ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม)
ปริญญา

การจัดการวิศวกรรม	วิศวกรรมอุตสาหการ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การวิเคราะห์การรบกวนจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ
เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตของชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

Analysis of Non Repeatable Run Out Disturbance
for Process Improvement of Head Stack Assembly in Hard Disk Drive

นามผู้วิจัย นางสาววันเพ็ญ มูลครบุรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....
(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....
(รองศาสตราจารย์พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....
(รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์, M.S.)

หัวหน้าภาควิชา ....
(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....
(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การรบกวนจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อปรับปรุง กระบวนการผลิตของชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

Analysis of Non Repeatable Run Out Disturbance for Process Improvement of Head Stack Assembly in Hard Disk Drive

โดย

นางสาววันเพ็ญ มูลครบุรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม)
พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วันเพ็ญ มูลครบุรี 2554: การวิเคราะห์การรบกวนจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตของชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม) สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 140 หน้า

ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเป็นสาเหตุหลักของปัญหาด้านฟังก์ชั่นการทำงานซึ่งรวมถึงความผิดพลาดของตำแหน่งสัญญาณและการเข้าถึงตำแหน่งแทร็กข้อมูลที่ไม่ถูกต้องในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ปัญหาเหล่านี้จะพบมากในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความจุสูง โดยทั่วไปแล้ว ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำมีสาเหตุมาจากการสั่นสะเทือนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อาการเสียหายจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่มีสาเหตุมาจากชุดหัวอ่านเขียน และปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดงานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำให้น้อยที่สุด โดยวิธีการที่ใช้จะต้องไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพ ต้นทุน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตจริงได้ ทั้งนี้ได้นำการวิเคราะห์ทางสถิติมาใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตซึ่งประกอบด้วย (1) ค่าแรงบิดการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลกับฐานชุดหัวอ่านเขียน (2) ความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้า และ (3) การหยอดกาวเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างฐานสำหรับชุดหัวอ่านเขียนและส่วนหางของหัวอ่านเขียน นอกจากนี้ ยังทำการ ศึกษาขั้นตอนของกระบวนการที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานชุดหัวอ่านเขียนกับส่วนหางของหัวอ่านเขียน และปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานเพื่อลดช่องว่างดังกล่าว ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาวิธีแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนที่เสียหายจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการบัดกรีซ้ำบนจุดบัดกรีของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลแผงวงจรและจุดบัดกรีของหัวอ่านเขียนเพื่อลดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานสำหรับชุดหัวอ่านเขียน และหลีกเลี่ยงการเกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากชุดหัวอ่านเขียนอีกครั้งในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

________________ ________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wanpen Moonkhonburi 2011: Analysis of Non Repeatable Run Out Disturbance for Process Improvement of Head Stack Assembly in Hard Disk Drive. Master of Engineering (Engineering Management) Major Field: Engineering Management, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 140 pages.

Non Repeatable Run Out (NRRO) is the main cause of functional problems including position error signal and track misregistration in hard disk drive (HDD). These problems are often found in high track density HDD. NRRO is generally caused by excessive vibration of the components in HDD.

This research work aims to analyze failure symptom of NRRO caused by head stack assembly (HSA) and to improve the process by minimizing the NRRO failure. The applied improvement method will not significantly affect the assembly process in terms of quality, cost, and are possible to implement in production. The statistical analysis was applied to determine the suitable conditions of the process parameters including (i) screw fastening torque to fix the flex cable and carriage, (ii) rotational speed of electric driver, and (iii) applying adhesive on the carriage to increase contact area between the carriage and tail of head gimbal assembly (HGA). In addition, the process steps were also investigated to explain how a gap between carriage slit and HGA tail appeared and to improve the work instruction of the process step to reduce the gap. Finally, the rework method of the NRRO-failed HSA by re-soldering on the flex pad and HGA pad was studied to reduce HGA tail floating and, consequently, avoid the repeated NRRO failure in HDD.

_____________________________ _____________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา, รองศาสตราจารย์ ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล, รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ รองศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ ญาณภิรัต ประธานโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขการศึกษาวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์มาโดยตลอด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนๆ ของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะและสนับสนุน

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมฯ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สุดท้ายขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ช่วยสนับสนุนในการทำการทดลองและเก็บข้อมูลตั้งแต่ต้นจนจบ จนสามารถประสบความสำเร็จในการเรียน และสามารถทำการศึกษาค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

วันเพ็ญ มูลครบุรี
ธันวาคม 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	9
การตรวจเอกสาร	11
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	82
สรุป	82
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก ภาพประกอบการศึกษา	90
ภาคผนวก ข ตารางประกอบการศึกษา	131
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	140

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปอร์เซ็นต์หมายเลขหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณมากกว่าค่าที่กำหนด	44
2	ช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	46
3	ค่าแรงบิดที่ทำให้สกรูหักขณะขันสกรูเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน	47
4	ของเสียจากสกรูหักตามค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรูเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่าน	48
5	ค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรูในการทดลองเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียนที่ใช้ในงานตัวอย่าง	48
6	ค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรูในการทดลองเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียนที่ใช้ในงานทดลอง	50
7	เปอร์เซ็นต์งานเสียความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำตามค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้า	50
8	เวลาการหยอดกาวและกำลังการผลิตต่อวันตามตำแหน่งการหยอดกาว	55
9	เวลาการแกะกาวและกำลังการผลิตต่อวันตามตำแหน่งการหยอดกาว	56
10	เปอร์เซ็นต์งานเสียจากกระบวนการทดสอบที่เกี่ยวกับการสั่นสะเทือนจากส่วนหางหัวอ่านเขียน	60
11	เปรียบเทียบวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่	63
12	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ชุดหัวอ่านเขียนที่พบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนด้วยวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่	64
13	เปรียบเทียบวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่	65
14	ค่าแรงที่กระทำกับสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียน	66

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

15 ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการหยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน 69
16 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการหยอดกาวที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน 70
17 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการหยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของ ฐานชุดหัวอ่านเขียน 71
18 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและบริเวณตะกั่วของหัวอ่านเขียน 72
19 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังก่อนและหลังการจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล 73
20 เปรียบเทียบต้นทุนและระยะเวลาการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนที่ไม่ผ่านการทดสอบความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ 79

ตารางผนวกที่

ข1 ข้อมูลค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่ไม่ได้หยอดกาวสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่ 132
ข2 ข้อมูลค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่ 134
ข3 ข้อมูลค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่ 136
ข4 ข้อมูลค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่ 138

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	3
2	กระบวนการผลิตชุดหัวอ่านเขียน	4
3	ชุดหัวอ่านเขียนสำหรับรุ่นงาน 2.5 นิ้ว	5
4	ส่วนประกอบภายในฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์	5
5	ตัวอย่างภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและแผงวงจรไฟฟ้า	6
6	เปอร์เซ็นต์งานเสียความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟความเร็ว 7200 รอบต่อนาที สัปดาห์ที่ 7- 18 ปี 2553	8
7	โครงสร้างของแทร็คของแผ่นดิสก์	14
8	รูปแบบสนามแม่เหล็กของ servo burst	14
9	สัญญาณเซอร์โวที่ตำแหน่งศูนย์	15
10	สัญญาณเซอร์โวที่ไม่ใช่ตำแหน่งศูนย์	16
11	ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณกับระยะทางระหว่างหัวอ่านเขียนกับศูนย์กลาง	17
12	การเบี่ยงเบนของแทร็คข้อมูลจริงจากแทร็คที่เป็นวงกลมตามอุดมคติ	18
13	การเข้าถึงตำแหน่งแทร็คที่ไม่ถูกต้องจากการเขียนและอ่านสัญญาณ	19
14	วงจรการควบคุมให้หัวอ่านเขียนของเซอร์โว	20
15	การพยากรณ์การเข้าถึงตำแหน่งที่ผิดพลาดตามวัสดุของแผ่นดิสก์	23
16	การออกแบบตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อลดการกระพือของแผ่นดิสก์	23
17	รูปแบบการไหลวนของอากาศตามระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์และขอบของตัวฐาน	23
18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนและขนาดการกระพือของแผ่นดิสก์ตามระยะระหว่างแผ่นดิสก์กับขอบของตัวฐาน	24
19	ลักษณะของ RRO และ NRRO ของสปินเดิลมอเตอร์	26
20	โครงสร้างสปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลและแบริ่งของเหลว	27
21	ตำแหน่งการใส่วัสดุป้องกันการสั่นสะเทือนภายในสปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล	28
22	ลักษณะของฐานชุดหัวอ่านเขียนที่มีผลต่อกระแสลมที่หมุนวนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	30
23	ประสิทธิภาพการลดการไหลเหนี่ยวนำการสั่นสะเทือนตามความหนาและความยาวของตัวปรับกระแสลม	31

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ไขควงไฟฟ้า	33
25	อุปกรณ์ควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของไขควงไฟฟ้า	34
26	อุปกรณ์สำหรับหยอดกาวในชุดหัวอ่านเขียน	34
27	เครื่องอบกาวด้วยแสงอัตราไวโอเลต	35
28	อุปกรณ์วัดแรงดึงสำหรับวัดแรงกดบริเวณแผ่นอลูมิเนียมของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล	35
29	กล้องจุลทรรศน์สำหรับตรวจสอบชุดหัวอ่านเขียน	36
30	ฐานชุดหัวอ่านเขียนที่มีช่องสำหรับใส่หางของหัวอ่านเขียน	40
31	ตำแหน่งการหยอดกาวเพื่อยึดส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับฐานชุดหัวอ่านเขียน	40
32	แสดงแผนงานวิจัย	42
33	ขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่วิเคราะห์จากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	43
34	การวิเคราะห์การเบี่ยงเบนออกนอกแทร็คข้อมูลของหัวอ่านเขียน	45
35	การเอียงตัวของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลกับระนาบอ้างอิง	45
36	ช่องว่างระหว่างหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	46
37	เปอร์เซ็นต์ของสกรูหักตามค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้า	49
38	ตัวอย่างสกรูหักติดอยู่กับฐานชุดหัวอ่านเขียน	49
39	การแจกแจงพื้นที่ใต้โค้งแบบปกติของปัจจัยในการขันสกรู	51
40	ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ	51
41	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวและไม่หยอดกาว	52
42	การวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณด้วยวิธี Two-Sample T-Test	53
43	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวของชุดหัวอ่านเขียน	54
44	การวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวด้วยวิธี One-Way ANONA	54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า

44 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวของชุดหัวอ่านเขียน 54

44 การวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวด้วยวิธี One-Way ANONA 54

45 แรงกระทำกรณีไม่มีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน 57

46 แรงกระทำกรณีมีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน 57

47 แรงกระทำกรณีเพิ่มขนาดของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานชุดหัวอ่านเขียน 58

48 แรงกระทำกรณีเพิ่มจุดการหยอดกาวบนฐานชุดหัวอ่านเขียน 58

49 ขนาดของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและตำแหน่งการหยอดกาวเพื่อเพิ่มพื้นที่การสัมผัสของส่วนหางหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน 59

50 แผนผังวิธีการปฏิบัติที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานชุดหัวอ่านเขียน 61

51 วิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรให้ยึดกับแผ่นอลูมิเนียม 62

52 การหมุนชุดหัวอ่านเขียนเพื่อตรวจสอบว่าตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรยึดกับแผ่นอลูมิเนียม 63

53 วิธีการวัดค่าแรงดึงที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน 65

54 ลักษณะการบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรและหัวอ่านเขียน 67

55 ลักษณะการเอียงตัวของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจร 68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยวิธี Paired T-Test	73
57	การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการหยอดกาวที่ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยวิธี Paired T-Test	74
58	การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยวิธี Paired T-Test	75
59	การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธี Paired T-Test	76
60	การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธี Paired T-Test	77
61	ตำแหน่งการเกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานชุดหัวอ่านเขียน	80
62	ผลิตผลการผลิตหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและบริเวณตะกั่วของหัวอ่านเขียน	81
63	เปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำก่อนและหลังการเพิ่มแรงบิดการขันสกรู	83
64	ต้นทุนที่สามารถลดได้จากการเปลี่ยนค่าแรงบิดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียนจาก 0.50 kgf.cm เป็น 0.60 kgf.cm	84

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หาง หัวอ่านเขียนก่อนและหลังการหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	91
ก2	การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หาง หัวอ่านเขียนก่อนและหลังการหยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน	94
ก3	การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่ หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน และส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน	97
ก4	การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับ ใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่ง สัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล	100
ก5	การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่ หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล	103
ก6	ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	106
ก7	ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยหยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน	111
ก8	ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐาน ชุดหัวอ่านเขียน	116
ก9	ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยการบัดกรีซ้ำจุดตะกั่วบริเวณสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล	121
ก10	ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยการจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล	126

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

HSA	=	Head Stack Assembly
HDE	=	Hard Disk Enclosure
HDD	=	Hard Disk Drive
PCBA	=	Printed Circuit Board Assembly
VCM	=	Voice Coil Motor
SRST	=	Self Run Stress Test
PES	=	Position Error Signal
TMR	=	Track Misregistration
RRO	=	Repeatable Run Out
NRRO	=	Non Repeatable Run Out
WWTMR	=	Write-to-Write Track Mis-Registration
WRTMR	=	Write-to-Read Track Mis-Registration
FIV	=	Flow-Induced Vibration
BB	=	Ball Bearing
FDB	=	Fluid Dynamics Bearing
LDV	=	Laser Doppler Vibrometer
RPM	=	Revolution Per Minute

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์การรบกวนจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตของชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

Analysis of Non Repeatable Run Out Disturbance for Process Improvement of Head Stack Assembly in Hard Disk Drive

คำนำ

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในตลาดโลกมีทิศทางการเติบโตที่ต่อเนื่อง ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรายใหญ่ของโลก ธุรกิจฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีการแข่งขันสูงทั้งทางด้านการใช้เทคโนโลยีในการผลิต ราคา คุณภาพและการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าตามเวลาที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งในด้านของราคานั้นตลาดเป็นผู้กำหนดราคาขายเนื่องจากมีผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟหลายราย ดังนั้นสิ่งที่จะเป็นจุดเด่นที่ทำให้ลูกค้าตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์คือ สินค้าที่มีคุณภาพ ทำงานได้ดีและมีเสถียรภาพในการใช้งานสูง ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องผลิตสินค้าที่ดีที่สุดให้กับลูกค้าด้วยความรวดเร็วและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

บริษัทกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งเป็นผู้ประกอบการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทั้งขนาด 2.5 นิ้วและ 3.5 นิ้ว เพื่อส่งออกจำหน่ายลูกค้าต่างประเทศทั้งหมด ซึ่งผลิตภัณฑ์ของบริษัทมีดังนี้

1. ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 2.5 นิ้ว สำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพาหรือโน้ตบุ๊ก, อุปกรณ์นำทางในรถยนต์, กล้องบันทึกวีดีโอ, อุปกรณ์บันทึกภาพจากโทรทัศน์ เป็นต้น

2. ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว สำหรับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแบบตั้งโต๊ะ และนำมาใช้เป็นระบบแม่ข่าย (Server) ในการจัดเก็บข้อมูลต่าง ๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟประกอบด้วยหลายชิ้นส่วนตามที่แสดงในภาพที่ 1 ดังนี้

1. ชุดหัวอ่านเขียน (Head Stack Assembly, HSA) ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบ ดังนี้

1.1 หัวอ่านเขียน (Head Gimbal Assembly, HGA) ทำหน้าที่ อ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็กลงบนแผ่นดิสก์

1.2 ฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage) ทำหน้าที่เป็นฐานสำหรับหัวอ่านเขียนและสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล นอกจากนี้ยังทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กทำให้ขดลวดมอเตอร์แบบเสียงเกิดแรงผลักเพื่อให้ชุดหัวอ่านเขียนเกิดการเคลื่อนที่

1.3 สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล (Flex Cable) ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจร โดยมีเออีโมดูล ทำหน้าที่เลือกควบคุมการอ่านเขียนสัญญาณจากหัวสไลเดอร์และขยายสัญญาณที่ได้จากการอ่านส่งเข้าแผงวงจรเพื่อทำการประมวลผล

2. ฐานรอง (Base Plate) ทำหน้าที่เป็นฐานรองรับหรือโครงสำหรับประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ลงในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

3. สปินเดิล มอเตอร์ (Spindle Motor) ทำหน้าที่ ขับเคลื่อนให้แผ่นดิสก์หมุน

4. แผ่นดิสก์ (Magnetic Disk) ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

5. สเปเซอร์ ริง (Spacer Ring) ทำหน้าที่คั่นกลางระหว่างแผ่นดิสก์แต่ละแผ่น เพื่อให้หัวอ่านเขียนสามารถเข้าไปทำการอ่านเขียนข้อมูลได้

6. ท๊อปแคล็มพ์ (Top Clamp) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แผ่นดิสก์หลุดจากแกนสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle Motor)

7. ขดลวดมอเตอร์แบบเสียง (Voice Coil Motor, VCM) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อให้ช่วยให้ชุดแขนของหัวอ่าน-เขียน เกิดการเคลื่อนที่ไปบนแผ่นดิสก์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. แร็มพ์ (Ramp) ทำหน้าที่ รองรับหัวอ่านในกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ยังไม่มีการทำงานหัวอ่านจะทำการพักอยู่บนแร็มพ์ เพื่อป้องกันการกระแทกกับแผ่นดิสก์

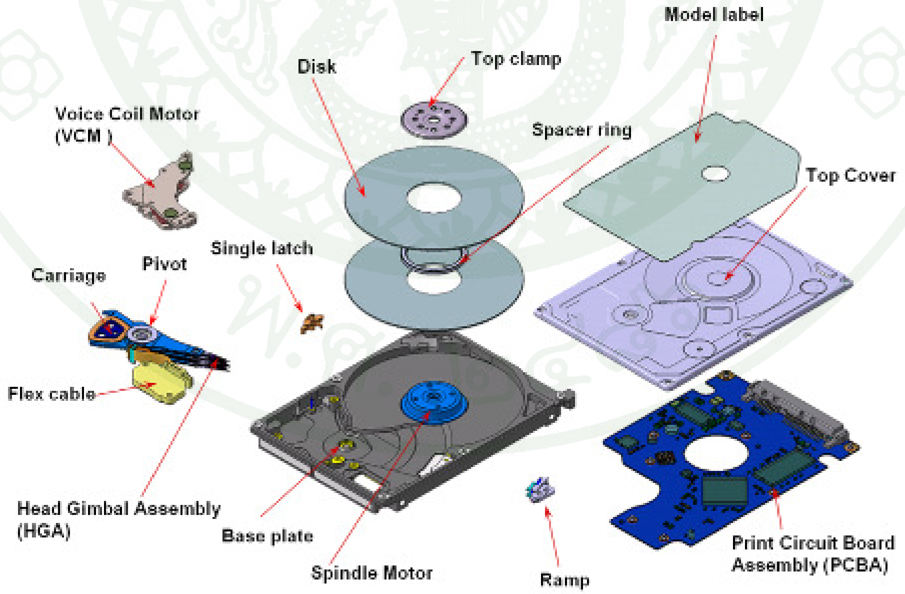
9. พิวอท (Pivot) ทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของชุดหัวอ่านเขียน ช่วยให้ชุดหัวอ่านเขียนเคลื่อนที่ขึ้น-ลงเพื่อไปอ่านเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ได้

10. ท๊อป คอฟเวอร์ (Top Cover) ทำหน้าที่ ป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนภายในของฮาร์ดดิสก์ เกิดความเสียหายจากสภาวะแวดล้อมภายนอก

11. แผงวงจร (Printed Circuit Board Assembly, PCBA) ทำหน้าที่ ประมวลผลและควบคุมการทำงานทั้งหมดของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

12. สกรู (Screw) ทำหน้าที่ ยึดชิ้นส่วนต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน

13. ป้ายบอกรุ่นงาน (Model Label) สำหรับบอกรายละเอียดของผลิตภัณฑ์



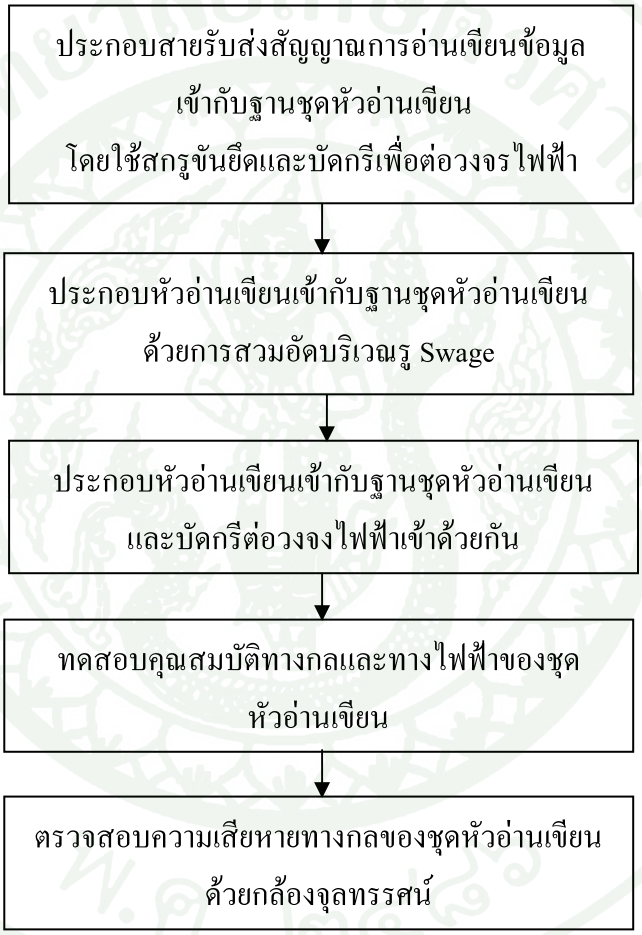
ภาพที่ 1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแบ่งกระบวนการผลิตหลักออกเป็น 3 ส่วน

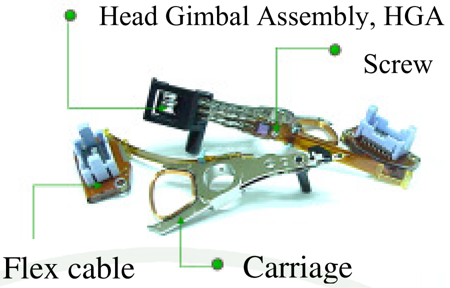
1. การผลิตชุดหัวอ่านเขียน (Head Stack Assembly, HSA) ในห้องสะอาดที่ควบคุมปริมาณฝุ่นขนาด 0.2 ไมครอนไม่เกิน 10,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการผลิตชุดหัวอ่านเขียน และภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างชุดหัวอ่านเขียนสำหรับรุ่นงาน 2.5 นิ้ว



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตชุดหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

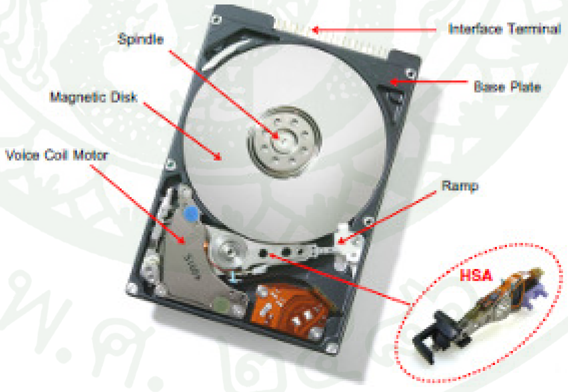
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ชุดหัวอ่านเขียนสำหรับรุ่นงาน 2.5 นิ้ว

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

2. การประกอบฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์ (Hard Disk Enclosure, HDE) เป็นการประกอบชุดหัวอ่านเขียนกับชิ้นส่วนต่างๆ เช่น แผ่นดิสก์, ท๊อปแคล็มพ์, ขดลวดมอเตอร์แบบเสียง, ชุดหัวอ่านเขียนลงบนฐานรองในห้องสะอาดที่ควบคุมปริมาณฝุ่นขนาด 0.2 ไมครอนไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต ตัวอย่างฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์แสดงในภาพที่ 4

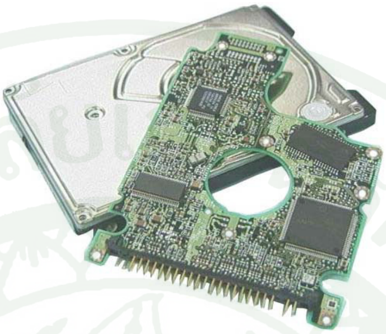


ภาพที่ 4 ส่วนประกอบภายในฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive, HDD) ในพื้นที่สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิปกติ โดยไม่มีการควบคุมปริมาณฝุ่น เป็นการประกอบแผงวงจรไฟฟ้าเข้ากับฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์ ตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและแผงวงจรไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์และแผงวงจรไฟฟ้า

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

หลังจากประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องมีการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟก่อนส่งมอบให้ลูกค้าเพื่อให้มั่นใจว่าสินค้าที่ส่งไปได้คุณภาพและสามารถใช้งานได้ กระบวนการทดสอบมีดังนี้

1. การเขียนสัญญาณเซอร์โวลงบนแผ่นดิสก์และทดสอบการเขียนสัญญาณ

2. การทดสอบการเริ่มต้นทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยทดสอบการเปิดไดร์ฟ ทดสอบความเร็วของมอเตอร์ เวลาที่ใช้ในการเตรียมพร้อมการทำงานของไดร์ฟ เตรียมโปรแกรมการทดสอบลงสู่ไดร์ฟ เตรียมหมายเลขแทร็คข้อมูล ทำการสร้างพื้นที่สำหรับการบันทึกข้อมูล เรียกกระบวนการนี้ว่า Function Test

3. การทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วยโปรแกรมการแปรผันอุณหภูมิ, การตรวจสอบพื้นผิวทั้งหมดของแผ่นดิสก์และทำการระบุตำแหน่งที่เสียหายไว้ และทำการจำแนกความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นดิสก์ออกเป็นหมวดต่าง เรียกกระบวนการนี้ว่า Self Run Stress Test (SRST)

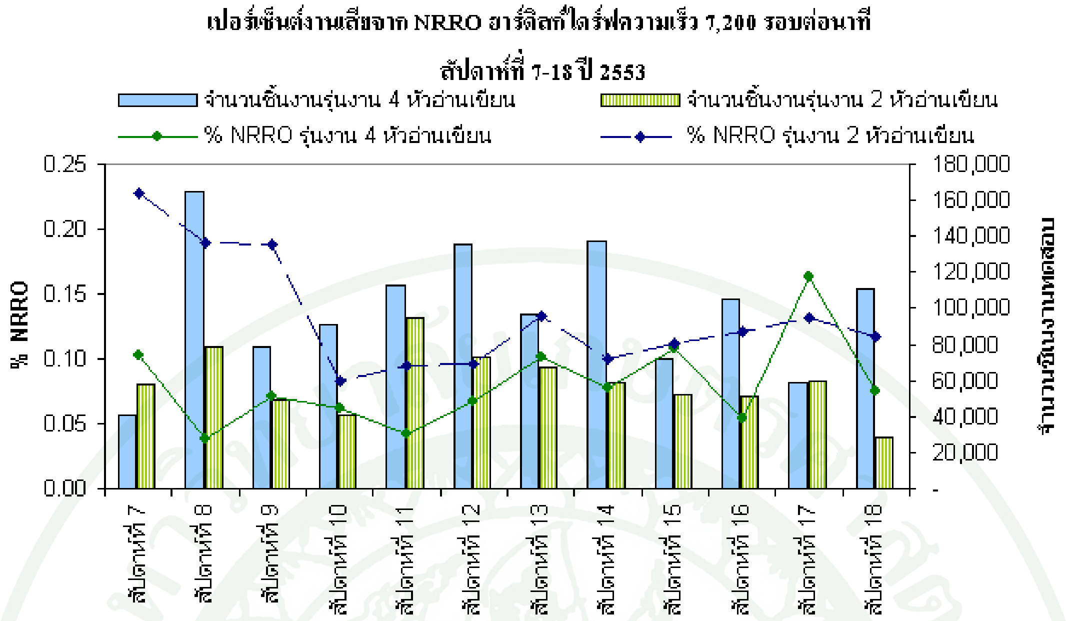
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การทดสอบขั้นสุดท้ายโดยการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นดิสก์ ตรวจสอบการอ่านเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ทั้งหมด ทดสอบค่าตัวแปรสำคัญในไดร์ฟ และตั้งค่าเฉพาะต่างๆ ตามความต้องการของลูกค้า เรียกกระบวนการนี้ว่า Final Test

ปัจจุบันผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดเล็กลง แต่มีความจุเพิ่มขึ้นให้มากที่สุด การที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจะมีความจุเพิ่มขึ้นนั้นขนาดของหัวสไลเดอร์จะต้องมีขนาดเล็กมาก และความหนาแน่นต่อแทร็คของแผ่นดิสก์ต้องมีค่ามากตามไปด้วยและการอ่านเขียนสัญญาณต้องมีความแม่นยำ แต่ปัญหาหลักอย่างหนึ่งของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความจุสูง คือความผิดพลาดในการเข้าถึงตำแหน่งสัญญาณแทร็คที่ต้องการอ่านเขียนข้อมูล (Position Error Signal, PES) ทำให้เกิดการเข้าถึงแทร็คในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง (Track Misregistration, TMR) เรียกลักษณะงานเสียนี้ว่า ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ (Non Repeatable Run Out, NRRO) ซึ่งเป็นลักษณะอาการงานเสียหายทางกลด้วยมีการรบกวนการอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งสาเหตุเกิดจากแรงสั่นสะเทือนจากลมหมุนภายในจากส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เช่น แผ่นดิสก์มีการกระพือขณะที่สปินเดิลมอเตอร์หมุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของแผ่นดิสก์, การสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์เองเนื่องจากหมุนด้วยความเร็วต่อนาทีด้วยรอบการหมุนที่สูง เช่น 5400, 7200, 10000, 15000 รอบต่อนาที การสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่เข้าออกแผ่นดิสก์ของชุดหัวอ่านเขียน รวมทั้งเกิดจากเรโซแนนซ์ทางกลของชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเอง โดยแต่ละชิ้นส่วนจะมีค่าความถี่เฉพาะอยู่ซึ่งฝ่ายออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว แต่เมื่อหลาย ๆ ชิ้นส่วนมารวมกันจะเกิดความถี่เสริมกันแล้วทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟไม่สามารถกรองความถี่พ้องนี้ได้ก็จะเกิดความถี่ที่สูงหรือต่ำกว่าที่ได้ออกแบบไว้เป็นสัญญาณรบกวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ในส่วนของงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากชุดหัวอ่านเขียนขณะที่มีการเคลื่อนที่ไปบนแผ่นดิสก์

เก็บข้อมูลการทดสอบงานระหว่างสัปดาห์ที่ 7-18 ปี พ.ศ. 2553 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเฉลี่ยอยู่ที่ 0.08% สำหรับรุ่นงาน 4 หัวอ่านเขียน และ 0.07% สำหรับรุ่นงาน 2 หัวอ่านเขียนของจำนวนงานทั้งหมดที่เข้าทดสอบรุ่นงานความเร็วสปินเดิลมอเตอร์ 7200 รอบต่อนาที แสดงในภาพที่ 6 ส่งผลกระทบต่อจำนวนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่จะส่งมอบให้กับลูกค้าลดลงเนื่องจากต้องส่งงานกลับไปถอดส่วนประกอบต่าง ๆ ออกเพื่อทำการแก้ไขต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 เปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟความเร็ว 7200 รอบต่อนาที สัปดาห์ที่ 7- 18 ปี 2553

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

จะเห็นว่าสำหรับรุ่นงานสปินเดิลมอเตอร์ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที มีปัญหาทั้ง 2 หัวอ่านเขียนและ 4 หัวอ่านเขียน ผู้ศึกษาเลือกรุ่นงาน 4 หัวอ่านเขียนมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากต้นทุนในการผลิตและต้นทุนในการแก้ไขงานสูงรุ่นงาน 2 หัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

การวิจัยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดการเกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียน สามารถแบ่งออกเป็นวัตถุประสงค์ย่อย ดังนี้

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของงานเสียที่เกิดจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียนทั้งจากการวิเคราะห์ความเสียหายทางไฟฟ้าและความเสียหายทางกล

2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียน

3. เพื่อออกแบบการทดลองเพื่อหาแนวทางการลดของเสียที่เกิดจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียนเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดผลิตผลดี

4. เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ไม่ผ่านการทดสอบความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตของบริษัท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะการเกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียนจะทำการศึกษาเฉพาะชุดหัวอ่านเขียนรุ่นงาน 2.5 นิ้ว ความเร็วการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ 7200 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นปัญหาเฉพาะของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 2.5 นิ้วของบริษัทกรณีศึกษา

2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียน โดยศึกษาค่าแรงบิดที่ใช้ขันสกรูเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน ความเร็วรอบของไขควงไฟฟ้าที่ใช้ขันสกรู และการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับฐานชุดหัวอ่านเขียน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต

3. ศึกษาวิธีการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนที่เสียหายจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเดิมเมื่อนำชุดหัวอ่านเขียนกลับไปใช้ใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 2.5 นิ้วรุ่นงาน 4 หัวอ่านเขียน ความเร็วการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ 7200 รอบต่อนาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

การพัฒนาอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้มีศักยภาพสามารถแข่งขันได้ในตลาดโลกนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงเทคโนโลยีและกลไกการทำงานของส่วนประกอบในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อที่จะสามารถพัฒนาให้ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีความหนาแน่นต่อพื้นที่สูงขึ้น มีการอ่าน-เขียนข้อมูลที่ถูกต้องตรงตามตำแหน่งที่ต้องการซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเนื่องจากเป็นการทำงานในขณะที่แผ่นดิสก์หมุนด้วยความเร็วสูง และหัวอ่าน-เขียนมีการเคลื่อนที่จากบริเวณจุดพักหัวอ่าน-เขียนในขณะที่ไม่ใช้งาน ดังนั้นความแม่นยำในการเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการจึงเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้องคำนึงถึง อุปสรรคอย่างหนึ่งที่ทำให้การเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการผิดพลาดเกิดจากแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งมีหลายสาเหตุ เช่น การสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วสูง การสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์ รวมทั้งการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนเอง

โดยเนื้อหาส่วนแรกของการตรวจเอกสารงานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อให้เข้าใจและทราบถึงกลไกการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ จากนั้นจะมุ่งเน้นการทบทวนสาเหตุและวิธีการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในแต่ละขั้นตอนการผลิตตั้งแต่การออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ การประกอบหัวอ่าน-เขียน การประกอบหลัก การเขียนสัญญาณเซอร์โว การทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1. ลักษณะทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟประกอบด้วยแผ่นดิสก์ที่มีแม่เหล็กเคลือบผิวบาง ๆ อยู่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นดิสก์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีตั้งแต่ 21 มิลลิเมตรสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 0.85 นิ้ว จนถึง 95 มิลลิเมตรสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว ความเร็วรอบในการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์อยู่ระหว่าง 3000 รอบต่อนาทีถึง 15000 รอบต่อนาที มีส่วนประกอบสำหรับการอ่านเขียนเรียกว่าหัวบันทึกที่มีสไลเดอร์ใช้สำหรับการเก็บข้อมูล และประกอบอยู่บนแขนยึดเป็นชิ้นส่วนทางกล มีแผงวงจรสำหรับควบคุมการทำงานและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ แผ่นดิสก์แต่ละแผ่นสามารถเก็บข้อมูลได้หลายแสนบิท โดยแต่ละแผ่นจะมีหัวบันทึกอยู่ด้านบนและล่างแต่ละดิสก์จะมีข้อมูลเก็บไว้เป็นวงเรียกว่าแทร็ค แต่แทร็คจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นเซคเตอร์ แต่ละ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เซคเตอร์จะมีขนาด 512 ไบต์ การแบ่งส่วนถูกใช้สำหรับการระบุตำแหน่งบนดิสก์ ในการบอกตำแหน่งสามารถระบุได้ เช่น หน้า 2 แทร็ค 3 เซคเตอร์ 9 ปกติในแต่ละแทร็คจะมีจำนวนเซคเตอร์เท่ากัน ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟบางอันจะมีจำนวนเซคเตอร์มากในบริเวณที่เป็นแทร็คด้านบวก เพราะมีพื้นที่หรือความยาวมากกว่า (Nakamura *et al*., 2008) จำนวนแทร็คต่อนิ้วหมายถึงมีการเพิ่มความหนาแน่นของแทร็คซึ่งถูกวัดด้วยแทร็คต่อนิ้วของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟโดยเพิ่มจากเมกกะไบต์เป็นกิกะไบต์เนื่องจากหัวอ่านที่ทันสมัย สามารถอ่านเขียนได้ในที่แคบ ในปัจจุบันบางฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีความหนาแน่นของแทร็คอยู่ที่ประมาณ 15,000 แทร็คต่อนิ้ว หากแบ่งตามโครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟตามหน้าที่การทำงานสามารถแบ่งออกได้ 4 ส่วนหลัก ได้แก่

1.1 ส่วนอ่าน-เขียน (Read-Write Part) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนหัวบันทึก (Recording Head) และส่วนแขนจับ (Suspension) หัวบันทึกที่ประกอบเสร็จแล้วจะอยู่ในรูปของสไลเดอร์ที่เคลื่อนที่อยู่เหนือแผ่นดิสก์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล หากแบ่งตามหน้าที่การทำงานของส่วนหัวบันทึกแล้วจะมีทั้งหมด 3 ส่วนย่อยคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการอ่าน (Read Head), ส่วนที่ทำหน้าที่ในการเขียน (Write Head), ส่วนป้องกันสนามแม่เหล็กภายนอก (Magnetic Sheild Part) และส่วนของแขนจับเนื่องจากหัวบันทึกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เอง จึงต้องอาศัยแขนจับหัวบันทึกเพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ (อภิรัฐ, 2549)

1.2 ส่วนจัดเก็บข้อมูล (Storage Part) หรือแผ่นดิสก์ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีทั้งแผ่นดิสก์แบบแก้วและแบบอลูมิเนียม

1.3 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ (Movement Controlling Part) ในส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวบันทึกจะใช้มอเตอร์ขดลวดแบบเสียง (Voice Coil Motor, VCM) ที่จะทำให้ตัวขับเร้า (Actuator) ที่อยู่บนชุด หัวอ่านเขียน เคลื่อนที่ในแนวรัศมีของแผ่นดิสก์ ส่วนการควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นดิสก์จะใช้มอเตอร์แบบหมุนหรือสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor) เพื่อบังคับให้แผ่นดิสก์ที่ประกอบเข้ากับสปินเดิลมอเตอร์หมุนตามในระหว่างการอ่าน-เขียนข้อมูล

1.4 ส่วนเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Interconnection Part) ซึ่งสัญญาณจากส่วนอ่าน-เขียนจะถูกเชื่อมต่อกับวงจะควบคุมของคอมพิวเตอร์หรือหน่วยประมวลผลข้อมูลของเครื่องใช้ไฟฟ้าผ่านทาง สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล ซึ่งวงจรรวมทั้งหมดจะอยู่ในรูปแผงวงจรไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 โดยบริษัท ไอบีเอ็ม เพื่อให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้โดยการสุ่ม (Random Access System) ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวแรกมีเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 24 นิ้วและพัฒนาต่อมาจนเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดเท่ากับ 0.8 - 1.0 นิ้วในปี ค.ศ. 2006 ขณะที่ความจุนั้นเพิ่มจาก 0.002 เมกะไบต์ต่อตารางนิ้ว เป็นมากกว่า 10 เมกะไบต์ต่อตารางนิ้ว (อภิรัฐ, 2549)

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้เพิ่มความหนาแน่นในการจัดเก็บข้อมูลให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งนำไปสู่ตำแหน่งของหัวอ่านเขียนที่เล็กลงเรื่อย ๆ ความผิดพลาดตำแหน่งหัวอ่านเขียนหรือส่วนเบี่ยงเบนของหัวอ่านเขียนจากศูนย์กลางแทร็คเป็นการพิจารณาจากสัญญาณที่เรียกว่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณ (Eguchi, 2009) ซึ่งในการอ่านหรือการเขียนข้อมูลที่สำเร็จนั้นต้องการความแปรปรวนที่น้อย ๆ ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความจุสูงยิ่งต้องการความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่น้อยลง เพื่อให้หัวอ่านเขียนสามารถเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการได้ และระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์กับสไลเดอร์ (Fly height) ก็ต้องมีขนาดเล็กลงด้วย การพัฒนาความถูกต้องของตำแหน่งหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลให้ได้มากขึ้น ซึ่งการสั่นสะเทือนทางกลจะทำให้ความถูกต้องของตำแหน่งหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องลดการสั่นสะเทือนในตำแหน่งหัวอ่านเขียนเพื่อที่จะปรับปรุงความถูกต้องของตำแหน่งหัวอ่านเขียนมากขึ้น เรามักจะเห็นค่าความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำมีขนาดลดลงเมื่อหัวอ่านเขียนมีการออกนอกแทร็คข้อมูลที่น้อยลง (Aruga *et al.,* 2009)

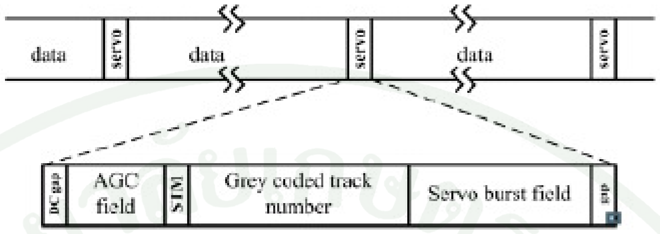
2. ตำแหน่งหัวอ่านเขียนตามกลไกการควบคุมเซอร์โว (Head Positioning Servomechanism)

2.1 ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณ (Position Error Signal, PES)

ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นนอกจากข้อมูลที่ผู้ใช้งานเขียนลงไปบนแต่ละแทร็คของแผ่นดิสก์แล้วยังมีข้อมูลของเซอร์โวรวมอยู่ในแทร็คด้วย ซึ่งมีทั้งหมด 5 ส่วนคือ DC-gap field, automatic gain control (AGC), servo timing mask (STM) field, grey coded track number field, position burst pattern field ดังภาพที่ 7 แต่ส่วนที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณนั้นมีอยู่สองส่วนคือ grey coded track number field และ position burst pattern field โดย grey coded track number field เป็นตัวระบุหมายเลขแทร็คเพื่อให้ตัวคอนโทรลทราบว่าขณะนี้หัวอ่านเขียนอยู่ที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

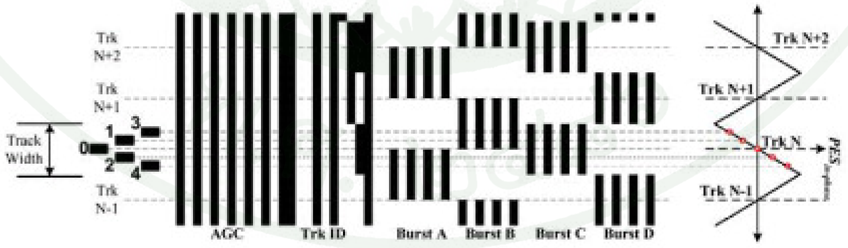
ตำแหน่งใด ส่วน position burst pattern field เป็นรูปแบบของเซอร์โวเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของหัวอ่านเขียนว่าอยู่ตำแหน่งใดโดยใช้รูปแบบการเขียนเป็นรูปแบบ A, B, C, D ตามภาพที่ 8



ภาพที่ 7 โครงสร้างของแทร็คของแผ่นดิสก์

ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

ตัวอย่างเช่น เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงานหากหัวอ่านเขียนอยู่ที่ตำแหน่งที่ 0 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของแทร็ค N สัญญาณที่อ่านได้จาก burst C จะมีค่าสูงสุด burst D จะเป็น 0 ส่วน burst A, B จะมีค่าเท่ากันแต่น้อยกว่า burst C โดยรูปแบบของสัญญาณที่อ่านได้จากตำแหน่ง 0 แสดงในภาพที่ 9 หากหัวอ่านเขียนไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ 0 สัญญาณที่อ่านได้จาก burst A, B, C, D ก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย ตามแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 8 รูปแบบสนามแม่เหล็กของ servo burst

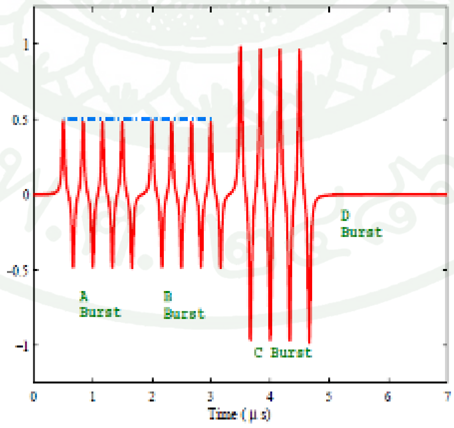
ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากลักษณะของรูปคลื่นตามที่แสดงในภาพที่ 9 และ 10 แสดงให้เห็นถึงขนาดของความแตกต่างของรูปคลื่นตามตำแหน่งของหัวอ่านเขียน ซึ่งขนาดของสัญญาณเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการวัดระยะทางของหัวอ่านเขียนกับแต่ละรูปแบบสัญญาณ ซึ่งสัญญาณนี้แปรผกผันกับความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ออกนอกแทร็ค ซึ่งเรียกว่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณ (Position Error Sensing Signal, PES) ซึ่งได้มาจากการแยกสัญญาณของรูปคลื่น burst เส้นแทร็ค ด้านล่างหรือเส้นตามแนวแทร็ค หากตำแหน่งที่หัวอ่านเขียนอยู่ห่างจากศูนย์กลางแทร็คสามารถคำนวณได้จากสัญญาณ burst เหล่านี้ ดังนั้นตำแหน่งศูนย์กลางแทร็คสามารถคำนวณจากสัญญาณ burst A เท่ากับ burst B ซึ่งความแตกต่างของขนาดสัญญาณตำแหน่ง A และ B เรียกว่า ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟส หรือ in-phase PES signal ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$PES_{in\text{-}phase} = A_A - A_B \qquad (1)$$

