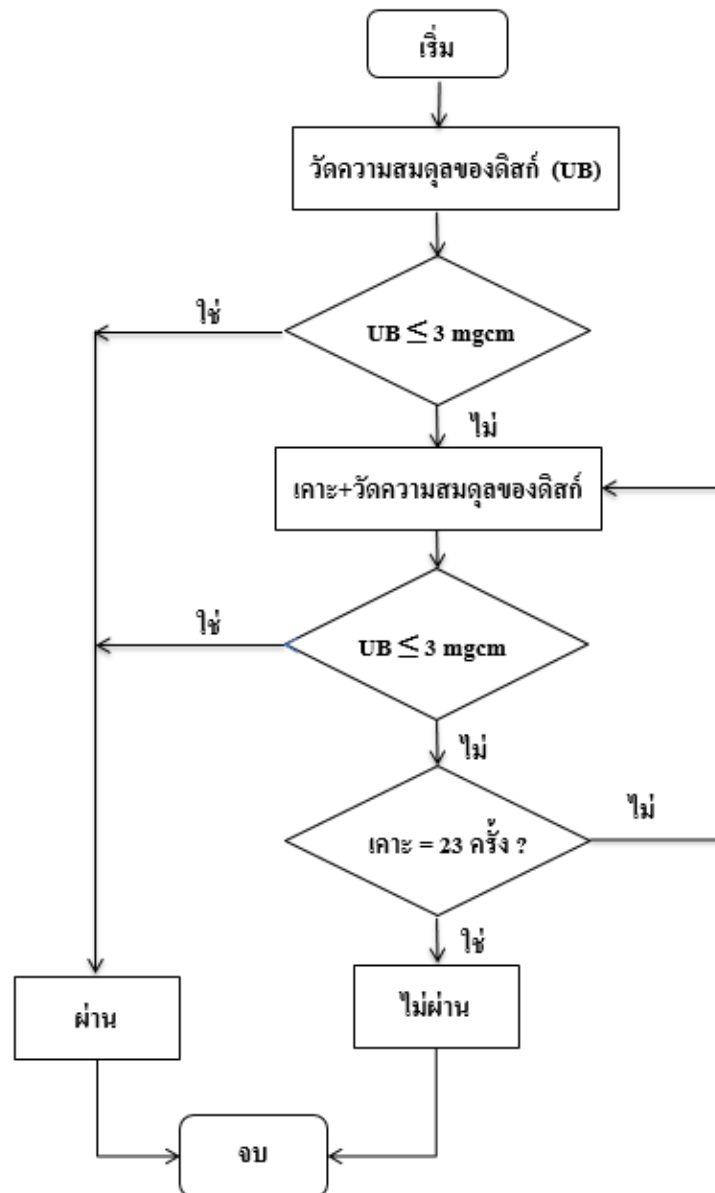
กระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์เป็นกระบวนการลำดับที่ 4 ของกระบวนการหลักการประกอบไดรฟ์ (HDE) ขั้นตอนการประกอบไดรฟ์เริ่มจากการประกอบแผ่นดิสก์เข้าใน Base motor ระหว่างแกนสปินเดิลมอเตอร์โดยมี Spacer ring หรือแหวนรองดิสก์กั้นระหว่างดิสก์ 2 แผ่น จากนั้นจะส่งต่อมายังกระบวนการประกอบ Top clamp ยึดแผ่นดิสก์กับสปินเดิล

มอเตอร์และขันยึดด้วยแรงบิด (Torque) น้อยที่ค่าแรงบิด (Torque) เท่ากับ 35 mNm เพื่อให้สามารถปรับความสมดุลที่ได้ง่าย กระบวนการต่อมาเป็นการดูทำความสะอาดหัวสกรู Top clamp หลังการขัน แล้วเป็นปรับความสมดุลของดิสก์ ซึ่งถ้าผลการทดสอบค่าความสมดุลของดิสก์ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 3 mg-cm จะส่งต่อไปยังกระบวนการต่อไป หากค่าความสมดุลไม่ผ่านเกณฑ์จะทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง และหากไม่ผ่านอีกครั้งจะถือเป็นของเสีย หากการทดสอบซ้ำผ่านจะส่งไปยังขั้นตอนต่อไปคือ การขันยึดแน่นที่ Top clamp สกรูด้วยค่าแรงบิดสูง ที่ค่าแรงบิด Torque = 0.300 Nm แล้วทำการทดสอบความสมดุลของดิสก์ครั้งสุดท้ายอีกครั้งที่กระบวนการวัดความสมดุลของดิสก์ ดังรูปที่ 1 ตั้งแต่กระบวนการที่ 7 เป็นต้นไปไม่มีความเกี่ยวข้องกับการวัดความสมดุลของดิสก์ ไม่ขออธิบายรายละเอียด



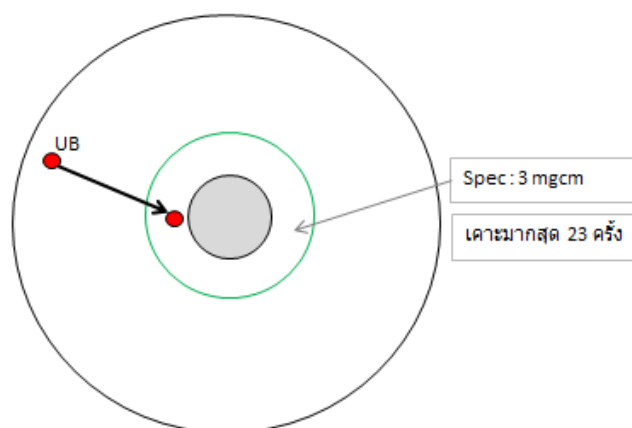
รูปที่ 1 กระบวนการประกอบไดรฟ์ (HDE Flow Process Chart)

การทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ จะวัดความสมดุลของดิสก์ออกมาเป็นค่าความไม่สมดุล (Unbalance value) หากค่าที่วัดได้เกินค่าที่กำหนด (Specification) ไว้ เครื่องจะทำการปรับความสมดุลของดิสก์ จนกว่าค่าความสมดุลของดิสก์จะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 mg-cm หรือจำนวนการเคาะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 23 ครั้ง ดังแผนภาพที่ 2



รูปที่ 2 การทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์

การปรับความสมดุลของดิสก์ของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ จะปรับค่าความสมดุลของดิสก์ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Piezo Electric ซึ่งขณะทำงานจะมีเสียงคล้ายการเคาะ ทางโรงงานกรณีศึกษาจึงเรียกลักษณะของการปรับความสมดุลนี้ว่า การเคาะ

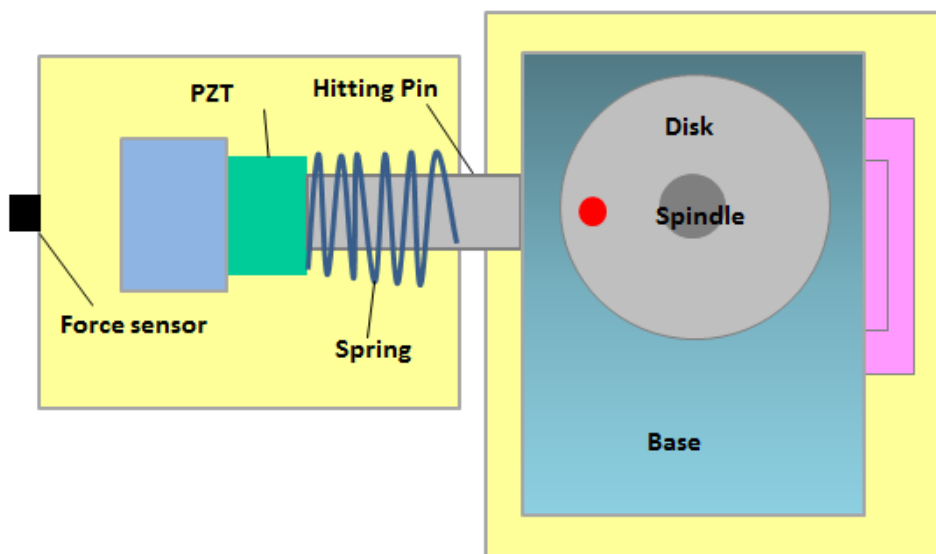


รูปที่ 3 ลักษณะความไม่สมดุลและเป้าหมายในการปรับความสมดุลของดิสก์

จากรูปที่ 3 การทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์จะทำการปรับค่าความสมดุลของดิสก์จากตำแหน่ง UB ซึ่งเป็นจุดสีแดงแสดงถึงตำแหน่งของความไม่สมดุล เพื่อให้ความสมดุลเคลื่อนที่มายังเกณฑ์ที่สมดุลตามข้อกำหนดดังที่กล่าวมาในตอนต้น

ในหนึ่งสายการผลิตมีเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์หนึ่งเครื่อง และในหนึ่งเครื่องประกอบด้วยชุดหัวเคาะ 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีอุปกรณ์หลัก ดังนี้

1. Force sensor ทำหน้าที่วัดแรงสั่นสะเทือนของชิ้นงานและดิสก์ขณะที่หมุนและแปลงค่าออกมาเป็นค่าความไม่สมดุลของดิสก์
2. Piezo Electric (PZT) ทำหน้าที่ในการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ชนิดลด Spring เป็นชนิดลดส่งแรงเคาะจาก PZT ไปสู่ชิ้นงาน
3. พินเคาะ (Hitting Pin) เป็นแกนที่เชื่อมต่อไปสัมผัสชิ้นงาน เป็นจุดในการเคาะ

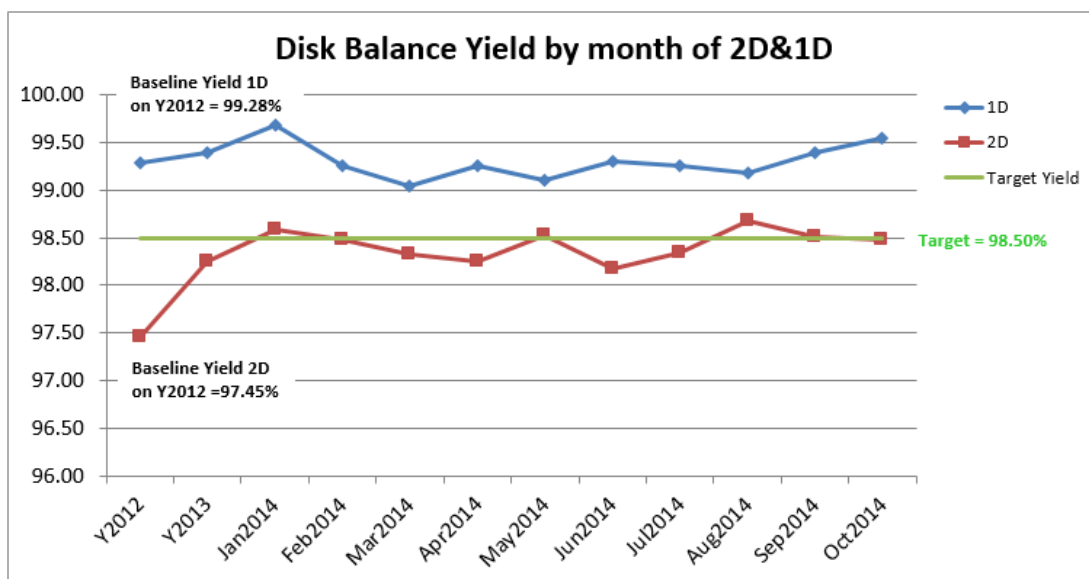


รูปที่ 4 อุปกรณ์หลักของชุดหัวเคาะของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์

โรงงานกรณีศึกษา ใช้ตัววัดความสามารถในการผลิตของกระบวนการวัดค่าความสมดุลของดิสก์ออกมาในรูปของอัตราผลผลิต หรือ Yield ซึ่งมีวิธีคำนวณดังนี้

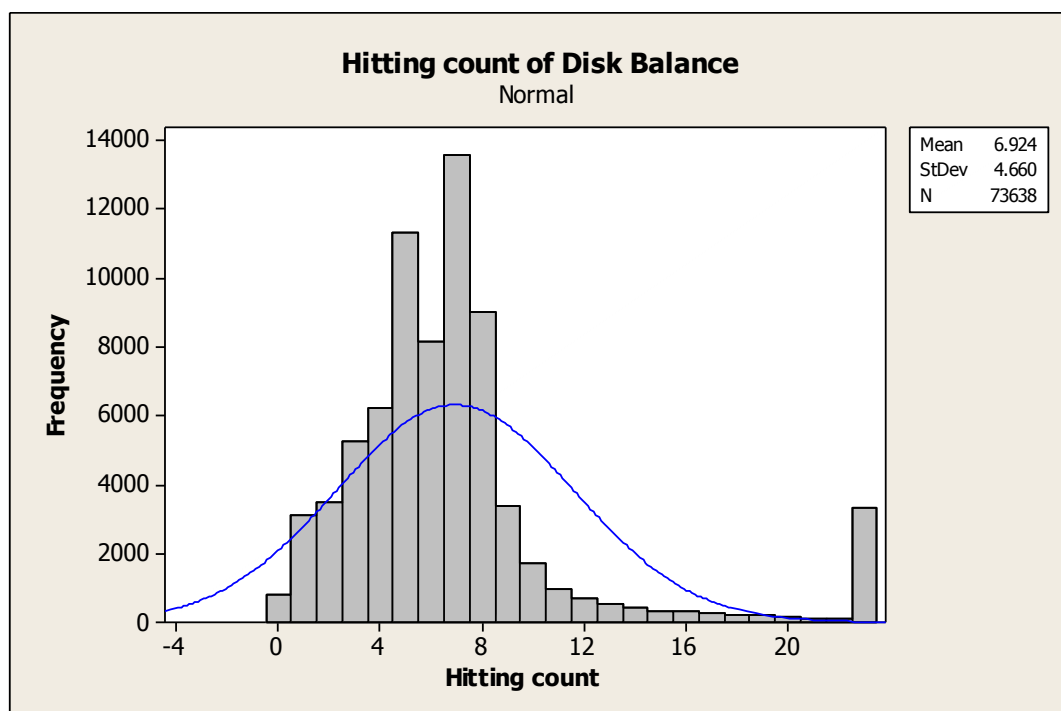
$$\text{อัตราผลผลิต Yield} = \frac{(\text{จำนวนที่ผลิต} - \text{ของเสียจากผลิต})}{\text{จำนวนที่ผลิต}} \times 100$$

ปัจจุบันอัตราผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์ในผลิตภัณฑ์ 2.5 นิ้ว รุ่น 2 ดิสก์ ยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดคือที่ 98.5% อัตราผลผลิตปัจจุบันเฉลี่ย 97.45% และยังพบว่าอัตราผลผลิตแปรปรวน เมื่อเทียบกับสายการผลิต 1 ดิสก์ ซึ่งปัญหาส่งผลให้ฝ่ายผลิตไม่สามารถประเมินการผลิตหรืออัตราผลิตที่แน่นอนได้ ทำให้การวางแผนการผลิตผิดพลาดต้องมีการกำหนดค่าเผื่อผลผลิตให้กว้าง และยังพบว่าหากกระบวนการผลิตนี้มีของเสียในอัตราสูงจะทำให้กระบวนการนี้เป็นคอขวดและมีได้รฟ์ที่เป็นของเสียในกระบวนการต้องทำการแก้ไขและส่งกลับมาทดสอบใหม่อีกครั้งซึ่งถือว่าเป็นการทำงานซ้ำซ้อน เสียต้นทุนในการเพิ่มพนักงานเพื่อแก้ไขงานเสีย และค่าใช้จ่ายจากการมีชิ้นส่วนเสียหายจากการแก้ไขงานเสีย



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงอัตราผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์
ของผลิตภัณฑ์ 2.5 นิ้ว ในรุ่น 2 ดิสก์ และ 1 ดิสก์

ด้วยปัญหานี้ในเรื่องอัตราผลผลิตต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานและไม่เสถียร ทำให้โรงงาน
กรณีศึกษาต้องศึกษาถึงความแตกต่างเพื่อที่จะพัฒนาความสามารถในการผลิตของทั้ง 2 รุ่น ให้มี
ความใกล้เคียงกัน จากข้อมูลการผลิตดังแสดงในรูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยการเคาะอยู่ที่ 6.97 ครั้ง หรือ
ประมาณ 7 ครั้ง ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.660 และมีกลุ่มงานที่จำนวนเคาะ 23 ครั้ง ซึ่งส่วน
ใหญ่คืองานเสีย หากอัตราผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์ต่ำกว่าเกณฑ์ที่
98.5% จะมีกลุ่มงานเสียมากและทำให้มีจำนวนงานที่ต้องเคาะ 23 ครั้ง สูงทำให้เวลากระบวนการ
นี้สูญเสียไปกับการทดสอบซ้ำของงานเสียในครั้งแรกและอาจกลายเป็นคอขวด



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงข้อมูลจำนวนการเคาะของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์

ตารางที่ 1 เวลาในการทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ของแต่ละขั้นตอน

		Operation	Time	
เวลา ทำงาน		Start + Clamp unit	2.5	sec
		Spin up	4.0	sec
		Hitting time (0.5 sec/hit)	3.5	sec
		Break	1.0	sec
		Unclamp unit	1.8	sec
		Total	12.8	sec

ค่าเฉลี่ยในการเคาะ 7 ครั้ง

เวลาที่เครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ใช้ในการทำงานต่อหนึ่งชิ้นงานจะใช้เวลาประมาณ 12.8 วินาทีต่อชิ้นงานที่จำนวนเคาะ 7 ครั้ง ซึ่งเวลาในการทำงานจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการเคาะ ซึ่งถ้าเคาะครบ 23 ครั้งจะให้เวลาในการทำงาน 20.8 วินาทีต่อชิ้นงาน จากเวลาในการทำงานของเครื่องจักรจะทำให้มีผลผลิตประมาณ 5,906 ชิ้นต่อวัน แต่ด้วยอัตราผลิตจริงของกระบวนการอยู่ที่ 97.45% ทำให้มีผลผลิตเพียง 5,759 ชิ้นต่อวัน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ปรับความสมดุลของดิสก์เพื่อเพิ่มผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาและเก็บข้อมูลการทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ในกระบวนการผลิตของกลุ่มผลิตภัณฑ์ 2.5 นิ้ว ในรุ่นงานการผลิต 2 ดิสก์

- 2) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์ ได้แก่

2.1) ระยะช่องว่าง (Clearance) ระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของแผ่นดิสก์ (C)

ตารางที่ 2 แบบจำลองการทดลองระยะช่องว่างระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของแผ่นดิสก์ (C)

การทดลอง	แบบจำลองการทดลอง
1. ให้ดิสก์ ทั้งสองแผ่นด้านซ้ายชิดกับแกนของสปินเดิลมอเตอร์ ด้านขวามีระยะช่องว่าง	
2. ให้ดิสก์ ทั้งสองแผ่นด้านซ้ายมีระยะช่องว่าง ด้านขวาชิดกับแกนของสปินเดิลมอเตอร์	
3. ให้ดิสก์ แผ่นบนซ้ายชิดขอบสปินเดิลมอเตอร์ขวามีระยะช่องว่าง แผ่นล่างซ้ายมีระยะช่องว่าง ขวาชิดกับแกนของสปินเดิลมอเตอร์	
4. ให้ดิสก์ แผ่นบนซ้ายมีระยะช่องว่าง ขวาชิดขอบสปินเดิลมอเตอร์ แผ่นล่างซ้ายชิดขอบสปินเดิลมอเตอร์ ขวามีระยะช่องว่าง	
5. ให้ดิสก์ ทั้งสองแผ่น ทั้งสองด้านมีระยะช่องว่างเท่า ๆ กัน	

2.2) ศึกษามุมองศาในการเคาะ Degree ที่ 2 มุม ได้แก่ มุม D0 องศา และมุม D180 องศา

ตารางที่ 3 แบบจำลองมุมองศาในการเคาะ (D)

การทดลอง	แบบจำลองการทดลอง
1. ให้องศาในการอยู่ที่มุม 0 องศา	
2. ให้องศาในการอยู่ที่มุม 180 องศา	

2.3) ความสูงของ Hitting Pin (H) ที่ 2 ระดับ H1 และ H2

ตารางที่ 4 แบบจำลองความสูงของ Hitting Pin (H)

การทดลอง	แบบจำลองการทดลอง
1. ให้ความสูงของ Hitting Pin อยู่ระหว่างฐานสปริงเดลิมาเตอร์และดิสก์แผ่นล่าง	
2. ให้ความสูงของ Hitting Pin อยู่ที่กึ่งกลางระหว่างดิสก์แผ่นบนและล่าง	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพิ่ม Yield หรือผลผลิตของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์
- 2) ลดปริมาณของเสียและความแปรปรวนในการเคาะของกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์
- 3) ลดความแตกต่างของ Yield ในรุ่นงาน 1 ดิสก์ และ 2 ดิสก์ เพื่อให้เปรียบเทียบกันได้

1.6 ขั้นตอนและแผนดำเนินงานวิจัย

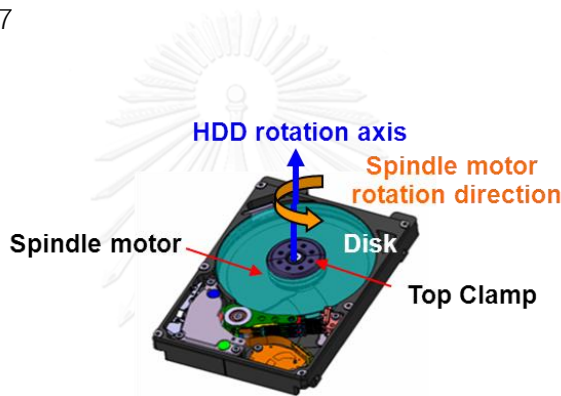
- 1) ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องการควบคุมในการหมุน การปรับความสมดุล การหมุน ศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 2) ตั้งทีมงานเพื่อวัดสภาพของปัญหาและระบุหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสมดุลของดิสก์จากกระบวนการผลิตและปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 3) เก็บข้อมูลและวิเคราะห์สาเหตุที่เป็นปัจจัยต่อความสมดุลของดิสก์ และการปรับความสมดุลของดิสก์
- 4) นำปัจจัยของปัญหาที่ได้จากการวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขและออกแบบการทดลอง
- 5) ทำการทดลอง นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลอง และกำหนดวิธีปรับปรุงแก้ไข
- 6) จัดทำแผนในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง พร้อมทั้งกำหนดหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
- 7) เรียบเรียงและจัดทำบทความเพื่อตีพิมพ์
- 8) เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์

เนื่องจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องทำงานด้วยการหมุนที่ด้วยความเร็วรอบสูง เพื่อให้การทำงานเสถียร ความสมดุลของดิสก์ที่ประกอบกันในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์บนแกนของสปินเดิลมอเตอร์จะต้องสมดุล เพื่อความถูกต้องในการอ่านและบันทึกข้อมูล และการลดปัจจัยของที่เกิดจากกระบวนการประกอบ เครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ จะลดความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น โดยมีหลักการทำงานดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และหลักในการหมุน

ความไม่สมดุลของดิสก์เป็นแรงที่เกิดจากความแตกต่าง ระหว่างจุดศูนย์กลางของมวลและจุดศูนย์กลางการหมุน ดังรูปที่ 8 (ก) แสดงจุดศูนย์กลางการหมุน (Rotational centerline) และจุดศูนย์กลางมวล (Mass centerline) อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน นั่นคือความสมดุลของดิสก์ รูปที่ 8 (ข) จุดศูนย์กลางการหมุนและจุดศูนย์กลางมวลอยู่คนละตำแหน่งกันและนั่นคือความไม่สมดุลของดิสก์ที่เกิดขึ้น (HITACHI Global Storage Technologies Ltd., 2009)



รูปที่ 8 ลักษณะการหมุนที่สมดุลและไม่สมดุล

หลักในการวัดความสมดุลของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์จะวัดออกมาในเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เป็นค่าความไม่สมดุล Unbalance (Gary K. Grim, John W. Haidler et al. 2007) โดยที่

$$F_c = mr\omega^2$$

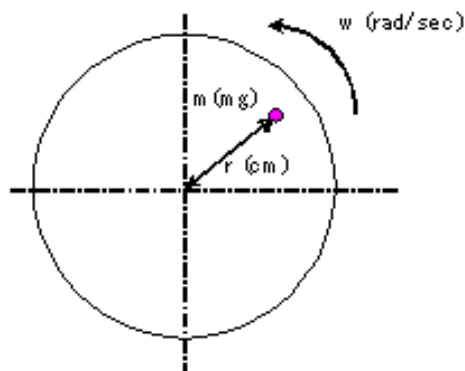
F_c คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

m คือ มวล (mg)

r คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางมวล (cm)

ω คือ ความเร็วรอบในการหมุนของการปรับความสมดุลของดิสก์ สำหรับเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์มีค่าคงที่ที่ 7200 รอบ/นาที

$m * r$ คือ Unbalance ในหน่วย mg-cm

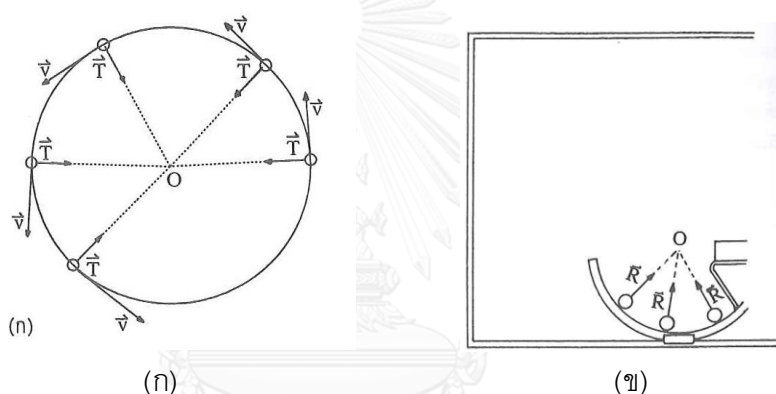


รูปที่ 9 หลักในการวัดความสมดุลของดิสก์

2.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบวงกลม (Circular motion)

ทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบวงกลม (นิรันดร์ สุวรัตน์ 2555) ในการศึกษาผลของแรงที่มีต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุพบว่า เมื่อแรงมีทิศทางขนานกับความเร็วของวัตถุ วัตถุจะมีแนวทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และเมื่อแรงทำมุมกับความเร็วโดยมีมุมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ระหว่าง 0 องศา ถึง 180 องศา วัตถุจะมีการเคลื่อนที่เป็นทางโค้งแบบโพรเจกไทล์ แต่ถ้าแรงมีทิศทางตั้งฉากกับความเร็วตลอดเวลาแนวทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจะเป็นรูปโค้งแบบวงกลม ซึ่งจะศึกษารายละเอียดต่อไป

ถ้าเรานำเชือกผูกเข้ากับวัตถุ แล้วแกว่งให้วัตถุเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ มือ พบว่าวัตถุมีแนวการเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งของวงกลม ดังรูปที่ 10 (ก) การเคลื่อนที่ของลูกกลมโลหะซึ่งถูกติดให้เคลื่อนที่ไปตามรางโค้งวงกลม ดังรูปที่ 10 (ข)



รูปที่ 10 แรงกระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนววงกลมในระนาบระดับ

จากรูปที่ 10 (ก) เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ติดกับเชือกแล้วถูกเหวี่ยงให้เคลื่อนที่ในระนาบระดับ พบว่าแรงดึงเชือก T กระทำต่อวัตถุตลอดเวลาที่มีทิศทางพุ่งเข้าหาจุด o ซึ่งเป็นจุดที่ถูกมือจับ วัตถุจะอยู่ห่างจากจุด o คงที่ตลอดเวลา ทางเดินของวัตถุจึงเป็นรูปวงกลม และพบว่าทิศทางของแรง T ตั้งฉากกับความเร็ว \vec{v} ของวัตถุตลอดเวลา

จากรูปที่ 10 (ข) เป็นการเคลื่อนที่ของลูกกลมโลหะที่ถูกติดให้เคลื่อนที่บนรางโค้งครึ่งวงกลมในแนวราบพบว่าทิศทางของลูกกลมเป็นทางโค้งวงกลม เนื่องจากแรงที่รางดันลูกกลมทุกตำแหน่งมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นสัมผัสของวงกลม หรือ \vec{R} ตั้งฉากกับความเร็ว \vec{v} ของลูกกลมทุกขณะ มีผลทำให้ทิศทางของลูกกลมเปลี่ยนตลอดเวลา

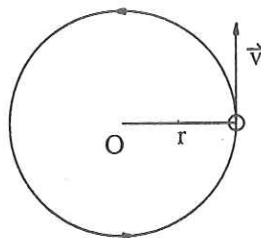
ทั้งจากรูปที่ 10 (ก) และ 10 (ข) แรง \vec{T} และ \vec{R} มีทิศพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของการเดินทาง วัตถุตลอดเวลาจึงเรียกแรง \vec{T} และ \vec{R} ว่าแรงสู่ศูนย์กลาง (F_c) ดังนั้นสรุปได้ว่า วัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลมได้ ต้องมีแรงลัพธ์กระทำต่อวัตถุในทิศตั้งฉากกับความเร็วของวัตถุตลอดเวลา

2.2.1 วัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่

ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่

1. คาบ (Period) T คือ เวลาที่วัตถุเคลื่อนครบ 1 รอบ หน่วยเป็น วินาทีต่อรอบ หรือ วินาที

2. ความถี่ (Frequency) f คือ จำนวนรอบที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ภายใน 1 วินาที หน่วยเป็น รอบต่อวินาที หรือ เฮิรตซ์ (Hz)



รูปที่ 11 วัตถุเคลื่อนที่ในแนววงกลมในระนาบด้วยอัตราเร็วคงตัว

เมื่อวัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่ คาบ และความถี่จะมีค่าคงที่ โดยคาบและความถี่สัมพันธ์กันโดย

$$T = \frac{1}{f}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง v , T , f จากรูปที่ 11 วัตถุเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุด o มีรัศมี r ด้วยอัตราเร็วคงที่ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ

จาก

$$v = \frac{S}{t}$$

ครบ 1 รอบ $S = 2\pi r$, $t = T$ (คาบ)

ดังนั้น

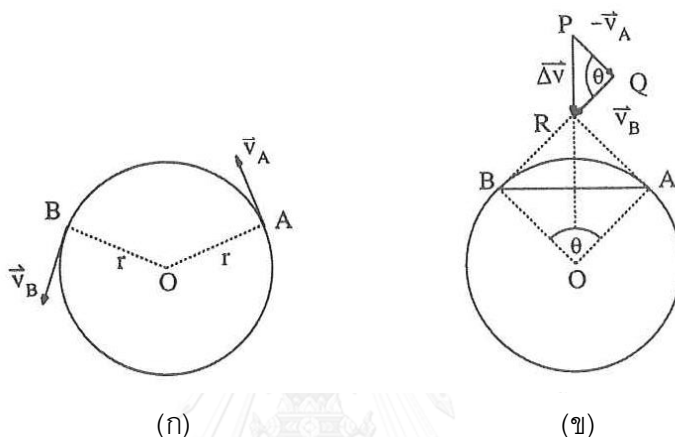
$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

หรือ

$$v = 2\pi rf$$

2.2.2 ความเร่งสู่ศูนย์กลาง (a_c)

วัตถุเคลื่อนที่ในแนววงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่ โดยมีแรงกระทำกับวัตถุในทิศเข้าสู่ศูนย์กลางทำให้ความเร็วของวัตถุเปลี่ยนไปตลอดเวลา โดยมีความเร่งตามกฎข้อสองของนิวตัน ถ้าพิจารณาวัตถุเคลื่อนที่จาก A ไป B ในช่วงเวลาสั้น ๆ Δt ดังรูปที่ 12 ต้องการหาความเร่งที่เกิด



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ในแนววงกลมทำให้เกิดความเร่ง

จากรูปที่ 12 (ข) จะเห็นว่ารูปสามเหลี่ยม PQR กับสามเหลี่ยม AOB เป็นสามเหลี่ยมคล้าย ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{AB}{PR} = \frac{AO}{PQ}$$

เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ v ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งจึงมีขนาดเท่ากัน อัตราเร็วที่ $v_A = v_B = v$ ถ้าวัตถุเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ใช้เวลา Δt สั้น ๆ A และ B จะอยู่ใกล้กันมาก อาจถือได้ว่าความยาวเส้นตรง AB มีค่าเท่ากับความยาวส่วนโค้ง AB มีค่าเท่ากับ $v\Delta t$

จาก $S = v \times t$ จึงเขียนได้ว่า

$$\frac{v\Delta t}{\Delta v} = \frac{r}{v}$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta v} = \frac{r}{v^2}$$

หรือ

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

นั่นคือ $a = \frac{v^2}{r}$ และ a มีทิศพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลาง

