ฑ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การออกแบบการตอกประกอบเฮดแสตกแอสเซ็มบลี ด้วยบอลหนึ่งลูก

DESIGN ANALYSIS OF A ONE BALL SWAGING FOR HEAD STACK ASSEMBLY

T125095

จุมพล บำรุงวงศ์

JOOMPON BAMRUNGWONG

วพ.
จ763ส1
2556
เลขหมู่...
เลขทะเบียน 125095
วัน,เดือน,ปี - 5 ก.ค. 2556

b. 12508305
i. ...

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-DS-D-001-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN ANALYSIS OF A ONE BALL SWAGING FOR HEAD STACK ASSEMBLY

JOOMPON BAMRUNGWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN DATA STORAGE TECHNOLOGY
COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

KMITL-2013-DS-D-001-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2013

COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การออกแบบการตอกประกอบเฮดแสตกแอสเซ็มบลีด้วยบอลหนึ่งลูก
Thesis Title DESIGN ANALYSIS OF A ONE BALL SWAGING FOR HEAD STACK ASSEMBLY
นักศึกษา นายจุมพล บำรุงวงศ์
รหัสประจำตัว 51064901
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-DS-D-001-01

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	
รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุนนัต	พิณโสภณ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร	จันทลักขณา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 15 มีนาคม 2556 เวลา 09.00 - 11.00 น.
สถานที่สอบ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ ธนชยานนท์)
คณบดี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การออกแบบการตอกประกอบเฮดแสตกแอสเซ็มบลีด้วยบอลหนึ่งลูก
นักศึกษา	นายจุมพล บำรุงวงศ์
รหัสประจำตัว	51064901
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟปกติใช้วิธีการตอกยึดด้วยลูกโลหะกลม (Ball Swaging) ซึ่งเป็นวิธีการประกอบ Boss Tower เข้ากับช่องเปิดของ Arm Actuator ซึ่งลูกโลหะกลมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางในของ Boss Tower ทำให้เกิดแรงดันกดที่ผิวของ Boss Tower เพื่อเชื่อมต่อ HGA เข้ากับ Arm Actuator โดยมีแรงยึดที่เพียงพอ และBoss Tower ไม่เกิดความเสียหาย โดยให้ค่ายึดติดที่เรียกว่า HGA Torque Retentionถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีการตอกยึดด้วยลูกกลมโลหะสองหรือสามลูก ซึ่งมีทั้งแบบกลับทิศทางและไม่กลับทิศทางเพื่อให้ได้แรงยึดติดพอเพียงแต่ส่งผลให้คุณสมบัติบางประการของHSAเกิดการเปลี่ยนแปลง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของ HGA หรือออกแบบกระบวนการเพื่อให้ได้สมรรถนะของ HSA ที่ดีโดยใช้ลูกโลหะกลมหนึ่งลูก วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติจะนำมาใช้เพื่อศึกษา ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าจากการทดสอบมีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการเบี่ยงเบนของค่าวิกฤติต่อคุณภาพ (CTQ) ของ HSA ลดลง และความสะอาดของ HSAเพิ่มขึ้น หลังจากประกอบด้วยการตอกยึดHSA ด้วยลูกกลมโลหะหนึ่งลูกและพบว่าช่องเปิดของ Arm Actuator สามารถช่วยลดผลกระทบจากการตอกยึด (Swage Effect) ด้วยลูกกลมโลหะหนึ่งลูกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Design Analysis of a One Ball Swaging for Head Stack Assembly
Student	Mr.Joompon Bamrungwong
Student ID.	51064901
Degree	Doctor of Philosophy
Program	Data Storage Technology
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

In hard disk drive manufacturing common uses ball swaging. It is a process that used toassemble a boss tower and an arm aperture. The swage ball has a larger diameter than an innerdiameter of the boss tower. Application a compression force to the inner surface of the boss tower tohold both components together with adequate holding force and without damaging the boss towercomponents result in HGA torque retention. Although current process either passing two or three balls with flipping or not flipping to meet requirement of retention torque, some HSA characteristics requirement changed. This project aims at improving part, componentor process design to allow similar swaging quality with single swage ball.Measurements of HSA KPIV after swaging obtainedfrom deformation of base plate and arm pad together.The 3-D FE method was used for analysis. The result analysis and experiment show boss tower deformation very similar. Although the variation of CTQ has been decreased, cleanliness has been improved by single ball. Moreover, non-circular arm aperture is able to reduce swage effect for single ball swaging.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณประพันธ์ อปริมาณ ผู้อำนวยการแผนก Head Stack Process Development บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้กรุณาให้โอกาสทางการศึกษาและคำแนะนำจนในที่สุดทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณสุพรรณี หาญชาญศิริ และ คุณวีระศักดิ์ พนางาม ที่คอยอำนวยความสะดวกและชี้แนะให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณภิณญาพัชญ์ ตั้งพร้อมจิตต์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ของวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จุมพล บำรุงวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VIII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา 3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎี 4
2.1 วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.2 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 7
2.3 กระบวนการประกอบชุดอ่าน-เขียนข้อมูลด้วยหนึ่งบอล 18
2.4 โทโปโลยีเหมาะสมสุด 19
2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 21
2.6 กลศาสตร์ของการสัมผัสแบบยืดหยุ่น 26
2.7 การสัมผัสแบบ 2 มิติ 28
2.8 การกระแทก และการกระจายของคลื่น 30
2.9 ความต้านทานโมเมนต์ 36
2.10 Steepest Descent Method 37

บทที่ 3 เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ 40
3.1 การสร้างแบบจำลอง 43
3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบ 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3 การแบ่งเอลิเมนต์ 46

3.4 การวิเคราะห์สมการที่เกี่ยวข้องกับHGA Torque Out 47

3.5 การประมวลผล 48

3.6 การพิสูจน์ผลการจำลอง (Validation 49

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ 50

4.1 ผลการศึกษาของSpacer Key Land 50

4.2 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์และการวัดจริง 51

4.3 ผลการศึกษาลดของเสียเนื่องจากSpacer Key Hole (Swage Push Out) 54

4.4 ผลการศึกษาBoss Tower Profile ที่มีผลต่อกระบวนการ One Ball Swaging 56

4.5 ผลการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการOne Ball Swaging 59

4.6 ผลการนำชิ้นงานของจริงมาทดลองในกระบวนการOne Ball Swaging 64

บทที่ 5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 66

5.1 ขั้นตอนของการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา 66

5.2 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 68

5.3 การออกแบบการทดลอง 69

5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตอกยึดด้วยหนึ่งบอล 70

5.5 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 71

บทที่ 6 สรุปผล และข้อเสนอแนะ 78

6.1 สรุปผล 78

6.2 ข้อเสนอแนะ 78

บรรณานุกรม 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก 82
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองสมรรถนะของ HSA ,ค่า HGA Torque และ Resonance Test 83
ภาคผนวก ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ 91
ภาคผนวก ค. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ 111
ประวัติผู้เขียน 149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของ HSA ในกระบวนการ Swaging 42

4.1 ค่าที่วัดได้เทียบกับค่าจากการจำลองด้วยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ 52

4.2 ดัชนีความรุนแรงที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA Tab Dn 57

4.3 ดัชนีความรุนแรงที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA Tab Up 57

5.1 ช่วงของค่าตัวแปรที่ต้องการจะออกแบบ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ 8
2.2 การเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์เป็นรหัสดิจิตอลของคอมพิวเตอร์ 8
2.3 คอมพิวเตอร์รุ่นIBM 305 RAMAC 9
2.4 รูปตัดขวางของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กที่เก็บข้อมูลโดยใช้ทิศของสนามแม่เหล็กแทนรหัส 0 หรือ 1 9
2.5 การเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์แบบแนวตั้งและแบบแนวนอน 10
2.6 ส่วนประกอบหลักในฮาร์ดดิสก์ 10
2.7 การเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งของหัวอ่าน/เขียน 11
2.8 ตัวอย่างการออกแบบแอร์แบริ่ง 12
2.9 ส่วนประกอบต่างๆในฮาร์ดดิสก์ 14
2.10 ส่วนประกอบต่างๆ ของ HAS 15
2.11 ส่วนประกอบต่างๆ ของซัสเพนชั่น 16
2.12 ส่วนประกอบของ Baseplate 18
2.13 Ball swaging process 18
2.14 ตัวอย่างการหาโทโปโลยีเหมาะสมสุดของโครงสร้าง 19
2.15 ตัวอย่างโครงสร้างทั่วๆ ไปที่นิยมนำมาหาค่าเหมาะสมสุด 20
2.16 ตัวอย่างการหาค่าเหมาะสมสุดร่วมกับการลดของปริมาตรลง 60 20
2.17 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอย่างง่ายแบบสี่จุดต่อ 22
2.18 ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ Incomplete Contact 26
2.19 ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ Complete Contact 27
2.20 ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ Receding Contact 27
2.21 สภาวะการเกิดความเค้นเนื่องจากการสัมผัสกันของทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากัน 28
2.22 ความเค้นในสภาวะความเครียดระนาบเนื่องจาก Line Load 28
2.23 องค์ประกอบของแรงเสียดทาน 29
2.24 การเคลื่อนที่ของคลื่นในหนึ่งมิติ 30
2.25 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในคลื่นตามยาว 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.26 การเคลื่อนที่ของคลื่นในแท่งโลหะ 33
2.27 การเคลื่อนที่ของอนุภาคใน Distortional Wave 33
2.28 ลักษณะการเคลื่นที่ของ Rayleigh Wave 34
2.29 ความเร็วของคลื่นแต่ละชนิดที่ Poisson Ratio ต่างๆ 35
2.30 การเคลื่อนที่ของ Love Wave 35
2.31 ไดอะแกรมของแรงบน Base Plate กับรูของ Arm Pad 36
2.32 ลักษณะการเกิดความดันสัมผัส 36
2.33 เส้นคอนทัวร์ (Contour) ของ U 38
3.1 พิจารณาเป็นภาชนะผนังหนาสมมารตรแกน 40
3.2 ลักษณะรูปร่างของ Base Plate ที่นำมาศึกษา 43
3.3 ลักษณะรูปร่างของ Actuator Arm ที่นำมาศึกษา 44
3.4 แบบจำลองในการวิเคราะห์ในภาพตัดขวาง 44
3.5 ภาพตัดขวางแบบจำลองและการกำหนดภาระเงื่อนไขที่ขอบในการวิเคราะห์ 45
3.6 ภาพจำลองเครื่อง Swaging Machine 45
3.7 การแบ่งเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ 46
3.8 ระบบสมมูล (Equivalent System) ของผิว Boss Tower ที่ยึดเกาะกับ Swage Hole 47
3.9 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่า HGA Torque Out 47
4.1 ลักษณะของ One Ball Swaging (ภาพตัดขวาง) 50
4.2 ลักษณะของ Spacer Key ที่ใช้ในปัจจุบัน 51
4.3 ลักษณะของ Spacer Key Land ที่ได้ศึกษาและนำมาใช้กับ One Ball Swaging 51
4.4 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์และการทดลองจริง 52
4.5 ตำแหน่งการวัดในการทดลองจริง 52
4.6 ผลการแสกนผิวของของ Base Plate Tab Up 53
4.7 ผลการแสกนผิวของของ Base Plate Tab Dn 54
4.8 ลักษณะของการเกิด Swage Push Out 55
4.9 ลักษณะของการเกิด Swage Push Out 55
4.10 ลักษณะของ Spacer key Hole ที่สามารถยืดอายุการใช้งานได้ 56
4.11 ตัวแปรต่างๆ ของ Boss Tower Profile 58
4.12 Boss Tower Profile ที่หาค่าเหมาะสมในกระบวนการ One Ball swaging 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 Pareto Chart ของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการสำหรับ Tab Dn 60

4.14 Pareto Chart ของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการสำหรับ Tab Up 61

4.15 ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สนใจ 62

4.16 ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สนใจTab Up 63

4.17 ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สนใจTab Dn 63

4.18 ชิ้นงานจริงที่ได้หลังจากวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ One Ball Swaging 64

4.19 เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการ, KPIV Chart 64

5.1 ปัจจัยและการตอบสนอง 69

5.2 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงจากโปรแกรมMinitab 71

5.3 ชิ้นงานจริงที่นำมาทดลองมีค่าRelief Ring Width กว้าง 72

5.4 ภาพตัดขวางA-A แสดงเส้นผ่าศูนย์กลางของ Boss Tower ทั้งด้านในและด้านนอก 72

5.5 เปรียบเทียบBoss Tower 73

5.6 ภาพตัดขวางด้านA-A และด้าน B-B หลังจากประกอบ Base Plate เข้ากับ Arm Actuator ยังไม่ผ่านกระบวนการตอกยึด 73

5.7 ภาพตัดขวางด้านA-A และด้าน B-B หลังผ่านกระบวนการตอกยึดทั้ง Down Tab และ Up Tab 74

5.8 การแอ่นตัวของArm Pad หลังจากตอกยึดด้วยบอล 75

5.9 เปรียบเทียบผลการตอกยึดที่ได้จากวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ และจากชิ้นงานจริง 75

5.10 ผลการทดลองเปรียบเทียบการโก่งตัวของArm Pad ระหว่าง Boss Tower แบบเดิม และ Oval Boss Tower 76

5.11 ภาพขยายศึกษาเศษอนุภาคโลหะขนาดเล็กโดยการตอกยึดแบบสองบอล 76

5.12 ภาพขยายศึกษาเศษอนุภาคโลหะขนาดเล็กโดยการตอกยึดแบบหนึ่งบอล 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของผู้คนทั่วไปทั้งในการทำงาน การศึกษาหรือใช้ในการสื่อสารและเพื่อความบันเทิง เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วยในการทำงานหรือเก็บข้อมูล ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ จึงต้องทำการพัฒนาอยู่เสมอเพื่อให้ทันต่อความต้องการของมนุษย์

ฮาร์ดดิสก์เป็นอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งในคอมพิวเตอร์ที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากฮาร์ดดิสก์มีหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลและเก็บข้อมูลได้ แม้ในขณะที่คอมพิวเตอร์ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้าก็ตาม และเมื่อเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนามากขึ้น ฮาร์ดดิสก์จึงได้มีการพัฒนาการเก็บข้อมูลให้สามารถเก็บข้อมูลได้มากซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเก็บข้อมูล (Areal Density) ซึ่งการก้าวหน้าทางด้านนี้ได้เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว เมื่อขนาดของฮาร์ดดิสก์มีขนาดเท่าเดิมแต่มีความจุหรือความสามารถในการเก็บข้อมูลมากขึ้น ทำให้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลต่างๆเล็กลงส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ต้องมีความแม่นยำในการอ่านและเขียนข้อมูลเพิ่มขึ้น

ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive) ชุดอ่าน-เขียนข้อมูล (Head Stack Assembly) จัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากในการอ่านเขียนข้อมูลลงในแผ่นข้อมูล (Media) อีกทั้งปัจจุบันนี้ผู้บริโภค มีความต้องการฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาดเล็กลงและมีความจุ (Capacity) ที่สูงขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติสำคัญต่างๆ อันได้แก่ ค่าความต้านทานแรงบิด (Torque Resistance) ค่าการสั่นสะเทือน (Vibration) ของหัวอ่าน และค่าแกรมโหลด (Gram Load) ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแต่ละรุ่นอย่างเหมาะสม และมีการควบคุมให้เกิดการ ผันผวนในกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุด

การประกอบชุดอ่าน-เขียนข้อมูลจะใช้ กระบวนการ Ball Swaging Process ซึ่งเป็นวิธีการยิง Swage Ball ผ่าน บริเวณของ Boss Tower ที่อยู่ในส่วนของ Base Plate ของหัวอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly) กระบวนการนี้จะทำให้มีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของ Base Plate และยึดติดกับ E-Block Arm (Arm Actuator) โดยที่ Swage Ball จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นรอบวงด้านในของ Boss Tower เนื่องจากขนาดของลูกบอลนั้นใหญ่กว่ารูของ Boss Tower จึงทำให้เกิดการยึดเกาะค่าของแรง (Strength) หรือเรียกว่า HGA Torque Out ยิ่งมีค่ามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยึดเกาะกันได้ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งก็สืบเนื่องมาจากการที่เกิดการเสียรูปมากขึ้นตามไปด้วย และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของชุดอ่าน-เขียนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เกิดการผันผวนของของค่าความต้านทานแรงบิด ค่าการสั่นสะเทือน ของหัวอ่าน การตอกขึ้นรูปชุดอ่าน-เขียนข้อมูล ด้วยบอลเป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนหนึ่งในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมติด HGA เข้ากับ Arm Actuator ในปัจจุบันใช้จำนวนบอล 2-3 บอล และด้วยการยิงบอลกลับด้านหรือไม่ก็ตามเพื่อให้ได้แรงยึดที่เพียงพอโดยมุ่งหวังไม่ให้เกิดความเสียหายต่อลักษณะเฉพาะ ของตัวจับยึดหัวอ่านถึงแม้ว่าวิธีการตอกขึ้นรูปมีมานานแล้วแต่ด้วยสภาวะการแข่งขันเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาด การลดเวลาการขึ้นรูปจึงเป็นทางหนึ่งที่ลดต้นทุนการผลิตและนำส่งได้เร็วขึ้น ดังนั้นจุดมุ่งหมายของโครงการนี้มุ่งหวังที่จะปรับปรุงขึ้นงานและออกแบบกระบวนการเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของตัวจับยึดหัวอ่านใกล้เคียงกับกระบวนการเดิมด้วยการใช้บอลเพียงหนึ่งบอลโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าที่จะส่งผลกระทบอย่างมากต่อ Slider Fly Height ที่อาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการอ่าน-เขียนข้อมูลและลดความสามารถในคุณสมบัติ Op-Shock ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ดังนั้น สำหรับงานวิจัยนี้ จึงต้องการที่จะสร้างแบบจำลองโดยนำระเบียบวิธีทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่ง สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมความสัมพันธ์ และผลที่เกิดขึ้นของ One Ball Swage Process ที่มีผลต่อการเสียรูปของ Base Plate ซึ่งส่งผลกับคุณสมบัติ ของชุดอ่าน-เขียนข้อมูล และทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองที่สมบูรณ์และผลการศึกษาที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้อ้างอิง และต่อยอดในการศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติของชุดอ่าน-เขียนข้อมูลเพื่อสามารถที่จะกำหนดค่าของ Swage Process Setting สำหรับการตอกยึดขึ้นรูปโดยใช้หนึ่งบอลที่เหมาะสมได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายและศึกษาสภาวะที่เหมาะแก่การตอกยึดขึ้นรูปด้วยบอลเพียงหนึ่งบอลที่มีผลกระทบต่อ Base Plate และ Arm Pad ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของ HSA

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการ หาสาเหตุ และกำหนดตัวแปรที่สำคัญ (KPIV) ที่มีผลต่อกระบวนการตอกยึดขึ้นรูป HSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ประสิทธิภาพของ HSA ขึ้นอยู่กับการเสียรูปทางกลของ Base Plate และ Arm Pad

1.3.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และสมรรถนะของ HSA

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 จำลอง Arm Coupon แทน Arm Actuator ที่เป็นส่วนประกอบจริงในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1.4.2 ศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการตอกยึดขึ้นรูป HSA

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองที่สามารถศึกษากระบวนการตอกยึดขึ้นรูป HSA ด้วยหนึ่งบอล

1.5.2 ทราบสาเหตุ ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการตอกยึดขึ้นรูป HSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎี

2.1 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive) จัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญยิ่งในคอมพิวเตอร์ หรือแม้แต่อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น กล้องถ่ายภาพ โทรทัศน์ โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในปัจจุบันนี้ ผู้บริโภคมีความต้องการฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้ในปริมาณมาก มีประสิทธิภาพ และมีความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลสูง (Access Time) ในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีการเข้าถึงข้อมูลสูง เทคโนโลยีในการจัดเรียงแถบแม่เหล็ก (Track Density) จะต้องมีความละเอียดมาก เพื่อเขียนข้อมูลลงในแผ่นดิสก์ และความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผ่นดิสก์ก็ต้องมีความเร็วสูงเช่นกัน ดังนั้นความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาหรือผลกระทบที่รุนแรงได้

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ มีอัตราการแข่งขันกันเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่น เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก ที่ผู้ผลิตต้องคำนึงถึงในทำนองเดียวกันความแม่นยำและน่าเชื่อถือของฮาร์ดดิสก์นั้นขึ้นอยู่กับ ประสิทธิภาพของชุดอ่าน-เขียนข้อมูล (Head Stack Assembly) ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการอ่าน เขียนข้อมูลลงในแผ่นข้อมูล (Media) คุณสมบัติต่าง ๆ อันได้แก่ ค่าความต้านทานแรงบิด และค่าแกรมโหลด จำเป็นต้องถูกกำหนด และควบคุมให้เหมาะสมในแต่ละรุ่นของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เมื่อคุณสมบัติเหล่านี้เกิดการผันผวนจะทำให้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อ Slider Fly Height ที่อาจก่อให้เกิดความผิดพลาด ในการอ่าน-เขียนข้อมูลและก่อให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นข้อมูลได้

เนื่องจากกระบวนการตอกยึดขึ้นรูปโดยใช้บอล (Ball Swaging) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการประกอบชุดอ่าน-เขียนข้อมูล ที่เป็นส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว โดยใช้หลักการยิง Swage Ball ผ่านบริเวณของ Boss Tower ที่อยู่ในส่วนของ Base Plate ของหัวอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly) เพื่อให้ Boss Tower เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร และยึดติดกับ E-Block Arm นอกเหนือจากบริเวณของ Boss Tower ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแล้ว ยังส่งผลให้ Base Plate และ E-Block Arm มีการเปลี่ยนรูป ทำให้ค่า Z-Height ของหัวอ่านเปลี่ยนแปลงอีกด้วย พบว่าค่า Z-Height ที่มีการเปลี่ยนแปลง 0.005-0.015 มิลลิเมตร สามารถส่งผลให้ค่าแกรมโหลดเปลี่ยนแปลงไปถึง 0.1-0.3 แกรม ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของชุดอ่าน-เขียนข้อมูลอย่างมาก และทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่าน-เขียนข้อมูลและคุณสมบัติอื่น ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้ ดังนั้นจึงทำให้นักวิจัยให้ความสนใจในการศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการ Ball swaging และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น Wadhwa (1996) ได้ทำการวิเคราะห์สมการโดยใช้หลักวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) เพื่อต้องการทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการเปลี่ยนรูปของวัสดุ และศึกษาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่า HGA Torque Out ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการตอกยึดขึ้นรูปโดยใช้บอล โดยใช้แบบจำลองทรงกระบอกบาง และหนาแบบสมมาตร (Thin and Thick Symmetrical Cylinder) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นแบบจำลอง พบว่าเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจากการตอกยึดขึ้นรูปจะเกิดความเค้น (Stress) ที่ส่งผลให้วัสดุมีระยะการเคลื่อนตัวในแนวรัศมี (Radial Displacement) ถ้าการเคลื่อนตัว มีระยะมากกว่า 1×10^{-5} นิ้ว จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ซึ่งโดยปกติ แล้วการตอกยึดขึ้นรูปจะทำให้วัสดุจะเกิดการเคลื่อนตัวมากกว่าค่านี้ และทำให้เกิดค่าความเค้น ถึงจุดคราก (Yield Point) หรือมากกว่า ตามทฤษฎีเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดไม่เป็นเชิงเส้น และค่าความเค้นถึงจุดครากหรือมากกว่า วัสดุจะเปลี่ยนคุณสมบัติจากอิลาสติก (Elastic) ไปเป็นพลาสติก หรืออีกนัยหนึ่งหมายความว่า วัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้น ทำให้ทุกการศึกษาเกี่ยวกับ Ball Swaging Process จะต้องกำหนดให้พิจารณาให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเสมอ ในกรณีของค่า HGA Torque Out ได้ทำการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขกับค่าที่วัดได้จากงานจริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยใช้แบบจำลองทรงกระบอกบางเท่านั้น ยังไม่ได้ถูกตรวจสอบสำหรับแบบจำลองทรงกระบอกหนา Kamnerdtong และคณะ (2005) ได้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) โดยทำการสร้างแบบจำลองสมมาตร (Symmetric Geometry) เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนรูปทรงของ Boss Tower และค่าความต้านทานแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าของกระบวนการตอกยึดขึ้นรูป เช่น ขนาดของ Swage Ball ความเร็วและทิศทางของ Swage Ball รวมทั้งค่าสัมประสิทธ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficient) ระหว่าง Boss Tower กับ Swage Ball การจำลองในการศึกษานี้ ได้นำสมการการหาค่าแรงบิดของ Wadhwa มาประยุกต์ใช้ และทำการประมวลผลโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทีละตัว พบว่าถ้ายิง Swage Ball ในแนวปกติ ขนาดของ Swage Ball ความเร็วของ Swage Ball และค่าสัมประสิทธ์แรงเสียดทานระหว่าง Boss Tower กับ Swage Ball มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงบิด และมุมระหว่างรอยต่อของ Base Plate กับ E-Block Arm เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่าความต้านทานแรงบิดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเข้าถึงข้อมูลของชุดหัวอ่านดีขึ้น แต่ข้อเสียที่พบคือการเปลี่ยนรูปของ Base Plate ก็มีมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการตอกยึดขึ้นรูปให้เหมาะสมเพื่อเกิดค่าแรงบิด และการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีการออกแบบ และทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าผลที่เกิดจากการจำลองถูกต้องตามการทดลองจริง Kenchiro Aoki และคณะ (2007) จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Dimensional Finite Element Method) โดยทำการสร้างแบบจำลองเพื่อทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของ Base Plate และค่า HGA Torque Out บริเวณ Inner Arm ของ E-Block ซึ่งมี Base Plate ยึดติดอยู่ทั้งหนึ่งและสองด้าน โดย Swage Ball ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และแบบจำลองถูกสร้างและกำหนดลักษณะแบบสมมาตร (Symmetrical Model) เพื่อลดระยะเวลาในการจำลอง พบว่าเมื่อทำการยิงบอลด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ๆ ค่าความเค้นที่กระทำต่อ E-Block Arm จะเป็นแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Stress) และมีความแตกต่างกันตามจำนวน Base Plate ที่ยึดติดอยู่ขณะเดียวกันใน E-Block Arm เดียวกันที่มี Base Plate ยึดติดอยู่ทั้งส่วนด้านบนและล่าง เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูป ค่า Torque Resistance ที่เกิดขึ้นกับ Base Plate จะแตกต่างกัน โดยที่ Base Plate ด้านบนจะเกิดการเปลี่ยนรูปง่าย และมากกว่าเนื่องจากผลกระทบสองส่วน คือ 1. แรงกระทำที่เกิดจากความเค้นที่บริเวณผิวของ Base Plate เอง และ 2. ผลสืบเนื่องของแรง กระทำที่มาจากการแอ่นตัวเปลี่ยนรูปของ E-Block Arm ดังนั้น ถ้ามีการเพิ่มความหนาของ E-Block Arm จะเป็นการลดแรงกระทำที่เกิดขึ้น และสามารถลดการ เปลี่ยนรูปของ Base Plate ด้านบนได้ งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบการทดลองวัดค่าการเปลี่ยนรูป ที่เกิดกับตัวงานจริงโดยใช้ Optical Displacement Sensor และ Laser-Interferometer เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำกับผลที่เกิดจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งสรุปได้ว่าการตั้งสมมุติฐานและวิเคราะห์ปัญหานั้นทำได้อย่างถูกต้อง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาเป็นเพียงการศึกษาและวิเคราะห์ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของ Ball Swaging Process ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการเปลี่ยนรูปของบริเวณ Base Plate เท่านั้น Jian Yang และคณะ (2007) ได้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Dimensional Finite Element Method, FEM) โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS/LS-DYNA ทำการวิเคราะห์และศึกษาเพิ่มเติมจนถึงผลที่กระทบต่อคุณสมบัติของชุดหัวอ่าน โดยทำการประมาณค่าของแกรมโหลดที่ส่งผลมาจากการเปลี่ยนรูปของ Base Plate และ E-Block arm โดยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นประกอบด้วย Swage Key ที่กำหนดคุณลักษณะเป็นวัสดุแข็งเกร็ง วิเคราะห์ในส่วนปลายของ E-Block Arm, Base Plate และ Swage Ball ให้เป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนรูป พบว่าหลังจากทำการยิง Swage Ball และถอด Swage Key ออก จะพบว่าด้านปลายของ E-Block Arm มีการแอ่นตัว จะส่งผลทำให้ปลายของ Base Plate ทั้งสองด้านเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปจากเดิมด้วย โดยที่ Base Plate ที่ติดอยู่ด้านบนของ E-Block Arm จะมีระยะการเปลี่ยนแปลงมากกว่า ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Kenchiro Aoki ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นได้นำหัวอ่านข้อมูลติดเข้าไปกับส่วนของ base plate เพื่อทำการประมวลผลต่อเพื่อศึกษาค่าแกรมโหลดที่เปลี่ยนแปลงค่า แกรมโหลดที่เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถคำนวณได้จากผลการเปลี่ยนแปลงของค่า Slider Z-Height และค่า Spring Rate ของซัสเพนชั่น (Suspension) ในส่วนของหัวอ่านเขียนข้อมูลอีกทั้งผลที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

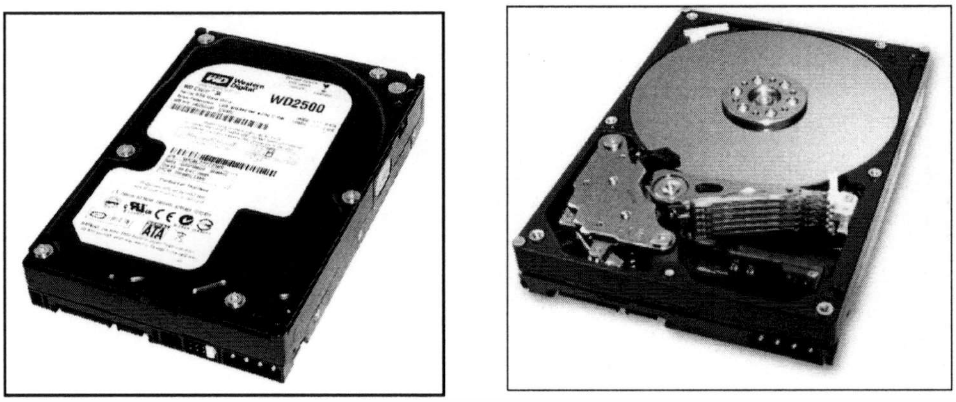
จากที่กล่าวมา พบว่าการวิจัยส่วนใหญ่เป็นเพียงการศึกษาละวิเคราะห์ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการตอกยึดขึ้นรูปที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการเปลี่ยนรูปของบริเวณ Base Plate หรือค่า HGA Torque Out เท่านั้น มีเพียง Jian Yang และคณะ ที่ได้ทำการศึกษาต่อยอดเพื่อให้เห็นถึงค่าของแกรมโหลดที่เปลี่ยนไป ซึ่งเกิดจากเปลี่ยนรูปของ Base Plate แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์นั้นเกิดจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการตอกยึดขึ้นรูปค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น

ดังนั้นในการวิจัยชิ้นนี้ จึงต้องการที่จะศึกษาและวิเคราะห์ให้เห็นภาพที่ชัดเจน ในกรณีที่เราทำการ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงในแต่ละค่าพารามิเตอร์ในการตอกยึดขึ้นรูป เชื่อมโยงถึงการเปลี่ยนรูปของ Base Plate และการเปลี่ยนไปของค่า HSA CTQ โดยทำการสร้างแบบจำลองของชุดหัวอ่านเขียนข้อมูลขนาด 2.5 นิ้ว และใช้วิธีการทางกลศาสตร์ของแข็งเชิงคำนวณควบคู่กับระเบียบทางไฟไนต์อิลิเมนต์ ในการแก้ปัญหาโดยขอบเขตเงื่อนไขของชิ้นส่วนต่าง ๆ คล้ายกับของจริง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้ผลิตในการกำหนดขอบเขตของค่าค่าพารามิเตอร์ในการตอกยึดขึ้นรูปต่าง ๆ ที่เหมาะสมเพื่อใช้ประกอบชุดอ่านเขียนข้อมูล ให้มีคุณภาพตามต้องการต่อไป

2.2 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive, HDD)

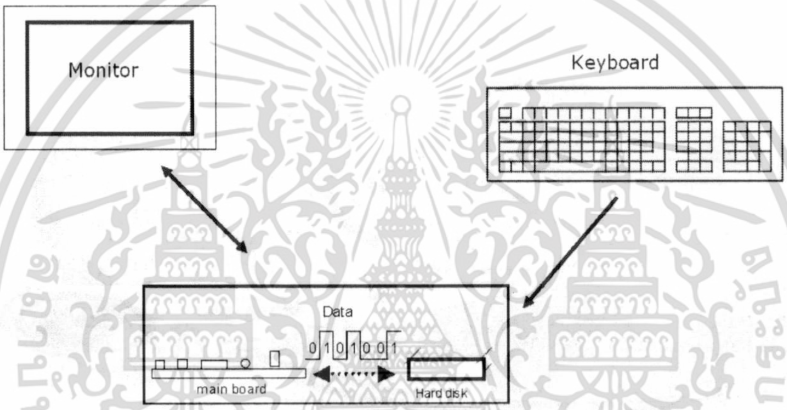
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเรียกได้หลายชื่อ เช่น ฮาร์ดไดรฟ์ (Hard Drive) ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) หรือ ฟิกดิสก์ไดรฟ์ (Fixed Disk Drive) ทำหน้าที่บันทึกและอ่านข้อมูลเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ ที่สามารถเก็บรักษาข้อมูลได้แม้ขณะที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าป้อนให้ก็ตามข้อมูลต่าง ๆ จะถูกบันทึกลงบนแผ่นแพลตเตอร์ (Platter) ที่มีพื้นผิวมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการเก็บข้อมูลนั้น จะเก็บในรูปรหัสดิจิตอลลงบนแผ่นดิสก์กลมแบนที่หมุนอย่างรวดเร็วซึ่งก็คือแผ่นแพลตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ตัวอย่างภายนอกฮาร์ดดิสก์ขนาด 2.5 นิ้ว b) ตัวอย่างภายในฮาร์ดดิสก์

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างฮาร์ดดิสก์

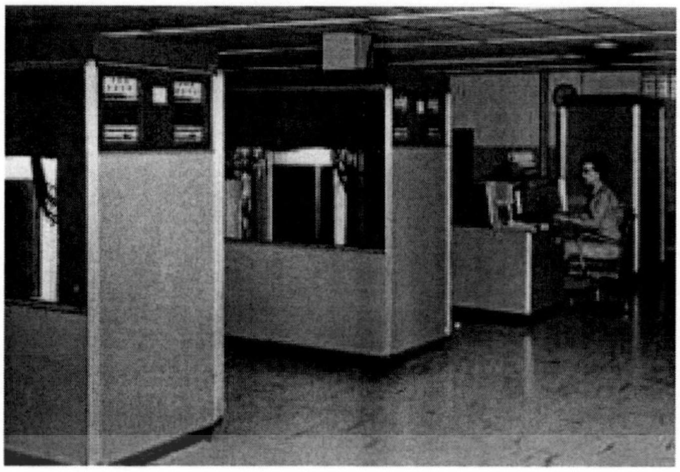


รูปที่ 2.2 การเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์เป็นรหัสดิจิตอลของคอมพิวเตอร์

2.2.1 ประวัติและความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์

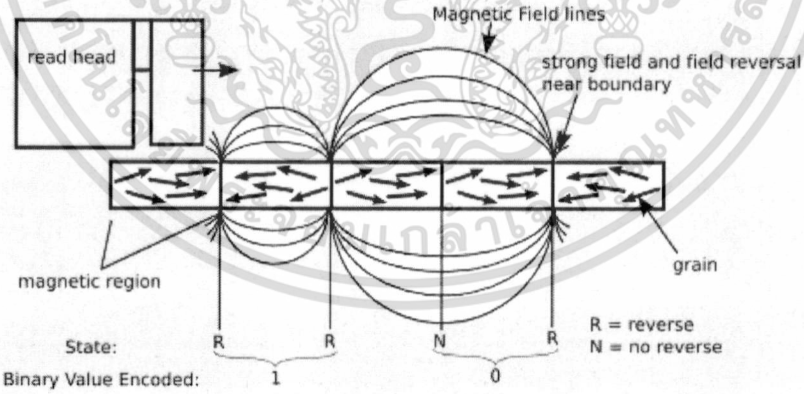
ฮาร์ดดิสก์เริ่มนำมาเผยแพร่ในทางการค้าเมื่อปี 1956 โดยคอมพิวเตอร์เครื่องแรกที่ใช้ฮาร์ดดิสก์ที่มีหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ได้ คือ IBM 305 RAMAC ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งใช้ฮาร์ดดิสก์รุ่น IBM Model 350 เป็นระยะเวลาหลายปีที่ฮาร์ดดิสก์มีขนาดใหญ่ อุปกรณ์มีน้ำหนักมากและการใช้กำลังไฟฟ้าที่มากเกินไป จึงเหมาะสมกับการใช้ในสำนักงานที่มีขนาดใหญ่มากกว่าสำนักงานที่มีขนาดเล็กหรือตามบ้านเรือน ก่อนช่วงต้นปี 1980 ฮาร์ดดิสก์มีแพลตเตอร์ขนาด 8 นิ้ว หรือ 14 นิ้ว ต้องใช้พื้นที่และกำลังไฟฟ้ามาก ด้วยเหตุนี้ฮาร์ดดิสก์จึงไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้กับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก จนกระทั่งหลังปี 1980 เมื่อซีเกทเทคโนโลยี (Seagate Technology) ได้เสนอฮาร์ดดิสก์รุ่น ST-506 ซึ่งมีขนาด 5.25 นิ้ว รุ่นแรกที่สามารถเก็บข้อมูลได้ 5 เมกกะไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 คอมพิวเตอร์รุ่น IBM 305 RAMAC

ความสามารถในการเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ก็เติบโตอย่างรวดเร็ว ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาคอมพิวเตอร์ส่วนตัว (PC) ฮาร์ดดิสก์สามารถเก็บข้อมูลได้ 20 เมกกะไบต์ ซึ่งถือว่ามีความจุมากแล้ว จนกระทั่งระหว่างกลางปี 1990 ถึงช่วงท้ายปี 1990 เมื่อคอมพิวเตอร์ส่วนตัวต้องมีความสามารถเก็บข้อมูลที่ไม่เพียงแต่เป็นข้อมูลที่เป็นข้อความ เอกสาร แต่ยังต้องเก็บข้อมูลที่เป็นรูปภาพ เพลงและวีดีโอได้ ดังนั้นฮาร์ดดิสก์จึงถูกสร้างให้มีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้ 8-20 กิกกะไบต์ ในช่วงท้ายปี 2007 ฮาร์ดดิสก์มีความสามารถในการเก็บข้อมูล 100-500 กิกกะไบต์ ขณะที่ความสามารถในการเก็บข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ 1 เทราไบต์

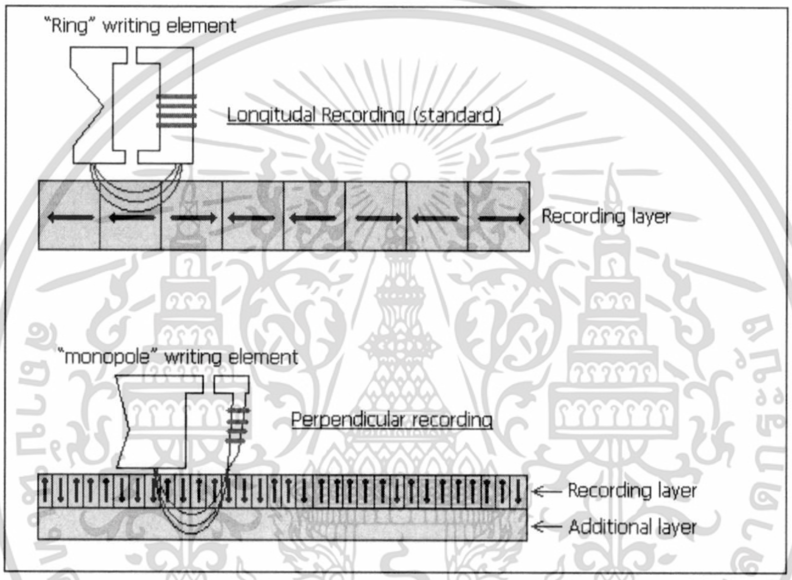


รูปที่ 2.4 รูปตัดขวางของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กที่เก็บข้อมูลโดยใช้ทิศของสนามแม่เหล็กแทนรหัส 0 หรือ 1

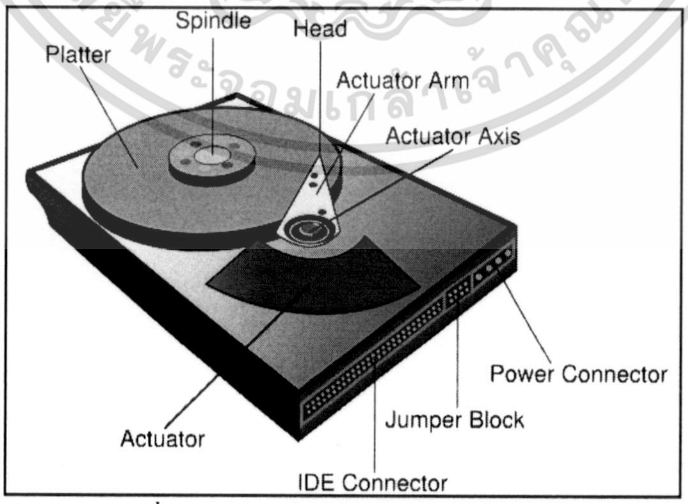
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์

ฮาร์ดดิสก์เก็บข้อมูลโดยใช้ทิศของสนามแม่เหล็กแทนรหัส 0 หรือ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และอ่านข้อมูลกลับโดยใช้วัสดุที่ตรวจจับความเป็นแม่เหล็กได้ ตัวอย่างการออกแบบฮาร์ดดิสก์ประกอบด้วยสปินเดิล (Spindle) ซึ่งยึดติดแพลตเตอร์จำนวนหนึ่งแผ่นหรือมากกว่าหนึ่งแผ่น แพลตเตอร์ทำจากวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น อลูมินัมอัลลอย (Aluminum Alloy) หรือแก้ว และถูกเคลือบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการเก็บข้อมูลจากการเก็บข้อมูลแบบแนวนอน (Longitudinal Recording) มาเป็นแบบการเก็บข้อมูลแบบแนวตั้ง (Perpendicular Recording) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งทำให้ฮาร์ดดิสก์สามารถเก็บข้อมูลได้มากขึ้น



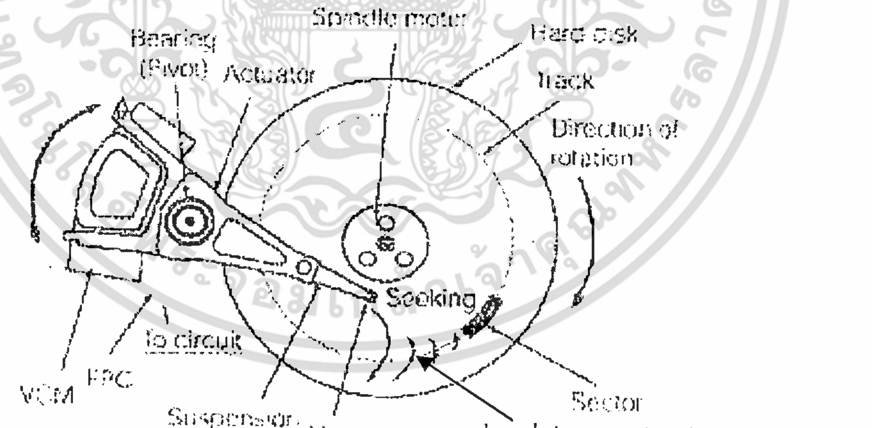
รูปที่ 2.5 การเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์แบบแนวตั้งและแบบแนวนอน



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบหลักในฮาร์ดดิสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์แสดงในรูปที่ 2.6 แพลตเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ข้อมูลจะถูกบันทึกลงบนแพลตเตอร์ขณะที่มันหมุนผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าหัวอ่าน/เขียน (Head) หัวอ่าน/เขียนทำงานโดยลอยอยู่เหนือพื้นผิวที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแพลตเตอร์ ระยะห่างระหว่างพื้นผิวแพลตเตอร์และหัวอ่านมีขนาดน้อยมาก (ในฮาร์ดดิสก์รุ่นใหม่หัวอ่านจะลอยอยู่ใกล้แพลตเตอร์ประมาณช่วง 10 นาโนเมตร) หัวอ่าน/เขียนถูกใช้สำหรับตรวจจับและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่อยู่ใต้ตัวมันอย่างรวดเร็ว พื้นผิวหนึ่งด้านของแพลตเตอร์ที่ยึดติดกับสปินเดิลจะใช้หัวอ่าน/เขียนหนึ่งชิ้นที่ประกอบอยู่กับชิ้นส่วนที่มีลักษณะเหมือนแขน ซึ่งเรียกว่าแอ็คชิวเอเตอร์อาร์ม (Actuator Arm) แอ็คชิวเอเตอร์อาร์มเป็นส่วนที่ทำให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้งข้ามไปมาบนแพลตเตอร์ที่หมุนอยู่ แอ็คชิวเอเตอร์อาร์มเคลื่อนที่โดยการควบคุมของวอยซ์คอยล์ (Voice Coil) หรือสเตปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor, ใช้ในฮาร์ดดิสก์รุ่นเก่า) สเตปเปอร์มอเตอร์นั้นถูกติดตั้งให้อยู่ด้านนอกของห้องหัวอ่าน/เขียนและแพลตเตอร์ และมีมาก่อนแบบวอยซ์คอยล์ ในเวลาต่อมาไม่นานนัก ฮาร์ดดิสก์ที่ใช้วอยซ์คอยล์ มีโครงสร้างเหมือนลำโพง คือ ขดลวดและหัวอ่าน/เขียนจะเคลื่อนที่แนวรัศมีของแพลตเตอร์แบบเส้นตรง ไม่ใช่การเคลื่อนเป็นแนวเส้นโค้งเหมือนในปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 2.7 ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ที่ใช้วอยซ์คอยล์มีรายละเอียดของโครงสร้างที่ต่างจากช่วงแรกแต่ยังคงมีส่วนที่เหมือนกัน คือ การทำงานร่วมกันระหว่างขดลวดและสนามแม่เหล็ก



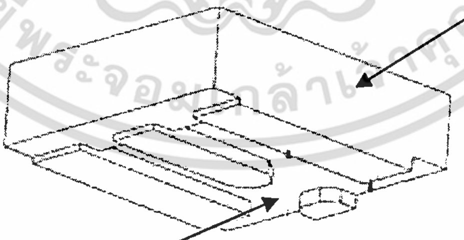
รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งของหัวอ่าน/เขียน

ฮาร์ดดิสก์รุ่นเก่าอ่านข้อมูลบนแผ่นแพลตเตอร์กลับ โดยวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสแม่เหล็กในหัวอ่าน หัวอ่านนี้จะมีขดลวดและทำงานเหมือนหัวอ่านของเทปแม่เหล็ก (Magnetic-Tape) โดยที่หัวอ่านไม่สัมผัสกับพื้นผิวที่เก็บข้อมูล เนื่องจากความหนาแน่นในการเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลในแพลตเตอร์เพิ่มขึ้น การใช้หัวอ่านแบบแมกนีโทรีซิสแทนซ์ (Magnetoresistance, MR) จึงถูกนำมาใช้ ซึ่งเป็นหัวอ่านที่ เมื่อได้รับกระแสแม่เหล็กจากแผ่นแพลตเตอร์ ความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านจะเปลี่ยนแปลง ต่อมาได้มีการพัฒนาหัวอ่านให้กระแสแม่เหล็กมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้ามากขึ้นแต่มีขนาดเล็กมากเรียกว่าหัวอ่านชนิดจีเอ็มอา (GMR) ซึ่งย่อมาจากภาษอังกฤษว่า Giant magneto Resistance ในปี ค.ศ. 2005 ได้มีการพัฒนาและนำหัวอ่านรุ่นทีเอ็มอา (TMR, Tunneling MR) มาใช้ในฮาร์ดดิสก์

หัวอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ รักษาระยะห่างจากแผ่นแพลตเตอร์ด้วยอากาศที่เคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนของแผ่นใกล้กับพื้นผิวของแผ่นแพลตเตอร์ หัวอ่าน/เขียนถูกติดอยู่บนชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเรียกว่า สไลเดอร์ (Slider) ความสูงของหัวอ่าน/เขียนในการลอยอยู่เหนือพื้นผิวแพลตเตอร์ (Flying Height) ถูกลดลงอยู่เสมอ เพื่อต้องการเพิ่มความหนาแน่นในการเก็บข้อมูล ความสูงในการลอยอยู่เหนือพื้นผิวแพลตเตอร์ถูกควบคุมโดยการออกแบบการเซาะร่องบริเวณพื้นผิวของสไลเดอร์ให้รูปทรงต่าง ๆ หรือเรียกว่าการออกแบบแอร์แบริ่ง (Air Bearing) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 (Air Bearing: เป็นการใช้ประโยชน์จากแผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่เกิดขึ้นจากความดันของอากาศ ทำให้ไม่มีค่าความเสียดทานระหว่างพื้นผิว 2 พื้นผิวที่ทำงานร่วมกันโดยพื้นผิวทั้งสองไม่สัมผัสกัน เนื่องจากการไม่สัมผัสกันของพื้นผิวทั้งสองทำให้ไม่เกิดปัญหาหลายอย่าง เช่น ความเสียดทาน, ความล้าของชิ้นงาน, การเกิดอนุภาคเล็ก ๆ และสารหล่อลื่น ซึ่งข้อดีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและงานที่ต้องใช้ความเร็วสูง) หน้าที่ของแอร์แบริ่ง คือ รักษาระดับความสูงของหัวอ่าน/เขียนให้คงที่ขณะที่ลอยอยู่เหนือพื้นผิวของแพลตเตอร์ ถ้าหัวอ่าน/เขียนชนหรือสัมผัสกับแพลตเตอร์จะเกิดความเสียหายที่รุนแรงบนพื้นผิวของแพลตเตอร์



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการออกแบบแอร์แบริ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์

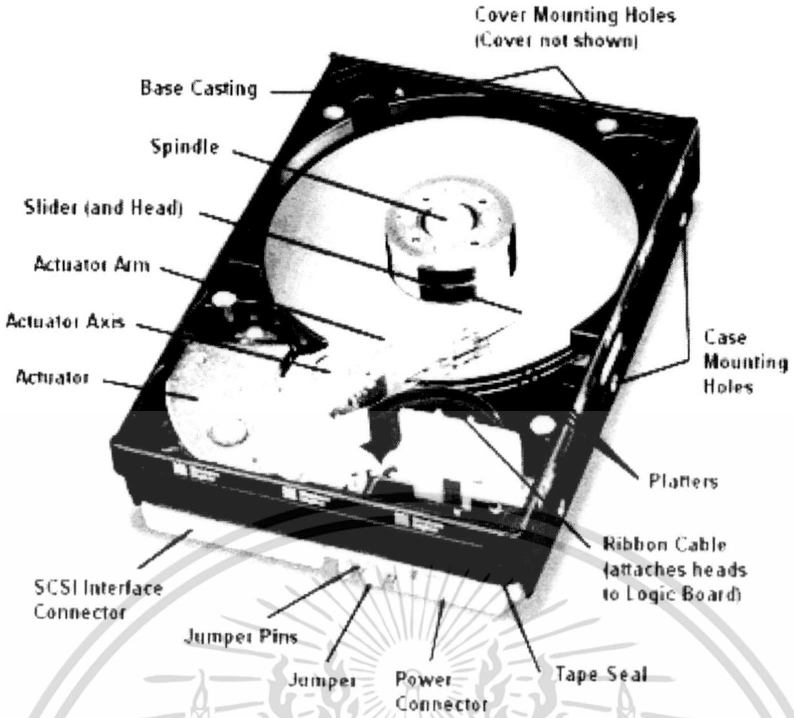
รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบหลักที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์แบบทั่วไปซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.3.1 แผ่นจานแม่เหล็ก (Platters) หรือจะเรียกว่า "แพลตเตอร์" เป็นพื้นที่ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานเหล็กกลม ๆ มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.8-5.25 นิ้ว ที่เคลือบสารแม่เหล็กวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น (ขึ้นอยู่กับความจุ) อยู่บนแกนหมุน (Spindle) และสารแม่เหล็กที่ว่าจะถูกเหนี่ยวนำให้มีสภาวะเป็น 0 และ 1 เพื่อจัดเก็บข้อมูลแทนความหมายของข้อมูลแต่ละก้อน โดยจานแม่เหล็กนี้จะติดกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่หมุนแผ่นจานเหล็กนี้ ปกติฮาร์ดดิสก์แต่ละตัวจะมีแผ่นดิสก์ประมาณ 1-4 แผ่น แต่ละแผ่นก็จะเก็บข้อมูลได้ทั้งสองด้าน ส่วนของจานแม่เหล็กนั้น ทำมาจากวัสดุอลูมิเนียมหรือวัสดุประเภทแก้วที่มีส่วนผสมเซรามิคอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งข้อดีของแผ่นจานแม่เหล็กที่ผลิตโดยใช้วัสดุอย่างหลัง คือ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและสามารถออกแบบให้แผ่นจานแม่เหล็กมีขนาดบางเท่าที่จะบางได้กว่าอลูมิเนียม ควรระมัดระวังไม่ให้ฮาร์ดดิสก์กระทบกระเทือนอย่างแรงเพราะจะทำให้ส่วนที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กและข้อมูลเสียหายได้ พื้นผิวของแผ่นจานแม่เหล็กทั้งสองด้านจะถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก ซึ่งเท่าที่มีใช้กันมี 2 ชนิด คือ

ก) สารประเภท Iron Oxide และ Thin Film สารประเภท Iron Oxide แผ่นจานแม่เหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุประเภทนี้ สังเกตได้ง่าย เพราะว่ามันมีสีน้ำตาล ใช้กันมากสำหรับฮาร์ดดิสก์ในช่วงแรก ๆ เพราะเป็นวัสดุที่มีราคาค่อนข้างถูกเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ค่อนข้างเปราะบางและแตกหักง่ายจากการสัมผัสกับหัวอ่าน ประกอบกับสารแม่เหล็กประเภทนี้มีความหนาแน่นค่อนข้างน้อย จึงมีข้อจำกัดในด้านขนาดความจุของข้อมูล

ข) สารประเภท Thin Film เป็นสารแม่เหล็กที่มีสีเงินวาว มีคุณสมบัติค่อนข้างทนทานต่อการเสียดสีของหัวอ่าน อีกทั้งยังเป็นสารเคลือบผิวที่บางมากทำให้หัวอ่านสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ดีกว่าจานแม่เหล็กที่ใช้สารเคลือบผิวชนิดอื่น ๆ สารแม่เหล็กประเภทนี้ยังมีราคาที่แพงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

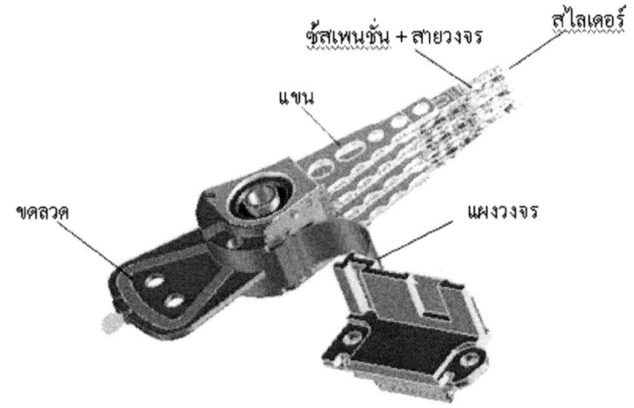


รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบต่างๆในฮาร์ดดิสก์

2.2.3.2 สปินเดิลมอเตอร์ (Spindle Motor) หรือมอเตอร์หมุนจานแม่เหล็ก (Spindle Motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้หมุนของแผ่นแม่เหล็กซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อความเร็วในการอ่านของฮาร์ดดิสก์ เพราะยิ่งมอเตอร์หมุนเร็วหัวอ่านก็จะเจอข้อมูลที่ต้องการเร็วขึ้นนั่นเอง ซึ่งความเร็วที่ว่านี้จะวัดกันเป็นรอบต่อนาที (Revolutions Per Minute หรือ RPM) ถ้าเป็นฮาร์ดดิสก์รุ่นเก่าจะหมุนด้วยความเร็วเพียง 3,600 รอบต่อนาที ต่อมาพัฒนาเป็น 5,400 รอบต่อนาที และ 7,200 รอบต่อนาที และปัจจุบันหมุนได้เร็วถึง 10,000 รอบต่อนาที การพัฒนาให้ฮาร์ดดิสก์หมุนเร็วจะได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นเพราะมีผลให้ Sector ที่บรรจุข้อมูลจะถูกหมุนเร็วมาพบกับหัวอ่านเร็วขึ้น ทำให้การค้นพบ อ่านข้อมูลได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพดีขึ้น เพราะลดทั้ง Access Time และ Latency Time

2.2.3.3 เฮดสแตกแอสเซมบลี (Head Stack Assembly, HSA) หรือชุดหัวอ่านขียนข้อมูล เป็นส่วนที่ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบต่างๆ ของ HSA

ก) เฮดกิมบอลแอสเซมบลี (Head Gimbal Assembly, HGA) หรือหัวอ่านขียนข้อมูล เป็นส่วนที่ใช้ในการอ่าน/เขียนข้อมูล มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนจึงมีราคาแพง ภายในหัวอ่านมีลักษณะเป็นขดลวด โดยในการอ่าน/เขียนข้อมูลเกิดขึ้นเมื่อคอนโทรลเลอร์ (Controller) ของฮาร์ดดิสก์ได้รับคำสั่งจาก Host ให้มีการอ่าน/เขียนข้อมูล จะนำคำสั่งที่ได้รับมาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วป้อนเข้าสู่ขดลวดทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำ ไปเปลี่ยนโครงสร้างของสารแม่เหล็กที่ฉาบบนแผ่นดิสก์ ซึ่งมีรูปแบบของการบันทึกข้อมูลในที่สุดเทคโนโลยีของการอ่าน/เขียนนี้ เรียกว่า MR (Magnical Recorder) โครงสร้างของหัวอ่านเป็นสารกึ่งตัวนำและกระบวนการผลิตเป็นเช่นเดียวกับการผลิตไมโครโปรเซสเซอร์ หัวอ่านจัดเป็นชิ้นส่วนที่เล็กและมีความซับซ้อนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตเป็นส่วนที่ทำหน้าที่อ่านและเขียนข้อมูลบนจานแม่เหล็กโดยตรง แต่จะลอยอยู่เหนือจานแม่เหล็กในระยะใกล้มากประมาณ 512 Micro Inches เท่านั้นเอง จำนวนของหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ตัวหนึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนของแผ่นจานแม่เหล็ก โดยหนึ่งด้านของจานแม่เหล็กจะต้องมีหัวอ่านจำนวน 1 อันเสมอ ฮาร์ดดิสก์โดยส่วนใหญ่ที่มีแผ่นจานแม่เหล็กตั้งแต่ 1-4 แผ่น ก็จะมีจำนวนหัวอ่านตั้งแต่ 2-8 หัว และเป็นไปได้ว่าในฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดใหญ่อาจมีจำนวนหัวอ่านได้มากถึง 20 หัว การอ่านและเขียนข้อมูลลงบนจานแม่เหล็กอาศัยหลักการตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทุกครั้งที่มีการอ่านหรือเขียนข้อมูลจะมีเพียงหนึ่งหัวอ่านเท่านั้นที่สามารถทำการเข้าถึงข้อมูลได้