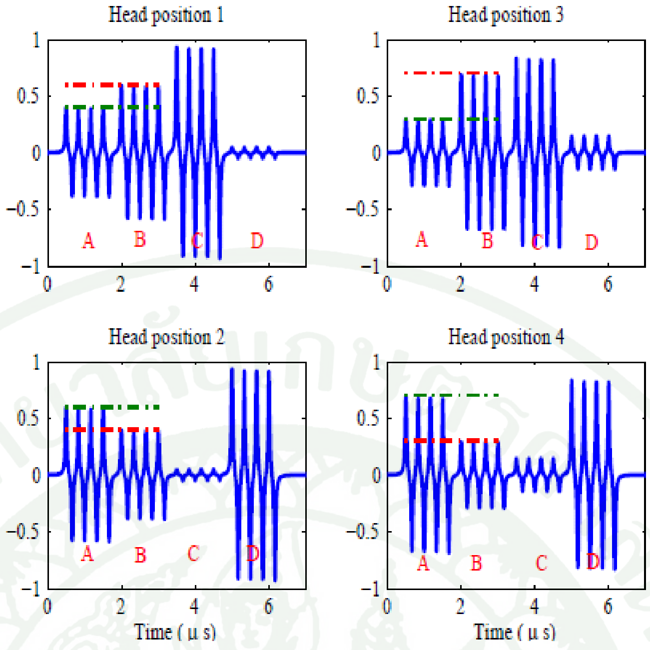
โดย A_A และ A_B เป็นขนาดของสัญญาณของ burst A และ burst B ตามลำดับ เมื่อหัวอ่านเขียนมีการเคลื่อนที่ออกจากศูนย์กลางแทร็ค ขนาดของสัญญาณหนึ่งจะมีค่ามากกว่าสัญญาณอื่น ๆ และความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟสจะไม่ใช่ศูนย์ ซึ่งขนาดของหัวอ่านจากศูนย์กลางแทร็คจะมากกว่าขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟส ซึ่งความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟสที่ตำแหน่งต่างกันของหัวอ่านนั้นจะมีความชันทั้งค่าบวกและค่าลบตามแทร็คที่อยู่ติดกัน



ภาพที่ 9 สัญญาณเซอร์โวที่ตำแหน่งศูนย์

ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 สัญญาณเซอร์โวที่ไม่ใช่ตำแหน่งศูนย์

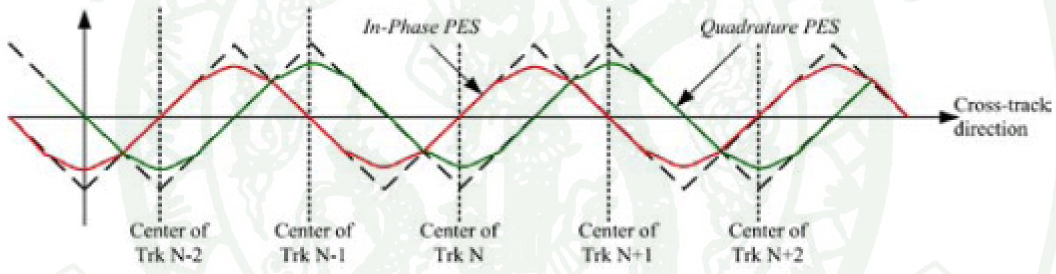
ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

ในทางอุดมคตินั้นตำแหน่งที่หัวอ่านเขียนจะอยู่ศูนย์กลางแทร็ค ขนาดของหัวอ่านเขียนควรจะเล็กกว่าความกว้างของแทร็คและถ้าหัวอ่านเขียนเคลื่อนที่ออกจากศูนย์กลางแทร็คซึ่งก็เป็นปกติที่จะเคลื่อนที่ออกจากสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งไม่ใช่ทั้งสองสัญญาณ ผลที่ได้คือการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยของหัวอ่านเขียนจะไม่มีหรือมีผลน้อยต่อขนาดของทั้งสอง burst ดังนั้น ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟสจะแสดงผลที่ระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกแทร็คที่มีขนาดใหญ่ตามที่แสดงในภาพที่ 8 ซึ่งการวัดขนาดที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงของระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกแทร็คสามารถทำได้โดยการสร้างรูปแบบสัญญาณคู่ใหม่ เช่น burst C และ burst D เช่น เมื่อหัวอ่านอยู่กึ่งกลางแทร็คจะอ่านค่าสัญญาณ burst C ได้สูงสุดและไม่สามารถอ่านค่าสัญญาณ burst D ได้ ซึ่งความแตกต่างของ C และ D นี้เรียกว่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณจากการล้ำสัญญาณแบบควอเดรเจอร์ (quadrature PES signal) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$PES_{quadrature} = A_C - A_D \quad (2)$$

โดย A_Cและ A_D เป็นขนาดของสัญญาณของ burst A และ burst B ตามลำดับ ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณจากการล้ำสัญญาณแบบควอเดรเจอร์เป็นฟังก์ชั่นของการเคลื่อนที่ออกนอกแทร็คตามที่แสดงในภาพที่ 11 ซึ่งขนาดขึ้นอยู่กับระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกแทร็ค เช่นเดียวกับความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟส สามารถประมาณสัญญาณของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณในเฟสและความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณจากการล้ำสัญญาณแบบควอเดรเจอร์จากการแปรผกผันของระยะทางระหว่างหัวอ่านเขียนกับศูนย์กลางแทร็คตามภาพที่ 11 และได้สัญญาณป้อนกลับจากเซอร์โวโดยการรวมความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณและจำนวนแทร็คจาก grey code field



ภาพที่ 11 ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณกับระยะทางระหว่างหัวอ่านเขียนกับศูนย์กลาง

ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

2.2 Repeatable and Non Repeatable Run Out

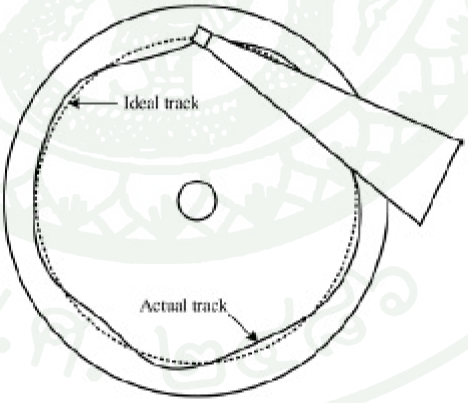
ส่วนประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเองสามารถที่จะทำให้เกิดการรบกวนได้ตามธรรมชาติจากการเคลื่อนไหวทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ตัวอย่างของการรบกวนที่เกิดขึ้น เช่น การหมุนของแผ่นดิสก์แล้วมีการส่าย โยกไปมาหรือเกิดการสั่นสะเทือนซึ่งจะทำให้แทร็คข้อมูลเคลื่อนที่ออกจากหรือเข้าใกล้กับตำแหน่งของสไลเดอร์บนหัวอ่านเขียน ตำแหน่งที่ไม่ตรงกันของศูนย์กลางแกนมอเตอร์และศูนย์กลางแผ่นดิสก์ซึ่งทำให้เกิดแทร็คข้อมูลแบบวงรี การชนกันของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบริ่งแบบลูกบอลในมอเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระทำจากการชนกัน รวมทั้งการทำงานที่มีการหมุนวนเป็นรอบเดิมของส่วนประกอบต่างๆ

จะเห็นว่าหากแทร็คข้อมูลมีหัวเขียนที่ตำแหน่งมั่นคงขณะที่แผ่นดิสก์มีการหมุน จุดที่อยู่ใต้หัวอ่านเขียนนั้นจะเป็นวงกลมที่ไม่สมบูรณ์แต่จะเป็นวงกลมแบบเป็นคลื่นๆ ตามที่แสดงในภาพที่ 12 การรบกวนที่เป็นการทำซ้ำหลายๆ รอบจะเกิดขึ้นทุกแทร็ค ส่วนการรบกวนที่ไม่เกิดการทำซ้ำนั้นจะเกิดขึ้นจากการเขียนสัญญาณบนแทร็คที่แตกต่างกัน ดังนั้นแทร็คข้อมูลที่สร้างสัญญาณเซอร์โวเป็นการรบกวนที่ไม่เกิดการทำซ้ำเพราะมีการเขียนสัญญาณเป็นบางส่วน หากตำแหน่งของหัวอ่านเขียนบนทุกๆแทร็คการเขียนเซอร์โวเคลื่อนที่แบบเป็นวงกลมตามธรรมชาติ การเบี่ยงเบนจากการเคลื่อนที่เป็นแทร็ควงกลมที่สมบูรณ์เป็นสาเหตุมาจากการรบกวนที่เป็นการทำซ้ำทางกล

ในทางกลับกันการรบกวนที่เป็นการทำซ้ำในเซอร์โวจะหายไประหว่างที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงานตามกลไกของเซอร์โว แต่การเบี่ยงเบนออกนอกแทร็คข้อมูลที่มีสาเหตุมาจากกลไกการรบกวนที่ไม่เกิดการทำซ้ำขณะที่มีการเขียนสัญญาณเซอร์โวจะยังคงปรากฏอยู่ซึ่งจะสอดคล้องกับความเร็วของสปินเดิลมอเตอร์

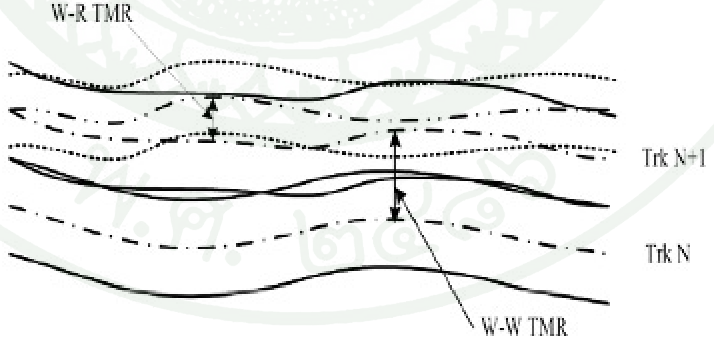


ภาพที่ 12 การเบี่ยงเบนของแทร็คข้อมูลจริงจากแทร็คที่เป็นวงกลมตามอุดมคติ

ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเบี่ยงเบนจากแทร็คอ้างอิงทำให้เกิดการออกจากความสามารถในการแสดงผลซ้ำ (Repeatable Run Out, RRO) สำหรับตำแหน่งหัวอ่านเขียนตามกลไกการควบคุมของเซอร์โว ส่วนการรบกวนที่ไม่เกิดการทำซ้ำขณะที่มีการเขียนสัญญาณเซอร์โวซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเบี่ยงเบนออกจากศูนย์กลางแทร็คข้อมูลอ้างอิงซึ่งส่งผลต่อตำแหน่งสไลเดอร์ที่เกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ ปัจจัยนี้ทำให้เกิดการความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ (Non Repeatable Run Out, NRRO) ซึ่งส่งผลต่อตำแหน่งของหัวอ่านเขียนตามกลไกการควบคุมของเซอร์โว การเบี่ยงเบนในสองแทร็คข้อมูลที่มีการเขียนสัญญาณแสดงในภาพที่ 13 โดยเส้นทึบแทนการเขียนสัญญาณเซอร์โวซึ่งหัวอ่านเขียนจะต้องเคลื่อนที่ตามเส้นนี้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความถี่ของคลื่นและการรบกวนอื่น ๆ ทำให้หัวอ่านเขียนนี้ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ตามศูนย์กลางแทร็คได้อย่างสมบูรณ์ โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของตำแหน่งหัวอ่านเขียนแทนด้วยเส้นประ นอกจากนี้แต่ละแทร็คหัวอ่านเขียนก็อาจจะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เหมือนกันและเป็นไปได้ที่แทร็คใดแทร็คหนึ่งจะไปทับแทร็คอื่นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “Squeeze” หรือ การเข้าถึงแทร็คข้อมูลที่ไม่ถูกต้องจากการเขียนสัญญาณ (Write-to-Write Track Mis-Registration, WWTMR) เมื่อหัวอ่านเขียนพยามยามที่จะไปตามศูนย์กลางแทร็ค ข้อมูลตามรูปแบบของเซอร์โว แต่เป็นการเคลื่อนที่แบบไม่มีจุดหมายรอบๆ ศูนย์กลางแทร็คเพราะว่ามีการรบกวนอื่น ๆ ด้วย การเข้าถึงแทร็คข้อมูลที่ไม่ถูกต้องระหว่างแทร็คอ้างอิงและหัวอ่านเขียนนี้เรียกว่า การเข้าถึงแทร็คข้อมูลที่ไม่ถูกต้องจากการอ่านเขียน (Write-to-Read Track Mis-Registration, WRTMR)

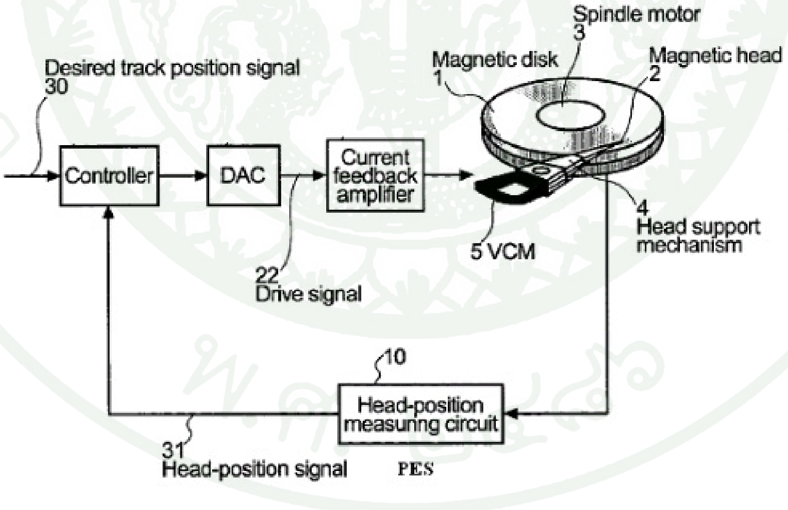


ภาพที่ 13 การเข้าถึงตำแหน่งแทร็คที่ไม่ถูกต้องจากการเขียนและอ่านสัญญาณ

ที่มา: Mamun *et al.* (2007)

เมื่อหัวอ่านเขียนไม่อยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางแทร็คข้อมูล หัวอ่านเขียนจะเริ่มจากการหา track ID ซึ่งกำหนดโดย gray code number หลังจากนั้นเมื่อพบแทร็คที่ต้องการแล้ว จึงพยายามทำให้หัวอ่านเขียนอยู่กึ่งกลางแทร็คโดยอ้างอิงตำแหน่งของหัวอ่านเขียนปัจจุบันจากค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณ จากนั้นส่วนควบคุม (Controller) จะส่งค่าดิจิตอลเพื่อแปลงเป็นอนาล็อก (Digital to Analog, DAC) ไปที่ขดลวดมอเตอร์แบบเสียง (Voice Coil Motor, VCM) เพื่อปรับให้หัวอ่านเขียนอยู่ตรงหรือใกล้เคียงกับศูนย์กลางแทร็คข้อมูลมากที่สุดจึงเริ่มอ่านหรือเขียนข้อมูล วงจรการควบคุมให้หัวอ่านเขียนของเซอร์โวแสดงในภาพที่ 14

ระบบตำแหน่งหัวอ่านเขียนมีการควบคุมสองทางโดยอันแรกคือการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนไปบนแผ่นแม่เหล็กบันทึกข้อมูล (Seek Control) และการควบคุมการรักษาตำแหน่งของหัวอ่านเขียนบนแทร็คที่ต้องการบนแผ่นแม่เหล็กบันทึกข้อมูล (Following Control) ซึ่งในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน หน้าที่หลักของระบบควบคุมคือตำแหน่งของหัวอ่านเขียนเพียงแค่ชั่วขณะ แต่ในส่วนการรักษาตำแหน่งหน้าที่หลักคือการทำงานในช่วงที่หัวอ่านเขียนอยู่ในภาวะที่นิ่งแล้ว (Atsumi *et al.,* 2008; Akagi *et al.*, 2005)



ภาพที่ 14 วงจรการควบคุมให้หัวอ่านเขียนของเซอร์โว

ที่มา: Akagi *et al*. (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การลดแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

เป้าหมายในอุตสาหกรรมการบันทึกข้อมูลในปัจจุบันคือ ความจุในการบันทึกข้อมูลต่อตารางนิ้วให้ได้มากที่สุด ซึ่งเมื่อความจุมีขนาดมากขึ้นจะทำให้การอ่านเขียนสัญญาณยากขึ้นด้วย เนื่องจากมีสิ่งรบกวนทั้งทางกลและทางไฟฟ้า สาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งคือมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ สิ่งรบกวนที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือสัญญาณรบกวนขณะที่หัวอ่านเขียนอยู่กับที่และสัญญาณรบกวนขณะที่หัวอ่านเขียนทำงาน เช่น เวลาที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟหมุนจะมีแรงสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่เกิดจากส่วนประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเอง เช่น การหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ ความไม่สมดุลของแผ่นดิสก์และชุดหัวอ่านเขียนเองในส่วนของชุดหัวอ่านเขียนแรงสั่นสะเทือนเกิดจากลมหมุนในหัวอ่านเขียนที่เหนี่ยวนำการไหลของอากาศภายในทำให้ตำแหน่งของหัวสไลเดอร์ไม่อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ดังนั้นการลดแรงลมภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากจะช่วยเพิ่มพื้นที่ความหนาแน่นของแทร็คในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ มีหลายงายวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการลดแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

กำลังลมหรือการสั่นสะเทือนเหนี่ยวนำการไหล (Flow Induce Vibration, FIV) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการลงตำแหน่งแทร็คที่ผิดบนแผ่นดิสก์ จึงมีการศึกษาการสั่นสะเทือนเหนี่ยวนำการไหลโดยการเติมก๊าซฮีเลี่ยมเข้าไปในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อไม่ให้เกิดหรือลดเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่ง จากการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของก๊าซฮีเลี่ยมและอากาศที่มีต่อการสั่นสะเทือนเหนี่ยวนำการไหล โดยตั้งสมมติฐานว่าการสั่นสะเทือนเหนี่ยวนำการไหล จะถูกกำจัดด้วยการผสมฮีเลี่ยมและอากาศด้วยการเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซฮีเลี่ยมจาก 0% ถึง 100% ซึ่งพบว่าความผิดพลาดของระยะแทร็คระหว่างแทร็คที่อยู่ติดกันเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของก๊าซฮีเลี่ยมลดลง ที่ความเข้มข้นของอากาศสูง ๆ ความผิดพลาดของระยะแทร็คที่พื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกมีการขยายตัวอย่างรุนแรงซึ่งก็มีเกิดขึ้นที่เข้มข้นของก๊าซฮีเลี่ยม 100% (Akagi *et al.*, 2005) ไม่เพียงแต่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 2.5 นิ้วหรือ 3.5 นิ้วเท่านั้นที่พบปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนเหนี่ยวนำการไหล ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาดเล็ก เช่น 1.0 นิ้วก็พบปัญหาสั่นสะเทือนเหนี่ยวนำการไหลเช่นกัน (Suriadi *et al.*, 2006)

การลดแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟก็เป็นสิ่งสำคัญ จึงได้มีการศึกษาอุปกรณ์สนับสนุนความยืดหยุ่นทางกลไกสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเป็นอุปกรณ์ที่สกัดกั้นการ

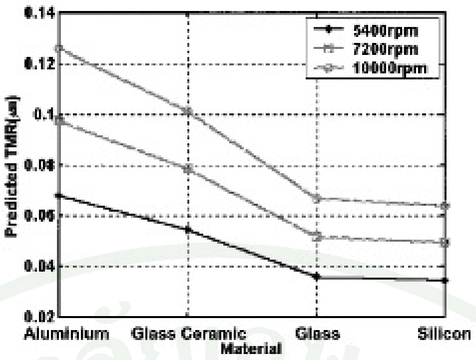
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สั่นสะเทือนภายนอกของความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งจะทำให้ความถี่รบกวนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟลดลง นอกจากนี้ความถี่สั่นพ้องของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีอุปกรณ์สนับสนุนความยืดหยุ่นทางกลไกก็ต่ำกว่าฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ไม่มีอุปกรณ์สนับสนุนความยืดหยุ่นทางกลไก และยังแก้ปัญหาเซอร์โวที่ช่วงความถี่ต่ำ ๆ ด้วย อุปกรณ์สนับสนุนความยืดหยุ่นทางกลไกมีอัตราส่วนการสกัดกั้นการรบกวนจากภายนอกที่เข้าสู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่สูง เพื่อใช้ในการลดความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เนื่องจากอัตราการส่งข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจะลดลงเมื่อค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่านเขียนเพิ่มขึ้น เนื่องจากใช้เวลาในการอ่านเขียนมากกว่าที่ต้องการเพราะว่ามีการเสื่อมสมรรถนะในการอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีอุปกรณ์สนับสนุนความยืดหยุ่นทางกลไกจะมีสมรรถนะในการอ่านเขียนมากกว่าไม่มีถึงสองเท่า (Matsuda *et al.,*2009)

3.1 การลดแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจากแผ่นดิสก์

จากลักษณะและโมเดลการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟโดยการศึกษาของ Liu *et al*. (2008) พบว่าบริเวณที่เกิดความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์มากที่สุดคือบริเวณขอบด้านนอกของแผ่นดิสก์ และความเร็วในการหมุนของแผ่นดิสก์ที่เร็วขึ้นจะทำให้ขนาดการกระพือของแผ่นดิสก์สูงขึ้นตามไปด้วย และทำให้ตำแหน่งหัวอ่านเขียนผิดพลาดไปจากตำแหน่งที่ต้องการอ่าน-เขียนข้อมูลตามไปด้วยซึ่งตรงกับการศึกษาของ Pang *et al.* (2008) นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุที่นำมาผลิตเป็นแผ่นดิสก์มีผลต่อขนาดการเข้าถึงตำแหน่งที่ผิดพลาดจากการกระพือของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วย ภาพที่ 15 แสดงขนาดการเข้าถึงตำแหน่งที่ผิดพลาดตามวัสดุของแผ่นดิสก์ที่การหมุนด้วยความเร็ว 5400, 7200, 10000 รอบต่อนาที โดยพบว่าวัสดุที่นำมาผลิตเป็นแผ่นดิสก์ที่ทำมาจากซิลิคอนจะมีขนาดการเข้าถึงตำแหน่งที่ผิดพลาดน้อยกว่าวัสดุที่นำมาผลิตเป็นแผ่นดิสก์ที่ทำมาจากแก้ว แก้วผสมเซรามิค และอลูมิเนียมตามลำดับทุกความเร็วในการหมุน (Chang *et al*., 2002)

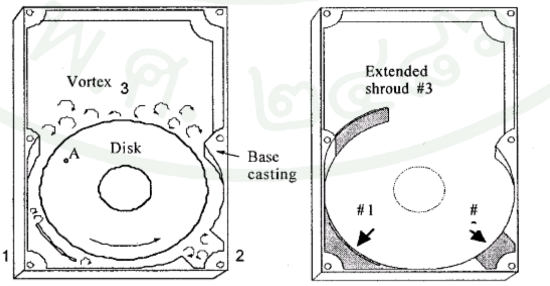
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 การพยากรณ์การเข้าถึงตำแหน่งที่ผิดพลาดตามวัสดุของแผ่นดิสก์

ที่มา: Chang *et al*. (2002)

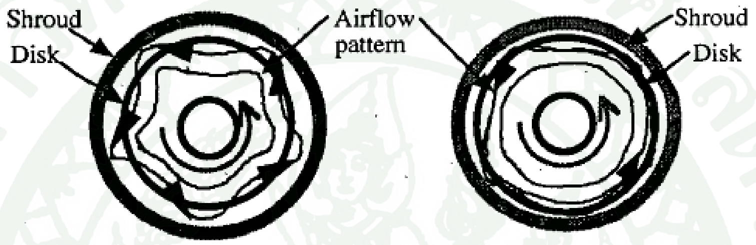
นอกจากนี้ยังพบว่าตัวฐานรองของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟก็มีผลต่อการสั่นสะเทือนจากการกระพือของแผ่นดิสก์เช่นกัน จากฐานรองของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแบบเดิมตามภาพที่ 16 (a) จะเปิดที่มุม 1 และ 2 ส่วนบริเวณที่ 3 มีลักษณะเปิดกว้างซึ่งอากาศจะสามารถไหลเข้า-ออกได้เต็มที่ เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบตัวฐานรองของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟตามหลักอากาศพลวัตโดยเพิ่มพื้นที่ตรงมุม 1 และ 2 ส่วนบริเวณที่ 3 จากที่มีลักษณะเปิดกว้างก็ออกแบบใหม่เป็นการเพิ่มเนื้อตัวฐานให้มีลักษณะโค้งบางๆ เพื่อกั้นไม่ให้อากาศจากด้านนอกบริเวณแผ่นดิสก์ไหลเข้าไปเพิ่ม ตามภาพที่ 16 (b) โดยตัวฐานรองของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ออกแบบตามหลักอากาศพลวัตสามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนจากการกระพือของแผ่นดิสก์มากกว่าตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแบบเดิมได้ถึง 50% (Heo *et al*., 2000)



ภาพที่ 16 การออกแบบตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อลดการกระพือของแผ่นดิสก์

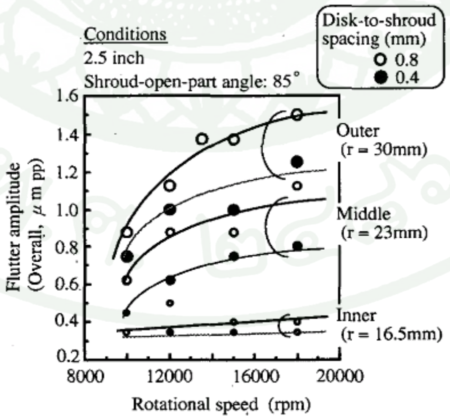
ที่มา: Heo *et al*. (2000)

ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์กับขอบของตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟก็มีผลต่อการสั่นสะเทือนจากการกระพือของแผ่นดิสก์โดย ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์กับขอบของตัวฐานมากจะมีการไหลวนของอากาศภายในที่แปรปรวนมากกว่าฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์กับขอบของตัวฐานน้อย ตามภาพที่ 17 พบว่าการสั่นสะเทือนจากการกระพือของแผ่นดิสก์จะลดลงถ้าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์กับขอบของตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟลดจาก 0.8 มิลลิเมตรเหลือที่น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร ทั้งแผ่นดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว และ 3.5 นิ้ว ทุกความเร็วรอบในการหมุนตั้งแต่ 8000 – 20000 รอบต่อนาทีตามภาพที่ 18



ภาพที่ 17 รูปแบบการไหลวนของอากาศตามระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์และขอบของตัวฐาน

ที่มา : Imai *et al.* (1999)



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนและขนาดการกระพือของแผ่นดิสก์ตามระยะระหว่างแผ่นดิสก์กับขอบของตัวฐาน

ที่มา : Imai *et al.* (1999)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้ Heo *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการลดความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์โดยการใช้ตัวเปลี่ยนทิศทางกระแสลม เพื่อการคำนวณพลวัตของไหลของอากาศและค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณ พบว่าฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีตัวเปลี่ยนทิศทางกระแสลมสามารถลดการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์ขณะหมุนได้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่า 2-3% สามารถที่จะลดความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณได้ถึง 13.6% ที่แผ่นดิสก์หมุนด้วยความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที

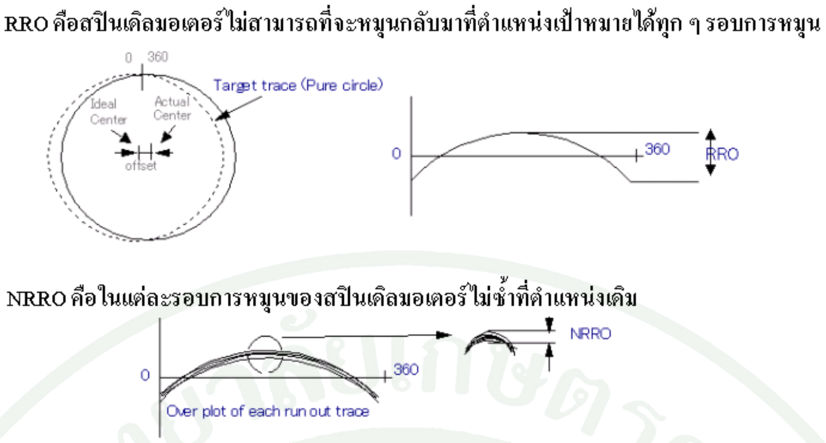
จากการศึกษาเกี่ยวกับขนาดของแผ่นดิสก์ต่อการสั่นสะเทือนของ Guo and Chen (2001) โดยทำการหมุนแผ่นดิสก์ที่ความเร็ว 4500, 5200, 6200, 7200 รอบต่อนาที ด้วยแผ่นดิสก์ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร และ 1.27 มิลลิเมตร โดยวัดการสั่นสะเทือนของดิสก์แผ่นบนด้วย พบว่าแผ่นดิสก์ที่มีความหนา 1.27 มิลลิเมตร จะมีระยะทางจากการสั่นสะเทือนจากจุดอ้างอิงของแผ่นดิสก์มากกว่าแผ่นดิสก์ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งระยะทางจากการสั่นสะเทือนที่มากกว่าหมายรวมถึงหัวสไลเดอร์สามารถที่จะออกนอกแทร็คข้อมูลได้มากตามไปด้วย

3.2 การลดแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจากสปินเดิลมอเตอร์

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีความเร็วของสปินเดิลมอเตอร์ตั้งแต่ 3000 รอบต่อนาทีถึง 15000 รอบต่อนาที ในการวัดแรงสั่นสะเทือนของสปิเดิลมอเตอร์มักจะคิดเป็นความถี่ 1 รอบการหมุน ความเร็วของสปินเดิลมอเตอร์ตั้งแต่ 7200 รอบต่อนาที ความถี่มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (Hz) ดังนั้นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีความถี่ต่อ 1 รอบการหมุนเท่ากับ 7200/60 เท่ากับ 120 Hz ภาพที่ 19 แสดงลักษณะของ RRO และ NRRO ของสปินเดิลมอเตอร์

พารามิเตอร์ที่สำคัญของสปินเดิลมอเตอร์คือ สปินเดิลมอเตอร์ไม่สามารถที่จะหมุนกลับมาที่ตำแหน่งเป้าหมายได้ทุก ๆ รอบการหมุนจากการหมุน 1 รอบ (Repeatable Run Out, RRO) และอีกพารามิเตอร์คือ ในแต่ละรอบการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ไม่ซ้ำที่ตำแหน่งเดิม (Non Repeatable Run Out, NRRO)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

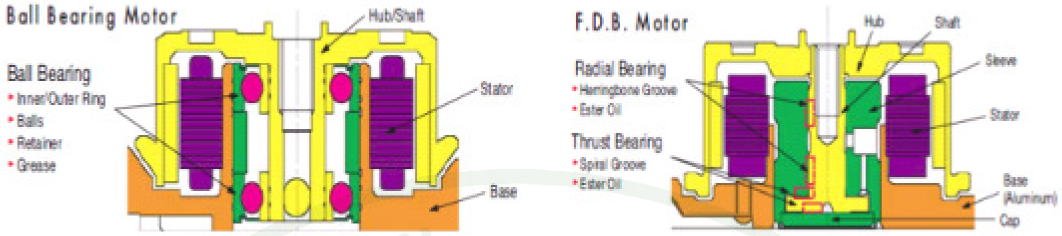


ภาพที่ 19 ลักษณะของ RRO และ NRRO ของสปินเดิลมอเตอร์

ที่มา : บริษัทกรณีศึกษา (2553)

มอเตอร์ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีการจัดแบ่งตามประเภทการออกแบบกลไกการหมุน ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภทคือ (1) มอเตอร์แบบบอลแบริ่ง (Ball bearing motor, BB motor) เป็นมอเตอร์ที่ประกอบด้วยตลับลูกปืน (ball bearing) 2 ตัว เป็นตลับลูกปืนแบบธรรมดา ประกอบด้วยลูกบอล (balls) และลู่วิ่งสัมผัส (contacting bearing raceways) ซึ่งการสัมผัสกันระหว่างโลหะ-โลหะก่อให้เกิดระบบการหมุนที่มีความฝืดสูง โดยแผ่นดิสก์จะถูกยึดติดบนสปินเดิลมอเตอร์ภายในไดร์ฟ (2) มอเตอร์แบบของเหลว (Fluid Dynamics Bearing, FDB) เป็นมอเตอร์ที่แตกต่างจากมอเตอร์แบบบอลแบริ่งอย่างสิ้นเชิงในเรื่องของการออกแบบซึ่งจะประกอบด้วย Hydrodynamic bearing 2 หน่วย โดยเกิดจากการประกอบกันระหว่าง 1 หน่วยของ shaft & thrust-plate กับ 1 sleeve และมีการเติมสารหล่อลื่นเข้าไปในช่องว่างของแบริ่งเป็นปริมาณระดับไมโครลิตร ทำให้สารหล่อลื่นนี้จะมีความหนาระดับไมครอน (μm) แบริ่งนี้มีการออกแบบผิวด้านในให้มีลายเป็นบั้งๆ คล้ายตัว V ซ้อนกันหรือร่องลายรูปแบบอื่นเพื่อให้เกิดการทำงานที่เสถียรของมอเตอร์ โครงสร้างสปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลและแบริ่งของเหลวแสดงในภาพที่ 20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(a) ของสปินเดิลมอเตอร์แบบบอลแบริ่ง (b) ของสปินเดิลมอเตอร์แบบแบริ่งของเหลว

ภาพที่ 20 โครงสร้างสปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลและแบริ่งของเหลว

ที่มา : บริษัทกรณีศึกษา (2553)

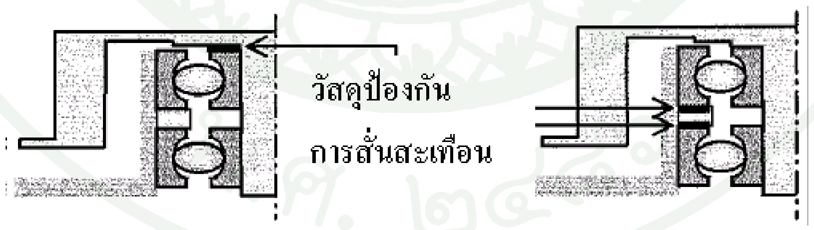
ปัจจุบันมีการเปลี่ยนมาใช้สปินเดิลมอเตอร์แบบของเหลว (Fluid Dynamics Bearing, FDB) แทนการใช้สปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล (Ball bearing) เพื่อช่วยลดปัญหาเรื่องแบริ่งของสปินเดิลเสียหายหากเกิดแรงกระแทกจากภายนอก ทั้งในแนวราบและแนวดิ่งแล้วไปกระแทกกับกรอบใส่บอลทำให้ลูกบอลและกรอบเสียรูปได้ จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุเป็นของเหลวแทน โดยหลักการทางฟิสิกส์ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบบอลแบริ่งด้อยกว่ามอเตอร์แบบของเหลวทั้งด้านความจุข้อมูล, เสียงรบกวน, การกระแทกอย่างรุนแรง, และความเร็วของการหมุน

ประสิทธิภาพในด้านความจุข้อมูล มอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลมีลักษณะการหมุนที่มีโอกาสสูงต่อการหลุดออกจากแนวการหมุนของสปินเดิลฮับซึ่งเป็นผลมาจากพื้นผิวที่ไม่สมบูรณ์ในการออกแบบแบริ่งแบบลูกบอลนั่นเอง โดยข้อจำกัดนี้รู้จักกันดีในชื่อของ ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ หรือ Non Reapeatable Run Out (NRRO) ส่วนการออกแบบมอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวนั้นไม่มีการสัมผัสกันของผิวโลหะ-โลหะ มอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวจะช่วยลดผลกระทบจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำลงได้มาก และข้อจำกัดของค่าความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำนี้เอง ทำให้เกิดคำถามว่า “ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 1 ตัว จะสามารถเก็บข้อมูลหรืออัดแน่นข้อมูลได้มากเท่าไหร่” ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถรองรับความหนาแน่นแทร็ค (Track density) และความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Area density) ที่เพิ่มขึ้นได้ดีกว่ามอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล เพราะมอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวมีแนวโน้มค่าความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่น้อยกว่ามอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล (Miwa *et al.,* 2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสิทธิภาพในด้านเสียงรบกวน (Acoustics) โดยระดับเสียงรบกวนที่ต่ำลงได้กลายมาเป็นลักษณะสำคัญในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นในกลุ่มผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อผู้บริโภค (Consumer Electronics Products) มอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวมีระดับเสียงรบกวนต่ำลงกว่ามอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลเป็นอย่างมาก เพราะไม่มีกลไกการสัมผัสกันระหว่าง drive housing กับแนวการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ อีกทั้งสารหล่อลื่นในมอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวยังเป็นเสมือนตัวช่วยลดระดับเสียง ซึ่งจะส่งผลต่อระดับการควบคุมเสียงรบกวนในอนาคตด้วย

ประสิทธิภาพในด้านการกระแทกอย่างรุนแรง มอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวมีความต้านทานการกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีกว่ามอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล เนื่องจากภายหลังจากเกิดการกระแทกอย่างรุนแรงคือ พื้นที่สัมผัสเล็กๆ ระหว่าง ball กับ raceway ในมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลอาจได้รับความเสียหาย ซึ่งส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของระดับเสียงรบกวนและค่าความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ แต่หลักการในมอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวระหว่าง shaft กับ sleeve นั้น ช่วยลดแรงสัมผัสได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสารหล่อลื่น (Lubricant film) ในมอเตอร์แบบแบริ่งของเหลว ยังช่วยลด/ซับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุป้องกันการสั่นสะเทือนภายในสปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลโดยใส่ด้านบนและบริเวณช่องระหว่างแบริ่งบนและล่างตามภาพที่ 21 พบว่าการใส่ตัวป้องกันการสั่นสะเทือนที่ด้านบนของแบริ่งจะมีประสิทธิภาพในการลดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่ดีกว่าการใส่ตัวป้องกันการสั่นสะเทือนบริเวณช่องระหว่างแบริ่งบนและล่างเพียงอย่างเดียว (Jang *et al*., 2000)



(a) ด้านบนของแบริ่ง (b) บริเวณช่องระหว่างแบริ่งบนและล่าง

ภาพที่ 21 ตำแหน่งการใส่วัสดุป้องกันการสั่นสะเทือนภายในสปินเดิลมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล

ที่มา : Jang *et al*. (2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสิทธิภาพในด้านความเร็วในการหมุน มอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอลจะเริ่มมีปัญหาในการหล่อลื่นและความร้อนสูงเกินไป ถ้ามีการหมุนในระดับความเร็วสูง และเป็นผลให้อายุการใช้งานลดลง แต่การที่มอเตอร์แบบแบริ่งของเหลวนั้นไม่มีแรงเสียดทานระหว่างโลหะ-โลหะ ย่อมหมายถึงมอเตอร์ว่าจะสามารถหมุนด้วยความเร็วที่สูงกว่าและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแบบมอเตอร์แบริ่งแบบลูกบอล

3.3 การลดแรงสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจากชุดหัวอ่านเขียน

Nakamura *et al*. (2008) ได้ทำการศึกษาอุปกรณ์ที่แก้ปัญหาตำแหน่งที่ผิดพลาดของหัวอ่านเขียนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนทางกลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเอง ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความเร่งที่เกี่ยวกับการหมุนโดยใช้ระบบอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็ก การสั่นสะเทือนของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเกิดจากการหมุนและการเคลื่อนไหวของส่วนต่างๆ การเคลื่อนที่นี้ถูกวัดโดยเซนเซอร์ที่มีความแปรปรวนน้อย การสั่นสะเทือนจากการหมุนสามารถตรวจจับและวัดออกมาเพื่อที่จะสร้างสัญญาณป้อนกลับไปที่วงจรขดลวดแบบเสียงเพื่อรักษาตำแหน่งของหัวอ่านเขียนให้ถูกต้อง การสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์, แกนตัวขับเร้า, แขนจับหัวอ่านเขียน, และแกนสปินเดิลมอเตอร์ การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเหล่านี้ทำให้สมรรถนะการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟลดลง ทำให้เวลาในการทำงานที่เพิ่มขึ้น, ความผิดพลาดในการเขียนข้อมูลบนแทร็ค อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีรอยขีดข่วนบนดิสก์

ชุดหัวอ่านเขียนส่วนใหญ่แขนจับตัวขับเร้าจะมีรูในการรักษาน้ำหนักให้สมดุล ดังนั้นแรงเฉื่อยของแขนจับสามารถที่จะควบคุมได้และทำให้มีความเร็วสูงในการเข้าถึงตำแหน่ง จากการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างการไหลของอากาศในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่น 3.5 นิ้วหมุนด้วยความเร็วรอบ 10,033 รอบต่อนาทีเพื่อเปรียบเทียบการไหลของอากาศรอบ ๆ แขนจับที่มีรูกับไม่มีรูรักษาน้ำหนักให้สมดุลตรงบริเวณฐานชุดหัวอ่านเขียน โดยวัดการสั่นสะเทือนของแขนจับทั้งสองประเภท พบว่ากระแสลมที่หมุนวนที่เกิดจากแขนจับแบบมีรูมีขนาดที่ใหญ่กว่าแขนจับแบบไม่มีรูรักษาน้ำหนักให้สมดุล เนื่องจากการไหลของลมนั้นไหลออกจากรูตรงแขนจับ ลมหมุนวนนี้เป็นแหล่งกำเนิดตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียน ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของฐานชุดหัวอ่านเขียนที่มีรูรักษาน้ำหนักให้สมดุล (a) และไม่มีรูรักษาน้ำหนักให้สมดุล (b) ตามลำดับ (Tsuda *et al.*,2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

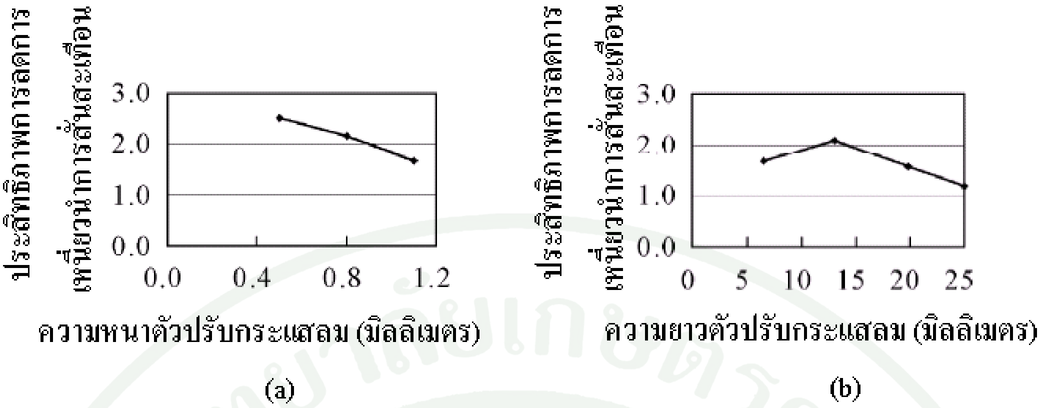
(a) มีรูรักษาน้ำหนักให้สมดุล (b) ไม่มีรูรักษาน้ำหนักให้สมดุล

ภาพที่ 22 ลักษณะของฐานชุดหัวอ่านเขียนที่มีผลต่อกระแสลมที่หมุนวนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ที่มา: Tsuda *et.al* (2003)

จากการศึกษาเพื่อลดการไหลแบบเหนี่ยวนำการสั่นสะเทือนด้วยการลดอัตราการไหลรอบ ๆ ชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในการทดลองเป็นรุ่นงาน 5 แผ่นดิสก์ เส้นผ่านศูนย์ผ่านกลาง 84 มิลลิเมตร หมุนด้วยความเร็วรอบ 10025 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์แต่ละแผ่นเท่ากับ 1.9 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยเปลี่ยนความหนาและความยาวของตัวปรับกระแสลมที่ประกอบอยู่ระหว่างแผ่นดิสก์และวัดขนาดการสั่นสะเทือนของสไลเดอร์ด้วยเลเซอร์ดอปเปอร์ไวโบรมิเตอร์ (Laser Doppler Vibrometer, LDV) โดยรูปร่างมาตรฐานของตัวปรับกระแสลมมีความหนาของครีบแต่ละอัน ความยาวจากส่วนปลายของตัวปรับกระแสลมถึงรัศมีด้านนอกของแผ่นดิสก์เท่ากับ 42 มิลลิเมตร หนา 1.1 มิลลิเมตรและยาว 19.8 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของตัวปรับกระแสลมจาก 0.5, 0.8 และ 1.1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวปรับกระแสลมจาก 6.5, 13.0, 19.8 และ 25.0 มิลลิเมตร พบว่าประสิทธิภาพของตัวปรับกระแสลมจะลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นและมีการใช้พลังงานที่สูงขึ้นด้วย โดยสรุปคือประสิทธิภาพของตัวปรับกระแสลมที่มีครีบบางจะดีกว่าครีบหนา และประสิทธิภาพของตัวปรับกระแสลมจากการเปลี่ยนความยาวให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ความยาว 13.0 มิลลิเมตร ถ้าตัวปรับกระแสลมยาวกว่า 13.0 มิลลิเมตร มีการใช้พลังงานจะสูงขึ้น อัตราการไหลก็จะลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของตัวปรับกระแสลมลดลง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความยาวของตัวปรับกระแสลมที่ใกล้เคียงกับความยาวของแขนจับภายในแผ่นดิสก์เป็นค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดตามที่แสดงในภาพที่ 23 (Hirono *et al.,* 2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพการลดการไหลเหนี่ยวนำการสั่นสะเทือนตามความหนาและความยาวของตัวปรับกระแสลม

ที่มา: Hirono *et.al* (2004)

การเลื่อนตำแหน่งของหัวอ่านเขียนเนื่องจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์ซึ่งสามารถลดแรงสั่นสะเทือนได้โดยการประกอบหัวอ่านเขียนที่เคลื่อนที่ได้ไม่เพียงแต่การอ่านเขียนสัญญาณในแนวตั้งกับแผ่นดิสก์แต่ยังสามารถทำการการอ่านเขียนสัญญาณในแนวนอนของแทร็ค รวมทั้งการกำหนดมุมเอียงในการโค้งขึ้น-ลงบนแผ่นดิสก์ของหัวอ่านเขียนที่ประมาณ 2.0μA° จะสามารถลดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณได้อย่างมีนัยสำคัญจากกระบวนการเขียนสัญญาณเซอร์โว (Oh *et al*., 2005)

Kazemi (2008) ได้ทำการศึกษาปัญหาการไหลที่เกิดการสั่นสะเทือนออกนอกแทร็คของสไลเดอร์ในดิสก์ไดรฟ์ซึ่งได้จำลองในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที ใช้ซอฟต์แวร์ไหลแบบจำลองชื่อ FLUENT ทำให้มีอากาศพลศาสตร์ที่เกิดแรงจากส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดหัวอ่านเขียนมีการจำลองชุดหัวอ่านเขียนด้วย Finite Element โดยการใช้วอฟแวร์ ANSYS วิเคราะห์การเคลื่อนที่ออกนอกแทร็คจากการสั่นสะเทือนของสไลเดอร์ที่มีสาเหตุจากอากาศพลศาสตร์จากส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดหัวอ่านเขียนสามารถสรุปได้ว่าแขนจับของชุดหัวอ่านเขียนเป็นส่วนที่มีความผันผวนของอากาศพลศาสตร์มากที่สุด อย่างไรก็ตามฐานของบริเวณที่รับน้ำหนักของหัวอ่านเขียนก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจนจากสไลเดอร์เนื่องจากการไหลวนเกิดขึ้นจากบริเวณด้านข้างของพื้นที่บริเวณที่รับน้ำหนักของหัวอ่านเขียน ดังนั้นจะเห็นว่าการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆของชุดหัวอ่านเขียนเองก็มีส่วนสำคัญต่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การสั่นสะเทือน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Shimizu *et al.* (2003) ที่เกี่ยวกับการจำลองความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งการเข้าถึงข้อมูลจากการสั่นสะเทือนจากการเหนี่ยวนำของอากาศของหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1.1 ส่วนประกอบสำหรับประกอบเป็นชุดหัวอ่านเขียนขนาด 2.5 นิ้ว ได้แก่ ฐานชุดหัวอ่านเขียน, สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล, หัวอ่านเขียน, และสกรู

