

การศึกษาการถอดออกและสวมเข้าของหวีในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
โดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

นายสุรียา สุภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**STUDY OF A SHIPPING COMB REMOVAL AND
INSERTION IN HDD MANUFACTURING
USING FINITE ELEMENT ANALYSIS**

Suriya Supa

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics
Suranaree University of Technology
Academic Year 2011**

การศึกษาการถอดออกและสวมเข้าของหัวในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
โดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายเข้าศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สุภกิจ ลิมปิจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุริยา สุภา : การศึกษาการถอดออกและสวมเข้าของหัวในการผลิตฮาร์ดดิสก์โครฟี
โดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (STUDY OF A SHIPPING COMB REMOVAL AND
INSERTION IN HDD MANUFACTURING USING FINITE ELEMENT ANALYSIS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 88 หน้า.

กระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์โครฟีได้นำระบบการประกอบแบบอัตโนมัติมาใช้
ในหลายขั้นตอนของกระบวนการผลิต แรงพลวัตในการถอดออกและประกอบเข้าของหัว
มีผลกระทบกับกระบวนการผลิตอัตโนมัติที่เกี่ยวข้องกับการประกอบ HSA แรงพลวัตของหัว
เกิดขึ้นจากหลายตัวแปรที่สลับซับซ้อน เช่น รูปร่าง และพื้นผิวสัมผัสในการประกอบ บทความนี้
นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ โดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งมีใช้กัน
อย่างแพร่หลายมาวิเคราะห์ค่าของแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหัวเข้ากับชุดแขนหัวอ่าน
เขียนของฮาร์ดดิสก์โครฟี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนของการผลิตหัวเพื่อมาทดลองใช้งาน
จริง และจะครอบคลุมถึงการคาดการณ์ในการกำหนดค่าแรงพลวัตของหัว ประโยชน์ที่คาดว่าจะ
ได้รับจากงานวิจัยนี้คือการประหยัดค่าใช้จ่ายจากการลดจำนวนของเสียในการทดลองจากการ
แก้ไขแม่พิมพ์ตามข้อผิดพลาดของหัวที่ออกแบบและจากการทดสอบทดลองในกระบวนการพัฒนา
การออกแบบหัว นอกจากนี้ยังมีความสามารถลดเวลาในการออกแบบหัวและเพิ่มศักยภาพ
ในการแข่งขันของการเปิดตัวผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์โครฟีเข้าสู่ตลาดได้อีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา สุริยา สุภา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

SURIYA SUPA : STUDY OF A SHIPPING COMB REMOVAL AND
INSERTION IN HDD MANUFACTURING USING FINITE ELEMENT
ANALYSIS. THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG,
Ph.D., 88 PP.

FEA/ SHIPPING COMB/ FAILURE/ DYNAMIC FORCE/ HDD

In HDD assembly processes, automation has been deployed in many steps of process from subassembly to drive. Dynamic forces of a shipping comb removal and insertion have impacted the automation process related to HSA assembly. Dynamic force of shipping comb is a complex result from parameters such as removal and insertion shape and surface contact condition. This paper will discuss the relation between dynamic forces, removal and insertion shape and contact surface of shipping comb. Generally, parts are manufactured and tested for performance evaluation and making of corrective design. These steps generally consume long time and high expense. It would be more advantageous, if these steps could be carried out by computer simulation. Therefore, this research aims to use the Finite Element Analysis (FEA) and will cover the prediction of comb removal and insertion force related to the comb shape. Potential benefit of this work is the cost saving by reducing the number of trial and error, reducing the change of comb mold design and test which tried out in comb development process. Moreover, having predictable force will reduce time to market and increase competitiveness of HDD product launch into the market.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature สุริยา สุปา

Advisor's Signature สมศักดิ์ สิวาดมรณพงษ์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงมิได้ หากไม่ได้รับความกรุณา ความช่วยเหลือ ทางด้านทุนการศึกษาการให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ดั่งนั้นจึงขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานเหล่านี้ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการศึกษา Hard Disk Drive Institute

คุณรุ่ง ศิวรัตน์ คุณประพันธ์ อภิรมาน คุณเชาวลิต จิญาธรรม์ คุณชวรินทร์ ชวรางกูร คุณนवलพรรณ ใจงาม คุณจุมพลเดชนันท์ บำรุงวงศ์ชารี คุณอัญชติ อึ้งธรรมคุณ คุณบริพัชร์ นาคนวล คุณวิริยะ อยู่เป็นสุข คุณศุภชุนวัฒน์ ธนสินทรัพย์ คุณจิระพงษ์ พงษ์ศิริโสภภาพร และคุณฐวิศณี ปัทมประดิษฐ์ วิศวกรแผนก Thailand Development บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด ที่สนับสนุนการศึกษา อนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้การช่วยเหลือ ในการออกแบบหรือออกแบบการทดลอง และคำแนะนำในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการแนวทาง ในการดำเนินการวิจัยที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย สนับสนุนให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และชี้แนวทางในการทำการวิจัย

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้ช่วยเหลือ มาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ และนำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

สุรียา สุภา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	2
1.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive, HDD).....	4
2.1.1 ประวัติและความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	4
2.1.2 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	5
2.1.3 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	7
2.1.3.1 แขนหัวอ่าน (Actuator Arm)	8
2.1.3.2 หัวอ่าน (Read/Write Head)	8
2.1.3.3 แผ่นจานแม่เหล็ก (Platters)	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.3.4	มอเตอร์หมุนจานแม่เหล็ก (Spindle Motor)	10
2.1.3.5	เคส (Case).....	10
2.1.3.6	กรองอากาศ (Air Filter)	10
2.1.3.7	ขั้วต่อและจัมเปอร์ (Connector and Jumper)	10
2.1.3.8	ขั้วต่ออินเตอร์เฟซ (Interface Connector).....	10
2.1.3.9	แผงวงจรบนตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Circuit/Logic Board)	11
2.2	ส่วนประกอบของชุดหัวอ่านเขียนข้อมูล (Head Stack Assembly : HSA)	11
2.2.1	ชิ้นส่วนชุดอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly : HGA).....	13
2.2.2	แขนของหัวอ่านเขียนข้อมูล (Actuator Arm)	13
2.3	พลาสติกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม	14
2.3.1	โพลีคาร์บอเนต.....	15
2.3.2	โครงสร้างของโพลีคาร์บอเนต.....	15
2.3.3	คุณสมบัติของโพลีคาร์บอเนต.....	16
2.3.4	ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลีคาร์บอเนต.....	16
2.4	ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ.....	16
2.4.1	ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Shape Function)	17
2.4.2	การหาสทิงเฟนสมตริกซ์และสมการของเอลิเมนต์.....	17
2.4.3	การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	19
2.5	การวิเคราะห์เชิงพลวัตของโครงสร้าง.....	20
2.6	เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบสามมิติ.....	23
2.6.1	เอลิเมนต์แบบแปดหน้าหรือทรงลูกบาศก์ (Hexahedron Element)	23
2.6.2	Natural Coordinate System.....	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3	แบบจำลองการกระเด้งการเคลื่อนที่ (Displacement Model)	25
2.6.4	ความสัมพันธ์ของความเครียดและความเค้น (Stress-Strain Relations).....	25
2.6.5	Element Stiffness Matrix	26
2.6.6	การคำนวณในเชิงตัวเลข (Numerical Computation).....	27
2.7	การสัมผัสในระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	27
2.7.1	แนวคิดพื้นฐานการสัมผัส	27
2.7.2	สมการคำนวณการสัมผัส	28
2.8	วิธีการวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขทางพลวัต (Dynamic Analysis By Numerical Integration)	32
2.8.1	บทนำ	32
2.8.2	วิธีการของนิวมาร์ค (Newmark Method)	33
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1	ศึกษาวัสดุในการสร้างหวี วิธีการถอดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)....	38
3.1.1	ศึกษาวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตหวี (Shipping Comb)	38
3.1.2	ศึกษากระบวนการผลิต HDD ที่เกี่ยวข้องกับหวี (Shipping Comb).....	39
3.2	ศึกษาวิธีการออกแบบหวี และหน้าที่ในแต่ละส่วนของการใช้งาน	40
3.2.1	ศึกษาลักษณะรูปร่างของหวี (Shipping Comb) โมเดล	40
3.2.2	ศึกษาการจับยึดหวี (Shipping Comb) เมื่อประกอบเข้ากับชุดหัวอ่าน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	41
3.3	จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบชิ้นงาน และบันทึกผล.....	41
3.4	สร้างแบบจำลองค่าแรงด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	43
3.5	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง และทำการปรับปรุงแบบจำลอง	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	ศึกษาแบบจำลองของการออกแบบหวี และออกแบบหวี ให้ได้ค่าแรงตามต้องการ.....	47
3.6.1	การศึกษา ค่าแรงในการถอดออกของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	48
3.6.2	การศึกษา ค่าแรงในการสวมเข้าของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	48
3.6.3	การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรง	49
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	
4.1	ผลการทดสอบชิ้นงานมาตรฐาน	50
4.2	ผลการวิเคราะห์ของชิ้นงานมาตรฐานด้วยไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	52
4.3	ผลการเก็บข้อมูลจากการวัดชิ้นงานจริงของค่าแรงสวมเข้าและถอดออกของหวี กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	53
4.4	ผลของไฟไนท์อิลลิเมนต์ของค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหวี	54
4.5	ผลการศึกษารูปแบบการออกแบบ DOE ของค่าแรงในการถอดออกของหวี.....	57
4.6	ผลการศึกษารูปแบบการออกแบบ DOE ของค่าแรงในการสวมเข้าของหวี.....	60
4.7	ผลการปรับปรุงการออกแบบ ค่าแรงในการถอดออกของหวี.....	62
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลงานวิจัย	65
5.1.1	ผลการศึกษาลักษณะการออกแบบค่าแรงถอดออกของหวีด้วย วิธีการไฟไนท์อิลลิเมนต์	65
5.1.2	ผลการศึกษาลักษณะการออกแบบค่าแรงถอดออกของหวีด้วย วิธีการไฟไนท์อิลลิเมนต์	65
5.1.3	ผลการออกแบบปรับปรุงหวี (Shipping Comb)	66
5.2	ข้อเสนอแนะ	66
	รายการอ้างอิง.....	67
	ภาคผนวก	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก. ข้อมูลการประกอบหีบขูดหัวอ่านและกระบวนการทดสอบค่าแรงหีบ.....	69
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบชิ้นงานและผลไฟไนท์อีพ็อกซีเรซิน.....	74
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	81
ประวัติผู้เขียน	88



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าสมบัติทางกลของวัสดุหวี (Shipping Comb).....	43
3.2 แสดงค่าสมบัติทางกลของวัสดุหวี (Shipping Comb) ใน Model.....	44
4.1 แสดงผลการทดสอบการดึง Specimen จำนวน 5 ชิ้น ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 5560.....	51
4.2 แสดงผลการเสียหายของ Specimen ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0.....	53
ข.1 แสดงผลการทดสอบดึงชิ้นงานมาตรฐาน	75
ข.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงหวีของ 100 ชิ้นงาน	75
ข.3 แสดงผล FEA ในการทำ DOE ของค่าแรงในการถอดออก.....	79
ข.4 แสดงผล FEA ในการทำ DOE ของค่าแรงในการสวมเข้า.....	80
ข.5 แสดงผล FEA ในการปรับปรุงการออกแบบหวีของค่าแรงในการถอดออก.....	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงรูปตัดขวางของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กที่เก็บข้อมูลโดยใช้ทิศของสนามแม่เหล็ก แทนรหัส 0 หรือ 15
2.2	แสดงการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แบบแนวตั้งและแบบแนวนอน5
2.3	แสดงการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งของหัวอ่าน/เขียนตาม Track.....6
2.4	แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....8
2.5	แสดงรูป Head Stack Assembly 12
2.6	แสดง Shipping Comb ตามจำนวนหัวอ่านขนาดต่าง ๆ 12
2.7	แสดงชุดอ่านเขียนข้อมูล (HGA) 13
2.8	แสดงชุด Actuator Arm 14
2.9	แสดงโครงสร้างทางเคมีของโพลีคาร์บอเนต..... 15
2.10	แสดงอิตลิเมนต์แบบลูกบาศก์ Hexahedron 8 โหนด 24
2.11	แสดงลักษณะการสัมผัสของพื้นผิวอิสระ 28
2.12	แสดงลักษณะการสัมผัสแบบวัตถุแข็ง 28
2.13	แสดง Extra DOF (Contact Pressure) 29
2.14	แสดงลักษณะของสถานะหน้าสัมผัส 30
2.15	แสดงการตรวจจับอนุพันธ์แบบจุด 30
2.16	แสดงการตรวจจับอนุพันธ์แบบจุด ใช้โนดอลดีเทคชั่น 31
2.17	แสดงการตรวจจับอนุพันธ์แบบจุด ที่บริเวณพื้นผิว 31
3.1	แสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัย 37
3.2	แสดงชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดสอบการดึง 38
3.3	แสดงเครื่อง Universal Testing Machine 5560 38
3.4	แสดงขั้นตอนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์..... 39
3.5	แสดงรูปของหัว (Shipping Comb) 40
3.6	แสดง Z-Latch ของหัว (Shipping Comb) ในการทำการวิจัยหาค่าแรง 40
3.7	แสดงชิ้นงานของหัว (Shipping Comb) กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไครฟ์ 41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 แสดงเครื่องทดสอบค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb).....	42
3.9 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงถอดออกของหวี (Shipping Comb)	42
3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)	42
3.11 แสดง Specimen ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work 2011.....	44
3.12 แสดงแบบจำลองของ 3D โมเดลทดสอบค่าแรงหวี (Shipping Comb).....	44
3.13 แสดงแบบจำลองของเมช (Mesh) โมเดลทดสอบค่าแรงหวี (Shipping Comb)	45
3.14 แสดงแบบจำลองของการกำหนดเงื่อนไขทดสอบค่าแรงถอดออกของหวี	46
3.15 แสดงแบบจำลองของการกำหนดเงื่อนไขทดสอบค่าแรงสวมเข้าของหวี	46
3.16 แสดงตำแหน่งของการเก็บค่าแรงในการถอดออกของหวี บน Z-Latch	47
3.17 แสดงตำแหน่งของการเก็บค่าแรงในการสวมเข้าของหวี บน Z-Latch	47
3.18 แสดงตัวแปรหลักในการศึกษาค่าแรงถอดออกของหวี (Shipping Comb).....	48
3.19 แสดงตัวแปรหลักในการศึกษาค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb).....	48
4.1 แสดงผลการทดสอบการดึง Specimen ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine	50
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน	51
4.3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบน Specimen โพลีคาร์บอเนต	52
4.4 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการถอดออกของหวี.....	53
4.5 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการสวมเข้าของหวี.....	54
4.6 แสดงผลของค่าความเค้นในการถอดออกบน Z-Latch ของหวี	55
4.7 แสดงผลของค่าความเค้นในการสวมเข้าบน Z-Latch ของหวี	55
4.8 แสดงผลของค่าความเค้นบน Z-Latch ของหวีในการออกแบบ DOE.....	55
4.9 แสดงกราฟของค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหวี.....	56
4.10 แสดงกราฟ Normal Plot ของตัวแปรหลักในการถอดออกของหวี.....	57
4.11 แสดงกราฟ Pareto ของตัวแปรหลักในการถอดออกของหวี	57
4.12 แสดงกราฟ Normal Plot ของการผสมตัวแปรในการถอดออกของหวี.....	58
4.13 แสดงกราฟ Pareto ของการผสมตัวแปรในการถอดออกของหวี.....	58
4.14 แสดงกราฟตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหวี	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงกราฟ Normal Plot ของตัวแปรหลักในการสวมเข้าของหวี.....	60
4.16 แสดงกราฟ Pareto ของตัวแปรหลักในการสวมเข้าของหวี.....	60
4.17 แสดงกราฟ Normal Plot ของการผสมตัวแปรในการสวมเข้าของหวี.....	61
4.18 แสดงกราฟ Pareto ของการผสมตัวแปรในการสวมเข้าของหวี.....	61
4.19 แสดงกราฟของค่าแรงในการถอดออกของหวี.....	62
4.20 แสดงกราฟเส้นตรงในการประมาณค่าแรงถอดออกของหวี.....	63
4.21 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการถอดออกของหวีหลังปรับปรุง.....	63
4.22 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการสวมเข้าของหวีหลังปรับปรุง.....	64
ก.1 แสดงรูปของหวี (Shipping Comb).....	70
ก.2 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของหวี (Shipping Comb) ที่ใช้สำหรับการจับยึด บนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไครฟ์.....	71
ก.3 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของหวี (Shipping Comb) ที่จับยึด บนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไครฟ์ในโมเดล.....	71
ก.4 แสดงการจับยึดหวี (Shipping Comb) เข้ากับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไครฟ์ ในการทดสอบค่าแรงหวี.....	72
ก.5 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงถอดออกของหวี (Shipping Comb).....	72
ก.6 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb).....	73
ก.7 แสดงลักษณะของ FEA ค่าแรงถอดออกของหวี (Shipping Comb).....	73
ก.8 แสดงลักษณะของ FEA ค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb).....	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
CI	=	Confidence Interval
Cpk	=	Process Capability Of Short Term Process
DOE	=	Design Of Experiment
FEA	=	Finite Element Analysis
HDD	=	Hard Disk Drive
HGA	=	Head Gimbal Assembly
HSA	=	Head Stack Assembly
KPIV	=	Key Parameter Input Variable
KPOV	=	Key Parameter Output Variable
PC	=	Polycarbonate
PSA	=	Pitch Static Attitude
RSA	=	Row Static Attitude
K	=	Stress Concentration Factor
R	=	Radius
σ	=	Stress
ε	=	Strain
E	=	Young's Modulus
ν	=	Poisson's Ratio

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการรับ-ส่ง เก็บ หรือประมวลผลข้อมูลมีความสำคัญอย่างมากต่อการดำรงชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม การศึกษา การแพทย์ และอื่น ๆ เทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลจึงถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นจึงเกิดการแข่งขันและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการพัฒนาออกแบบมีประสิทธิภาพสูง มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และใช้งานได้สะดวก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลที่มีความนิยมน้อยกว่าหลายในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตออกเป็น 5 กระบวนการหลัก คือ

- 1) กระบวนการผลิตแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Fabrication)
- 2) กระบวนการผลิตหัวอ่านและเขียนข้อมูล (Slider Fabrication)
- 3) กระบวนการผลิต Head Gimbal Assembly (HGA)
- 4) กระบวนการผลิต Head Stack Assembly (HSA)
- 5) กระบวนการผลิต Hard Disk Drive (HDD)

ในการประกอบ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้หัวในการกันการป้องกัน หัวอ่านชนกัน หรือชนกับสิ่งรอบข้างแล้วในการประกอบเองนั้น หัวถูกสวมลงไปตั้งแต่การขึ้นรูปของ HSA และในการผลิตในรูป HSA นั้นมีการวัดการทดสอบทั้งทางด้านทางกลและทางไฟฟ้า และในการทดสอบทางกลนั้นต้องมีการถอดหัวออกเพื่อทำการวัดค่า แล้วนำหัวสวมเข้าไปใส่อีกครั้ง ในการถอดออกและสวมเข้าของหัวนั้นใช้เครื่องจักรในการถอดออกและสวมเข้า และในการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้เครื่องจักรที่เป็นระบบอัตโนมัติเช่นกันในการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องมีการควบคุมค่าแรงที่ใช้ควบคุมในการถอดออกและสวมเข้าของหัวเพื่อให้สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีมีคุณภาพ

จากการออกแบบหัวที่ใช้ในปัจจุบันไม่สามารถที่จะประมาณค่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นในการสวมหัวเข้ากับชิ้นงาน และการถอดหัวออกจากชิ้นงาน แล้วทำให้เกิดปัญหา และไม่สามารถควบคุมค่าแรงที่ใช้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบหัว เช่นในการออกแบบหัวครั้งที่ 1 ได้ค่าแรงอยู่ค่าหนึ่งแต่ในการใช้งานต้องการเพิ่มค่าแรงขึ้น 20% ในการออกแบบ ครั้งที่ 2 แต่ผลที่ออกมาได้ค่าแรงเพิ่มเป็น 45% ซึ่งไม่เป็นไปตามที่ต้องการจึงนำไปสู่กรอบเนื้อหาของการทำงานวิทยานิพนธ์

ในครั้งนี้ เพื่อศึกษาค้นคว้าในเรื่องการทำนายค่าแรงกระทำในการถอดออกและสวมเข้าของหวี และในการออกแบบหวี ได้ทำการออกแบบจาก โปรแกรม Ideas แล้วเริ่มในการศึกษา จากการประกอบในโปรแกรม Ideas แล้วทำการเก็บผลของตัวหวีและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม Minitab จากนั้นทำการทดลองในโปรแกรม ANSYS เพื่อเป็นการจำลอง และวิเคราะห์ผลของค่าแรงกระทำที่เกิดขึ้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่หนึ่ง ทำการศึกษาในแบบหวีที่ใช้ในปัจจุบัน แล้วทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของส่วนที่ทำให้เกิดแรงในการถอดออกและสวมเข้า โดยใช้โปรแกรม Ideas และ Minitab

ส่วนที่สอง ทำการศึกษาใน ต้นแบบและวิจัยในผลของแต่ละ KPIV ของโปรแกรม ANSYS ที่จะพัฒนาหวีที่มีอยู่ในปัจจุบัน และเพื่อลดเวลาการออกแบบหวี เพื่อนำมาใช้งานในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปทรงของหวี (Shipping Comb) ที่มีต่อค่าของแรงพลวัตในการสวมเข้าและถอดออกในการประกอบกับชุดแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
- 2) เพื่อวิเคราะห์แรงพลวัตของหวี (Shipping Comb) โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
- 3) เพื่อหาความสัมพันธ์เป็นแนวทางในการปรับปรุงรูปทรงของหวี (Shipping Comb) ให้มีแรงพลวัตในการประกอบที่ได้ประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาหวี (Shipping Comb) 1 แบบ (Model) ที่ใช้ประกอบกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว ของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด
- 2) งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลกับการทดสอบของค่าแรงสวมเข้าและถอดออกทางกลในห้องปฏิบัติการทดสอบของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด เท่านั้น
- 3) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการออกแบบหวี ด้วยโปรแกรม Ideas, Solid Work 2011
- 4) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการจำลองแรงพลวัตการออกแบบด้วยโปรแกรม ANSYS
- 5) การจำลองแรงพลวัตงานในวิจัยนี้ศึกษาหวี (Shipping Comb) เท่านั้น โดยกำหนดให้ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็น Rigid Body Condition

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1) ศึกษาและเก็บข้อมูลทางเทคนิคของวัสดุ และกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับหวี (Shipping Comb)

- 2) ศึกษาวิธีการออกแบบหวี (Shipping Comb) และทำการเก็บข้อมูลของการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อระบุ KPIV ของค่าแรงถดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb) และวิเคราะห์ผลทางสถิติ
- 3) สร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าแรงถดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb) ปัจจุบัน
- 4) ทำการปรับปรุงแบบจำลองให้เทียบเคียงกับค่าแรงจริง
- 5) ออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าแรงถดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)
- 6) ทำการวิเคราะห์ผลและระบุการควบคุม KPIV
- 7) วิเคราะห์ผลการวิจัย สรุปผล จัดทำรายงานและนำเสนอผลการศึกษา

1.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องวัดสำหรับวัดแรงที่ใช้ในการถดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb) กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
- 2) คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ : Ideas, Solid Work 2011, ANSYS Workbench 13.0 และ Minitab 16

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทำนายค่าแรงสวมเข้าและถดออกของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในระดับความน่าเชื่อถือที่ต้องการได้
- 2) สามารถควบคุมค่าแรงสวมเข้าและถดออกของหวี
- 3) ช่วยลดความสูญเสียกำลังคนและเวลาในการออกแบบหวี
- 4) สามารถลดต้นทุนการแก้ไขแม่พิมพ์ และเพิ่มประสิทธิภาพของแบบหวี
- 5) ช่วยลดเวลาในการทดสอบคุณสมบัติของหวีก่อนใช้งานจริงในผลิตภัณฑ์นั้น
- 6) เพื่อช่วยสนับสนุนหวีของผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ได้ทันตามกำหนดเวลา
- 7) สามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาปรับปรุงและออกแบบหวีให้มีประสิทธิภาพการใช้งานดียิ่งขึ้นในผลิตภัณฑ์ในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive, HDD)

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเรียกได้หลายชื่อ เช่น ฮาร์ดไดรฟ์ (Hard Drive), ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) หรือเรียกว่าฟิกซ์ดิสก์ไดรฟ์ (Fixed Disk Drive) ทำหน้าที่บันทึกและอ่านข้อมูลเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ ที่สามารถเก็บรักษาข้อมูลได้แม้ขณะที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าป้อนให้ก็ตาม ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกบันทึกลงบนแผ่นเพลตเตอร์ (Platter) ที่มีพื้นผิวมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการเก็บข้อมูลนั้นจะเก็บในรูปแบบรหัสดิจิทัลลงบนแผ่นดิสก์กลมแบนที่หมุนอย่างรวดเร็ว

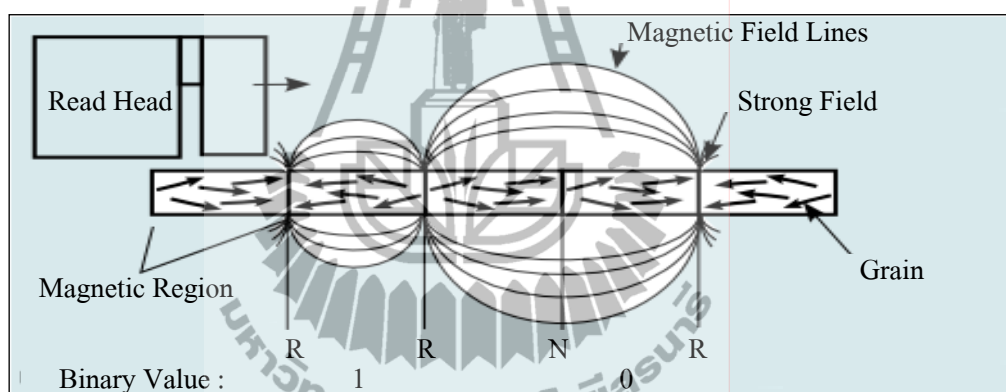
2.1.1 ประวัติและความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เริ่มนำมาเผยแพร่ในทางการค้าเมื่อปี 1956 โดยคอมพิวเตอร์เครื่องแรกที่ใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ได้ คือ IBM 305 RAMAC ซึ่งใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่น IBM Model 350 เป็นระยะเวลาหลายปี ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีขนาดใหญ่ อุปกรณ์มีน้ำหนักมากและการใช้กำลังไฟฟ้าที่มากเกินไป จึงเหมาะสมกับการใช้ในสำนักงานที่มีขนาดใหญ่ มากกว่าสำนักงานที่มีขนาดเล็กหรือตามบ้านเรือน ก่อนช่วงต้นปี 1980 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีเพลตเตอร์ขนาด 8 นิ้ว หรือ 14 นิ้ว ต้องใช้พื้นที่และกำลังไฟฟ้ามก ด้วยเหตุนี้ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้กับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก จนกระทั่งหลังปี 1980 เมื่อซีเกตเทคโนโลยี (Seagate Technology) ได้เสนอฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่น ST-506 ซึ่งมีขนาด 5.25 นิ้วรุ่นแรกที่สามารถเก็บข้อมูลได้ 5 เมกกะไบต์

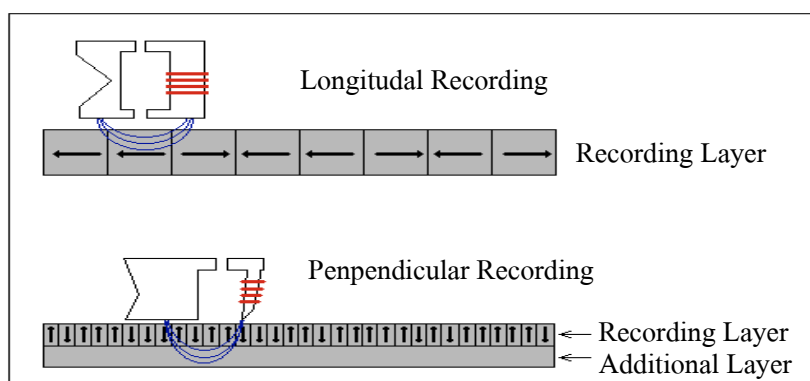
ความสามารถในการเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เติบโตอย่างรวดเร็ว ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาคอมพิวเตอร์ส่วนตัว (PC) และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุดที่ 20 เมกกะไบต์ ซึ่งถือว่ามีความจุมากแล้ว จนกระทั่งระหว่างกลางปี 1990 ถึงช่วงท้ายปี 1990 เมื่อคอมพิวเตอร์ส่วนตัวต้องมีความสามารถเก็บข้อมูลที่ไม่เพียงแต่เป็นข้อมูลที่เป็นข้อความ เอกสาร แต่ยังคงเก็บข้อมูลที่เป็นรูปภาพ เพลงและวิดีโอได้ ดังนั้นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงถูกสร้างให้มีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้ 8-20 กิกะไบต์ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้พัฒนามาในช่วงท้ายปี 2007 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความสามารถในการเก็บข้อมูล 100-500 กิกะไบต์ และช่วงปี 2012 การเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความสามารถในการเก็บข้อมูล 1-3 เทราไบต์ ขณะที่ความสามารถในการเก็บข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ 5 เทราไบต์

2.1.2 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เก็บข้อมูลโดยใช้ทิศของสนามแม่เหล็กแทนรหัส 0 หรือ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และอ่านข้อมูลกลับโดยใช้วัสดุที่ตรวจจับความเป็นแม่เหล็กได้ ตัวอย่างการออกแบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประกอบด้วยสปินเดิล (Spindle) ซึ่งยึดติดเพลตเตอร์จำนวนหนึ่งแผ่นหรือมากกว่าหนึ่งแผ่น เพลตเตอร์ทำจากวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น อลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloy) หรือแก้ว และถูกเคลือบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการเก็บข้อมูลจากการเก็บข้อมูลแบบแนวนอน (Longitudinal Recording) มาเป็นแบบการเก็บข้อมูลแบบแนวตั้ง (Perpendicular Recording) ซึ่งทำให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สามารถเก็บข้อมูลได้มากขึ้น ลักษณะการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.2