กำหนดให้ $a_c =$ ความเร่งสู่ศูนย์กลาง

v คือ อัตราเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบวงกลม

r คือ รัศมีวงกลม

$$\text{ดังนั้น } a_c = \frac{v^2}{r}$$

2.2.3 การหาแรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลม

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันและการเคลื่อนที่แบบวงกลม แรงลัพธ์ที่มากระทำต่อวัตถุกับความเร่งของวัตถุจะมีทิศทางเดียวกัน คือทิศเข้าหาจุดศูนย์กลางซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Sigma F = ma \quad (\Sigma F \text{ คือ } F_c)$$

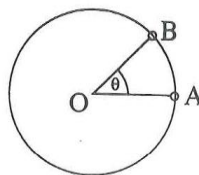
$$\text{ได้ว่า } F_c = ma_c \quad (a_c = \frac{v^2}{r})$$

$$\text{หรือ } F_c = \frac{mv^2}{r}$$

2.2.4 อัตราเร็วเชิงมุม (Angular speed)

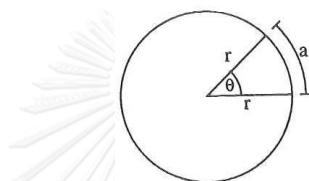
อัตราเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบวงกลม ที่กล่าวมานั้นคือ ความยาวของเส้นโค้งที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ใน 1 วินาทีเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราเร็วเชิงเส้น (v) แต่ในที่นี้ยังมีอัตราเร็วอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นการบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมที่จุดศูนย์กลาง เนื่องจากการกวาดไปของรัศมีใน 1 วินาที เรียกว่าอัตราเร็วเชิงมุม (ω) อ่านว่า โอเมก้า

อัตราเร็วเชิงมุม คือ มุมที่รัศมีกวาดไปได้ใน 1 วินาทีที่มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที จากรูปที่ 13 วัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลมรัศมี r ด้วยอัตราเร็วคงที่จาก A ถึง B ในเวลา t วินาที โดยมีรัศมี r กวาดไปเป็นมุม θ เรเดียน ณ จุดศูนย์กลางของวงกลม พบว่าทุก ๆ จุดบนรัศมี OA จะมีการเคลื่อนที่ไปยัง OB ในเวลาเดียวกัน มีอัตราเร็วเชิงเส้น (v) ไม่เท่ากัน (ระยะต่างกันในเวลาเท่ากัน) แต่มีอัตราเร็วเชิงมุม (ω) เท่ากัน (มุมที่เกิดขึ้นเท่ากันในเวลาเท่ากัน)



รูปที่ 13 การเคลื่อนที่แบบวงกลมทำให้มุมที่จุดศูนย์กลางเปลี่ยนแปลง

การบอกมุมนอกจากจะมีหน่วยเป็นองศาแล้ว ยังอาจใช้หน่วยเป็น เรเดียน (radian) โดยมีนิยามว่า มุม 1 เรเดียน มีค่าเท่ากับมุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลม ซึ่งมีส่วนโค้งรองรับมุมยาวเท่ากับรัศมี หรือกล่าวได้ว่ามุมในหน่วยเรเดียน คือ อัตราส่วนระหว่างส่วนโค้งที่รองรับมุมกับรัศมีของวงกลม



รูปที่ 14 อัตราส่วนระหว่างส่วนโค้งที่รองรับมุมกับรัศมีของวงกลม

ถ้า a คือ ความยาวของส่วนโค้งที่รองรับมุม

r คือ รัศมีของส่วนโค้ง

θ คือ มุมที่จุดศูนย์กลางเป็นเรเดียน

จะได้ว่า

$$\theta = \frac{a}{r}$$

และจากนิยามอัตราเร็วเชิงมุมจะได้ว่า

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมในหน่วยองศากับเรเดียน เมื่อพิจารณาวงกลม พบว่ามุมรอบจุดศูนย์กลางของวงกลมเท่ากับ 360 องศา โดยส่วนโค้งที่รองรับมุมก็คือเส้นรอบวง

จาก

$$\theta = \frac{a}{r}$$

เมื่อ

$$a = 2\pi r$$

จะได้ว่า

$$\theta = \frac{2\pi r}{r}$$

$$\theta = 2\pi \text{ เรเดียน}$$

ดังนั้น สรุปได้ว่ามุม 360 องศา เทียบเท่ากับมุม 2π เรเดียน

เมื่อพิจารณาวัตถุเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่ครบ 1 รอบพอดี

จาก $\omega = \frac{\theta}{t}$

พบว่า $\theta = 2\pi$ เรเดียน

$t = T$ วินาที (คาบ)

จะได้ว่า $\omega = \frac{2\pi}{T}$ หรือ $\omega = 2\pi f$

และจาก $v = \frac{2\pi r}{T}$ และ $v = 2\pi r f$

ดังนั้น $v = \omega r$

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงเส้น (v) และอัตราเร็วเชิงมุม (ω)

2.3 การสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือน (Vibration) (อาจอหาญ ณ นรงค์ 2553) ก็คือ การสั่นหรือการแกว่งของวัตถุหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับจุดที่ใช้อ้างอิง เช่นการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเมื่อเปรียบเทียบกับฐานของเครื่อง หรือการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน (Bearing) เมื่อเทียบกับตัวเรือน (Cage or Housing) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงจะสามารถทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหายได้โดยการแตกหักหรือล้าตัวซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมากน้อย เร็วหรือช้าก็จะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเมื่อเทียบกับขนาดโครงสร้างและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุนั้น ๆ

2.3.1 ที่มาของการสั่นสะเทือน (Vibration Source)

โดยปกติแล้วการทำงานของชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือเครื่องจักรนั้นย่อมมีการสั่นสะเทือนเป็นธรรมชาติของมันอยู่แล้ว ถ้าระดับการสั่นสะเทือนนั้นไม่มากหรืออยู่ในเกณฑ์ปกติก็ถือว่าเป็นเรื่องธรรมดา แต่ถ้าการสั่นสะเทือนมากเกินไปก็อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนตลอดจนเครื่องจักรนั้น ๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง เราจึงต้องหาสาเหตุและที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นเพื่อทำการแก้ไขให้การสั่นสะเทือนนั้นอยู่ในระดับปกติ ซึ่งการสั่นสะเทือนนั้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น

1) ความไม่สมดุลในการหมุน (Unbalance) จะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของการหมุนและจุดศูนย์กลางของมวลไม่อยู่ในจุด ๆ เดียวกัน เช่น การไม่สมดุลหรือการแกว่งของเพลลาที่คดงอหรือชำรุด การไม่สมดุลของใบพัด ล้อช่วยแรง ขึ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมีหรือในรูปวงกลม

2) ความไม่ได้อินทรีย์ (Misalignment) ระหว่างเพลลาของมอเตอร์และปั๊มหรือเพลลาของต้นกำลังกับเพลลาของเครื่องจักร

3) การหลุดหลวมของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรสำหรับความเสียหายที่เกิดจากการสั่นสะเทือนนั้นจะเกิดเนื่องจากแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุที่สั่นสะเทือนนั้น ๆ โดยที่แรงที่เกิดขึ้น จะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (2nd Newton Laws) ดังสมการ

$$F = ma$$

โดยที่ F คือ แรงกระทำที่เกิดขึ้น (N)

m คือ มวลของวัตถุหรือระบบที่เคลื่อนที่ (kg)

a คือ อัตราเร่งที่เกิดขึ้นกับวัตถุหรือระบบที่เกิดการเคลื่อนที่ (m/s²)

สำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้นความไม่สมดุลของชิ้นส่วนที่หมุนก็จะเป็นต้นเหตุให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจะเป็นไปตามสมการ

$$F = m_r r \omega^2$$

โดยที่ F คือ แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมดุลในการหมุน (N)

m_r คือ มวลของวัตถุหรือระบบที่เคลื่อนที่โดยการหมุน (kg)

r คือ ระยะห่างระหว่างมวลที่ไม่สมดุลจากศูนย์กลางการหมุน (m)

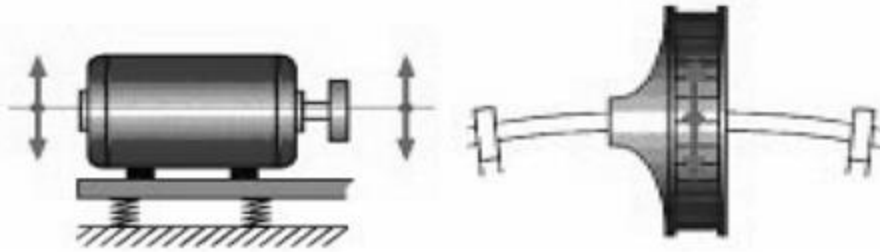
ω คือ ความเร็วเชิงมุม (2Ns)(m/s) โดยที่ Ns = รอบต่อวินาที

2.3.2 รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Type)

การสั่นสะเทือนแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกันตามลักษณะและองค์ประกอบ คือ

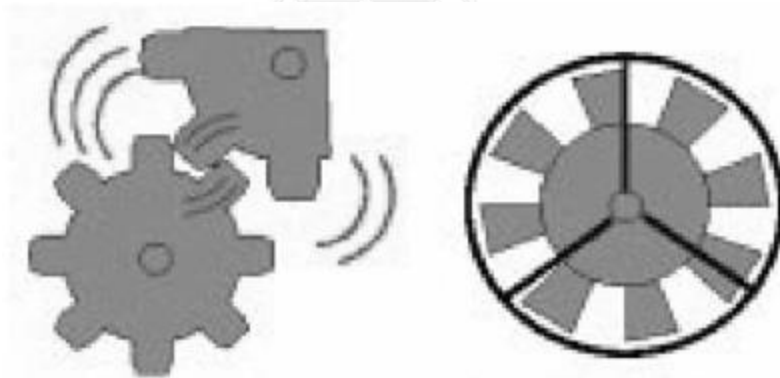
1) การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) คือ การสั่นสะเทือนที่ทิศทางของการสั่นสะเทือนเป็นไปได้โดยอิสระตามทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนโดยไม่มีส่วนที่เป็นวัตถุแข็งเกร็งมาขัดขวางทิศทางของชิ้นส่วนที่สั่นสะเทือนนั้น ๆ เช่น เครื่องจักรหรือ

มอเตอร์ที่วางอยู่บนฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นและฐานที่มีความเป็นสปริง หรือใบพัดที่หมุนอยู่บนเพลายาวดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร

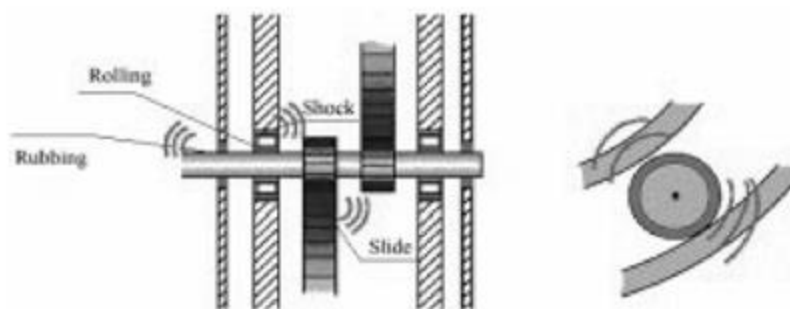
2) การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน (Meshing or Passing Vibration) คือการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่งที่ชิ้นส่วนที่เราวิเคราะห์การสั่นสะเทือนหมุนหรือเคลื่อนที่ผ่าน เช่น การสั่นสะเทือนของเฟืองที่ชนกันและหมุนไปเรื่อย ๆ โดยในตอนที่ฟันแต่ละฟันชนและจากกันก็จะมี การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น หรือการสั่นสะเทือนของใบพัดของพัดลมดังรูปที่ 16



(ก) การสั่นสะเทือนของเฟืองที่ชนกัน

(ข) การสั่นสะเทือนของใบพัดที่หมุนผ่าน

รูปที่ 16 การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน



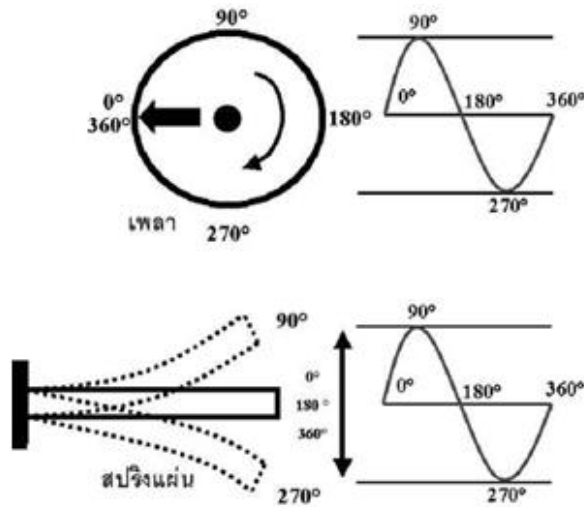
รูปที่ 17 การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน

3) การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน (Frictional Vibration) คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในการหมุนหรือเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร เช่น การหมุนหรือเคลื่อนที่ของเม็ดลูกปืนหรือตลับลูกปืน การเคลื่อนที่และไถล (Slide) ของบุชที่รองรับการหมุนของชิ้นส่วนเครื่องจักรดังรูปที่ 17

2.3.3 ค่าในการวัดการสั่นสะเทือน

ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้นเราจะต้องใช้ค่ามิติหรือหน่วยต่าง ๆ ในการอ้างอิง ดังนั้นเราจะต้องรู้จักและทำความเข้าใจค่า มิติและหน่วยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดการสั่นสะเทือนก่อนที่เราจะลงลึกในรายละเอียดต่อไป

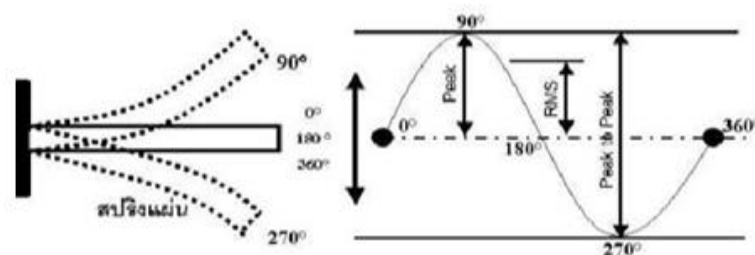
1) รอบของการสั่นสะเทือน (Cycle of Vibration) ในการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและแบบกลับไปกลับมา เช่น การหมุนของเพลลาหรือการแกว่งของวัตถุต่าง ๆ นั้น การเคลื่อนที่จะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ตำแหน่งเดิม เราเรียกว่า 1 รอบของการเคลื่อนที่ (Cycle) หรืออาจเรียกว่าคาบ (Period) การเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 18 รูปบน เป็นการหมุนของเพลลาซึ่งใน 1 รอบของการเคลื่อนที่ของเพลลานั้นมี 360 องศาโดยการเคลื่อนที่แต่ละช่วงจะแบ่งเป็นควอเตอร์ ๆ ละ 90 องศา เมื่อเพลลาหมุนครบ 1 รอบก็จะเป็นมุมในการเคลื่อนที่ครบ 360 องศาพอดี เราจะเห็นว่าเมื่อถ่ายทอดมุมของการเคลื่อนที่ของเพลลามายู่ในรูปของแอมพลิจูดแล้วมุมที่เป็นส่วนยอดของแอมพลิจูดด้านบนคือมุม 90 องศา มุมที่เป็นส่วนยอดในด้านล่างคือมุม 270 องศา ส่วนมุม 0 องศาจะอยู่ในระนาบเดียวกับ 180 และ 360 องศา



รูปที่ 18 รอบของการเคลื่อนที่ (Cycle of Motion)

รูปที่ 18 ล่างเป็นการเคลื่อนที่ในรูปแบบของการแกว่งของสปริงแผ่น จะเห็นว่าในการเคลื่อนที่โดยการแกว่งครบ 1 รอบนั้นเริ่มต้นจากจุดเริ่มต้นที่ 0 องศาคือจุดที่สปริงอยู่ในลักษณะตรง จากนั้นก็เคลื่อนที่ขึ้นไปยังจุดบนสุดซึ่งก็คือมุม 90 องศาและเคลื่อนที่ผ่านมายังจุดแรก ที่ตำแหน่ง 180 องศา จากนั้นก็เคลื่อนที่เลยลงไปยังจุดต่ำสุดที่ 270 องศาและสุดท้ายเคลื่อนที่มาครบรอบที่จุดเดิมคือ 360 องศา ก็จะได้เป็น 1 รอบของการเคลื่อนที่ในรูปแบบของการแกว่งของสปริงแผ่นดังกล่าว

2) ขนาดความรุนแรงของการสั่นสะเทือนหรือแอมพลิจูด (Amplitude) จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นเรื่องของรอบของการเคลื่อนที่และได้กล่าวไว้ใน 1 รอบของการเคลื่อนที่นั้นมี 360 องศา จุดที่สูงสุดด้านบนและด้านล่างของการเคลื่อนที่จะเท่ากับที่ 90 องศาและ 270 องศา ส่วนขนาดความสูงจากจุดบนที่ 90 องศา มาถึงจุดล่างที่ 270 องศา นั้นเราเรียกว่าขนาดของแอมพลิจูด ซึ่งมีขนาดเป็นหน่วยระยะทางอาจเป็นมิลลิเมตรหรือนิวหรืออื่น ๆ ในหน่วยของระยะทางซึ่งก็แล้วแต่จะนำมาเป็นหน่วยวัด ในงานวัดความสั่นสะเทือนนั้นเราแบ่งขนาดความสูงของแอมพลิจูดออกเป็น 3 ประเภท (เพื่อความเข้าใจให้ดูรูปที่ 19 ประกอบ) ซึ่งก็คือ



รูปที่ 19 ประเภทของแอมพลิจูด

แบบเต็มคลื่น (Peak to Peak) เป็นการวัดขนาดของแอมพลิจูดจากยอดคลื่นบนที่ 90 องศาถึงยอดคลื่นล่างที่ 270 องศา ถ้าเราพิจารณาจากรูปที่ 19 เราจะเห็นว่าเป็นการวัดขนาดของการขึ้นสุดและลงสุดของการสั่นสะเทือนซึ่งจะมีค่าเท่ากับระยะการสั่นสะเทือนทั้งหมดของวัฏจักรวัดขนาดการสั่นสะเทือนแบบเต็มคลื่น (Peak to Peak) นี้จะใช้กับการวัดการสั่นสะเทือนในหน่วยการวัดแบบการวัดระยะทาง (Displacement) ของเครื่องจักรที่มีรอบของการสั่นสะเทือนต่ำ ๆ เช่น เฟลาที่หมุนด้วยความเร็วที่ไม่เกิน 600 รอบต่อนาที

แบบครึ่งคลื่น (Peak หรือ Zero to Peak) เป็นการวัดขนาดของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนโดยจะวัดระยะจากจุดเริ่มต้นที่ 0 องศาของแอมพลิจูดไปถึงจุดสูงสุดที่ 90 องศาหรือจาก 180 องศาไปยัง 270 องศา หรือค่าครึ่งหนึ่งของขนาดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

แบบ Root Mean Square, RMS หรือค่ามาตรฐานความเฉ (Standard Deviation) ของขนาดแอมพลิจูดในกรณีที่วัดค่าแอมพลิจูดที่ไม่มีความสม่ำเสมอค่า Root Mean Square นี้จะไม่ใช้ค่าเฉลี่ย การหาค่า RMS ทำได้โดยเอากำลังสองของระยะแอมพลิจูดมารวมกันแล้วถอดรากที่สองออกมาโดยจะอยู่ในรูปสมการ

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

โดยที่ T คือ คาบในเวลา 1 รอบ

t คือ เวลา

หรือ

$$RMS = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \text{Peak} \text{ หรือ } 0.707 \text{ เท่าของค่า Peak}$$

(คิดที่ 1 รอบของแอมพลิจูด 1 HZ)

3) ความถี่ (Frequency) คือความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการเคลื่อนที่หรือรอบของการหมุนต่อหน่วยเวลา ในหน่วย SI ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันจะวัดเป็นรอบต่อวินาที (Rev/s หรือ rps, Hz) จากตัวอย่างข้างต้นถ้าหากเฟลาหมุนด้วยความเร็ว 1500 รอบต่อนาที (rpm) ความถี่ในการหมุนก็จะเท่ากับ $1500/60 = 25$ รอบต่อวินาทีหรือ 25 Hz ความถี่ที่เรามักจะพูดถึงกันนั้นจะมีอยู่สองชนิดก็คือ

ความถี่ในการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร คือความถี่ที่เกิดจากการหมุนหรือการเคลื่อนที่จากการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร เช่นมอเตอร์หมุนด้วยความถี่ 25 Hz (1500 rpm) ซึ่งความถี่ที่เกิดจากการทำงานหรือการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรนี้จะมากหรือน้อยก็จะขึ้นอยู่กับ

องค์ประกอบหลายอย่างซึ่งจะอธิบายในรายละเอียดภายหลัง โดยที่ความถี่และเวลาในการสั่นสะเทือนจะเป็นไปตามสมการ

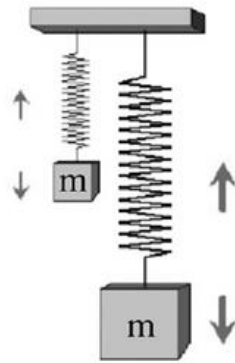
ความถี่ = $1/\text{เวลาของการสั่นในแต่ละรอบ (Cycle)}$

เวลาในการสั่นแต่ละรอบ = $1/\text{ความถี่}$

ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ความถี่ธรรมชาติเป็นความถี่ประจำตัวของวัตถุใด ๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะต่าง ๆ ดังนี้คือ

- ความหยุ่นตัว (Elasticity) และความแข็งเกร็งของวัตถุ
- ขนาดของวัตถุ (Size)
- รูปทรงของวัตถุ (Dimension)

จากรูปที่ 20 รูปสปริงที่มีวัตถุซึ่งมีมวล m (kg) แขนงติดอยู่ที่ปลาย ซึ่งเมื่อเราดึงสปริงดังกล่าวให้ยืดออกและปล่อย สปริงดังกล่าวก็จะสั่น



รูปที่ 20 ความถี่ธรรมชาติของสปริง

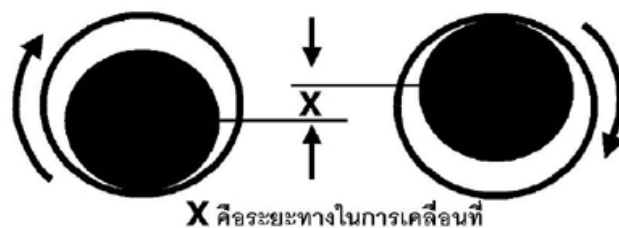
2.3.4 หน่วยวัดการสั่นสะเทือน (Vibration Measurement Unit)

หน่วยวัดการสั่นสะเทือน คือหน่วยที่ใช้ในการบอกปริมาณของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ต้องการวัดว่ามีค่ามากน้อยขนาดไหน โดยหน่วยที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1) การวัดระยะทางของการสั่นสะเทือน (Displacement) คือการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนว่า “มีการเคลื่อนที่ไปจากจุดอ้างอิงเท่าใด ในการสั่นสะเทือนแต่ละรอบ” โดยปกติจะนิยมวัดเป็นมิลลิเมตร (mm) หรือนิ้ว ในการวัดระยะทางจะวัดแบบเต็มคลื่น (Peak to Peak) ส่วนมากจะใช้กับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วรอบต่ำ ๆ ที่ไม่เกิน 1200 รอบต่อนาที

หรือ 20Hz เช่นเครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน หรือเครื่องจักรที่หมุนหรือเคลื่อนที่ช้าเพราะว่าที่ความเร็วรอบในการหมุนหรือเคลื่อนที่ต่ำ ๆ วัตถุจะมีระยะการเคลื่อนที่ได้มาก

การสั่นสะเทือนที่ความเร็วต่ำ ๆ นั้นระยะการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนเป็นสิ่งที่เราสามารถมองเห็นได้ดีที่สุด ตัวอย่างเช่นเพลาดังรูปที่ 21 เราจะเห็นว่าในการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่ำ ๆ นั้นเมื่อเพลามุนและเพลานั้นมีความหลวมคลอนอยู่เพลานั้นก็จะเกิดการแกว่ง ดังนั้นถ้าเพลาลวมมากก็จะเกิดการแกว่งมากในขณะที่เพลามีความพิตพอดีก็จะมีระยะแกว่ง (X) น้อยกว่า



เมื่อเพลามุนครบ 1 รอบ

รูปที่ 21 ระยะทางในการเคลื่อนที่ของเพลาดต่อการหมุน 1 รอบ

2) การวัดความเร็ว (Velocity) เป็นการวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่สั่นสะเทือนว่า “มีความเร็วเท่าไรในแต่ละรอบของการสั่นสะเทือน” โดยปกตินิยมวัดเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) และนิ้วต่อวินาที (inch/sec) ในการวัดความเร็วเรามักจะวัดแบบ RMS เราจะใช้หน่วยนี้กับการวัดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ระหว่าง 20 ถึง 1000 เฮิรตซ์ หรือความเร็วรอบในการหมุนที่สูงกว่า 1200 รอบต่อวินาที

3) การวัดอัตราเร่ง (Acceleration) เป็นการวัด การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อหน่วยเวลาของวัตถุที่มีการสั่นสะเทือน ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงคือตั้งแต่ 10000 เฮิรตซ์ ขึ้นไป เพราะว่าการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงนั้นระยะทางการเคลื่อนที่ที่น้อยและในขณะเดียวกันความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สูงมาก ค่าที่เราสามารถที่จะมองเห็นได้ชัดเจนในการวัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงก็คืออัตราเร่งหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่อหน่วยเวลา จากรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ในหัวข้อที่ผ่านมาเราจะเห็นว่าที่จุดบนสุดและจุดล่างสุดของตัวเรือนเพลานั้นความเร็วจะเป็นศูนย์

ดังนั้นในการวัดแบบอัตราเร่งเราจะวัดหาความเปลี่ยนแปลงของความเร็วของการเคลื่อนที่ของเพลาวาจากจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดของเพลามีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเมื่อเทียบกับเวลามีค่าเท่าใด โดยปกติอัตราเร่งจะวัดเป็นหน่วยมิลลิเมตรต่อเวลายกกำลังสอง (mm/s²) หรือ

G ($1G = 9.81 \text{ m/s}^2$) ส่วนมากเราจะใช้ค่าอัตราเร่งเป็นตัววัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน (Bearing)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจงานวิจัยที่เรื่องความสมดุลของดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และการสั่นสะเทือนที่เป็นสาเหตุของความไม่สมดุลในฮาร์ดดิสก์ได้มีผู้ที่เคยศึกษาและวิจัย ดังนี้

สามารถ มุ่งโตกลาง, อุณนัต พิณโสภณและปัญญา สิงห์นาม (สามารถ มุ่งโตกลาง, อุณนัต พิณโสภณ et al. 2552) ได้ศึกษาถึงความไม่สมดุลของชุดแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์อันเนื่องมาจากการขั้วสกรูในกระบวนการการผลิตฮาร์ดดิสก์ชุดแผ่นดิสก์จะถูกประกอบเข้ากับแกนหมุนด้วยการขันสกรู และการปรับสมดุลเพื่อให้ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นจะขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายและตรวจสอบความสมดุลแต่ปรากฏว่าความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้าย ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์จากแบบจำลองโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณและเปรียบเทียบกับผลกับการทดลองจริง เริ่มจากการตั้งสมมติฐานว่า สาเหตุที่ทำให้ความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นหลังจากการขันสกรูแน่นครั้งสุดท้ายอาจมาจากการขันสกรูด้วยแรงบิดไม่เท่ากัน จำลองความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบ่งรูสกรูออกเป็น 2 กลุ่มในด้านตรงกันข้าม แล้วกำหนดภาวะเป็นแบบความดันที่รูสกรู 2 กลุ่มให้ต่างกันเริ่มจากให้สกรูกลุ่มแรกมีความดันคงที่ 100% กลุ่มที่ 2 มีความดัน 40% เพื่อให้ภาวะของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันมากที่สุดเท่ากับ 60% แล้วเพิ่มความดันของสกรูกลุ่มที่ 2 ขึ้นเพื่อให้ภาวะของสกรูทั้ง 2 กลุ่มต่างกันอย่างน้อยลง แล้วศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากอัตราการเสียรูปของดิสก์ พบว่าอัตราการเสียรูปด้านที่มีความดันมากจะเสียรูปมากกว่านำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นและเขียนแผนภูมิ พบว่าเมื่อสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกัน 60% จะมีค่าความไม่สมดุลต่างกันมากที่สุดถึง 7.565 mg-cm และเมื่อความดันของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อยลงความไม่สมดุลจะลดลง โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการทดลองโดยกำหนดค่าภาวะเป็นแบบแรงบิดในการขันสกรู แล้วศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น พบว่ามีความไม่สมดุลเกิดขึ้นก่อนการขันสกรูและเพิ่มขึ้นเนื่องจากสกรูทั้งสองกลุ่มมีแรงบิดต่างกันเมื่อแรงบิดของสกรูทั้งสองกลุ่มต่างกันน้อย ความสมดุลจะลดลงด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับการคำนวณ สรุปผลศึกษาและวิเคราะห์ได้ว่าที่ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการขันสกรูทำให้ทราบว่าแรงของสกรูแต่ละตัวมีผลต่อจุดกึ่งกลางของชุดแผ่นดิสก์ ซึ่งจุดกึ่งกลางมวลจะเคลื่อนตัวไปในทิศทางของสกรูตัวที่ได้รับแรงมากกว่าสกรูตัวอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความไม่

สมดุล และความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการขึ้นสกรูสามารถแก้ไขให้ความไม่สมดุลลดลงได้โดยเพิ่มการขึ้นสกรูด้านตรงข้าม

ฐิติมา จินตนาวัน (ฐิติมา จินตนาวัน 2544) ได้ศึกษาและอธิบายความเข้าใจเบื้องต้นในปัญหาการสั่นสะเทือนทางกลของระบบ Disk – Spindle ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากการสั่นสะเทือนทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างดิสก์กับหัวอ่าน และทำให้การอ่านหรือเขียนข้อมูลไม่ถูกต้อง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทั้งแบบไม่มีแรงกระทำ Free vibration analysis และแบบมีแรงกระทำ Forced vibration analysis ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนทางกลของระบบ Disk – Spindle ได้แก่ 1. การแกว่งและ Precession ของแกนหมุน การของเพลตามแนวขวาง และการสั่นของแผ่นดิสก์แต่ละแผ่นแบบ one-nodal-diametral modes จะเกิดควบคู่กัน การสั่นสะเทือนแบบนี้จะทำให้ดิสก์แบ่งเป็นกลุ่มของ balanced modes และกลุ่มของ unbalanced modes ในแต่ละกลุ่มของ balanced modes ดิสก์ 2 แผ่นใด ๆ จะมีการสั่นแบบกลับเฟส (Out of phase) ในขณะที่ดิสก์แผ่นที่เหลือจะไม่มี การสั่นของแผ่นดิสก์ที่กลับเฟส ทำให้แรงเฉื่อย (inertia force) ของระบบหักล้างกันหมดไปและทำให้ไม่มีการสั่นของแกนหมุนและเพลลา สำหรับกลุ่ม unbalanced modes ดิสก์ทุกแผ่นเกิดการสั่นที่เฟสตรงกัน (In phase) ดังนั้นแรงเฉื่อยรวมของระบบเนื่องจากการสั่นของดิสก์เกิดขึ้นในรูปของ unbalanced moment รอบ centroid และ unbalanced moment นี้เป็นผลให้แกนหมุนเกิด steady precession ประกอบกับแรงดิ่งกลับ ของแบร์ริงทำให้เกิดการแกว่ง (whirling) ของแกนหมุน 2. การสั่นของแกนหมุนในแนวแกน z 3. การสั่นในแนวระนาบของแผ่นดิสก์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิด track misregistration (TMR) การสั่นในแนวระนาบของแผ่นดิสก์ซึ่งเกิดจากการแกว่งและ precession ของแกนหมุน (rocking modes) เป็นสาเหตุทำให้เกิด TMR ผู้วิจัยได้เสนอทางเลือกใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ นำ Fluid dynamic bearing spindle (FDBs) เพื่อแทน Ball bearing spindle จึงช่วยการสั่นธรรมชาติแบบ rocking modes และช่วยลดเสียงในฮาร์ดดิสก์ แต่ FDB spindle ยังมีปัญหาเรื่องการรั่วไหลของของเหลวในแบร์ริง

อภิรัฐ ศิลปพินิจ (อภิรัฐ ศิลปะพินิจ 2551) ได้ศึกษาการสั่นสะเทือนและเสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีขนาดจานดิสก์ 3.5 นิ้ว พบการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ชนิด Fluid dynamic bearing เป็นผลมาจากการกระตุ้นของแม่เหล็กไฟฟ้า จึงออกแบบการทดลองสั่นสะเทือนแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบปรับเปลี่ยนความถี่ให้เหมาะสม และใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากภายในสู่ภายนอกของ