1.2 ส่วนประกอบสำหรับประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 2.5 นิ้ว

2. อุปกรณ์ในการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

2.1 อุปกรณ์ประกอบชุดหัวอ่านเขียน

2.1.1 ไขควงไฟฟ้าสำหรับการประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน ผู้ผลิต TECHNART รุ่น SG-1200A-SDw แสดงตามภาพที่ 24

ภาพที่ 24 ไขควงไฟฟ้า

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.2 อุปกรณ์ควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของไขควงไฟฟ้า ผู้ผลิต TECHNART รุ่น FED III ของโรงงานกรณีศึกษา แสดงตามภาพที่ 25

ภาพที่ 25 อุปกรณ์ควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของไขควงไฟฟ้า

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

2.2 อุปกรณ์การประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเอนโคลสเซอร์ขนาด 2.5 นิ้ว

2.3 อุปกรณ์สำหรับหยอดกาวในชุดหัวอ่านเขียน แสดงในภาพที่ 26

ภาพที่ 26 อุปกรณ์สำหรับหยอดกาวในชุดหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 เครื่องอบกาวด้วยแสงอัตราไวโอเลต แสดงในภาพที่ 27

ภาพที่ 27 เครื่องอบกาวด้วยแสงอัตราไวโอเลต

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

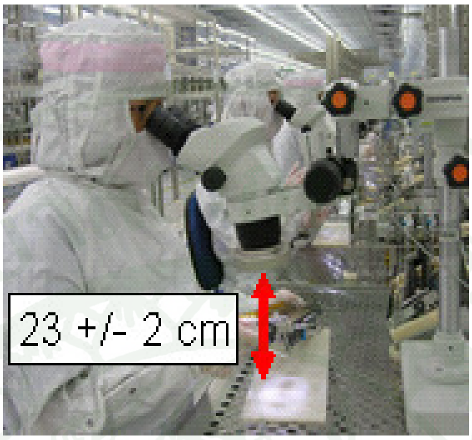
2.5 อุปกรณ์การวัดแรง (Force Measurement) ผู้ผลิต IMADA รุ่น DS2-200N แสดงในภาพที่ 28

ภาพที่ 28 อุปกรณ์การวัดแรงสำหรับวัดแรงกดบริเวณแผ่นอลูมิเนียมของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.6 กล้องจุลทรรศน์ ผู้ผลิต Olympus รุ่น SZ4045ESD ตรวจสอบชุดหัวอ่านเขียน ที่กำลังขยาย 10 เท่า ด้วยระยะห่าง 23 +/- 2 เซนติเมตร แสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 กล้องจุลทรรศน์สำหรับตรวจสอบชุดหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

3. อุปกรณ์การวิเคราะห์ผล

3.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ CPU Intel 2.40GHz, Ram 2 GB, HDD 250GB, 14.1 LCD

3.2 โปรแกรมระบบปฏิบัติการ Window XP Professional

3.3 โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab 15

3.4 โปรแกรมวิเคราะห์ขนาดตำแหน่งของสัญญาณความผิดพลาดและการวิเคราะห์การเบี่ยงเบนจากศูนย์กลางแทร็คข้อมูลของหัวอ่านเขียน ชื่อโปรแกรม ptcsrv01

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ (Non Repeatable Run Out, NRRO) มีหลายสาเหตุ เช่น การกระแทกและการสั่นสะเทือนจากภายนอก, การหมุนที่ไม่ได้รอบของสปินเดิลมอเตอร์, การไหลวนของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากการกระพือของแผ่นดิสก์ (Disk flutter) การกระพือของจากหางของชุดหัวอ่านเขียน (Tail flutter) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการที่ศึกษาในงานวิจัยเป็นความผิดพลาดจากการไม่สามารถแสดงผลซ้ำที่เกิดจากชุดหัวอ่านเขียน สันนิษฐานว่าสาเหตุเกิดจากการสั่นสะเทือนจากการกระพือของหัวอ่านเขียนในระหว่างที่มีการเคลื่อนที่เข้า-ออกแผ่นดิสก์ โดยเลือกงานที่ทดสอบไม่ผ่านจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ รุ่นงาน 4 หัวอ่านเขียน บริษัทกรณีศึกษามีการเรียกชื่อหมายเลขหัวอ่านเขียนตามตำแหน่ง คือ หัวอ่านเขียนที่อยู่ใกล้กับฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเรียกว่า หัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์ (HD#0) ถัดขึ้นมาเป็นหัวอ่านเขียนหมายเลขหนึ่ง (HD#1), หัวอ่านเขียนหมายเลขสอง (HD#2) และหัวอ่านเขียนหมายเลขสาม (HD#3) ตามลำดับ มีขั้นตอนดังนี้ วิธีการดำเนินการวิจัย ที่ใช้ในโครงการวิทยานิพนธ์ มีรายละเอียดขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาลักษณะงานเสียของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่เกิดจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ โดยการทำการวิเคราะห์งานเสียทางไฟฟ้าเพื่อวัดขนาดตำแหน่งของสัญญาณความผิดพลาดในการเข้าถึงตำแหน่งสัญญาณและค่าความถี่ที่เกิดขึ้น รวมทั้งศึกษาความเสียหายทางกลของชุดหัวอ่านเขียนที่ถอดออกจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่เสียด้วยอาการจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำว่ามีลักษณะแตกต่างจากชุดหัวอ่านเขียนที่ยังไม่ประกอบในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอย่างไร

1.1 ตรวจสอบหาความถี่และขนาดของการเกิดจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีโปรแกรมจากบริษัทกรณีศึกษา จากความก้าวหน้าทางเทคนิคในการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ทำให้ปัจจุบันสามารถตรวจพบความเสียหายที่ก่อตัวในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแต่เนิ่นๆได้ โดยอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณความสั่นสะเทือนจากในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ แสดงผลการวัดด้วยกราฟซึ่งแกนแนวนอนเป็นความถี่และแกนแนวตั้งเป็นค่าขนาดของตำแหน่งของสัญญาณความผิดพลาด (Position Error Signal, PES)

1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของหัวอ่านเขียน (Off Track Write Head Instability) โดยการนำฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ผ่านการวิเคราะห์ขนาดตำแหน่งของสัญญาณความผิดพลาดมาวิเคราะห์ว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตำแหน่งของสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเบี่ยงเบนไปจากค่ามาตรฐานที่กำหนดมากน้อยเพียงใด โดยทำการระบุไซลินเดอร์หรือตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามแนวรัศมีของหัวอ่านเขียนบนแผ่นดิสก์ที่ต้องการตรวจสอบได้ แสดงผลการวัดด้วยกราฟซึ่งแกนแนวนอนเป็นไซลินเดอร์ของแผ่นดิสก์และแกนแนวตั้งเป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งหัวอ่านเขียนที่วัดเทียบกับจุดกึ่งกลางของสไลเดอร์ที่เคลื่อนที่บนแผ่นดิสก์

1.3 การตรวจสอบลักษณะความเสียหายทางกลของชุดหัวอ่านเขียนด้วยสายตาผ่านกล้องจุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกับชุดหัวอ่านเขียนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

2. ศึกษากระบวนการผลิตในพื้นที่ของการประกอบชุดหัวอ่านเขียนที่คาดว่าน่าจะมีผลต่อความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากชุดหัวอ่านเขียน ดังนี้

2.1 ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่

2.1.1 ค่าแรงบิดของไขควงไฟฟ้าในการประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน

2.1.2 ค่าความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้าในการประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน

2.2 ผลของปัจจัยที่ต้องการศึกษา ได้แก่

2.2.1 อัตรางานทดสอบไม่ผ่านด้วยอาการความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำด้วยรหัสงานเสีย 4887 และ 8020

2.2.2 อัตราของเสียจากฐานชุดหัวอ่านเขียนเนื่องจากมีสกรูหักจากประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ศึกษากระบวนการผลิตในพื้นที่ของการประกอบฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์ที่คาดว่าน่าจะมีผลต่อความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากชุดหัวอ่านเขียน ดังนี้

3.1 ศึกษาลักษณะทางกลของชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบในพื้นที่การประกอบชุดหัวอ่านเขียนที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า

3.2 ศึกษาลักษณะของชุดหัวอ่านเขียนหลังจากออกจากเครื่องล้างแบบสลายประจุไฟฟ้าเพื่อทำความสะอาดเนื่องจากชุดหัวอ่านเขียนประกอบในห้องสะอาดที่ควบคุมปริมาณฝุ่นไม่เกิน 10,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตเมื่อนำมาใช้งานในห้องสะอาดที่ควบคุมปริมาณฝุ่นไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต้องล้างทำความสะอาดก่อน

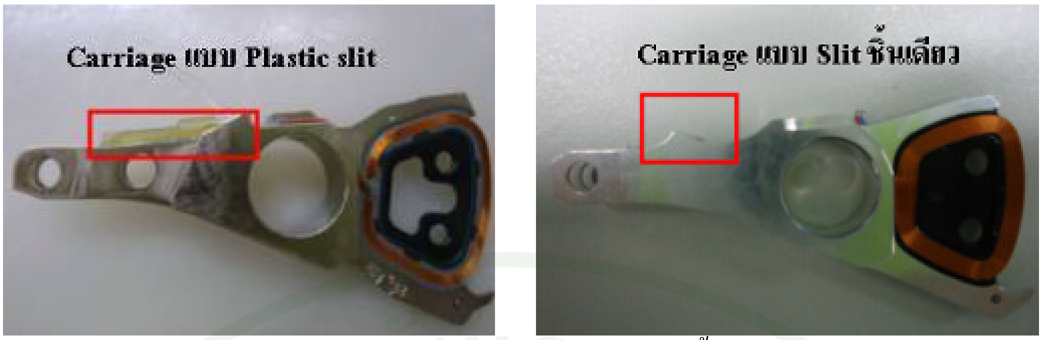
3.3 ศึกษาลักษณะของชุดหัวอ่านเขียนหลังจากผ่านการประกอบพิวอท

3.4 ศึกษาลักษณะของชุดหัวอ่านเขียนหลังจากพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเพื่อยึดส่วนหางของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน

4. ศึกษาการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสส่วนหางของหัวอ่านเขียนและฐานชุดหัวอ่านเขียนโดยการหยอดกาว เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษามีการเปลี่ยนแปลงแบบของฐานชุดหัวอ่านเขียนเพื่อลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนจึงยกเลิกการใช้ช่องสำหรับใส่หางของหัวอ่านเขียนแบบพลาสติกมาเป็นช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนแบบชิ้นเดียว แสดงในภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างฐานชุดหัวอ่านเขียนมีผลคือ พื้นที่สัมผัสระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนน้อยลง จึงต้องออกแบบกระบวนการผลิตให้สอดคล้องโดยการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสส่วนหางของหัวอ่านเขียนและฐานชุดหัวอ่านเขียนโดยการหยอดกาว

4.1 ศึกษาและวิเคราะห์การใช้กาวยึดระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับฐานชุดหัวอ่านเขียน เพื่อลดการสั่นสะเทือนของชุดหัวอ่านเขียน โดยพิจารณาตำแหน่งของกาวที่หยอดบนชุดหัวอ่านเขียนแสดงในภาพที่ 31 โดยวงกลมแทนตำแหน่งการหยอดกาว

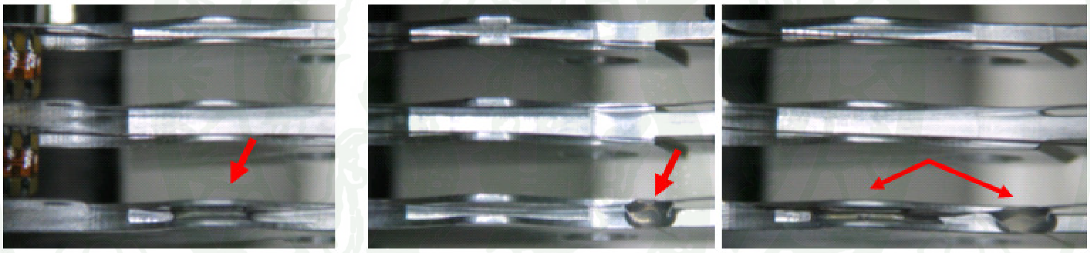
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(a) แบบพลาสติก (b) แบบเป็นชิ้นเดียวกับฐานชุดหัวอ่านเขียน

ภาพที่ 30 ฐานชุดหัวอ่านเขียนที่มีช่องสำหรับใส่หางของหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)



(a) (b) (c)

ภาพที่ 31 ตำแหน่งการหยอดกาวเพื่อยึดส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับฐานชุดหัวอ่านเขียน
(a) ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน, (b) ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน
(c) ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและฐานชุดหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

4.2 เปรียบเทียบขนาดของความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากชุดหัวอ่านเขียนจากการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ประกอบจากชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวยึดระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับฐานชุดหัวอ่านเขียน กับชุดหัวอ่านเขียนปกติที่ไม่มีการหยอดกาวโดยทำการตั้งสมมติฐานการทดลองโดยใช้ Two Sample-t Test ในการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าขนาดของความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่ทดสอบได้และเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันหรือไม่

ภายหลังจากการทดสอบโดยวิธี Two Sample-t Test แล้ว หากพบว่าขนาดของความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำมีความแตกต่างระหว่างการหยอดกาวยึดระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับฐานชุดหัวอ่านเขียนกับการไม่หยอดกาว จากนั้นทำการตรวจสอบสมมติฐานว่าตำแหน่งของการหยอดกาวมีผลต่อขนาดของความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำหรือไม่ โดยการใช้การวิเคราะห์ด้วย One Way ANOVA

5. ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการนำชุดหัวอ่านเขียนจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ทดสอบไม่ผ่านจากความความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อป้องกันไม่ให้ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเสียหายด้วยลักษณะเดิมอีก

5.1 ออกแบบการทดลองและประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ขนาดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำก่อนและหลังการแก้ไขมีความแตกต่างกันหรือไม่ ตามสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานหลัก (H_0) : ขนาดความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่เกิดจากชุดหัวอ่านเขียน
ก่อนและหลังการแก้ไขไม่มีความแตกต่างกัน
สมมติฐานรอง (H_1) : ขนาดความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่เกิดจากชุดหัวอ่านเขียน
ก่อนและหลังการแก้ไขมีความแตกต่างกัน

5.2 นำวิธีการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนที่ทดสอบไม่ผ่านจากความผิดพลาดจากการในการแสดงผลซ้ำที่ดีที่สุดมาทำการทดลองเพิ่มด้วยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตและตรวจสอบอัตรางานเสียด้วยลักษณะเดิม

6. ทดลองนำแต่ละวิธีการจากการทดลองมาปฏิบัติในการผลิตงาน

7. สรุปผลการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

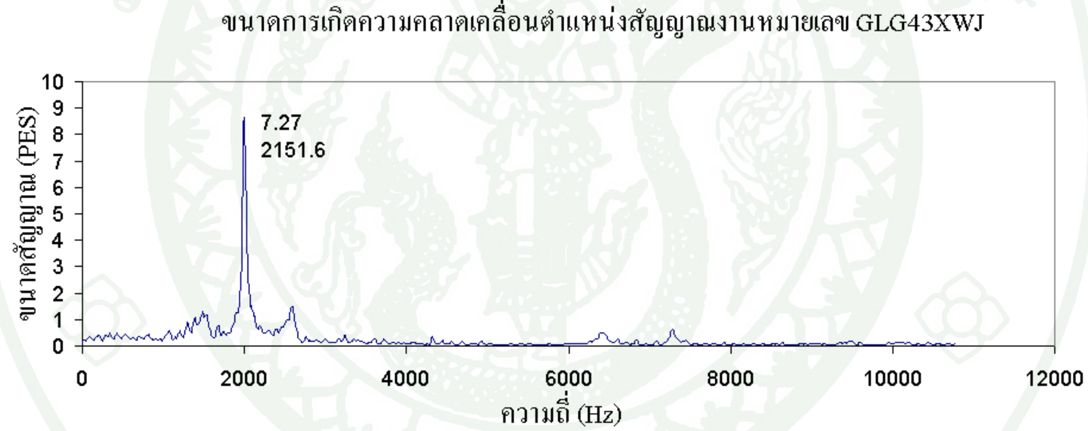
ภาพที่ 32 แสดงแผนงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ผลการศึกษาลักษณะของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่เกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ

1.1 จากข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 300 ตัว พบว่าขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่วิเคราะห์ได้มากกว่าค่าที่กำหนดของรุ่นงานในช่วงความถี่ประมาณ 1.5 – 3.3 kHz ภาพที่ 33 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ ขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่ความถี่ 2,151.6 Hz มีขนาดความผิดพลาดของสัญญาณตำแหน่งเท่ากับ 7.27 PES เนื่องจากกราฟมีขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงขึ้นมามากกว่าที่ความถี่ในช่วงอื่น ๆ ส่วนมากแล้วหัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์จะมีขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณมากกว่าค่าที่กำหนดของรุ่นงาน แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 33 ขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่วิเคราะห์จากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์หมายเลขหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณมากกว่าค่าที่กำหนด

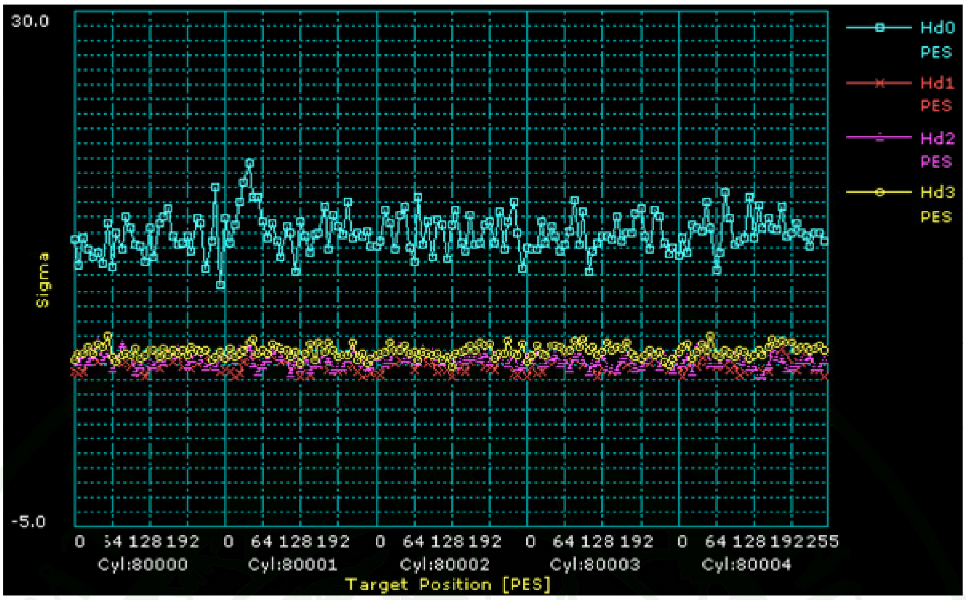
หมายเลขหัวอ่าน-เขียน	จำนวนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณมากกว่าค่าที่กำหนด	เปอร์เซ็นต์
0	262	87.67%
1	12	4.00%
2	8	2.67%
3	17	5.67%

1.2 จากนั้นวิเคราะห์เสถียรภาพของหัวอ่านเขียน (Off Track Write Head Instability) โดยการนำฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ผ่านการวิเคราะห์หาขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณมาวิเคราะห์ว่าขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่เกิดขึ้นเบี่ยงเบนไปจากค่าจุดศูนย์กลางของแทร็คข้อมูลมากน้อยเพียงใด โดยทำการระบุไซลินเดอร์หรือตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามแนวรัศมีของหัวอ่านเขียนบนแผ่นดิสก์ที่ต้องการตรวจสอบได้ ซึ่งผลที่ได้คือหัวอ่านเขียนที่มีขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงก็จะมีขนาดการเบี่ยงเบนจากจุดศูนย์กลางของแทร็คข้อมูลสูงกว่าหัวอ่านเขียนหมายเลขอื่น ภาพที่ 34 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์การเบี่ยงเบนออกนอกแทร็คข้อมูลของหัวอ่านเขียน

1.3 จากนั้นทำการถอดชุดหัวอ่านเขียนออกจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และนำชุดหัวอ่านเขียนไปตรวจสอบลักษณะความเสียหายทางกลของหัวอ่านด้วยสายตาผ่านกล้องจุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางกลของหัวอ่านเขียนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ดังนี้

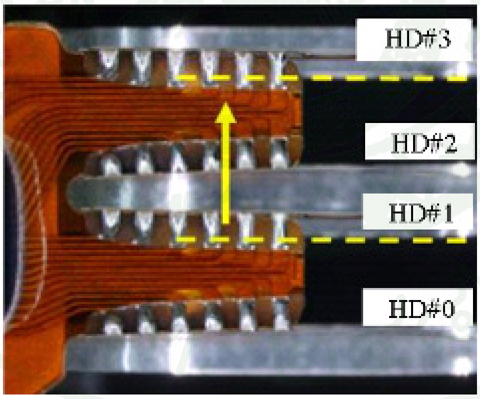
1.3.1 สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล มีการเอียงตัวไปทางด้านซ้ายมือหรือเอียงไปด้านหัวอ่านเขียนหมายเลข 3 (HD#3) เท่ากับ 69.33 %, เอียงไปทางด้านขวามือหรือเอียงไปด้านหัวอ่านเขียนหมายเลข 0 (HD#0) เท่ากับ 20.00% และ สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลอยู่ในตำแหน่งเดิมเท่ากับ 10.67% แสดงในภาพที่ 35

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 34 การวิเคราะห์การเบี่ยงเบนออกนอกแทร็คข้อมูลของหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

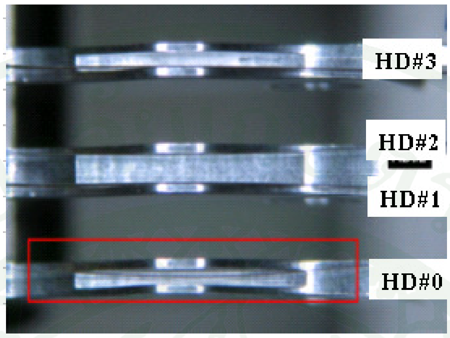


ภาพที่ 35 การเอียงตัวของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเทียบกับระนาบอ้างอิง

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3.2 มีช่องว่างระหว่างหางของหัวอ่านเขียน (HGA tail) กับช่องสำหรับใส่หัวอ่านเขียน (Carriage slit) เรียกว่า Tail Floating แสดงในภาพที่ 36 โดยช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนตามหมายเลขหัวอ่านเขียนแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 36 ช่องว่างระหว่างหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ตารางที่ 2 ช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	จำนวน	%
ไม่มีช่องว่าง	29	9.67%
0	230	76.67%
0, 1	17	6.00%
0, 1, 3	1	1.00%
0, 2, 3	1	0.33%
0, 3	10	0.33%
1	3	3.33%
1,2	3	1.00%
1, 3	1	0.33%
3	4	1.33%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการศึกษากระบวนการผลิตชุดหัวอ่านเขียนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ

2.1 ผลการศึกษาค่าแรงบิดและความเร็วรอบของไขควงไฟฟ้าที่ใช้ขันสกรูเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน บริษัทกรณีศึกษาประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน ด้วยไขควงไฟฟ้าที่ค่าแรงบิด 0.50 kgf.cm หากขันสกรูยึดด้วยค่าแรงที่ต่ำกว่านี้จะทำให้มี สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลหลวมไม่สามารถยึดกับฐานชุดหัวอ่านเขียนได้เนื่องจากขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงานจะหมุนด้วยความเร็วรอบต่อนาทีสูงทำให้สกรูมีการคลายตัวออกเป็นสาเหตุให้สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลมีการเอียงไปด้านซ้ายหรือขวาของฐานชุดหัวอ่านเขียน จึงต้องการเพิ่มค่าแรงบิดให้มากกว่า 0.50 kgf.cm เพื่อที่จะยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลกับฐานชุดหัวอ่านเขียนได้ดีขึ้น ซึ่งต้องศึกษาก่อนว่าสกรูสามารถรับแรงบิดได้มากที่สุดเท่าไหร่หรือการระบุค่าแรงบิดที่ขันสกรูแล้วทำให้สกรูหัก จากตัวอย่างการประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลกับฐานชุดหัวอ่านเขียนพบว่าสกรูรับแรงบิดได้สูงสุดที่ 1.28 kgf.cm และค่าแรงบิดที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้สกรูหักได้คือ 0.92 kfg.cm แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าแรงบิดที่ทำให้สกรูหักขณะขันสกรูเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน

ตัวอย่าง	ค่าแรงบิด (kgf.cm)	ตัวอย่าง	ค่าแรงบิด (kgf.cm)
1	1.22	6	1.27
2	1.29	7	1.18
3	1.20	8	1.24
4	1.31	9	1.44
5	1.44	10	1.29
ค่าเฉลี่ย			1.28 kgf.cm
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.0903
ค่าเฉลี่ย – 4 x (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			0.92 kgf.cm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทดลองประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล เข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยไขควงไฟฟ้าที่ค่าแรงบิด 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 kgf.cm ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4 พบว่ามีสกรูหักเมื่อเพิ่มค่าแรงบิดที่ 0.70, 0.80 kgf.cm เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าแรงบิดไขควงฟ้าให้สูงขึ้นความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้าก็จะแปรผันเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4 ของเสียจากสกรูหักตามค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรูเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียน

ค่าแรงบิด	0.50 kgf.cm	0.60 kgf.cm	0.70 kgf.cm	0.80 kgf.cm
ความเร็วรอบ	490 รอบต่อนาที	585 รอบต่อนาที	745 รอบต่อนาที	825 รอบต่อนาที
จำนวนงาน	300	300	300	300
สกรูหัก	0	0	1	2
% สกรูหัก	0.00%	0.00%	0.33%	0.67%

จะเห็นว่ามีสองปัจจัยที่ต้องควบคุมในกระบวนการขันสกรูยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน คือ ค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้า จึงกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยในการทดลองแสดงในตารางที่ 5

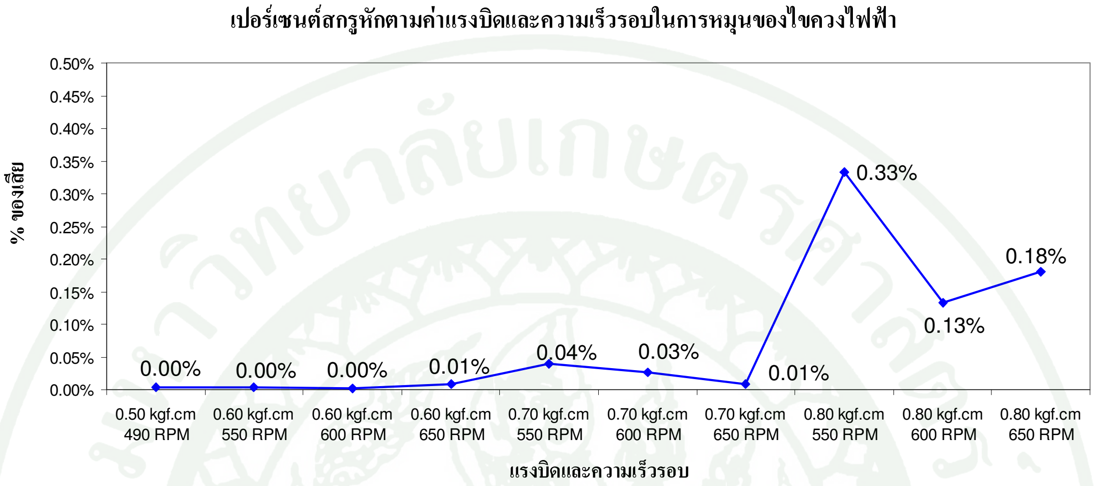
ตารางที่ 5 ค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรูในการทดลองเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียนในงานตัวอย่าง

แรงบิด	0.60 kgf.cm			0.70 kgf.cm			0.80 kgf.cm		
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	550	600	650	550	600	650	550	600	650

พบว่ามีสกรูหักที่ค่าแรงบิด 0.80 kgf.cm 550 รอบต่อนาทีเท่ากับ 0.33%, 0.80 kgf.cm 600 รอบต่อนาทีเท่ากับ 0.13%, 0.80 kgf.cm 650 รอบต่อนาทีเท่ากับ 0.18% ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 37 ซึ่งส่งผลกระทบต่อของเสียในกระบวนการผลิตเนื่องจากต้องทิ้งฐานชุดหัวอ่านเขียนไม่สามารถ

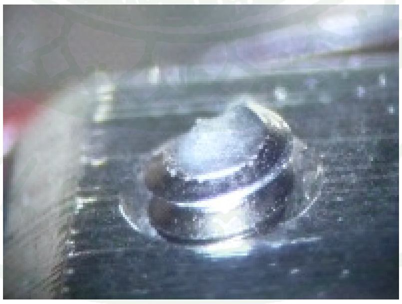
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำมาใช้ผลิตงานต่อได้เพราะสกรูหักและติดอยู่ในฐานชุดหัวอ่านเขียน สามารถสรุปได้ว่าค่าแรงบิด 0.80 kgf.cm ไม่สามารถใช้ในสายการผลิตจริงได้ แสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 37 เปอร์เซ็นต์ของสกรูหักตามค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้า

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)



ภาพที่ 38 ตัวอย่างสกรูหักติดอยู่กับฐานชุดหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จึงออกแบบการทดลองเพื่อควบคุมค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้าเป็นสองปัจจัยสองระดับแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการขันสกรูในการทดลองเพื่อประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเข้ากับฐานชุดหัวอ่านเขียนที่ใช้ในงานทดลอง

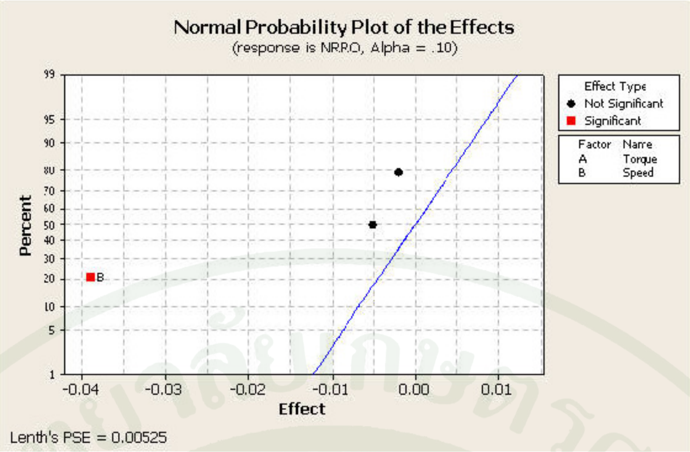
ปัจจัย	ระดับ	
	ต่ำ	สูง
A: แรงบิด (Fastening Torque : kgf.cm)	0.60	0.70
B: ความเร็วรอบ (Rotational Speed : rpm)	550	650

ตารางที่ 7 แสดงเปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำตามเงื่อนไขการขันสกรูด้วยแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งผลการทดลองพบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 ความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำดังแสดงในรูปที่ 39 และความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้าที่ระดับสูง 650 รอบต่อนาทีเป็นผลกระทบของปัจจัยหลักแสดงในรูปที่ 40 จะเห็นว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียนเท่ากับความเร็ว 650 รอบต่อนาทีและแรงบิด 0.70 kgf.cm เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและเปอร์เซ็นต์ของเสียจากการต้องทิ้งฐานชุดหัวอ่านเขียนจากสกรูหักน้อยที่สุด

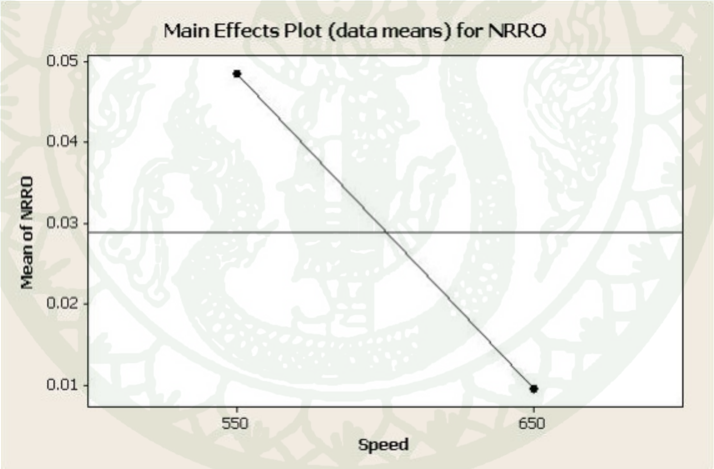
ตารางที่ 7 เปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำตามค่าแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของไขควงไฟฟ้า

แรงบิด	ความเร็วรอบ (Rotational Speed : rpm)	
(Fastening Torque : kgf.cm)	550	650
0.60	0.047%	0.013%
0.70	0.050%	0.006%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 39 การแจกแจงพื้นที่ใต้โค้งแบบปกติของปัจจัยในการขันสกรู



ภาพที่ 40 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ

2.2 ผลการศึกษาการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสส่วนหางของหัวอ่านเขียนและฐานชุดหัวอ่านเขียนโดยการหยอดกาว จากผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติโดยวิธี Two Sample-t Test เพื่อตรวจสอบสมมติฐานความแตกต่างของขนาดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำซึ่งวัดออกมาเป็นขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ประกอบจากชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวกับไม่หยอดกาว โดยกำหนดให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

μ_0 = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่ไม่มีการหยอดกาว

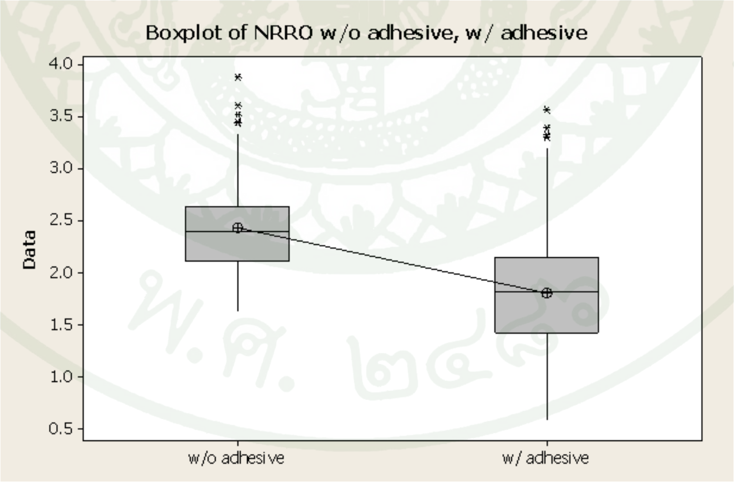
μ_1 = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่ไม่มีการหยอดกาว

สมมติฐานทั่วไปคือ

H_0: $\mu_0 = \mu_1$

H_1: $\mu_0 \neq \mu_1$

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวและไม่หยอดกาวแสดงในภาพที่ 41 พบว่า P-value เท่ากับ 0.000 (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวและไม่หยอดกาวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการหยอดกาวที่ชุดหัวอ่านเขียนมีผลให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณน้อยกว่าชุดอ่านเขียนที่ไม่หยอดกาว ภาพที่ 42 แสดงการวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณด้วยวิธี Two-Sample T-Test



ภาพที่ 41 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวและไม่หยอดกาว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Two-Sample T-Test and CI: w/o adhesive, w/ adhesive

```
Two-sample T for w/o glue vs w/ glue

                N    Mean   StDev   SE Mean
w/o adhesive   195   2.426  0.416    0.030
w/ adhesive    585   1.801  0.514    0.021


Difference = mu (w/o adhesiev) - mu (w/ adhesive)
Estimate for difference:  0.6251
95% CI for difference:  (0.5532, 0.6970)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 17.09  P-Value = 0.000  DF = 407
```

ภาพที่ 42 การวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณด้วยวิธี Two-Sample T-Test

จากนั้นวิเคราะห์ว่าตำแหน่งการหยอดกาวมีผลต่อค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณหรือไม่โดยใช้ One Way ANOVA โดยกำหนดให้

μ_0 = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน (Carriage slit)

μ_1 = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage tip)

μ_2 = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage slit & tip)

สมมติฐานทั่วไปคือ

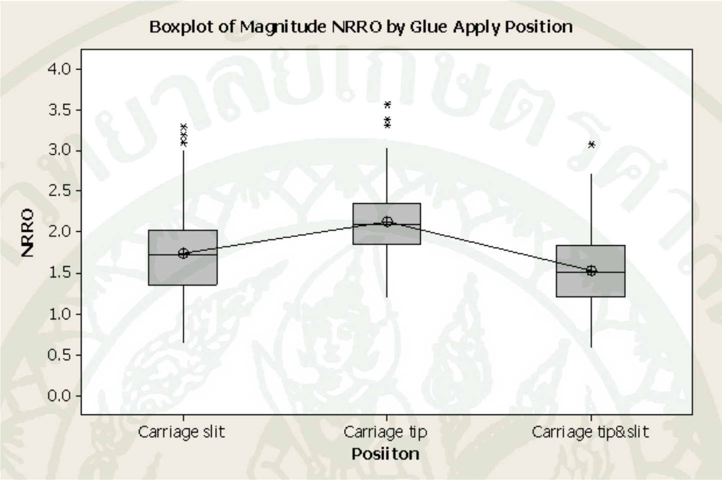
H_0: $\mu_0 = \mu_1 = \mu_2$

H_1: μ_0, μ_1, μ_2 อย่างน้อยหนึ่งค่ามีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากัน

จากการการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวของชุดหัวอ่านเขียนแสดงในภาพที่ 43 พบว่าตำแหน่งการหยอดกาวมีผลต่อค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณโดยการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฐานชุดหัวอ่านเขียน มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณน้อยกว่าการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนเพียงอย่างเดียวตามลำดับ การวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวด้วยวิธี One-Way ANONA แสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 43 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวของชุดหัวอ่านเขียน

One-way ANOVA: NRRO versus Posiiton

```
Source     DF       SS      MS      F      P
Posiiton    2   35.714  17.857  87.64  0.000
Error     582  118.579   0.204
Total     584  154.293

S = 0.4514   R-Sq = 23.15%   R-Sq(adj) = 22.88%


Level                 N    Mean   StDev
Carriage slit       195  1.7406  0.5016
Carriage tip        195  2.1294  0.3741
Carriage slit&tip   195  1.5333  0.4687

                    Individual 95% CIs For Mean Based on
                    Pooled StDev
Level               -------+---------+---------+---------+--
Carriage slit                  (--*--)
Carriage tip                                       (--*---)
Carriage slit &tip  (---*--)
                    -------+---------+---------+---------+--
                         1.60      1.80      2.00      2.20
Pooled StDev = 0.4514
```

ภาพที่ 44 การวิเคราะห์ผลความแตกต่างค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณตามตำแหน่งการหยอดกาวด้วยวิธี One-Way ANONA

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 ตำแหน่งกาวหยอดกาวที่ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่น้อยที่สุด คือหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน แต่เนื่องจากการหยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนั้นมีข้อเสีย คือ

2.3.1 การหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนั้นไม่สามารถที่จะทำการหยอดกาวด้วยเครื่องหยอดกาวได้ต้องทำการหยอดการด้วยมือโดยพนักงาน ซึ่งการหยอดกาวด้วยมือนั้นใช้เวลามากกว่าเวลาที่กำหนดในการคำนวณกำลังการผลิตจึงทำให้กระบวนการหยอดกาวเป็นคอขวดของการผลิต เวลาการหยอดกาวและกำลังการผลิตต่อวันตามตำแหน่งการหยอดกาว แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เวลาการหยอดกาวและกำลังการผลิตต่อวันตามตำแหน่งการหยอดกาว

ตำแหน่งการหยอดกาว	เวลาการหยอดกาว (วินาที)	กำลังการผลิต (ต่อวัน)
บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน (Carriage slit)	10.81	6,994
บริเวณฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage tip)	7.81	8,570
บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage slit & tip)	18.62	4,060

2.3.2 หากต้องมีการส่งชุดหัวอ่านเขียนกลับเข้าไปในพื้นที่การประกอบชุดหัวอ่านเขียนเนื่องจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทดสอบไม่ผ่านในแต่ละกระบวนการหรือชุดหัวอ่านเขียนได้รับความเสียหายทางกายภาพ เช่น หัวอ่านเขียนเสียรูปทรง โก่ง งอ และกำหนดให้ต้องเปลี่ยนหัวอ่านเขียนนั้น ต้องทำการแกะกาวเก่าออกเสียก่อนแล้วจึงค่อยนำหัวอ่านเขียนตัวใหม่มาประกอบเข้าแทนที่พบว่ากาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนั้นไม่สามารถใช้เครื่องเป่าลมร้อนเพื่อให้กาวอ่อนตัวและใช้แหนบคีบกาวออกมาได้ นอกจากนี้ยังพบว่ามีเศษกาวหลงเหลือติดค้างที่บริเวณที่ฐานของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนอีกด้วย เวลาการแกะกาวและกำลังการผลิตต่อวันตามตำแหน่งการหยอดกาว แสดงในตารางที่ 9

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 เวลาการแกะกาวและกำลังการผลิตต่อวันตามตำแหน่งการหยอดกาว

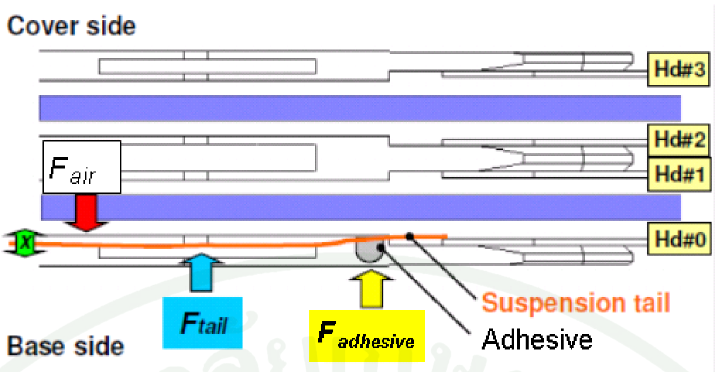
ตำแหน่งการหยอดกาว	เวลาการแกะกาว (วินาที)	กำลังการผลิต (ต่อวัน)
บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน (Carriage slit)	34.91	2,166
บริเวณฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage tip)	9.39	8,051
บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน (Carriage slit & tip)	50.95	1,483

ดังนั้นบริษัทกรณีศึกษาจึงได้เลือกการหยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนมาใช้ในกระบวนการผลิตสำหรับรุ่นงานที่มีความจุสูง และสปินเดิลมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 7,200 รอบต่อนาที แต่พบว่าเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีความจุสูงขึ้น เช่น จากความจุ 500GB เป็น 750GB หรือ 1 TB นั้นการหยอดกาวที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนเพียงอย่างเดียว ยังคงพบปัญหาความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำและมีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน กำหนดตัวแปรสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวดังนี้

- Air disturbance force (F_{air}) เป็นแรงรบกวนจากอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ
- Tail strain force (F_{tail}) เป็นแรงดึงของหางหัวอ่านเขียน
- Adhesive strain force ($F_{adhesive}$) เป็นแรงดึงของกาว

ซึ่งสมมติฐานที่ต้องการไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน คือ $F_{air} < F_{tail} + F_{adhesive}$ แสดงในภาพที่ 45

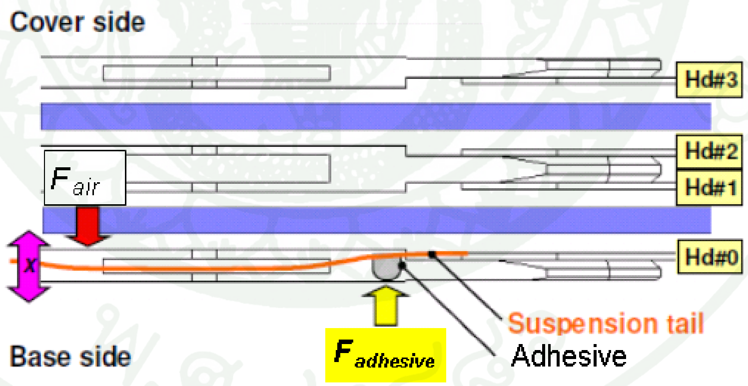
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 45 แรงกระทำกรณีไม่มีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ส่วนชุดหัวอ่านเขียนที่เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางขอ หัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน มีสมมติฐานคือ $F_{air} > F_{tail} + F_{adhesive}$ แสดงในภาพที่ 46

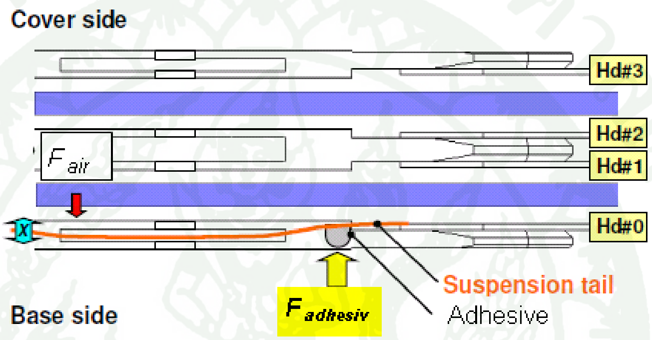


ภาพที่ 46 แรงกระทำกรณีมีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

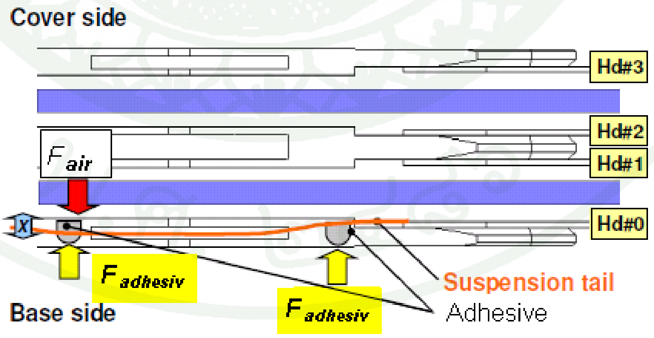
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลังจากที่หยอดกาวที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนแล้วพบว่ายังมีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน จึงทำการทดลองเพิ่มโดยเพิ่มขนาดของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนให้สัมผัสกับส่วนหางของหัวอ่านเขียนมากขึ้น แสดงในภาพที่ 47 และการเพิ่มจำนวนการหยอดกาวให้มากขึ้น จากข้อจำกัดของการหยอดกาวในช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน ผู้ศึกษาจึงกำหนดตำแหน่งการหยอดกาวเพิ่มที่อีกด้านหนึ่งของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน วัตถุประสงค์เพื่อลดขนาดของการรบกวนจากอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้น้อยกว่าแรงดึงของหางหัวอ่านเขียนและแรงดึงจากกาว แสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 47 แรงกระทำกรณีเพิ่มขนาดของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)