1ก) การเขียนข้อมูลทุกครั้งที่หัวอ่านทำการเขียนข้อมูลจะมีกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับส่วนของขดลวดที่ปลายหัวอ่าน ทำให้มันถูกเปลี่ยนสภาวะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าชั่วคราวและจะไปเหนี่ยวนำให้สารแม่เหล็กบนจานแม่เหล็กมีการจัดเรียงทิศทางตามรูปแบบของข้อมูลที่ต้องการบันทึก

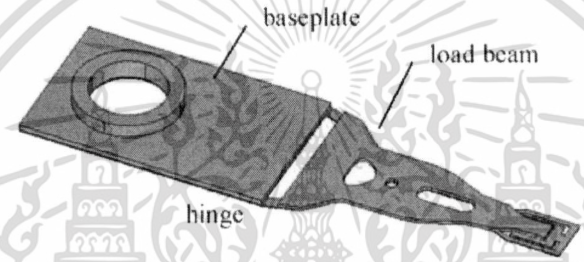
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2ก) การอ่านข้อมูลของหัวอ่านจะเป็นไปในทางกลับกัน คือ หัวอ่านจะอยู่ในสภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า จึงเกิดการเหนี่ยวนำจากกระแสไฟฟ้าอ่อน ๆ ขึ้นที่ขดลวด ซึ่งค่าของกระแสที่อ่านได้นี้ คือ ข้อมูลที่อ่านได้จากจานแม่เหล็กนั่นเอง

เฮดกิมบอลแอสเซมบลี (Head Gimbal Assembly, HGA) มีส่วนประกอบย่อยดังนี้

1. สไลเดอร์ (Slider) เป็นชิ้นส่วนที่มีหัวอ่าน/เขียนติดอยู่ ทำหน้าที่อ่าน/เขียนข้อมูลลงบนดิสก์

2. ซัสเพนชั่น (ระบบกันสะเทือน) รวมกับสายวงจร (Suspension + Flex Circuit) เป็นส่วนที่ติดกับสไลเดอร์เพื่อให้สไลเดอร์สามารถเคลื่อนที่ลอยอยู่บนดิสก์ได้ โดยทั่วซัสเพนชั่นจะประกอบด้วยหลายส่วนคือ เบสเพลต (Base Plate), ข้อพับ (Hinge), โหลดบีม (Load Beam)



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของซัสเพนชั่น

ข) ส่วนประกอบรวม (Overmold Assembly) มีขดลวด (Coil) เป็นตัวให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านเพื่อทำให้ HSA เคลื่อนที่ได้ โดยในการทำงานจะมีวอยซ์คอยล์มอเตอร์ (Actuator or Voice Coil Motor, VCM) ประกบขดลวดด้านบนและด้านล่างของขดลวด เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในบริเวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวีซีเอ็ม จะมีแรงเกิดขึ้นทำให้ HSA เคลื่อนที่ได้

ค) แขนควบคุม (Actuator Arm) ทำงานร่วมกันกับมอเตอร์ในการเลื่อนแขนหัวอ่านไปที่ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการอ่าน/เขียนข้อมูล โดยมีคอนโทรลเลอร์ (Controller) ทำหน้าที่แปลคำสั่งที่มาจากคอมพิวเตอร์ จากนั้นก็เลื่อนหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูล แต่ต่อมา Stepping Motor ได้ถูกแทนด้วย Voice Coil ที่สามารถทำงานได้เร็วและแม่นยำกว่า Stepping Motor

ง) เคส (Case) มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมใช้บรรจุกลไกต่างๆ ในการหมุน-อ่านภายในแผ่นดิสก์ ปกติเคสนี้จะถูกปิดผนึกอย่างหนาแน่น เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการหยิบจับและป้องกันฝุ่นละออง

จ) กรองอากาศ (Air Filter) ภายในฮาร์ดดิสก์ไม่ได้เป็นสูญญากาศ อย่างที่เข้าใจ เพราะมันต้องการอากาศในการยกหัวอ่านให้ลอยอยู่เหนือจานแม่เหล็กได้ในหลายพื้นที่ที่มีสภาวะแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศแตกต่างกัน เนื่องจากอากาศจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีความกดอากาศสูงไปยังที่ที่มีความกดอากาศต่ำ ตัวกรองอากาศจึงทำหน้าที่ในการรักษาปริมาณอากาศเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศระบายออกไปด้านนอกหมด

ฉ) ขั้วต่อและจัมเปอร์ (Connector and Jumper) ขั้วต่อและจัมเปอร์เป็นส่วนประกอบที่อยู่ในส่วนท้ายของฮาร์ดดิสก์ทุกๆ ตัวซึ่งประกอบไปด้วยขั้วต่ออินเตอร์เฟส ขั้วต่อสายไฟ และจัมเปอร์

ช) ขั้วต่ออินเตอร์เฟส (Interface Connector) เป็นจุดเชื่อมต่อที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างฮาร์ดดิสก์กับซีพียู หรือแม้กระทั่งหน่วยความจำ ซึ่งรูปแบบของขั้วต่ออินเตอร์เฟสอาจแตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทของฮาร์ดดิสก์ เช่น จำนวนขาสัญญาณจะมีไม่เท่ากันซึ่งเป็นผลทำให้สายสัญญาณที่ใช้ย่อมมีลักษณะที่ต่างกันไปอีกด้วย

ซ) ขั้วต่อสายไฟ (Power Connector) คือ ช่องสี่เหลี่ยมที่มีมุมตัดสองด้านบนใช้รองรับขั้วไฟพลาสติกสีขาวขนาดใหญ่ที่มาจากเพาเวอร์ซัพพลายนั่นเอง (ขั้วไฟขนาดเล็กจะใช้กับฟลอปปีดิสก์ไดรฟ์) โดยจะมีขาโลหะทั้งหมดสี่ขาในช่องนี้ เวลาเสียบขั้วไฟพลาสติกสีขาวเข้ากับ Power Connector ต้องเสียบให้ถูกทิศทาง ไม่เช่นนั้นจะเป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าที่ไม่ตรงกับความต้องการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ ส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์เกิดความเสียหายได้ ฮาร์ดดิสก์ทุกตัวจะมีขั้วต่อสายไฟสำหรับต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ โดยขั้วต่อไฟมาตรฐานจะมีจำนวนขาสัญญาณ 4 เข็ม ซึ่งจะจ่ายไฟ 5 V และ 12 V

ฌ) จัมเปอร์ (Jumper) เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ใช้สำหรับการปรับตั้งค่าเฉพาะให้กับฮาร์ดดิสก์แต่ละตัว เช่น การกำหนดให้ฮาร์ดดิสก์เป็นตัว Boot หรือเป็นตัวเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ประเภท IDE

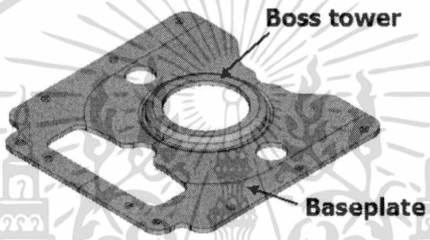
ญ) แผงวงจรบนตัวฮาร์ดดิสก์ (Circuit/Logic Board) ฮาร์ดดิสก์แต่ละตัวจะมีแผงวงจรที่เรียกว่า Circuit หรือ Logic Board แผงวงจรนี้จะถูกยึดติดกับภายนอกของตัวฮาร์ดดิสก์ โดยจะมีชิพไอซีที่เรียกว่า DSP (Digital Signal Processors) ซึ่งควบคุมการส่งผ่านของข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลส่วนที่ถูกเรียกใช้บ่อย ๆ และส่วนประกอบอื่น ๆ รวมทั้งส่วนควบคุม Spindle, Actuator, Cache Memory, Read/Write Operation, Power Management แผงวงจรนี้ จะรับคำสั่งผ่านมาทางส่วนควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ หรือ Hard Drive's Controller ซึ่งถูกควบคุมโดยระบบปฏิบัติการอีกทีหนึ่ง เมื่อระบบต้องการข้อมูลที่เก็บบันทึกอยู่ในฮาร์ดดิสก์ ตัวแผงวงจรนี้จะรับคำสั่งโดยเคลื่อนและควบคุมส่วนประกอบต่างๆ เพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
125095

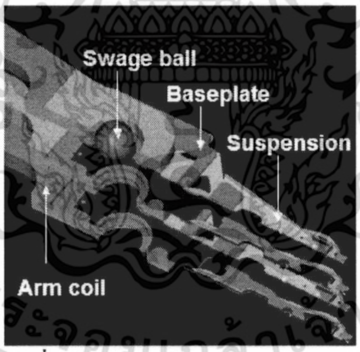
2.3 กระบวนการประกอบชุดอ่าน-เขียนข้อมูลด้วยหนึ่งบอล (One Ball Swaging Process)

เฮดสแตกแอสเซมบลี (Head Stack Assembly, HSA) หรือชุดหัวอ่านเขียนข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการประกอบหัวอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly) หลาย ๆ ชิ้นเข้ากับแขนควบคุม (Actuator Arm) โดยใช้กระบวนการ Ball Swaging Process

Ball Swaging Process เป็นวิธีการยิง Swage Ball ผ่านบริเวณของ Swage Boss ที่เป็นส่วนประกอบของ Base Plate โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางรูของ Swage Boss จะมีขนาดที่ออกแบบมาให้สามารถประกอบเข้ากับแขนควบคุมได้พอดี ขนาดของ Swage Ball ที่ใช้นั้น จะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูของ Swage boss เมื่อทำการยิง Swage Ball ผ่านบริเวณของ Swage Boss จึงส่งผลให้ Swage Boss เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร เกิดการยึดเกาะติดเข้ากับแขนควบคุม



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของ Baseplate



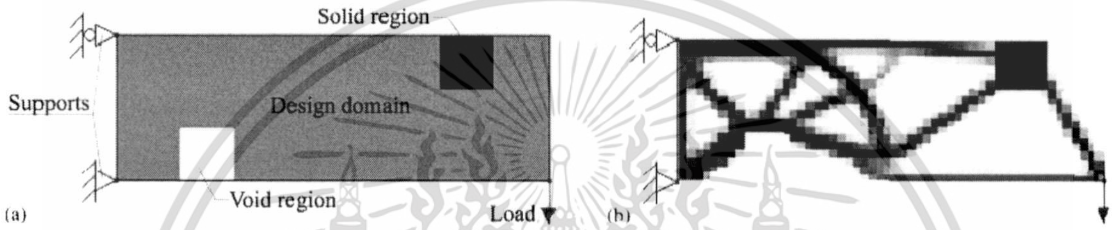
รูปที่ 2.13 Ball swaging process

การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของ Baseplate ยึดติดกับ E-Block Arm จะเกิดค่าของแรง (Strength) หรือเรียกว่า Retention torque หรือ HGA Torque Out ยิ่งมีค่ามากก็จะทำให้ตัวงานยึดเกาะกันได้ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งก็สืบเนื่องมาจากการที่เกิดการเสียรูปมากขึ้นตามไปด้วย ในการศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนรูปของวัสดุ ความดันสัมผัส ที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการ Swaging จำเป็นต้องเข้าใจทฤษฎีเบื้องต้นเพื่ออธิบาย วิเคราะห์ และขยายผลในการศึกษากระบวนการ Swaging และเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งในส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โทโปโลยีเหมาะสมสุด

โทโปโลยีเหมาะสมสุดเป็นรูปแบบเฉพาะของการหาค่าเหมาะสมสุด (Optimization) ของการหารูปร่างของโครงสร้างงานที่เราสนใจ วัตถุประสงค์ของการหาโทโปโลยีเหมาะสมสุดคือการวิเคราะห์หาโครงสร้างหลักที่จำเป็นต่องานนั้นๆ ให้สอดคล้องกับการหาค่ามากสุดหรือน้อยสุดของวัตถุประสงค์ในการออกแบบ เช่น ค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง, ค่าความถี่ธรรมชาติ ฯลฯ โดยมีเงื่อนไขการออกแบบ เช่น การลดปริมาตรของโครงสร้าง เพื่อนำวัสดุมาใช้ในการสร้างโครงสร้างต่างๆให้เกิดประโยชน์สูงสุดดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.14 ซึ่งโครงสร้างที่ได้จากการหาโทโปโลยีเหมาะสมสุดต้องสามารถรับภาระ (load) ได้ตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ

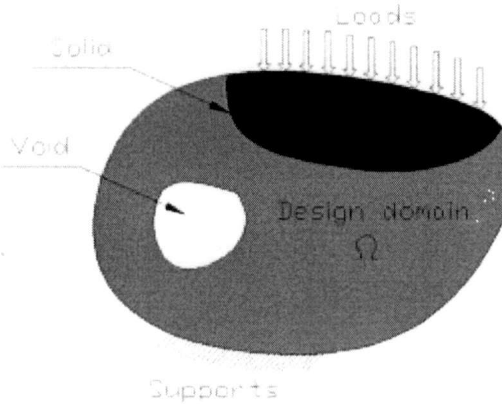


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหาโทโปโลยีเหมาะสมสุดของโครงสร้าง

รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของโครงสร้างทั่วไป ที่นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีโทโปโลยีเหมาะสมสุด โดยทั่วไปจะมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้ 1. ดีไซน์โดเมน (Design Domain) คือ ขอบเขตพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ 2. โซลิดรีเจน (Solid Region) คือ พื้นที่ที่ต้องการคงไว้ 3. วอยด์ (Void) คือ พื้นที่ว่างในบริเวณดีไซน์โดเมน 4. แรง (Load) ที่มากระทำต่อโครงสร้าง และ 5. จุดยึด (Support)

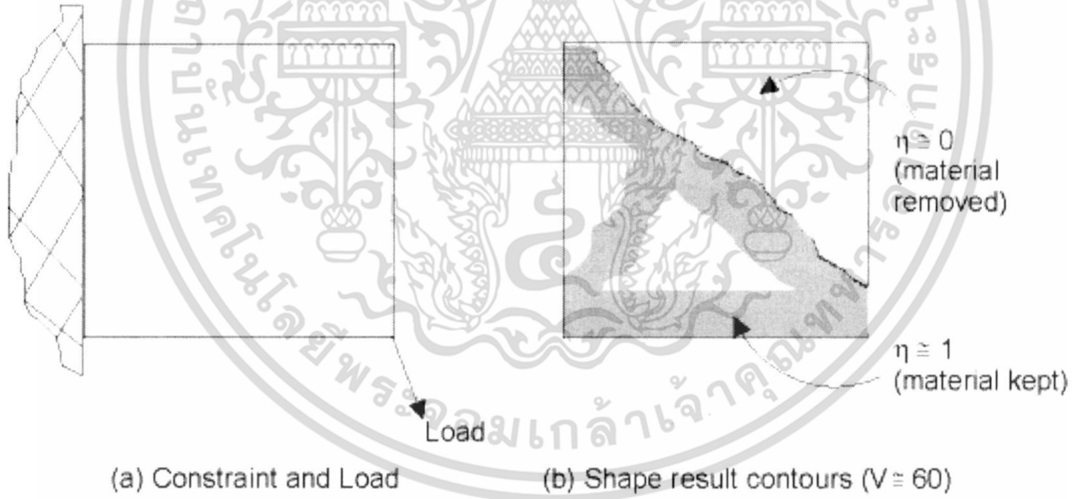
ในวิธีโทโปโลยีเหมาะสมสุดตัวแปรอิสระจะได้จากการหาค่าเหมาะสมสุด (Optimization) ซึ่งบ่งบอกถึงการกระจายตัวของวัสดุบนรูปร่างของโครงสร้าง ใช้เป็นตัวแปรในการหาค่าเหมาะสมสุด เราต้องทำการระบุปัญหาของโครงสร้าง เช่น ค่าคุณสมบัติของวัสดุ, การวิเคราะห์, แรงที่มากระทำ ฯลฯ และระบุฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ซึ่งหมายถึง ฟังก์ชันที่เราต้องการหาค่าต่ำสุด (Minimize) หรือต้องการหาค่ามากสุด (Maximize) หลังจากนั้น กำหนดสภาวะค่าคงที่ของตัวแปรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างโครงสร้างทั่วๆไปที่นิยมนำมาหาค่าเหมาะสมสุด

ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของโทโปโลยีเหมาะสมสุด คือ การหาค่าต่ำสุดหรือค่าที่มากที่สุดของสิ่งที่เราสนใจ เช่น การหาค่าต่ำสุดของพลังงานของโครงสร้าง, การหาค่ามากสุดของค่าความถี่ธรรมชาติ ฯลฯ ขณะเดียวกันเราก็กำหนดขอบเขตเงื่อนไข (Constraint) เช่น การลดปริมาตรของโครงสร้าง ฯลฯ จากวิธีการนี้จะให้ค่าตัวแปร (η_i) ออกมาในรูปของ ซูโดเดนสิตี (Pseudo-Densities) ที่อยู่ภายในของแต่ละเอลิเมนต์



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการหาค่าเหมาะสมสุดร่วมกับการลดของปริมาตรลง 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบมาตรฐานของโทโปโลยีเหมาะสมสุด คือ การตั้งปัญหาออกแบบที่ต้องการให้มีโครงสร้างที่สนใจมี Structure Compliance น้อยสุด และให้ตรงกับขอบเขตเงื่อนไขของปริมาตร (V) ที่ตั้งไว้ การหาค่าน้อยสุดของโครงสร้างหมายถึงการหาค่ามากสุดของค่าความแข็งแกร่งรวมของโครงสร้าง (Global Structural Stiffness) ตัวอย่างเช่น กำหนดให้ V=60 หมายถึง 60% ของวัสดุที่ต้องเอาออก โดยยังมีค่าความแข็งแกร่งมากสุด ในขณะที่มีภาระ (Load) มากระทำ ดังแสดงในรูปที่ 2.16, ภาพ a) แสดงภาระที่มากระทำต่อโครงสร้างและการกำหนดขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Conditions), ภาพ b) แสดงผลของรูปร่างที่เกิดขึ้นในลักษณะของความหนาแน่น (Density Contour)

2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM)

เนื่องจากวิธีโทโปโลยีเหมาะสมสุดนั้น ต้องการหาการกระจายของวัสดุที่อยู่บนโครงสร้างของชิ้นงานโดยอาศัยค่าตัวแปรที่อยู่ในรูปของซูโดเดนสิตี (Pseudo-Densities) ภายในของพื้นที่ย่อยเล็ก ๆ หรือเรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ในโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างมีคุณสมบัติตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เราสนใจ เช่น หาค่าพลังงานต่ำสุดของโครงสร้าง, หาค่ามากสุดของค่าความถี่ธรรมชาติ ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ เราจึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการหาคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง เช่น ความเค้น, ความเครียด, ระยะการขจัด หรือพลังงานความเครียดของโครงสร้าง ด้วยการวิเคราะห์ประมาณค่าเหล่านี้จากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้คือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการนี้ใช้หลักการหาความสัมพันธ์ของเอลิเมนต์ด้วยระเบียบเชิงตัวเลขแทนการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของโครงสร้างที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรง (Exact Solution) จากสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างด้วยโทโปโลยีเหมาะสมสุด เราจำเป็นต้องทราบถึงวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

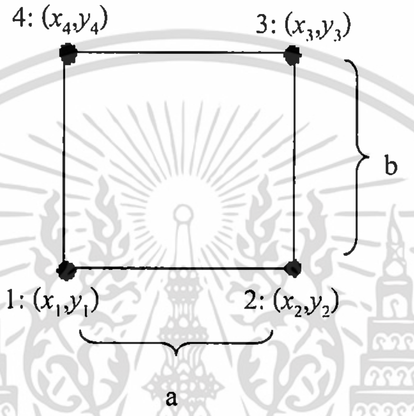
พื้นฐานของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ แล้วใช้หลักการคำนวณสภาวะสมดุลพลวัตของแต่ละเอลิเมนต์ โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ซึ่งกล่าวไว้ว่าผลรวมของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อมวลในทิศทางใด จะมีค่าเท่ากับผลคูณของมวลกับความเร่งในทิศนั้น แล้วนำเอลิเมนต์เหล่านั้นรวมเข้าด้วยกัน ให้เป็นระบบโครงสร้างที่ง่ายขึ้น โดยแสดงในรูปของสมการเมตริกซ์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นต้นจะไม่คำนึงความหน่วงของโครงสร้าง การวิเคราะห์ระบบแบบพลวัตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี ซึ่งทั้ง 2 กรณีพิสูจน์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน คือ 1. วิธีพลังงาน (พลังงาน) เป็นวิธีที่ใช้หลักของงานเสมือน (Principal of Virtual Work) 2. อาศัยสมการลากรองจ์ (Lagrange's Equation) ในการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างที่ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Shape Function)

ในวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เราจะแบ่งขอบเขตออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ซึ่งต่อกันที่จุดต่อต่างๆ ค่าที่จุดต่อนั้นๆไม่รู้ค่าและต้องการหาการกระจายของผลเฉลยระหว่างจุดต่อ (Node) ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประมาณค่าคุณสมบัติต่างๆเช่นการขจัดและความเครียด ที่อยู่ภายในเอลิเมนต์ เพื่อใช้หาผลเฉลยที่จุดต่อ ซึ่งเราสามารถสมมุติให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย เช่น ในลักษณะเชิงเส้นตรงได้

ตัวอย่างการหาฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์รูปร่างสี่เหลี่ยมอย่างง่ายแบบสี่จุดต่อในแนวระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอย่างง่ายแบบสี่จุดต่อ

โดยเริ่มจากสมมุติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนรูปสี่เหลี่ยมให้อยู่ในลักษณะของเชิงเส้นคู่ (Bilinear) ในรูปแบบดังนี้

$$\phi(x,y) = Ax + By + Cxy + D \tag{2.1}$$

โดยค่า A, B, C และ D คือค่าคงตัวซึ่งหาได้จากเงื่อนไขที่ว่า

$$x = x_1, y = y_1: \quad \phi(x_1,y_1) = \phi_1 = Ax_1 + By_1 + Cx_1y_1 + D$$

$$x = x_2, y = y_2: \quad \phi(x_2,y_2) = \phi_2 = Ax_2 + By_2 + Cx_2y_2 + D$$

$$x = x_3, y = y_3: \quad \phi(x_3,y_3) = \phi_3 = Ax_3 + By_3 + Cx_3y_3 + D$$

$$x = x_4, y = y_4: \quad \phi(x_4,y_4) = \phi_4 = Ax_4 + By_4 + Cx_4y_4 + D$$

แก้สมการหาค่า A, B, C และ D จะได้ว่า

$$D = \phi_1 \; A = \frac{\phi_2 - \phi_1}{a} \; , \; B = \frac{\phi_4 - \phi_1}{b} \; , \; C = \frac{\phi_1 - \phi_2 + \phi_3 - \phi_4}{ab} \text{ และ}$$

$$D = \phi_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่ากลับเข้าไปในสมการที่ (2.1) จะได้

$$\phi(x,y)=\left(1-\frac{x}{a}\right)\left(1-\frac{y}{b}\right)\phi_1+\frac{x}{a}\left(1-\frac{y}{b}\right)\phi_2+\frac{x}{a}\frac{y}{b}\phi_3+\frac{y}{b}\left(1-\frac{x}{a}\right)\phi_4$$

$$\phi(x,y)=N_1(x,y)\phi_1+N_2(x,y)\phi_2+N_3(x,y)\phi_3+N_4(x,y)\phi_4 \qquad (2.2)$$

เขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์จะได้ว่า

$$\phi(x,y)=\begin{bmatrix}N_1(x,y) & N_2(x,y) & N_3(x,y) & N_4(x,y)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\phi_1\\ \phi_2\\ \phi_3\\ \phi_4\end{Bmatrix} \qquad (2.3)$$

เมื่อ N_i , $i = 1, 4$ คือ Shape Function

เมื่อได้ Shape Function ของแต่ละเอลิเมนต์ที่เราต้องการ เช่น เอลิเมนต์สองมิติแบบสี่โหนด หรือเอลิเมนต์สามมิติแบบแปดโหนด ซึ่งแต่ละชนิดของเอลิเมนต์ก็จะมี Shape Function ที่ต่างกันออกไป หลังจากนั้นเราก็สามารถทำการสมมุติลักษณะการกระจายตัวของค่าต่าง ๆ ในเอลิเมนต์ในทิศทางที่เราสนใจ ตัวอย่างเช่น ค่าเคลื่อนตัวในสามทิศทางของเอลิเมนต์สามมิติแบบแปดโหนดได้ดังนี้

$$u(x,y,z)=\begin{bmatrix}N(x,y,z)\\(1\times 8)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u\\(8\times 1)\end{Bmatrix}$$

$$v(x,y,z)=\begin{bmatrix}N(x,y,z)\\(1\times 8)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}v\\(8\times 1)\end{Bmatrix} \qquad (2.4)$$

$$w(x,y,z)=\begin{bmatrix}N(x,y,z)\\(1\times 8)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}w\\(8\times 1)\end{Bmatrix}$$

2.5.2 กำหนดความสัมพันธ์ความเครียดกับการขจัด และความเค้นกับความเครียด

สำหรับการหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ในโครงสร้าง จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการขจัด และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในกรณีความเครียดในแนวระนาบ มีสมการความเครียดกับการขจัดเป็นดังนี้

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\partial u/\partial x\\ \partial v/\partial y\\ \partial u/\partial y+\partial v/\partial x\end{Bmatrix} \qquad (2.5)$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$\varepsilon = Bd \qquad (2.6)$$

เมื่อ ε คือ เวกเตอร์ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B คือ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเคลื่อนตัวได้จากฟังก์ชั่นประมาณการ

d คือ เวกเตอร์การขจัดที่จุดต่อ

ในกรณีของความเค้นกับความเครียดในแนวระนาบให้ทฤษฎีของ Hooke's Law จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดคือ

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix} = \mathbf{D}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix} \quad \text{หรือ} \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2.7}$$

แทนค่าสมการที่ (2.6) ลงใน (2.7) จะได้

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathrm{DBd} \tag{2.8}$$

เมื่อ $\boldsymbol{\sigma}$ คือ เวกเตอร์ความเค้น

D คือ เมตริกซ์ความยืดหยุ่น (Elasticity Matrix) สามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติของวัสดุของเอลิเมนต์ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือความเค้นในแนวระนาบกับความเครียดในแนวระนาบ

2.5.3 การหาสทิฟเนสเมตริกซ์และสมการของเอลิเมนต์

สามารถหาสทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ โดยอาศัยหลักการพลังงานศักย์รวมต่ำสุด จากสมการพลังงานศักย์ π_p มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานความเครียด $\boldsymbol{U}$ กับพลังงานศักย์เนื่องจากแรงภายนอกหรืองานเนื่องจากแรงภายนอก $\boldsymbol{W}$ ดังสมการที่(2.9)

$$\pi_p = \boldsymbol{U} + \boldsymbol{W} \tag{2.9}$$

สมการพลังงานความเครียด (strain energy) ของเอลิเมนต์ใด ๆ คือ

$$\boldsymbol{U}_i = \frac{1}{2}\iiint_{\Omega_i} \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\, d\Omega \tag{2.10}$$

เมื่อ Ω_i คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์ที่ i แทนค่าสมการที่ (2.6) และ (2.8) ลงในสมการที่ (2.10) และพิจารณาในเทอมพิกัดรวมจะได้ว่า

$$\boldsymbol{U}_i = \frac{1}{2}\bar{\mathbf{d}}^{\mathrm{T}}\left(\iiint_{\Omega_i}\bar{\mathbf{B}}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\bar{\mathbf{B}}\, d\Omega\right)\bar{\mathbf{d}} \tag{2.11}$$

งานเนื่องจากแรงภายนอก คือ $\boldsymbol{W}_i = -\bar{\mathbf{d}}^{\mathrm{T}}\,\bar{\mathbf{f}}$ (2.12)

เมื่อ $\bar{\mathbf{d}}$ คือ เวกเตอร์การขจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ในพิกัดรวม

$\bar{\mathbf{f}}$ คือ แรงทั้งหมดที่กระทำบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม

ดังนั้นพลังงานศักย์รวมของแต่ละเอลิเมนต์จากสมการ (2.9) คือ

$$\pi_p = \frac{1}{2}\bar{\mathbf{d}}^{\mathrm{T}}\left(\iiint_{\Omega_i}\bar{\mathbf{B}}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\bar{\mathbf{B}}\, d\Omega\right)\bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{d}}^{\mathrm{T}}\,\bar{\mathbf{f}} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่วัสดุอยู่ในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น การกระจัดและความเครียดมีค่าน้อยและชิ้นส่วนอยู่ในสภาวะสมดุล พลังงานศักย์รวมของระบบจะมีค่าต่ำสุด โดยให้ $\nabla \pi_p \big|_{\bar{d}} = \bar{0}$ นั้นคือ

$$\nabla \pi_p \big|_{\bar{d}} = \iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega \bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{f}} = \bar{0} \tag{2.14}$$

จากสมการ (2.14) จัดรูปใหม่ได้ $\iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega \bar{\mathbf{d}} = \bar{\mathbf{f}}$ (2.15)

หรือ $\bar{\mathbf{k}} \bar{\mathbf{d}} = \bar{\mathbf{f}}$ (2.16)

สมการที่ (2.16) คือ สมการสมดุลของแรงในเทอมของสทิฟเนสเมตริกซ์

ซึ่งค่า $\bar{\mathbf{k}} = \iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega$ คือสทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ในพิกัดรวม และในกรณีที่เอลิเมนต์มีความหนา t คงที่ สทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์คือ

$$\bar{\mathbf{k}} = t \iiint_{A_i} \bar{\mathbf{B}}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} dA \tag{2.17}$$

ในกรณีที่จุดต่อถูกกำหนดตำแหน่งโดยพิกัดเฉพาะที่ จำเป็นต้องแปลงพิกัดเฉพาะที่ให้อยู่ในเทอมของพิกัดรวม ซึ่งสามารถแปลงได้โดยใช้สมการที่ (2.18)

$$\mathbf{d} = \bar{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{d}}, \;\; \mathbf{f} = \bar{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{f}} \;\; \text{และ} \;\; \bar{\mathbf{k}} = \bar{\mathbf{T}}^{\mathrm{T}} \mathbf{k} \bar{\mathbf{T}} \tag{2.18}$$

เมื่อ $\bar{\mathbf{T}}$ คือ เมตริกซ์แปลงพิกัดเฉพาะที่ให้อยู่ในเทอมของพิกัดรวม

$\mathbf{k}$ คือ สทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ในพิกัดเฉพาะที่

2.5.4 การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดขอบเงื่อนไข

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จาก การรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าสทิฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และความต่อเนื่องของโครงสร้าง ทำให้สามารถหาสทิฟเนสเมตริกซ์รวมในพิกัดรวมของระบบได้ดังนี้คือ

$$\mathbf{K} = \sum_{1}^{N_E} \bar{\mathbf{k}} \tag{2.19}$$

ดังนั้นสามารถหาสมการสมดุลของแรงในเทอมพิกัดรวมของระบบได้ดังนี้

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{d} \tag{2.20}$$

เมื่อ $\mathbf{F}$ คือ เวกเตอร์ของแรงของระบบที่จุดต่อ

$\mathbf{K}$ คือ สทิฟเนสเมตริกซ์รวมของระบบ

เนื่องจากเมตริกซ์ $\mathbf{K}$ ในสมการ (2.20) เป็นเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix) จึงจำเป็นต้องอาศัยขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) หรือเงื่อนไขอื่นๆ เช่นจุดยึด เพื่อช่วยทำให้เมตริกซ์ $\mathbf{K}$ ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน และสามารถหาการกระจัดที่จุดต่อได้ พิจารณาตามสมการรวมของระบบโครงสร้าง และเงื่อนไขขอบเขตได้ตามสมการที่ (2.21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_a \\ \mathbf{d}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_b \end{Bmatrix} \tag{2.21}$$

กระจายสมการที่ (2.21) ได้ดังนี้

$$\mathbf{K}_{aa}\mathbf{d}_a + \mathbf{K}_{ab}\mathbf{d}_b = \mathbf{F}_a \tag{2.22}$$

$$\mathbf{d}_a = \mathbf{K}_{aa}^{-1}\left(\mathbf{F}_a - \mathbf{K}_{ab}\mathbf{d}_b\right) \tag{2.23}$$

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{K}_{ba}\mathbf{d}_a + \mathbf{K}_{bb}\mathbf{d}_b \tag{2.24}$$

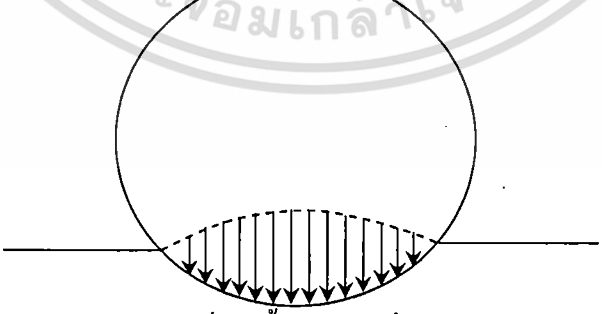
เมื่อ $\mathbf{F}_a$ และ $\mathbf{F}_b$ คือ เวกเตอร์แรงภายนอกที่มากระทำ ณ จุดต่อที่ทราบ และไม่ทราบค่า ตามลำดับ $\mathbf{d}_a$ และ $\mathbf{d}_b$ คือ เวกเตอร์การขจัดที่ทราบค่าและไม่ทราบค่า ตามลำดับ ซึ่งแรงและการขจัดที่ทราบค่านี้ จะเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการ ส่วนสทิฟเนสเมตริกซ์จะเป็นสทิฟเนสเมตริกซ์ตามตำแหน่งของการขจัดและตำแหน่งของแรง เมื่อทราบค่าของเวกเตอร์การขจัดแล้ว เราสามารถหาค่าความเค้นระนาบ γ_{xy} , σ_y และ γ_{xy} ของแต่ละจุดบนโครงสร้างได้โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (2.8)

2.6 กลศาสตร์ของการสัมผัสแบบยืดหยุ่น (Mechanics of Elastic Contacts)

การแบ่งประเภทของการสัมผัสสามารถแบ่งได้หลายแบบโดยใช้เกณฑ์การแบ่งที่แตกต่างกัน ในกรณีนี้แบ่งตามลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น

2.6.1 Incomplete Contact

เมื่อวัตถุ 2 ชิ้นถูกกดเข้าด้วยกันการสัมผัสเริ่มแรกจะเป็นแบบจุด พื้นที่การสัมผัสจะขยายกว้างขึ้นเมื่อเพิ่มแรงกด ลักษณะของความดันสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นสามารถแสดงดังในรูปที่ 2.18

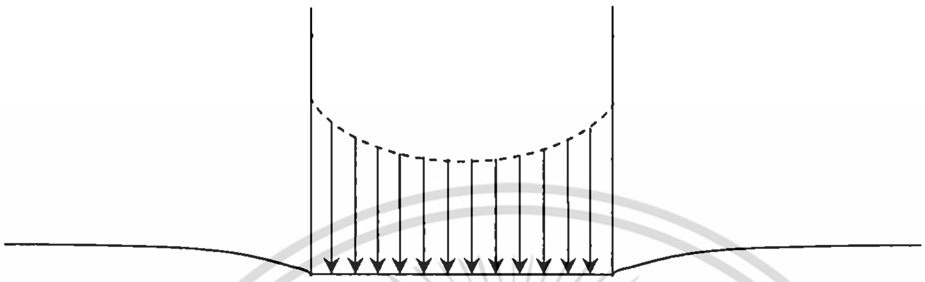


รูปที่ 2.18 ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ Incomplete Contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 Complete Contact

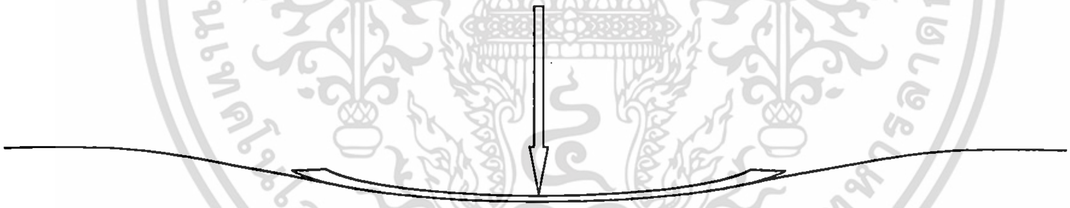
ลักษณะของการสัมผัสที่เกิดขึ้นคือ พื้นที่ในการสัมผัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าแรงที่ใช้ในการกดจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตัวอย่างเช่นการกด Punch บนชิ้นงานโดยสมมติว่า Punch แข็งกว่าชิ้นงานมากจนอาจกล่าวว่า Punch เป็นวัตถุแข็งเกร็ง ลักาณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงที่สุดที่ขอบของพื้นที่สัมผัส



รูปที่ 2.19 ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ Complete Contact

2.6.3 Receding Contact

การสัมผัสแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก ลักษณะที่สำคัญคือพื้นที่ในการสัมผัส (Contact Area) ลดน้อยลงเมื่อแรงที่กระทำเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การกดแผ่นเสียงลงบนพรมเป็นต้น

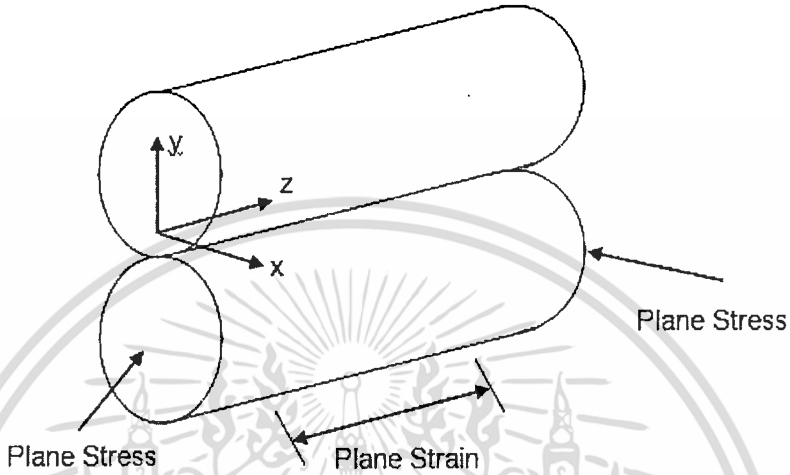


รูปที่ 2.20 ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ Receding Contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

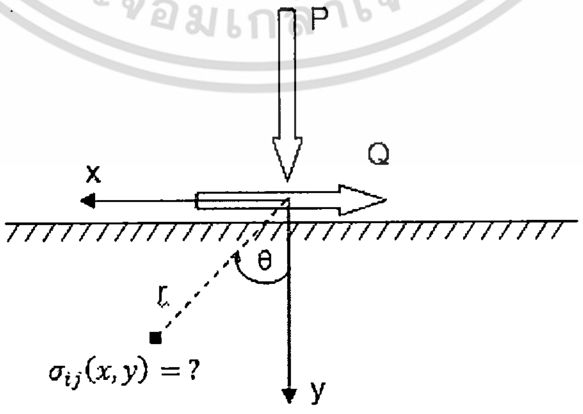
2.7 การสัมผัสแบบ 2 มิติ (Plane Contacts)

ในสภาวะจริงการสัมผัสของชิ้นส่วนกลไกจะเป็นแบบ 3 มิติแต่ในบางกรณีก็สามารถลดการพิจารณาให้อยู่ในรูปของปัญหา 2 มิติได้ เช่น ความเค้นระนาบ (Plane Stress) หรือ ความเครียดระนาบ (Plane Strain) เป็นต้น



รูปที่ 2.21 สภาวะการเกิดความเค้นเนื่องจากการสัมผัสกันของทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากัน

จากรูปที่ 2.21 สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงจากความเค้นระนาบไปเป็นความเครียดระนาบเมื่อความหนาของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.22 แสดงความเค้นในสภาวะความเครียดระนาบเนื่องจากภาระที่ตั้งฉากและภาระที่ตั้งฉากและภาระที่ขนานกับผิวซึ่งมีขนาด P และ Q ต่อหนึ่งหน่วยความยาวตามลำดับ การพิจารณาปัญหาที่เกิดจากแรงตั้งฉากกับผิวอย่างเดียวมีขึ้นในปี ค.ศ. 1892 โดย Alfred-Aime Flamnant



รูปที่ 2.22 ความเค้นในสภาวะความเครียดระนาบเนื่องจาก Line Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากภาระตั้งฉากและขนานกับผิวจะสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.25

$$\sigma_{rr} = \frac{-2}{\pi r}(P\cos\theta - Q\sin\theta)$$
$$\sigma_{\theta\theta} = \tau_{r\theta} = 0 \qquad (2.25)$$

เมื่อ r และ θ เป็นพิกัดในระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate)

องค์ประกอบของการสัมผัสในสภาวะจริงจะมีความขรุขระของผิวทำให้เกิดแรงต้านที่เรียกว่าแรงเสียดทานในทิศทางที่ขนานกับผิวสัมผัส ลักษณะของความขรุขระจะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโดยกรรมวิธีการผลิตแต่ละแบบจะทำให้เกิดความขรุขระไม่เหมือนกัน เช่น ผิวที่เกิดจากการขัดจะมีความขรุขระน้อยกว่าผิวที่เกิดจากการกลึง เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นผลมาจากสาเหตุสองประการด้วยกันคือ

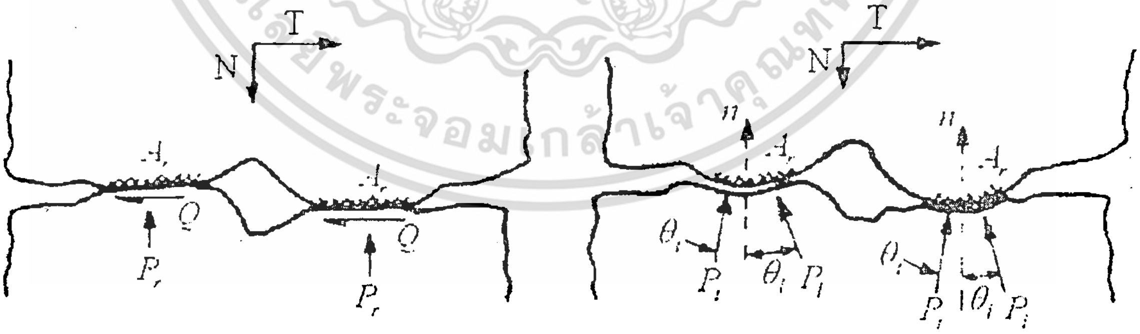
2.7.1 การยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุ

ความต้านทานการไถลระหว่างผิวสัมผัสแบบนี้เรียกว่า Adhesive Friction เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุ จากรูปที่ 2.23(ก) เมื่อ Q คือแรงเฉือนที่เกิดขึ้น และ P_i คือ ความดันระหว่างผิวสัมผัส Adhesive Coefficient of Friction, μ_a คือ

$$\mu_a = \frac{Q}{P_r} \qquad (2.26)$$

2.7.2 ความขรุขระของผิวสัมผัส

จากรูปที่ 2.23(ข) เมื่อลักษณะของผิวสัมผัสไม่ได้ราบเรียบเสมอกันความดันที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสจะทำให้เป็นแรงต้านการไถล



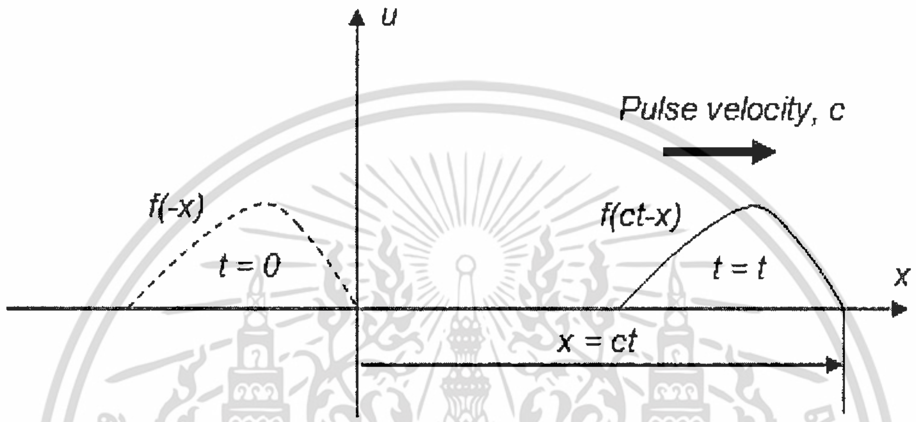
(ก) การยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุ (ข) ความขรุขระของผิววัสดุ

รูปที่ 2.23 องค์ประกอบของแรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การกระแทกและการกระจายของคลื่น (Impact and Wave Propagation)

การปะทะหรือชนกันเป็นการกระทบกันของวัตถุตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไป ในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งความดันและการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนจะค่อยๆแพร่จากจุดที่เกิดการชนไปยังส่วนอื่นๆด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่พิจารณา เช่นเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในหนึ่งมิติ คลื่นจะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งซึ่งสมมติเป็นตำแหน่งที่ $x = 0$ ไปยังตำแหน่ง $x = ct$ เมื่อ c เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่และ t เป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การเคลื่อนที่ของคลื่นในหนึ่งมิติ

สำหรับคลื่นซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นจะเรียกว่า Elastic Wave สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

ก) Body Wave เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในตัวกลาง สามารถแบ่งออกได้อีก สองชนิดตามลักษณะทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือ

- ก. คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave)
- ข. Distortional Wave หรือ Shear Wave

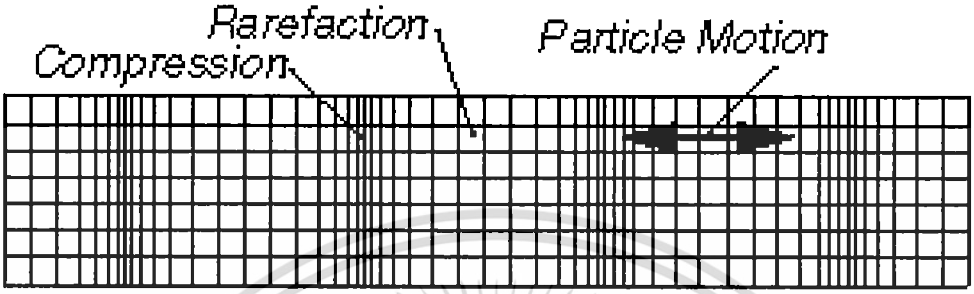
ข) Surface Wave เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามผิวของตัวกลางแบ่งได้เป็น

- ก. Rayleigh Wave
- ข. Love Wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 Body Wave

2.8.1.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) หรือ Dilatational Wave หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Primary Wave การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง



รูปที่ 2.25 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในคลื่นตามยาว

พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในแท่งโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัด A โลหะมีความหนาแน่น ρ และมีโมดูลัสความยืดหยุ่น E ดังรูปที่ 2.26 เมื่อมีค้อนเคาะที่ปลายด้านหนึ่งจะเกิดคลื่นเคลื่อนที่ไปตามความยาวของแท่งโลหะ โดยองค์ประกอบเล็กๆของแท่งโลหะจะเกิดสมดุลพลวัต ซึ่งจากกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's Second Law) จะได้ความสัมพันธ์

$$F = ma$$

$$-\left[\sigma A - \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x}\delta x\right)A\right] = \rho A \delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

จาก Hook's Law

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \tag{2.28}$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดซึ่งนิยามโดย

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.27 จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[E\frac{\partial u}{\partial x}\right]=\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.29}$$

และ

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{2.30}$$

จากสมการของคลื่น

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=c^2\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{2.31}$$

จะได้ความเร็วของคลื่นในวัสดุเป็น

$$c=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2.32}$$

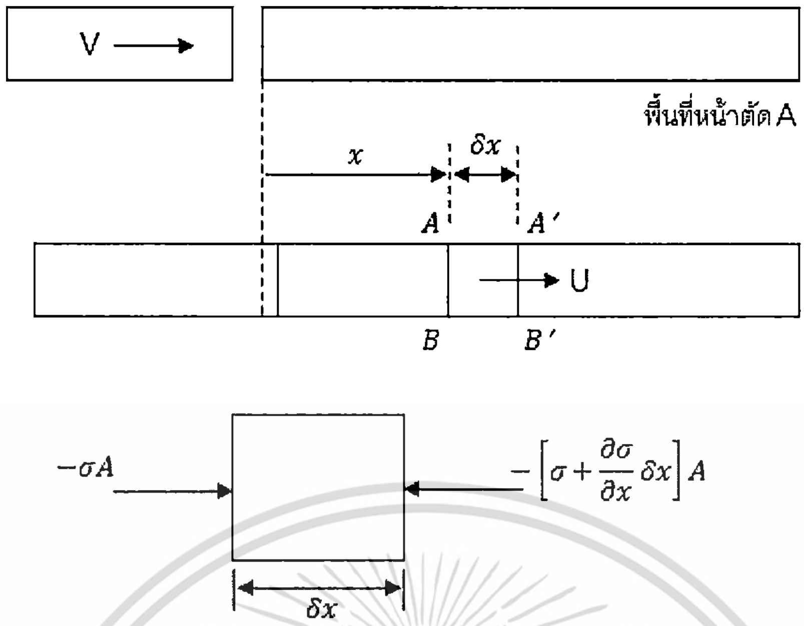
ความเร็วดังกล่าวเป็นความเร็วของคลื่นตามยาวซึ่งเคลื่อนที่ในวัสดุที่มีขนาดจำกัด ในกรณีที่วัสดุมีขนาดไม่จำกัด (ขนาดใหญ่มาก) การคำนวณหาความเร็วในการเคลื่นที่ของคลื่นจะพิจารณาจากสมการของ Navier เมื่อไม่คิดผลของ Body force จะได้ความเร็วในการเคลื่นที่มีค่าเท่ากับ

$$c=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \tag{2.33}$$

โดยที่ λ และ μ คือ Lame' Constants ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Young's Modulus, E และ Poisson Ratio, υ ตามสมการ

$$\lambda=\frac{\upsilon E}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$$
$$\mu=\frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{2.34}$$

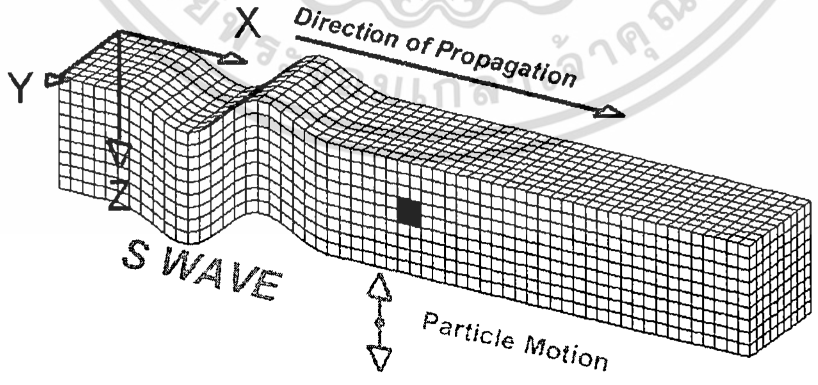
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การเคลื่อนที่ของคลื่นในแท่งโลหะ

ซึ่งความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุขนาดใหญ่ที่มีค่า Poisson Ratio ประมาณ 0.3 จะประมาณว่าความเร็วของคลื่นในการเคลื่อนที่ในวัสดุที่มีขนาดจำกัดดังแสดงในรูปที่ 2.26 ประมาณ 1.16 เท่า

2.8.1.2 Distortional Wave หรือ Shear Wave หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Secondary Wave ลักษณะของคลื่นชนิดนี้ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การเคลื่อนที่ของอนุภาคใน Distortional Wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

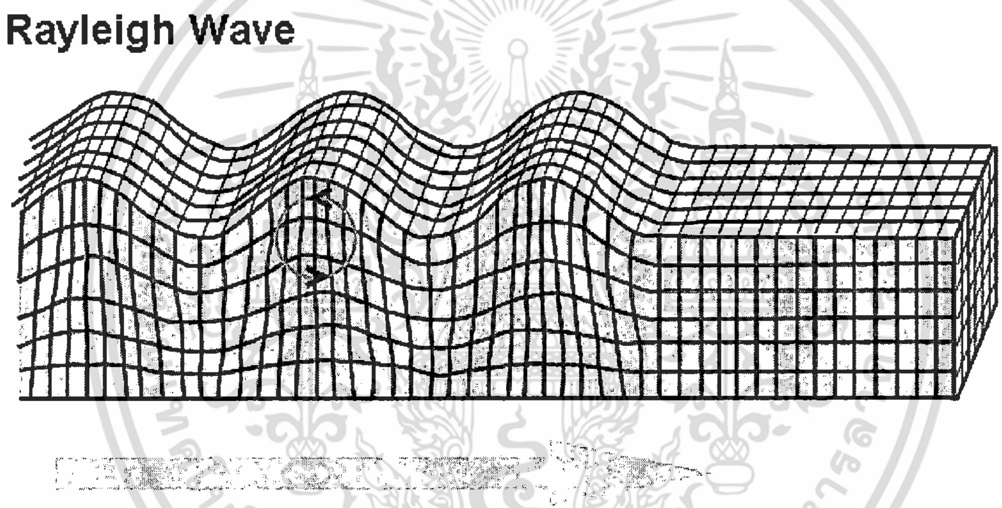
โดยความเร็วของ Distortional Wave, c_s จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2.35}$$

ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีขนาดไม่จำกัดที่มีค่า Poisson Ratio เท่ากับ 0.3 จะได้ว่าความเร็วของ Distortional Wave จะน้อยกว่า Longitudinal Wave ประมาณครึ่งหนึ่ง

2.8.2 Surface Wave

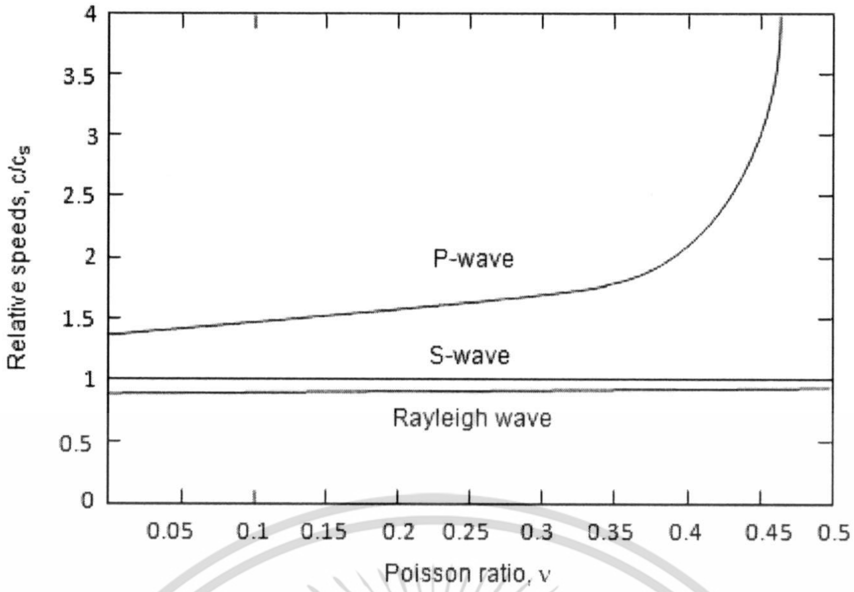
2.8.2.1 Rayleigh Wave เป็นคลื่นที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบหมุนวนเช่นเดียวกับคลื่นในทะเลความเร็วในการเคลื่อนที่จะช้ากว่าเมื่อเทียบกับคลื่นที่เป็นแบบ Body Wave โดยความเร็วจอยู่ที่ประมาณ 0.9 เท่าของความเร็ว Distortional Wave สำหรับวัสดุที่มีค่า Poisson Ratio ประมาณ 0.3



รูปที่ 2.28 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Rayleigh Wave

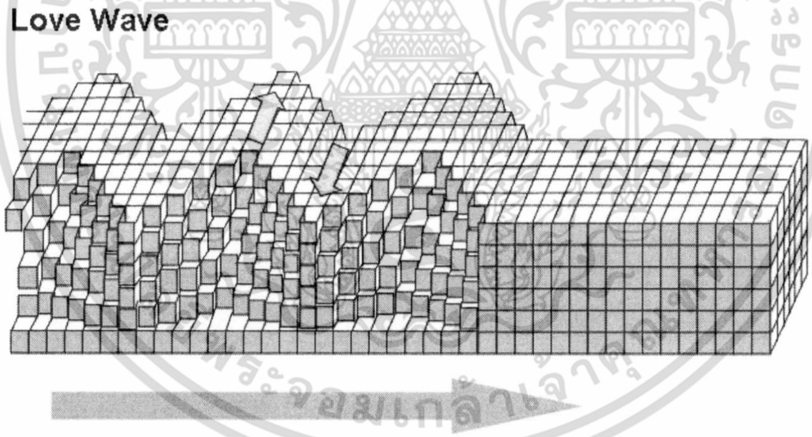
การเปรียบเทียบความเร็วของ Rayleigh Wave ที่ค่า Poisson Ratio ต่าง ๆ กับความเร็วของ Primary Wave และ Secondary Wave สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.29 ที่สภาวะ $\upsilon = 0$ ความเร็วของ Rayleigh Wave มีค่าประมาณ $0.862c_s$ และเมื่อ $\upsilon = 0.5$ จะมีความเร็วประมาณ $0.955c_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 ความเร็วของคลื่นแต่ละชนิดที่ Poisson Ratio ต่างๆ

2.8.2.2 LoveWave เป็นคลื่นที่มีการเคลื่นที่ของอนุภาคอยู่บนระนาบของผิวตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.30 จะพบเห็นได้ในตัวกลางซึ่งมีลักษณะเป็นชั้น ตัวอย่างเช่นการเกิดแผ่นดินไหว



รูปที่ 2.30 การเคลื่อนที่ของ Love Wave

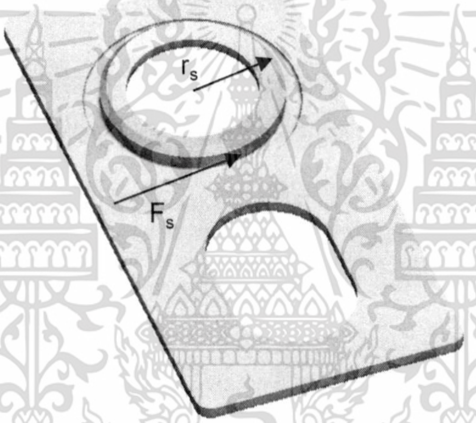
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ความต้านทานโมเมนต์ (Torque Out)