โครงสร้างมอเตอร์ พบว่าการกระตุ้นด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วงความถี่ 0-20 kHz และที่การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวรัศมีและแนวตามเส้นสัมผัสวงกลม เมื่อนำผลการตอบสนองดังกล่าวเปรียบเทียบกับสเปคตรัม เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 7200 รอบต่อนาที พบว่าเสียงดังซัดนั้น เป็นผลมาจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสปินเดิลมอเตอร์เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงและเสียงดัง โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 14-20 kHz ทำให้ได้แนวทางการลดการสั่นสะเทือนจากภายในสู่ภายนอกเพื่อลดการแพร่ของเสียง และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยทดลองเปลี่ยนแรงดันระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์ พบว่าสการลดขนาด interference fit สามารถลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานมอเตอร์ได้ และถ้าให้ผลดีที่สุดคืออยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 7-12 kHz

Branislav Hredzak and Guoxiao Guo (Branislav Hredzak 2005) ได้พัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยปรับความไม่สมดุลในการหมุนของดิสก์ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Active Balancer เนื่องจากการสั่นสะเทือนของดิสก์และสปินเดิลมอเตอร์มีผลต่อคุณภาพการเขียนสัญญาณ Servo ที่ความเร็วสูง Active Balancer สามารถชดเชยความไม่สมดุลในการหมุนโดยการกระตุ้น electromagnetic ให้ปล่อยลูกบอลเหล็กออกมาชดเชยความไม่สมดุล Active Balancer มีลักษณะเป็นวงแหวนมีร่องรอบวงและบรรจุลูกบอลเหล็กไว้ในร่อง ลูกบอลเหล็กจะถูกยึดไว้ด้วยแม่เหล็กถาวร เมื่อต้องการที่จะชดเชยความไม่สมดุล electromagnetic จะกระตุ้นสนามแม่เหล็กชั่วคราวปล่อยลูกบอลเหล็กจากรัศมีวงในส่งวงนอกในจุดที่ไม่สมดุล

Branislav Hredzak, Guoxiao Guo and Jingling Zhang (Branislav Hredzak, Guoxiao Guo et al. 2003) กล่าวว่า ความไม่สมดุล (Unbalance) เกิดจากการกระจายตัวของมวลแบบไม่ต่อเนื่องบนชิ้นส่วนที่มีการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเหนี่ยวนำการสั่นสะเทือนอยู่อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เกิด disk slippage การสึกกร่อนของ bearing ในสปินเดิลและการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงได้อธิบายการออกแบบวิวัฒนาการของเครื่อง soft balancing ที่สามารถนำมาใช้วัดค่าความไม่สมดุลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเครื่อง rotating อื่น ๆ จากการทดสอบ เครื่อง balancing ที่ออกแบบมาค่อนข้างสมบูรณ์แบบในการวัดค่าความไม่สมดุลด้วยการเพิ่มมวลที่ทราบค่าเข้าไปในชิ้นส่วนที่มีการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่มีความสมดุลแล้ว เพื่อให้ทราบค่าความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวนั้น ตำแหน่งสัญญาณที่ผิดพลาด (position error signal) ถูกวัดนำไปใช้เพื่อหาผลของค่าความไม่สมดุลใน repeatable run out

(RRO) และ non-repeatable run out (NRRO) จากการวัดค่าตำแหน่งทำให้พบว่ามีผลต่อ NRRO เล็กน้อย แต่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อฮาร์โมนิกแรกของ RRO

Branislav Hredzak , Guoxiao Guo and Jingling Zhang (Branislav Hredzak, Guoxiao Guo et al. 2006) ได้ศึกษาเพื่อออกแบบหัวจับสัญญาณที่สามารถติดตั้งเป็นหัวอ่านเขียน ข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อจับสัญญาณการอ่านเขียนผิดพลาดในการอ่านเขียนและบันทึก ข้อมูล วัดออกมาเป็นค่าความไม่สมดุลของดิสก์ เนื่องจากปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีข้อจำกัดเรื่อง เครื่องจักรที่ใช้วัดความสมดุลของดิสก์จากภายนอก ความสมดุลของดิสก์ถูกทำให้ สมดุลหลังจากการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้ว และความวัดความไม่สมดุลเพียงครั้งเดียวไม่ สามารถวัดค่าความไม่สมดุลในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน ดังนั้นจึงได้วิจัยออกแบบให้มีหัวจับ สัญญาณที่ติดตั้งที่หัวอ่านเพื่อวัดออกมาเป็นค่าความไม่สมดุลของดิสก์ โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักร การทำงานของหัวสัญญาณสามารถติดตาม รายงานผลหากมีความเป็นไปได้ที่ค่าความไม่สมดุล ของดิสก์จะเปลี่ยนแปลงไประหว่างการใช้งานในช่วงอายุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ประโยชน์ที่ได้รับจากวิธีการนี้คือ ค่าความไม่สมดุลของดิสก์สามารถวัดได้โดยไม่ต้องใช้ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์จับสัญญาณอื่นๆ สามารถติดตามและวัดค่าหากมีสัญญาณของความ เปลี่ยนแปลงที่มีโอกาสทำให้ความไม่สมดุลเกิดขึ้น โดยวัดสัญญาณตำแหน่ง ความผิดพลาดในการ อ่านเขียนบนดิสก์ที่ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าแอมพลิจูด แรงสั่นสะเทือนจากฮาร์โมนิก ที่ ความเร็วรอบต่างกัน

การทำงานนี้ยังสามารถติดตามและรายงานผลหากพบความเป็นไปได้ที่ค่าความไม่สมดุล ของดิสก์จะเปลี่ยนแปลงไประหว่างการใช้งานในช่วงอายุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วิธีการนี้ยังสามารถที่จะ นำไปใช้งานในกระบวนการอ่านเขียนสัญญาณเซอร์โวของการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ดี ผลการ ทดลองสามารถพิสูจน์ได้ว่าวิธีการนี้ส่งผลต่อการวัดความไม่สมดุลของดิสก์ได้จริง

บทที่ 3

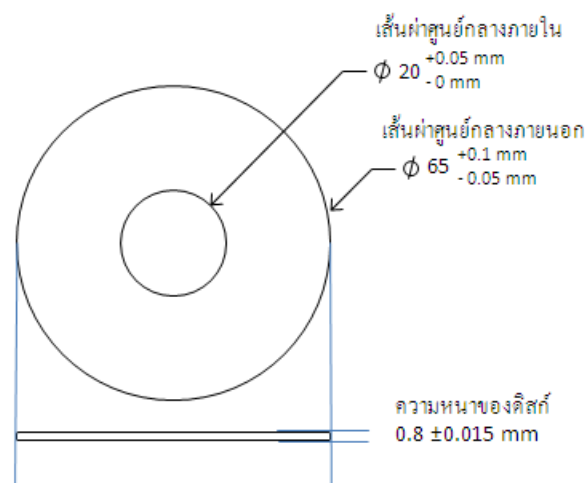
วิธีการดำเนินการวิจัย

ความเร็วรอบในการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีขีดจำกัดเพื่อให้การถึงข้อมูลหรือส่งข้อมูลมีความรวดเร็ว การหมุนที่ความเร็วรอบสูงก็ต้องการความสมดุลในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดแรงสั่นสะเทือน ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดแรงสั่นสะเทือนคือความไม่สมดุลของดิสก์ ซึ่งในกระบวนการอ่านเขียนสัญญาณเซอร์โว มีผลทำให้เกิดช่วงความถี่ในการอ่านเขียนสัญญาณผิดพลาด มีผลกระทบต่อความแม่นยำของตำแหน่งในการอ่านเขียนของหัวอ่าน ดังนั้นสปินเดิลและมอเตอร์จะต้องถูกทำให้เกิดความสมดุลก่อนที่จะประกอบ แต่ส่วนใหญ่ความไม่สมดุลจะเกิดขึ้นอีกครั้งจากการประกอบดิสก์และสเปเซอร์ วิธีการลดค่าความไม่สมดุลของดิสก์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะเรียกว่าความสมดุล

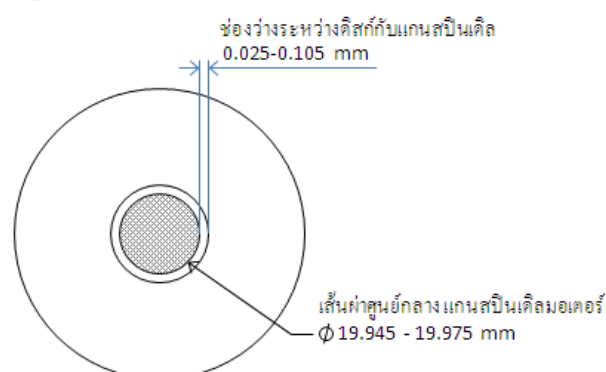
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์มีมากมายหลายปัจจัย ในงานวิจัยที่ได้กำหนดเลือกปัจจัยเพื่อทำการทดลองจากคุณสมบัติของเครื่องจักรที่ใช้และข้อมูลจากการทำงานปัจจุบันซึ่งปัจจัยที่นำมาทดลองคัดเลือกจากข้อมูลปัญหาอันหลังในกระบวนการที่คาดว่า มีผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์แต่ยังไม่ได้ทดลองวิจัยอย่างจริงจัง ปัจจัยเหล่านั้นได้แก่ ระยะช่องว่างระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของแผ่นดิสก์ มุมองศาในการเคาะและความสูงของพินเคาะ ซึ่งในการทดลองจะกำหนดขึ้นงานที่ทำการทดสอบและเครื่องจักรให้เป็นไปตามปัจจัยที่กำหนดไว้มากที่สุด และปรับความสมดุลของดิสก์เพื่อที่จะเก็บข้อมูลการเคาะ การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุลของดิสก์และจำนวนครั้งของการเคาะในแต่ละการทดลอง แล้วนำผลมาทำการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสมดุลและบรรลุเป้าหมายค่าความสมดุลของดิสก์ที่ยอมรับได้ ง่ายที่สุดและให้ผลการผลิตเป็นไปตามที่ต้องการ

ปัจจัยระยะช่องว่าง (Clearance) ระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ ได้เลือกวิเคราะห์และทดลองในงานวิจัย เนื่องจากข้อมูลในระดับชิ้นส่วนที่ใช้ประกอบ กำหนดให้มีค่าเผื่อ (Tolerance) ของแต่ละชิ้นส่วนสะดวกในการประกอบชิ้นงานต่าง ๆ เข้าด้วยกัน แต่ระยะช่องว่างนี้ได้พิจารณาว่าก็มีผลต่อกระบวนการปรับความสมดุลของดิสก์ เนื่องจากระยะช่องว่างระหว่างดิสก์กับแกนของสปินเดิลมอเตอร์นี้มีผลต่อจุดศูนย์กลางมวล ระยะช่องว่างที่มากหรือน้อยมีผลต่อจุดศูนย์กลางมวลที่ต่างกัน และมีผลต่อความไม่สมดุลของดิสก์และการปรับความสมดุลของดิสก์

การทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์จากปัจจัยระยะช่องว่าง (Clearance) ระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของดิสก์ (C) ที่มีลักษณะต่างกัน โดยข้อมูลของชิ้นส่วนทั้งสอง คือดิสก์ และสปินเดิลมอเตอร์ที่เมื่อนำมาประกอบกันแล้ว จะมีต้องมีระยะช่องว่าง เพื่อให้ชิ้นส่วนทั้งสองไม่เสียดสีกันหรือเคลื่อนที่ด้วยการหมุนได้สะดวก จากข้อมูลการผลิตขนาดของดิสก์ มีดังนี้ ดิสก์มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 65 (+0.1, -0.05) มิลลิเมตร หรือ 2.5 นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20(+0.05,-0) มิลลิเมตร ข้อมูลการผลิตขนาดของสปินเดิลมอเตอร์มีดังนี้ แกนสปินเดิล มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 19.945-19.975 มิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 22 และ 23



รูปที่ 22 ข้อมูลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของดิสก์



รูปที่ 23 ข้อมูลช่องว่างระหว่างดิสก์กับแกนสปินเดิลมอเตอร์

หากนำดิสก์และสปินเดิลมอเตอร์มาประกอบเข้าด้วยกันจะมีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองน้อยที่สุดคือ 0.025 มิลลิเมตร (20.00-19.945 มิลลิเมตร) และช่องว่างที่มากที่สุดคือ 0.105 มิลลิเมตร (20.05-19.945) ข้อมูลนี้ผู้วิจัยได้จำแนกความน่าจะเป็นซึ่งในกระบวนการผลิตเมื่อ

ประกอบชิ้นส่วนทั้งสองแล้ว การจัดวางมีโอกาสเป็นไปได้ตามแบบจำลองทั้ง 5 แบบ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับการทดลองของปัจจัยระยะช่องว่าง ระหว่างแกนของสปินเดิลมอเตอร์กับ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของดิสก์

การทดลอง	แบบจำลองการทดลอง	กำหนดให้
1. ดิสก์ ทั้งสองแผ่นด้านซ้าย ซิดกับแกนของสปินเดิล มอเตอร์ ด้านขวามีระยะ ช่องว่าง		F1
2. ดิสก์ทั้งสองแผ่นด้านซ้าย มีระยะช่องว่าง ด้านขวาซิด กับแกนของสปินเดิลมอเตอร์		F2
3. ดิสก์ แผ่นบนซ้ายซิด ขอบสปินเดิลมอเตอร์ ขวามี ระยะช่องว่าง แผ่นล่างซ้ายมี ระยะช่องว่าง ขวาซิดกับแกน ของสปินเดิลมอเตอร์		F3
4. ดิสก์แผ่นบนซ้ายมีระยะ ช่องว่าง ขวาซิดขอบสปิน เดิลมอเตอร์ แผ่นล่างซ้ายซิด ขอบสปินเดิลมอเตอร์ ขวามี ระยะช่องว่าง		F4
5. ดิสก์ทั้งสองแผ่น ทั้งสอง ด้าน มีระยะช่องว่างเท่า ๆ กัน		F5

การศึกษาที่จำลองให้ดิสก์มีลักษณะดังกล่าวเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่จากการเคาะด้วยเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ว่าลักษณะแบบใด ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสก์เข้าสู่ความสมดุลได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ปัจจัยมุมองศาในการเคาะ เนื่องจากการปรับค่าความสมดุลของดิสก์ของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์จะทำการเคาะในขณะที่ดิสก์หมุนด้วยความเร็วรอบสูง คงที่ คือ 7200 รอบต่อนาที เมื่อหมุนครบรอบจะทำการเคาะ จนกว่าค่าความสมดุลของจะเข้าสู่เป้าหมาย คือ 3 mg-cm องศาในการเคาะเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการปรับค่าความสมดุล เนื่องจากหากองศาในการเคาะจะทำงานสอดคล้องกับความถี่ในการเคาะด้วย หากทั้งสองสิ่งไม่สอดคล้องกันหรือทำงานไม่สัมพันธ์การปรับความสมดุลของดิสก์ จะมีทิศทางการเคลื่อนที่หรือการเคาะแต่ละครั้งไม่ตรงกัน ทำให้ปรับค่าความสมดุลยากหรือเข้าสู่ความสมดุลตามเป้าหมายไม่ได้

ในการทดลองเรื่องมุมองศาในการเคาะจะทำการทดลองที่ 2 มุม คือมุม 0 องศาและ 180 องศา โดยกำหนดให้ตำแหน่งพินเคาะเป็นจุดอ้างอิง

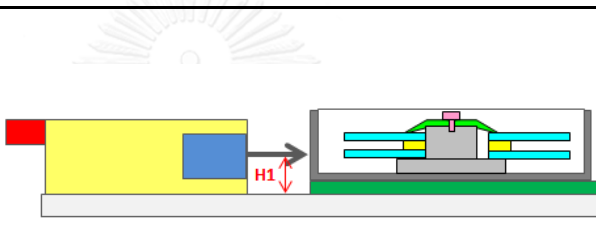
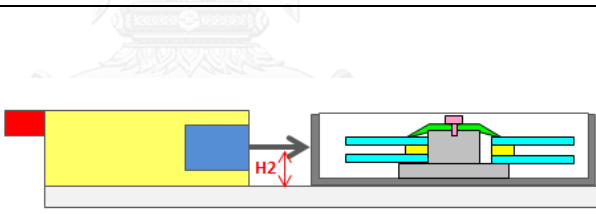
ตารางที่ 6 ระดับการทดลองของปัจจัยมุมองศาในการเคาะ

การทดลอง	แบบจำลองการทดลอง	กำหนดให้
1. มุมในการเคาะที่ มุม 0 องศา		D0
2. มุมในการเคาะที่ มุม 180 องศา		D180

ปัจจัยความสูงของของพินเคาะ (Hitting Pin) ระดับความสูงของพินเคาะเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสมดุลของดิสก์ อีกปัจจัยเนื่องจากการเคาะเป็นจุดส่งผ่านแรงเคาะจากเพียโซอิเล็กทริกไปสู่ฐานสปินเดิลมอเตอร์และดิสก์ หากตำแหน่งพินอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมการส่งผ่านแรงเคาะสู่ชิ้นงานง่ายทำให้การปรับความสมดุลของดิสก์เข้าสู่เป้าหมายง่ายขึ้น

การทดลองความสูงของพินเคาะ ทำการทดลองที่ความสูง 2 ระดับ คือที่ตำแหน่งพินเคาะอยู่กึ่งกลางระหว่างดิสก์แผ่นบนและล่าง และที่ตำแหน่งพินเคาะอยู่ระหว่างฐานสปินเดิลมอเตอร์และดิสก์แผ่นล่าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคาะทั้งสองแบบมีผลที่แตกต่างกันอย่างไร

ตารางที่ 7 ระดับการทดลองของปัจจัยความสูงของพินเคาะ

การทดลอง	แบบจำลองการทดลอง	กำหนดให้
1. ความสูงของพินเคาะอยู่ระหว่างฐานสปินเดิลมอเตอร์และดิสก์แผ่นล่าง		H1
2. ความสูงของพินเคาะอยู่ตรงกลางระหว่างดิสก์แผ่นบนและล่าง		H2

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

3.1.1 วัสดุ

1) ส่วนประกอบไดรฟ์ ขนาด 2.5 นิ้ว รุ่น 2 ดิสก์ ได้แก่ สเปนเดิลมอเตอร์, ดิสก์, แหวนรองดิสก์ (Spacer ring), แผ่นแคลมป์ยึดดิสก์ (Top clamp) และสกรู

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) เครื่องขันสกรูสำหรับการยึดแคลมป์กับแกนของสเปนเดิลมอเตอร์ด้วยไขควงไฟฟ้ารุ่น ABL 10YPC2-UA+S
- 2) อุปกรณ์ควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรู รุ่น TN401 ผู้ผลิต TECHNART
- 3) อุปกรณ์สำหรับปรับทิศทางดิสก์ของโรงงานกรณีศึกษา
- 4) แหวนรองความสูงขนาด 0.8 มิลลิเมตร
- 5) เครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ ของโรงงานกรณีศึกษา

3.2 ข้อกำหนด ปัจจัยควบคุมในการทดลอง

- 1) ที่ค่าแรงบิด (Torque) ในการขันยึดแผ่นแคลมป์กับดิสก์ที่ 35 mNm หรือ 0.035 kgf.cm
- 2) ความเร็วรอบของการหมุนของดิสก์และสเปนเดิลมอเตอร์ในขณะที่ปรับความสมดุลของดิสก์ที่ 7200 รอบต่อนาที
- 3) กฎเกณฑ์การตัดสินผ่านการทดสอบ และไม่ผ่านการทดสอบ ตัดสินที่ค่าความสมดุลของดิสก์และจำนวนการเคาะ ดังนี้ ค่าความสมดุลของดิสก์มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 mg-cm ที่จำนวนครั้งในการเคาะไม่เกิน 23 ครั้ง ถือว่าผ่านการทดสอบเป็นงานดี หากจำนวนการเคาะครบครั้งที่ 23 มีค่าความสมดุลของดิสก์มากกว่า 3 mg-cm ซึ่งงานนั้นไม่ผ่านการทดสอบถือเป็นงานเสีย ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2

3.3 การวางแผนการทดลอง

การทดลองเป็นการศึกษาจากปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ระยะช่องว่างระหว่างแกนสเปนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ มุมองศาในการเคาะ และความสูงของพินเคาะ โดยปัจจัยระยะช่องว่างระหว่างแกนสเปนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ มีทั้งหมด 5 รูปแบบ คือ F1, F2, F3, F4 และ F5 มุมองศาในการเคาะ มีทั้งหมด 2 มุม คือ มุม 0 องศา (D0) และมุม 180 องศา (D180) และความสูงของพินเคาะมีทั้งหมด 2 ระดับ คือ ระหว่างฐานสเปนเดิลมอเตอร์กับดิสก์แผ่นล่าง (H1) และ จุดกึ่งกลางระหว่างดิสก์แผ่นบนและแผ่นล่าง (H2) สรุปดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปัจจัยนำเข้าและระดับของปัจจัยในการทดลอง

ลำดับที่	ปัจจัย	จำนวนระดับ	ระดับของปัจจัย
1	ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ (C)	5	F1, F2, F3, F4 และ F5
2	มุมองศาในการเคาะ (θ)	2	มุม 0 องศา (D0) และ มุม 180 องศา (D180)
3	ความสูงของพินเคาะ	2	H1 และ H2

3.3.1 ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

ตัวแปรอิสระที่กำหนดในการทดลองก็คือปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย โดยตัวแปรที่ 1 คือ ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ ตัวแปรที่ 2 คือ มุมองศาในการเคาะ และตัวแปรที่ 3 คือ ความสูงของพินเคาะ เพื่อให้ได้ตัวแปรตามออกมา คือ จำนวนครั้งในการเคาะ ในการปรับค่าความสมดุลของดิสก์ให้อยู่ในข้อกำหนดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 mg-cm.

3.3.2 จำนวนการทดลอง

การออกแบบการทดลองปัจจัยนำเข้าในการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 มี 5 ระดับ ปัจจัย 2 มี 2 ระดับ และปัจจัยที่ 3 มี 2 ระดับ ดังนั้นจำนวนการทดลองจะเท่ากับ 20 การทดลอง (5 x 2 x 2 การทดลอง)

3.3.3 การหาจำนวนชิ้นงานตัวอย่างในการทดลอง

การกำหนดขนาดชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบสมมติฐาน โดยกำหนดปัจจัยในการทดลอง ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์ กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ ที่ 5 ระดับ ได้แก่ F1, F2, F3, F4 และ F5 กำหนดมุมองศาในการเคาะ ที่ 2 ระดับ ได้แก่ มุม D0 และ มุม D180 กำหนด ความสูงของพินเคาะ ที่ 2 ระดับ ได้แก่ H1 และ H2 นำค่ามาใส่ในโปรแกรม Minitab เพื่อคำนวณหาจำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการใช้ในการทดลอง

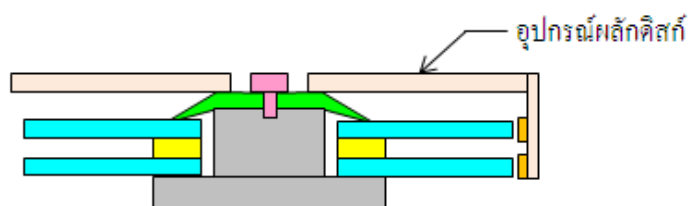
3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 วิธีการทดลองระยะห่างระหว่างแกนสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์

การศึกษาได้ดำเนินการทดลอง ดังนี้

- 1) ประกอบแผ่นดิสก์ทั้งสองแผ่นด้วยเครื่องประกอบแผ่นดิสก์
- 2) ประกอบแผ่นแคลมป์ยึดดิสก์กับแกนสปินเดิลมอเตอร์ไว้บนชิ้นงานศึกษา โดยที่ยังไม่ขันสกรู
- 3) นำอุปกรณ์ล็อคแผ่นแคลมป์กับแกนของสปินเดิลมอเตอร์วางบนชิ้นงานเพื่อล็อคชิ้นงานไว้ก่อนขันสกรู

อุปกรณ์นี้ได้ทำการประยุกต์เพื่อให้อาจปรับทิศทางของดิสก์ได้ และเพิ่มแผ่นสปริงขนาดเล็ก มีขั้นตอนการทำงานแสดงตามภาพที่ 24



รูปที่ 24 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ยึดดิสก์

- 4) เมื่อทิศทางของดิสก์อยู่ในทิศทางดั่งแบบจำลอง ทำการยึดแผ่นแคลมป์และแกนสปินเดิลด้วยเครื่องขันยึดสกรูที่ค่าแรงบิด 35 mNm หรือ 0.035 kgf.cm
- 5) นำชิ้นงานที่ขันยึดสกรูแล้วไปทดสอบการปรับค่าความสมดุลของดิสก์ด้วยเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ จากนั้นบันทึกผลทิศทางการเคาะและการเปลี่ยนแปลงของค่าความสมดุลของดิสก์

3.4.2 วิธีการทดลองมุมมองศาในการเคาะ

การศึกษาได้ดำเนินการทดลอง ดังนี้

- 1) ปรับตั้งมุมมองศาในการเคาะในส่วนการปรับตั้งค่าของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ที่มุม 0 องศา
- 2) นำชิ้นงานที่ประกอบดิสก์และขันสกรูแล้ว มาทำการเคาะเพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของค่าความสมดุลของดิสก์และจำนวนครั้งในการเคาะ

- 3) ทำการทดลองจนครบตามจำนวนชิ้นงานตัวอย่าง
- 4) จากนั้นปรับตั้งมุมองศาในการเคาะจาก 0 องศา เป็น 180 องศา แล้วทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2 เป็นต้นมา

3.4.3 วิธีการทดลองความสูงของพินเคาะ

การศึกษาได้ดำเนินการทดลอง ดังนี้

- 1) นำชิ้นงานที่ถูกค่าแรงบิด 0.035 kgf.cm เพื่อทดสอบการเคาะที่ระดับความสูงของพินเคาะ
- 2) ปรับความสูงของพินเคาะ ให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการทั้ง H1 และ H2
- 3) ในการทดลองที่ตำแหน่งความสูงของพินเคาะระหว่างดิสก์ทั้งสองแผ่น (H2) ต้องปรับฐานของชุดหัวเคาะเพื่อปรับตำแหน่งการเคาะ โดยจะใช้แผ่นรองความสูงขนาด 0.8 มิลลิเมตร ปรับยกฐานทั้งสี่มุม เหตุผลที่ใช้แผ่นรองความสูงที่ 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากดิสก์มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร
- 4) นำข้อมูลการเคาะจากการทดลองทั้งสองแบบมาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสมดุลของดิสก์

3.5 วิธีการวิเคราะห์ผลของข้อมูล

- 1) วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการประมวลผลด้วยโปรแกรม MINITAB วิเคราะห์และพิจารณาทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$
- 2) ตั้งสมมติฐานการทดลองโดยใช้ Two Sample-t Test ในการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบกระบวนการปัจจุบันและผลการทดลองมีความแตกต่างกันหรือไม่
- 3) วิเคราะห์ผลการปรับความสมดุลของดิสก์จากเครื่อง ปรับความสมดุลของดิสก์ด้วยโปรแกรม Balance Analysis

3.6 การนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิต

ผลการทดลองที่ได้หลังจากวิเคราะห์และผลของปัจจัยที่ได้มีผลต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการปรับความสมดุลของดิสก์ จะนำผลของปัจจัยนั้นรวมทั้งผลของปัจจัยร่วมไปทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์จริงหรือไม่ หากผลิตด้วยจำนวนจำนวนมาก โดยทำการผลิตด้วยชิ้นงานตัวอย่างที่ 300 ชิ้น การทดสอบยืนยันผลนอกจากจะใช้ปัจจัยที่มีผลและปัจจัยร่วมแล้วกำหนดปัจจัยควบคุมได้แก่ ค่าแรงบิด (Torque) ในในการขันยึดแผ่นแคลมป์กับดิสก์ ความเร็วรอบของการหมุนของดิสก์และสปินเดิลมอเตอร์ และกฎเกณฑ์การตัดสินผ่านการทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองด้วย

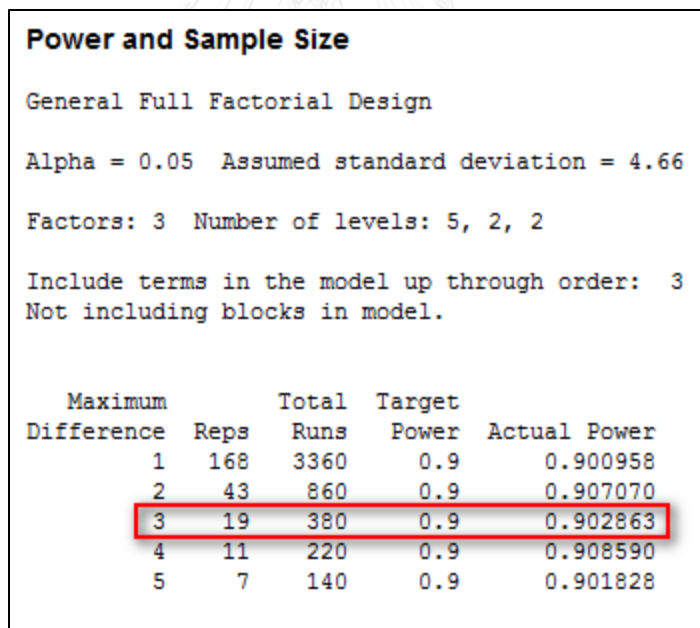


บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการหาจำนวนชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละการทดลอง

จำนวนชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละการทดลอง คำนวณหาจากโปรแกรม Minitab กำหนดให้อำนาจการทดสอบเท่ากับ 90% หรือ 0.9 ที่ค่าความแปรปรวนจำนวนการเคาะจนบรรลุค่าความสมดุลของดิสก์ของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ จากข้อมูลการผลิตเท่ากับ $(4.660)^2$ ที่ค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบสมมติฐานโดยคิดจากความแตกต่างของจำนวนเคาะที่ต้องการให้เปลี่ยนไป เริ่มจาก 1 2 3 4 และ 5 ครั้ง ทำให้ได้จำนวนชิ้นงานตัวอย่างจากค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 25 จากผลที่ได้เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการจัดหาชิ้นงานตัวอย่างและความเพียงพอของข้อมูลที่จะนำผลมาวิเคราะห์ต่อไปได้ ผู้วิจัยจึงเลือกผลจากค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบเท่ากับ 3 ได้จำนวนชิ้นงานตัวอย่างเท่ากับ 19 ชิ้นงาน



Maximum Difference	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
1	168	3360	0.9	0.900958
2	43	860	0.9	0.907070
3	19	380	0.9	0.902863
4	11	220	0.9	0.908590
5	7	140	0.9	0.901828

รูปที่ 25 จำนวนชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองในแต่ละการทดลอง

4.2 ผลของอิทธิพลของปัจจัย Format, Degree และ H ที่มีผลต่อการเคาะ

ผลการทดลองจากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ General Full Factorial Design ผลของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยจาก 20 การทดลอง ในแต่ละการทดลองมีขนาดชิ้นงานตัวอย่าง 19 ชิ้นงาน แสดงผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการจากการนำเข้าปัจจัย F, Degree และ H จากการออกแบบการทดลองแบบ General Full Factorial Design

ระยะ ช่องว่าง (F)	มุมมองในการเคาะ(θ)			
	0 องศา		180 องศา	
	ความสูงพินเคาะ(H)		ความสูงพินเคาะ(H)	
	H1	H2	H1	H2
F1	Mean = 3.579 Median = 3 StDev = 2.854	Mean = 6.737 Median = 5 StDev = 4.188	Mean = 22.79 Median = 23 StDev = 0.713	Mean = 23 Median = 23 StDev = 0
F2	Mean = 4.526 Median = 3 StDev = 3.373	Mean = 6.632 Median = 7 StDev = 3.670	Mean = 22.947 Median = 23 StDev = 0.229	Mean = 22.737 Median = 23 StDev = 1.147
F3	Mean = 9.947 Median = 9 StDev = 5.612	Mean = 10.000 Median = 7 StDev = 6.377	Mean = 22.158 Median = 23 StDev = 2.062	Mean = 21.368 Median = 23 StDev = 4.890
F4	Mean = 8.368 Median = 8 StDev = 4.310	Mean = 10.053 Median = 8 StDev = 5.826	Mean = 22.947 Median = 23 StDev = 0.229	Mean = 21.947 Median = 23 StDev = 3.566
F5	Mean = 8.895 Median = 3 StDev = 10.176	Mean = 11.316 Median = 11 StDev = 10.446	Mean = 23 Median = 23 StDev = 0	Mean = 23 Median = 23 StDev = 0