ภาพที่ 48 แรงกระทำกรณีเพิ่มจุดการหยอดกาวบนฐานชุดหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

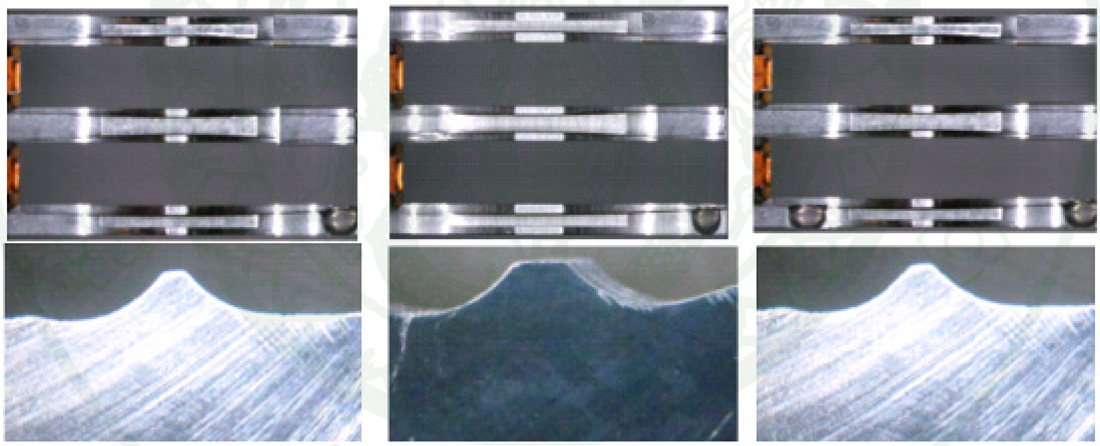
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากนั้นทำการทดลองโดยแบ่งชุดหัวอ่านเขียนออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1: ชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบจากฐานชุดหัวอ่านเขียนปัจจุบันและหยอดกาวที่ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน 1 จุด แสดงในภาพที่ 49 (a)

กลุ่มที่ 2: ชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบจากฐานชุดหัวอ่านเขียนที่เพิ่มขนาดของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและหยอดกาวที่ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน 1 จุด เรียกกลุ่มนี้ว่า “Big slit” แสดงในภาพที่ 49 (b)

กลุ่มที่ 3: ชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบจากฐานชุดหัวอ่านเขียนปัจจุบันและหยอดกาวที่ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน 1 จุดและด้านหลังของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนอีก 1 จุด แสดงในภาพที่ 49 (c)



(a) (b) (c)

ภาพที่ 49 ขนาดของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและตำแหน่งการหยอดกาวเพื่อเพิ่มพื้นที่การสัมผัสของส่วนหางหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากนั้นทำการประกอบชุดหัวอ่านเขียนทั้งสามกลุ่มเป็นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกลุ่มละ 200 ตัว และพิจารณาประสิทธิภาพของชุดหัวอ่านเขียนแต่ละกรณีจากงานเสียจากกระบวนการทดสอบที่เกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของส่วนหางของหัวอ่านเขียน (Tail flutter) แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เปอร์เซ็นต์งานเสียจากการทดสอบที่เกี่ยวกับการกระพือของส่วนหางหัวอ่านเขียน

	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	กลุ่ม 3
การทดสอบไดร์ฟที่ Function Test ด้วยอุณหภูมิห้อง	5.38%	0.00%	0.00%
การทดสอบไดร์ฟที่ SRST Test ด้วยอุณหภูมิสูง-ต่ำ	3.64%	6.18%	1.17%

จากการทดลองชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบจากฐานชุดหัวอ่านเขียนปัจจุบันและหยอดกาวที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน 1 จุดและด้านหลังของช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนอีก 1 จุด นั้นมีเปอร์เซ็นต์งานเสียจากกระบวนการทดสอบที่เกี่ยวกับการสั่นสะเทือนจากหางของหัวอ่านเขียน (Tail flutter) น้อยที่สุด

3. ผลศึกษากระบวนการผลิตในพื้นที่ของการประกอบฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์ที่คาดว่าน่าจะมีผลต่อความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากชุดหัวอ่านเขียน

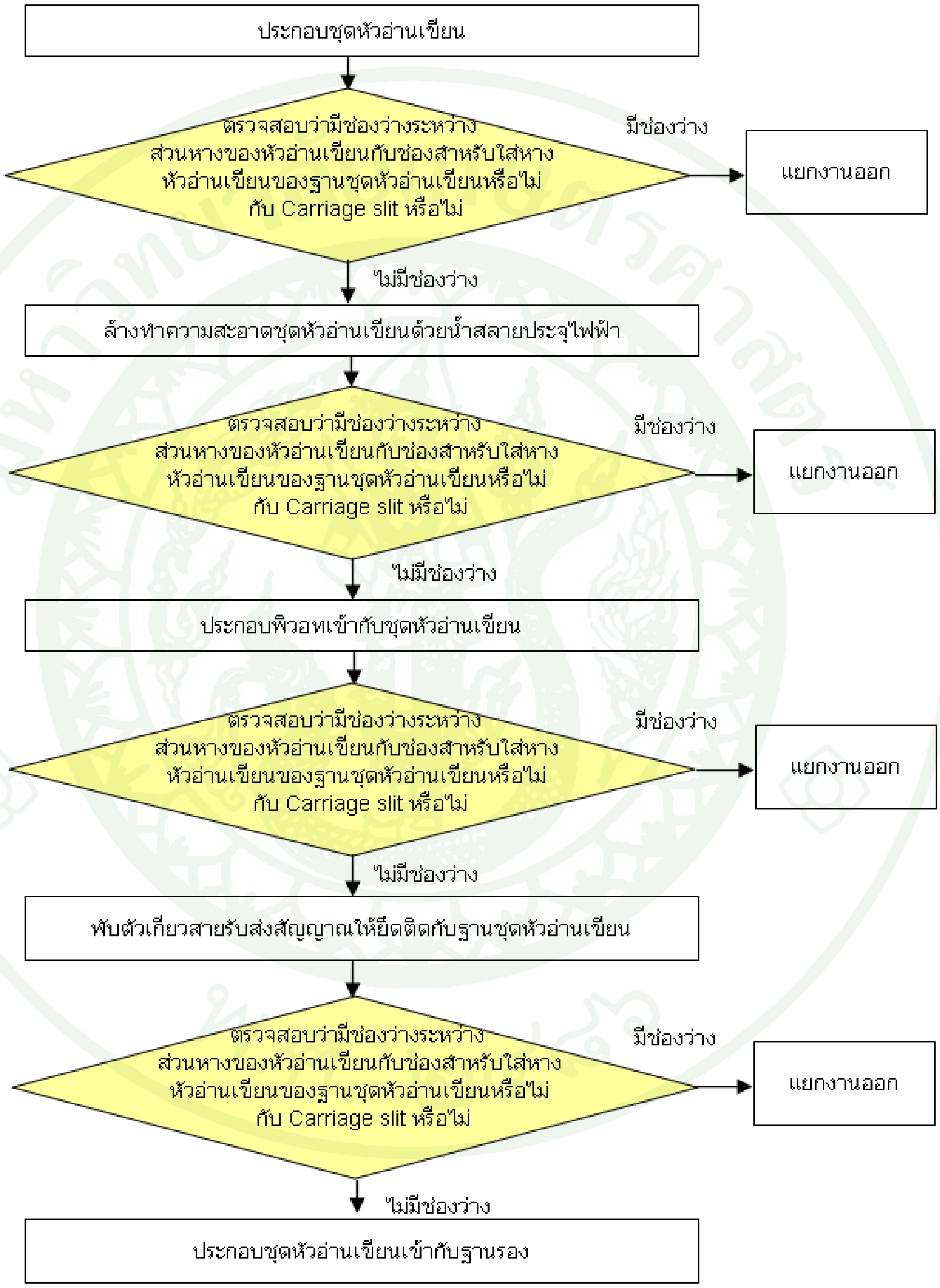
แผนผังวิธีการปฏิบัติที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนในภาพที่ 50 โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติงาน ดังนี้

3.1 ทำการประกอบชุดหัวอ่านเขียนจำนวน 500 ชุดหัวอ่านเขียนและตรวจสอบหลังจากผ่านกระบวนการทดสอบทั้งทางกลและทางไฟฟ้าแล้วพบว่าในพื้นที่การปฏิบัติงานการประกอบชุดหัวอ่านเขียน พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

3.2 นำชุดหัวอ่านเขียนมาล้างทำความสะอาดชุดหัวอ่านเขียนเพื่อนำมาใช้ในพื้นที่การประกอบฮาร์ดดิสก์เอ็นโคลสเซอร์ และตรวจสอบหลังการล้าง พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3 นำชุดหัวอ่านเขียนมาทำการประกอบพิวอทเข้ากับชุดหัวอ่านเขียน พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน



ภาพที่ 50 แผนผังวิธีการปฏิบัติที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4 นำชุดหัวอ่านเขียนมาพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลให้ยึดกับแผ่นอลูมิเนียมเรียกขั้นตอนการปฏิบัติงานนี้ว่า Flex Band Assembly พบว่ามีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน เท่ากับ 9.40% โดยเกิดช่องว่างที่หัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์เท่ากับ 7.60% (38/500 ชุดหัวอ่านเขียน) และเกิดช่องว่างที่หัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์และหมายเลขหนึ่งเท่ากับ 1.80% (9/500 ชุดหัวอ่านเขียน) จึงสังเกตวิธีการปฏิบัติงานพบว่าพนักงานแต่ละคนมีวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลให้ยึดกับแผ่นอลูมิเนียมแตกต่างกัน พบว่าพนักงานบางส่วนหลังจากที่พับเรียบร้อยแล้ว ตามภาพที่ 51 พนักงานจะมีการขยับที่บริเวณจุดล็อกของตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณและพลิกชุดหัวอ่านเขียนไป-มาเพื่อตรวจสอบว่าตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณได้ยึดติดกับฐานชุดหัวอ่านเขียนแน่นหรือไม่ ตามภาพที่ 52 ซึ่งขั้นตอนที่มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน ได้หากมีการขยับและหมุนด้วยแรงที่มากเกินไป

ภาพที่ 51 วิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรให้ยึดกับแผ่นอลูมิเนียม

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 52 การหมุนชุดหัวอ่านเขียนเพื่อตรวจสอบว่าตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรให้ยึดกับแผ่นอลูมิเนียม

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

ดังนั้นจึงกำหนดวิธีการปฏิบัติเพื่อลดความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่

วิธีปฏิบัติงาน	วิธีการเดิม	วิธีการใหม่
ตำแหน่งการจับชุดหัวอ่านเขียน	บริเวณขอบของขดลวดทองแดงที่ฐานชุดหัวอ่านเขียน	จับที่พิวอท
ลำดับการตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณ	โป้ง--> ชี้	ชี้ --> โป้ง
การตรวจสอบตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณยึดกับแผ่นอลูมิเนียม	ขยับที่บริเวณจุดล็อกตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณและหมุนชุดหัวอ่านเขียน ไป-มา 2-3 ครั้ง	ตรวจสอบด้วยสายตา ห้ามหมุนชุดหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากนั้นทำการทดลองเพื่อวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการเดิมวิธีการใหม่กับ พนักงานจำนวน 5 คน แล้วเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน พบว่าวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการใหม่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนน้อยกว่าวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล ด้วยวิธีการเดิม ดังแสดงในตารางที่ 12 จากนั้นนำชุดหัวอ่านเขียนมาประกอบใส่เข้ากับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและเข้าสู่กระบวนการทดสอบและเปรียบเทียบงานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่ ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ชุดหัวอ่านเขียนที่พบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน ด้วยวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่

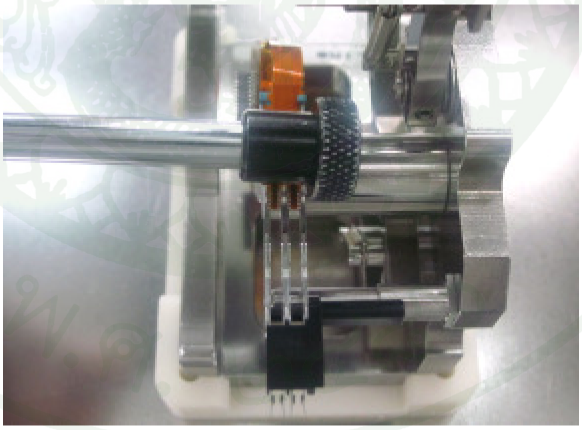
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5
จำนวนชุดหัวอ่านเขียนต่อการทดลอง	500	500	500	500	500
เปอร์เซ็นต์ชุดหัวอ่านเขียนที่พบช่องว่างระหว่างส่วนหางของ หัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนด้วยวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณด้วยวิธีการเดิม	7.80% (39/500)	7.00% (35/500)	6.60% (33/500)	6.80% (34/500)	4.50% (24/500)
เปอร์เซ็นต์ชุดหัวอ่านเขียนที่พบช่องว่างระหว่างส่วนหางของ หัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนด้วยวิธีการพับ ตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณด้วยวิธีการใหม่	2.40% (12/500)	1.60% (8/500)	1.80% (9/500)	2.00% (10/500)	0.60% (3/500)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบวิธีการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธีการเดิมและวิธีการใหม่

การพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณ	วิธีการปัจจุบัน	วิธีการใหม่
ช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	6.60%	1.68%
งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ	15.0%	1.70%

หาค่าแรงที่ทำให้สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลมีการเอียงตัวไปด้านในด้านหนึ่งของฐานชุดหัวอ่านเขียน พบว่าสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลมีการเอียงตัวไปด้านหัวอ่านเขียนหมายเลขสามประมาณ 0.09 mm และใช้อุปกรณ์วัดแรงตามที่แสดงในภาพที่ 53 เพื่อศึกษาแรงที่กระทำกับสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลจนทำให้สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลมีการเอียงตัวและเกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน พบว่าสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล มีการเอียงตัวเมื่อมีแรงมากกระทำอย่างน้อย 0.94 kgf.cm แสดงในตารางที่ 14



ภาพที่ 53 วิธีการวัดค่าแรงดึงที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 ค่าแรงที่กระทำกับสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและทำให้เกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ตัวอย่างที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าแรง (kgf.cm)	1.06	1.56	0.94	0.98	1.02	1.01	1.05	0.97	0.99	1.01

4. ผลศึกษากระบวนการนำชุดหัวอ่านจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำมาใช้ใหม่สำหรับรุ่นงานที่ไม่ได้หยอดกาวตั้งแต่การผลิตครั้งแรก

การเกิดความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่เกิดจากชุดหัวอ่านเขียนเป็นความเสียหายทางกล ซึ่งไม่ได้เกิดจากประสิทธิภาพของหัวอ่านเขียนดังนั้นจึงสามารถที่จะนำชุดหัวอ่านเขียนกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนหัวอ่านเขียน ซึ่งในปัจจุบันชุดหัวอ่านเขียนที่ถอดออกจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ทดสอบไม่ผ่านด้วยความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจะทำการตรวจสอบด้วยสายตาและทดสอบความยืดหยุ่นของโครงสร้างของหัวอ่านเขียนและคุณสมบัติทางไฟฟ้าเท่านั้น จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสลายประจุไฟฟ้า ก็สามารถนำกลับมาใช้ใหม่และประกอบเข้ากับตัวฐานและส่วนประกอบอื่น ๆ ของฮาร์ดดิสก์ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการผลิตอยู่ที่ 49.6% ดังนั้น จึงต้องศึกษาวิธีการใหม่ที่จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตของการนำชุดหัวอ่านเขียนมาใช้ใหม่สูงที่สุดสำหรับรุ่นงานที่ไม่ได้ทำการหยอดกาวตั้งแต่การประกอบชุดหัวอ่านเขียนครั้งแรก

4.1 เก็บตัวอย่างงานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่เสียหายด้วยอาการความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำเพื่อวิเคราะห์หาความถี่และขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณ และการวิเคราะห์การเบี่ยงเบนออกจากศูนย์กลางแทร็คข้อมูลของหัวอ่านเขียน จากนั้นตรวจสอบลักษณะความเสียหายทางกายภาพของชุดหัวอ่านเขียนด้วยสายตาผ่านกล้องจุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของหัวอ่านเขียนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานตามข้อ 1.1-1.3

4.2 แบ่งงานออกเป็น 5 กลุ่มๆ ละ 15 ตัว จากนั้นถอดชุดหัวอ่านเขียนออกจากฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อทำการทดลองวิธีการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนที่เสียหายทางกลกลับมาใช้ใหม่ ดังนี้

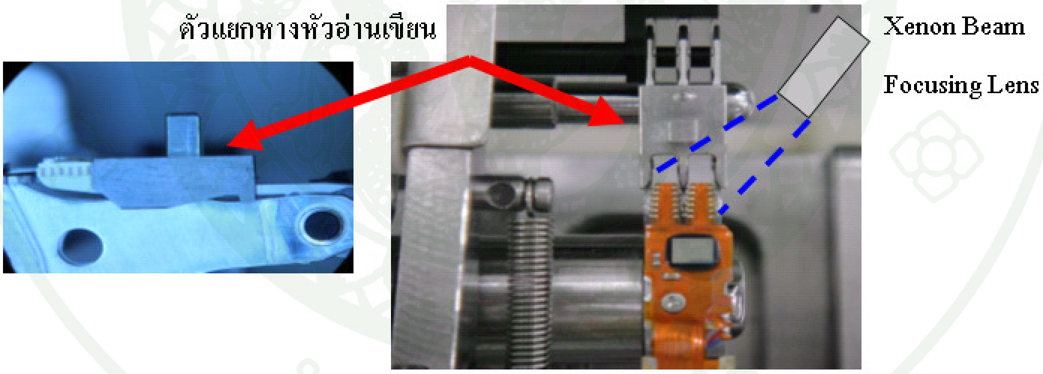
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2.1 หยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนเพื่อยึดส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

4.2.2 หยอดกาวที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนเพื่อยึดส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

4.2.3 หยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนเพื่อยึดส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

4.2.4 บัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและจุดตะกั่วของหัวอ่านเขียน ซึ่งจะใช้ตัวแยกหางหัวอ่านเขียนเป็นตัวบังคับให้จุดตะกั่วหลอมละลายรวมตัวกัน จากนั้นใช้ความร้อนจากการบัดกรีแบบเลเซอร์ ลักษณะการบัดกรีแสดงในภาพที่ 54

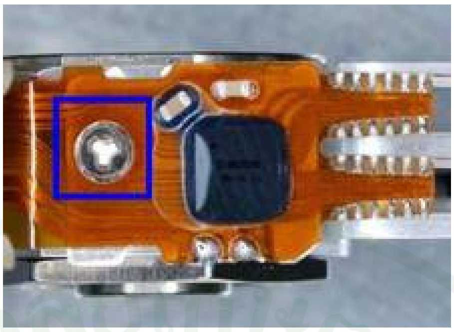


ภาพที่ 54 ลักษณะบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรและหัวอ่านเขียน

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

4.2.5 การจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลใหม่เพื่อให้สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่งและลดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน แสดงในภาพที่ 55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 55 ลักษณะการเอียงตัวของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจร

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

4.3 หลังจากนำชุดหัวอ่านเขียนทำการทดลองวิธีการแก้ไขตามขั้นตอนข้อ 4.2 แล้วนำชุดหัวอ่านเขียนมาวิเคราะห์ลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 วิเคราะห์ว่าวิธีการแก้ไขงานแต่ละวิธีนั้นสามารถลดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนได้หรือไม่ การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการแก้ไขด้วยวิธีการต่างๆ แสดงในภาพผนวก ก

4.3.2 นำชุดหัวอ่านเขียนที่ทำการแก้ไขแล้วประกอบเข้ากับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและแผงวงจรไฟฟ้าชุดเดิม

4.3.4 ตรวจสอบหาความถี่และขนาดของการเกิดความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณเปรียบเทียบกับค่ากำหนดของรุ่นงานว่าสามารถแก้ปัญหาความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำหรือไม่ แสดงในตารางที่ 15 – 19 ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไขด้วยวิธีการต่างๆ แสดงในภาพผนวก ข

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการหยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขหัวอ่านเขียนที่เสียหาย	ก่อนการปรับปรุง (PES)	หลังการปรับปรุง (PES)	ผลต่างก่อน-หลัง	ผลการตัดสินใจ
1	GLG3E1RJ	0	5.088	6.329	-1.241	ไม่ผ่าน
2	GLG3ER6J	0	5.576	1.699	3.877	ผ่าน
3	GLG4GE7J	1, 2	4.704	4.928	-0.224	ไม่ผ่าน
4	GLG3RU9J	0	7.298	1.048	6.250	ผ่าน
5	GLG4KNXJ	0	7.290	1.109	6.181	ผ่าน
6	GLG47HTJ	0	4.524	1.516	3.008	ผ่าน
7	GLG3ZHWJ	0	4.376	0.939	3.437	ผ่าน
8	GLG1AS8J	0	5.675	0.932	4.743	ผ่าน
9	GLG3WP6J	0	4.265	1.165	3.100	ผ่าน
10	GLG4A08J	0	7.978	0.973	7.005	ผ่าน
11	GLG6022J	0	5.047	1.486	3.561	ผ่าน
12	GLG568YJ	0	7.171	0.956	6.215	ผ่าน
13	GLG5LVGJ	0	8.932	0.895	8.037	ผ่าน
14	GLG5S6PJ	0, 1	5.717	1.446	4.271	ผ่าน
15	GLG3ET3J	0	6.209	0.985	5.224	ผ่าน
ค่าเฉลี่ย			5.990	1.760	4.230	(13/15)x100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.436	1.616	2.2522	86.67%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการหยอดกาวที่บริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขหัวอ่านเขียนที่เสียหาย	ก่อนการปรับปรุง (PES)	หลังการปรับปรุง (PES)	ผลต่างก่อน-หลัง	ผลการตัดสินใจ
1	GLG3U12J	0	9.051	5.877	3.174	ไม่ผ่าน
2	GLG3NU7J	0	6.575	5.682	0.893	ไม่ผ่าน
3	GLG3N6SJ	0	6.321	1.113	5.208	ผ่าน
4	GLG2M50J	0	9.260	3.727	5.533	ผ่าน
5	GLG4N3YJ	0	7.026	2.394	4.632	ผ่าน
6	GLG3WJ7J	0	6.674	4.219	2.455	ไม่ผ่าน
7	GLG3ZJRJ	0	6.519	6.700	-0.181	ไม่ผ่าน
8	GLG4GYRJ	0	7.187	2.066	5.121	ผ่าน
9	GLG43XWJ	0	8.621	4.254	4.367	ไม่ผ่าน
10	GLG3VGKJ	0	5.842	5.452	0.390	ไม่ผ่าน
11	GLG4GEDJ	0	8.894	6.805	2.089	ไม่ผ่าน
12	GLG63MLJ	0	7.388	1.428	5.960	ผ่าน
13	GLG566RJ	1, 2	6.355	5.710	0.645	ไม่ผ่าน
14	GLG5UDVJ	0	4.507	2.264	2.243	ผ่าน
15	GLG4WZLJ	0	5.481	5.359	0.122	ไม่ผ่าน
ค่าเฉลี่ย			7.047	4.203	2.843	(6/15)x100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.387	1.932	2.165	40.00%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการหยอดกาวที่บริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขหัวอ่านเขียนที่เสียหาย	ก่อนการปรับปรุง (PES)	หลังการปรับปรุง (PES)	ผลต่างก่อน-หลัง	ผลการตัดสินใจ
1	GLG3L70J	0	4.711	0.977	3.734	ผ่าน
2	GLG3L4DJ	0	9.099	1.290	7.809	ผ่าน
3	GLG3D8UJ	0	7.489	1.185	6.304	ผ่าน
4	GLG5GTJJ	0	6.759	1.487	5.272	ผ่าน
5	GLG3N7AJ	0	5.592	0.857	4.735	ผ่าน
6	GLG41SSJ	0	6.680	1.111	5.569	ผ่าน
7	GLG4L0GJ	0	5.701	1.469	4.232	ผ่าน
8	GLG63MEJ	0	4.513	1.289	3.224	ผ่าน
9	GLG571BJ	0	5.135	1.552	3.583	ผ่าน
10	GLG63ANJ	1, 2	4.527	1.002	3.525	ผ่าน
11	GLG63G1J	0	4.892	1.020	3.872	ผ่าน
12	GLG6029J	0	4.967	1.320	3.647	ผ่าน
13	GLG5GTLJ	0	6.965	1.222	5.743	ผ่าน
14	GLG5GGYJ	0	4.727	1.453	3.274	ผ่าน
15	GLG2M4VJ	0	6.300	0.940	5.360	ผ่าน
ค่าเฉลี่ย			5.870	1.212	4.659	(15/15)x100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.325	0.221	1.326	100.00%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและตะกั่วของหัวอ่านเขียน

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขหัวอ่านเขียนที่เสียหาย	ก่อนการปรับปรุง (PES)	หลังการปรับปรุง (PES)	ผลต่าง ก่อน-หลัง	ผลการตัดสินใจ
1	VLKTUHPJ	0	5.248	0.822	4.426	ผ่าน
2	VLKY9X5J	0	6.557	1.052	5.505	ผ่าน
3	VLKYZ47J	0	11.106	0.754	10.352	ผ่าน
4	VLKYE33J	0	5.003	1.487	3.516	ผ่าน
5	VLKY7PSJ	0	6.442	1.292	5.150	ผ่าน
6	VLKYVBBJ	0	5.474	1.016	4.458	ผ่าน
7	VLKZ9V0J	0	5.944	1.022	4.922	ผ่าน
8	VLKZB89J	0	4.226	1.085	3.141	ผ่าน
9	VLKY7BJJ	0	5.553	1.336	4.217	ผ่าน
10	VLKXMMGJ	0	7.208	0.998	6.210	ผ่าน
11	VLKY5GWJ	0	5.342	0.799	4.543	ผ่าน
12	VLKYY5WJ	0	9.943	0.973	8.970	ผ่าน
13	VLKX4TZJ	0	5.627	0.880	4.747	ผ่าน
14	VLKZB5YJ	0	5.715	1.110	4.605	ผ่าน
15	VLKY7R4J	0	6.766	1.048	5.718	ผ่าน
ค่าเฉลี่ย			6.410	1.045	5.365	(15/15)x100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.842	0.203	1.927	100.00%

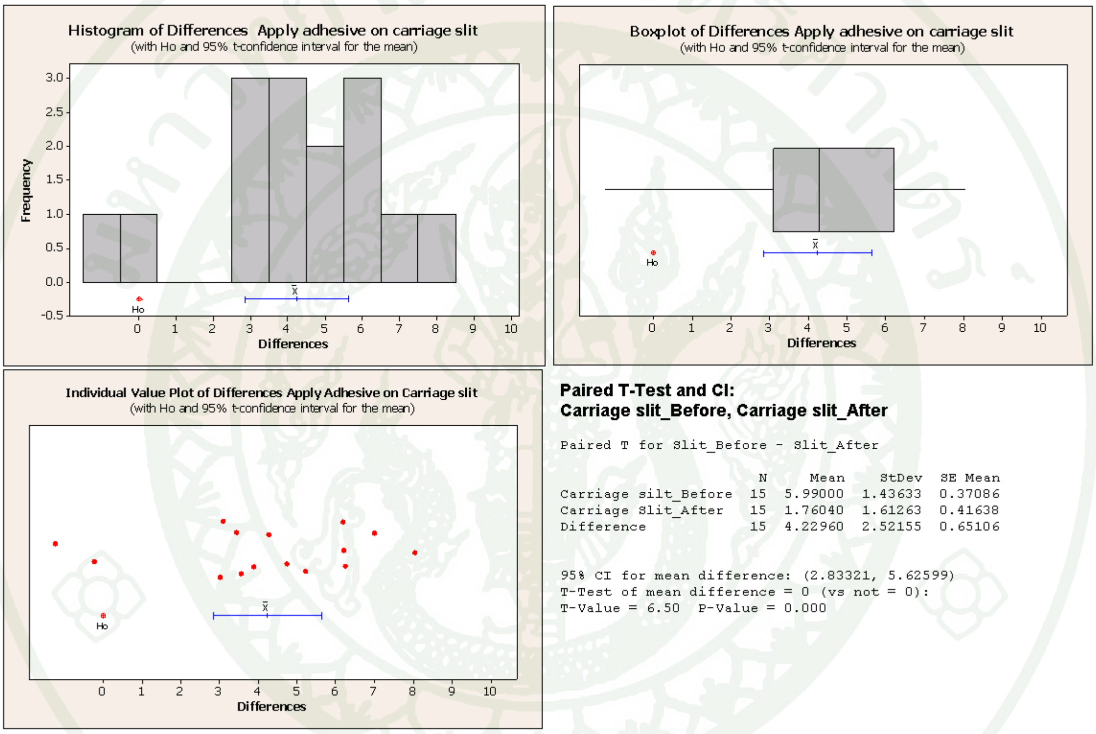
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 ค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงสุดก่อนและหลังจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจร

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขหัวอ่านเขียนที่เสียหาย	ก่อนการปรับปรุง (PES)	หลังการปรับปรุง (PES)	ผลต่างก่อน-หลัง	ผลการตัดสินใจ
1	GLG3ES7J	0	6.762	1.002	5.760	ผ่าน
2	GLG19A3J	0	6.456	1.317	5.139	ผ่าน
3	GLG3T03J	0	6.817	1.250	5.567	ผ่าน
4	GLG3MEPJ	0	5.054	2.119	2.935	ผ่าน
5	VLKZ9X5J	0	9.293	7.789	1.504	ไม่ผ่าน
6	GLG5MTMJ	1, 2	4.842	1.225	3.617	ผ่าน
7	VLKZ0E5J	0	6.001	1.062	4.939	ผ่าน
8	VLKY7M1J	0	6.521	0.890	5.631	ผ่าน
9	VLKYMGTJ	0	4.126	0.791	3.335	ผ่าน
10	VLKYLL3J	0	4.929	3.151	1.778	ผ่าน
11	VLKY7R0J	0	6.121	0.935	5.186	ผ่าน
12	VLKYVM7J	0	5.740	1.218	4.522	ผ่าน
13	VLKZ8A7J	0	6.068	0.912	5.156	ผ่าน
14	VLKYM5KJ	0	5.961	0.931	5.030	ผ่าน
15	VLKZ9XMJ	0	8.436	0.762	7.674	ผ่าน
ค่าเฉลี่ย			6.208	1.690	4.518	(14/15)x100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.332	1.797	1.622	93.33%

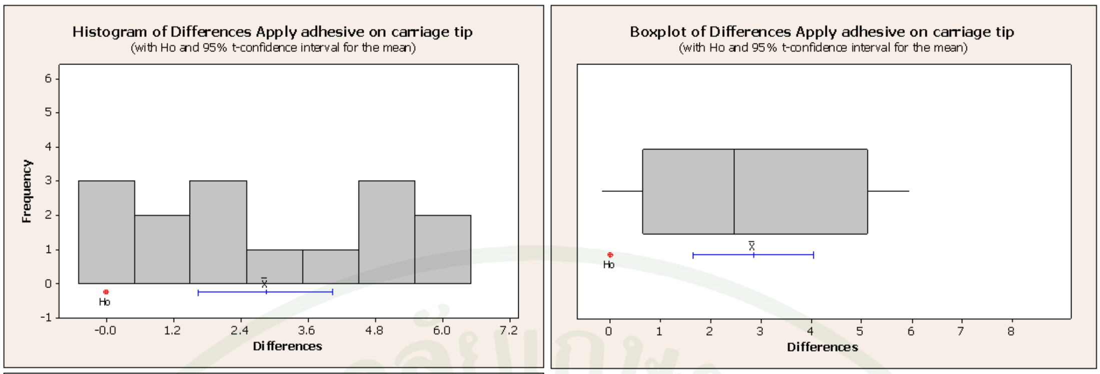
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

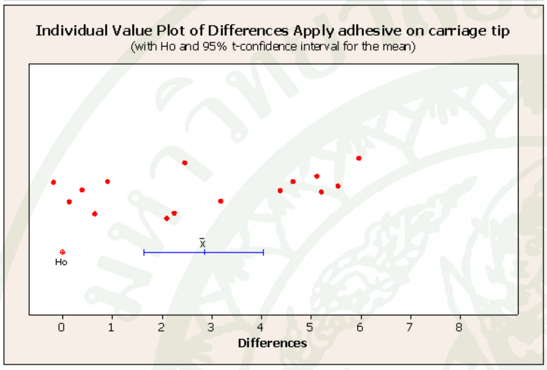
นำค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณที่วัดได้มาทดสอบทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างกันระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยวิธี Paired T-Test เนื่องจากก่อนและหลังการปรับปรุงเป็นชิ้นงานตัวเดียวกัน พบว่าทุกการทดลองมีความแตกต่างกันระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุงค่า p-value เท่ากับ 0.000 (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) ทุกการทดลอง แสดงการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไขด้วยวิธี Paired T-Test ตามภาพที่ 56 – 60 ดังนี้



ภาพที่ 56 การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนด้วยวิธี Paired T-Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



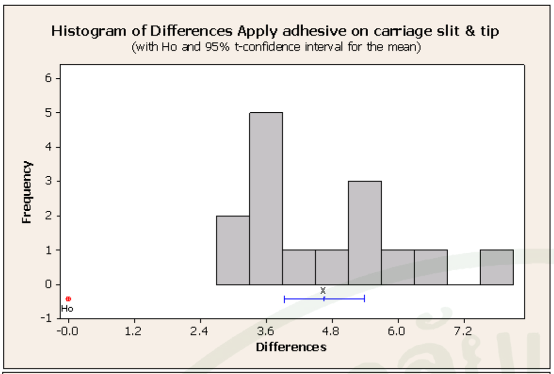


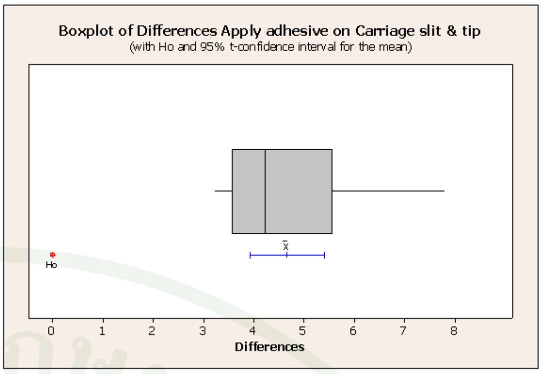
Paired T-Test and CI:
Carriage tip_Before, Carriage tip_After

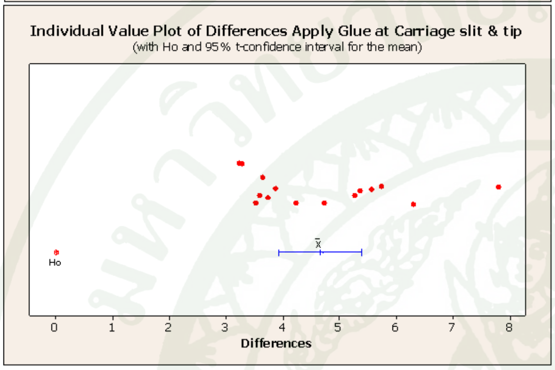
```
Paired T for Carriage_Before - Carriage_After

                     N      Mean    StDev  SE Mean
Carriage tip_Before  15  7.04673  1.38722  0.35818
Carriage tip_After   15  4.20333  1.93168  0.49876
Difference           15  2.84340  2.16540  0.55910

95% CI for mean difference: (1.64424, 4.04256)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0):
T-Value = 5.09  P-Value = 0.000
```

ภาพที่ 57 การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการหยอดกาวที่ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยวิธี Paired T-Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





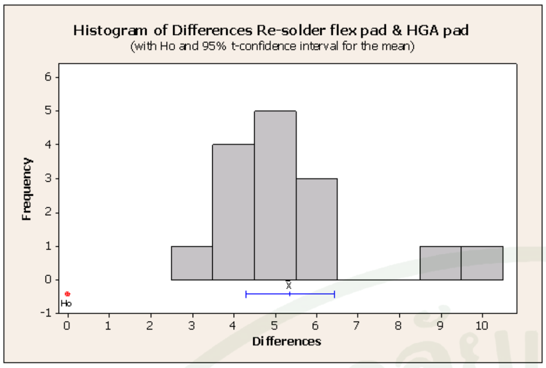


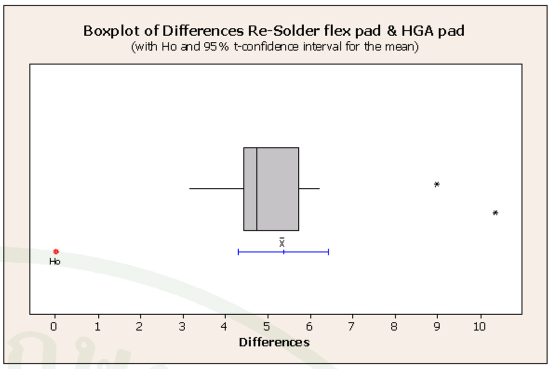
Paired T-Test and CI:
Carriage slit & tip_Before, Carriage slit & tip_After

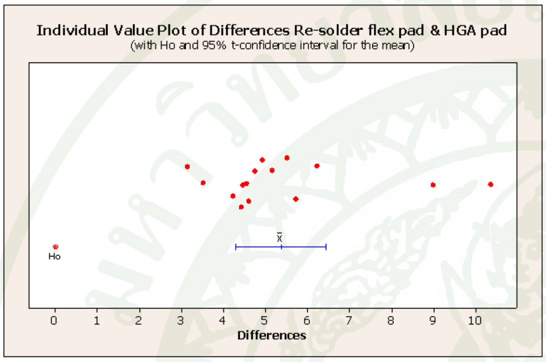
```
Paired T for Carriage & Slit_Before - Carriage & Slit_After

                            N     Mean    StDev  SE Mean
Carriage slit & tip before  15  5.87047  1.32532  0.34220
Carriage slit & tip after   15  1.21160  0.22140  0.05717
Difference                  15  4.65887  1.32577  0.34231

95% CI for mean difference: (3.92468, 5.39305)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0):
T-Value = 13.61  P-Value = 0.000
```

ภาพที่ 58 การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยวิธี Paired T-Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





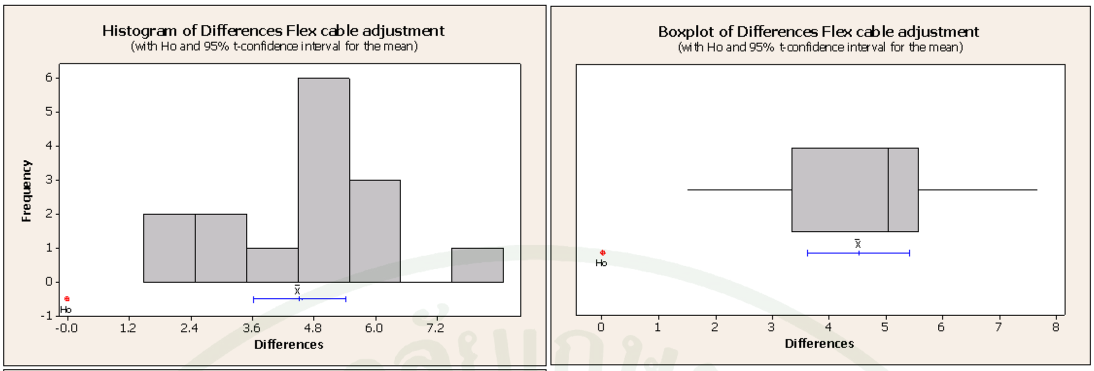


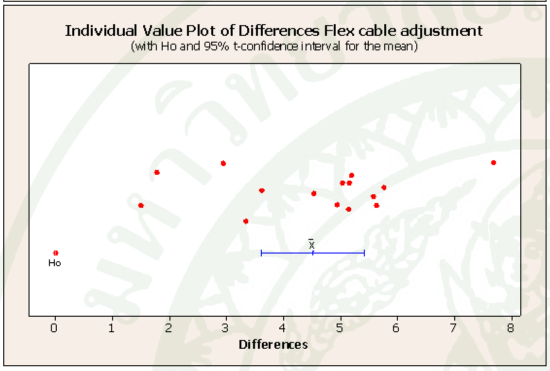
Paired T-Test and CI:
Re-solder_Before, Re-solder_After

```
Paired T for Re-beam_Before - Re-beam_After

                  N     Mean    StDev  SE Mean
Re-solder_Before  15  6.41027  1.84168  0.47552
Re-solder_After   15  1.04493  0.20316  0.05246
Difference       15  5.36533  1.92705  0.49756


95% CI for mean difference: (4.29817, 6.43250)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0):
T-Value = 10.78  P-Value = 0.000
```

ภาพที่ 59 การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลัง การบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณด้วยวิธี Paired T-Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





Paired T-Test and CI:
Flex cable adjustment_Before, Flex cable adjustment_After

```
Paired T for M1 Screw_Before - M1 Screw_After

                              N      Mean    StDev  SE Mean
Flex cable adjustment_Before  15   6.20847  1.33194  0.34390
Flex cable adjustment_After   15   1.69027  1.79715  0.46402
Difference                    15   4.51820  1.62193  0.41878

95% CI for mean difference: (3.62000, 5.41640)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0):
T-Value = 10.79  P-Value = 0.000
```

ภาพที่ 60 การวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลัง การจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยวิธี Paired T-Test

จะเห็นว่าวิธีการที่สามารถแก้ไขค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณให้น้อยลงได้ 100% มีสองวิธี โดยวิธีที่หนึ่งคือการหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน ส่วนวิธีที่สองคือ การบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและหัวอ่านเขียน แต่ในกระบวนการผลิตจริงได้เลือกวิธีการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและบริเวณตะกั่วหัวอ่านเขียนเป็นวิธีการในการนำชุดหัวอ่านเขียนที่เสียหายด้วยความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากไม่ต้องเปลี่ยนหัวอ่านเขียนใหม่เพราะหัวอ่านเขียนไม่ได้เสียหายทางไฟฟ้าหรือเสียหายด้วยคุณสมบัติของหัวอ่านเขียนเอง นอกจากนี้ยังประหยัดต้นทุนในการแก้ไขงานเสียต่ำที่สุดทั้งต้นทุนในด้านจัดซื้อเครื่องจักรและพื้นที่ในการใช้ห้องสะอาด และยังใช้ระยะเวลาในการแก้ไขงานน้อยที่สุดอีกด้วย แสดงในตารางที่ 20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 เปรียบเทียบต้นทุนและระยะเวลาการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียนที่ไม่ผ่านการทดสอบความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำ

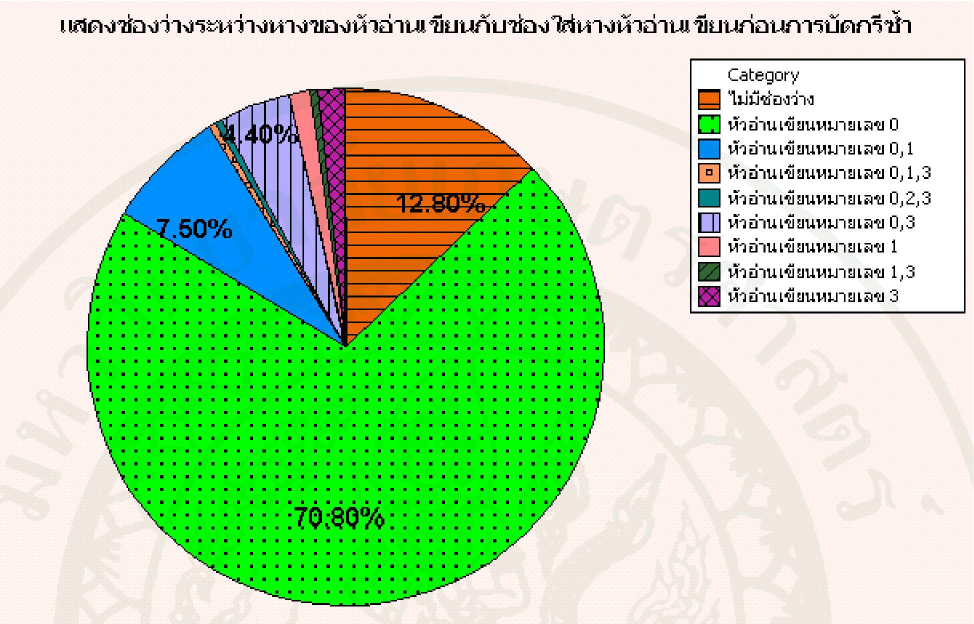
วิธีการแก้ไข	ต้นทุนการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียน (บาท)	ระยะเวลาการแก้ไขชุดหัวอ่านเขียน (วินาที)	พื้นที่ห้องสะอาดที่เพิ่มจากไลน์การผลิตเดิม (เมตร)
การหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน	1,541,411	97.10	กว้าง 0.70 ยาว 1.20
การหยอดกาวที่ส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน	1,541,411	90.81	กว้าง 0.70 ยาว 1.20
การหยอดกาวที่ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน	1,541,411	101.62	กว้าง 0.70 ยาว 1.20
การบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณ	-	98.82	-
การจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล	-	85.96	-

ราคาเครื่องหยอดกาวเท่ากับ 33,500 ดอลล่าร์ เครื่องอบกาวเท่ากับอัตรา 16,400 ดอลล่าร์ โดยคำนวณอัตราแลกเปลี่ยน 1 ดอลล่าร์เท่ากับ 30.89 บาท ซึ่งในการหยอดกาวต้องใช้ทั้งเครื่องหยอดกาวและเครื่องอบกาวให้แห้ง (ไม่พิจารณาค่าแรงเนื่องจากพนักงานปฏิบัติงานตามปกติ)

เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพการผลิตจึงได้เพิ่มจำนวนตัวอย่างงานที่เสียหายด้วยอาการความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำมาทำการแก้ไขด้วยวิธีการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและหัวอ่านเขียน โดยตรวจสอบการเอียงตัวของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล จำนวน 225 ชุด พบว่าสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเอียงไปด้านซ้ายมือหรือด้านหัวอ่านเขียนหมายเลขสามเท่ากับ 56.29% เอียงไปด้านขวามือหรือด้านหัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์เท่ากับ 31.90% และ สายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล อยู่ในตำแหน่งเดิมไม่เอียงซ้ายหรือขวาเท่ากับ 11.90% จากนั้นตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน พบว่ามีช่องว่างที่หัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์มากที่สุด 70.80% แสดงในภาพที่ 61