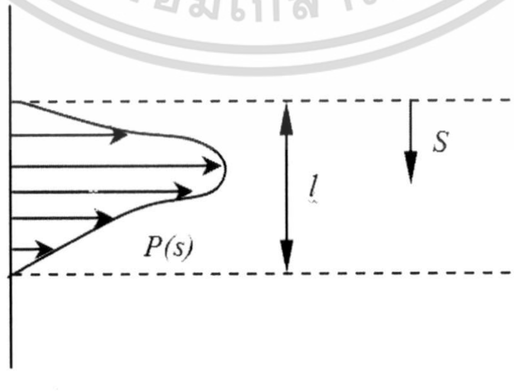
ความต้านทานโมเมนต์ของชุดหัวอ่านคือค่า HGA Torque Out ของชุดหัวอ่านหลังจากผ่านการประกอบด้วยกระบวนการ Ball Swaging เกิดจากตัวแปรหลักสองตัวด้วยกันคือ

2.9.1 ความดันสัมผัส (Contact Pressure, *F(s)*)

ความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของ Base Plate กับ รูของ Arm Pad ซึ่งความดันที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของลูกบอลที่ใช้ยิง ทิศทางในการยิง หรือลักษณะของ Boss Tower Profile เป็นต้น ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามแนวความกว้างของพื้นที่สัมผัส เนื่องจากการสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นการสัมผัสแบบ Incomplete Contact บริเวณขอบของการสัมผัสจะมีความดันเป็นศูนย์



รูปที่ 2.31 ไดอะแกรมของแรงบน Base Plate กับรูของ Arm Pad, F_s คือ แรงที่กระทำในแนวสัมผัส r_s คือ รัศมีของ Boss



รูปที่ 2.32 ลักษณะการเกิดความดันสัมผัสแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 ความเสียดทาน (Coefficient of Friction, μ)

ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของ Base Plate กับ รูของ Arm Pad ซึ่งในสภาวะกระบวนการจริงจะไม่คงที่ตลอดผิวสัมผัสและจะขึ้นอยู่กับผิวที่สัมผัสเป็นสำคัญโดยที่ความต้านทานโมเมนต์บิด ($\tau_{Torque\ Out}$) สามารถเขียนได้ในรูปสมการดังนี้

$$\tau_{TorqueOut} = \mu r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{l} F(s) ds d\theta \qquad (2.36)$$

เมื่อ l คือ ความกว้างของพื้นที่สัมผัส และ 2π คือ มุมที่รองรับการสัมผัสระหว่างผิวของ Base Plate กับรูของ Arm Pad ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ในการวิเคราะห์จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแต่ละองค์ประกอบแยกกันซึ่ง คือระหว่าง Swage Ball กับ Base Plate, รูของ Arm Pad กับ Base Plate และ ระหว่าง Spacer Key กับ Base Plate และ Arm Pad งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาแบบจำลองสามมิติอาศัยแนวคิดของการยึดเกาะของ Boss Tower เข้ากับ Arm Pad หลังจากที่ Swage Ball วิ่งผ่านทำให้เกิดการยึดเกาะของ Boss Tower กับ Swage Hole

2.10 Steepest Descent Method

ในงานวิจัยนี้จะศึกษา Boss Tower Profile ที่เหมาะสมในกระบวนการ One Ball Swaging ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าที่เหมาะสม (Optimum Design) เป็นที่สนใจเป็นเวลาเวลาหลายปีแล้ว และด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาท วิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ถูกพัฒนาและทำได้รวดเร็วขึ้น การออกแบบหาค่าที่เหมาะสมสามารถพิจารณาเป็นผลกระทบที่ต้องการ (Desirable Effects) และ ผลกระทบที่ไม่ต้องการ(Undesirable Effects) การออกแบบที่เหมาะสมมีคำจำกัดความที่ควรทราบคือ

ก) การออกแบบที่ดีที่สุด (Optimum Design) คือความเป็นได้ของการออกแบบที่ดีที่สุดและเป็นไปตามวัตถุประสงค์

ข) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือความสัมพันธ์ที่ต้องมีเพื่อการออกแบบที่ดีที่สุด เช่นน้ำหนัก, ราคา หรือรูปร่างและรูปแบบของข้อกำหนดในการออกแบบ (Constrain)

ค) ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) หรือบางทีเรียกตัวแปรการออกแบบ

การแก้ปัญหาการออกแบบสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.37

$$U = U(x_1, x_2, ...x_n) \qquad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

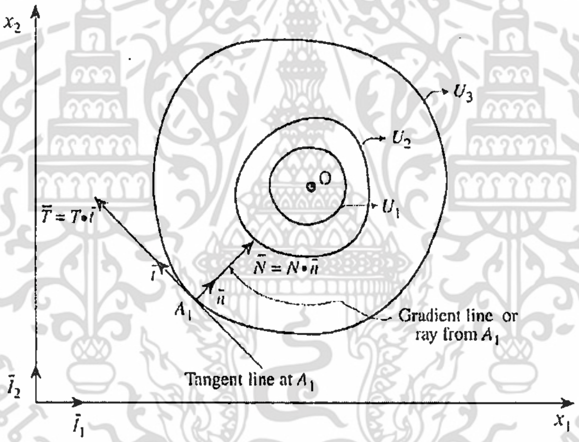
เมื่อ x คือ ตัวแปรของการออกแบบและ n คือจำนวนของตัวแปรของการออกแบบ ในการแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมข้อจำกัดที่สอดคล้องกับการออกแบบถูกเรียกว่า Constraints ผู้ออกแบบทำการแก้ปัญหาโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เติมเต็มด้วย Constraints ที่เท่ากันและไม่เท่ากันสมารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.38

$$\begin{aligned} h_i(x) &= h_i(x_1, x_2, \ldots x_n) = 0 \quad i = 1, 2 \ldots, m \\ g_i(x) &= g_i(x_1, x_2, \ldots x_n) \geq 0 \quad j = 1, 2 \ldots, p \end{aligned} \tag{2.38}$$

เมื่อ $h_i(x)$ และ $g_i(x)$ เป็น Constraints ที่เท่ากันและไม่เท่ากันตัวแปรการออกแบบในที่นี้คือ มิติของ Boss Tower Profile ในการหาค่าที่เหมาะสมวิธี Steepest Descent Method จะถูกนำมาใช้ถ้ามีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ประกอบด้วยตัวแปรการออกแบบสองตัวคือ x_1 และ x_2 สามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังสมการที่ 2.39

$$U = U(x_1, x_2) \tag{2.39}$$

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ U ที่มีคอนทัวร์ (Contour) ของค่าคงที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถหาค่าได้โดยหารปรับเปลี่ยนค่าของ x_1 และ x_2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 เส้นคอนทัวร์ (Contour) ของ U

จุด O ที่แสดงในรูปที่ 2.33 เป็นจุดที่มีค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์, U ตัวอักษร A_1 คือจุดเริ่มต้นใดๆ เรียกว่า Base Point เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ตั้งฉากและเวกเตอร์สัมผัสและเวกเตอร์หนึ่งหน่วย t และ n ที่จุด A_1 สามารถเขียนได้ในรูป

$$\begin{aligned} \bar{T} &= T \cdot \bar{t} \\ \bar{N} &= N \cdot \bar{n} \end{aligned} \tag{2.40}$$

เวกเตอร์ตั้งฉากกับจุด A เรียกว่า Gradient vector สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.46

$$\bar{N} = \nabla U = \left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)\bar{I}_1 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)\bar{I}_2 \tag{2.41}$$

ดังนั้นเวกเตอร์หนึ่งหว่วยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{n} = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)\bar{I}_1 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)\bar{I}_2}{\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)^2}} \tag{2.42}$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ได้เป็นเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของ Gradient เวกเตอร์ของเวกเตอร์ตัวถัดไป ซึ่งวิธี Steepest Search สามารถใช้ได้กับหลายตัวแปรและเพื่อย้ายทิศทางของ Gradient เวกเตอร์, N การเพิ่มขึ้น,∇ นำไปคูณกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย n สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.43

$$\bar{\Delta} = \left(\frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)\Delta\bar{I}_1 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)\Delta\bar{I}_2}{\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)^2}} \right) \tag{2.43}$$

ซึ่งสมการที่ 2.43 สามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{\Delta} = \Delta x_1\bar{I}_1 + \Delta x_2\bar{I}_2 \tag{2.44}$$

เมื่อ

$$\Delta x_1 = \left(\frac{-\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)_{A_1} \Delta}{\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)^2_{A_1} + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)^2_{A_1}}} \right) \tag{2.45}$$

และ

$$\Delta x_2 = \left(\frac{-\left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)_{A_1} \Delta}{\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1}\right)^2_{A_1} + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2}\right)^2_{A_1}}} \right) \tag{2.46}$$

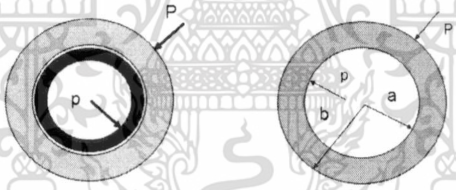
ค่า Δ ที่เหมือนกันและทิศทางของ Gradient ถูกนำมาใช้จนกระทั่งได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์, U ตามต้องการเมื่อทิศทางของ Gradient เปลี่ยนไปและ Δ ถูกลดลงไปที่ Δ/2 การทำอย่างนี้ซ้ำ ๆ กันจนกระทั่งถูกลดลงจนลู่เข้า ค่าของ x_1 และ x_2 ถึงค่าสูงสุด หรือต่ำสุดและเป็นคำตอบของ $\partial U/\partial x_1$ และ $\partial U/\partial x_2$ งานวิจัยจะใช้ซอฟแวร์ Minitab เพื่อช่วยคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของ Boss Tower Profile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของการบวนการ Swaging โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงการเสียรูปของ Base Plate ที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการ Swaging จึงจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของการ Swaging และในส่วนของเทคนิคในการศึกษาการตอกขึ้นรูปเพื่อประกอบ HGA เข้ากับ Arm Actuator เพื่อสร้าง HSA สามารถพิจารณาเป็นภาชนะผนังหนาสมมาตรแกนที่มีความดันกระทำและไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของชิ้นงานสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 3.1

(ก) รูปร่างจริงของการประกอบ



(ข) พิจารณาเป็นภาชนะผนังหนา

รูปที่ 3.1 พิจารณาเป็นภาชนะผนังหนาสมมาตรแกน

สมการที่ใช้อธิบายการประกอบ HSA สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \qquad (3.1)$$

และ

$$\frac{d^4\phi}{dr^4} + \frac{2}{r}\frac{d^3\phi}{dr^3} - \frac{1}{r^2}\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{1}{r^3}\frac{d\phi}{dr} = 0 \qquad (3.2)$$

เมื่อ σ_r และ σ_θ คือความเค้นใน Radial และ Circumferential Stresses ตามลำดับและ ϕ คือ Airy's Stress Function ที่สามารถเขียนได้ในรูป

$$\phi = \frac{\lambda}{2} r^2 + \beta \log r \qquad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่พิจารณา Body Force และเป็นปัญหาสามมาตรแกนด้วย Lame Formula คำตอบความเค้นของสมการที่ได้ คือ

$$\sigma_\theta = \frac{pa^2 - Pb^2}{b^2 - a^2} + \frac{(p-P)a^2b^2}{b^2 - a^2}\frac{1}{r^2} \qquad (3.4)$$

$$\sigma_r = \frac{pa^2 - Pb^2}{b^2 - a^2} - \frac{(p-P)a^2b^2}{b^2 - a^2}\frac{1}{r^2}$$

สามารถหาค่าการขจัดได้ดังสมการที่ 3.5

$$u_r = \frac{1}{E}\left[\frac{(1-\upsilon)(pa^2 - Pb^2)}{b^2 - a^2}r + \frac{(1+\upsilon)a^2b^2(p-P)}{b^2 - a^2}r\right] \qquad (3.5)$$

จาก Tresca's rule วัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุด, τ_{max}, มีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนของวัสดุ, τ_y, ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} = \tau_y \qquad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีพบว่าในช่วง $a \le r \le r_p$ วัสดุจะเข้าสู่พฤติกรรมพลาสติก (Plastic Region) และเมื่อ $r_p \le r \le b$ จะอยู่ในช่วงอิลาสติก (Elastic Region) ซึ่งอธิบายได้ตามสมการที่ 3.7

$$\sigma_r = -2\tau_y \log\frac{r_p}{r} - p_{r_p} \quad ; a \le r \le r_p \qquad (3.7)$$

จากสมการอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการ Swaging Process พบว่าขนาดของ Swage Ball จะมีผลต่อความดันสัมผัสส่งผ่านไปยัง Boss Tower และเสียรูปไปยึดติดกับรูของ Arm Pad สมการแสดงพฤติกรรมสามารถให้ความเข้าใจพฤติกรรมการ Swaging ได้ระดับหนึ่งแต่ในพฤติกรรมจริงโครงสร้างมีความซับซ้อนมากจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาตัวแปรหลาย ๆตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ Swaging Process งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการ Swaging ที่ต้องการใช้บอลเพียงหนึ่งบอลและยังคงค่าคุณภาพของ HSA เหมือนกับใช้สองหรือสามบอลตัวแปรที่ทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณภาพของกระบวนการ Swaging จะมีอยู่สิบเก้าตัวแปรดังตารางที่ 3.1 ในการวิเคราะห์จะพิจารณาแต่ละตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA ที่ได้ ซึ่งขั้นตอนในการศึกษาตัวแปรแต่ละตัวเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของ HSA ในกระบวนการ Swaging

•Base Plate Variations		**unit**
x	–Boss ID	mil
x	–Boss OD	mil
x	–Base Plate Thickness	mil
x	–Backbore Dia.	mil
x	–Boss Height	mil
x	–Relief Ring Depth	mil
x	–Relief Ring Width	mil
x	–Top Transition Angle	Deg
x	–Top Transition Chamfer	Deg
x	–Top Transition Chamfer Width	mil
x	–Bottom Transition Angle	Deg
x	–Back Angle	Deg
x	–Back Angle Width	mil
x	–Ball Contact Angle	Deg
x	–Backbore chamfer width at 45	mil
•Arm Variations		**unit**
x	–Arm Hole Dia.	mil
x	–Arm Pad Thickness	mil
•Ball Variations		**unit**
x	– Swage Ball Dia.	mil
x	– Swage Ball COF	N/A
•Environment Variations		**unit**
	–Pin Speed	mm/s
	–Clamp Force	mN

การศึกษาผลของแต่ละตัวแปรจะทำการวิเคราะห์ปรับเปลี่ยนขนาดของแต่ละตัวแปร โดยเน้นพิจารณาที่โครงรูปของ Boss Tower และขนาดของรู Arm Pad เป็นหลักเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นและนำผลที่ได้ไปศึกษาต่อโดยการออกแบบการทดลอง (DOE, Design Of Experiment) จากนั้น หาสภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ HSA ด้วยการใช้บอลเพียงหนึ่งบอล งานวิจัยจะใช้เครื่องมือและซอฟแวร์ที่บริษัทมีเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่อีกรุ่น ในการศึกษาจะนำผลที่ได้จากการทดลองมาช่วยเพื่อตัดบางตัวแปรออกเป็นการลดตัวแปรเริ่มต้นในการวิเคราะห์กระบวนการ Swaging โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีขั้นตอนในการดำเนินการซึ่งสามารถแบ่งเป็นสามขั้นตอนหลักด้วยกัน คือ

1. การสร้างแบบจำลอง
2. การประมวลผล
3. ผลการวิเคราะห์

ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองจะประกอบด้วยการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนต่างๆให้เหมือนกับกายภาพจริงตลอดจนกำหนดสภาวะเงื่อนไขที่ขอบให้สอดคล้องกับทางปฏิบัติสามารถอธิบายได้ดังนี้

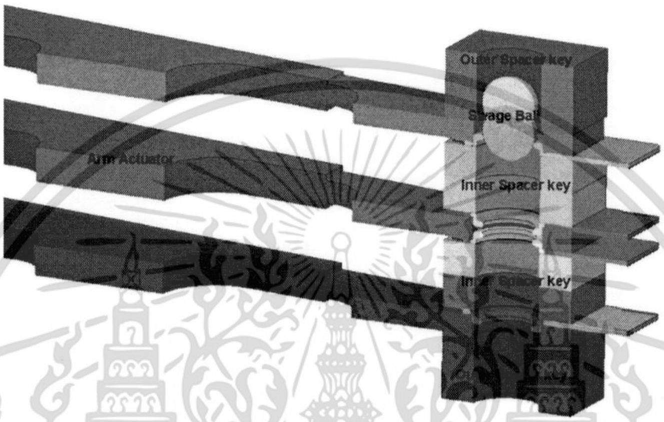
3.1.1 การสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วน ในขั้นแรกของการวิเคราะห์เป็นการสร้างแบบจำลองงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองสามมิติ ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของ Base Plate ไม่สามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลองสองมิติและเพื่อให้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดแบบจำลองแบบสามมิติจึงเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์ ลักษณะของ Base Plate สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ลักษณะรูปร่างของ Base Plate ที่นำมาศึกษา

ในแบบจำลองของ Base Plate ประกอบไปด้วย Hinge ซึ่งเป็นส่วนที่เชื่อมต่อไปยัง Load Beam และจับยึดหัวอ่านเขียน โดยตัวของ Hinge จะยึดติดกับ Base Plate ตามลักษณะจริง คือ ตามรอยเชื่อมแต่เพื่อความง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในแบบจำลองจะไม่พิจารณาส่วนของ Load Beam และตัวอ่านเขียน ซึ่งในความเป็นจริง ถ้าตัดออกไปจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของ Base Plate ตัว Base Plate ประกอบไปด้วย Boss Tower ที่มีไว้สำหรับให้บอลวิ่งผ่านและยึดติดกับรูของ Arm Pad ในส่วนของ Actuator Arm จะพิจารณาทั้ง Root Arm เนื่องจากการค่าที่ได้จากการวัดเป็นค่าการเสียรูปจากทั้งตัวของ Base Plate เองแล้วยังรวมการเสียรูปของตัว Actuator Arm ด้วย สำหรับแบบจำลองของ Actuator Arm สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีลักษณะเหมือนจริงรวมถึงร่องสำหรับใส่ชุดสายสัญญาณอ่อน Actuator Arm ทำหน้าที่ในการรองรับชุดหัวอ่านเขียนโดยการประกอบยึดแน่นกับ Base Plate หลังจากผ่านกระบวนการ Swaging มิติของ Actuator Arm จะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ โครงร่างของ Arm Pad ในแต่ละรุ่นของ HSA จะไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ลักษณะรูปร่างของ Actuator Arm ที่นำมาศึกษา



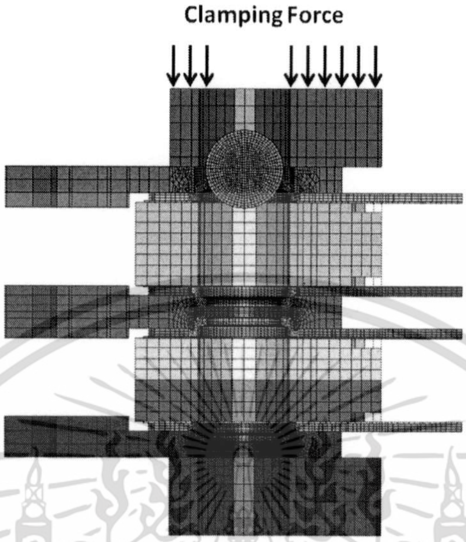
รูปที่ 3.4 แบบจำลองในการวิเคราะห์ในภาพตัดขวาง

รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ในภาพตัดขวางเพื่อให้เห็นรายละเอียดด้านในแบบจำลองในการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วย Spacer Key ด้านนอกสองคีย์และ Spacer Key ด้านในสองคีย์แต่ละคีย์ที่อยู่ด้านในจะแยกเป็นสองคีย์เพื่อความง่ายต่อการกำหนด Load Curve ขณะจำลองการเคลื่อนที่ของคีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

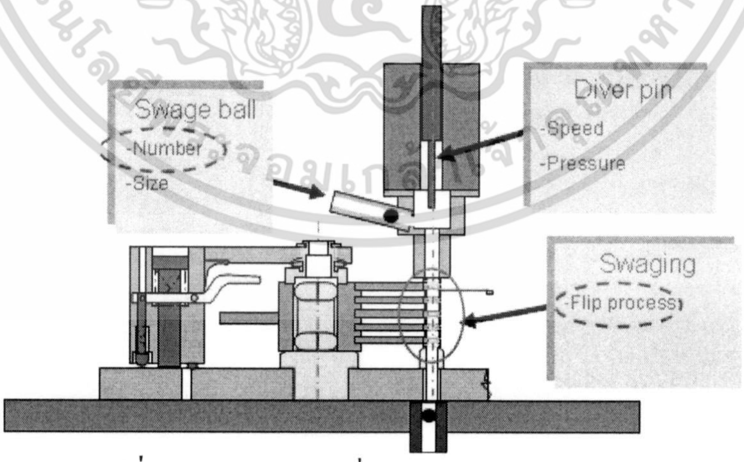
การสร้างแบบจำลองที่เหมือนจริงเป็นการทำให้ผลที่ได้ออกมาเหมือนจริงแต่ต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบที่เหมือนจริงให้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพจริงดังแสดงในรูปที่ 3.5 สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางแบบจำลองและการกำหนดภาระเงื่อนไขที่ขอบในการวิเคราะห์

3.2.1 แรงกด (Clamping Force)

แรงกดจะกระทำอยู่บนคีย์บนที่เป็นคีย์นอกเสมือนกับ Nose จากเครื่อง Swaging กระทำบนคีย์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะพบว่า Nose กดอยู่บนคีย์นอก



รูปที่ 3.6 ภาพจำลองเครื่อง Swaging Machine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ลูกบอล (Swage Ball)

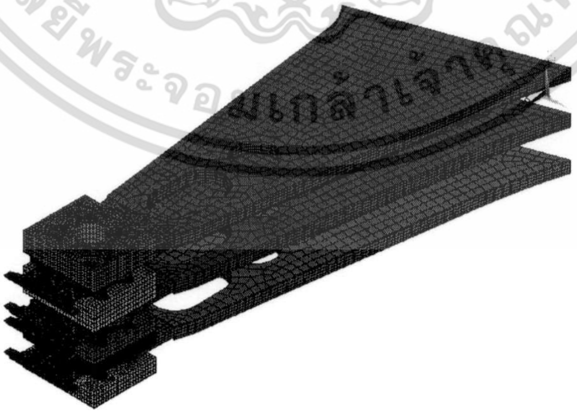
กำหนดความเร็วของลูกบอลให้เคลื่นที่ลงในทิศทางตามแกน z เท่านั้น แต่สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทาง x และ y และลูกบอลจะถูกกำหนดเป็นวัตถุเกร็งที่ไม่สามารถเสียรูปได้ เนื่องจากในความเป็นจริงลูกบอลมีค่าความแข็งกว่า Base Plate ถึงสิบเท่า ในกระบวนการจริงจะมี Pin ดันลูกบอล เรียกว่า Driving Pin และมีความดันสุญญากาศพยายามดึงลูกบอลลงและเพื่อความสะอาดในกระบวนการ

3.2.3 Actuator Arm

ในแบบจำลองจะยึดที่ปลายของ Root Arm แบบทุกองศาอิสระและตัว Arm Pad จะถูกประกอบเข้ากับ Base Plate โดยมี Spacer Key ประกอบอยู่ด้วย

3.3 การแบ่งเอลิเมนต์

แบบจำลองทุกชิ้นส่วนที่ทำการวิเคราะห์จะแบ่งเอลิเมนต์เป็นเอลิเมนต์รูปลูกบาศก์ไม่มีโหนดตรงกลาง เนื่องจากในการวิเคราะห์แบบ Explicit ตัวโปรแกรมไม่ยอมให้มีโหนดที่กลางด้านเมื่อใช้เอลิเมนต์ที่เป็นทรงลูกบาศก์ ภาพการบางเอลิเมนต์แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าเอลิเมนต์ในแบบจำลองบริเวณที่เป็น Base Plate จะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะบริเวณ Boss Tower เพื่อให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ เช่นการเปลี่ยนรูปของ Base Plate มีความถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากถ้าเอลิเมนต์น้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถเห็นลักษณะของการเสียรูปที่ถูกต้องและลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างผิวได้และถ้าขนาดของเอลิเมนต์เล็กมากเกินไปการคำนวณจะใช้เวลานานมากขึ้น



รูปที่ 3.7 การแบ่งเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์สมการที่เกี่ยวข้องกับ HGA Torque Out

การยึดเกาะของ Boss Tower กับ Arm Actuator สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

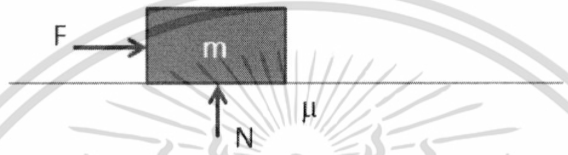
$$T = Fr \tag{3.8}$$

$$F = \mu N \tag{3.9}$$

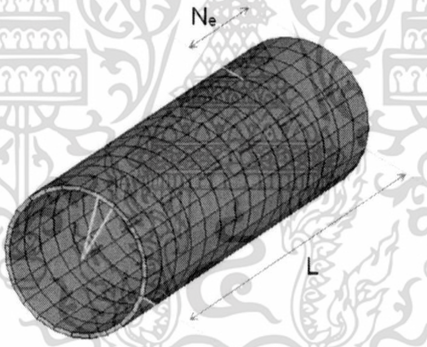
$$N = \sigma \times A = P_{force} \tag{3.10}$$

σ คือ Von Mises Stress

A คือ พื้นที่ที่สัมผัสกันระหว่างผิวของ Boss Tower กับ Arm Pad



รูปที่ 3.8 ระบบสมมูล (Equivalent System) ของ ผิวของ Boss Tower ที่ยึดเกาะกับ Swage Hole



รูปที่ 3.9 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่า HGA Torque Out

รูปที่ 3.9 แสดงแนวคิดในการหาค่า HGA Torque Out โดยให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีการสร้างตาข่ายโดยการควบคุมจำนวนเอลิเมนต์ที่ถูกล็อค เมื่อแทนสมการที่ 3.9 และ 3.10 ลงในสมการที่ 3.8 จะได้

$$T = r\mu \int_{0}^{2\pi} P_{force} \frac{rL}{N_e} d\theta \tag{3.11}$$

ทำให้สมการที่ 3.11 อยู่ในรูปอย่างง่าย จะได้

$$T = \mu P_{force} A \frac{D}{2N_e} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T คือ แรงที่กดแบริ่งให้ออกมา (Bearing Push Out Force)

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง ผิวของ Boss Tower ที่ยึดเกาะกับ Swage Hole

P_{force}คือ ความดันที่ผิวสัมผัส (Contact Pressure) ระหว่าง ผิวของ Boss Tower ที่ยึดเกาะกับ Swage Hole

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของ Boss Tower

N_e คือ จำนวนของเอลิเมนต์ของ Boss Tower ที่ถูกล็อค

ในทางปฏิบัติค่า P_{force} สามารถคำนวณได้จากซอฟท์แวร์ ANSYS LS-DYNA ตามค่า N_e ที่กำหนด

3.5 การประมวลผล

ขั้นตอนนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ต้องทำเพื่อให้ได้ผลการคำนวณหลังจากที่ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไปเป็นการประมวลผลซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการประมวลผลโดยวิธี Explicit รายละเอียดดังนี้

การคำนวณโดยวิธี Explicit Dynamics เป็นวิธีการคิดสมดุลพลวัตที่เวลาต่างๆซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$[M]\left[\ddot{u}^{(i)}\right]=\left[F^{(i)}\right]-\left[I^{(i)}\right] \tag{3.13}$$

เมื่อ $[M]$ คือเมตริกซ์ของมวล, F คือเวกเตอร์ของภาระที่มากระทำ และ I คือเวกเตอร์ของแรงภายใน วิธีการคำนวณเพื่อหาความเร่งของมวลในแต่ละเอลิเมนต์ที่เวลาต่างๆ จะใช้วิธีการ Central Difference สามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\ddot{u}^{(i)}=\frac{1}{\Delta t^2}\left(u^{(i+1)}-2u^{(i)}+u^{(i-1)}\right) \tag{3.14}$$

$$\Delta t_{stable}=\min\left(\frac{L_c}{c}\right) \tag{3.15}$$

เมื่อ L_c คือ มิติจำเพาะของเอลิเมนต์และ c คือความเร็วของ Longitudinal Wave ในเอลิเมนต์ เวลาที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.15 จะเป็นเวลาที่คลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้เพียงหนึ่งเอลิเมนต์ ในทางปฏิบัติการแบ่งช่วงเวลาย่อยในการคำนวณของสมการที่ 3.15 จะน้อยกว่าช่วงเวลาย่อยที่ทำให้การคำนวณมีความเสถียรเล็กน้อยโดยพิจารณาจาก Courant Number, C_n ซึ่งนิยามได้คือ

$$C_n=\left(\frac{\Delta t_{Actual}}{\Delta t_{stable}}\right) \tag{3.16}$$

ในกระบวนการคำนวณจะใช้ค่า Courant Number ในช่วงระหว่าง 0.95-0.98 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขนาดของช่วงเวลาย่อยสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนด Mass Scaling Factor ที่กำหนดจะมีความเหมาะสมหรือไม่ ขึ้นอยู่กับพลังงานภายใน (Internal Energy, IE) เปรียบเทียบกับพลังงานจลน์ (Kinetic Energy, KE) ของชิ้นส่วนที่มีการเปลี่ยนรูปในแบบจำลอง โดยสัดส่วนของพลังงานจลน์จะต้องไม่เกิน 5-10% ของพลังงานภายในตลอดช่วงการวิเคราะห์

3.6 การพิสูจน์ผลการจำลอง (Validation)

ในขั้นตอนของการยืนยันผลการจำลองในขั้นต้น จะเป็นการเทียบเคียงการเสียรูปของบอสทาวเวอร์โดยการนำชิ้นงานจริงไปตัดขวาง (Cross Section) เพื่อเทียบกับผลที่ได้กับแบบจำลอง ในขณะเดียวกันนำชิ้นงานจริงไปวัดค่าวิกฤตด้วยเครื่อง MAPOSS และนำแผ่นฐานมาวัดลักษณะการเสียรูปด้วยเครื่อง Veeco Scan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์

การคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้คำนวณตัวแปรและปัจจัยต่างๆในกระบวนการ Swaging วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นำมาวิเคราะห์สามารถอธิบายทั้งในแง่ของคุณภาพของ HSA และการเปลี่ยนรูปของ Base Plate ที่เกิดขึ้นโดยสามารถอธิบายถึงกลไกและสาเหตุของผลที่เกิดขึ้นซึ่งจะแบ่งการพิจารณาตามลำดับ ในส่วนแรกจะเป็นการศึกษา Spacer Key Land ที่ไม่ทำให้ Base Plate เกิดการเปลี่ยนรูปหรือเปลี่ยนรูปในช่วงที่ยอมรับได้ หลังจากนั้นจะศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ Swaging ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยจะพิจารณาศึกษาแยกเป็นกรณีไป

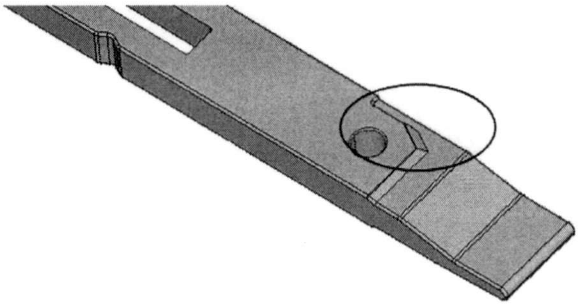
4.1 ผลการศึกษาของ Spacer Key Land

กระบวนการ Swaging ที่ใช้อยู่ปัจจุบันนั้นได้ใช้สอง หรือสามบอลและมีการกลับทิศทางการยิงลูกบอลในงานวิจัยนี้ต้องการกระบวนการ Swaging โดยใช้ลูกบอลเพียงหนึ่งบอล ดังนั้นจะไม่มีการกลับทิศทางของลูกบอลและจะยิงบอลเพียงครั้งเดียว (Normal Direction) ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ลักษณะของ One Ball Swaging (ภาพตัดขวาง)

ด้วย Spacer Key ที่ใช้ในปัจจุบันจะมีการหลบชุดของสายไฟอ่อนบริเวณคีย์ทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของ Base Plate รูปของ Spacer Key สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จึงได้วิเคราะห์ Spacer Key Land หลายรูปแบบและได้ Spacer Key Land ที่สามารถลดการเปลี่ยนรูปของ Base Plate สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งได้นำมาใช้ในกระบวนการ Swaging โดยใช้หนึ่งบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะของ Spacer Key ที่ใช้ในปัจจุบัน

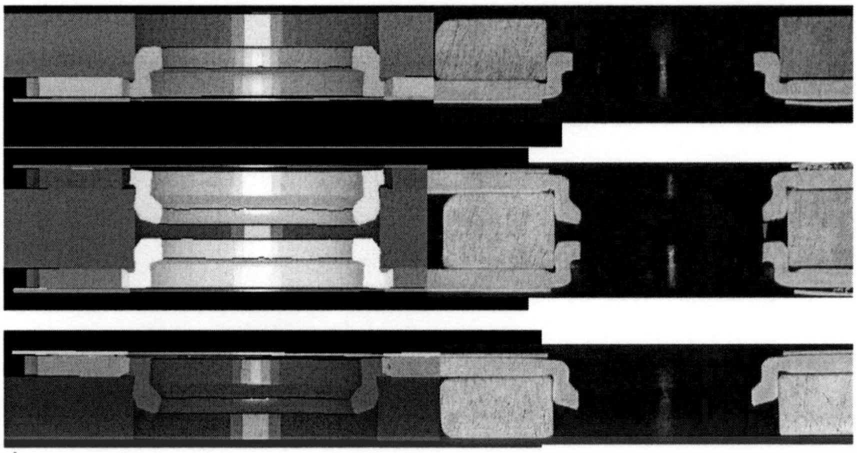
รูปที่ 4.3 ลักษณะของ Spacer Key Land ที่ได้ศึกษาและนำมาใช้กับ One Ball Swaging

การที่ Spacer Key land มีเนื้อที่หายไปเนื่องจากหลบชุดสายไฟอ่อนทำให้พื้นที่รองรับใต้ Base Plate ไม่เท่ากันขณะที่ Nose ของเครื่อง Swage กดลงบน Outer Key ทำให้ Base Plate ได้รับความเค้นนำและเมื่อบอลวิ่งผ่านจะเกิดการดันที่บริเวณของรู Arm Pad ทำให้หลังจากแยกคีย์ออกทั้งหมดตัวของ Base Plate เกิดการเสียรูปทำให้ค่า Tip_R ของ HSA เบี่ยงเบนไป

4.2 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์และการวัดจริง

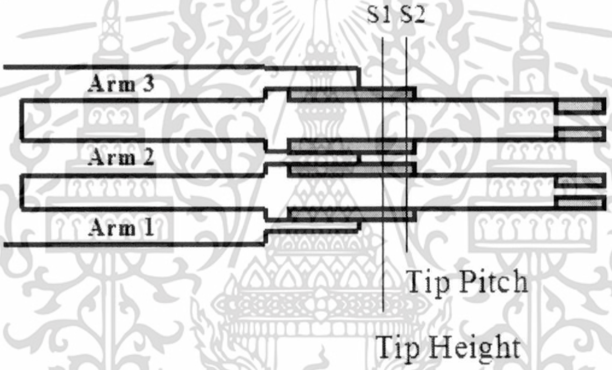
หลังจากได้ศึกษาวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการวิเคราะห์จากการจำลองได้นำมาเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองจริง

สำหรับค่าลักษณะเฉพาะของ HSA ที่ทำการวิเคราะห์ได้พิจารณาตามเครื่องมือวัดที่ทำการวัดสามารถแสดงตำแหน่งการวัดได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวัดในการทดลองจริง

ตำแหน่ง S1 และ S2 คือตำแหน่งที่เครื่องมือวัดวัดค่า Tip_Ht และ Tip_P ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการคำนวณและจากการวัดจริงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าที่วัดได้เทียบกับค่าจากการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

Parameters		Tip Height (inch)		Tip Pitch (degree)	
		FEA result	Actual data	FEA result	Actual data
Head 0	Outer arm	0.00153	0.00123	-0.737	-0.535
Head 1	Inner arm	-0.00146	-0.00192	-0.469	-0.320
Head 2	Inner arm	-0.00050	-0.00060	-0.233	-0.216
Head 3	Outer arm	0.00064	0.00070	0.581	0.347

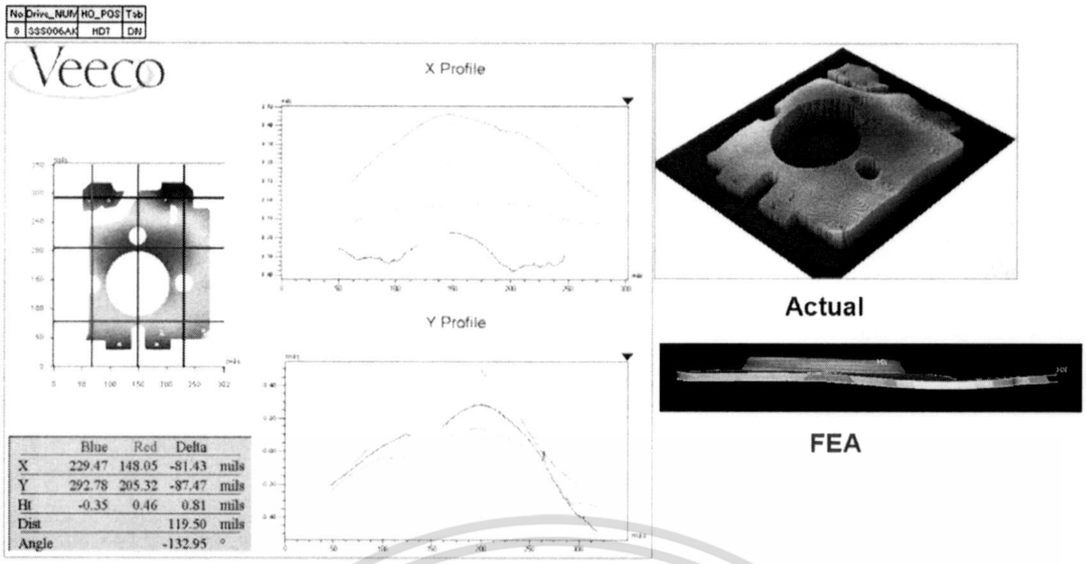
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบจริง พบว่า Tip Height และ Tip Pitch มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 18.39 % และ 39.9 % ตามลำดับ แต่มีแนวโน้มในการเสียรูปที่ถูกต้อง

หลังจากที่ได้วัดค่าลักษณะเฉพาะของ HSA แล้วได้นำชิ้นงานมาแสกนผิวเพื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์จำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ผลที่ได้แบ่งออกเป็น Tab Up และ Tab Dn ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับการทดลองทั้งนี้เนื่องจากได้รวมเอาค่าการเปลี่ยนรูปของ Root Arm มาด้วย พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของ Base Plate สำหรับ Tab Dn สามารถอธิบายได้ว่าขณะที่บอลเริ่มสัมผัสกับ Top Transition Chamfer ของ Boss Tower ลูกบอลจะกดที่ Top Transition Chamfer และผลักตัว Boss Tower ให้ไปติดกับรูของ Arm Pad เส้นแนวแรงจะเกือบขนานกับ Bottom Transition Angle และเมื่อลูกบอลเคลื่อนที่มาถึงบริเวณปลายของ Ball Contact Area ของ Boss Tower ลูกบอกจะดันเนื้อของ Base Plate ให้ออกไปตามแนวรัศมีส่งผลให้ Base Plate เกิดการเปลี่ยนรูป

รูปที่ 4.6 ผลการแสกนผิวของของ Base Plate Tab Up

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



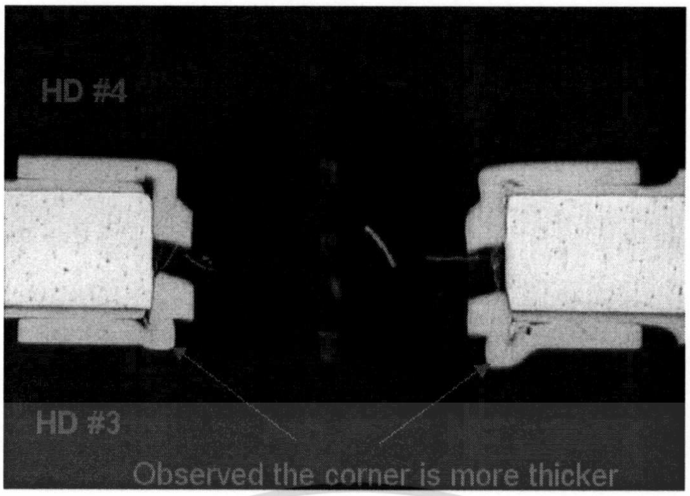
รูปที่ 4.7 ผลการแสกนผิวของของ Base Plate Tab Dn

สำหรับ Tab UP สามารถอธิบายได้ว่าขณะที่บอลเริ่มสัมผัสกับปลายของ Bottom Transition Angle ของ Boss Tower ลูกบอลจะผลักตัว Boss Tower ให้ไปติดกับรูของ Arm Pad และดึงเนื้อของ Base Plate รอบๆ Relief Ring ให้เข้ามาตามแนวรัศมีส่งผลให้ Base Plate เกิดการเปลี่ยนรูป ลักษณะพฤติกรรมการดึงเนื้อของ Boss Tower แบบนี้ได้ถูกเรียกว่า Tension และพฤติกรรมการดันเนื้อของ Boss Tower ได้ถูกเรียกว่า Compression

4.3 ผลการศึกษาลดของเสียเนื่องจาก Spacer Key Hole (Swage Push Out)

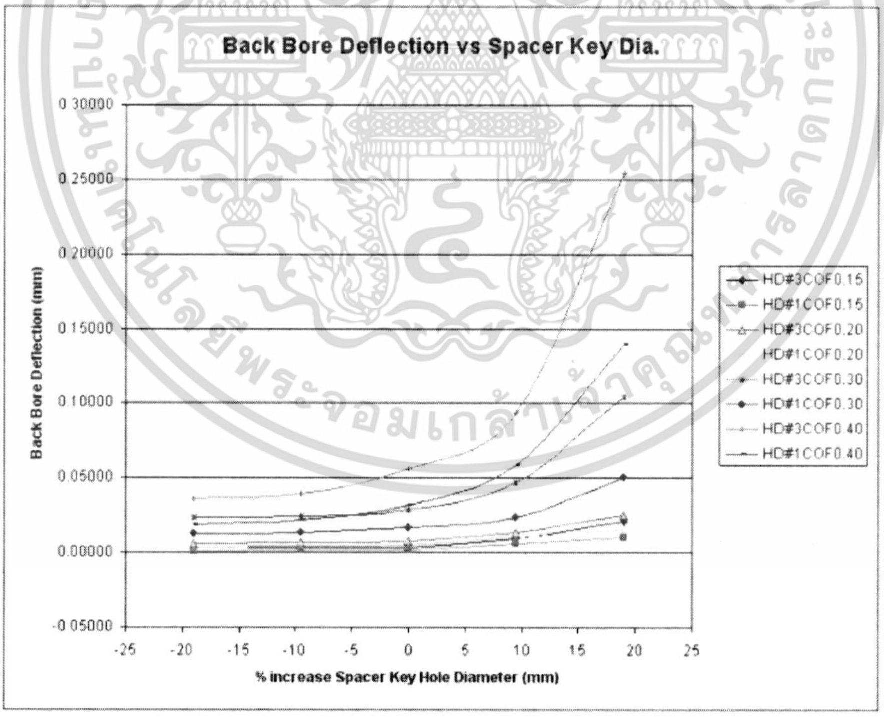
หลังจากได้ศึกษาวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการวิเคราะห์ได้นำมาเทียบกับการทดลองและได้ Spacer Key Land ที่เหมาะสม จากนั้นได้ทำการศึกษาต่อเพื่อลดของเสียเนื่องจากกระบวนการ Swaging ที่เรียกว่า Swage Push Out สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมักเกิดขึ้นกับ Tab Dn การเกิด Swage Push Out สามารถอธิบายได้ว่า พื้นที่รองรับของ Back Bore ไม่เพียงพอขณะที่ลูกบอกเคลื่อนที่ชน Top Transition Chamfer ลูกบอลจะกด Boss Tower ผลักตัว Boss Tower ให้ไปติดกับรูของ Arm pad เส้นแนวแรงจะมีทิศทางไปยัง Back Bore ขณะที่บริเวณ Back Bore เริ่มแอ่นตัวลงและเมื่อ ลูกบอลเคลื่อนที่ผ่าน Ball Contact Angle ลูกบอลจะฉุดให้ Boss Tower ยุบตัวลงมาพร้อมลูกบอลทำให้เกิด Swage Push Out ซึ่งทำให้ค่าการยึดเกาะระหว่า Base Plate และ Arm Pad ลดลง หรือในบางกรณีไม่สามารถยึดเกาะได้เลยทำให้มีผลต่อ Resonance และ Base Plate สามารถหลุดได้ในขณะทำงานอยู่ในไดร์ฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ลักษณะของการเกิด Swage Push Out

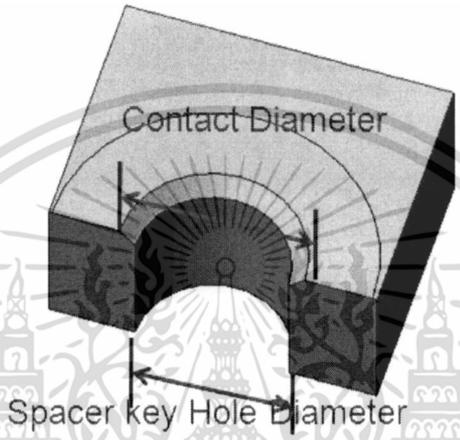
เพื่อลดโอกาสในการเกิด Swage Push Out ได้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Spacer key เรียกว่า Spacer Key Hole ที่เหมาะสม ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะของการเกิด Swage Push Out

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์นี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานควบคู่กับการปรับเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Spacer Key Hole ทำให้พบว่าค่าที่เหมาะสมของ Spacer Key Hole สามารถลดลงได้อีก 5-10% ของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมของ Spacer Key Hole และยังพบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Spacer Key Hole มีขนาดโตขึ้นจะทำให้พบกับ Swage Push Out มากขึ้น และเพื่อให้สามารถยืดอายุการใช้งาน Spacer key ให้ยาวนานขึ้นจึงได้ทำ Chamfer ที่บริเวณรูของ Spacer key Hole สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะของ Spacer key Hole ที่สามารถยืดอายุการใช้งานได้

นอกจากนั้นยังพบว่าการปรับเปลี่ยนใช้คีย์นอกสุดด้านบนสามารถลดการเบี่ยงเบนลักษณะเฉพาะของ HSA ได้ในกรณีที่ Arm Pad มีขนาดบาง

4.4 ผลการศึกษา Boss Tower Profile ที่มีผลต่อกระบวนการ One Ball Swaging

ตารางที่ 3.1 ได้แสดงถึงตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของ HSA ในกระบวนการ Swaging ตัวแปรทั้งหมดได้ถูกนำมาศึกษา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 สำหรับ Tab Dn และ ตารางที่ 4.3 สำหรับ Tab Up ตารางที่ 4.2 และ 4.3 ได้มาจากการศึกษาตัวแปรของแต่ละตัวสามค่าหรือมากกว่าเพื่อหาดัชนีความรุนแรงของแต่ละตัวแปรที่เกิดขึ้นในแต่ละ Tab จากตารางทั้งสองและค่าตัวคูณความสามารถพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA แบ่งแยกตามชิ้นส่วนได้คือ Arm Pad ตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA จะมีค่าความหนาของ Arm Pad และเส้นผ่านศูนย์กลางของ Arm Hole ตามลำดับ ในส่วนของ Base Plate ตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA คือ Relief Ring Width, Boss Height, และ Relief Ring Depth ตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกจะพิจารณาจากความสามารถของกระบวนการผลิตเพิ่มเติมจากการคัดเลือกจากตารางที่ 4.2 และ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ดัชนีความรุนแรงที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA Tab Dn

			Quantity/unit Effects		
Component	Variation	units	Tip_Ht	Tip_P	Tip_R(S4)
MP	Boss ID	mil	0.05	0.21	0.00
MP	Boss OD	mil	0.08	0.07	0.11
MP	Base Plate Thickness	mil	0.36	0.09	0.00
MP	Backbore Dia.	mil	0.00	0.00	0.00
MP	Boss Height	mil	1.08	0.60	0.06
MP	Relief Ring Depth	mil	1.31	2.10	0.08
MP	Relief Ring Width	mil	0.35	0.06	0.02
MP	Top Transition Angle	Deg	0.00	0.01	0.01
MP	Top Transition Chamfer	Deg	0.02	0.01	0.00
MP	Top Transition Chamfer Width	mil	0.13	0.12	0.11
MP	Bottom Transition Angle	Deg	0.00	0.00	0.00
MP	Back Angle	Deg	0.00	0.00	0.00
MP	Back Angle Width	mil	0.23	0.11	0.02
MP	Ball Contact Angle	Deg	0.02	0.03	0.00
MP	Backbore chamfer width at 45	Deg	0.21	0.20	0.01
Arm	Arm Hole Dia.	mil	0.15	0.00	0.00
Arm	Arm Pad Thickness	mil	17.85	0.22	0.65
Ball	Swage Ball Dia.	mil	0.17	0.02	0.00
Ball	Swage Ball COF	N/A	0.05	0.03	0.04

ตารางที่ 4.3 ดัชนีความรุนแรงที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA Tab Up

			Quantity/unit Effects		
Component	Variation	units	Tip_Ht	Tip_P	Tip_R(S4)
MP	Boss ID	mil	0.05	0.21	0.00
MP	Boss OD	mil	0.08	0.07	0.11
MP	Base Plate Thickness	mil	0.36	0.09	0.00
MP	Backbore Dia.	mil	0.00	0.00	0.00
MP	Boss Height	mil	1.08	0.60	0.06
MP	Relief Ring Depth	mil	1.31	2.10	0.08
MP	Relief Ring Width	mil	0.35	0.06	0.02
MP	Top Transition Angle	Deg	0.00	0.01	0.01
MP	Top Transition Chamfer	Deg	0.02	0.01	0.00
MP	Top Transition Chamfer Width	mil	0.13	0.12	0.11
MP	Bottom Transition Angle	Deg	0.00	0.00	0.00
MP	Back Angle	Deg	0.00	0.00	0.00
MP	Back Angle Width	mil	0.23	0.11	0.02
MP	Ball Contact Angle	Deg	0.02	0.03	0.00
MP	Backbore chamfer width at 45	Deg	0.21	0.20	0.01
Arm	Arm Hole Dia.	mil	0.15	0.00	0.00
Arm	Arm Pad Thickness	mil	17.85	0.22	0.65
Ball	Swage Ball Dia.	mil	0.17	0.02	0.00
Ball	Swage Ball COF	N/A	0.05	0.03	0.04

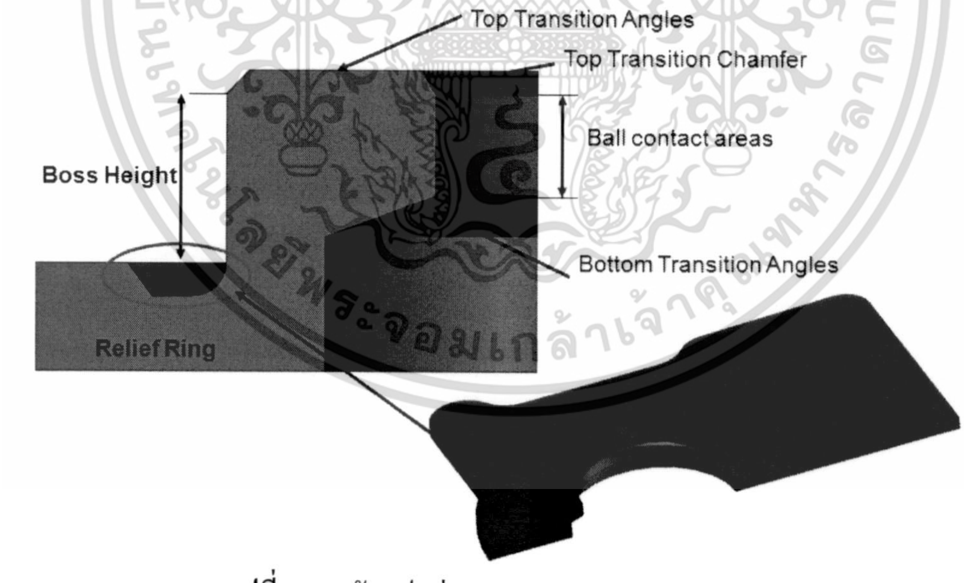
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ตัวแปรของ Arm pad

ตัวแปรของ Arm Pad ที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA ผลการวิเคราะห์ตัวแรกคือความหนาของ Arm Pad ถ้าความหนาของ Arm Pad เปลี่ยนไปจะส่งผลโดยตรงกับค่า Z-Ht ของระบบ และยังส่งผลโดยตรงกับค่า Tip_Ht ที่เบี่ยงเบนไปโดยตรงโดยมีความสัมพันธ์รวมกัน ตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA ตัวที่สองคือ Arm Pad Hole การที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Arm Pad Hole ลดลงหรือขยายขึ้น จะส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA เนื่องจากเมื่อลูกบอลสัมผัสกับ Top Transition Chamfer ใน Tab Dn ตัว Boss Tower จะเสียรูปเข้าสัมผัสกับผิวของรู Arm ถ้ารู Arm เล็กลงเมื่อลูกบอลเคลื่อนที่ผ่าน Ball Contact Area จะดัน Boss Tower ให้พยายามแนบกับผิวของ Arm ทำให้ใช้แรงกดที่ผิว Arm มากเมื่อเอาแรงกดที่คีย์บนออกตัวของ Arm Pad เองจะเปลี่ยนรูปไปตามแรงดันของ Boss Tower ที่กระทำส่งผลให้ลักษณะเฉพาะของ HSA เปลี่ยนไปสำหรับ Tab Up ก็เกิดในทำนองเดียวกัน และถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Arm Pad เล็กมากๆ มีโอกาสเกิด Swage Push Out สำหรับใน Tab Dn

4.4.2 ตัวแปรของ Base Plate

ตัวแปรของ Base Plate ที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA ผลการวิเคราะห์ตัวแรกคือ Relief Ring Width ตำแหน่งของแต่ละตัวแปรสามาถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

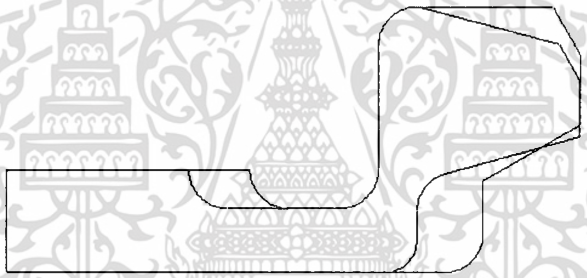


รูปที่ 4.11 ตัวแปรต่างๆของ Boss Tower Profile

ความกว้างของ Relief Ring สามารถช่วยปรับปรุงค่าความแข็งของ Flange ของ Base Plate และช่วยปรับปรุงแรงยึดเกาะกับผิวของรู Arm การมีค่า Relief Ring Width มากทำให้ตัว Boss Tower สามารถเสียรูปได้ง่ายเมื่อลูกบอลกระทบกับ Top Transition Chamfer และยังช่วยไม่ให้ขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Arm Hole สัมผัสกับ Boss Tower ซึ่งเหมือนเป็นการต้านการเปลี่ยนรูปของ Boss Tower ตัวแปรตัวที่สองคือ Relief Ring Depth ถ้าความลึกของ Relief Ring น้อยลงค่าความแข็งของ Flange ของ Base Plate จะมีค่าน้อยลงส่งผลให้ Base plate เกิดการเปลี่ยนรูปได้มาก ถ้าความลึกของ Relief Ring น้อยมากๆ Base Plate จะเสียรูปขณะที่ Nose ของเครื่อง Swaging กดลงบนคีย์นอกตัวบนถึงแม่ไม่ได้ให้บอลวิ่งผ่าน ตัวแปรสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์คือ Boss Height จาการศึกษาพบว่าถ้าค่าของ Boss height มีค่าสูงในกรณี Tab Dn เมื่อลูกบอลเคลื่อนที่มาชนกับ Top Transition Chamfer ตัว Boss Tower จะเสียรูปเข้าชนกับผิวของรู Arm Pad แต่จุดแรกที่สัมผัสกับผิวของรู Arm คือค่า Boss height เมื่อลูกบอลเคลื่อนที่ผ่าน Ball Contact Area ทำให้ต้องใช้แรงสูงและเมื่อไม่มีแรงกดที่คีย์นอกตัวบนทำให้ Arm Pad เกิดการเปลียนรูปเนื่องจากแรงที่ Boss Tower กระทำกับผิวของ Arm Hole สำหรับใน Tan up ก็เกิดทำนองเดียวกันและตัว Boss tower จะกินเนื้อของ Arm บริเวณ Arm Hole แต่ในกรณีที่ Arm Pad มีความหนามากการมีค่า Boss height ที่สูงจะเป็นการเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่าง Arm และ Base Plate

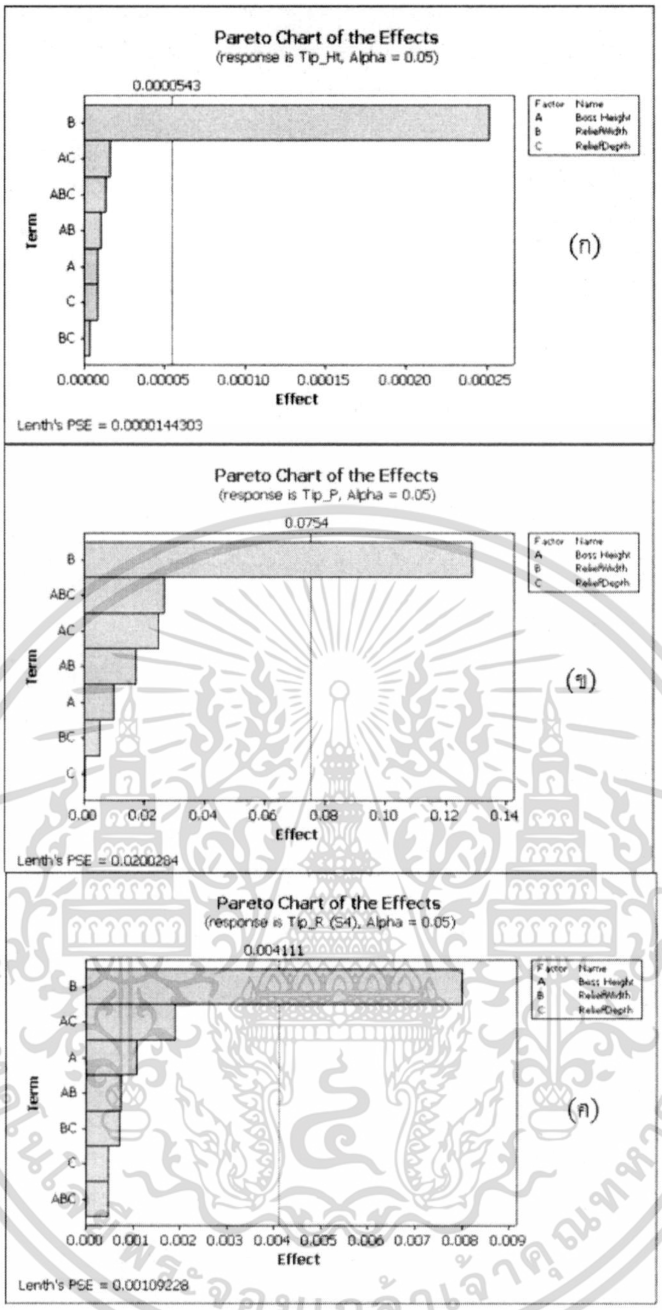


รูปที่ 4.12 Boss Tower Profile ที่หาค่าเหมาะสมในกระบวนการ One Ball swaging

4.5 ผลการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการ One Ball Swaging

การวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการ One Ball Swaging กระทำโดยผ่านการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE) ตารางที่ 3.1 ได้แสดงถึงตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของ HSA ในกระบวนการ Swaging ตัวแปรทั้งหมดได้ถูกนำมาศึกษาหลังจากที่ได้คัดเลือกตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA และเลือก Spacer Key Land ที่ส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของ HSA น้อยที่สุด ตัวแปรที่ได้คัดเลือกมาจะนำมาหาค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ One Ball Swaging ด้วยโปรแกรม Minitab กำหนดตัวแปรศึกษาเป็น 2 Levels 3 Factors โดยพิจารณาทั้ง Tip_ht, Tip_P และ Tip_R ผลการวิเคราะห์ Tab Dn สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13

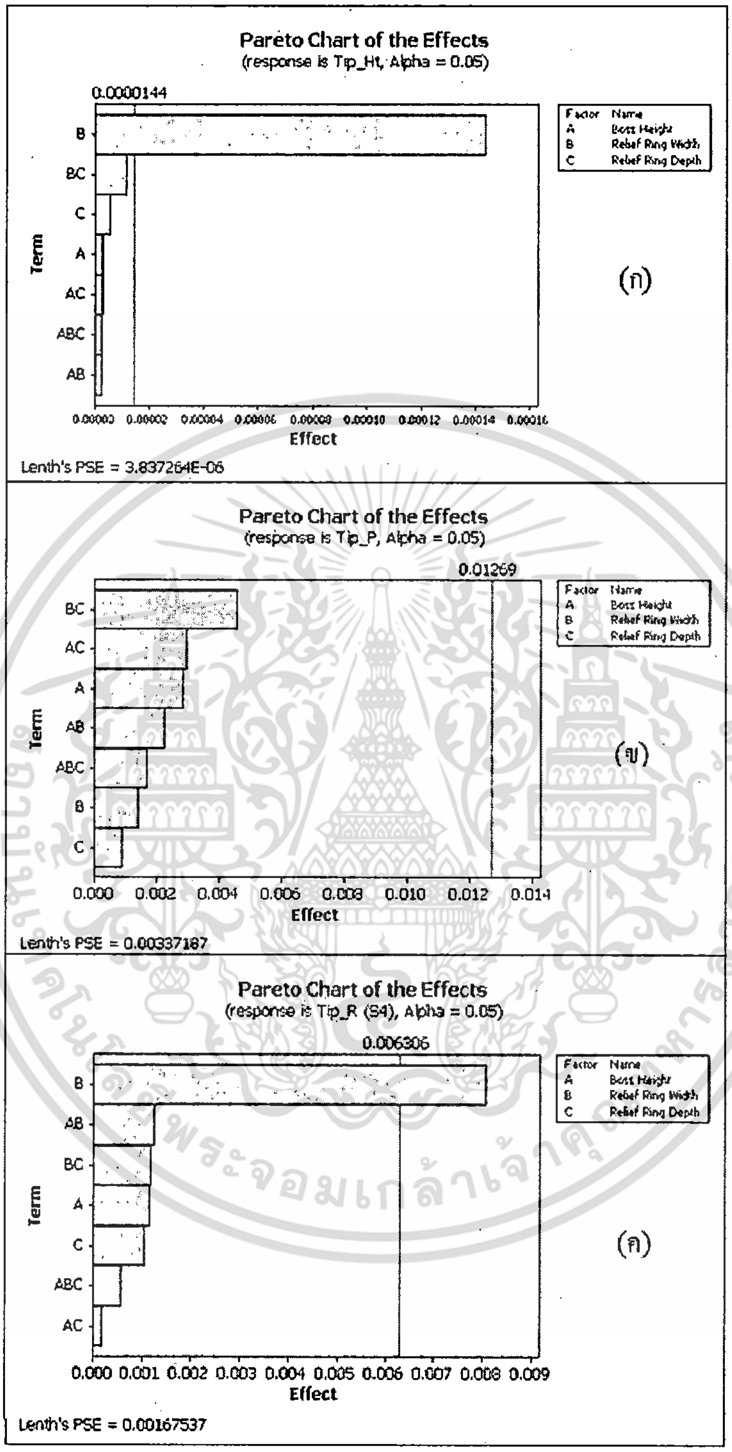
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 Pareto Chart ของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการสำหรับ Tab Dn(ก) Tip_Ht (ข) Tip_P (ค) Tip_R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

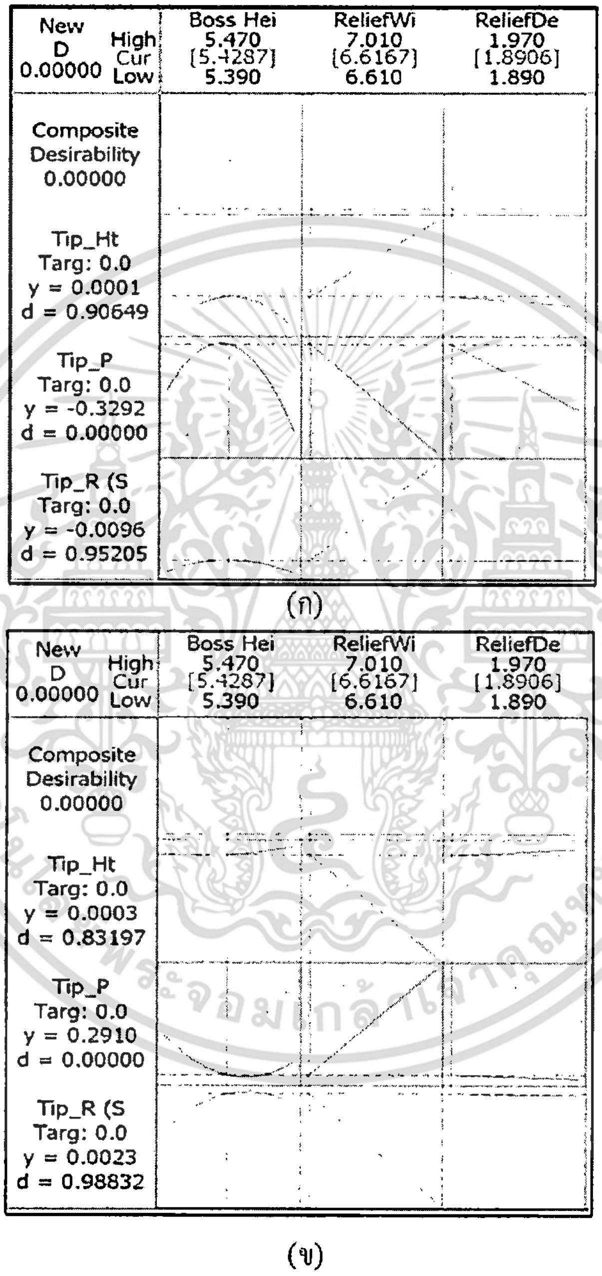
ผลการวิเคราะห์ Tab Up สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 Pareto Chart ของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการสำหรับ Tab Up (ก) Tip_Ht (ข) Tip_P (ค) Tip_R

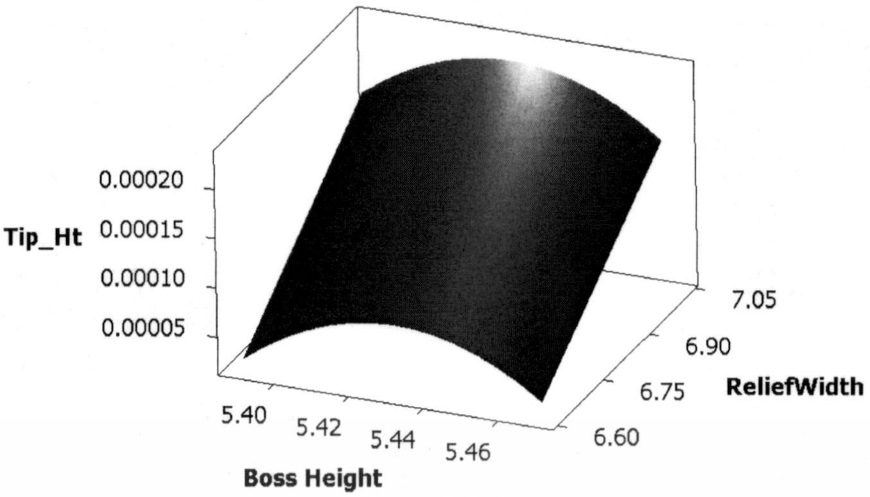
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab พบว่า ตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพเฉพาะของ HSA ทั้งสอง Tab คือ Relief Ring Width จากนั้นได้ศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่ได้คัดเลือกมา ผลจากการศึกษาหาค่าของ Relief Ring Width ที่เหมาะสมและค่า Boss Height และ Relief Ring Depth สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15

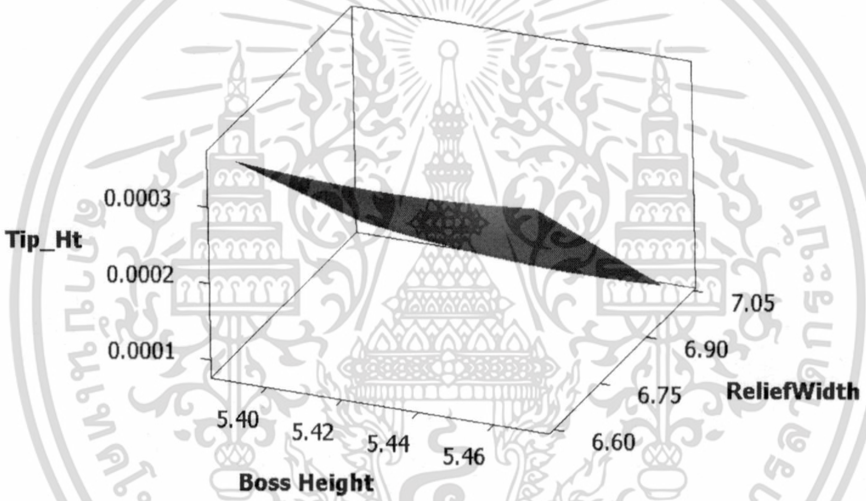


รูปที่ 4.15 ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สนใจ (ก) Tab Dn (ข) Tab Up

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สนใจ Tab Dn



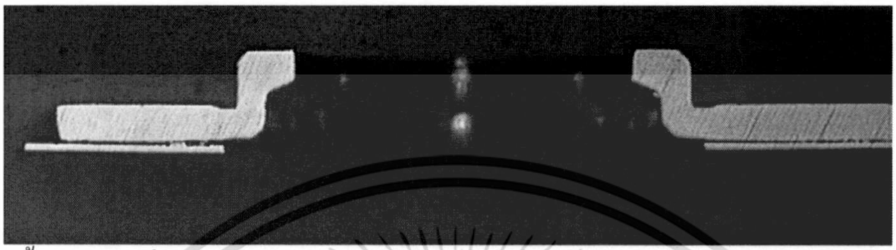
รูปที่ 4.17 ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สนใจ Tab Up

จากการหาค่าที่เหมาะสมพบว่าค่า Relief Ring Width สำหรับ Tab Up ยิ่งมีค่ามากก็จะสามารถลดค่าการเบี่ยงเบนของลักษณะเฉพาะของ HSA ได้แต่ในทางกลับกันสำหรับ Tab Dn ค่า Relief Ring width ยิ่งมีค่าน้อยจะยิ่งคงค่าลักษณะเฉพาะของ HSA อย่างไรก็ตามค่า Relief Ring Depth จะส่งผลกับ Tab Up เท่านั้น

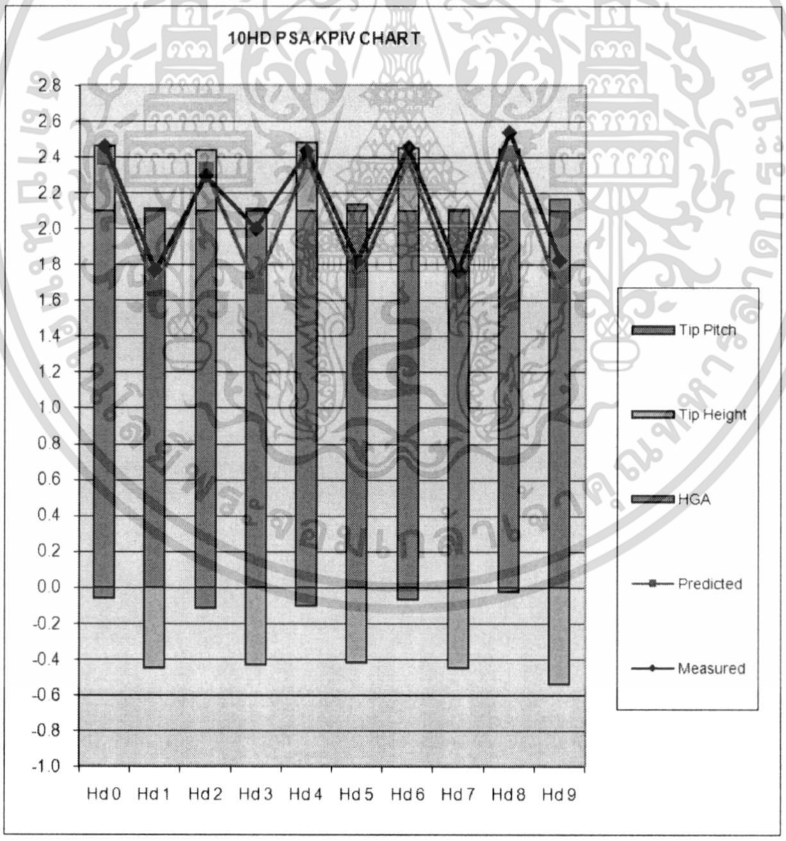
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการนำชิ้นงานจริงมาทดลองในกระบวนการ One Ball Swaging

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการ One Ball Swaging ลักษณะชิ้น Boss Tower Profile จริงได้ถูกสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.18 และชิ้นงานจริงได้นำมาใช้กับ HSA ที่มีจำนวนหัวอ่านเขียนมากที่สุดเพื่อสร้างความมั่นใจว่า Base Plate ของหัวอ่านเขียนล่างสุดยังสามารถยึดติดอยู่กับ Arm Pad ได้



รูปที่ 4.18 ชิ้นงานจริงที่ได้หลังจากวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ One Ball Swaging



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการ, KPIV Chart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้รับการวิเคราะห์แล้วมาทำต้นแบบทดสอบพบว่ามีสมรรถนะของลักษณะเฉพาะของ HSA เทียบเท่ากับกระบวนการ Swaging แบบเดิมรวมถึงการทดสอบความสั่นพ้อง (Resonance) เมื่อพิจารณาจาก KPIV Chart พบว่ามีความใกล้เคียงกับแบบจำลองกระบวนการมากสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

5.1 ขั้นตอนของการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมไม่ว่าจะเป็นปัญหาใดๆ ก็ตามจะต้องมีวิธีการและขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังต่อไปนี้

5.1.1 การกำหนดปัญหา

ปัญหาที่จะทำการแก้ไขจะต้องกำหนดขอบเขตและเป้าหมายของการรแก้ปัญหาอย่างชัดเจน เพราะในบางครั้งขอบเขตของปัญหากว้างเกินไปหรือไม่ชัดเจน จะทำให้การแก้ไขปัญหาเป็นไปได้ยาก ในบางครั้งไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้ หรือถ้าแก้ไขปัญหาได้ ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ถูกต้อง ปัญหาอาจมีเป้าหมายหลายอย่างในขณะเดียวกัน และเป้าหมายแต่ละอย่างมีความสำคัญไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งเป้าหมายออกเป็นสองประเภท คือ

- *เป้าหมายเดียว* คือ เป้าหมายของปัญหามีเพียงหนึ่งปัญหาเท่านั้น ซึ่งเป็นเป้าหมายแบบสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้ เช่น ต้องการออกแบบรถยนต์ให้มีแรงเสียดทานน้อยที่สุดตามหลักพลศาสตร์ การออกแบบปั๊มน้ำเพื่อให้ได้กำลังปั๊มมากที่สุด เป็นต้น

- *เป้าหมายหลายเป้าหมาย* คือ เป้าหมายของปัญหามีมากกว่าหนึ่งเป้าหมาย ซึ่งแต่ละเป้าหมายอาจจะเป็นแบบเดียวกัน หรือตรงข้ามกันก็ได้ เช่น ต้องการผลิตรถยนต์ให้ได้มากที่สุดแต่ใช้กำลังการผลิตน้อยที่สุด ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่าเป้าหมายเดียวกัน แต่ในบางกรณีเป้าหมายอาจจะเป็นคนละแบบก็ได้ เช่น ต้องการขายรถยนต์ให้ได้กำไรสูงสุดในขณะเดียวกันต้องการให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดด้วย

ขั้นตอนในการกำหนดปัญหาของการออกแบบพอกล่าวสังเขปได้ดังนี้

- กำหนดเป้าหมายของการออกแบบ
- ศึกษาตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อเป้าหมายของการออกแบบ
- กำหนดข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของการออกแบบ
- กำหนดแนวทางในการออกแบบ
- กำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ปัญหา และระยะเวลาในการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การจัดรูปปัญหาให้เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้จัดตั้งปัญหา และทำความเข้าใจปัญหาอย่างถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การจัดรูปแบบของปัญหาให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยจัดรูปของปัญหาให้เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะมีโครงสร้างดังนี้

- สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของเป้าหมายกับตัวแปรสำหรับตัดสินใจ สมการเป้าหมายนี้จะเป็นแบบสูงสุดหรือต่ำสุด (Maximize, Minimize) ก็ได้ และค่าของสมการเป้าหมายจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรสำหรับตัดสินใจ เช่น การผลิตเพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด การผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด ฯลฯ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา

- สมการแสดงขอบข่ายหรือเงื่อนไขบังคับ (Constraint) ซึ่งแสดงขอบเขต หรือข้อจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรในรูปของสมการหรืออสมการ

- ตัวแปรในการออกแบบหรือตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวแปรที่เราต้องการทราบค่าตัวแปรดังกล่าวจะมีตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ และเป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมการเป้าหมายที่กำหนดขึ้น ตัวแปรในการออกแบบสามารถแบ่งได้สามชนิดคือ ตัวแปรที่มีความต่อเนื่อง ตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง และตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม

5.1.3 การทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหา และการหาผลลัพธ์ของปัญหา

บ่อยครั้งที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาไม่ถูกต้อง เนื่องจากความบกพร่องบางประการทำให้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไม่ใช่ตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริง จึงทำให้การหาผลลัพธ์เป็นไปไม่ได้ ดังนั้น ควรมีการตรวจสอบการจัดตั้งปัญหาเปรียบเทียบกับปัญหาจริง ตรวจสอบการใช้หน่วย และมิติของตัวแปรต่างๆ ว่าสอดคล้องกันหรือไม่ โดยสามารถทำการตรวจสอบด้วยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์แล้วดูว่าจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นสอดคล้องกับค่าที่ควรจะเป็นหรือไม่ และตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลในอดีตมาทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ แล้วนำเอาผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ในการหาผลลัพธ์หรือค่าคำตอบของปัญหาจะเลือกใช้วิธีว่าเหมาะสมกับปัญหาหรือสามารถแก้ปัญหาได้หรือไม่ และเมื่อได้ผลลัพธ์แล้วต้องคำนึงถึงพฤติกรรมของผลลัพธ์ที่จะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อตัวแปรในการออกแบบของปัญหาเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ จะต้องมีการวิเคราะห์ความไว ซึ่งการวิเคราะห์ความไวนี้มีความสำคัญมาก เพราะว่าถ้าตัวแปรในการออกแบบของปัญหาที่ศึกษาไม่อาจประมาณค่าได้แน่นอน จะต้องหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมจากค่าต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 การทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

ถ้าหากผลที่ได้ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้จะต้องสามารถทดสอบได้ โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ข้อมูลในอดีตกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริงๆ อย่างไรก็ตาม การทดสอบความถูกต้องไม่เหมาะกับปัญหาที่ไม่เคยเกิดมาก่อน เพราะจะไม่มีข้อมูลในอดีตที่จะนำมาเปรียบเทียบได้

5.1.5 การนำผลลัพธ์หรือค่าคำตอบไปใช้งาน

จะต้องทำการแปลงผลลัพธ์ที่ได้ให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานได้ และเมื่อนำไปใช้งานแล้วควรทำการประเมินผลการใช้งาน เพื่อนำข้อบกพร่องที่ได้มาปรับปรุง และแก้ไขให้เป็นไปตามความต้องการต่อไป เพราะในบางครั้งผลลัพธ์ที่ได้ไม่สามารถทำให้เป็นจริงตามที่เราต้องการได้ หรือไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ

5.2 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหาคำตอบของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งได้ 4 วิธี คือ

5.2.1 วิธีกราฟ (Graphical Method)

เป็นวิธีที่ต้องพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมการเป้าหมายและตัวแปรในการออกแบบ ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ใช้ได้กับปัญหาหนึ่งมิติและสองมิติเท่านั้น กล่าวคือ จำนวนตัวแปรในการออกแบบสูงสุดที่จะใช้วิธีนี้ต้องไม่เกินสองตัวแปร

5.2.2 วิธีการวิเคราะห์ (Analytical Technique)

สิ่งสำคัญของปัญหาที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ในการหาค่าคำตอบ คือ สมการความสัมพันธ์จะต้องสามารถหาอนุพันธ์ได้ และความสัมพันธ์ของสมการต้องเป็นแบบต่อเนื่อง เพราะในการหาคำตอบของปัญหาจะใช้วิธีหาอนุพันธ์ของสมการเป้าหมาย ถ้าปัญหาเป็นแบบที่มีสมการขอบเขตจำกัดจะใช้วิธีตัวคูณของลากรองจ์ (Lagrange Multipliers) ทำการแปลงสมการขอบเขตให้เป็นเทอมที่เพิ่มขึ้นของสมการเป้าหมาย จะทำให้ปัญหากลายเป็นปัญหาที่ไม่มีสมการขอบเขตจำกัด

5.2.3 วิธีการทดลอง (Experimental Technique)

วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เป็นการทดลองหาคำตอบทุกทางเลือกที่เป็นไปได้ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้ หาคำตอบที่เหมาะสม วิธีการนี้เหมาะกับปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อน และมีตัวแปรในการออกแบบไม่มากนัก เพราะถ้าเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน และตัวแปรในการออกแบบมีจำนวนมาก ใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบนาน และมีค่าใช้จ่ายมากกว่าวิธีอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

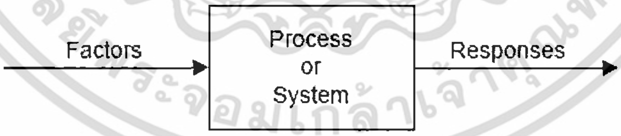
5.2.4 วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Technique)

วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีทำซ้ำเพื่อหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถแยกประเภทได้จากหลายลักษณะคือ สามารถแบ่งได้จากลักษณะของสมการเป้าหมาย และจากลักษณะของปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับ หรือไม่มีเงื่อนไขบังคับ เป็นต้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือของบริษัท ซีเกทเทคโนโลยี และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะใช้วิธีการของบริษัทและนำมาเป็นองค์ความรู้เพื่อใช้ภายในบริษัท ประกอบด้วยซอฟแวร์ Minitab และ Ansys โดยการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ซอฟแวร์ Ansys เพื่อคำนวณตัวแปรและปัจจัยต่างๆในกระบวนการ Swaging วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นำมาวิเคราะห์สามารถอธิบายทั้งในแง่ของคุณภาพของ HSA และการเปลี่ยนรูปของ Base Plate ที่เกิดขึ้นโดยสามารถอธิบายถึงกลไกและสาเหตุของผลที่เกิดขึ้น ในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ซอฟแวร์ Minitab

5.3 การออกแบบการทดลอง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีบรรทัดฐานอยู่ที่จะไม่ทำให้กระบวนการผลิต Boss Tower เปลี่ยนไปมากเพื่อควบคุมกระบวนการผลิตและราคาที่สูงขึ้นจากการออกแบบการประกอบ HSA ด้วยหนึ่งบอลและสามารถใช้ได้ในขบวนการ Swaging ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีตัวแปรอยู่สองลักษณะเพื่อให้ข้อมูลของระบบที่ศึกษาคือ ปัจจัย (Factor) และ การตอบสนอง (Responses) ซึ่งการตอบสนองจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับที่มาของระบบโดยจะจัดการกับปัจจัยเพื่อให้ระบบการตอกยึดด้วยหนึ่งบอลของ HSA มีค่าที่ดีที่สุดสามารถเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ปัจจัย (Factors) และการตอบสนอง (Responses) : กระบวนการหนึ่งกระบวนการหรือระบบหนึ่งระบบสามารถควบคุมได้โดยปัจจัยที่ป้อนให้หนึ่งปัจจัยหรือมากกว่า การเปลี่ยนแปลงปัจจัยเหล่านี้ก่อให้เกิดการตอบสนองต่างๆ และสามารถวัดได้

ปัจจัยถูกแบ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้สามารถตรวจจับและปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงกับระบบและไม่สามารถควบคุมได้ในระบบ ในงานวิจัยนี้ปัจจัยแรกที่ต้องนำมาพิจารณาคือ Spacer Key Land เนื่องจาก Spacer Key Land ส่งผลถึงค่าแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบของ HSA หลังจากประกอบ งานวิจัยเริ่มด้วยการศึกษาการแอ่นตัวของ Back Bore ของ Base Plate การทดลองจะใช้วิธีการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมได้นำมาเทียบกับการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของการจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทำให้พบว่าอายุการใช้งานของ Spacer Key สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อใส่ Chamfer รอบๆ รูของ Swage Key ซึ่งค่าที่ดีที่สุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่สัมผัสคือ ห้าเปอร์เซ็นต์ของรูของ Spacer Key เพื่อคงสมรรถนะของ HSA หลังจากประกอบดังแสดงในรูปที่ 4.9

5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตอกยึดด้วยหนึ่งบอล

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการตอกยึด ตารางที่ 5.1 แสดงช่วงของค่าตัวแปรที่ต้องการจะออกแบบซึ่งแบ่งเป็น ตัวแปรที่ Boss Tower เอง ตัวแปรที่มาจาก Arm ปัจจัยที่มาจากบอลที่ใช้ในการตอกยึด และปัจจัยจากเครื่องจักรและการตั้งค่าของเครื่อง

ตารางที่ 5.1 ช่วงของค่าตัวแปรที่ต้องการจะออกแบบ

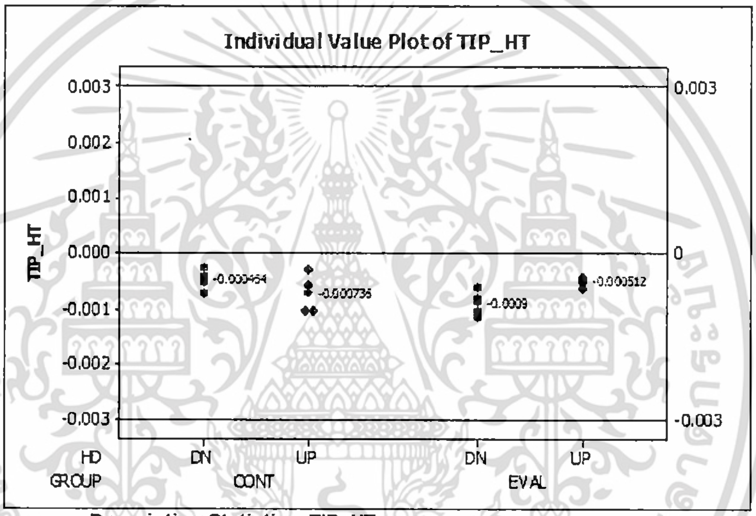
KPIV Lists One Ball Swaging

•Base Plate Variations	unit	Min	Normal	Max	unit	Min	Normal	Max
–Boss ID	mil	53.7	54.0	54.3	mm	1.3640	1.3720	1.3800
–Boss OD	mil	72.6	73.0	73.4	mm	1.8440	1.8540	1.8640
–Base Plate Thickness	mil	5.4	5.9	6.4	mm	0.1370	0.1500	0.1630
–Backbore Dia.	mil	62.5	64.0	65.5	mm	1.5880	1.6260	1.6640
–Boss Height	mil	5.39	5.43	5.47	mm	0.1370	0.1380	0.1390
–Relief Ring Depth	mil	1.89	1.93	1.97	mm	0.0480	0.0490	0.0500
–Relief Ring Width	mil	6.61	6.81	7.01	mm	0.1680	0.1730	0.1780
–Top Transition Angle	Deg	-3.0	0.0	3.0	Deg	-3.0	0.0	3.0
–Top Transition Chamfer	Deg	55.0	60.0	65.0	Deg	55.0	60.0	65.0
–Top Transition Chamfer Width	mil	0.91	1.10	1.30	mm	0.023	0.028	0.033
–Bottom Transition Angle	Deg	60.0	70.0	80.0	Deg	60.0	70.0	80.0
–Back Angle	Deg	40.0	45.0	50.0	Deg	40.0	45.0	50.0
–Back Angle Width	mil	2.95	3.15	3.35	mm	0.0750	0.0800	0.0850
–Ball Contact Angle	Deg	-2.0	0.0	2.0	Deg	-2.0	0.0	2.0
–Backbore chamfer width at 45	mil	3.20	0.0	4.76	mm	0.081	0.0	0.121
•Arm Variations	unit	Min	Normal	Max	unit	Min	Normal	Max
–Arm Hole Dia.	mil	73.4	73.8	74.2	mm	1.8644	1.8745	1.8847
–Arm Pad Thickness	mil	18.9995	19.0000	19.0005	mm	0.48259	0.48260	0.48261
•Ball Variations	unit	Min	Normal	Max	unit	Min	Normal	Max
– Swage Ball Dia.	mil	57.0	58.0	59.0	mm	1.44780	1.47320	1.49860
– Swage Ball COF	N/A	0.10	0.15	0.20	N/A	0.10	0.15	0.20
•Environment Variations	unit	Min	Normal	Max	unit	Min	Normal	Max
–Pin Speed	mm/s	12.7	17.8	22.9	in/s	5.0	0.7	9.0
–Clamp Force	mN	667,233	1,112,055	1,556,878	lbf	150.0	250.0	350.0
–Spacer Key Land	?		?				?	
–Spacer Key Hole Dia.	?		?				?	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

Constraint จะกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของ Tip_Ht, Tip_P และ Tip_R มีค่าน้อยที่สุด หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย แต่จะมุ่งเน้นที่ค่า Tip_Ht เป็นหลักเนื่องจากเป็นตัวแปรวิกฤตที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA ที่ผ่านกระบวนการตอกยึดด้วยบอล เนื่องจากตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของ HSA มีมากดังนั้นจึงจำเป็นต้องลำดับความสำคัญเพื่อลดตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะใช้วิธีการ Direct Search Method ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะนำมาประมวลผลเพื่อหาค่า Quantity ต่อ Unit Effect ของ HSA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 สำหรับ Down Tab และ 4.3 สำหรับ Up Tab



Descriptive Statistics: TIP_HT

Results for HD = DN

Variable	GROUP	Mean	StDev	Minimum	Maximum
TIP_HT	CONT	-0.000464	0.000176	-0.000730	-0.000250
	EVAL	-0.000900	0.000212	-0.001160	-0.000610

Results for HD = UP

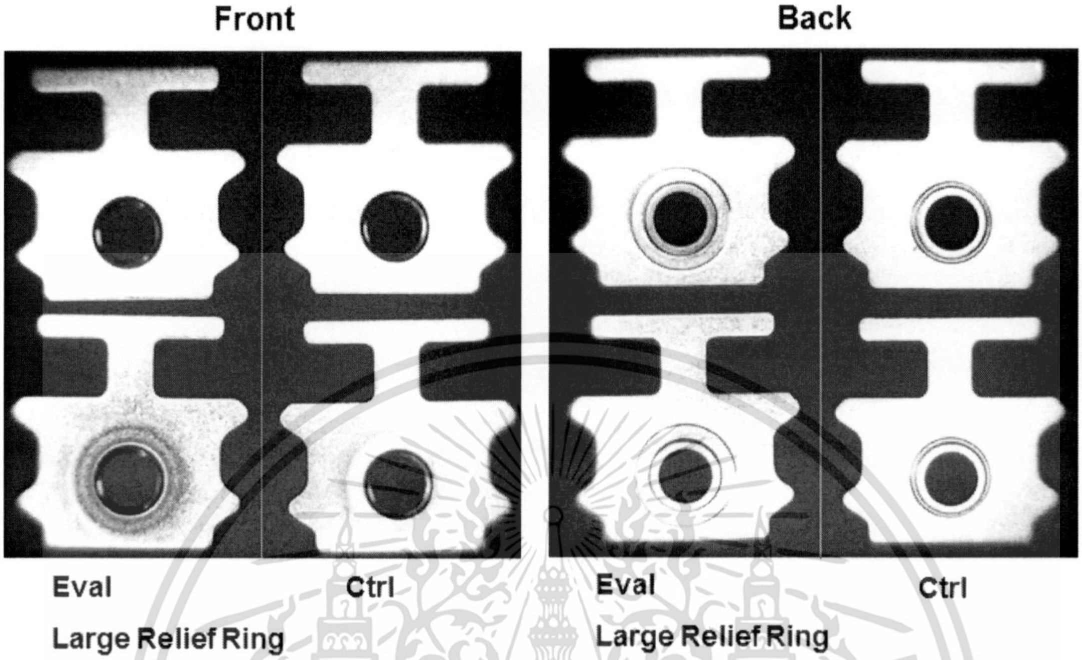
Variable	GROUP	Mean	StDev	Minimum	Maximum
TIP_HT	CONT	-0.000736	0.000307	-0.001030	-0.000310
	EVAL	-0.000512	0.000082	-0.000650	-0.000440

รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงจากโปรแกรม Minitab (CONT คือ Relief Ring ปกติ, EVAL คือ งานที่ Relief Ring กว้าง)

พบว่าจะได้ค่าตัวแปรที่สำคัญทั้งหมด สามค่าคือ Boss Height, Relief Ring Depth, Relief Ring Width สำหรับ Down Tab และ Up Tab จากนั้น นำค่าตัวแปรทั้งหมดเหล่านี้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้โปรแกรม Minitab ผลที่ได้จากโปรแกรม Minitab แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.14 จากรูปแสดงให้เห็นว่า Relief Ring Width มีผลต่อสมรรถนะของ HSA มากที่สุดโดยพบว่า Relief Ring Width ยิ่งแคบยิ่งดีสำหรับ Down Tab ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ Relief Ring Width

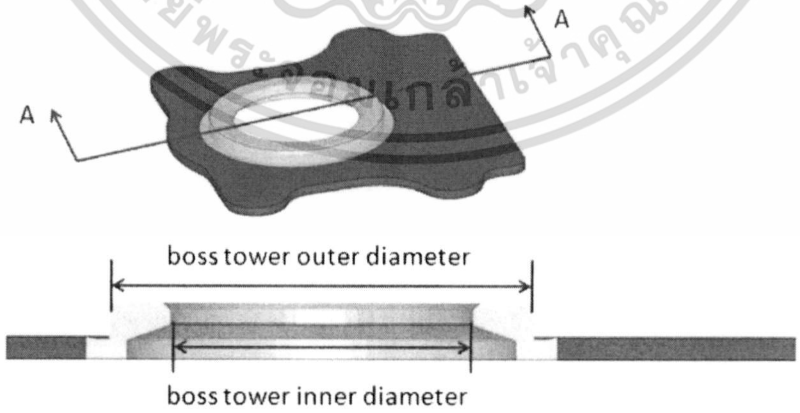
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งกว้างยิ่งดีสำหรับ Up Tab ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จึงทำการทดลองการตอกยึดด้วยบอลกับชิ้นงานจริง ผลการทดลองออกมาสอดคล้องกันแสดงดังรูปที่ 5.2



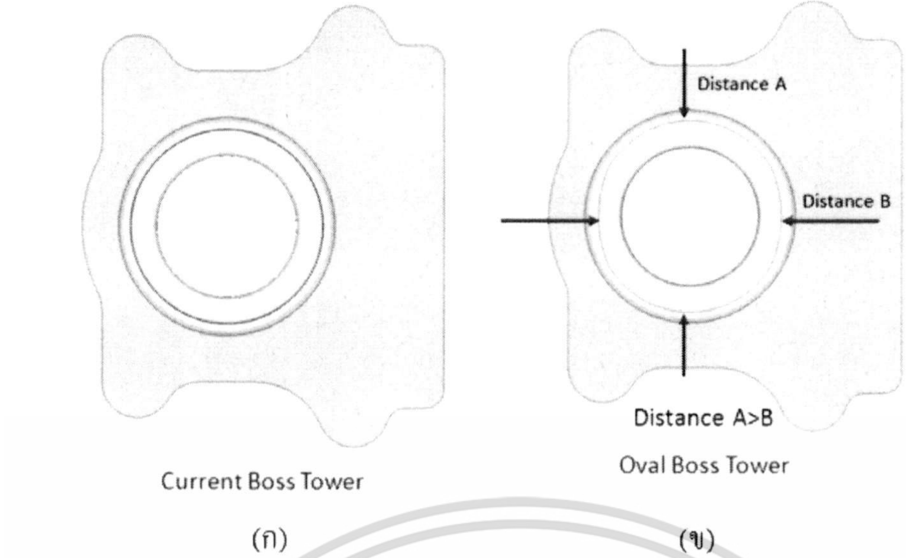
รูปที่ 5.3 ชิ้นงานจริงที่นำมาทดลองมีค่า Relief Ring Width กว้าง

ผลที่ได้จากโปรแกรม Minitab ทำให้เกิดแนวคิดใหม่ในการออกแบบ Boss Tower โดยนำข้อดีและข้อเสียของความกว้างและความแคบของ Relief Ring มาใช้งาน โดยปรับปรุง Boss Tower ให้มีทั้ง Relief Ring Width กว้างและ Relief Ring Width แคบรวมอยู่ใน Base Plate เดียว

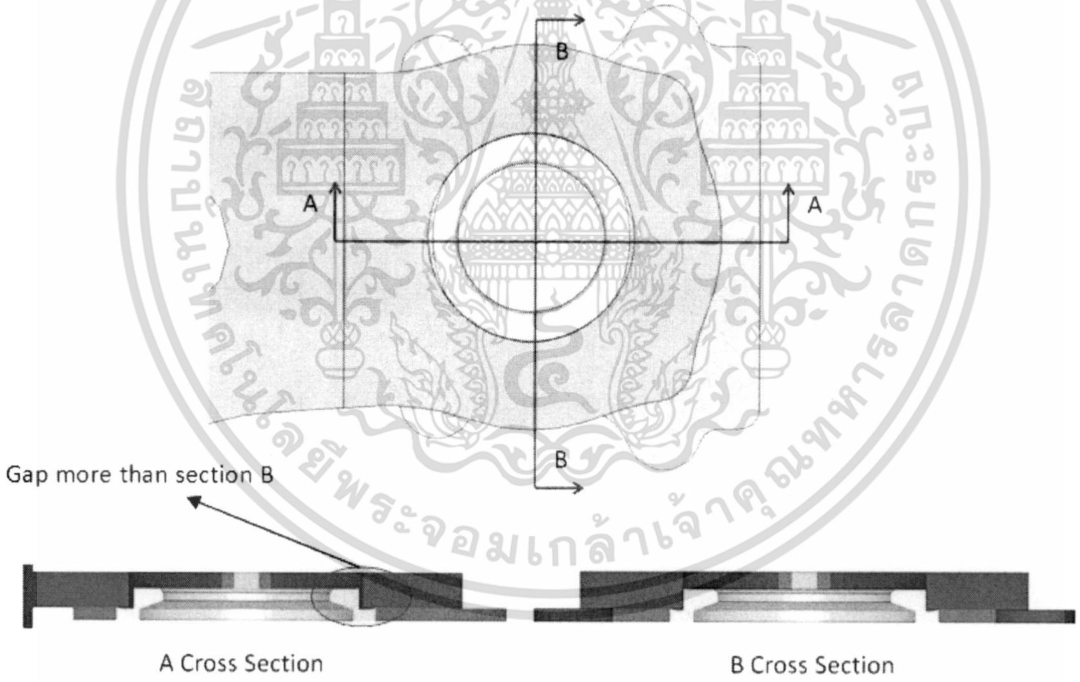


รูปที่ 5.4 ภาพตัดขวาง A-A แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ Boss Tower ทั้งด้านในและด้านนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



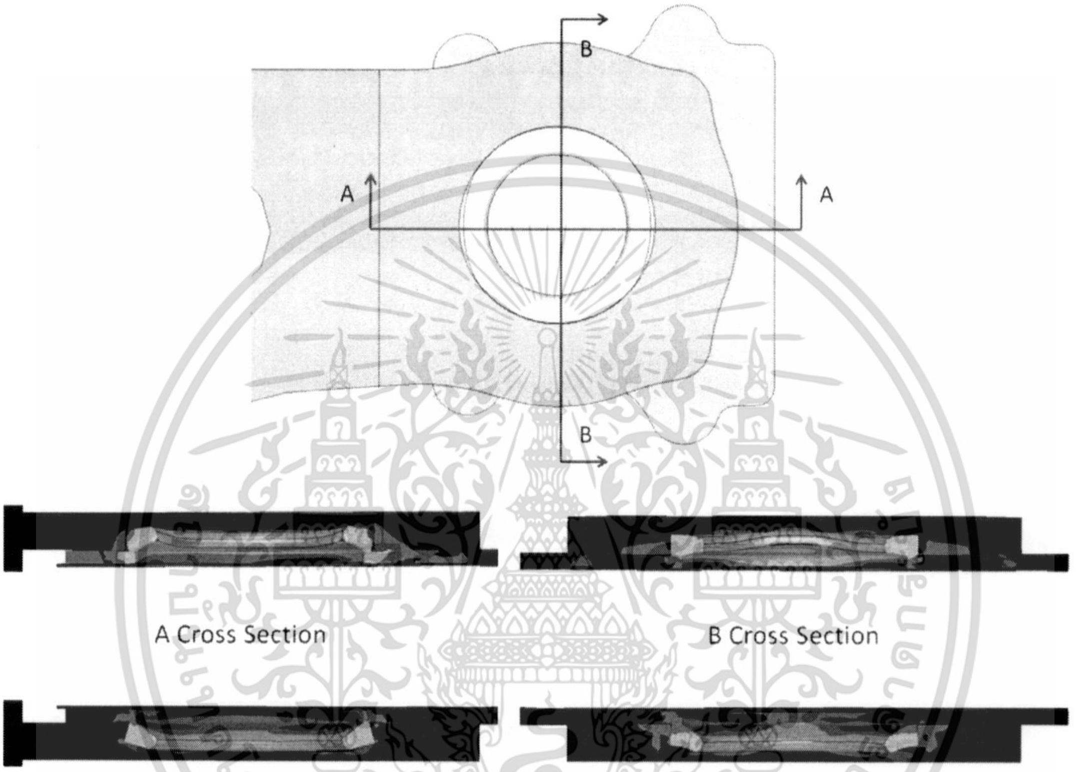
รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบ Boss Tower (ก) แบบปัจจุบัน (ข) แบบที่มีการปรับเปลี่ยน Relief Ring Width ในขณะที่รูปร่างของ Base Plate ไม่ได้ปรับเปลี่ยน



รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางด้าน A-A และ ด้าน B-B หลังจากประกอบ Base Plate เข้ากับ Arm Actuator ยังไม่ผ่านกระบวนการตอกยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของ Boss Tower ที่ทำให้มีทั้ง Relief Ring Width กว้างและ Relief Ring Width แคบแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 เรียก Boss Tower ลักษณะนี้ว่า Oval Boss Tower เมื่อนำมาประกอบกับ Arm Actuator จะพบว่ามีช่องว่างระหว่างผิวของ Boss Tower และช่องสำหรับตอกยึด (Swage Hole)ไม่เท่ากัน พิจารณาตามความยาวของ HSA พบว่ามีช่องว่างมากกว่าในแนวด้านข้างของ HSA ผลการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาลักษณะการเสียรูปของ Boss Tower แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ภาพตัดขวางด้าน A-A และ ด้าน B-B หลังจากผ่านกระบวนการตอกยึดทั้ง Down Tab และ Up Tab

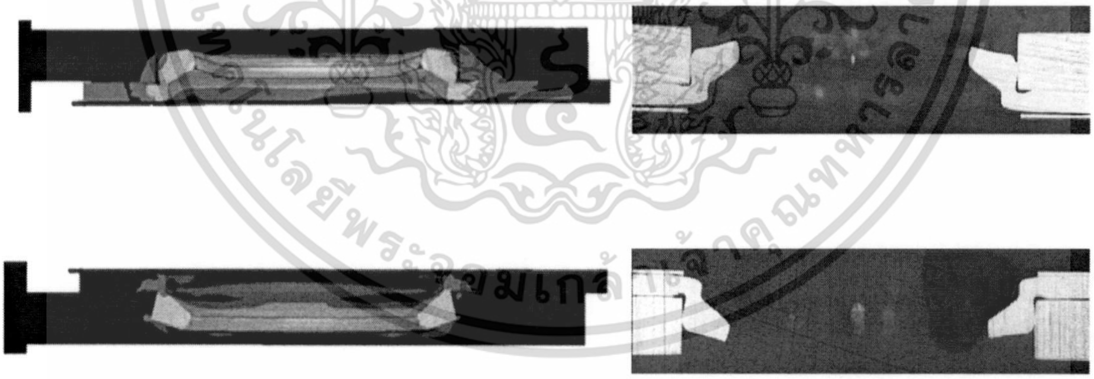
จากรูปที่ 5.7 พบว่าลักษณะการเสียรูปของ Boss Tower สำหรับ Down Tab มีลักษณะเป็นคลื่น (wavy) ตามแนวเส้นรอบวงและ Boss Tower จะมีการโก่งตัวขึ้นด้านบนตามแนวความยาวของ HSA ในทางกลับกัน Boss Tower จะมีการสียรูปแอ่นตัวปกติในแนวด้านข้างของ HSA ส่วน Up tab จะมีการเสียรูปเป็นคลื่นแต่ว่ามีความเป็นคลื่นน้อยกว่า Down tab เมื่อพิจารณาการเสียรูปของ Arm Pad พบว่ามีการแอ่นตัวน้อยกว่าการตอกยึดแบบเดิมและพบว่าช่องว่างระหว่าง Arm กับ Base Plate มีค่าลดลง (Gap to Arm) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองกับชิ้นงานจริงเปรียบเทียบการเสียรูปของ Boss Tower แสดงดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 เป็นค่าที่ได้จากการวัดจริงในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)

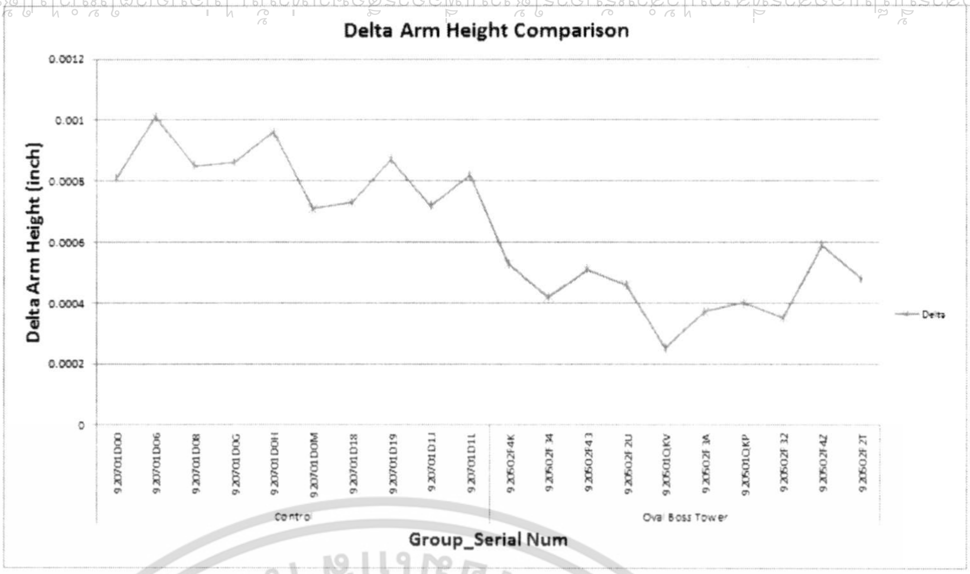
(ข)

รูปที่ 5.8 การแอ่นตัวของ Arm Pad หลังจากตอกยึดด้วยบอล (ก) Boss Tower แบบ Oval Boss Tower (ข) Boss Tower แบบเดิม



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการตอกยึดที่ได้จากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์และจากชิ้นงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

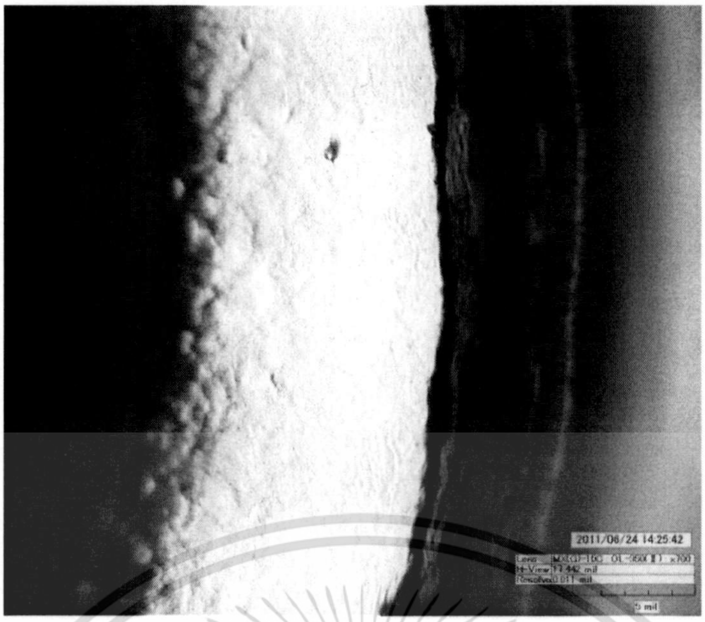


รูปที่ 5.10 ผลการทดลองเปรียบเทียบการโก่งตัวของ Arm Pad ระหว่าง Boss Tower แบบเดิม และ Oval Boss Tower

จากการทดลองตอกยึดด้วยหนึ่งบอลรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นถึงค่าผลต่างของ Arm Pad ก่อนนำมาตอกยึดขึ้นรูป HSA และหลังจากนำมาตอกยึดขึ้นรูป HSA พบว่าการตอกยึด HSA ด้วย Oval Boss Tower ทำให้การเสียรูปของ Arm Pad ลดลงนำไปสู่สมรรถนะของ HSA ที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาในด้านความสะอาดโดยพิจารณาจากจำนวนเศษอนุภาคของโลหะที่หลุดออกมาหลังจากการตอกยึดด้วยหนึ่งบอลพบว่าจำนวนอนุภาคเศษโลหะขนาดเล็กลดลงดังแสดงดังรูปที่ 5.12

รูปที่ 5.11 ภาพขยายศึกษาเศษอนุภาคโลหะขนาดเล็กโดยการตอกยึดแบบสองบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ภาพขยายศึกษาเศษอนุภาคโลหะขนาดเล็กโดยการตอกยึดแบบหนึ่งบอลพบว่ามีเศษอนุภาคโลหะน้อยกว่าการตอกยึดแบบสองบอล

ในขณะที่รูปที่ 5.11 แสดงให้ทราบว่าการตอกยึดด้วยสองบอลมีเศษอนุภาคโลหะเกิดขึ้นหลังจากการตอกยึดด้วยสองบอลมีมากกว่าการตอกยึดด้วยบอลเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

จากการศึกษาด้วยแบบจำลองและการทดลองทำให้ได้รูปแบบของ Boss Tower ซึ่งสามารถใช้กับการตอกยึด HSA ด้วยหนึ่งบอล อย่างไรก็ตามการลดการเสียรูปของ Swage Pad สามารถออกแบบ Boss Tower ได้หลายแบบ กระบวนการตอกยึดด้วยหนึ่งบอลในงานวิจัยนี้เครื่องที่ใช้ในการตอกยึดด้วยบอลใช้ความเร็วของ Pin ที่ 0.7 นิ้วต่อนาที ขนาดของแรงกดของหัวกด (Nose) อยู่ที่ 250 ปอนด์ ขนาดของบอลที่ใช้คือ 0.059 นิ้ว Spacer Key ที่ใช้เป็นแบบสมมาตรด้านข้างซ้ายและขวาของ Suspension ที่นำมาตอกยึด

งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

6.1.1 Spacer Key Land มีผลต่อคุณภาพของ HSA พบว่าความสมมาตรซ้ายและขวาของ Spacer Key จะทำให้ HSA มีคุณภาพดีว่าแบบปัจจุบัน

6.1.2 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของ Spacer Key จำเป็นต้องมี Chamfer ที่ขอบรูยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถลดรอยตำหนิจากการขูดของ Spacer Key

6.1.3 ตัวแปรที่ทำให้ Base Plate มีการเสียรูปมากที่สุดคือ Relief Ring Width ดังนั้นการออกแบบ Boss Tower ที่เหมาะสม จะสามารถใช้ได้ทั้งการตอกยึดขึ้นรูป HSA ในปัจจุบัน และหนึ่งบอลโดยไม่ส่งผลต่อค่า HGA Torque Out

6.1.4 การจำลองศึกษาก่อนการออกแบบ Boss Tower ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้าง HSA

6.1.5 การตอกยึดด้วยหนึ่งบอลสามารถใช้ได้มากกว่าสิบหัวอ่าน

6.1.6 เศษของโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการตอกยึดขึ้นรูป HSA ด้วยหนึ่งบอล มีจำนวนลดลง เมื่อเทียบกับการใช้สอง และสามบอล

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การแก้ปัญหาการเสียรูปของ Arm Actuator นอกจากจะพัฒนา Boss Tower ให้มีรูปร่างและขนาดแล้ว การพัฒนา Arm Pad เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่ต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการผลิต

6.2.2 ตัวแปรแรกที่จำเป็นสำหรับการสร้าง HSA คือค่า HGA Torque Out ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่า HGA Torque Out ก่อนค่าอื่นๆ จากนั้นจึงค่อยพิจารณาตัวแปรต้นของ HSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ข้อจำกัดของการตอกยึดด้วยหนึ่งบอลนั้นขึ้นอยู่กับการได้แนวของ Pin ในกรณีที่มีหัวอ่านมากกว่าสิบหัวอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ANSYS Theory Reference, 2006

ANSYS Training Manual: **Explicit Dynamics With ANSYS LS-Dyna**, release 7.1, Edition2.

Drean M., Habraken A.M., Muzeau J.P.; Bouchair A. "Modelling of the Swaging Process during the Installation of Swaged Bolts." **Journal of Constructional Steel Research,** Vol. 46, No. 1, April 1998, pp. 256-257(2)

Frank A. McClintock, "Mechanical Behavior of Materials." Addison-Weiley,1966

Hitachi Global Storage Technologies Netherlands B.V., Amsterdam (NL). "Disk Drive with Controlled Pitch Static Attitude of Slider on Integrated Lead Suspensions by improved Plastic Deformation Processing." **United States Patent,** No. : US 6,992,862 B2, (2006).

I. Diewanit, K. Sittipongpanich, T. Chettaisong, and V. Thaveeprungsriporn, "Baseplate Design for Reducting Deflection of Suspension Assembly by Swaging." **United States Patent.,** No. US 2005/0078407 A1, Apr. 2005.

Jian Yang, Chen-Chi Lin, Shahab Tabrizi, "Finite Element Simulation of Ball Swaging Process of Jointing HGA With Actuator Arm and Gram Load Calculation." **ASME Information Storage and Processing Systems Conference.**, Santa Clara, CA, 2007

Jongpradist, P., Rotbunsongsri, R., Sukkana, C., Sungtong, W. "Parametric Study of Baseplate Geometry Using Finite Element Analysis." **DST-CON 2009.**, Bangkok, Thailand

J.R. Cho, J.I. Song, K.T. Noh and D.H. Jeon. "Nonlinear finite element analysis of swaging process for automobile power steering hose." **Journal of Materials Processing Technology.**, Vol. 170, Issues 1-2 , Dec. 2005., pp 50-57

K. Aoki and K. Aruga, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives." **Microsyst. Technol.**, vol.13, pp. 943-949, 2007.

Li RONG, Zuo-ren NIE and Tie-yong ZUO, "FEA modeling of effect of axial feeding velocity on strain field of rotary swaging process of pure magnesium." **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Vol.16, Issue 5, Oct. 2006, pp. 1015-1020

P. Wriggers, Computational Contact Mechanics, John Wiley and Sons, 2002, pp. 161-255

"Seagate Technology Summit 2007," Feb. 2008, Hutchinson Technology Corp.

S. K. Wadhwa, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process." **IEEE Trans. Magn.**, vol. 32, no. 3, pp. 1837-1842, May. 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T. Kamnerdtong, S. Chutima and K. Ekintumas. "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation", **Eighth Asian Symposium on Visualization**, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

University of Tennessee, Dept. of Materials Science and Engineering. (2007). **Introduction to Materials Science**, Chapter 6, Mechanical Properties of Metals. Retrieved Dec.20, 2007, from http://web.utk.edu/~prack/mse201/Chapter%206%20Mechanical%20Properties.pdf

Y. Zhang and R. R. Wolter, "Baseplate for a Disk Drive Head Suspension", **United States Patent** No.: US 7,339,767 B1, Mar. 2008.

Y. Zhang, W. A. Linnertz, R. E. Fossum and S. J. V. Sloun, "Swaging-Optimized Baseplate for Disk Drive Head Suspension" **United States Patent** No.: US 7,042,680 B1, May. 2006.

Yogesh..Jaluria,Design and Optimization of Thermal Systems 2nd,CRC Press,2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองสมรรถนะของ HSA, ค่า HGA Torque และ Resonance Test

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

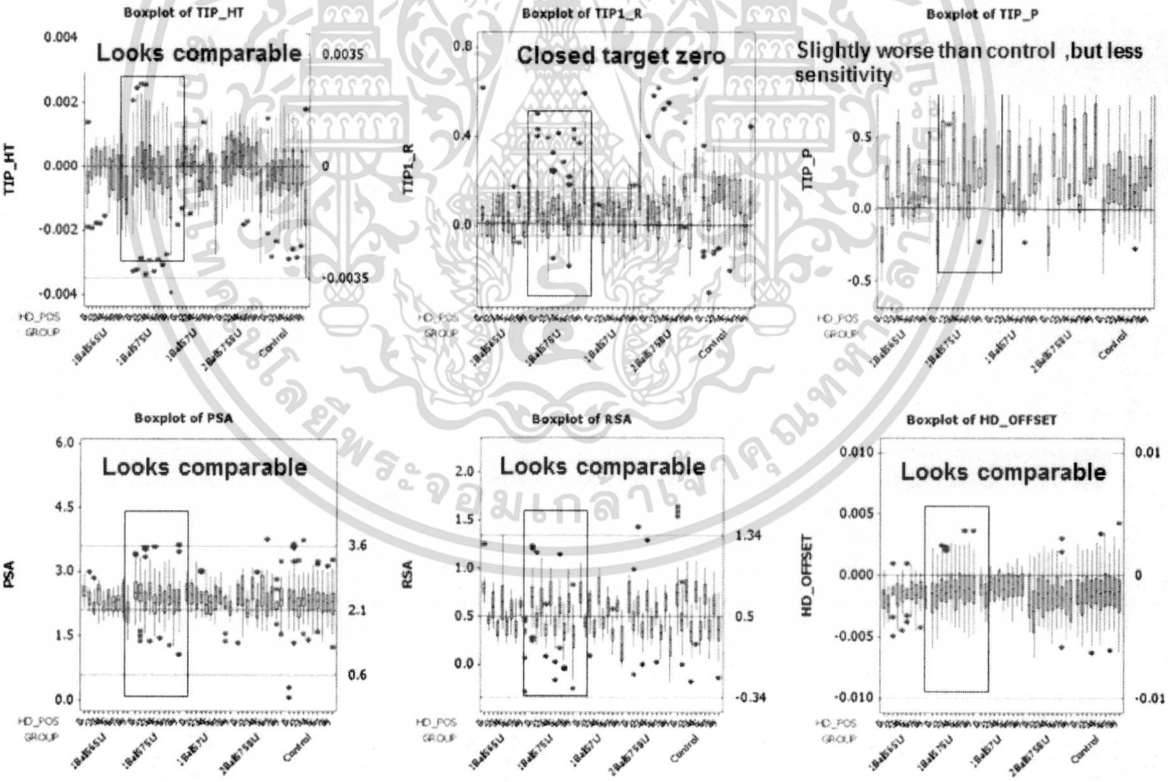
FW16 Normal — 290 Units Control

	Parameter	USL	LSL		HD POS 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Control Mapross	PSA	3.6	0.6	Mean	2.35	2.31	2.20	2.34	2.20	2.35	2.20	2.37	2.19	2.19
				Stdev	0.35	0.32	0.31	0.37	0.30	0.34	0.30	0.33	0.32	0.33
				Ppk (>1.33)	1.20	1.33	1.49	1.15	1.57	1.22	1.54	1.26	1.49	1.42
	RSA	1.34	-0.34	Mean	0.43	0.35	0.46	0.37	0.44	0.39	0.42	0.39	0.42	0.40
				Stdev	0.16	0.13	0.14	0.12	0.15	0.14	0.13	0.12	0.16	0.14
				Ppk (>1.33)	1.63	1.75	1.93	2.00	1.73	1.75	1.94	2.05	1.63	1.73
	TIP_HT	0.0035	-0.0035	Mean	-0.00046	-0.00048	-0.00007	-0.00044	-0.00005	-0.00050	-0.00005	-0.00041	-0.00012	-0.00127
				Stdev	0.00063	0.00066	0.00063	0.00064	0.00066	0.00068	0.00064	0.00066	0.00064	0.00076
				Ppk (>1.33)	1.60	1.52	1.82	1.59	1.73	1.48	1.79	1.57	1.76	0.98
	HD Offset	0.01	-0.01	Mean	-0.00070	-0.00120	-0.00136	-0.00140	-0.00119	-0.00114	-0.00128	-0.00103	-0.00129	-0.00099
				Stdev	0.00275	0.00212	0.00192	0.00198	0.00196	0.00207	0.00203	0.00207	0.00208	0.00221
				Ppk (>1.33)	1.13	1.38	1.50	1.45	1.50	1.43	1.43	1.44	1.39	1.36
Gramload	Gramload	3.06	1.94	Mean	2.48	2.46	2.59	2.46	2.59	2.46	2.59	2.45	2.59	2.42
				Stdev	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06
				Ppk (>1.33)	3.42	2.79	2.98	3.32	2.79	2.51	3.11	3.28	2.79	2.80

FW16 1 ball — 18 units 1 ball + normal hole

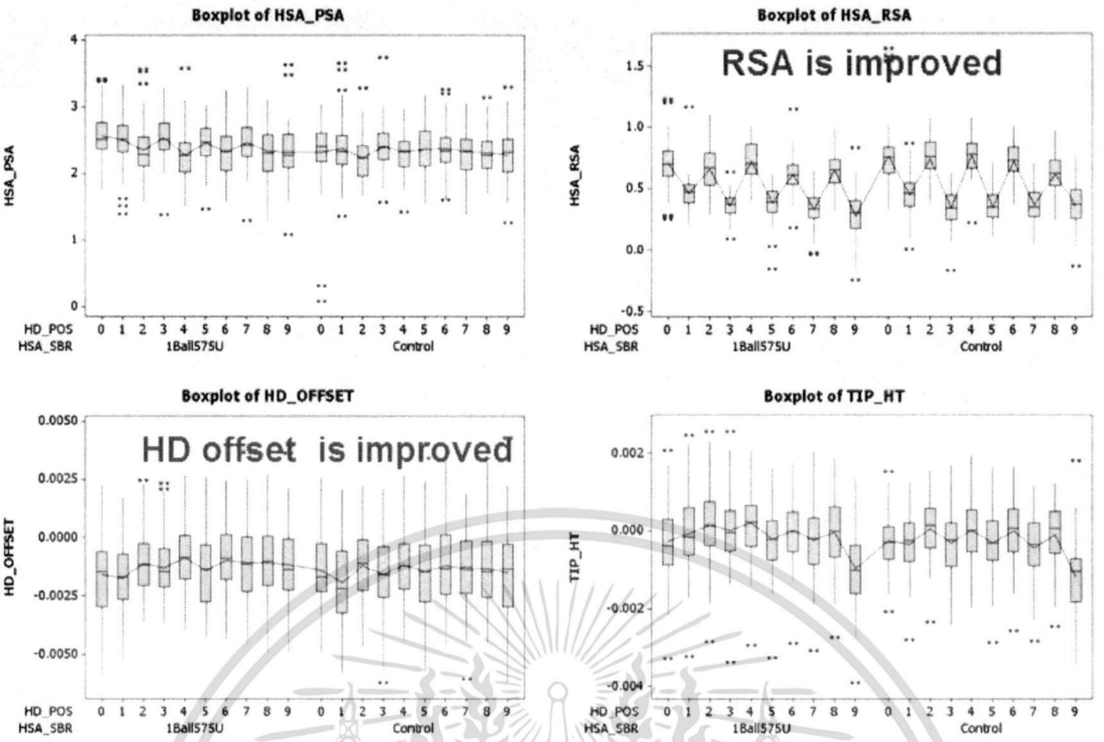
	Parameter	USL	LSL		HD POS 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eval Maporss	PSA	3.6	0.6	Mean	2.63	1.84	2.53	1.96	2.48	1.95	2.59	1.86	2.57	1.83
				Stdev	0.23	0.27	0.22	0.29	0.26	0.25	0.18	0.23	0.22	0.23
				Ppk (>1.33)	1.38	1.51	1.64	1.58	1.46	1.76	1.85	1.80	1.57	1.77
	RSA	1.34	-0.34	Mean	0.58	0.38	0.61	0.47	0.59	0.44	0.58	0.48	0.54	0.47
				Stdev	0.15	0.12	0.13	0.15	0.18	0.14	0.16	0.14	0.18	0.10
				Ppk (>1.33)	1.73	2.08	1.95	1.84	1.36	1.91	1.55	1.97	1.49	2.67
	TIP_HT	0.0035	-0.0035	Mean	-0.00147	-0.00172	-0.00128	-0.00158	-0.00132	-0.00155	-0.00124	-0.00178	-0.00120	-0.00198
				Stdev	0.00042	0.00046	0.00055	0.00049	0.00053	0.00046	0.00050	0.00041	0.00046	0.00053
				Ppk (>1.33)	1.61	1.28	1.36	1.31	1.36	1.42	1.50	1.41	1.66	0.95
	HD Offset	0.01	-0.01	Mean	0.00153	0.00105	0.00174	0.00082	0.00176	0.00094	0.00184	0.00067	0.00162	0.00069
				Stdev	0.00178	0.00183	0.00172	0.00179	0.00142	0.00162	0.00132	0.00114	0.00149	0.00162
				Ppk (>1.33)	1.58	1.63	1.60	1.71	1.94	1.86	2.06	2.74	1.88	1.92
Gramload	Gramload	3.06	1.94	Mean	2.43	2.50	2.51	2.52	2.53	2.49	2.52	2.50	2.52	2.46
				Stdev	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.06	0.07	0.09	0.05
				Ppk (>1.33)	2.19	2.78	2.72	2.50	2.36	2.99	2.86	2.68	2.11	3.29

รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง Boss Tower แบบเดิม และ Oval Boss Tower

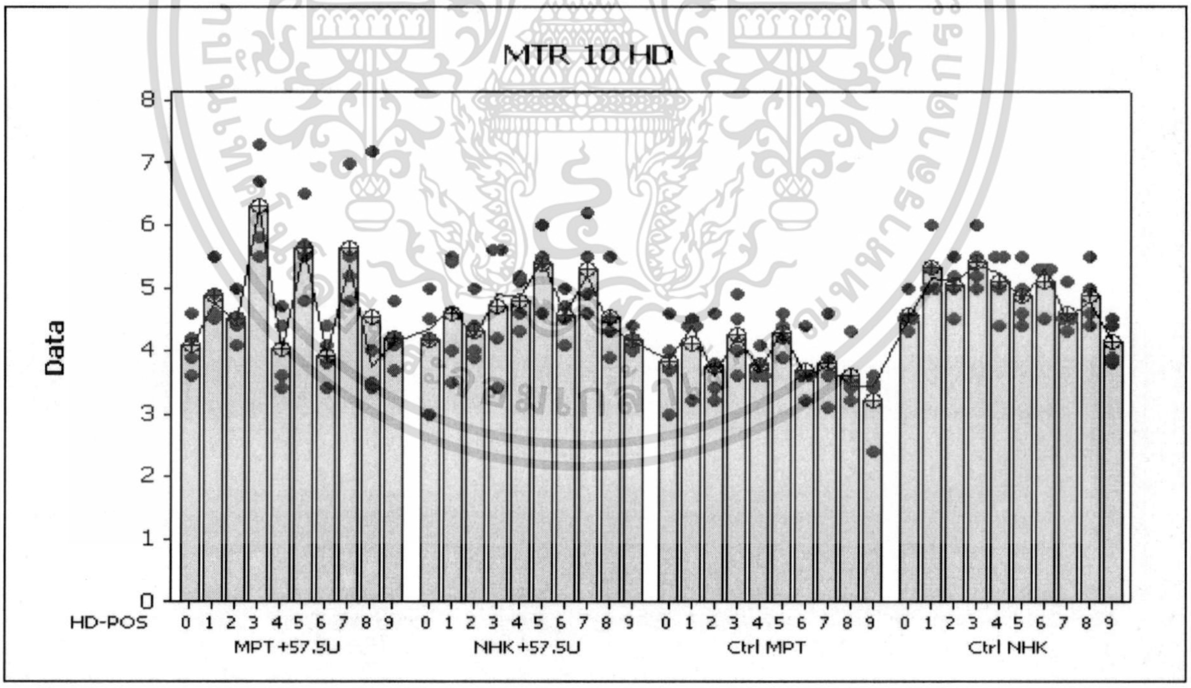


รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่า HSA KPIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

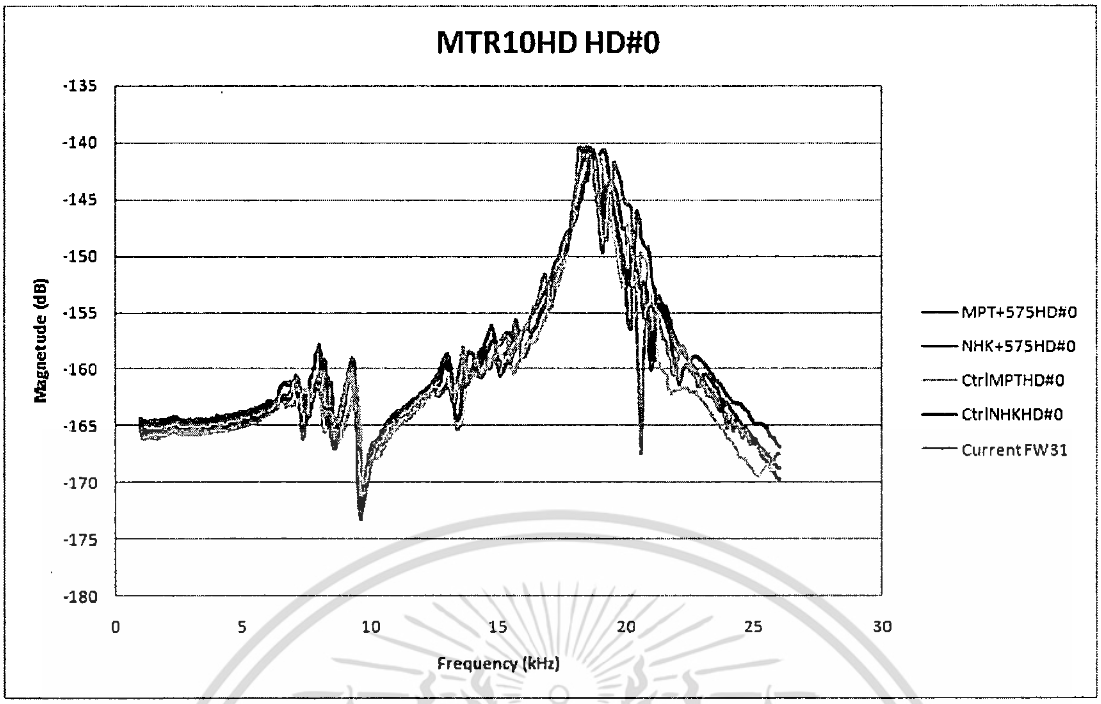


รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่า HSA CTQ

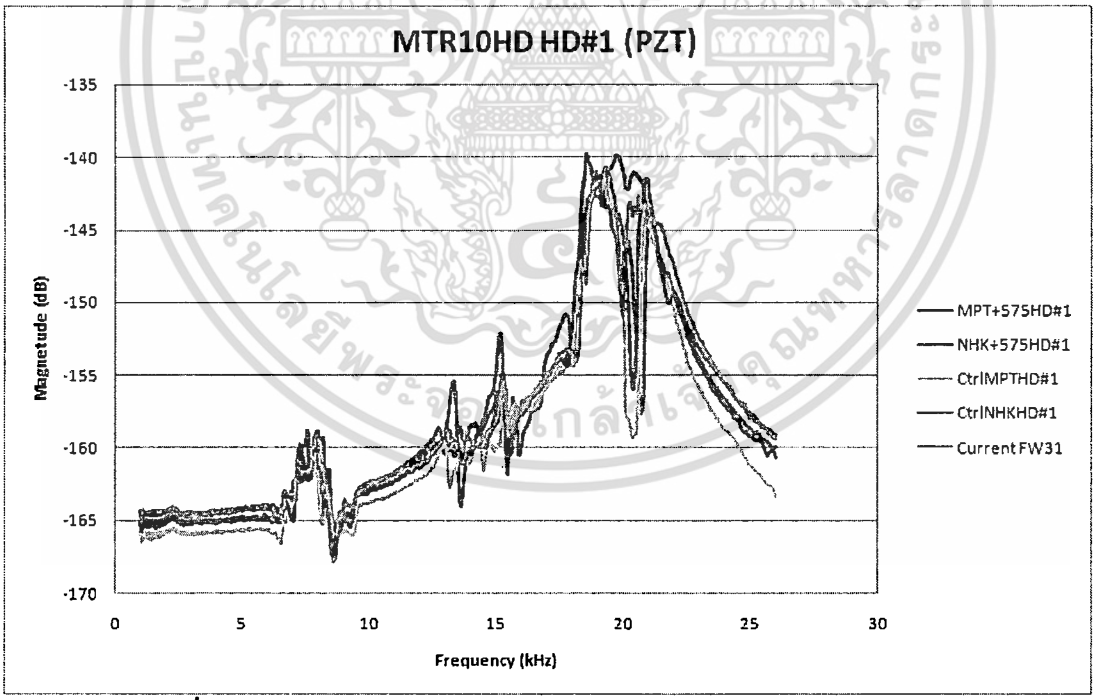


รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่า HGA Torque Out ระหว่าง Boss Tower แบบเดิม และ Oval Boss Tower

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

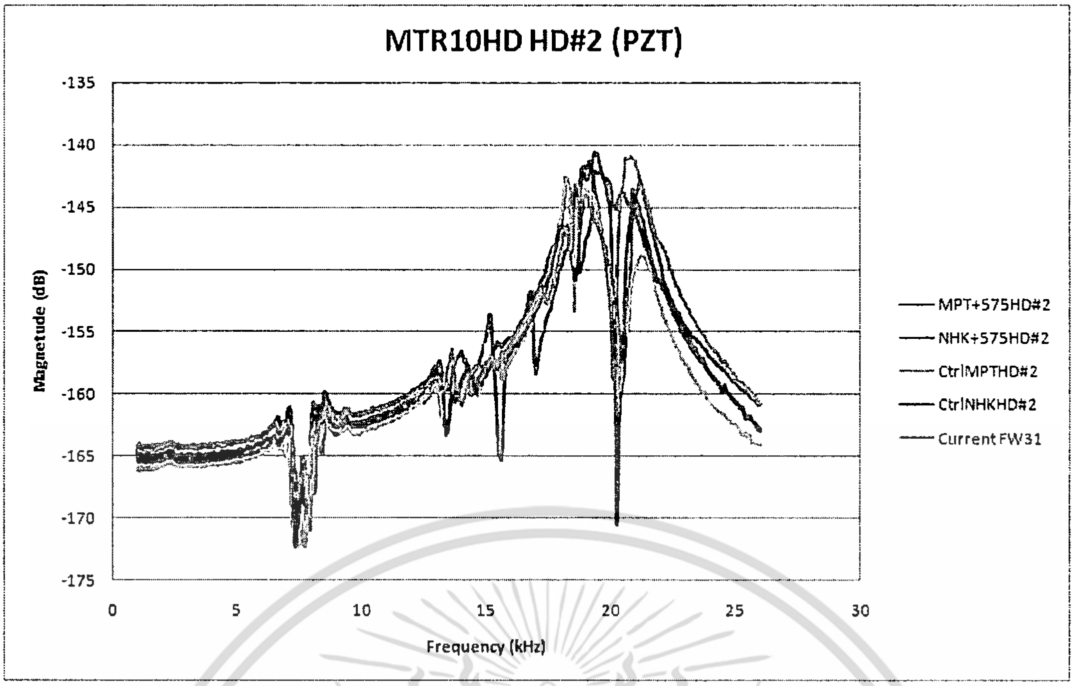


รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#0

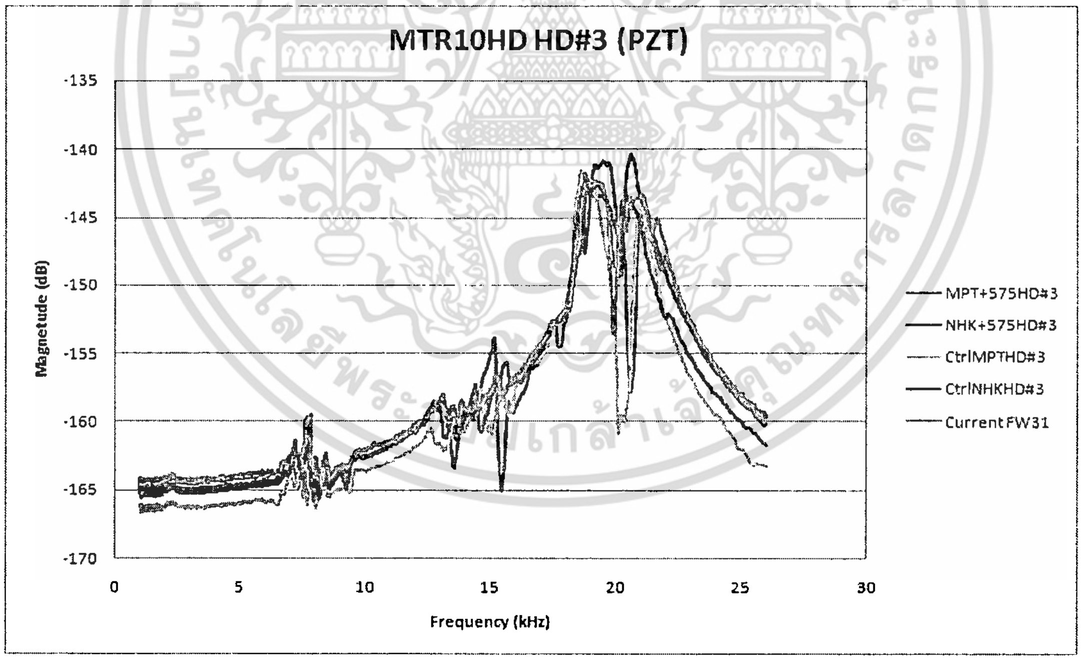


รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

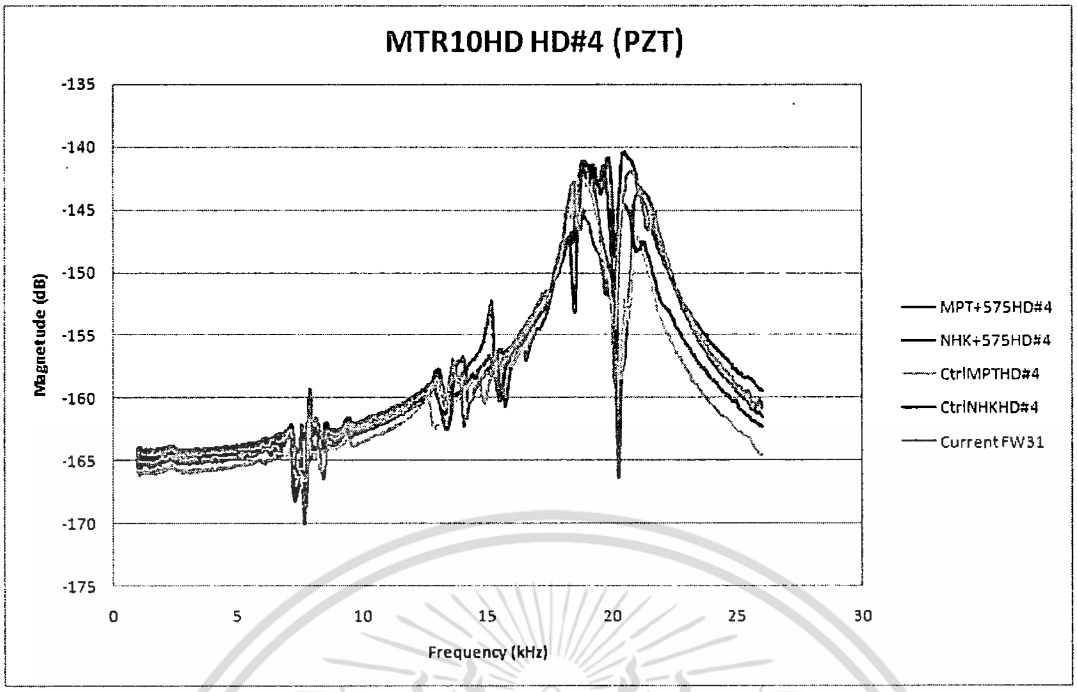


รูปที่ ก.7 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#2

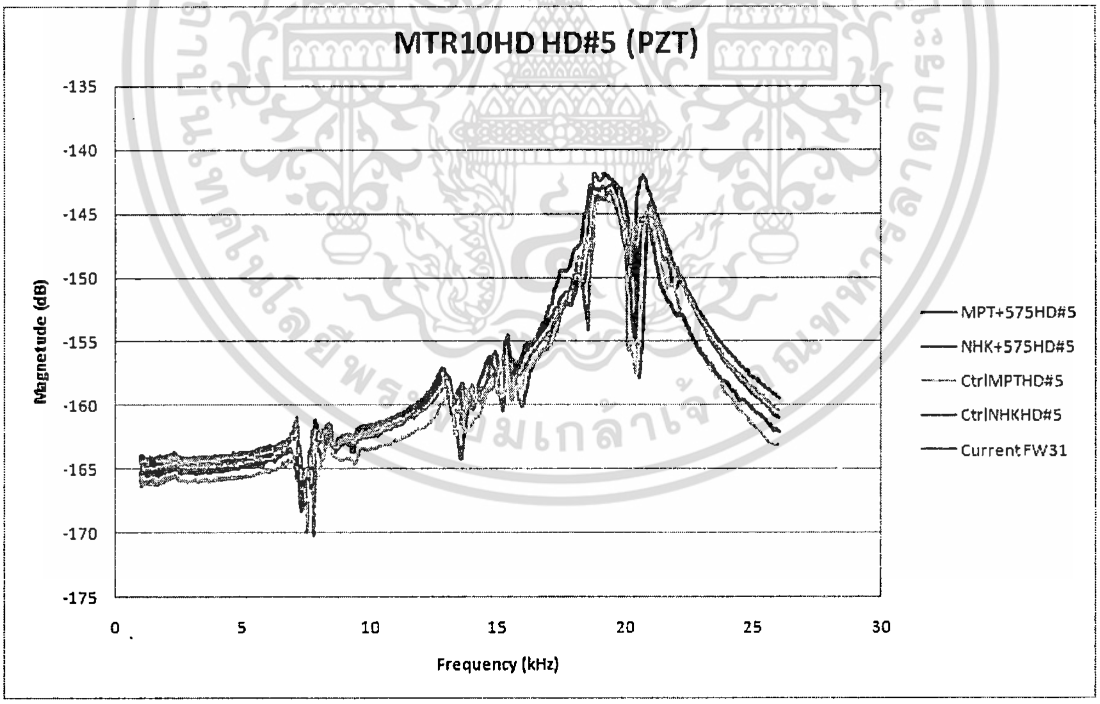


รูปที่ ก.8 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

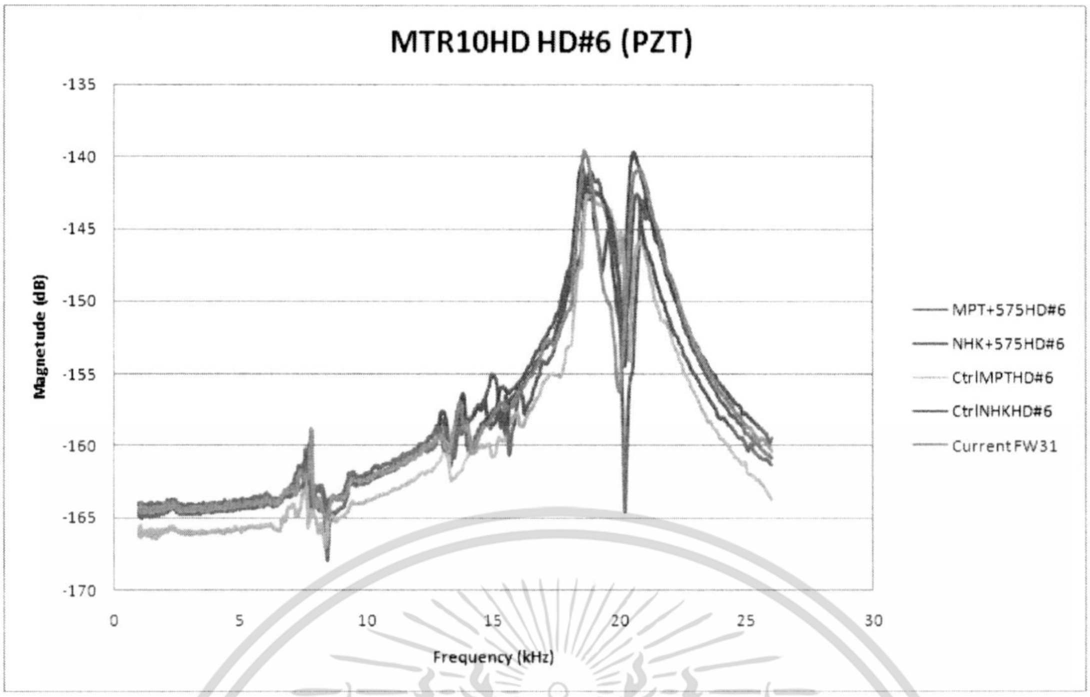


รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#4

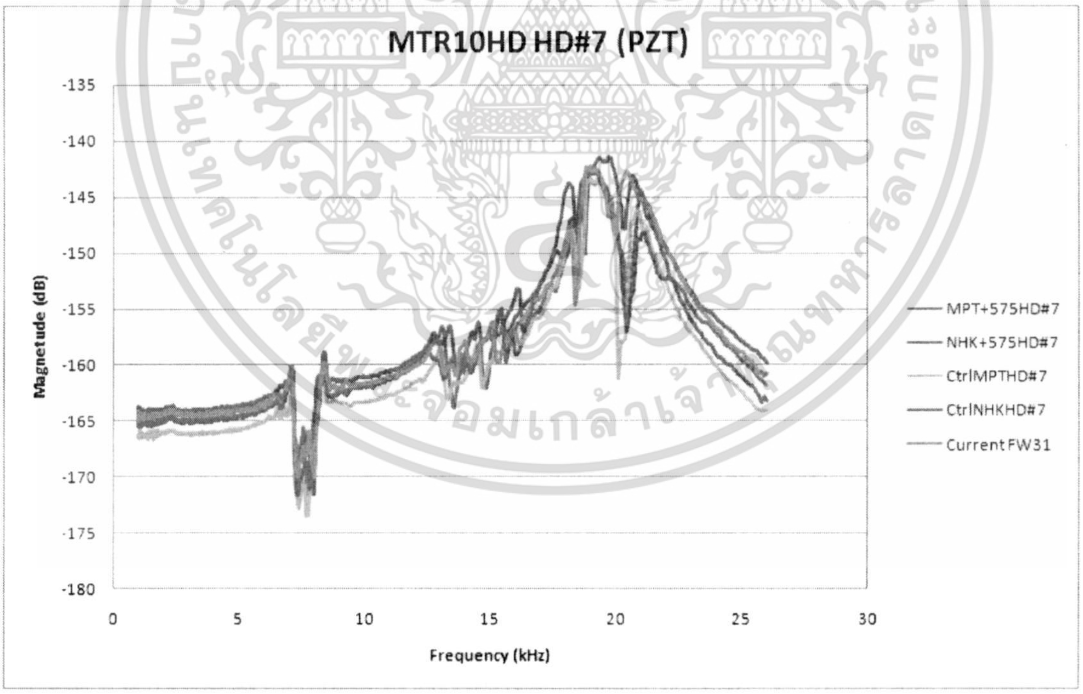


รูปที่ ก.10 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

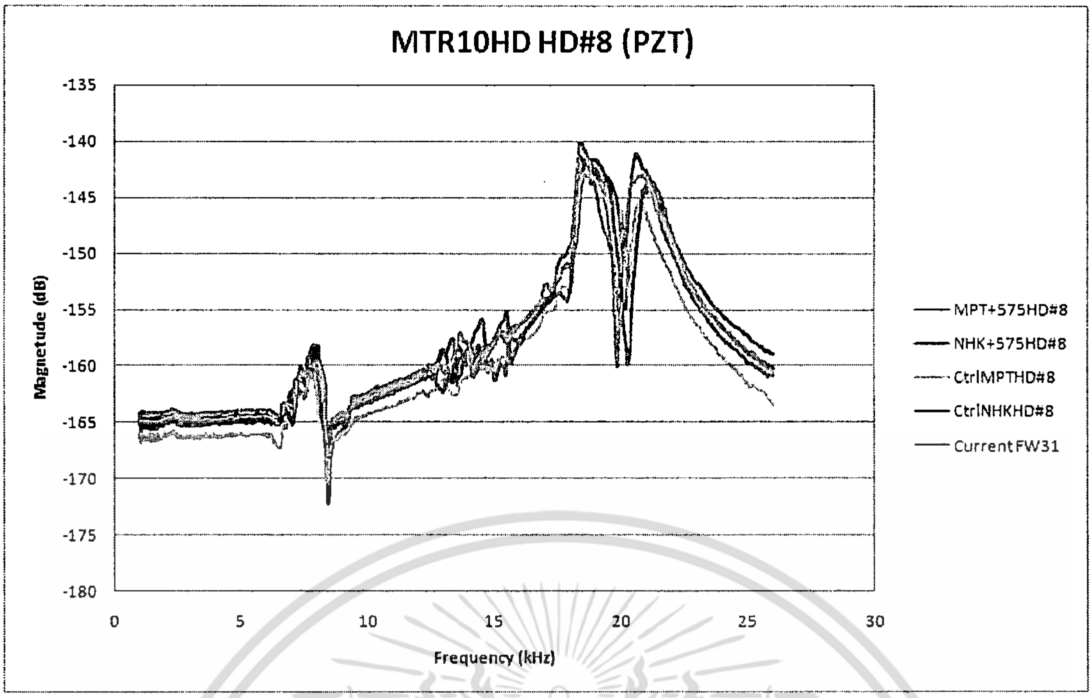


รูปที่ ก.11 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#6

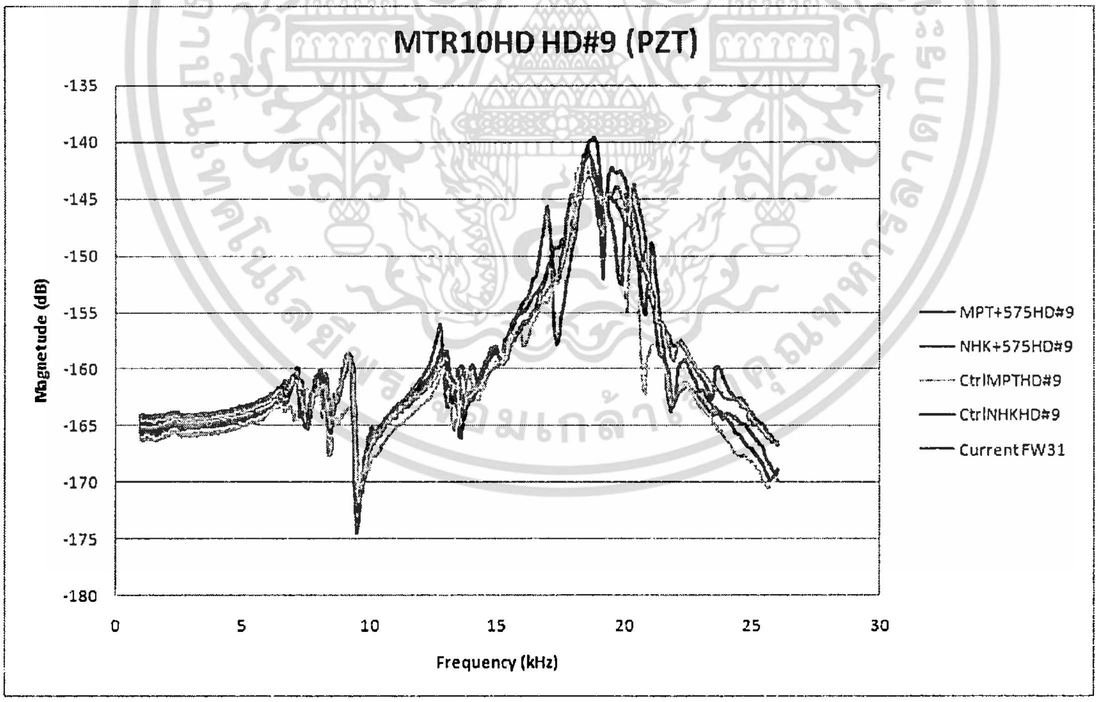


รูปที่ ก.12 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.13 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#8



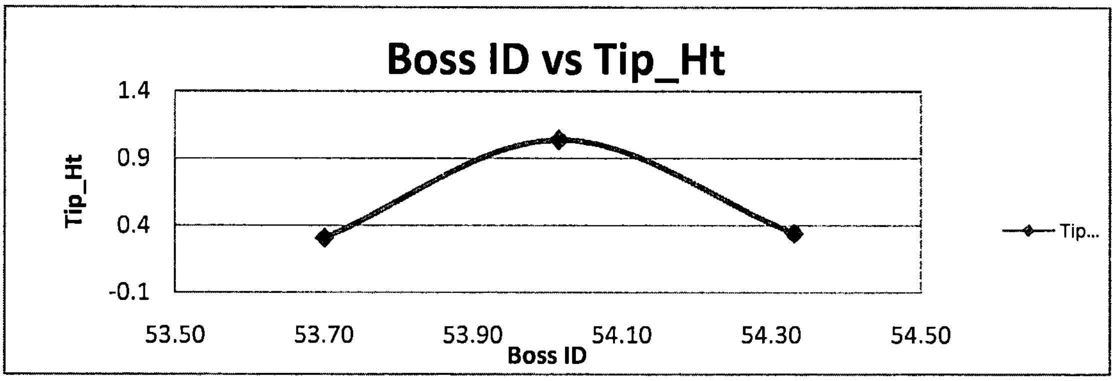
รูปที่ ก.14 ผลการทดสอบ Resonance ของ HD#9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

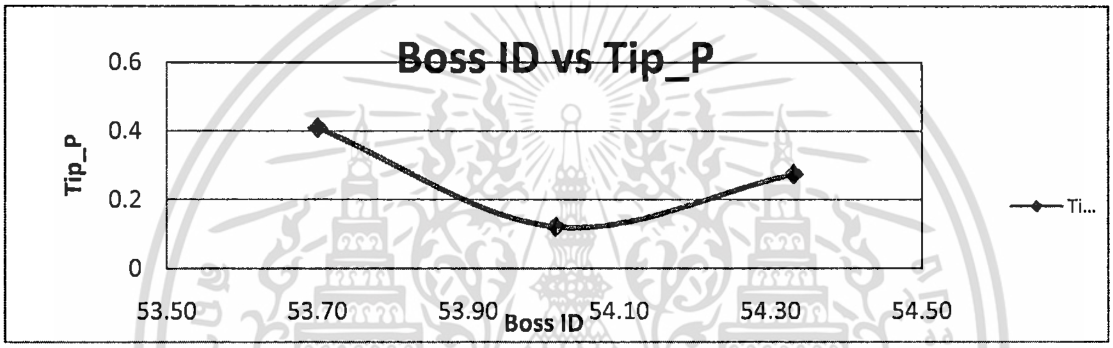
ภาคผนวก ข.

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ

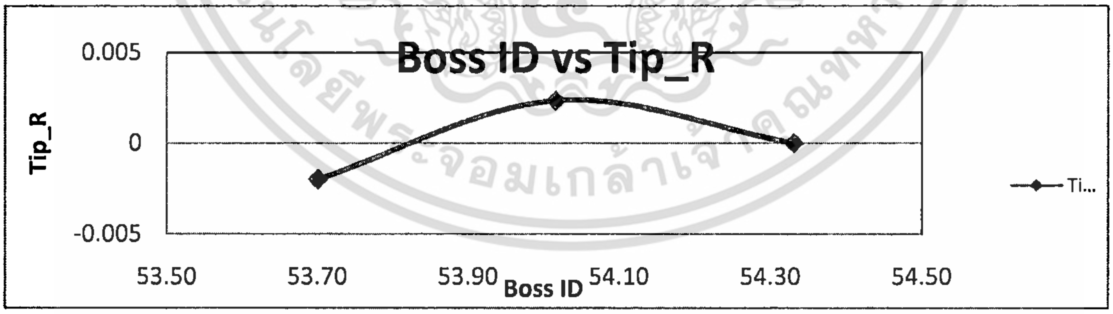
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss ID และ Tip_Ht

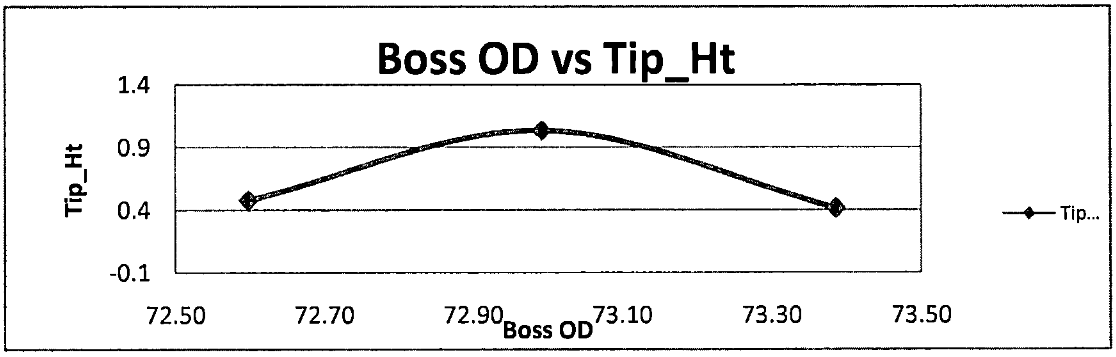


รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss ID และ Tip_P

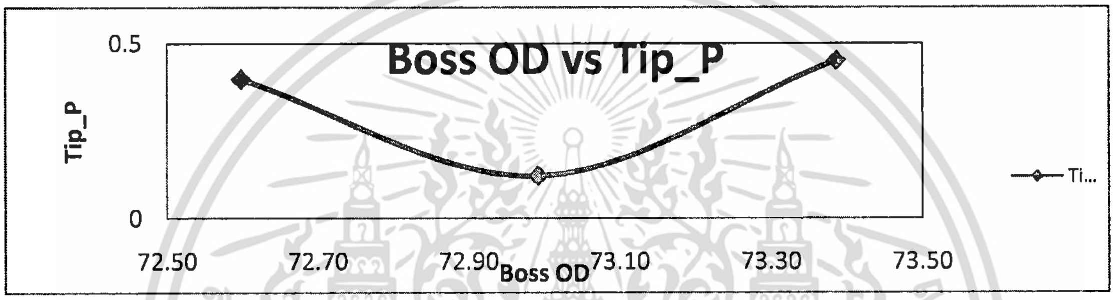


รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss ID และ Tip_R

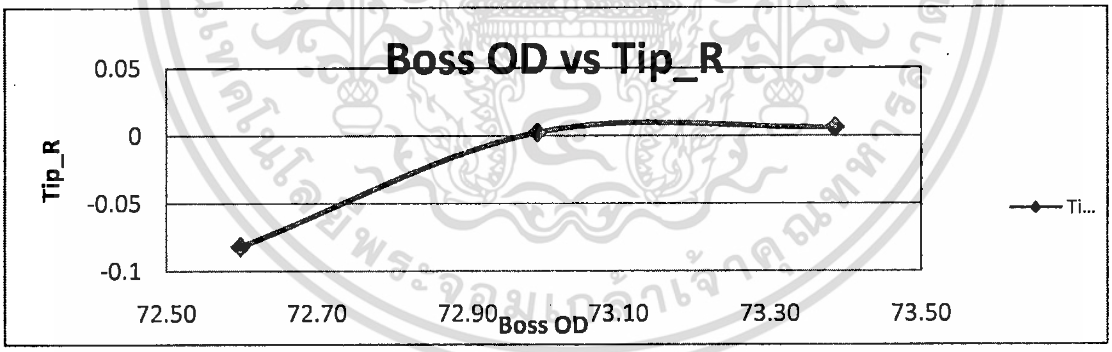
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss OD และ Tip_Ht

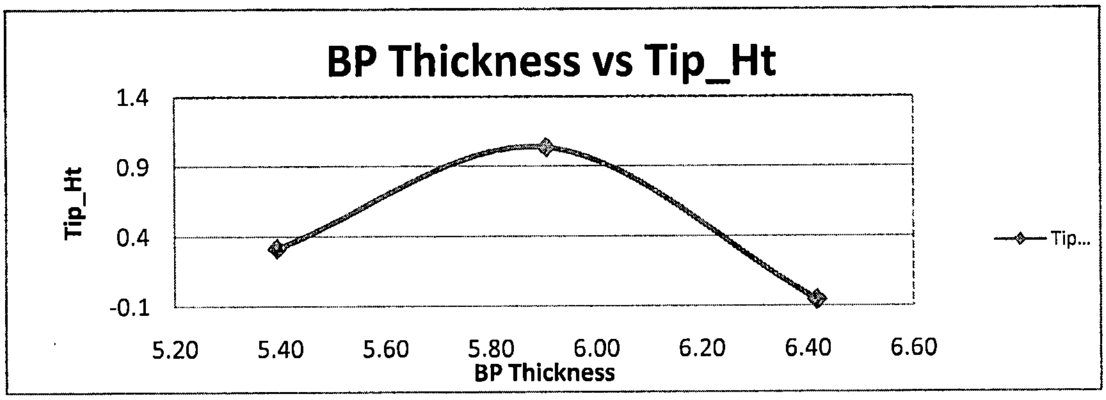


รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss OD และ Tip_P

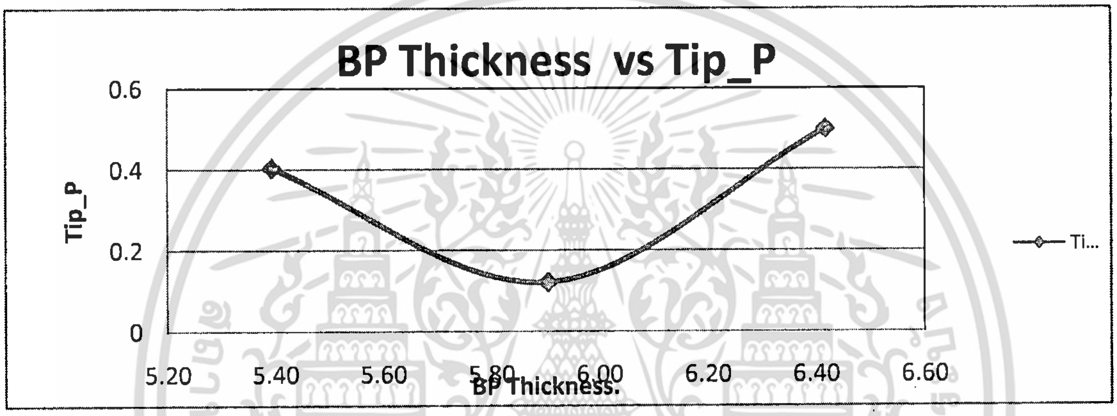


รูปที่ ข.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss OD และ Tip_R

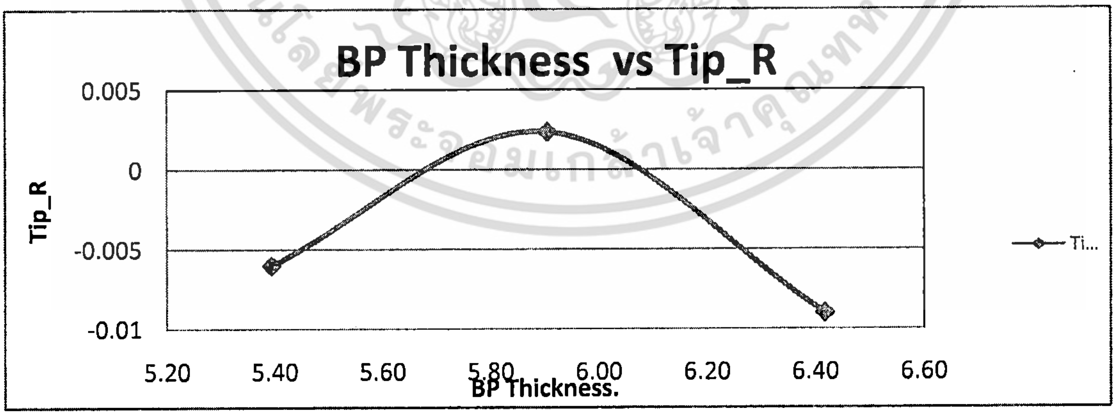
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BP Thickness และ Tip_Ht

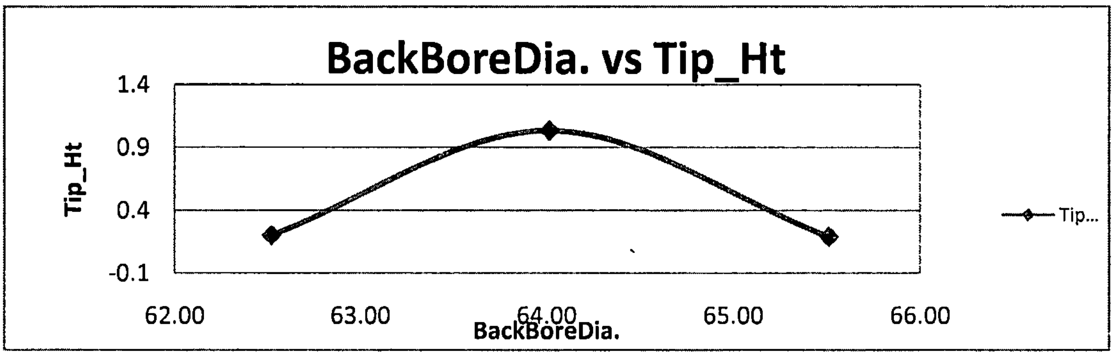


รูปที่ ข.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BP Thickness และ Tip_P

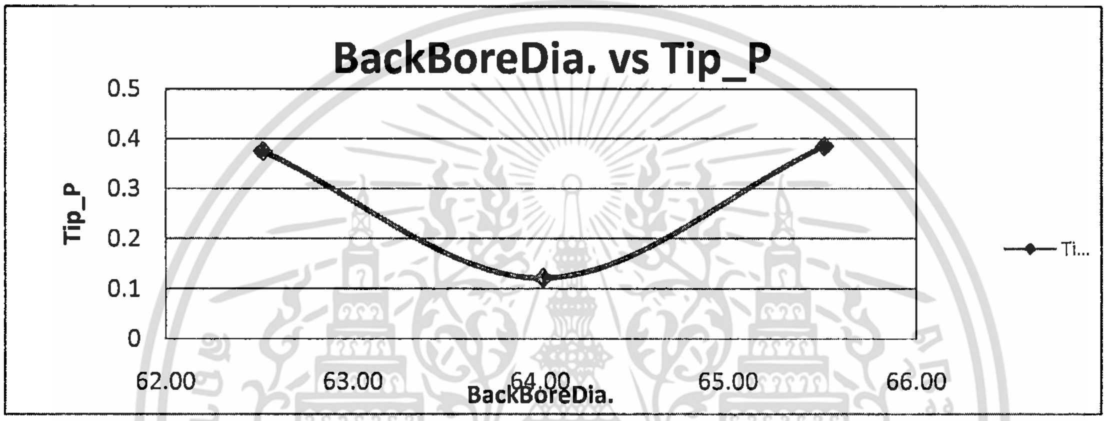


รูปที่ ข.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BP Thickness และ Tip_R

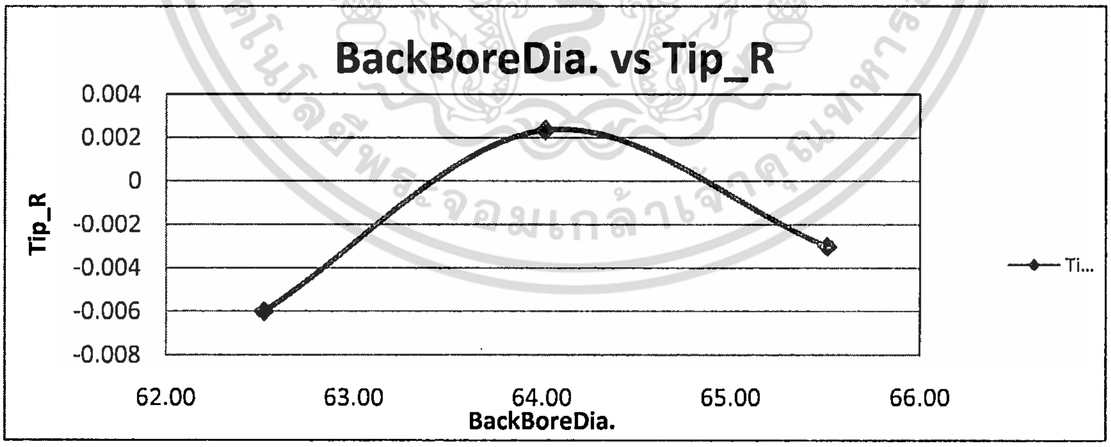
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BackNoreDia และ Tip_Ht

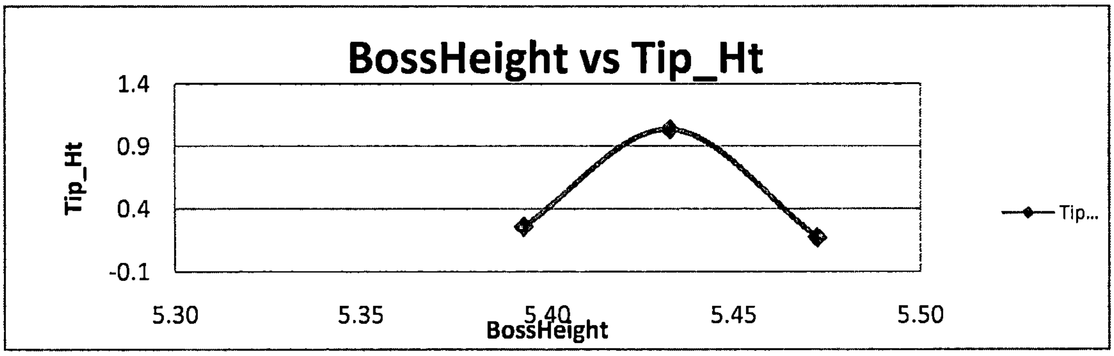


รูปที่ ข.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BackNoreDia และ Tip_P

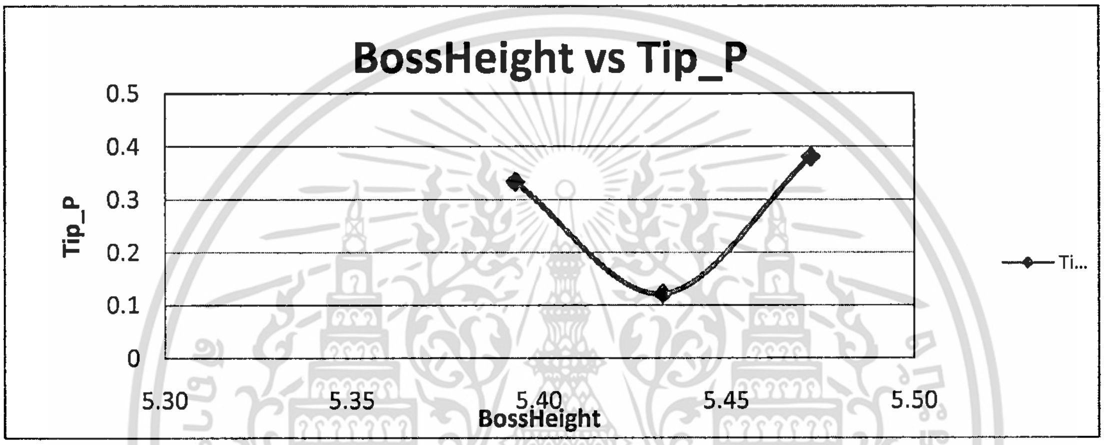


รูปที่ ข.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BackNoreDia และ Tip_R

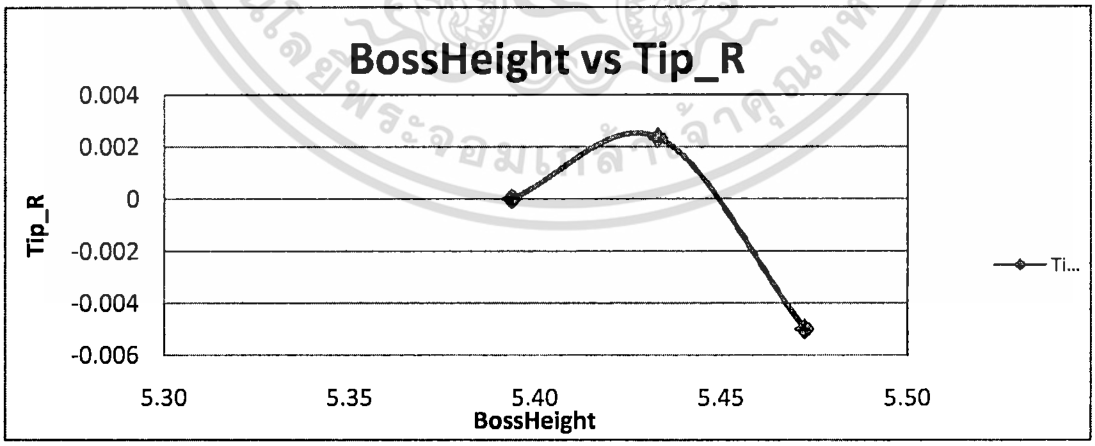
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss Height และ Tip_Ht

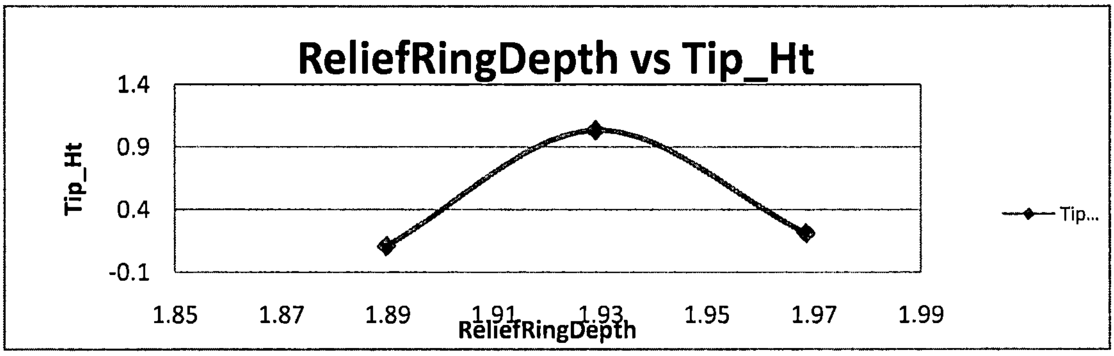


รูปที่ ข.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss Height และ Tip_P

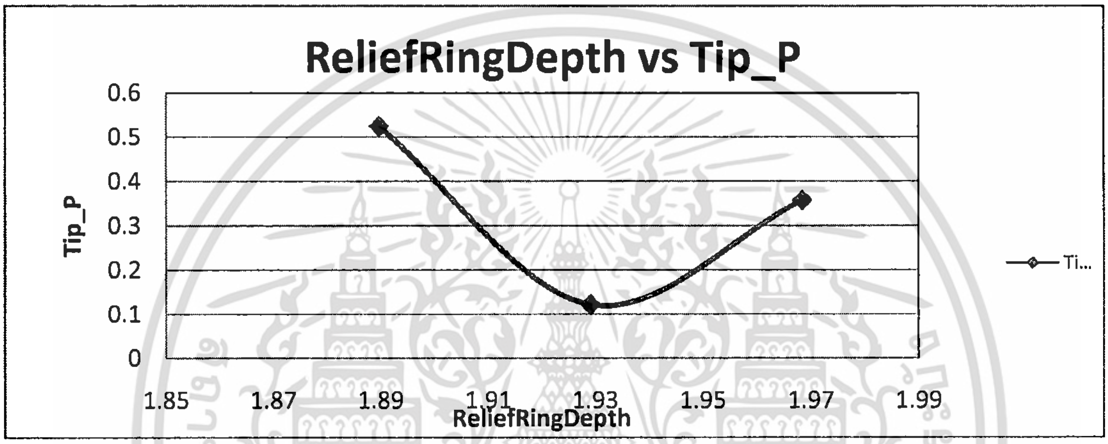


รูปที่ ข.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Boss Height และ Tip_R

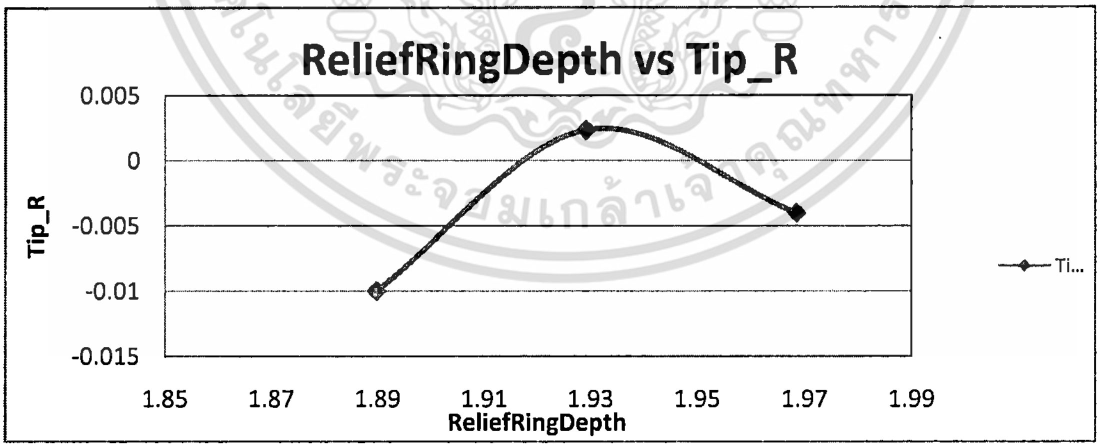
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relief Ring Depth และ Tip_Ht

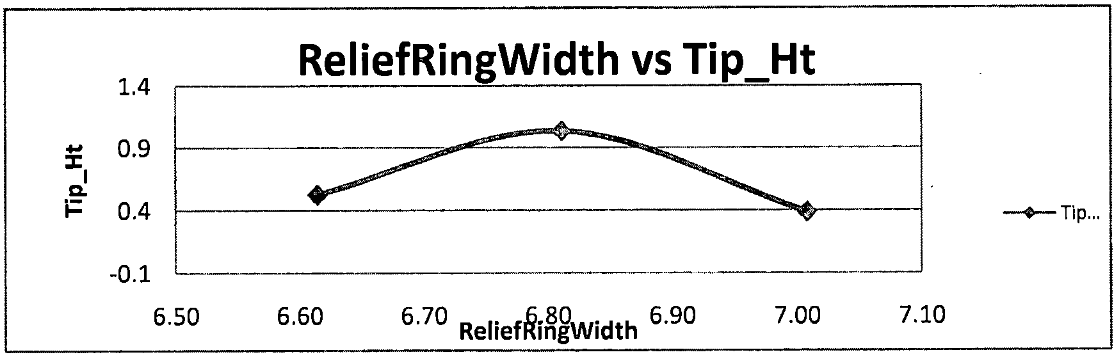


รูปที่ ข.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relief Ring Depth และ Tip_P

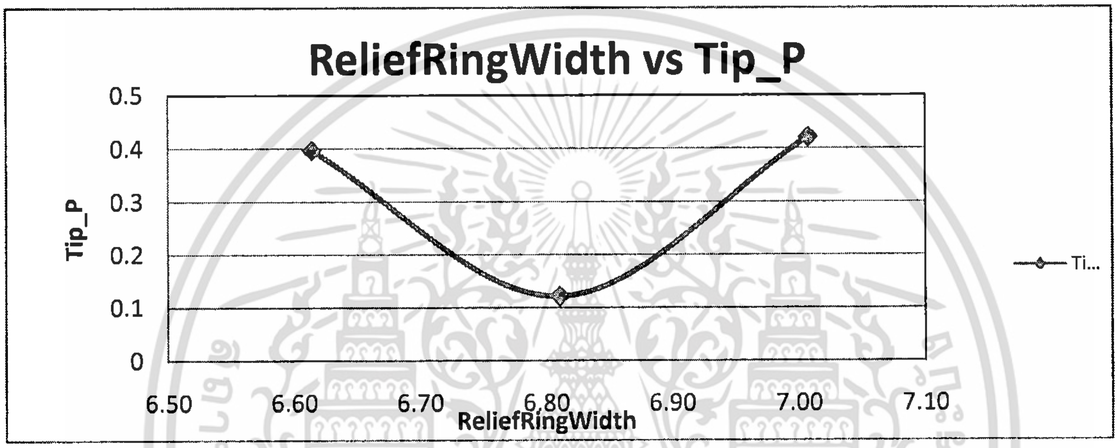


รูปที่ ข.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relief Ring Depth และ Tip_R

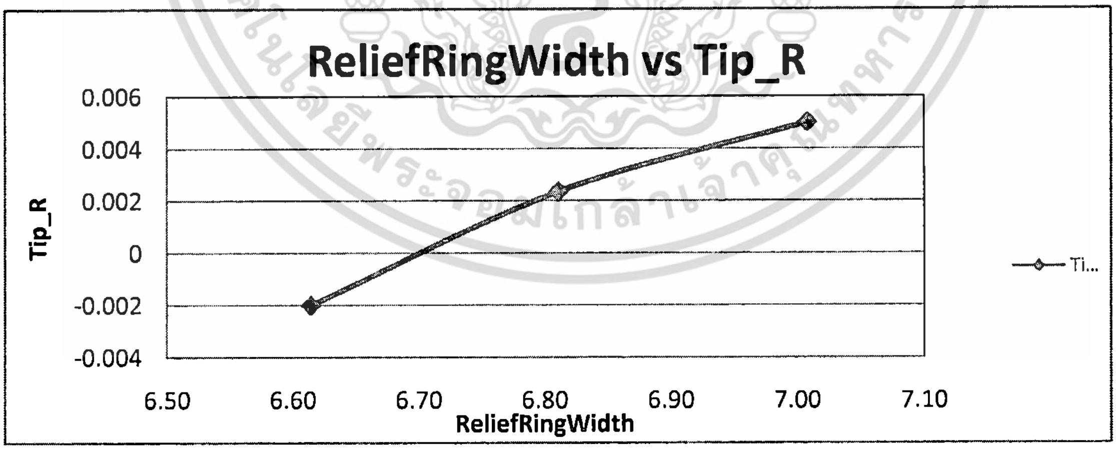
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relief Ring Width และ Tip_Ht

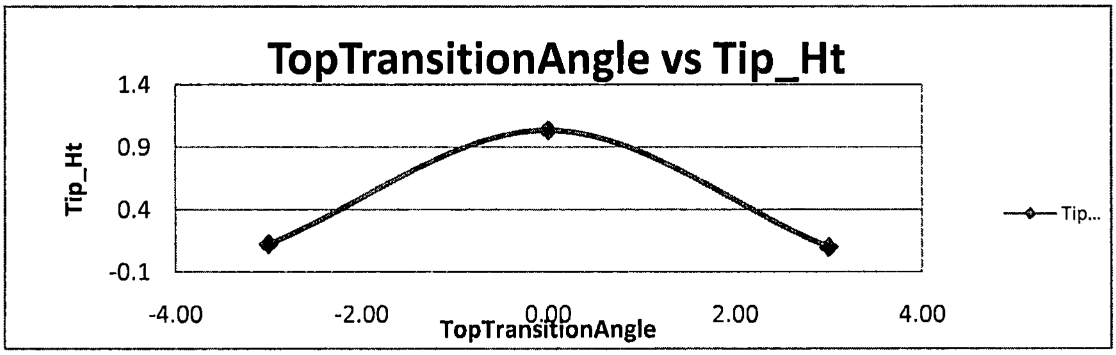


รูปที่ ข.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relief Ring Width และ Tip_P

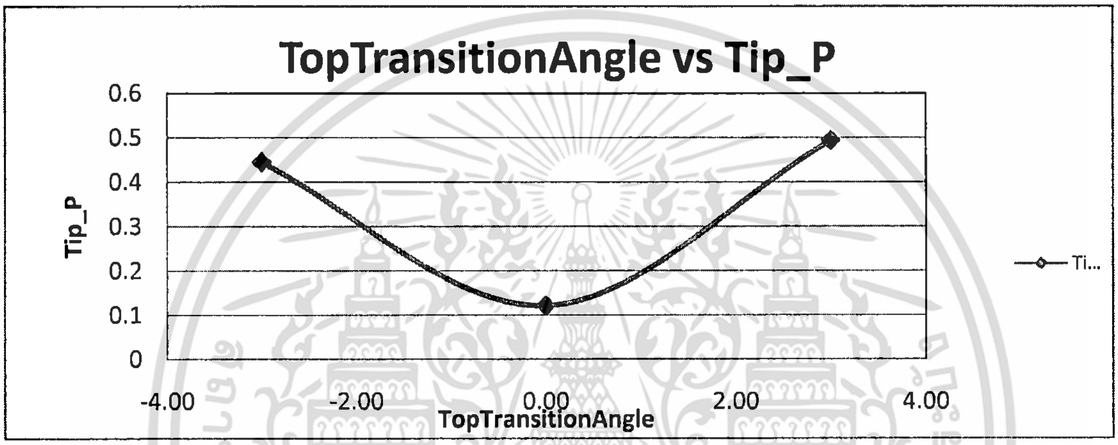


รูปที่ ข.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relief Ring Width และ Tip_R

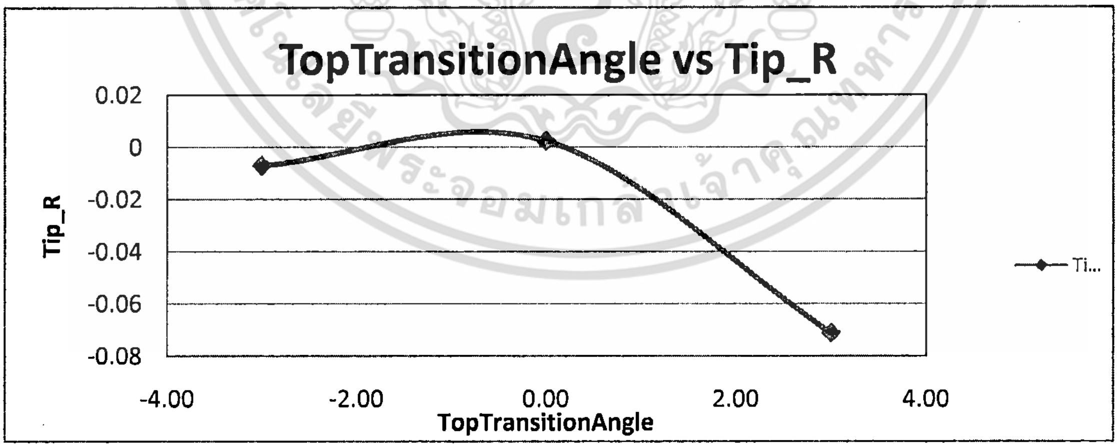
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Angle และ Tip_Ht

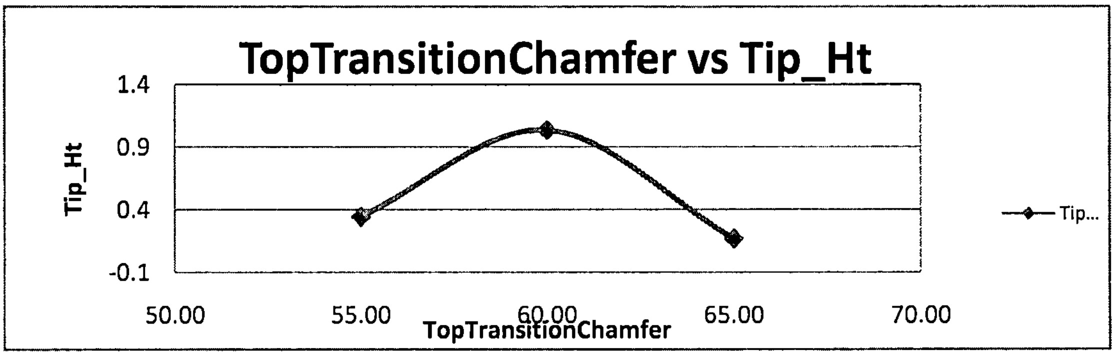


รูปที่ ข.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Angle และ Tip_P

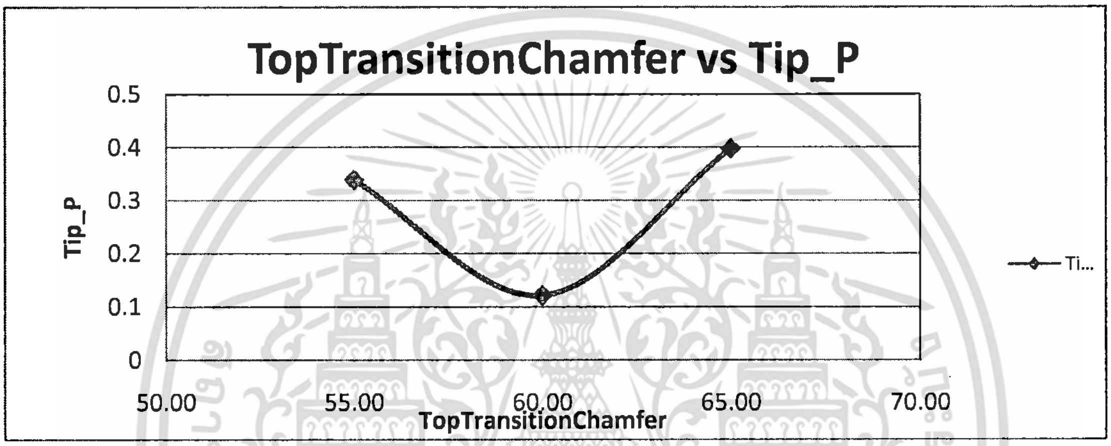


รูปที่ ข.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Angle และ Tip_R

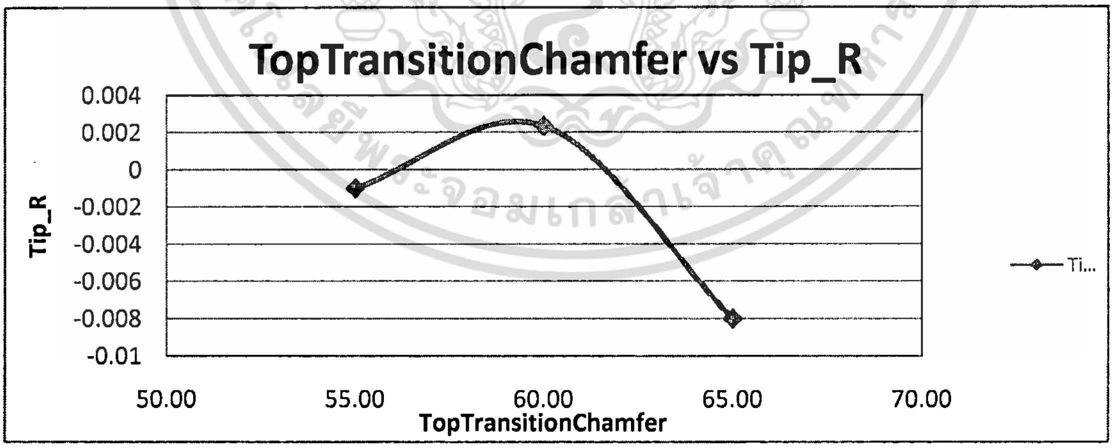
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Chamfer และ Tip_Ht

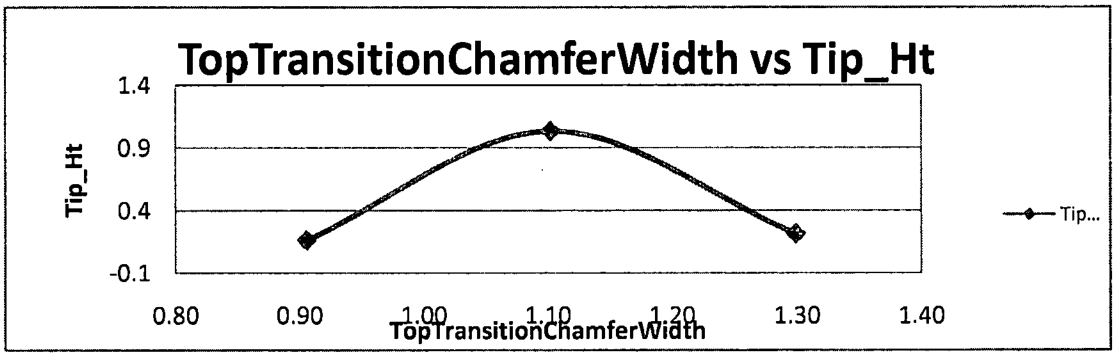


รูปที่ ข.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Chamfer และ Tip_P

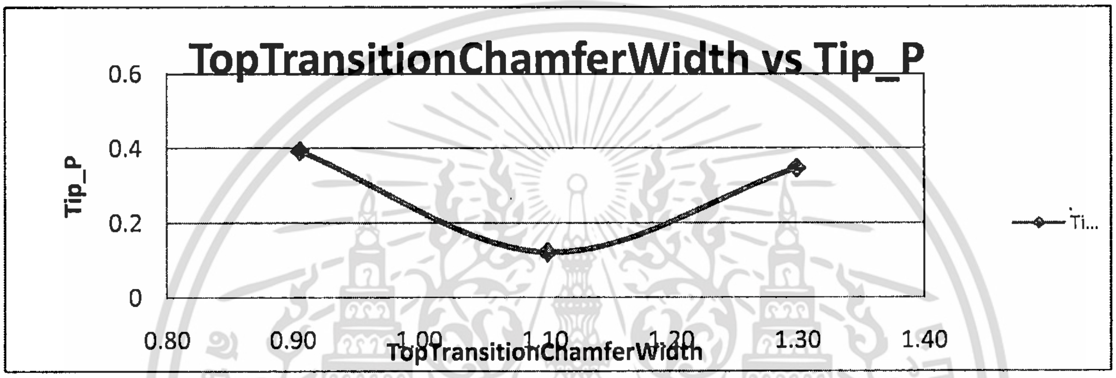


รูปที่ ข.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Chamfer และ Tip_R

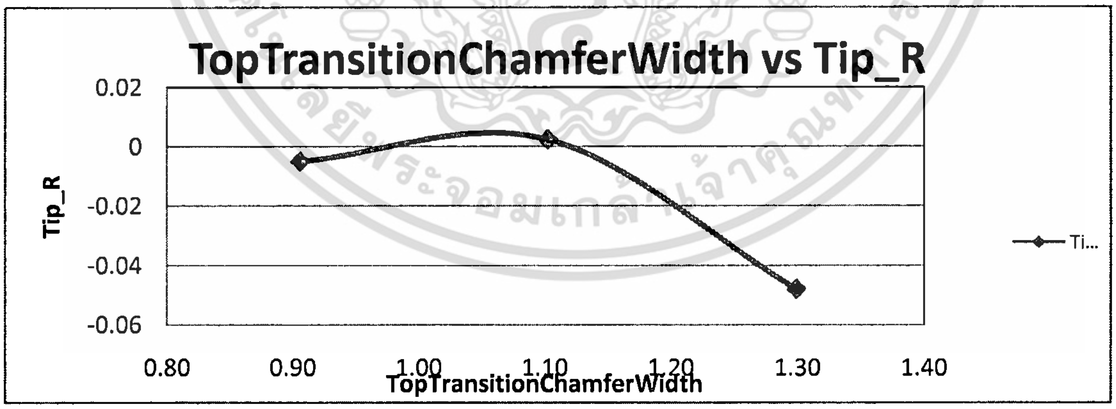
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Chamfer Width และ Tip_Ht

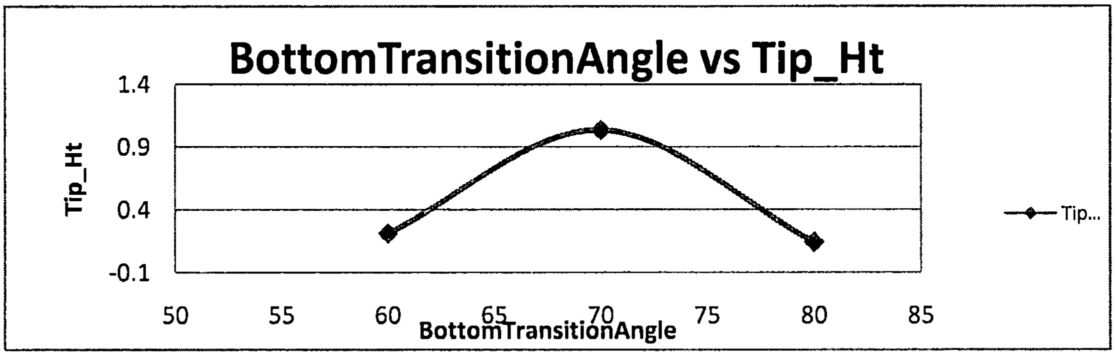


รูปที่ ข.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Chamfer Width และ Tip_P

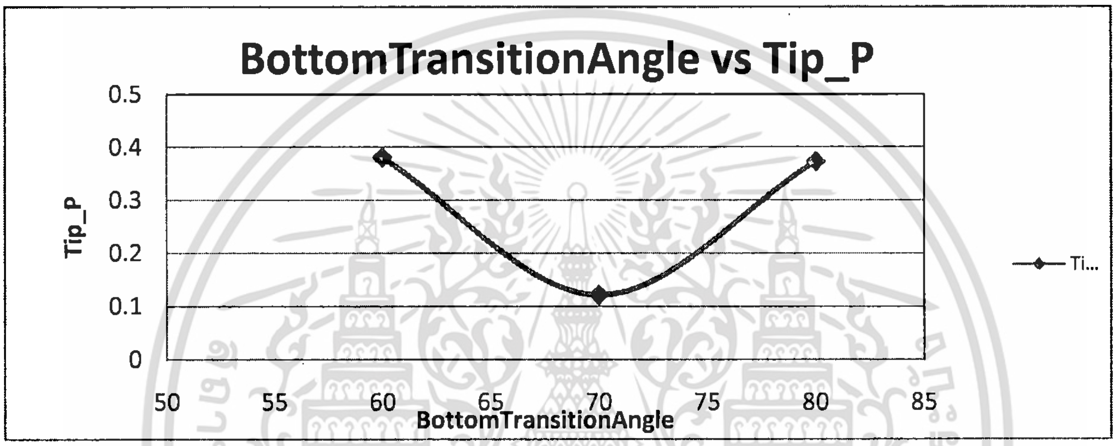


รูปที่ ข.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Top Transition Chamfer Width และ Tip_R

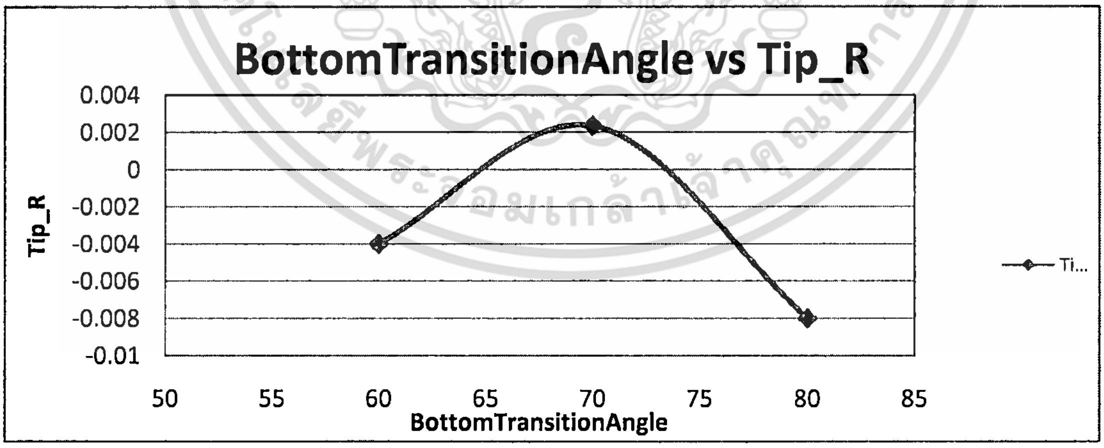
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bottom Transition Angle และ Tip_Ht

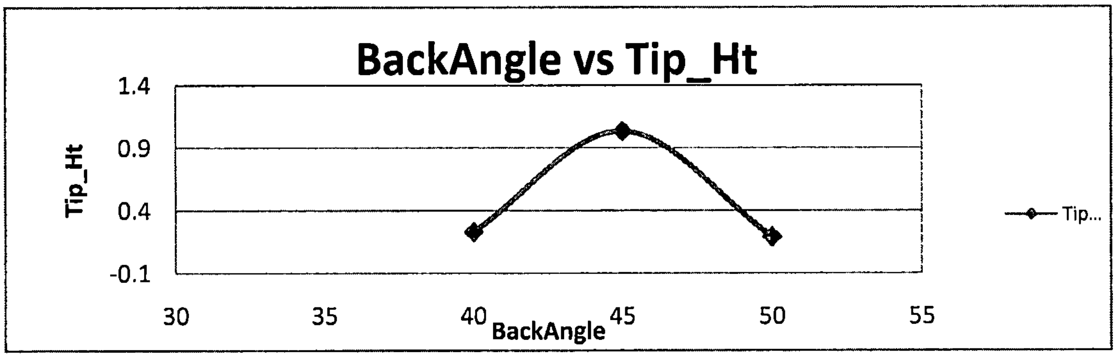


รูปที่ ข.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bottom Transition Angle และ Tip_P

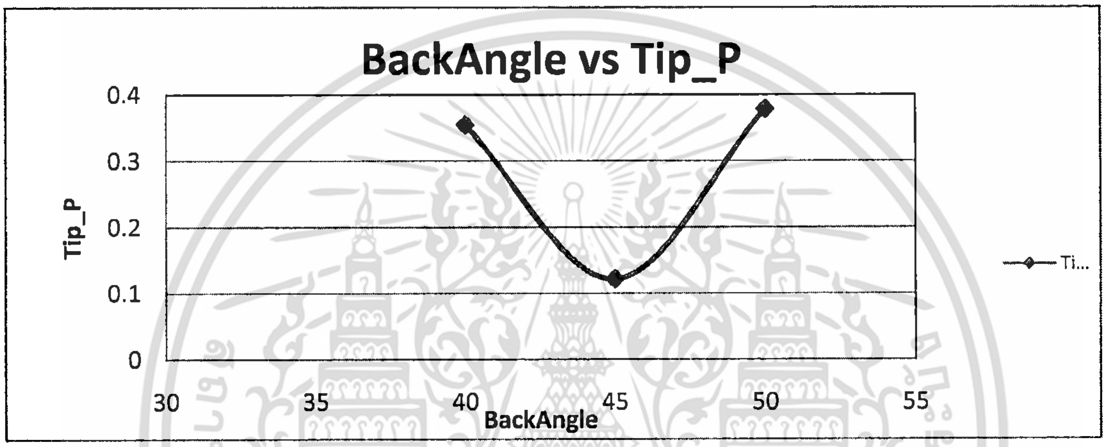


รูปที่ ข.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bottom Transition Angle และ Tip_R

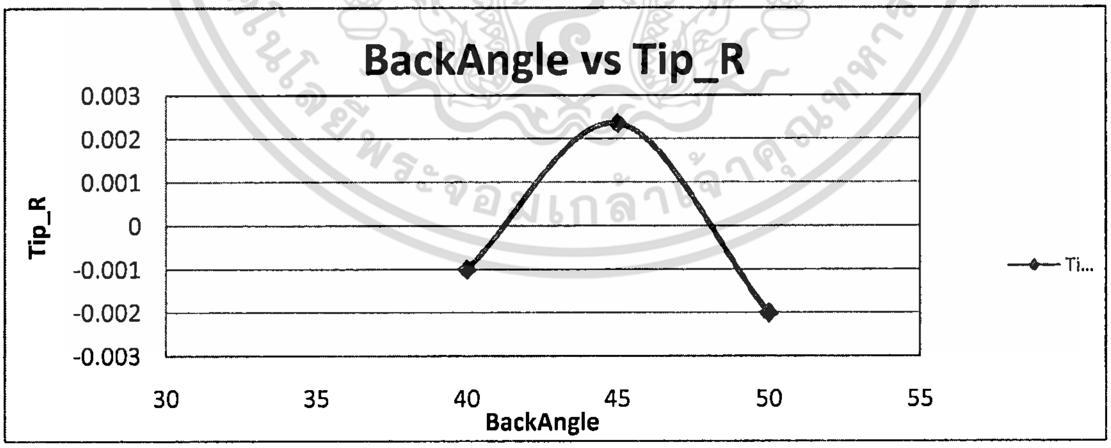
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Angle และ Tip_Ht

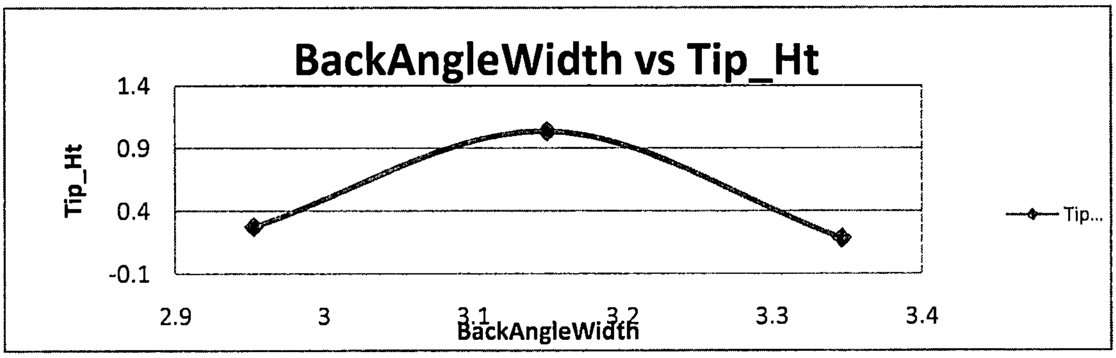


รูปที่ ข.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Angle และ Tip_P

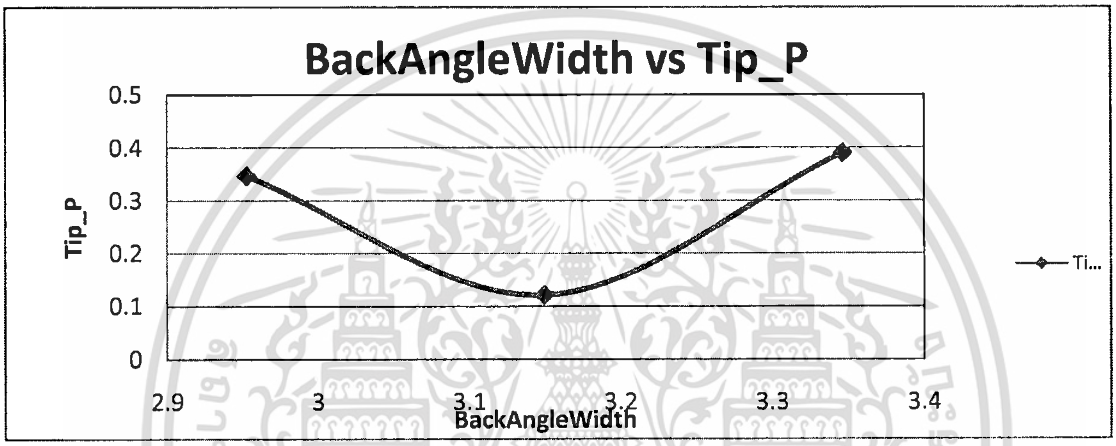


รูปที่ ข.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Angle และ Tip_R

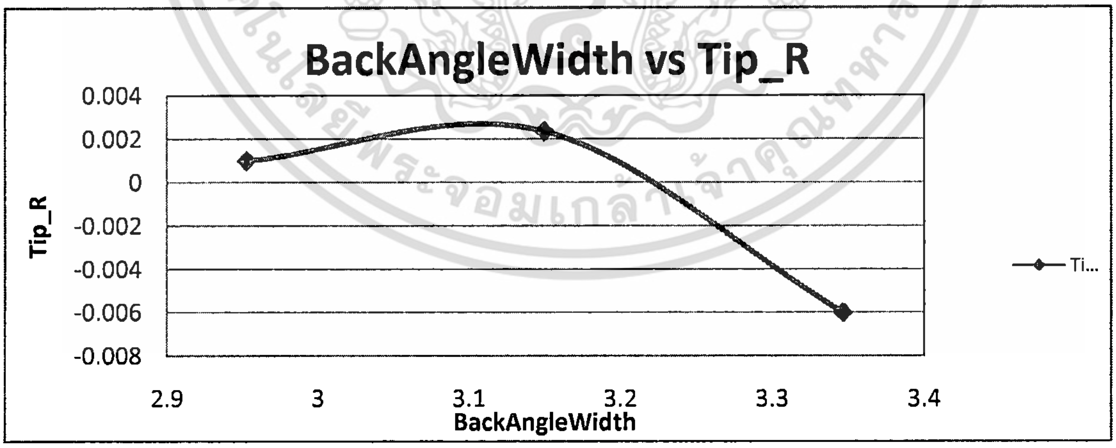
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Angle Width และ Tip_Ht

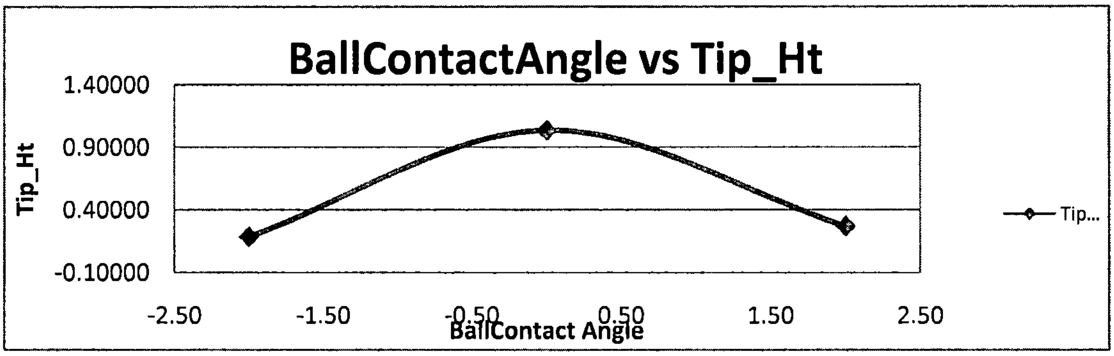


รูปที่ ข.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Angle Width และ Tip_P

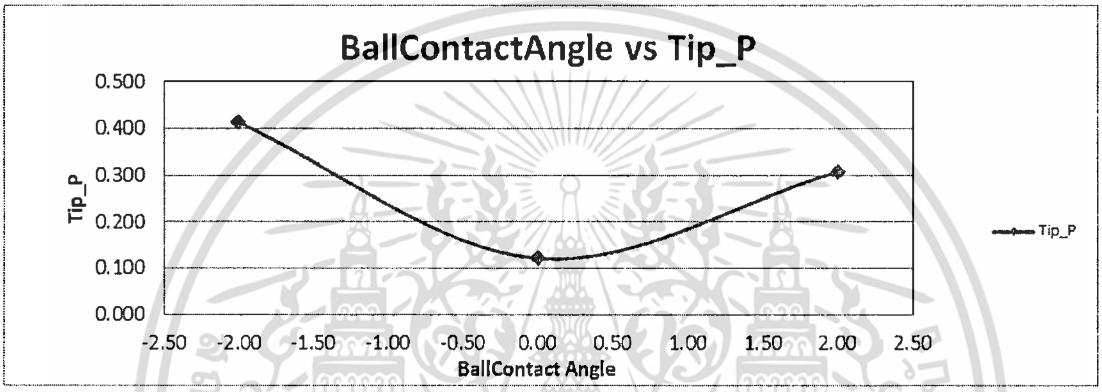


รูปที่ ข.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Angle Width และ Tip_R

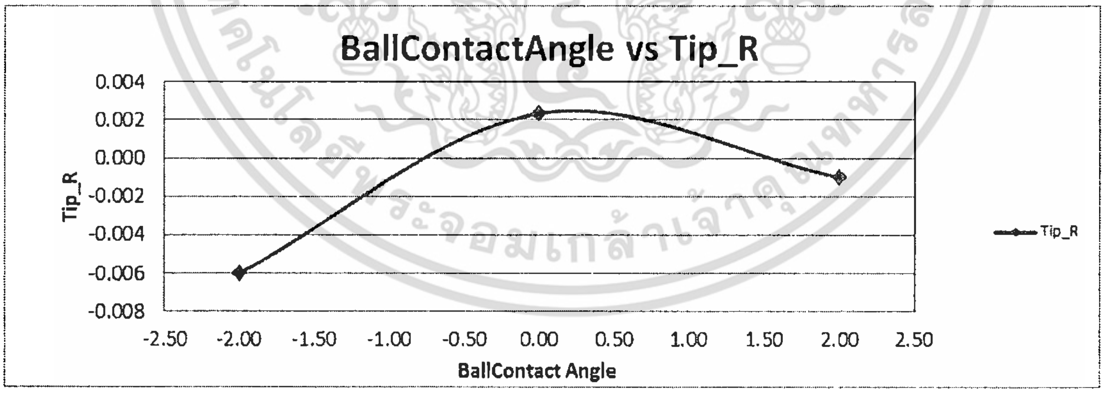
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ball Contact Angle และ Tip_Ht

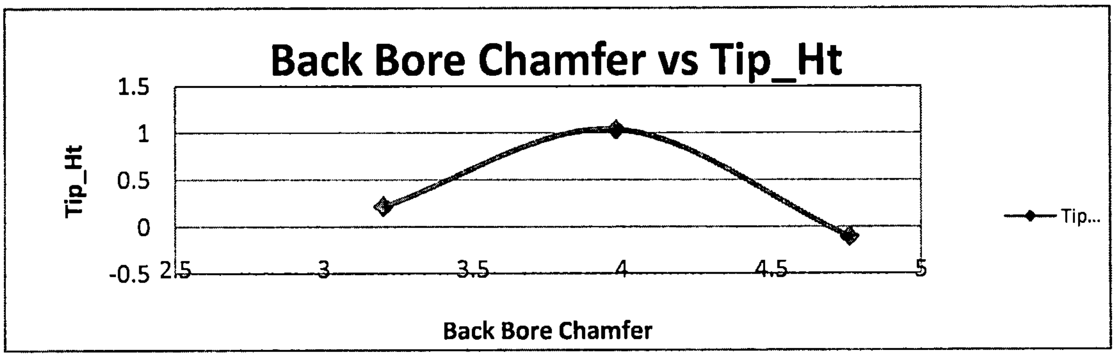


รูปที่ ข.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ball Contact Angle และ Tip_P

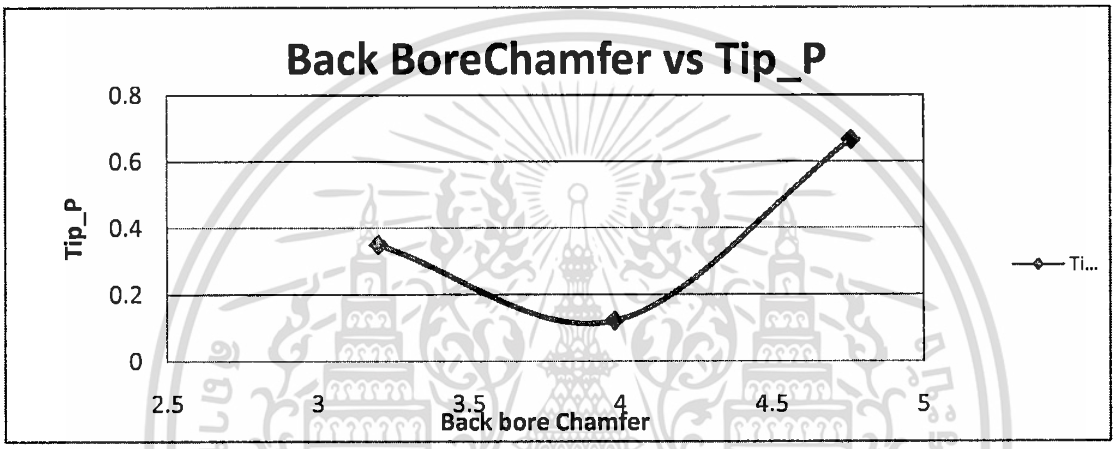


รูปที่ ข.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ball Contact Angle และ Tip_R

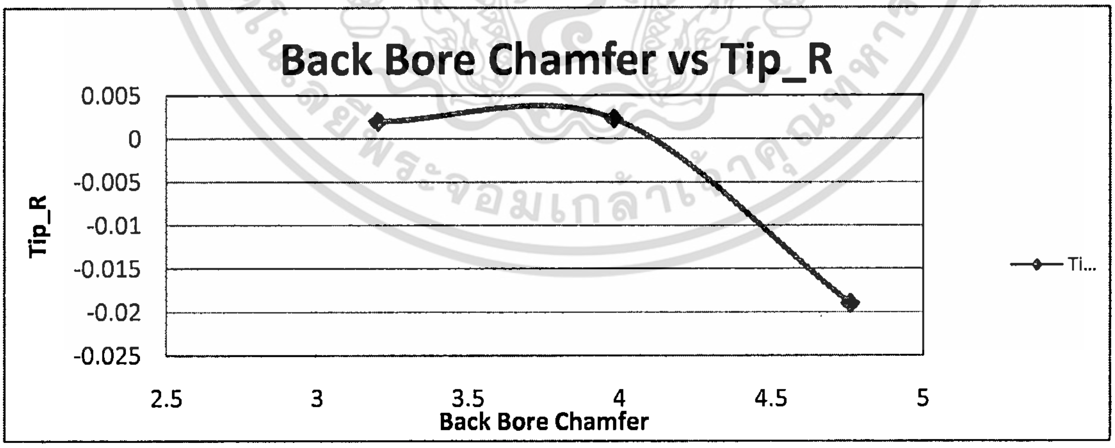
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Bore Chamfer และ Tip_Ht

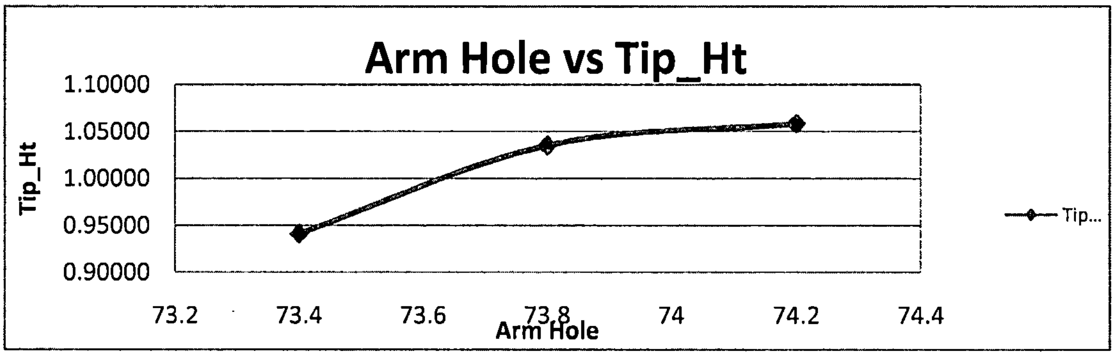


รูปที่ ข.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Bore Chamfer และ Tip_P

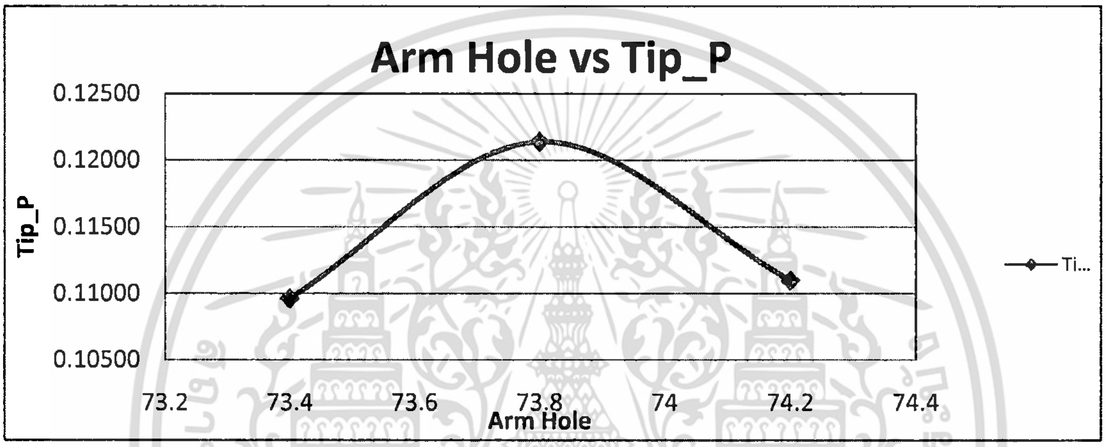


รูปที่ ข.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Back Bore Chamfer และ Tip_R

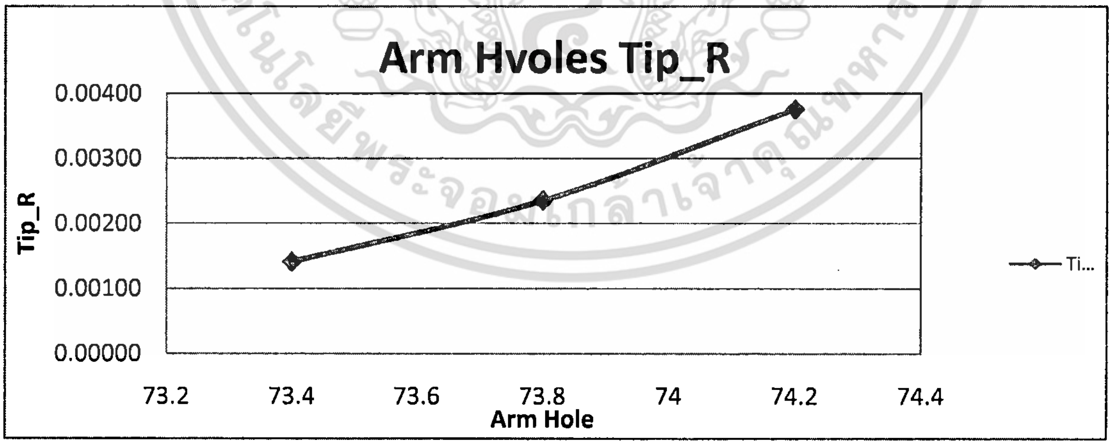
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Arm Hole และ Tip_Ht

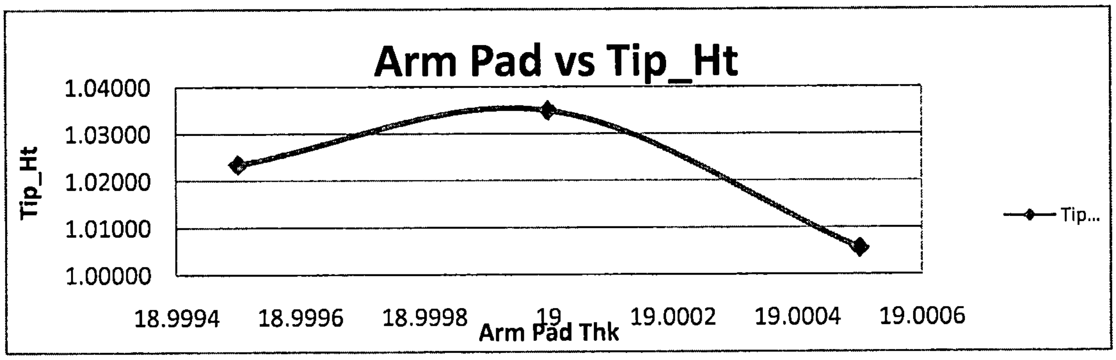


รูปที่ ข.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Arm Hole และ Tip_P

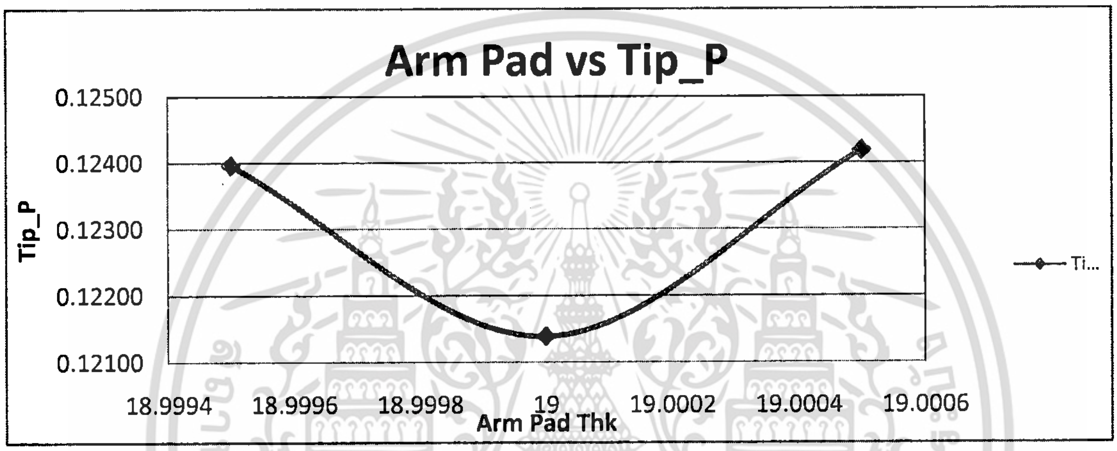


รูปที่ ข.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Arm Hole และ Tip_R

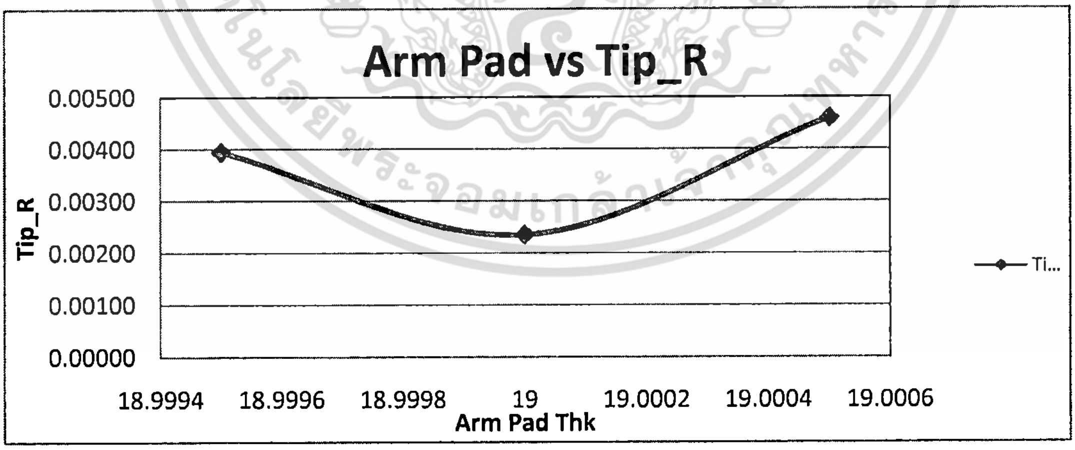
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Arm Pad และ Tip_Ht

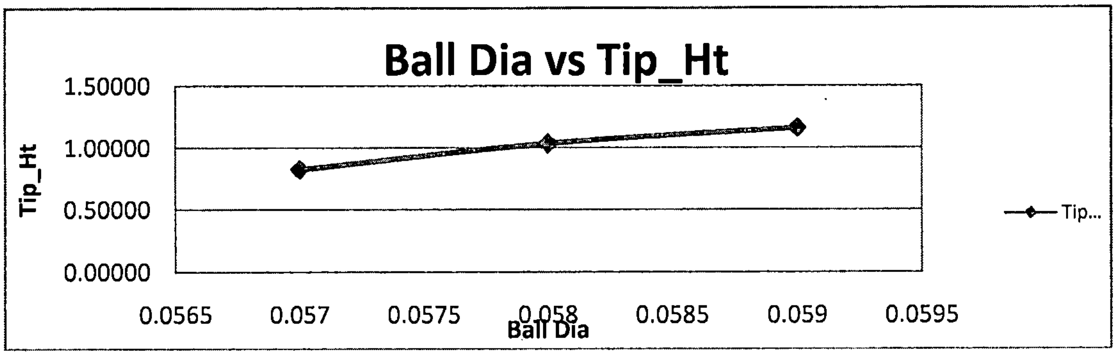


รูปที่ ข.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Arm Pad และ Tip_P

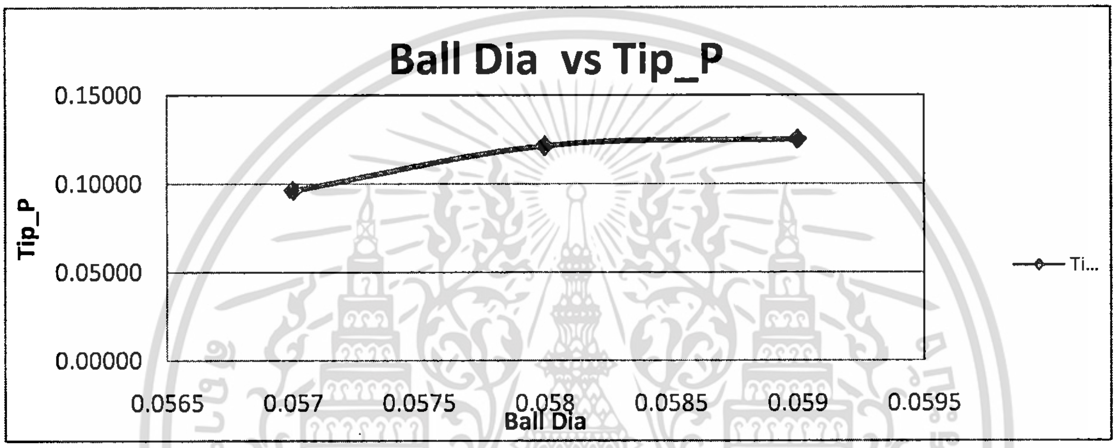


รูปที่ ข.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Arm Pad และ Tip_R

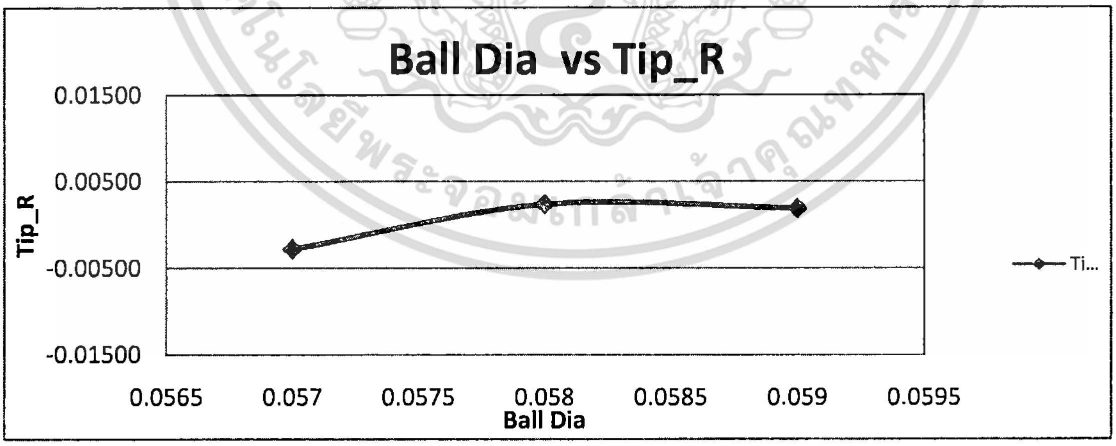
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ball Diameter และ Tip_Ht

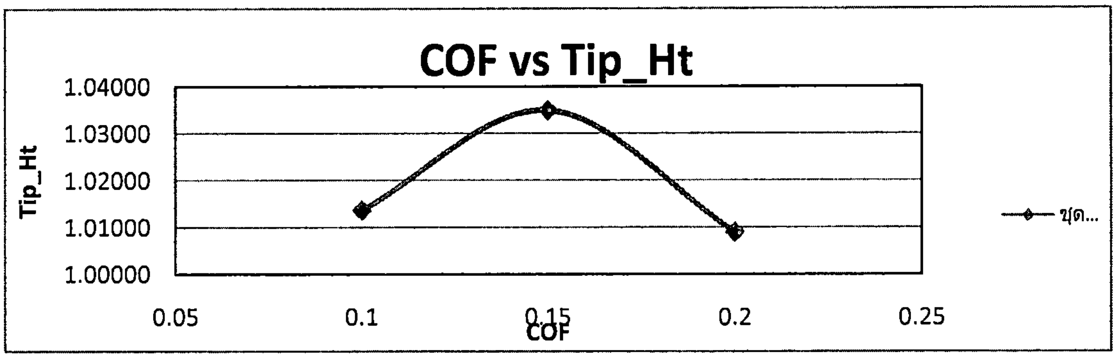


รูปที่ ข.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ball Diameter และ Tip_P

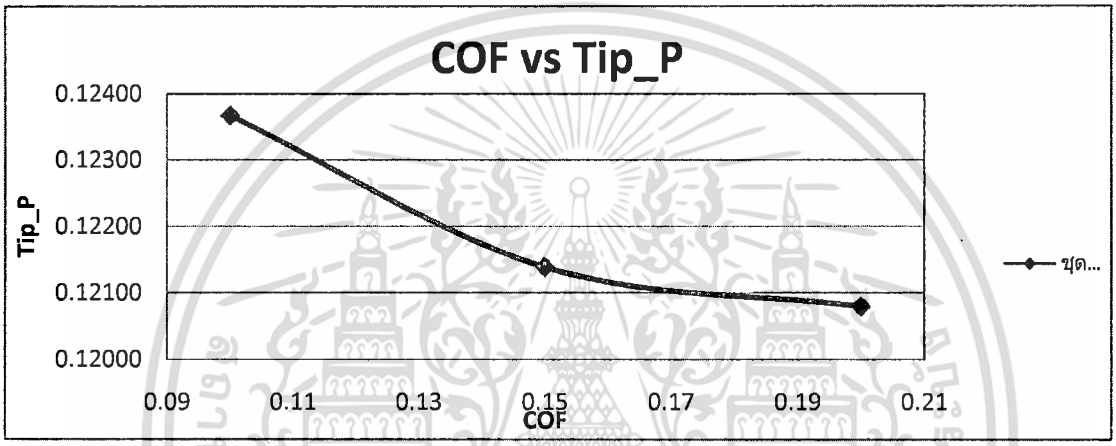


รูปที่ ข.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ball Diameter และ Tip_R

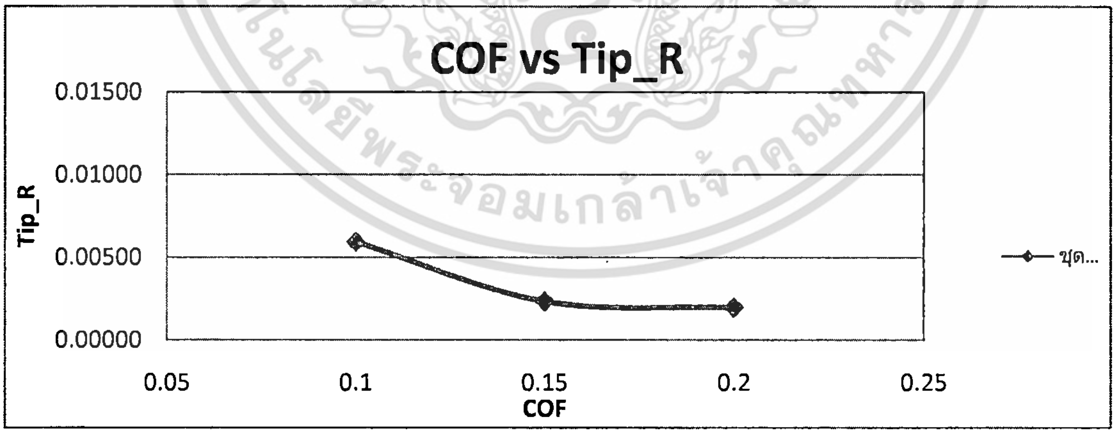
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง COF และ Tip_Ht



รูปที่ ข.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง COF และ Tip_P



รูปที่ ข.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง COF และ Tip_R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of the Spacer key on Swage Push out

Joompon Bamrungwong, Mongkol Mongkolwongrojn

College of Data Storage Technology and Applications
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
3 moo 2 Chalongkrung Rd. Ladkrabang
Bangkok, Thailand 10520
kmmongko@kmitl.ac.th
Seagate Technology (Thailand) Ltd.
1627 Moo 7, Teparuk Rd, Tambol Teparuk,
Amphur Muang, Samutprakarn 10270 Thailand
joompon.bamrungwong@seagate.com

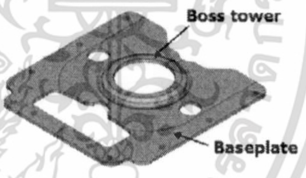
***Abstract*— This paper is aimed at demonstrating the use of finite element analysis for simulating a swaging process of hard disk drive (HDD) a head stack assembly (HSA) to reduce the defect from swage push out by focusing on the spacer key. A swaging process is a material processing technique used to connect a head gimbal assembly (HGA) to an E-block becoming the so-called head stack assembly by using swage balls with insert the spacer key and remove it after process done. The finite element model is 3-dimensional where solid Lagrangian elements and the explicit dynamics simulation are being used. The simulation results are compared to those obtained from experimentation; it was found that the result from finite element analysis agree with the experiment results. It was found that the defect swage push out can be reduced by a proper spacer key hole diameter as for HSA able to improve by spacer key land as well. However, there is some part of the base plate that required further investigation. The effects of base plate not considered in the present analysis, those items like the actual swage boss profile.**

***Keywords*— Ball Swaging ,Finite Element, Head Stack Assembly, Spacer Key**

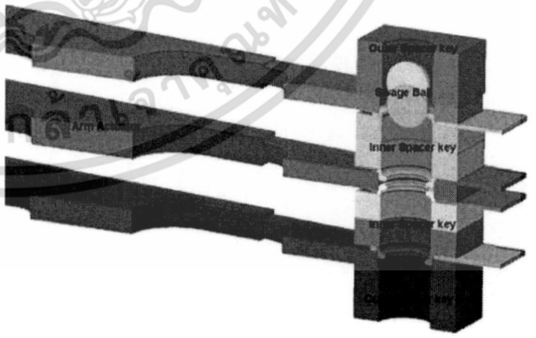
I. INTRODUCTION

In the hard disk drive (HDD) manufacturing process, Ball swaging is the common most important manufacturing processes, which joints the Head Gimbal Assembly (HGA) base plates with actuator arm called the head stack assembly (HSA). The HGA base plate is a thin sheet component and includes boss tower as illustrated in Fig. 1. The boss tower is sized to fit within an opening in actuator arm to which the HGA base plates to be mounted. During the swaging process, the ball is driven past through the boss tower into frictional engagement with the inner surface of the opening in the actuator arm and clamped by swage keys. The base plate and attached suspension are thereby securely fastened to the actuator arm. But the base plate deformation will have effect to many Critical To Quality parameters (CTQ). One of the parameters is the Swage Push out. It will degrade of securely fastened to the actuator arm and HSA quality. And one of swage push out came from the spacer key was being supported each suspensions. The swage push out has a large deformation of the boss tower or collapse of the boss tower whilst the ball was passing through as illustrated in Fig. 2.

The swaging process results in plastic deformation of HGA base plate and actuator arm. This deformation can cause disturbance in desired spring characteristic of the suspension on the actuator arm, known as gramload changes from its optimum value, and change to desired retention torque. Since gram load and retention torque are the critical parameters affecting the slider flight height and op-shock performance of hard disk drives, investigating the swaging process induced base plate and arm deformation, gramload and retention torque change are of general interest. This, however, reduces boss tower deformation. It is necessary to clarify the dimension of the spacer key to reduce swage push out



(a)



(b)

Figure 1. (a) Components of a baseplate and (b) the assembly for swaging process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wadhwa analysed the ball swaging process numerical using an axially symmetric model as the early analysis of the ball swaging process, and Kamnerdtong numerically verified the deformation of the entire arm and HGA but the accuracy of the simulation has yet to be verified through experimentation. Aoki and Aruga analysed using a three-dimension finite element analysis based on a symmetrical model for an actuator inner arm and two attached base plates. These studies improved the understanding of the base plate deformation. Jian Yang analysed a three-dimension finite element analysis to study gram load changes, greatly improved the understanding of the deformation related with gram load changes.

The aim of this work is to study the effects of the spacer key in swaging process by three dimensional finite element analysis model (FEA) and extends to increase spacer key life. In the present work, the swaging process is studied by performing explicit dynamic finite element analysis (FEA) using a commercial program ANSYS/LS-Dyna. Four base plates and three arms in the assembly are opted as a prototype to be studied. 2-Balls swaging process is considered, and its velocity maintains constant in the top-to-bottom direction.

II. Swaging Process Modeling

The finite element simulation of the ball swaging process was performed with the commercial software package. A three-dimensional (3-D) and a cross-sectional view of the finite element (FE) model used for swaging process of actuator arms are shown in Figure 2 and 3.

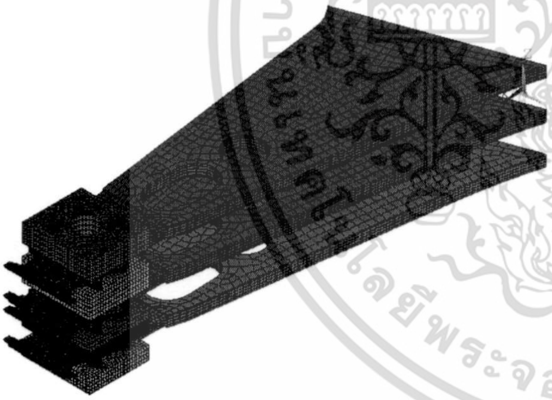


Figure 2. Four base plate and three arm in the assembly for swaging simulation

In this simulation, a nonlinear explicit dynamics analysis is performed. If the stress is in the elastic deformation region, the relationship between stress and strain is linear. After the stress reaches the yield point, the relationship becomes nonlinear. The swaged part of the base plate undergoes plastic deformation. Nonlinear material properties should be considered. Geometric nonlinearity is also considered in this

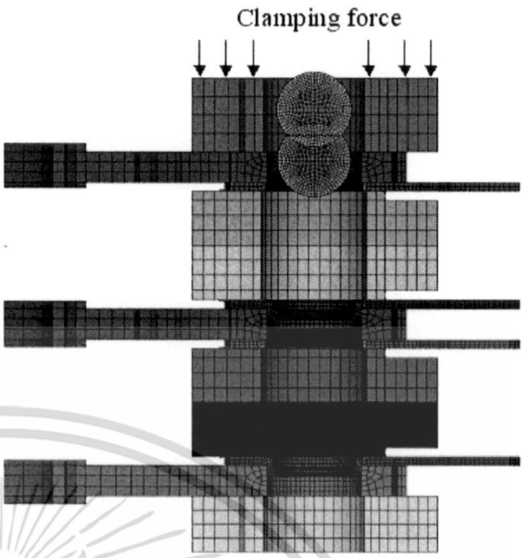


Figure 3. Four base plate and three arm in the assembly for swaging simulation

analysis because the base plate undergoes large deformation at the swaged part, as shown in Figure 3. The model includes three actuator arm tip, four base plates with part of hinges, four swage keys, and two swage balls. The inner spacer key was separated to two part of assembly for analyze.

III. Boundary Conditions and Contact Surfaces

During the swaging process, the constant clamping force at the outer key parts during swaging is constant and the arms are separated from each other by the use of spacer keys. In the FE model, the clamping pressure is applied as forces via force load curve. For simplicity, the swage keys, which are employed to simulate the clamping boundary at the arm contact condition, are modelled as rigid bodies while the other components including actuator arm tip, base plates and hinges are deformable parts. The simulation use the same load curve for ball speed for each heads and swage ball is forced to move in Z direction only according to its load curve. The boss tower of the base plate is plastically deformed and joined to the arm. The contact surface between the ball and swaging boss, between the base plate and the arm, and the one between swaging boss and the clamp are taken into account in analyzing the boss arm force. The friction coefficients for each contact surface are separated as 2 groups, contact surface of assembly and part-to-part contact. The base plate, hinge and the suspension are made of stainless steel while the arm is made of aluminum. The swaging ball is made of stainless steel with hardened coating. Thus, the ball is simulated as a rigid body. The material models defined in the analysis are bilinear isotropic material and bi-linear kinematics hardening. The properties of the materials used in the simulation are listed in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

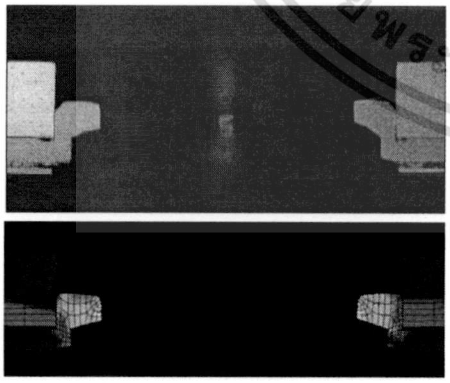
Table 1. All the elements used in the analysis are eight-nodes brick elements. To reduce the computing time, the model consists of both rigid bodies and deformable bodies. The actuator arm hole and the base plate boss tower are prepared such that finer meshes are only required in the vicinity of the contact areas and the elements are coarser in the areas farther away.

TABLE I
MATERIAL PROPERTIES FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS

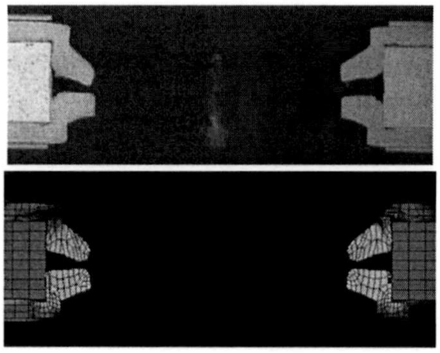
Material Properties	Type of Material	
	Stainless steel	Aluminum
Elastic modulus, E (MPa)	190,000	71,016
Yield stress, Y (MPa)	206	275
Poisson ratio	0.32	0.33
Mass density (kg/m^3)	7889	2700

IV. Validation of the Finite Element Model

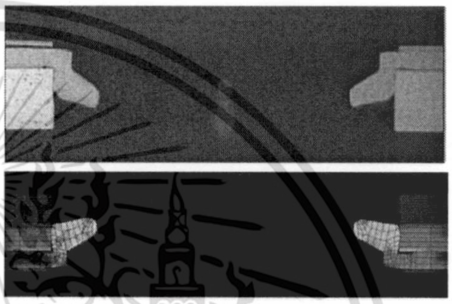
The base plate and arm tip deformation results from FEA simulations for inner and outer arms are evaluated from the displacements value that measured from specific nodes compared to the reference plane. For all simulated cases, the simulation results are tendency to value from experimentation. However, it is focusing on the effect of the spacer key to reduce the swage push out and extends the spacer key life which accompany with cost spending for swage key shuttle key, there is some offset that required further investigation. These differences could be from some other effects not considered in the present analysis. The illustration of boss tower deformation from swaging process are shown in Fig.4



(a)



(b)



(c)

Figure 4. (a) Head #3 (b) Head #1 and 2 (c) Head #0 comparison boss tower X- section deformation

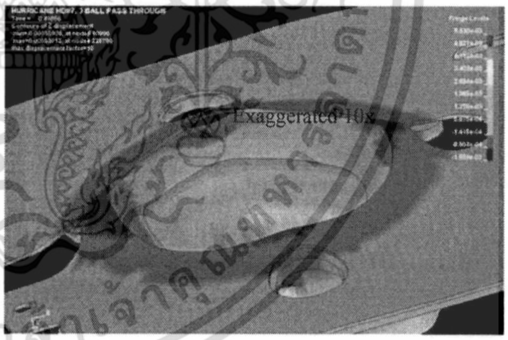


Figure 5. Large deformation due to spacer key hole diameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 2

SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

Parameters		Tip Height (inch)		Tip Pitch (degree)	
		FEA result	Actual data	FEA result	Actual data
Head 0	Outer arm	-0.00123	-0.00102	-0.572	-0.672
Head 1	Inner arm	0.00031	0.00027	0.473	0.537
Head 2	Inner arm	-0.0006	-0.0009	-0.520	-0.517
Head 3	Outer arm	0.00122	0.00118	0.437	0.543

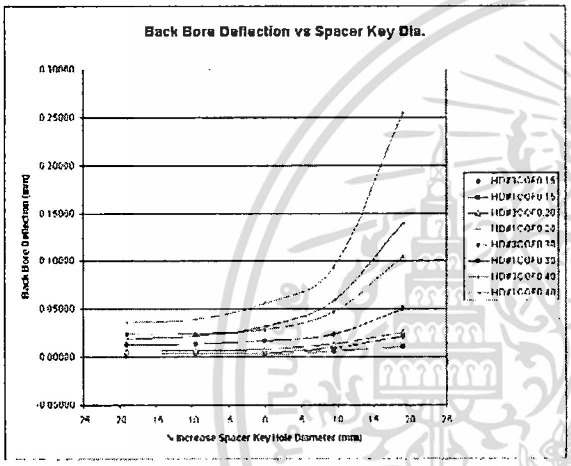


Figure 6. Back Bore deformation vs. spacer key hole diameter

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

The work studies the behaviors and characteristics of the base plate after a swaging process that become swage push out problem. The effects of changing the spacer key hole diameter from nominal value are also investigated. Based on the result of this work, an offset could be diminished by improving the precision of swage key shape and swage boss profile. The result from this simulation will be used for evaluation of proper spacer key diameter to reduce swage push out and extends the spacer key life. Obviously, maximum spacer key hole diameter can be reduced 10-20 percent to maintain the back bore deformation. To extend the spacer key life the hole must be proposed to has a inner chamfer equal to maximum diameter that acceptable. The proper spacer key hole diameter come along with inner chamfer able to reduce the swage push out and extend the spacer key life. Nevertheless, improvement of the swage ball coefficient of friciton able to extend the spacer key life and improve some HSA CTQ. For this preliminary study, the FEA simulation results are said to agree well with the actual experiment. However, the coefficient of friction must be considered and the configuration of the boss tower profile must be considered also. The effects of spacer key land on swaging process will be evaluated in future simulation.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by Cooperate Project between National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Seagate Technology (Thailand) via Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

[1] S. K. Wadhwa, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 3, pp. 1837-1842, May 1996

[2] K. Aoki and K. Aruga, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives," Microsyst. Technol., vol. 13, pp. 943-949, 2007.

[3] T. Kamnerdtong, S. Chutima and K. Ekintumas, "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation," Eighth Asian Symposium on Visualization, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

[4] Jian Yang, Chen-Chi Lin, Shahab Tabrizi, "Finite Element Simulation of Ball Swaging Process of Jointing HGA With Actuator Arm and Gram Load Calculation", ASME Information Storage and Processing Systems Conference, Santa Clara, CA, 2007

[5] Jongpradist, P.., Rotbunsongsri, R., Sukkana, C., Sungtong, W. Parametric Study of Baseplate Geometry Using Finite Element Analysis, DST-CON 2009, Bangkok, Thailand

[6] J.R. Cho, J.I. Song, K.T. Noh and D.H. Jeon, Nonlinear finite element analysis of swaging process for automobile power steering hose, Journal of Materials Processing Technology, Volume 170, Issues 1-2 , 14 December 2005, Pages 50-57

[7] Drean M.; Habraken A.M.; Muzeau J.P.; Bouchair A., Modelling of the Swaging Process during the Installation of Swaged Bolts, Journal of Constructional Steel Research, Volume 46, Number 1, April 1998, pp. 256-257(2)

[8] Li RONG, Zuo-ren NIE and Tie-yong ZUO, FEA modeling of effect of axial feeding velocity on strain field of rotary swaging process of pure magnesium, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 16, Issue 5, October 2006, Pages 1015-1020

[9] "Seagate Technology Summit 2007," FEB 2008, Hutchinson Technology Corp.

[10] ANSYS Training Manual: Explicit Dynamics With ANSYS LS-Dyna, release 7.1, Edition2.

[11] Y. Zhang and R. R. Wolter, "Baseplate for a Disk Drive Head Suspension," United States Patent No.: US 7,339,767 B1, March 2008.

[12] Y. Zhang, W. A. Linnertz, R. E. Fossum and S. J. V. Sloun, "Swaging-Optimized Baseplate for Disk Drive Head Suspension," United States Patent No.: US 7,042,680 B1, May 2006.

[13] I. Diewanit, K. Sittipongpanich, T. Chettaisong, and V. Thaveeprungsripom, "Baseplate Design for Reducting Deflection of Suspension Assembly by Swaging," United States Patent No. US 2005/0078407 A1, April 2005.

[14] P. Wriggers, Computational Contact Mechanics, John Wiley and Sons, 2002, pp 161-255

[15] ANSYS Theory Reference, 2006

[16] Frank A. McClintock,"Mechanical Behavior of Materials",Addison-Weiley,1966

[17] Yogesh..Jaluria,Design and Optimization of Thermal Systems 2nd,CRC Press,2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Outer key to Reduce Outer Arm Swage Effect

Joompon Bamrungwong, Mongkol Mongkolwongrojn

College of Data Storage Technology and Applications
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
3 moo 2 Chalongkrung Rd. Ladkrabang
Bangkok, Thailand 10520
kmmongko@kmitl.ac.th

Seagate Technology (Thailand) Ltd.
1627 Moo 7, Teparuk Rd, Tambol Teparuk,
Amphur Muang, Samutprakarn 10270 Thailand

joompon.bamrungwong@seagate.com

***4bstract*— The capacity of the hard disk drive (HDD) has been ɔeing increased so the E-Block arm was being changed in arm ɔad thickness. The suspension that is a base plate and arm pad was deformed after swaging process had finished. The read-write ıead was deviated as was moving on the media. A swaging ɔrocess is a material processing technique that is used to nterface a head gimbal assembly (HGA) to an E-block becoming so-called head stack assembly using swage balls with insert the spacer key and remove it after process had done. Because of the arm pad was reduced in thickness so the outer key was being studied to reduce the swage effect. The finite element model is 3-limensional where solid Lagrangian elements and the explicit lynamics simulation are being used for study the outer key. The imulation results were compared with those obtained from the experiment. It was found that the result from finite element analysis agree with the experiment results. In addition, a proper outer key width is able to reduce the swage effect of the outer arm. However, if there is a difference in the design of the base plate and arm profile, the outer key is possible different. The ffects of base plate were not considered in this study, those items ike the actual base plate thickness.**

***eywords*— Ball Swaging ,Finite Element, Head Stack Assembly, Outer Key, Arm Pad**

I. INTRODUCTION

In the hard disk drive (HDD) manufacturing process, Ball waging is the common most important manufacturing rocesses, which joints the Head Gimbal Assembly (HGA) ase plates with actuator arm called the head stack assembly HSA). At present, the capacity of the hard disk drive (HDD) as been being increased dynamically so the E-Block arm was hanged in arm pad thickness. Deformation of the outer arm ad can be improved by the outer key so it was motivated to educe the swage effect by study its dimension and onfigurations. The arm pad is shown in Fig. 1. During the waging process, the ball is driven past through the boss tower nto frictional engagement with the inner surface of the pening in the arm pad and clamped by swage keys. The base late and attached suspension are thereby securely fastened to he actuator arm. The outer arm, the base plate and arm pad deformation will have effect to many Critical to Quality parameters (CTQ). The outer key is shown in Fig. 2.

The swaging process affects the plastic deformation of HGA base plate and actuator arm. This deformation can cause disturbance in desired spring characteristic of the suspension on the actuator arm, known as gramload changes from its optimum value, and change to desired retention torque. Since gramload and retention torque are the critical parameters affecting the slider flight height and op-shock performance of hard disk drives, investigating the swaging process induced base plate and arm pad deformation are of general interest.

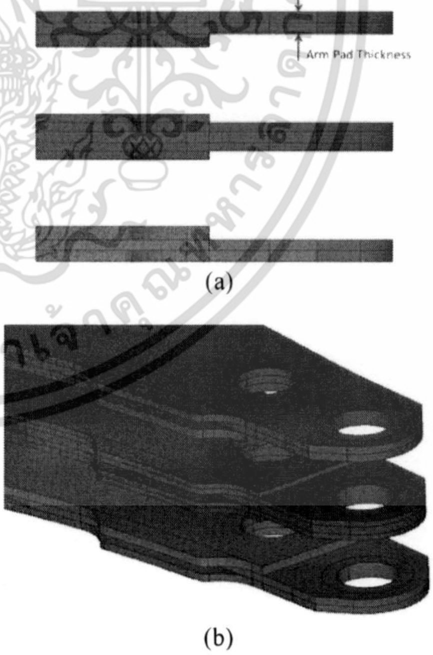
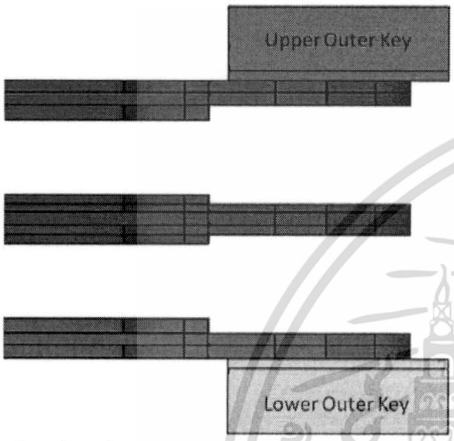


Figure 1. (a) Arm Pad Thickness (b) ISO view of the arm pad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wadhwa analysed the ball swaging process numerical using an axially symmetric model as the early analysis of the ball swaging process, and Kamnerdtong numerically verified the deformation of the entire arm and HGA but the accuracy of the simulation has yet to be verified through experimentation [1]. Aoki and Aruga analysed using a three-dimension finite element analysis based on a symmetrical model for an actuator inner arm and two attached base plates [2]. These studies improved the understanding of the base plate deformation. Jian Yang analysed a three-dimension finite element analysis to study gram load changes, greatly improved the understanding of the deformation related with gram load changes [4].



igure 2. Outer key clamping on the outer arm

The aim of this work is to study the effects of the outer key n swaging process by three dimensional finite element nalysis model (FEA). At present, the swaging process is tudied by performing explicit dynamic finite element analysis FEA) using a commercial program ANSYS/LS-Dyna. Four ase plates and three arms in the assembly are opted as a rototype in this study. 2-Balls swaging process is considered nd their velocity keep constant in the top-to-bottom direction.

II. Swaging Process Modelling

The finite element simulation of the ball swaging process 'as performed with the commercial software package. A ree-dimensional (3-D) and a cross-sectional view of the nite element (FE) model used for swaging process of ctuator arms are shown in Figure 3.

In this simulation, a nonlinear explicit dynamics analysis is erformed. If the stress is in the elastic deformation region, ie relationship between stress and strain is linear. After the ress had reached the yield point, the relationship became onlinear. The swaged part of the base plate undergoes plastic eformation. Nonlinear material properties should be onsidered. Geometric nonlinearity is also considered in this nalysis because the base plate undergoes large deformation at ie swaged part, as shown in Figure 3.

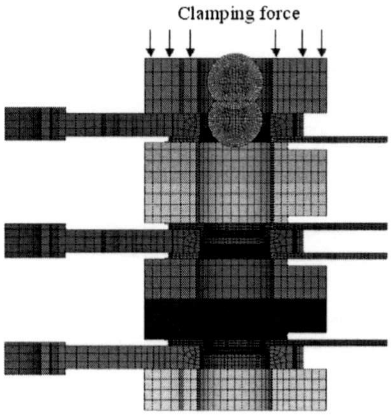


Figure 3. Four base plate and three arm in the assembly for swaging simulation

The model includes three actuator arm tip, four base plates with part of hinges, four swage keys, and two swage balls. The inner spacer key was separated to two part of assembly for analyze.

III. Boundary Conditions and Contact Surfaces

During the swaging process, the clamping force at the outer key parts during swaging is constant and the arms are separated from each other using the spacer keys. In the FE model, the clamping pressure is applied as forces via force load curve. For simplicity, the swage keys, which are employed to simulate the clamping boundary at the arm contact condition, are modelled as rigid bodies while the other components including actuator arm tip, base plates and hinges are deformable parts. The simulation uses the same load curve for ball speed in each head and swage ball is forced to move in Z direction only according to its load curve. The boss tower of the base plate is plastically deformed and joined to the arm. The contact surface between the ball and swaging boss, between the base plate and the arm, and the one between swaging boss and the clamp are taken into account in analyzing the boss arm force. The friction coefficients for each contact surface are separated as 2 groups, contact surface of assembly and part-to-part contact. The base plate, hinge and the suspension are made of stainless steel while the arm is made of aluminum. The swaging ball is made of stainless steel with hardened coating. Thus, the ball is simulated as a rigid body. The material models defined in the analysis are bilinear isotropic material and bi-linear kinematics hardening. The properties of the materials used in the simulation are listed in Table 1. All the elements used in the analysis are eight-nodes brick elements. To reduce the computing time, the model consists of both rigid bodies and deformable bodies. The actuator arm hole and the base plate boss tower are prepared such that finer meshes are only required in the vicinity of the contact areas and the elements are coarser in the areas farther away.

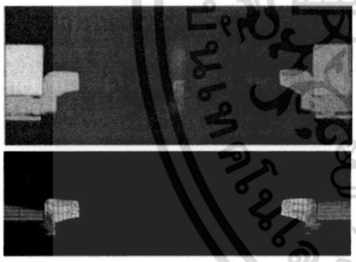
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I
MATERIAL PROPERTIES FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS

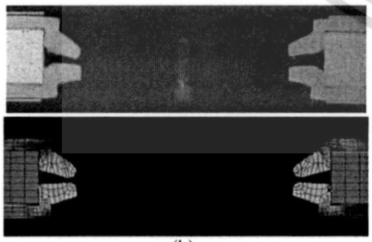
Material Properties	Type of Material	
	Stainless steel	Aluminum
Elastic modulus, E (MPa)	190,000	71,016
Yield stress, Y (MPa)	206	275
Poisson ratio	0.32	0.33
Mass density (kg/m^3)	7889	2700

IV. VALIDATION OF THE FINITE ELEMENT MODEL

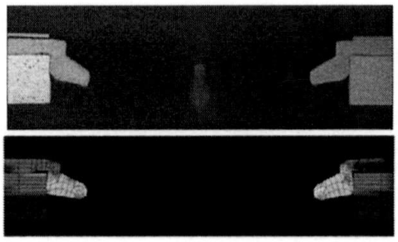
The base plate and arm tip deformation results from FEA imulations for inner and outer arms were evaluated from the lisplacements value that measured from specific nodes compared with the reference plane. In all simulated cases, the imulation results have a tendency to the experiment. However, the effect of the outer key is focused to reduce the wage effect for the outer arm which accompany with cost pending for swage key and shuttle key, there is some offset hat required further investigation. These differences could be rom some other effects not considered in the present analysis. The boss tower deformation caused by swaging process are shown in Fig.4



(a)



(b)



(c)

Figure 4. (a) Head #3 (b) Head #1 and 2 (c) Head #0 comparison boss tower X- section deformation (Exaggerated 10x)

Product	HSA Eval FW38		
	Mean	Sigma	Cpk
Desaru			
PSA0	2.44	0.18	2.30
PSA1	1.92	0.26	1.79
PSA2	2.12	0.20	2.63
PSA3	2.04	0.27	1.88

(a)

Product	HSA Control FW38		
	Mean	Sigma	Cpk
Desaru			
PSA0	2.44	0.27	1.58
PSA1	2.01	0.29	1.75
PSA2	2.08	0.22	2.40
PSA3	2.19	0.24	2.06

(b)

Figure 5. a) Improve outer key b) current outer key

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

The study of the behaviors and characteristics of the base plate and thiner arm pad after a swaging process that become swage effect problem. The effects of variation in the outer key width from nominal value are investigated to improve the outer arm swage effect. As the result, an offset could be diminished by improving the precision of swage key shape and swage boss profile. The result from this simulation will be used for evaluation of proper outer key for thinner arm pad to reduce swage effect of the outer arm. Obviously, outer key designed can reduce PSA HD3 from 2.19 deg to 2.05 deg, a new outer key designed (Cut off 1.4 mm) will be reduce the swage effect 6 percent. Nevertheless, if the base plate and arm pad are changed the outer key designed not improve HSA CTQ, improvement of the swage ball coefficient of friciton is able to extend the spacer key life and improve some HSA CTQ. For this preliminary study, the FEA simulation results correspond to the experiment and can apply to other studies. However, the coefficient of friction, damping and the configuration of the boss tower profile must be considered. The effects of spacer key land on swaging process will be evaluated for simulation in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by Cooperate Project between National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Seagate Technology (Thailand) via Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

[1] S. K. Wadhwa, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 3, pp. 1837-1842, May 1996

[2] K. Aoki and K. Aruga, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives," Microsyst. Technol., vol. 13, pp. 943-949, 2007.

[3] T. Kamnerdtong, S. Chutima and K. Ekintumas, "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation," Eighth Asian Symposium on Visualization, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

[4] Jian Yang, Chen-Chi Lin, Shahab Tabrizi, "Finite Element Simulation of Ball Swaging Process of Jointing HGA With Actuator Arm and Gram Load Calculation", ASME Information Storage and Processing Systems Conference, Santa Clara, CA, 2007

[5] Jongpradist, P.., Rotbunsongsri, R., Sukkana, C., Sungtong, W. Parametric Study of Baseplate Geometry Using Finite Element Analysis, DST-CON 2009, Bangkok, Thailand

[6] J.R. Cho, J.I. Song, K.T. Noh and D.H. Jeon, Nonlinear finite element analysis of swaging process for automobile power steering hose, Journal of Materials Processing Technology, Volume 170, Issues 1-2 , 14 December 2005, Pages 50-57

[7] Drean M.; Habraken A.M.; Muzeau J.P.; Bouchair A., Modelling of the Swaging Process during the Installation of Swaged Bolts, Journal of Constructional Steel Research, Volume 46, Number 1, April 1998, pp. 256-257(2)

[8] Li RONG, Zuo-ren NIE and Tie-yong ZUO, FEA modeling of effect of axial feeding velocity on strain field of rotary swaging process of pure magnesium, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 16, Issue 5, October 2006, Pages 1015-1020

9] "Seagate Technology Summit 2007," FEB 2008, Hutchinson Technology Corp.

10] ANSYS Training Manual: Explicit Dynamics With ANSYS LS-Dyna, release 7.1, Edition2.

11] Y. Zhang and R. R. Wolter, "Baseplate for a Disk Drive Head Suspension," United States Patent No.: US 7,339,767 B1, March 2008.

12] Y. Zhang, W. A. Linnertz, R. E. Fossum and S. J. V. Sloun, "Swaging-Optimized Baseplate for Disk Drive Head Suspension," United States Patent No.: US 7,042,680 B1, May 2006.

13] I. Diewanit, K. Sittipongpanich, T. Chettaisong, and V. Thaveeprungsripom, "Baseplate Design for Reducting Deflection of Suspension Assembly by Swaging," United States Patent No. US 2005/0078407 A1, April 2005.

14] P. Wriggers, Computational Contact Mechanics, John Wiley and Sons, 2002, pp 161-255

15] ANSYS Theory Reference, 2006

16] Frank A. McClintock,"Mechanical Behavior of Materials",Addison-Weiley,1966

17] Yogesh..Jaluria,Design and Optimization of Thermal Systems 2nd,CRC Press,2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of Modelling for Resonance Analysis

Joomponladej Bamrungwongtaree

Head Stack Process Development, Seagate Technology (Thailand) Co., Ltd
1627 Moo7 Teparuk Rd., Teparak, Mueng Samutprakan 10270, Thailand
joomponladej.bamrungwongtaree@seagate.com

***Abstract*— This paper describes two software implementation of a Computer Aids Design (CAD) and a Computer Aids Engineering (CAE) optimization tool for HGA resonance analysis. The approach is based on mechanical vibration and expanding for resonance analysis using Solidworks and Ansys commercial software. Linkage between Solidworks and Ansys software is useful to create shaping an innovative in organization and to reduce cost per unit. The first section is description of the suspension development by SolidWorks which has a purpose for bi-directional parametric study. An analysis for solution using Ansys by insertion snipped command to perform mechanical vibration is discussed in latter. The result of simulation was compared with actual test via frequency respond function (FRF) overlaid graph and characteristics that can be comparable. This paper can be used as reference for predictive modelling of innovation in organization and speed up analysis and solution.**

Keywords*— CAD, CAE, Resonance, Head Stack Assembly, Suspension

I. Introduction

The electronics prices always take exponential, first launch get more benefit. Development of product, process including analysis and solution is quite rush to reduce the Time To Market (TTM). At present, the CAD 3D and CAE have been being developed continuously for implementation of the tools. Solidworks becomes the commonly used software in our company after experienced IDEAS for over 10 years. In this paper proposes the development of the suspension model using Solidworks and the study of the parametric using Ansys workbench which are commercial software. Although many published papers attempt to solve the problem, did not concentrate to create the Know How for further use. Jiaping Yang and Shixin Chen [1] have studied Effects of Slider-driven Piezo-microactuator Placements and Profiles on HGA Sway Mode but the step of how to do cannot be provided. Tossanope Kamnerdthong and Surachet Chutima [2] have studied HGA deformations post clamping using finite element analysis to reduce design the proper clamping fixture to reduce the deformation. Lim, B.B.; Yang, J.P [3] have studied shock analysis of MEMS actuator integrated with HGA for operational and non-operational HDD. The preloaded state of the suspension is considered for the simulation. The content of implementation of a Computer Aids Design (CAD) and a Computer Aids Engineering (CAE) optimization tool for their purpose was not discussed in above mentioned paper. This paper provides technique of CAD and simulation technique of CAE and shaping an innovative in organization and further use. The HSA consists of HGA and arm actuator engaged by experienced swaging process. The characteristics of both HGA and HSA are very important while the slider is flying over the media. Moreover, HGA can be considered as black box. The prediction of HGA or HSA resonance before making part is able to help manufacturing process to know the impact of KPIV on HGA or HSA resonance and excellent HGA or HSA is possibly achieved and delivered to the customer. However, the model and FE model developed can be taken for studying all static attitudes. The implicit of the prediction characteristics related to cost saving in an organization also.

II. Material and Method

At present, the CAD3D is being used for development the different products in manufacturer. All features of software is being supported to the complex geometry. A studying the both static and dynamic of the HGA and HSA based on creating 3D model linked with software CAE. As for the finite element analysis software owner improves the feature of linking with the CAD3D native file to reduce creating time. The 3D model also improves a lot of meshing techniques. The contents of this paper include of two parts as CAD3D development and finite element technique to study the resonance.

A. Nomenclature and specific word

A suspension assembly consists of the main components i.e. a base plate, load beam and gimbal as shown in the fig. 1.

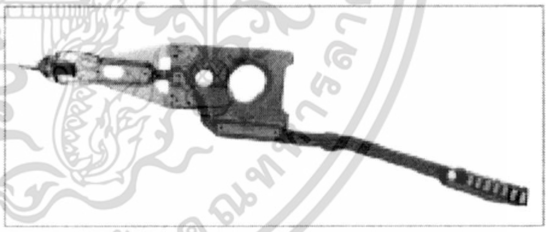


Fig. 1 Components of the suspension

(courtesy by http://www.global.tdk.com/ir/ir_library/annual/2011/html/segment/seg02.htm)

This paper is to study only suspension style as load-unload tab as shown in Fig. 1. The base plate is a component of suspension which is used for attaching the suspension assembly to the actuator E-block, typically through a swaging process. The load beam contains a spring region (the radius) and a rigid region (the rails). The spring region is adjusted by forming, rolling, or other means to provide the gram load for the assembly. The load beam's rails limit unwanted deflection between the radius and the gimbal. The gimbal is typically welded to the load beam or integrated into the load beam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

structure. The load beam geometry is the primary factor that influences on the resonance characteristics of the suspension assembly. The gimbal is a suspension feature to which the slider is attached. The gimbal's pitch and roll stiffnesses have a strong influence on the flying characteristics of the HGA. There are primarily two types of gimbals: integrated gimbals and flexures. The gimbals are integrated into a gimbal that is typically etched directly into the load beam. Suspensions used for integrating gimbals are called two-piece suspensions (base plate and load beam). The flexure is a gimbal that is initially a separate component. The flexure is laser welded to the load beam and pivots about the dimple. Suspension assemblies that use a flexure are called three-piece suspensions (base plate, load beam, flexure). Three-piece suspensions account for the majority of the suspension market. As mentioned earlier, the radius is region of the load beam which serves as a spring. The suspension's gram load and resonance are controlled through processing in this region and the rail is formed features in the load beam that provide rigidity between the radius and the gimbal. The rails serve to limit deflection in the load beam and maximize disk-to-rail clearance. A variety of rail configurations used depend on resonance requirements, disk-to-disk spacing, wire routing, gram load and part cost.

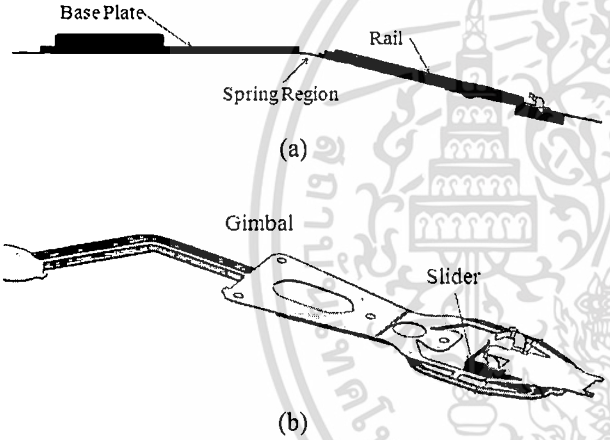


Fig. 2 Nomenclature of (a) the suspension (b) the gimbal

To design by CAD for CAE and study resonance need to rimarily understand the specific words that are defined as the ollowing. Firstly, the gram load is a reaction force at the load oint when the suspension assembly is elevated to offset eight. This force balances with the slider air bearing force and thus has a significant impact on fly height. It is common ractice to use units of gram for this force. Second, the spring ate is a changing rate in gram load against displacement at he load point. Generally, low spring rates are desirable since hey reduce the gram load variation due to mounting olerances, etc. Third, the free state angle is angle of the suspension after it has been rolled to produce the desired gram oad. This angle is primarily a function of the suspension spring rate and the length of the load beam. Fourth, the load oint is a location of the dimple on a suspension assembly where the suspension spring force is transferred to the slider.

Next, the static attitude can be described as pitch and roll angle of the gimbal's bond pad related to the mounting surface. The roll angle is about the longitudinal axis of the load beam. The pitch angle has relative to an axis that is orthogonal to the roll axis and parallel to the disk surface. Finally, the suspension offset height is a distance between the plane of the bond pad and the plane of the mounting surface.

B. 3D Model Development

The CAD3D has been being developed continuously. The suspension is a thin sheet. Because SolidWorks CAD3D has a feature of sheet metal so creation of the suspension 3D model will perform on sheet metal feature. In case of the base plate, damper and slider can be modelled by solid feature as shown in the Fig. 3.

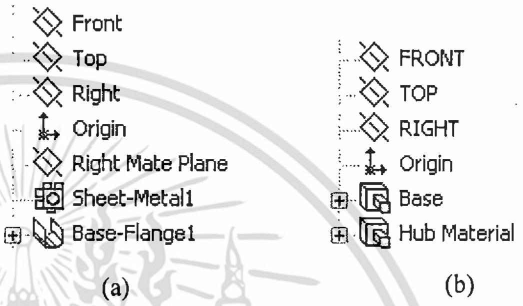


Fig. 3 SolidWorks Feature (a) Sheet metal Feature (b) Solid Model Feature

The sheet metal feature allows making a bending at spring region as for the lift tab or limiter can use the Jog feature to achieve the part as needed as shown in Fig. 4.

Fig. 4 Sheet metal feature allows making a bending at spring region

Because around spring region and out rigger has three part overlay this area so geometry analysis is necessarily to make the radius and angle use the equation option in the SolidWorks for this configuration management. The acquired model at free state angle must optimize the bent location and angle by linking with Ansys Workbench.

C. FE Model Development

The ANSYS Workbench can make a template for general use in the other models that have the same analysis. Template based analysis using Workbench has many benefits i.e. all analysis cases are bundled into one file, files can be easily understood by the others; has modular approaches and more efficient analysis. The solution set can be separated by insert snipped command for each analysis. The first is static analysis for optimization of the pregram location and pregram angle and evaluation the different parameters as gram load, average

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the transfer function for further use. This is gap for create the transfer function for other purpose.

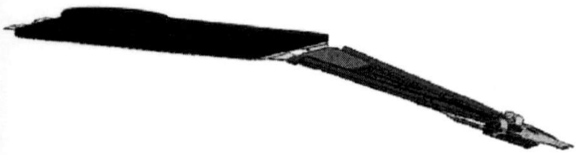


Fig. 2. The full HGA model for analysis

The aim of this work is to predict HSA static attitude by creation the transfer function with three dimensional finite element analysis model (FEA). At present, the swaging process is studied by performing the explicit dynamic finite element analysis (FEA) using ANSYS/LS-Dyna commercial software. Four base plates and three arms in the assembly are opted as a prototype in this study. Two balls swaging process with a constant velocity in the top-to-bottom direction was considered. The HGA was simulated by the implicit finite element analysis to find out sensitivity.

II. Material and Method

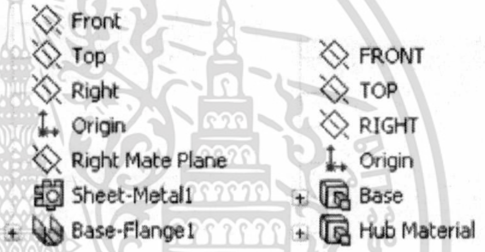
The finite element simulation of the ball swaging process was performed using the commercial software package. A three-dimensional (3-D) and a cross-sectional view of the finite element (FE) model of actuator arms used in swaging process are shown in Fig. 1 and HGA in Fig. 2.

A. HSA Model Development

In this simulation, a nonlinear explicit dynamics analysis was performed. If the stress is in the elastic deformation region, the relationship between the stress and the strain is linear. After the stress had reached the yield point, the relationship became nonlinear. The swaged part of the base plate undergoes plastic deformation. Nonlinear material properties should be considered. In addition, geometric nonlinearity was also considered in this analysis because the base plate undergoes large deformation at the swaged part. In the figure 1, the model includes three actuator arm tips, four base plates with part of hinges, four swage keys, and two swage balls. The inner spacer key was separated into two parts of assembly for analysing. During the swaging process, the clamping force at the outer key parts was constant and the arms were separated from each other using the spacer keys. In the FE model, the clamping pressure was applied as forces via force load curve. For simplicity, the swage keys that were employed to simulate the clamping boundary at the arm contact condition were identified as rigid bodies. The other components including actuator arm tips, base plates and hinges were deformable parts. The simulation used the same load curve for ball speed in each head and forced the swage ball to move in Z direction only according to its load curve. The boss tower of the base plate was plastically deformed and joined to the arm. The contact surface between the ball and swaging boss, the base plate and the arm, and swaging boss and the clamp were taken into account in the boss arm force analyzing. The friction coefficients for each contact surface were separated into two groups, i.e. contact surface of assembly and part-to-part contact. The base plates, hinges and the suspensions were made of stainless steel and the arms were made of aluminium. The swaging balls were made of stainless steel with hardened coating. Thus, the balls were simulated as rigid body. The material properties of models defined in the analysis were bilinear isotropic material and bi-linear kinematics hardening as listed in Table 1. All the elements used in this analysis were eight-nodes brick elements. To reduce the computational time, the model consisted of both rigid bodies and deformable bodies. The actuator arm hole and the base plate boss tower were prepared such that were finer meshes in the vicinity of the contact areas and coarser in the areas farther away.

B. HGA Model Development

In this part discusses the development approach of the suspension, a thin sheet. Because SolidWorks CAD3D has a feature of sheet metal, creation of the suspension 3D model will perform on sheet metal feature. In case of the base plate, damper and slider can be modelled by solid feature as shown in Fig. 3.



(a) (b)

Fig. 3 Feature model (a) Sheet metal feature (b) Solid model feature

The sheet metal feature allows making a bending at spring region as shown in Fig. 4. As for the lift tab or limiter can use the Jog feature to achieve the part as needed.

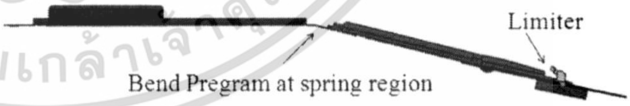


Fig. 4 Sheet metal feature allows making a bending at spring region

Because around spring region and out rigger have three parts that overlay this area, geometry analysis is necessarily to make the radius and angle using the equation option in CAD3D for this configuration management. The acquired model at free state angle must optimized in the bent location and angle by linking with Ansys Workbench and then loads the model at Z height. To find out the transfer function needs to primarily understand the definition of words. For example,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flexture Length (FL) implies the distance from the swage hole center to the slider center (L). Tip height (d) is defined as the distance from the swage hole center to the specific section.

TABLE I
MATERIAL PROPERTIES FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS

Material Properties	Type of Material	
	Stainless Steel	Aluminum
Elastic modulus, E (MPa)	190,000	71,016
Yield stress, Y (MPa)	206	275
Poisson ratio	0.32	0.33
Mass density (kg/m^3)	7889	2700

III. RESULTS

From FEA simulation, the base plate deformation extended of inner and outer arms were evaluated from the displacements value that measured from specific nodes compared with the reference plane as shown in table II. In all simulation cases, the simulation results have a tendency to the experiment. The boss tower deformation caused by swaging process is same as the cross-sectional actual model. However, the swage effect will be practically used as the offset value which is required by investigation and not considered in the current analysis.

TABLE II
RESULT OF BASE PLATE DEFORMATION

Parameters		Tip Height (inch)		Tip Pitch (degree)	
		FEA result	Actual data	FEA result	Actual data
Head 0	Outer arm	-0.00123	-0.00102	-0.572	-0.672
Head 1	Inner arm	0.00031	0.00027	0.473	0.537
Head 2	Inner arm	-0.0006	-0.0009	-0.520	-0.517
Head 3	Outer arm	0.00122	0.00118	0.437	0.543

The result of base plate deformation will be put in the transfer function to accomplish HSA static attitude and gram load. The sensitivity obtained from HGA model is the actual flexure length at load state. The bend pregram location leads to sensitivity calculation of pitch static attitude that sensitivity of gram load changed with base plate pitch and roll changed. The geometry analysis necessarily understands physics of the head stack assembly as shown in fig. 5. All those value will be used for creation the transfer function which is not shown here.

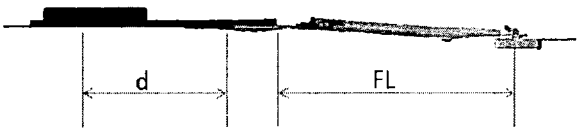


Fig. 5 HGA model at load state and preliminary parameter

The sensitivity equation obtained from HGA model and geometry analysis is a transfer function for prediction of head stack assembly performance as shown in table III.

TABLE III
PERFORMANCE OF THE HEAD STACK ASSEMBLY

			Target 2.1	Target 0.5	Target 2.5
HSA CTQ					
Tip Ht (inch)	Tip P (Deg)	Tip R (Deg)	PSA	RSA	Gramload
-0.00030	0.01	-0.03	2.18	0.47	2.49
0.00022	0.39	-0.01	2.29	0.51	2.39
0.00014	-0.49	-0.01	2.22	0.49	2.38
0.00020	-0.05	0.00	2.14	0.50	2.50
0.00007	-0.04	-0.01	2.21	0.49	2.44
0.00024	0.36	0.01	0.07	0.02	0.07

The HGA model was simulated via harmonic analysis to understand its characteristics and then design the experiment using one variable at a time technique. The top three sensitivities of the first torsion achieved from model are shown in fig. 6.

	Freq. (Hz/unit)		Gain (dB/unit)	
1T	1	Delta RG (9864 Hz)	1	Tip Height (0.27 dB)
	2	Loadbeam twist (6980 Hz)	2	Delta RG (0.16 dB)
	3	Pregram Bend Location (6872 Hz)	3	Pregram Bend Location (0.11 dB)

Fig. 6 Top three of KPIV impact to frequency and gain

IV. CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS

The behaviors and characteristics of the head gimbal assembly and head stack assembly can be predicted by using CAD and CAE to generate the transfer function. In actually, measured static attitude can be compared to the model prediction by putting the KPIV of HSA into the transfer function. From both model and experiment were able to filter out the root cause of the degrading of HSA as KPIV of HSA. KPIV of the HSA will be identified for deliverable HSA improvement. The HGA model is useful for studying the characteristics of the HSA and resonance budgeting. Because the deformation on the load beam and bend pregram location is prior parameter, so it should be controlled in swaging process. The design changed of HGA leads to the different transfer function. The transfer function accomplished is able to be used for spacer key design and other purposes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by Cooperate Project between National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Seagate Technology (Thailand) via Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

[1] S. K. Wadhwa, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 3, pp. 1837-1842, May 1996

[2] K. Aoki and K. Aruga, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives," Microsyst. Technol., vol. 13, pp. 943-949, 2007.

[3] T. Kamnerdtong, S. Chutima and K. Ekintumas, "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation," Eighth Asian Symposium on Visualization, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

[4] Jian Yang, Chen-Chi Lin, Shahab Tabrizi, "Finite Element Simulation of Ball Swaging Process of Jointing HGA With Actuator Arm and Gram Load Calculation", ASME Information Storage and Processing Systems Conference, Santa Clara, CA, 2007

[5] Khemakorn Chaloemsri. Parametric Study of Baseplate Geometry Using Finite Element Analysis, KKU Research Journal, Khonkaen, Thailand

[6] Rattaphom Khlaiaksorn, Evaluation of Head Stack Assembly Pitch Static Attitude by Means of Finite Element Analysis, KKU Research Journal, Khonkaen, Thailand

[7] ANSYS Theory Reference, 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ıternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 1
SSN 2250-3153

Improvement of Boss Tower for Single Ball Swaging in Hard Disk Drive

Joompondej Bamrungwongtaree[*], Mongkol Mongkolwongrojn[**]

[*] College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
[**] Mechanical Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

bstract- Ball swaging is a material process used to assemble a boss tower and an arm aperture. A swage ball is inserted into the boss wer to swage and couple two components. The swage ball has a larger diameter than an inner diameter of the boss tower, applies a ompression force to the inner surface of the boss tower to hold both components together with adequate holding force and without amaging the boss tower. This study proposes a new design of the boss tower by relief ring width optimization. It reduces the arm tip formation while avoiding HSA resonance and allows similar swaging quality by using single ball. The 3-D FE method was used for alysis. The result analysis and experiment show boss tower deformation very similar. Although the variation of CTQ has been creased, cleanliness has been improved. Moreover, non-circular arm aperture is able to reduce swage effect.

Index Terms- Ball Swaging, Finite Element, Head Stack Assembly, Spacer Key, Boss Tower

I. INTRODUCTION

n the hard disk drive (HDD) manufacturing process, ball swaging has long been a common process. The process assembles the Head Gimbal Assembly (HGA) base plates with actuator arm called the head stack assembly (HSA). A base plate includes a flange ving a top surface and an opposing second surface; and a boss tower having a swage hole and extending from an area where the ss tower meets the top surface of the flange to an end surface of the boss tower. The base plate is a component of a swage coupling sembly that is coupled to a component having an arm aperture as shown in Figure 1. The Figure 2 shows the configuration of the ss tower and the figure 3 shows several types of the boss tower profile which consist of basic components. During the swaging ocess, the ball is inserted through the boss tower to swage couple the boss tower to the arm aperture that clamped by swage keys. e swage ball applies a compression force to the inner surface of the boss tower, therefore the boss tower expands to hold the second mponent to the first component with adequate holding force and without damaging the boss tower. The base plate and arm tip formation cause an effect to many Critical To Quality parameters (CTQ).

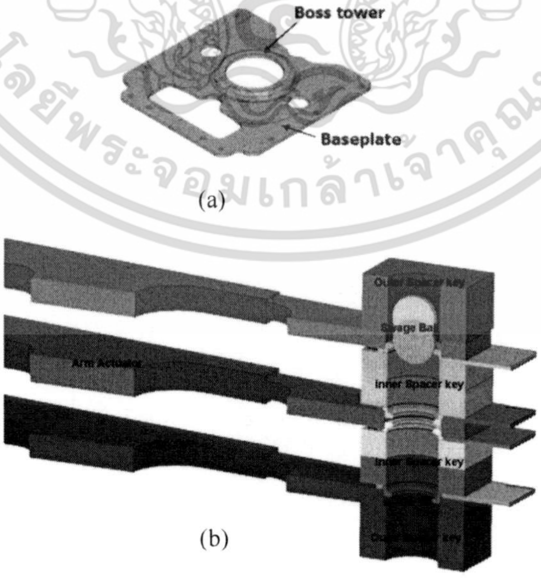


Figure 1: (a) Components of a base plate and (b) the Head Stack Assembly for swaging process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

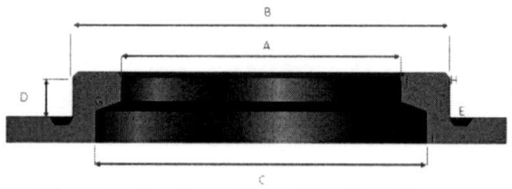


Figure 2: Configuration of the Boss Tower
A = Boss ID, B = Boss OD, C = Backbore Dia., D = Boss Height, E = Relief Ring, F = Top Transition Angles, G = Bottom Transition Angles, H = Back Angles and I = Backbore chamfer

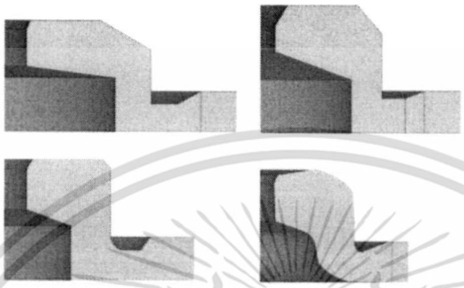


Figure 3: Boss Tower profiles

At present, the hard disk drive (HDD) capacity is dynamically increased while its size becomes slimmer and the read-write head ʼas tightened to move on the media. To reduce the swage effect of the new arm pad and head gimbal designed, all the configuration f the boss tower can be studied to reduce deviation after swaging process. The high deformation has occurred whilst the ball was ıssing through the boss tower as simply shown in Figure 4. The swaging process results in elastic-plastic deformation of boss tower ıd actuator arm hole. This deformation can cause disturbance in desired spring characteristic of the suspension on the actuator arm, ıown as the gramload changes from its design value, and change to desired torque out. Since gramload and torque out are the critical ırameters affecting the slider flight height and op-shock performance of hard disk drives, investigating the swaging process that ıduced base plate and arm deformation, HSA property and torque out change are of main focus. However, it is necessary to clarify e dimension of the boss tower profile to reduce swage effect and for single ball swaging.

The first study, Wadhwa [1] analysed the ball swaging process using an axially symmetric model, and Kittipong [2] numerically ·rified the deformation of the entire arm and HGA but the accuracy of the simulation has yet to be verified through experimentation. ɔki and Aruga [3] analysis using a three-dimension finite element was based on a symmetrical model for an actuator inner arm and o attached base plates. These studies provide a better understanding of the base plate deformation. In Jian Yang [4]'s analysis using hree-dimension finite element to study gram load changes, helps to understand the relationship between deformation and gram load ıanges. Some recommendations on having a spacer key to reduce swage effect and resonance analysis by three dimensional finite ·ment analysis model were given [5-8]. Athena Jiao et al. [9] found that the ball size introducing a 15% deformation is preferred for onance performance.

The aim of this research is to study the effects of the boss tower parameters and to optimize the use of single ball swaging process. e current boss tower will be developed to be used for a single ball in swaging process. The swaging process is investigated by ·rforming explicit dynamic finite element analysis (FEA) using a commercial program ANSYS/LS-Dyna [10]. Initial study is on an n coupon and validation then move into experiment with ten base plates and six arms in the assembly as a prototype in actual ɔcess. The clamping force in a single ball swaging process is considered constant; its velocity remains constant in the top-to-bottom ection.

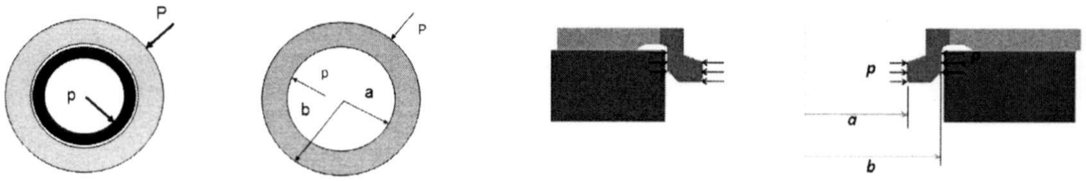
II. GOVERNING EQUATION

The Figure 4 shows the diagram of the swaging structure. Inherently, the swaging process is a sophisticated problem of metal ınsformation involving three objects which includes base plate, arm and swage ball that are different in shape and material ›perties.

Thus, the complete model for the swaging process would be extremely complicated and will be affected by a number of parameters. ıny factors are involved which all contribute to the shift of the HSA characteristics. In this paper, the focus is on how to use a one-l to assemble HSA while maintaining the HSA characteristics. Many parameters relatively were varied.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 3
SSN 2250-3153



(a) (b)

Figure 4: (a) Swaging schematic (b) Arm aperture model as thick cylinders

'he governing equation of swaging process can be written in equation

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \qquad (1)$$

nd

$$\frac{d^4\phi}{dr^4} + \frac{2}{r}\frac{d^3\phi}{dr^3} - \frac{1}{r^2}\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{1}{r^3}\frac{d\phi}{dr} = 0 \qquad (2)$$

/here σ_r and σ_θ are radial and circumferential stresses respectively and ϕ is the Airy's stress function is in the form

$$\phi = \frac{\lambda}{2} r^2 + \beta \log r \qquad (3)$$

o simplify the theoretical model and make it is reasonable, the deformation occurring in the swaging process is considered as thick ylinder as shown in Figure 4(b). In absence of body force for this axisymmetric, Lame formula can be used here to calculate the ress generated at different locations [9].

$$\sigma_\theta = \frac{pa^2 - Pb^2}{b^2 - a^2} + \frac{(p-P)a^2b^2}{b^2 - a^2}\frac{1}{r^2} \qquad (4)$$

$$\sigma_r = \frac{pa^2 - Pb^2}{b^2 - a^2} - \frac{(p-P)a^2b^2}{b^2 - a^2}\frac{1}{r^2} \qquad (5)$$

ie displacement can be derived using the formula below.

$$u_r = \frac{1}{E}\left[\frac{(1-\upsilon)(pa^2 - Pb^2)}{b^2 - a^2} r + \frac{(1+\upsilon)a^2b^2(p-P)}{b^2 - a^2} r\right] \qquad (6)$$

ith Tresca rules applied [9], then further relationship can be derived, material will begin to yield when τ_{max}, the maximum shear ess, is equal to τ_y the yield stress. Since σ_θ and σ_r are principal stresses, yielding will begin when

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} = \tau_y \qquad (7)$$

w define a radius r_p so that region $a \le r \le r_p$ is in the plastic region and $r_p \le r \le b$ is in the elastic region then obtain

$$\sigma_r = -2\tau_y \log\frac{r_p}{r} - p_{r_p} \; ; a \le r \le r_p \qquad (8)$$

e ball size will affect the inner pressure applied to the boss tower and then further engage to an arm hole. The relationship between l size and the inner pressure force is as well as the degree of plastic deformation of base plate and boss tower. In the actual swaging ocess, the base plate's boss tower is more complicated than in the simulation. Thus, the finite element analysis will be used to study the single ball swaging to approach this behaviour.

III. SWAGING NUMERICAL MODEL

The finite element simulation of a single ball swaging process was performed with the commercial software package. The explicit namics simulation, the equilibrium equations in dynamic analysis can be written in the form

$$[M]\left[\ddot{u}^{(i)}\right] = \left[F^{(i)}\right] - \left[I^{(i)}\right] \qquad (9)$$

ere $[M]$ is mass matrix, F is the vector of externally applied load and I is the vector of inertia forces. The mathematically ilibrium relation is a system of linear differential equations of second order. The solution can be obtained by finite difference pression to approximate the accelerations and velocities in terms of displacement which can be written as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 4
SSN 2250-3153

$$\ddot{u}^{(i)} = \frac{1}{\Delta t^2}\left(u^{(i+1)} - 2u^{(i)} + u^{(i-1)}\right) \quad (10)$$

[he error of calculation depends on stable increment of time as the relation is shown below

$$\Delta t_{stable} = \min\left(\frac{L_c}{c}\right) \quad (11)$$

vhere L_c is limited element edge length and c is velocity of longitudinal wave for an element is in the form

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (12)$$

. and μ is Lame' constants can be written in terms of young's modulus and passion ratio as follows

$$\lambda = \frac{\upsilon E}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)} \quad (13)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \quad (14)$$

The stable time expression mentioned for only one element in practically the LS-DYNA solver automatically calculates the inimum time step for each element based on its characteristic length and density. The smallest of these element time steps is called e critical time step. The actual time step used during solution is the product of the current critical time step and a stability factor sually 0.90). As elements distort during the analysis, their time steps are recalculated. However, an element's time step is calculated ased on its material properties (E, υ, ρ) and characteristic length. The equation can be rearranged to find the required density of each ement for a desired time step size. By adding the corresponding mass to these elements, the solution time will be reduced. This ocedure is known as mass scaling and not recommended. In this paper, mass was not added to speed up run. A three-dimensional -D) and a cross-sectional view of the finite element (FE) model used for swaging process of actuator arms are shown in Figure 5 and

Figure 5: Four base plate and three arms in the assembly for swaging simulation

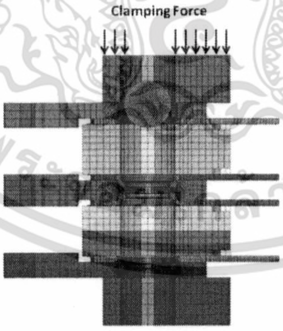


Figure 6: Cross-sectional view of four base plates and three arms in the assembly for swaging simulation

The swage torque out after the ball is driven through the boss tower the base plate and attached suspension was securely fastened to actuator arm pad. The equation of swage torque can be derived from

$$T = rF \quad (15)$$

ere

$$F = \mu N \quad (16)$$

d now substitution eq. (16) into eq. (15) got

$$T = r\mu \int_0^{2\pi} P \frac{rL}{N_e} d\theta \quad (17)$$

nplify the eq. (17) obtain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 5
SSN 2250-3153

$$T = \mu PA \frac{D}{2N_e} \tag{18}$$

vhere T is HGA torque out, μ is coefficient of friction, P is contact pressure, D is a diameter of swage hole, and N_e is the number of ngaged element. Practically, an average pressure and contact area substitution in (18) to obtain HGA torque out. However, current rocess has standard swage and micro-swage; the swage torque out relation of both can start from (15). For standard swaging,

$$T_s = r_s F_s \tag{19}$$

Vhere $F_s = 2\pi r_s \mu_s$ then

$$T_s = \mu_s 2\pi r_s^2 \tag{20}$$

olving for μ

$$\mu = \frac{T_s}{2\pi r_s^2} \tag{21}$$

s for micro-swage start from eq. (15)

$$T_{ms} = r_{ms} F_{ms} \tag{22}$$

olving for μ

$$\mu = \frac{T_{ms}}{2\pi r_{ms}^2} \tag{23}$$

rom Eq. (21) and (23) obtain

$$\frac{T_s}{2\pi r_s^2} = \frac{T_{ms}}{2\pi r_{ms}^2} \tag{24}$$

ıus

$$T_s = \frac{r_s^2}{r_{ms}^2} T_{ms} \tag{25}$$

uation (25) is theoretical micro-swage flange effect comparison where T_s is standard HGA torque out, T_{ms} is micro-swage HGA rque out, r_s is radius of standard swage, r_{ms} is radius of micro-swage. In this analysis, a nonlinear explicit dynamics analysis is rformed. The swaged part of the base plate undergoes plastic deformation. Nonlinear material properties are considered. To save ie consumption, the model is presented with three actuator arm tip, four base plates with part of hinges, four swage keys, and one age ball. The inner spacer key was separated to two part of assembly for specific analysis, as shown in Figure 6. As for the periment, six arms with ten headers are used.

IV. BOUNDARY CONDITIONS AND CONTACT SURFACES

During the swaging process, the constant clamping force at the outer key parts during swaging is constant and the arms are parated from each other by the spacer keys. In the FE model, the clamping pressure is applied as forces via force load curve. In other rds, the swage keys, which are employed to simulate the clamping boundary at the arm contact condition, are partial modelled as id bodies and does not include spacer key's tail while the other components including actuator arm tip, base plates and hinges are formable parts. The simulation uses the same load curve for ball speed for each heads and swage ball; and is forced to move in Z ection only according to its load curve. The boss tower of the base plate is plastically deformed and joined to the arm. The contact face between the ball and swaging boss, between the base plate and the arm, and the one between swaging boss and the clamp are en into account in analysing the boss arm force. The friction coefficients for each contact surface are divided into two groups, itact surface of assembly and part-to-part contact. The base plate, hinge and the suspension are made of stainless steel while the arm made of aluminum. The swaging ball is made of stainless steel with hardened coating. Thus, the ball is simulated as a rigid body. e material models defined in the analysis are bilinear isotropic material and bi-linear kinematics hardening. The properties of the terials used in the simulation are listed in Table 1. The interesting area will be defined as component name to recall in post cessor.

All the elements used in the analysis are eight-nodes brick elements. To further reduce the computing time, the model consists of h rigid bodies and deformable bodies. The actuator arm hole and the base plate's boss tower are prepared and that the finer meshes only required in the vicinity of the contact areas and the elements are coarser in the areas farther away.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 6
SSN 2250-3153

Table 1: Material properties for finite element analysis

Material Properties	Type of Materials	
	Stainless steel	**Aluminum**
Elastic modulus, E (MPa)	190,000	71,016
Yield stress, Y (MPa)	206	275
Poisson ratio	0.32	0.33
Mass density (kg/m^3)	7,889	2,700

V. FINITE ELEMENT MODEL VALIDATION

The boss tower and arm tip deformation results from FEA simulations for inner and outer arms are evaluated from the isplacements value that measured from specific nodes compared to the reference plane. For all simulated cases, the results have ndency to value from experimental data with strictly control the incoming part. However, the focus is on the effect of the boss tower maintain the HSA characteristics with single ball which accompany with cost saving, there are some offset that must be controlled. hese differences could be from some other effects that were not considered in the present analysis for sample swage shuttle. The ustration of boss tower deformation from swaging process is shown in Figure 7 and 8.

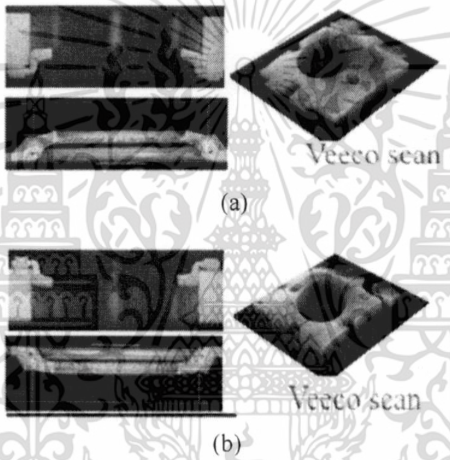


Figure 7: (a) DN Facing head (b) UP Facing head comparison boss tower X-section deformation and Veeco scan

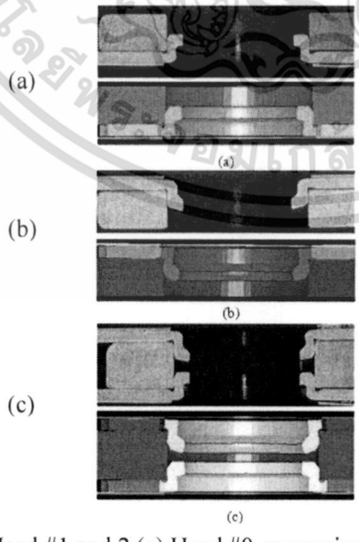


Figure 8: (a) Head #3 (b) Head #1 and 2 (c) Head #0 comparison boss tower X-section deformation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ıternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012
ꟷSN 2250-3153

VI. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, the behaviors and characteristics of the base plate's boss tower profile after a completed swaging process are studied. 'able 2 shows comparison between simulation and experimental results. This paper presented the results of screening parameters on rocess optimization of key parameters for single ball swaging. The optimal parameter setting yield the optimum performance with ıree parameters after sereening from nineteen parameters. In this case, these parameters are main effect of the parameter variation. 'he main parameters that affected HSA characteristics are the base plate relief ring width both DN and UP Tab as shown in Figure 9.

Table 2: Simulation and experimental results

Parameters		Tip Height (inch)		Tip Pitch (degree)	
		FEA result	Actual data	FEA result	Actual data
Head 0	Outer arm	-0.00123	-0.00102	-0.572	-0.672
Head 1	Inner arm	0.00031	0.00027	0.473	0.537
Head 2	Inner arm	-0.0006	-0.0009	-0.520	-0.517
Head 3	Outer arm	0.00122	0.00118	0.437	0.543

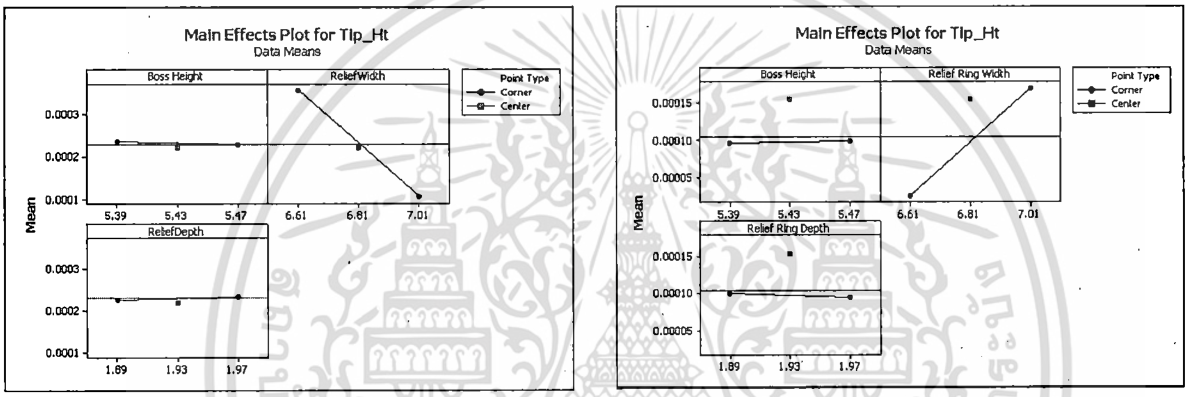
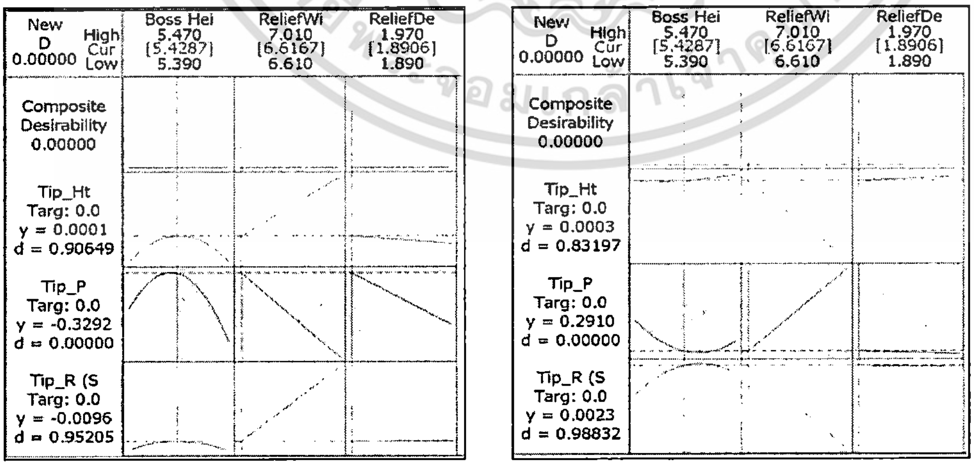


Figure 9: Main effect plot for (a) DN Tab, Tip_Ht (b) UP Tab, Tip_Ht

After the effects of three parameters i.e boss height, relief width and relief depth were screened from nineteen parameters, the ꟷsult from the simulation will be used for optimal factor setting. The optimum parameter is shown in the Figure 10. The other two ꟷrameters were fixed at the same condition to find the proper relief ring width. Obviously from experiment, larger relief ring width ꟷovides torque out a bit higher both two tabs for outer arm and comparable with the middle arm. UP tab should be small relief ring ꟷdth. On the other hand, DN tab should be large.



(a) (b)

Figure 10: Optimization (a) UP Tab (b) DN Tab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 8
SSN 2250-3153

From this analysis, it leads to new design of the boss tower by relief ring width optimization. A relief ring is not identical width which distance A is more than that B as shown in Figure 11. Figure 12 shows cross section of the optimal relief ring width. Moreover, his design is able to avoid HSA resonance (Nyquist frequency of using 256 servo sectors) similar to using loctite HGA to arm. The xperimental results reveal that the frequency shifted from 11kHz to 12kHz. The actual part of HGA torque out, actual cross section, he actual HSA for ten headers are studied and tested and those results reveal that arm tip deformation is reduced as shown in Figure 3. The HSA ten header with single ball swaging was tested the resonance of FRF, the result are acceptable and shift the 11.5kHz to ower frequency to avoid resonance. Also found that the single ball swaging process for ten headers approach to KPIV chart model. he effects of swage shuttle, spacer key land on swaging process will be used as STX DFM.

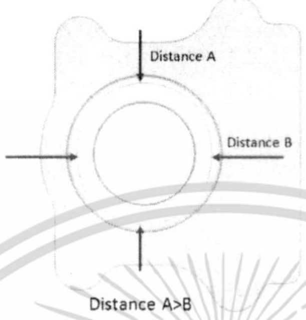


Figure 11: Optimal relief ring width

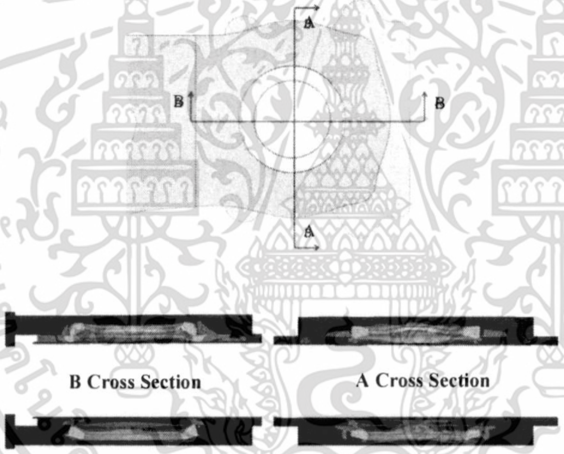
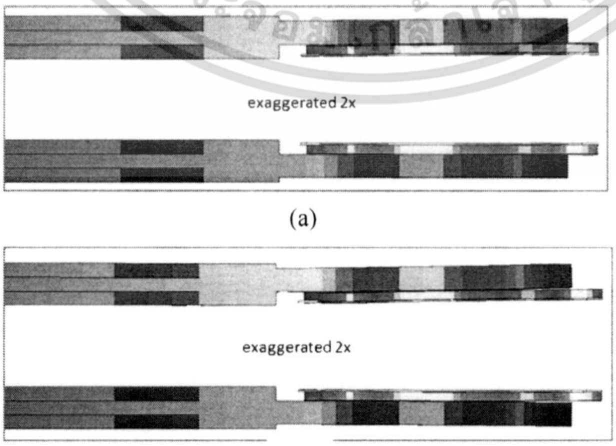


Figure 12: Cross section of the optimal relief ring width



(a)

(b)

Figure 13: Relief ring width (a) Optimized cause less deformation both TAB UP and DN (b) Non-Optimized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ıternational Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 9
SSN 2250-3153

VII. CONCLUSION

In this paper, the behaviors and characteristics of the base plate's boss tower profile were studied. The analysis reveals that the elief ring width should be a main focus when using single ball in swaging process. The analysis leads to a new design of the boss ower by combination of optimal relief ring width together. Figure 11 illustrates a schematic diagram of a perimeter of relief ring. In ıarticular, Figure 12 and 13 illustrate how the perimeter varies from a minimum compression force to a maximum compression force. 'he experimental result also shows that the arm thickness is not related to HGA torque out. Still, the impact to arm tip deformation eads to resonance frequency. The new design of boss tower is able to apply with thin arm for reduction of the arm tip deformation. 'rom analysis, the relief ring depth excessive results in flange effect. A small top transition angle can reduce the boss tower ıeformation. The very low bottom transition angle results in swage push out defect. The backbore diameter is used for boss tower inging. Although relief ring is mainly a potential impact to HSA quality, for a single ball swaging, not only relief ring is improved, in ctual process some parameters also are slightly adjusted to keep HSA characteristics CTQ and swage push out is decreased; thus a ontact angle is recommended. Back bore chamfer is required to reduce suspension weight, right angle can be ignored for back bore. Vhen re-work is considered, there is no impact to the installed head due the same ball size is used and just passed through. However, KSA lower header has lower impact to HSA characteristics because long distance has more chance to face swage damage if ball speed . increased. The dimension of spacer key land should be controlled to ensure that other defect will not occurred during swaging rocess. From eq. 25, with STX boss tower the standard swage has HGA torque out approximately two times of micro-swage.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by Cooperate Project between National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and eagate Technology (Thailand) via Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, King Mongkut's stitute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

[1] S.K. Wadhwa, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 1837-1842.

[2] E. Kittipong, C. Surachate, K. Thoatsanope, "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation," *Eighth Asian Symposium on Visualization*, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

[3] K. Aoki and K. Aruga, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives," *Microsyst. Technol*, Vol. 13, 2007, pp. 943-949.

[4] L. Chen-Chi, Y. Jian, and Ti. Shahab, "Finite Element Simulation of Ball Swaging Process of Jointing HGA With Actuator Arm and Gram Load Calculation," *ASME Information Storage and Processing Systems Conference*. 2007. Santa Clara, CA.

[5] B. Joompon, "Effect of the Spacer Key on Swage Push out," *International Conference of Business and Industrial Research*, Bangkok, Thailand, 17-18 March 2010.Bangkok, Thailand.

[6] B. Joompon, "Effect of the Spacer Key to HAS," *3rd International Conference on Data Storage Technology*, Bangkok, Thailand, 2010, pp.131-134

[7] B. Joompon, "Study of Outer Key to Reduce Outer Arm Swage Effect," *Joint International Conference On Information & Communication Technology Electronic and Electrical Engineering, Luangprabang*, Lao PRD, 2010, pp.16-19

[8] B. Joomponladej, "A Development of modeling for Resonance Analysis," *4th International Conference on Data Storage Technology*, Bangkok, Thailand, 2011, pp.108-111

[9] A. Jiao, Z. Liu, L. Pan, M. Ying, "Swaging Force Control in Drive Resonance Response," *IEEE Trans. Magnetic Recording Conference*, Singapore, 2009, pp. BS04

[10] Livermore Software Technol. Corp. *LS-Dyna Theory Manual*, Livermore, CA, 2006.

AUTHORS

rst Author – Joompondej Bamrungwongtaree, M.Eng, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , joompondej.bamrungwongtaree@seagate.com.

cond Author – Mongkol Mongkolwongrojn, Ph.D (Mechanical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, kmmongko@kmitl.ac.th

rrespondence Author – Pattaraweerin Woraratsoontorn, oaw2520@hotmail.com, jomeb@hotmail.com, (66)96472455.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dear Authors,

Thanks for your concern.

Before you begin editing, please choose the topic of your manuscript: (A. Material Science and Engineering)

A. Material Science and Engineering

B. Nanomaterials and Nanostructure Synthesis and Properties

C. Nano Devices and System

D. Nano materials, Technologies for Applications

E. Circuits and Systems

F. Mechanical Engineering

G. Industrial Electronics

H. Others:______________________________.

This is very important.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study swaging process for reduction Swage effect in Hard Disk Drive

Joompondej Bamrungwongtaree[1,a] and Mongkol Mongkolwongrojn[2,b]

[1]College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

[2]Mechanical Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

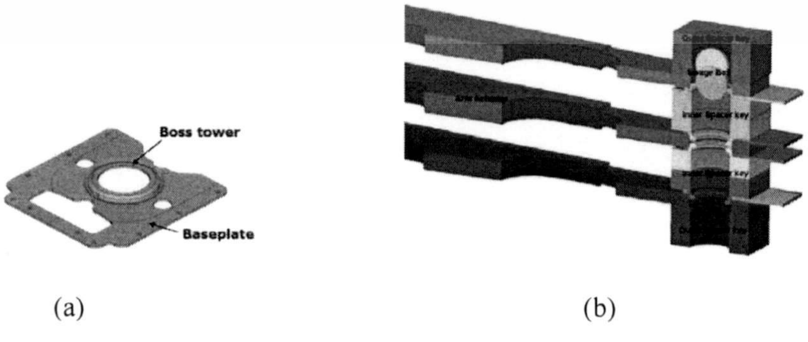
[a]joompondej.bamrungwongtaree@seagate.com, [b]kmmongko@kmitl.ac.th

Keywords: Ball Swaging, Finite Element, Head Stack Assembly, Spacer Key, Boss Tower

Abstract. In hard disk drive manufacturing common uses ball swaging. It is a process that used to assemble a boss tower and an arm aperture. The swage ball has a larger diameter than an inner diameter of the boss tower. Application a compression force to the inner surface of the boss tower to hold both components together with adequate holding force and without damaging the boss tower components result in HGA torque retention. Measurements of HSA KPIV after swaging obtained from deformation of base plate and arm pad together. Due to hard disk drive is dynamically developed by increasing in the areal density and reducing in size, thus the arm pad is thinned. This study focuses on reducing of the swage effect by control outer arm pad deformation to maintain HSA performance. HGA torque retention was considered to reduce gap to arm and to avoid HSA resonance while swaging quality was similar. The 3-D FE method was used for analysis. The analysis and experiment show that HGA torque retention and the arm aperture modified was almost linear. Furthermore, the reduction of arm deformation and gap to arm cause increasing in HSA performance. The arm aperture can be modified for manufacturability.

Introduction

In the hard disk drive (HDD) manufacturing process, ball swaging has long been a common process. The process assembles the Head Gimbal Assembly (HGA) base plates with actuator arm called the head stack assembly (HSA). A base plate includes a flange having a top surface and an opposing second surface; and a boss tower having a swage hole and extending from an area where the boss tower meets the top surface of the flange to an end surface of the boss tower. The base plate is a component of a swage coupling assembly that is coupled to a component having an arm aperture as shown in Figure 1. The Figure 2 shows the configuration of the arm hookup and the figure 3 shows arm pad which become thinner. During the swaging process, the ball is inserted through the boss tower to swage couple the boss tower to the arm aperture that clamped by swage keys. The swage ball applies a compression force to the inner surface of the boss tower, therefore the boss tower expands to hold the second component to the first component with adequate holding force and without damaging the boss tower. The base plate and arm tip deformation cause an effect to many Critical To Quality parameters (CTQ) [1].



(a) (b)

Figure 1 (a) Components of a base plate (b) the Head Stack Assembly for swaging process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

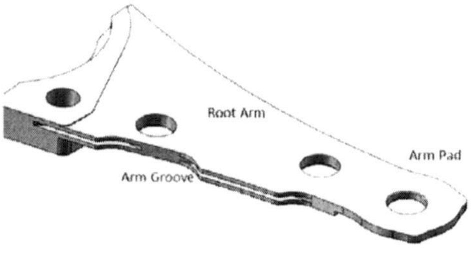


Figure 2 Arm Configuration

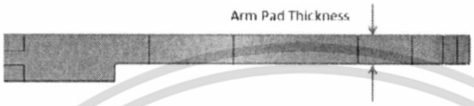


Figure 3 Arm Pad or Swage Pad thickness

At present, the hard disk drive (HDD) capacity is dynamically increased while its size becomes slimmer and the read-write head was tightened to move on the media. To reduce the swage effect of the new arm pad and head gimbal designed, all the configuration of the arm pad can be studied to reduce deviation after swaging process. The swaging process results in elastic-plastic deformation of boss tower and actuator arm hole. This deformation can cause disturbance in desired spring characteristic of the suspension on the actuator arm, known as the gramload changes from its design value, and change to desired torque out. Since gramload and torque retention are the critical parameters affecting the slider flight height and op-shock performance of hard disk drives, investigating the swaging process that induced base plate and arm deformation, HSA property and torque retention change are of main focus. However, the boss tower profile was able to reduce swage effect for single ball swaging [1].

The first study, Wadhwa [2] analysed the ball swaging process using an axially symmetric model, and Kittipong [3] numerically verified the deformation of the entire arm and HGA but the accuracy of the simulation has yet to be verified through experimentation. Aoki and Aruga [4] analysis using a three-dimension finite element was based on a symmetrical model for an actuator inner arm and two attached base plates. These studies provide a better understanding of the base plate deformation. In Jian Yang [5]'s analysis using a three-dimension finite element to study gram load changes, helps to understand the relationship between deformation and gram load changes. Some recommendations on having a spacer key to reduce swage effect and resonance analysis by three dimensional finite element analysis model were given but for very thin arm still need to study [6-9]. Athena Jiao et al. [10] found that the ball size introducing a 15% deformation is preferred for resonance performance.

The aim of this research is to study the swage effects of the HSA in swaging process. The current boss tower and arm pad will be developed to be studied in swaging process. The swaging process is investigated by performing explicit dynamic finite element analysis (FEA) using a commercial program ANSYS/LS-Dyna [11].

Governing Equation

Inherently, the swaging process is a sophisticated problem of metal transformation involving three objects which includes base plate, arm and swage ball that are different in shape and material properties. Thus, the complete model for the swaging process would be extremely complicated and will be affected by a number of parameters. Many factors are involved which all contribute to the shift of the HSA characteristics. The important parameter is relief ring. Shape of boss tower was developed while arm pad is being designed [1]. In this paper, the focus on reduction of swage effect for ball

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

swaging to assemble HSA while maintaining the HSA characteristics. Modified arm aperture will be considered.

The swage torque out after the ball is driven through the boss tower the base plate and attached suspension was securely fastened to the actuator arm pad. The equation of swage torque can be derived from

$$T = rF \tag{1}$$

Where

$$F = \mu N \tag{2}$$

And now substitution Eq. 2 into Eq. 1 got

$$T = r\mu \int_{0}^{2\pi} P\frac{rL}{N_e} d\theta \tag{3}$$

Simplify the Eq. 3 obtain

$$T = \mu PA \frac{D}{2N_e} \tag{4}$$

where T is HGA torque out, μ is coefficient of friction, P is contact pressure, D is a diameter of swage hole, and N_e is the number of engaged element. Practically, an average pressure and contact area substitution in Eq. 4 to obtain HGA torque out. However, current process has standard swage and micro-swage; the swage torque out relation of both can start from Eq. 1. For standard swaging,

$$T_s = r_s F_s \tag{5}$$

Where $F_s = 2\pi r_s \mu_s$ then

$$T_s = \mu_s 2\pi r_s^2 \tag{6}$$

Solving for μ

$$\mu = \frac{T_s}{2\pi r_s^2} \tag{7}$$

As for micro-swage start from Eq. 1

$$T_{ms} = r_{ms} F_{ms} \tag{8}$$

Solving for μ

$$\mu = \frac{T_{ms}}{2\pi r_{ms}^2} \tag{9}$$

From Eq. 8 and 9 obtain

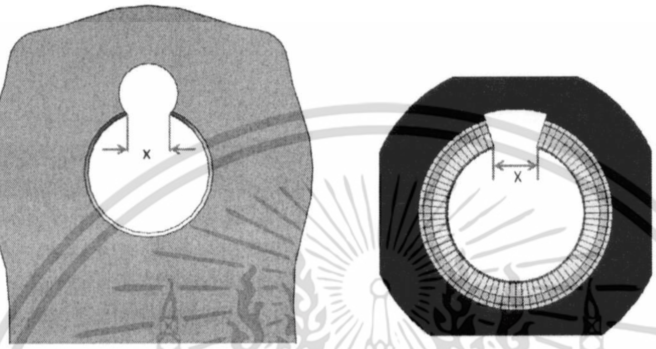
$$\frac{T_s}{2\pi r_s^2} = \frac{T_{ms}}{2\pi r_{ms}^2} \tag{10}$$

Thus

$$T_s = \frac{r_s^2}{r_{ms}^2} T_{ms} \tag{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equation 11 is theoretical micro-swage flange effect comparison where T_s is standard HGA torque out, T_{ms} is micro-swage HGA torque out, r_s is radius of standard swage, r_{ms} is radius of micro-swage. Equation 11 was not mentioned or related to the performance of HSA but just demonstrates the arm aperture size and HGA torque retention. In this analysis, a nonlinear explicit dynamics analysis was performed. The swaged part of the base plate undergoes plastic deformation. Nonlinear material properties were considered [1]. As for the experiment, three arms with four headers were used. The arm aperture was being modified as shown in Figure 4. The distance x and arm thickness were varied and HGA torque retention was determined.



(a) (b)

Figure 4 Condition and configuration of (a) arm aperture and (b) boss tower

Boundary Conditions and Contact Surfaces

During the swaging process, the constant clamping force at the outer key parts during swaging is constant and the arms are separated from each other by the spacer keys. In the FE model, the clamping pressure is applied as forces via force load curve. In other words, the swage keys, which are employed to simulate the clamping boundary at the arm contact condition, are partial modelled as rigid bodies and does not include spacer key's tail while the other components including actuator arm tip, base plates and hinges are deformable parts. The simulation uses the same load curve for ball speed for each heads and swage ball; and is forced to move in Z direction only according to its load curve. The boss tower of the base plate is plastically deformed and joined to the arm. The contact surface between the ball and swaging boss, between the base plate and the arm, and the one between swaging boss and the clamp are taken into account in analysing the boss arm force. The friction coefficients for each contact surface are divided into two groups, contact surface of assembly and part-to-part contact. The base plate, hinge and the suspension are made of stainless steel while the arm is made of aluminum. The swaging ball is made of stainless steel with hardened coating. Thus, the ball is simulated as a rigid body. The material models defined in the analysis are bilinear isotropic material and bi-linear kinematics hardening. The properties of the materials used in the simulation are listed in Table 1. The interesting area will be defined as component name to recall in post processor.

Table 1 Material properties for finite element analysis

Material Properties	**Type of Materials**	
	Stainless steel	**Aluminum**
Elastic modulus, E (MPa)	190,000	71,016
Yield stress, Y (MPa)	206	275
Poisson ratio	0.32	0.33
Mass density (kg/m^3)	7,889	2,700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All the elements used in the analysis are eight-nodes brick elements. To further reduce the computing time, the model consists of both rigid bodies and deformable bodies. The actuator arm hole and the base plate's boss tower are prepared and that the finer meshes are only required in the vicinity of the contact areas and the elements are coarser in the areas farther away [1].

Results and Discussions

In this study, the arm pad aperture and boss tower was being modified and result of HGA torque retention are studied. Table 2 shows HGA torque retention by modify arm aperture and boss tower. The arm thickness was not related to HGA torque retention. The relationship of slot width and torque retention is shown in Figure 5 from selected 10 mil arm thickness. HGA torque retention was rapidly reduced at 0.813 mm of distance x. Therefore, this distance x of arm aperture was considered.

Table 2 HGA Torque retention (inch-oz)

	Arm Thickness (mil)		
Condition	8	10	12
Control	7.37	7.41	7.29
Slot 1 side*	6.10	5.93	5.99
Boss 1 slot**	5.90	6.20	6.10
Slot 2 sides*	5.80	5.72	5.90
Boss 2 slots**	5.23	5.42	5.38
Reduce Boss height	6.83	6.90	6.86

*Slot width at 0.813 mm
**Slot width at 0.813 mm

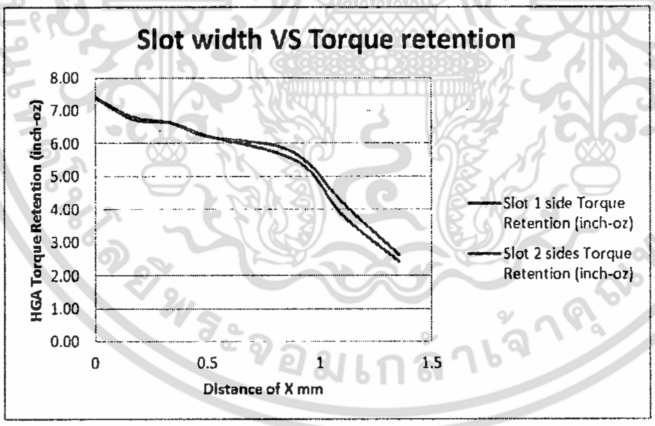


Figure 5 Slot width versus torque retention at 10 mil arm thickness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

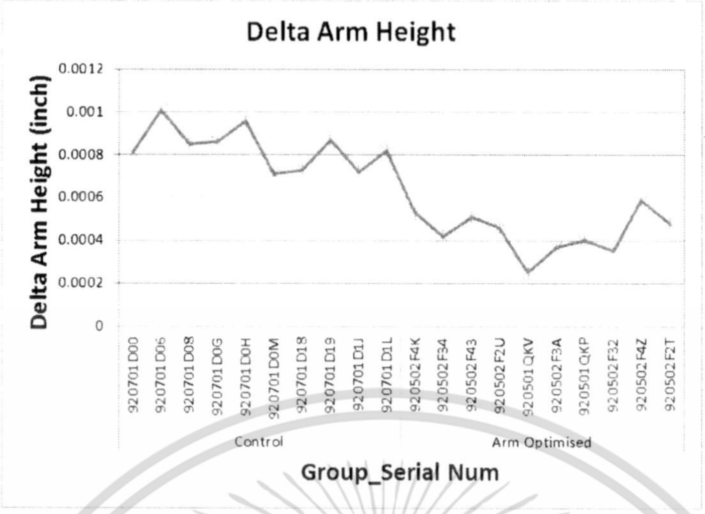
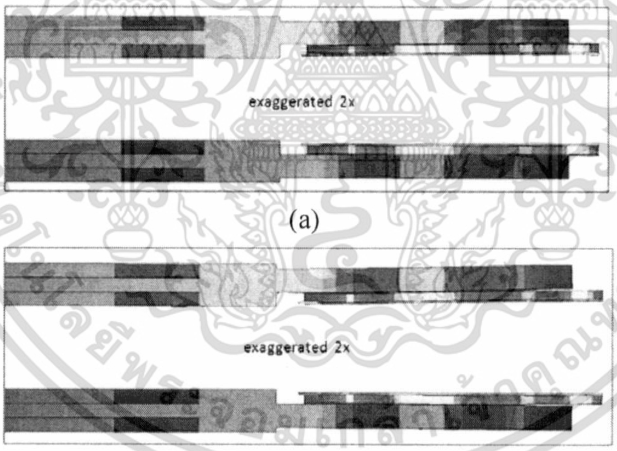


Figure 6 Experimental results of arm pad deviation at 10 mil arm thickness

Figure 6 reveals that the delta or differences of before and after swaging of arm height for arm optimized were less than those for control. Hence, modified arm aperture was able to reduce arm deviation after experience swaging process. Moreover, experimental results show all over minimum specification of HGA torque retention.



(a)

(b)

Figure 7 (a) Optimized arm aperture cause less deformation and gap to arm (b) Non-Optimized

Figure 7 shows arm aperture optimized cause less gap to arm and arm pad deformation. Thus, this design was able to avoid HSA resonance (Nyquist frequency of using 256 servo sectors) which was similar to using loctite HGA to arm.

Conclusion

In this paper, the arm aperture and boss tower were studied and focused on the outer arm. The analysis reveals that the torque retention and circumstance reduced was almost linear until 0.813 mm of distance x where it was dramatically decreased. The analysis leads to a new design of the arm aperture. The experimental result also shows that the arm thickness was not related to HGA torque out. The gap to arm can lead to resonance frequency. The new design of arm aperture is able

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to apply with thinner arm for reduction of the arm tip deformation and gap to arm. In actual process has limitation of the mid arm thickness because boss tower can not touch each other but in machining of arm hook up need to have same arm aperture. When rework was considered, there is not impact to rework process due to still use the same machine and method of rework process. However, in this study the 10 mil arm thickness was regarded to modify the arm aperture, arm thickness was smaller 10 mil that was not recommended because of non-optimum HSA KPIV (Tip height, Tip pitch and Tip roll). In traditional swaging, arm aperture was larger than micro-swage which circumstance of arm aperture was nearer arm edge than arm aperture in micro-swage. Therefore, arm aperture in micro-swage should be positioned appropriately to arm edge. The dimension of spacer key land should be controlled to ensure that other defect will not occurred during swaging process. From Eq. 11, with STX boss tower the standard swage has HGA torque out approximately two times of micro-swage. Modifying the arm aperture is prefered because machining process is easier and has torque retention higher than the boss tower.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by Cooperate Project between National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Seagate Technology (Thailand) via Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

[1] B. Joompondej, M. Mongkol: Improvement of Boss Tower for Single Ball Swaging in Hard Disk Drive, International Journal of Scientific and Research Publications, Nov 2012.

[2] S.K. Wadhwa: Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 1837-1842.

[3] E. Kittipong, C. Surachate, K. Thoatsanope: Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation, Eighth Asian Symposium on Visualization, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

[4] K. Aoki and K. Aruga: Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives, Microsyst. Technol, Vol. 13, 2007, pp. 943-949.

[5] L. Chen-Chi, Y. Jian, and Ti. Shahab: Finite Element Simulation of Ball Swaging Process of Jointing HGA With Actuator Arm and Gram Load Calculation, ASME Information Storage and Processing Systems Conference. 2007. Santa Clara, CA.

[6] B. Joompon: Effect of the Spacer Key on Swage Push out, International Conference of Business and Industrial Research, Bangkok, Thailand, 17-18 March 2010.Bangkok, Thailand.

[7] B. Joompon: Effect of the Spacer Key to HSA, 3rd International Conference on Data Storage Technology, Bangkok, Thailand, 2010, pp.131-134

[8] B. Joompon: Study of Outer Key to Reduce Outer Arm Swage Effect, Joint International Conference On Information & Communication Technology Electronic and Electrical Engineering, Luangprabang, Lao PRD, 2010, pp.16-19

[9] B. Joomponladej: A Development of modeling for Resonance Analysis, 4th International Conference on Data Storage Technology, Bangkok, Thailand, 2011, pp.108-111

[10] A. Jiao, Z. Liu, L. Pan, M. Ying: Swaging Force Control in Drive Resonance Response, IEEE Trans. Magnetic Recording Conference, Singapore, 2009, pp. BS04

[11] Livermore Software Technol. Corp. LS-Dyna Theory Manual, Livermore, CA, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of the Spacer Key on HSA

Joompon Bamrungwong, Mongkol Mongkolwongroj

College of Data Storage Technology and Applications
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
3 moo 2 Chalongkrung Rd. Ladkrabang
Bangkok, Thailand 10520
joompon.bamrungwong@seagate.com, kmmongko@kmitl.ac.th

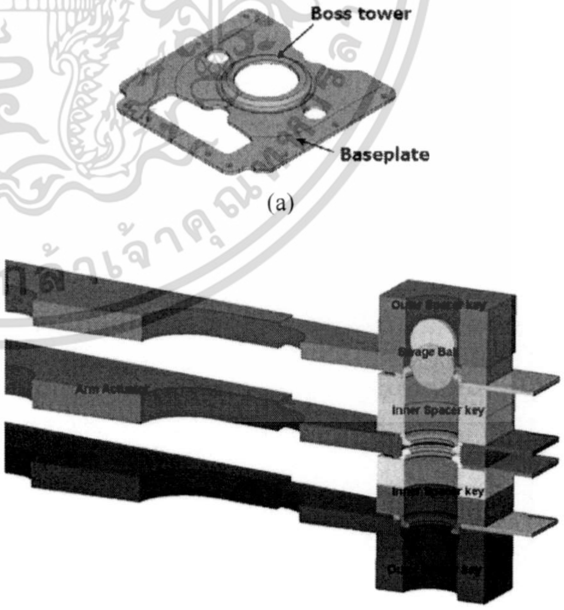
***Abstract*— This paper is aimed at demonstrating the use of finite element analysis for simulating a swaging process of hard disk drive (HDD) a head stack assembly (HSA) to reduce the defect from swage push out by focusing on the spacer key. A swaging process is a material processing technique used to connect a head gimbal assembly (HGA) to an E-block becoming the so-called head stack assembly by using swage balls with insert the spacer key and remove it after process done. The finite element model is 3-dimensional where solid Lagrangian elements and the explicit dynamics simulation are being used. The simulation results are compared to those obtained from experimentation; it was found that the result from finite element analysis agree with the experiment results. Previous paper revealed that the defect swage push out can be reduced by a proper spacer key hole diameter as for HAS CTQ improvement can be improved by symmetry spacer key land. However, there is some part of the base plate that required further investigation. The effects of base plate not considered in the present analysis, those items like the actual swage boss profile.**

***Index Terms*— Ball Swaging ,Finite Element, Head Stack Assembly, Spacer Key Land**

I. Introduction

In the hard disk drive (HDD) manufacturing process, Ball swaging is the common most important manufacturing processes, which joints the Head Gimbal Assembly (HGA) base plates with actuator arm called the head stack assembly (HSA). The HGA base plate is a thin sheet component and includes boss tower as illustrated in Fig. 1. The boss tower is sized to fit within an opening in actuator arm to which the HGA base plates to be mounted. During the swaging process, the ball is driven past through the boss tower into frictional engagement with the inner surface of the opening in the actuator arm and clamped by swage keys. The base plate and attached suspension are thereby securely fastened to the actuator arm. But the base plate deformation will have effect to many Critical To Quality parameters (CTQ). There are the parameters is the Swage Push out and spacer key land. It will degrade of securely fastened to the actuator arm and HSA quality (CTQ). And one of swage push out came from the spacer key was being supported each suspensions. The swage push out has a large deformation of the boss tower or collapse of the boss tower whilst the ball was passing through as illustrated in Fig. 2. The spacer key land was being supported under the base plate it can be degraded HSA CTQ.

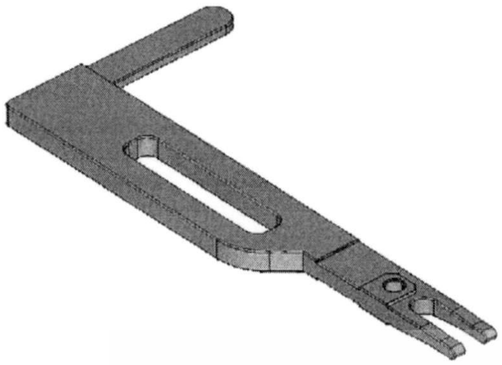
The swaging process results in plastic deformation of HGA base plate and actuator arm. This deformation can cause disturbance in desired spring characteristic of the suspension on the actuator arm, known as gramload changes from its optimum value, and change to desired retention torque. Since gram load and retention torque are the critical parameters affecting the slider flight height and op-shock performance of hard disk drives, investigating the swaging process induced base plate and arm deformation, gramload and retention torque change are of general interest. This, however, reduces boss tower deformation. It is necessary to clarify the dimension of the spacer key hole diameter to reduce swage push out and maintain HSA CTQ by consider spacer key land



(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

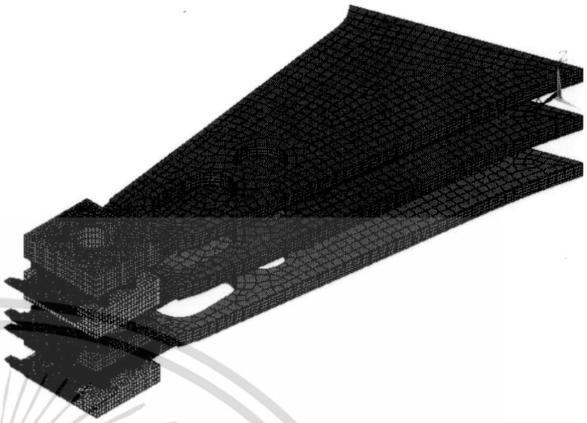
Figure 1. (a) Components of a baseplate and (b) the assembly for swaging process (c) Spacer key

Wadhwa analysed the ball swaging process numerical using an axially symmetric model as the early analysis of the ball swaging process, and Kamnerdtong numerically verified the deformation of the entire arm and HGA but the accuracy of the simulation has yet to be verified through experimentation. Aoki and Aruga analysed using a three-dimension finite element analysis based on a symmetrical model for an actuator inner arm and two attached base plates. These studies improved the understanding of the base plate deformation. Jian Yang analysed a three-dimension finite element analysis to study gram load changes, greatly improved the understanding of the deformation related with gram load changes.

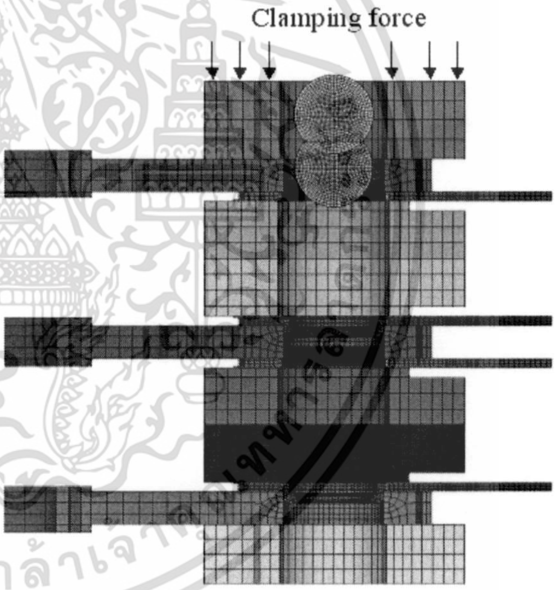
The aim of this work is to study the effects of the spacer key in swaging process by three dimensional finite element analysis model (FEA), extends to increase spacer key life and improve HSA CTQ by study spacer key land. In the present work, the swaging process is studied by performing explicit dynamic finite element analysis (FEA) using a commercial program ANSYS/LS-Dyna. Four base plates and three arms in the assembly are opted as a prototype to be studied. 2-Balls swaging process is considered, and its velocity maintains constant in the top-to-bottom direction.

II. SWAGING PROCESS MODELING

The finite element simulation of the ball swaging process was performed with the commercial software package. A three-dimensional (3-D) and a cross-sectional view of the finite element (FE) model used for swaging process of actuator arms are shown in Figure 2(a) and 2(b). In this simulation, a nonlinear explicit dynamics analysis is performed. If the stress is in the elastic deformation region, the relationship between stress and strain is linear. After the stress reaches the yield point, the relationship becomes nonlinear. The swaged part of the base plate undergoes plastic deformation. Nonlinear material properties should be considered. Geometric nonlinearity is also considered in this analysis because the base plate undergoes large deformation at the swaged part, as shown in Figure 2b. The model includes three actuator arm tip, four base plates with part of hinges, four swage keys, and two swage balls. The inner spacer key was separated to two part of assembly for analyze.



(a)



(b)

Figure 2. Four base plate and three arm in the assembly for swaging simulation (a) all FE modelling (b) FE model cross section

The spacer key was divided as 2 parts for one common key and able to move only in z- direction it was define as rigid body. For this study there are 2 common key and 2 outer key, various common key land was being study to find the best one that not impact to HSA CTQ.

III. BOUNDARY CONDITIONS AND CONTACT SURFACES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

During the swaging process, the constant clamping force at the outer key parts during swaging is constant and the arms are separated from each other by the use of spacer keys. In the FE model, the clamping pressure is applied as forces via force load curve. For simplicity, the swage keys, which are employed to simulate the clamping boundary at the arm contact condition, are modeled as rigid bodies while the other components including actuator arm tip, base plates and hinges are deformable parts. The simulation use the same load curve for ball speed for each heads and swage ball is forced to move in Z direction only according to its load curve. The boss tower of the base plate is plastically deformed and joined to the arm. The contact surface between the ball and swaging boss, between the base plate and the arm, and the one between swaging boss and the clamp are taken into account in analyzing the boss arm force. The friction coefficients for each contact surface are separated as 2 groups, contact surface of assembly and part-to-part contact. The base plate, hinge and the suspension are made of stainless steel while the arm is made of aluminum. The swaging ball is made of stainless steel with hardened coating. Thus, the ball is simulated as a rigid body. The material models defined in the analysis are bilinear isotropic material and bi-linear kinematics hardening. The properties of the materials used in the simulation are listed in Table 1. All the elements used in the analysis are eight-nodes brick elements. To reduce the computing time, the model consists of both rigid bodies and deformable bodies. The actuator arm hole and the base plate boss tower are prepared such that finer meshes are only required in the vicinity of the contact areas and the elements are coarser in the areas farther away.

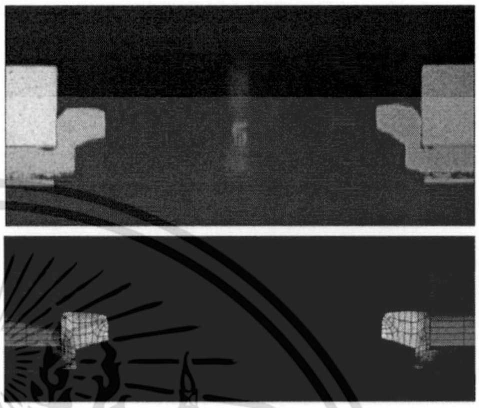
TABLE I

MATERIAL PROPERTIES FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS

Material Properties	Type of Material	
	Stainless steel	Aluminum
Elastic modulus, E (MPa)	190,000	71,016
Yield stress, Y (MPa)	206	275
Poisson ratio	0.32	0.33
Mass density (kg/m^3)	7889	2700

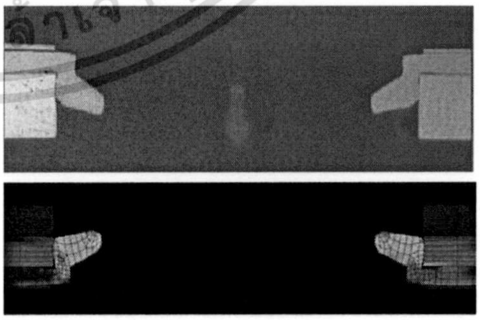
IV. VALIDATION OF THE FINITE ELEMENT MODEL

The base plate and arm tip deformation results from FEA simulations for inner and outer arms are evaluated from the displacements value that measured from specific nodes compared to the reference plane. For all simulated cases, the simulation results are tendency to value from experimentation. However, it is focusing on the effect of the spacer key to reduce the swage push out and extends the spacer key life which accompany with cost spending for swage key shuttle key, there is some offset that required further investigation. These differences could be from some other effects not considered in the present analysis. The illustration of boss tower deformation from swaging process are shown in Fig.3



(a)

(b)



(c)

Figure 3. (a) Head #3 (b) Head #1 and 2 (c) Head #0 comparison boss tower X- section deformation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

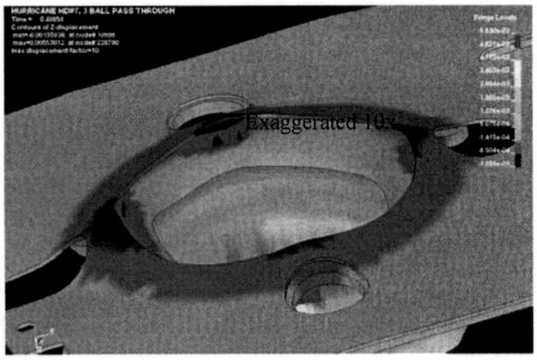


Figure 4. Large deformation due to spacer key hole diameter

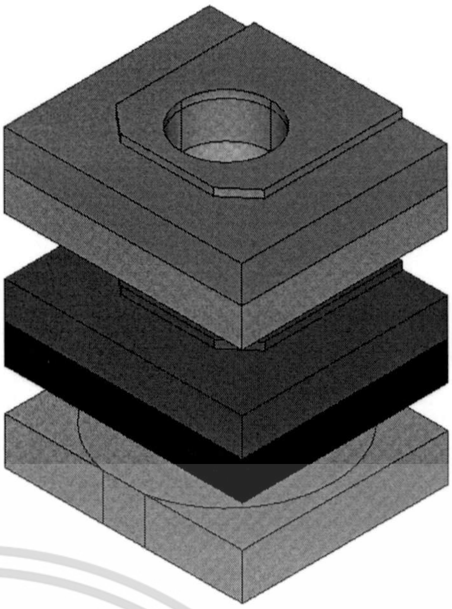


Figure 5. Spacer key land not impact to HSA CTQ

TABLE 2
SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

Parameters		Tip Height (inch)		Tip Pitch (degree)	
		FEA result	Actual data	FEA result	Actual data
Head 0	Outer arm	-0.00123	-0.00102	-0.572	-0.672
Head 1	Inner arm	0.00031	0.00027	0.473	0.537
Head 2	Inner arm	-0.0006	-0.0009	-0.520	-0.517
Head 3	Outer arm	0.00122	0.00118	0.437	0.543

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

The work studies the behaviors and characteristics of the ›ase plate after a swaging process that become swage push out ›roblem. The effects of changing the spacer key hole diameter rom nominal value was investigated. Based on the result of his work, an offset could be diminished by improving the ›recision of swage key shape and swage boss profile. The esult from this simulation will be used for evaluation of ›roper spacer key diameter to reduce swage push out and xtends the spacer key life also improve HSA CTQ by pecific proper spacer key land. Obviously, from previous aper maximum spacer key hole diameter can be reduced 10-0 percent to maintain the back bore deformation and to educe spacer key land impact to HSA CTQ need the ommon spacer key come along to proper symmetry land with e suspension. To extend the spacer key life the hole must be oposed to has a inner chamfer equal to maximum diameter at acceptable. The proper spacer key hole diameter come ong with inner chamfer and symmetry land support able to educe the swage push out and extend the spacer key life also ot impact HSA CTQ too much thereby swage effect. Nevertheless, improvement of the swage ball coefficient of friction able to extend the spacer key life and improve some HSA CTQ. For this preliminary study, the FEA simulation results are said to agree well with the actual experiment. However, the coefficient of friction must be considered and the configuration of the boss tower profile must be considered also.

The effect of the boss tower profile on swaging process will be evaluated in future work.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by Cooperate Project between National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Seagate Technology (Thailand) via Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. And great thanks to Head Stack Process Development Director to provided the great support.

REFERENCES

[1] S. K. Wadhwa, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 3, pp. 1837-1842, May 1996

[2] K. Aoki and K. Aruga, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives," Microsyst. Technol., vol. 13, pp. 943-949, 2007.

[3] T. Kamnerdtong, S. Chutima and K. Ekintumas, "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation," Eighth Asian Symposium on Visualization, Chiangmai, Thailand, 2005, pp.50.1-50.7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจุมพล บำรุงวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	4 มิถุนายน 2515 จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่	239 ซอยบางนา-ตราด14 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260 โทร. 0-2393-1499

ประวัติการศึกษา

2540	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
2548	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความชำนาญเฉพาะด้าน

1) การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์
2) การออกแบบ HGA
3) กระบวนการผลิต HSA
4) กระบวนการ Reflow ในการผลิต HSA

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2547-2549	ตำแหน่งวิศวกรระดับสอง บริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซิซั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) - ผลงานการออกแบบและหาค่าเหมาะสมในการออกแบบ HGA
พ.ศ.2549-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรชำนาญการ บริษัท ซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด - ผลงานการออกแบบSpacer Key เพื่อลดของเสียจากการตอกยึดขึ้นรูป HSA - ผลงานการออกแบบBoss Tower ของ Base Plate เพื่อลด Swage Effect ในกระบวนการตอกยึดขึ้นรูป HSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้