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธี General Linear Model

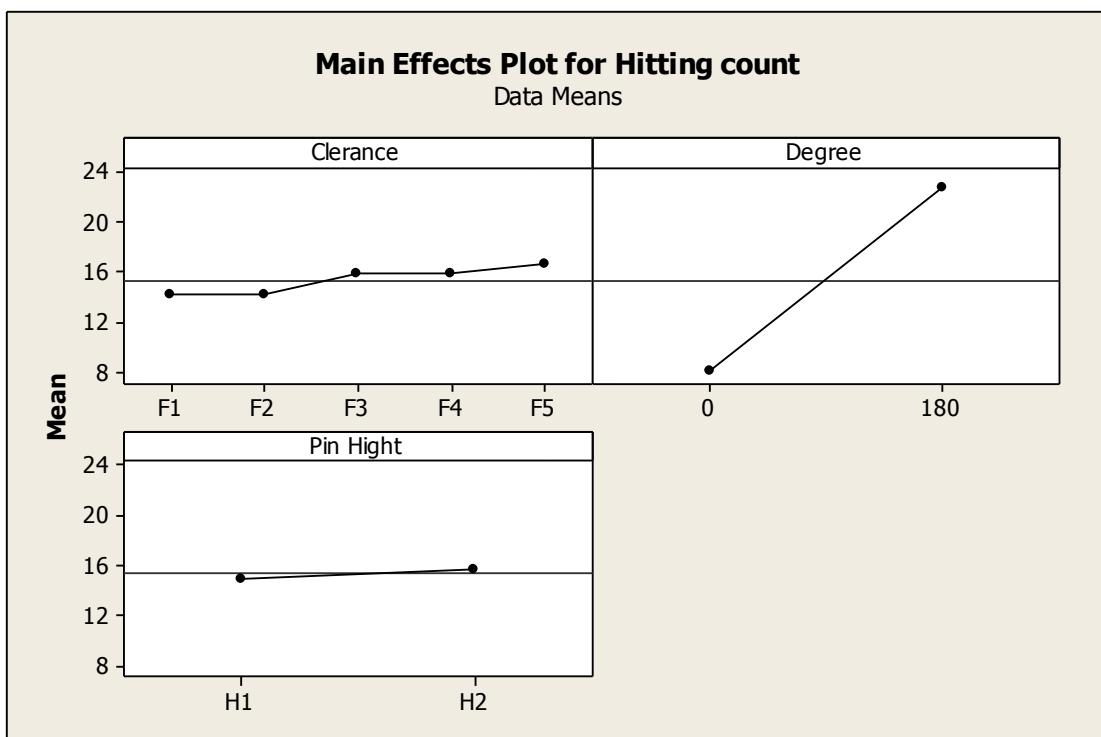
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย General Linear Model ของจำนวนครั้งในการเคาะชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 26 เมื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัย ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 พบว่า อิทธิพลของปัจจัยหลัก ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ Clearance มีค่า P-value เท่ากับ 0.003 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 มุมองศาในการเคาะ Degree มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และ ความสูงของพินเคาะ Pin High มีค่า P-value เท่ากับ 0.132 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยหลัก Clearance และ Degree มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน และปัจจัยหลัก Pin High ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน ในส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัย จะเห็นว่าอิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance และ Degree มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance และ Pin High มีค่า P-value เท่ากับ 0.751 มากกว่า 0.05 อิทธิพลร่วมของปัจจัย Degree และ Pin High มีค่า P-value เท่ากับ 0.015 น้อยกว่า 0.05 และอิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance, Degree และ Pin High มีค่า P-value เท่ากับ 0.945 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance และ Pin High และอิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance, Degree และ Pin High ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน ส่วนอิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance และ Degree อิทธิพลร่วมของปัจจัย Degree และ Pin High มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน

General Linear Model: Hitting count versus Clearance, Degree, Pin Hight							
Factor	Type	Levels	Values				
Clearance	fixed	5	F1, F2, F3, F4, F5				
Degree	fixed	2	0, 180				
Pin Hight	fixed	2	H1, H2				
Analysis of Variance for Hitting count, using Adjusted SS for Tests							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Clearance	4	358.9	358.9	89.7	4.13	0.003	
Degree	1	20323.3	20323.3	20323.3	936.04	0.000	
Pin Hight	1	49.4	49.4	49.4	2.27	0.132	
Clearance*Degree	4	588.2	588.2	147.1	6.77	0.000	
Clearance*Pin Hight	4	41.6	41.6	10.4	0.48	0.751	
Degree*Pin Hight	1	128.5	128.5	128.5	5.92	0.015	
Clearance*Degree*Pin Hight	4	16.3	16.3	4.1	0.19	0.945	
Error	360	7816.3	7816.3	21.7			
Total	379	29322.5					
S = 4.65961 R-Sq = 73.34% R-Sq(adj) = 71.94%							

รูปที่ 26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย General Linear Model

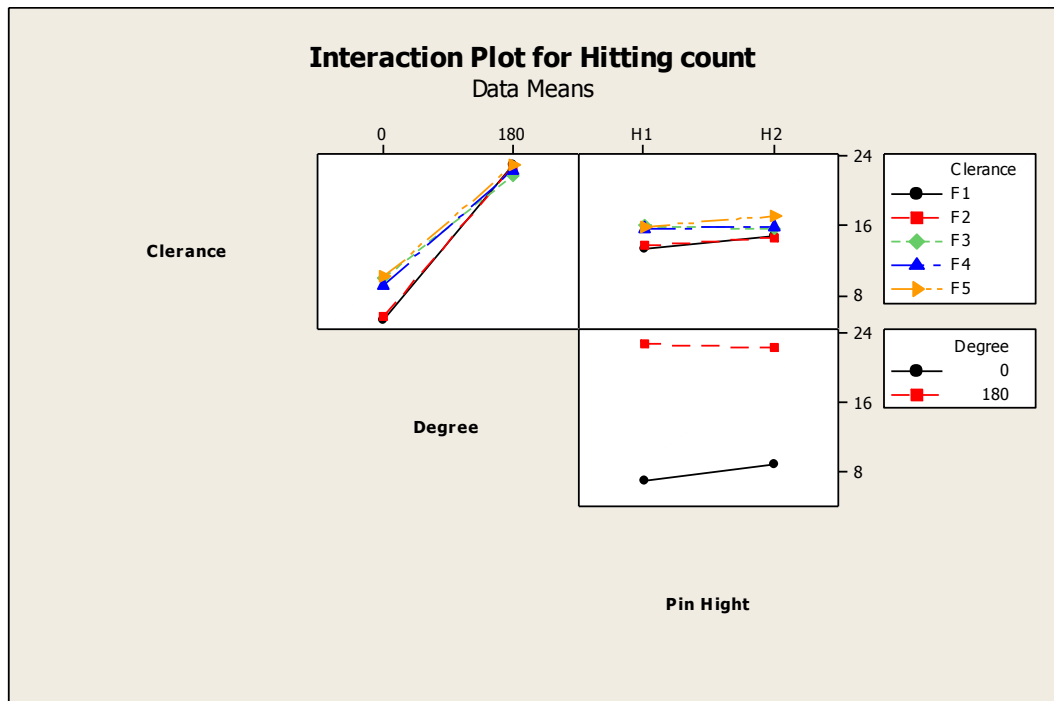
ด้วยโปรแกรม Minitab

เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยหลักดังแสดงในรูปที่ 27 พบว่า ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปีน เดิมมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ Clearance ที่ F1 และ F2 จะให้ค่าจำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานน้อยที่สุด ส่วน Clearance ที่ F5 จะให้ค่าจำนวนครั้งของการเคาะขึ้นงานมากที่สุด สำหรับมุมองศาในการเคาะ พบว่าที่มุม 0 องศา จะให้จำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานน้อยกว่าการเคาะที่มุม D180 องศา และความสูงของพินเคาะทั้งสองระดับไม่มีความแตกต่างกันในการเคาะขึ้นงาน



รูปที่ 27 ผลของปัจจัยหลักที่มีต่อจำนวนครั้งของการเคาะขึ้นงาน

เมื่อพิจารณาผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance และ Degree ดังแสดงในรูปที่ 28 พบว่าการเคาะขึ้นงานที่มุมเคาะ 0 องศา จะให้ค่าจำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานน้อยกว่าที่มุม 180 องศา ในทุก ๆ Clearance และมุมเคาะ 0 องศา ที่ Clearance F1 และ F2 จะให้จำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานน้อยที่สุด และมุมเคาะที่ 0 องศา ทั้งตำแหน่งความสูงพินเคาะ H1 และ H2 ให้ค่าจำนวนครั้งการเคาะขึ้นงานน้อยกว่ามุมการเคาะ 180 องศา ดังนั้น ควรเลือกใช้ Clearance ที่ F1 และ F2 มุมการเคาะที่ 0 องศา จึงจะทำให้ได้ค่าจำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานที่น้อยที่สุด



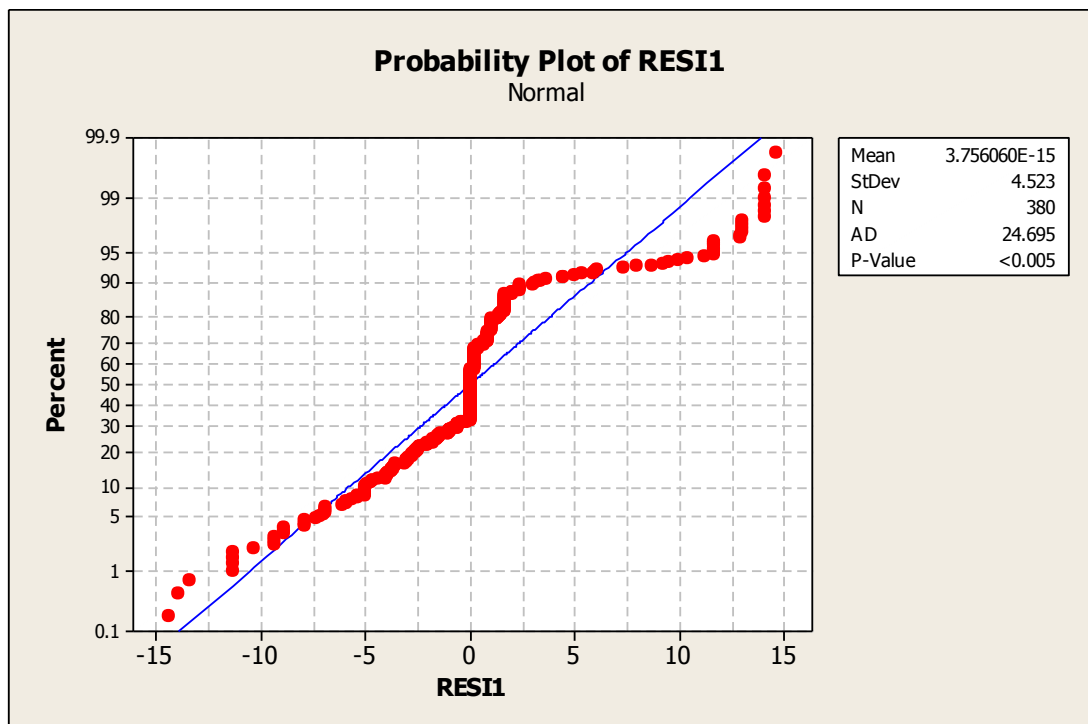
รูปที่ 28 ผลของปัจจัยร่วมที่มีต่อจำนวนครั้งในของการเคาะขึ้นงาน

4.2.2 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual, ϵ_{ij}) มีการกระจายตัวแบบปกติ ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลอง ผลการตรวจสอบแสดงดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ

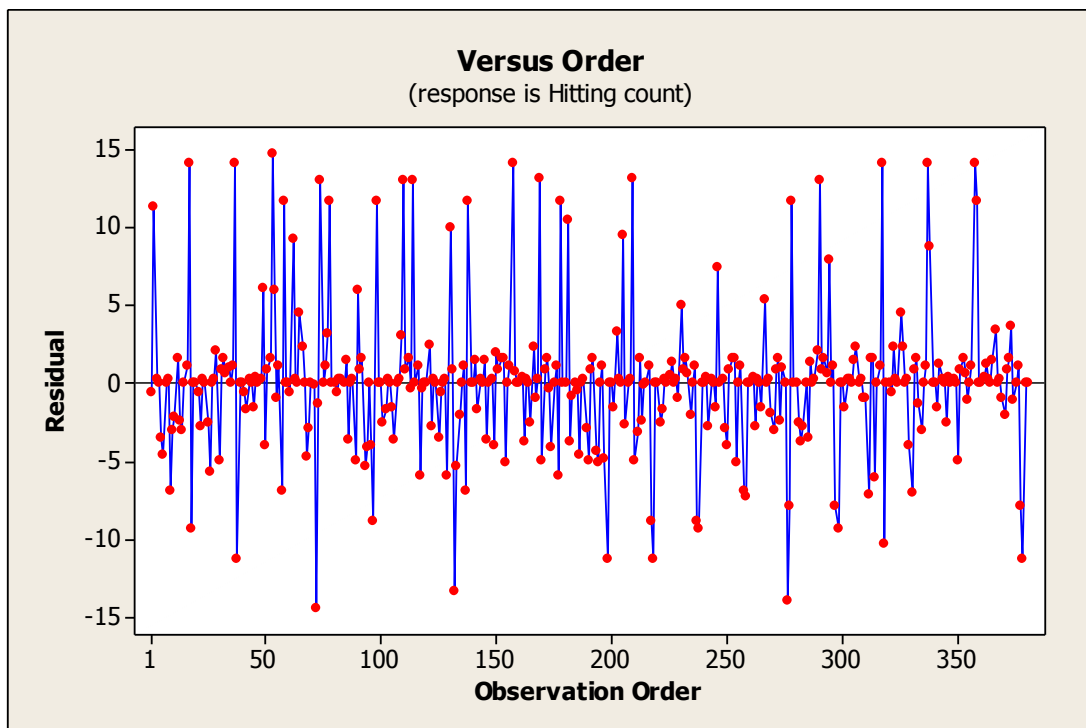
การตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวแสดงในรูปที่ 29 พบว่าค่าตกค้างมีการมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ลักษณะการเรียงตัวของค่าตกค้างบางช่วงมีการเรียงตัวไม่อยู่ในแนวเส้นตรง ค่าสถิติทดสอบ AD มีค่าเท่ากับ 24.695 ซึ่งมากกว่า 0.05 แต่ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.005 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงถึงว่าสามารถปฏิเสธได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 29 ผลการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าตกค้าง

2. การทดสอบความเป็นอิสระ

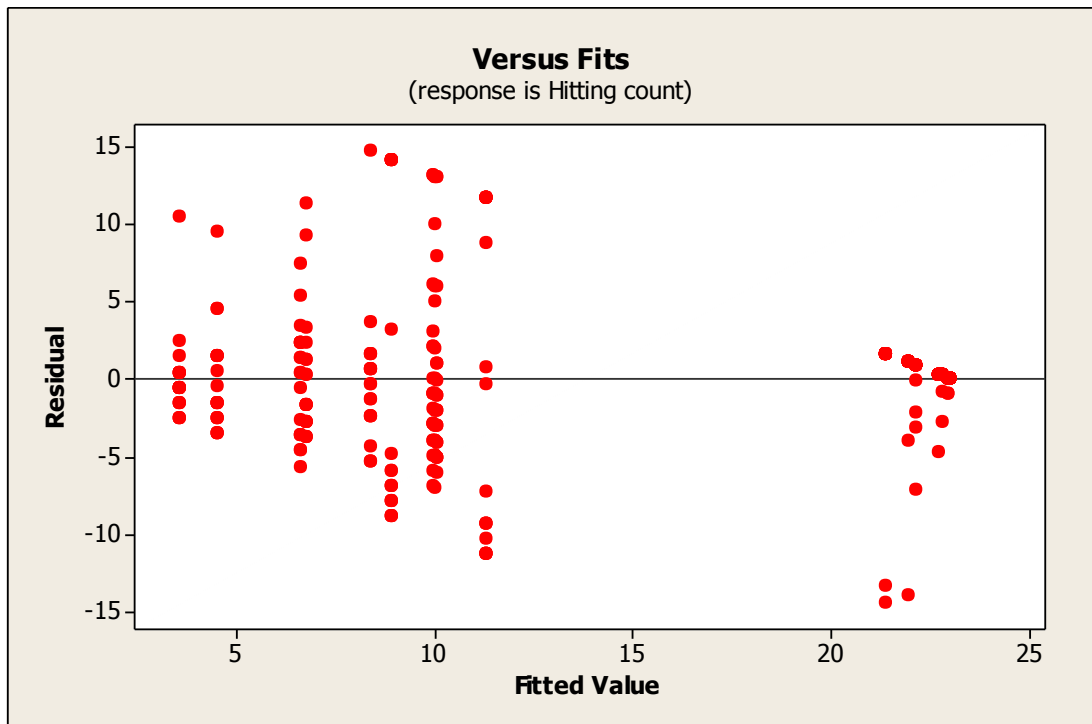
การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับความต่อเนื่อง ในการเก็บข้อมูล ลักษณะกราฟไม่ควรแสดงแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆ ของข้อมูลควรมีการกระจายของข้อมูลแบบไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน ผลจากการทดลองพบว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม มีรูปแบบเป็นอิสระต่อกัน และมีรูปแบบไม่แบบที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 30 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน



รูปที่ 30 กราฟทดสอบความเป็นอิสระแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ค่าส่วนตกค้างกับความต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล

3. การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน เพื่อตรวจสอบดูการกระจายไม่สม่ำเสมอ ความผิดปกติที่ค่าสูง ๆ และข้อมูลผิดปกติ ลักษณะกราฟควรมีการกระจายของข้อมูลแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ จากข้อมูลการทดลองผลการทดสอบข้อมูลมีการกระจายตัวสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ซึ่งจากรูปที่ 31 สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวนคงที่ตรงตามสมมติฐาน



รูปที่ 31 กราฟทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนระหว่าง
ค่าส่วนตกค้างกับจำนวนครั้งของการเคาะ

จากการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง พบว่าข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ในการออกแบบการทดลองไม่เป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไปได้

จากการวิเคราะห์ความเพียงพอของแบบจำลอง พบว่าข้อมูลจากการทดสอบมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ซึ่งไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลต่อไปได้ แต่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ General Linear Model ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย Clearance และ Degree และผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย Degree และ Pin Height ส่งผลต่อจำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปัจจัย Degree ที่มุมองศาเคาะ 180 องศา ให้จำนวนครั้งในการเคาะขึ้นงานที่ 23 ครั้ง และเป็นงานเสียทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่นำปัจจัย Degree ที่มุม 180 องศา ไปวิเคราะห์ผลต่อไป และผลของอิทธิพลร่วมของทั้งปัจจัย Degree และ Pin Height ส่งผลต่อจำนวนครั้งในการเคาะอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแตกต่างของผลงานดี และงานเสียที่ได้จากการเคาะระหว่างมุม 0 องศา และ 180 องศา ทำให้ปัจจัย Degree ส่งผลต่ออิทธิพลร่วมของทุกปัจจัย แต่จะไม่ส่งผลต่ออิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัย ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลต่อไปผู้วิจัยขอวิเคราะห์ความแตกต่างผลของปัจจัย Clearance ที่ 4 ระดับ F1 F2 F3 และ F4 ไม่วิเคราะห์ผลที่ระดับ F5 เนื่องจากผลการทดลอง

ที่แสดงในตารางที่ 9 ที่ระดับ F5 ข้อมูลมีการกระจายตัวสูงส่งผลให้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง จึงขอไม่วิเคราะห์ผลของปัจจัยนี้ต่อไปเพราะจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลผิดพลาด โดยจะควบคุมปัจจัย Degree ที่ 0 องศา ปัจจัย Pin Height ที่ H1 ทดสอบสมมติฐานแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ (Nonparametric Statistics) ซึ่งเป็นการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ค่ามัธยฐานของประชากรแทนค่าเฉลี่ยของประชากร และวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว เมื่อต้องการหลีกเลี่ยงข้อกำหนดเบื้องต้นที่ว่าตัวอย่างที่สุ่มมาจะต้องมาจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนี้

สมมติฐานสำหรับการทดสอบในทางสถิติ

กำหนดให้	M_1	แทน	ค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ที่ F1
	M_2	แทน	ค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ที่ F2
	M_3	แทน	ค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ที่ F3
	M_4	แทน	ค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ที่ F4

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

$$H_0 : M_1 = M_2 = M_3 = M_4$$

(หมายถึงค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ที่ระยะ Clearance ทั้ง 4 ไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : M_i \neq M_j$$

(หมายถึงค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ที่ระยะ Clearance ทั้ง 4 มีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่)

ทดสอบสมมติฐานแบบไม่ใช้พารามิเตอร์โดยการทดสอบของครัสคาลและวอลลิส (The Kruskal-Wallis Test) ผลที่ได้ดังรูปที่ 32

ผลการทดสอบแบบ Kruskal-Wallis Test ของปัจจัย Clearance ที่รูปแบบการปรับดิสก์ ให้มีระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนสปินเดิลมอเตอร์ ทั้ง 4 รูปแบบ ค่า P-value ซึ่งพิจารณาค่า P-value (adjust for ties) เนื่องจากมีข้อมูลกลุ่มที่มีค่าซ้ำกัน P-value ที่ได้เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น สรุปได้ว่า ปัจจัย Clearance ที่รูปแบบการปรับดิสก์ให้ระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนสปินเดิลมอเตอร์ F1 F2 F3 และ F4 มีความแตกต่างกัน และมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ ดังแสดงรูปที่ 32 ตรวจสอบการกระจายตัวด้วย Mood Median Test ซึ่งเป็นการทดสอบคล้ายการทดสอบแบบ Kruskal-Wallis Test แต่แสดงผลในรูปแบบการกระจายตัวของค่ามัธยฐาน ผลที่ได้การกระจายตัวของค่ามัธยฐานที่ F1 และ F2 มีการกระจายตัวน้อยกว่าและค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะน้อยกว่ารูปแบบอื่น ดังแสดงรูปที่ 33

Results for: Worksheet 9

Kruskal-Wallis Test: Hitting count versus Clerance

Kruskal-Wallis Test on Hitting count

Clerance	N	Median	Ave Rank	Z
F1	19	3.000	21.8	-3.80
F2	19	3.000	27.8	-2.45
F3	19	9.000	54.0	3.54
F4	19	8.000	50.4	2.71
Overall	76		38.5	

H = 30.18 DF = 3 P = 0.000

H = 30.53 DF = 3 P = 0.000 (adjusted for ties)

รูปที่ 32 ผลการทดสอบสมมติฐานแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ ของปัจจัย Clearance ด้วยวิธี Kruskal-Wallis Test

Mood Median Test: Hitting count versus Clerance

Mood median test for Hitting count

Chi-Square = 29.36 DF = 3 P = 0.000

Clerance	N<=	N>	Median	Q3-Q1	Individual 95.0% CIs
F1	18	1	3.0	2.0	(--*--)
F2	16	3	3.0	4.0	(--*-----)
F3	5	14	9.0	6.0	(-----*-----)
F4	6	13	8.0	4.0	(-----*--)

3.0 6.0 9.0 12.0

Overall median = 6.0

รูปที่ 33 การกระจายตัวของค่ามัธยฐานด้วยวิธี Mood Median Test

เนื่องจากทดสอบสมมติฐานของปัจจัย Clearance ที่รูปแบบ F1 และ F2 มีค่ามัธยฐานเท่ากันคือ 3 ครั้ง ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับใดให้ผลดีที่สุด เพื่อสรุปการทดสอบสมมติฐานจึงขอปัจจัย Clearance มาทดสอบเปรียบเทียบกันทีละคู่ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบสมมติฐานค่ามัธยฐานปัจจัยนำเข้า Clearance

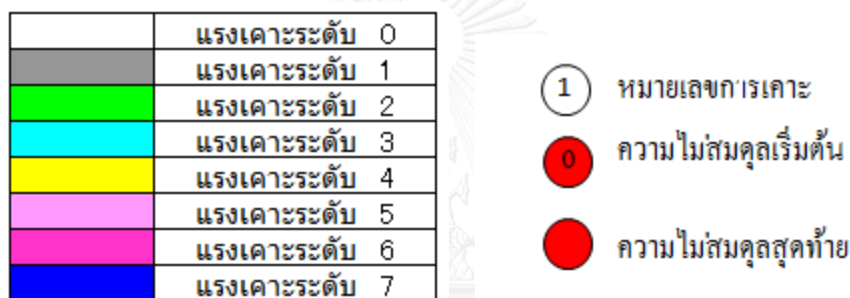
ลำดับ	ปัจจัย Clearance		P-value	ผลการทดสอบสมมติฐาน
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 1		
1	F1	F2	0.398	ไม่แตกต่างกัน
2	F1	F3	<0.05	แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
3	F1	F4	<0.05	แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
4	F2	F3	<0.05	แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
5	F2	F4	<0.05	แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
6	F3	F4	0.471	ไม่แตกต่างกัน

ผลการทดสอบสมมติฐานทีละคู่ คู่ทดสอบ F1 F2 และคู่ทดสอบ F3 F4 ค่า P-value มากกว่า 0.05 นั่นคือ ค่ามัธยฐานจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ ของทั้งสองคู่ไม่แตกต่างกัน แต่คู่ F1 F2 มีค่ามัธยฐานต่ำกว่า คือที่ 3 ครั้ง ดังนั้นจึงขอสรุปว่าปัจจัย Clearance ที่รูปแบบ F1 และ F2 มุมเคาะ 0 องศาและความสูงพิน H1 ให้ผลจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ดีที่สุด ผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลด้วยวิธี General Linear Model เบื้องต้น

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์จากการเคาะ

กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์เป็นกราฟที่เครื่องจักรรายงานผลออกมาจากปรับความสมดุลของชิ้นงานนั้น ๆ เพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์ผลต่อไปได้ โดยกราฟจะแสดงผลแบบจำลองของดิสก์เป็นลักษณะวงกลม ข้อมูลค่าความไม่สมดุลเริ่มต้น ความไม่สมดุลที่เปลี่ยนไปจากการเคาะแต่ละครั้ง และความไม่สมดุลสุดท้ายหรือเมื่อดิสก์เข้าสู่สมดุล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความไม่สมดุลจะแสดงเป็นจุดวงกลม สีในวงกลมแสดงถึงระดับแรงเคาะที่เครื่องใช้เคาะในแต่ละครั้งมีตั้งแต่ระดับต่ำสุดคือ 0 ถึงระดับสูงสุดคือ 7 ตัวเลขในวงกลมแสดงถึงลำดับในเคาะเริ่มจาก 1 ถึง 23 ครั้ง ดังอธิบายในรูปที่ 34

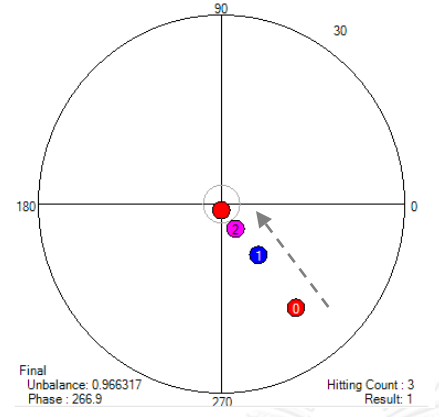
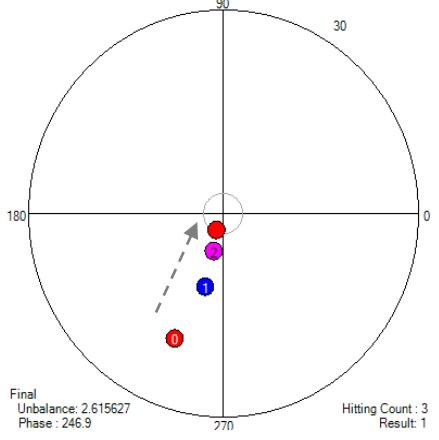
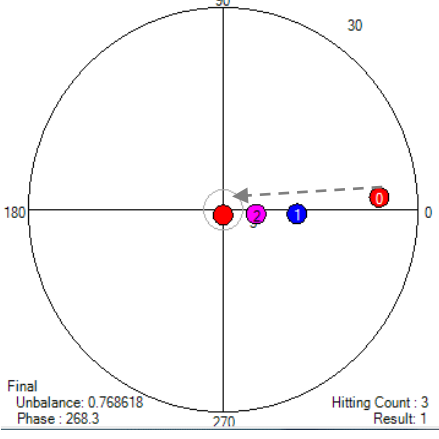
หมายเลขในวงกลมแสดงถึงลำดับของการเคาะ เริ่มจาก 1 ถึง 23

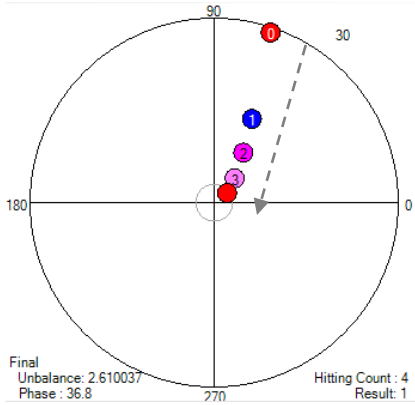
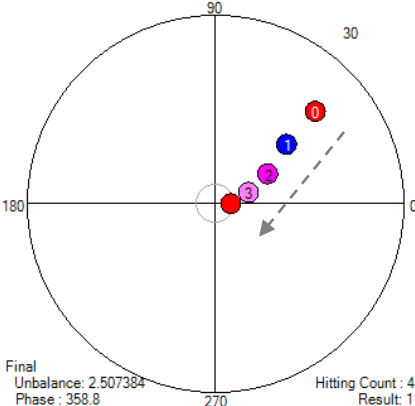


รูปที่ 34 แถบสีระดับในการเคาะและความหมายในการอ่านกราฟ

การวิเคราะห์ผลด้วยกราฟจากชิ้นงานตัวอย่าง 5 จาก 19 ชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดลองแต่ละการทดลอง แสดงผลดังนี้

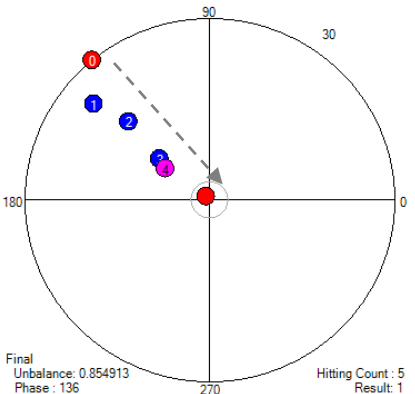
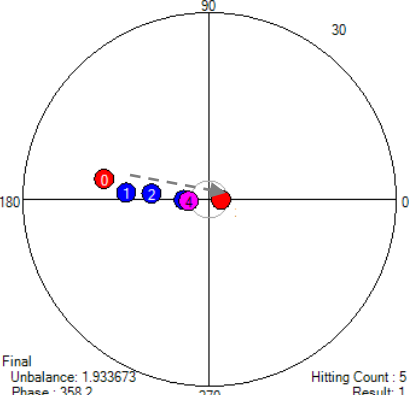
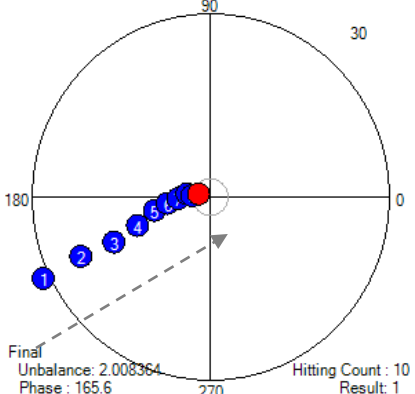
ตารางที่ 11 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H1

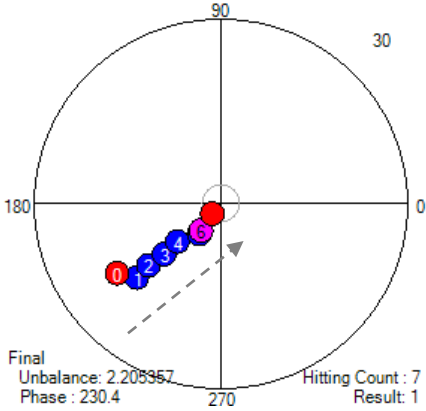
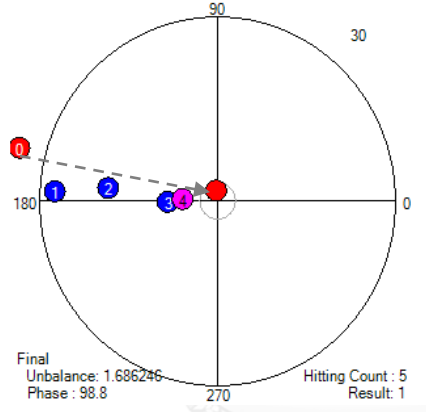
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.47 mg-cm มุมเริ่มต้น : 306.51 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.966 mg-cm มุมสุดท้าย : 266.87 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 19.86 mg-cm มุมเริ่มต้น : 247.96 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.61 mg-cm มุมสุดท้าย : 246.89 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.12 mg-cm มุมเริ่มต้น : 4.41 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.76 mg-cm มุมสุดท้าย : 268.33 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 29.15 mg-cm มุมเริ่มต้น : 71.63 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.61 mg-cm มุมสุดท้าย : 36.82 องศา จำนวนเคาะ : 4 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 21.65 mg-cm มุมเริ่มต้น : 42.47 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.50 mg-cm มุมสุดท้าย : 358.83 องศา จำนวนเคาะ : 4 ครั้ง</p>