ภาพที่ 61 ตำแหน่งการเกิดช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

นำชุดหัวอ่านเขียนมาบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและบริเวณตะกั่วของหัวอ่านเขียน และตรวจสอบอีกครั้งหนึ่ง ไม่พบการเอียงตัวของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล และช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน จากนั้นประกอบชุดหัวอ่านเขียนเข้ากับชิ้นส่วนอื่นๆ ในพื้นที่การผลิตหลักเป็นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและตรวจสอบผลิตผลการผลิตจากการเขียนสัญญาณเซอร์โวลงบนแผ่นดิสก์ การทดสอบฟังก์ชั่นการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและมีการใส่สัญญาณและรหัสต่างๆ บนแผ่นดิสก์ การทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่อุณหภูมิสูงและหาลักษณะงานเสียบนแผ่นดิสก์ การทดสอบขั้นสุดท้ายโดยการจำลองสภาพการใช้งานจริง โดยผลิตผลการผลิตรวมเท่ากับ 75.11%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจสอบประสิทธิภาพการผลิตหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรและบริเวณตะกั่วของหัวอ่านเขียน			
HDD Trial	H695		
MTYPE	PTC4		
Through Yield [%]	75.11%		
Failure Repeat [%]	0.00%		
SSW Yield [%]	97.33%		
Function Yield [%]	91.32%		
SRST Yield [%]	87.00%		
Final Yield [%]	97.13%		
SSW Test	Input	225	
	Pass	219	97.33
	9913	2	0.89
	9958	2	0.89
	9960	1	0.44
	9961	1	0.44
Function Test	Input	219	
	Pass	200	91.32
	4881	8	3.65
	4880	6	2.74
	4395	2	0.91
	4000	1	0.46
	3400	1	0.46
	0104	1	0.46
SRST Test	Input	200	
	Pass	174	87.00
	6300	26	13.00%
Final Test	Input	174	
	Pass	169	97.13
	7730	2	1.15
	7070	1	0.57
	8704	1	0.57
	8710	1	0.57

ภาพที่ 62 ผลิตผลการผลิตหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและบริเวณตะกั่วของหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

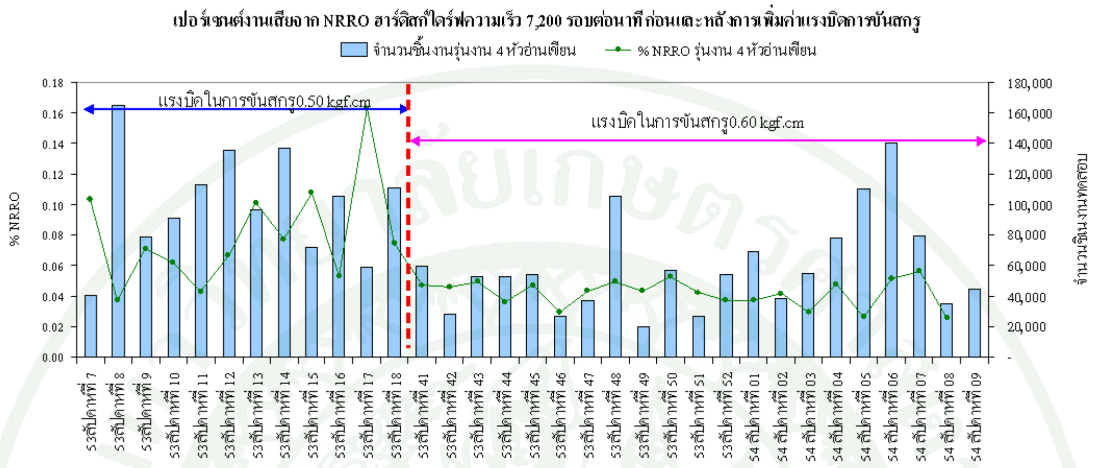
จากการศึกษาลักษณะของงานที่เกิดจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำจากชุดหัวอ่านเขียนพบว่ามีขนาดของความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณสูงกว่าค่าที่กำหนดของรุ่นงานที่ศึกษาที่ความถี่ประมาณ 1.5 – 3.3 kHz และมีช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนที่หัวอ่านเขียนหมายเลขศูนย์ถึง 92.0% จากการวิจัยพบว่า

1. ช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเพื่อยึดตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณเข้ากับแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะประกอบชุดหัวอ่านเขียนเข้ากับตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการวิธีการปฏิบัติงานเพื่อลดความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น

2. ในพื้นที่การประกอบชุดหัวอ่านเขียนค่าแรงบิดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน จาก 0.50 kgf.cm ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำน้อยที่สุดคือที่แรงบิด 0.70 kgf.cm และความเร็วการหมุนของไขควงไฟฟ้าอยู่ที่ 650 รอบต่อนาที นอกจากจะพิจารณาเปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำแล้ว ยังต้องพิจารณาเรื่องของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตอื่นด้วย ถึงแม้ว่าสกรูสามารถรับแรงบิดสูงสุดได้ถึง 0.92 kg.fcm แต่เมื่อทำมาทดลองในการผลิตพบว่าเมื่อแรงบิดเพิ่มเป็น 0.80 kgf.cm สกรูก็จะหักจึงไม่สามารถนำไปปฏิบัติในการผลิตจริงได้ และในการปฏิบัติงานจริงได้ทำการเพิ่มค่า เป็น 0.60 kgf.cm เนื่องจากได้ทดลองใช้ค่าแรงบิด 0.70 kgf.cm ไปได้ประมาณ 1 เดือน ได้รับการแจ้งข้อมูลจากฝ่ายเตรียมอุปกรณ์ว่าจำนวนการใช้งานตัวขันสกรูได้เพิ่มขึ้นทั้งโรงงานที่ปราจีนบุรีและชลบุรีเป็น 2 เท่ามากกว่าตอนที่ขันสกรูด้วยค่าแรงบิด 0.50 kgf.cm จึงลดค่าแรงในการขันสกรูลงมาที่ 0.60 kgf.cm โดยเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยจากงานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำด้วยแรงบิดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยค่าแรงบิด 0.50 kgf.cm จากสัปดาห์ที่ 7 -18 ปี 2553 เป็น 0.08% เมื่อปรับค่าแรงบิดเป็น 0.60 kgf.cm จากสัปดาห์ที่ 41 ปี 2553 - สัปดาห์ที่ 9 ปี 2554 เปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำลดลงเหลือ 0.05% แสดงในภาพที่ 63 โดยสามารถลดต้นทุนของเสียจากการทดสอบไม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผ่านจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำได้ทั้งหมด 19,631,817 ล้านบาท โดยวิธีการคำนวณแสดงในภาพที่ 64



ภาพที่ 63 เปอร์เซ็นต์งานเสียจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำก่อนและหลังการเพิ่มแรงบิดการขันสกรู

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

3. การเพิ่มพื้นที่การสัมผัสระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและในช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนซึ่งสามารถทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณลดลงนั้น ได้ทำการหยอดกาวทั้งส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน แต่เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการแก้ไขงานที่ทดสอบไม่ผ่านจากกระบวนการอื่น ๆ ปัญหาอื่นนั้น พบว่าการหยอดกาวในช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนั้นวิธีการแกะกาวออกจากช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนั้นทำได้ค่อนข้างยาก และการหยอดกาวที่ในช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนไม่สามารถที่จะทำการหยอดกาวด้วยเครื่องหยอดกาวได้ ต้องทำการหยอดการด้วยมือโดยพนักงานซึ่งการหยอดกาวด้วยมือนั้นใช้เวลามากกว่าเวลาที่กำหนดในการคำนวณกำลังการผลิตไม่สามารถนำมาใช้ในการผลิตจริงได้ จึงได้เพิ่มการหยอดกาวที่ด้านหลังช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนอีก 1 จุด

4. ในการนำชุดหัวอ่านเขียนที่เสียหายด้วยความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับรุ่นงานที่ไม่ได้หยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนและด้านหลังช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนนั้น เมื่อพิจารณาว่าความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำที่เกิดจากการสั่นสะเทือน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของส่วนหางหัวอ่านเขียนเป็นความเสียหายทางกลไม่ได้เสียหายทางไฟฟ้าหรือคุณสมบัติของหัวอ่านเขียนเองจึงไม่ต้องเปลี่ยนหัวอ่านเขียนใหม่ จึงได้เลือกวิธีการบัดกรีซ้ำบริเวณตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและบริเวณตะกั่วของหัวอ่านเขียน เป็นวิธีการในการนำชุดหัวอ่านเขียนกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากหลังการบัดกรีซ้ำสามารถที่จะทำให้ส่วนหางของหัวอ่านเขียนกลับมาแนบสนิทกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังประหยัดต้นทุนในการแก้ไขงานเสียต่ำที่สุดทั้งต้นทุนในด้านจัดซื้อเครื่องจักรและพื้นที่การใช้ห้องสะอาดและยังใช้ระยะเวลาในการแก้ไขงานน้อยที่สุดอีกด้วย

ต้นทุนที่สามารถลดได้จากการเปลี่ยนค่าแรงบิดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน

Model	Q3'10	Q4'10	Q1'11	Q2'11	Total
จำนวนส่งมอบ HDD ความเร็วสปินเดิลมอเตอร์ 7200 รอบต่อนาที	3,041,000	2,316,000	1,817,000	529,510	7,703,510
ต้นทุนการส่ง HDD กลับเข้าสู่ห้องสะอาดต่อไดร์ฟ (บาท)	84.95	84.95	84.95	84.95	84.95
% HDD failed NRRO (แรงบิด 0.50 kgf.cm)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
ต้นทุน HDD failed NRRO (แรงบิด 0.50 kgf.cm)	20,666,028	15,739,073	12,347,969	3,598,444	52,351,513
% HDD failed NRRO (แรงบิด 0.60 kgf.cm)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ต้นทุน HDD failed NRRO (แรงบิด 0.60 kgf.cm)	12,916,267	9,836,921	7,717,480	2,249,028	32,719,696
ต้นทุนที่สามารถลดได้	7,749,760	5,902,152	4,630,488	1,349,417	19,631,817

ภาพที่ 64 ต้นทุนที่สามารถลดได้จากการเปลี่ยนค่าแรงบิดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียนจาก 0.50 kgf.cm เป็น 0.60 kgf.cm

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพงานจากความผิดพลาดในการแสดงผลซ้ำของหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ มีข้อเสนอ ดังนี้

1. การเพิ่มค่าแรงบิดในการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียน จาก 0.50 kgf.cm ซึ่งสกรูสามารถรับแรงบิดสูงสุดได้ถึง 0.92 kgf.cm แต่เมื่อทำมาทดลองในการผลิตพบว่าเมื่อแรงบิดเพิ่มเป็น 0.80 kgf.cm สกรูก็จะหักจึงไม่สามารถนำไปปฏิบัติในการผลิตจริงได้นั้น เนื่องจากที่บริษัทกรณีศึกษานั้นยังทำการประกอบสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยพนักงาน จึงอาจทำให้มีปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การเพิ่มแรงบิดโดยการบิดข้อมือของพนักงานขณะที่ทำการขันสกรู ดังนั้นหากต้องการควบคุมปัจจัยภายนอกนี้ ควรจะมีการพัฒนาการขันสกรูเพื่อยึดสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลและฐานชุดหัวอ่านเขียนด้วยเครื่องอัตโนมัติหรือไขควงไฟฟ้าที่มีการทำงานเป็น 2 จังหวะเพื่อขันสกรูให้ได้ค่าแรงบิดตามที่กำหนดและให้หมุนด้วยความเร็วรอบที่ไม่สูงมากนักเมื่อได้ค่าแรงบิดที่สมบูรณ์แล้วเพื่อป้องกันสกรูหัก

2. กระบวนการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลเพื่อยึดตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณเข้ากับแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะประกอบชุดหัวอ่านเขียนเข้ากับตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นมีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดช่องว่างช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนและช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนขึ้น เนื่องจากเป็นการปฏิบัติงานด้วยพนักงานจึงมีความเป็นไปได้ที่พนักงานอาจจะไม่ปฏิบัติตามวิธีการที่ได้จัดเตรียมให้เนื่องจากไม่สามารถที่จะควบคุมได้ตลอดเวลา ดังนั้นควรจะออกแบบลักษณะของ ตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลให้สามารถรองรับการพับตัวเกี่ยวสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลด้วยเครื่องอัตโนมัติได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

อภิรัฐ คิริธราวัตร. 2549. **ผลของการคายประจุไฟฟ้าในหัวบันทึก.** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

Akagi, K. and K. Usui. 2009. Written-In RRO and NRRO Characteristics in Mobile Hard Disk Drive. **IEEE Transactions on Magnetics** 45(11): 5112-5117.

Akagi, K., K. Yasuna. and K. Shishida. 2005. Optimizing servo-signal design for a hard disk drives. **Microsyst Technol.** 11: 784-789.

Aruga, K. 2009 Probabilistic Analysis of Off-Track Capability Assuming Geometric Track Misregistration Model for Higher Track Density Disk. **IEEE Transactions on Magnetics** 45(11): 5022-5025.

Atsumi, T., A. Okuyama and S. Nakagawa. 2008. Vibration Control Above the Nyquist Frenquency in hard Disk Drives. **IEEE Transactions on Magnetics** 55(10): 3751-3757.

Chang, Y. B., D. K. Park, N.C. Park and Y. P. Park. 2002. Prediction of Track Misregistration Due to Disk Flutter in Hard Disk Drive **IEEE Transactions on Magnetics** 38(2): 1441-1446.

Eguchi, T. 2009. Simulation of Position Error Signal Degradation Due to Operational Vibration for Hard Disk Drives in a Storage Server Box. **IEEE Transactions on Magnetics** 44(11): 5162-5167.

Guo, L. and Y. J. D. Chen. 2001. Disk Flutter and Its Impact on HDD Servo Performance. . **IEEE Transactions on Magnetics** 37(2): 866 -870.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Heo, Z., C. Du, J. Mou and E. H. Ong. 2008. Reducing position error signal (PES) due to disk vibration using an air shroud. **Journal of Sound and Vibration** 311: 874–885.

Heo, B., I.Y. Shen and J. J. Railey. 2000. Reducing Disk Flutter by Improving Aerodynamic Design of Base casting. **IEEE Transactions on Magnetics** 36(5): 2222-2224.

Hirono, Y., T. Arisaka , N. Nishijima, T. Shimizu, S. Nakamura and S. Masuda. 2004. Flow-Induced Vibration Reduction in HDD by Using a Spoiler. **IEEE Transactions on Magnetics** 40(4): 3168-3170.

Imai, S., M. Tokuyama and Y. Yamaguchi. 1999. Reduction of Disk Flutter by Decreasing Disk-to-Shroud Spacing**. IEEE Transactions on Magnetics** 35(5): 2301 -2305.

Jang, G.H., S. J. Hong, D. K. Kim and J. H. Han. 2000. New Design of a HDD Spindle Motor Using Damping Material to Reduce NRRO. **IEEE Transactions on Magnetics** 36(5): 2258-2260.

Kazemi, M. 2008. Analysis of the Slider Off-Track Vibration Caused by the Aerodynamic Loads Associated With Different Components of a Head Stack Assembly in a Disk Drive. **IEEE Transactions on Magnetics** 44(5): 633-639.

Liu, M., F. F. Yap and H. Harmoko. 2008. A Model for Hard Disk Drive for Vibration and Shock Analysis. **IEEE Transactions on Magnetics** 44(12): 4764-4768.

Mamun, A. A., G. Guo and C. Bi. 2007. **Hard Disk Drive Mechatronics and Control.** Taylor & Francis Group. Florida.

Matsuda Y., S. Nakamura., M. Sega and Y. Katou. 2009. Flexible Support Mechanism for Hard Disk Drives to Decrease Vibration Disturbance. **IEEE Transactions on Magnetics** 45(11): 5108-5111.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Miwa. M., H. Harita, R. Kaneko and H. Ishizaki. 2003. Frequency characteristics of stiffness and damping effect of ferro fluid bearing. **Wear** 254: 1056–1060.

Nakamura, S., Y. Hirono., R. Aduma., H. Takahashi., S. Hagiya., K. Wakatsuki and S. Saegusa. 2008. Reducing Head-Gimbal-Assembly Windage for High-Track Density Hard Disk Drives. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing** 2(5): 853-859.

Oh, D. H and S. W. Kang. 2005. Position error reduction in magnetic disk drives using a head gimbal assembly with radial head motion capability. **Microsyst Technol** 11: 728-733.

Suriadi, M. A., C. S. Tan, Q. D. Zhang, T. H. Yip and K. Sundaravadivelu. 2006. Numerical investigation of airflow inside a 1-in hard disk drive. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 303: 124-127.

Shimizu, H., T. Shimizu., M. Tokuyama., H. Masuda and S.Nakamura. 2003. Numerical Simulation of Positioning Error Caused by Air-Flow-Induced Vibration of Head Gimbals Assembly in Hard Disk Drive. **IEEE Transactions on Magnetics** 39(2): 806-811.

Tsuda, N., H. Kubotera, M. Tatewaki, S. Noda, M. Hashiguchi and T. Maruyama. 2003. Unsteady Analysis and Experimental Verification of the Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms. **IEEE Transactions on Magnetics** 39(2): 819-825.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

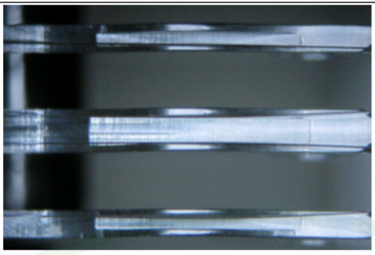
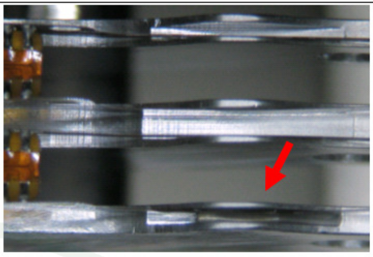
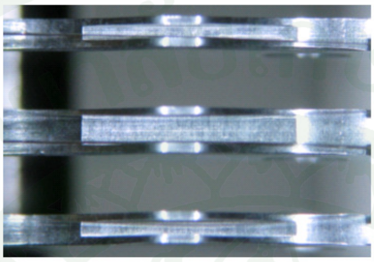
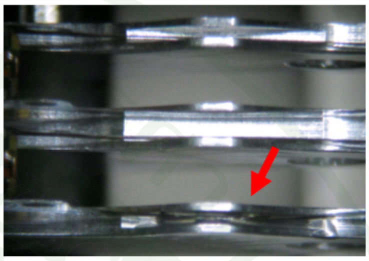
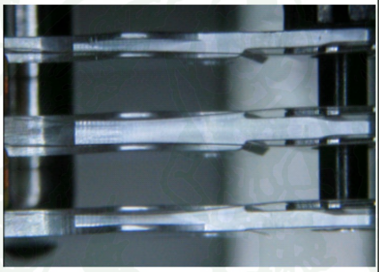
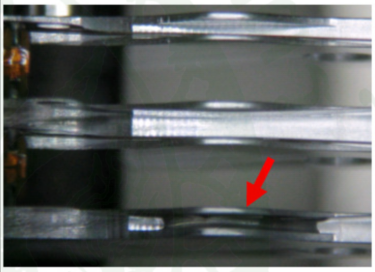
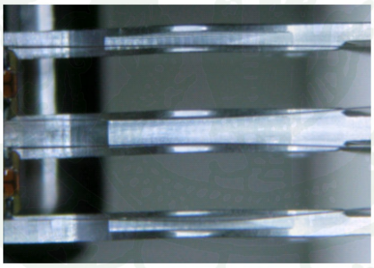
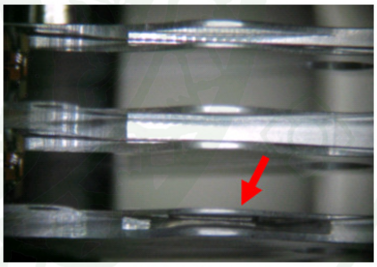
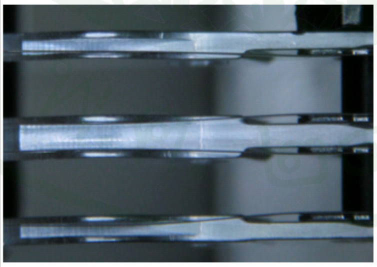
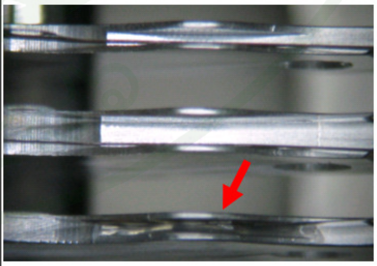
ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

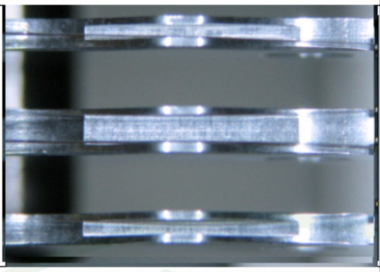
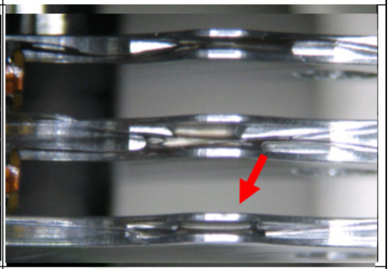
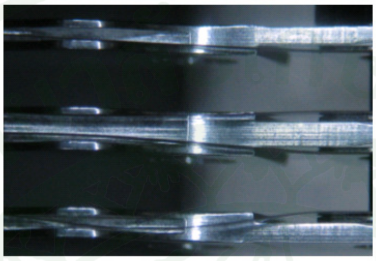
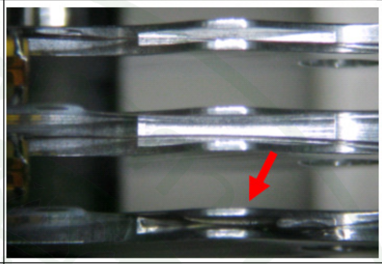
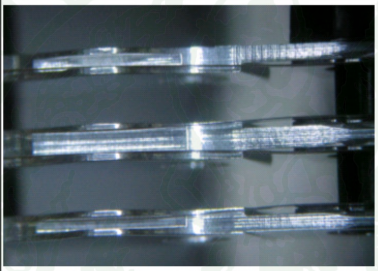
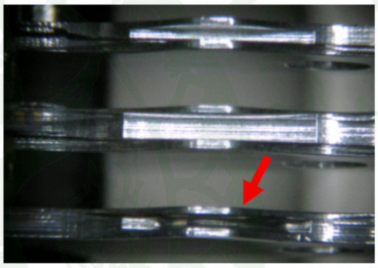
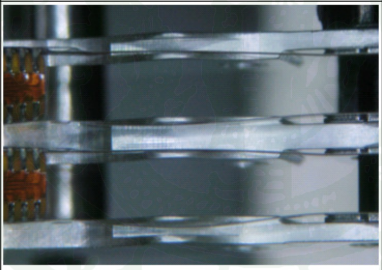
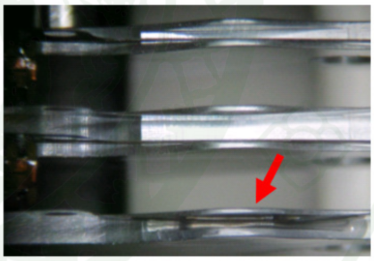
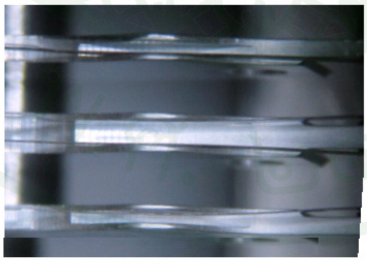
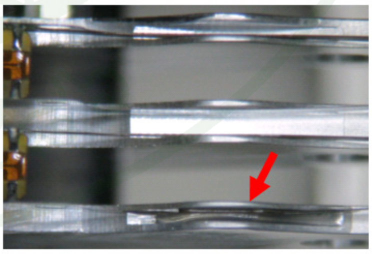
ภาพประกอบการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG6022J	A20LYGDV		
GLG568YJ	F11336K1		
GLG4A08J	A219PL4F		
GLG3ET3J	F112N2XB		
GLG3ER6J	F111XNKN		

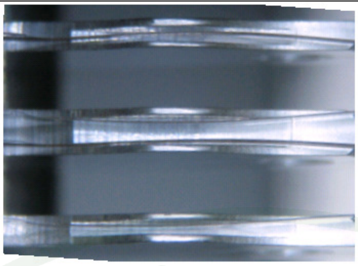
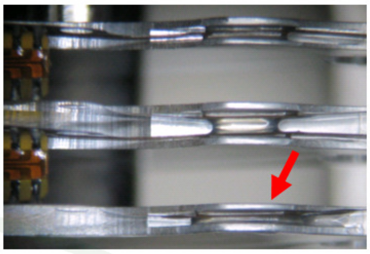
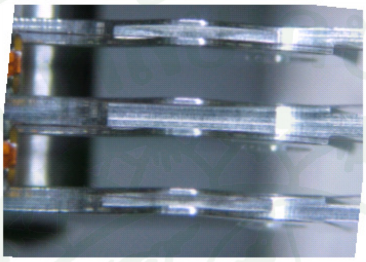
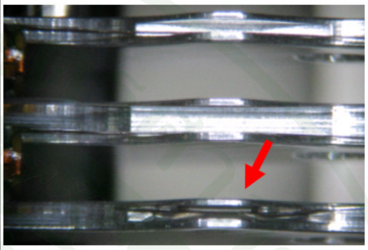
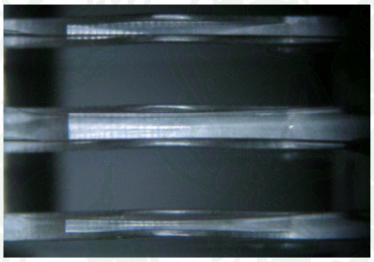
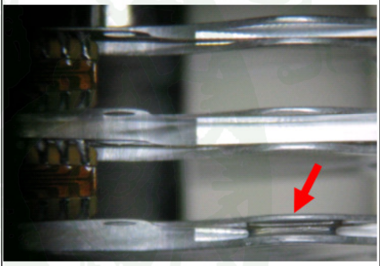
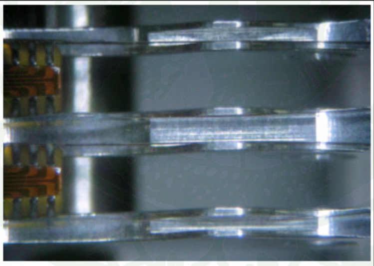
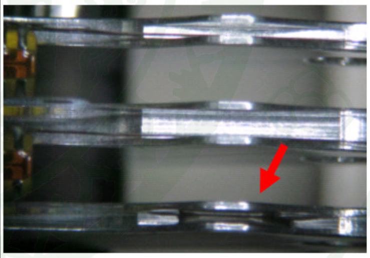
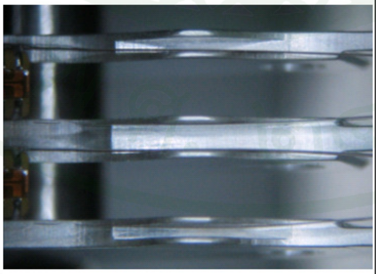
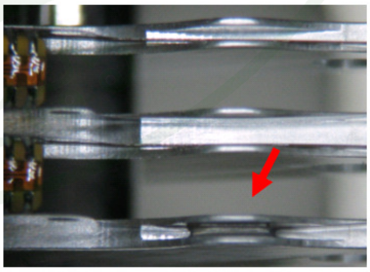
ภาพผนวกที่ ก1 การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG3WP6J	A21AT3KE		
GLG4GE7J	A21AW2FF		
GLG3ZHWJ	F111CT1J		
GLG1AS8J	A219ZV57		
GLG47HTJ	A21AWTET		

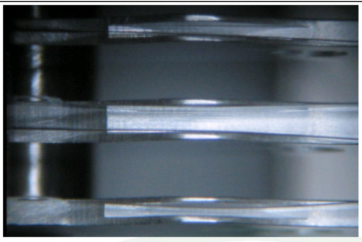
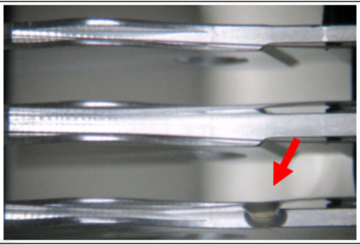
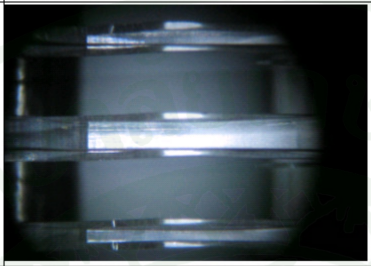
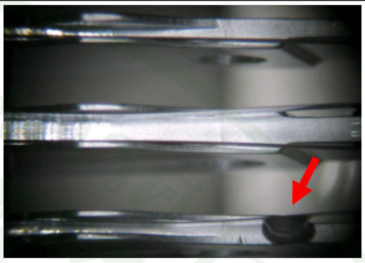
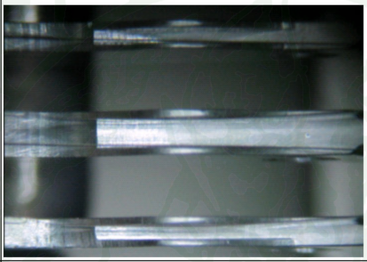
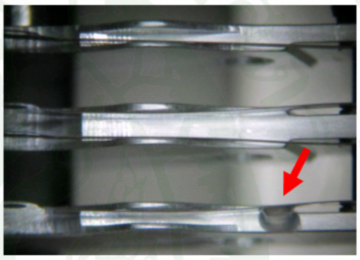
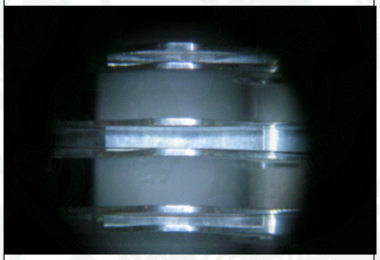
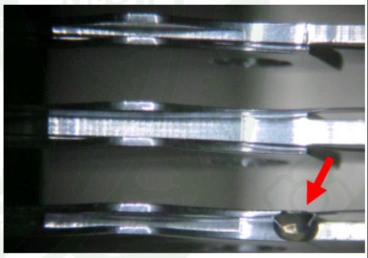
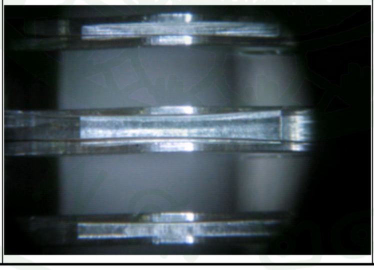
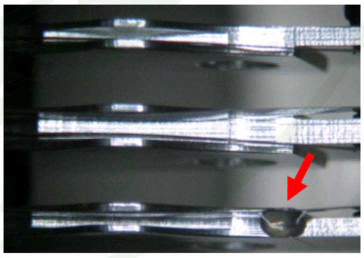
ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG5S6PJ	A219V272		
GLG3RU9J	A20MYN2K		
GLG5LVGJ	F112KBHK		
GLG4KNXJ	A21AWTMK		
GLG3E1RJ	F112KXHW		

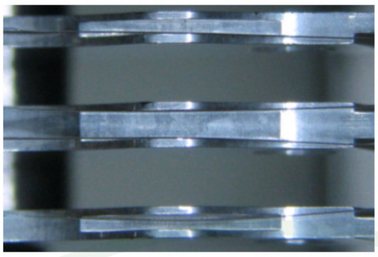
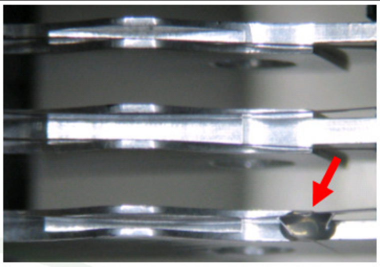
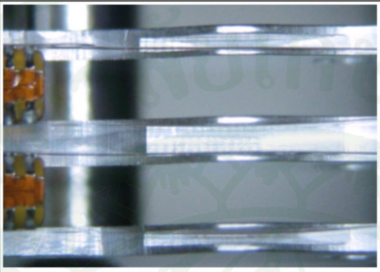
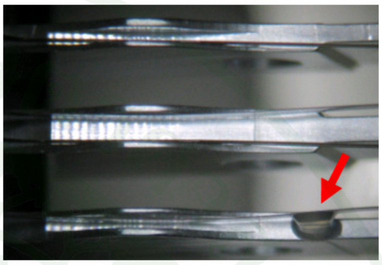
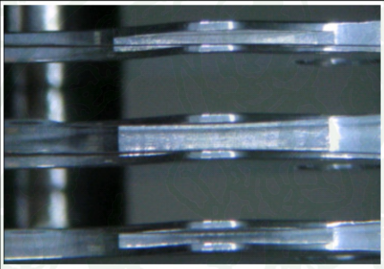
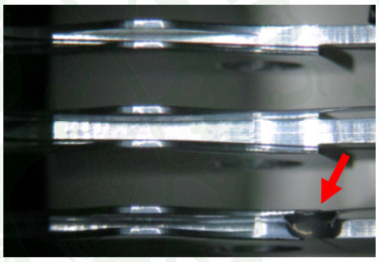
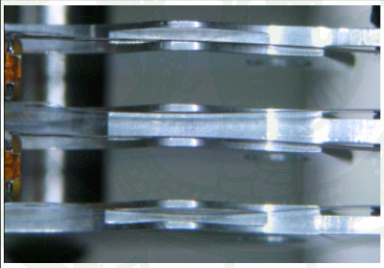
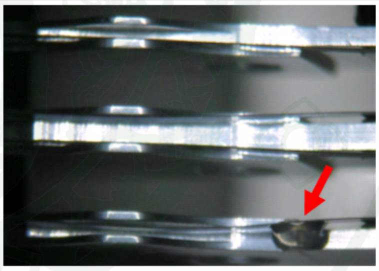
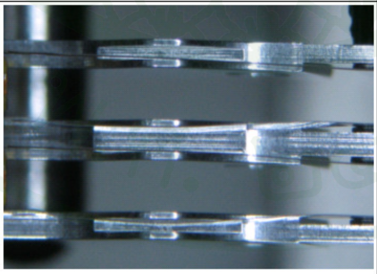
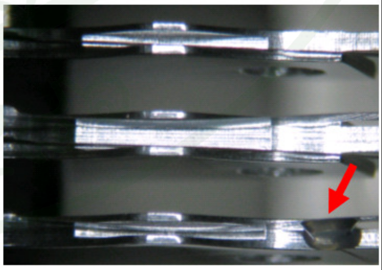
ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG3ZJRJ	A219TCQT		
GLG3WJ7J	A21A81CY		
GLG2M50J	F112BG4S		
GLG4N3YJ	A21AWMVB		
GLG566RJ	F1134Y06		

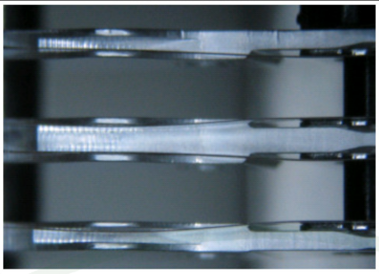
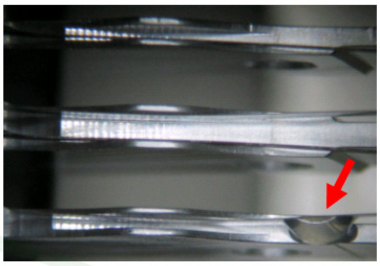
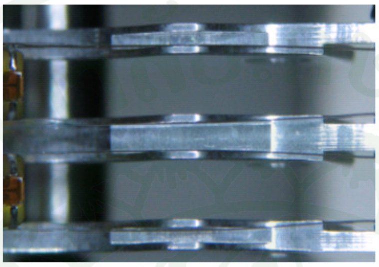
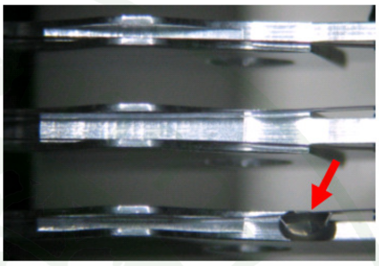
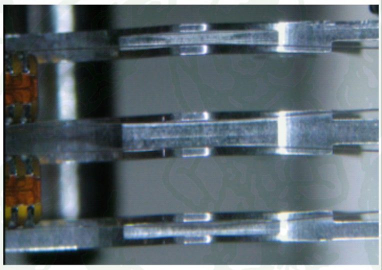
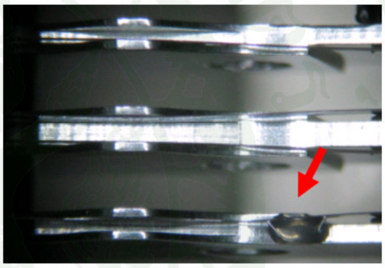
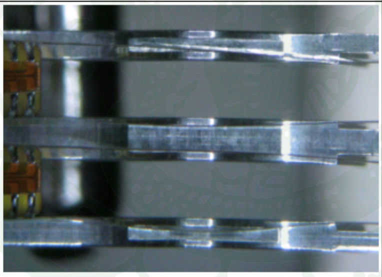
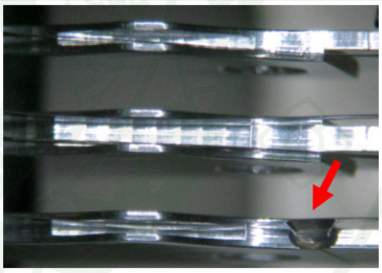
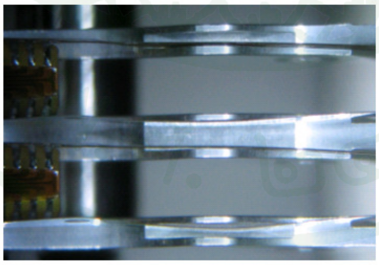
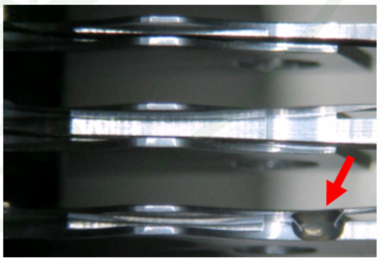
ภาพผนวกที่ ก2 การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการหยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG3NU7J	A21A366Q		
GLG43XWJ	A21A80VS		
GLG5UDVJ	A21B6092		
GLG3VGKJ	A219ZRYQ		
GLG4WZLJ	F1121JBZ		

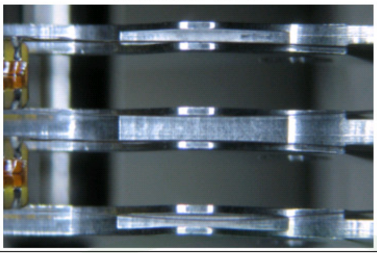
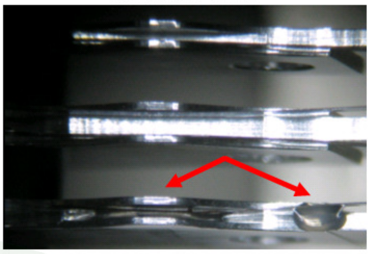
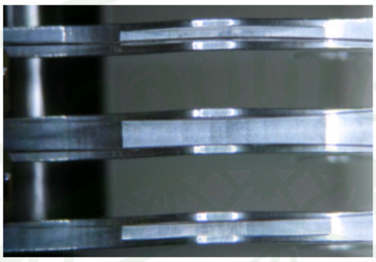
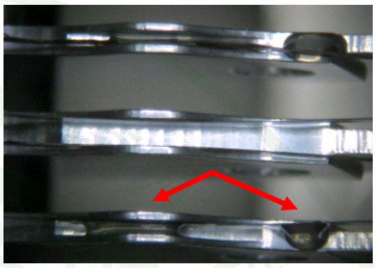
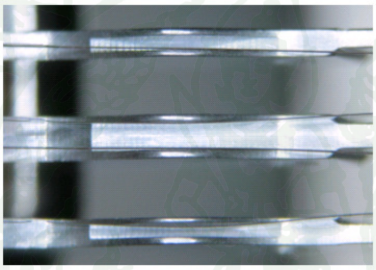
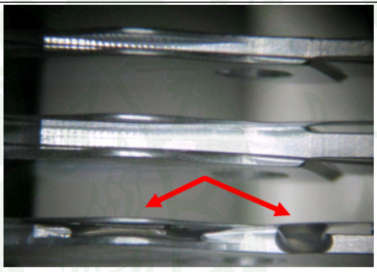
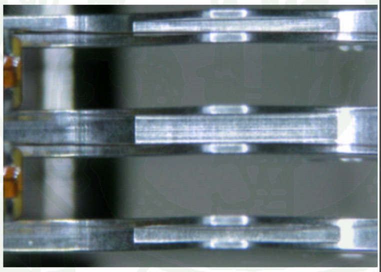
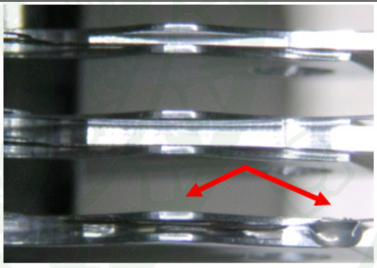
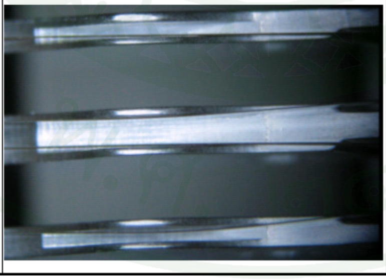
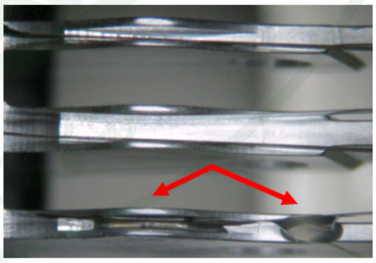
ภาพผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG3N6SJ	A219PKRN		
GLG4GYRJ	A21AWLGK		
GLG3U12J	A219ZT1F		
GLG63MLJ	A21BDYLR		
GLG4GEDJ	F112HQ2V		

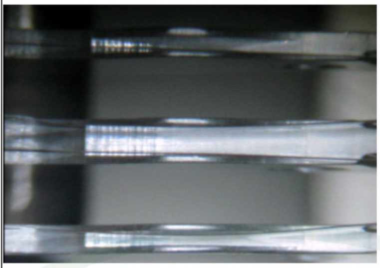
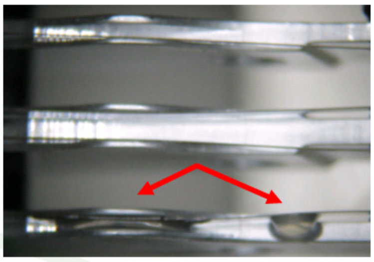
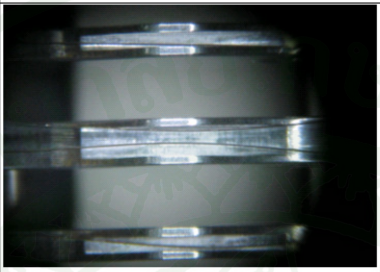
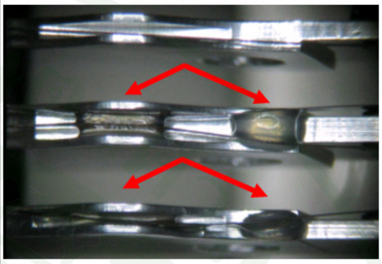
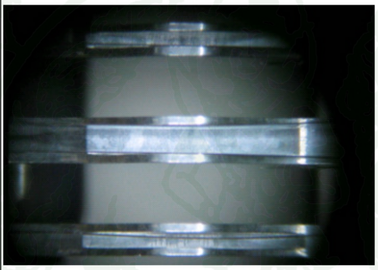
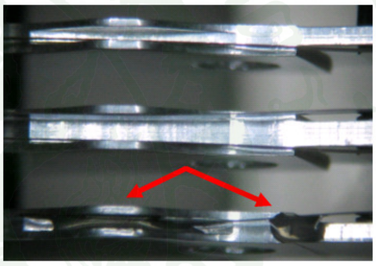
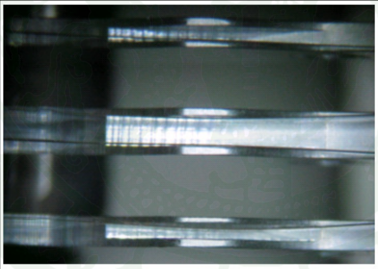
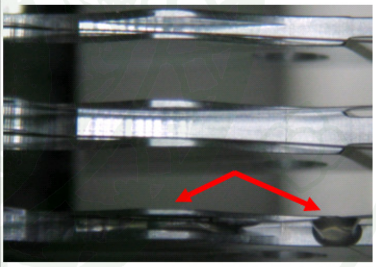
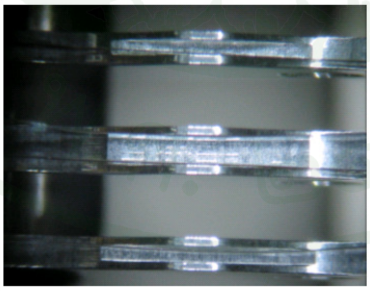
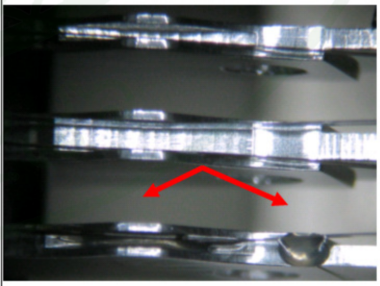
ภาพผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG571BJ	F113580C		
GLG4L0GJ	F112107W		
GLG6029J	A21B2358		
GLG5GTLJ	A21AVGHL		
GLG3N7AJ	A219Z1GQ		

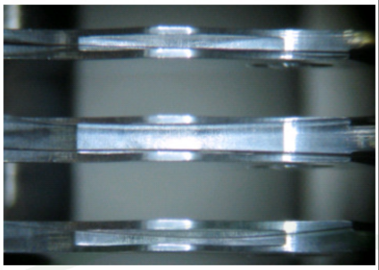
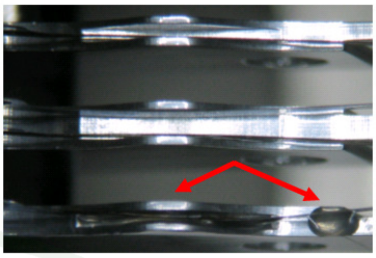
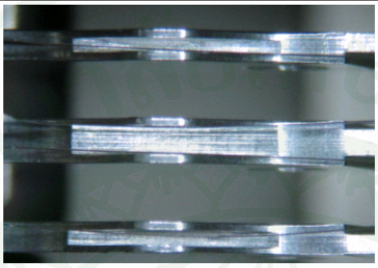
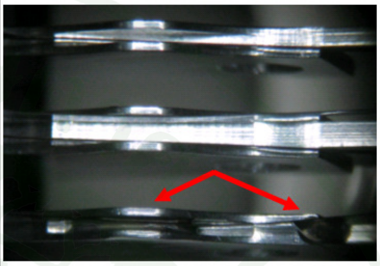
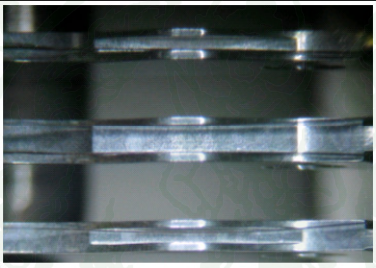
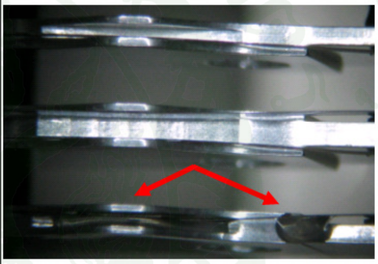
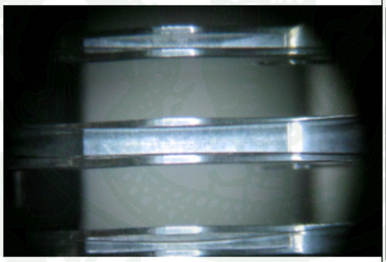
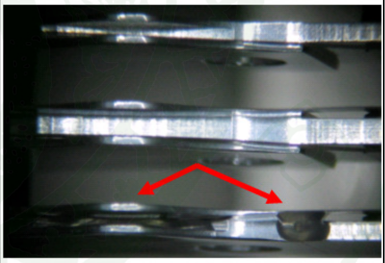
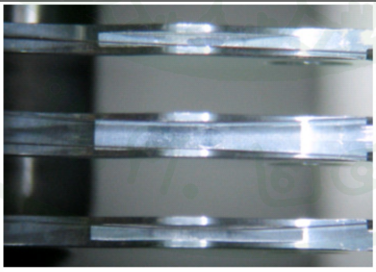
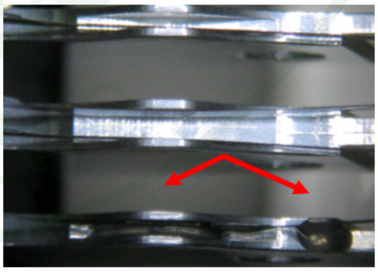
ภาพผนวกที่ ก3 การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG3L4DJ	A219ZVT3		
GLG63G1J	F1136VLB		
GLG3D8UJ	A21A8HM7		
GLG5GGYJ	A21AP1NL		
GLG5GTJJ	A21AVKV3		