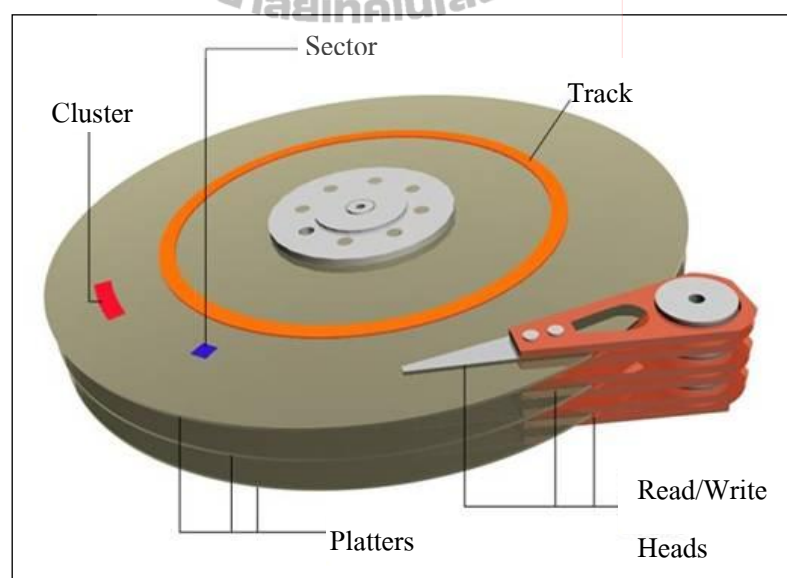


รูปที่ 2.1 แสดงรูปตัดขวางของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กที่เก็บข้อมูลโดยใช้ทิศของสนามแม่เหล็ก แทนรหัส 0 หรือ 1



รูปที่ 2.2 แสดงการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แบบแนวตั้งและแบบแนวนอน

แพลตฟอร์มซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ข้อมูลจะถูกบันทึกลงบนแพลตฟอร์ม ขณะที่มันหมุนผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าหัวอ่าน/เขียน (Head) หัวอ่าน/เขียนทำงานโดยลอยอยู่เหนือพื้นผิวที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแพลตฟอร์ม ระยะห่างระหว่างพื้นผิวแพลตฟอร์มและหัวอ่านมีขนาดน้อยมาก (ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์รุ่นใหม่หัวอ่านจะลอยอยู่ใกล้แพลตฟอร์มประมาณช่วง 10 นาโนเมตร) หัวอ่าน/เขียนถูกใช้สำหรับตรวจจับและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่อยู่ใต้ตัวมันอย่างรวดเร็ว พื้นผิวหนึ่งด้านของแพลตฟอร์มที่ยึดติดกับสปินเดิลจะใช้หัวอ่าน/เขียนหนึ่งชิ้นที่ประกอบอยู่กับชิ้นส่วนที่มีลักษณะเหมือนแขน ซึ่งเรียกว่าแอ็คชูเอเตอร์อาร์ม (Actuator Arm) แอ็คชูเอเตอร์อาร์มเป็นส่วนที่ทำให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้งข้ามไปมาบนแพลตฟอร์มที่หมุนอยู่ แอ็คชูเอเตอร์อาร์มสามารถเคลื่อนที่โดยการควบคุมของวอยซ์คอยล์ (Voice Coil) หรือสเตปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์รุ่นเก่า) สเตปเปอร์มอเตอร์นั้นถูกติดตั้งให้อยู่ด้านนอกของห้องหัวอ่าน/เขียนและแพลตฟอร์ม และมีมาก่อนแบบวอยซ์คอยล์ ในเวลาต่อมาไม่นานนัก ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ใช้วอยซ์คอยล์ มีโครงสร้างเหมือนลำโพง คือ ขดลวดและหัวอ่าน/เขียนจะเคลื่อนที่แนวรัศมีของแพลตฟอร์มแบบเส้นตรง ไม่ใช่การเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งเหมือนในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ณ ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ใช้วอยซ์คอยล์มีรายละเอียดของโครงสร้างที่ต่างจากช่วงแรกแต่ยังคงมีส่วนที่เหมือนกัน คือ การทำงานร่วมกันระหว่างขดลวดและสนามแม่เหล็ก



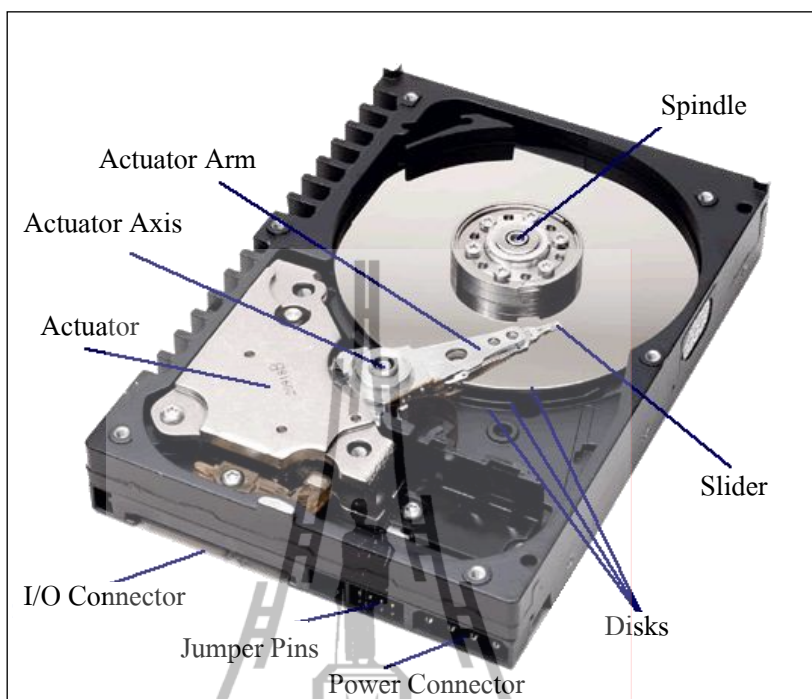
รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งของหัวอ่าน/เขียนตาม Track

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์รุ่นเก่าอ่านข้อมูลบนแผ่นฟลอปปีดิสก์ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของกระแสแม่เหล็กในหัวอ่าน หัวอ่านนี้จะมีขดลวดและทำงานเหมือนหัวอ่านของเทปแม่เหล็ก (Magnetic-Tape) โดยที่หัวอ่านไม่ต้องมาสัมผัสกับพื้นผิวที่เก็บข้อมูลเนื่องจากความหนาแน่นในการเก็บข้อมูลในฟลอปปีดิสก์เพิ่มขึ้น การใช้หัวอ่านแบบแมกนีโทริซิสแตนซ์ (Magneto Resistance, MR) จึงถูกนำมาใช้ในการอ่าน ซึ่งเป็นหัวอ่านที่เมื่อได้รับกระแสแม่เหล็กจากแผ่นฟลอปปีดิสก์ ความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านจะเปลี่ยนแปลง ต่อมาได้มีการพัฒนาหัวอ่านให้กระแสแม่เหล็กมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้ามากขึ้นแต่มีขนาดเล็กเรียกว่าหัวอ่านชนิดจีเอ็มอาร์ (GMR) ซึ่งย่อมาจากภาษาอังกฤษว่า Giant Magneto Resistance ในปี ค.ศ. 2005 ได้มีการพัฒนาหัวอ่านรุ่นทีเอ็มอาร์ (TMR, Tunneling MR) มาใช้ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

หัวอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์รักษาระยะห่างจากแผ่นฟลอปปีดิสก์ด้วยอากาศที่เคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนของแผ่นใกล้กับพื้นผิวของแผ่นฟลอปปีดิสก์ หัวอ่าน/เขียนถูกติดตั้งบนชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นกลิ้งสี่เหลี่ยมเรียกว่าสไลเดอร์ (Slider) ความสูงของหัวอ่าน/เขียนในการลอยเหนือพื้นผิวฟลอปปีดิสก์ (Flying Height) จะปรับตัวลดลงอยู่เสมอ เพื่อต้องการเพิ่มความหนาแน่นในการเก็บข้อมูล ความสูงในการลอยเหนือพื้นผิวฟลอปปีดิสก์ถูกควบคุมโดยการออกแบบการเซาะร่องบริเวณพื้นผิวของสไลเดอร์ให้รูปทรงต่าง ๆ หรือเรียกว่าการออกแบบแอร์เบริง (Air Bearing) (Air Bearing : เป็นการใช้ประโยชน์จากแผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่เกิดขึ้นจากความดันของอากาศ ทำให้ไม่มีค่าความเสียดทานระหว่างพื้นผิว 2 พื้นผิวที่ทำงานร่วมกันโดยพื้นผิวทั้งสองไม่สัมผัสกัน เนื่องจากการไม่สัมผัสกันของพื้นผิวทั้งสองทำให้ไม่เกิดปัญหาหลายอย่าง เช่น ความเสียดทาน ความล้าของชิ้นงาน การเกิดอนุภาคเล็ก ๆ และสารหล่อลื่น ซึ่งข้อดีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและงานที่ต้องใช้ความเร็วสูง) หน้าที่ของแอร์เบริงคือ รักษาระดับความสูงของหัวอ่าน/เขียนให้คงที่ขณะที่ลอยเหนือพื้นผิวของฟลอปปีดิสก์ ถ้าหัวอ่าน/เขียนชนกับฟลอปปีดิสก์จะเกิดความเสียหายที่รุนแรงบนบริเวณพื้นผิวของฟลอปปีดิสก์

2.1.3 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แบบทั่วไปซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.1.3.1 แขนหัวอ่าน (Actuator Arm) ทำงานร่วมกับมอเตอร์ (Voice Coil) ในการเลื่อนแขนหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการอ่าน/เขียนข้อมูลโดยมีคอนโทรลเลอร์ (Controller) ทำหน้าที่แปลคำสั่งที่มาจากคอมพิวเตอร์ จากนั้นก็เลื่อนหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูล แต่ต่อมา Stepping Motor ได้ถูกแทนด้วย Voice Coil ที่สามารถทำงานได้เร็วและแม่นยำกว่า Stepping Motor

2.1.3.2 หัวอ่าน (Read/Write Head) เป็นส่วนที่ใช้ในการอ่าน/เขียนข้อมูล มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนจึงมีราคาแพง ภายในหัวอ่านมีลักษณะเป็นขดลวด โดยในการอ่าน/เขียนข้อมูลเกิดขึ้นเมื่อคอนโทรลเลอร์ (Controller) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้รับคำสั่งจากตัว Host ให้มีการอ่าน/เขียนข้อมูล จะนำคำสั่งที่ได้รับมาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วป้อนเข้าสู่ขดลวดทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำไปเปลี่ยนโครงสร้างของสารแม่เหล็กที่ฉาบบนแผ่นดิสก์ ซึ่งมีรูปแบบของการบันทึกข้อมูลในเทคโนโลยีของการอ่าน/เขียนนี้ เรียกว่า MR (Magnical Recorder) โครงสร้างของหัวอ่านเป็นสารกึ่งตัวนำและกระบวนการผลิตเป็นเช่นเดียวกับการผลิตไมโครโปรเซสเซอร์ หัวอ่านจัดเป็นชิ้นส่วนที่เล็กและมีความซับซ้อนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตเป็นส่วนใหญ่ที่ทำหน้าที่อ่านและเขียนข้อมูลบนจานแม่เหล็กโดยตรง แต่จะลอยอยู่เหนือจานแม่เหล็กใน ระยะใกล้มากประมาณ 512 Micro Inches เท่านั้นเอง จำนวนของหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวหนึ่ง

จะขึ้นอยู่กับจำนวนของแผ่นจานแม่เหล็ก โดยหนึ่งด้านของจานแม่เหล็กจะต้องมีหัวอ่านจำนวน 1 อันเสมอ ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยส่วนใหญ่ที่มีแผ่นจานแม่เหล็กตั้งแต่ 1 - 5 แผ่นก็จะมีจำนวนหัวอ่านตั้งแต่ 2 - 10 หัว และเป็นไปได้ว่าในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีขนาดใหญ่อาจมีจำนวนหัวอ่านได้มากถึง 20 หัว การอ่านและเขียนข้อมูลลงบนจานแม่เหล็กอาศัยหลักการตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทุกครั้งที่มีการอ่านหรือเขียนข้อมูลจะมีเพียงหนึ่งหัวอ่านเท่านั้นที่สามารถทำการเข้าถึงข้อมูลได้

- การเขียนข้อมูลทุกครั้ง หัวอ่านทำการเขียนข้อมูลจะมีกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับส่วนของขดลวดที่ปลายหัวอ่านทำให้มันถูกเปลี่ยนสถานะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าชั่วคราวและจะไปเหนี่ยวนำให้สารแม่เหล็กบนจานแม่เหล็กมีการจัดเรียงทิศทางตามรูปแบบของข้อมูลที่ต้องการบันทึก
- การอ่านข้อมูลของหัวอ่านจะเป็นไปในทางกลับกัน คือ หัวอ่านจะอยู่ในสถานะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า จึงเกิดการเหนี่ยวนำจากกระแสไฟฟ้าอ่อน ๆ ขึ้นที่ขดลวด ซึ่งค่าของกระแสที่อ่านได้นี้ คือ ข้อมูลที่อ่านได้จากจานแม่เหล็กนั่นเอง

2.1.3.3 แผ่นจานแม่เหล็ก (Platters) หรือจะเรียกว่า “เพลตเตอร์” เป็นพื้นที่ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานเหล็กกลม ๆ มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.8 - 5.25 นิ้ว ที่เคลือบสารแม่เหล็กวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น (ขึ้นอยู่กับความจุ) อยู่บนแกนหมุน (Spindle) และสารแม่เหล็กที่ว่าจะถูกเหนี่ยวนำให้มีสถานะเป็น 0 และ 1 เพื่อจัดเก็บข้อมูลแทนความหมายของข้อมูลแต่ละก้อน โดยจานแม่เหล็กนี้จะติดกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่หมุนแผ่นจานเหล็กนี้ ปกติฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แต่ละตัวจะมีแผ่นดิสก์ประมาณ 1 - 5 แผ่น แต่ละแผ่นดิสก์ก็จะเก็บข้อมูลได้ทั้งสองด้านส่วนของจานแม่เหล็กนั้นทำมาจากวัสดุอลูมิเนียมหรือวัสดุประเภทแก้วที่มีส่วนผสมเซรามิกอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งข้อดีของแผ่นจานแม่เหล็กที่ผลิตโดยใช้วัสดุอย่างหลัง คือ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและสามารถออกแบบให้แผ่นจานแม่เหล็กมีขนาดบางเท่าที่จะบางได้กว่าอลูมิเนียม ควรระมัดระวังไม่ให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์กระทบกระเทือนอย่างแรงเพราะจะทำให้ส่วนที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กและข้อมูลเสียหายได้ พื้นผิวของแผ่นจานแม่เหล็กทั้งสองด้านจะถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก ซึ่งเท่าที่มีใช้กันมี 2 ชนิด คือ สารประเภท Iron Oxide และ Thin Film

- สารประเภท Iron Oxide แผ่นจานแม่เหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุประเภทนี้สังเกตได้ง่าย เพราะว่ามันมีสีน้ำตาล ใช้กันมากสำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในช่วงแรก ๆ เพราะเป็นวัสดุที่มีราคาค่อนข้างถูกเนื่องจากมี

คุณสมบัติที่ค่อนข้างเปราะบางและแตกหักง่ายจากการสัมผัสกับหัวอ่าน ประกอบกับสารแม่เหล็กประเภทนี้มีความหนาแน่นค่อนข้างน้อยจึงมีข้อจำกัดในด้านขนาดความจุของข้อมูล

- สารประเภท Thin Film เป็นสารแม่เหล็กที่มีสีเงินวาวมีคุณสมบัติค่อนข้างทนทานต่อการเสียดสีของหัวอ่าน อีกทั้งยังเป็นสารเคลือบผิวที่บางมากทำให้หัวอ่านสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ดีกว่าจานแม่เหล็กที่ใช้สารเคลือบผิวชนิดอื่น ๆ สารแม่เหล็กประเภทนี้ยังมีราคาสูง

2.1.3.4 มอเตอร์หมุนจานแม่เหล็ก (Spindle Motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้หมุนของแผ่นแม่เหล็กซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อความเร็วในการอ่านของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพราะยิ่งมอเตอร์หมุนเร็วหัวอ่านก็จะเจอข้อมูลที่ต้องการเร็วขึ้นนั่นเอง ซึ่งความเร็วที่ว่านี้จะวัดกันเป็นรอบต่อนาที (Revolutions Per Minute หรือ RPM) ถ้าเป็นฮาร์ดดิสก์ไครฟ์รุ่นเก่าจะหมุนด้วยความเร็วเพียง 3,600 รอบต่อนาที ต่อมาพัฒนาเป็น 5,400 รอบต่อนาทีและ 7,200 รอบต่อนาที และปัจจุบันหมุนได้เร็วถึง 14,000 รอบต่อนาที การพัฒนาให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์หมุนเร็วจะได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะมีผลให้ Sector ที่บรรจุข้อมูลจะถูกหมุนเร็วมาพบกับหัวอ่านเร็วขึ้น ทำให้การค้นพบอ่านข้อมูลได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพดีขึ้น เพราะลดทั้ง Access Time และ Latency Time

2.1.3.5 เคส (Case) มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมใช้บรรจุลูกไกต่าง ๆ ในการหมุนเพื่ออ่านภายในแผ่นดิสก์ ปกติเคสนี้จะถูกปิดผนึกอย่างหนาแน่น เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการหยิบจับและป้องกันฝุ่นละออง

2.1.3.6 กรองอากาศ (Air Filter) ภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไม่ได้ทำเป็นสุญญากาศอย่างที่เข้าใจ เพราะมันต้องการอากาศในการยกหัวอ่านให้ลอยอยู่เหนือจานแม่เหล็กได้ในหลายพื้นที่ ที่มีสภาวะแรงดันอากาศแตกต่างกัน เนื่องจากอากาศจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีความกดอากาศสูงไปยังที่ที่มีความกดอากาศต่ำ ตัวกรองอากาศจึงทำหน้าที่ในการรักษาปริมาณอากาศเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศระบายออกไปด้านนอกหมด

2.1.3.7 ขั้วต่อและจัมเปอร์ (Connector and Jumper) ขั้วต่อและจัมเปอร์จัดเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในส่วนท้ายของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทุก ๆ ตัว ซึ่งประกอบไปด้วยขั้วต่ออินเตอร์เฟส ขั้วต่อสายไฟ และจัมเปอร์

2.1.3.8 ขั้วต่ออินเตอร์เฟส (Interface Connector) ใช้เป็นจุดเชื่อมต่อที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างฮาร์ดดิสก์ไครฟ์กับซีพียูหรือแม้กระทั่งหน่วยความจำ ซึ่งรูปแบบของขั้วต่อ

อินเตอร์เฟซอาจแตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เช่น จำนวนขาสัญญาณจะมีไม่เท่ากันซึ่งเป็นผลทำให้สายสัญญาณที่ใช้ ย่อมมีลักษณะที่ต่างกันไปอีกด้วย

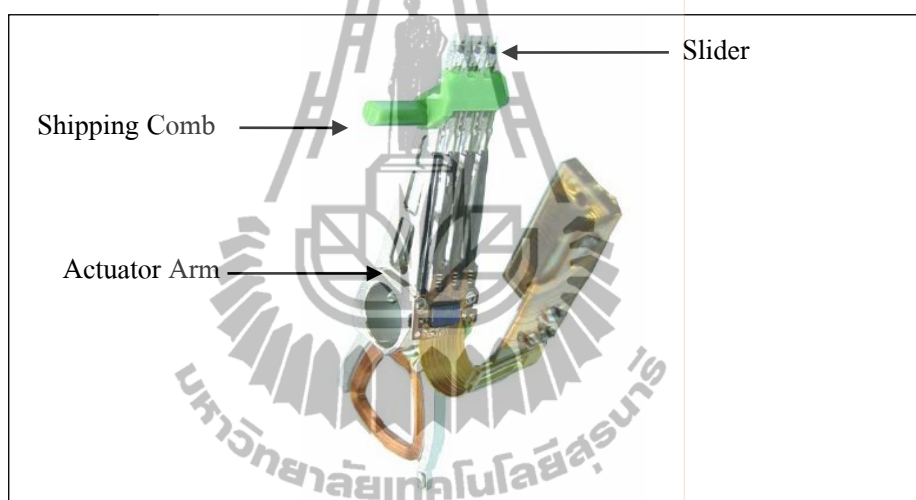
- ขั้วต่อสายไฟ (Power Connector) คือ ช่องสี่เหลี่ยมที่มีมุมตัดสองด้านบน ใช้รองรับขั้วไฟพลาสติกสีขาวขนาดใหญ่ที่มาจากเพาเวอร์ซัพพลายนั่นเอง (ขั้วไฟขนาดเล็กจะใช้กับฟลอปปีดิสก์ไครฟ์) โดยจะมีขาโลหะทั้งหมดสี่ขาในช่องนี้ เวลาเสียบขั้วไฟพลาสติกสีขาวเข้ากับ Power Connector ต้องเสียบให้ถูกทิศทาง ไม่เช่นนั้นจะเป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าที่ไม่ตรงกับความต้องการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความเสียหายได้ ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทุกตัวจะมีขั้วต่อสายไฟสำหรับต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ โดยขั้วต่อไฟมาตรฐานจะมีจำนวนขาสัญญาณ 4 เข็ม ซึ่งจะจ่ายไฟ 5 V และ 12 V
- จัมเปอร์ (Jumper) เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ใช้สำหรับการปรับตั้งค่าเฉพาะให้กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แต่ละตัว เช่น การกำหนดให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นตัว Boot หรือเป็นตัวเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประเภท IDE

2.1.3.9 แผงวงจรบนตัวฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (Circuit/Logic Board) ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แต่ละตัวจะมีแผงวงจรที่เรียกว่า Circuit หรือ Logic Board แผงวงจรนี้จะถูกยึดติดกับภายนอกของตัวฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยจะมีชิพไอซีที่เรียกว่า DSP (Digital Signal Processors) ซึ่งทำการควบคุมส่งผ่านของข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลส่วนที่ถูกเรียกใช้บ่อย ๆ และส่วนประกอบอื่น ๆ รวมทั้งส่วนควบคุม Spindle, Actuator, Cache Memory, Read/Write Operation, Power Management แผงวงจรนี้จะรับคำสั่งผ่านทางส่วนควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ หรือ Hard Drive's Controller ซึ่งถูกควบคุมโดยระบบปฏิบัติการอีกทีหนึ่ง เมื่อระบบต้องการข้อมูลที่เก็บบันทึกอยู่ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ตัวแผงวงจรนี้จะรับคำสั่งโดยเคลื่อนและควบคุมส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ต้องการ

2.2 ส่วนประกอบของชุดหัวอ่านเขียนข้อมูล (Head Stack Assembly : HSA)

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล ทำงานโดยอาศัยหัวเขียนอ่านที่เป็นแม่เหล็กเหนี่ยวนำกับจานแม่เหล็กซึ่งหมุนด้วยรอบความเร็วสูง โดยชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ดังกล่าวเรียกว่า หัวอ่านเขียนข้อมูล (Slider) หัวอ่านเขียนนี้จะวางติดอยู่ที่ปลายแขนจับยึด (Suspension) ซึ่งจะถูกรวมกันว่า ชิ้นส่วนชุดอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly :HGA) เมื่อนำชิ้น

ส่วน HGA มาวางซ้อน ๆ กันเป็นชั้นในแนวตั้งและประกอบเข้ากับแขนของหัวอ่าน (Actuator Arm) จะถูกเรียกว่า Head Stack Assembly ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยจะทำให้ชิ้นส่วน HGA สามารถอ่านและเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล (Platter) หลาย ๆ แผ่นได้พร้อมกัน แผ่นบันทึกข้อมูลจะสามารถบันทึกข้อมูลได้ 2 ด้าน จึงจำเป็นต้องใช้ HGA จำนวน 2 ชั้น ในการอ่านแผ่นบันทึกข้อมูล 1 แผ่น จำนวนแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีผลต่อความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่จุมาก ๆ ก็ต้องใช้แผ่นบันทึกมากขึ้น Shipping Comb จึงถูกนำมาติดตั้งบนชุด HGA ที่มีทั้งขนาด 2, 4, 6 หรือ 8 หัวอ่านขึ้นอยู่กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แต่ละรุ่นและ Shipping Comb ก็ยังมีรูปร่างหน้าตาที่แตกต่างกันออกไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



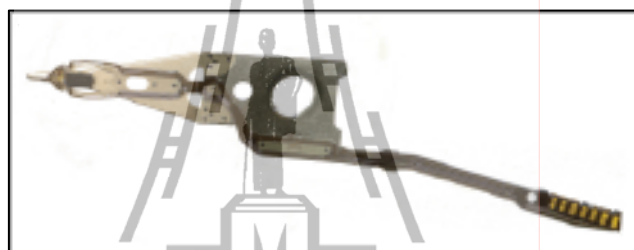
รูปที่ 2.5 แสดงรูป Head Stack Assembly



รูปที่ 2.6 แสดง Shipping Comb ตามจำนวนหัวอ่านขนาดต่าง ๆ

2.2.1 ชิ้นส่วนชุดอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly : HGA)

เป็นอุปกรณ์รองรับหัวอ่านเขียนข้อมูล ทำให้หัวอ่านเขียนข้อมูลลอยอยู่บนผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลในระยะความสูงที่เหมาะสมเพื่อการอ่านเขียนข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นบันทึกข้อมูลในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทำงานอยู่ ซึ่งระยะห่างของผิวหัวอ่านเขียนข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลนั้นอยู่ในระดับนาโนเมตร โดย HGA 1 ชิ้นจะอ่านเขียนข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลได้เพียง 1 ด้านเท่านั้น ซึ่งในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประกอบด้วย HGA จำนวนหลายชิ้น ลักษณะชิ้นส่วนชุดอ่านเขียนข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงชุดอ่านเขียนข้อมูล (HGA)

2.2.2 แขนของหัวอ่านเขียนข้อมูล (Actuator Arm)

เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เคลื่อนย้าย HGA เพื่อควบคุมหัวอ่านเขียนข้อมูลซึ่งติดตั้งตรงส่วนปลายของ HGA ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง Track และ Sector ที่ต้องการอ่านเขียนข้อมูลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยมีระยะห่างระหว่างผิวหัวอ่านเขียนข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลนั้นอยู่ในระดับนาโนเมตร Actuator Arm นี้เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่มีผลต่อความเร็วในการอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพราะตัว Actuator Arm นี้จะต้องเคลื่อนที่นำพาหัวอ่านเขียนข้อมูลไปยังตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ ไม่เช่นนั้นจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการอ่านเขียนข้อมูลเร็วขึ้นตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันยังคงต้องรักษาความแม่นยำและความถูกต้องชนิดร้อยเปอร์เซ็นต์เต็ม ลักษณะชิ้นส่วนชุดอ่านเขียนข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงชุด Actuator Arm

2.3 พลาสติกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

พลาสติก คือ สารสังเคราะห์ (Synthetic Materials) ที่มนุษย์คิดค้นขึ้นมามีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ประกอบด้วยธาตุสำคัญได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน คลอรีน ฟลูออรีน ฯลฯ สมาคมวิศวกรพลาสติก (SPE) และสมาคมอุตสาหกรรมพลาสติก (SPI) แห่งสหรัฐอเมริกาได้ให้คำจำกัดความของพลาสติกไว้ดังนี้ “พลาสติกคือ วัสดุที่ประกอบด้วย สารหลายอย่างมีน้ำหนักโมเลกุลสูงคงรูปเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิต ลักษณะอ่อนตัวขณะทำการผลิตซึ่งโดยมากใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยความร้อนหรือแรงอัดหรือทั้งสองอย่าง”

พลาสติกเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ชนิดหนึ่ง ทั้งนี้เพราะพลาสติกส่วนมากมีแหล่งกำเนิดจากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ มีพลาสติกหลายชนิดที่มีเฉพาะธาตุไฮโดรเจนและคาร์บอนล้วน ๆ ผสมอยู่ แต่พลาสติกส่วนมากยังประกอบด้วยธาตุชนิดอื่น ๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน คลอรีน ฟลูออรีน ฟอสฟอรัส กำมะถัน ฯลฯ พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) กับเทอร์โมเซต (Thermoset) เทอร์โมพลาสติกเป็นกลุ่มที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้และเสียค่าใช้จ่ายในการตกแต่งน้อยกว่ามีความเหนียวดี สามารถทำให้มีความบางได้ตามต้องการ น้ำหนักเบา มีรอบในการผลิตน้อยจึงผลิตได้เร็วทำให้ได้ผลผลิตสูง สามารถให้สีได้หลากหลาย ส่วนเทอร์โมเซตมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ไม่ค่อยหดตัว มีความแข็งตึง ด้านทานการขีดคราก ความชื้นและสารเคมีได้ดีเยี่ยม สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการให้สีความใสและการหล่อเข้าแบบ นอกจากนี้ถ้าจะแบ่งตามลักษณะของ

การใช้งานสามารถแบ่งพลาสติกออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้ คือ พลาสติกใช้งานทั่วไป พลาสติกวิศวกรรม และสเปเชียลตี้พลาสติก

1) พลาสติกใช้งานทั่วไปส่วนใหญ่เป็นจำพวกโพลีโพรพิลีน โพลีเอทิลีน โพลีสไตรีน โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีเมทิล เมทาคริเลต อะคริลิก เอบีเอส เอสเอเอ็น หรือแซน เป็นต้น

2) พลาสติกวิศวกรรม ได้แก่ โพลีออกซิเมทิลีน หรือพีโอเอ็ม โพลีคาร์บอเนต โมดิฟายด์ โพลีโพรพิลีนออกไซด์ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต โพลีบิวทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นต้น ลักษณะเด่นของพลาสติกวิศวกรรมที่แตกต่างจากพลาสติกใช้งานทั่วไป คือ พลาสติกวิศวกรรมจะมีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่า มีน้ำหนักเบา สามารถปรับแต่งได้เหมือนโลหะ