จากกราฟปัจจัยนำเข้า F1 D0 H1 สามารถอธิบายได้ว่าการปรับความสมดุลของดิสก์ค่าความไม่สมดุลของดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สมดุลในแนวตรงและแนวองศาเดิม ความไม่สมดุลที่ลดลงในแต่ละครั้งที่เคาะอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 mg-cm. มีระยะห่างเท่า ๆ กัน ทำให้เข้าสู่สมดุลได้เร็ว จำนวนครั้งในการเคาะน้อย

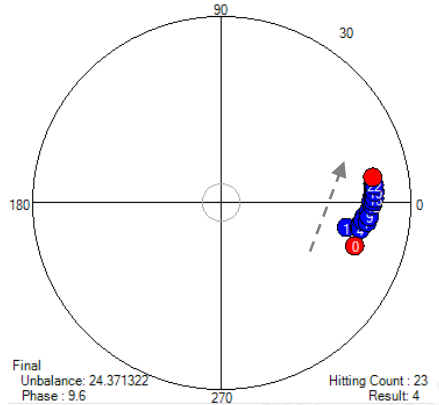
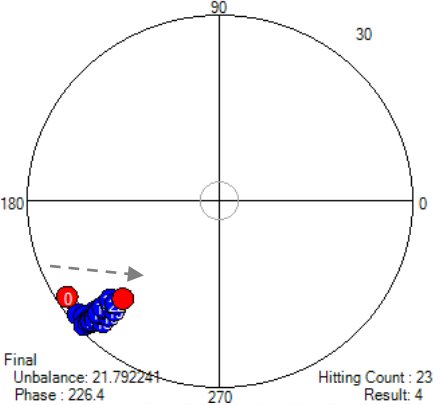
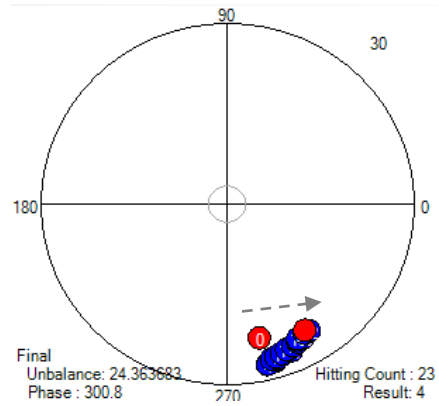
ตารางที่ 12 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H2

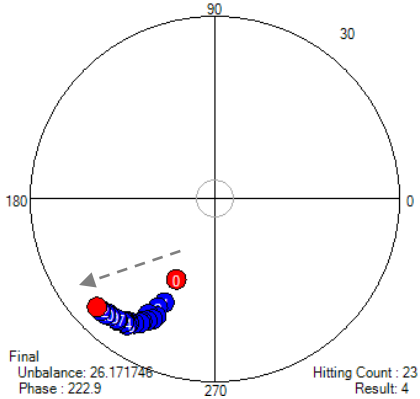
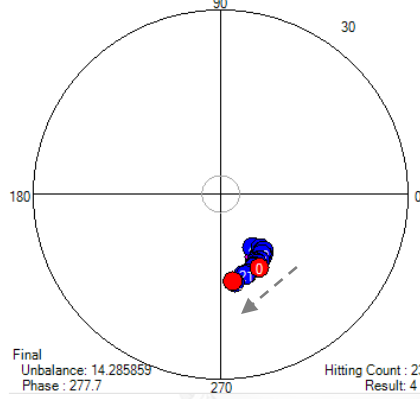
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1	 <p>Final Unbalance: 0.854913 Phase: 136</p> <p>Hitting Count: 5 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 29.96 mg-cm มุมเริ่มต้น : 129.59 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.85 mg-cm มุมสุดท้าย : 136.01 องศา จำนวนเคาะ : 5 ครั้ง</p>
2	 <p>Final Unbalance: 1.933673 Phase: 358.2</p> <p>Hitting Count: 5 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.19 mg-cm มุมเริ่มต้น : 168.96 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.93 mg-cm มุมสุดท้าย : 358.21 องศา จำนวนเคาะ : 5 ครั้ง</p>
3	 <p>Final Unbalance: 2.008364 Phase: 165.6</p> <p>Hitting Count: 10 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 42.07 mg-cm มุมเริ่มต้น : 205.02 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.00 mg-cm มุมสุดท้าย : 165.58 องศา จำนวนเคาะ : 10 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.17 mg-cm มุมเริ่มต้น : 214.21 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.20 mg-cm มุมสุดท้าย : 230.39 องศา จำนวนเคาะ : 7 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 34.49 mg-cm มุมเริ่มต้น : 165.59 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.68 mg-cm มุมสุดท้าย : 98.75 องศา จำนวนเคาะ : 5 ครั้ง</p>

จากกราฟแสดงการปรับความสมดุลของดิสก์ของปัจจัย F1 D0 H2 การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุลมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายในแนวเส้นตรง มุมองศามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในแนวเดิม ความไม่สมดุลที่ลดลงในแต่ละครั้งที่เคาะมีระยะห่างไม่คงที่ บางชิ้นงานตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้จำนวนครั้งในการเคาะสูงกว่าที่ F1 D0 H1 เล็กน้อย

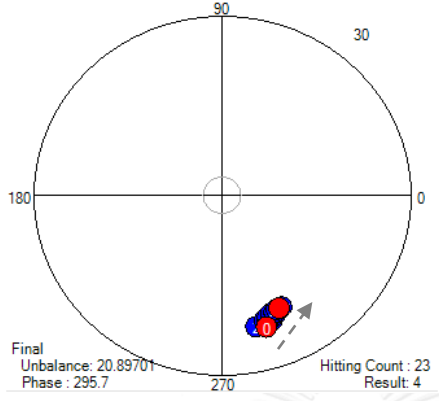
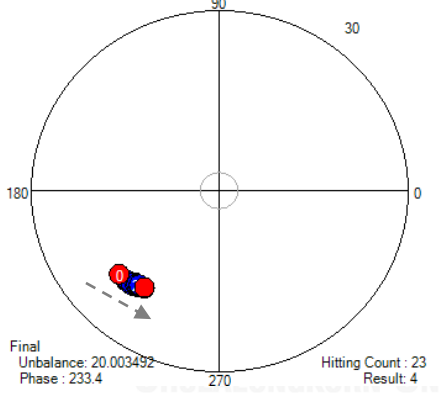
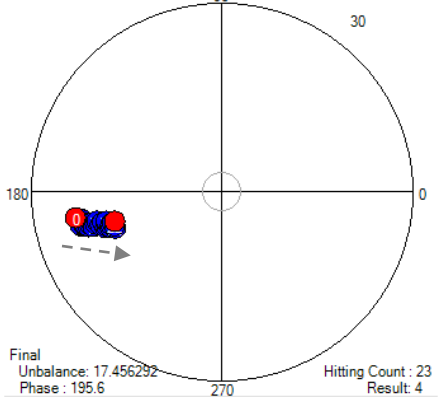
ตารางที่ 13 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D180 H1

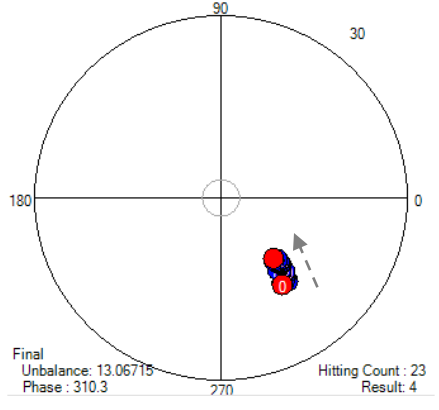
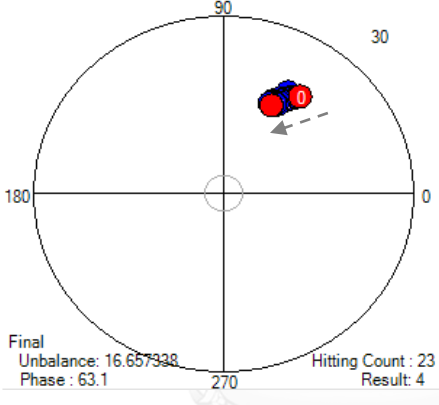
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 22.30 mg-cm มุมเริ่มต้น : 341.74 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 24.37 mg-cm มุมสุดท้าย : 9.58 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 28.31 mg-cm มุมเริ่มต้น : 213 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 21.79 mg-cm มุมสุดท้าย : 226.42 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 22.81 mg-cm มุมเริ่มต้น : 283.15 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 24.36 mg-cm มุมสุดท้าย : 300.79 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 14.70 mg-cm มุมเริ่มต้น : 244.7 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 26.17 mg-cm มุมสุดท้าย : 222.9 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 13.45 mg-cm มุมเริ่มต้น : 297.31 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 14.28 mg-cm มุมสุดท้าย : 277.65 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

จากกราฟของปัจจัยนำเข้า F1 D180 H1 สามารถอธิบายได้ว่า ที่มุม D180 ความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการเคาะแต่ละครั้ง ความไม่สมดุลของดิสก์ค่าเริ่มต้นและสุดท้ายไม่มีทิศทางเข้าสู่เป้าหมาย

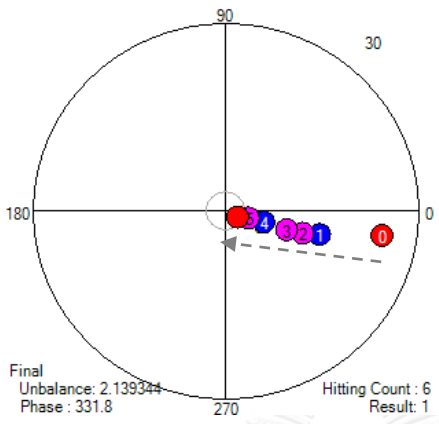
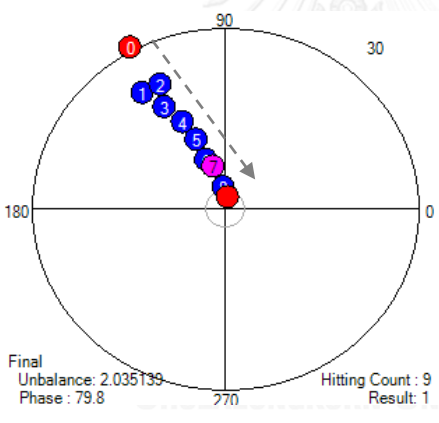
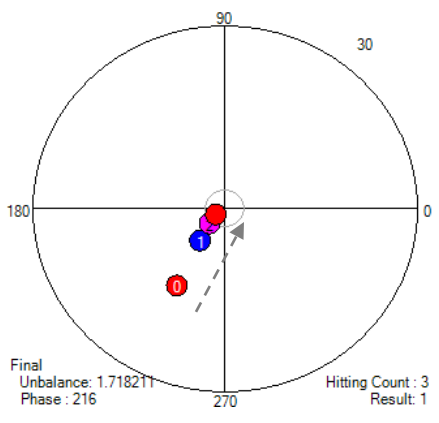
ตารางที่ 14 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D180 H2

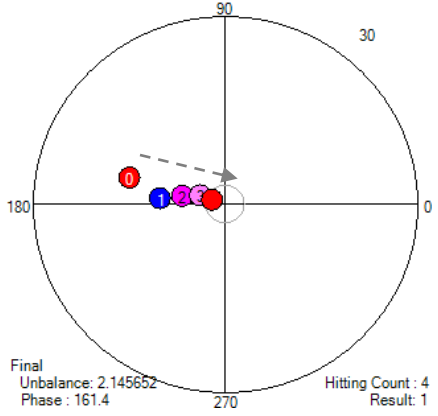
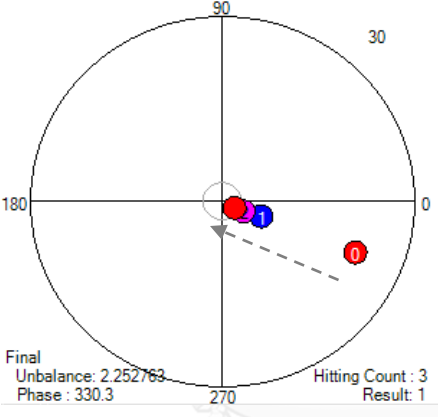
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 23.10 mg-cm มุมเริ่มต้น : 287.77 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 20.89 mg-cm มุมสุดท้าย : 295.69 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 21.12 mg-cm มุมเริ่มต้น : 221.11 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 20.00 mg-cm มุมสุดท้าย : 233.43 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 23.35 mg-cm มุมเริ่มต้น : 190.23 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 17.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 195.63 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.35 mg-cm มุมเริ่มต้น : 304.57 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 13.06 mg-cm มุมสุดท้าย : 310.25 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.31 mg-cm มุมเริ่มต้น : 53.55 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 16.65 mg-cm มุมสุดท้าย : 63.13 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

จากกราฟของปัจจัยนำเข้า F1 D180 H2 ผลการเคาะที่มุม D180 ให้ผลในลักษณะคล้ายกันคือความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการเคาะแต่ละครั้ง ส่งผลให้การเคาะไม่สามารถปรับความสมดุลได้

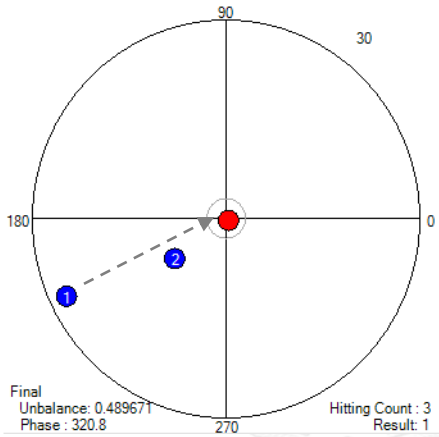
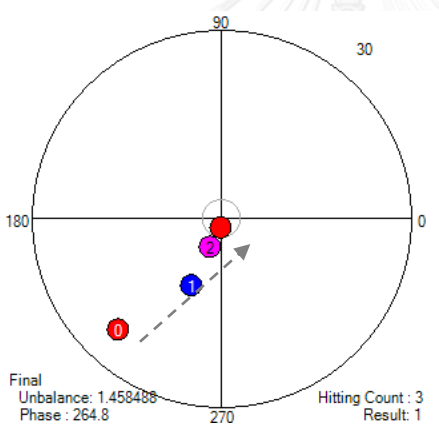
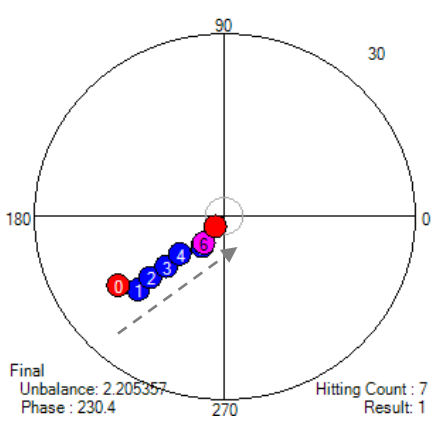
ตารางที่ 15 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D0 H1

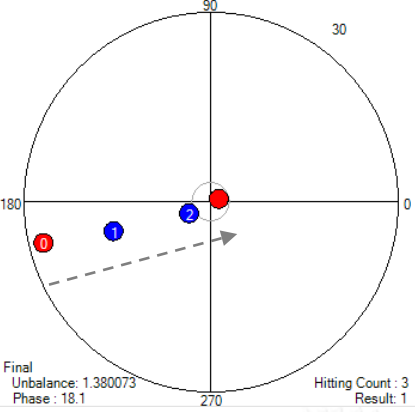
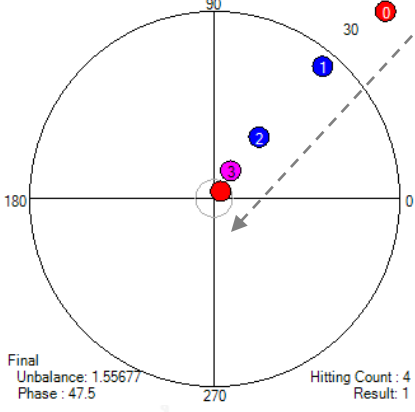
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.64 mg-cm มุมเริ่มต้น : 350.75 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.13 mg-cm มุมสุดท้าย : 331.81 องศา จำนวนเคาะ : 6 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 30.64 mg-cm มุมเริ่มต้น : 118.88 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.03 mg-cm มุมสุดท้าย : 79.83 องศา จำนวนเคาะ : 9 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 14.68 mg-cm มุมเริ่มต้น : 239.5 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.71 mg-cm มุมสุดท้าย : 215.99 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 15.50 mg-cm มุมเริ่มต้น : 164.26 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.14 mg-cm มุมสุดท้าย : 161.42 องศา จำนวนเคาะ : 4 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 22.42 mg-cm มุมเริ่มต้น : 338.19 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.25 mg-cm มุมสุดท้าย : 330.28 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>

จากกราฟปัจจัยนำเข้า F2 D0 H1 ผลของการปรับความสมดุลของดิสก์ ค่าความไม่สมดุลของดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สมดุลในแนวตรงและแนวองศาเดิม ความไม่สมดุลที่ลดลงในแต่ละครั้งที่เคาะอยู่ระหว่าง มีระยะห่างไม่สม่ำเสมอ แต่เข้าสู่เป้าหมายได้ จำนวนครั้งในการเคาะน้อย

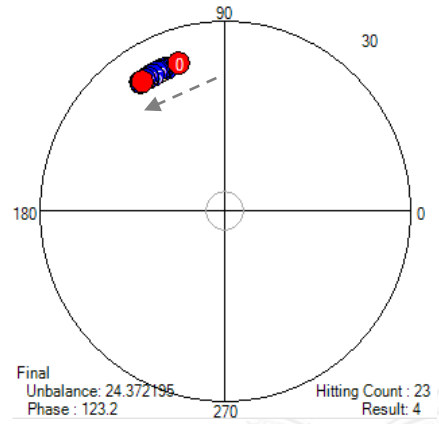
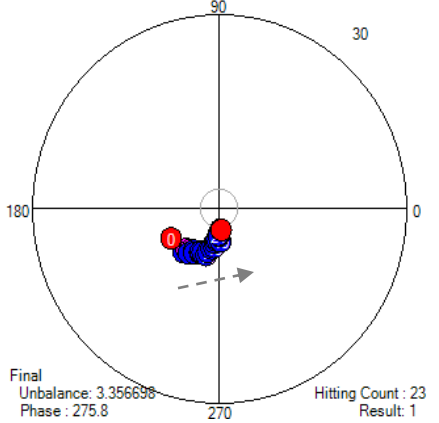
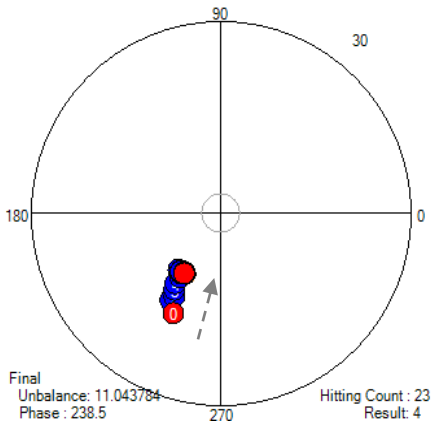
ตารางที่ 16 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D0 H2

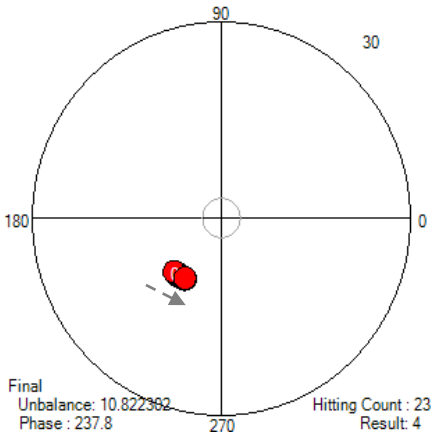
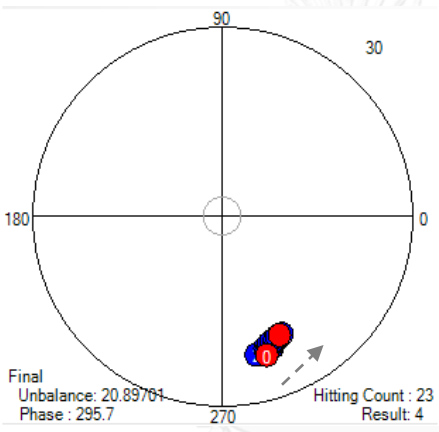
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 46.15 mg-cm มุมเริ่มต้น : 196.77 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.48 mg-cm มุมสุดท้าย : 320.75 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.07 mg-cm มุมเริ่มต้น : 227.17 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 264.81 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.17 mg-cm มุมเริ่มต้น : 214.21 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.20 mg-cm มุมสุดท้าย : 230.39 องศา จำนวนเคาะ : 7 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 27.61 mg-cm มุมเริ่มต้น : 193.65 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.38 mg-cm มุมสุดท้าย : 18.1 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 40.85 mg-cm มุมเริ่มต้น : 47.11 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.55 mg-cm มุมสุดท้าย : 47.51 องศา จำนวนเคาะ : 4 ครั้ง</p>

จากกราฟปัจจัยนำเข้า F2 D0 H2 ผลของการปรับความสมดุลของดิสก์ ค่าความไม่สมดุลของดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สมดุลในแนวตรงและแนวองศาเดิม ความไม่สมดุลที่ลดลงในแต่ละครั้งที่เคาะอยู่ระหว่าง มีระยะห่างไม่สม่ำเสมอ แต่เข้าสู่เป้าหมายได้ จำนวนครั้งในการเคาะเฉลี่ย 6.632 ครั้ง

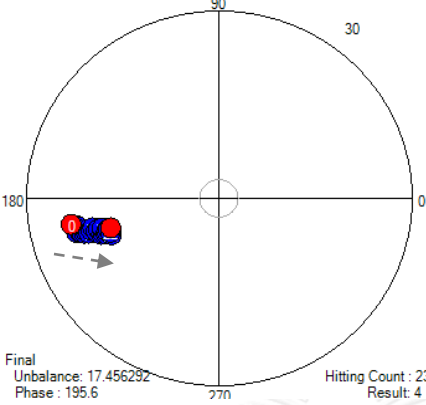
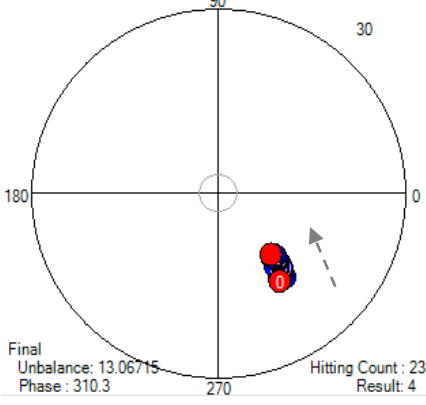
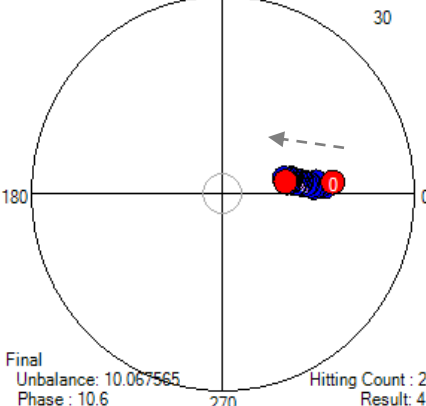
ตารางที่ 17 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D180 H1

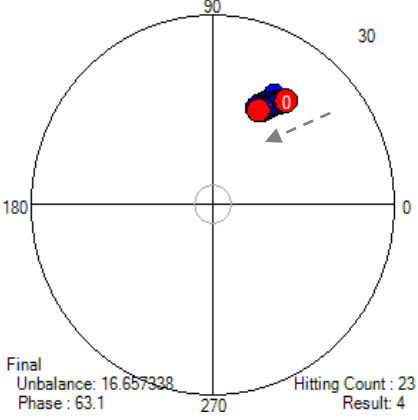
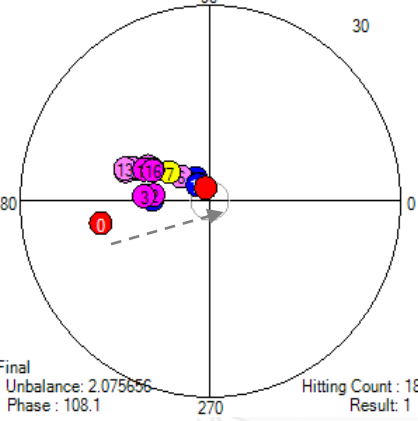
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.45 mg-cm มุมเริ่มต้น : 107.79 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 24.37 mg-cm มุมสุดท้าย : 123.2 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 8.96 mg-cm มุมเริ่มต้น : 210.96 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 3.35 mg-cm มุมสุดท้าย : 275.83 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.34 mg-cm มุมเริ่มต้น : 244.42 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 11.04 mg-cm มุมสุดท้าย : 238.5 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 11.10 mg-cm มุมเริ่มต้น : 227.51 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 10.82 mg-cm มุมสุดท้าย : 237.81 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 23.10 mg-cm มุมเริ่มต้น : 287.77 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 20.89 mg-cm มุมสุดท้าย : 295.69 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

จากกราฟของปัจจัยนำเข้า F2 D180 H1 ความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการเคาะแต่ละครั้ง ส่งผลให้การเคาะไม่สามารถปรับความสมดุลได้

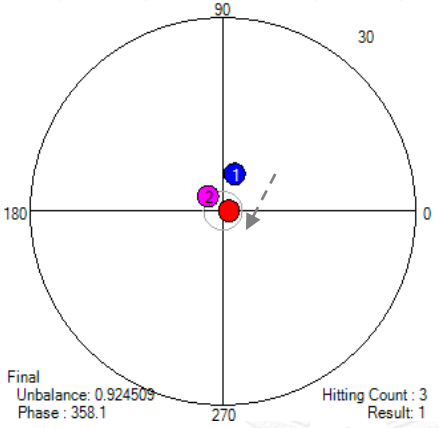
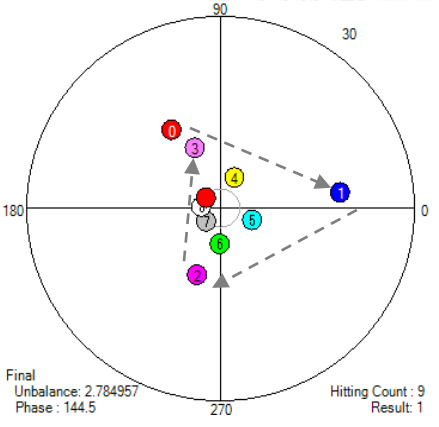
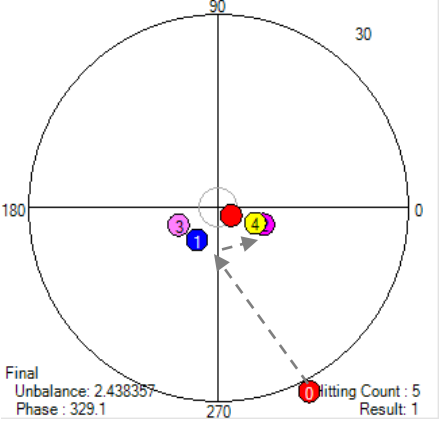
ตารางที่ 18 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D180 H2

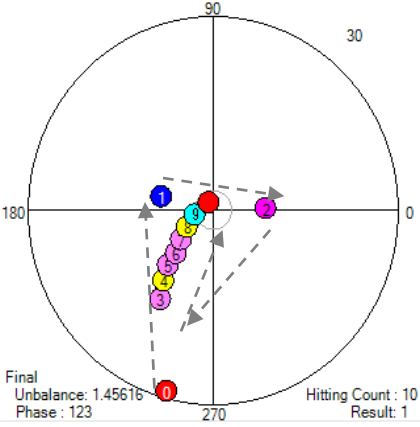
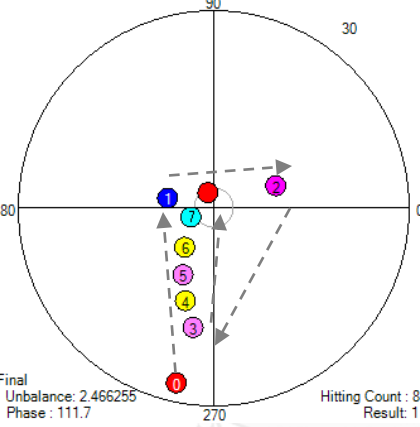
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 23.35 mg-cm มุมเริ่มต้น : 190.23 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 17.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 195.63 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.35 mg-cm มุมเริ่มต้น : 304.57 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 13.06 mg-cm มุมสุดท้าย : 310.25 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.39 mg-cm มุมเริ่มต้น : 5.67 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 10.06 mg-cm มุมสุดท้าย : 10.56 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.31 mg-cm มุมเริ่มต้น : 53.55 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 16.65 mg-cm มุมสุดท้าย : 63.13 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.53 mg-cm มุมเริ่มต้น : 191.35 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.07 mg-cm มุมสุดท้าย : 108.1 องศา จำนวนเคาะ : 18 ครั้ง</p>

จากกราฟของปัจจัยนำเข้า F2 D180 H2 ความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการเคาะแต่ละครั้ง บางตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงแต่ยังเข้าสู่เป้าหมายได้ช้า ส่งผลให้การเคาะไม่สามารถปรับความสมดุลได้และจำนวนเคาะสูง

ตารางที่ 19 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D0 H1

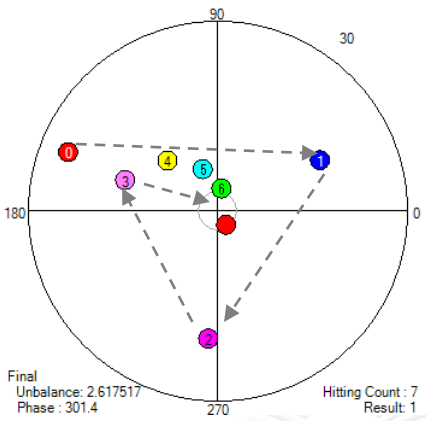
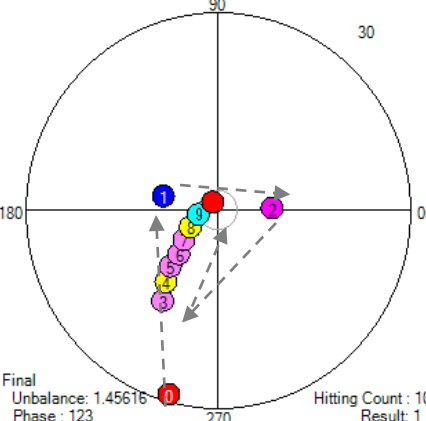
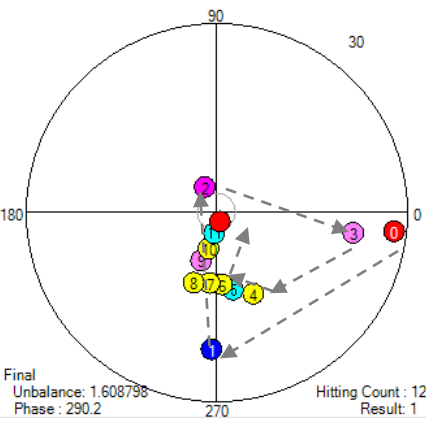
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 39.16 mg-cm มุมเริ่มต้น : 174.44 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.92 mg-cm มุมสุดท้าย : 358.11 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 14.39 mg-cm มุมเริ่มต้น : 121.9 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.78 mg-cm มุมสุดท้าย : 144.5 องศา จำนวนเคาะ : 9 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 31.95 mg-cm มุมเริ่มต้น : 296.8 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.43 mg-cm มุมสุดท้าย : 329.05 องศา จำนวนเคาะ : 5 ครั้ง</p>