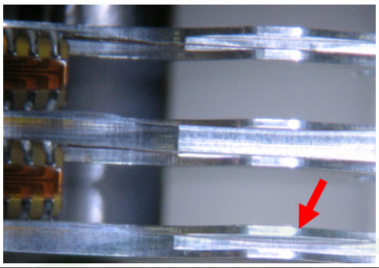
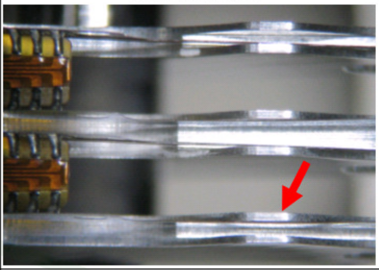
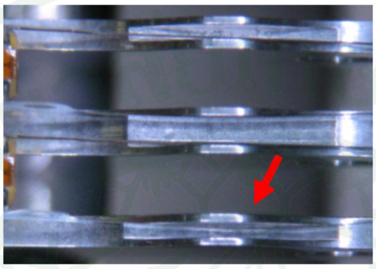
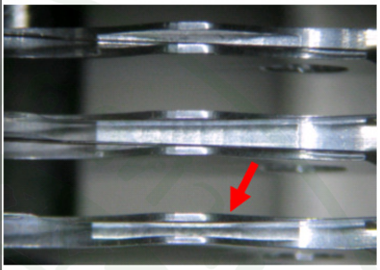
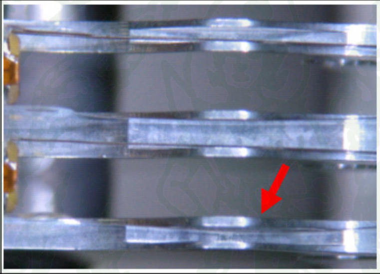
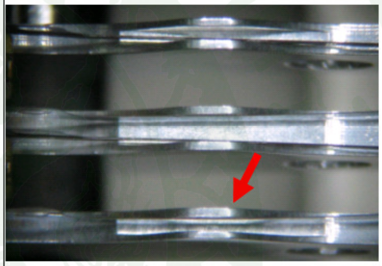
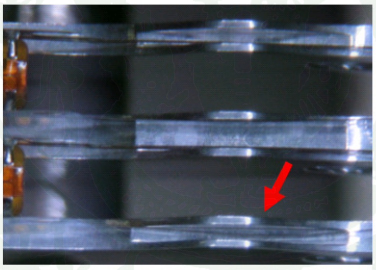
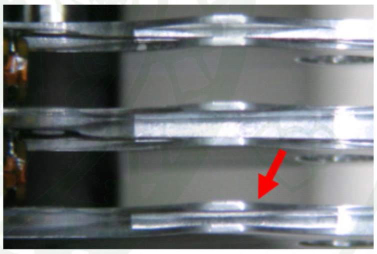
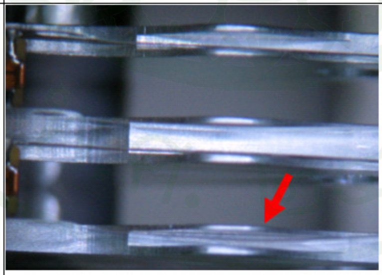
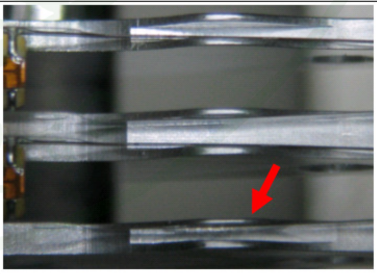
ภาพผนวกที่ ก3 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการหยอดกาว	หลังการหยอดกาว
GLG3L70J	A20MZ33C		
GLG63ANJ	A21BJZHX		
GLG41SSJ	A21A8GJS		
GLG2M4VJ	F1122FVR		
GLG63MEJ	A21AYZZN		

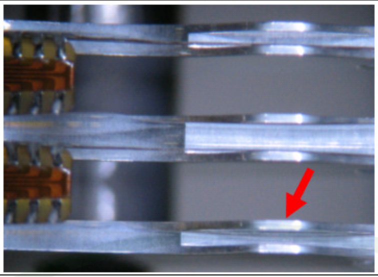
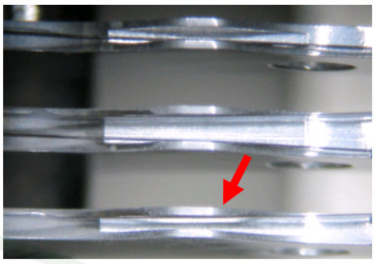
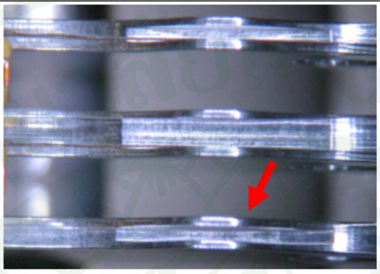
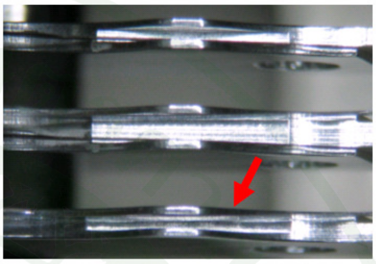
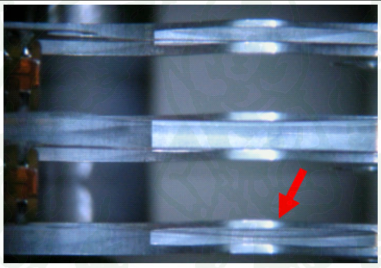
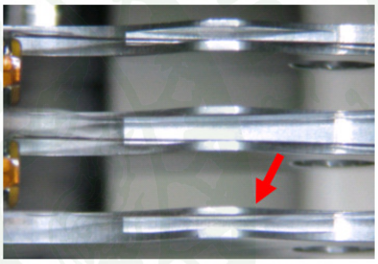
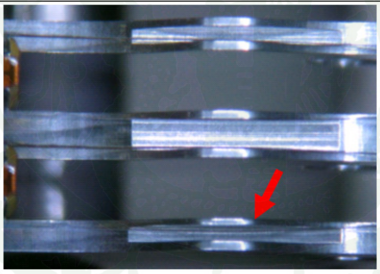
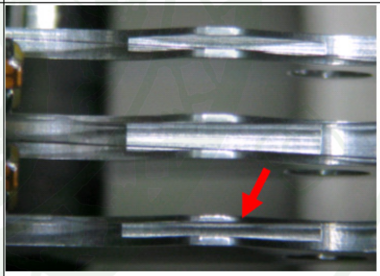
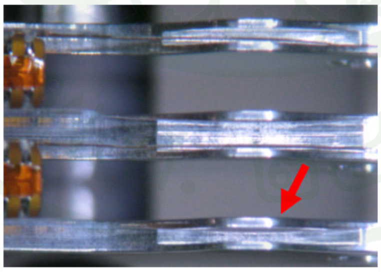
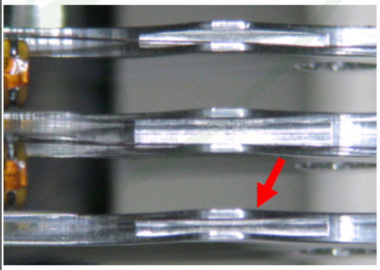
ภาพผนวกที่ ก3 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการบัดกรีซ้ำ	หลังการบัดกรีซ้ำ
VLKY5GWJ	F1114AGP		
VLKZB89J	A219ZMSE		
VLKYVBBJ	A20MTQB1		
VLKYE33J	A20MQRS3		
VLKZB5YJ	F110JVYB		

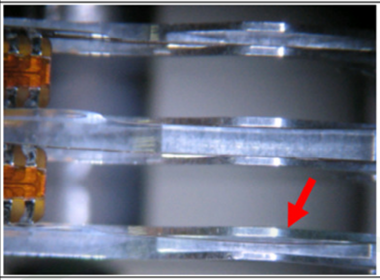
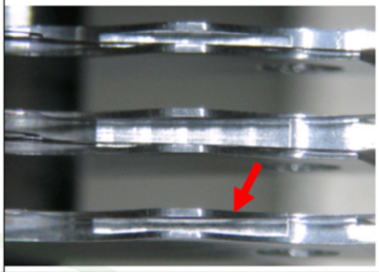
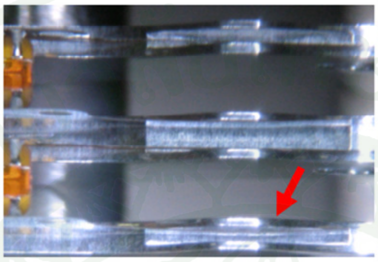
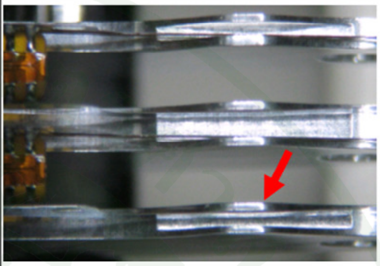
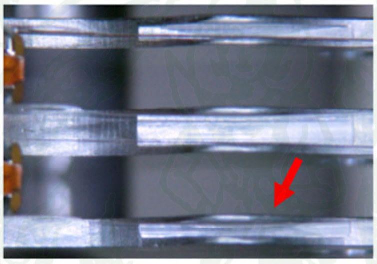
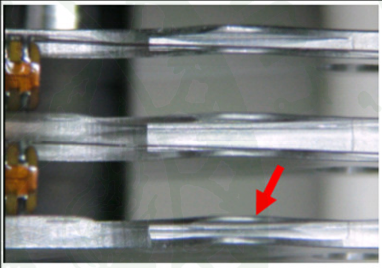
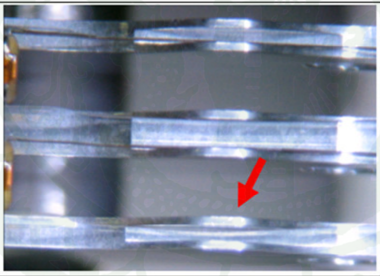
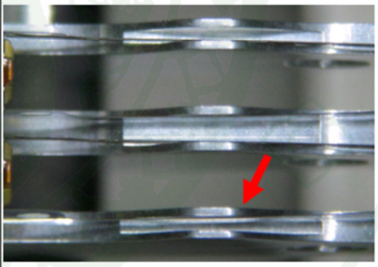
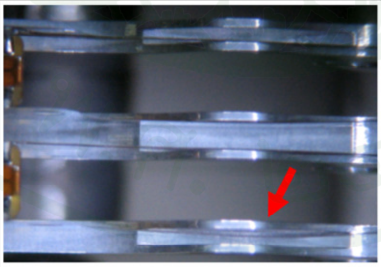
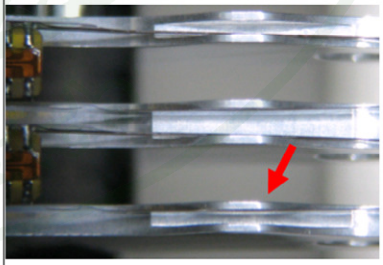
ภาพผนวกที่ ก4 การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรและหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการบัดกรีซ้ำ	หลังการบัดกรีซ้ำ
VLKX4TZJ	A219B5RT		
VLKYY5WJ	A219WVHD		
VLKYZ47J	A20HNWTG		
VLKY7PSJ	F110YPM8		
VLKY7BJJ	A20MYXPG		

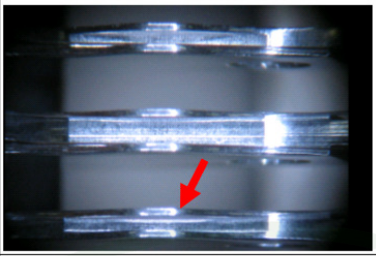
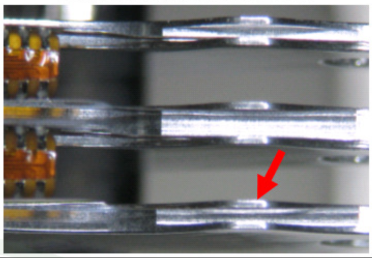
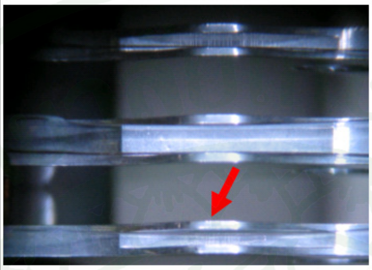
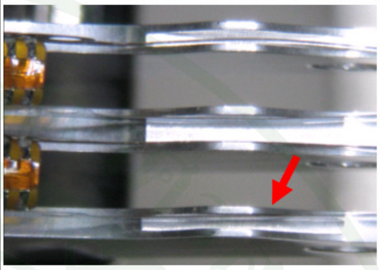
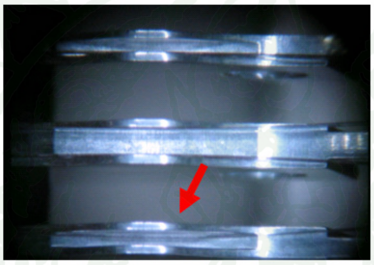
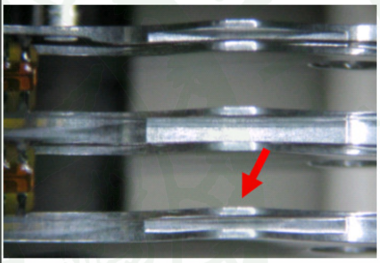
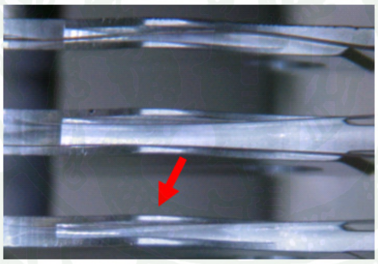
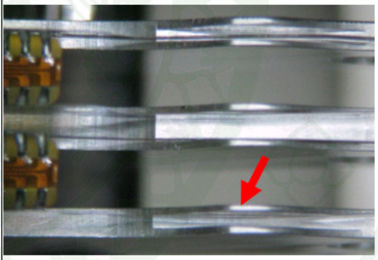
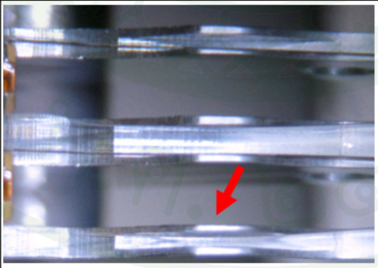
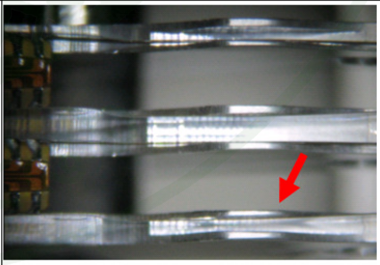
ภาพผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการบัดกรีซ้ำ	หลังการบัดกรีซ้ำ
VLKY7R4J	A20L4D00		
VLKZ9V0J	A20FTPP1		
VLKY9X5J	A20M6YTB		
VLKTUHPJ	F110WPMV		
VLKXMMGJ	A219R2Q9		

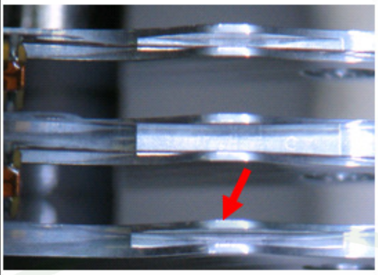
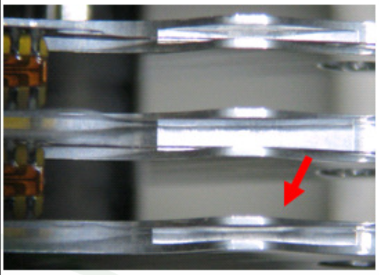
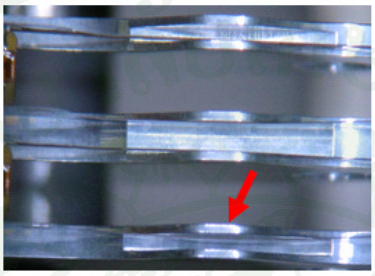
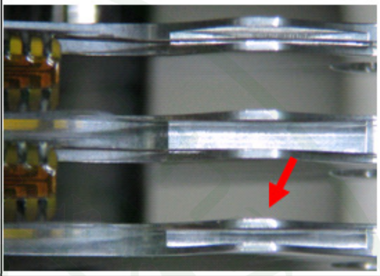
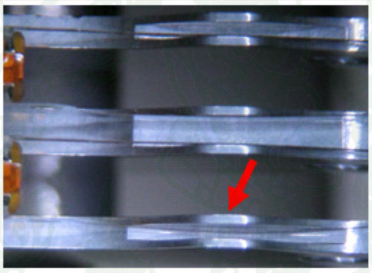
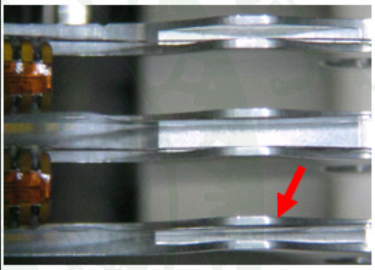
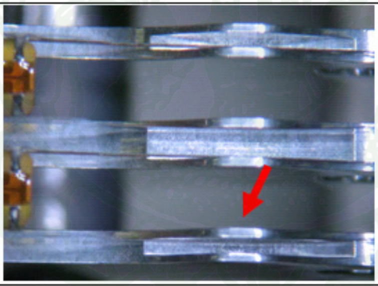
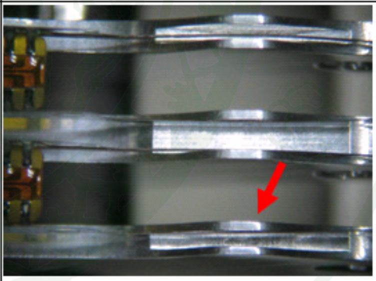
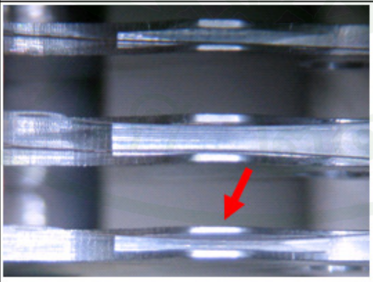
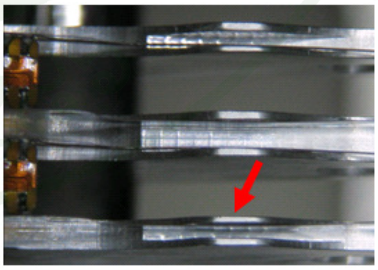
ภาพผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการปรับตำแหน่ง Flex cable	หลังการปรับตำแหน่ง Flex cable
GLG3MEPJ	A219ZFWY		
GLG3T03J	A219YLJ8		
GLG19A3J	A219S2SD		
GLG5MTMJ	A219N7MA		
GLG3ES7J	F112P962		

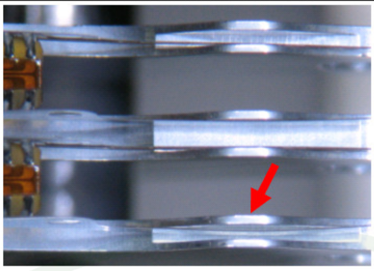
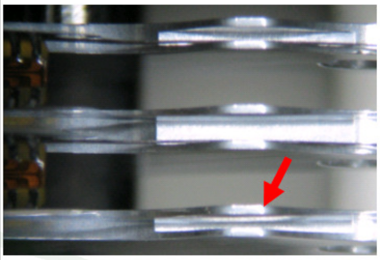
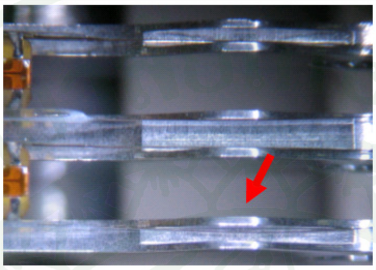
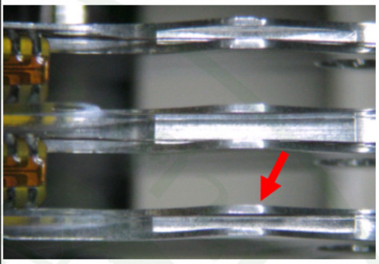
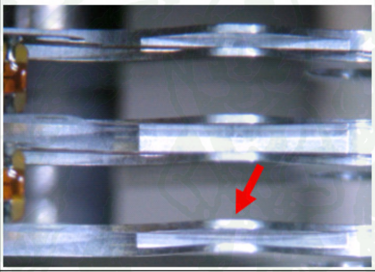
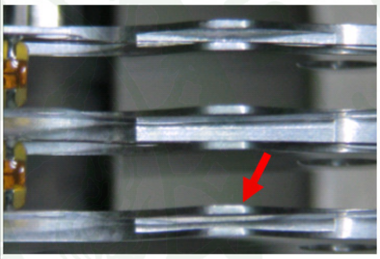
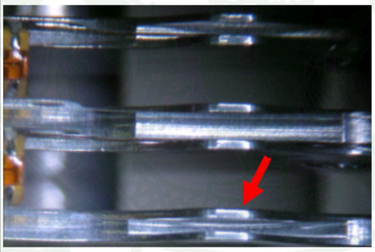
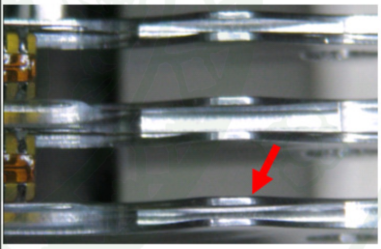
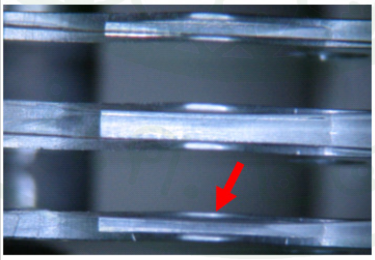
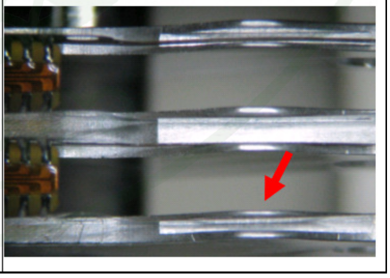
ภาพผนวกที่ ก5 การตรวจสอบช่องว่างระหว่างส่วนหางของหัวอ่านเขียนกับช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนก่อนและหลังการจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการปรับตำแหน่ง Flex cable	หลังการปรับตำแหน่ง Flex cable
VLKYMGTJ	A219B4BB		
VLKZ9X5J	F1121GHY		
VLKZ0E5J	A20MYSMN		
VLKYVM7J	A219B9ZQ		
VLKYLL3J	A20L3HW6		

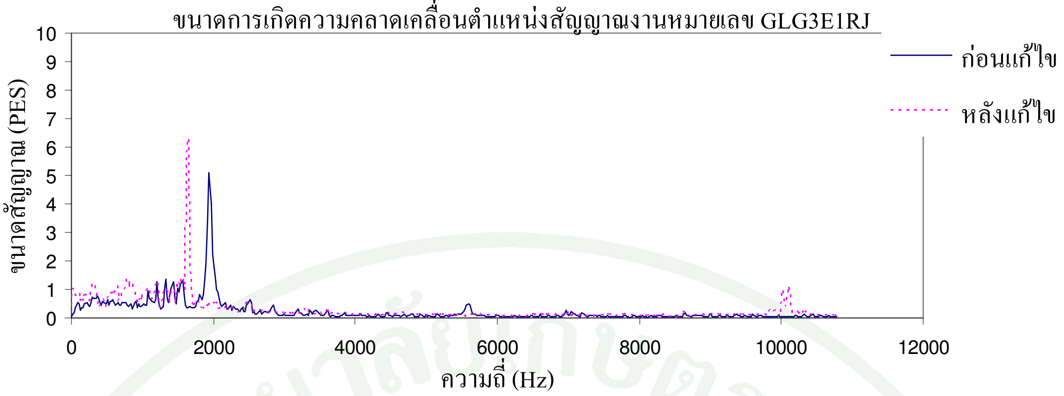
ภาพผนวกที่ ก5 (ต่อ)

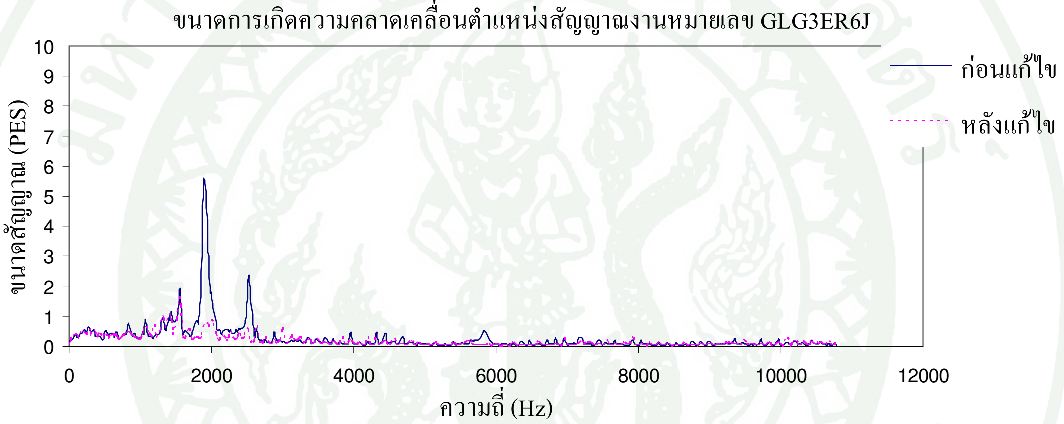
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

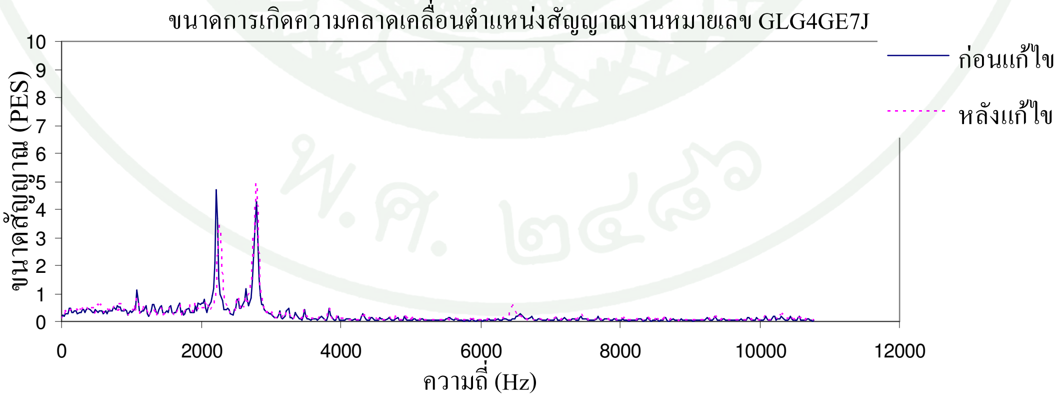
HDD Serial	HSA Serial	ก่อนการปรับตำแหน่ง Flex cable	หลังการปรับตำแหน่ง Flex cable
VLKYM5KJ	A219B1ZW		
VLKY7R0J	A219TGGS		
VLKZ9XMJ	F110WRWS		
VLKY7M1J	F1114AMT		
VLKZ8A7J	A2193SR5		

ภาพผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

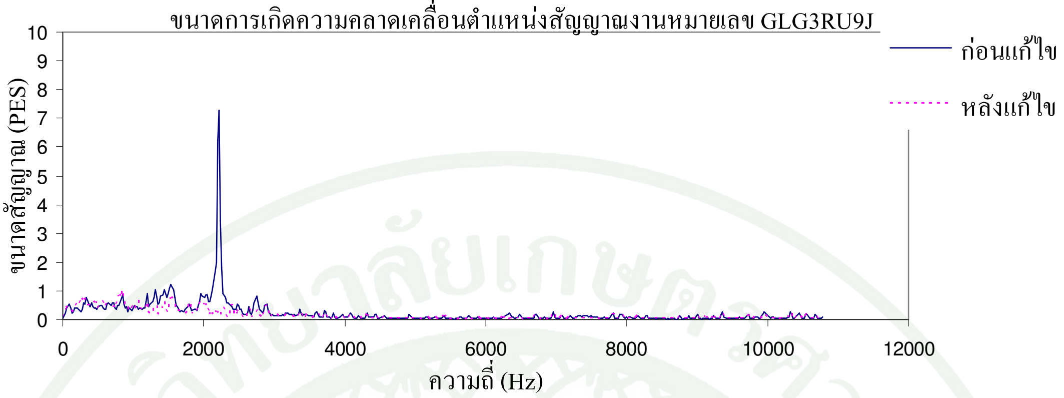


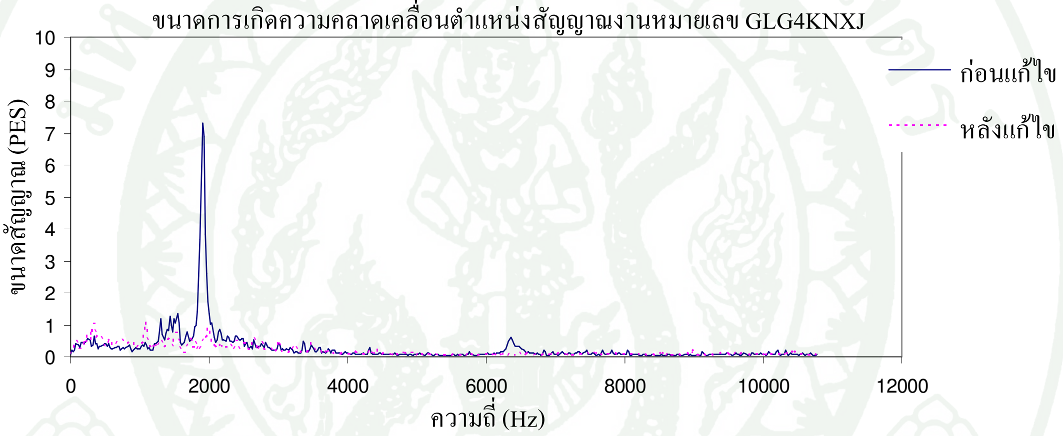


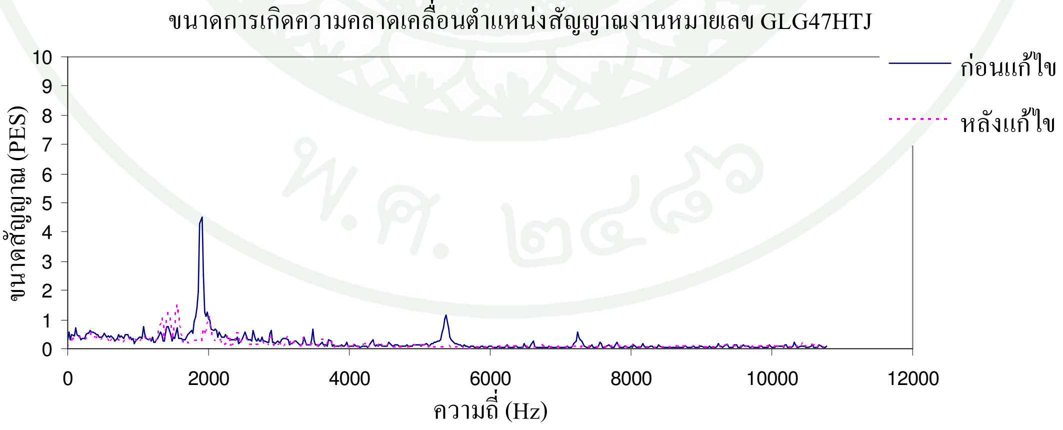


ภาพผนวกที่ ก6 ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไขด้วยการหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

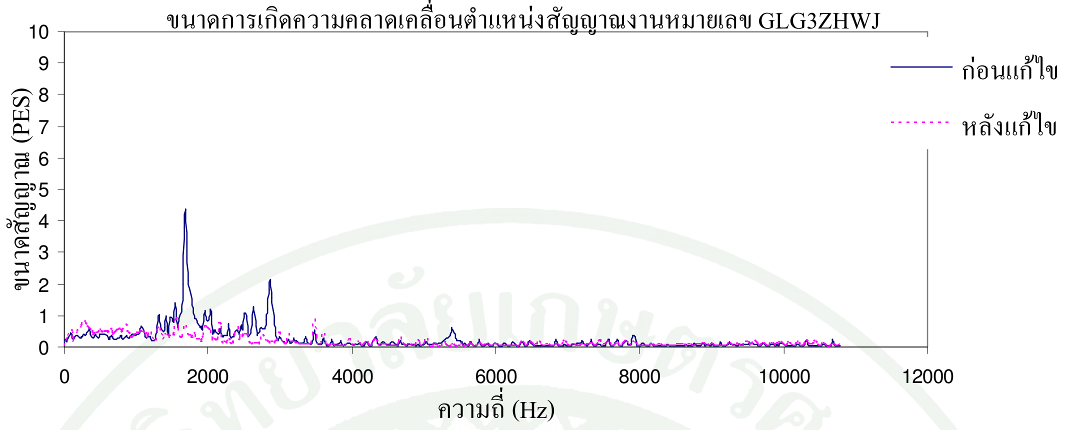


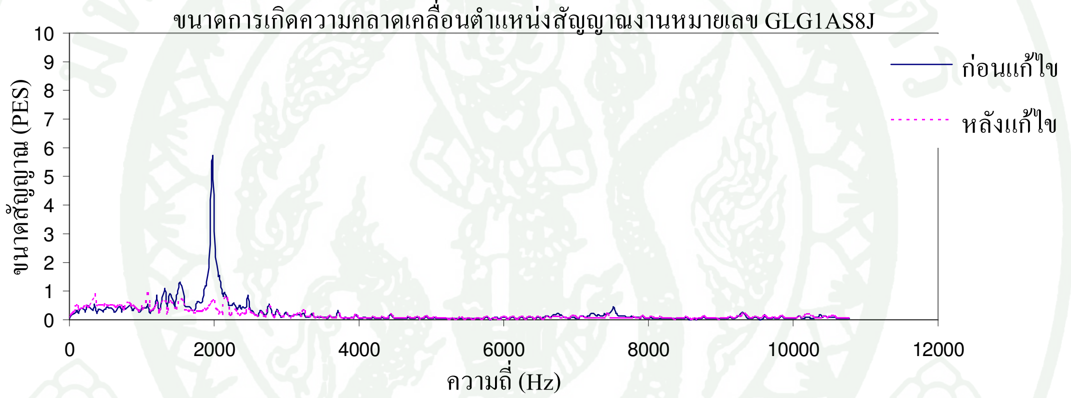


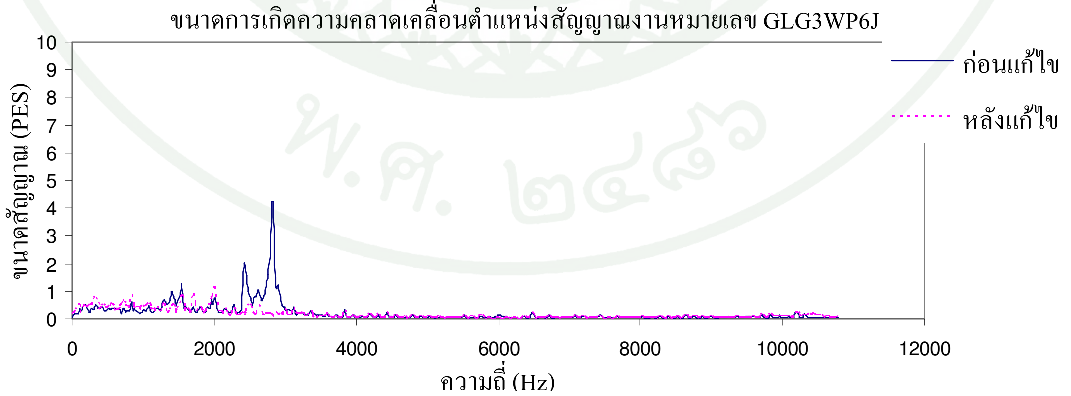


ภาพผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

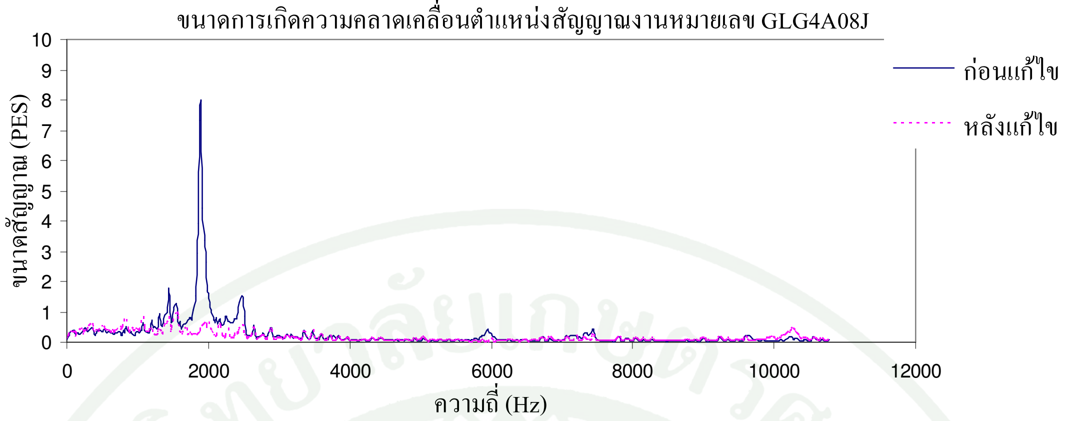


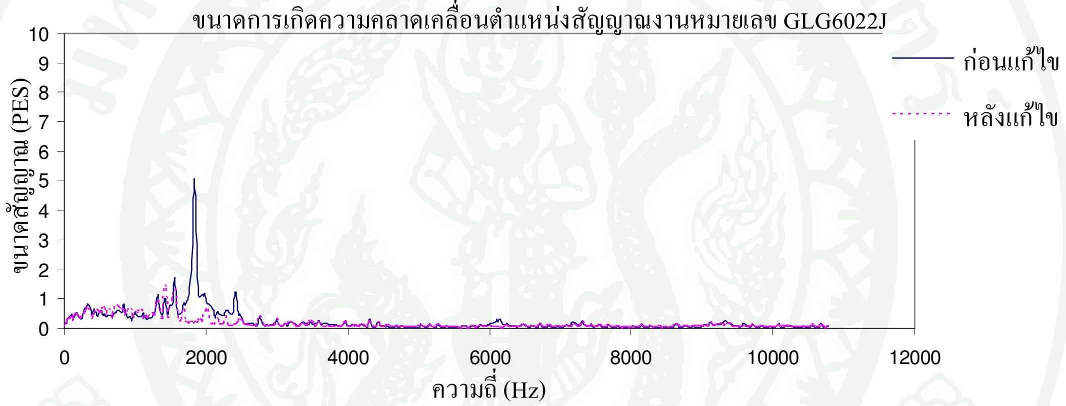


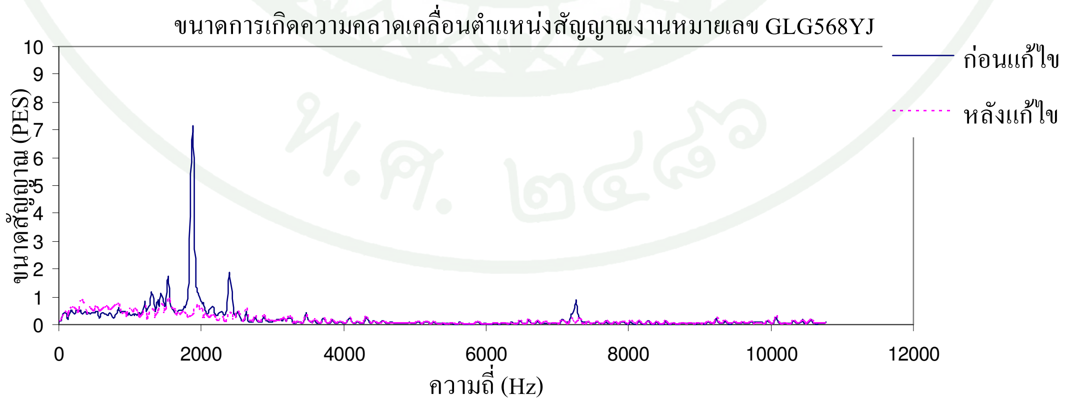


ภาพผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

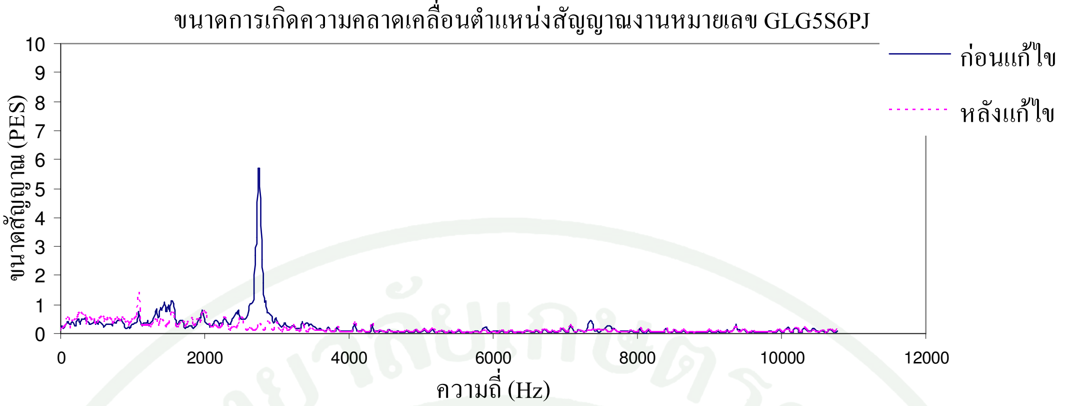


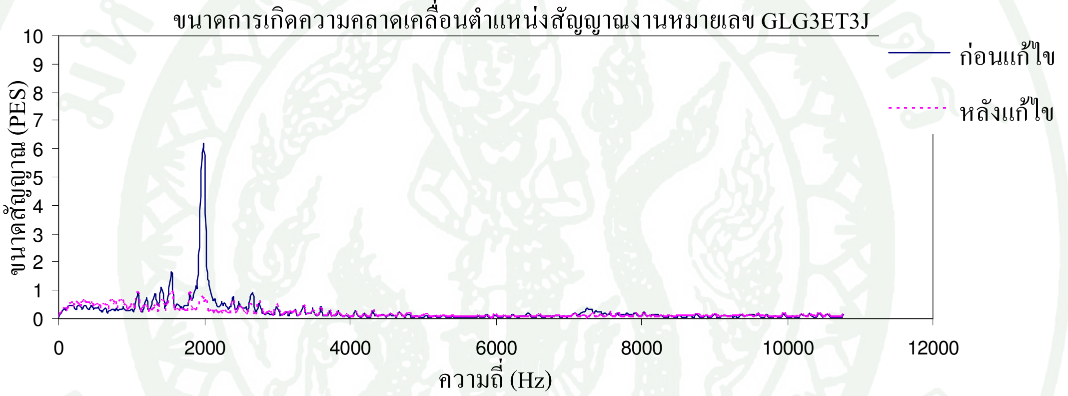


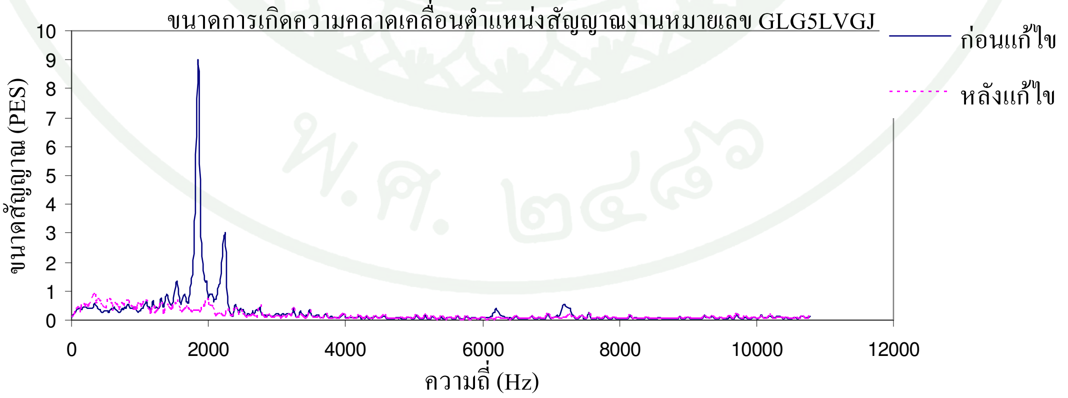


ภาพผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

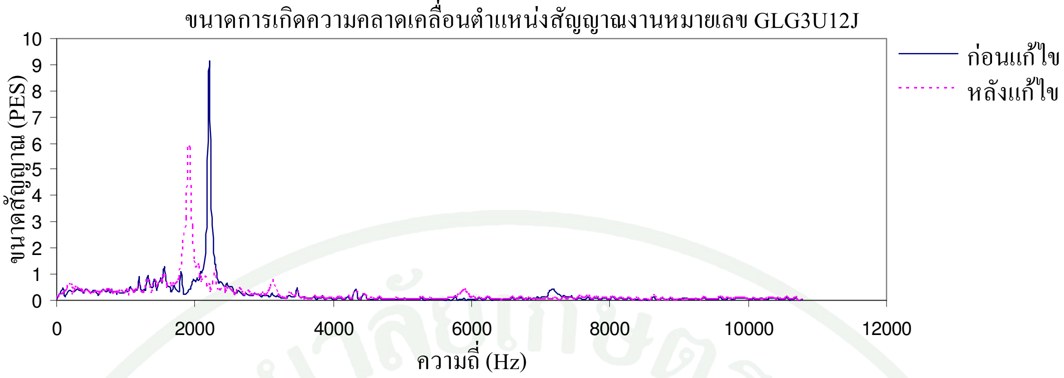


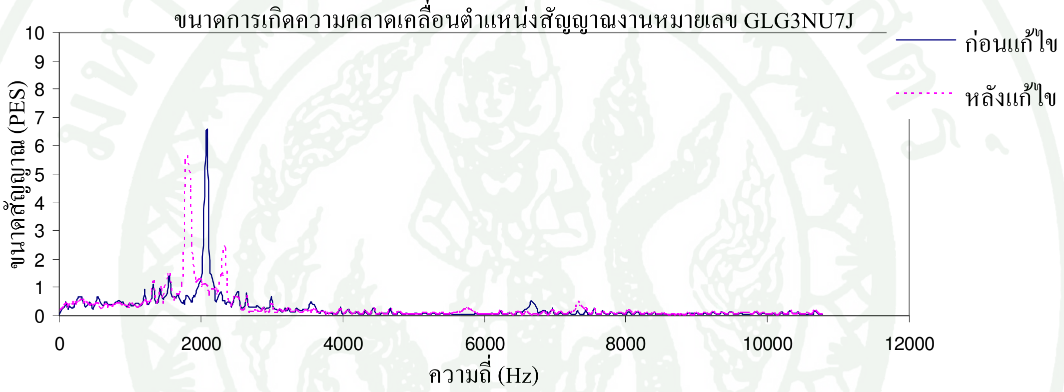


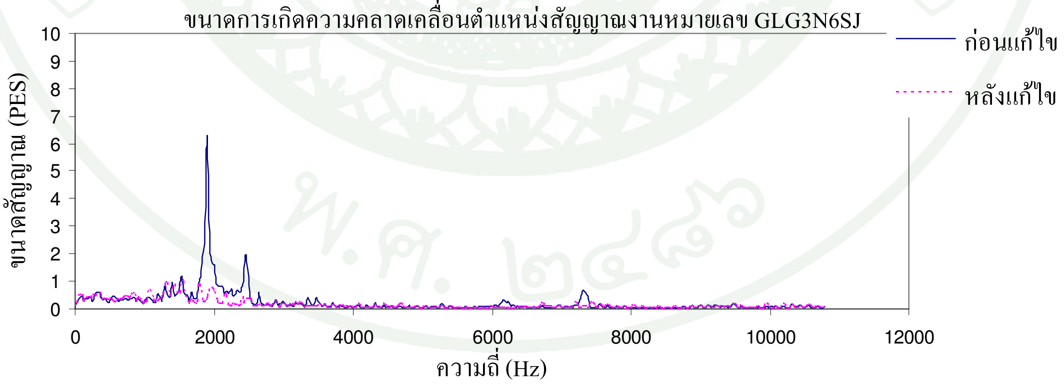


ภาพผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

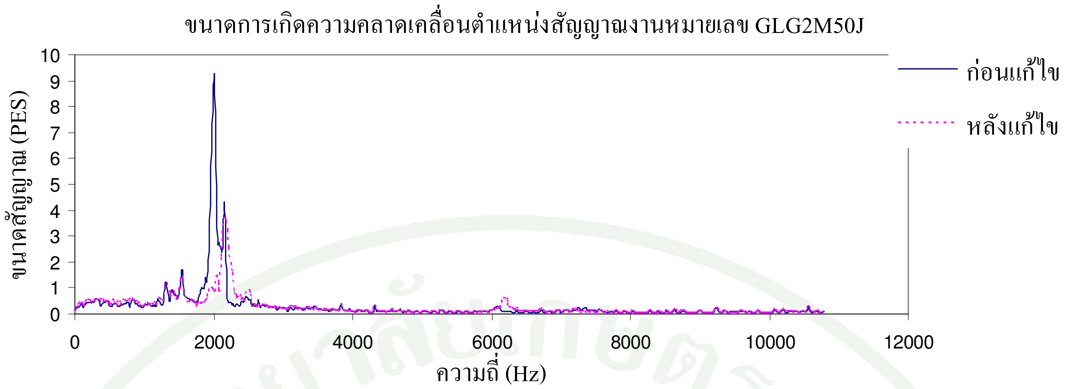


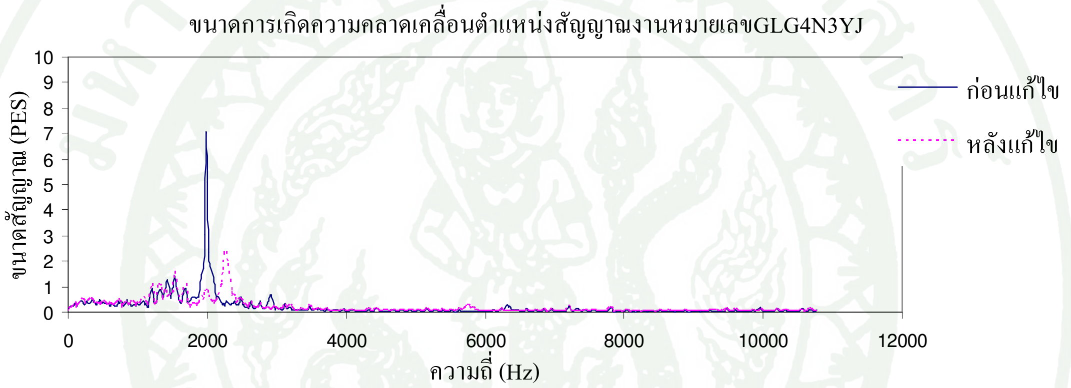


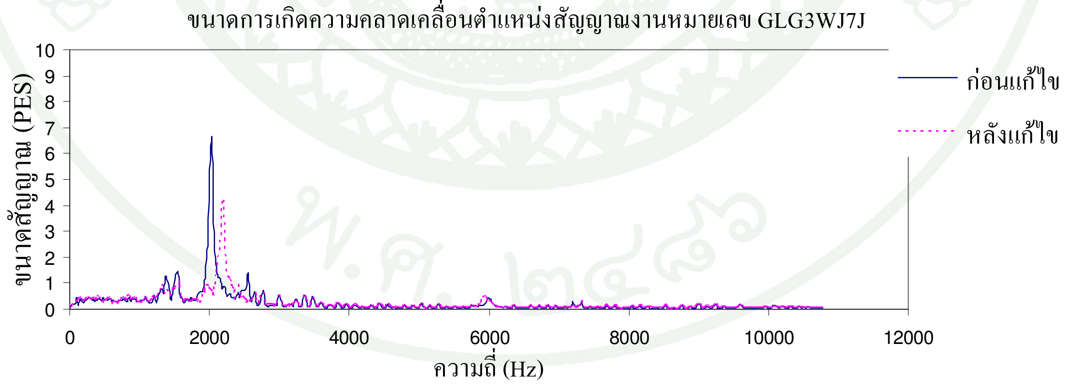


ภาพผนวกที่ ก7 ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยการหยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

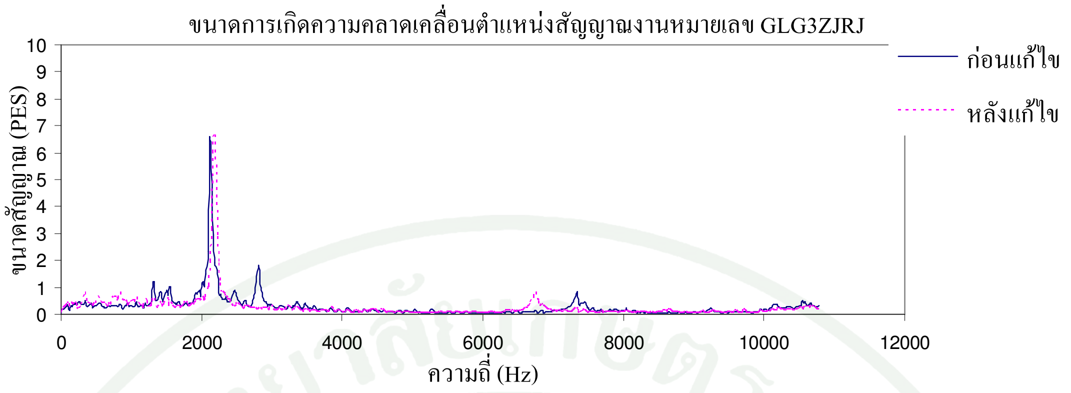


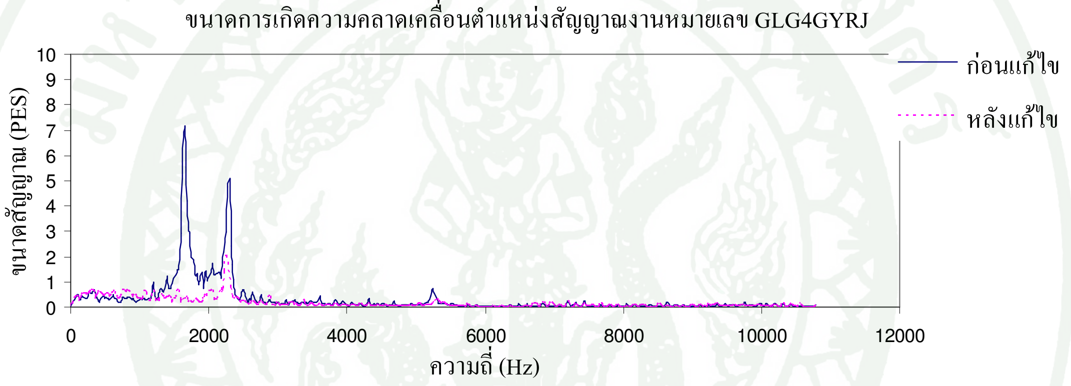


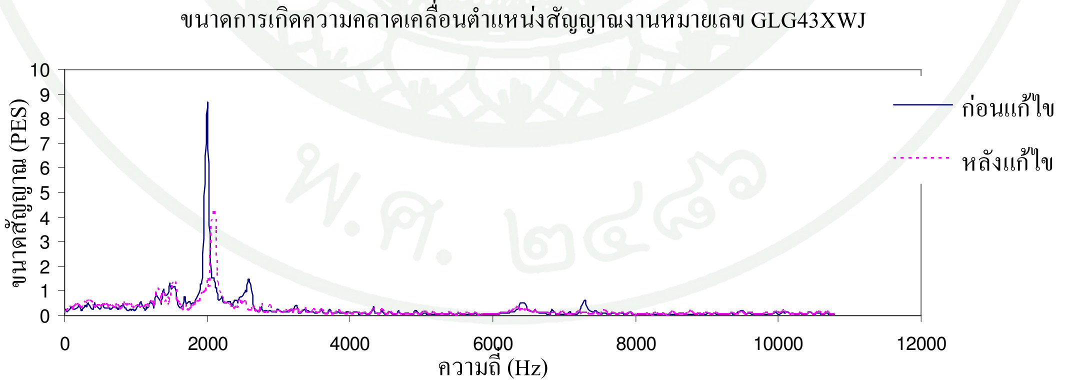


ภาพผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

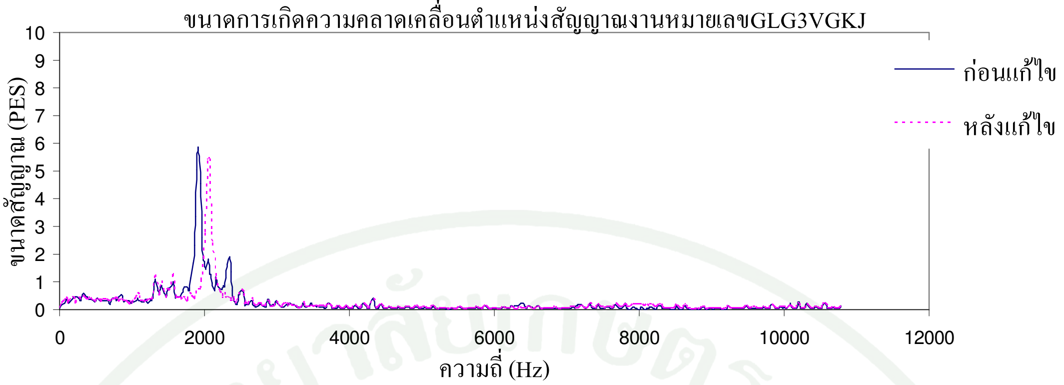


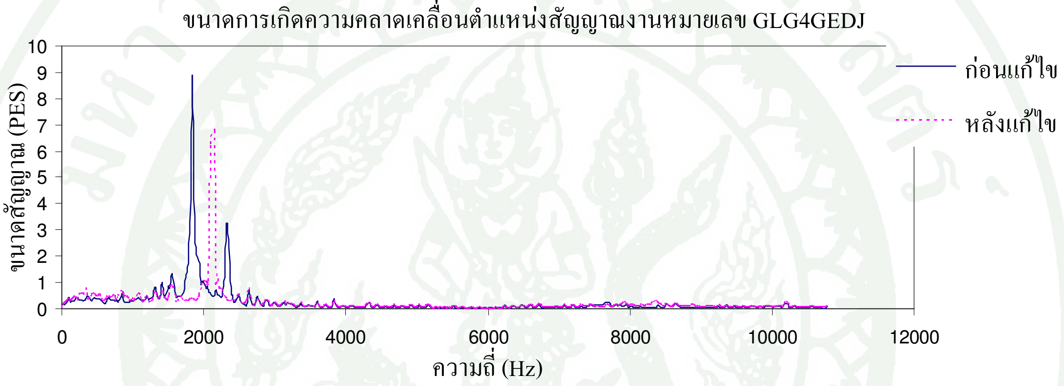


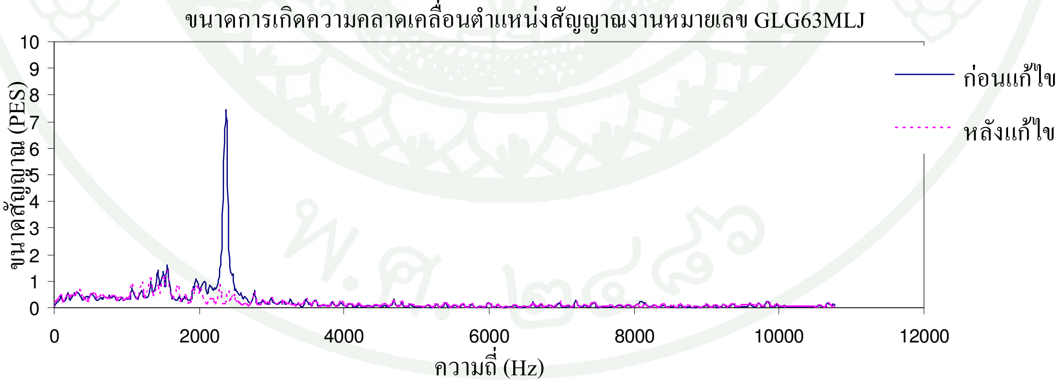


ภาพผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

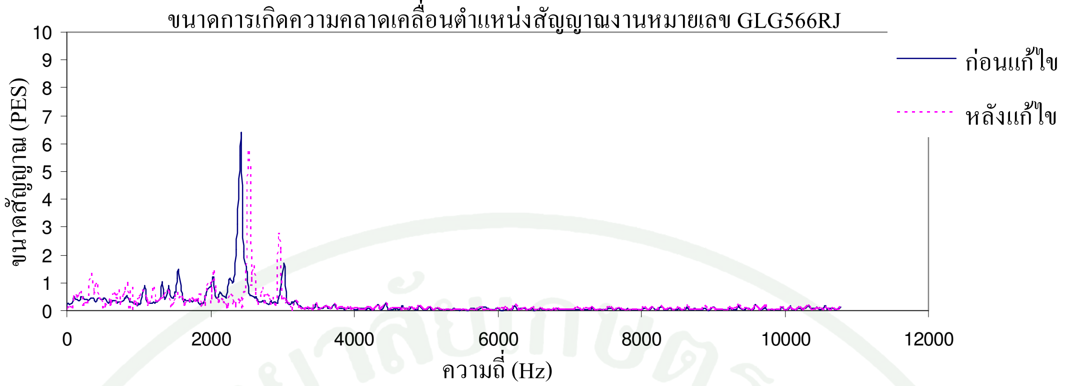


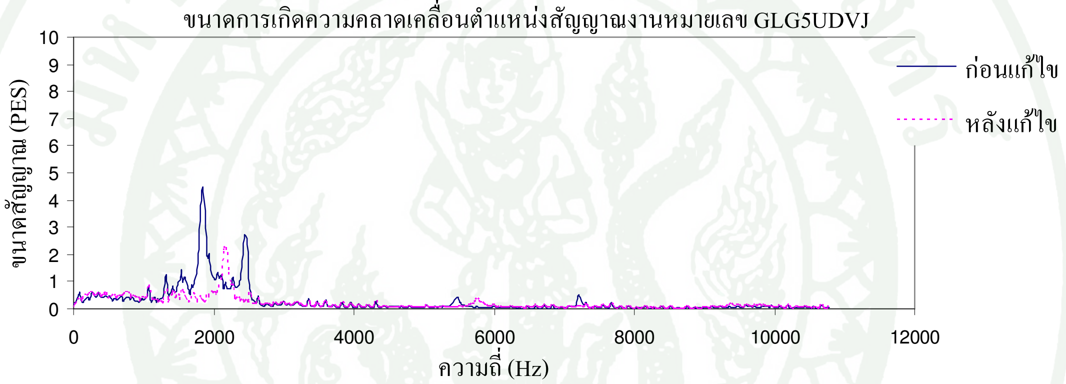


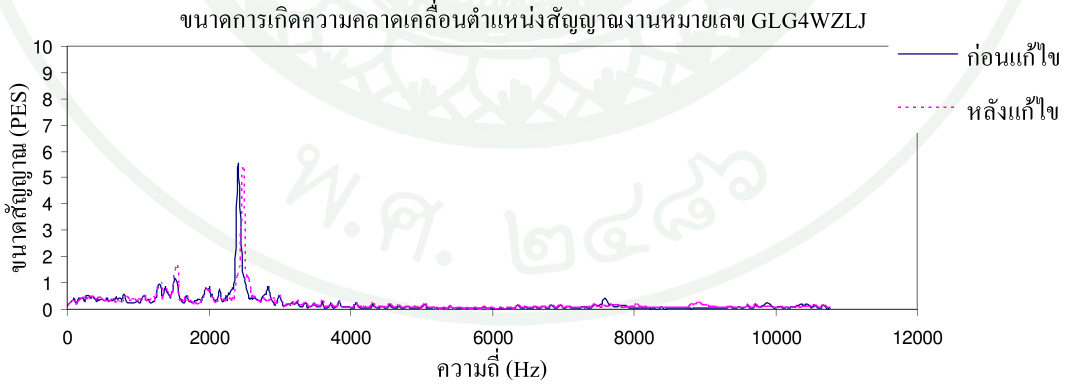


ภาพผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

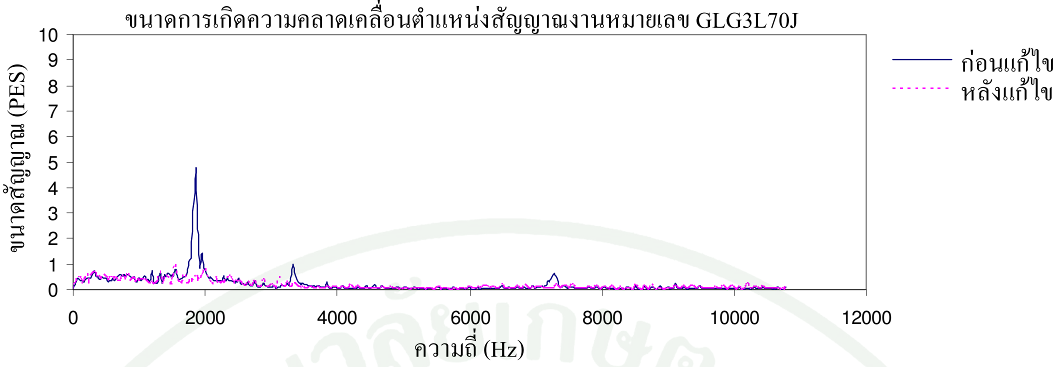


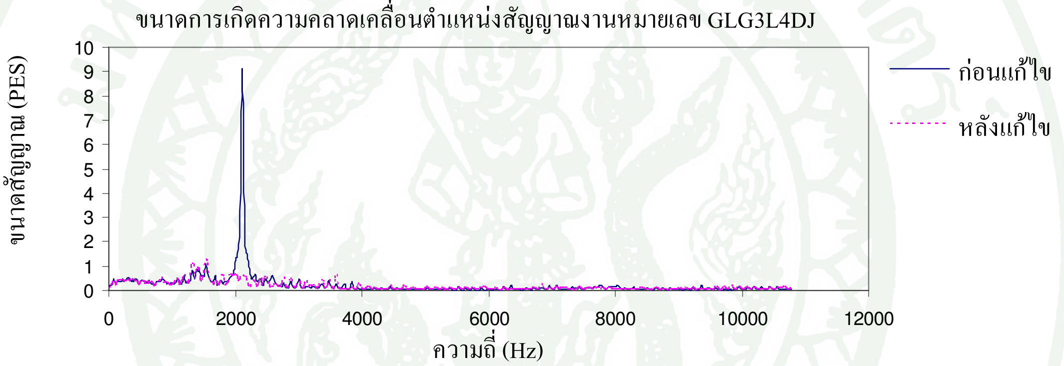


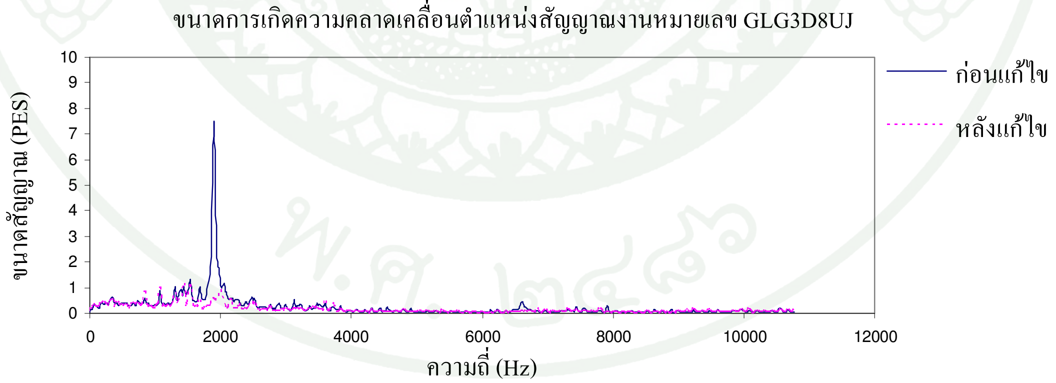


ภาพผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

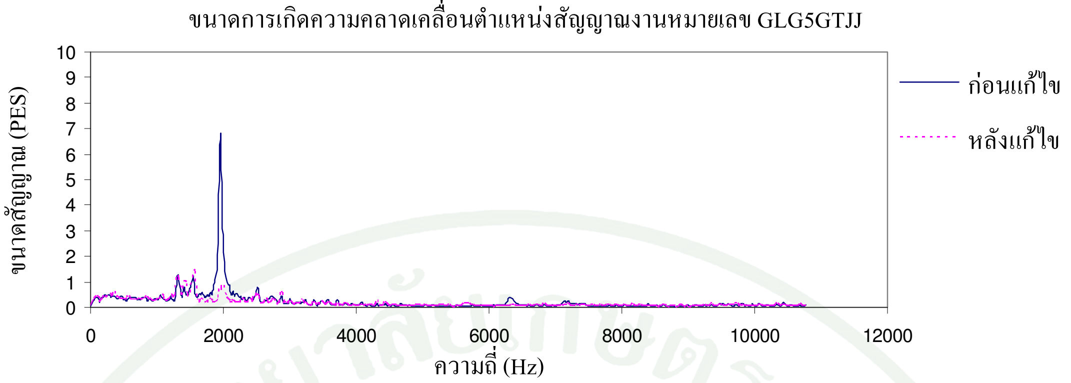


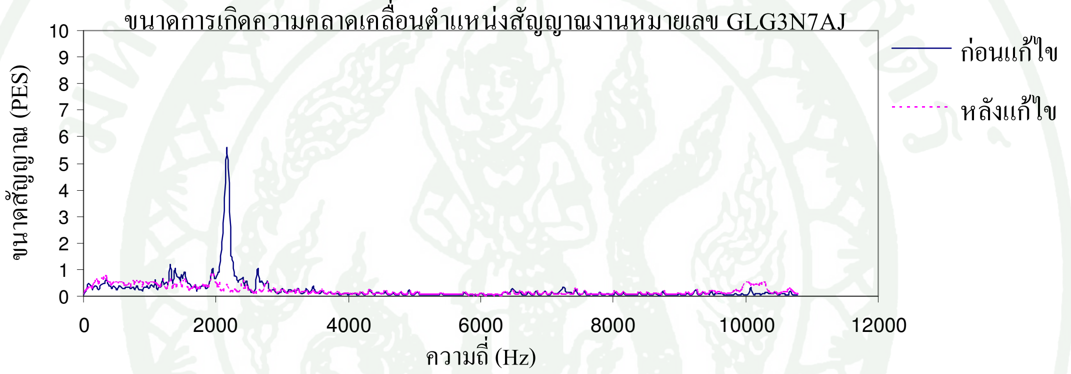


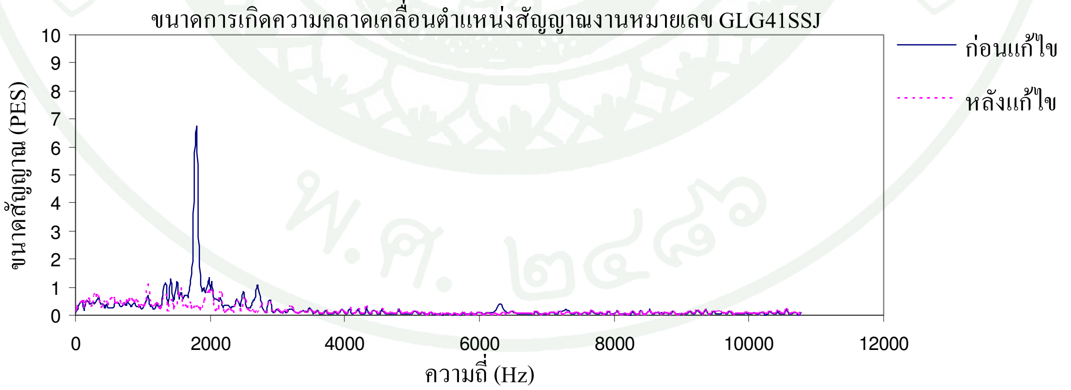


ภาพผนวกที่ ก8 ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยการหยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนและส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

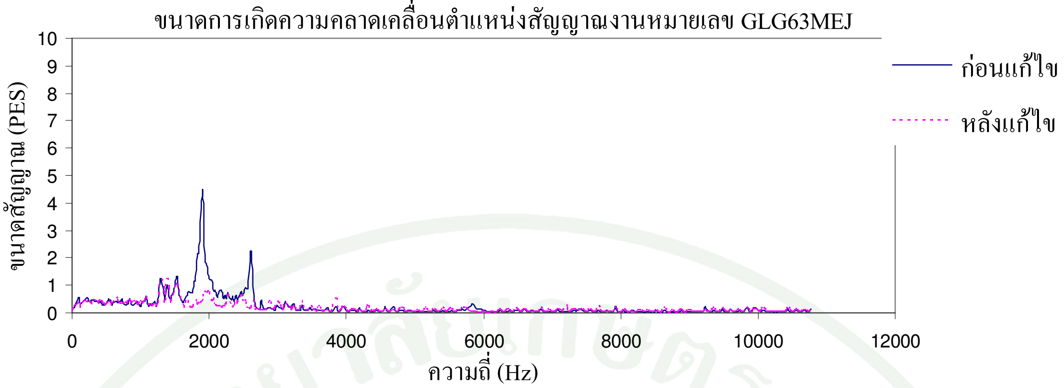


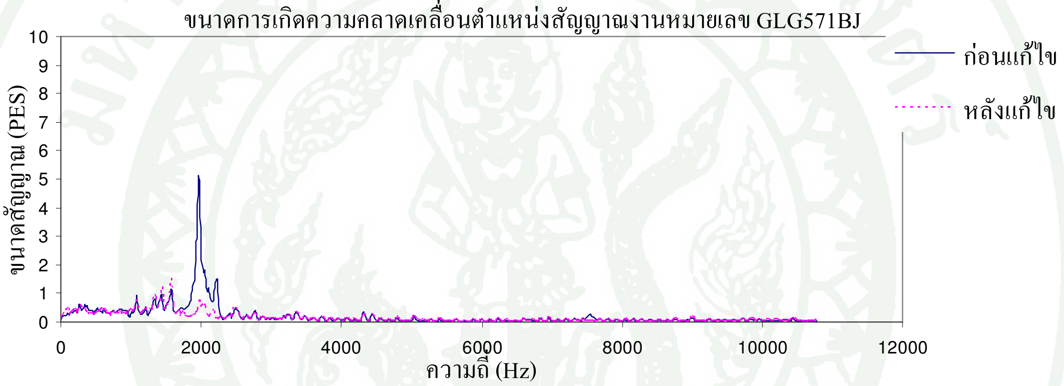


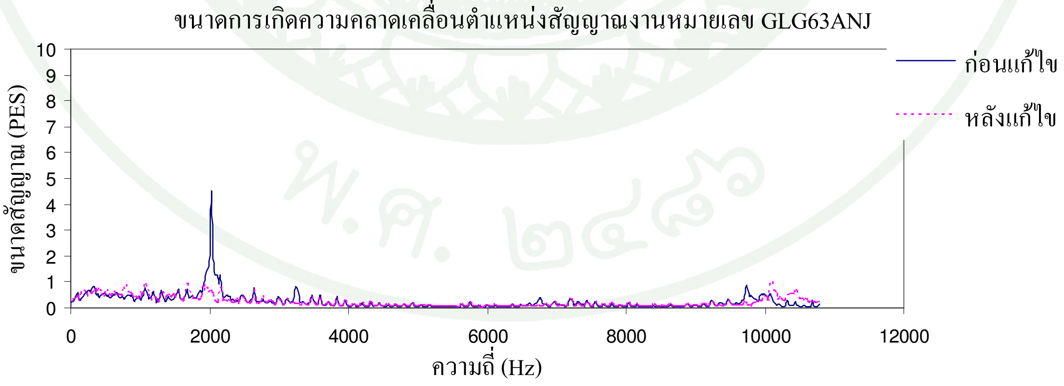


ภาพผนวกที่ ก8 (ต่อ)

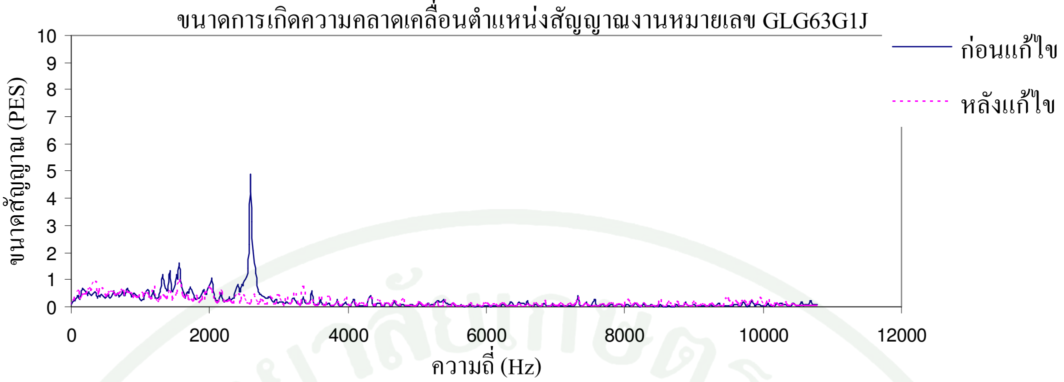
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

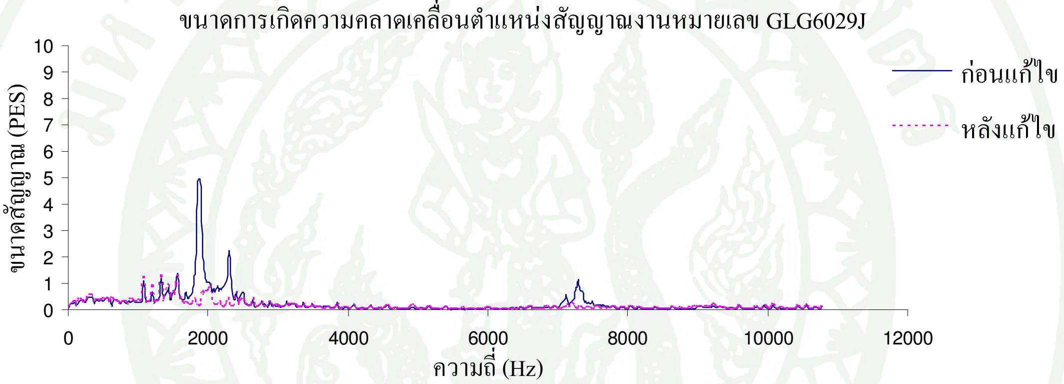


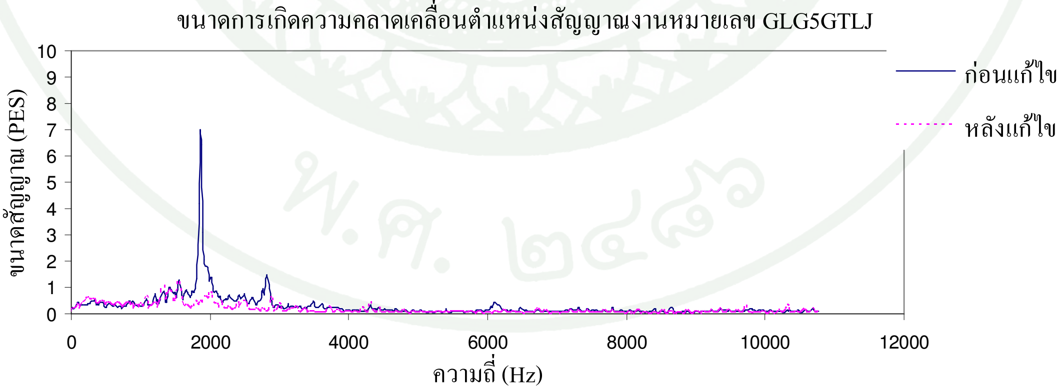




ภาพผนวกที่ ก8 (ต่อ)

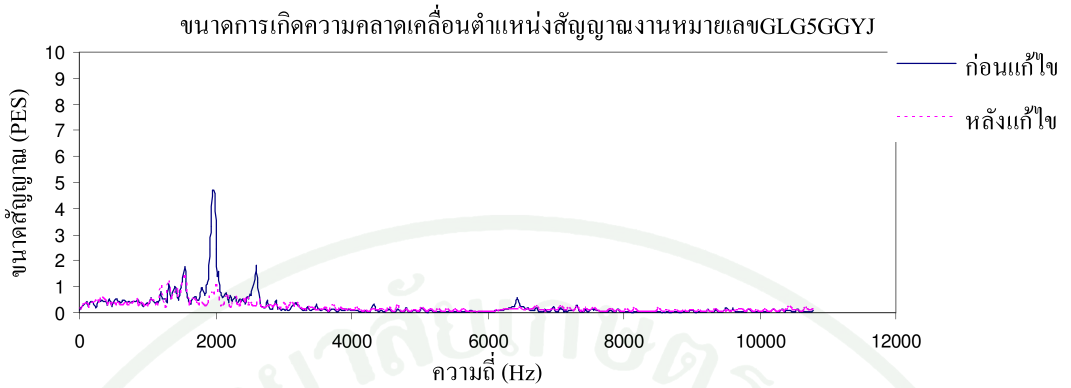


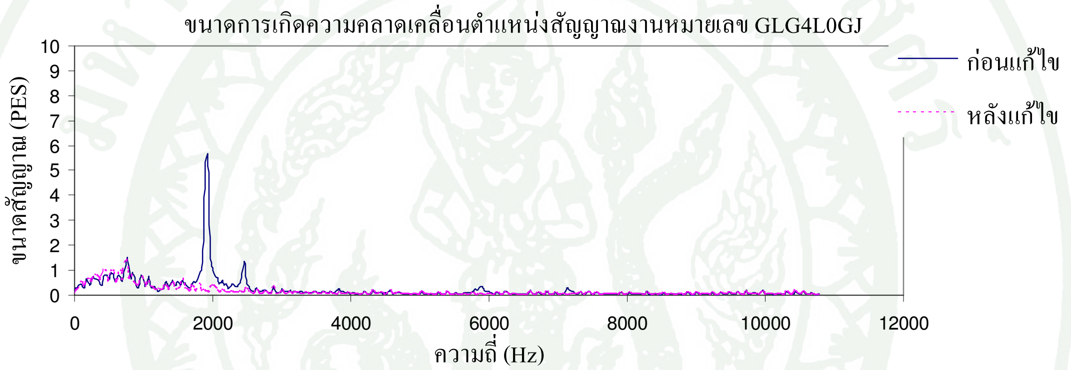


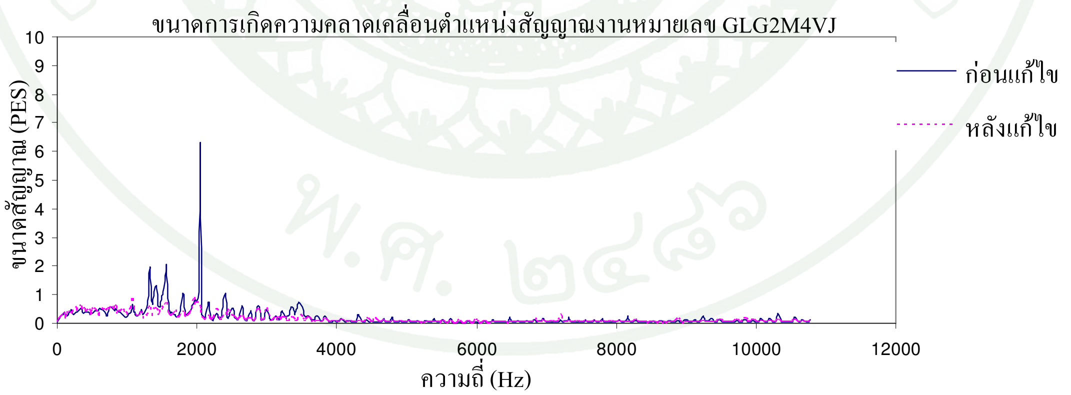


ภาพผนวกที่ ก8 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

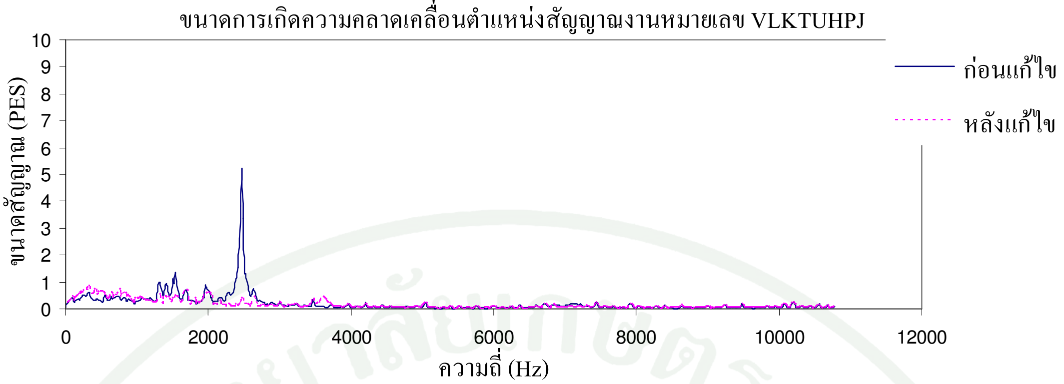


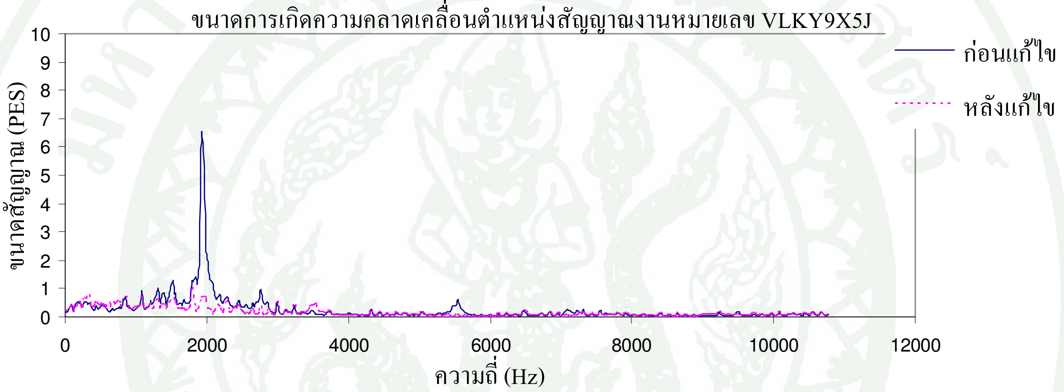


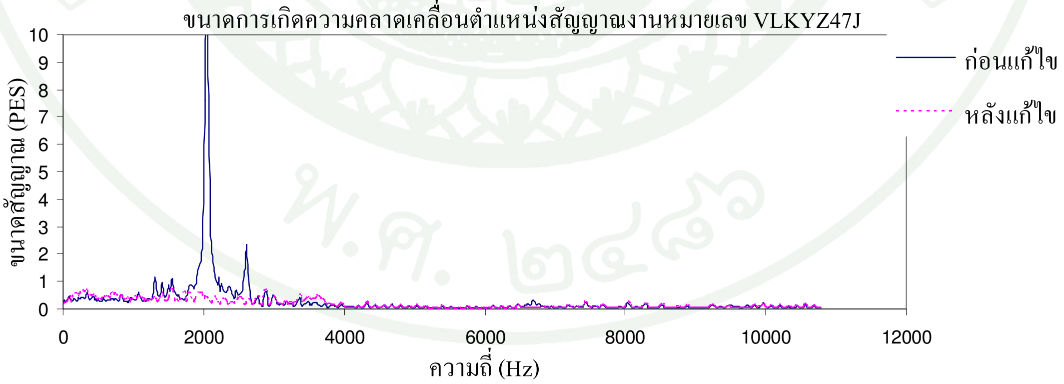


ภาพผนวกที่ ก8 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

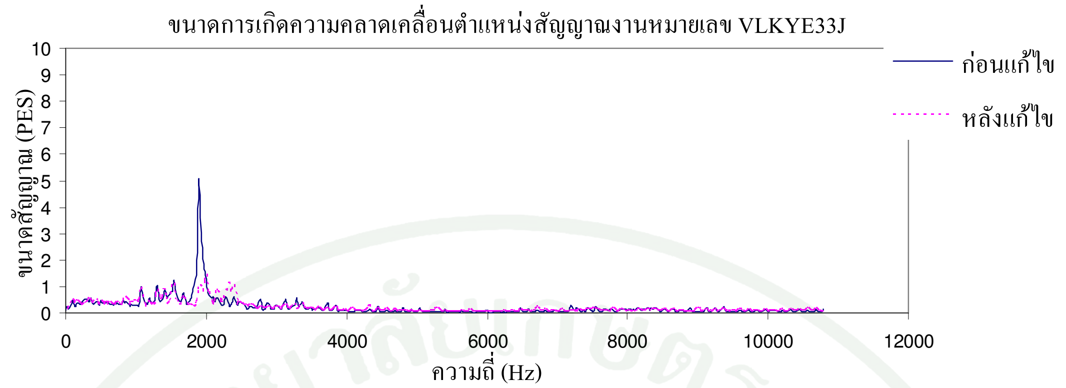


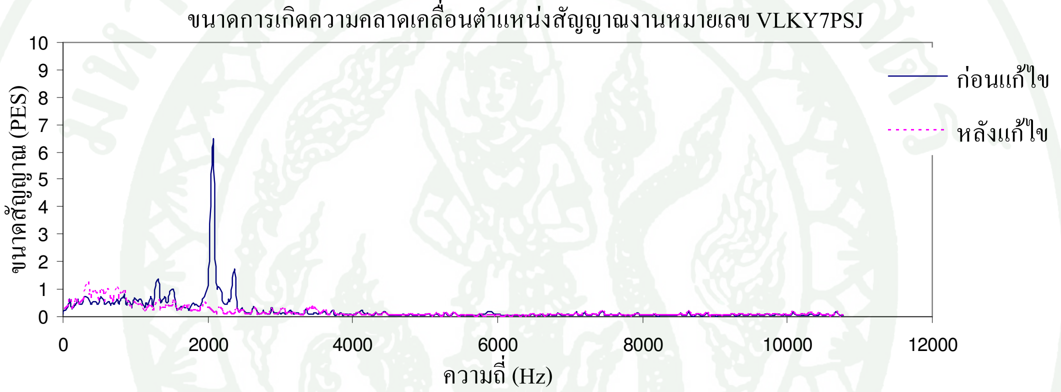


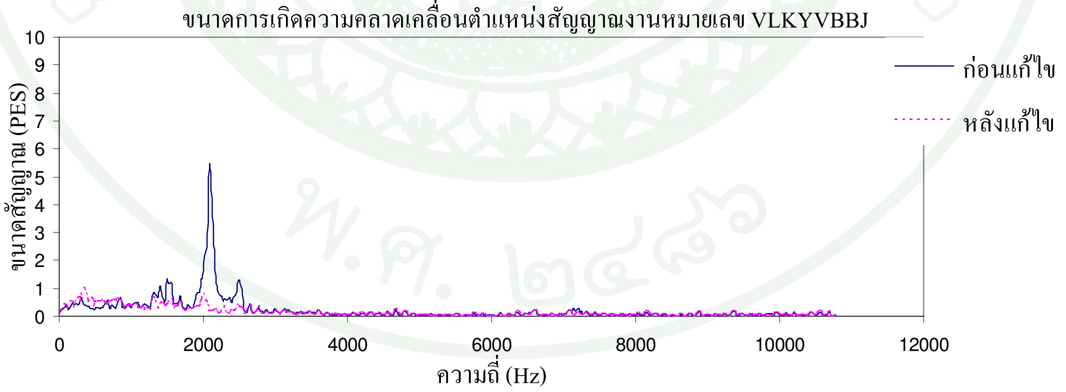


ภาพผนวกที่ ก9 ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไขด้วยการบัดกรีซ้ำบริเวณจุดตะกั่วของสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างหัวอ่านเขียนกับแผงวงจรและหัวอ่านเขียน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