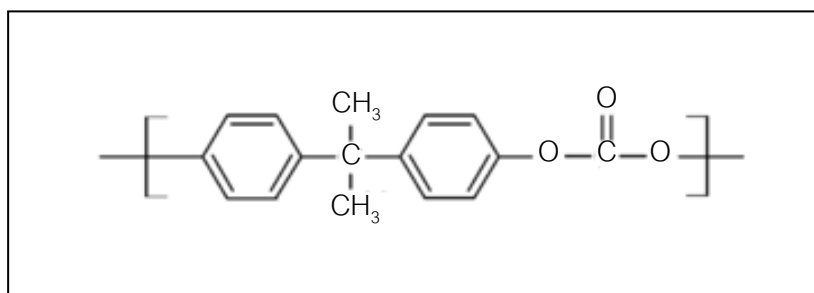
3) สเปเชียลตี้พลาสติก เป็นชนิดพิเศษที่นอกเหนือจาก 2 กลุ่ม แรก เช่น เทฟลอน เป็นต้น

2.3.1 โพลีคาร์บอเนต

โพลีคาร์บอเนตหรือที่รู้จักด้วยชื่อเครื่องหมายการค้า Lexan Makrolon Makrolear เป็นต้น เป็นกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก หรือ เรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลาย เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็น โซ่ตรงยาวมีการเชื่อมต่อระหว่าง โซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถหลอมเหลวได้ หรือ เมื่อผ่านการอัดแรงมาก ๆ จะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม

2.3.2 โครงสร้างของโพลีคาร์บอเนต

โพลีคาร์บอเนตได้รับการเรียกตามโครงสร้างที่มีกลุ่มคาร์บอเนต (-O-(C=O)-O-) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โพลีคาร์บอเนตจะมีลักษณะ โปร่งใส แข็ง ทนแรงยึด และแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างทางเคมีของโพลีคาร์บอเนต

จากรูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของโพลีคาร์บอเนตจะเห็นโครงสร้างหกเหลี่ยมสองด้าน โครงสร้างหกเหลี่ยมนี้เรียกว่า กลุ่มฟีนิล (Phenyl Group) นอกจากนี้ยังสามารถ

เห็น CH₃ สองกลุ่ม เรียกว่ากลุ่มเมทิล (Methyl Group) โดยกลุ่มการแสดงของกลุ่มฟีนิลในห่วงโซ่โมเลกุลและด้านเมทิลจึงนำไปสู่ความแข็งแรงในระดับโมเลกุลของโพลีคาร์บอเนต ความแข็งแรงนี้มีผลต่อคุณสมบัติของโพลีคาร์บอเนตโดยตรง

2.3.3 คุณสมบัติของโพลีคาร์บอเนต

โพลีคาร์บอเนตมาจาก Bisphenol (BPA) เป็นสารอินทรีย์ที่มีฟีนิลสองหมู่ฟังก์ชัน เป็นวัสดุที่คงทนมาก ถึงแม้จะทนต่อแรงกระแทกสูงแต่ก็มีความต้านทานรอยขีดข่วนต่ำ โพลีคาร์บอเนตมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้วประมาณ 150 °C ค่ายังโมดูลัสประมาณ (E) 2.0-2.4 GPa ค่าความต้านทานแรงดึง 55-75 MPa เปรี่เซนต์อีลองเกชัน 80-150%

2.3.4 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลีคาร์บอเนต

ลักษณะของเรซินมีทั้งเป็นเม็ดใส เป็นผงและเป็นแผ่น เหมาะสำหรับการใช้เป็นสารประกอบสำหรับงานขึ้นรูปเป็นหลัก เช่น การฉีดเข้าแม่พิมพ์หรือเอกซ์ทรูชัน ใช้ทำคอมโพสิต กระจกเลนส์คอมโพสิตหน้าของรถยนต์ กระจกแว่นตา ภาชนะ ขวดพลาสติก ใบบัตร และใช้เป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.4 ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

เนื่องจากวิธีโทโปโลยีเหมาะสมที่สุดนั้น ต้องการหาการกระจายของวัสดุที่อยู่บนโครงสร้างของชิ้นงาน โดยอาศัยค่าตัวแปรที่อยู่ในรูปของซูโดเดนซิตี (Pseudo-Densities) ภายในของพื้นที่ย่อยเล็ก ๆ หรือเรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ในโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างมีคุณสมบัติตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เราสนใจ เช่น หาค่าพลังงานต่ำสุดของโครงสร้าง การหาค่ามากที่สุดของค่าความถี่ธรรมชาติ ฯลฯ ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง เช่น ความเค้น ความเครียด ระยะการขจัด หรือพลังงานความเครียดของตัวโครงสร้าง ด้วยการวิเคราะห์ประมาณค่าเหล่านี้จากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ยอมรับคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการนี้ใช้หลักการหาความสัมพันธ์ของเอลิเมนต์ด้วยระเบียบเชิงตัวเลขแทนการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของโครงสร้างที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) จากสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างด้วยโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด เราจำเป็นต้องทราบถึงวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

พื้นฐานของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ แล้วใช้หลักการคำนวณสถานะสมดุลพลวัตของแต่ละเอลิเมนต์ โดยใช้กฎของการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ซึ่งกล่าวไว้ว่าผลรวมของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อมวลในทิศทางใด จะมีค่าเท่ากับ

ผลคูณของมวลกับความเร่งในทิศทางนั้น แล้วนำอิลลิเมนต์เหล่านั้นรวมเข้าด้วยกัน ให้เป็นระบบโครงสร้างที่ง่ายขึ้น โดยแสดงในรูปของสมการเมตริกซ์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลลิเมนต์ในขั้นต้นจะไม่คำนึงความหน่วงของโครงสร้าง การวิเคราะห์ระบบแบบพลวัตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีซึ่งทั้ง 2 กรณีพิสูจน์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน คือ 1. วิธีพลังงาน (พลังงาน) เป็นวิธีที่ใช้หลักของงานเสมือน (Principal Of Virtual Work) 2. อาศัยสมการลากรองจ์ (Lagrange's Equation) ในการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างที่ถูกแบ่งเป็นอิลลิเมนต์ย่อย

2.4.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ (Shape Function)

ในวิธีการไฟไนต์อิลลิเมนต์เราจะแบ่งขอบเขตออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย ซึ่งต่อกันที่จุดต่อต่าง ๆ ค่าที่จุดต่อ นั้น ๆ ไม่รู้ค่าและต้องการหาการกระจายของผลเฉลยระหว่างจุดต่อ (Node) ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์เป็นฟังก์ชันที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประมาณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เช่นการขจัดและความเครียด ที่อยู่ภายในอิลลิเมนต์ เพื่อใช้หาผลเฉลยที่จุดต่อ ซึ่งเราสามารถสมมุติให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย เช่น ในลักษณะเชิงเส้นตรงได้

2.4.2 การหาสทิงพเนสมตริกซ์และสมการของอิลลิเมนต์

สามารถหาสทิงพเนสมตริกซ์ของอิลลิเมนต์ โดยอาศัยหลักการพลังงานศักย์รวมต่ำสุด จากสมการพลังงานศักย์ π_p มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานความเครียด U กับพลังงานศักย์เนื่องจากแรงภายนอกหรืองานเนื่องจากแรงภายนอก W ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$\pi_p = U + W \quad (2.1)$$

สมการพลังงานความเครียด (Strain energy) ของอิลลิเมนต์ใด ๆ คือ

$$U_i = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega_i} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega \quad (2.2)$$

เมื่อ Ω_i คือ ปริมาตรของอิลลิเมนต์ที่ i และพิจารณาในเทอมพิกัดรวมจะได้ว่า

$$U_i = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{d}}^T \left(\iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega \right) \bar{\mathbf{d}} \quad (2.3)$$

งานเนื่องจากแรงภายนอก คือ

$$W_i = \bar{\mathbf{d}}^T \bar{\mathbf{f}} \quad (2.4)$$

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

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

ดังนั้นพลังงานศักย์รวมของแต่ละอิลลิเมนต์จากสมการ (2.1) คือ

$$\pi_p = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{d}}^T \left(\iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega \right) \bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{d}}^T \bar{\mathbf{f}} \quad (2.5)$$

ในกรณีที่วัสดุอยู่ในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น การกระจัดและความเครียดมีค่าน้อยและขึ้นส่วนอยู่ในสภาวะสมดุล พลังงานศักย์รวมของระบบจะมีค่าต่ำสุด โดยให้ $\nabla \pi_p|_{\bar{\mathbf{d}}} = \bar{\mathbf{0}}$ นั่นคือ

$$\nabla \pi_p|_{\bar{\mathbf{d}}} = \iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega \bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{0}} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) จัดรูปใหม่ได้

$$\iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega \bar{\mathbf{d}} = \bar{\mathbf{f}} \quad (2.7)$$

หรือ $\bar{\mathbf{k}} \bar{\mathbf{d}} = \bar{\mathbf{f}} \quad (2.8)$

จากสมการที่ (2.8) คือ สมการสมดุลของแรงในเทอมของสทิฟเนสเมตริกซ์

ซึ่งค่า $\bar{\mathbf{k}} = \iiint_{\Omega_i} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega$ คือ สทิฟเนสเมตริกซ์ของอิลลิเมนต์ในพิกัดรวม

ในกรณีที่อิลลิเมนต์มีความหนา t คงที่ สทิวเฟเนสมเมตริกซ์ของอิลลิเมนต์ คือ

$$\bar{\mathbf{k}} = t \iiint_V \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} dA \quad (2.9)$$

ในกรณีที่จุดต่อถูกกำหนดตำแหน่งโดยพิกัดเฉพาะที่ จำเป็นต้องแปลงพิกัดเฉพาะที่ให้ไว้ในเทอมของพิกัดรวม ซึ่งสามารถแปลงได้ ดังแสดงในสมการที่ (2.10)

$$\mathbf{d} = \bar{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{d}}, \quad \mathbf{f} = \bar{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{f}} \quad \text{และ} \quad \bar{\mathbf{k}} = \bar{\mathbf{T}}^T \mathbf{k} \bar{\mathbf{T}} \quad (2.10)$$

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

\mathbf{k} คือ สทิวเฟเนสมเมตริกซ์ของอิลลิเมนต์ในพิกัดเฉพาะที่

2.4.3 การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จาก การรวมสมการของแต่ละอิลลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีวางซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าสทิวเฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักการสมมูลของแรงที่จุดต่อของอิลลิเมนต์ และความต่อเนื่องของโครงสร้าง ทำให้สามารถหาสทิวเฟเนสมเมตริกซ์รวมในพิกัดรวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$\mathbf{K} = \sum_1^{N_E} \bar{\mathbf{k}} \quad (2.11)$$

ดังนั้นสามารถหาสมการสมมูลของแรงในเทอมพิกัดรวมของระบบได้ดังนี้

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (2.12)$$

เมื่อ \mathbf{F} คือ เวกเตอร์ของแรงของระบบที่จุดต่อ

\mathbf{K} คือ สทิวเฟเนสมเมตริกซ์รวมของระบบ

เนื่องจากเมตริกซ์ \mathbf{K} ใน ดังแสดงในสมการ (2.12) เป็นเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix) จึงจำเป็นต้องอาศัยขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) หรือเงื่อนไขอื่น ๆ เช่น จุดยึด เพื่อช่วยทำให้เมตริกซ์ \mathbf{K} ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน และสามารถหาการกระจัดที่จุดต่อได้ พิจารณาตามสมการรวมของระบบโครงสร้าง และเงื่อนไขขอบเขตได้ ดังแสดงสมการที่ (2.13)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_a \\ \mathbf{d}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_b \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

กระจายสมการที่ (2.13) ได้ดังนี้

$$\mathbf{K}_{aa} \mathbf{d}_a + \mathbf{K}_{ab} \mathbf{d}_b = \mathbf{F}_a \quad (2.14)$$

$$\mathbf{d}_a = \mathbf{K}_{aa}^{-1} (\mathbf{F}_a - \mathbf{K}_{ab} \mathbf{d}_b) \quad (2.15)$$

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{K}_{ba} \mathbf{d}_a + \mathbf{K}_{bb} \mathbf{d}_b \quad (2.16)$$

เมื่อ \mathbf{F}_a และ \mathbf{F}_b คือ เวกเตอร์แรงภายนอกที่กระทำ ณ จุดต่อที่ทราบ และไม่ทราบค่า ตามลำดับ \mathbf{d}_a และ \mathbf{d}_b คือ เวกเตอร์การขจัดที่ทราบค่าและไม่ทราบค่า ตามลำดับ ซึ่งแรงและการขจัดที่ทราบค่านี้ จะเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการ ส่วนสทิงเฟนสมเมตริกซ์จะเป็นสทิงเฟนสมเมตริกซ์ตามตำแหน่งของการขจัดและตำแหน่งของแรง

2.5 การวิเคราะห์เชิงพลวัตของโครงสร้าง

ปัญหาทางพลวัตของการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเค้น ความเครียด และแรง ทั้งหมดนี้มีผลต่อกัน วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้วิเคราะห์ระบบโครงสร้างที่ถูกแบ่งออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย ๆ คือ สมการลากรองจ์ (Lagrange's Equation) ข้อดีข้อวิธีการนี้ คือ สามารถแทนรายละเอียดของการกระจัดของโครงสร้างด้วยพิกัดทั่วไป ซึ่งถ้าให้ระบบที่กำลังพิจารณา มีการกระจัดเสมือนที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n ค่า คือ q_1, q_2, \dots, q_n มีพลังงานจลน์ของระบบเป็นฟังก์ชันของ q_1, q_2, \dots, q_n และ $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$ มีพลังงานความเครียดเป็นฟังก์ชันของ q_1, q_2, \dots, q_n สมการลากรองจ์ของระบบจะอยู่ในรูป ดังแสดงในสมการ (2.17)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.17)$$

สำหรับ $i = 1, 2, \dots, n$

เมื่อ เครื่องหมาย ดอท หมายถึงการอนุพันธ์เทียบกับเวลา

D คือ งานจากแรงหน่วย

Q_i คือ แรงทั่วไปที่สอดคล้องกับพิกัดทั่วไป q_i

พิจารณาสมการลากรองจ์ สำหรับการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีที่พลังงานจลน์ไม่ขึ้นอยู่กับการจัดเสมือน (q_i) ใด ๆ และไม่พิจารณาความหน่วงของโครงสร้าง จะพบว่าพจน์ที่ 2 และ 3 ดังแสดงในสมการ (2.17) สามารถตัดทิ้งได้ และจากการแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยที่มีรูปทรงอย่างง่ายหลาย ๆ เอลิเมนต์ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าโครงสร้างที่กำลังวิเคราะห์เกิดขึ้นได้จากการนำจุดต่อ (Node) และเส้นขอบหรือผิวรอบของแต่ละเอลิเมนต์มาเชื่อมโยงกันไว้

สำหรับเอลิเมนต์ย่อยตัวที่ i มีเวกเตอร์การจัด \mathbf{r}_i ที่จุด P ใด ๆ ภายในเอลิเมนต์จะอยู่ในรูป ดังแสดงในสมการที่ (2.18)

$$\mathbf{r}_i(P) = \mathbf{N}\mathbf{r}_{e,i} \quad (2.18)$$

เมื่อ \mathbf{N} คือ ฟังก์ชันเมตริกซ์ หรือเรียกอีกอย่างว่าฟังก์ชันการจัด (Displacement Function) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว นิยมใช้ป็นฟังก์ชัน โพลีโนเมียล การเลือกใช้ฟังก์ชันการจัดจะขึ้นอยู่กับประเภทของเอลิเมนต์

$\mathbf{r}_{e,i}$ คือ เวกเตอร์ที่ประกอบไปด้วยการจัดของจุดต่อของเอลิเมนต์ที่กำลังพิจารณา พลังงานจลน์รวมของเอลิเมนต์สามารถคำนวณได้จาก

$$T_i = \frac{1}{2} \left(\rho \iiint_{\Omega_i} \dot{\mathbf{r}}_i^T \dot{\mathbf{r}}_i d\Omega \right) \quad (2.19)$$

เมื่อ Ω_i คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์

ρ คือ ความหนาแน่นของเอลิเมนต์ ซึ่งสมมุติให้มีค่าคงที่

เมื่อแทนสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.19) จะได้ ดังแสดงในสมการที่ (2.20)

$$T_i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}_{e,i}^T \left(\rho \iiint_{\Omega_i} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega \right) \dot{\mathbf{r}}_{e,i} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}_{e,i}^T \mathbf{m}_i^0 \dot{\mathbf{r}}_{e,i} \quad (2.20)$$

พลังงานศักย์รวมหรือพลังงานความเครียดของอีลิเมนต์ที่ i สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) เมื่อ σ และ ε แทนความเค้นและความเครียดที่จุดใด ๆ ภายในอีลิเมนต์ตามลำดับ ความเครียดดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของอนุพันธ์ของการขจัดเทียบกับแกนพิกัด ดังแสดงในสมการที่ (2.21)

$$\varepsilon(\mathbf{P}) = \mathbf{B}\mathbf{r}_{e,i} \quad (2.21)$$

โดย \mathbf{B} หาได้จากวิธีเหมือน \mathbf{N}

จากการใช้กฎของฮุก (Hooke's Law) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด คือ

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.22)$$

จากสมการจะได้ว่า

$$U_i = \frac{1}{2} \mathbf{r}_{e,i}^T \left(\iiint_{\Omega_i} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \right) \mathbf{r}_{e,i} = \frac{1}{2} \mathbf{r}_{e,i}^T \mathbf{k}_i \mathbf{r}_{e,i} \quad (2.23)$$

ดังนั้นพลังงานจลน์รวมและพลังงานศักย์รวมของทั้งโครงสร้าง สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T \left(\sum_{i=1}^{N_E} \mathbf{m}_i \right) \dot{\mathbf{r}} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{r}} \quad (2.24)$$

และ

$$\mathbf{U} = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \left(\sum_{i=1}^{N_E} \mathbf{k}_i \right) \mathbf{r} = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \mathbf{K} \mathbf{r} \quad (2.25)$$

เมื่อ N_E คือ จำนวนอีลิเมนต์ทั้งหมด

\mathbf{r} คือ เวกเตอร์การขจัดของระบบรวม (Global System)

ความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของระบบรวมกับการขจัดที่จุดต่อของอีลิเมนต์ i สามารถหาได้จากเมตริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$\mathbf{r}_{e,i} = \mathbf{T}_i \mathbf{r} \quad (2.26)$$

จากผลของการแปลงการจัดที่จุดต่อไปเป็นการจัดของระบบรวมนั้น เราจะได้เมตริกซ์มวลของอิเลิเมนต์ (Element Mass Matrix, \mathbf{m}_i) และสทิฟเนสเมตริกซ์ของอิเลิเมนต์ (Element Stiffness Matrix, \mathbf{k}_i) ตามลำดับดังนี้

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{T}_i^T \mathbf{m}_i^0 \mathbf{T}_i \quad (2.27)$$

และ
$$\mathbf{k}_i = \mathbf{T}_i^T \mathbf{k}_i^0 \mathbf{T}_i \quad (2.28)$$

แทนค่าพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ในสมการลากรองจ์ จะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างในรูปเมตริกซ์ คือ

$$\mathbf{M}_{aa} \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}_{aa} \mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (2.29)$$

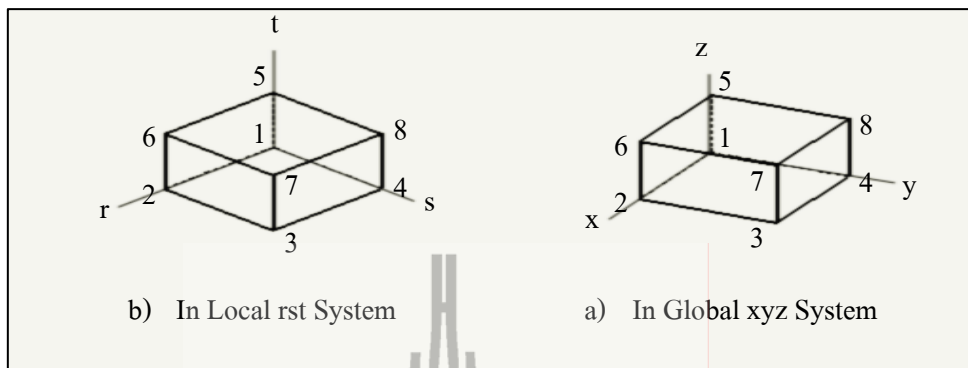
- เมื่อ
- \mathbf{M} คือ เมตริกซ์มวลของโครงสร้าง
 - \mathbf{K} คือ สทิฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้าง
 - \mathbf{F} คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอกที่สอดคล้องกับจุดต่อในโครงสร้าง

สมการ (2.29) คือ ระบบของการวิเคราะห์แบบพลวัต จะเห็นว่าเมื่อทำการตัดพจน์ของพลังงานจลน์ออกไปจะได้การวิเคราะห์แบบสถิตย์ ซึ่งทำให้การซับซ้อนของการคำนวณลดลง

2.6 อิเลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบสามมิติ

2.6.1 อิเลิเมนต์แบบแปดหน้าหรือทรงลูกบาศก์ (Hexahedron Element)

ในส่วนของหัวข้อนี้ จะพิจารณาถึงรูปแบบการแบ่งอิเลิเมนต์แบบแปดหน้าหรือทรงลูกบาศก์ (Hexahedron Element) ซึ่งจะมีแปดจุด (Node) ที่ตามมุมของอิเลิเมนต์ ในแต่ละจุดจะมี 3 ดีกรีออฟฟร็ดอม (Degree Of Freedom) เพื่อให้สะดวกเราคิดรูปแบบอิเลิเมนต์โดยการคิดแบบ Isoperimetric Element. อิเลิเมนต์แบบนี้ถูกเรียกว่า Zienkiewicz-Irons-Brick มี 8 nodes (ZIB 8) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (a)



รูปที่ 2.10 แสดงอิลลิเมนต์แบบลูกบาศก์ Hexahedron 8 โหนด

2.6.2 Natural Coordinate System

ตัวอย่างในรูปที่ 2.10 (a) พิกัดในรูปแบบปกติ คือ r , s , และ t ที่มีจุดเริ่มต้นของระบบ คือ จุดเซนทรอยด์ (Centroid) ของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งแกนระยะพิกัดของแต่ละแกน r , s และ t จะเชื่อมโยงระหว่างคู่ของผิวที่อยู่ด้านตรงข้ามซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง ± 1

ดังนั้นระยะพิกัดที่เป็นโลคอล รูปแบบของอิลลิเมนต์ที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ดังที่อยู่ในรูป 2.10 (b) ถึงแม้ว่าในระบบพิกัด Cartesian ที่เป็น Global อาจจะไม่มีความแน่นอน และการบิดรูปของทรงลูกบาศก์ทั้งหกด้าน เช่น ในรูปที่ 2.10 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของ Local และ Global สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ z_8 \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

โดยที่

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & \dots & N_8 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\text{และ} \quad N_i(r,s,t) = \frac{1}{8}(1+rr_i)(1+ss_i)(1+tt_i) \quad ; i = 1,2,\dots \quad (2.32)$$

2.6.3 แบบจำลองการกระทำการเคลื่อนที่ (Displacement Model)

การตั้งสมมุติฐานของการเปลี่ยนแปลงของระยะการเคลื่อนที่ระหว่างโนด (Node) เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น การเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงได้โดยการใช้ฟังก์ชันอินเตอร์โพลชัน (Interpolation Function) ซึ่งเหมือนกับรูปแบบทางเรขาคณิต

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_8 \end{Bmatrix} = [N] \cdot \bar{Q}^{(e)} \quad (2.33)$$

ซึ่ง $\bar{Q}^{(e)}$ คือ เวกเตอร์ของ Nodal Displacement Degree Of Freedom และ (u_i, v_i, w_i) คือ ระยะการเคลื่อนที่ของจุด $i, i = 1-8$

2.6.4 ความสัมพันธ์ของความเครียดและความเค้น (Stress-Strain Relations)

ใช้สมการ (2.34) Three-Dimensional Strain-Displacement Relations

$$\bar{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = \underset{6 \times 24}{[B]} \cdot \underset{24 \times 1}{\bar{Q}^{(e)}} \quad (2.34)$$

โดยที่ $[B] = [[B_1][B_2] \dots [B_8]]$ (2.35)

และ $[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, i = 1-8$ (2.36)

โดยที่เมตริก $[B_i]$ สามารถเขียนออกมาในรูปเชิงอนุพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.37)$$

2.6.5 Element Stiffness Matrix

กำหนดให้ Element Stiffness Matrix มีรูปสมการตามข้อ (2.38)

$$[K]^{(e)} = \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [D][B] dV \quad (2.38)$$

เมื่อเมตริก [B] คือ Natural Coordinates (ดังแสดงในสมการที่ 2.34, 2.35) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องรวมสมการหลังจากการอินทิเกรต ดังแสดงในสมการที่ (2.38) ด้วย โดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$dV = dx dy dz = \det[J] \cdot dr ds dt \quad (2.39)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.38) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[K]^{(e)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B] [D][B] \det[J] dr ds dt \quad (2.40)$$

2.6.6 การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Computation)

เมื่อ เมตริก [B] คือ ฟังก์ชันอิมพลีซิท ของ r, s และ t วิธีการคิดทางเชิงตัวเลขถูกใช้ในประเมินผลคูณรวมของการอินทิเกรต (Integrate) ดังแสดงในสมการ (2.40) จากการพิสูจน์พบว่าวิธีการ Gaussian Quadrature เป็นวิธีคิดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ในการแก้ปัญหานี้ใช้ Gaussian Quadrature แบบสองจุด ซึ่งให้ผลที่แม่นยำ ดังนี้

$$[K]^{(e)} = \sum_{r=R_1}^{R_2} \sum_{s=S_1}^{S_2} \sum_{t=T_1}^{T_2} [(B)^T [D][B] \cdot \det[J]](R_i, S_j, T_k) \quad (2.41)$$

โดยที่ $[(B)^T [D][B] \cdot \det[J]](R_i, S_j, T_k) \quad (2.42)$

2.7 การสัมผัสในระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

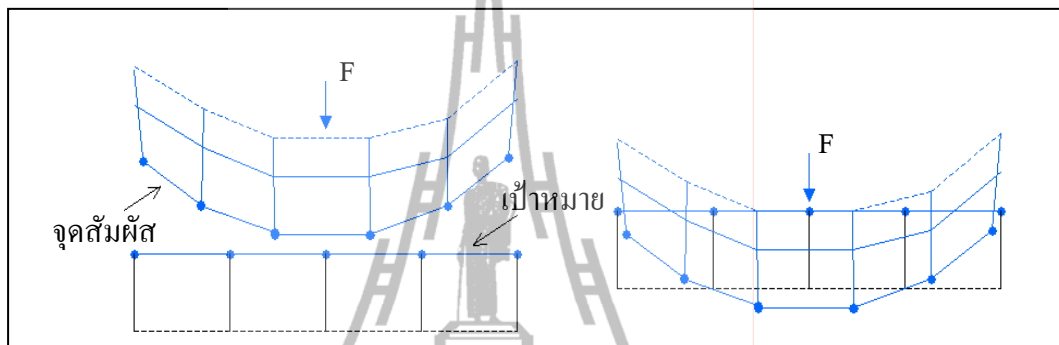
การสัมผัสของชิ้นส่วนทางกลเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการสัมผัสของส่วนชิ้นงานตั้งแต่สองส่วน ในการศึกษากระบวนการสวมเข้าและถอดออกของหวิ้น จำเป็นต้องพิจารณาการสัมผัสกันของหวิ้นแขนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

2.7.1 แนวคิดพื้นฐานการสัมผัส

การสัมผัส คือ การที่พื้นผิวอิสระเริ่มเคลื่อนที่เข้าหากันจนกระทั่งพื้นผิวเหล่านั้นเริ่มเกิดมีการสัมผัสและทำการสัมผัสกันอย่างเต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ในทางฟิสิกส์ อธิบายคุณลักษณะการสัมผัสไว้ดังนี้

การสัมผัสของพื้นผิวจะไม่มีอาการงอของกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ได้มีการแสดงการส่งผ่านแรงกดและแรงเสียดทาน และไม่มีการส่งผ่านแรงดึงถ้าว คือ พื้นผิวสัมผัสสามารถแยกออก และเคลื่อนที่ออกจากกันได้โดยอิสระ

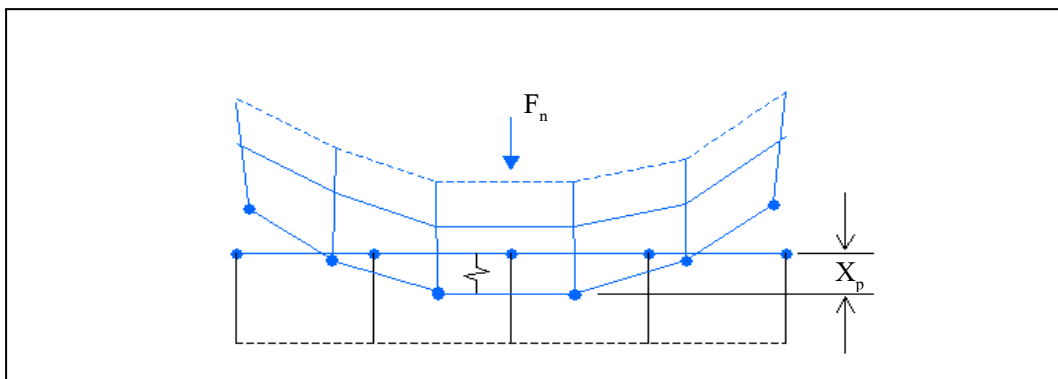
การสัมผัส คือ การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น ความแข็งของระบบขึ้นอยู่กับสถานะของการสัมผัสว่าเป็นแบบขณะสัมผัสหรือขณะเคลื่อนที่ออกจากกัน



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการสัมผัสของพื้นผิวอิสระ

2.7.2 สมการคำนวณการสัมผัส

สำหรับการสัมผัสแบบวัตถุแข็งสามารถใช้สมการเพียวพินาตี้ (Pure Penalty) หรือ ออกเมนต์ลากรองจ์ (Augmented Lagrange) ซึ่งมีพื้นฐานสมการเดียวกันได้ ข้อแตกต่าง ระหว่างสมการคำนวณแบบ เพียวพินาตี้ (Pure Penalty) และ ออกเมนต์ลากรองจ์ (Augmented Lagrange) คือ การมีพจน์ขยายของการสัมผัส (λ) เพิ่มเข้ามา



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการสัมผัสแบบวัตถุแข็ง

$$\text{Pure Penalty : } F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} + X_{\text{penetration}} \quad (2.43)$$

$$\text{Augmented Lagrange : } F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} + X_{\text{penetration}} + \lambda \quad (2.44)$$

โดย F_{normal} คือ แรงจากการสัมผัส

K_{normal} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งสัมผัส

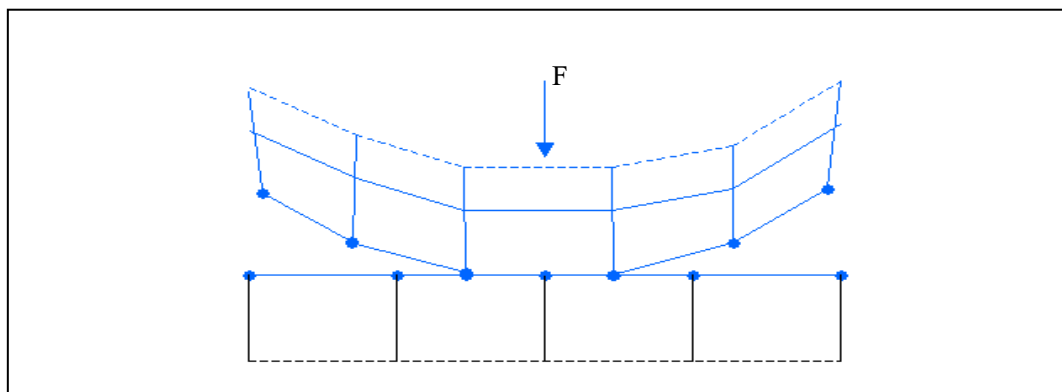
$X_{\text{penetration}}$ คือ ระยะการจมลงเนื่องงาน

λ คือ พจน์ขยายของการสัมผัส

จากการที่มีพจน์ขยายของการสัมผัส (λ) นี้ ทำให้การคำนวณแบบออกเมนต์ลากรองจ์ (Augmented Lagrange) ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งสัมผัสที่เกิดขึ้น k_{normal} ยิ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งสัมผัส k_{normal} มีค่ามาก ระยะการจมลงเนื่องงานก็จะน้อย

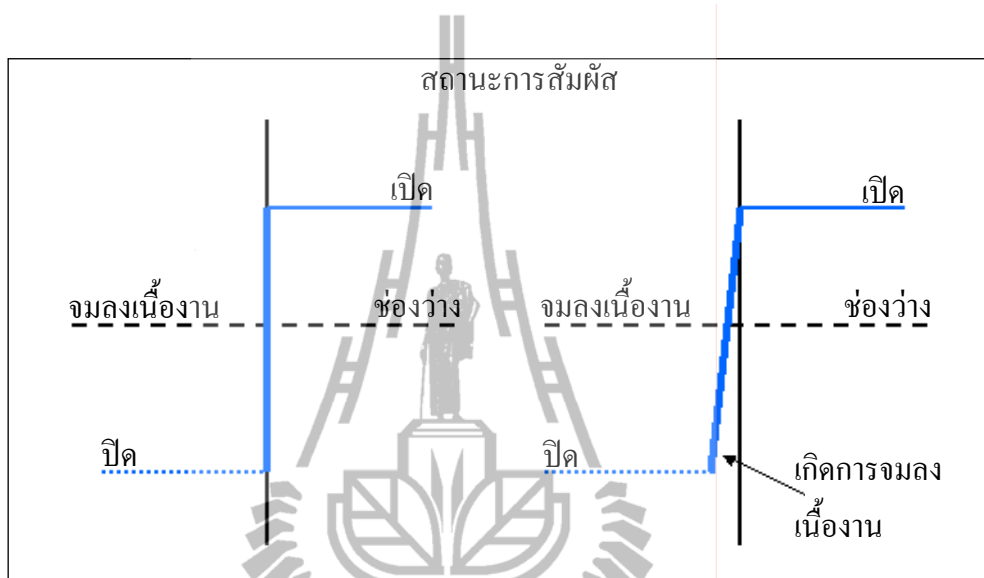
สมการลากรองจ์แบบทวีคูณ (Lagrange Multiplier) ก็ คือ การเพิ่มจำนวนค่าแรงกดสัมผัส เป็นองศาอิสระการเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) พิเศษ เข้าไปในสมการลากรองจ์แบบปกติ (Normal Lagrange) เพื่อให้เกิดการสัมผัสโดยสมบูรณ์ ผลที่ตามมา คือ แทนที่จะทำการแก้ปัญหา สมการค่าแรงสัมผัสโดยผ่านค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งที่สัมผัสและระยะจมลงเนื่องงานแต่แรงกดสัมผัสจะถูกแก้สมการ โดยวิธีแบบจัดแจงบังคับให้ค่าการจมลงเนื่องงาน มีค่าเท่ากับหรือใกล้ค่าศูนย์ โดยเปลี่ยนแปลง DOF ดังแสดงในรูปที่ 2.13

$$F_{\text{normal}} = \text{Extra DOF (Contact Pressure)} \quad (2.45)$$



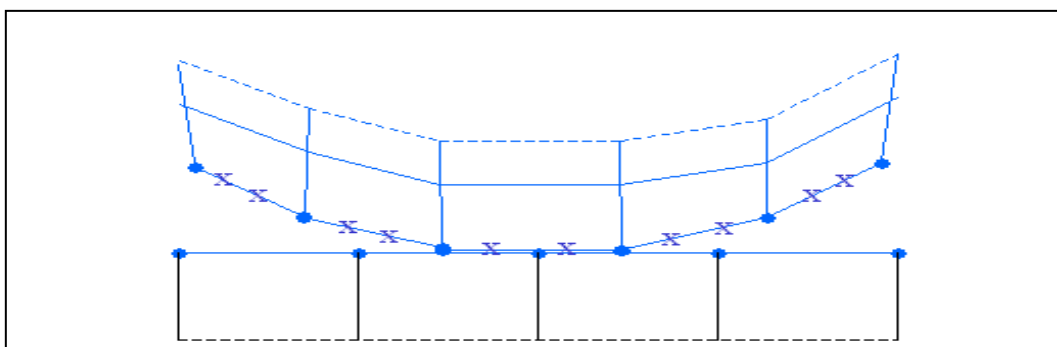
รูปที่ 2.13 แสดง Extra DOF (Contact Pressure)

ปัญหาของสมการลากรองจ์แบบปกติ (Normal Lagrange) ถ้ามีการกำหนดให้ไม่มีการจมลงเนื่องงานเกิดขึ้น สถานะการสัมผัสจะเป็นทั้งแบบเปิด หรือแบบปิดได้ซึ่งทำให้ใช้วิธีการลู่อายาก เพราะจุดสัมผัสสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในช่วงแบบเปิดหรือปิด แต่ถ้ายอมให้มีการจมลงเนื่องงานเกิดขึ้นได้บ้างจะได้เป็นวิธีการลู่อายากจะทำได้ง่ายกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของสถานะหน้าสัมผัส

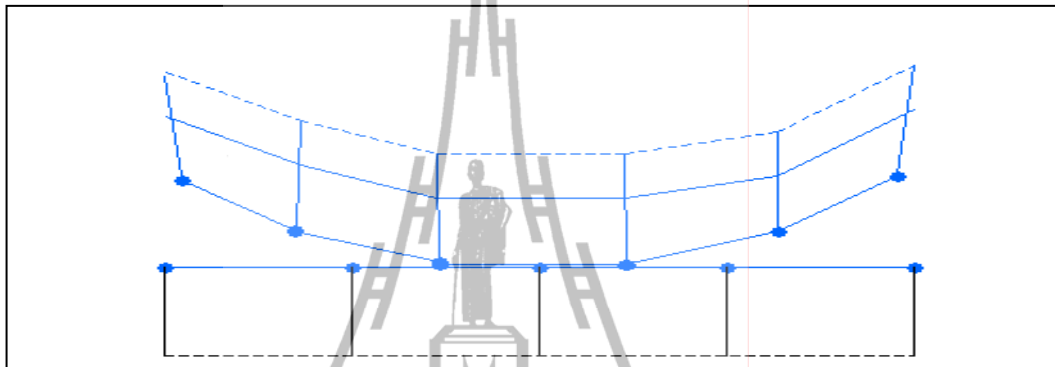
การสัมผัสจะถูกตรวจจับแตกต่างกันไปตามชนิดของสมการที่ใช้ สมการคำนวณแบบเพียวพินาตี้ (Pure Penalty) และ ออกเมนต์ลากรองจ์ (Augmented Lagrange) จะใช้การตรวจจับอนุพันธ์แบบจุด (Integration Point Detection) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ทำให้มีจุดตรวจจับที่มากจุด



รูปที่ 2.15 แสดงการตรวจจับอนุพันธ์แบบจุด

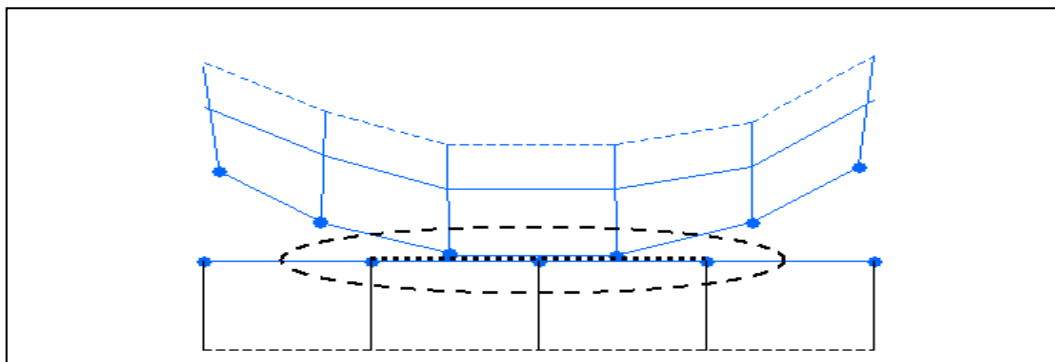
สมการลากรองจ์แบบปกติ (Normal Lagrange) และ แบบมัลติพอยน์คอนสเตรนซ์ (Multi-Point Constraint) จะใช้โนดอลดีเทกชัน (Nodal Detection) ดังแสดงในรูปที่ 2.16, 2.17 ทำให้มีจุดตรวจจ็บน้อยกว่า

โนดอลดีเทกชัน (Nodal Detection) จะให้ผลการสัมผัสที่ขอบที่ดีกว่า แต่แยกว่า ในส่วนอื่น ๆ ซึ่งการทำเมช (Mesh) ที่ละเอียดสามารถช่วยแก้ไขได้



รูปที่ 2.16 แสดงการตรวจจ็บอนุพันธ์แบบจุด ใช้โนดอลดีเทกชัน

ในกรณีของการสัมผัสแบบยึดติดและไม่มีการแยกจากกันของสองพื้นผิว สามารถใช้สมการมัลติพอยน์คอนสเตรนซ์ (Multi-Point Constraint) ได้ ข้อจำกัดจะถูกเพิ่มเข้าไป ในสมการเพื่อที่จะโยกการเคลื่อนที่ระหว่างพื้นผิวสัมผัส วิธีนี้ไม่ใช่สมการแบบพินาดีเบส (Penalty-Based) หรือ ลากรองจ์แบบทวีคูณ (Lagrange Multiplier) แต่เป็นแบบที่เกี่ยวข้องกับบริเวณ พื้นผิวโดยตรง การเลือกรูปขนาดใหญ่ก็สามารถใช้สมการมัลติพอยน์คอนสเตรนซ์ (Multi-Point Constraint) ได้



รูปที่ 2.17 แสดงการตรวจจ็บอนุพันธ์แบบจุด ที่บริเวณพื้นผิว

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นจะเกี่ยวข้องกับการสัมผัสในทิศทางปกติ ถ้ามีการ ระบุถึงค่าแรงเสียดทาน ความหยาบและการจับยึดของการสัมผัส ลักษณะเช่นนี้จะเกิดการสัมผัสในทิศทางเชิงมุมได้ คล้ายกับการผ่านเข้าไปไม่ได้จากการสัมผัสในทิศทางเชิงมุม พื้นผิวทั้งสองจะไม่เลื่อนตัวออกจากกันถ้าเกิดการยึดติดขึ้น “Sticking” สมการแบบ เพียวพินาตี้ (Pure Penalty) จะถูกใช้คำนวณเสมอ โดยมีตัวแปรเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งสัมผัสเชิงมุมและระยะการเลื่อนตัว

$$\text{Sticking} : F_{\text{tangential}} = k_{\text{tangential}} + X_{\text{sliding}} \quad (2.46)$$

โดย $F_{\text{tangential}}$ คือ แรงจากการสัมผัสเชิงมุม
 $K_{\text{tangential}}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งสัมผัสเชิงมุม
 X_{sliding} คือ ระยะการเลื่อนตัว

ซึ่ง X_{sliding} มีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับการเกิดการยึดติด แม้ว่า การเลื่อนตัว ถูกอนุญาตให้มีได้ในวิธีการแบบพินาตี้เบส (Penalty-Based)

2.8 วิธีการวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขทางพลวัต (Dynamic Analysis By Numerical Integration)

2.8.1 บทนำ

โดยพื้นฐานทั่วไปในการแก้ปัญหาการวิเคราะห์ของระบบโครงสร้างพลวัต (Dynamic Response) คือ การใช้วิธีวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขของสมการ Dynamic Equilibrium ในขณะที่หลังจากที่เวลาเริ่มต้นที่ศูนย์จนถึงเวลาใด ๆ ในช่วงเวลาที่กำหนด โดยส่วนใหญ่ในหลักวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขหลาย ๆ แบบจะกำหนดเวลาในการคำนวณเป็นช่วงระยะเวลา $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t \dots N\Delta t$ ในการประมวลผล อย่างไรก็ตามทุกวิธีการแก้ปัญหาสามารถจำแนกออกเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ วิธีการแบบ Explicit Integration และ Implicit Integration

วิธีการคิดแบบ Explicit Integration ไม่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของสมการเชิงเส้นที่เป็นกลุ่ม โดยปกติแล้ววิธีการนี้จะนำมาใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) ที่เวลา “t” ใด ๆ แล้วนำไปประเมินผลที่เกิดขึ้น ณ เวลาที่ “t+ Δt ” สำหรับโครงสร้างจริงใด ๆ ที่ประกอบด้วย Stiff Element และต้องการผลลัพธ์ที่แน่นอนในช่วงเวลาสั้น ๆ

วิธีการคิดแบบ Implicit Integration จะถูกนำมาใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) ที่เวลา “ t ” ใด ๆ หลังจากที่พบผลที่เกิดขึ้นจากการประมวลผล ณ เวลาที่ “ $t-\Delta t$ ” ดังนั้นวิธีการนี้จำเป็นจะต้องใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของสมการเชิงเส้นที่เป็นกลุ่ม

2.8.2 วิธีการของนิวมาร์ค (Newmark Method)

วิธีการของนิวมาร์ค (Newmark Method) ได้ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1959 และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาโครงสร้างพลวัต (Dynamic Structural Problem) ที่เกี่ยวข้องจากแรงระเบิดและแผ่นดินไหว หลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมการ Linear Dynamic Equilibrium ซึ่งเขียนรูป ดังแสดงในสมการ (2.47)

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t = F_t \quad (2.47)$$

เมื่อทำการใช้วิธีการของนิวมาร์ค สามารถแปลงออกมาได้ในรูปแบบสมการ (2.48) และ (2.49)

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^3 \ddot{u} \quad (2.48)$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t^2 \ddot{u} \quad (2.49)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าความเร่งเป็นเชิงเส้นภายในระยะเวลาที่กำหนด จะสามารถเขียนสมการออกมา ดังแสดงในสมการที่ (2.50)

$$\ddot{u} = \frac{(\ddot{u}_t - \ddot{u}_{t-\Delta t})}{\Delta t} \quad (2.50)$$

ดังแสดงในสมการที่ (2.48, 2.49 และ 2.50) สามารถนำมาเขียนในรูปแบบฟอร์มพื้นฐานของนิวมาร์ค (New Mark's Standard Form) ได้เป็น ดังแสดงในสมการที่ (2.51) และ (2.52) ดังต่อไปนี้

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_t \quad (2.51)$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{u}_t \quad (2.52)$$

นิวมาร์คได้ใช้สมการ (2.47), (2.51) และ (2.52) ในการประมวลผลในแต่ละช่วงเวลา และระดับความเป็นอิสระการกระจัดของโครงสร้าง โดยที่พจน์ ii , สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.49) โดยการนำค่ามวลที่เกี่ยวข้องกับระดับความเป็นอิสระไปหารทั้งหมด

โดย γ และ β คือ ค่าอินทิเกรตชั้นพารามิเตอร์ (Integration Parameters) ซึ่งมีผลต่อค่าความเสถียรของระบบ

$$\gamma \geq \frac{1}{2}, \quad \beta \leq \frac{1}{2} \quad \text{และ} \quad \Delta t \leq \frac{1}{\omega_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{2} - \beta}} \quad (2.53)$$

โดยที่ ω_{\max} เป็นค่าความถี่ที่มากที่สุดในระบบโครงสร้าง และจะมีความเสถียรอย่างไม่มีเงื่อนไขถ้า

$$2\beta \geq \gamma \geq \frac{1}{2} \quad (2.54)$$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จักรพันธ์ ปรริภักย์จิตร (2007) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นส่วน HGA ภายหลังจากจับยึดด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ พบว่า ภาวะที่ทำให้กับชุดจับยึดมีส่วนสำคัญต่อการเสียรูปของชิ้นส่วน HGA อย่างยิ่งเนื่องจากทำให้ความเค้นที่บางตำแหน่งของการจับยึดเกินกว่าขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุ ส่งผลให้เกิดการเสียรูปของชิ้นส่วน HGA จึงทำให้ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป โดยภาวะที่เหมาะสมในการจับยึด คือ ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 110 MPa นอกจากนี้ ลักษณะของชุดจับยึดก็ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปของชิ้นส่วน HGA ด้วย โดยลักษณะรูปร่างของชุดจับยึดที่มีพื้นที่จับยึดมากขึ้นจะทำให้การเสียรูปของชิ้นส่วน HGA ลดลงมาก ซึ่งลักษณะของชุดจับยึดด้านบนแบบสี่เหลี่ยมและชุดจับยึดด้านล่างแบบสี่เหลี่ยมไม่มีการลบบมมีผลต่อการเสียรูปของชิ้นส่วนน้อยที่สุด

ภากรณ์ ทรัพย์เจริญ (2008) ได้ทำการวิเคราะห์ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนข้อมูลเพื่อหามุมลอยตัว (Suspension Angle) ที่ให้ค่า Gram Load ในช่วง 2.5 ± 0.2 กรัม ที่เหมาะสมโดยศึกษาค่าความเค้น ที่เกิดขึ้นเมื่อชุดจับยึดหัวอ่านอยู่ในสภาวะ Load State ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ จากการจำลองพบว่า มุมลอยตัวที่เหมาะสมจะมีค่าระหว่าง 10-12 องศา และจากการทดลองพบว่า มุมลอยตัวที่เหมาะสมจะมีค่าระหว่าง 12-13 องศา ซึ่งพบค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่

ประมาณ 1-2 องศา เมื่อกำหนดมุมลอยตัวมีค่าเท่ากับ 11 องศา เพื่อวิเคราะห์ความเค้น จะพบว่าความเค้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณ Bend Zone เป็นหลัก

เรื่องฤทธิ์ สารางคำ (2008) ได้ศึกษาค่าแรงเนื่องจากความเร่ง (G-Force) ที่เกิดขึ้นกับฮาร์ดดิสก์จากการตกกระทบบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ โดยการตกกระทบบนบดิสระในทิศทางต่าง ๆ ด้วยวิธีการทางไฟไนท์เอลิเมนต์และการทดสอบจริง และนำค่าแรงเนื่องจากความเร่งที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางนำเครื่องทดสอบการตกกระทบบนดิสระไปใช้ในการทดสอบการตกกระทบบนดิสระของบรรจุภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไปได้ อีกทั้งวิธีการศึกษาการตกกระทบบนดิสระของบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ยังสามารถนำไปใช้เป็นการศึกษาการตกกระทบบนดิสระนอกเหนือจากการทดสอบการตกกระทบบนดิสระจริง

ยุทธชัย ว่องไวพินิจ (2008) ได้ทำการศึกษาอายุการใช้งานของพลาสติกถ่วงหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างวัสดุ เนื่องมาจากอายุการใช้งานทำให้เสียหาย ดังนั้นจึงได้ทำการกำหนดจำนวนครั้งในการนำกลับมาใช้และใช้ความรู้เรื่องไฟไนท์เอลิเมนต์มาช่วยในการออกแบบแก้ไขจุดที่อ่อนแอเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของ Shipping Comb จากการวิเคราะห์พบว่า Shipping Comb 1 ชิ้นสามารถนำกลับมาใช้ได้ไม่เกิน 7 ครั้ง จุดที่อ่อนแอที่สุดคือ บริเวณ Latch แบบตั้งฉาก จึงได้ทำการเปลี่ยนเป็นโค้งแบบรัศมี 0.09 องศา พบว่าโค้งแบบรัศมีจะเกิดความเค้นและความเครียดขึ้นน้อยกว่าแบบโค้งหักฉากและสามารถเพิ่มจำนวนรอบการใช้งานเป็น 12 ครั้ง

คันสนีย์ ขุนทิพย์ทอง (2552) ได้ทำการศึกษาลักษณะการเสีรูปของหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามุม Pitch Static Attitude (PSA) ในกระบวนการตรวจสอบคุณสมบัติอันเนื่องมาจากได้รับแรงจับยึดด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าแรงจับยึดที่ส่งผลต่อการเสีรูปของ HGA และการเปลี่ยนแปลงค่ามุม PSA และ RSA น้อยที่สุดจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์และผลจากการทดลองจากกระบวนการตรวจสอบคุณสมบัติพบว่า ค่าแรงจับยึด 7 ปอนด์ ทำให้ HGA เกิดการเสีรูปที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามุม PSA และ RSA น้อยที่สุด

ขจรศักดิ์ ใจดี สุรเชษฐ์ ชุตินา และ ทศพร กำเนิดทอง (2010) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของชิ้นส่วน HGA หลังถูกจับยึดด้วยชิ้นส่วนหวีถ่าง ภายในกระบวนการประกอบ HSA โดยทำการปรับเปลี่ยนขนาดของหวีถ่าง จากตัวแปรในการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Spreader Pins ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์และพิจารณาผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงค่า Gram Load จากการวิเคราะห์พบว่า การจับยึด HGA ด้วยชิ้นส่วนหวีถ่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

ของ Spreader Pins มากขึ้นไม่เกิน 1.29 มิลลิเมตร จะไม่ทำให้เกิดการเสีรูปอย่างถาวรและไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานเปลี่ยนแปลงของค่า Gram Load

รัฐภูมิ คล้ายอักษร (2010) ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อชุดหัวอ่านเขียนข้อมูลที่เกิดจากกระบวนการ Ball Swaging Process ต่อค่า Pitch Static Attitude ภายในฮาร์ดดิสก์ขนาด 2.5 นิ้ว โดยสร้างแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความสั่นพ้องและผลกระทบที่เกิดขึ้น อันสืบเนื่องมาจากกระบวนการสเวจ โดยใช้บอลต่อคุณสมบัติของชุดอ่านเขียนข้อมูล และทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการทั้งสองมาเปรียบเทียบกันและพบว่าผล ที่ได้มีค่าไปในทิศทางเดียวกัน โดยสามารถพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของค่าพิชสแตติกแอททิจูดได้อย่างน่าเชื่อถือ

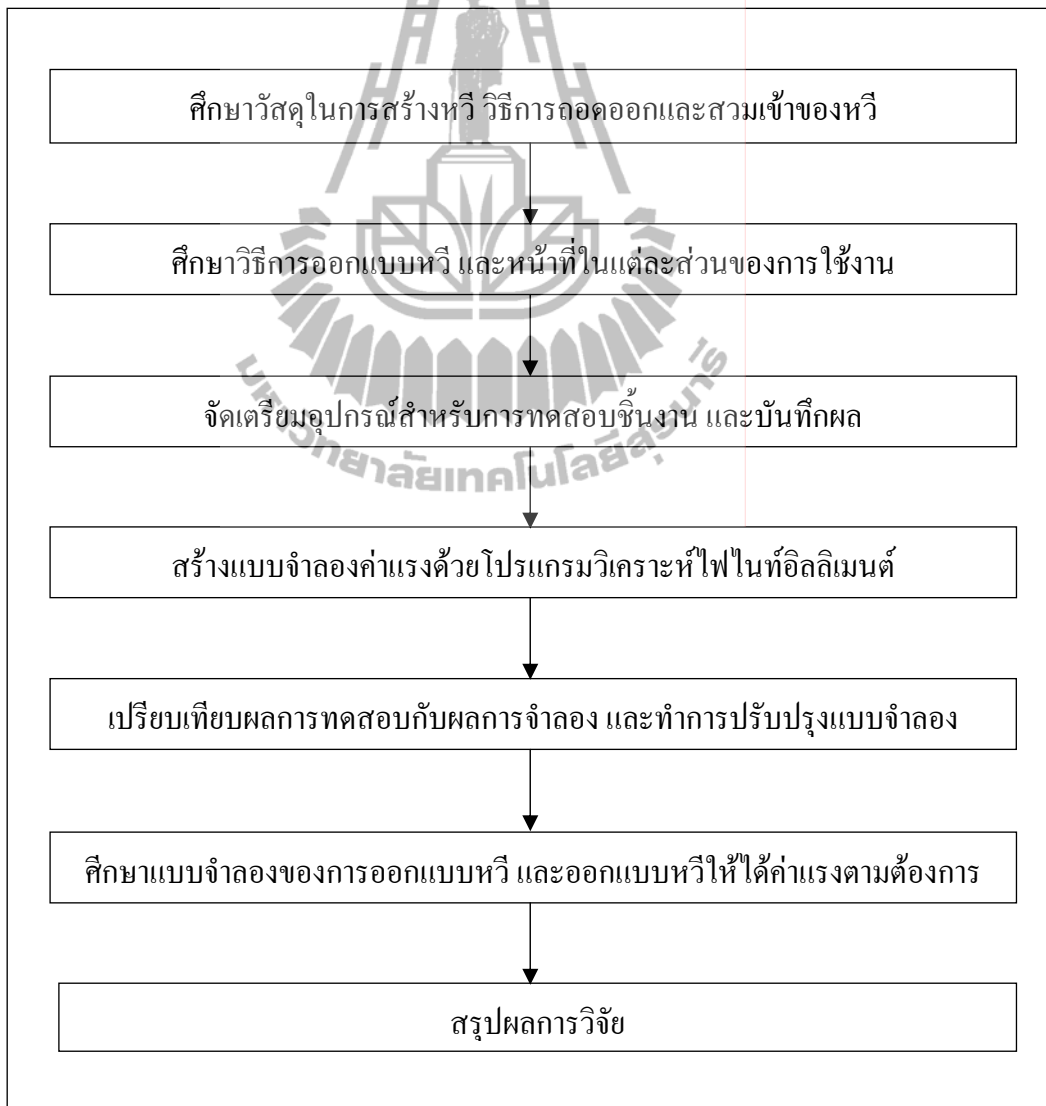
ทศนพ กำเนิดทอง สุรเชษฐ์ ชูติมา และจักรพันธ์ ปรริรักษ์วิจิตร (2010) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเสีรูปของ HGA หลังจากการให้แรงจับยึดในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และนำผลที่ได้มาปรับปรุงขนาดของแรงและลักษณะการจับยึดในกระบวนการ จากการศึกษาพบว่ากราฟแสดงลักษณะของการเสีรูปตามแนวขวางและตามแนวยาวของ HGA เนื่องจากการจับยึดโดยชุดจับยึดที่มีด้านบนเป็นแบบสี่เหลี่ยมและด้านล่างเป็นแบบไม่มีลบบมจะมีผลต่อการเสีรูปของ HGA น้อยที่สุดและเกิดการเสีรูปตามขวางที่มีลักษณะสม่ำเสมอ

ฐวิศณี ปัทมประดิษฐ์ เณลิ้มชัย ไชยรงค์รัตน์ และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ (2011) ได้ทำการศึกษาการเสีหายของหัวในรูปแบบแนวแรงการทำกับหัวตามแนวแกนต่างๆ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และนำผลที่ได้มาเทียบกับการจำลองการเสีหายจริงของหัว ผลของการวิเคราะห์ที่ได้มีค่าไปในทิศทางเดียวกัน และสามารถประมวลผลมีความถูกต้องถึง 95% และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบปรับปรุงหัวเพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในกระบวนการพัฒนาหัว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการถอดออกและการสวมเข้าของหวี (Shipping Comb) กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ของ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด โดยมีขั้นตอนดำเนินการงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาวัสดุในการสร้างหวี วิธีการถอดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหวี (Shipping Comb) ที่ใช้กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว โดยทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับหวี (Shipping Comb) ดังต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตหวี (Shipping Comb)

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาผลิตหวี (Shipping Comb) ก่อนทำการทดสอบการเสียดหยาของหวี (Shipping Comb) จะต้องทำการหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตหวี (Shipping Comb) เป็นอันดับแรกซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ คือ โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) ในการทดสอบนี้ได้นำชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตรูปทรงมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อนำมาทดสอบดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 5560 ขนาด 5 kN



รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดสอบการดึง

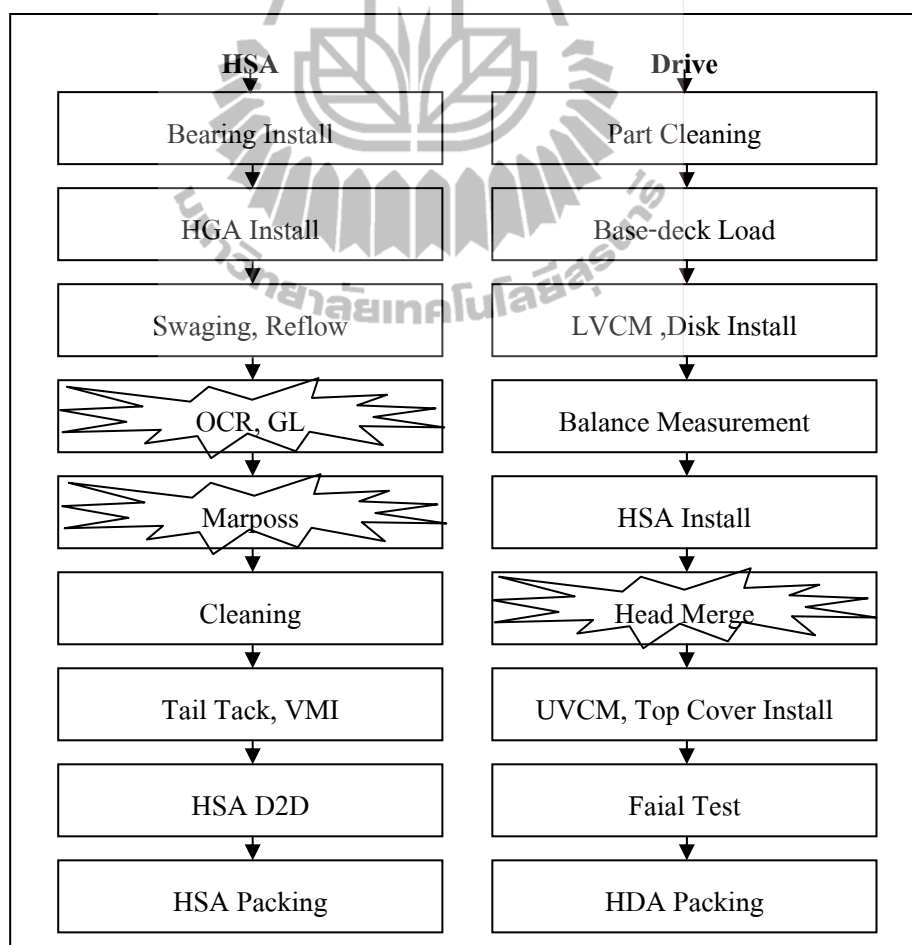


รูปที่ 3.3 แสดงเครื่อง Universal Testing Machine 5560

ลักษณะชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะมีรูปร่างดัมเบล (Dumbbell Shape) หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาดความกว้างที่ 12.5 ± 0.3 mm. ความยาวที่ 220 ± 0.4 mm. และหนาที่ 3.2 ± 0.4 mm. การทดสอบจะใช้ชิ้นงานจำนวนทั้งหมด 5 ชิ้น ประกอบเข้ากับ Gripper ของเครื่องทดสอบดึงชิ้นงานด้วยอัตราเร็ว 50 mm/min อ้างอิงตามมาตรฐานทดสอบการดึงพลาสติก (ASTM : D638-03) หลังจากนั้นนำผลที่ได้ ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

3.1.2 ศึกษากระบวนการผลิต HDD ที่เกี่ยวข้องกับหัว (Shipping Comb)

ในการประกอบชิ้นงานชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ใช้ระบบการประกอบอัตโนมัติ และมีกระบวนการในการทดสอบทั้งทางด้าน Mechanic และ Electronic และในส่วนของการทดสอบด้าน Mechanic ต้องมีการถอดประกอบหัว อาทิเช่น กระบวนการทดสอบ OCR, GL, Marpass and Head Merge และการถอดหัว ในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



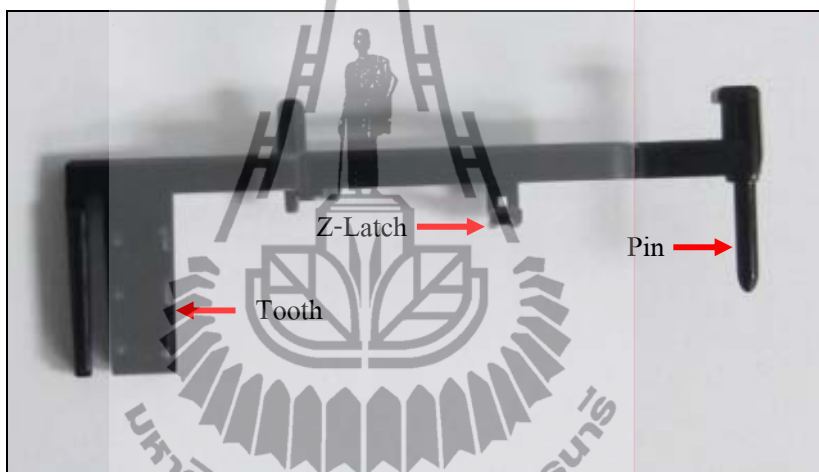
รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3.2 ศึกษาวิธีการออกแบบหวี และหน้าที่ในแต่ละส่วนของการใช้งาน

การออกแบบหวีนั้นจะมีส่วนของหวีเพื่อสัมผัสกับแขนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อใช้ในการจัดยึดจับและการใช้งานในแต่ละและ ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

3.2.1 ศึกษาลักษณะรูปร่างของหวี (Shipping Comb) โมเดล

หวี (Shipping Comb) ที่ทำการศึกษาค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้ากับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และส่วนที่ทำการศึกษาค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหวี คือ Shipping Comb Z-Latch ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงรูปของหวี (Shipping Comb)



รูปที่ 3.6 แสดง Z-Latch ของหวี (Shipping Comb) ในการทำการวิจัยหาค่าแรง

3.2.2 ศึกษาการจับยึดหวี (Shipping Comb) เมื่อประกอบกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

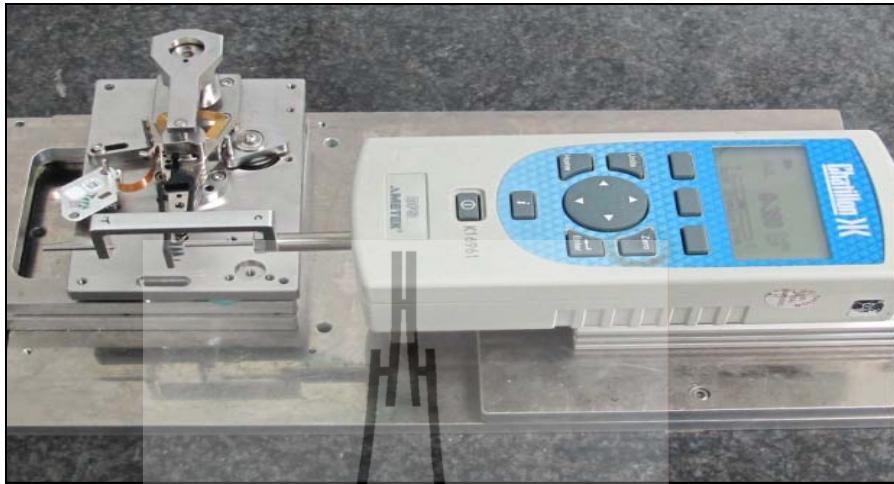


รูปที่ 3.7 แสดงชิ้นงานของหวี (Shipping Comb) กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าส่วนของ Pin จะถูกประกอบในรูของชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อเป็นจุดหมุนของหวีในการถอดออกและสวมเข้า และส่วนของ Z- Latch จะมีพื้นที่ในการยึดกับรูของชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อใช้ยึดตัวหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

3.3 จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบชิ้นงาน และบันทึกผล

การทดสอบค่าแรงในการสวมเข้าและถอดออกหวีโดยใช้ Force Gauge Chatillon DFS 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 การดันหวีที่ระยะของซี่หวี กับค่าแรงที่ได้ออกมาเพื่อคิดเป็นค่าโมเมนต์ วิธีการทดสอบแรงถอดออก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และวิธีการทดสอบแรงสวมเข้า ดังแสดงในรูปที่ 3.10 แล้วทำการเตรียมชิ้นงานทั้งหมดเป็นจำนวน 100 ชิ้น เพื่อทำการทดสอบค่าแรงของการถอดออกและสวมเข้าของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องทดสอบค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงถอดออกของหวี (Shipping Comb)



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)

3.4 สร้างแบบจำลองค่าแรงด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 ใช้ในการวิเคราะห์ Model ชิ้นงานหวีประกอบด้วยชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (Shipping Comb) ชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ จาก บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด ที่สำหรับใช้กับชุดหัวอ่านจำนวน 6 หัว ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ซึ่งผลิตจากโพลีคาร์บอเนตมีคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสมบัติทางกลของวัสดุหวี (Shipping Comb)

ชนิดของวัสดุ	โพลีคาร์บอเนต
Poisson Ratio	0.37
Tensile Modulus (Mpa)	2,413
Tensile Strength (Mpa)	56
Tensile Elongation (%)	5.0-10.0
Flexural Strength (Mpa)	92
Flexural Modulus (Mpa)	2,620

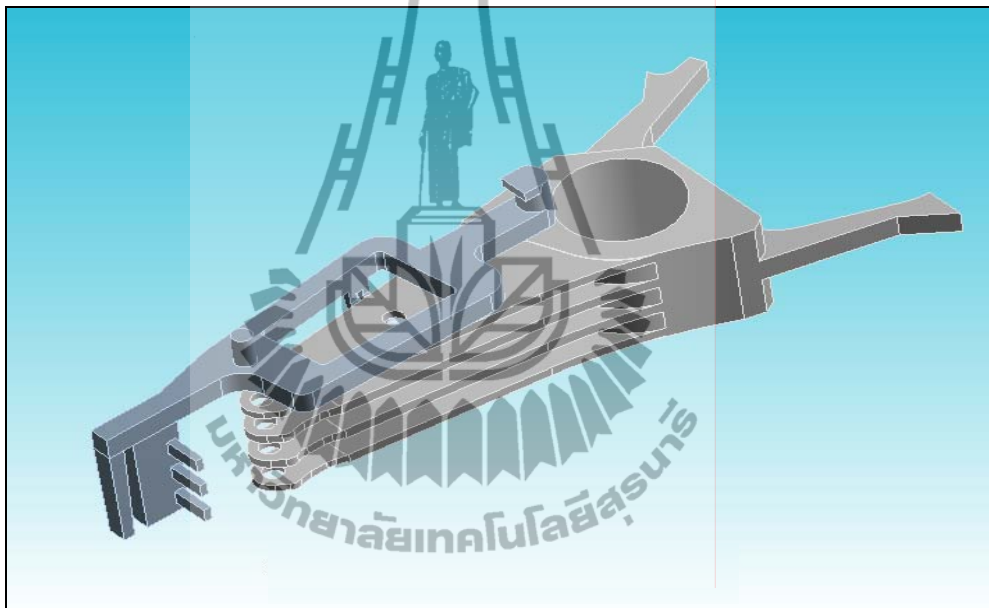
แบบจำลองหวีโดยไฟไนต์เอลิเมนต์งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS Workbench 13.0 ในการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อให้นักศึกษาเป็นไปตามวัตถุประสงค์จึงมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

- คุณสมบัติของทางกลของวัสดุ แสดงไว้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2
- ชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน Specimen ของวัสดุโพลีคาร์บอเนต
- พฤติกรรมของวัสดุเป็น Isotropic Elasticity
- ค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

Specimen ที่นำมาใช้วิเคราะห์นี้มีรูปร่างเป็นรูปดัมเบล (Dumbbell) หน้าตัดสี่เหลี่ยมตามมาตรฐานของ ASTM D638-03 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการวัดขนาดของ Specimen และขึ้นรูป 3D ด้วยโปรแกรม Solid Work 2011 ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ Specimen ที่ได้ ออกแบบมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดง Specimen ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work 2011

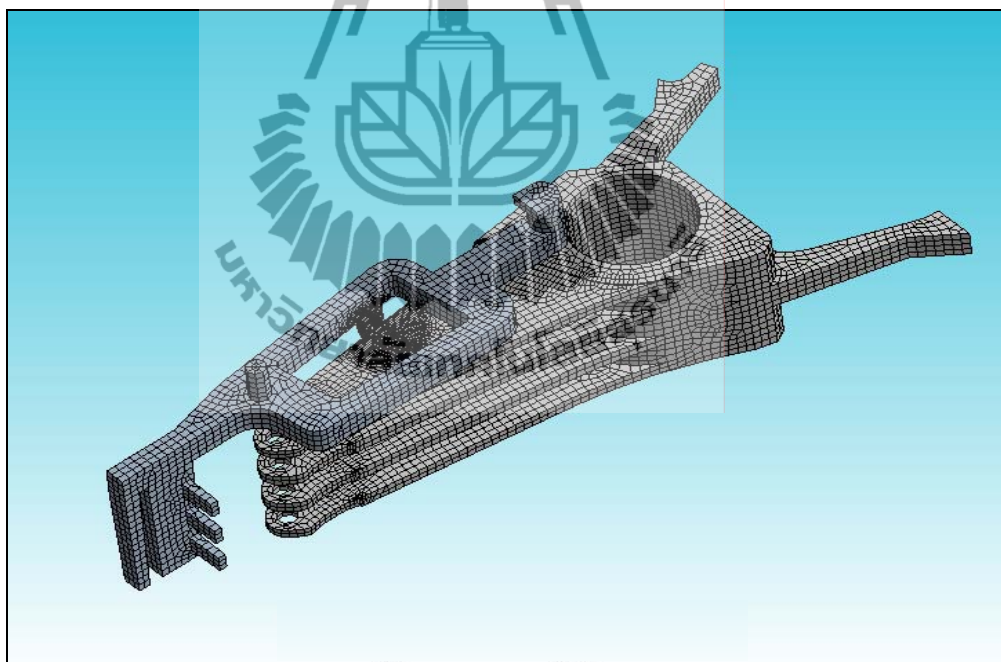


รูปที่ 3.12 แสดงแบบจำลองของ 3D โมเดลทดสอบค่าแรงหวี (Shipping Comb)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสมบัติทางกลของหวี (Shipping Comb) ใน Model

ชนิดของวัสดุ	โพลีคาร์บอเนต
Poisson Ratio	0.37
Young Modulus (Mpa)	2,400
Yield Strength (Mpa)	56
Tensile Elongation (%)	8.0
Tensile Strength (Mpa)	92
Coefficient Of Fiction	0.005

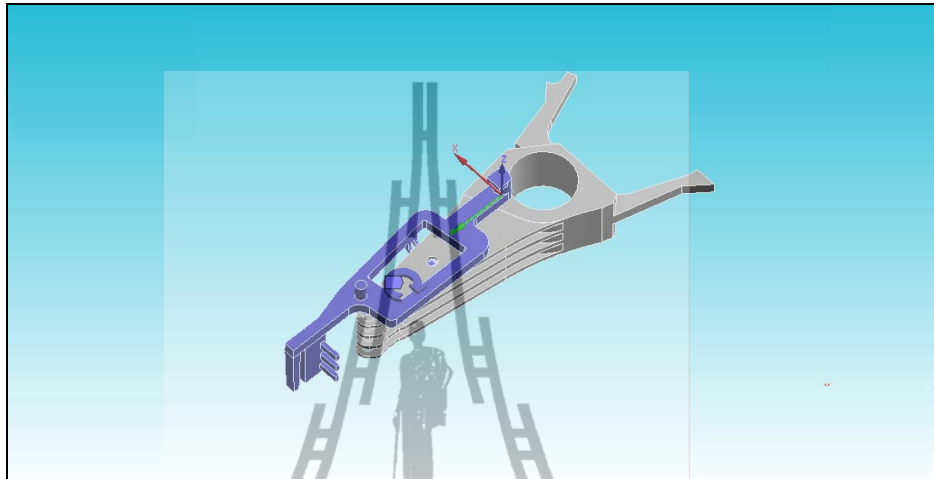
การเลือกอิลลิเมนต์ให้กับแบบจำลองทางไฟไนท์อิลลิเมนต์เนื่องจากแบบจำลองเป็นการทดสอบแบบพลวัต จึงต้องสร้างรูปแบบอิลลิเมนต์เป็น Explicit และควบคุมรูปแบบอิลลิเมนต์ในแต่ละส่วนของชิ้นงาน และโครงสร้างของ Shipping Comb มีความซับซ้อนจึงจำเป็นต้องเลือกรูปแบบอิลลิเมนต์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกอิลลิเมนต์รูปทรงแบบปิรามิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) ด้วยวิธีของ Patch Independent (Algorithm) และเนื่องจากบริเวณชิ้นงานที่สัมผัสกันและชิ้นที่มีการยึดตัวของชิ้นงาน พิจารณาเป็นตำแหน่งที่เกิดความเข้มข้นของความเค้นที่มีค่าสูง (Stress Concentration) จึงต้องกำหนดจำนวนอิลลิเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นจึงทำการแบ่งอิลลิเมนต์บริเวณที่ทำการศึกษากออกเป็นอิลลิเมนต์เล็กๆ โดยการใช้ Body Sizing เพื่อกำหนดพื้นที่ ที่ต้องการความละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยมี Nodes ประมาณ 40,000 และ Elements ประมาณ 50,000



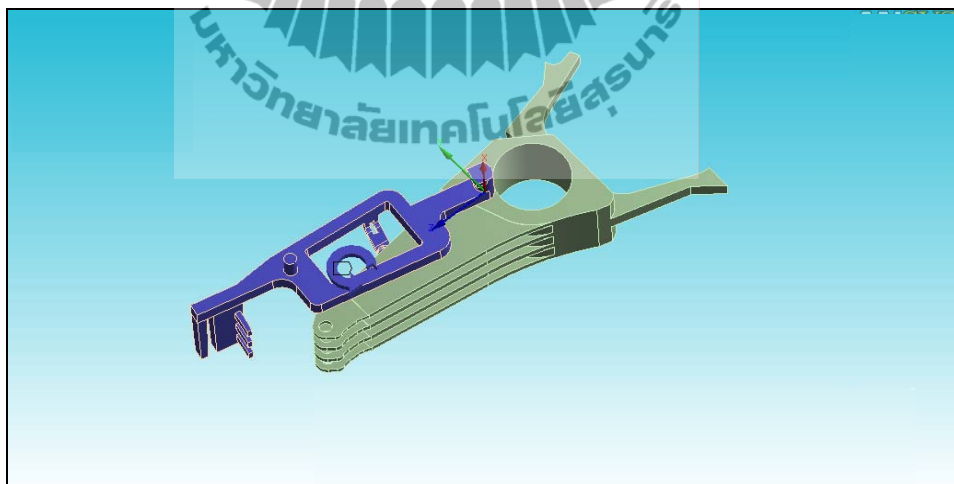
รูปที่ 3.13 แสดงแบบจำลองของเมช (Mesh) โมเดลทดสอบค่าแรงหวี (Shipping Comb)

การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ใน Explicit Dynamics (AS) ให้การสัมผัสของชิ้นงานเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน คือ Body Interaction และกำหนดแรงเสียดทานเป็น Frictional Type ให้ค่าของ Friction Coefficient = 0.005 และ Dynamic Coefficient = 0.005 จากนั้น

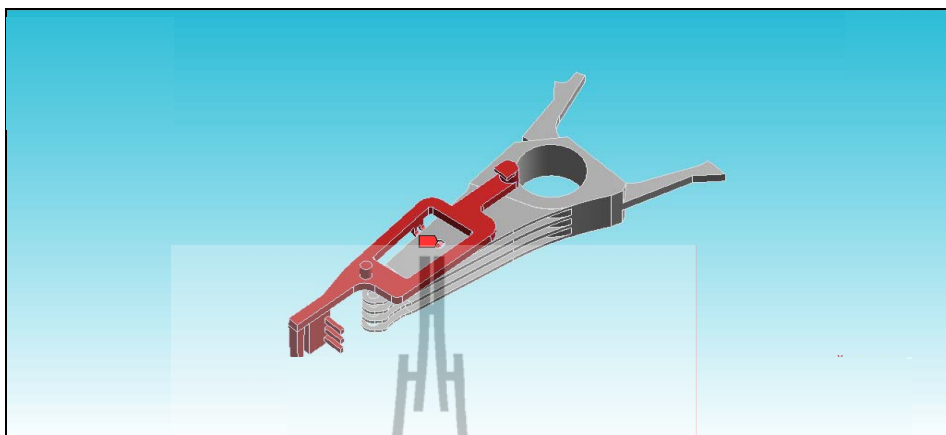
ให้ Initial Condition โดยการให้หัวหมุนรอบ Pin เป็นจุดหมุน ด้วย Angular Velocity =220 rad/s และคำนวณที่เวลา $0 - 2.2e-4$ s เพื่อได้ระยะทางในจังหวะที่หัวถูดออกและสวมเข้า



รูปที่ 3.14 แสดงแบบจำลองของการกำหนดเงื่อนไขทดสอบค่าแรงถูดออกของหัว



รูปที่ 3.15 แสดงแบบจำลองของการกำหนดเงื่อนไขทดสอบค่าแรงสวมเข้าของหัว



รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งของการเก็บค่าแรงในการถอดออกของหวี บน Z-Latch



รูปที่ 3.17 แสดงตำแหน่งของการเก็บค่าแรงในการสวมเข้าของหวี บน Z-Latch

3.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง และทำการปรับปรุงแบบจำลอง

นำผลของการทดลองวัดงานจริงมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง FEA และทำการปรับปรุงแบบจำลองให้ได้แรงในการถอดออกและสวมเข้าใกล้เคียงกับค่าจริงจากการทดลอง

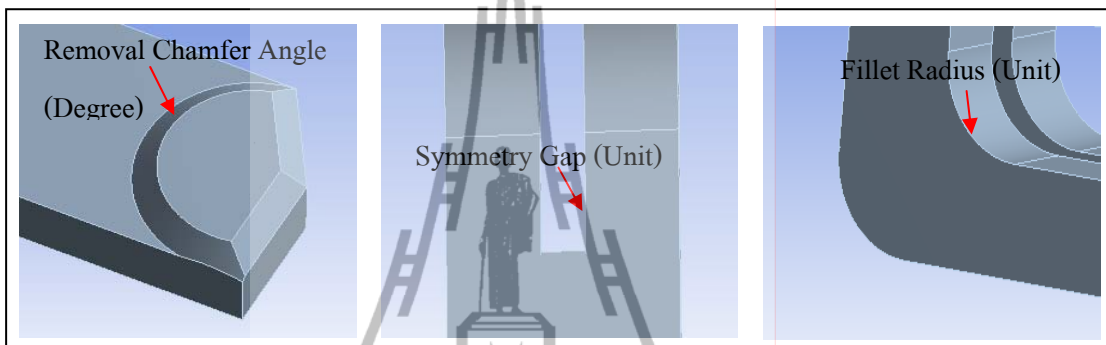
3.6 ศึกษาแบบจำลองของการออกแบบหวี และออกแบบหวีให้ได้ค่าแรงตามต้องการ

การศึกษาแบบจำลองของการออกแบบหวีแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

- การศึกษาค่าแรงในการถอดออกของหวี (Shipping Comb)
- การศึกษาค่าแรงในการสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)

3.6.1 การศึกษาค่าแรงในการถอดออกของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

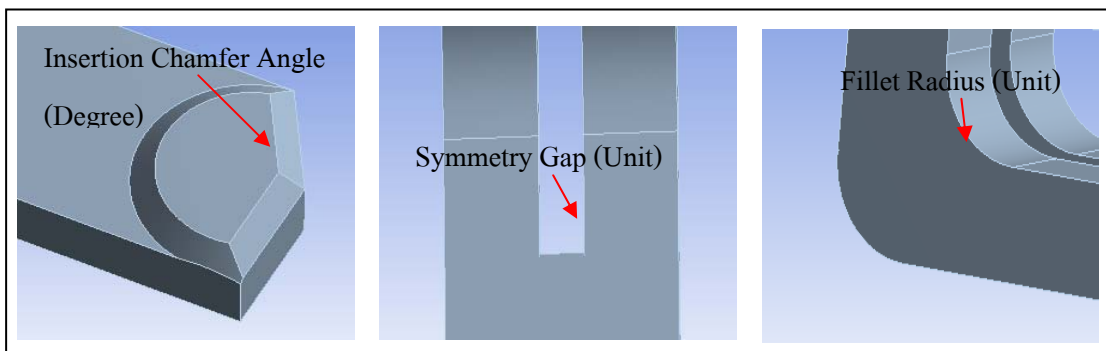
ทำการศึกษารอกแบบการถอดออกของหวี โดยใช้ 3 ตัวแปร 2 อันดับ ตาม Design Of Experiment (DOE) โดยกำหนดตัวแปรหลักทั้ง 3 คือ 1. Removal Chamfer Angle (Degrees) 2. Symmetry Gap (Unit) 3. Fillet Radius (Unit) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 แล้วใน DOE ทำการคิดโดยการรวมตัวแปรเพื่อดูผลของค่าแรงว่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่างโดยวิธีทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% CI



รูปที่ 3.18 แสดงตัวแปรหลักในการศึกษาค่าแรงถอดออกของหวี (Shipping Comb)

3.6.2 การศึกษาค่าแรงในการสวมเข้าของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

ทำการศึกษารอกแบบการสวมเข้าของหวี โดยใช้ 3 ตัวแปร 2 อันดับ ตาม Design Of Experiment (DOE) โดยกำหนดตัวแปรหลักทั้ง 3 คือ 1. Removal Chamfer Angle (Degrees) 2. Symmetry Gap (Unit) 3. Fillet Radius (Unit) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 แล้วใน DOE ทำการคิดโดยการรวมตัวแปรเพื่อดูผลของค่าแรงว่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่างโดยวิธีทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% CI



รูปที่ 3.19 แสดงตัวแปรหลักในการศึกษาค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)

3.6.3 การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรง

ในการคำนวณค่าแรงรวมเข้าและถอดออกของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ แล้วนำผลที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อทำการปรับปรุงค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหวี และทำการออกแบบหวีให้มีประสิทธิภาพการใช้งานตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบแล้วทำการพัฒนาการออกแบบค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าให้ดียิ่งขึ้นในผลิตภัณฑ์ในอนาคตสืบต่อไป



บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบชิ้นงานมาตรฐาน

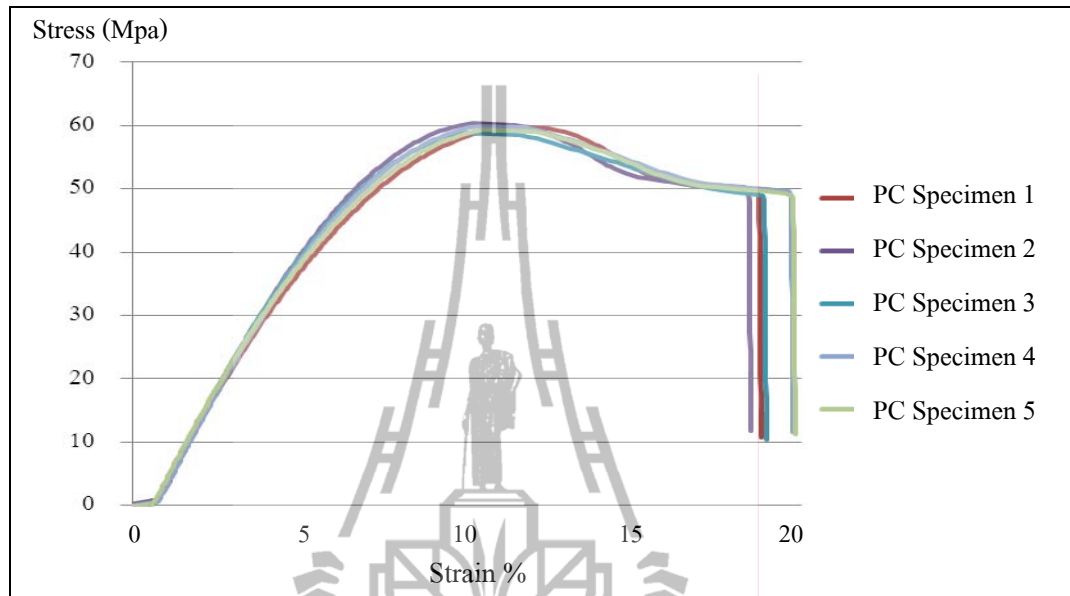
ผลการทดสอบความเค้น และความเครียดของชิ้นงานมาตรฐาน (Specimens) ด้วยทดสอบเครื่อง Universal Testing Machine 5560



รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการดึง Specimen ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

จากการทดสอบชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) จำนวนทั้งหมด 5 ชิ้น ด้วยอัตราเร็วที่ 50 mm/min เมื่อนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น และความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะพบว่า ชิ้นงานจะมีพฤติกรรมการเสียหายแบบวัสดุเหนียว (Ductile Material) โดยมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงวัสดุ 2 ช่วง คือ Elastic Deformation และ Plastic Deformation จากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะสามารถรับแรงดึงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดคราก (Yield Point) ณ จุดนี้ ชิ้นงานทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรซึ่งจะเกิดค่าความเค้น (Yield Stress) เท่ากับ 56 MPa หลังจากนั้นชิ้นงานจะสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสามารถรับความเค้นได้สูงสุด (Ultimate Tensile Stress) เท่ากับ

60 Mpa และค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดึงนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ Shipping Comb ต่อไป



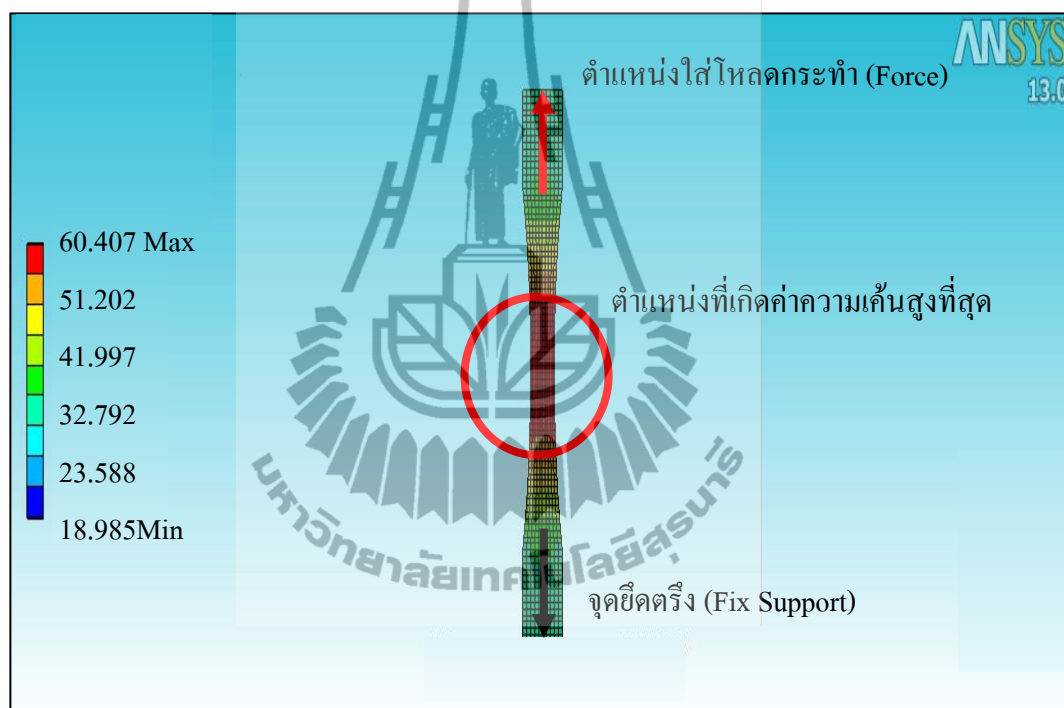
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการดึง Specimen จำนวน 5 ชิ้นด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 5560

ชิ้นงาน	แรง (N)	ความเค้น (MPa)
1	2,411.71	59.86
2	2,431.93	60.36
3	2,370.53	58.84
4	2,414.80	59.94
5	2,389.71	59.32
ค่าเฉลี่ย	2,403.74	59.66

4.2 ผลการวิเคราะห์ของชิ้นงานมาตรฐานด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถแสดงผลในรูปการกระจายตัวของความเค้นของอีลิตีเมนต์ตามเกณฑ์ของวอนมิสเสส (Von Mises Criterion) ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนชิ้นทดสอบ Specimen โพลีคาร์บอเนต ซึ่งถูกดึงให้เสียหาย การวิเคราะห์ได้ทำการดึงชิ้นงานให้ยืดออกโดยกำหนดบริเวณจับยึดแน่นและลักษณะการใส่โหลดตามการทดสอบจริงได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบน Specimen โพลีคาร์บอเนต

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 โดยอ้างอิงจากค่าคุณสมบัติของความเค้นคราก (Yield Stress) ของโพลีคาร์บอเนต จะพบว่าเมื่อใส่โหลดกระทำดึงชิ้นงานด้วยแรงดึง 2,360 N จะมีการกระจายตัวของค่าความเค้นสูงสุด ณ บริเวณตรงกลาง ของ Specimen เท่ากับ 60 MPa เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะการเสียหายจะเกิดขึ้น ณ บริเวณตรงกลางของ Specimen ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองการเสียหายเป็นดังนี้

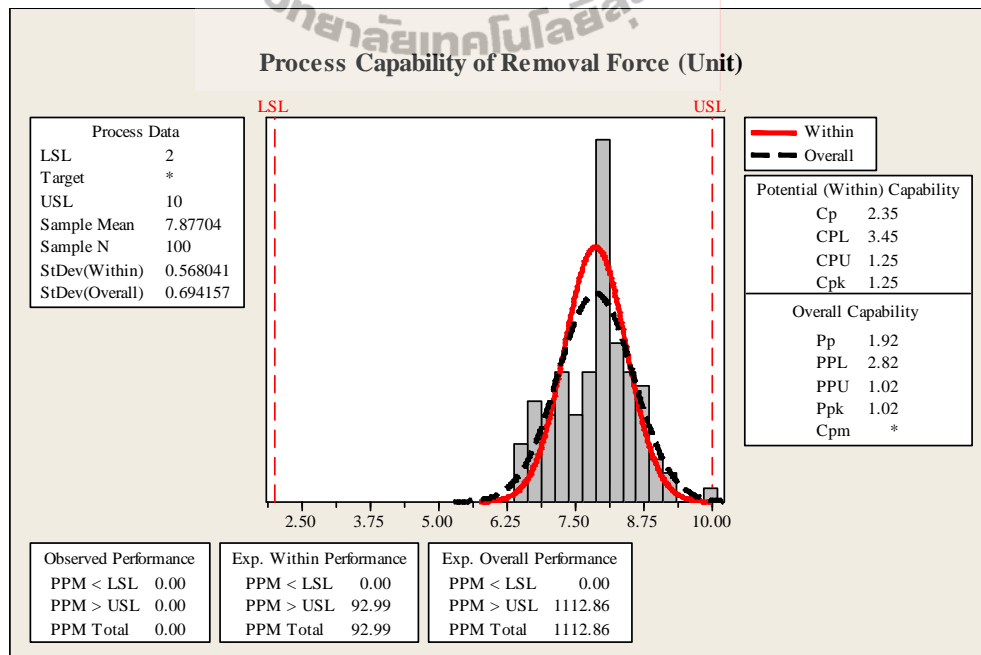
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเสียหายของ Specimen ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0

ชิ้นงาน	แรง (N)	ความเค้น (MPa)
โพลีคาร์บอเนต	2,360 N	60

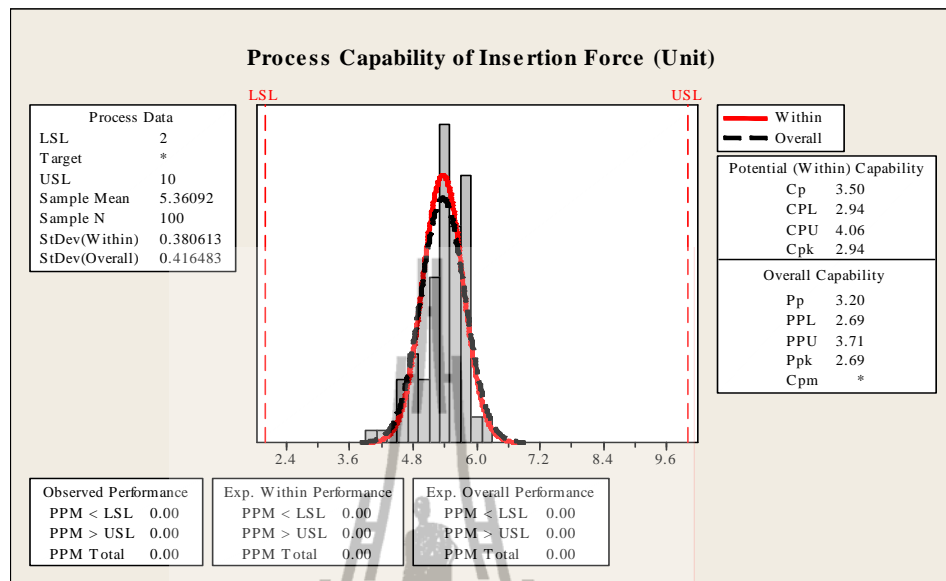
จากการเปรียบเทียบผลทดสอบการดึง Specimen ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 5560 และผลการจำลองการเสียหายด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าได้ผลใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบผลที่ได้เป็นการแสดงให้เห็นถึง ความน่าเชื่อถือของโปรแกรมจำลองชิ้นงาน มีค่าความถูกต้องเป็นที่ยอมรับ

4.3 ผลการเก็บข้อมูลจากการวัดชิ้นงานจริงของค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหัวกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในการเก็บข้อมูลในการวิเคราะห์โดยการเก็บค่าแรงการทดลองค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหัวกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยใช้ Force Gauge Chatillon DFS 0.5 โดยการดันหัวที่ระยะของซี่หัว กับค่าแรงที่ได้ออกมาเพื่อคิดเป็นค่าโมเมนต์



รูปที่ 4.4 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการถอดออกของหัว

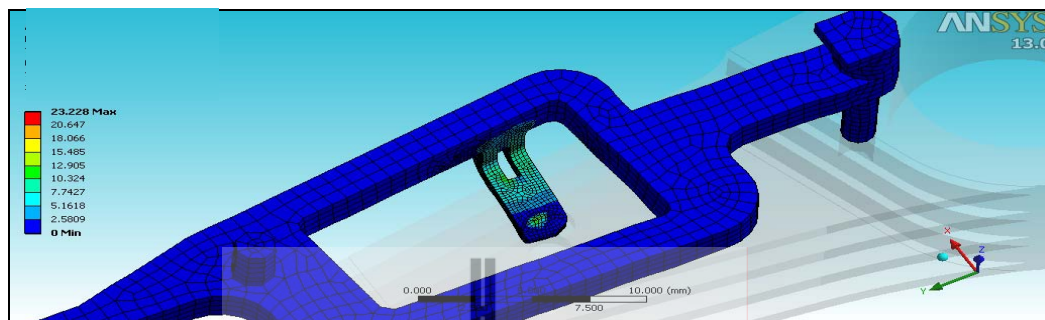


รูปที่ 4.5 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการสวมเข้าของหัว

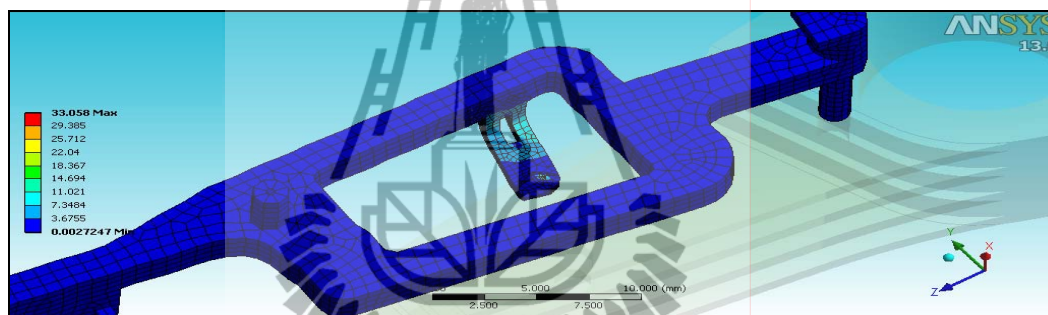
ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเชิงสถิติแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหัวกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จากข้อมูลของค่าแรงโมเมนต์ของการสวมเข้าของหัว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าแรงโมเมนต์ที่เป็นไปตามความต้องการในการออกแบบ ทั้งนี้เนื่องจากค่าเฉลี่ยอยู่ตรงตำแหน่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วงค่าควบคุม ดังแสดงในส่วนของสมรรถนะของกระบวนการที่มีค่ามากกว่า 1.33 ตามหลักของสถิติ และในส่วนของข้อมูลของค่าแรงโมเมนต์ของการถอดออกของหัว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าแรงโมเมนต์ที่มีค่ามากกว่าเป้าหมายที่ได้ออกแบบไว้โดยมีสมรรถนะของกระบวนการที่มีค่าน้อยกว่า 1.33 ตามหลักของสถิติจึงต้องทำการปรับปรุง

4.4 ผลของไฟในท์อิลลิเมนต์ของค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหัว

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยระเบียบวิธีไฟในท์อิลลิเมนต์สามารถแสดงผลในรูปการกระจายตัวของความเค้นของอิลลิเมนต์ตามเกณฑ์ของวอนมิสเชส (Von Misses Criterion) ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้น Z-Latch ของหัว ซึ่งถูกถอดออกและสวมเข้า กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ การวิเคราะห์ได้สวม Pin ลงไปรูเพื่อเป็นจุดหมุนของหัว และลักษณะการใส่โหลดตามการทดสอบจริงได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

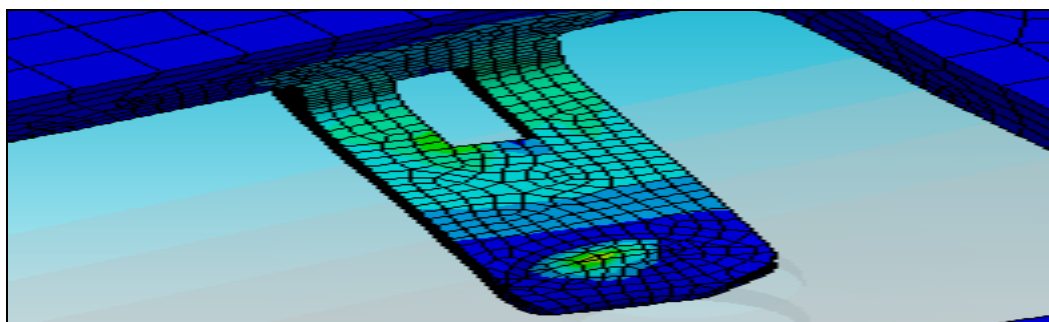


รูปที่ 4.6 แสดงผลของค่าความเค้นในการถอดออกบน Z-Latch ของหวี



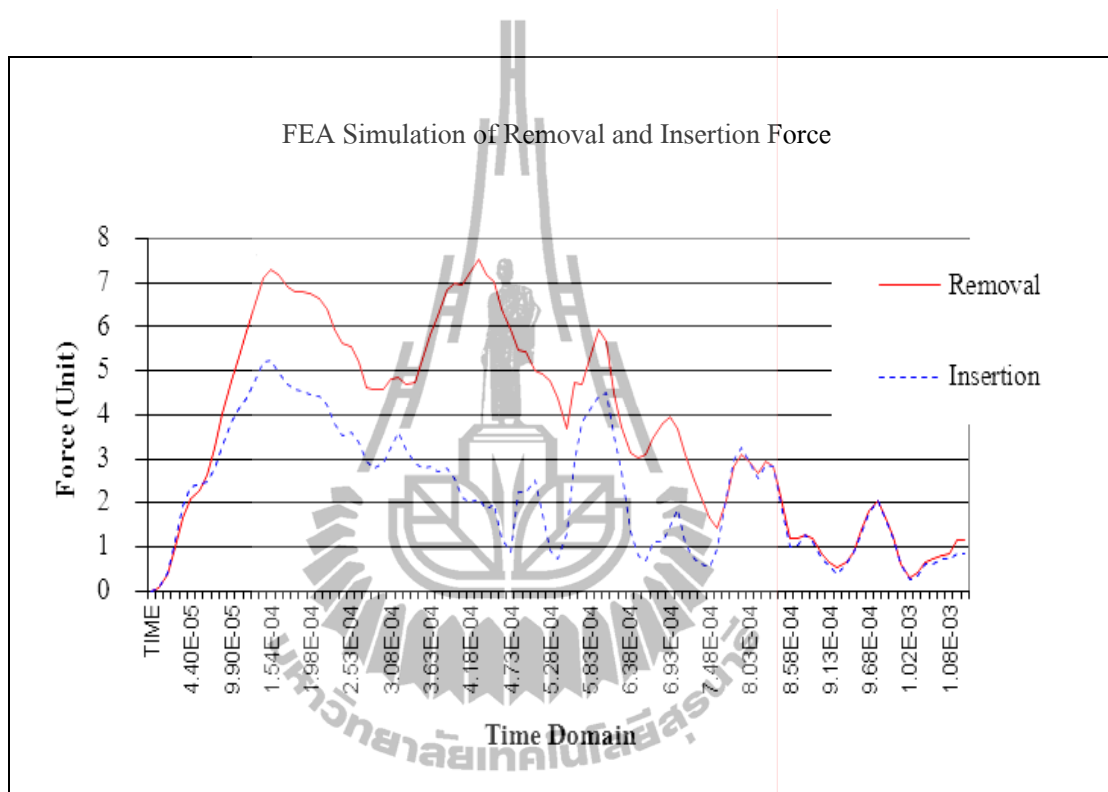
รูปที่ 4.7 แสดงผลของค่าความเค้นในการสวมเข้าบน Z-Latch ของหวี

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 โดยพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณของ Z-Latch ของหวีทั้งในการถอดออกและสวมเข้ากับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงเป็นจุดเริ่มต้นการการออกแบบการทดลอง Design of Experiment (DOE) ของการออกแบบหวีต่อไป



รูปที่ 4.8 แสดงผลของค่าความเค้นบน Z-Latch ของหวีในการออกแบบ DOE

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหัว โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าแรงสูงสุดในการถอดออกและสวมเข้าจะเกิดขึ้นในระยะเวลาที่ตัวหัวสัมผัสกับ ชุดหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เท่านั้น

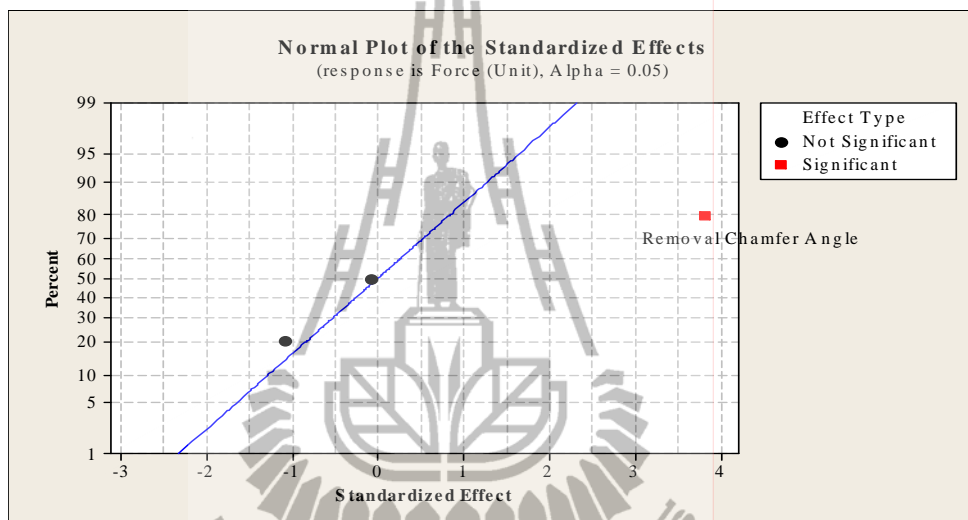


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟของค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหัว

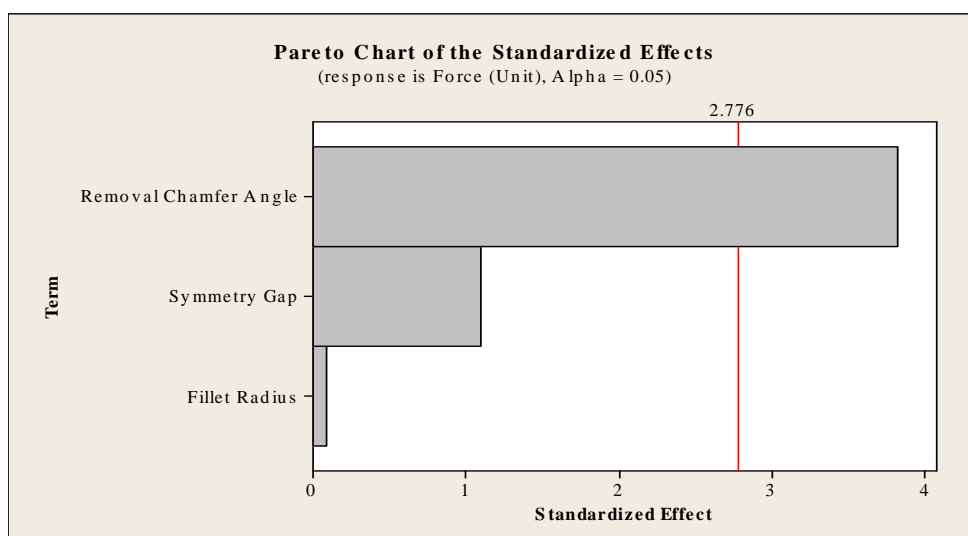
จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหัวกับชุดหัวอ่าน ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยใช้ Force Gauge Chatillon DFS 0.5 โดยการดันหัวที่ระยะของซี่หัว กับค่าแรง ที่ได้ออกมาเพื่อคิดเป็นค่าโมเมนต์ และเทียบกับผลการจำลองค่าแรงถอดออกและสวมเข้าของหัว ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 จะเห็นได้ว่าได้ผลใกล้เคียงกัน ถึง 95% ผลที่ได้เป็นการ แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรมจำลองชิ้นงานที่มีค่าความถูกต้องเป็นที่ยอมรับ

4.5 ผลการศึกษาการออกแบบ DOE ของค่าแรงในการถอดออกของหวี

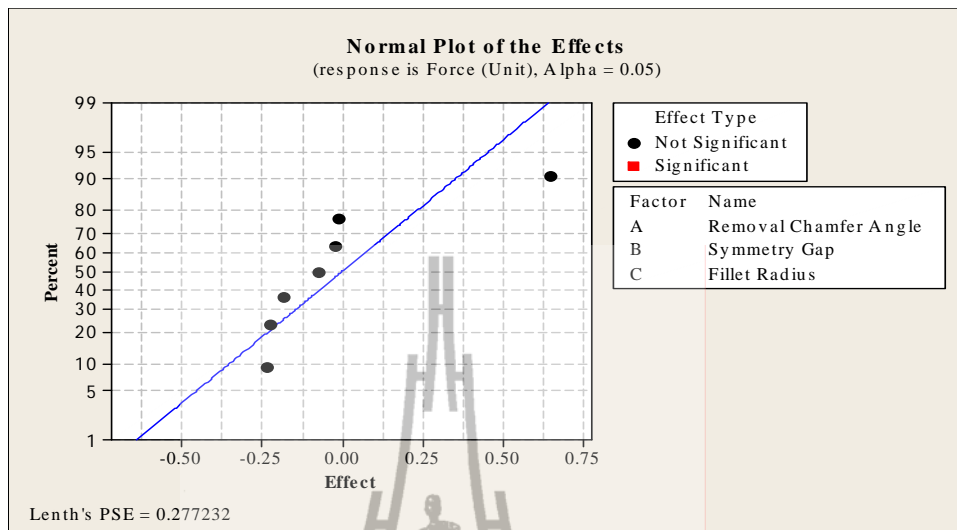
จากผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณของ Z-Latch ทำการศึกษา ค่าแรงในการถอดออกของหวี กับ ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ใดที่ทำการศึกษากการออกแบบหวี โดยใช้ 3 ตัวแปร 2 อันดับ ตาม Design Of Experiment (DOE) โดยตัวแปรหลักทั้ง 3 คือ 1. Removal Chamfer Angle (Degrees) 2. Symmetry Gap (Unit) 3. Fillet Radius (Unit)



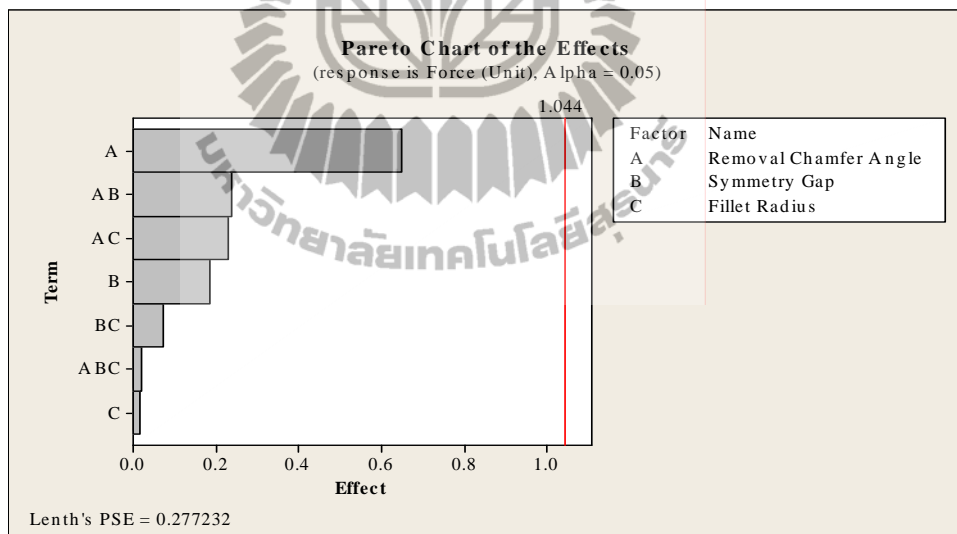
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟ Normal Plot ของตัวแปรหลักในการถอดออกของหวี



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟ Pareto ของตัวแปรหลักในการถอดออกของหวี



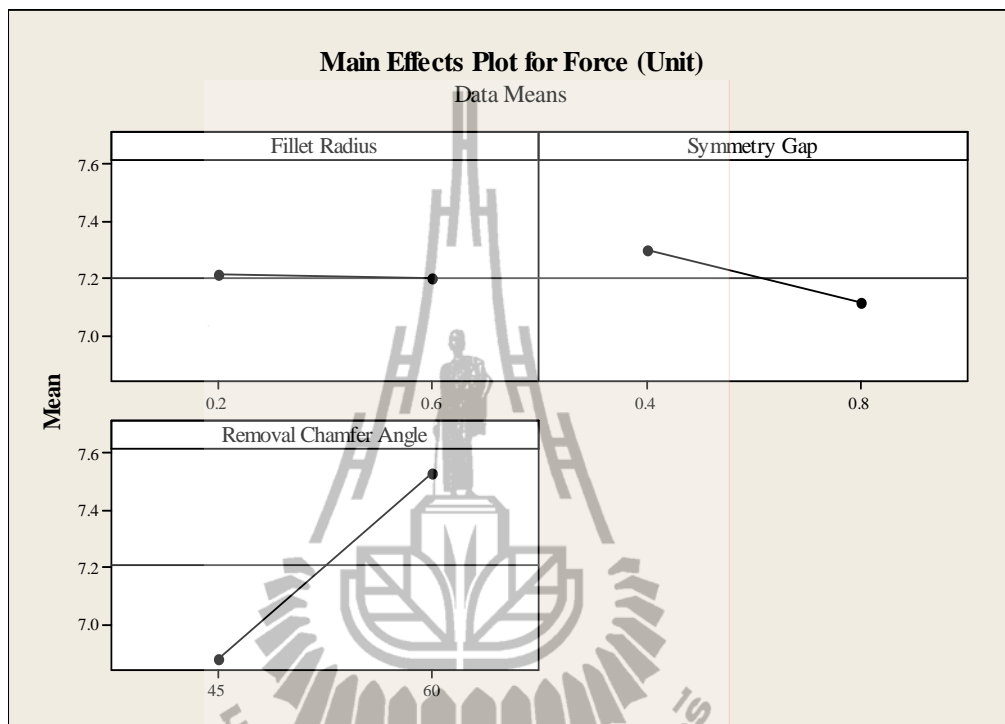
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ Normal Plot ของการผสมตัวแปรในการถอดออกของหัว



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟ Pareto ของการผสมตัวแปรในการถอดออกของหัว

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในส่วนของตัวแปรหลักจะมี Removal Chamfer Angle จะมีผลต่อค่าแรงในการถอดหัวที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นๆใน DOE อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพิจารณาในการผสมตัวแปรก็ยังแสดงให้เห็นว่ามีผลค่อนข้างมากในกลุ่มตัวแปรแต่ก็ไม่ได้แตกต่างอย่างชัดเจน

การพิจารณาตัวแปรหลัก ดังนั้นการพิจารณาจึงมุ่งไปสู่ Removal Chamfer Angle เพื่อทำการปรับปรุงค่าแรงในการถอดออกของหวีให้มีค่าที่ลดลง

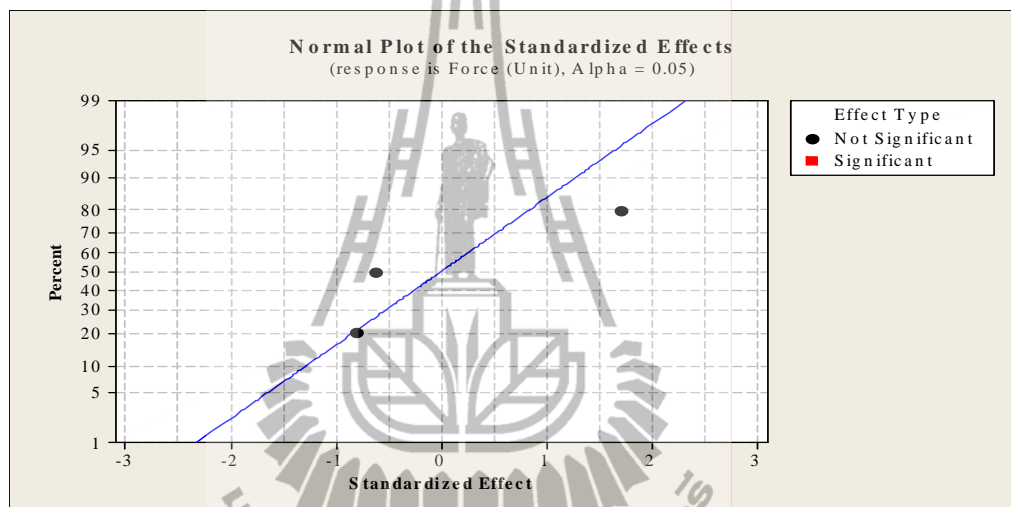


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหวี

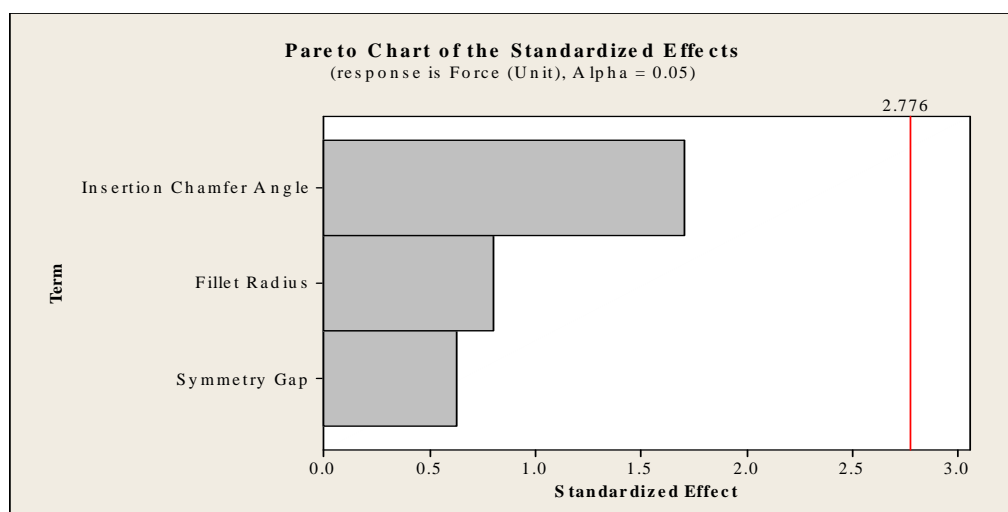
พิจารณาจากกราฟตัวแปรที่มีผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหวีจะแสดงได้ว่า ตัวแปร Removal Chamfer Angle มีผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหวี มากที่สุด โดยการมีค่าของมุมยิ่งสูงก็ทำให้ส่งผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหวีมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกันและในการออกแบบค่าแรงในการถอดออกของหวีต้องการให้มีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ Removal Chamfer Angle มีค่ามุมที่น้อยลงเพื่อจะได้ค่าแรงในการถอดออกของหวีมีค่าลดลงตามที่ต้องการและในลำดับต่อไปทำการออกแบบ Removal Chamfer Angle มีค่ามุมที่ลดน้อยลง

4.6 ผลการศึกษาการออกแบบ DOE ของค่าแรงในการสวมเข้าของหวี

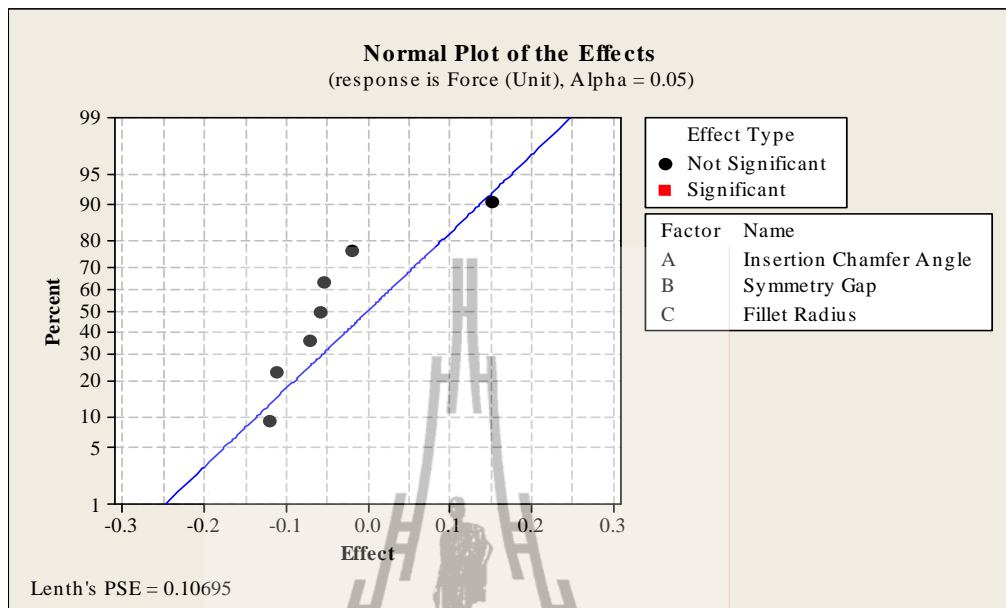
จากผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในบริเวณของ Z-Latch ทำการศึกษา ค่าแรงในการถอดออกของหวี กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทำการศึกษการออกแบบหวี โดยใช้ 3 ตัวแปร 2 อันดับ ตาม Design Of Experiment (DOE) โดยตัวแปรหลักทั้ง 3 คือ 1. Insertion Chamfer Angle (Degrees) 2. Symmetry Gap (Unit) 3. Fillet Radius (Unit)



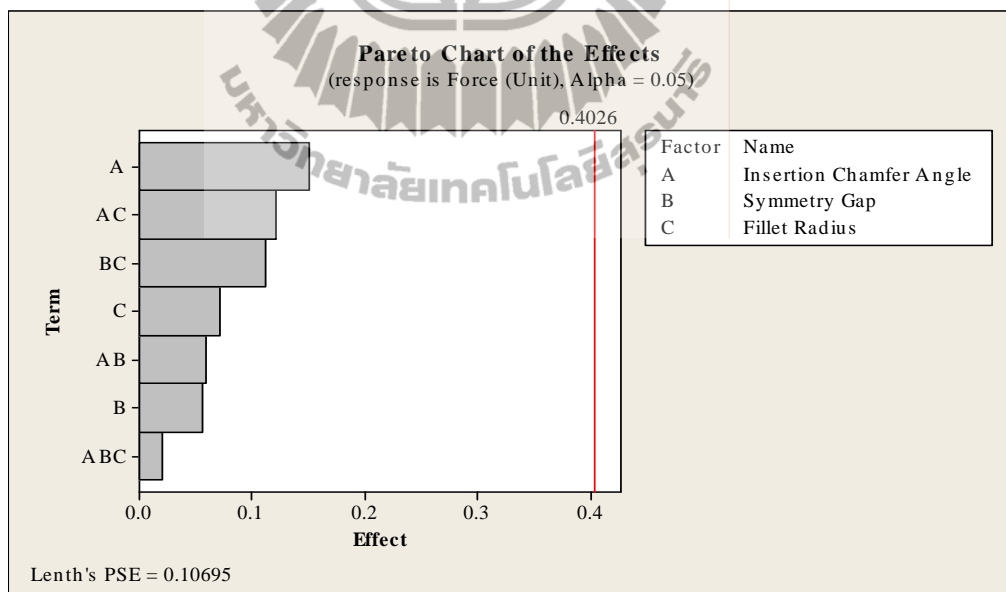
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟ Normal Plot ของตัวแปรหลักในการสวมเข้าของหวี



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟ Pareto ของตัวแปรหลักในการสวมเข้าของหวี



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟ Normal Plot ของการผสมตัวแปรในการสวมเข้าของหัว



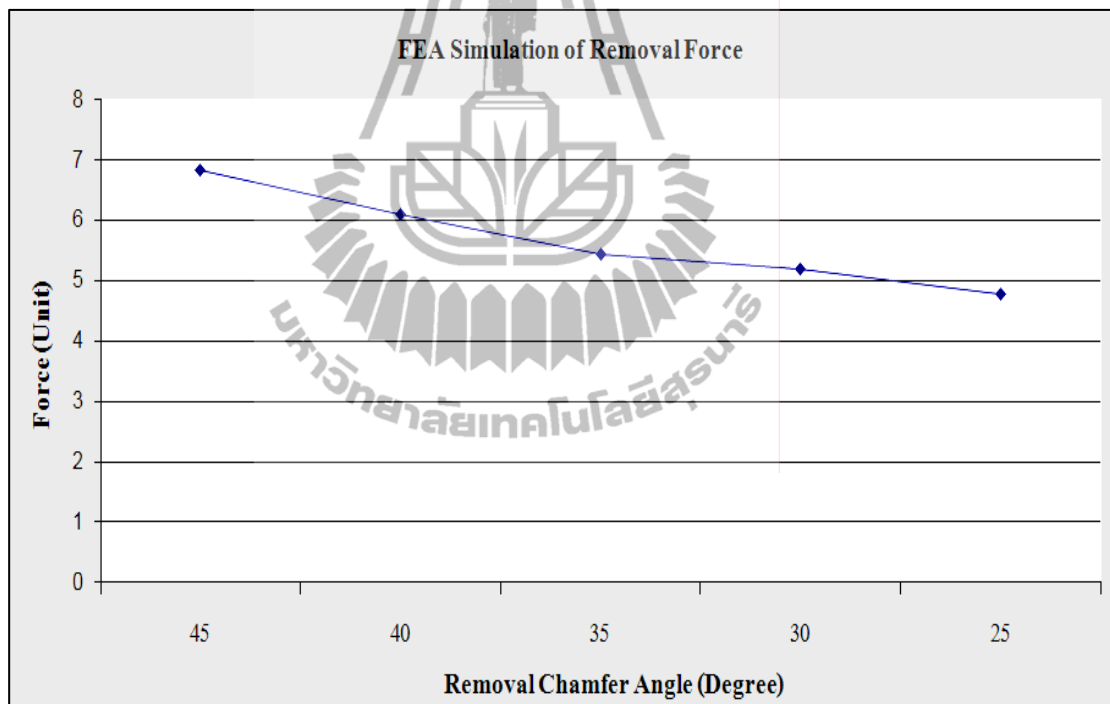
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟ Pareto ของการผสมตัวแปรในการสวมเข้าของหัว

จากกราฟ จะเห็นได้ว่าตัวแปรส่วนใหญ่ไม่ได้ส่งผลที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการออกแบบการสวมเข้าของหัวแล้วตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดในกลุ่มคือ Insertion Chamfer Angle ก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องระวังในการออกแบบค่าแรงในการสวมเข้าของหัว

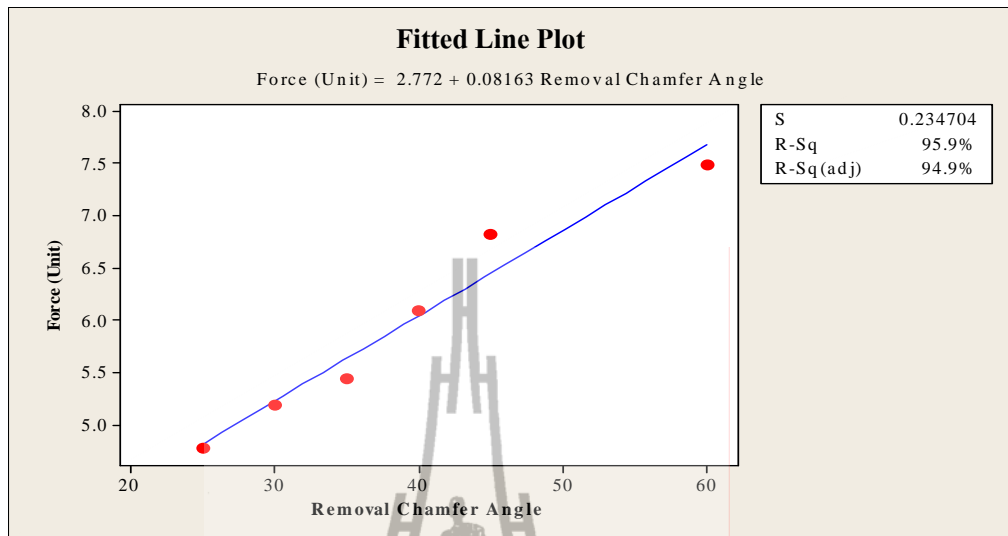
4.7 ผลการปรับปรุงการออกแบบ ค่าแรงในการถอดออกของหัว

จากผลการวิจัยค่าแรงในการถอดออกของหัวจะได้ว่า ตัวแปร Removal Chamfer Angle มีผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหัว มากที่สุดในการออกแบบค่าแรงในการถอดออกของหัว ต้องการให้มีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ Removal Chamfer Angle มีค่ามูมนที่น้อยลงเพื่อจะได้ค่าแรงในการถอดออกของหัวมีค่าลดลงตามที่ต้องการและในลำดับต่อไป ทำการออกแบบ Removal Chamfer Angle มีค่ามูมนที่ลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ในการออกแบบเพื่อปรับปรุงค่าแรงถอดออกหัว โดยการลดค่า Removal Chamfer Angle ลงก็จะเห็นได้ว่าค่าแรงในการถอดออกหัวมีค่าลดลงตามลำดับดังสมการเส้นตรง ค่าแรงถอดออก มีค่า $2.772+0.08163$ ของค่า Removal Chamfer Angle ดังแสดงในรูปที่ 4.20

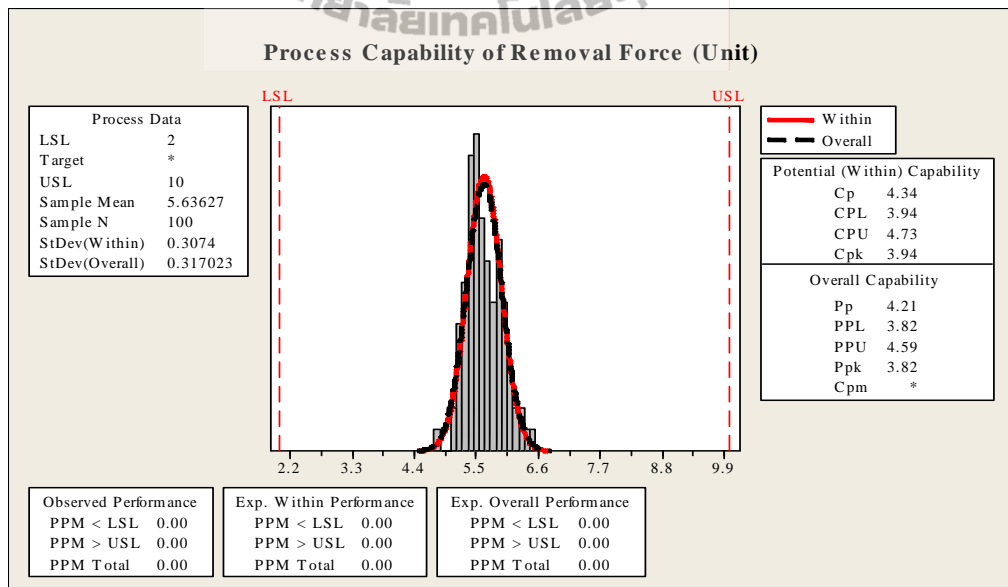


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟของค่าแรงในการถอดออกของหัว

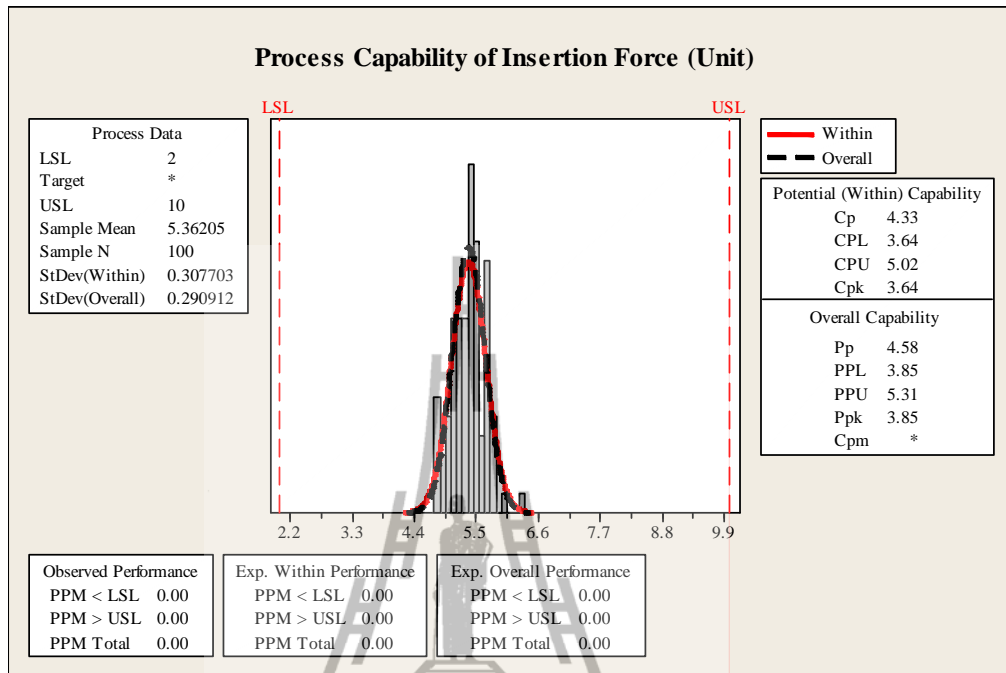


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟเส้นตรงในการประมาณค่าแรงถอดออกของหัว

ผลจากการปรับปรุงในการออกแบบค่าแรงในการถอดออกของหัว และทำการสร้างชิ้นงานจริงมาใช้งานแล้วผลของค่าแรงที่ได้หลังการใช้ไฟไนท์อิลลิเมนต์ช่วยในการออกแบบค่าแรงในการถอดออก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และค่าแรงในการสวมเข้า ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการถอดออกของหัวหลังปรับปรุง



รูปที่ 4.22 แสดงผลของค่าแรงโมเมนต์ของการสวมเข้าของหัวหลังปรับปรุง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปทรงของหัวที่มีต่อค่าของแรงพลวัตในการสวมเข้าและถอดออกในการประกอบกับชุดแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อวิเคราะห์แรงพลวัตของ Shipping Comb โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์หาความสัมพันธ์เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงรูปทรงของ Shipping Comb ให้มีแรงพลวัตในการประกอบที่ได้ประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้นในการวิจัยกับ Shipping Comb ของ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด และปรับปรุงโมเดลเพื่อให้สามารถทำนายค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง จากการเปรียบเทียบผลทดสอบและผลการจำลองการเสียหายด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 13.0 จะเห็นได้ว่าได้ผลใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบผลที่ได้เป็นการแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือซึ่งสิ่งที่ได้จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาลักษณะการออกแบบค่าแรงถอดออกของหัวด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

จากผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณของ Z-Latch พบว่า ค่าแรงในการถอดออกของหัวกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้ 3 ตัวแปร 2 อันดับ ตาม Design Of Experiment (DOE) โดยตัวแปรหลักทั้ง 3 คือ 1. Removal Chamfer Angle (Degrees) 2. Symmetry Gap (Unit) 3. Fillet Radius (Unit) ซึ่งได้ผลตัวแปร Removal Chamfer Angle มีผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหัวมากที่สุด โดยการมีค่าของมุมยิ่งสูงก็ทำให้ส่งผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหัวมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกันและในการออกแบบค่าแรงในการถอดออกของหัวต้องการให้มีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ Removal Chamfer Angle มีค่ามุมที่น้อยลงเพื่อจะได้ค่าแรงในการถอดออกของหัวมีค่าลดลงตามที่ต้องการ

5.1.2 ผลการศึกษาลักษณะการออกแบบค่าแรงสวมเข้าของหัวด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

จากผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณของ Z-Latch พบว่า ค่าแรงในการสวมเข้าของหัว กับ ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้ 3 ตัวแปร 2 อันดับ ตาม Design Of Experiment (DOE) โดยตัวแปรหลักทั้ง 3 คือ 1. Insertion Chamfer Angle (Degrees) 2. Symmetry Gap (Unit) 3. Fillet Radius (Unit) ได้ผลออกมา คือ ทั้ง 3 ตัวแปรไม่ส่งผลที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการออกแบบ

การสวมเข้าของหวีโดยตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดในกลุ่ม คือ Insertion Chamfer Angle ซึ่งก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญในการออกแบบค่าแรงในการสวมเข้าของหวี

5.1.3 ผลการออกแบบปรับปรุงหวี (Shipping Comb)

จากผลการวิจัยค่าแรงในการถอดออกของหวีจะแสดงได้ว่า ตัวแปร Removal Chamfer Angle มีผลต่อค่าแรงในการถอดออกของหวี มากที่สุดในการออกแบบค่าแรงในการถอดออกของหวีต้องการให้มีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ Removal Chamfer Angle มีค่ามุมที่น้อยลงเพื่อจะได้ค่าแรงในการถอดออกของหวีมีค่าลดลงตามที่ต้องการ

โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบหวี (Shipping Comb) Model นี้ คือ การออกแบบการถอดออกของหวี 1. Removal Chamfer Angle 35 Degree, 2. Symmetry Gap 0.8 Unit 3. Fillet Radius 0.6 Unit และการออกแบบการสวมเข้าของหวี 1. Insertion Chamfer Angle 60 Degree, 2. Symmetry Gap 0.8 Unit 3. Fillet Radius 0.6 Unit ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดดังกล่าวจะสามารถทำให้ได้ค่าแรงพลวัตของการถอดออกและสวมเข้าของหวีของชิ้นงานจริงมีค่า Cpk มากกว่า 1.33 ซึ่งเป็นที่ยอมรับสำหรับค่าแรงพลวัตของหวี (Shipping Comb)

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำการศึกษาหวี (Shipping Comb) จะเห็นได้ว่าการออกแบบค่าแรงสวมเข้าและถอดออกของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ รูปทรงของหวีโดยเฉพาะค่ามุมในการประกอบกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ มีผลต่อค่าแรงสวมเข้าและถอดออกของหวีเป็นอย่างมาก และในแต่ละผลิตภัณฑ์ มีความแตกต่างในเรื่องขนาดของชิ้นงานหวี และความแตกต่างขนาดของชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ และรวมไปถึงความแตกต่างของรูยึดจับ Z-Latch ของ Shipping Comb ในแต่ละผลิตภัณฑ์ จึงเสนอแนะให้มีการออกแบบในส่วนของรูยึดจับ Z-Latch ของ Shipping Comb ที่มีขนาดที่เท่ากัน และทำการออกแบบ Shipping Comb ที่มีค่าแรงสวมเข้าและถอดออกของหวีกับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วนำมาใช้ในการออกแบบใน ผลิตภัณฑ์ในอนาคตสืบต่อไป

รายการอ้างอิง

- ขจรศักดิ์ ใจดี สุรเชษฐ์ ชูดีมา และ ทศพร กำเนิดทอง (2553). การศึกษาพฤติกรรมชิ้นส่วน HGA ขณะถูกจับยึดด้วย Shipping comb. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 92 หน้า.
- จักรพันธ์ ปริรักษย์วิจิตร (2550). การศึกษา Static Attitude และ Gram Load Clamping Unit โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 9-26.
- ฐวิสณี ปัทมประดิษฐ์ และ สมศักดิ์ ศิวคำรองพงส์ (2553). การวิเคราะห์ความเสียหายของหัวประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เนื่องจากปัจจัยทางกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 174 หน้า.
- ทศนพ กำเนิดทอง สุรเชษฐ์ ชูดีมา และ จักรพันธ์ ปริรักษย์วิจิตร (2553). การศึกษาสภาพการเสีรูปร่างของ HGA ภายหลังจากจับยึดโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 จังหวัดชลบุรี. หน้า 902-907.
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ (2550). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร. 294 หน้า.
- ภากรณ์ ทรัพย์เจริญ และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์ (2551). การวิเคราะห์มุมลอยตัวของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 71 หน้า.
- บุทธชัย ว่องไวพินิจ และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์ (2551). ศึกษาและพัฒนาเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของพลาสติกถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์. โครงการนมหบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 100 หน้า

- รัฐภูมิ คล้ายอักษร และ สุจินต์ บุรีรัตน์ (2553). การศึกษาผลกระทบต่อชุดหัวอ่านเขียนข้อมูลที่เกิดจากกระบวนการ **Ball Swaging Process** ต่อค่า **Pitch Static Attitude** ภายในฮาร์ดดิสก์ขนาด **2.5 นิ้ว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 116 หน้า.
- เรืองฤทธิ์ สารางคำ และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์ (2551). การจำลองการตกกระทงของบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 112 หน้า.
- คันสนีย์ ขุนทิพย์ทอง และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต (2552). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า **PSA** และ **RSA** ของหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อันเนื่องมาจากค่าแรงที่ใช้จับยึดระหว่างการวัดค่าด้วยวิธี **ไฟไนต์เอลิเมนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 55 หน้า.
- Gu, B., Shu, D.W., Luo, J., and Shi, B. J. (2006). **FEA Simulation of Linear and Rotary Drop Test for Small Form Factor HDD**. International conference on Mechatronics and automation June 25-28, 2006, pp. 1264-1268.
- Monika, G., Albert, J., Shih, E., and Ronald, O. (1999). **Finite-Element Analysis of Stress Concentration in ASTM D 638 Tension Specimens**. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 31, No. 1.
- Nasser, F., and Chenhua, L. (2008). **Optimal simple step stress accelerated life test design for reliability prediction**. Journal of Statistical Planning and Inference, pp. 1-10.
- Yusaku, F. and Dong-Wei, S. (2008). **Impact force measurement of an actuator arm of a hard disk drive**. International Journal of Impact Engineering 35 (2008), pp. 98-108.



ข้อมูลการประกอบพิธีกับชุดหัวอ่านและกระบวนการทดสอบค่าแรงหัว

ก.1 หวีประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (Shipping Comb)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวี (Shipping Comb) ที่ใช้กับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ ก.1 Shipping Comb จะนำมาสวมเข้ากับชุดหัวอ่านเพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้หัวอ่านเขียนข้อมูล (Slider) เกิดการสัมผัสและกระทบกระเทือนกันและป้องกันการสัมผัสกับสิ่งรอบข้าง ตั้งแต่กระบวนการผลิตชุดหัวอ่าน กระบวนการการขนส่ง ตลอดจนถึงกระบวนการนำชุดหัวอ่านไปประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ วัสดุที่นำมาใช้ทำหวี (Shipping Comb) ผลิตมาจากโพลีคาร์บอเนต ซึ่งมีคุณสมบัติ แข็งแรง ทนต่อความร้อน และทนต่อแรงกระแทกสูง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนจับยึดและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์



รูปที่ ก.1 แสดงรูปของหวี (Shipping Comb)

ก.2 ขั้นตอนในการจับยึด Shipping Comb เข้ากับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

Shipping Comb ที่ได้ทำการศึกษาวีวิจัยนี้ใช้สำหรับจับยึดชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จำนวน 6 หัวอ่าน โดยขั้นตอนและตำแหน่งการจับยึด ดังแสดงในรูปที่ ก.2

1) นำ Pin ใส่เข้าไปในรูของ Actuator ตรงตำแหน่ง Pivot เพื่อทำหน้าที่เป็นจุดหมุนให้กับ Shipping Comb ในการถอดออกและสวมเข้า

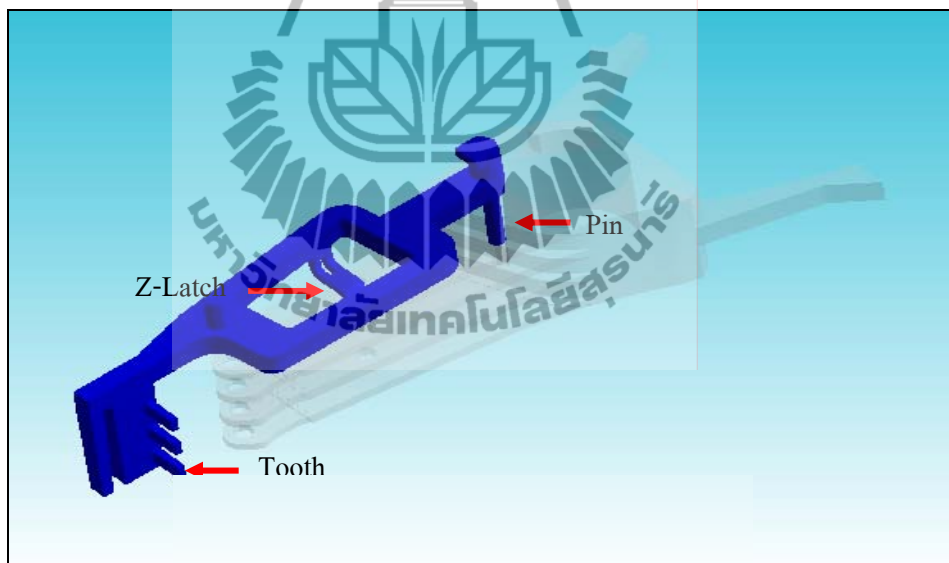
2) ดัน Latch เข้าไปสวมกับแขนของ Actuator ระหว่างซี่ที่ 1 และ 2 โดยผิวสัมผัสของ Latch จะถูกออกแบบมาให้สามารถถอดออกและสวมเข้ากับ Actuator ได้

3) ซี่หวีของ Shipping Comb จะถูกสวมเข้ากับบริเวณตรงปลายของ HGA เพื่อทำหน้าที่แยกและป้องกันไม่ให้ Slider เกิดการสัมผัสกัน

4) Z-Latch จะทำหน้าที่ล็อก Shipping Comb ที่สวมอยู่ไม่ให้หลุดออกจาก Actuator



รูปที่ ก.2 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของหวี (Shipping Comb) ที่ใช้สำหรับการจับยึดบนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

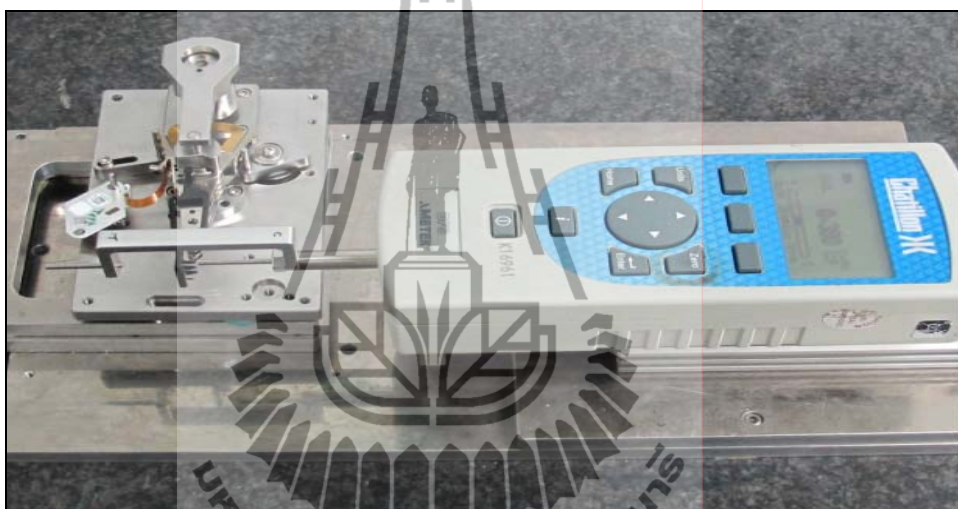


รูปที่ ก.3 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของหวี (Shipping Comb) ที่จับยึดบนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ใน โมเดล

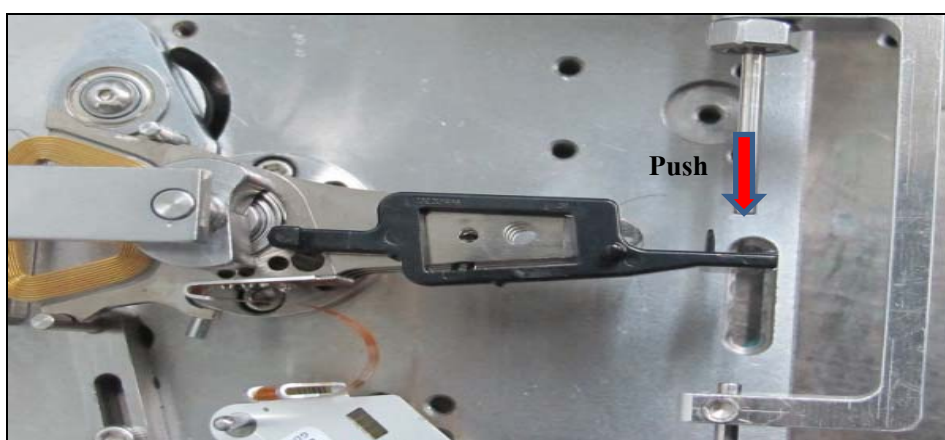
กระบวนการประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ซึ่งจะมีการติดตั้ง Shipping Comb เข้ากับชุดหัวอ่านเพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชุดหัวอ่านเขียนข้อมูลบริเวณตรงปลายเกิดการสัมผัสกัน Shipping Comb ที่นำมาใช้ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะมีขั้นตอนการนำไปใช้งาน

ก.3 กระบวนการทดสอบค่าแรงหวี

การทดสอบค่าแรงในการถอดออกและสวมเข้าของหวี โดยใช้ Force Fauge Chatillon DFS 0.5 ดังแสดงในรูปที่ ก.4 การดันหวีที่ระยะของซี่หวีกับค่าแรงที่ได้มาเพื่อนำมาคิดเป็นค่าโมเมนต์ วิธีการทดสอบแรงถอดออก ดังแสดงในรูปที่ ก.5 และวิธีการทดสอบแรงสวมเข้า ดังแสดงในรูปที่ ก.6 เป็นระยะที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแล้วนำมาคูณกับค่าแรงที่ได้จาก Force Gauge ในการทำ FEA นำค่าที่ได้จากจุด Contact มาคูณกันกับค่าระยะทางใน โมเดล ดังแสดงในรูปที่ ก.7 และ ก.8



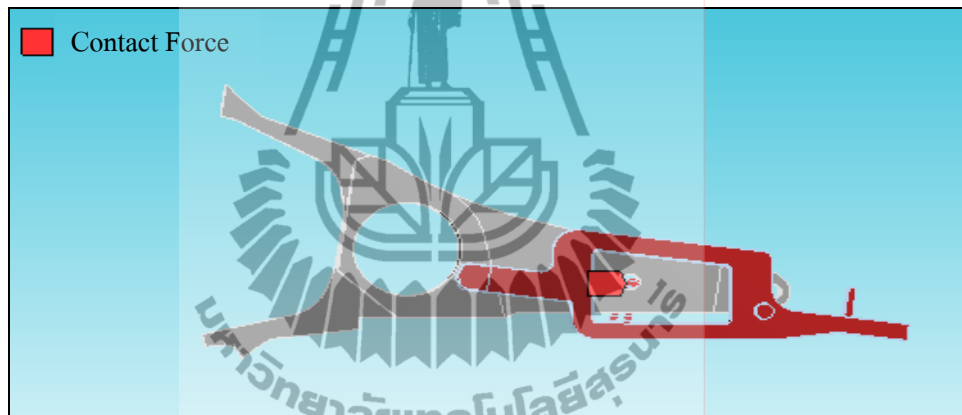
รูปที่ ก.4 แสดงการจับยึดหวี (Shipping Comb) เข้ากับชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ในการทดสอบค่าแรงหวี



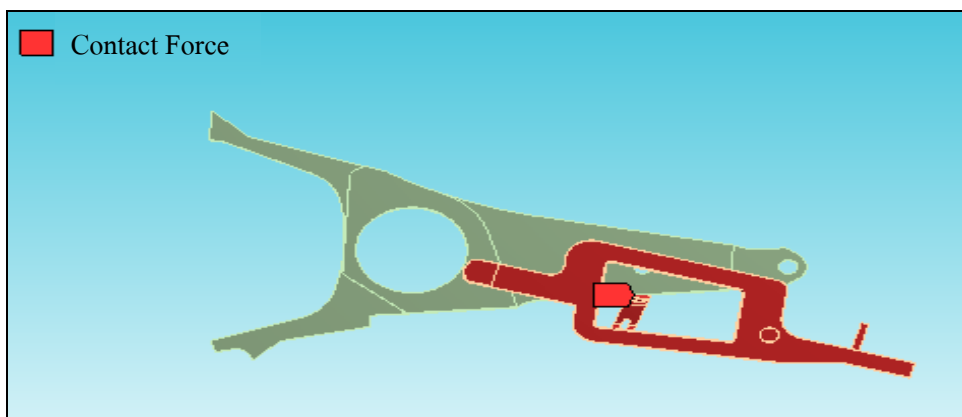
รูปที่ ก.5 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงถอดออกของหวี Shipping Comb



รูปที่ ก.6 แสดงลักษณะของการทดสอบค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)



รูปที่ ก.7 แสดงลักษณะของ FEA ค่าแรงกดออกของหวี (Shipping Comb)



รูปที่ ก.8 แสดงลักษณะของ FEA ค่าแรงสวมเข้าของหวี (Shipping Comb)



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบชิ้นงานและผลไฟในท์อิลลิเมนต์

ข.1 การทดสอบดึงชิ้นงานมาตรฐาน (Specimens)

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบดึงชิ้นงานมาตรฐาน

ชิ้นงาน	Tensile Yield Stress (MPa)	Maximun Load (N)	Ultimate Tensile Stress (Mpa)	Stress at Break (Mpa)	Elongation at Break (%)
1	56.10	2,259.99	59.86	49.50	18.68
2	55.98	2,255.47	60.36	49.84	18.44
3	56.03	2,257.31	58.84	48.83	18.87
4	55.87	2,250.81	59.94	49.62	19.64
5	55.86	2,250.62	59.32	48.97	19.72
ค่าเฉลี่ย	55.97	2,254.84	59.66	49.352	19.07

ข.2 ผลการทดสอบค่าแรงหิว

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงหิวของ 100 ชิ้นงาน

Parts	Before Removal (Unit)	Before Insertion (Unit)	Improve Removal (Unit)	Improve Insertion (Unit)
1	7.878	5.852	5.122	5.865
2	7.878	5.577	5.282	5.169
3	8.286	5.165	5.050	5.623
4	8.695	5.165	4.907	5.538
5	7.878	5.990	5.224	5.370
6	7.266	4.039	5.006	5.270
7	7.878	4.588	5.707	5.395
8	7.878	5.577	5.254	5.279
9	7.062	4.588	5.348	5.498
10	6.817	5.165	5.363	5.941
11	7.062	5.303	5.089	5.877

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงหิวของ 100 ชิ้นงาน (ต่อ)

Parts	Before Removal (Unit)	Before Insertion (Unit)	Improve Removal (Unit)	Improve Insertion (Unit)
12	8.286	5.303	5.218	5.586
13	8.491	5.577	5.683	5.948
14	8.082	5.577	5.363	5.393
15	9.103	5.577	5.099	5.409
16	6.613	5.440	5.522	5.454
17	8.286	5.852	5.798	5.534
18	7.470	4.753	5.272	5.267
19	6.613	5.852	5.841	5.478
20	7.470	5.852	5.326	5.287
21	9.960	5.440	4.835	5.426
22	7.878	5.028	5.391	5.886
23	7.674	5.303	5.379	5.221
24	9.103	5.852	5.458	5.875
25	8.491	5.852	5.431	6.095
26	7.062	4.891	5.418	6.185
27	8.082	5.577	5.394	5.757
28	7.266	4.753	5.686	5.361
29	6.817	4.753	5.201	5.537
30	7.266	5.715	5.481	5.206
31	7.674	5.165	5.708	5.321
32	8.082	5.028	5.114	5.573
33	8.082	5.165	4.859	5.717
34	8.491	6.127	5.114	5.608
35	8.695	5.852	5.827	6.286
36	8.082	5.028	4.819	5.562

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงหิวของ 100 ชิ้นงาน (ต่อ)

Parts	Before Removal (Unit)	Before Insertion (Unit)	Improve Removal (Unit)	Improve Insertion (Unit)
37	7.878	5.577	5.493	5.724
38	6.817	4.314	5.551	5.359
39	7.470	4.588	5.439	5.274
40	7.062	5.440	4.817	6.011
41	7.674	5.303	5.496	5.663
42	7.266	5.303	5.483	5.105
43	8.286	5.165	5.583	5.441
44	9.348	5.715	5.375	5.786
45	8.491	5.715	5.083	5.440
46	7.470	5.440	5.269	5.480
47	7.266	5.165	5.437	5.766
48	6.817	4.176	5.254	6.044
49	7.674	5.028	5.724	5.438
50	8.082	4.891	5.683	5.995
51	7.878	5.577	4.969	5.582
52	7.878	5.440	5.057	4.818
53	8.082	5.165	5.968	5.547
54	8.082	5.577	5.507	6.470
55	8.286	5.303	5.220	5.633
56	7.266	5.715	5.662	5.447
57	7.878	5.577	5.717	5.516
58	6.817	5.028	5.253	6.427
59	7.878	5.440	5.713	5.361
60	8.695	5.303	5.393	5.729
61	8.491	5.165	5.546	5.879

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงหิวของ 100 ชิ้นงาน (ต่อ)

Parts	Before Removal (Unit)	Before Insertion (Unit)	Improve Removal (Unit)	Improve Insertion (Unit)
62	8.695	5.165	5.084	5.363
63	7.878	5.715	5.475	5.527
64	8.695	5.303	5.694	5.306
65	7.878	5.577	5.238	5.583
66	7.674	5.303	5.351	6.040
67	7.674	5.715	5.724	5.702
68	7.062	4.588	5.531	5.866
69	7.266	5.303	5.468	5.772
70	7.878	5.303	5.218	5.207
71	7.878	5.303	5.306	5.543
72	8.491	5.715	5.284	5.924
73	8.286	5.440	5.019	5.060
74	8.695	5.577	4.812	5.198
75	8.082	5.852	5.815	5.298
76	7.674	5.715	5.777	6.001
77	7.470	5.440	4.990	6.093
78	7.266	4.588	5.548	5.726
79	7.266	5.577	6.284	5.245
80	8.286	5.303	5.075	5.755
81	9.103	5.715	5.361	5.682
82	8.286	5.990	5.437	6.287
83	8.286	5.852	5.060	6.117
84	8.491	5.852	5.409	5.742
85	8.695	5.577	5.369	5.982
86	7.674	5.303	4.864	6.202

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงหิวของ 100 ชิ้นงาน (ต่อ)

Parts	Before Removal (Unit)	Before Insertion (Unit)	Improve Removal (Unit)	Improve Insertion (Unit)
87	8.286	5.577	5.226	5.547
88	6.409	4.891	5.684	6.142
89	6.817	4.891	4.841	5.468
90	8.082	5.852	5.568	5.968
91	8.491	5.165	5.155	5.544
92	8.491	5.577	5.235	5.925
93	9.348	5.440	5.694	5.707
94	8.286	5.577	5.456	5.811
95	8.695	5.852	5.438	5.644
96	7.062	5.165	5.387	5.423
97	7.674	6.127	5.511	5.515
98	6.613	5.303	4.765	5.610
99	6.817	5.303	5.584	5.589
100	7.470	5.165	5.187	5.783

ตารางที่ ข.3 แสดงผล FEA ในการทำ DOE ของค่าแรงในการถอดออก

RunOrder	CenterPt	Blocks	Removal Chamfer Angle (Degree)	Symmetry Gap (Unit)	Fillet Radius (Unit)	Force (Unit)
1	1	1	45	0.4	0.2	6.722
2	1	1	60	0.4	0.2	7.815
3	1	1	45	0.8	0.2	6.827
4	1	1	60	0.8	0.2	7.488
5	1	1	45	0.4	0.6	6.988
6	1	1	60	0.4	0.6	7.667
7	1	1	45	0.8	0.6	6.989

ตารางที่ ข.3 แสดงผล FEA ในการทำ DOE ของค่าแรงในการถอดออก (ต่อ)

RunOrder	CenterPt	Blocks	Removal Chamfer Angle (Degree)	Symmetry Gap (Unit)	Fillet Radius (Unit)	Force (Unit)
8	1	1	60	0.8	0.6	7.149

ตารางที่ ข.4 แสดงผล FEA ในการทำ DOE ของค่าแรงในการสวมเข้า

RunOrder	CenterPt	Blocks	Insertion Chamfer Angle (Degree)	Symmetry Gap (Unit)	Fillet Radius (Unit)	Force (Unit)
1	1	1	45	0.4	0.2	5.454
2	1	1	60	0.4	0.2	5.766
3	1	1	45	0.8	0.2	5.550
4	1	1	60	0.8	0.2	5.783
5	1	1	45	0.4	0.6	5.596
6	1	1	60	0.4	0.6	5.705
7	1	1	45	0.8	0.6	5.508
8	1	1	60	0.8	0.6	5.458

ตารางที่ ข.5 แสดงผล FEA ในการปรับปรุงการออกแบบหัวของค่าแรงในการถอดออก

Removal Chamfer Angle (Degree)	Symmetry Gap (Unit)	Fillet Radius (Unit)	Force (Unit)
60	0.8	0.2	7.488
45	0.8	0.2	6.827
40	0.8	0.2	6.091
35	0.8	0.2	5.438
30	0.8	0.2	5.190
25	0.8	0.2	4.781



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Suriya Supa, Somsak Siwadamronpong. **FEA Simulation Study of a Shipping Comb Removal and Insertion in HDD Manufacturing.** The 4th International Data Storage Technology Conference (DST-CON2011). January 10, 2012. at Impact Convention Center (Hall 9), Room Sapphire 5 Muangthong Thani, Nonthaburi, Thailand



FEA Simulation Study of a Shipping Comb Removal and Insertion in HDD Manufacturing

Suriya Supa¹, Somsak Siwadamrongpong²

¹*School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology,*

²*School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology,*

Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

¹suriya.supa@seagate.com

²somsaksi@sut.ac.th

Abstract— In HDD assembly processes, automation has been deployed in many steps of process from subassembly to drive. Dynamic forces of a shipping comb removal and insertion have impacted the automation process related to HSA. Dynamic force of shipping comb is a complex result from parameters such as removal and insertion shape and surface contact condition. This paper will discuss the relation between dynamic forces, removal and insertion shape and contact surface of shipping comb. Then, parts are manufactured and tested for performance evaluation and making of corrective design. These steps generally consume long time and high expense. It would be more advantageous, if these steps could be carried out by computer simulation. Therefore, this research aims to use the Finite Element Analysis (FEA) and will cover the prediction of comb removal and insertion force related to the comb shape. Potential benefit of this work is the cost saving by reducing the number of trial and error, changing the comb mold design change and testing try out in comb development process. Moreover, having predictable force will reduce time to market and increase competitiveness of HDD product launch into the market.

Keywords— FEA, Shipping Comb, Dynamic Force, HDD

I. INTRODUCTION

Nowadays, many technologies have grown rapidly with high competition in each of industries even in manufacturing. The step of product development in order to ensure quality and performance begins with designing to follow the required dimensions and shape that conform to its applications and consumers. Then it is manufactured and tested for performance evaluation and making of corrective design. Test is an important procedure of product development process that uses to investigate failure problems and is able to reduce amount of scrap. There are many available testing modes such as tensile test, drop test, vibration test, impact test etc. In general, the product development process has followed these steps: design, manufacture and test as shown in Fig. 1 nevertheless these steps consume long time and high expense especially in testing procedure. In addition, some product must be sent to test in foreign country. It should be more advantageous, if these steps could be carried out by computer simulation. Therefore, this research aims to use finite element method to analyse and help in the designing phase. The result

of simulation indicates the dynamic force, which can be analysed to improve the design to meet the removal and insertion force requirements and is able to find the way to improve the design of the removal and insertion force.

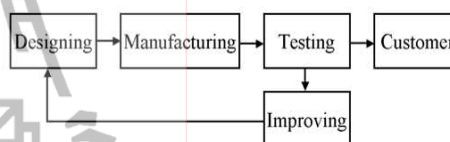


Fig. 1 Shipping Comb development process

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

Finite Element Analysis (FEA) is one method that is used as simulation and failure analysis tool. Many industries use it to improve and develop the product because it is faster more convenient, and less expensive than testing. This research has studied a designed relate force using FEA simulation together with exponential validation using parts with fixture. The project activities are as follow

- Process, material and physical configuration collection
- Classification of Removal and Insertion Force
- Removal and Insertion force test
- FEA Simulation
- Model validation.
- Design shape of the shipping comb base on the studied force related experiments
- Conclusion

The project activities start with the study manufacturing process, material of the product, and physical configuration. Then data collector data by classifying product samples of 200 data points in order to identify removal & insertion analysis. Afterwards, the step function to create dynamic force of removal & insertion is assumed. The fixtures are designed and used with the force gauge to push the parts in the removal & Insertion directions to test the samples. In the means time the Finite Element mechanical dynamics to determine stress & force distribution on the model using appropriate element type

and size show in Fig. 4. The results of the simulation are compared with those from tested samples to verify the force magnitude. Finally, the FEA and experimental results are in agreement with approximately 95% of accuracy.

III. GENERAL INFORMATION ABOUT SHIPPING COMB & FINITE ELEMENT ANALYSIS

A. Shipping Comb Material

Polycarbonate (PC) is an engineering material widely used in many industries. It is a group of thermoplastic that has organic chemical structure as shown in Fig. 2. It is well known about its high strength, good hardness, flexibility, impact durability, high temperature and chemical stability compared with other polymers. Consequently, it is used many piece part components including the shipping comb for the ARM assembly.

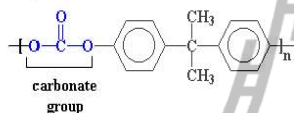


Fig. 2 PC Organic chemistry structure

TABLE I
POLYCARBONATE PROPERTIES

Polycarbonate Properties	
Specific gravity	1.4
Tensile Strength (Mpa)	64
Tensile Modulus (Mpa)	2,400
Impact Strength (J/m)	70
Thermal Conductivity (W/m.k)	0.25
Melt Temperature (°C)	230-310
Electrical Resistivity (Ω.cm)	< 1E4

B. ANSYS Explicit Dynamics

Explicit Dynamic analysis expresses the conservation of mass, momentum, and energy in Lagrange coordinates. Together with a material model and a set of initial conditions and boundary conditions, these define the complete solution of the problem.

For Lagrange formulations, the mesh moves and distorts with the material that it models, so conservation of mass is automatically satisfied. The density at any time can be determined from the current volume of the zone and its initial mass:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}$$

The partial differential equations, which express the conservation of momentum, relate the acceleration to the stress tensor σ_{ij} :

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

Conservation of energy is expressed via:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx})$$

For each time step, these equations are solved explicitly for each element in the model, based on input values at the end of the previous time step

Only mass and momentum conservation is enforced. However, in well posed explicit simulations, mass, momentum and energy should be conserved. Energy conservation is constantly monitored for feedback on the quality of the solution (as opposed to convergent tolerances in implicit transient dynamics)

The Explicit Dynamics solver uses a central difference time integration scheme (Leapfrog method). After forces have been computed at the nodes (resulting from internal stress, contact, or boundary conditions), the nodal accelerations are derived by dividing force by mass:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i$$

where x_i are the components of nodal acceleration ($i=1,2,3$), F_i are the forces acting on the nodes, b_i are the components of body acceleration and m is the mass of the node

With the accelerations at time $n - 1/2$ determined, the velocities at time $n + 1/2$ are found from

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n$$

Finally, the positions are updated to time $n + 1$ by integrating the velocities

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2}$$

C. Shipping Comb Removal and Insertion

Due to movement of the removal and insertion from the disassembling and the assembling the part generate the contact force in the process, which it is mass and momentum conservation to dynamic force, the shipping comb will be a complex analysis result with key parameters such as removal, insertion, shape and surface contact condition as shown in Fig.3.

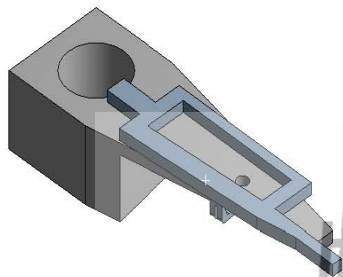


Fig. 3 Shipping Comb and Arm assembly model

The ANSYS Workbench with Explicit STR analysis is used for simulation the mechanical dynamics of the material model. The Equivalent (Von-Mises) stress and the Contact force with Material behaviour identified as in isotropic elasticity, Mechanical properties of Polycarbonate are identified as shown in Table II, and the model was composed of 14,000 elements and 10,000 nodes.

TABLE II
POLYCARBONATE MECHANICAL FEA PROPERTIES

Polycarbonate Mechanical FEA Properties	
Poisson Ratio	0.38
Young Modulus (MPa)	2,400
Yield Strength (MPa)	58
Tensile Strength (MPa)	64
Tensile Elongation (%)	5.0-10.0
Friction Coefficient	0.05-0.09
Dynamic Coefficient	0.05-0.09

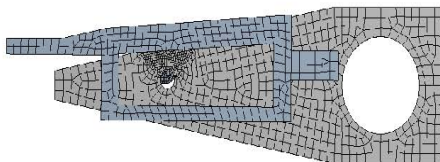


Fig. 4 Shipping Comb and Arm assembly Meshing feature

D. Force Testing and FEA result

TABLE III
COMPARISON OF TESTING AND SIMULATION RESULT

Force Comparison		
Model	Force test (N)	Model (N)
Removal	2.56 ± 0.2	2.64
Insertion	1.62 ± 0.2	1.72

Removal & Insertion force show maximum force at the top of shape contacted along the way to Simulation of shape contact time. The FEA results are compared with tested result in Table III.

E. Influence of Geometry

The stress on the model is used to study relationship between the designed shape and predicted removal and insertion force. Fig. 5 shows a stress of the shipping comb removal, whereas Fig. 10 shows the stress of the shipping comb insertion. The designed shape are optimized has been created using Minitab v16.1.0 via DOE Factorial module to create 2-level factorial with DOE 3 factors which Full DOE are 8 runs, by varying the factors are the Chamfer (A), the Symmetry cut hold (B), and the Fillet (C) in Shipping Comb design.

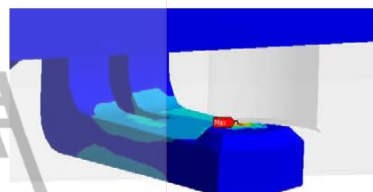


Fig. 5 Stress of the shipping comb removal

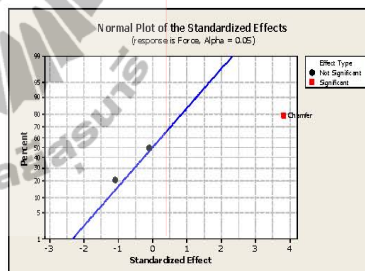


Fig. 6 Normal plot of the standardized effect in the removal force response

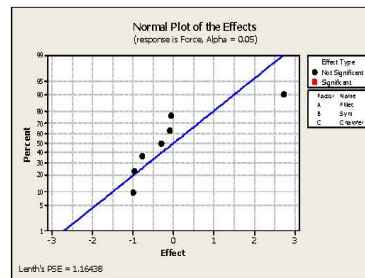


Fig. 7 Normal plot of the DOE standardized effect in the removal force response

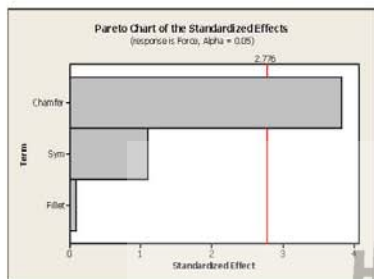


Fig. 8 Pareto Chart of the standardized effect in the removal force response

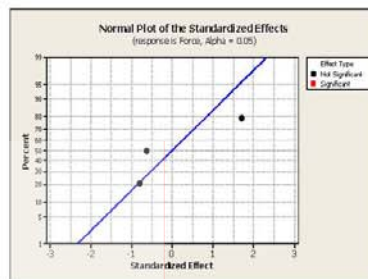


Fig. 11 Normal plot of the standardized effect in insertion force response

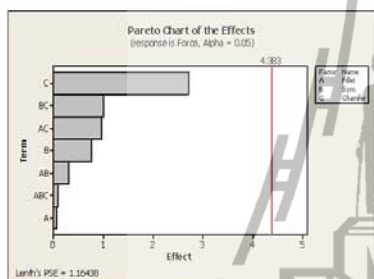


Fig. 9 Pareto chart of the DOE standardized effect in the removal force response

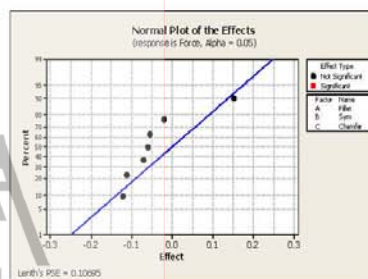


Fig. 12 Normal plot of the DOE standardized effect in insertion force response

The Chamfer of the removal force shows significance in factor at 95% confident (key factor is 2.776 and combined factors is 4.383) as show in Fig. 6, and Fig. 8, whereas Fig. 7, and Fig. 9 show of The DOE standardized effect, which also shows the highest influence of Chamfer highest effect.

The Insertion force shows standardized effect non-significance at 95% confident (key factor is 2.776 and combined factors is 4.026) of the parameters as shown in Fig. 11 and Fig. 14, whereas Fig. 12, and Fig. 14 also show non-significance of combined factors in DOE standardized effect.

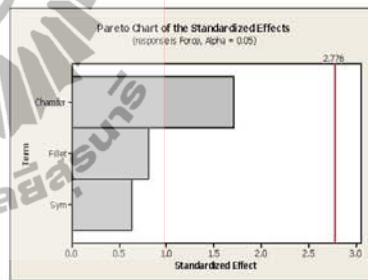


Fig. 13 Pareto chart of the standardized effect in insertion force response

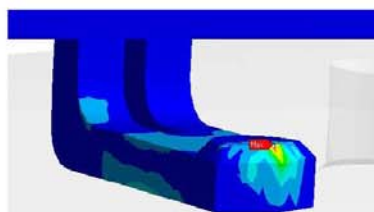


Fig. 10 Stress of the Shipping Comb Insertion

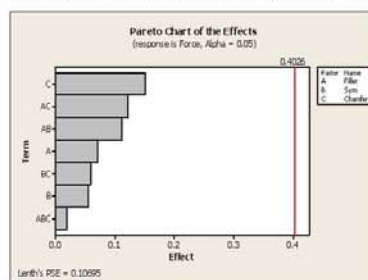


Fig. 14 Pareto plot of the DOE standardized effect in insertion force response

IV. CONCLUSIONS

In summary, according to our FEA simulation study of shipping comb design related to parameters of the removal and the insertion in the HDD manufacturing. The simulation result shows that chamfer is the major parameter in the standardized effect. Designer must focus on the chamfer for surface force contact effect from it. By the way, the chamfer designs of the force contraction recommend that the removal chamfer design should has lower slope than that of insertion chamfer. This design may lead to controlling of the dynamic force of removal and insertion to be close to each other.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to my colleagues, Prapan A., Choavalit C., Nualpun J., Joomponladej B., Tunthanawath T., Anchalee U., Kobsak P., Boripat N., Chaovanit K., Ekasit P., Wiriya Y. from Thailand Process Development Department of Seagate Technology Thailand Ltd, Sithipong S. from CAD-IT CONSULTANTS (ASIA) PTE Ltd, and Thawisanee P., Chalearmchai C. from Mechanical Engineering of Suranaree University of Technology for their continuous help, encouragement, and useful suggestion.

REFERENCES

- [1] J.P.F. Inberg, Fracture of polycarbonate/ABS blends. (2001). Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands pp. 1-139.
- [2] Monika, G., Albert, J., Shih, E., and Ronald, O. (1999). Finite-Element Analysis of Stress Concentration in ASTM D 638 Tension Specimens. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 31, No. 1.
- [3] Nasser, F. and Chenhua, B. (2008). Optimal simple step stress accelerated life test design for reliability prediction. *Journal of Statistical Planning and Inference*, pp. 1-10.
- [4] Yusaku, F. and Dong-Wei, S. (2008). Impact force measurement of an actuator arm of a hard disk drive. *International Journal of Impact Engineering* 35 (2008), pp. 98-108.
- [5] Roy A. B. Engelen, Ron H. J. Peerlings, and Marc G. D. Geers. (2003). Ductile Failure Modes in Plasticity. Eindhoven University of Technology, Netherlands Institute for Metals Research Ui
- [6] Neville W. Sachs, P.E., (2005). Fracture Features. *Journal of failure analysis and prevention*, Vol. 5.
- [7] Sai Sarva, Adam D. Mulliken, Mary C. Boyce. (2007). Mechanics of Taylor impact testing of polycarbonate. *International Journal of Solids and Structures* 44 pp. 2381-2400.
- [8] Jongpradist, P., Rotbunongsri, R., Sukkana, C., Sungtong, W. (2008). Parametric Study of Baseplate Geometry Using Finite Element Analysis, Thesis, KMUTT, Thailand.
- [9] Gu, B., Shu, D.W., Luo, J. and Shi, B. J. (2006). FEA Simulation of Linear and Rotary Drop Test for Small Form Factor HDD. *International conference on Mechatronics and automation* June 25-28, 2006, pp. 1264-1268.
- [10] Thawisanee P., Chalearmchai C., Somsak S. (2011). Product Development Process Improvement by Using Finite Element Simulation, Thesis, SUT, Thailand.
- [11] CAD-IT, Training Manual to ANSYS Explicit STR Release 13.0, 1st ed., ANSYS, Dec. 2010.

ประวัติผู้เขียน

นายสุรียา สุภา เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2526 ณ จังหวัดลำปางเป็นบุตรของ นายประสิทธิ์ และนางสนธยา สุภา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ณ โรงเรียนมัธยมวิทยาลัยลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (อิเล็กทรอนิกส์) และสำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (เมคคาทรอนิกส์) ณ สถาบันการอาชีวศึกษา ภาคเหนือ 3 วิทยาลัยเทคนิคลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (นักศึกษาทุนเพชรพระจอมเกล้า) คณะวิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (เกียรตินิยมอันดับ 2) เมื่อปีพุทธศักราช 2549 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานใน บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งงาน Process Engineer แผนก Thailand HSA Process Development ขณะทำงานได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท (บัณฑิตศึกษาทุน HDDI) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ (หลักสูตรวิชาเมคคาทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และระหว่างทำงานได้เป็นส่วนหนึ่งในการประสานงานทางด้านงานวิจัยระหว่าง บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยขอนแก่น และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จึงช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์และความรู้ที่สร้างสมจากการทำงานและการศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำงานวิจัยได้มีบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 บทความ โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.