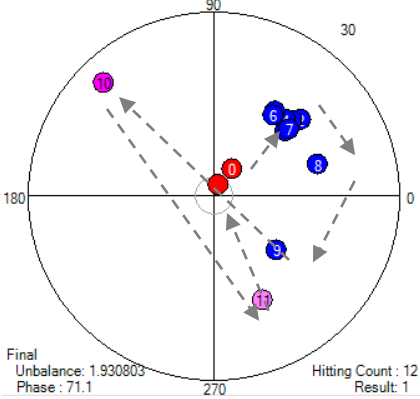
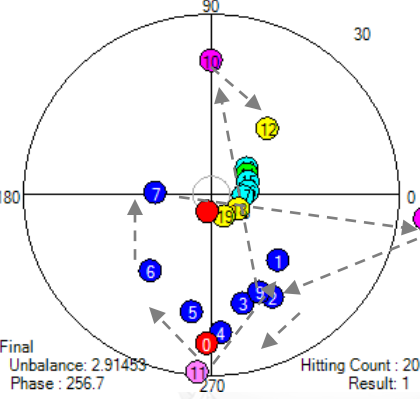
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 28.94 mg-cm มุมเริ่มต้น : 254.72 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 122.98 องศา จำนวนเคาะ : 10 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 27.21 mg-cm มุมเริ่มต้น : 257.74 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.46 mg-cm มุมสุดท้าย : 111.74 องศา จำนวนเคาะ : 8 ครั้ง</p>

จากกราฟปัจจัยนำเข้า F3 D0 H1 การปรับความสมดุลของดิสก์ การเปลี่ยนแปลงค่าความไม่สมดุลไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นแนวเส้นตรงแต่สามารถปรับความสมดุลให้เข้าสู่เป้าหมายได้

สาเหตุที่การปรับความสมดุลของดิสก์ไม่เป็นแนวเส้นตรงอาจเป็นผลจากการปรับระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนสปินเดิลมอเตอร์ของดิสก์แผ่นบนและล่างอยู่คนละด้าน ทำให้การเคาะความไม่สมดุลมีการหมุนของน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในทิศตรงข้ามกัน

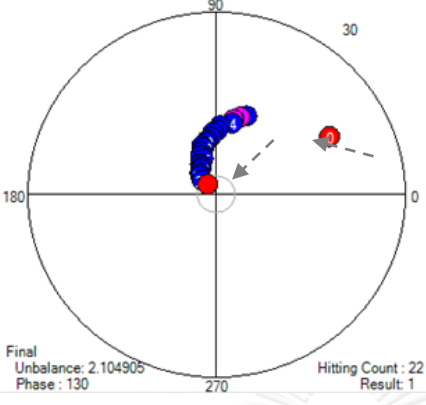
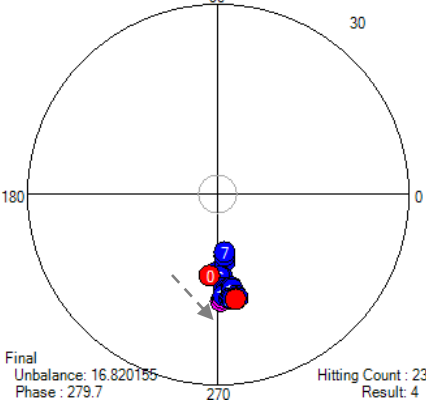
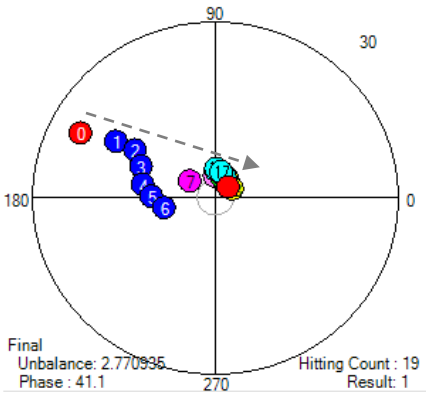
ตารางที่ 20 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D0 H2

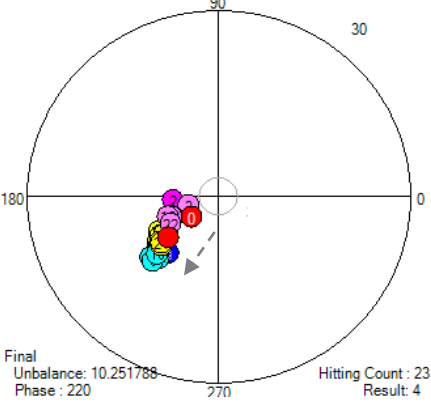
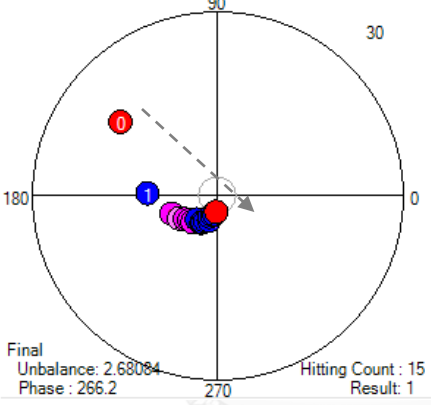
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1	 <p>Final Unbalance: 2.617517 Phase: 301.4 Hitting Count: 7 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 25.37 mg-cm มุมเริ่มต้น : 158.64 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.61 mg-cm มุมสุดท้าย : 300.1 องศา จำนวนเคาะ : 7 ครั้ง</p>
2	 <p>Final Unbalance: 1.45616 Phase: 123 Hitting Count: 10 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 28.94 mg-cm มุมเริ่มต้น : 254.72 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 122.98 องศา จำนวนเคาะ : 10 ครั้ง</p>
3	 <p>Final Unbalance: 1.608798 Phase: 290.2 Hitting Count: 12 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 28.13 mg-cm มุมเริ่มต้น : 353.76 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.60 mg-cm มุมสุดท้าย : 290.17 องศา จำนวนเคาะ : 12 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 5.24 mg-cm มุมเริ่มต้น : 56.8 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.93 mg-cm มุมสุดท้าย : 71.11 องศา จำนวนเคาะ : 12 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.71 mg-cm มุมเริ่มต้น : 268.25 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.91 mg-cm มุมสุดท้าย : 256.65 องศา จำนวนเคาะ : 20 ครั้ง</p>

จากกราฟปัจจัยนำเข้า F3 D0 H2 การปรับความสมดุลของดิสก์ทิศทางการเคาะไม่เป็นระเบียบในแนวเส้นตรง สามารถเข้าสู่เป้าหมายได้แต่จำนวนการเคาะสูง

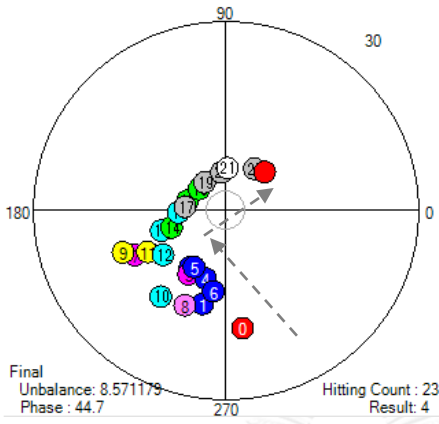
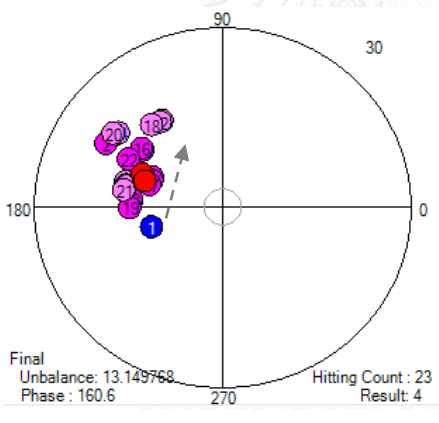
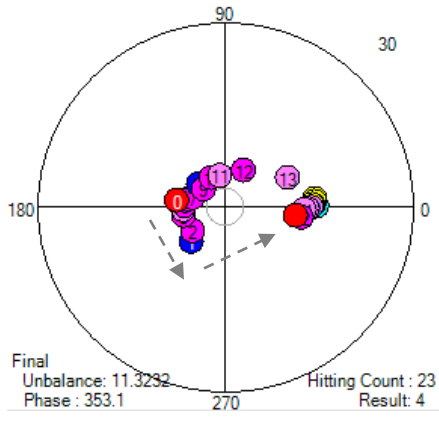
ตารางที่ 21 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H1

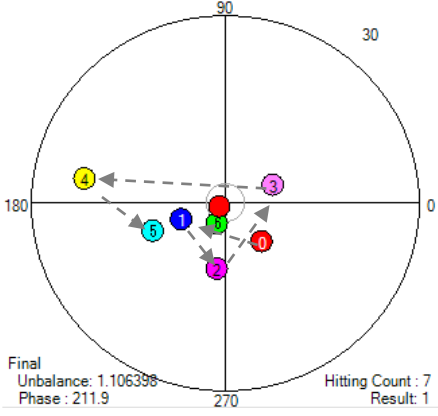
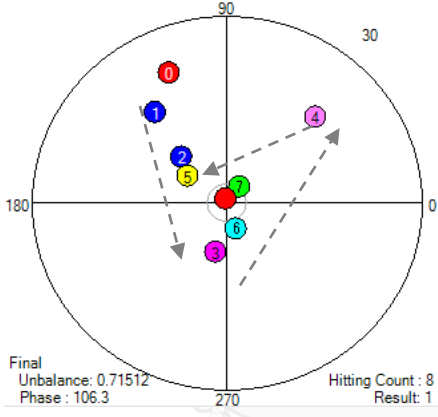
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.37 mg-cm มุมเริ่มต้น : 27.71 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.10 mg-cm มุมสุดท้าย : 129.96 องศา จำนวนเคาะ : 22 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 12.89 mg-cm มุมเริ่มต้น : 264.25 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 16.82 mg-cm มุมสุดท้าย : 279.67 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.70 mg-cm มุมเริ่มต้น : 153.63 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.77 mg-cm มุมสุดท้าย : 41.1 องศา จำนวนเคาะ : 19 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4	 <p>Final Unbalance: 10.251788 Phase: 220</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 5.33 mg-cm มุมเริ่มต้น : 217.99 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 10.25 mg-cm มุมสุดท้าย : 220.04 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5	 <p>Final Unbalance: 2.68084 Phase: 266.2</p> <p>Hitting Count: 15 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 19.70 mg-cm มุมเริ่มต้น : 142.61 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.68 mg-cm มุมสุดท้าย : 266.17 องศา จำนวนเคาะ : 15 ครั้ง</p>

จากตารางที่ 21 การปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H1 ค่าความไม่สมดุลของดิสก์ในการเคาะแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยและการปรับความสมดุลทำได้ยาก เนื่องจากเป็นการเคาะที่มุม 180 องศา

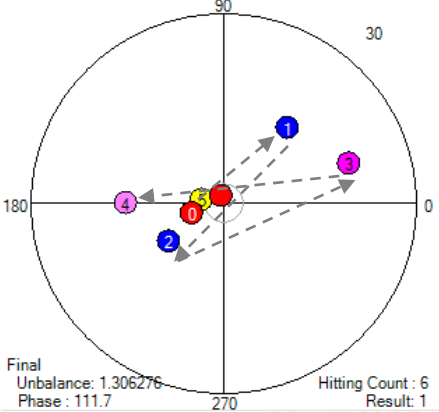
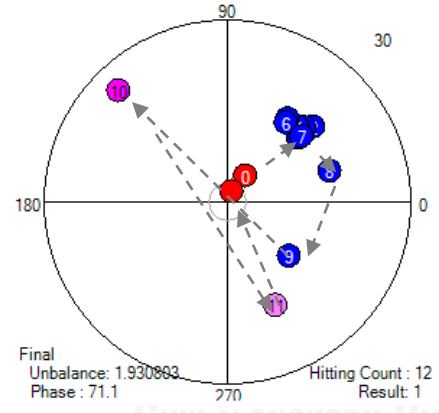
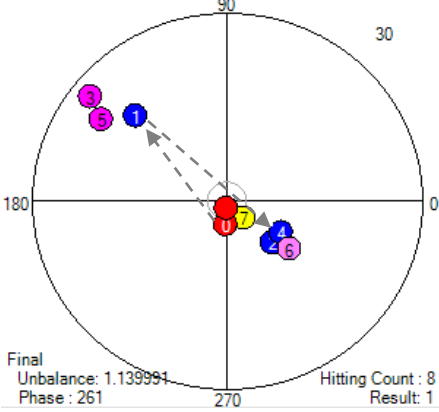
ตารางที่ 22 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H2

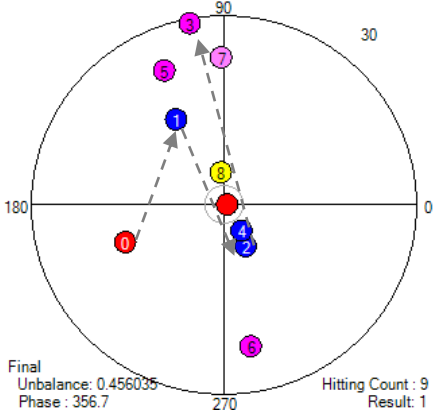
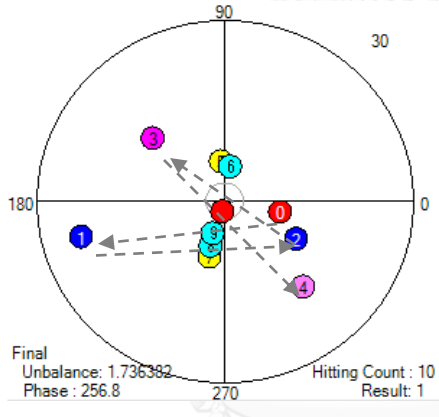
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 18.91 mg-cm มุมเริ่มต้น : 278.09 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 8.57 mg-cm มุมสุดท้าย : 44.74 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 13.90 mg-cm มุมเริ่มต้น : 156.77 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 13.14 mg-cm มุมสุดท้าย : 160.6 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 7.81 mg-cm มุมเริ่มต้น : 172.02 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 11.32 mg-cm มุมสุดท้าย : 353.07 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 8.30 mg-cm มุมเริ่มต้น : 312.18 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.10 mg-cm มุมสุดท้าย : 211.93 องศา จำนวนเคาะ : 7 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 22.73 mg-cm มุมเริ่มต้น : 113.16 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.71 mg-cm มุมสุดท้าย : 106.32 องศา จำนวนเคาะ : 8 ครั้ง</p>

จากตารางที่ 22 การปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัย F3 D180 H2 ตำแหน่งความไม่สมดุลมีการเปลี่ยนแปลงจากการเคาะแต่เป็นการเปลี่ยนองศาแต่ค่าความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้ไม่สามารถปรับความสมดุลของดิสก์ให้เข้าสู่เป้าหมายได้

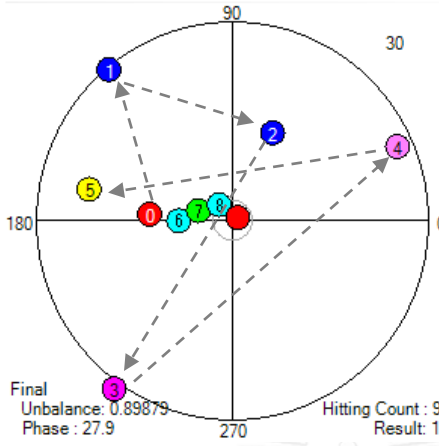
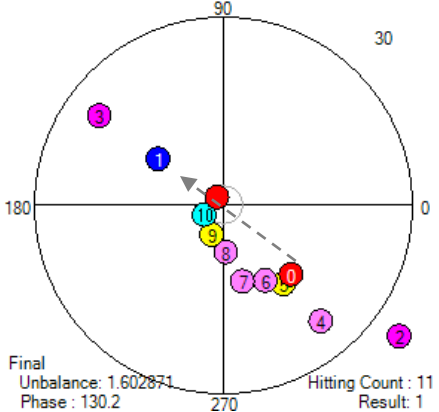
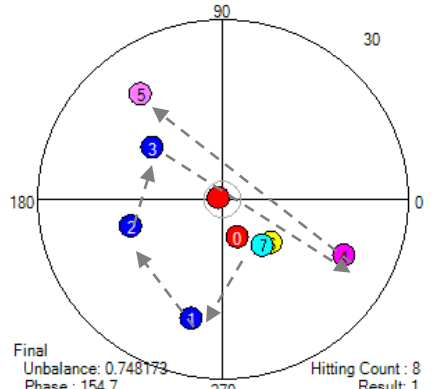
ตารางที่ 23 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D0 H1

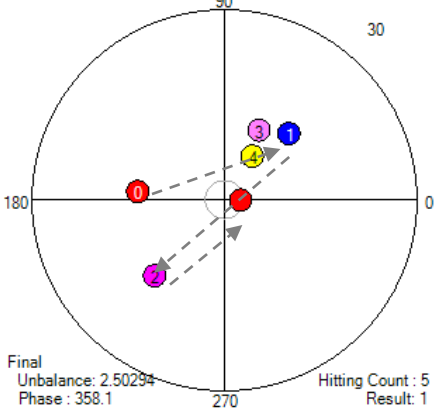
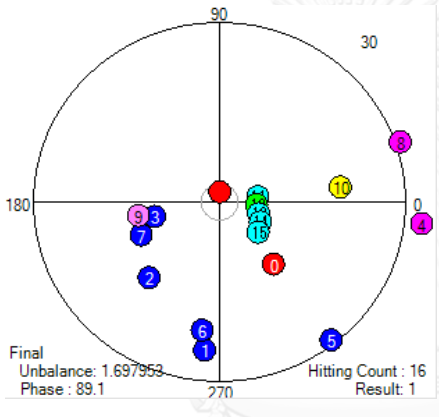
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 5.29 mg-cm มุมเริ่มต้น : 196.74 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.30 mg-cm มุมสุดท้าย : 111.73 องศา จำนวนเคาะ : 6 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 5.24 mg-cm มุมเริ่มต้น : 56.8 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.93 mg-cm มุมสุดท้าย : 71.11 องศา จำนวนเคาะ : 12 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 3.71 mg-cm มุมเริ่มต้น : 265.96 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.13 mg-cm มุมสุดท้าย : 260.95 องศา จำนวนเคาะ : 8 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 16.51 mg-cm มุมเริ่มต้น : 201.18 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 356.75 องศา จำนวนเคาะ : 9 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 8.98 mg-cm มุมเริ่มต้น : 348.67 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.73 mg-cm มุมสุดท้าย : 256.84 องศา จำนวนเคาะ : 10 ครั้ง</p>

จากตารางที่ 23 การปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัย F4 D0 H1 ให้ผลการเคาะลักษณะคล้ายการปรับความสมดุลของดิสก์ในรูปแบบ F3 เนื่องจากการปรับให้มีระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนสปินเดิลมอเตอร์ของแผ่นบนและล่างในทิศทางข้ามเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงของความไม่สมดุลของดิสก์จากการเคาะไม่สม่ำเสมอ ทิศทางการเคาะไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ

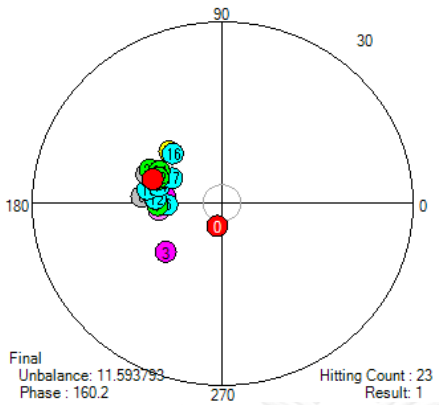
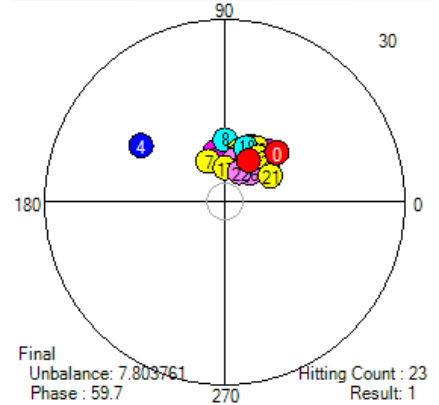
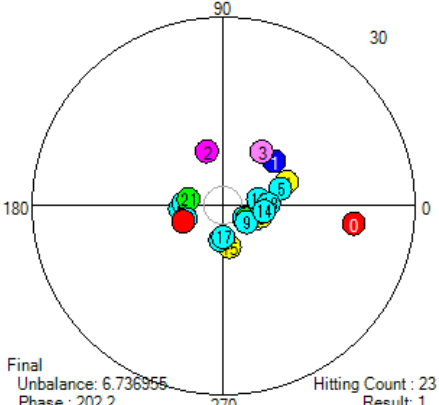
ตารางที่ 24 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D0 H2

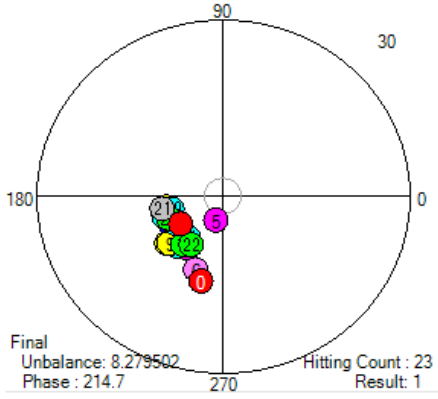
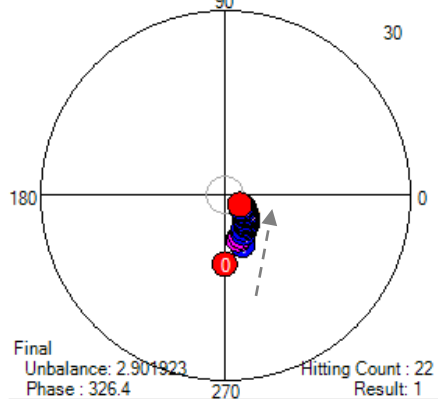
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1	 <p>Final Unbalance: 0.89879 Phase: 27.9</p> <p>Hitting Count: 9 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 12.71 mg-cm มุมเริ่มต้น : 175.99 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.89 mg-cm มุมสุดท้าย : 27.85 องศา จำนวนเคาะ : 9 ครั้ง</p>
2	 <p>Final Unbalance: 1.602871 Phase: 130.2</p> <p>Hitting Count: 11 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 15.40 mg-cm มุมเริ่มต้น : 313.94 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.60 mg-cm มุมสุดท้าย : 130.17 องศา จำนวนเคาะ : 11 ครั้ง</p>
3	 <p>Final Unbalance: 0.748173 Phase: 154.7</p> <p>Hitting Count: 8 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 6.66 mg-cm มุมเริ่มต้น : 290.87 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 0.74 mg-cm มุมสุดท้าย : 154.67 องศา จำนวนเคาะ : 8 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 13.58 mg-cm มุมเริ่มต้น : 174.63 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.50 mg-cm มุมสุดท้าย : 358.09 องศา จำนวนเคาะ : 5 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 13.50 mg-cm มุมเริ่มต้น : 309.97 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.69 mg-cm มุมสุดท้าย : 89.06 องศา จำนวนเคาะ : 16 ครั้ง</p>

ตารางที่ 24 การปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัย F4 D0 H2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุลของดิสก์ไม่สม่ำเสมอและมีทิศทางไม่เป็นแนวเส้นตรง กระจายตัวหลังการเคาะแต่สามารถปรับค่าความไม่สมดุลให้เข้าสู่เป้าหมายได้

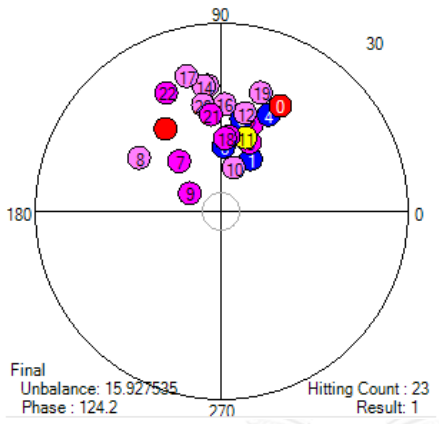
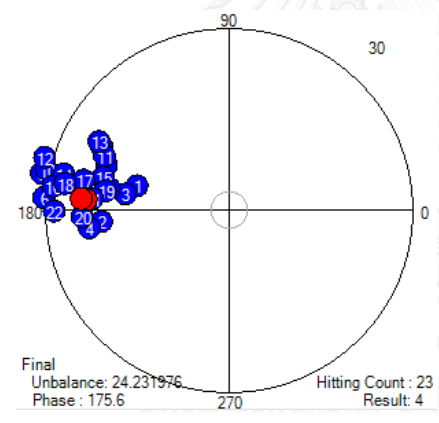
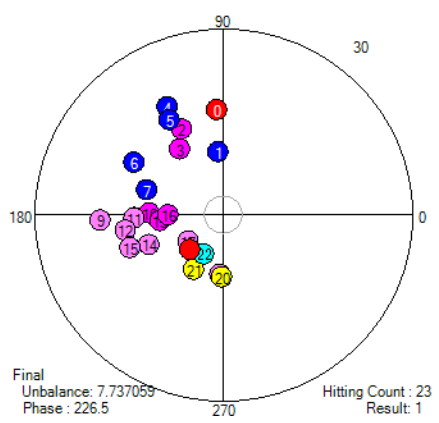
ตารางที่ 25 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D180 H1

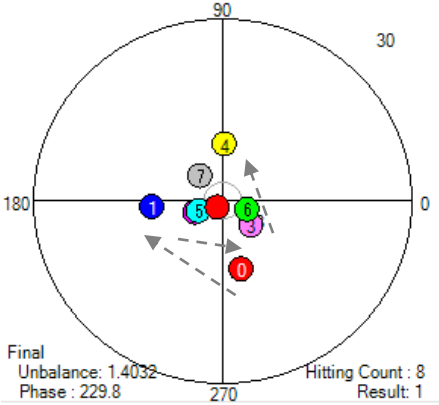
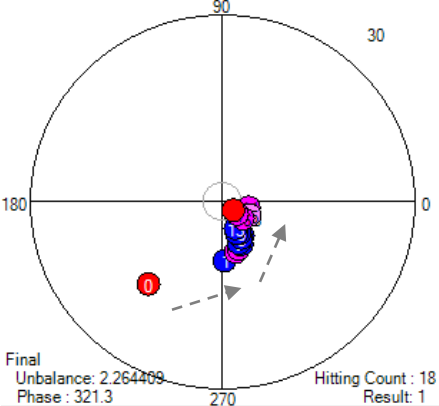
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1	 <p>Final Unbalance: 11.593793 Phase: 160.2</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 3.85 mg-cm มุมเริ่มต้น : 258.76 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 11.59 mg-cm มุมสุดท้าย : 160.19 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2	 <p>Final Unbalance: 7.803761 Phase: 59.7</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 11.80 mg-cm มุมเริ่มต้น : 42.87 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 7.80 mg-cm มุมสุดท้าย : 59.68 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3	 <p>Final Unbalance: 6.736355 Phase: 202.2</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 20.69 mg-cm มุมเริ่มต้น : 351 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 6.73 mg-cm มุมสุดท้าย : 202.21 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 14.8 mg-cm มุมเริ่มต้น : 256.27 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 8.27 mg-cm มุมสุดท้าย : 214.66 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 11.22 mg-cm มุมเริ่มต้น : 269.9 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.90 mg-cm มุมสุดท้าย : 326.35 องศา จำนวนเคาะ : 22 ครั้ง</p>

ตารางที่ 25 แสดงการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัย F4 D180 H1 ค่าความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการเคาะ จับตัวเป็นกลุ่มและไม่สามารถปรับค่าให้เข้าเป้าหมายได้

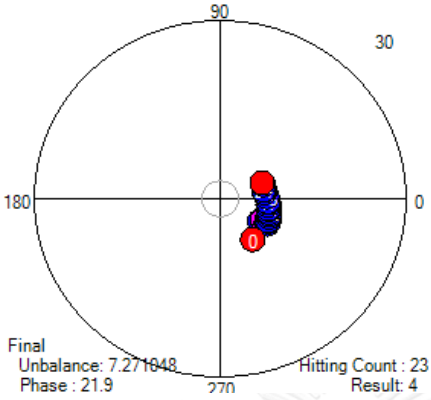
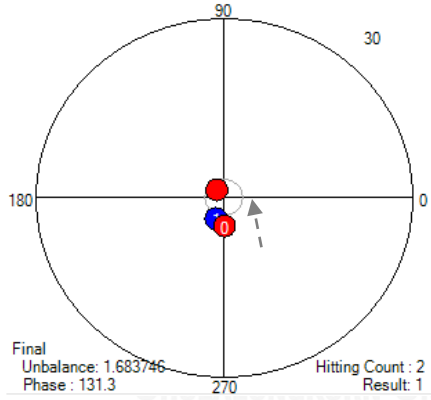
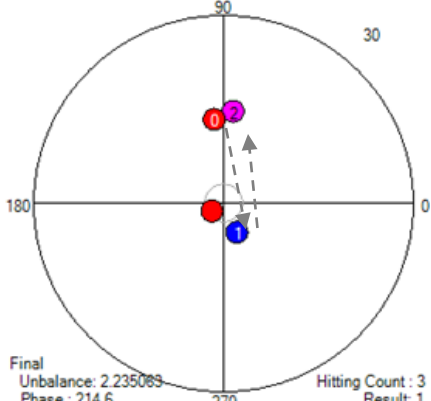
ตารางที่ 26 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D180 H2

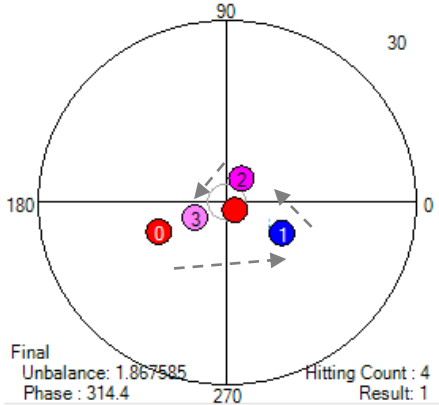
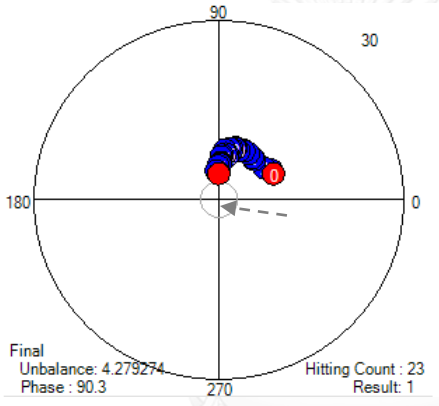
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 19.35 mg-cm มุมเริ่มต้น : 60.49 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 15.92 mg-cm มุมสุดท้าย : 124.21 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 23.40 mg-cm มุมเริ่มต้น : 175.76 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 24.23 mg-cm มุมสุดท้าย : 175.62 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 16.97 mg-cm มุมเริ่มต้น : 93.55 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 7.73 mg-cm มุมสุดท้าย : 226.45 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 11.60 mg-cm มุมเริ่มต้น : 284.3 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.40 mg-cm มุมสุดท้าย : 229.79 องศา จำนวนเคาะ : 8 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.54 mg-cm มุมเริ่มต้น : 229.11 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.26 mg-cm มุมสุดท้าย : 321.27 องศา จำนวนเคาะ : 18 ครั้ง</p>

ตารางที่ 26 การปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัย F4 D180 H2 ค่าความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จับตัวเป็นกลุ่ม ไม่สามารถปรับความสมดุลของดิสก์ให้เข้าสู่เป้าหมายได้ มีเพียง 2 จาก 19 ชิ้นงานที่สามารถปรับความสมดุลได้

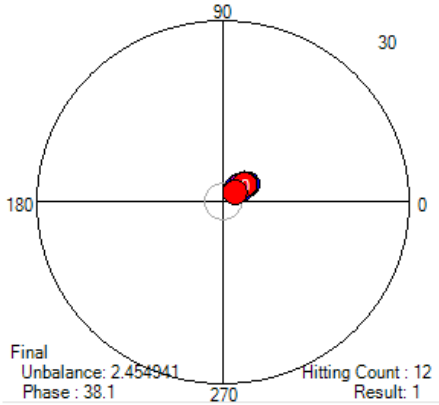
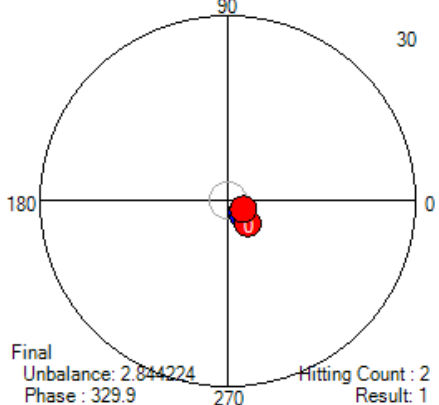
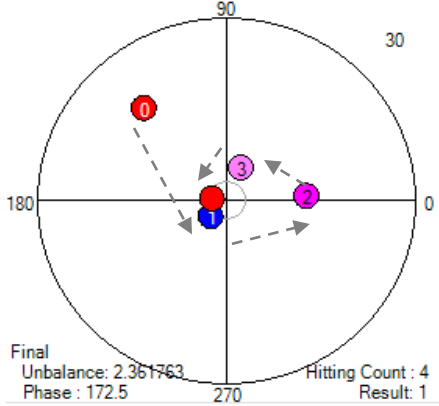
ตารางที่ 27 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D0 H1