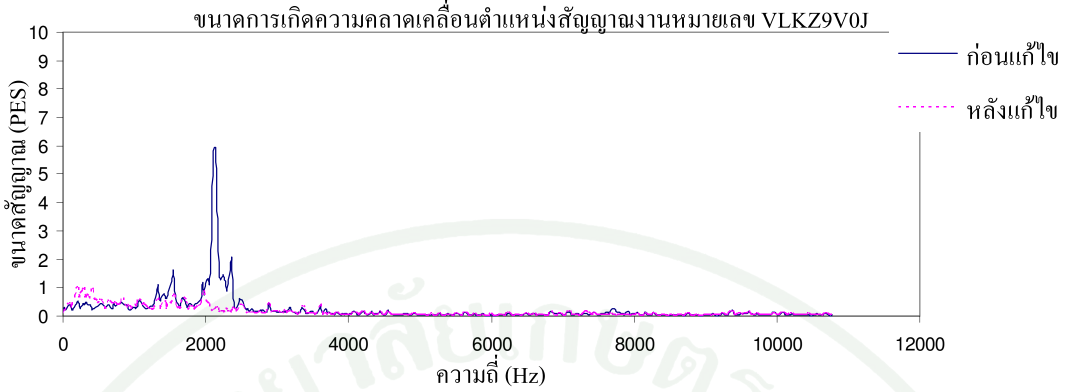


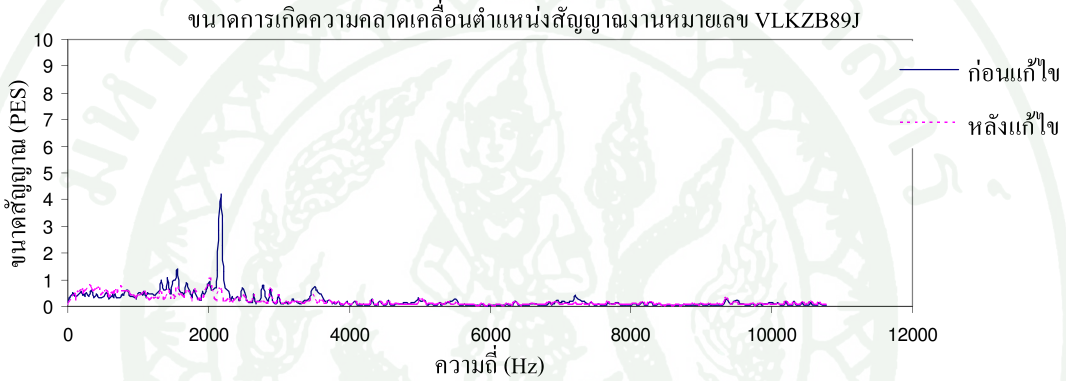


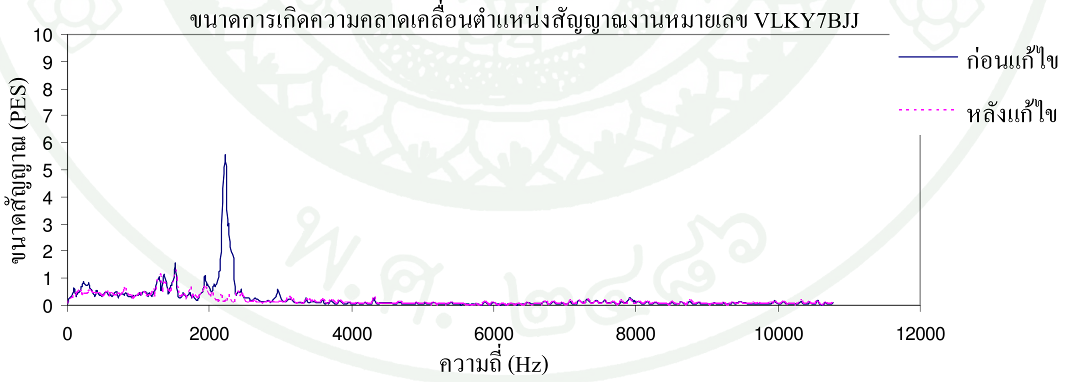


ภาพผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

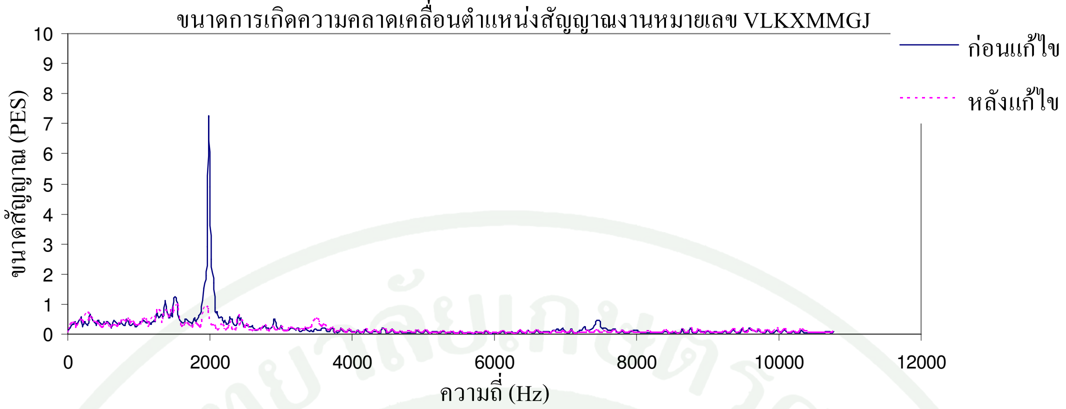


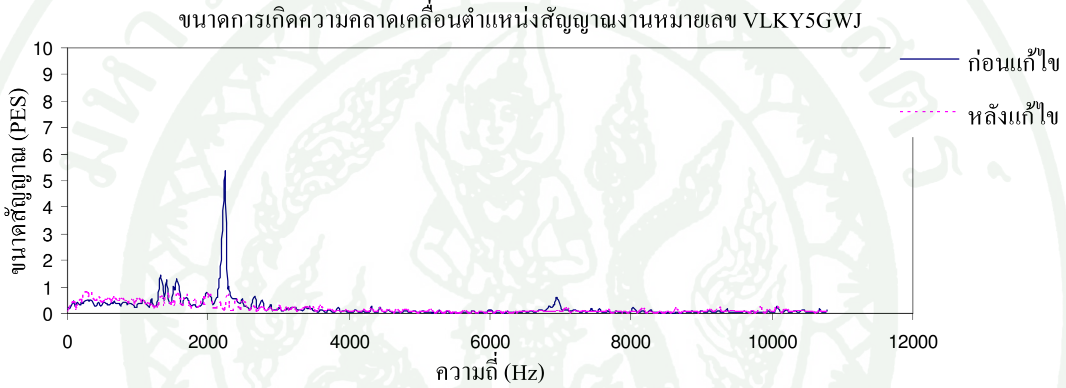


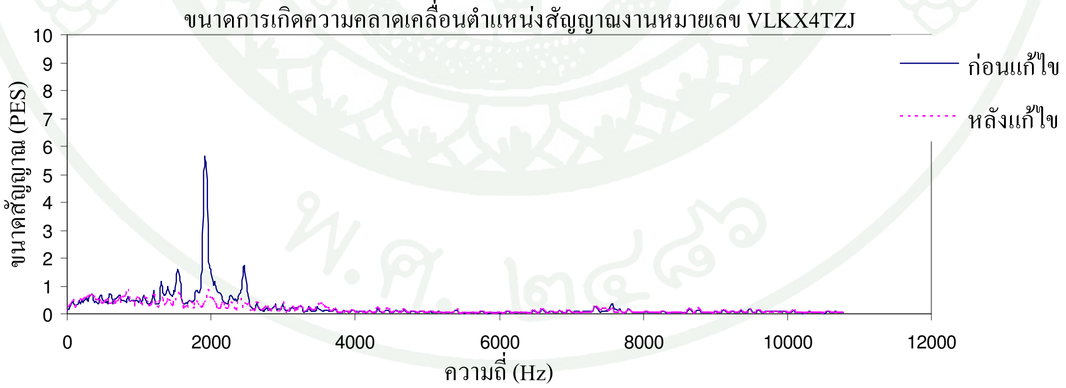


ภาพผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

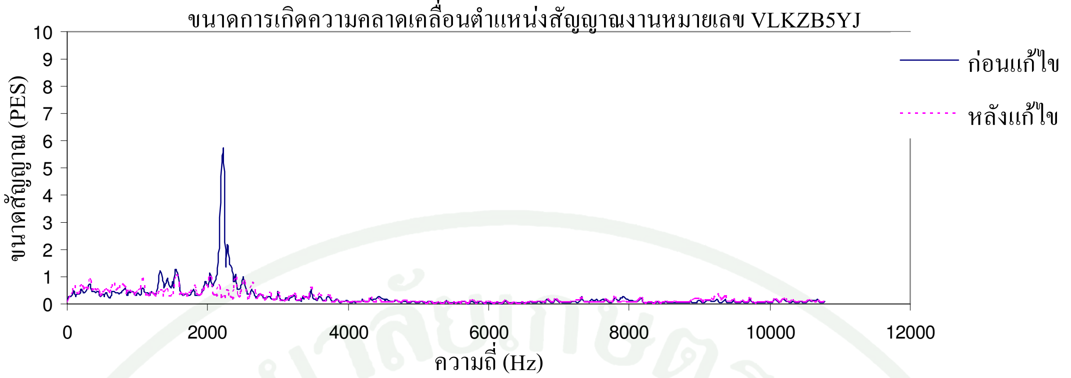


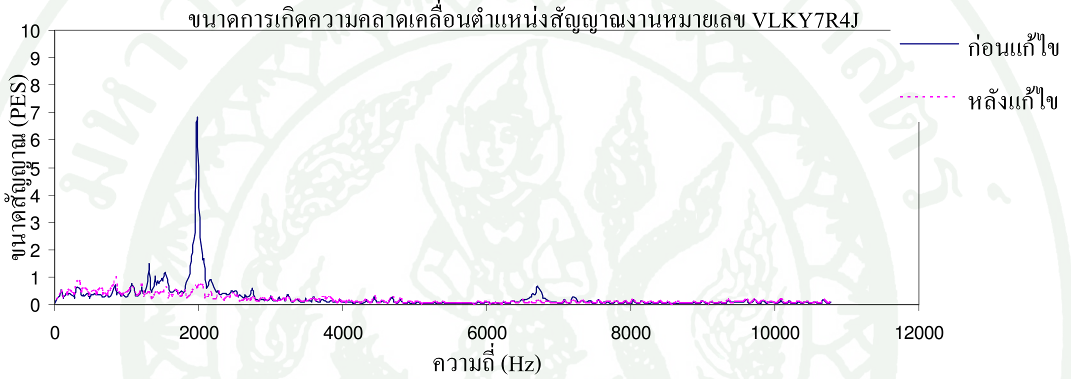


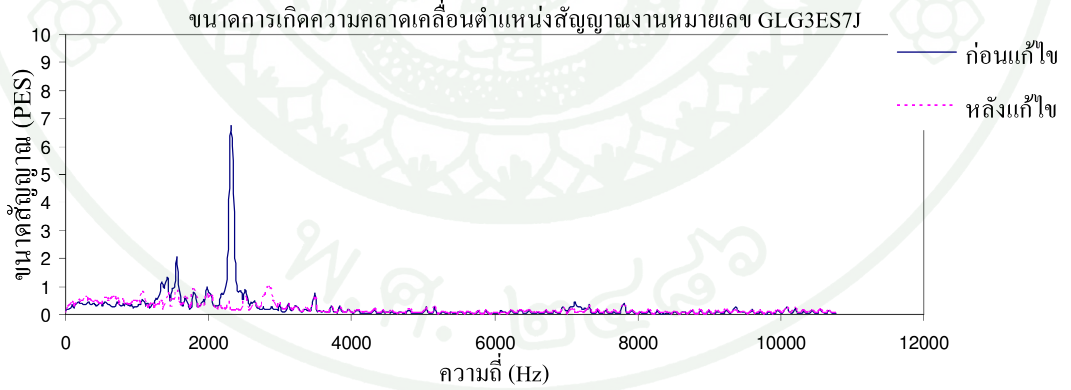


ภาพผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

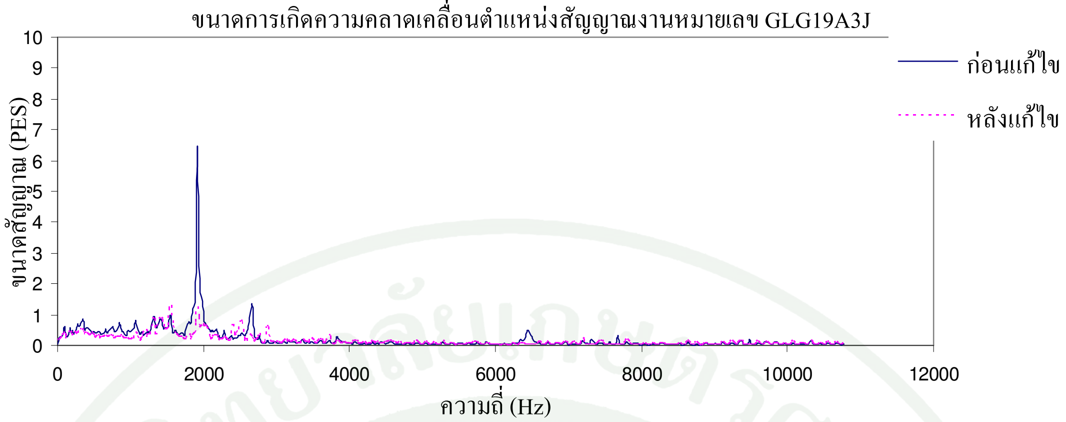


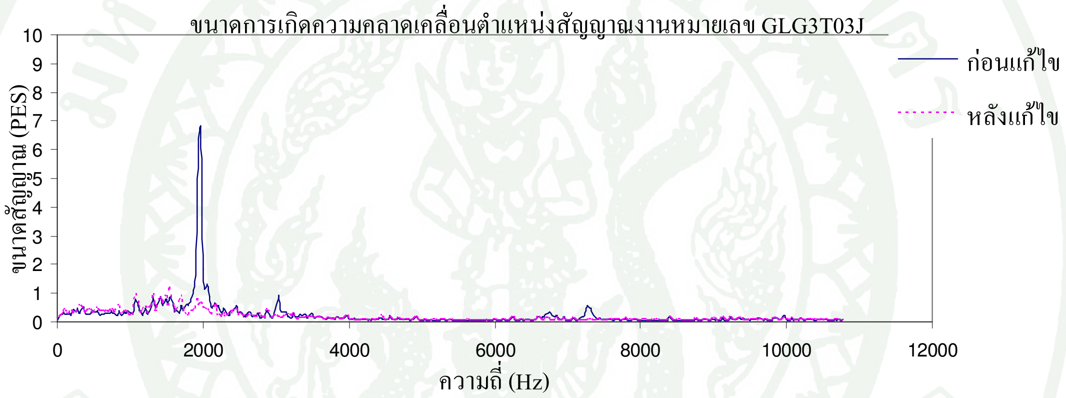


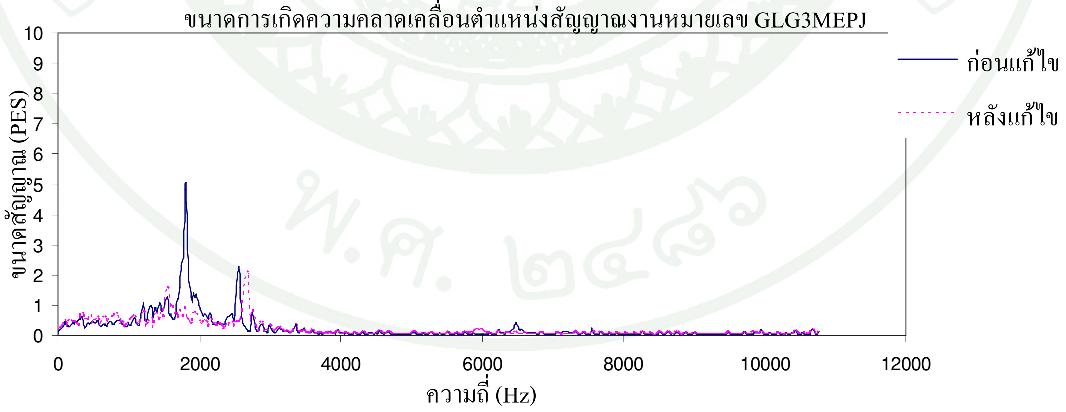


ภาพผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

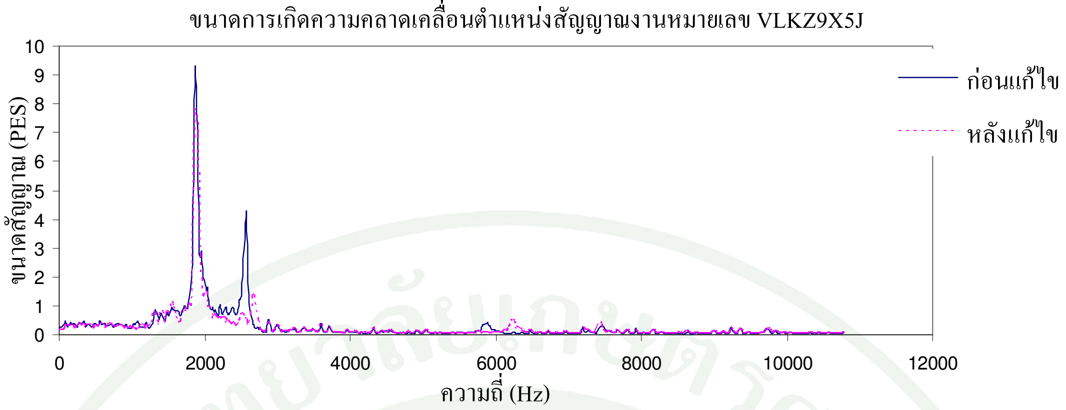


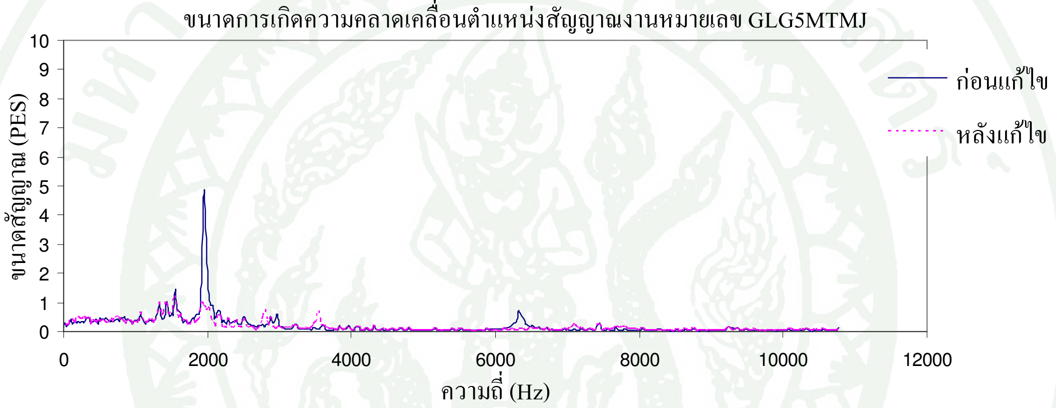


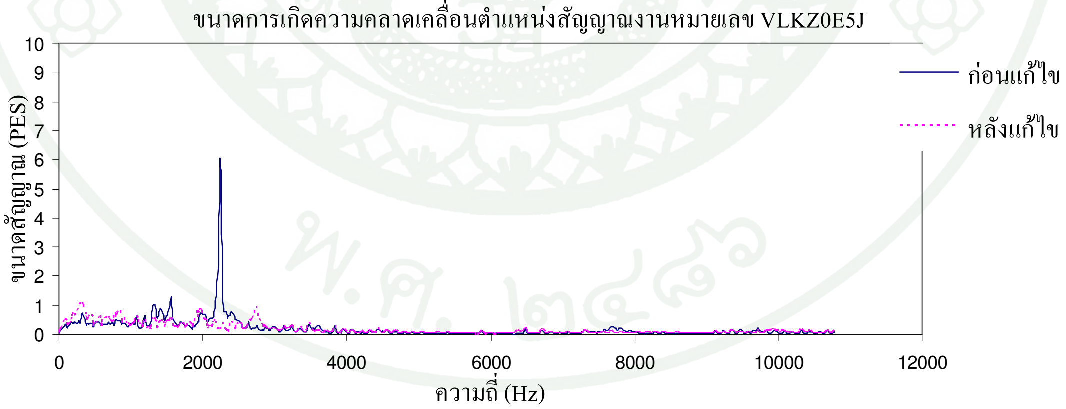


ภาพผนวกที่ ก10 ขนาดการเกิดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัญญาณก่อนและหลังการแก้ไข ด้วยการจัดตำแหน่งสายรับส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่าง หัวอ่านเขียนกับแผงวงจร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

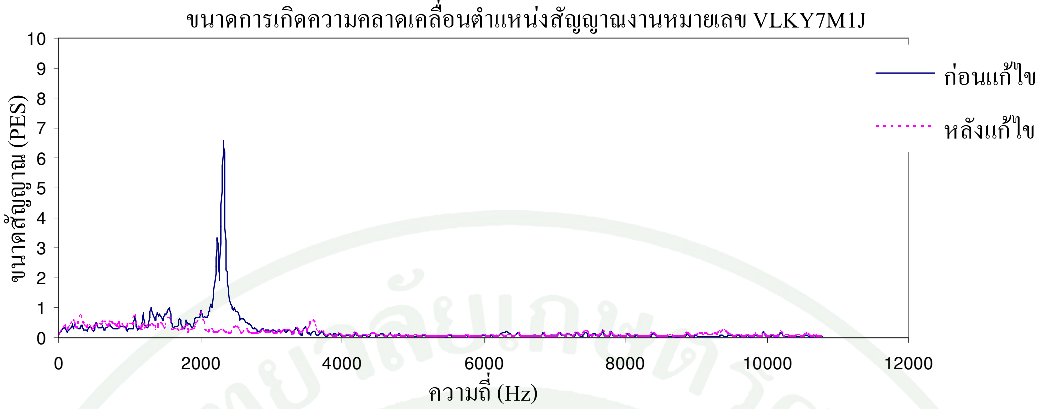


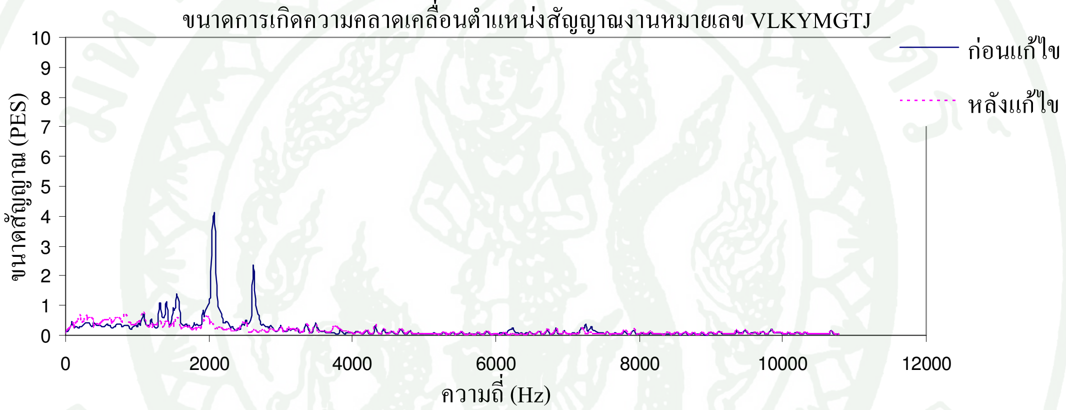


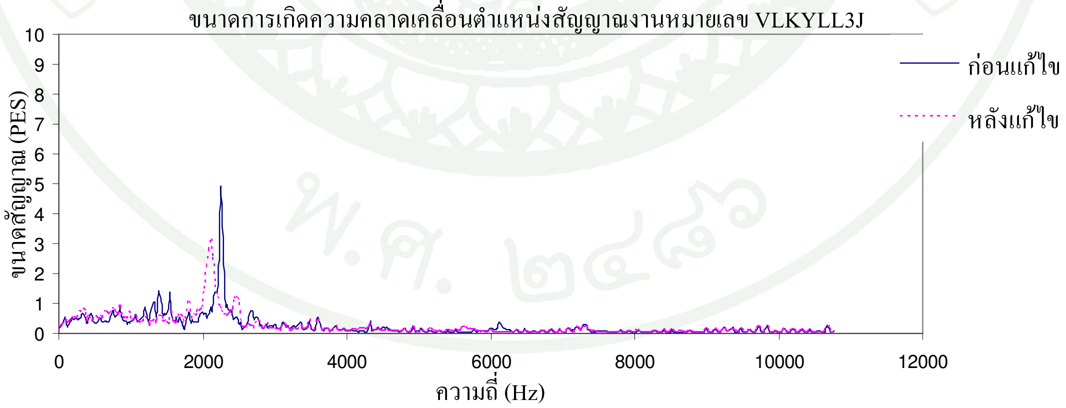


ภาพผนวกที่ ก10 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

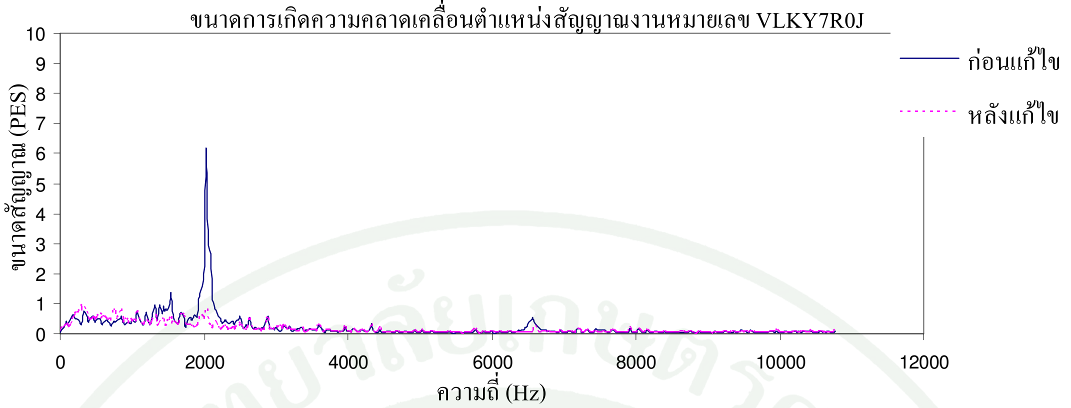


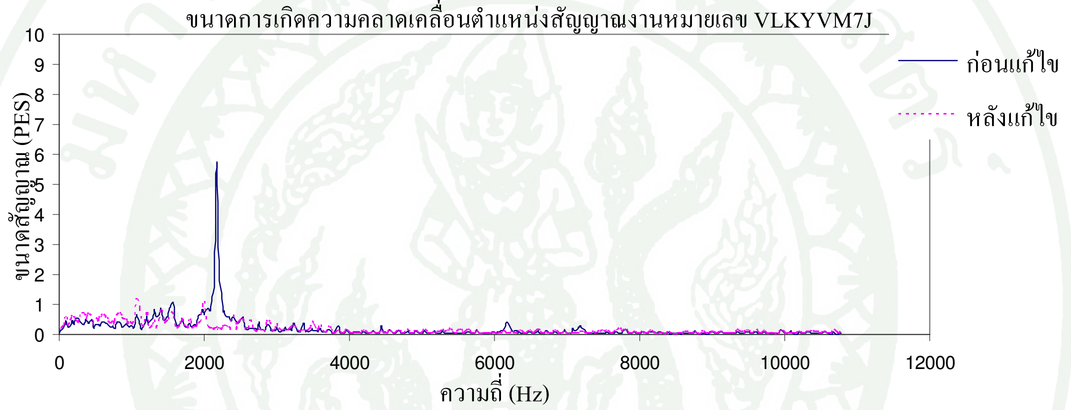


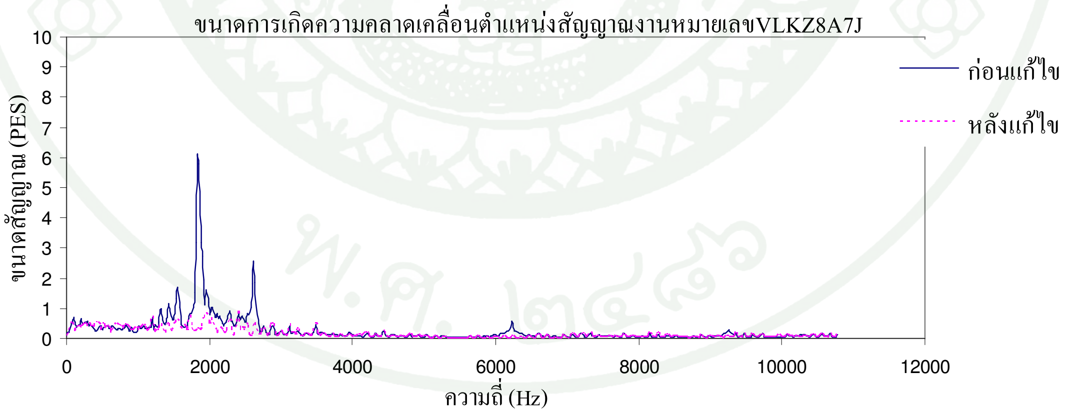


ภาพผนวกที่ ก10 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

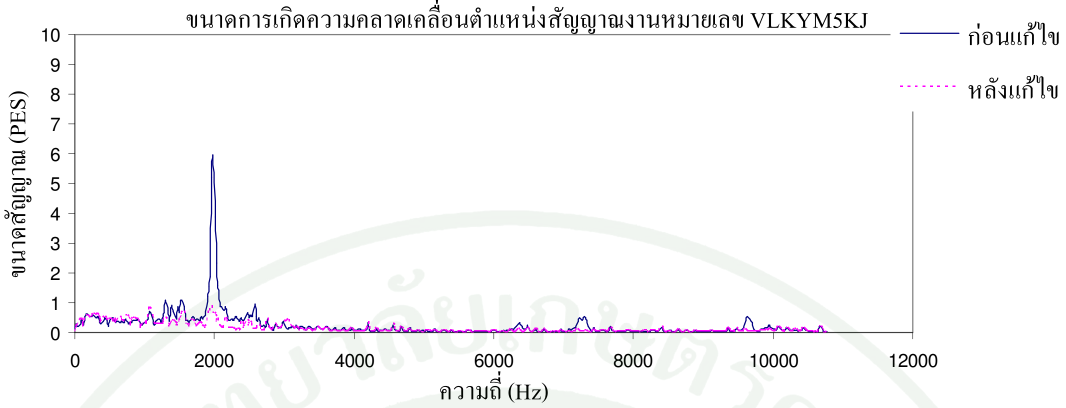


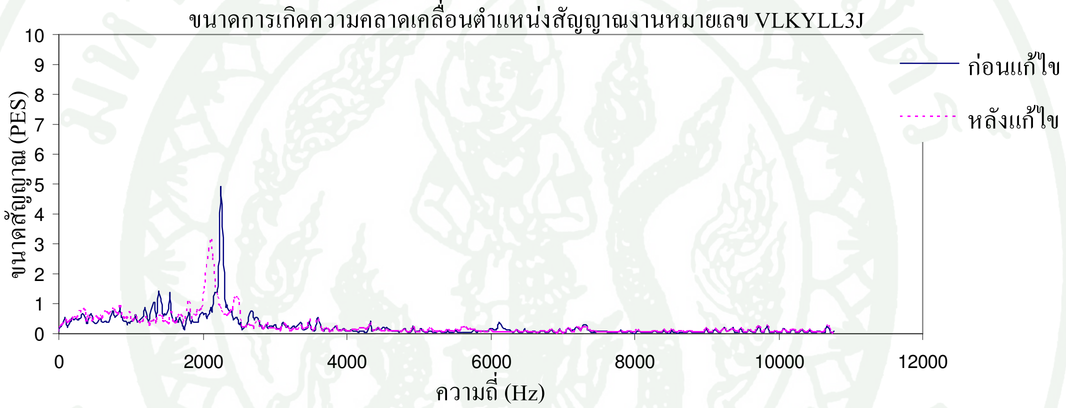


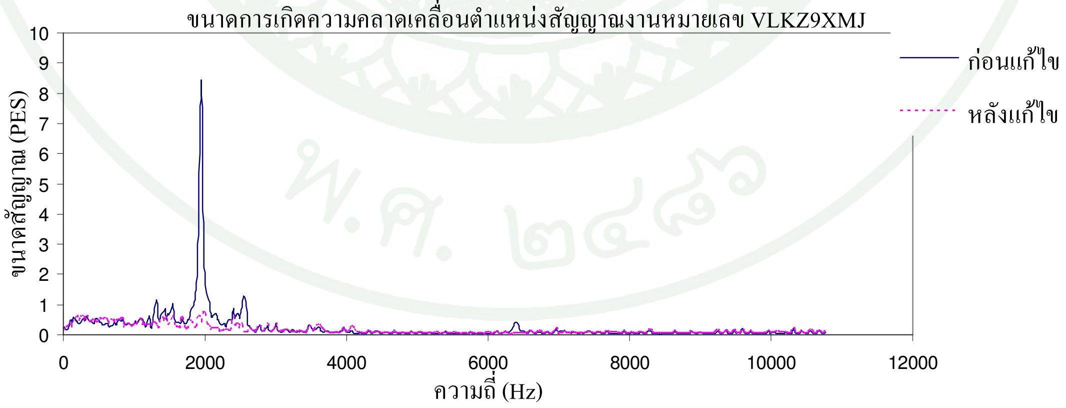


ภาพผนวกที่ ก10 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์







ภาพผนวกที่ ก10 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ตารางผนวกประกอบการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่ไม่ได้หยอดกาว สำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
1	2.4260	26	2.3851	51	2.0755	76	2.0875
2	2.4470	27	2.3491	52	2.0968	77	2.1475
3	2.4979	28	2.3792	53	2.2160	78	2.1159
4	2.3860	29	2.4321	54	2.2316	79	2.0792
5	2.4515	30	2.4475	55	2.2715	80	1.9515
6	2.4872	31	2.4882	56	2.0960	81	2.2286
7	2.3797	32	2.3871	57	2.3081	82	2.0063
8	2.4546	33	2.3646	58	2.1664	83	2.2611
9	2.3961	34	2.4889	59	2.2722	84	1.9278
10	2.3791	35	2.3923	60	1.9054	85	1.7879
11	2.5086	36	2.5022	61	2.0998	86	2.3308
12	2.4168	37	2.1544	62	2.1697	87	2.1602
13	2.3548	38	2.2907	63	1.9743	88	2.0348
14	2.4355	39	2.1198	64	2.1817	89	1.8898
15	2.3549	40	1.9024	65	2.3036	90	2.0326
16	2.4804	41	1.9650	66	1.6272	91	2.0895
17	2.4118	42	2.0853	67	2.2556	92	2.1833
18	2.4965	43	1.7806	68	2.2720	93	2.0609
19	2.3943	44	1.9969	69	2.2249	94	1.8979
20	2.3405	45	1.7134	70	2.1175	95	2.2691
21	2.4891	46	1.7737	71	1.9022	96	2.2288
22	2.4925	47	2.2803	72	1.8773	97	2.1795
23	2.4117	48	2.0542	73	2.1821	98	2.0931
24	2.4000	49	2.1652	74	2.0106	99	1.8720
25	2.4745	50	1.9214	75	2.3191	100	1.9048

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
101	2.2961	126	2.7706	151	3.0280	176	2.8777
102	2.0632	127	2.6633	152	2.5249	177	3.0317
103	1.8707	128	2.5944	153	3.1915	178	2.6163
104	1.7278	129	2.6622	154	3.1449	179	2.7600
105	1.7291	130	2.8345	155	2.5230	180	2.6661
106	2.0350	131	2.5158	156	2.6239	181	2.5287
107	2.0767	132	2.7028	157	2.5749	182	2.5208
108	2.2650	133	2.5776	158	2.6031	183	2.6432
109	2.1011	134	3.6037	159	2.8344	184	2.6507
110	1.8854	135	2.5487	160	3.3387	185	2.6280
111	2.1325	136	3.1397	161	3.1339	186	2.8883
112	1.7989	137	3.0007	162	2.8579	187	3.0788
113	2.1551	138	2.5800	163	3.4413	188	2.6623
114	1.7820	139	3.2657	164	3.5184	189	2.5200
115	2.3077	140	2.5394	165	3.0841	190	3.0060
116	2.2481	141	2.8506	166	2.5271	191	2.7646
117	2.1856	142	2.9639	167	3.1022	192	3.8744
118	1.9361	143	3.1130	168	2.7879	193	2.6142
119	1.7224	144	3.0267	169	2.6315	194	3.4364
120	2.3219	145	2.6506	170	2.5495	195	2.8148
121	2.2815	146	2.6218	171	2.9601		
122	1.9701	147	2.8868	172	3.2790		
123	2.2237	148	2.7689	173	2.5826		
124	2.5800	149	3.2280	174	2.5671		
125	2.7460	150	3.3042	175	2.7087		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
1	1.7736	26	1.8592	51	1.1318	76	1.4587
2	1.8296	27	1.7875	52	0.7760	77	1.0806
3	1.6248	28	1.6964	53	1.0345	78	1.2733
4	1.6823	29	1.8187	54	1.2183	79	1.3892
5	1.6485	30	1.7611	55	1.4799	80	1.0100
6	1.6966	31	1.6504	56	1.5926	81	1.5366
7	1.7973	32	1.8298	57	0.6450	82	1.2914
8	1.6471	33	1.7847	58	1.1212	83	1.2529
9	1.7801	34	1.7781	59	1.5415	84	1.5331
10	1.7593	35	1.8563	60	1.4771	85	0.6582
11	1.7438	36	1.7494	61	1.3200	86	1.2096
12	1.8507	37	1.7562	62	1.2975	87	1.5033
13	1.8122	38	1.7613	63	1.3971	88	1.5767
14	1.8514	39	1.3088	64	1.2423	89	1.2252
15	1.6643	40	1.2643	65	1.5756	90	0.9358
16	1.7571	41	1.1736	66	1.0595	91	1.5141
17	1.7198	42	1.1264	67	1.2174	92	1.3567
18	1.8158	43	1.5490	68	1.6194	93	1.1256
19	1.8255	44	1.4481	69	1.4540	94	0.9930
20	1.8492	45	1.6117	70	1.5163	95	1.3191
21	1.6307	46	1.0088	71	1.2779	96	1.1710
22	1.8608	47	1.4773	72	1.1441	97	1.2793
23	1.7234	48	1.3117	73	1.1716	98	1.5471
24	1.7989	49	1.1983	74	1.3814	99	1.5299
25	1.8116	50	1.4985	75	1.1015	100	1.5889

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
101	1.0740	126	1.4437	151	2.0352	176	2.2818
102	1.5188	127	1.3302	152	2.2803	177	2.0538
103	1.2685	128	1.5540	153	2.1376	178	2.0652
104	1.5403	129	1.2929	154	1.9878	179	2.2262
105	1.5614	130	0.8476	155	1.8895	180	2.3531
106	1.4733	131	1.4456	156	2.5840	181	2.2718
107	1.2949	132	0.9423	157	1.8809	182	2.0330
108	1.5252	133	1.2681	158	1.9747	183	3.0146
109	0.8194	134	0.8890	159	2.4009	184	2.5430
110	1.2668	135	1.2433	160	2.0384	185	2.6979
111	1.3090	136	1.4119	161	2.3486	186	2.0331
112	1.2398	137	1.5922	162	1.9609	187	2.0466
113	1.2725	138	0.9569	163	2.1638	188	2.0482
114	1.4745	139	1.3848	164	2.1901	189	2.4039
115	1.0334	140	1.8795	165	1.9120	190	2.8765
116	1.5684	141	2.0338	166	2.0883	191	2.5765
117	1.0451	142	1.9558	167	2.0437	192	1.9852
118	1.3523	143	1.9061	168	1.9125	193	2.7775
119	1.5931	144	2.3154	169	2.7170	194	1.9421
120	1.4625	145	2.9063	170	1.9885	195	1.9342
121	1.4909	146	2.3373	171	3.1900		
122	1.4079	147	2.1868	172	2.5221		
123	1.4095	148	1.9883	173	5.4236		
124	1.3130	149	2.1913	174	2.4062		
125	1.0244	150	2.1634	175	2.0319		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณส่วนปลายของฐานชุดหัวอ่านเขียนสำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
1	2.1535	26	2.2075	51	1.7439	76	1.8038
2	2.1869	27	2.0821	52	1.7482	77	1.6213
3	2.1813	28	2.1198	53	1.8843	78	1.9530
4	2.1440	29	2.0741	54	1.8463	79	1.9801
5	2.2029	30	2.1569	55	1.7814	80	1.9909
6	2.2127	31	2.0907	56	1.5049	81	1.5216
7	2.1832	32	2.1860	57	2.0373	82	1.8255
8	2.1811	33	2.1442	58	1.7945	83	1.8924
9	2.1296	34	2.1737	59	1.7878	84	1.9938
10	2.1613	35	2.1842	60	2.0245	85	1.9167
11	2.0865	36	2.1392	61	1.5185	86	1.8776
12	2.1661	37	1.6688	62	1.8016	87	1.8355
13	2.1153	38	1.6182	63	1.6563	88	1.8544
14	2.1463	39	2.0338	64	1.9952	89	1.8081
15	2.1208	40	2.0551	65	1.7292	90	1.7926
16	2.0950	41	2.0460	66	1.5227	91	1.9244
17	2.1783	42	1.6079	67	2.0303	92	1.9590
18	2.2276	43	1.9762	68	1.9351	93	1.6531
19	2.1164	44	1.8093	69	1.8226	94	1.8398
20	2.0634	45	2.0632	70	1.8520	95	1.9685
21	2.1224	46	1.6506	71	2.0126	96	1.9781
22	2.0891	47	1.9313	72	1.6366	97	1.9829
23	2.2141	48	2.0144	73	1.5873	98	1.5034
24	2.1445	49	1.9633	74	1.7003	99	1.8432
25	2.0832	50	1.7285	75	1.7013	100	1.9880

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
101	2.0354	126	2.9275	151	2.7906	176	2.3200
102	1.9563	127	2.2879	152	4.2030	177	2.2882
103	2.0117	128	2.5212	153	2.3364	178	2.7501
104	1.8213	129	2.3582	154	2.5774	179	2.9424
105	1.9712	130	2.2567	155	2.7568	180	2.4937
106	2.0339	131	2.4423	156	2.5352	181	2.3358
107	1.7971	132	3.0257	157	2.6203	182	2.9535
108	1.5265	133	2.3238	158	3.3157	183	2.4173
109	1.8626	134	2.6009	159	2.3698	184	2.5361
110	1.7535	135	2.4131	160	2.6540	185	2.8629
111	1.8806	136	2.3539	161	2.5826	186	2.3857
112	1.8822	137	2.2631	162	2.3034	187	2.4560
113	1.7106	138	3.3819	163	2.6915	188	3.5672
114	1.7158	139	2.4683	164	2.2705	189	2.7669
115	1.6792	140	2.2430	165	2.5130	190	2.4164
116	1.7157	141	2.2685	166	2.5471	191	2.2646
117	1.8921	142	2.2898	167	2.4537	192	2.4263
118	1.8862	143	2.3065	168	2.6743	193	2.5077
119	1.7841	144	2.6239	169	2.3058	194	2.5859
120	1.6271	145	2.3929	170	2.6904	195	1.4458
121	1.9019	146	2.3606	171	2.3774		
122	1.7878	147	2.2636	172	2.5317		
123	1.9149	148	2.3011	173	2.2529		
124	1.8424	149	2.5102	174	2.3662		
125	2.3842	150	2.2747	175	2.5698		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ข้อมูลค่าความผิดพลาดตำแหน่งสัญญาณของชุดหัวอ่านเขียนที่หยอดกาวบริเวณช่องสำหรับใส่หางหัวอ่านเขียนของฐานชุดหัวอ่านเขียน สำหรับชุดหัวอ่านเขียนที่ประกอบใหม่

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
1	1.5222	26	1.4767	51	1.3844	76	1.0044
2	1.5118	27	1.5443	52	1.4221	77	1.4107
3	1.5093	28	1.5922	53	1.1502	78	1.4234
4	1.4507	29	1.5521	54	1.2854	79	1.3344
5	1.6277	30	1.6072	55	1.2062	80	0.8279
6	1.5197	31	0.8990	56	1.3346	81	1.4184
7	1.5880	32	0.9640	57	0.9632	82	1.3555
8	1.5039	33	1.0832	58	1.4064	83	1.1510
9	1.5938	34	0.9780	59	0.6421	84	1.2361
10	1.4868	35	1.2960	60	1.3172	85	1.3630
11	1.5263	36	0.9393	61	1.0092	86	1.3892
12	1.5954	37	1.0438	62	1.0385	87	1.2565
13	1.4559	38	0.9214	63	1.3199	88	1.3235
14	1.5352	39	0.9906	64	0.5781	89	1.4099
15	1.6243	40	1.0333	65	1.1705	90	1.4228
16	1.5835	41	0.6492	66	0.8519	91	0.6265
17	1.5435	42	1.1360	67	0.8999	92	0.8744
18	1.5664	43	1.2350	68	0.7317	93	1.1690
19	1.5527	44	0.8781	69	0.9067	94	0.8862
20	1.5496	45	0.8398	70	1.2799	95	0.9739
21	1.5742	46	0.9595	71	1.0212	96	1.3424
22	1.4878	47	1.4119	72	1.0533	97	1.0468
23	1.5930	48	1.4222	73	0.9099	98	1.3997
24	1.4743	49	1.1203	74	1.0671	99	0.9632
25	1.5904	50	1.4159	75	1.3995	100	1.2786

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO	No	NRRO
101	0.8895	126	2.1824	151	1.8895	176	2.1085
102	1.0950	127	1.7606	152	1.8296	177	1.9119
103	1.3850	128	2.2616	153	2.0439	178	1.9011
104	1.2551	129	1.7866	154	2.2060	179	2.7261
105	1.2026	130	2.3267	155	1.8450	180	2.1501
106	1.3029	131	1.6502	156	2.1273	181	1.6801
107	1.4086	132	1.7392	157	1.6959	182	1.8739
108	1.2780	133	1.7498	158	2.0929	183	1.7342
109	1.4124	134	1.9105	159	2.1310	184	1.8562
110	1.0472	135	2.1196	160	2.6728	185	2.3439
111	0.8433	136	2.4233	161	2.0358	186	2.4167
112	1.3239	137	1.7239	162	1.9338	187	1.7344
113	1.3950	138	2.0239	163	1.8108	188	2.1490
114	1.2876	139	1.8047	164	2.0226	189	1.7183
115	0.8376	140	2.1008	165	2.4480	190	2.1285
116	1.2038	141	2.1950	166	2.0552	191	2.2097
117	1.3447	142	1.7241	167	2.3205	192	2.0152
118	1.1662	143	2.7233	168	1.8761	193	3.0827
119	1.2572	144	1.9621	169	1.6813	194	1.8412
120	1.1613	145	1.6828	170	1.7295	195	1.7000
121	0.8713	146	1.7615	171	1.7202		
122	1.8547	147	2.3654	172	2.0866		
123	2.1520	148	1.7891	173	2.2141		
124	2.0930	149	1.8800	174	2.5261		
125	1.7376	150	1.7787	175	1.7041		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาววันเพ็ญ มูลครบุรี
เกิดวันที่	11 พฤศจิกายน 2524
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (อุตสาหการ) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรฝ่ายผลิต
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัทฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด
ทุนการศึกษา	ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมฯ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์