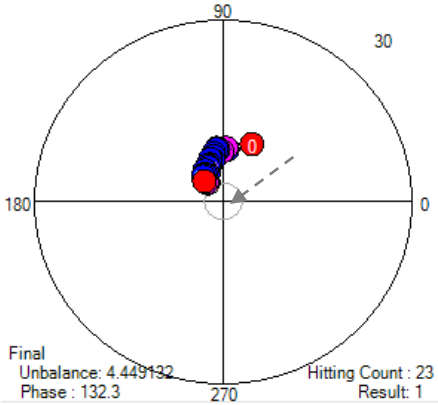
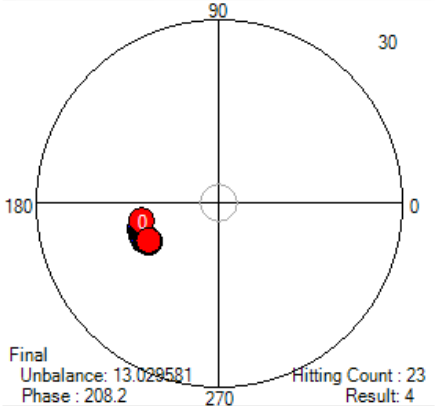
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 8.61 mg-cm มุมเริ่มต้น : 307.25 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 7.27 mg-cm มุมสุดท้าย : 21.93 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 4.79 mg-cm มุมเริ่มต้น : 271.36 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.68 mg-cm มุมสุดท้าย : 131.26 องศา จำนวนเคาะ : 2 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 13.39 mg-cm มุมเริ่มต้น : 96.41 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.23 mg-cm มุมสุดท้าย : 214.62 องศา จำนวนเคาะ : 3 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 11.81 mg-cm มุมเริ่มต้น : 204.66 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.86 mg-cm มุมสุดท้าย : 314.41 องศา จำนวนเคาะ : 4 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 9.80 mg-cm มุมเริ่มต้น : 25.75 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 4.27 mg-cm มุมสุดท้าย : 90.32 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตารางที่ 27 การปรับความสมดุลที่ปัจจัย F5 D0 H1 ผลจากการวิเคราะห์กราฟลักษณะการปรับความสมดุลของดิสก์ไม่มีรูปแบบ มีชิ้นงานที่ค่าความไม่สมดุลของดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงและเข้าสู่เป้าหมายได้ แต่ไม่เป็นแนวเส้นตรง และไม่มีรูปแบบแน่นอน

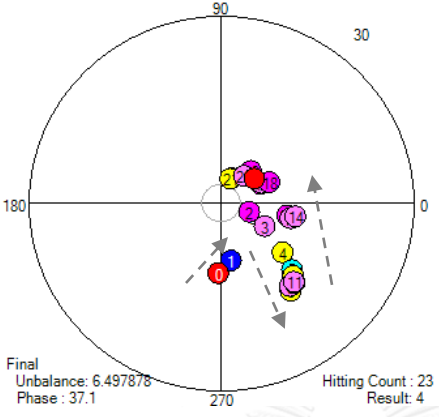
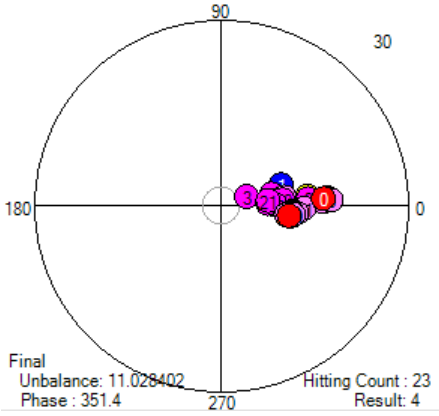
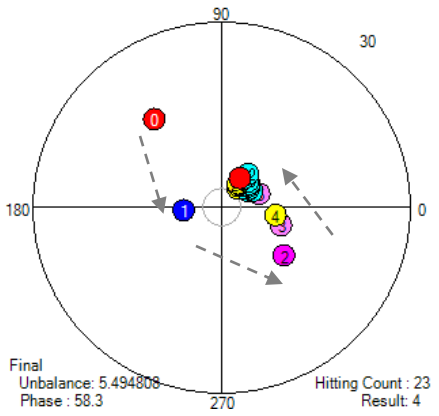
ตารางที่ 28 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D0 H2

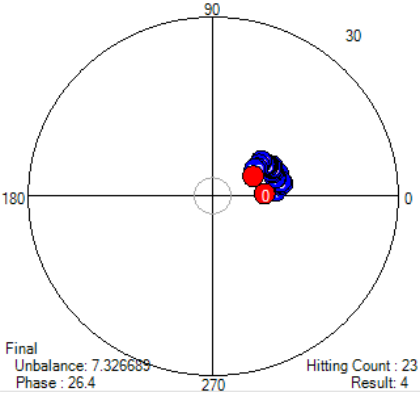
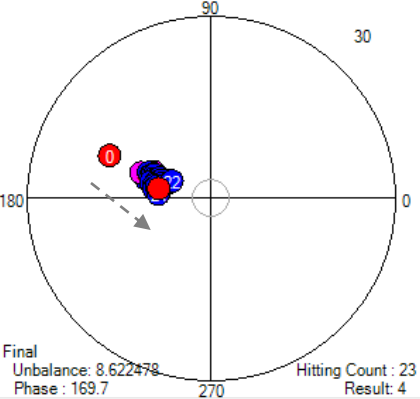
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 4.45 mg-cm มุมเริ่มต้น : 39.04 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.45 mg-cm มุมสุดท้าย : 38.06 องศา จำนวนเคาะ : 12 ครั้ง</p>
2		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 4.89 mg-cm มุมเริ่มต้น : 310.55 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 2.84 mg-cm มุมสุดท้าย : 329.9 องศา จำนวนเคาะ : 2 ครั้ง</p>
3		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 18.33 mg-cm มุมเริ่มต้น : 164.69 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 1.42 mg-cm มุมสุดท้าย : 237.98 องศา จำนวนเคาะ : 4 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4	 <p>Final Unbalance: 4.449132 Phase : 132.3 Hitting Count : 23 Result: 1</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 10.47 mg-cm มุมเริ่มต้น : 64.22 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 4.44 mg-cm มุมสุดท้าย : 132.3 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5	 <p>Final Unbalance: 13.029581 Phase : 208.2 Hitting Count : 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 12.97 mg-cm มุมเริ่มต้น : 192.81 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 13.02 mg-cm มุมสุดท้าย : 208.16 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตารางที่ 28 การปรับความสมดุลที่ปัจจัย F5 D0 H2 มีลักษณะการปรับความสมดุลใกล้เคียงกับปัจจัย F5 D0 H1 คือมีการเปลี่ยนแปลงค่าความไม่สมดุลจากการเคาะไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นแนวเส้นตรง

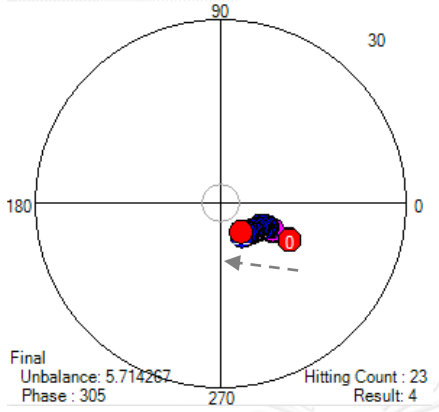
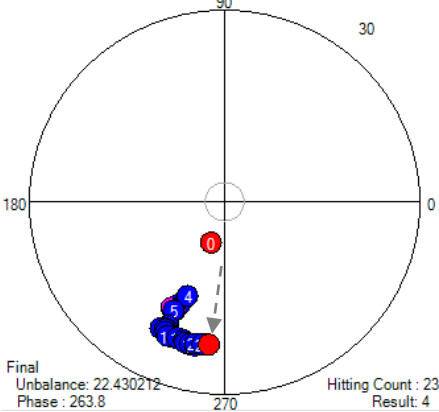
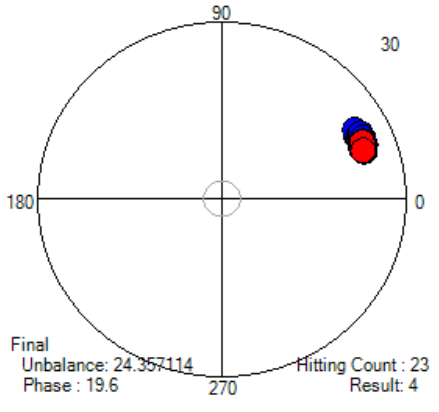
ตารางที่ 29 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D180 H1

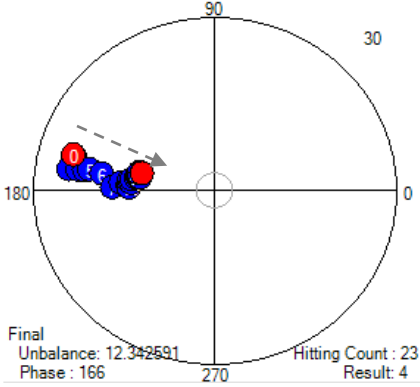
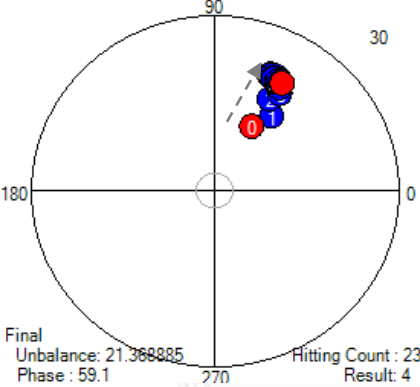
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1	 <p>Final Unbalance: 6.497878 Phase : 37.1 Hitting Count : 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 11.23 mg-cm มุมเริ่มต้น : 267.68 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 6.46 mg-cm มุมสุดท้าย : 37.12 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2	 <p>Final Unbalance: 11.028402 Phase : 351.4 Hitting Count : 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 16.44 mg-cm มุมเริ่มต้น : 4.02 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 11.02 mg-cm มุมสุดท้าย : 351.39 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3	 <p>Final Unbalance: 5.494808 Phase : 58.3 Hitting Count : 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.79 mg-cm มุมเริ่มต้น : 127.06 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 5.49 mg-cm มุมสุดท้าย : 58.28 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 8.42 mg-cm มุมเริ่มต้น : 2.2 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 7.32 mg-cm มุมสุดท้าย : 26.35 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
5		<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 17.90 mg-cm มุมเริ่มต้น : 157.06 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 8.62 mg-cm มุมสุดท้าย : 169.7 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตารางที่ 29 การปรับความสมดุลที่ปัจจัย F5 D180 H1 ค่าความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จับตัวเป็นกลุ่ม ไม่สามารถปรับความสมดุลของดิสก์ให้เข้าสู่เป้าหมายได้

ตารางที่ 30 ผลการเปลี่ยนแปลงของความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D180 H2

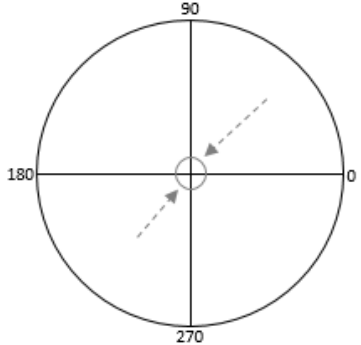
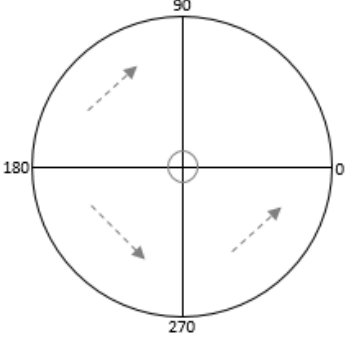
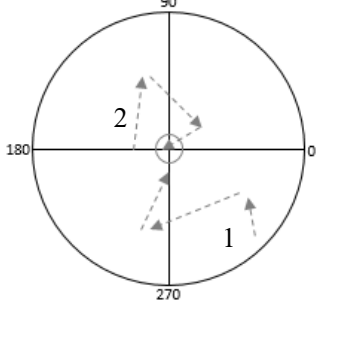
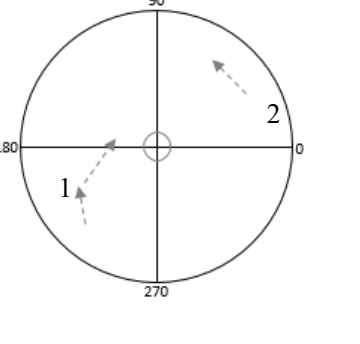
ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
1	 <p>Final Unbalance: 5.714267 Phase: 305</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น: 12.65 mg-cm มุมเริ่มต้น : 331.42 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 5.71 mg-cm มุมสุดท้าย : 304.99 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
2	 <p>Final Unbalance: 22.430212 Phase: 263.8</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 6.72 mg-cm มุมเริ่มต้น : 251.7 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 22.43 mg-cm มุมสุดท้าย : 263.81 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>
3	 <p>Final Unbalance: 24.357114 Phase: 19.6</p> <p>Hitting Count: 23 Result: 4</p>	<p>ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.72 mg-cm มุมเริ่มต้น : 22.65 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 24.35 mg-cm มุมสุดท้าย : 19.58 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง</p>

ตัวอย่างที่	การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่สมดุล	ข้อมูลการเคาะ
4		ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 24.11 mg-cm มุมเริ่มต้น : 165.19 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 12.34 mg-cm มุมสุดท้าย : 166.04 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง
5		ความไม่สมดุลเริ่มต้น : 12.54 mg-cm มุมเริ่มต้น : 61.25 องศา ความไม่สมดุลสุดท้าย : 21.36 mg-cm มุมสุดท้าย : 59.11 องศา จำนวนเคาะ : 23 ครั้ง

ตารางที่ 30 การปรับความสมดุลที่ปัจจัย F5 D180 H2 ค่าความไม่สมดุลของดิสก์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จับตัวเป็นกลุ่ม ไม่สามารถปรับความสมดุลของดิสก์ให้เข้าสู่เป้าหมายได้

จากการวิเคราะห์การปรับความสมดุลของดิสก์ด้วยกราฟผลที่ได้การปรับความสมดุลของดิสก์จากการทดลองของปัจจัย F1 D0 H1 และ F2 D0 H1 ให้ผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย General Linear Model ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H1 และ F2 D0 H1 ส่งผลให้การปรับความสมดุลของดิสก์ดีที่สุด

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความสมดุลจากการเคาะ

ปัจจัย F	ปัจจัย H	ปัจจัย D D0	ปัจจัย D D180
F1 และ F2	H1 และ H2	<p>การเปลี่ยนแปลงความสมดุลมีลักษณะเส้นตรงเส้นเดียว พุ่งเข้าสู่ศูนย์กลาง</p> <p><u>สรุป</u> : จำนวนการเคาะเพื่อปรับความสมดุลน้อย</p> 	<p>ความสมดุลหลังการเคาะไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีลักษณะรวมเป็นกลุ่ม ไม่เข้าสู่ศูนย์กลาง</p> <p><u>สรุป</u> : ไม่สามารถปรับความสมดุลได้</p> 
F3 และ F4	H1 และ H2	<p>ไม่เป็นแนวเส้นตรงพุ่งเข้าสู่ศูนย์กลาง การเปลี่ยนความสมดุลไม่มีรูปแบบ ความสมดุลเปลี่ยนในทิศทางตรงข้ามหลังการเคาะ หรือ มีทิศทางเป็นรูปสามเหลี่ยม</p> <p><u>สรุป</u> : จำนวนการเคาะเพื่อปรับความสมดุลสูง</p> 	<p>มี 2 รูปแบบหลัก คือ มีการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นแต่ไม่เข้าสู่ศูนย์กลาง และ มีลักษณะเป็นกระจายตัวเป็นกลุ่ม</p> <p><u>สรุป</u> : ไม่สามารถปรับความสมดุลได้</p> 

ปัจจัย F	ปัจจัย H	ปัจจัย D D0	ปัจจัย D D180
F5	H1 และ H2	การเปลี่ยนความสมดุลมีลักษณะเป็นกลุ่ม และเปลี่ยนค่าน้อย สรุป : จำนวนการเคาะเพื่อปรับความสมดุลสูง	มีลักษณะรวมเป็นกลุ่ม ไม่เข้าสู่ศูนย์กลาง สรุป : ไม่สามารถปรับความสมดุลได้

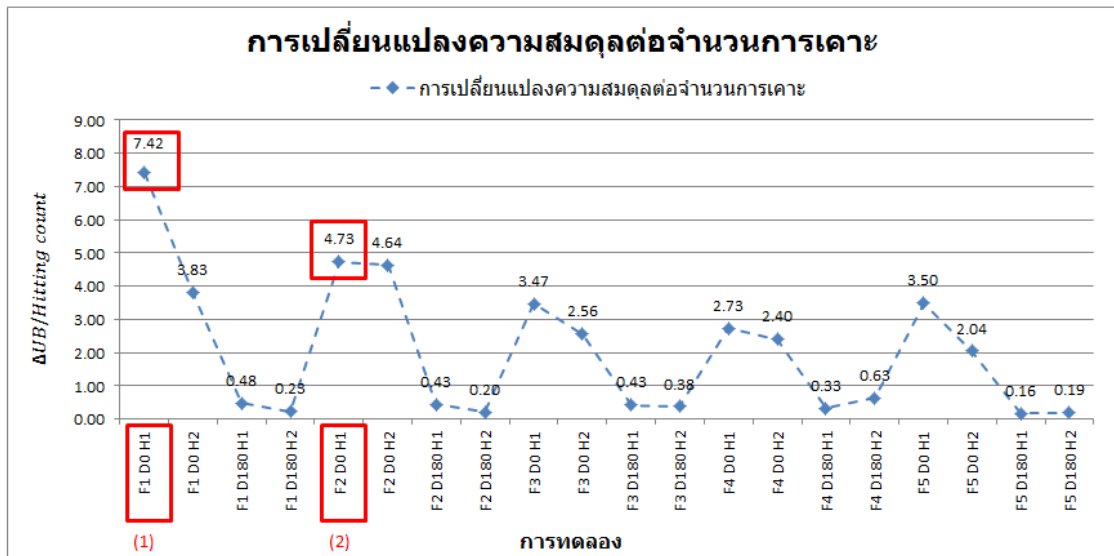
4.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำค่าความไม่สมดุลเริ่มต้นและความไม่สมดุลสุดท้ายมาพิจารณาหาผลการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ เพื่อพิจารณาถึงปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลให้ความสมดุลของดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในแต่ละครั้งของการเคาะ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ หาได้จาก

การเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ

$$\text{การเปลี่ยนแปลงความสมดุล} = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงความสมดุล } (\Delta UB)}{\text{จำนวนการเคาะ (Hitting count)}}$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงความสมดุล (ΔUB) คือ ความไม่สมดุลเริ่มต้น - ความไม่สมดุลสุดท้าย



รูปที่ 35 การเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ

จากผลของการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 35 พบว่า ผลของการทดลองปัจจัย F1 D0 H1 ให้ค่าของการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะดีที่ดูต้งอย่างเห็นได้ชัด คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด รองลงมาคือปัจจัย F2 D0 H1 ผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธี General Linear Model และการวิเคราะห์ด้วยกราฟการปรับความสมดุลในหัวข้อที่ 4.3 แต่ผลการเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะระหว่างปัจจัย F1 D0 H1 และปัจจัย F2 D0 H1 มีค่าแตกต่างกันคือ 7.42 และ 4.73 mg-cm ต่อครั้ง แตกต่างกัน 2.69 mg-cm ต่อครั้ง แต่ยังให้ผลดีกว่าปัจจัยอื่น เพื่อไม่เป็นการตัดปัจจัยที่อาจมีผล และให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลด้วย 2 วิธี ก่อนนั้น สรุปคือ การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์ คือการทดลองที่ปัจจัย F1 D0 H1 และ F2 D0 H1 แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ สรุปว่าปัจจัยความสูงของพินเคาะ H ไม่มีผลต่อการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์ คือ ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1, F2 ที่ มุมการเคาะ 0 องศา นำผลการทดลองที่ได้ไปทดสอบยืนยันผล เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการทดลอง ก่อนการสรุปผล

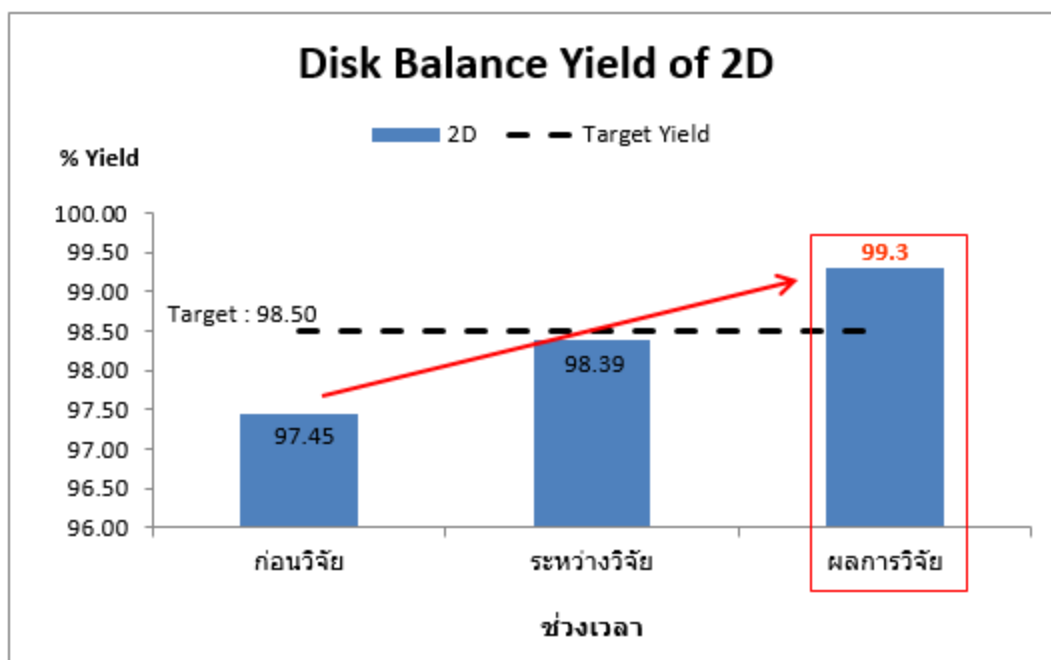
4.5 การทดสอบยืนยันผล และผลการทดสอบยืนยันผล

จากผลการวิเคราะห์ของปัจจัยหลักและผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab การวิเคราะห์การปรับความสมดุลของดิสก์ด้วยกราฟ และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสมดุลต่อจำนวนการเคาะ สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลให้จำนวนครั้งในการเคาะชิ้นงานน้อยที่สุดของเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์ ได้แก่ ระยะเวลาว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์ กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1, F2 ที่มุมการเคาะ D0 เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้สามารถใช้งานได้จริงในการผลิตจริง ได้นำปัจจัยทั้งสองที่มีนัยสำคัญทั้ง 2 ปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลอีกครั้ง ด้วยการผลิตจริง จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ 300 ชิ้นงานต่อการทดลอง ซึ่งผลการทดสอบดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ผลการทดสอบการปรับค่าความสมดุลของดิสก์เพื่อทดสอบยืนยันผล

การทดลองที่	ปัจจัยนำเข้า			จำนวนชิ้นงาน(ชิ้น)	ผลการเคาะ (ครั้ง)		Yield
	Clearance	มุมการเคาะ	ความสูงพิน		Mean	StDev	
1	F1	D0	H1	300	4.223	2.841	99.3%
2	F2	D0	H1	300	4.963	2.546	99.0%

เมื่อพิจารณาข้อมูลจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน ผลของการปรับความสมดุลของดิสก์จากปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่ส่งผล ข้อมูลจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงานทั้ง 300 ชิ้นงาน พบว่าจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงาน F1 และมุมการเคาะ 0 องศา ค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงานอยู่ที่ 4.223 ครั้ง ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนครั้งของการเคาะอยู่ที่ 2.841 ครั้ง อัตราการผลิต 99.3% การทดสอบที่ F2 มุมการเคาะ 0 องศา ค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการเคาะชิ้นงานอยู่ที่ 4.963 ครั้ง ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.546 ครั้ง อัตราการผลิต 99.0% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบยืนยันผลที่ ระยะเวลาว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์ กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1 ให้อัตราการผลิต และค่าเฉลี่ยในการเคาะดีกว่าที่ F2 เล็กน้อย ที่มีมุมองศาการเคาะเดียวกันคือที่ D0 จึงสามารถสรุปผลการทดลองด้วยการทดสอบยืนยันผลได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลให้การปรับความสมดุลของดิสก์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต และสามารถเพิ่มอัตราการผลิตคือการปรับดิสก์ให้มีระยะเวลาว่างระหว่างแกนสปีนเดิลมอเตอร์ กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1 ที่มุมเคาะ D0 จะให้ค่าเฉลี่ยในการเคาะคือ 4.223 ครั้ง หรือประมาณ 5 ครั้ง และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนครั้งของการเคาะอยู่ที่ 2.694 ครั้ง อัตราการผลิต 99.30% ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 กราฟแสดงอัตราการผลิตเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้ นำไปทดสอบสมมติฐานโดยวิธี Two Sample-t Test เพื่อตรวจสอบสมมติฐานความแตกต่างระหว่างการปรับความสมดุลของดิสก์กระบวนการปัจจุบันและผลการศึกษามีความแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานสำหรับการทดสอบในทางสถิติ

กำหนดให้ μ_1 แทน ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของกระบวนการปัจจุบัน

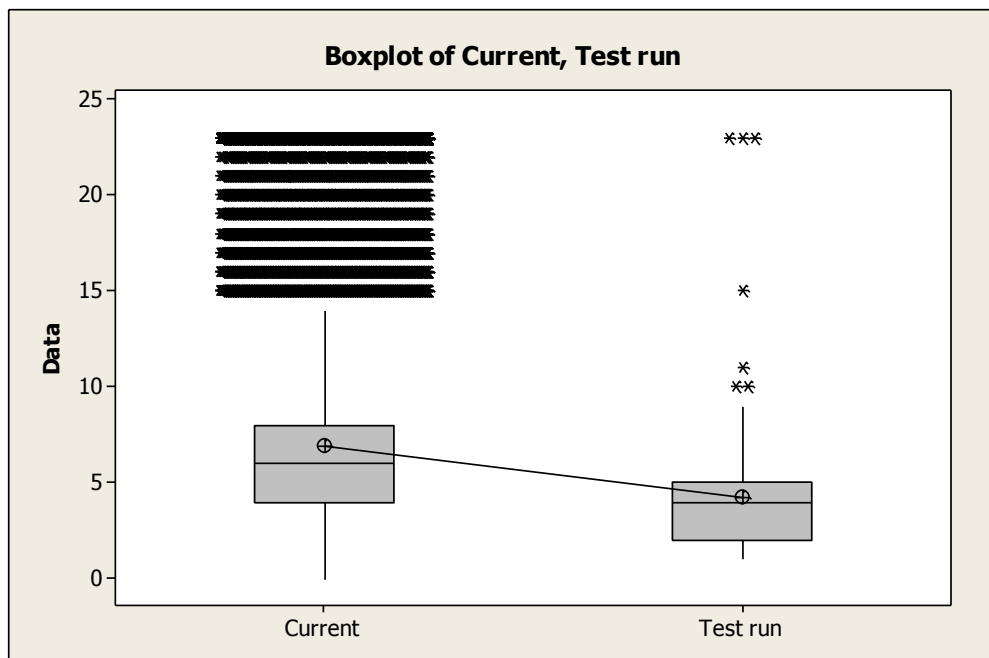
μ_2 แทน ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของผลการศึกษา

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ (หมายถึงค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ด้วยวิธีการทั้ง 2 วิธีมีค่าไม่แตกต่างกัน)

$H_1 : \mu_2 < \mu_1$ (หมายถึงค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของผลการศึกษาน้อยกว่ากระบวนการปัจจุบัน)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของกระบวนการปัจจุบันและผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 37 พบว่า ผลการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี Two Sample-t Test ดังแสดงในรูปที่ 38 ค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลการศึกษาของปัจจัยการปรับระยะช่องว่างระหว่างแกนสปินเดิลมอเตอร์ กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1 มุมเคาะ D0 ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์น้อยกว่ากระบวนการปัจจุบัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 37 การกระจายตัวค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของกระบวนการปัจจุบันและผลการศึกษา

Two-Sample T-Test and CI: Current, Test run

Two-sample T for Current vs Test run

	N	Mean	StDev	SE Mean
Current	73638	6.92	4.66	0.017
Test run	300	4.22	2.84	0.16

Difference = mu (Current) - mu (Test run)

Estimate for difference: 2.701

95% CI for difference: (2.376, 3.025)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 16.37 P-Value = 0.000 DF = 305

รูปที่ 38 ผลการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของการเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ของกระบวนการปัจจุบันและผลการศึกษา

นำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบการผลิตในปัจจุบันของสายการผลิต 2D ซึ่งค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการเคาะอยู่ที่ 6.97 ครั้ง หรือประมาณ 7 ครั้ง ค่าความค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.660 ครั้ง อัตราผลผลิต 97.45% ทำให้สรุปได้ว่าหากนำผลของปัจจัย ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1 ที่มุมองศาการเคาะ DO องศา ไปพัฒนาใช้ในกระบวนการผลิตจะสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตจาก 97.45% เป็น 99.30% หรือคิดเป็น 72.33% จากปัจจุบัน ลดเวลาในการผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้นที่กระบวนการวัดและปรับความสมดุลของดิสก์จากการเคาะชิ้นงาน 7 ครั้ง เหลือ 5 ครั้ง ทำให้เวลาในกระบวนการลดลง 1.0 วินาทีต่อชิ้นงาน อัตราของเสียในกระบวนการลดลงจาก 2.55% เหลือ 0.7 % ทำให้ลดจำนวนงานที่ต้องแก้ไขลง 1.85% ความแปรปรวนของกระบวนการเนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนครั้งในการเคาะสูงส่งผลให้กระบวนการมีความแปรปรวนสูง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดจาก 4.660 เหลือ 2.841 ซึ่งกล่าวได้ว่า จะมีความแปรปรวนของจำนวนครั้งในการเคาะที่ 5 ± 2.841 ครั้ง ดังตารางที่ 33

ที่อัตราผลผลิต 99.30% เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตรุ่นงาน 1D ค่าเฉลี่ยอัตราผลผลิตระหว่างเดือน มกราคม-ตุลาคม 2557 อยู่ที่ 99.31% สามารถกล่าวได้ว่าอัตราผลผลิตที่ได้เทียบเท่ากับอัตราผลผลิตของรุ่นงาน 1D

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการผลิตปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 32 ค่าเฉลี่ยในการเคาะต่อชิ้นงานลดลง 2 ครั้ง เวลาในการทำงานลดลง 1 วินาทีต่อชิ้นงาน อัตราผลผลิตเพิ่มขึ้น 1.85% ส่งผลให้การผลิต 1 วัน ที่เวลาในการทำงาน 21 ชั่วโมง มีผลผลิตเพิ่มขึ้นหรือสามารถผลิตงานได้เพิ่มขึ้น 603 ชิ้นต่อวัน

ตารางที่ 33 อัตราการผลิตเปรียบเทียบก่อนการทดลองและผลการทดลอง

	หน่วย	ก่อน	ผลการทดลอง	แตกต่าง
ค่าเฉลี่ยในการเคาะ	ครั้ง	7	5	-2
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	4.660	2.841	-1.819
เวลาที่เครื่องทำงานต่อ 1 ชิ้น	วินาที	12.8	11.8	-1
อัตราการผลิต	%	97.45	99.3	+1.85
อัตราของเสีย	%	2.55	0.7	-1.85
ผลผลิตต่อวัน (21 ชม)	ชิ้น/วัน	5759	6362	+603



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลทำให้การปรับความสมดุลของดิสก์ให้มีค่าเฉลี่ยในการเคาะน้อยที่สุด และอัตราผลผลิตของกระบวนการเพื่อส่งผลให้กระบวนการผลิตมีอัตราผลผลิตเพิ่มขึ้น และลดความแปรปรวนในกระบวนการผลิตให้น้อยลง จากการวิจัยพบว่า

1) ในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในขั้นตอนย่อยการประกอบดิสก์กับแกนสปินเดิลมอเตอร์ไม่มีรูปแบบของการวางดิสก์ที่แน่นอนซึ่งส่งผลไปยังกระบวนการถัดไป ทำให้การปรับความสมดุลของดิสก์มีความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยในการเคาะชิ้นงานสูง จากการวิจัยโดยการทดลองกำหนดรูปแบบของการประกอบชิ้นส่วนทั้งสองที่มีโอกาสเป็นไปได้ในกระบวนการผลิตจริงแล้วหาแบบที่ส่งผลให้การปรับความสมดุลของดิสก์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ผลที่ได้คือการทำให้เกิดระยะช่องว่าง ระหว่างดิสก์ทั้งสองแผ่นอยู่ในทิศทางเดียวกันซึ่งก็คือการทำให้ดิสก์ทั้งสองแผ่นให้มีจุดศูนย์กลางมวลอยู่ในทิศทางเดียวกัน จะทำให้การปรับความสมดุลของดิสก์เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วที่สุด

2) มุมองศาในการเคาะที่ 2 มุม คือ 0 องศา และ 180 องศา ส่งผลให้การปรับความสมดุลของดิสก์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุก ๆ รูปแบบของการปรับระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนของสปินเดิลมอเตอร์ ที่มุม 180 องศาไม่สามารถปรับลดความไม่สมดุลของดิสก์ได้ผลของทุก ๆ การทดลองมีค่าเฉลี่ยการเคาะมากกว่า 20 ครั้ง และมีอัตราของเสียสูง ส่วนที่มุมการเคาะ 0 องศา ค่าเฉลี่ยในการเคาะดีกว่ามุม 180 องศา ทุก ๆ รูปแบบของการปรับดิสก์เช่นกัน รูปแบบที่ดีที่สุดในการเคาะที่มุม 0 องศา โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของการเคาะและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ รูปแบบ F1 และ F2 หรือการทำให้เกิดระยะช่องว่างระหว่างดิสก์ทั้งสองแผ่นในทิศทางเดียวกัน

3) ผลการวิจัยความสูงของพินเคาะ พบว่าปัจจัยนี้ทั้ง 2 ระดับไม่ส่งผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์

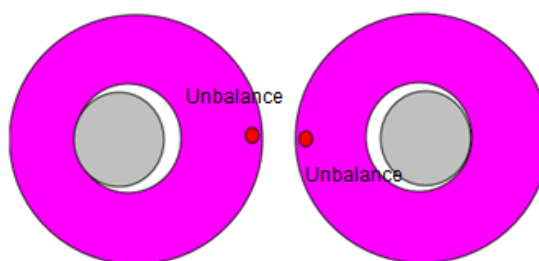
5.2 อภิปรายผลของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์

จากการวิเคราะห์ปัจจัย 3 ปัจจัย มี 2 ปัจจัยที่ส่งต่อการปรับความสมดุลของดิสก์และปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการให้ดีขึ้น คือปัจจัยระยะช่องว่างระหว่างดิสก์กับแกนของสปินเดิลมอเตอร์และมุมมองศาในการเคาะ เหตุและผลที่ทั้ง 2 ปัจจัยสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการเคาะมีดังนี้

5.2.1 ผลของปัจจัยระยะช่องว่างระหว่างดิสก์และแกนของสปินเดิลมอเตอร์

ความไม่สมดุลของดิสก์เกิดจาก จุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน การทดลองโดยการผลัดดิสก์ให้มีช่องว่างระหว่างดิสก์กับแกนของสปินเดิลมอเตอร์เป็นการทำให้จุดศูนย์กลางมวลบนแผ่นดิสก์มีลักษณะที่ต่างกัน แล้ววิเคราะห์จากการปรับความสมดุลของดิสก์ ผลที่ได้คือการผลัดดิสก์ทั้งสองแผ่นให้มีจุดศูนย์กลางมวลอยู่ในทิศทางเดียวกันส่งผลให้ผลการปรับความสมดุลของดิสก์มีค่าเฉลี่ยของการเคาะน้อยที่สุดเนื่องจากว่า เป็นการทำให้จุดศูนย์กลางมวลบนดิสก์มาอยู่ในแนวและทิศทางเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เมื่อทำการเคาะ เครื่องปรับความสมดุลของดิสก์จะเคาะในจุดที่ฟอร์สเซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำหนักได้มากที่สุด ซึ่งเมื่อน้ำหนักของดิสก์อยู่ในแนวดิสก์อยู่ในแนวเดียวกัน การเคาะเพื่อปรับความสมดุลของดิสก์ให้เข้าสู่เป้าหมายจึงทำได้เร็วขึ้น

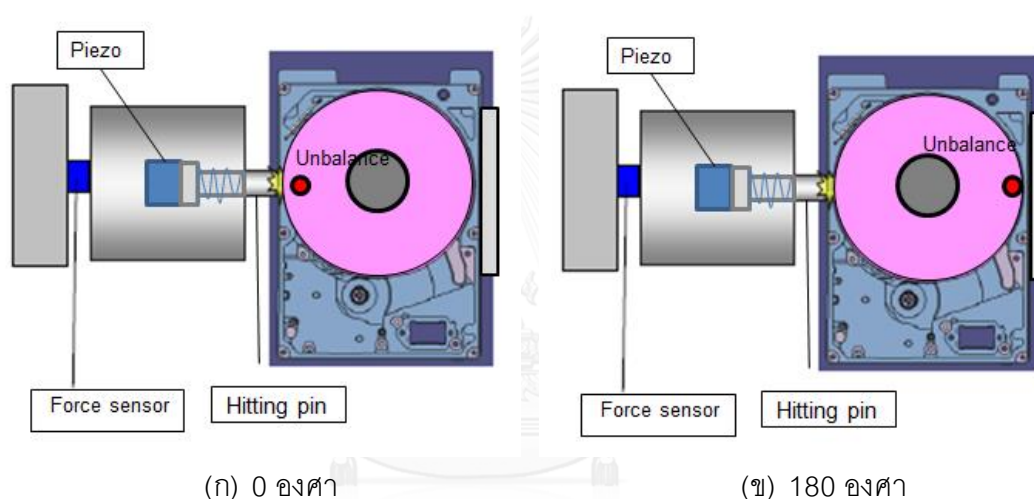
การที่ผลของการปรับดิสก์รูปแบบ F1 และ F2 ให้ผลการเคาะในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากว่า ดิสก์และสปินเดิลมอเตอร์ เมื่อประกอบเข้าด้วยกันจะมีลักษณะเป็นแกนหมุน การผลัดดิสก์ทั้งสองแผ่นให้มีน้ำหนักรวมอยู่ในทิศเดียวกันไม่ว่าด้านซ้ายหรือขวาเมื่อสปินเดิลมอเตอร์หมุนจะเสมือนว่าเป็นทิศเดียว ดังแสดงในรูปที่ 39 ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าการปรับดิสก์ในรูปแบบที่ F1 และ F2 คือการปรับดิสก์ในรูปแบบเดียวกัน



รูปที่ 39 ลักษณะการผลัดดิสก์ให้น้ำหนักรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง

5.2.2 ผลของปัจจัยมุมองศาในการเคาะ

ที่มุมองศาในการเคาะ 0 องศา ส่งผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์อย่างดีที่สุดเยี่ยม เนื่องจากว่า มุม 0 องศาที่กำหนดบนเครื่องปรับความสมดุลของดิสก์จะอยู่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของพินเคาะของชุดหัวเคาะ ขณะที่ทำการเคาะ ชิ้นงานจะถูกยึดแน่นด้วยแคมป์ของชุดหัวเคาะ พินเคาะจะสัมผัสกับชิ้นงาน ทำการเคาะด้วยการส่งแรงสั่นสะเทือนไปที่ชิ้นงานเมื่อจุดของความไม่สมดุลของดิสก์หมุนวนมาที่ 0 องศา หรือตำแหน่งพินเคาะ ความไม่สมดุลของดิสก์ถูกเคาะเพื่อส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนจากชุดหัวเคาะจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดทำให้ผลทำให้ดิสก์เข้าสู่เป้าหมายของความสมดุลได้ดีที่สุด ส่วนมุมองศาในการเคาะที่ 180 องศาจะอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกับพินเคาะทำให้ปรับความสมดุลของดิสก์ได้ยาก



(ก) 0 องศา

(ข) 180 องศา

รูปที่ 40 ตำแหน่งที่มุมเคาะ

5.3 งานวิจัยที่ควรศึกษาต่อในอนาคต

1. ระดับของแรงในการเคาะมีผลต่อการปรับความสมดุลของดิสก์เพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตจากการวิเคราะห์กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมองศาและค่าความไม่สมดุลที่เปลี่ยนไปจากการเคาะซึ่งมีหลายระดับ เป็นปัจจัยที่น่าสนใจในการศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตต่อไป

2. ศึกษาถึงปัจจัยอื่นที่มีผลทำให้การปรับความสมดุลของดิสก์ ที่ระยะช่องว่างระหว่างแกนสปินเดิลมอเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของดิสก์ F1 และ F2 เนื่องจาก F1 และ F2 คือการปรับดิสก์ในรูปแบบเดียวกัน แต่การทดลอง F1 ให้ผลดีกว่า F2 ในทุกผลการวิเคราะห์

รายการอ้างอิง

Branislav Hredzak, et al. (2003). Investigation of the Effect of Hard Disk Drive Unbalance or Repeatable and Non-repeatable Runout. Singapore, A Start Data Storage Institute.

Branislav Hredzak, et al. (2006). New Method for Sensorless Measurement of Hard Disk Drives Imbalance. Singapore. **A Start Data Storage Institute.**

Branislav Hredzak, G. G. (2005). Active Balancer with Electromagnetic Release of Balancing Members. Singapore, A Start Data Storage Institute.

Gary K. Grim, et al. (2007). THE BASICS OF BALANCEING. Precision Measurement and Testing Equipment and Services. USA.

ฐิติมา จินตนาวัน (2544). "การสันตะเพ็อนทางกลของระบบคอมพิวเตอรื Hard Disk Drive (HDD)." วารสารวิชาการหุ่นยนต์ไทย, ปีที่ 1(ฉบับที่ 1): 54-59.

นิรันดร์ สุวรรตน์ (2555). ฟิสิกส์ เล่ม 1 ม.4-6. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ พ.ศ. พัฒนา จำกัด.

สามารถ มุ่งโตกลาง, et al. (2552). "การศึกษาความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์อันเนื่องมาจากชั้นสกรูโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์." วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (16(2)): 21-27.

อภิรัฐ ศิลปะพินิจ (2551). การศึกษาการสันตะเพ็อนและเสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อาจหาญ ณ นรงค์ (2553). "การเฝ้าติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยวิธีการวัดและวิเคราะห์การสันตะเพ็อน." Retrieved 17 มิถุนายน 2553, from

<http://thailandindustry.com/guru/view.php?id=11387§ion=9&rcount=Y>.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F1	0	H1	1	3	20.47	0.966	19.50	6.50
			2	3	19.86	2.61	17.25	5.75
			3	3	24.12	0.76	23.36	7.79
			4	3	15.69	1.14	14.55	4.85
			5	3	26.12	2.05	24.07	8.02
			6	1	19.71	1.69	18.02	18.02
			7	6	22.01	2	20.01	3.34
			8	5	27.71	1.33	26.38	5.28
			9	4	14.96	1.57	13.39	3.35
			10	14	14.72	2.38	12.34	0.88
			11	2	21.65	1.46	20.19	10.10
			12	1	18.15	1.32	16.83	16.83
			13	4	29.15	2.61	26.54	6.64
			14	4	22.45	1.1	21.35	5.34
			15	1	12.57	2.8	9.77	9.77
			16	2	22.56	2.63	19.93	9.97
			17	3	23.14	1.46	21.68	7.23
			18	2	14.85	1.66	13.19	6.60
			19	4	21.65	2.5	19.15	4.79
			Mean	3.579			Average	7.42
			StDev	2.854				

ตารางที่ 2 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D0 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F1	0	H2	1	18	18.43	2.71	15.72	0.87
			2	4	13.97	1.031	12.94	3.23
			3	5	29.96	0.85	29.11	5.82
			4	16	11.88	2.73	9.15	0.57
			5	7	20.17	2.2	17.97	2.57
			6	5	17.19	1.93	15.26	3.05
			7	4	16.88	1.96	14.92	3.73
			8	5	34.49	1.68	32.81	6.56
			9	3	15.12	1.96	13.16	4.39
			10	3	20.58	1.81	18.77	6.26
			11	10	42.07	2	40.07	4.01
			12	5	18.33	2.96	15.37	3.07
			13	4	15.71	2.13	13.58	3.40
			14	4	18.57	2.73	15.84	3.96
			15	3	21.89	1.54	20.35	6.78
			16	7	27.11	2.86	24.25	3.46
			17	9	36.38	1.85	34.53	3.84
			18	8	29.96	2.19	27.77	3.47
			19	8	31.3	1.97	29.33	3.67
			Mean	6.737			Average	3.83
			StDev	4.188				

ตารางที่ 3 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D180 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F1	180	H1	1	23	13.45	14.28	-0.83	-0.04
			2	23	14.7	26.17	-11.47	-0.50
			3	23	22.3	24.37	-2.07	-0.09
			4	23	28.31	21.79	6.52	0.28
			5	23	22.81	24.36	-1.55	-0.07
			6	23	32.61	24.35	8.26	0.36
			7	23	18.84	20.15	-1.31	-0.06
			8	23	14.57	10.7	3.87	0.17
			9	23	27.6	10.52	17.08	0.74
			10	22	12.33	2.89	9.44	0.43
			11	23	22.22	6.88	15.34	0.67
			12	23	20.45	9.02	11.43	0.50
			13	23	32.18	10.07	22.11	0.96
			14	23	31.28	5.37	25.91	1.13
			15	20	34.06	1.39	32.67	1.63
			16	23	12.36	10.37	1.99	0.09
			17	23	25.78	3.86	21.92	0.95
			18	23	33.58	4.13	29.45	1.28
			19	23	28.7	6.72	21.98	0.96
			Mean	22.789			Average	0.49
			StDev	0.713				

ตารางที่ 4 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F1 D180 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F1	180	H2	1	23	23.1	20.89	2.21	0.10
			2	23	21.12	20	1.12	0.05
			3	23	23.35	17.45	5.90	0.26
			4	23	17.35	13.06	4.29	0.19
			5	23	20.3	16.65	3.65	0.16
			6	23	29.24	22.79	6.45	0.28
			7	23	18.11	4.08	14.03	0.61
			8	23	38.14	24.47	13.67	0.59
			9	23	21.92	16.91	5.01	0.22
			10	23	31.89	28.1	3.79	0.16
			11	23	36.66	25.11	11.55	0.50
			12	23	28.88	29.31	-0.43	-0.02
			13	23	24.34	23.73	0.61	0.03
			14	23	28.37	24.85	3.52	0.15
			15	23	29.01	23.97	5.04	0.22
			16	23	27.21	24.96	2.25	0.10
			17	23	25.87	21.17	4.70	0.20
			18	23	23.72	14.71	9.01	0.39
			19	23	25.22	19.13	6.09	0.26
			Mean	23.000			Average	0.23
			StDev	0.000				

ตารางที่ 5 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D0 H1

Clarence	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{Hitting\ count}$
F2	0	H1	1	1	8.31	1.57	6.74	6.74
			2	2	11.2	2.36	8.84	4.42
			3	3	14.7	1.7	13.00	4.33
			4	9	30.64	2.03	28.61	3.18
			5	6	24.64	2.13	22.51	3.75
			6	3	14.68	1.71	12.97	4.32
			7	1	11.47	1.45	10.02	10.02
			8	6	18.34	2.97	15.37	2.56
			9	2	17.58	1.58	16.00	8.00
			10	4	15.5	2.14	13.36	3.34
			11	14	32.38	2.75	29.63	2.12
			12	5	26.41	1.79	24.62	4.92
			13	3	22.42	2.25	20.17	6.72
			14	3	18.79	2.68	16.11	5.37
			15	1	7.06	2.69	4.37	4.37
			16	6	27.28	2.64	24.64	4.11
			17	9	26.18	2.38	23.80	2.64
			18	2	11.32	1.43	9.89	4.95
			19	6	27.43	2.88	24.55	4.09
			Mean	4.526			Average	4.73
			StDev	3.373				

ตารางที่ 6 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D0 H2

Clarence	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{Hitting\ count}$
F2	0	H2	1	2	6.08	1.61	4.47	2.24
			2	1	10.77	0.99	9.78	9.78
			3	7	20.17	2.2	17.97	2.57
			4	9	23.04	1.75	21.29	2.37
			5	3	46.15	0.48	45.67	15.22
			6	3	24.07	1.45	22.62	7.54
			7	6	11.28	1.14	10.14	1.69
			8	3	27.61	1.68	25.93	8.64
			9	9	30.64	2.03	28.61	3.18
			10	2	15.75	2.09	13.66	6.83
			11	4	40.85	1.55	39.30	9.83
			12	8	8.72	2.01	6.71	0.84
			13	14	32.38	2.75	29.63	2.12
			14	12	19.97	2.76	17.21	1.43
			15	8	20.4	2.5	17.90	2.24
			16	9	26.18	2.38	23.80	2.64
			17	9	36.38	1.85	34.53	3.84
			18	7	27.57	2.76	24.81	3.54
			19	10	19.77	2.97	16.80	1.68
			Mean	6.632			Average	4.64
			StDev	3.670				

ตารางที่ 7 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D180 H1

Clarence	Degree	Pin Height	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F2	180	H1	1	23	24.45	24.37	0.08	0.00
			2	23	8.96	3.35	5.61	0.24
			3	23	17.34	11.04	6.30	0.27
			4	23	11.1	10.82	0.28	0.01
			5	23	23.1	20.89	2.21	0.10
			6	23	24.31	22.15	2.16	0.09
			7	23	21.64	28.46	-6.82	-0.30
			8	23	17.09	4.82	12.27	0.53
			9	22	22.22	6.88	15.34	0.70
			10	23	20.45	9.02	11.43	0.50
			11	23	32.18	10.07	22.11	0.96
			12	23	31.28	5.37	25.91	1.13
			13	23	25.78	3.86	21.92	0.95
			14	23	28.7	6.72	21.98	0.96
			15	23	29.24	22.79	6.45	0.28
			16	23	25.27	5.78	19.49	0.85
			17	23	38.14	24.47	13.67	0.59
			18	23	21.92	16.91	5.01	0.22
			19	23	31.89	28.1	3.79	0.16
			Mean	22.947			Average	0.43
			StDev	0.229				

ตารางที่ 8 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F2 D180 H2

Clarence	Degree	Pin Height	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F2	180	H2	1	23	23.35	17.45	5.90	0.26
			2	23	17.35	13.06	4.29	0.19
			3	23	17.39	10.06	7.33	0.32
			4	18	17.53	2.07	15.46	0.86
			5	23	20.31	16.65	3.66	0.16
			6	23	36.66	25.11	11.55	0.50
			7	23	28.88	29.31	-0.43	-0.02
			8	23	24.34	23.73	0.61	0.03
			9	23	28.37	24.85	3.52	0.15
			10	23	29.01	23.97	5.04	0.22
			11	23	27.21	24.96	2.25	0.10
			12	23	25.87	21.17	4.70	0.20
			13	23	23.72	14.71	9.01	0.39
			14	23	16.53	30.89	-14.36	-0.62
			15	23	11.42	4.79	6.63	0.29
			16	23	25.22	19.13	6.09	0.26
			17	23	16.9	19.06	-2.16	-0.09
			18	23	28.8	18.59	10.21	0.44
			19	23	21.5	17.03	4.47	0.19
			Mean	22.737			Average	0.20
			StDev	1.147				

ตารางที่ 9 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D0 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F3	0	H1	1	3	39.16	0.92	38.24	12.75
			2	12	28.13	1.6	26.53	2.21
			3	16	31.13	1.66	29.47	1.84
			4	7	25.37	2.61	22.76	3.25
			5	5	31.95	2.43	29.52	5.90
			6	13	34.72	2.07	32.65	2.51
			7	4	30.21	2.83	27.38	6.85
			8	6	36.2	1.08	35.12	5.85
			9	23	29.65	9.02	20.63	0.90
			10	7	30.09	2.82	27.27	3.90
			11	23	21.41	7.38	14.03	0.61
			12	9	18.61	2.87	15.74	1.75
			13	7	25.96	2.87	23.09	3.30
			14	8	27.21	2.46	24.75	3.09
			15	12	27.14	1.79	25.35	2.11
			16	9	17.17	2.82	14.35	1.59
			17	6	21.85	0.69	21.16	3.53
			18	10	28.94	1.45	27.49	2.75
			19	9	14.39	2.78	11.61	1.29
			Mean	9.947			Average	3.47
			StDev	5.612				

ตารางที่ 10 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D0 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F3	0	H2	1	7	25.37	2.61	22.76	3.25
			2	5	7.82	0.65	7.17	1.43
			3	6	36.2	1.08	35.12	5.85
			4	10	28.94	1.45	27.49	2.75
			5	16	31.13	1.65	29.48	1.84
			6	23	23.65	14.45	9.20	0.40
			7	20	24.71	2.91	21.80	1.09
			8	12	28.13	1.6	26.53	2.21
			9	5	15.55	1.1	14.45	2.89
			10	5	14.89	2.84	12.05	2.41
			11	5	7.98	1.27	6.71	1.34
			12	15	18.25	2.97	15.28	1.02
			13	6	18.65	2.84	15.81	2.64
			14	7	25.96	2.87	23.09	3.30
			15	23	21.41	7.38	14.03	0.61
			16	9	18.61	2.87	15.74	1.75
			17	3	21.15	2.33	18.82	6.27
			18	5	23.97	1.45	22.52	4.50
			19	8	27.21	2.46	24.75	3.09
			Mean	10.000			Average	2.56
			StDev	6.377				

ตารางที่ 11 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F3	180	H1	1	20	17.84	2.89	14.95	0.75
			2	23	12.89	16.82	-3.93	-0.17
			3	23	5.33	10.25	-4.92	-0.21
			4	22	20.37	2.1	18.27	0.83
			5	23	27.2	5.75	21.45	0.93
			6	23	19.58	12.92	6.66	0.29
			7	23	22.01	17.81	4.20	0.18
			8	23	14.44	11.38	3.06	0.13
			9	23	17.67	5.39	12.28	0.53
			10	23	18.5	20.2	-1.70	-0.07
			11	19	24.7	21.93	2.77	1.15
			12	23	20.16	20.03	0.13	0.01
			13	23	20.58	19.82	0.76	0.03
			14	23	24.73	20.3	4.43	0.19
			15	23	26.46	9.42	17.04	0.74
			16	15	19.7	2.68	17.02	1.13
			17	23	26.63	6.98	19.65	0.85
			18	23	21.95	7.64	14.31	0.62
			19	23	16.33	11.27	5.06	0.22
			Mean	22.158			Average	0.43
			StDev	2.062				

ตารางที่ 12 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F3 D180 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F3	180	H2	1	23	19.63	12.23	7.40	0.32
			2	23	12.1	3.1	9.00	0.39
			3	23	18.91	8.57	10.34	0.45
			4	7	8.3	1.1	7.20	1.03
			5	23	9.05	13.51	-4.46	-0.19
			6	23	13.9	13.41	0.49	0.02
			7	8	22.73	0.71	22.02	2.75
			8	23	7.81	11.32	-3.51	-0.15
			9	23	28.24	30.8	-2.56	-0.11
			10	23	31.25	33.64	-2.39	-0.10
			11	23	15.79	12.86	2.93	0.13
			12	23	17.89	5.56	12.33	0.54
			13	23	24.9	27.39	-2.49	-0.11
			14	23	27.24	10.24	17.00	0.74
			15	23	36.23	22.11	14.12	0.61
			16	23	18.68	19.05	-0.37	-0.02
			17	23	28.1	16.49	11.61	0.50
			18	23	22.83	20.93	1.90	0.08
			19	23	14.24	8.43	5.81	0.25
			Mean	21.368			Average	0.38
			StDev	4.890				

ตารางที่ 13 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D0 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F4	0	H1	1	6	5.29	1.3	3.99	0.67
			2	9	16.51	0.45	16.06	1.78
			3	23	31.85	7.13	24.72	1.07
			4	7	24.03	0.82	23.21	3.32
			5	3	27.93	1.58	26.35	8.78
			6	8	3.71	1.13	2.58	0.32
			7	3	27.83	2.13	25.70	8.57
			8	10	8.98	1.73	7.25	0.73
			9	8	24.56	1.6	22.96	2.87
			10	4	26.88	1.27	25.61	6.40
			11	6	29.09	1.06	28.03	4.67
			12	9	17.34	2.85	14.49	1.61
			13	10	22.23	2.51	19.72	1.97
			14	6	19.05	2.71	16.34	2.72
			15	9	13.85	2.14	11.71	1.30
			16	10	15.11	2.81	12.30	1.23
			17	7	17.18	1.37	15.81	2.26
			18	9	13.73	2.72	11.01	1.22
			19	12	5.24	1.93	3.31	0.28
		Mean		8.368			Average	2.73
		StDev		4.310				

ตารางที่ 14 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D0 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F4	0	H2	1	7	24.03	0.82	23.21	3.32
			2	11	22.23	2.51	19.72	1.79
			3	16	13.5	1.69	11.81	0.74
			4	23	31.85	7.1	24.75	1.08
			5	6	29.09	1.06	28.03	4.67
			6	23	15.13	17.21	-2.08	-0.09
			7	8	38.14	2.84	35.30	4.41
			8	5	25.55	2.15	23.40	4.68
			9	6	19.05	2.71	16.34	2.72
			10	5	13.04	0.41	12.63	2.53
			11	10	24	1.14	22.86	2.29
			12	8	6.66	0.74	5.92	0.74
			13	5	13.58	2.5	11.08	2.22
			14	11	15.4	1.6	13.80	1.25
			15	18	21.51	1.55	19.96	1.11
			16	4	26.88	1.27	25.61	6.40
			17	7	12.89	0.92	11.97	1.71
			18	9	12.71	0.89	11.82	1.31
			19	9	27.34	2.85	24.49	2.72
		Mean		10.053			Average	2.40
		StDev		5.826				

ตารางที่ 15 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D180 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F4	180	H1	1	23	3.85	11.59	-7.74	-0.34
			2	23	11.8	7.8	4.00	0.17
			3	22	11.22	2.9	8.32	0.38
			4	23	20.69	6.73	13.96	0.61
			5	23	14.8	8.27	6.53	0.28
			6	23	16.96	8.45	8.51	0.37
			7	23	17.69	9.41	8.28	0.36
			8	23	16.13	7.85	8.28	0.36
			9	23	11.85	5.81	6.04	0.26
			10	23	11.17	9.16	2.01	0.09
			11	23	9.51	6.67	2.84	0.12
			12	23	10.29	8.27	2.02	0.09
			13	23	12.95	9.24	3.71	0.16
			14	23	10.46	5.33	5.13	0.22
			15	23	18.92	8.12	10.80	0.47
			16	23	27.18	7.28	19.90	0.87
			17	23	15.85	6.62	9.23	0.40
			18	23	17.03	5.48	11.55	0.50
			19	23	25.35	4.8	20.55	0.89
			Mean	22.947		Average	0.33	
			StDev	0.229				

ตารางที่ 16 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F4 D180 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F4	180	H2	1	23	19.35	15.92	3.43	0.15
			2	23	23.4	24.23	-0.83	-0.04
			3	23	16.97	7.73	9.24	0.40
			4	23	18.75	8.55	10.20	0.44
			5	18	17.54	2.26	15.28	0.85
			6	23	27.39	7.36	20.03	0.87
			7	23	32.43	5.36	27.07	1.18
			8	23	25.45	6.58	18.87	0.82
			9	23	30.23	4.74	25.49	1.11
			10	23	17.02	7.69	9.33	0.41
			11	23	18.47	8.69	9.78	0.43
			12	23	20.21	7.58	12.63	0.55
			13	23	25.75	8.26	17.49	0.76
			14	8	11.6	1.4	10.20	1.28
			15	23	19.4	11.11	8.29	0.36
			16	23	25.9	6.04	19.86	0.86
			17	23	23.28	9.26	14.02	0.61
			18	23	20.69	6.73	13.96	0.61
			19	23	14.35	8	6.35	0.28
			Mean	21.947		Average	0.63	
			StDev	3.566				

ตารางที่ 17 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D0 H1

Clarence	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{Hitting\ count}$
F5	0	H1	1	23	8.61	7.27	1.34	0.06
			2	23	9.8	4.27	5.53	0.24
			3	2	4.79	1.68	3.11	1.56
			4	12	7.2	2.12	5.08	0.42
			5	0	0.55	0.55	0.00	0.00
			6	3	13.39	2.23	11.16	3.72
			7	2	6.54	2.39	4.15	2.08
			8	23	16.16	6.15	10.01	0.44
			9	3	13.39	2.23	11.16	3.72
			10	4	11.81	1.86	9.95	2.49
			11	0	2.8	2.8	0.00	0.00
			12	0	1.83	1.83	0.00	0.00
			13	2	13.82	2.64	11.18	5.59
			14	1	18.33	0.87	17.46	17.46
			15	1	24.72	2.78	21.94	21.94
			16	23	10.26	13.94	-3.68	-0.16
			17	23	14.66	13.36	1.30	0.06
			18	23	13.18	13.37	-0.19	-0.01
			19	1	9.86	2.98	6.88	6.88
			Mean	8.895			Average	3.50
			StDev	10.176				

ตารางที่ 18 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D0 H2

Clarence	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{Hitting\ count}$
F5	0	H2	1	2	4.89	2.84	2.05	1.03
			2	0	1.98	1.98	0.00	0.00
			3	23	10.47	4.49	5.98	0.26
			4	23	10.25	9.23	1.02	0.04
			5	23	12.97	13.02	-0.05	0.00
			6	11	18.98	2.66	16.32	1.48
			7	23	14.3	14.87	-0.57	-0.02
			8	12	4.45	2.45	2.00	0.17
			9	23	10.34	7.14	3.20	0.14
			10	0	2.36	2.36	0.00	0.00
			11	0	0.96	0.96	0.00	0.00
			12	2	13.29	2.07	11.22	5.61
			13	4	16.99	1.09	15.90	3.98
			14	23	16.16	6.15	10.01	0.44
			15	2	17.4	2.18	15.22	7.61
			16	1	19	2.04	16.96	16.96
			17	20	28.1	2.14	25.96	1.30
			18	23	14.34	17.53	-3.19	-0.14
			19	0	1.4	1.4	0.00	0.00
			Mean	11.316			Average	2.04
			StDev	10.446				

ตารางที่ 19 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D180 H1

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F5	180	H1	1	23	28.43	22.46	5.97	0.26
			2	23	11.23	6.49	4.74	0.21
			3	23	16.44	11.02	5.42	0.24
			4	23	17.79	5.49	12.30	0.53
			5	23	8.42	7.32	1.10	0.05
			6	23	17.9	8.62	9.28	0.40
			7	23	14.52	10.71	3.81	0.17
			8	23	13.63	5.69	7.94	0.35
			9	23	16.66	7.02	9.64	0.42
			10	23	10.17	4.61	5.56	0.24
			11	23	10.02	26.12	-16.10	-0.70
			12	23	18.07	23.29	-5.22	-0.23
			13	23	19.97	32.07	-12.10	-0.53
			14	23	23.28	7.1	16.18	0.70
			15	23	7.17	26.2	-19.03	-0.83
			16	23	25.83	20.8	5.03	0.22
			17	23	26.28	9.09	17.19	0.75
			18	23	19.58	7.41	12.17	0.53
			19	23	17.13	9.52	7.61	0.33
			Mean	23.000			Average	0.16
			StDev	0.000				

ตารางที่ 20 ตารางข้อมูลการปรับความสมดุลของดิสก์ที่ปัจจัยนำเข้า F5 D180 H2

Clerance	Degree	Pin Hight	ชั้นงาน ที่	จำนวนเคาะ (Hitting count)	ความไม่สมดุลเริ่มต้น (First Unbalance)	ความไม่สมดุลสุดท้าย (Final Unbalance)	ΔUB	$\frac{\Delta UB}{\text{Hitting count}}$
F5	180	H2	1	23	38.07	16.78	21.29	0.93
			2	23	12.65	5.71	6.94	0.30
			3	23	6.72	22.43	-15.71	-0.68
			4	23	24.72	24.35	0.37	0.02
			5	23	24.11	12.34	11.77	0.51
			6	23	12.54	21.36	-8.82	-0.38
			7	23	10.33	2.35	7.98	0.35
			8	23	21.87	16.99	4.88	0.21
			9	23	16.84	21.18	-4.34	-0.19
			10	23	20.12	15.7	4.42	0.19
			11	23	19.57	10.84	8.73	0.38
			12	23	11.25	25.26	-14.01	-0.61
			13	23	31.93	5.14	26.79	1.16
			14	23	25.07	6.59	18.48	0.80
			15	23	11.22	7.44	3.78	0.16
			16	23	6	26.91	-20.91	-0.91
			17	23	26.48	5.73	20.75	0.90
			18	23	24.57	31.55	-6.98	-0.30
			19	23	23.66	5.94	17.72	0.77
			Mean	23.000			Average	0.19
			StDev	0.000				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาว เกศรินทร์ บรรลุศิลป์
วัน เดือน ปี เกิด	เมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	จังหวัด อุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียน นารีอนุกุล จังหวัด อุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีการศึกษา 2546 เข้ารับการศึกษาคณะหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคปลายของปีการศึกษา 2553