

การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงพลวัตของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์แบบ  
SSA และ DSA ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DYNAMIC PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN SSA AND DSA HDD  
SUSPENSION ASSEMBLIES USING FINITE ELEMENT METHOD

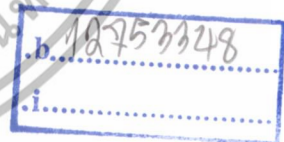


T141232

ปรีชา สูดัจันทร์  
PREECHA SUDACHUN



จพ.  
๗/4681  
055๘



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 141232  
วัน,เดือน,ปี..... ๗ ๘ ส.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558  
KMITL-2015-EN-M-030-204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DYNAMIC PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN SSA AND DSA HDD  
SUSPENSION ASSEMBLIES USING FINITE ELEMENT METHOD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015  
KMITL-2015-EN-M-030-204**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2015**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

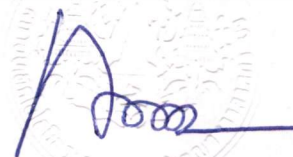
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงพลวัตของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์แบบ SSA และ DSA ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Thesis Title DYNAMIC PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN SSA AND DSA HDD SUSPENSION ASSEMBLIES USING FINITE ELEMENT METHOD  
นักศึกษา นายปรีชา สุดาจันทร์  
รหัสประจำตัว 54610818  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-030 - 204

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อนุรัตน์	พิมโสภณ
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยนันท
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงพลวัตของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟแบบ SSA และ DSA ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายปรีชา สุดาจันทร์
รหัสนักศึกษา	54610818
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟได้มีการพัฒนาความจุของการจัดเก็บข้อมูลให้มากขึ้นแต่ยังคงไว้ซึ่งขนาดของแผ่นดิสก์ไทร์ฟเท่าเดิม ซึ่งในอนาคตยังคงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความจุให้มากขึ้นเรื่อยๆ การทำงานของฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟนั้นจะมีชุดจับยึดหัวอ่านเขียนที่นิยมใช้อยู่ 2 รูปแบบ คือแบบซิงเกิลสเตทแอกชูเอเตอร์ (Single state actuator, SSA) และแบบดูอัลสเตทแอกชูเอเตอร์ (Dual state actuator, DSA) ความแตกต่างระหว่างชุดจับยึดหัวอ่านเขียนทั้งสองแบบคือ แบบซิงเกิลสเตทแอกชูเอเตอร์ จะทำการเคลื่อนที่โดยการควบคุมของชุดวอยซ์คอยล์มอเตอร์เพียงอย่างเดียว ส่วนแบบดูอัลสเตทแอกชูเอเตอร์ สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งจากการควบคุมของชุดวอยซ์คอยล์มอเตอร์และวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งสามารถทำให้การเคลื่อนที่ไปอ่านเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ที่มีร่องเก็บข้อมูลขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและวิเคราะห์การตกกระแทก เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างสมรรถนะเชิงพลวัตระหว่างชุดจับยึดหัวอ่านทั้ง 2 รูปแบบ สมรรถนะเชิงพลวัตประกอบไปด้วย (1) ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสะเทือน (Mode shape) ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน (2) ผลตอบสนองต่อการตกกระแทกในสถานะที่ฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟทำงาน (Operation shock) และไม่ทำงาน (Non-operation shock) จากผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างชุดจับยึดหัวอ่านแบบซิงเกิลสเตทแอกชูเอเตอร์กับแบบดูอัลสเตทแอกชูเอเตอร์พบว่าแบบดูอัลสเตทแอกชูเอเตอร์ โหมด 1<sup>st</sup> Bending มีความถี่ธรรมชาติมากกว่า 36.4 เฮอร์เซ็นต์ โหมด 1<sup>st</sup> Torsion และโหมด Sway มีความถี่น้อยกว่า 8.69 เฮอร์เซ็นต์ และ 2.68 เฮอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดจับยึดหัวอ่านแบบดูอัลสเตทแอกชูเอเตอร์ มีโหมดเพิ่มขึ้นจากแบบซิงเกิลสเตทแอกชูเอเตอร์คือ โหมดการบิดของเบสเพลท (Base plate torsion) ที่ความถี่ 24,200 Hz และโหมดการบิดของโหลดบีม (Load beam torsion) ที่ความถี่ 26,600 Hz ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการออกแบบเบสเพลทเพื่อให้มีพื้นที่สำหรับการวางวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ของแบบดูอัลสเตทแอกชูเอเตอร์ ส่งผลให้มีความถี่ธรรมชาติที่เปลี่ยนไปคล้ายกัน การวิเคราะห์การตกกระแทกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือการวิเคราะห์ในสถานะฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟทำงานและไม่ทำงาน โดยการวิเคราะห์ในสถานะ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานเป็นการหาขนาดความเร่งของการตกกระแทกที่ทำให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ (Lift-off shock) ที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์แตกต่างกันคือ 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที ผลการศึกษาพบว่าแบบดิวอัลสเตทแอกซ์วีร์เอเตอร์ค่าความเร่งของการตกกระแทกที่ทำให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์มากขึ้น 81.1 เปอร์เซ็นต์ 80.1 เปอร์เซ็นต์ และ 79.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านทั้งสองแบบในสถานะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงานเพื่อศึกษาการแยกตัวกันระหว่างติมเฟิลกับหัวอ่านเขียน โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร่งในการตกกระแทกจาก 150G 300G และ 450G และมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างสัญญาณพัลส์จาก 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากผลการศึกษาพบว่า การแยกตัวของติมเฟิลกับหัวอ่านเขียนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร่งในการตกกระแทกและค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์เพิ่มขึ้น



<b>Thesis Title</b>	Dynamic Performance Comparison between SSA and DSA HDD Suspension Assemblies Using Finite Element Method
<b>Student</b>	Mr.Preecha Sudachun
<b>Student ID</b>	54610818
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn

### ABSTRACT

Nowadays, the hard disk drive has been developed for increasing storage capacity by maintaining the size of the hard disk which the requirement's tendency of the hard disk drive space is still higher in the future. There are two types of suspension in the hard disk drive, namely single state actuator (SSA) and dual state actuator (DSA). The difference between both suspension types is that the movement of single state actuator suspension is controlled by voice coil motor only but dual state actuator suspension is moved by controlling of voice coil motor and piezoelectric transducer which can control the movement to write and read data on the small sector/track in nanometer scale with high efficiency.

This research proposes the natural frequency and shock analysis using finite element method to compare the dynamic performance between both types of suspension. Dynamic performance consists of (1) natural frequency and mode shape analyzes (2) dynamic shock response while the disk is operation and non-operation modes. The analyzed results show that 1<sup>st</sup> Bending mode of dual state actuator suspension increases 36.4% but, 1<sup>st</sup> Torsion mode and Sway mode natural frequency decreases 8.69% and 2.68% respectively. In addition, there are more mode shapes found on dual state actuator suspension; base plate torsion mode at 24,200 Hz and load beam Torsion mode at 26,600 Hz. The study shows that the baseplate design for piezoelectric transducer of dual state actuator suspension is effects to the natural frequency. For shock analysis using finite element method, there are two cases of study, namely operation shock analysis and non-operation shock analysis. Operation

shock analysis is conducted to determine amount of acceleration shock that can make a head lift-off from a disk during operation (Lift-off shock) by varying pulse width of 0.5, 1 and 2 ms. From the analysis results, found that the Lift-off shock of dual state actuator suspension increases 81.1%, 80.1% and 79.2% respectively. After that, the non-operation shock analysis are performed to investigate the separation between dimple and slider head by varying the acceleration shock of 150G, 300G and 450G and varying pulse width of 0.5, 1 and 2 ms. The results show that increasing of the acceleration shock and pulse width are affects to the increasing of the gap between dimple and slider head.



## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา และให้กำลังใจ รวมถึงผลักดันให้การดำเนินงานต่างๆ ประสบผลสำเร็จมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้พิจารณารายละเอียดงานวิจัย เล่มนี้ และได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงส่วนต่างๆ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งเป็นกำลังใจให้ต่อสู้ พากเพียร และผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ มา ได้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีความปรารถนาดีและเชื่อมั่นในตัวข้าพเจ้า ทั้งผู้ที่ถูก กล่าวถึง ณ ที่นี้และผู้ที่ยังไม่ได้กล่าวถึง ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลาย ในสากลโลก โปรดจงดลบันดาลให้ทุกท่านประสบแต่ความโชคดี ทางไกลโรครภัยไข้เจ็บ คิดสิ่งใดให้สม ปรารถนาทุกประการ รวมถึงขอช่วยคลี่คลายให้ทุกท่าน มีความเข้าใจลึกซึ้งและปฏิบัติตามอริยมรรคมี องค์ 8 ประการ เพื่อเป็นอาวุธต่อสู้กิเลสในการดำเนินสู่เส้นทางนิพพานด้วย เทอญ

นายปรีชา สุดาจันทร์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนเชิงกล.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการตกระแทกเชิงกล.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	20
3.2 หัวอ่านเขียน (Slider).....	25
3.3 ชิ้นส่วนประกอบของ HGA (Head gimbal assembly).....	28
3.4 ชิ้นส่วนประกอบของ HSA (Head stack assembly).....	30
3.5 สมรรถนะของชุดจับยึดหัวอ่าน.....	31
3.6 ธรรมชาติของการสั่นสะเทือน.....	32
3.7 การสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรี.....	30
3.8 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรี.....	37
3.9 การวิเคราะห์โหมดัลของการสั่นสะเทือน.....	44
3.10 วิธีการรวมกันของรูปแบบการสั่นสะเทือน (Mode summation method).....	52
3.11 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method).....	55
3.12 การทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์.....	56
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	59
4.1 การทดสอบโปรแกรม ANSYS V.13.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาความแตกต่างการออกแบบชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิล สเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์และดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	61
4.3 การวิเคราะห์สั่นสะเทือนด้วยระเบียบวิธีไฟน์ดเอลิเมนต์.....	65
4.4 การทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง Scanning laser doppler vibrometer (SLDV) .....	73
4.5 การวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน.....	75
4.6 เครื่องมือสำหรับใช้ทดสอบการตกกระแทก .....	76
4.7 การวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่ของ ดิมเพิล กับ SST Tongue ของดิวอัลสเตท แอกซ์วัวร์เอเตอร์ .....	78
บทที่ 5 ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล.....	81
5.1 ผลการสั่นสะเทือนด้วยความถี่โมดอลและตรวจสอบความถูกต้องของซิงเกิล สเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	81
5.2 ผลการสั่นสะเทือนด้วยความถี่โมดอลและตรวจสอบความถูกต้องของดิวอัลสเตท แอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	85
5.3 ผลการวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน (Hard disk drive operation shock analysis).....	87
5.4 วิธีการคำนวณหาค่าของแรงตอบสนองจากเกิดการตกกระแทก.....	91
5.5 ผลของการเคลื่อนที่ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนจากการตกกระแทก.....	93
5.6 การวิเคราะห์การหาระยะของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน Suspension ตกกระแทก ขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน (Non-operation shock analysis).....	97
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	115

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบการผลการทดลองกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
2.2 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวัดด้วย SLDV กับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
2.3 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย SLDV.....	10
2.4 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย SLDV กับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	12
2.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดทั้ง 2 แบบ.....	14
2.6 ตารางเปรียบเทียบการหาความถี่ธรรมชาติของ HSA ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง..	15
2.7 การตรวจสอบผลการจำลองกับการทดสอบ.....	18
4.1 แสดงผลลัพธ์เปรียบเทียบระหว่าง ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys และ ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยทฤษฎี.....	61
4.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	67
5.1 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติระหว่างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการ ทดสอบของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	82
5.2 ตารางแสดงรูปร่างลักษณะของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์ เปรียบเทียบกับระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผล จากการทดสอบ SLDV.....	82
5.3 เปรียบเทียบความถี่ระหว่างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลจากการ ทดสอบแบบชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดualสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	85
5.4 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดualสเตทแอกซ์วีเอเตอร์ เปรียบเทียบกับระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผล จากการทดสอบ SLDV.....	85
5.5 เปรียบเทียบความถี่จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลระหว่างซิง เกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์กับดualสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	86
5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึด หัวอ่านเปรียบเทียบกับระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบกับผลจากการทดสอบจากเครื่องซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	89

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเปรียบเทียบกับระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบจากเครื่องของซิงเกิลสเตทแอกซ์วีร์เอเตอร์ .....	90
5.8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเปรียบเทียบกับระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบจากเครื่องของซิงเกิลสเตทแอกซ์วีร์เอเตอร์กับดูอัลสเตทแอกซ์วีร์เอเตอร์ .....	91



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซึ่งเกิดสเตทแอกซ์ัวร์เอเตอร์.....	2
1.2 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคูอัลสเตทแอกซ์ัวร์เอเตอร์.....	2
1.3 แสดงสภาวะติมเฟิลกับ SST Tongue แนบสนิทกัน.....	3
1.4 แสดงสภาวะติมเฟิลกับ SST Tongue แยกออก.....	3
2.1 แสดงฟังก์ชันความถี่ของการตอบสนอง.....	6
2.2 แสดงลักษณะการสั่นสะเทือนของ Coil bending.....	9
2.3 แสดงลักษณะการสั่นสะเทือนของ Arm bending.....	9
2.4 แสดงลักษณะการสั่นสะเทือนของ Coil torsion.....	9
2.5 แสดงลักษณะการสั่นสะเทือนของ Coil cupping.....	10
2.6 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Coil bending.....	11
2.7 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Arm bending.....	11
2.8 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Coil torsion.....	12
2.9 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Coil cupping.....	12
2.10 กราฟแสดงผลการวัดในแนวตั้ง.....	13
2.11 รูปแสดงผลการวัดในแนวราบ (จำนวนโหมด).....	13
2.12 รูปแสดงความสัมพันธ์ของผลการวัดทั้ง 2 แบบ.....	14
2.13 แสดงระบะการกระจัดสัมพัทธ์ที่มีความแตกต่างของสัญญาณพลัส.....	15
2.14 พฤติกรรมของหัวอ่านที่สัญญาณความเร่ง 100 เมตร/วินาที <sup>2</sup> .....	16
2.15 พฤติกรรมของหัวอ่านที่สัญญาณความเร่ง 200 เมตร/วินาที <sup>2</sup> .....	16
2.16 พฤติกรรมของหัวอ่านที่สัญญาณความเร่ง 300 เมตร/วินาที <sup>2</sup> .....	16
2.17 แบบจำลองบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์.....	17
2.18 ตัวอย่างรูปแบบการตกกระแทกด้านล่าง (Bottom).....	18
2.19 บริเวณข้อมูลที่เกิดการสัมผัสกับฐานฮาร์ดดิสก์ โดรฟ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 50x).....	19
3.1 ฮาร์ดดิสก์โดรฟ์ (ขวา) และชิ้นส่วนที่ถูกประกอบเข้าเป็นฮาร์ดดิสก์โดรฟ์ (ซ้าย) [10].....	21
3.2 แขนจับหัวอ่านเขียนและส่วนประกอบต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์โดรฟ์ [10].....	22
3.3 แขนจับหัวอ่านเขียนแบบ Single stage actuator (SSA) [10].....	22
3.4 แขนจับหัวอ่านเขียนแบบ Dual stage actuator (DSA) [10].....	23
3.5 ส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน [10].....	23
3.6 ระบะการบินของหัวอ่านเขียน (Fly height) และขนาดเปรียบเทียบของตัวอย่างสิ่ง แปลกล้อม [10].....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงส่วนประกอบของหัวอ่านเขียน (Slider).....	25
3.8 แสดงส่วนประกอบของหัวเขียน.....	25
3.9 แสดงส่วนประกอบของหัวอ่านแบบ GMR.....	26
3.10 แสดงโครงสร้างของชิ้นส่วนต่างๆ ที่นำมาประกอบกันเป็น GMR Head.....	26
3.11 แสดง M1 และ M2 มีทิศทางเดียวกัน.....	27
3.12 แสดง M1 และ M2 มีทิศทางตรงกันข้าม.....	27
3.13 แสดงชิ้นส่วนของ HGA.....	28
3.14 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างของแผงวงจรไฟฟ้าชนิดออน.....	29
3.15 แสดงส่วนประกอบของ HGA Up / HGA Down ของ Hard Disk Drive 2.5"และ 3.5".....	30
3.16 ชิ้นส่วนประกอบของ HSA (Head stack assembly).....	30
3.17 แสดงลักษณะการอ่านเขียนสัญญาณของ HSA.....	31
3.18 ระบบสมมุติการสันสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง.....	33
3.19 การเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสันสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง.....	34
3.20 ระบบสมมุติการสันสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง.....	35
3.21 โอเวอร์แคมป์.....	36
3.22 คริติคอลลีแคมป์.....	36
3.23 อันเดอร์แคมป์.....	37
3.24 ระบบสมมุติการสันสะเทือนแบบบังคับที่ไม่มีตัวหน่วง.....	38
3.25 ระบบสมมุติการสันสะเทือนแบบบังคับที่มีตัวหน่วง.....	40
3.26 อัตราขยายการเคลื่อนที่เทียบกับอัตราส่วนความถี่.....	43
3.27 การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสเทียบกับอัตราส่วนความถี่.....	43
3.28 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสันสะเทือนแบบอิสระ.....	44
3.29 ระบบสมมุติหลายมวลที่มีการสันสะเทือนแบบอิสระ.....	45
3.30 ลักษณะของระบบสมมุติมวลคู่ในระบบพิกัดปกติและระบบพิกัดโมดัล.....	49
3.31 ระบบสมมุติหลายมวลที่มีการสันสะเทือนแบบบังคับ.....	50
3.32 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสันสะเทือนแบบอิสระ.....	52
3.33 รูปร่างการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละรูปแบบการสันสะเทือน.....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.34 แบบจำลองการทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่โดยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริเมตร.....	57
3.35 แสดงหน้าตาของโปรแกรมไฮเปอร์เมท [2].....	58
3.36 การแบ่งรูปร่างของปัญหาหรือแบบจำลองของออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ.....	58
4.1 รูปแสดงตัวอย่างขนาดของคานอย่างง่ายเพื่อใช้สำหรับการจำลองหาความถี่ธรรมชาติ.....	59
4.2 รูปแสดงความถี่ธรรมชาติของคานของโหมดที่1 [14].....	60
4.3 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	62
4.4 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	62
4.5 แสดงรูปเบสเพลท (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ (ข) แบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	63
4.6 เบสเพลท ของแบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ที่ประกอบด้วย PZT.....	63
4.7 โทลด์บีม (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ (ข) แบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	64
4.8 วงจรไฟฟ้าชนิดอ่อน (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ (ข) แบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	64
4.9 ชุดชุดจับยึดหัวอ่านเขียน (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ (ข) แบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	65
4.10 ชุดประกอบจับยึดหัวอ่านเขียน (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ (ข) แบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	65
4.11 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	66
4.12 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอ.....	66
4.13 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	68
4.14 รูปแบบในการกระตุ้นและการวัดการสั่นสะเทือนบนหัวอ่านเขียนสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	69
4.15 กราฟแสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	69
4.16 รูปแบบของการสั่นสะเทือนของโหมด 1 <sup>st</sup> Bending ของซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	70
4.17 รูปแบบของการสั่นสะเทือนของโหมด 1 <sup>st</sup> Torsion ของซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์..	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด Sway ของซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	71
4.19 กราฟแสดงผลการสั่นสะเทือนการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	71
4.20 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด 1 <sup>st</sup> Bending ของคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์....	72
4.21 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด 1 <sup>st</sup> Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์....	72
4.22 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด Sway ของคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	73
4.23 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด BP Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์....	73
4.24 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด 3 <sup>rd</sup> Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์... 74	74
4.25 แบบจำลองการทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านเขียนของ เครื่องทดสอบ SLDV .....	75
4.26 รูปแบบในการกระตุ้นและการวัดการสั่นสะเทือน.....	75
4.27 กราฟแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนของซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	76
4.28 กราฟแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนของคูอัลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์.....	76
4.29 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทำงาน.....	77
4.30 เครื่องมือสำหรับใช้ทดสอบการตกกระแทก (Shock tower).....	78
4.31 ผลจากความเร่งตอบสนองที่เครื่องทดสอบแสดง.....	79
4.32 แสดงเงื่อนไขของการวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไม่ทำงาน.....	80
5.1 กราฟแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนของการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์ .....	81
5.2 กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนของการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับผลจากการทดสอบ SLDV ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์ .....	82

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 กราฟแสดงผลของการสันสเทือนการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์ เอลิเมนต์ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดิวอัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	84
5.4 กราฟแสดงผลของการสันสเทือนการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์ เอลิเมนต์เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลจากการทดสอบ SLDV ของชุดจับยึดหัวอ่าน เขียนแบบดิวอัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	84
5.5 กราฟแสดงผลของการสันสเทือนพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างระหว่างซิงเกิลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์กับ ดิวอัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	86
5.6 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของ ชุดจับยึดหัวอ่านแบบ ซิงเกิลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	88
5.7 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านแบบ ดิวอัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	89
5.8 แสดงผลของความเร่งตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของเครื่องทดสอบ.....	91
5.9 แสดงผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของดิวอัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์.....	92
5.10 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านขณะเกิดจากสภาวะการตกกระแทก.....	93
5.11 แสดงการเคลื่อนที่ของโพลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที.....	93
5.12 แสดงการเคลื่อนที่ของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที.....	94
5.13 แสดงการเคลื่อนที่ของโพลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที.....	94
5.14 แสดงการเคลื่อนที่ของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที.....	95
5.15 แสดงการเคลื่อนที่ของโพลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที.....	95
5.16 แสดงการเคลื่อนที่ของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที.....	96
5.17 แสดงการเคลื่อนที่ของติมเพิล กับ SST Tongue.....	97
5.18 แสดงการเคลื่อนที่ของ SST Tongue และ ติมเพิล ที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที.....	97
5.19 แสดงการเคลื่อนที่ของ SST Tongue และ ติมเพิล ที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที.....	98
5.20 แสดงการเคลื่อนที่ของ SST Tongue และ ติมเพิล ที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที.....	98

# บทที่ 1

## บทนำ

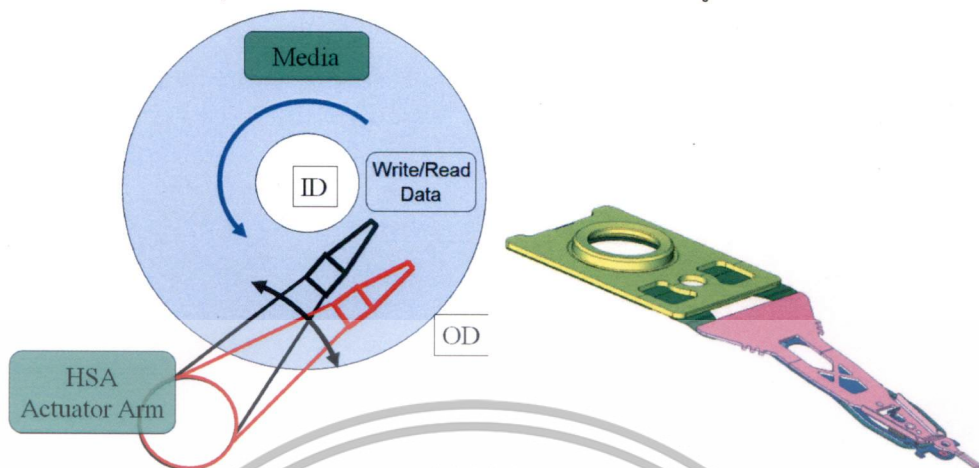
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้พัฒนาประสิทธิภาพเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างกว้างขวางเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นแต่ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กลง เช่น เครื่องเล่น เอ็มพีสาม กล้องดิจิทัล ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบพกพา เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะสำนักงาน จนกระทั่งรวมไปถึงคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ของระบบเครือข่าย

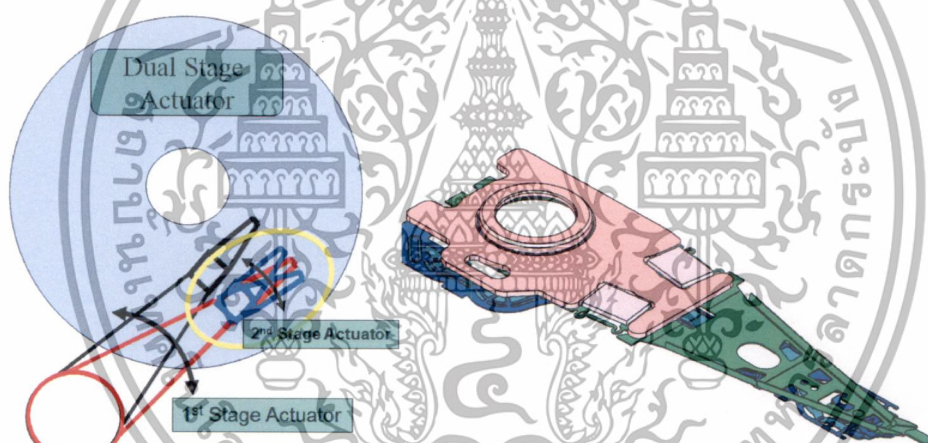
การสันสะเทือนแรงและกระแทกเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยากสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่อยู่ในรูปแบบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบพกพา คอมพิวเตอร์แบบพกพา กล้องวิดีโอ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อผู้บริโภคที่อยู่ในยุคแห่งเทคโนโลยี ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่อได้รับแรงกระแทกจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่การคิดค้นวิธีการป้องกันและการออกแบบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น อีกทั้งปัจจุบันนี้ อุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการพัฒนาความจุของการจัดเก็บข้อมูลให้มากขึ้นแต่ยังคงไว้ซึ่งขนาดของแผ่นดิสก์ไดรฟ์เท่าเดิม ซึ่งในอนาคตยังคงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความจุให้มากขึ้นเรื่อยๆ การเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะกระทำโดยสร้างสนามแม่เหล็กลงบนแผ่นดิสก์ (Platter) ซึ่งแผ่นดิสก์แต่ละด้าน จะเก็บข้อมูลตามแนวของเส้นรอบวง ซึ่งแนวของเส้นรอบวงบนแผ่นดิสก์นั้นเรียกว่าร่องเก็บข้อมูล (Track) ซึ่งในแต่ละร่องเก็บข้อมูลจะมีการแบ่งออกเป็นช่วงๆ ย่อยออกไปอีกเรียกว่า แชนกเตอร์ (Sector) ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึง การเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนไปบนตำแหน่งต่างๆ ได้บนแผ่นที่มีขนาด แชนกเตอร์เล็กมากๆ การทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นจะมีชุดจับยึดหัวอ่านเขียนอยู่ 2 รูปแบบ คือแบบ ซิงเกิลสเตตแอคชูเอเตอร์ (Single state actuator, SSA) ซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียน จากการเคลื่อนที่ของชุดหัวอ่านเขียนสำเร็จ (Head stack assembly, HSA) ได้เพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 1.1 โดยตัวชุดจับหัวอ่านเขียนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบนแผ่นดิสก์ด้วยตัวเองได้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอ่านเขียน เนื่องจากการเพิ่มแชนกเตอร์ให้มีขนาดเล็กลง จึงจำเป็นต้องพัฒนาชุดจับยึดหัวอ่านเขียนที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้อย่างละเอียดและมีประสิทธิภาพ โดยการควบคุมให้ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเคลื่อนที่ได้จากทั้ง HSA และตัวชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเอง ซึ่งเรียกว่าชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ดูอัลสเตตแอคชูเอเตอร์ (Dual state actuator, DSA) นอกจากจะสามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นดิสก์โดยอาศัยการทำงานของ HSA แล้วตัวชุดจับหัวอ่านเขียนยังถูกออกแบบมาให้

เอกลักษณะเป็นเอกลักษณ์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขของเงื่อนไขในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะที่แคบและแม่นยำมากขึ้นได้ด้วยตัวของชุดจับหัวอ่านเขียนเอง โดยการอาศัยหลักการทำงานของวัสดุเพียโรโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ (PZT) ดังรูปที่ 1.2



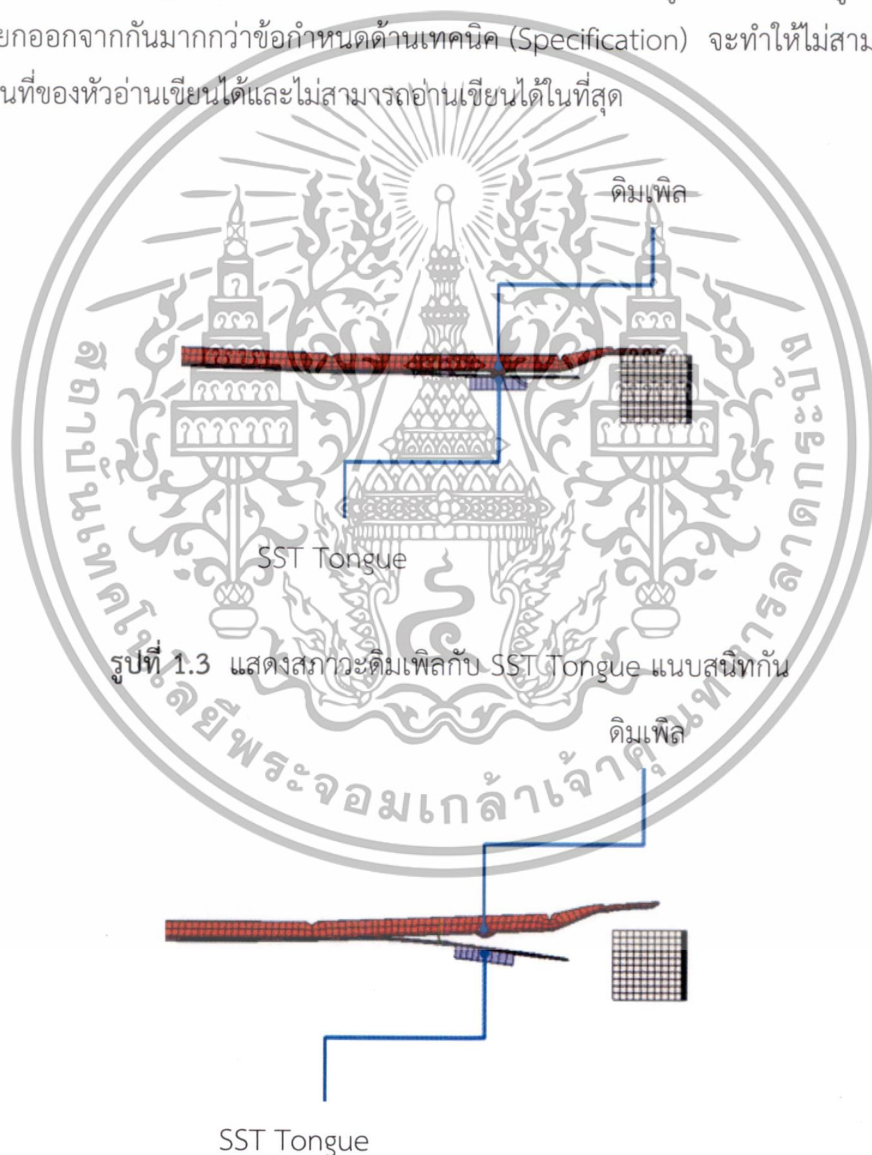
รูปที่ 1.1 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตจแอกชูเอเตอร์



รูปที่ 1.2 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดวลสเตจแอกชูเอเตอร์

เนื่องจากชุดจับยึดหัวอ่านเขียนทั้ง 2 รูปแบบ ซิงเกิลสเตจแอกชูเอเตอร์และดวลสเตจแอกชูเอเตอร์ มีความแตกต่างกันทั้งทางด้านรูปแบบและสมรรถนะ ซึ่งการออกชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดวลสเตจแอกชูเอเตอร์ เบสเพลทและโพลดรัมจะต้องออกแบบให้มีพื้นที่เพื่อวาง PZT ลงไปบนตัวผลิตภัณฑ์ เพื่อสมรรถนะในการเคลื่อนที่ของหัวอ่านไปบนร่องเก็บข้อมูลที่มีขนาดเล็ก และเพื่อตอบสนองการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั่นเอง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของชุดจับยึดหัวอ่านแบบดวลสเตจแอกชูเอเตอร์ งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบของการสั่นสะเทือนพร้อมทั้งวิเคราะห์การตกกระแทกทั้ง 2 รูปแบบ คือการวิเคราะห์ในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน (Operation shock analysis) และในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน (Non-operation shock analysis) ในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานนั้นหัวอ่านเขียนจะถูกยกด้วยแอกชูเอเตอร์เป็นแอกชูเอเตอร์ที่ส่งแรงไปยังเบสเพลทใช้แรงเพื่อออกสั่นสะเทือนไปยังจานดรัมซึ่งประโยชน์ที่จะนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงของอากาศภายใต้หัวอ่านเขียนมีหน่วยเป็นกรัม (Gram) ซึ่งการวิเคราะห์การตกกระทงในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานนั้นเป็นการทำนายค่าขนาดของความเร่งในแนวดิ่ง (Gravity G) ของการตกกระทงที่ส่งผลให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ ซึ่งแสดงว่าจะต้องมีปริมาณความเร่งของการตกกระทงที่มากพอเพื่อให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ซึ่งเรียกว่าค่า Lift-off shock สำหรับการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อเพิ่ม Lift-off shock จึงเป็นสิ่งจำเป็น นั่นหมายความว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถทนแรงตกกระทงที่ระดับความสูงที่มากขึ้น สำหรับการวิเคราะห์การตกกระทงในสภาวะขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงานนั้น จะทำการวิเคราะห์เฉพาะชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดิวอัลสเททแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ และโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น เพื่อทำนายระยะการเคลื่อนที่ของ SST Tongue กับดิมเพิลที่แยกออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ รูปที่ 1.4 ซึ่งถ้าระยะที่แยกออกจากกันมากกว่าข้อกำหนดด้านเทคนิค (Specification) จะทำให้ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนได้และไม่สามารถอ่านเขียนได้ในที่สุด



รูปที่ 1.3 แสดงสภาวะดิมเพิลกับ SST Tongue แนบสนิทกัน

รูปที่ 1.4 แสดงสภาวะดิมเพิลกับ SST Tongue แยกออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการตอบสนองของการสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมกับเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลองของ ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์กับคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมกับเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลองของ ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์กับคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์ ขณะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงาน

1.2.3 เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อระยะการเคลื่อนที่ของโพลดรัมและกิมบอล จากการตกกระแทก โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์ ขณะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงาน

1.2.4 เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อระยะการเคลื่อนที่ของดิมเพิลกับ SST Tongue จากการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์ขณะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟไม่ทำงาน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS V.13

1.3.2 ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว

1.3.3 งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลของการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการการทดสอบของบริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซีชั่น เทคโนโลยี ประเทศไทย

1.3.4 วิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเท่านั้น

1.3.5 การวิเคราะห์กระทำภายใต้เงื่อนไขที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงาน

1.3.6 การวิเคราะห์กระทำภายใต้เงื่อนไขที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟไม่ทำงาน

## 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 สำนักรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลต่างๆ

1.4.2 ศึกษาโครงสร้าง ส่วนประกอบ และหลักการทำงานของฮาร์ดดิสก์

1.4.3 สร้างชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ด้วยข้อมูลที่ได้รับคำแนะนำ มาจากบริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซีชั่น เทคโนโลยี ประเทศไทย โดยโปรแกรม SolidWorks 2012

1.4.4 กำหนดคุณสมบัติของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนศึกษาการใช้งานและทดสอบโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS V.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.5 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS V.13 เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนและการตกรรณะแตกของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1.4.6 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลลัพธ์ที่ได้

1.4.7 จัดทำรายงานและนำเสนอวิทยานิพนธ์

1.4.8 แก้ไขวิทยานิพนธ์และเผยแพร่ผลงานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถทราบถึงคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1.5.2 สามารถทราบถึงผลกระทบของการตกรรณะแตกของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

1.5.3 เป็นแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขชุดจับยึดหัวอ่านเขียน

1.5.4 เพื่อเพิ่มพูนความรู้อันจะนำไปสู่งานวิจัยในด้านอื่นต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

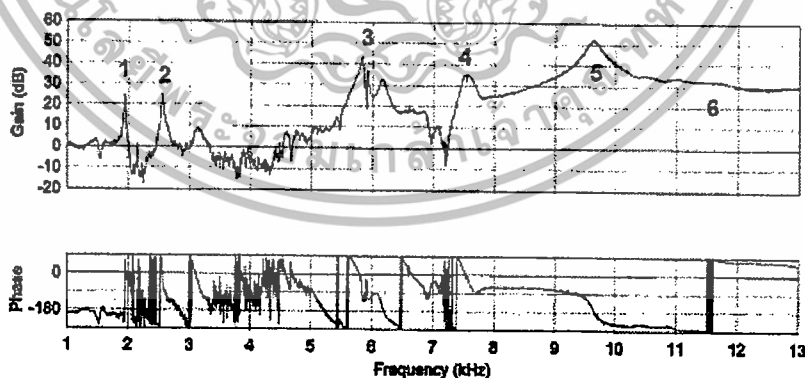
## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสันสะท้อนเชิงกล

ในปี พ.ศ. 2546 S. Kilian และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบ Single state ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการใช้เทคนิควิธีของ Topology optimization topography optimization และรวมทั้ง 2 เทคนิคเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของโหมดของความถี่ต่างๆ เช่น โหมดของการโก่งตัว (Bending mode) การบิดตัว (Torsion mode) และโหมดพลิ้วไหว (Sway mode) สำหรับชุดจับยึดหัวอ่านที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ในส่วนของประสิทธิภาพเชิงกลที่ต้องการของชุดจับยึดหัวอ่านนั้นจะต้องมีการโหมดการโก่งตัวน้อย และจะต้องมีความแข็งแรงในโหมดของการบิดตัว และโหมดพลิ้วไหว

งานวิจัยชิ้นนี้จะทำการหาประสิทธิภาพเชิงกลของชุดประกอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยการใช้ โปรแกรม Altair optiStruct [2] เพื่อใช้ในการออกแบบรูปร่างของตัวชุดจับยึดหัวอ่านที่มีความถี่ที่ต้องการของแต่ละโหมด ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับน้ำหนัก ปริมาตร การเคลื่อนที่ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงกลให้ได้ตามที่ต้องการหลังจากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดลอง

สำหรับการวัดประสิทธิภาพเชิงกลของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น จะออกมาในรูปแบบของฟังก์ชันความถี่ของการตอบสนอง (Frequency response function, FRF) ซึ่งจะต้องใช้เครื่องมือวัดที่สามารถทดสอบชิ้นงานที่มีความถี่สูงๆ ได้ด้วย ผลที่ได้จากการวัดนั้นปรากฏดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงฟังก์ชันความถี่ของการตอบสนอง

สำหรับผลการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบผลการทดลองของประสิทธิภาพเชิงกลของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นปรากฏดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์

Main modes	Simulation (Hz)	Experiment (Hz)	Delta [%]
First bending	1,950	1,970	-1.02
First torsion	2,560	2,860	-10.49
Second bending	5,870	5,830	0.69
Second torsion	7,500	7,210	4.02
Sway	9,696	9,470	2.39
Flapping	11,000	11,200	-1.79

ในปี พ.ศ. 2550 พิพัฒน์ อำไพพัฒน์กุล และคณะ [3] ศึกษาถึงการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบร์ริง (Pivot bearing) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้เป็นแกนหมุนของแขนหัวอ่านเขียน (Actuator arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive, HDD) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสะเทือนของแบร์ริง พร้อมกับเปรียบเทียบค่าที่ได้กับการทดสอบโดยใช้ Scanning laser doppler vibrometer (SLDV) เป็นเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนทางแสง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบด้วย SLDV แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติ ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบร์ริงและพัฒนาหรือทำวิจัยในระดับสูงต่อไป

ผลการทดสอบที่ได้จาก SLDV จะอยู่ในรูป FRF ของแบร์ริง ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าลักษณะของการสั่นสะเทือนจากการวัดทั้ง 5 จุดนั้น สามารถบอกได้ว่า การสั่นสะเทือนในโหมดแรกนั้นเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแนวแกนหรือการสั่นขึ้นลงของแบร์ริง (Axial vibration) เพราะในตำแหน่งในการวัดของจุดที่ Sleeve1 Sleeve2 และ Sleeve3 เป็นการวัดจากด้านบนและมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าทางด้านข้างในตำแหน่ง Side top และ Side bottom อธิบายได้ว่าเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในแนวแกน และในโหมดของการเคลื่อนที่ต่อมาเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากตัวฐานที่ยึดทำการทดลอง (Fixture) เพราะว่าได้ทำ การทดสอบเพียงแค่ตัวฐานเพียงอย่างเดียวและผลของการตอบสนองการสั่นเกิดขึ้นในส่วนของฐานยึดของการทดสอบ ได้และแสดงค่าของความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวัดด้วย SLDV กับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

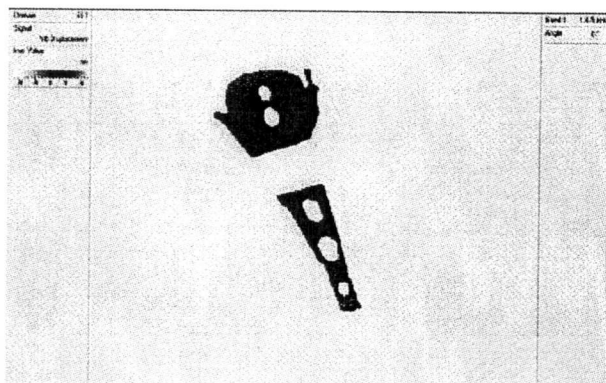
โหมด (Mode)	ความถี่ธรรมชาติ SLDV (Hz)	ความถี่ธรรมชาติ FEM (Hz)	% ความผิดพลาด
Sleeve 1	7,788	7,862	1.0
Sleeve 2	7,808	7,862	0.7
Sleeve 3	7,808	7,862	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

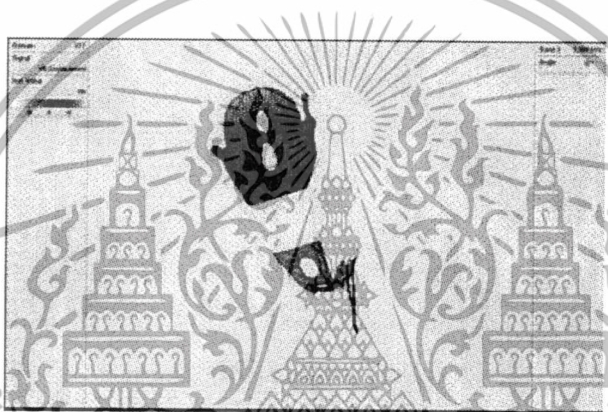
ในปี พ.ศ. 2550 นายเทวิน พันภัย และคณะ [4] ศึกษาถึงการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสะเทือนของหัวอ่านเขียน พร้อมกับเปรียบเทียบค่าที่ได้กับการทดสอบโดยการใช่ SLDV เป็นตัววัดการสั่นสะเทือนทางแสง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลจากการทดสอบด้วย SLDV แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติ ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ในบทความนี้การสั่นสะเทือนของ HSA จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และตรวจสอบโดยการใช่ SLDV เป็นตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนทางแสง เพื่อทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของ HSA การสั่นสะเทือนของ HSA นั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น เกิดจากตัวขับเคลื่อน (Voice coil motor, VCM) หรือเกิดจากอากาศไหลวนบนแผ่นดิสก์เนื่องจากการหมุนของแผ่นดิสก์ (Air flow) จากปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดการเสียหายจากการอ่านข้อมูลของตัวหัวอ่านได้ในงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในส่วนที่เกิดการสั่นสะเทือนจากตัว VCM เพียงอย่างเดียวทั้งนี้เพื่อเป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วย SLDV เพื่อจะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับการใช้งานจริง และจะนำแบบจำลองที่ได้ไปปรับปรุงหรือพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

ผลการทดสอบที่ได้จาก SLDV จะอยู่ในรูปความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการสั่นสะเทือนของหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ผลการทดสอบจาก SLDV ได้เลือกมาทั้งหมด 4 รูปแบบในการสั่นสะเทือนด้วยกัน เพื่อจะเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในส่วนของรูปแบบการสั่นสะเทือนคือ การเคลื่อนที่ในส่วนของคอยล์ (Coil bending) ลักษณะจะเป็นการบิดตัวขึ้นลงของคอยล์ ส่วนการเคลื่อนที่ต่อมาเป็นการเคลื่อนที่ในส่วนของแขน (Arm bending) จะมีลักษณะคล้ายกับรูปแบบแรกจะแตกต่างกันตรงตำแหน่งของการเคลื่อนที่ รูปแบบของการเคลื่อนที่ต่อมาเป็นการเคลื่อนที่บิดไปบิดมาของคอยล์ (Coil torsion) เป็นการบิดตัวขึ้นลงในส่วนของคอยล์ และรูปแบบสุดท้ายที่จะแสดงคือเป็นการเคลื่อนที่คล้ายรูปถ้วย (Coil cupping) จากการทดสอบสามารถอธิบายได้ว่าความถี่ธรรมชาติ ที่ได้จากการทดสอบนั้น มีการเคลื่อนที่ในหลายมิติ ลักษณะของการสั่นสะเทือนนั้นก็สามารถบอกได้ว่า ส่วนต่างๆ ของหัวอ่านเขียน มีความถี่ของวัสดุที่สามารถตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนเมื่อมีแรงมากระทำจากภายนอกมีความถี่เท่าไรค่าความถี่ของวัสดุหรือความถี่ธรรมชาติ



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการสันสะท้อนของ Coil bending

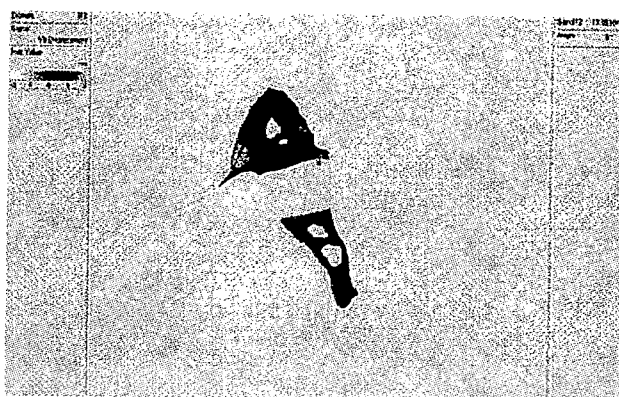


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการสันสะท้อนของ Arm bending



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการสันสะท้อนของ Coil torsion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



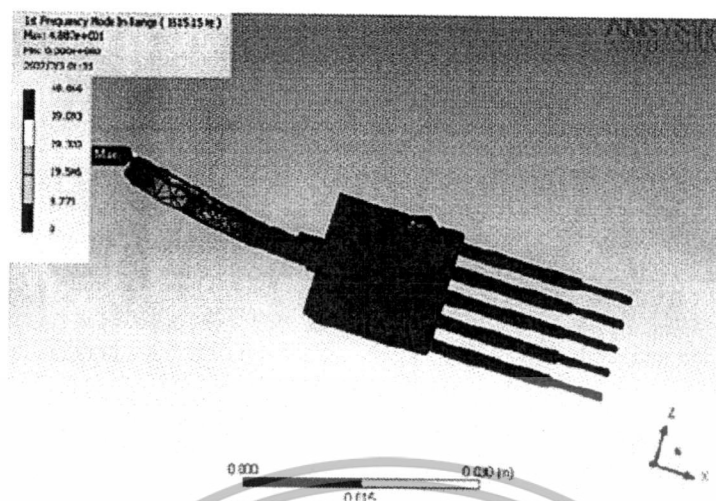
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการสันสะท้อนของ Coil cupping

ตารางที่ 2.3 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย SLDV

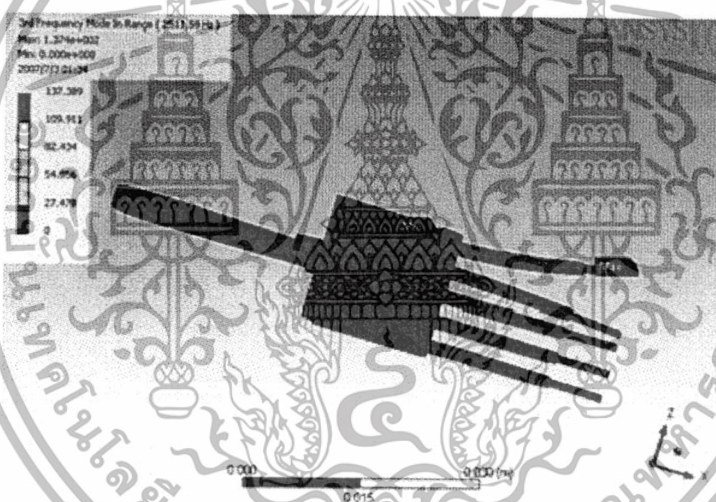
โหมด (Mode)	ความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบด้วย เครื่อง SLDV (Hz)
Coil Bending	1,875
Arm Bending	2,500
Coil Torsion	6,688
Coil Cupping	11,880

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตให้มีความใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากที่สุด เริ่มจากการสร้างแบบจำลองให้เหมือนกับวัตถุที่จะมาทดสอบมากที่สุด หลังจากนั้นเลือกรูปแบบที่จะทำการทดสอบ สำหรับในงานวิจัยนี้ทำ การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ และก็มาถึงขั้นตอนสำคัญคือ การกำหนดเงื่อนไขของขอบเขต เช่น คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ การยึดวัตถุและการกำหนดแรงที่จะมากระตุ้นต่อวัตถุ ผลการทดสอบด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เลือกรูปแบบที่จะมาเปรียบเทียบทั้งหมด 4 รูปแบบด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

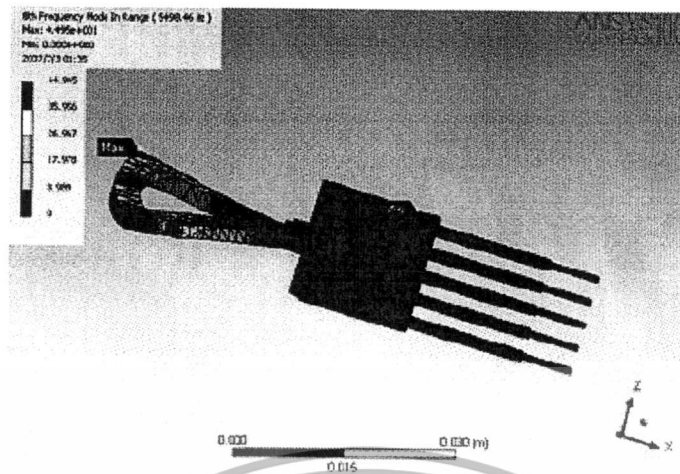


รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Coil bending

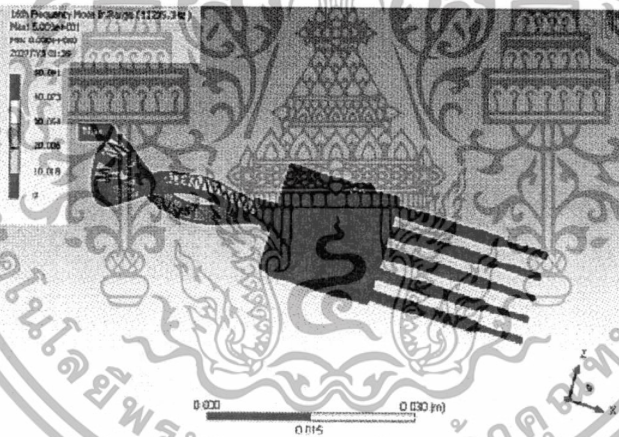


รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Arm bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Coil torsion



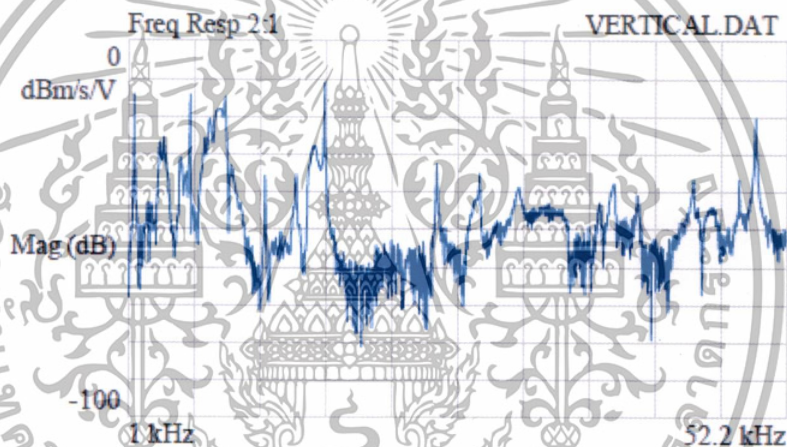
รูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมด Coil cupping

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย SLDV กับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

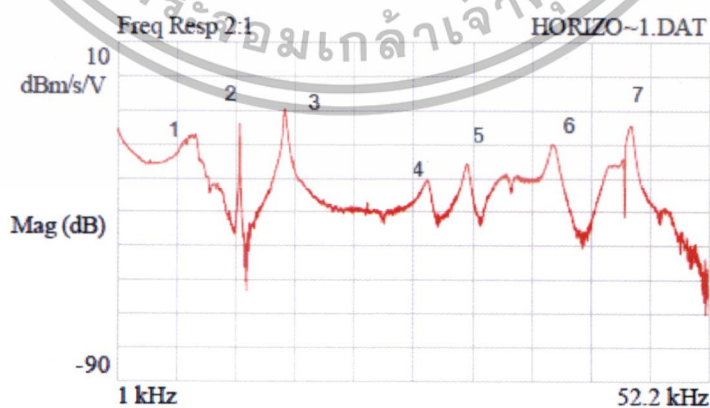
โหมด (Mode)	ความถี่ธรรมชาติ SLDV (Hz)	ความถี่ธรรมชาติ FEM (Hz)	% ความผิดพลาด
Coil Bending	1,875	1,615	13
Arm Bending	2,500	2,511	0.5
Coil Torsion	6,688	5,498	17
Coil Cupping	11,880	11,235	5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการในโครงการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2554 สราวุธ สุขสวัสดิ์ และคณะ [5] ทำการศึกษาการวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบและแนวตั้งของ Actuator arm โดยใช้ SLDV จากผลการทดลองการวัดการสั่นสะเทือน ทั้ง 2 แบบสามารถจำแนกได้ดังนี้ การวัดในแนวราบ (Sway mode) จะสามารถได้กราฟที่จะแสดงผล Peak ของโหมดในการเคลื่อนที่ได้อย่างชัดเจนกว่าเมื่อหากเปรียบเทียบจากการวัดในแนวตั้ง โหมดการดัด และพบว่ามียางโหมดในการเคลื่อนที่จากการวัดทั้ง 2 แบบมีความสัมพันธ์กัน นั่นคือเกิดการเคลื่อนที่พร้อม กันทั้ง 2 แนวแกน โหมดการบิด ในโหมด 3 4 5 และ 6 ซึ่งสามารถนำค่าขึ้นไปประยุกต์ในการใช้งานได้และ ที่สำคัญมีบางโหมดในการเคลื่อนที่ สามารถพบได้แต่ในแนวราบไม่สามารถพบในแนวตั้ง เช่นโหมดที่ 1 2 และ 7 ซึ่งทำให้พิสูจน์ได้ว่าการวัดในแนวราบก็มีความสำคัญเช่นกัน สำหรับการวัดการวัดการสั่นสะเทือนของ Actuator arm

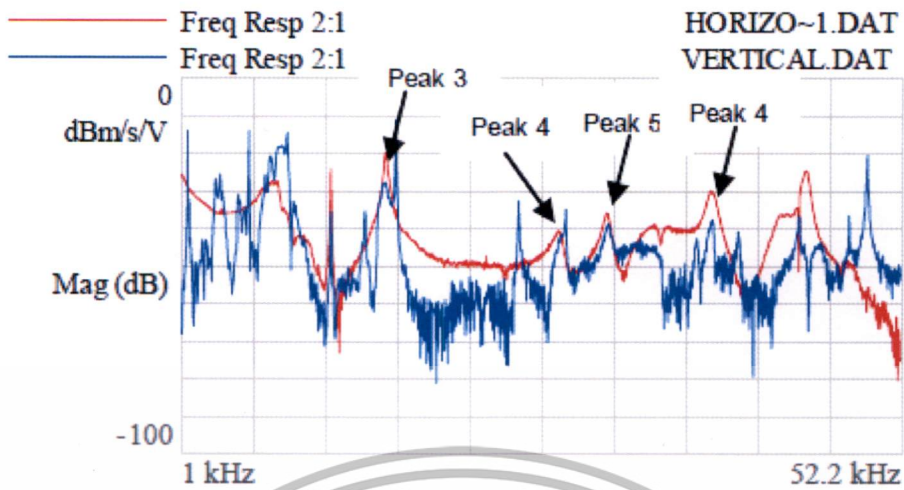


รูปที่ 2.10 กราฟแสดงผลการวัดในแนวตั้ง



รูปที่ 2.11 รูปแสดงผลการวัดในแนวราบ (จำนวนโหมด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 รูปแสดงความสัมพันธ์ของผลการวัดทั้ง 2 แบบ

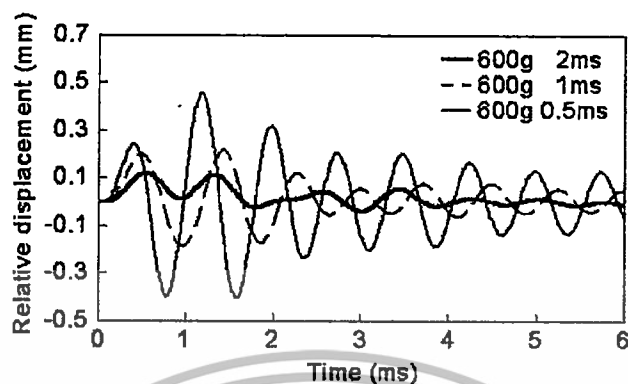
ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดทั้ง 2 แบบ

การวัด/Peak	แนวตั้ง (Hz)	แนวราบ (Hz)
Peak Mode 3	15.46	15.52
Peak Mode 4	28.36	27.88
Peak Mode 5	31.40	31.27
Peak Mode 6	38.79	38.72

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการตกกระแทกเชิงกล

ในปี พ.ศ. 2548 Dong-Wei Shua และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulses width) กับความกว้างของสัญญาณแอมพลิจูด (Pulses width amplitude) ของ Half-sine acceleration วิเคราะห์ด้วยวิธีการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการศึกษาแบบพลศาสตร์ของชิ้นส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพียงอย่างเดียว ไม่ได้รวมถึงแผ่นบันทึกข้อมูลหรือชิ้นส่วนประกอบของ Suspension แต่อย่างใด ซึ่งใช้โปรแกรมของ LS-DYNA3D ในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์จะจำลองให้เป็นการตกลงในแนวตั้ง ชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองประกอบไปด้วย Arm actuator pivot และ Voice coil motor (VCM) Arm actuator จะใช้คุณสมบัติของวัสดุ ของอลูมิเนียม Aluminum 6061-T6 (73 GPa) และในส่วนของ Pivot เป็นวัสดุเหล็กสแตนเลส (Stainless steel 200 GPa) ส่วนตัว VCM ประกอบไปด้วย การและทองแดง ค่าความหนืดเป็นกำหนดให้เป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.06 ซึ่งค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเหล่านี้เราสามารถที่ใส่เข้าไปในโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วย สำหรับตัว Pivot จะจำลองให้เป็นสปริงเอลิเมนต์ ความแข็งแรงนั้นจะขึ้นอยู่กับรัศมีความยาวและแกนของสปริงเอลิเมนต์



รูปที่ 2.13 แสดงระยะการกระจัดสัมพัทธ์ที่มีความแตกต่างของสัญญาณพัลส์

จากรูปที่ 2.14 เราจะพบได้ว่าค่าการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดเกิดขึ้นในขณะที่สัญญาณพัลส์ Pulses width ที่ 0.5 มิลลิวินาทีด้วยระยะ 0.48 มิลลิเมตร 1 มิลลิวินาที ด้วยระยะ 0.23 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิวินาที ด้วยระยะ 0.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ

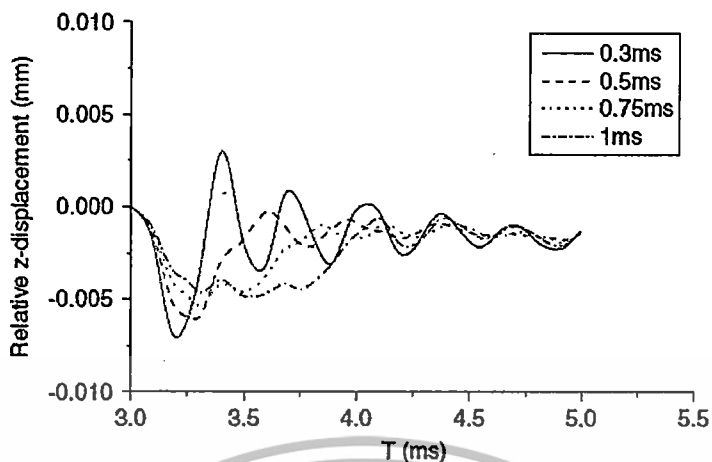
ในปี พ.ศ. 2549 J. Luo และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่มีผลต่อการตอบสนองของการตกระแหกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม Ansys ศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองจากการตกระแหกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ชิ้นส่วนประกอบของ Head stack assembly (HSA) ซึ่งจะรวมกับชิ้นส่วนของ Pivot ด้วย เริ่มด้วยด้วยการหาความถี่ธรรมชาติเปรียบเทียบกับระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองผลปรากฏในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตารางเปรียบเทียบการหาความถี่ธรรมชาติของ HSA ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

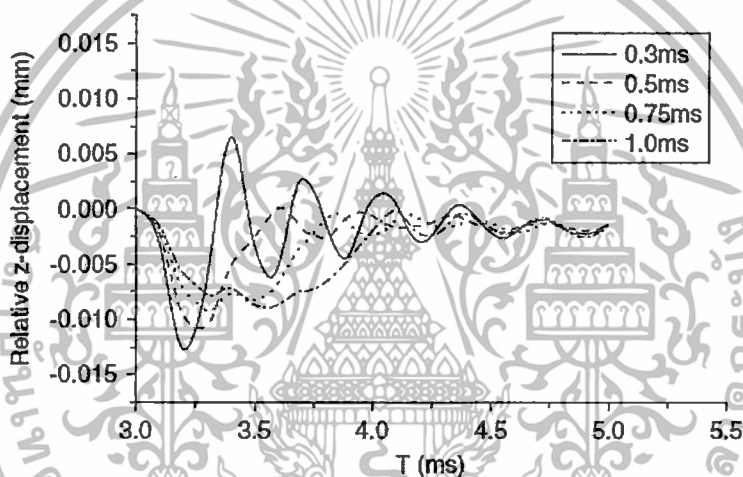
Mode ID	Simulation (Hz)	Experiment (Hz)
First free bending	258	255
Second free bending	3,680	3,766
First bending	3,520/3,622	3,700
Second bending	9,980/11,830	10,080

สำหรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่มีผลกระทบต่ออาการตกระแหกนั้น จะศึกษาพฤติกรรมของหัวอ่านที่ความแรงของการตกระแหกที่แตกต่างกันไปเริ่มตั้งแต่สัญญาณพัลส์ 0.3 ถึง 1.0 มิลลิวินาที ในส่วนของแอมพลิจูด ที่เลือกใช้สำหรับการศึกษาคือ 100 200 และ 300 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ตามลำดับ งานวิจัยชิ้นนี้จะเน้นที่ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของหัวอ่านเขียน เมื่อมีความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่เปลี่ยนไปและการเกิดริโซแนนซ์ของ HSA ผลการศึกษาปรากฏดังรูป

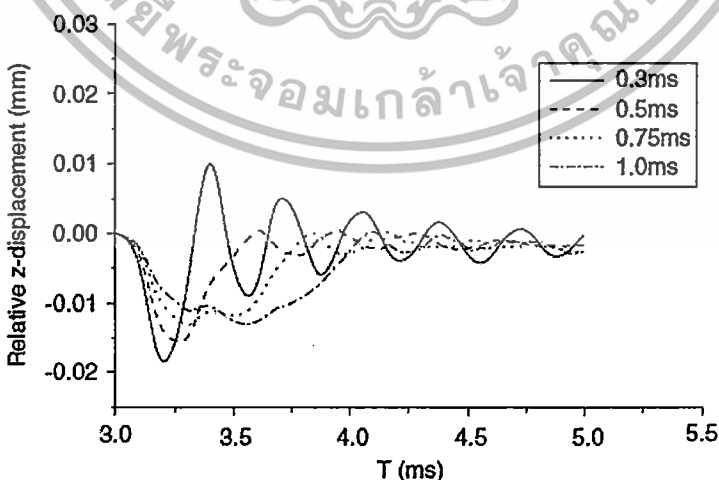
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นชอบใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 พฤติกรรมของหัวอ่านที่สัญญาณความเร่ง 100 เมตร/วินาที<sup>2</sup>



รูปที่ 2.15 พฤติกรรมของหัวอ่านที่สัญญาณความเร่ง 200 เมตร/วินาที<sup>2</sup>



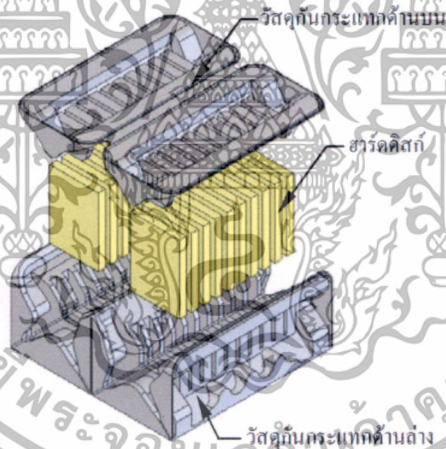
รูปที่ 2.16 พฤติกรรมของหัวอ่านที่สัญญาณความเร่ง 300 เมตร/วินาที<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

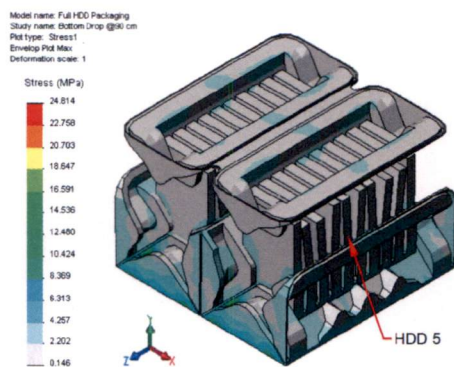
จากผลการศึกษาที่ปรากฏดังรูปที่ 2.15 รูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17 นั้นสัญญาณความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 0.3 มิลลิวินาที เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 0.5 0.75 และ 1.0 มิลลิวินาที ตามลำดับ ซึ่งผลสรุปก็คือความกว้างของสัญญาณพัลส์มีผลกระทบต่อการตอบสนองของภาคกระแทกของฮาร์ดดิสก์ได้र्फ

ในปี พ.ศ. 2551 เรื่องฤทธิ์ สารางคำ และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการจำลองการตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ เป็นการศึกษาการตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ จากการตกกระแทกในทิศทาง และความสูงต่างๆ โดยการศึกษาได้มีการจำลองการตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ COSMOSWork2007 [13] ซึ่งการจำลองลักษณะของทิศทางของการตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์นั้น ได้ทำการจำลอง 8 กรณี คือ ด้านล่าง ด้านข้าง ด้านหน้าด้านบน มุม และขอบประกอบมุม 3 ขอบ ที่ระดับความสูง 60 80 และ 90 เซนติเมตร โดยผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปของแรงเนื่องจากความเร่ง การเปลี่ยนแปลงความเร็ว และค่าความเค้น ที่เกิดขึ้นกับฮาร์ดดิสก์ในกล่องบรรจุภัณฑ์ จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้สามารถนำเอาวิธีการนี้ไปใช้ทำการทดสอบกับรูปแบบบรรจุภัณฑ์ใหม่ๆ ในอนาคต โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบกับผลิตภัณฑ์จริงๆ นอกจากนี้ยังใช้เพื่อทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 2.17 แบบจำลองบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างรูปแบบการตกกระแทกด้านล่าง (Bottom)

ตารางที่ 2.7 การตรวจสอบผลการจำลองกับการทดสอบ

Directions	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )		Error (%)
	Simulations	Experiment	
Bottom	142.33	131.38	8.33
Front	75.72	63.28	19.66
Side	53.08	48.00	10.58
Top	118.38	105.58	12.12
Front Edge	71.44	67.48	5.87

ในปี พ.ศ. 2555 เจษฎา ตรีรารักษ์ และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ผลของสนับเบอร์ บนฐานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายใต้ผลกระทบของแรงกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีความสำคัญในเครื่องคอมพิวเตอร์ การป้องกันแผ่นดิสก์จากแรง กระแทกจึงมีความสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อนำไปสู่การป้องกันข้อมูลให้มีความปลอดภัย งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการติดตั้ง สนับเบอร์ (Snubber) บนฐานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Base plate) ขนาด 3.5 นิ้ว เพื่อป้องกันความเสียหายของข้อมูลบน แผ่นดิสก์ภายใต้ผลกระทบของแรงกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมของผลดังกล่าวใน 2 กรณี คือ 1) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่มีสนับเบอร์ และ 2) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีสนับเบอร์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองจริง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าสนับเบอร์ช่วยป้องกันการกระแทกระหว่างส่วน ที่จัดเก็บข้อมูลบนแผ่นดิสก์กับฐานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงานได้ จึงเป็นการช่วยปกป้องความเสียหายของข้อมูล

ผลการทดลองจริงเมื่อปล่อยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ชนิดไม่มีสนับเบอร์ตกจากที่สูงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกสู่พื้น จากนั้นทำการตรวจสอบความเสียหายของข้อมูลที่อาจเกิดขึ้นบนแผ่นดิสก์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยแสง และกล้องจุลทรรศน์พบว่า ระยะเวลาสูงที่ ก่อให้เกิดความเสียหายของข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้คือ ระยะเวลาสูง 10 15 และ 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.19 สำหรับระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูง 5 เซนติเมตร ไม่พบความเสียหายใดๆบนแผ่นดิสก์ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2.19 บริเวณข้อมูลที่เกิดการสัมผัสกับฐานฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 50x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

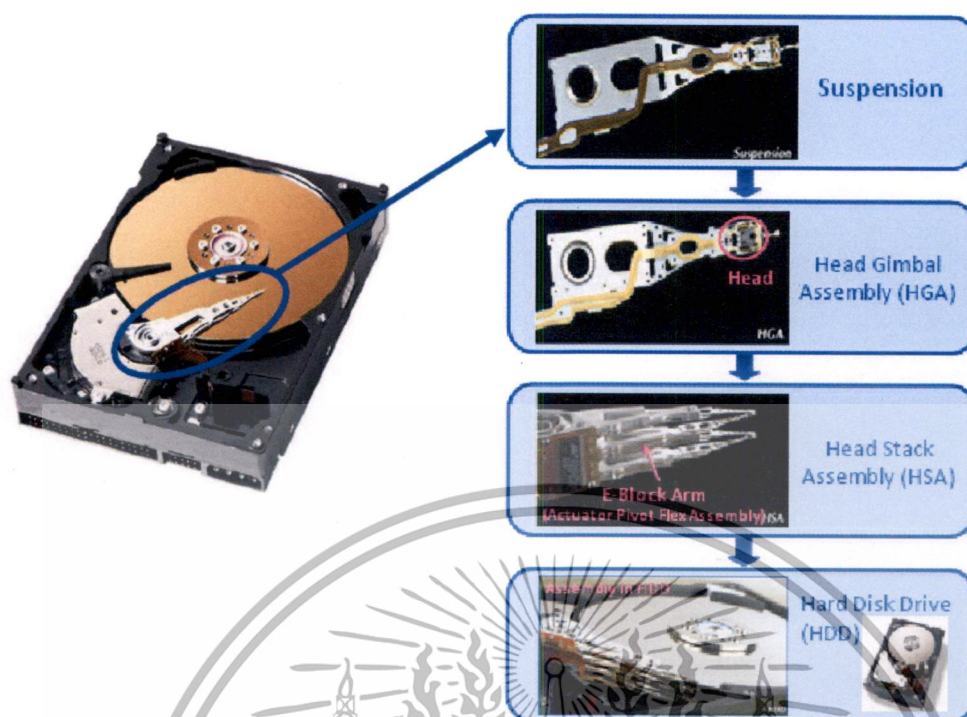
### 3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ระบบข้อมูลข่าวสารที่ต้องมีความแม่นยำและเที่ยงตรงในโลกธุรกิจ และในยุคปัจจุบัน เป็นสิ่งที่จะต้องพัฒนาควบคู่ไปกับการเติบโตของทุกอุตสาหกรรม คอมพิวเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวก ใช้ในการเก็บข้อมูลข่าวสารและเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เป็นหน่วยเก็บข้อมูลหลักในเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมาก ทำให้เกิดการขยายตัวในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ทิศทางที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

สำหรับในประเทศไทยพบว่า มีการเติบโตและการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากการที่บริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่างเข้ามาตั้งฐานการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น บริษัท Seagate Technology ที่จังหวัดนครราชสีมา บริษัท Western Digital ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา บริษัท Hitachi GST ที่จังหวัด ปราชินบุรี ก่อให้เกิดการแข่งขันที่สูงขึ้นทั้งด้านคุณภาพ ด้านราคา และด้านการบริการของกลุ่มผู้ส่งมอบ (Supplier) ส่งผลให้ทุกบริษัทพยายามหาวิธีการและแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพ ให้ผลิตภัณฑ์ของตนมีคุณภาพสูงอยู่เหนือคู่แข่ง พร้อมไปกับการลดของเสีย การลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการผลิตให้ต่ำที่สุดด้วย เพื่อให้บริษัทสามารถดำรงอยู่ในอุตสาหกรรมได้ และเพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [10] (Hard disk drive : HDD) เป็นอุปกรณ์ส่วนสำคัญในคอมพิวเตอร์ ที่ใช้เป็นหน่วยความจำในการเก็บข้อมูลต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ เมื่อถูกบันทึกแล้วจะสามารถเรียกกลับมาใช้งานใหม่ หรือทำการแก้ไขข้อมูลที่บันทึกไว้แล้วได้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อความปลอดภัย และป้องกันการสูญหายของข้อมูล

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบขึ้นจากชุดจับยึดหัวอ่านสำเร็จ (Head stack assembly, HSA) ที่เกิดจากการประกอบ ชิ้นส่วนหัวอ่านเขียนประกอบสำเร็จ (Head gimbal assembly, HGA) หลายตัวเข้าด้วยกันบน E-Block (Actuator pivot flex assembly) โดย HGA เกิดจากการประกอบหัวอ่านเขียน (Head slider) เข้ากับแขนจับหัวอ่านเขียน (Suspension) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

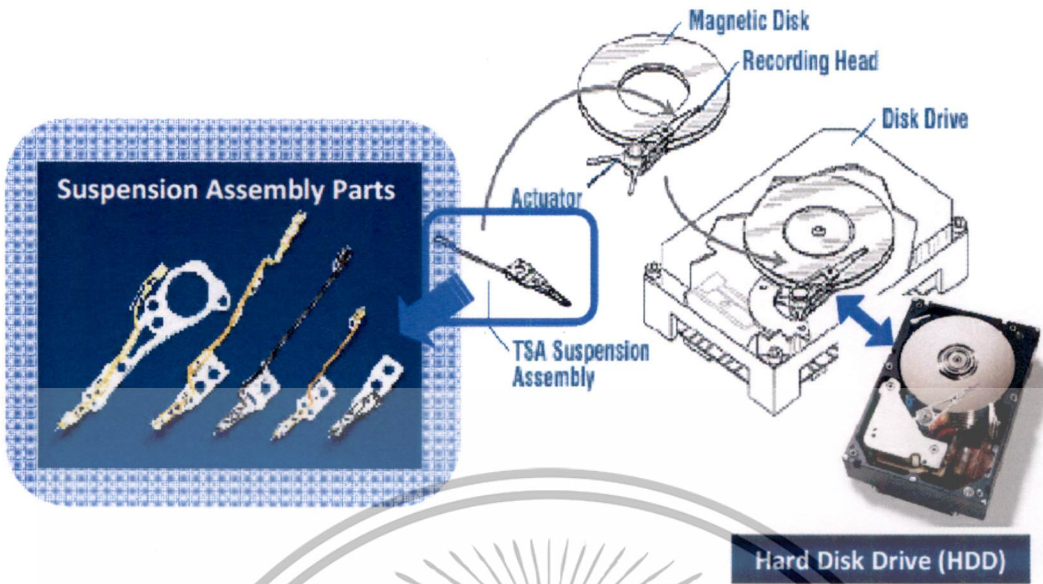


รูปที่ 3.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ขวา) และชิ้นส่วนที่ถูกประกอบเข้าเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ซ้าย) [10]

การเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียน อาศัยการเคลื่อนที่ผ่าน HSA ซึ่งเป็นการขับเคลื่อนของ Voice coil motor (VCM) ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจากชุดควบคุม (Controller)

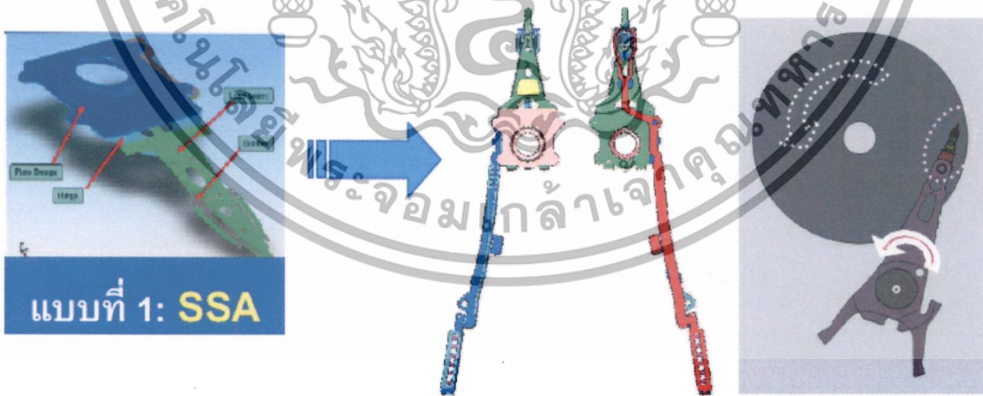
แขนจับยึดหัวอ่านเขียน (Suspension) เป็นชิ้นส่วนที่รองรับทางกลศาสตร์ ใช้สำหรับจับยึดหัวอ่านเขียน (Head slider) และพาหัวอ่านเขียนให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการอ่านหรือเขียนบนแผ่นดิสก์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยไม่เกิดการชนระหว่างหัวอ่านเขียนกับผิวหน้าของแผ่นดิสก์ ด้วยเหตุนี้เอง แขนจับหัวอ่านเขียน จึงเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องถูกประกอบเข้าไปใน HSA ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทุกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แขนจับหัวอ่านเขียนและส่วนประกอบต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ [10]

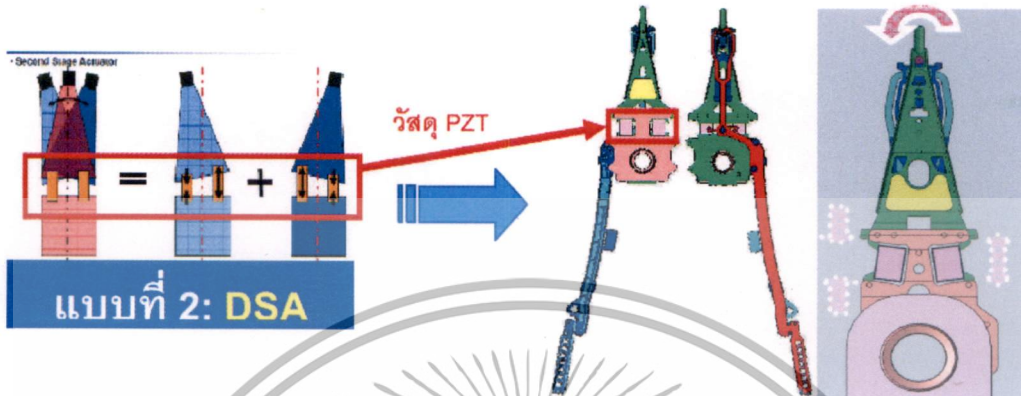
ผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่านเขียนในปัจจุบันของโรงงานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการออกแบบคือ แบบที่ 1 ผลิตภัณฑ์แบบทั่วไป (Normal suspension product หรือ Single stage actuator : SSA) ซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนจากการเคลื่อนที่ของ HSA ได้เพียงอย่างเดียว โดยตัวแขนจับหัวอ่านเขียนหรือ HGA ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบนดิสก์ด้วยตัวเองได้



รูปที่ 3.3 แขนจับหัวอ่านเขียนแบบ Single stage actuator (SSA) [10]

แบบที่ 2 ผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่านเขียนชนิดที่สามารถปรับตำแหน่งได้สองจังหวะ (Dual stage actuator : DSA) ผลิตภัณฑ์แบบ DSA นอกจากจะสามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นดิสก์โดยอาศัยการทำงานของ HSA แล้วตัวแขนจับหัวอ่านเขียนยังถูกออกแบบมาให้สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะที่แคบและแม่นยำมากขึ้นได้ ด้วยตัวของแขนจับหัวอ่านเขียนเอง โดยการอาศัยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

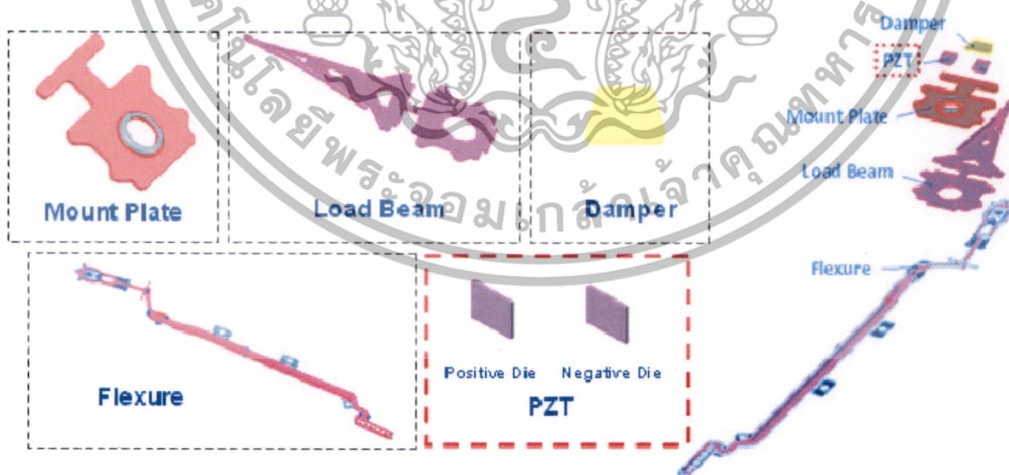
หลักการการทำงานของวัสดุเพียโรโซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์ (PZT) ที่เพิ่มเติมจากผลิตภัณฑ์แบบ SSA โดยในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้วัสดุ PZT อย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook)



รูปที่ 3.4 แขนจับหัวอ่านเขียนแบบ Dual stage actuator (DSA) [10]

องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่านเขียนแบบ SSA ประกอบด้วย เม้าท์เพลต (Mount plate) โหลดบีม (Load beam) หรือ ฮิง (Hinge) แดมเปอร์ (Damper) และเซอร์กิตแบบยืดหยุ่น (Flexible circuit)

โดยผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่านเขียนแบบ DSA มีองค์ประกอบที่เพิ่มเติมจากแบบ SSA คือ ชิ้นส่วนเพียโรโซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์ (PZT) ที่มีทั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน [10]

ชิ้นส่วน PZT [12] โดยทั่วไปทำมาจาก เซรามิกส์ Lead zirconate titanate [ $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ ] ที่มีขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ทนต่อกำลังไฟฟ้าที่สูงได้ โดยมีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และสามารถเปลี่ยนกลับจากเอกสารเป็นเอกสารที่สแกนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติหนาเปไซประโยชน์ดานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกันจึงทำให้ชิ้นส่วน PZT สามารถเกิดการเคลื่อนที่เชิงกล โดยการขยับยืดและหดตามทิศทางของสภาพความเป็นขั้วที่ถูกสร้างขึ้น (Doped dipole moment) เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าที่ส่งมาจากชุดควบคุม ผ่านเข้ามาทางทางเซอร์กิตแบบยืดหยุ่นของแขนจับหัวอ่านเขียน มายังวัสดุ PZT ทำให้เกิดการขยับยืดและหดของ PZT แต่ละขั้วด้วยคุณสมบัติของวัสดุ PZT นี้เอง จึงสามารถทำให้หัวอ่านเขียนของผลิตภัณฑ์แบบ DSA เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ในระยะองศาที่แคบลงได้แม่นยำมากขึ้น บนแผ่นดิสก์เก็บข้อมูลที่มีความกว้างของแถบบันทึก (Track) เล็กมากได้ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แบบ SSA ไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยองศาที่มีความละเอียดเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์แบบ DSA ได้

ด้วยเหตุนี้เอง ผลิตภัณฑ์แขนจับยืดหัวอ่านเขียนแบบ DSA จึงสามารถเพิ่มความจุฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้มากขึ้น จากความสามารถในการอ่านเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ที่มีความจุแทรก (Track) ที่มากขึ้นได้ จึงทำให้ความต้องการของผลิตภัณฑ์แบบ DSA ในกลุ่มผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

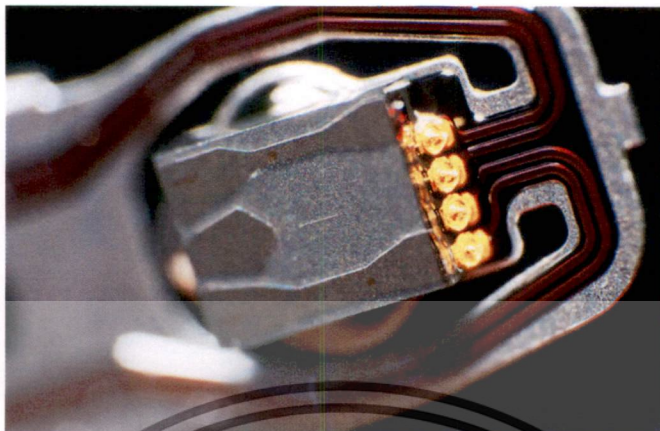
แขนจับหัวอ่านเขียนเป็นชิ้นส่วนหลักในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟซึ่งทำหน้าที่พยุงหัวอ่านเขียนให้ลอยอยู่เหนือพื้นผิวของแผ่นดิสก์เก็บข้อมูลในตำแหน่งที่ต้องการการอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วยระยะความสูงที่ถูกต้องแม่นยำ โดยที่ไม่เกิดการชนระหว่างหัวอ่านเขียนกับพื้นผิวหน้าของแผ่นดิสก์ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกำลังอ่านหรือเขียนข้อมูล ระยะความสูงในการบินของหัวอ่านเขียน (Fly height) อยู่ที่ระยะน้อยกว่า 0.01 ไมครอนเหนือพื้นผิวของแผ่นดิสก์ที่หมุนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วตั้งแต่ 5,400 จนถึง 20,000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นระยะที่เล็กมาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับขนาดของเม็ดฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 5 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 50 ไมครอน ดังภาพเปรียบเทียบที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระยะการบินของหัวอ่านเขียน (Fly height) และขนาดเปรียบเทียบของตัวอย่างสิ่งแปลกปลอม [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

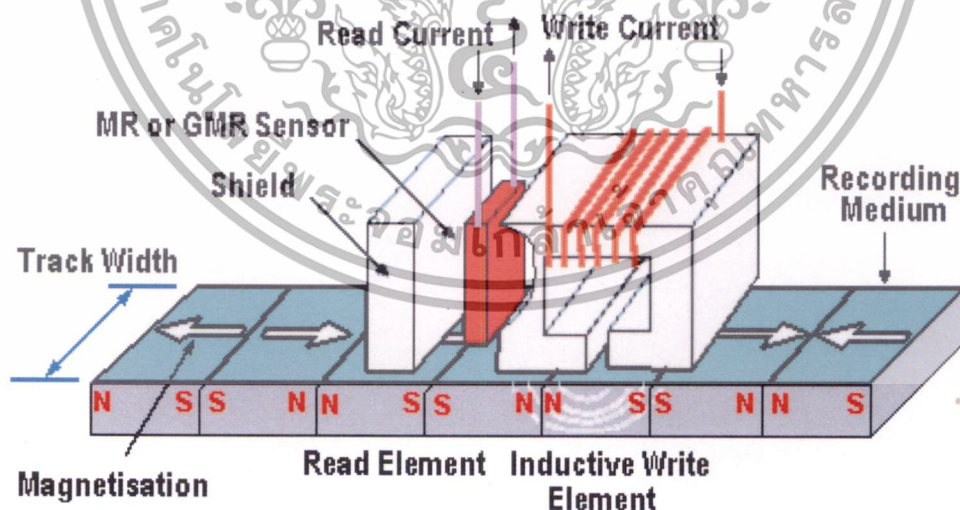
### 3.2 หัวอ่านเขียน (Slider)



รูปที่ 3.7 แสดงส่วนประกอบของหัวอ่านเขียน (Slider)

สำหรับหัวอ่านเขียน (Slider) นั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ หัวเขียน หัวอ่านและ ABS แยกอธิบายแต่ละส่วนประกอบได้ดังนี้

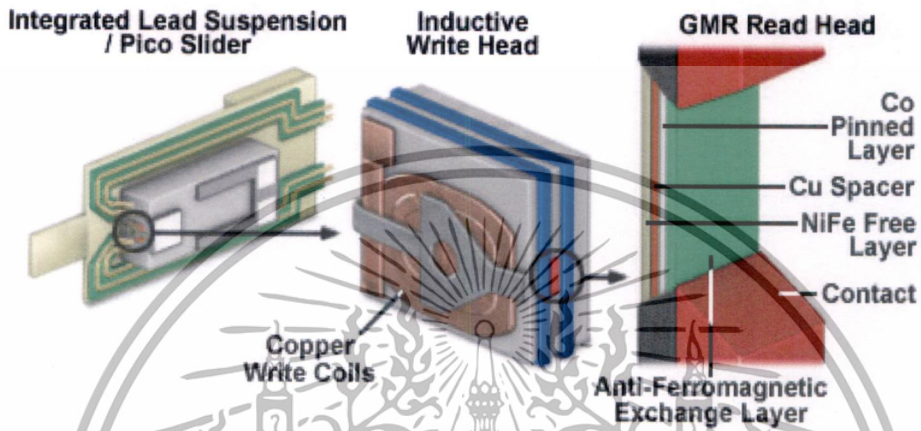
3.2.1 หัวเขียน (Write head) อาศัยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดตัวนำที่พันรอบแกนเหล็กหรือเฟอร์ไรต์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบริเวณเนื้อของวงแหวน ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะพุ่งออกจากบริเวณส่วนปลายหรือช่องว่างของวงแหวนที่เป็นรอยขีด พุ่งตรงไปยังเนื้อของแผ่นดิสก์เพื่อบังคับให้แม่เหล็กบริเวณผิวของแผ่นดิสก์เปลี่ยนทิศทางตามคำสั่ง



รูปที่ 3.8 แสดงส่วนประกอบของหัวเขียน

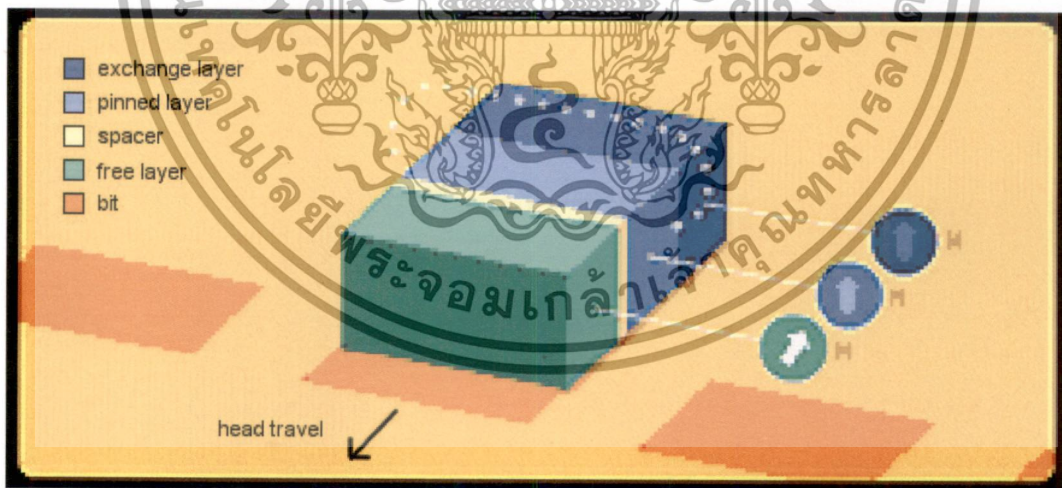
3.2.2 หัวอ่าน (Read head) หัวอ่านที่ใช้ใน Hard disk drive มี 2 ชนิด คือ Magneto resistance (MR) และ Giant magneto resistance (GMR) ซึ่งจากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นขโมยเอกสารนี้การค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า เมื่อแม่เหล็กได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะทำให้ทิศทางของแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนไปตามทิศทางของแม่เหล็กที่เข้ามากระทำ นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกว่าค่าความต้านทานของแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Magneto resistance (MR) ซึ่งเป็นหลักการของหัวอ่านในยุคเริ่มแรก ต่อมาได้มีการพัฒนาให้หัวอ่านสามารถอ่านข้อมูลที่มี Bit ขนาดเล็กมากๆ ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุต่อตารางนิ้วสูง เรียกหัวอ่านแบบนี้ว่า Giant magneto resistance (GMR) ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างหัวอ่านแบบ GMR มาอธิบาย ซึ่งมีโครงสร้างและส่วนประกอบดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบของหัวอ่านแบบ GMR

สำหรับการทำงานของ GMR Head อธิบายได้ดังรูป



รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้างของชิ้นส่วนต่างๆ ที่นำมาประกอบกันเป็น GMR Head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensing layer เป็นชั้นของสารแม่เหล็กที่ประกอบด้วย Nickel (Ni) และ Iron (Fe) เมื่อนำมารวมกันจะทำให้ได้สารแม่เหล็กที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงนำมาใช้เป็น Sensor ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวของแผ่น Disk โดย Sensing layer นี้มีคุณสมบัติสามารถเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กได้อย่างอิสระ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มาเข้ามาระทำ

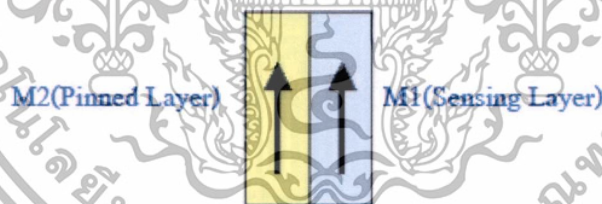
Copper เป็นชั้นของทองแดง ที่ใช้กันระหว่าง Sensing layer (M1) กับ Pinned layer (M2) เนื่องจากเป็นตัวนำจึงทำให้สามารถนำ Electron จากชั้นนอกสุดผ่านเข้าไปยังชั้นในสุดได้ เพื่อเปรียบเทียบทิศทางสนามแม่เหล็กของชั้นทั้งสอง

Pinned layer เป็นชั้นของสารแม่เหล็กที่ประกอบด้วย Cobalt (Co) และ Iron (Fe) ใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทิศทางสนามแม่เหล็กของชั้น Sensing Layer (M1) เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่เกิดขึ้น

Exchange layer เป็นชั้นของสารแม่เหล็ก ใช้ในการบังคับทิศทางสนามแม่เหล็กของชั้น Pinned layer เพื่อให้มีทิศทางของสนามแม่เหล็กตามที่ได้กำหนดไว้

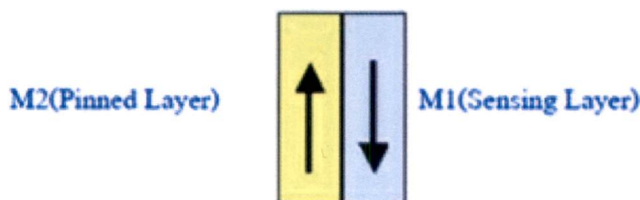
สำหรับการอ่านสัญญาณอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างสารแม่เหล็กที่อยู่บนแผ่น Disk กับหัวอ่าน ถ้าค่าความต้านทานมากจะทำให้กระแสไฟไหลผ่าน GMR ได้น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าความต้านทานน้อยจะทำให้กระแสไฟไหลผ่าน GMR ได้มาก

ชั้นของสารแม่เหล็กที่เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานคือ Sensing layer (M1 สีฟ้า) และ Pinned layer (M2 สีเหลือง) เมื่อมีการอ่านสัญญาณ Sensing layer จะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ถ้ามีทิศทางเดียวกันกับ Pinned layer (M2) จะทำให้ค่าความต้านทานที่ได้มีค่าต่ำ เนื่องจากทิศทางของสนามแม่เหล็กชี้ไปในทิศทางเดียวกันจึงทำให้ Electron ของแต่ละชั้นข้ามไปหากันได้และเกิดการไหลของกระแสผ่าน GMR



รูปที่ 3.11 แสดง M1 และ M2 มีทิศทางเดียวกัน

ในกรณีที่ทิศทางของ M1 และ M2 สวนทางกัน จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมาก เนื่องจากทิศทางของสนามแม่เหล็กสวนทางกันจึงทำให้ทิศทางของ Electron ในแต่ละชั้นสวนทางกันด้วยและไม่สามารถข้ามไปถึงกันได้ จึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน GMR ดังรูป



รูปที่ 3.12 แสดง M1 และ M2 มีทิศทางตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการดังกล่าว เมื่อนำไปต่อเข้ากับวงจรทางไฟฟ้า (AE Module) สามารถวัดค่าที่ได้ ออกมาในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าเพื่อขยายสัญญาณ และนำไปถอดรหัสที่ภาค HDC (Hard disk control circuit) ของ Card ต่อไป

3.2.3 ABS (Air bearing surface) เป็นส่วนที่ใช้รับแรงลมที่เกิดจากการหมุนของ Spindle motor เพื่อให้ Slider ลอยอยู่เหนือแผ่น Disk ตามระดับความสูง (Flying height) ที่ได้ออกแบบ และคำนวณไว้สำหรับกระบวนการสร้าง MR และ GMR มีทั้งหมด 6 กระบวนการคือ

1. การสร้าง Substrate
2. การสร้างหัวอ่าน (MR หรือ GMR Head)
3. การสร้างหัวเขียน (Inductive write head)
4. การสร้างหน้า ABS (Air bearing surface)
5. การตรวจสอบคุณภาพ
6. การประกอบ Slider เข้ากับ Flexure (Head gimbal assembly)

ในแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนที่สลับซับซ้อนเนื่องจากการนำชั้นสารหลายๆ ชั้นมารวมกันด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะขออธิบายเฉพาะกระบวนการสร้าง ABS เท่านั้น เมื่อผ่านกระบวนการสร้าง Inductive write head (หัวเขียน) แล้ว Slider แต่ละตัวจะถูกตัดออกจากแผ่น Wafer เพื่อนำไปสร้างหน้า ABS โดยใช้วิธีการ Machining, Ion Milling ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการฉายสารไวแสง ลงบนผิวหน้าของ Substrate หลังจากนั้นจึงผ่านขั้นตอนการฉายแสงเพื่อให้ได้รูปร่างของ ABS ตามที่ได้ออกแบบไว้ และนำไปกัดผิวหน้าของ ABS โดยใช้วิธีการ Ion Milling ยิ่งอนุภาคของสารที่ใช้กัดผิวหน้า ABS ลงบนผิวของ Substrate ดังนั้นบริเวณพื้นผิวของ Substrate ที่ไม่ได้เคลือบด้วยสารไวแสงจะถูกกัดให้หลุดออกไป

### 3.3 ชั้นส่วนประกอบของ HGA (Head gimbal assembly)



รูปที่ 3.13 แสดงชั้นส่วนของ HGA

HGA Up หน้าที่ : อ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็กลงบนแผ่น Disk ด้านล่าง

HGA Down หน้าที่ : อ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็กลงบนแผ่น Disk ด้านบน

วัสดุที่ใช้ผลิตประกอบด้วย : Polyester , Copper Foil , Polyimide , Plastic

HGA เป็นการนำหลายชิ้นส่วนมารวมกัน ซึ่งแยกอธิบายวัสดุที่ใช้ในการผลิตได้ดังนี้

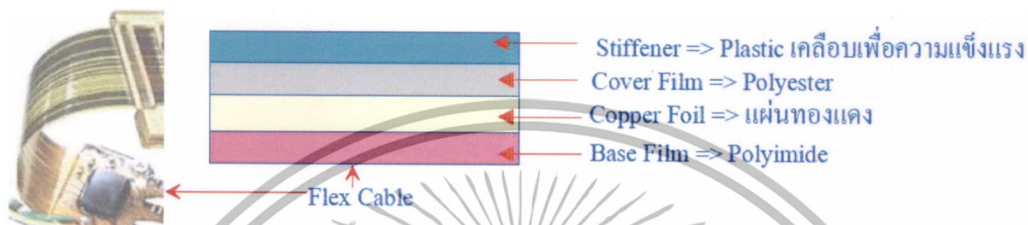
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Flexure : Flexible printed circuit (FPC) หมายถึง วงจรไฟฟ้าแบบอ่อนแอ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1.1 Single Sided เป็นแผ่นวงจรที่ใช้งานได้ด้านเดียว

1.2 Double Sided เป็นแผ่นวงจรที่ใช้งานได้สองด้าน

1.3 Multi Layered เป็นแผ่นวงจรที่รวมหลายวงจรหลายๆ ชั้นเข้าด้วยกันวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต Flex Cable ทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะคล้ายกันดังนั้นจำแนกตามส่วนประกอบหลักๆ ได้ดังนี้



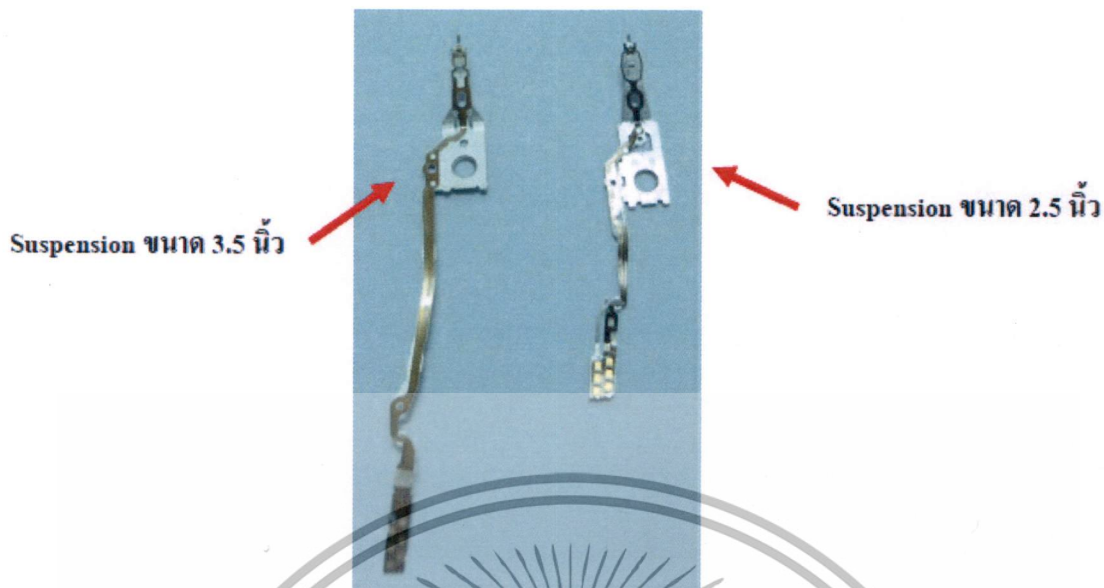
รูปที่ 3.14 แสดงชั้นส่วนโครงสร้างของแผงวงจรไฟฟ้าชนิดอ่อน

2. Suspension => Stainless steel เบอร์ 304 ส่วนประกอบ Iron (Fe) = 70.92% Chromium (Cr) = 18-20% Nickel (Ni) = 8-10% Carbon (C) = 0.08% Silicon (Si) = 1.0% Manganese (Mn) = 2.0%

3. Arm => Stainless steel เบอร์ 304 ส่วนประกอบ Iron (Fe) = 70.92% Chromium (Cr) = 18-20% Nickel (Ni) = 8-10% Carbon (C) = 0.08% Silicon (Si) = 1.0% Manganese (Mn) = 2.0%

หลักการทำงาน : ส่วนประกอบของ HGA Up และ HGA Down นั้นมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยแตกต่างกันตรงที่การวางตำแหน่งของ Tail และ Arm ให้อยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงส่วนประกอบของ HGA ของ Hard disk drive 2.5" และ 3.5"

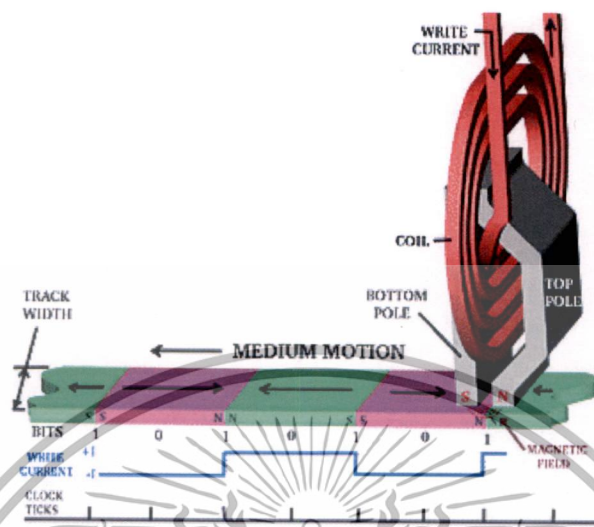
### 3.4 ชิ้นส่วนประกอบของ HSA (Head stack assembly)



รูปที่ 3.16 ชิ้นส่วนประกอบของ HSA

จากรูปด้านบนแสดงลักษณะของ HSA ซึ่งเป็นการนำชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นมารวมกัน ได้แก่ HGA Up HGA Down dummy HGA Flex cable carriage Screw M1.0 และ Screw M1.6 เป็นต้น หน้าที่จะอธิบายหลักการทำงานอย่างคร่าวๆ ของ HSA เท่านั้น หลักการทำงาน ภายในตัว HSA จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ อ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็ก นั่นก็คือ Slider ซึ่งตัว Slider มีโครงสร้างภายในที่สลับซับซ้อนมาก เนื่องจากเป็นการนำชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นมารวมกันซึ่งถือว่าเป็นหัวใจหลักของการอ่านเขียนข้อมูลเมื่อมีการอ่านสัญญาณหัว Slider ที่ทำการอ่าน (Read head) จะนำสัญญาณส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาขยายที่ AE (Arm Electronic) Module เพื่อให้ได้ความแรงของสัญญาณ หลังจากนั้นจึงส่งสัญญาณไปที่ Pin connector เพื่อเชื่อมต่อให้ Card ถอดรหัสและทำการประมวลผลต่อไป



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะการอ่านเขียนสัญญาณของ HSA

### 3.5 สมรรถนะของชุดจับยึดหัวอ่าน

ชุดจับยึดหัวอ่านเขียน (Suspension) เป็นชิ้นส่วนที่รองรับทางกลใช้สำหรับจับยึดหัวอ่านเขียนและพาหัวอ่านเขียนให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการอ่านหรือเขียนบนแผ่นดิสก์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยไม่เกิดการชนระหว่างหัวอ่านเขียนกับผิวหน้าของแผ่นดิสก์ ด้วยเหตุนี้เอง แขนจับหัวอ่านเขียน จึงเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องถูกประกอบเข้าไปใน HSA ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทุกตัว แขนจับหัวอ่านเขียนเป็นชิ้นส่วนหลักในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งทำหน้าที่พยุงหัวอ่านเขียนให้ลอยอยู่เหนือพื้นผิวของแผ่นดิสก์เก็บข้อมูลในตำแหน่งที่ต้องการการอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยระยะความสูงที่ถูกต้องแม่นยำ ระยะความสูงในการบินของหัวอ่านเขียนอยู่ที่ระยะน้อยกว่า 0.01 ไมครอนเหนือพื้นผิวของแผ่นดิสก์ที่หมุนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วตั้งแต่ 5,400 จนถึง 20,000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นระยะที่น้อยมากเพราะฉะนั้นสมรรถนะทางกลหลักที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงจะประกอบด้วย

3.4.1 สมรรถนะของการสั่นสะเทือนเชิงกล ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานชุดจับยึดหัวอ่านจะเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นดิสก์นั้นจะเกิดการสั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลา เพราะฉะนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนจำเป็นจะต้องรู้ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน เพื่อที่ผู้ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเขียนโปรแกรมเซอร์โวสำหรับการควบคุมหัวอ่านเขียนที่ความถี่ธรรมชาติของแต่ละโหมดหลัก ซึ่งประกอบไปด้วย 1<sup>st</sup> Bending 1<sup>st</sup> Torsion และ Sway สำหรับปัญหาการสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหนึ่งในหลายๆ ปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากการสั่นสะเทือนจะไปรบกวนการทำงานของชิ้นส่วนต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรืออาจส่งผลให้เกิดการชำรุดเสียหายของอุปกรณ์จนส่งผลให้การทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีประสิทธิภาพลดลงหรือล้มเหลวในที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 สมรรถนะของการตกกระแทกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน นั้นหัวอ่านเขียนจะถูกยกด้วยแรง (Air Bearing Surface : ABS) มีหน่วยเป็นกรัม (gram) ซึ่งการวิเคราะห์การตกกระแทกในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานนั้นเป็นการทำนายหาค่าขนาดของความเร่งจากการตกกระแทก (Gravity : G) ของการตกกระแทกที่ส่งผลให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ ซึ่งแสดงว่าต้องมีปริมาณความเร่งของการตกกระแทกที่มากพอเพื่อให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ สำหรับการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อเพิ่ม Lift-off Shock มีหน่วยเป็น G/gram

3.4.3 สมรรถนะของการตกกระแทกในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน เป็นสภาวะที่ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนพักอยู่บน Ramp การตกกระแทกในสภาวะขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงานนั้น จะวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่ของ SST Tongue กับติมเพิล (SST Tongue คือบริเวณที่ยึดติดกับหัวอ่านเขียน) เพื่อศึกษาระยะที่ SST Tongue กับติมเพิลที่แยกออกจากกันเนื่องจากสภาวะของการตกกระแทก

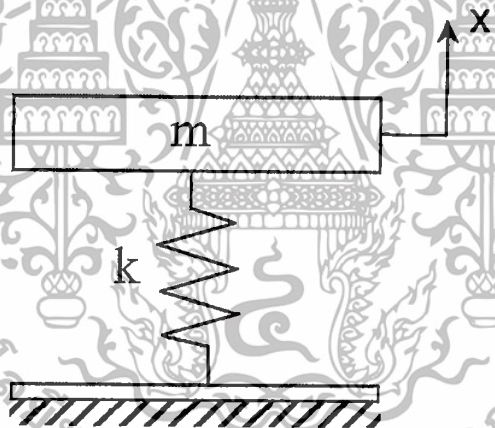
### 3.6 ธรรมชาติของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนคือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของระบบ การเคลื่อนที่ดังกล่าวอาจมีลักษณะรูปร่างที่แน่นอน (Regular form) หรืออาจจะไม่แน่นอน (Irregular) ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งการสั่นสะเทือนออกเป็นสองกรณี คือ การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) และการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced vibration) การสั่นสะเทือนอิสระจะเกิดขึ้นในลักษณะที่ระบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยการสั่นสะเทือนดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายค่าความถี่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะระบบที่เกิดการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนแบบบังคับ คือการเคลื่อนที่ในขณะที่มีแรงภายนอกกระทำกับระบบและทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เช่นเดียวกับแรงที่กระทำ หรือมีความถี่เท่ากับค่าความถี่ของแรงกระทำ ถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำมีค่าเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ จะเรียกว่า ระบบนั้นอยู่ในสภาพเกิดการสั่นพ้อง ซึ่งจะเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง และเป็นอันตรายต่อระบบอย่างมาก สำหรับในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์การเกิดการสั่นพ้องอาจไม่ส่งผลถึงขั้นทำให้อุปกรณ์ภายในเกิดความเสียหายแต่มันจะไปรบกวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้เกิดความผิดพลาดได้ ตัวอย่างเช่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงลมในการหมุนของจานแม่เหล็กหรือจากสั่นสะเทือนจากมอเตอร์วอลซ์คอยล์หรือสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor) ไปทำให้เกิดการสั่นพ้องขึ้นที่ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน จนส่งผลให้ตำแหน่งในการเข้าถึงข้อมูลผิดพลาดได้ ดังนั้นการศึกษากการสั่นสะเทือนจึงมีความจำเป็นต่อการนำไปพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### 3.7 การสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรี

การสั่นสะเทือนอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีคือการสั่นสะเทือนที่ไม่มีแรงจากภายนอกกระทำกับระบบ ซึ่งระบบที่สมมุติขึ้นจะประกอบไปด้วยมวลเพียงอันเดียวเชื่อมต่อกับสปริงจะเรียกว่าระบบแบบไม่มีตัวหน่วง โดยปกติโครงสร้างพื้นฐานของระบบต่างๆ จะมีตัวหน่วง (Damper) อยู่ในระบบด้วยเช่น การเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน การเสียดทานในเนื้อวัสดุ ในขณะที่วัสดุมีการยืด-หดตัว หรือการต้านการเคลื่อนที่อื่นๆ เป็นต้น โดยตัวหน่วงจะช่วยลดความรุนแรงในการสั่นสะเทือนและส่งผลให้ระบบหยุดนิ่งในที่สุด ซึ่งในบางกรณีที่ระบบมีค่าตัวหน่วงมากอาจจะส่งผลให้ระบบไม่เกิดการสั่นสะเทือนและเข้าสู่สภาวะปกติในที่สุด โดยระบบที่มีมวลเชื่อมต่อกับสปริงและตัวหน่วงจะเรียกว่าระบบแบบมีตัวหน่วง โดยในรูปที่ 3.18 แสดงระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วงและรูปที่ 3.19 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง

#### 3.7.1 การสั่นสะเทือนอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบไม่มีตัวหน่วง



รูปที่ 3.18 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง

จากรูปที่ 3.18 แสดงระบบสมมุติการสั่นสะเทือนอิสระของมวล  $m$  ที่ไม่มีตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equations) ของการเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่ายได้คือ

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3.1)$$

ซึ่งผลเฉลยทั่วไป (General solution) ของสมการเชิงอนุพันธ์คือ

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$A = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} = \text{แอมพลิจูด (Amplitude)}$$

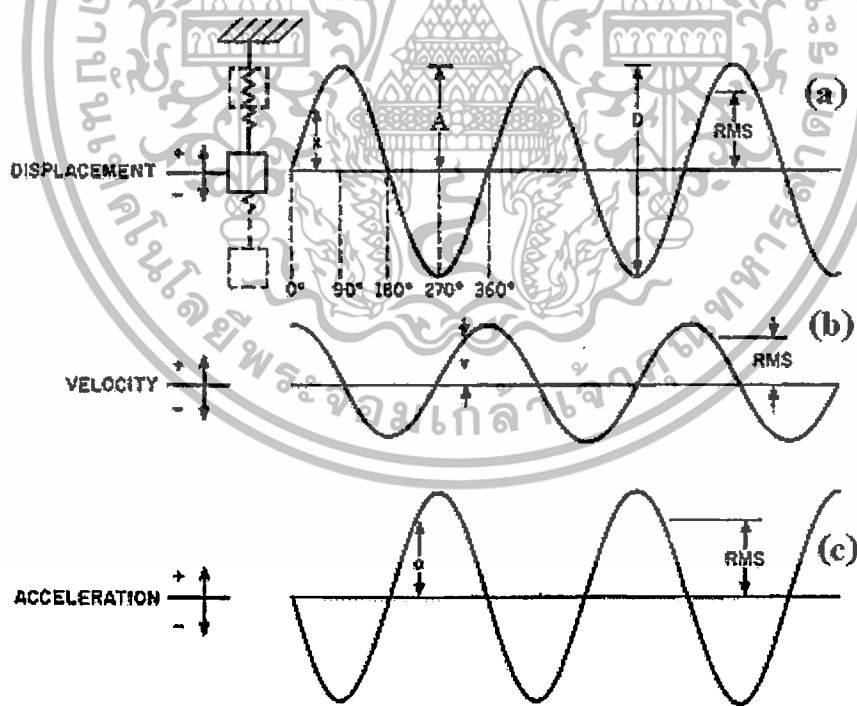
$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0} = \text{มุมเฟส (Phase angle)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{ความถี่ธรรมชาติ}$$

$$x_0 = x(0) = \text{การกระจัดเริ่มต้น}$$

$$v_0 = \dot{x}(0) = \text{ความเร็วเริ่มต้น}$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการที่ 3.18 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่จะอยู่ในลักษณะของฟังก์ชันไซน์ (Sine) หรือ โคไซน์ (Cosine) โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ (initial condition) ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำกันในเวลาที่เหมาะสมและเรียกว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (Harmonic) โดยรูปที่ 3.19 แสดงการเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง

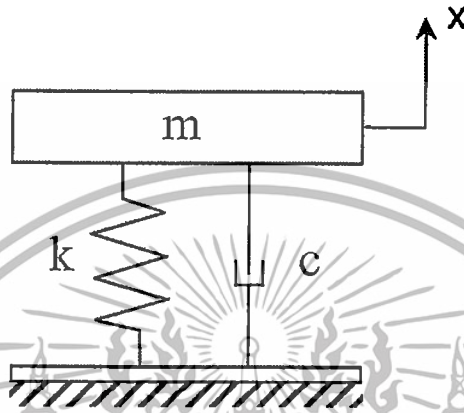


รูปที่ 3.19 การเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง

รูปที่ 3.19 แสดงการเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง ซึ่งการเคลื่อนที่เป็นไปตามสมการที่ 3.2 โดยมุมเฟสมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งภาพ 3.19 (a) แสดงถึงการกระจัดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันกึ่งไซน์ รูปที่ 3.19 (b) แสดงถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของการกระจัดเทียบกับเวลา รูปที่ 3.19 (c) แสดงถึงความเร่งในการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของการกระจัดเทียบกับเวลา

### 3.7.2 การสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบมีตัวหน่วง



รูปที่ 3.20 ระบบสมมติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง

จากรูปที่ 3.4 แสดงระบบสมมติการสั่นสะเทือนอิสระของระบบที่มีตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่ายได้คือ

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3.3)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = 0 \quad (3.4)$$

โดย  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (3.3) จะพิจารณาจาก  $\zeta$  คือค่าอัตราส่วนตัวหน่วง (damping ratio) ซึ่งได้จากการจัดรูปสมการที่ 3.3 และถูกแสดงอยู่ในสมการที่ 3.4 โดยค่าอัตราส่วนตัวหน่วงจะบ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนที่ได้ 3 แบบคือ

โอเวอร์แดมป์ (Overdamped Motion) คือการที่ระบบมีค่าอัตราส่วนตัวหน่วงมีค่ามากกว่าหนึ่ง ( $\zeta > 1$ ) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ (3.3) ในกรณีนี้คือ

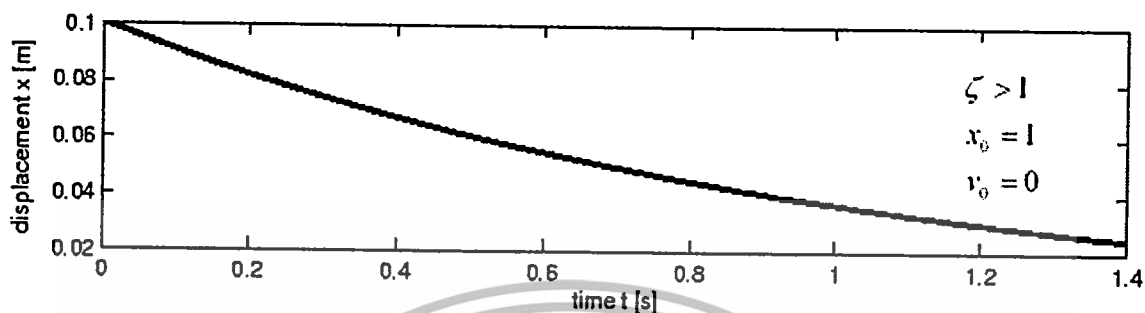
$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left( a_1 e^{-\omega_n\sqrt{\zeta^2-1}t} + a_2 e^{+\omega_n\sqrt{\zeta^2-1}t} \right) \quad (3.5)$$

โดยที่

$$a_1 = \frac{-v_0 + (-\zeta + \sqrt{\zeta^2-1})\omega_n x_0}{2\omega_n\sqrt{\zeta^2-1}} \quad \text{และ} \quad a_2 = \frac{v_0 + (\zeta + \sqrt{\zeta^2-1})\omega_n x_0}{2\omega_n\sqrt{\zeta^2-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลเฉลยทั่วไปของการเคลื่อนที่กรณีโอเวอร์แดมป์ในสมการที่ (3.5) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่จะไม่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยการกระจัดจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไปและเข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุดดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.21

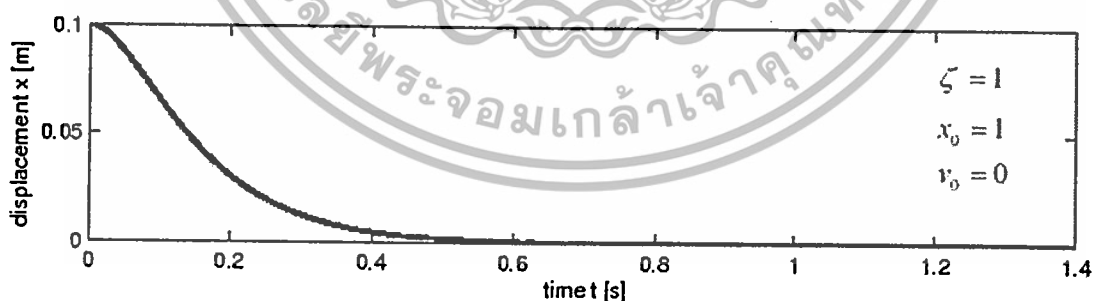


รูปที่ 3.21 โอเวอร์แดมป์

คริตติคอลลีแดมป์ (Critically Damped Motion) คือการที่ระบบมีค่าอัตราส่วนตัวหน่วงเท่ากับหนึ่ง ( $\zeta = 1$ ) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ (3.3) ในกรณีนี้คือ

$$x(t) = [x_0 + (v_0 + \omega_n x_0)t] e^{-\omega_n t} \quad (3.6)$$

จากผลเฉลยทั่วไปของการเคลื่อนที่กรณีคริตติคอลลีแดมป์ในสมการที่ (3.6) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่จะไม่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยการกระจัดจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไปและเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างรวดเร็วดังที่แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 คริตติคอลลีแดมป์

อันเดอร์แดมป์ (Underdamped Motion) คือการที่ระบบมีค่าอัตราส่วนตัวหน่วงน้อยกว่าหนึ่ง ( $0 < \zeta < 1$ ) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการ (3.3) ในกรณีนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (3.7)$$

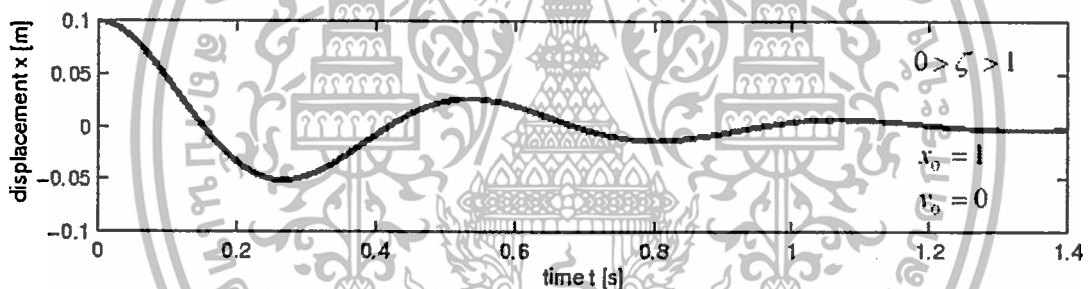
โดยที่

$$A = \frac{\sqrt{(v_0 + \zeta\omega_n x_0)^2 + (x_0\omega_d)^2}}{\omega_d^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{x_0\omega_d}{v_0 + \zeta\omega_n x_0}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \text{ความถี่ของการหน่วง (damped frequency)}$$

จากผลเฉลยทั่วไปของการเคลื่อนที่กรณีอันเดอร์แดมป์ในสมการที่ (3.7) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่มีลักษณะการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นโดยการกระจัดจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยที่สอดคล้องที่ได้แสดงในรูปที่ 3.23



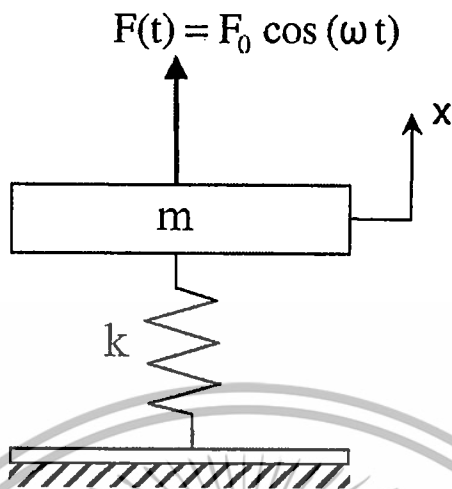
รูปที่ 3.23 อันเดอร์แดมป์

### 3.8 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรี

การสั่นสะเทือนแบบบังคับคือการสั่นสะเทือนของวัตถุหรือระบบที่เกิดจากแรงกระทำที่ต่อเนื่องตลอดเวลาเช่น การสั่นสะเทือนจากเครื่องยนต์ ซึ่งความถี่ในการสั่นของระบบจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงที่มากระทำ ด้วยเหตุนี้ความถี่ที่เกิดจากแรงภายนอกมากกว่ากระทำ จึงเป็นไปได้ที่จะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่เกิดจากการสั่นของระบบเองในขณะไม่มีแรงกระทำที่เรียกว่าความถี่ธรรมชาติของระบบและส่งผลทำให้เกิดการสั่นพ้อง โดยในรูปที่ 3.24 แสดงระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่ไม่มีตัวหน่วงและรูปที่ 3.25 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบไม่มีตัวหน่วง



รูปที่ 3.24 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่ไม่มีตัวหน่วง

ในรูปที่ 3.24 แสดงก้อนน้ำหนักมวล  $m$  ตั้งอยู่บนสปริงโดยให้แรง  $F(t)$  กระทำต่อมวลนี้ โดยให้  $F(t)$  กระทำอยู่ในลักษณะฟังก์ชันโคไซน์

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \tag{3.8}$$

เมื่อ  $\omega$  คือความถี่ของแรงกระทำต่อมวล  $m$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆจะมีแรงกระทำบนมวล  $m$  2 แรงคือแรงจากสปริงและแรงกระทำภายนอกซึ่งเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$m\ddot{x} + kx = F(t) \tag{3.9}$$

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \tag{3.10}$$

สมการที่ (3.10) อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสองแบบไม่เอกพันธ์ (second order linear non-homogeneous differential equations) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปเกิดจากผลบวกของผลเฉลยเติมเต็ม (complementary solution) และผลเฉลยเฉพาะ (particular solution) ดังในสมการที่ (3.11)

$$x = x_c + x_p \tag{3.11}$$

โดย  $x$  คือผลเฉลยทั่วไป

เอกสารนี้  $x_c$  คือผลเฉลยเติมเต็มสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x_p$  คือผลเฉลยเฉพาะ

ซึ่งผลเฉลยเต็มเต็มจะหาได้จากการเปลี่ยนสมการที่ (3.9) ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสองแบบเอกพันธ์โดยการกำหนดให้  $F(t) = 0$  ทำให้มีรูปสมการเหมือนกันกับสมการที่ (3.1) ซึ่งจะได้ได้ผลเฉลยเต็มเต็มดังที่แสดงในสมการที่ (3.2)

ในการหาผลเฉลยเฉพาะของสมการที่ (3.9) จะทำได้โดยการกำหนดให้

$$x_p = C \cos \omega t \quad (3.12)$$

$$\dot{x}_p = -\omega C \sin \omega t \quad (3.13)$$

$$\ddot{x}_p = -\omega^2 C \cos \omega t \quad (3.14)$$

แทนค่าสมการที่ (3.12) และ (3.14) ลงในสมการที่ (3.10) ได้ว่า

$$-m\omega^2 C \cos \omega t + kC \cos \omega t = F_0 \cos \omega t \quad (3.15)$$

นำ  $\cos \omega t$  ทหารสมการที่ (3.15) จะได้

$$C = \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (3.16)$$

โดย  $f_0 = \frac{F_0}{m}$

แทนค่า  $C$  จากสมการที่ (3.16) ลงในสมการที่ (3.12) จะได้

$$x_p(t) = \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (3.17)$$

นำผลเฉลยเฉพาะในสมการที่ (3.17) และผลเฉลยเต็มเต็มในสมการที่ (3.2) แทนลงในสมการที่ (3.11) จะทำให้ได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ (3.10) ได้คือ

$$x(t) = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} \sin(\omega_n t + \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0}) + \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18) ถ้ากำหนดให้  $\omega = \omega_n$  จะได้

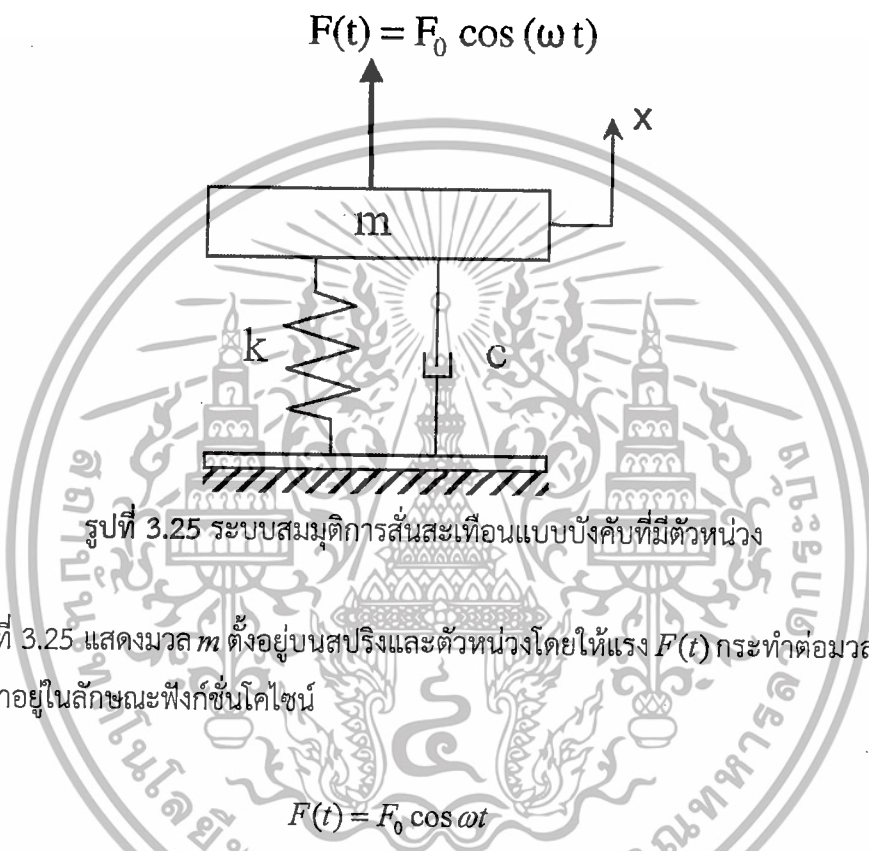
$$x(t) = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} \sin(\omega_n t + \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0}) + \frac{f_0}{0} \cos \omega t \quad (3.19)$$

$$x(t) = \infty \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x = \infty$  ในสมการที่ (3.20) แสดงถึงการกระจัดของระบบจะมีขนาดเป็นอนันต์ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนรุนแรงอย่างมาก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อการที่ความถี่ของแรงกระทำมีค่าเข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ แต่ในความเป็นจริงระบบจะมีตัวหน่วงทำให้ความรุนแรงในการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ในการพ้องจะมีขนาดการสั่นมากที่สุดค่าหนึ่ง

### 3.8.2 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรีแบบมีตัวหน่วง



ในรูปที่ 3.25 แสดงมวล  $m$  ตั้งอยู่บนสปริงและตัวหน่วงโดยให้แรง  $F(t)$  กระทำต่อมวลนี้ โดยให้  $F(t)$  กระทำอยู่ในลักษณะฟังก์ชันโคไซน์

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (3.21)$$

จากรูปที่ 3.9 แสดงระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่ายได้คือ

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos \omega t \quad (3.22)$$

นำ  $m$  มารวมสมการที่ (3.22)

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = f_0 \cos \omega t \quad (3.23)$$

สมการที่ (3.22) อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสองแบบไม่เอกพันธ์ ซึ่งผลเฉลยทั่วไปเกิดจากผลบวกของผลเฉลยเต็มเต็มและผลเฉลยเฉพาะดังในสมการที่ (3.11) โดยเลือกพิจารณาเฉพาะในกรณีการเคลื่อนที่ของระบบแบบอันเดอร์แดมป์ ( $0 < \zeta < 1$ ) เนื่องจากเป็นกรณีที่มีการเกิดเอกสารเป็นเอกสารที่ลวงในเวลาที่การเคลื่อนที่ของระบบมีค่า  $\omega < \omega_n$  เมื่ออยู่ในระบบอันเดอร์แดมป์การคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยผลเฉลยเต็มเต็มจะหาได้จากการเปลี่ยนสมการที่ (3.22) ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสองแบบเอกพันธ์โดยการกำหนดให้  $F(t) = 0$  ทำให้มีรูปสมการเหมือนกันกับสมการที่ (3.3) ซึ่งจะได้ผลเฉลยเต็มเต็มดังที่แสดงในสมการที่ (3.7)

ในการหาผลเฉลยเฉพาะของสมการที่ (3.22) จะทำได้โดยการกำหนดให้

$$x_p(t) = X \cos(\omega t - \theta) \quad (3.24)$$

นำสมการที่ (3.24) เปลี่ยนรูปโดยใช้สมบัติตรีโกณมิติ  $\cos(A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$  ได้เป็น

$$x_p(t) = X \cos \theta \cos \omega t + X \sin \theta \sin \omega t \quad (3.25)$$

$$x_p(t) = A_s \cos \omega t + B_s \sin \omega t \quad (3.26)$$

โดย  $A_s = X \cos \theta$  และ  $B_s = X \sin \theta$   
และจะได้ว่า

$$X = \sqrt{A_s^2 + B_s^2} \quad \text{และ} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{B_s}{A_s} \quad (3.27)$$

ทำการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองเทียบกับเวลาของสมการที่ (3.26) ได้เป็น

$$\dot{x}_p(t) = -\omega A_s \sin \omega t + \omega B_s \cos \omega t \quad (3.28)$$

และ

$$\ddot{x}_p(t) = -\omega^2 (A_s \sin \omega t + B_s \cos \omega t) \quad (3.29)$$

แทนสมการที่ (3.26), (3.28) และ (3.29) ลงในสมการที่ (3.23)

$$(-\omega^2 A_s + 2\zeta \omega_n \omega B_s + \omega_n^2 A_s - f_0) \cos \omega t + (-\omega^2 B_s - 2\zeta \omega_n \omega A_s + \omega_n^2 B_s) \sin \omega t = 0 \quad (3.30)$$

นำสมการที่ (3.30) แทนค่าเวลาคือ  $t = 0$  และ  $t = \pi/2$  และได้ผลลัพธ์สมการคือ

$$(\omega_n^2 - \omega^2) A_s + (2\zeta \omega_n \omega) B_s = f_0 \quad (3.31)$$

$$(-2\zeta \omega_n \omega) A_s + (\omega_n^2 - \omega^2) B_s = 0 \quad (3.32)$$

นำสมการที่ (3.31) และ (3.32) ใช้หาค่า  $A_s$  และ  $B_s$  ได้คือ  $A_s$  และ  $B_s$  นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_s = \frac{(\omega_n^2 - \omega^2) f_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \quad (3.33)$$

$$B_s = \frac{2\zeta\omega_n\omega f_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \quad (3.34)$$

นำสมการที่ (3.33) และ (3.34) แทนลงในสมการที่ (3.27) เพื่อหาผลเฉลยเฉพาะได้เป็น

$$x_p(t) = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \cos\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) \quad (3.35)$$

นำผลเฉลยเฉพาะและผลเฉลยเต็มเติมแทนลงในสมการที่ (3.11) ได้เป็นเฉลยทั่วไปของสมการที่ (3.22) คือ

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) + X \cos(\omega t - \theta) \quad (3.36)$$

โดย

$$A = \frac{x_0 - X \cos \theta}{\sin \phi}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega_d (x_0 - X \cos \theta)}{v_0 + (x_0 - X \cos \theta) \zeta \omega_n - \omega X \sin \theta}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

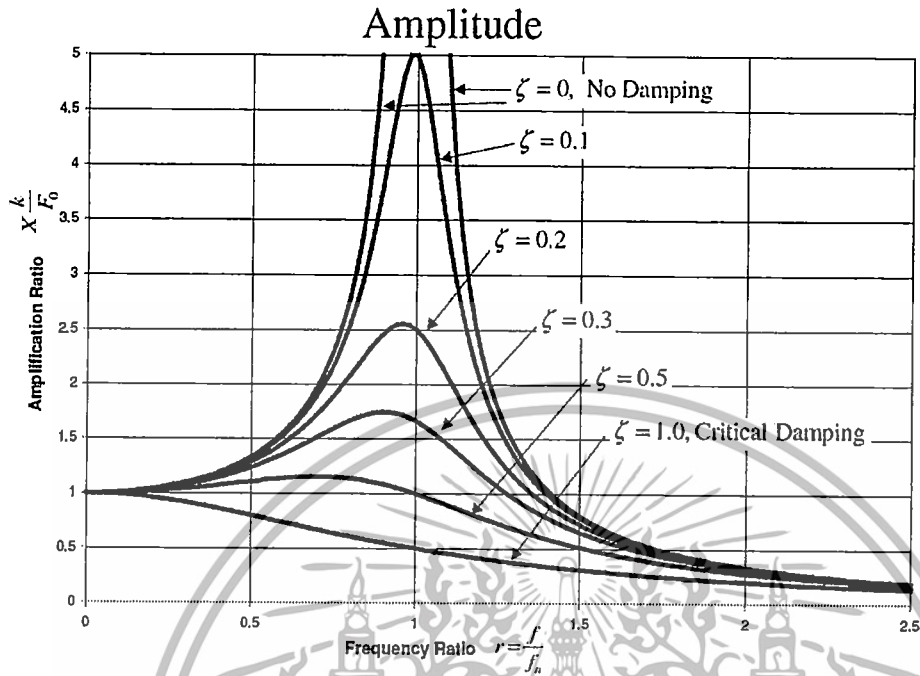
$$X = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}}$$

จากผลเฉลยทั่วไปในสมการที่ (3.36) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปขนาดการกระจัดของผลเฉลยเต็มเติมจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่ส่งผลกับการเคลื่อนที่ของระบบ โดยจะเหลือแต่เพียงผลของการกระจัดจากผลเฉลยเฉพาะในสมการที่ (3.35) และเมื่อนำแอมพลิจูดของผลเฉลยเฉพาะในสมการที่ (3.35) มาทำการนอร์มัลไลซ์ (normalized) เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่จะได้เป็นดังสมการที่ (3.37) และมีผลดังที่แสดงในรูปที่ 3.26

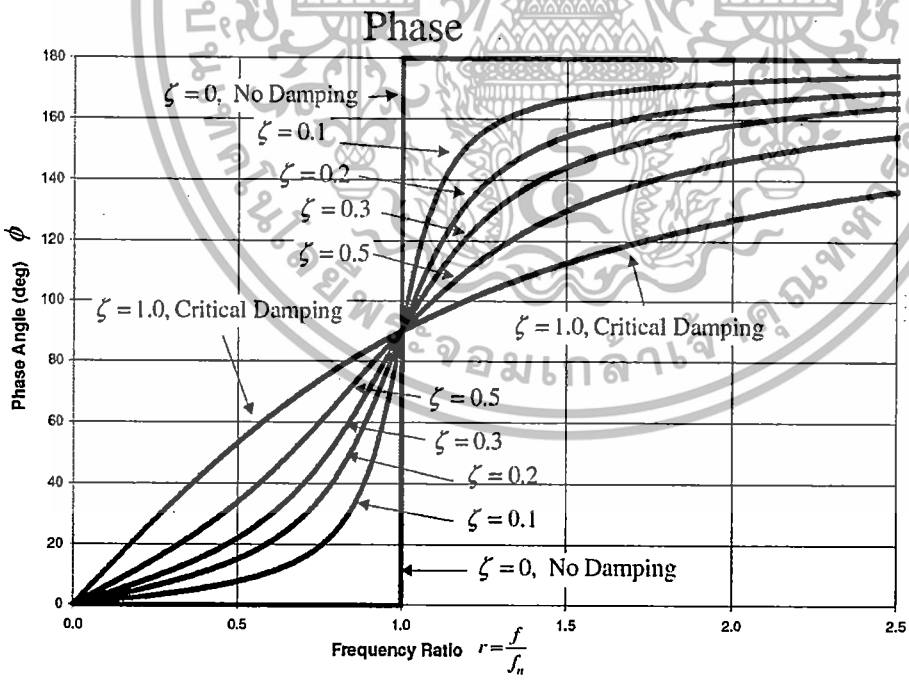
$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad \text{และ} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $r = \omega / \omega_n$



รูปที่ 3.26 อัตราขยายการเคลื่อนที่เทียบกับอัตราส่วนความถี่

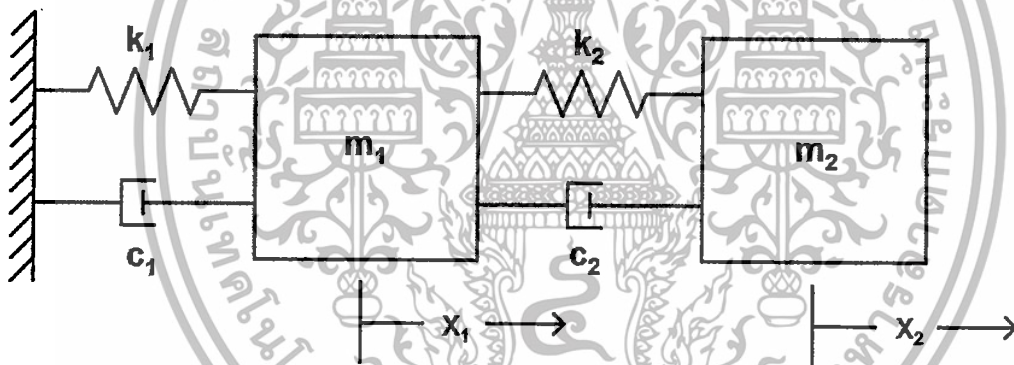


รูปที่ 3.27 การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสเทียบกับอัตราส่วนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 การวิเคราะห์โหมดัลของการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของระบบที่มีระดับความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไปจะมีความซับซ้อนอย่างมากเมื่อนำมาวิเคราะห์บนระบบพิกัดปกติ ซึ่งการวิเคราะห์โหมดัลคือวิธีที่ใช้สำหรับการนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่มีระดับความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไปเพื่อช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์บนพิกัดปกติ (Original coordinate system) โดยการสร้างระบบพิกัดใหม่ขึ้นมาคือระบบพิกัดโหมดัล (Modal coordinate system) การจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดปกติให้มาอยู่ในพิกัดโหมดัลจะช่วยให้สมการในแต่ละสมการมีความอิสระจากกันซึ่งจะทำได้โดยสามารถนำมาคิดแยกในแต่ละสมการได้อย่างสะดวกโดยสมการที่ถูกสร้างขึ้นในระบบพิกัดโหมดัลจะเรียกว่าสมการโหมดัล (Modal equations) โดยจะนำเสนอขั้นตอนอย่างง่ายในการใช้วิธีการวิเคราะห์โหมดัลสำหรับการหาผลเฉลยสำหรับระบบมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระดังที่แสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

จากรูปที่ 3.28 แสดงการจำลองระบบมวลคู่ที่มีสปริงและตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละมวลในรูปอย่างง่ายได้คือ

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) - c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.38)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.39)$$

นำสมการที่ (3.38) และ (3.39) มาจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \quad (3.41)$$

ซึ่งสามารถนำสมการ (3.40) และ (3.41) เขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (3.42)$$

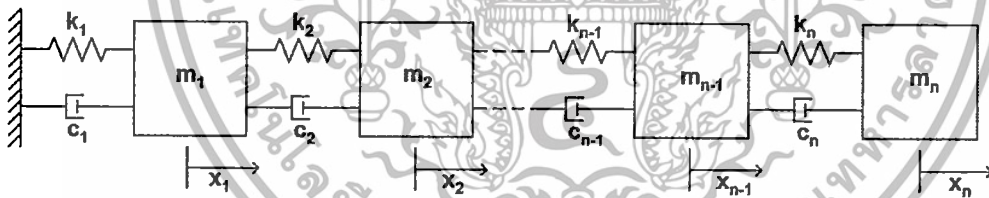
โดยที่  $M$  คือเมทริกซ์ของมวล

$C$  คือเมทริกซ์ของค่าคงที่ตัวหน่วง

$K$  คือเมทริกซ์ของค่าคงที่สปริง

จากสมการ (3.40) และ (3.41) แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนในการหาผลเฉลยเนื่องจากในแต่ละสมการมีความเกี่ยวข้องกันอยู่และจะมีความซับซ้อนมากขึ้นในระบบที่มีระดับความอิสระที่สูงมากขึ้น โดยเมทริกซ์และระบบที่มีระดับความอิสระใดๆจะถูกแสดงในสมการที่ (3.43)

### 3.9.1 การวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหลายระดับขั้นเสรี



รูปที่ 3.29 ระบบสมมุติหลายมวลที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบจะถูกเขียนในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (3.43)$$

โดยที่

$$M\ddot{x} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & m_{n-1} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C\dot{x} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & \vdots \\ 0 & -c_3 & \ddots & & 0 \\ \vdots & 0 & & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & \cdots & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix}$$

$$Kx = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & \vdots \\ 0 & -k_3 & \ddots & & 0 \\ \vdots & 0 & & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & \cdots & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix}$$

การจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดปกติให้อยู่ในระบบพิกัดโมดัลจะต้องมีการหาค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งอยู่ในค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) และนำไปเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector) โดยกำหนดให้

$$x = M^{-1/2} v e^{j\omega t} \quad (3.44)$$

โดย  $v$  คือเมทริกซ์เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะและนำสมการที่ (3.44) แทนลงในสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ในสมการที่ (3.43) โดยไม่คิดตัวทวนวงได้เป็น

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (3.45)$$

$$-MM^{-1/2}\omega^2 v e^{j\omega t} + KM^{-1/2} v e^{j\omega t} = 0 \quad (3.46)$$

นำสมการที่ (3.46) คูณทั้งสมการด้วย  $M^{-1/2}$

$$-(M^{-1/2}MM^{-1/2})\omega^2 v e^{j\omega t} + (M^{-1/2}KM^{-1/2})v e^{j\omega t} = 0 \quad (3.47)$$

กำหนดให้เมทริกซ์  $\tilde{K} = M^{-1/2}KM^{-1/2}$  ค่า  $\omega^2 = \lambda$  และ  $M^{-1/2}MM^{-1/2} = I$  โดย  $\lambda$  คือค่าลักษณะเฉพาะและ  $I$  คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) ซึ่งนำสมการที่ (3.47) มาเขียนได้ใหม่คือ

$$-I\omega^2 v e^{j\omega t} + \tilde{K}v e^{j\omega t} = 0 \quad (3.48)$$

นำสมการที่ (3.48) ทหารด้วย  $e^{j\omega t}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (3.49) การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\lambda = \omega^2$

ซึ่งเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของในแต่ค่าลักษณะเฉพาะจะถูกนำมาสร้างเป็นเมทริกซ์  $P$  คือ

$$P = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad \dots \quad v_n] \quad (3.50)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบในสมการที่ (3.43) สามารถเปลี่ยนอยู่ในระบบพิกัดโมดัลโดยการกำหนดให้

$$x(t) = M^{-1/2} Pr(t) \quad (3.51)$$

นำสมการที่ (3.51) แทนลงในสมการที่ (3.43) จะได้เป็น

$$MM^{-1/2} P\ddot{r}(t) + CM^{-1/2} P\dot{r}(t) + KM^{-1/2} Pr(t) = 0 \quad (3.52)$$

นำสมการที่ (3.52) คูณเมทริกซ์  $P^T M^{-1/2}$  ทั้งสมการ

$$\begin{aligned} P^T M^{-1/2} MM^{-1/2} P\ddot{r}(t) + P^T M^{-1/2} CM^{-1/2} P\dot{r}(t) + P^T M^{-1/2} KM^{-1/2} Pr(t) &= 0 \\ P^T P\ddot{r}(t) + P^T \tilde{C}P\dot{r}(t) + P^T \tilde{K}Pr(t) &= 0 \end{aligned} \quad (3.53)$$

โดยที่เมทริกซ์  $\tilde{C} = M^{-1/2} CM^{-1/2}$  และได้รูปสุดท้ายเป็น

$$\ddot{r}(t) + \text{diag}[2\zeta_i \omega_i] \dot{r}(t) + \Lambda r(t) = 0 \quad (3.54)$$

โดย

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \omega_{n-1}^2 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$diag [2\zeta_i \omega_i] = \begin{bmatrix} 2\zeta_1 \omega_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\zeta_2 \omega_2 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 2\zeta_{n-1} \omega_{n-1} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 2\zeta_n \omega_n \end{bmatrix}$$

ซึ่ง  $\zeta_i$  ได้จาก

$$C = \alpha M + \beta K$$

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta \omega_i}{2} \quad i=1,2,\dots,n$$

และสามารถเขียนสมการที่ (3.54) กระจายได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \ddot{r}_1(t) \\ \ddot{r}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{r}_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\zeta_1 \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\zeta_2 \omega_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 2\zeta_n \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_1(t) \\ \dot{r}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{r}_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \ddot{r}_1(t) + 2\zeta_1 \omega_1 \dot{r}_1(t) + \omega_1^2 r_1(t) &= 0 \\ \ddot{r}_2(t) + 2\zeta_2 \omega_2 \dot{r}_2(t) + \omega_2^2 r_2(t) &= 0 \\ \vdots & \\ \ddot{r}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{r}_n(t) + \omega_n^2 r_n(t) &= 0 \end{aligned} \tag{3.55}$$

จากสมการที่ (3.55) แสดงถึงความอิสระในแต่ละสมการซึ่งสามารถหาผลเฉลยทั่วไปในแต่ละสมการบนเงื่อนไข  $0 < \zeta_i < 1$  ได้เป็น

$$r_i(t) = A_i e^{-\zeta_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t + \phi_i) \quad i=1,2,\dots,n \tag{3.56}$$

โดยที่

$$\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$$

$$A_i = \sqrt{\frac{(\dot{r}_{i0} + \zeta_i \omega_i r_{i0})^2 + (r_{i0} \omega_{di})^2}{\omega_{di}^2}}$$

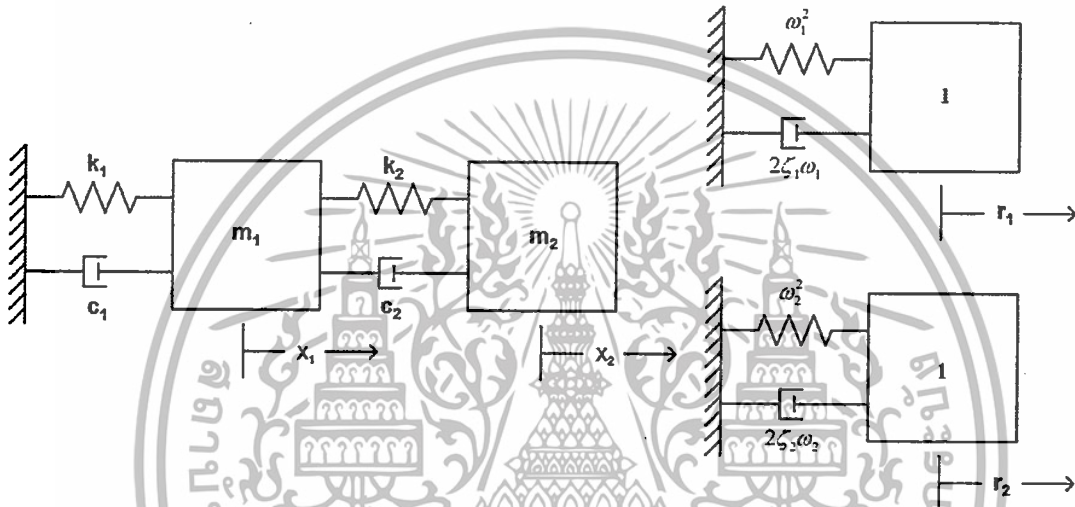
$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{r_{i0} \omega_{di}}{\dot{r}_{i0} + \zeta_i \omega_i r_{i0}}$$

ซึ่งค่า  $A_i$  และ  $\phi_i$  จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบซึ่งค่า  $r_{i0}$  และ  $\dot{r}_{i0}$  หาได้จาก  
 เอกสารที่แนบมา ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ  
 ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r(0) = r_0 = P^T M^{1/2} x_0 \quad (3.57)$$

$$\dot{r}(0) = \dot{r}_0 = P^T M^{1/2} \dot{x}_0 \quad (3.58)$$

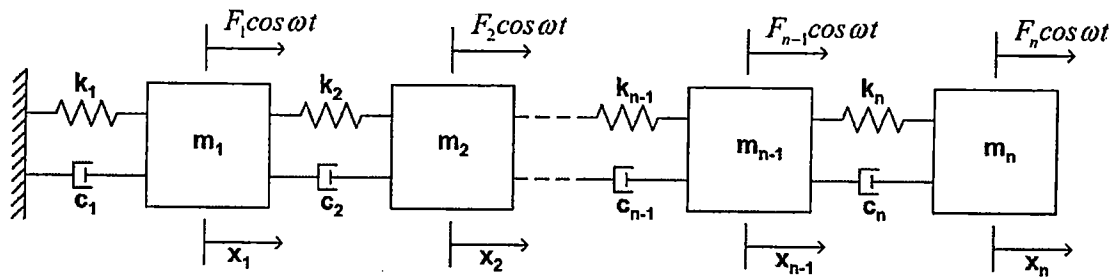
เมื่อได้คำตอบของสมการต่างๆของระบบในระบบพิกัดโมดัลสามารถแปลงกลับไปในระบบพิกัดปกติโดยใช้สมการที่ (3.51) โดยรูปที่ 3.14 แสดงแผนภาพความแตกต่างระหว่างการใช้ระบบพิกัดปกติและระบบพิกัดโมดัลของระบบมวลคู่



รูปที่ 3.30 ลักษณะของระบบสมมติมวลคู่ในระบบพิกัดปกติและระบบพิกัดโมดัล

### 3.9.2 การวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหลายระดับขั้นเสรี

การใช้วิธีวิเคราะห์โหมดัลเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบที่ระดับความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไปจะมีความแตกต่างจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากระบบที่นำมาวิเคราะห์ในส่วนนี้จะมีการเพิ่มแรงกระตุ้นเข้ามาโดยกำหนดให้แรงที่ทำให้การกระตุ้นเข้ามานั้นมีลักษณะคือ  $F(t) = F_i \cos \omega t$  ทำให้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบแตกต่างไปจากเดิม ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังที่แสดงในสมการที่ (3.59) โดยในรูปที่ 3.31 แสดงแผนภาพจำลองของระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยแรง



รูปที่ 3.31 ระบบสมมติหลายมวลที่มีการสั่นสะเทือนแบบบังคับ

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบจะถูกเขียนในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = BF(t) \quad (3.59)$$

โดย

$$B = B_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_1 \cos \omega t \\ F_2 \cos \omega t \\ \vdots \\ F_n \cos \omega t \end{bmatrix}$$

นำสมการที่ (3.51) แทนลงในสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่อยู่ในสมการที่ (3.59) ได้เป็น

$$MM^{-1/2}P\ddot{r}(t) + CM^{-1/2}P\dot{r}(t) + KM^{-1/2}Pr(t) = BF(t) \quad (3.60)$$

นำสมการที่ (3.60) คูณ  $P^T M^{-1/2}$  ตลอดทั้งสมการได้เป็น

$$P^T M^{-1/2}MM^{-1/2}P\ddot{r}(t) + P^T M^{-1/2}CM^{-1/2}P\dot{r}(t) + P^T M^{-1/2}KM^{-1/2}Pr(t) = P^T M^{-1/2}BF(t)$$

$$P^T P\ddot{r}(t) + P^T \tilde{C}P\dot{r}(t) + P^T \tilde{K}Pr(t) = P^T M^{-1/2}BF(t)$$

$$\ddot{r}(t) + \text{diag}[2\zeta_i \omega_i] \dot{r}(t) + \Lambda r(t) = f(t) \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_1 \cos \omega t \\ f_2 \cos \omega t \\ \vdots \\ f_n \cos \omega t \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถนำสมการที่ (3.61) มาเขียนกระจายได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \ddot{r}_1(t) \\ \ddot{r}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{r}_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2\zeta_2\omega_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 2\zeta_n\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_1(t) \\ \dot{r}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{r}_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \cos \omega t \\ f_2 \cos \omega t \\ \vdots \\ f_n \cos \omega t \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \ddot{r}_1(t) + 2\zeta_1\omega_1\dot{r}_1(t) + \omega_1^2 r_1(t) &= f_1 \cos \omega t \\ \ddot{r}_2(t) + 2\zeta_2\omega_2\dot{r}_2(t) + \omega_2^2 r_2(t) &= f_2 \cos \omega t \\ \vdots & \\ \ddot{r}_n(t) + 2\zeta_n\omega_n\dot{r}_n(t) + \omega_n^2 r_n(t) &= f_n \cos \omega t \end{aligned} \quad (3.62)$$

จากสมการที่ (3.62) แสดงถึงความอิสระในแต่ละสมการซึ่งสามารถหาผลเฉลยทั่วไปในแต่ละสมการบนเงื่อนไข  $0 < \zeta_i < 1$  ได้เป็น

$$r_i(t) = A_i e^{-\zeta_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t + \phi_i) + X_i \cos(\omega t - \theta_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.63)$$

โดยที่

$$\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{\omega_{di} (r_{i0} - X_i \cos \theta_i)}{\dot{r}_{i0} + (r_{i0} - X_i \cos \theta_i) \zeta_i \omega_i - \omega X_i \sin \theta_i}$$

$$A_i = \frac{r_{i0} - X_i \cos \theta_i}{\sin \phi_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

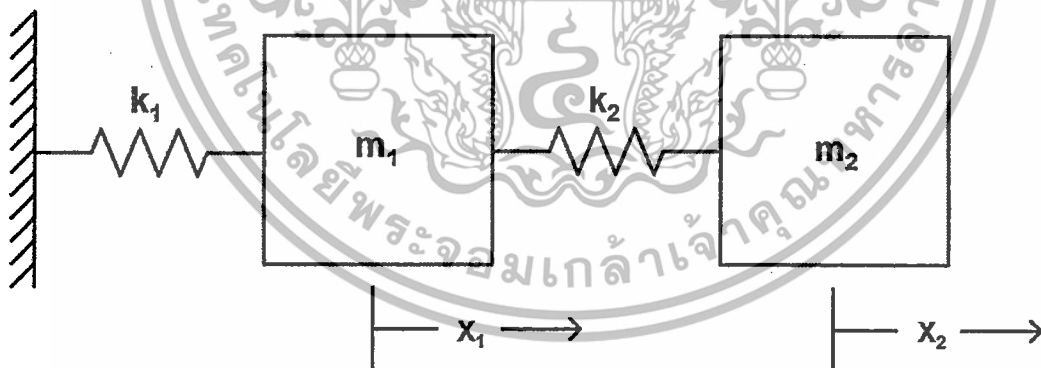
$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{2\zeta_i \omega_i \omega}{\omega_i^2 - \omega^2}$$

$$X_i = \frac{f_i}{\sqrt{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_i \omega_i \omega)^2}}$$

เมื่อได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการต่างๆของระบบในระบบพิกัดโมดัลตั้งที่แสดงในสมการที่ (3.63) สามารถแปลงกลับไปในระบบพิกัดปกติโดยการใช้สมการที่ (3.51) ซึ่งทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีการสั่นสะเทือนแบบบังคับในระบบพิกัดปกติ

### 3.10 วิธีการรวมกันของรูปแบบการสั่นสะเทือน (Mode Summation Method)

การสั่นสะเทือนของระบบต่างๆเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบโดยขึ้นกับเงื่อนไขเริ่มต้นและลักษณะของระบบ ซึ่งในการสั่นสะเทือนจะมีรูปแบบในการสั่นสะเทือนเฉพาะในแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติเกิดขึ้นมากมายซ้อนทับกันจนกลายเป็นการเคลื่อนที่ของระบบ โดยเงื่อนไขเริ่มต้นจะส่งผลให้การสั่นสะเทือนในแต่ละรูปแบบมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันออกไป [11] ซึ่งจะสามารถบอกรูปแบบการเคลื่อนที่ของในแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติและอิทธิพลในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.32 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

รูปที่ 3.16 มวล  $m_1$  และ  $m_2$  ถูกเชื่อมต่อกันด้วยสปริงและถูกยึดกับกำแพงด้านหนึ่งโดยไม่มีแรงจากภายนอกกระทำซึ่งจะสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปเมทริกซ์ดังที่แสดงในสมการที่ (3.42) ได้คือ

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (3.64)$$

กำหนดให้  $x = M^{-1/2} q(t)$  และคูณสมการที่ ด้วย  $M^{-1/2}$  จะได้สมการใหม่เป็นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณง่ายขึ้นที่สะดวกยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการดำเนินการนี้จะไม่ทำกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I\ddot{q}(t) + \tilde{K}q(t) = 0 \quad (3.65)$$

ซึ่งผลเฉลยของสมการที่ (3.65) ในแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติจะได้คือ

$$q_i(t) = v_i e^{\pm \sqrt{\lambda_i} t} \quad (3.66)$$

ซึ่งสามารถนำสมการที่ (3.66) เปลี่ยนรูปโดยใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler's formula) ได้เป็นคือ

$$q_i(t) = d_i \sin(\omega_i t + \phi_i) v_i \quad (3.67)$$

โดย  $d_i$  คือสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Expansion coefficient) ในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน และสามารถเขียนสมการที่ (3.67) ในรูปผลรวมของทุกรูปแบบการสั่นสะเทือนได้เป็น

$$q(t) = \sum_{i=1}^n d_i \sin(\omega_i t + \phi_i) v_i \quad (3.68)$$

ซึ่ง  $d_i$  และ  $\phi_i$  ในสมการที่ (3.68) จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขเริ่มต้น ( $t=0$ ) ได้คือ

$$q(0) = \sum_{i=1}^n d_i \sin \phi_i v_i \quad (3.69)$$

และ

$$\dot{q}(0) = \sum_{i=1}^n \omega_i d_i \sin \phi_i v_i \quad (3.70)$$

นำเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ  $v_j^T$  คูณเข้าในสมการที่ (3.69) และ (3.70) จะพบว่า  $v_j^T v_i = 0$  เมื่อ  $i \neq j$  และ  $v_j^T v_j = 1$  เมื่อ  $i = j$  ทำให้สามารถเขียนสมการได้ใหม่คือ

$$v_i^T q(0) = d_i \sin \phi_i v_i \quad (3.71)$$

และ

$$v_i^T \dot{q}(0) = \omega_i d_i \sin \phi_i v_i \quad (3.72)$$

จากสมการที่ (3.71) และ (3.72) จะสามารถนำมาใช้หาค่า  $d_i$  และ  $\phi_i$  ได้คือ

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{\omega_i v_i^T q(0)}{v_i^T q(0)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.72)$$

และ

$$d_i = \frac{v_i^T q(0)}{\sin \phi_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $\phi_i$  คือมุมเฟสและ  $d_i$  คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่แสดงถึงอิทธิพลของในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของระบบ

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{v}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.72)$$

$\mathbf{u}_i$  คือรูปแบบการสั่นสะเทือนที่จะบ่งบอกถึงรูปร่างในการเสียรูปในรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ค่าความถี่ธรรมชาติต่างๆ

จากรูปที่ 3.16 จะแสดงตัวอย่างการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวและรูปร่างในการเคลื่อนที่ในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนโดยกำหนดให้  $m_1 = 9\text{kg}$ ,  $m_2 = 1\text{kg}$ ,  $k_1 = 24\text{N/m}$ ,  $k_2 = 3\text{N/m}$ ,  $x_1(0) = 1$ ,  $x_2(0) = 1$ ,  $\dot{x}_1(0) = 0$  และ  $\dot{x}_2(0) = 0$  ซึ่งสามารถหาเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะได้คือ

$$\mathbf{v}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \mathbf{v}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

โดยนำมาหาค่า  $\phi_i$ ,  $\mathbf{u}_i$  และ  $d_i$  ได้เป็น

$$\phi_i = \frac{\pi}{2}$$

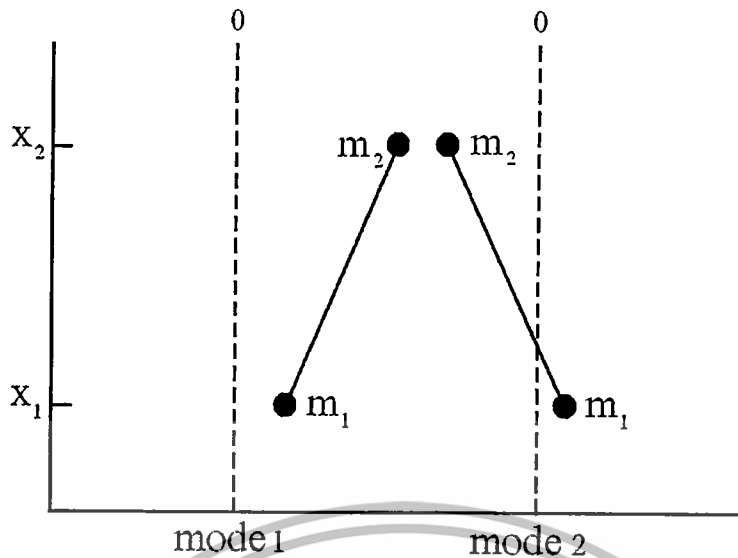
$$\mathbf{u}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$d_1 = 2\sqrt{2}$$

$$d_2 = \sqrt{2}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการสั่นสะเทือนที่หนึ่ง (first mode shape) มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของระบบมากกว่ารูปแบบการสั่นสะเทือนที่สอง (second mode shape) โดยรูปร่างในการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนจะถูกแสดงดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 รูปร่างการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน

### 3.11 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง โดยจะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาต่างๆ เช่น ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน วิเคราะห์การไหลของของไหล และปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง เป็นต้น หลักการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีรูปร่างอยู่หลายลักษณะ โดยจุดตัดที่เชื่อมต่อกันในแต่ละเอลิเมนต์ จะถูกเรียกว่าจุดต่อ (Node) ซึ่งจะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อจะคำนวณหาค่าของตัวแปรที่ต้องการบนตำแหน่งจุดต่อต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในทางปฏิบัติทั่วไป แรงจากภายนอกที่กระทำต่อวัตถุโดยปกตินั้นจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของระบบ และเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะส่งผลให้เกิดแรงต้านเพิ่มขึ้นมานั้นคือ แรงเฉื่อย (Inertia force) และแรงหน่วง (Damping force) ซึ่งจะมีทิศสวนทางกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ จากสมการที่ (3.59) จะเห็นว่าโพลเดเวกเตอร์  $F(t)$  ที่ด้านขวาของสมการจะแสดงถึงแรงทุกๆ ชนิดที่กระทำต่อระบบ ซึ่งก่อนหน้านี้ได้กล่าวเฉพาะแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยขึ้นกับฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine) ซึ่งส่งผลให้ความเครียดและความเค้นจะแปรผันตามเวลาด้วย ดังนั้นการแก้สมการไฟไนต์เพื่อคำนวณหาการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะใช้หลักการของการวิเคราะห์โมดัล ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการในการหาค่าลักษณะเฉพาะ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ และกระบวนการแก้สมการเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่

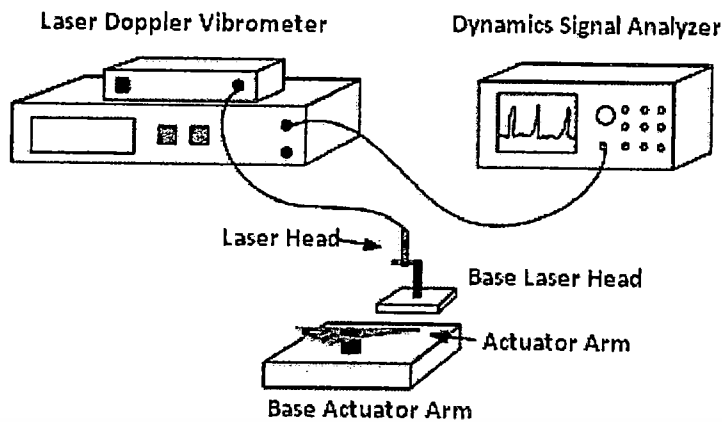
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.12 การทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์

ในการทดสอบวัดการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่านเขียนได้ใช้เครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์ในการวัดการสั่นสะเทือน โดยการตรวจวัดจะทำการใส่แรงกระตุ้นที่มีความถี่ต่างๆ ให้กับชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนโดยใช้มอเตอร์วอยซ์คอยล์ และยิงแสงไปยังตำแหน่งต่างๆบนชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ต้องการทดสอบ โดยแสงที่ถูกยิงไปตกลงบนจุดทดสอบจะสะท้อนกลับมายังตัวรับของเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์และใช้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแสงเพื่อใช้หาระยะทาง ความเร็วและความเร่งในการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และหลักการของปรากฏการณ์คอปเพลอร์ (Doppler effect) ความถี่ของแสงที่กระเจิงกลับจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Blue Shift คือเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิด คือความถี่ของแสงเพิ่มขึ้น และเกิด Red Shift เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ออกห่างจากแหล่งกำเนิด คือความถี่ของแสงลดลง ซึ่งความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำไปหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุได้และการเปลี่ยนแปลงมุมของการสะท้อนกลับ (Phase angle) ของแสงที่กระเจิงกลับจากวัตถุจะสามารถใช้หาระยะการเคลื่อนที่ของจุดที่ต้องการทดสอบได้ ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแปลงมุมของการสะท้อนกลับและความถี่ที่วัดได้จะถูกส่งไปยัง Dynamics signal analyzer (DSA) เพื่อแปลงเป็นผลการตอบสนองต่างๆ [11] ดังที่แสดงในรูปที่ 3.34 ซึ่ง DSA เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณในช่วงความถี่ต่างๆโดยมีขั้นตอนการทำงานคือ DSA จะรับสัญญาณจากตัวควบคุมของเครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์และทำการจัดเก็บสัญญาณเพื่อมาแปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital signal) โดยใช้ ADC (Analog to digital converter) หลังจากนั้นทำการใช้ FFT (Fast fourier transform) เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลที่ได้รับเข้ามาซึ่งอยู่ในรูปของ Time domain ให้อยู่ในรูปของ Frequency domain เพื่อที่แยกให้อยู่ในรูปของความถี่ต่างๆและทำการแสดงผลที่หน้าจอ โดยผลที่แสดงในช่วงความถี่ต่างๆจะมีค่าอัตราการขยายการสั่นสะเทือน (Gain) ที่แตกต่างกันซึ่งคำนวณจากสัญญาณป้อนเข้า (input) ในระบบและสัญญาณการตอบสนอง (output) จากระบบซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Gain (dB)} = 20 \log_{10} \left| \frac{\text{output}}{\text{input}} \right| \quad (3.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 แบบจำลองการทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่โดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

### 3.13 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.13.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)

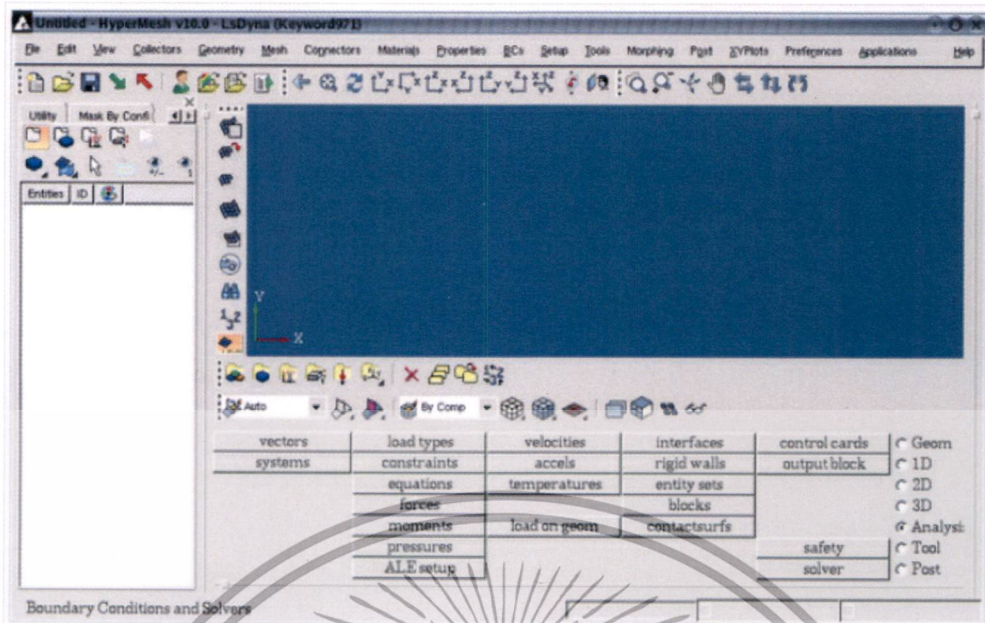
1. การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
2. การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆต่อกัน โดยแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยโนด (Discretization)
3. การกำหนด shape function ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์หรือผลเฉลยของเอลิเมนต์(ค่าประมาณ)
4. สร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์
5. กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะโหดและสภาวะขอบให้กับปัญหา
6. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

3.13.2 ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution phase) การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบคือค่าการกระจัดที่โนดต่างๆ หรือค่าอุณหภูมิที่โนดต่างๆ (ในกรณีแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อน)

3.13.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post processing phase) การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติมเช่นเราอาจจะทราบค่าความเค้นหลัก พลิ๊กซ์ความร้อน เป็นต้น

ทำการ import ชิ้นงานต่างๆ ที่สนใจศึกษาหรือวิเคราะห์ จาก โปรแกรม Solidworks หรือโปรแกรมอื่นๆ ที่รองรับ เข้าไปทำการสร้างเมชในโปรแกรมไฮเปอร์เมท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมไฮเปอร์เมท [2]



รูปที่ 3.36 การแบ่งรูปร่างของปัญหาหรือแบบจำลองของออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4 บทที่ 4

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดสอบโปรแกรม ANSYS V.13

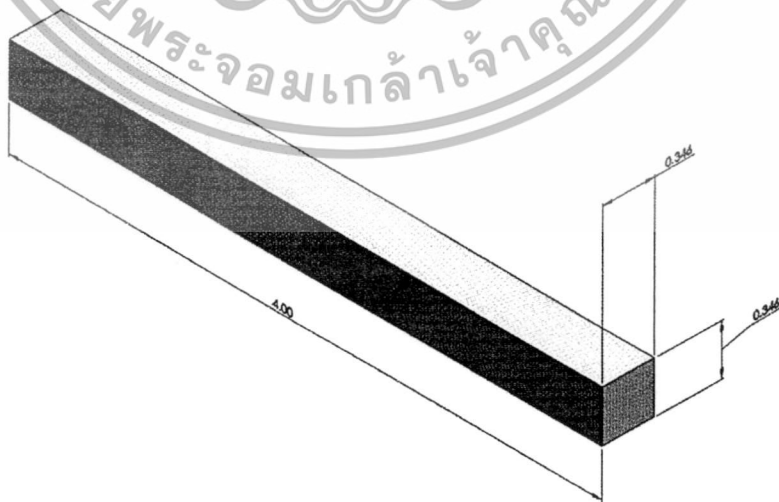
การทดสอบโปรแกรม ANSYS V.13 มีขึ้นเพื่อสร้างความมั่นใจในความถูกต้องแม่นยำและความมีเสถียรภาพในการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งความจริงแล้วก่อนที่นำโปรแกรมออกสู่ตลาดได้นั้น โปรแกรมจะต้องถูกทดสอบมาเป็นอย่างดี ดังนั้นประโยชน์โดยแท้จริงนั้นคือให้ผู้ใช้ได้ศึกษาการใช้งานของโปรแกรมให้มีความถูกต้อง ตลอดจนฝึกฝนและสร้างประสบการณ์จนเกิดความมั่นใจ ก่อนที่จะนำโปรแกรมนั้น ๆ ไปวิเคราะห์กับปัญหาในงานวิจัยด้านต่าง ๆ

##### 4.1.1 การวิเคราะห์การสั่นโมดอลของคาน

การวิเคราะห์การสั่นโมดอลของคาน เป็นการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับคานแบบสถิตศาสตร์ คือ แรงที่กระทำกับคานมีขนาดและทิศทางการคงที่ โดยในการวิเคราะห์ด้วย ANSYS V.13 จะสามารถเชื่อมโยงไฟล์จากโปรแกรม Solidworks [13] ทั้งชิ้นส่วน และชิ้นงานประกอบชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

##### 4.1.2 การสร้างแบบจำลองของคาน

การกำหนดรูปร่างและขนาดแบบจำลองของคานที่ใช้ในการทดสอบ โดยจะสร้างขึ้นจากโปรแกรม Solidworks 2012 โดยคานจะมีความยาว 4 เมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด  $0.346 \times 0.346$  เมตร โดยกำหนดวัสดุของคานเป็น Structural steel แสดงดังรูปที่ 4.1

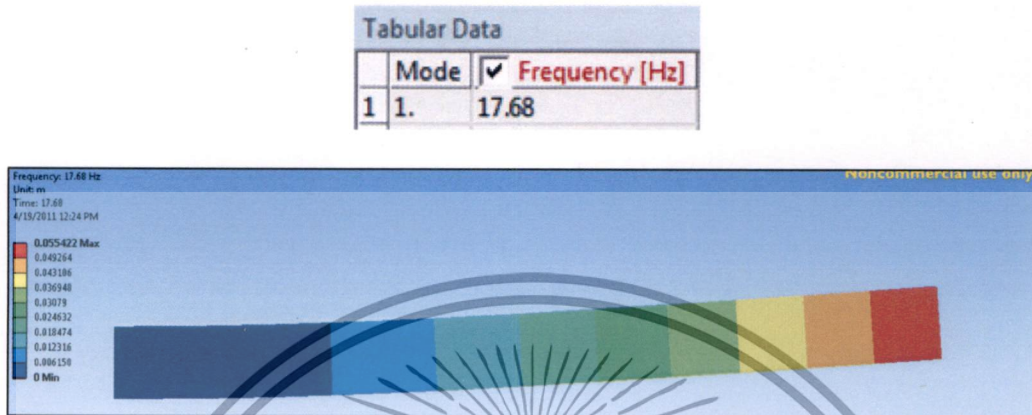


รูปที่ 4.1 รูปแสดงตัวอย่างขนาดของคานอย่างง่ายเพื่อใช้สำหรับการจำลองหาความถี่ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys V.13

เมื่อโปรแกรมทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้นสมบูรณ์ โดยเลือกวิเคราะห์ผลลัพธ์ของค่าการสั่นสะเทือนดังแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแสดงความถี่ธรรมชาติของคานของโหมดที่ 1 [14]

#### 4.1.4 การเปรียบเทียบผลกับคำตอบจากการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าความถี่ของธรรมชาติของคาน [15]

$$w_n = \alpha_n \sqrt{\frac{EI}{ml^3}} \quad (4.1)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\alpha_n = 1.875, 4.694, 7.855, \dots$$

$$m = \rho V = \rho \cdot l \cdot h \cdot w$$

$$I = \frac{wh^3}{12}$$

$$w_1 = 1.875^2 \sqrt{\frac{70E9 \frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot 0.346m \cdot (0.346)^3}{2.7E3 \frac{kg}{m^3} \cdot 4m \cdot 0.346m \cdot 0.346m(4m)^3}} \quad (4.2)$$

$$= 111.7 \frac{rad}{s} = 17.8Hz$$

$$\sigma_i = 0.73409, 1.018647, 0.9992245, \dots$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่าง ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys และ ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยทฤษฎี

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys	ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยทฤษฎี
17.68	17.8

ผลของค่าความผิดพลาดจากการคำนวณความถี่ธรรมชาติของคาน

$$\text{error \%} = \left| \frac{\delta_T - \delta_A}{\delta_T} \right| \times 100\% \quad (4.3)$$

โดยที่ error % คือ เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดจาก ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วย ทฤษฎี เปรียบเทียบกับ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys

$\delta_T$  คือ ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยทฤษฎี

$\delta_A$  คือ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys

จะได้ว่า

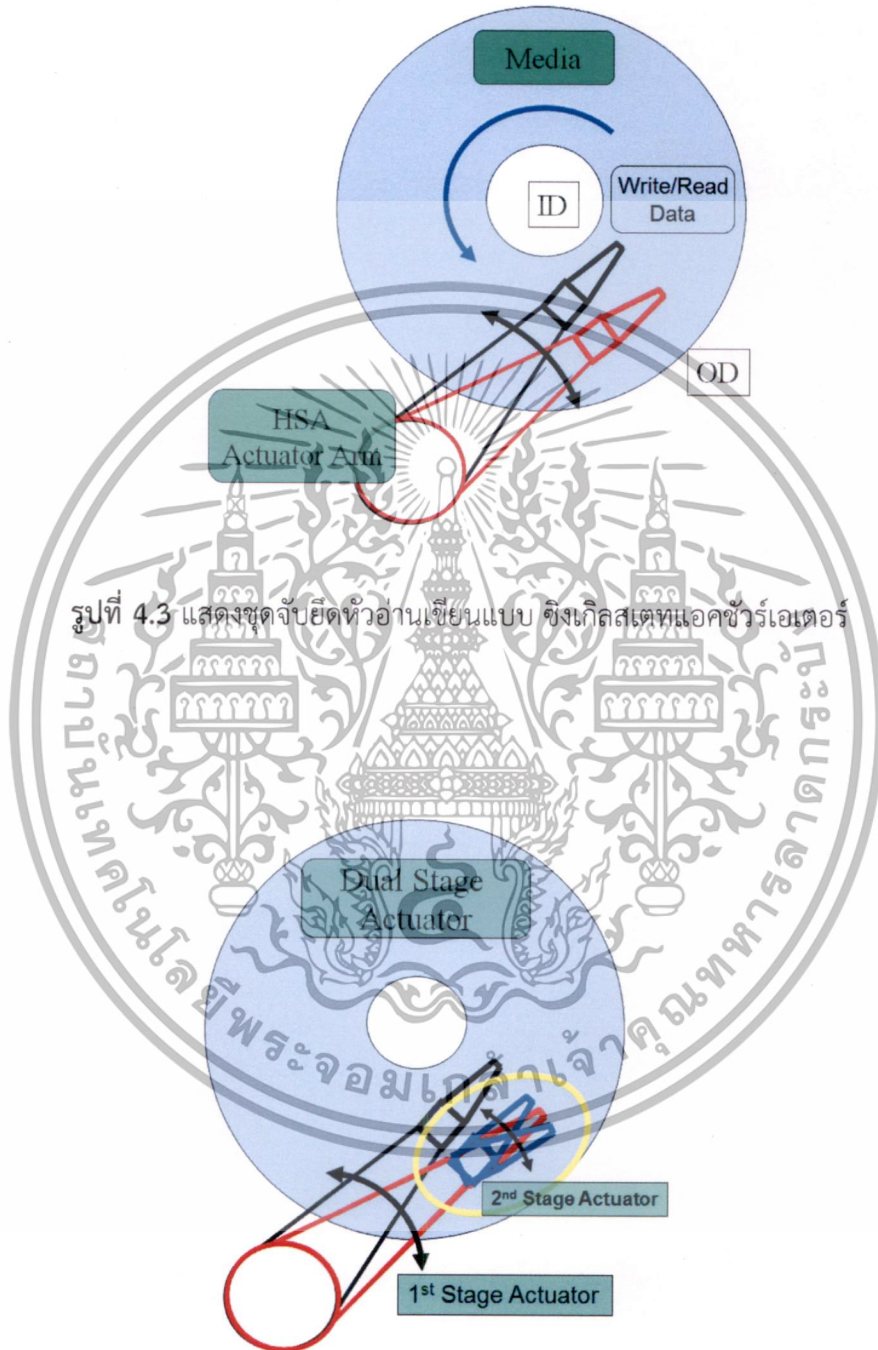
$$\text{error \%} = \left| \frac{17.8 - 17.68}{17.8} \right| \times 100\% = 0.67\% \quad (4.3)$$

#### 4.2 การศึกษาความแตกต่างการออกแบบชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ซิงเกิลสเตทแอกซ์ วัวร์เอเตอร์และคูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

การออกแบบชิ้นส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยโปรแกรม Solidworks version 12 ของชิ้นส่วนต่างๆ ประกอบด้วย เบสเพลท โทลด์บีม วงจรไฟฟ้าชนิดอ่อน และ วัสดุเพียร์ โซอิเล็ทริกทรานส์ดีวเซอร์ (PZT) หลังจากนั้นก็นำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบกัน การทำงานของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นจะมีชุดจับยึดหัวอ่านเขียนอยู่ 2 รูปแบบ คือแบบ แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ ซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียน จากการเคลื่อนที่ของ HSA ได้เพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 4.3 โดยตัวชุดจับยึดหัวอ่านเขียนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบนแผ่นดิสก์ด้วยตัวเองได้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอ่านเขียนเนื่องจากการเพิ่มแชนกเตอร์ให้มีขนาดเล็กลง จึงจำเป็นต้องพัฒนาชุดจับยึดหัวอ่านเขียนที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้อย่างละเอียดและมีประสิทธิภาพ โดยการควบคุมให้ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเคลื่อนที่ได้จากทั้ง HSA และตัวชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเอง ซึ่งเรียกว่าชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ ซึ่งชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ คูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ นอกจากจะสามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นดิสก์โดยอาศัยการทำงาน ของ HSA แล้วตัวชุดจับยึดหัวอ่านเขียนยังถูกออกแบบมาให้สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะที่แคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแม่นยำมากขึ้นได้ ด้วยตัวของชุดจับหัวอ่านเขียนเอง โดยการอาศัยหลักการทำงานของ PZT ดังรูปที่ 4.4

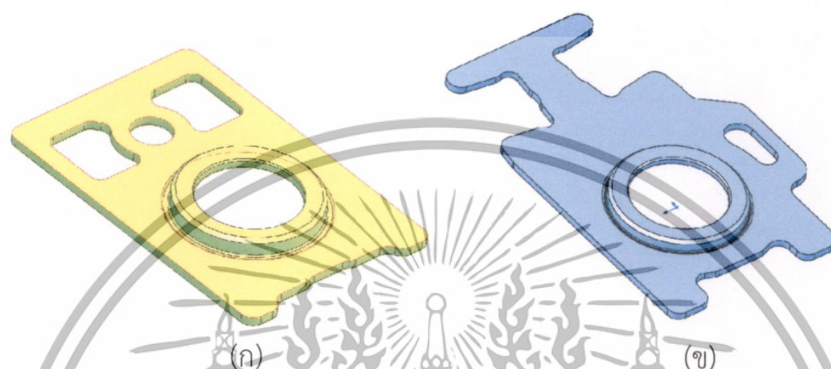


รูปที่ 4.3 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ซิงเกิลสเตทแอกชูเอเตอร์

รูปที่ 4.4 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ดวลส์เตทแอกชูเอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 เบสเพลททำหน้าที่เพื่อยึดกับชุดแกนจับยึดหัวอ่านเขียนจากการ Swage ของขบวนการ ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สำหรับวัสดุที่ใช้คือวัสดุเหล็กสแตนเลส การออกชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ เบสเพลทและโหลดบีมจะต้องออกแบบให้มีพื้นที่เพื่อวาง PZT ลงไปบนตัว ผลิตภัณฑ์ เพื่อสมรรถนะในการเคลื่อนที่ของหัวอ่านไปบนร่องเก็บข้อมูลที่มีขนาดเล็กลงและเพื่อ ตอบสนองการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั่นเอง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของชุดจับยึดหัวอ่าน แบบดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์



รูปที่ 4.5 แสดงรูปเบสเพลท (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ (ข) แบบดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

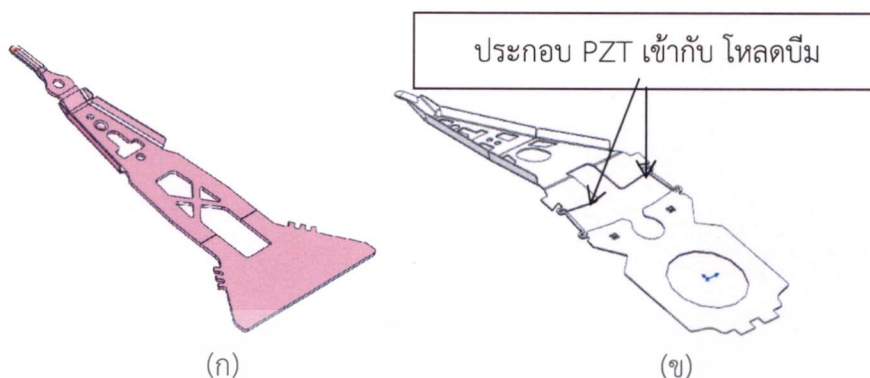
เบสเพลทของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์แตกต่างจากชุดจับยึด หัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์คือ เบสเพลทต้องออกแบบให้มีพื้นที่เพื่อประกอบ PZT ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เบสเพลท ของแบบดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ ที่ประกอบกับ PZT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 โหลดบีมทำหน้าที่เป็นตัวรองรับวงจรไฟฟ้าชนิดอ่อนและเชื่อมติดกับเบสเพลท โดยการเชื่อมจากระบวนการผลิตชุดจับยึดหัวอ่านเขียน สำหรับวัสดุที่ใช้คือวัสดุเหล็กสเตนเลส



รูปที่ 4.7 โหลดบีม (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ (ข) แบบคูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

4.2.3 วงจรไฟฟ้าชนิดอ่อน ทำหน้าที่ส่งสัญญาณอ่านเขียนไปที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเชื่อมติดกับ โหลดบีม สำหรับวัสดุที่ใช้ประกอบกันมี 4 ชนิด



รูปที่ 4.8 วงจรไฟฟ้าชนิดอ่อน (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ (ข) แบบคูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

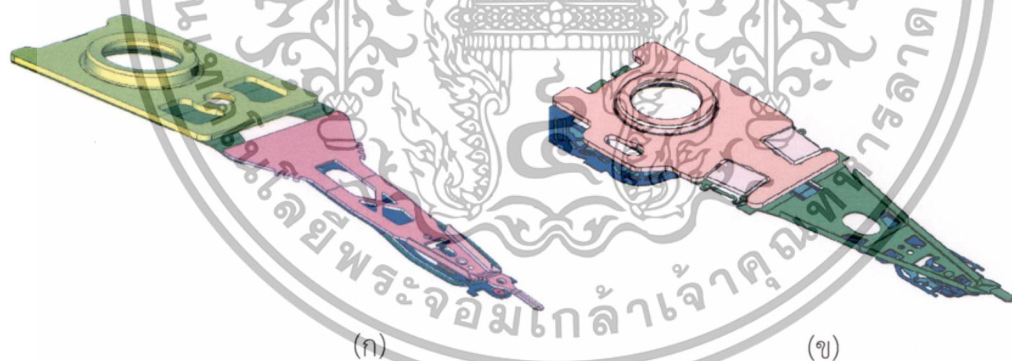
#### 4.2.4 ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อให้เป็นชุดประกอบจับยึดหัวอ่านเขียน



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 ชุดจับยึดหัวอ่านเขียน (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ฮวีเอเตอร์ (ข) แบบคูอัลสเตทแอกซ์ฮวีเอเตอร์



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 ชุดประกอบจับยึดหัวอ่านเขียน (ก) แบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ฮวีเอเตอร์ (ข) แบบคูอัลสเตทแอกซ์ฮวีเอเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

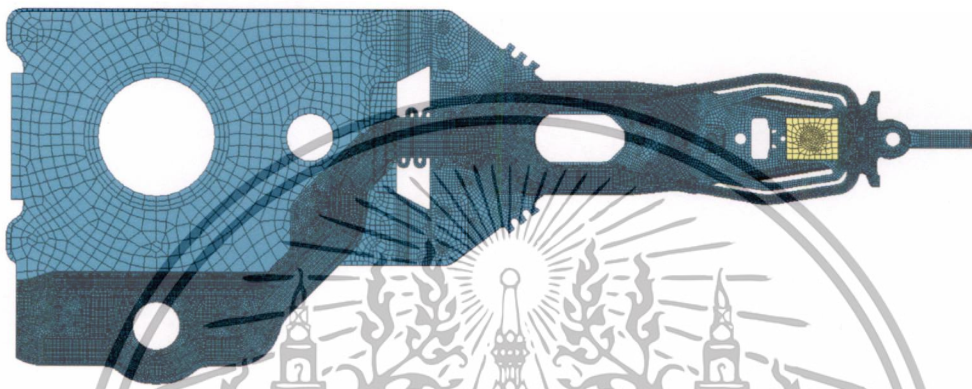
### 4.3 การวิเคราะห์สันสะเทือนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือการสร้างเอลิเมนต์ คุณสมบัติเชิงกลที่ใช้ในการวิเคราะห์

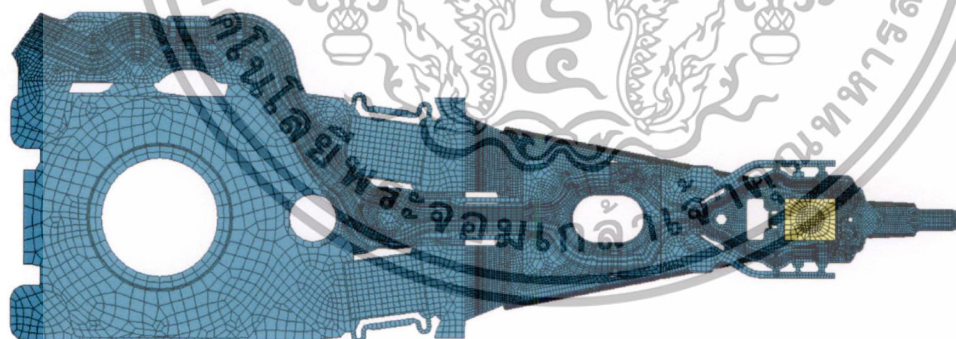
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 การสร้างเอลิเมนต์

โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในครั้งนี้คือ Ansys software โดยการสร้างเอลิเมนต์ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเป็นชนิด Tetrahedron ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นชนิด Solid 185 ซึ่งเป็นรูปแบบสำเร็จของซอฟต์แวร์ และ Solid 185 นั้นเหมาะสำหรับรูปแบบที่เป็นปัญหาสามมิติของโครงสร้างที่เป็นของแข็ง



รูปที่ 4.11 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์จัวร์เอเตอร์



รูปที่ 4.12 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบคูอัลสเตทแอกซ์จัวร์เอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 คุณสมบัติเชิงกลที่ใช้ในการวิเคราะห์

แบบจำลองของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย ๆ จำนวนมาก ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะถูกผลิตขึ้นจากวัสดุที่แตกต่างกันโดยมีคุณสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้

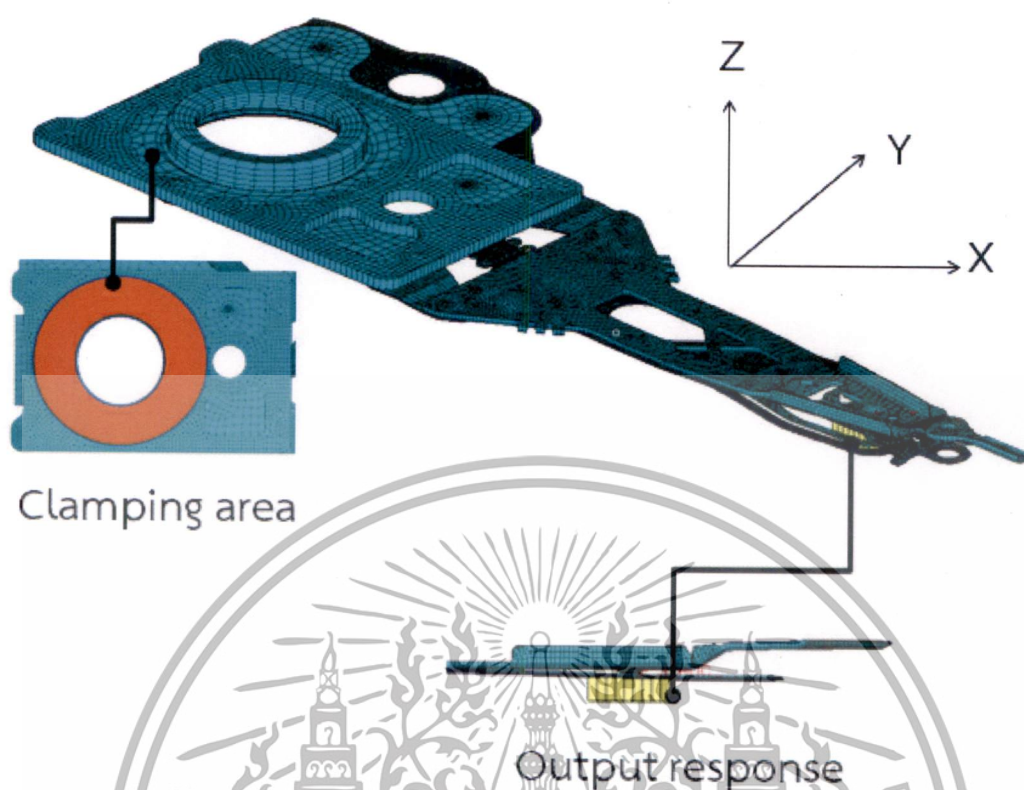
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ส่วนประกอบ Suspension assembly	ชื่อวัสดุ	ค่าโมดูลัสความ ยืดหยุ่น (MPa)	Poisson ratio	ความ หนาแน่น (kg/mm <sup>3</sup> )
Arm actuator	Stainless steel 304	$1.93 \times 10^5$	0.31	$7.75 \times 10^{-6}$
Base plate	Stainless steel 304	$1.93 \times 10^5$	0.31	$7.75 \times 10^{-6}$
Load beam	Stainless steel 304	$1.93 \times 10^5$	0.31	$7.75 \times 10^{-6}$
Trace gimbal assembly	1. Stainless steel 304	$1.93 \times 10^5$	0.31	$7.75 \times 10^{-6}$
	2. Polyimide	5860	0.33	$1.83 \times 10^{-6}$
	3. Copper	$1.24 \times 10^5$	0.34	$8.87 \times 10^{-6}$
	4. Cover layer	2.5	0.35	$1.4 \times 10^{-6}$
Slider	Silicon wafer	$4.0 \times 10^5$	0.30	$4.0 \times 10^{-5}$

### 4.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตคือ บริเวณหน้าผิวสัมผัสระหว่างเบสเพลท กับผิวหน้าของแขนแอคชูเอเตอร์จะถูกกำหนดให้เป็นจุดยึดติด และกำหนดให้บริเวณหัวอ่านเขียนเปรียบเสมือนสปริง (Spring element) ผลมาจากแรงยก (Air bearing surface, ABS) เปรียบเสมือนสภาวะฮาร์ดดิสไดร์ฟทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.13 หลังจากนั้นทำวิเคราะห์ด้วยโมดอลฟังก์ชันแล้ววิเคราะห์ผลการกระจัดที่หัวอ่านเขียน (Output response) ซึ่งจะวิเคราะห์ผลการตอบสนองการสั่นสะเทือนเฉพาะในแนวแกน Y เท่านั้น

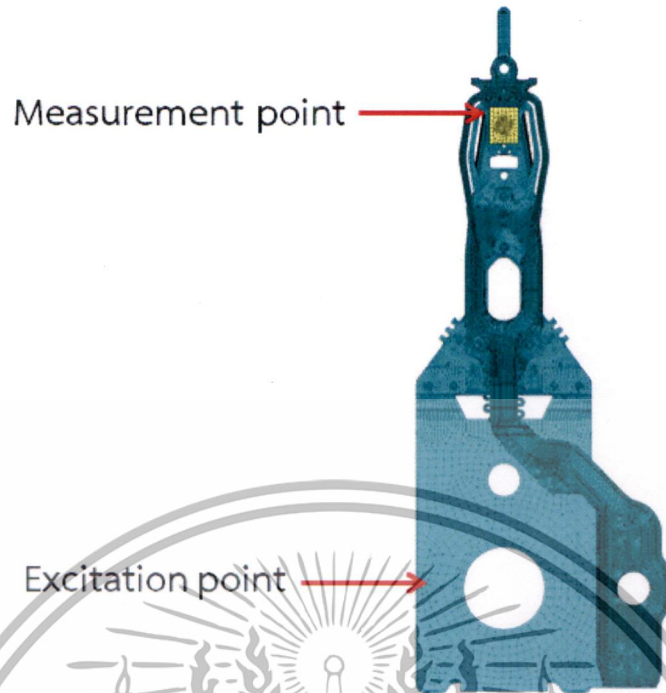
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

การกระตุ้นจะกระทำบนตัวเบสเฟลทเท่านั้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.13 สำหรับหัวอ่านเขียน กำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Z แต่จะเป็นอิสระในแนวแกน X และ แกน Y เสมือนสถานะที่ฮาร์ดดิสก์ได้รพทำงานจริงที่เคลื่อนในแนวแกน Z ได้น้อยมาก

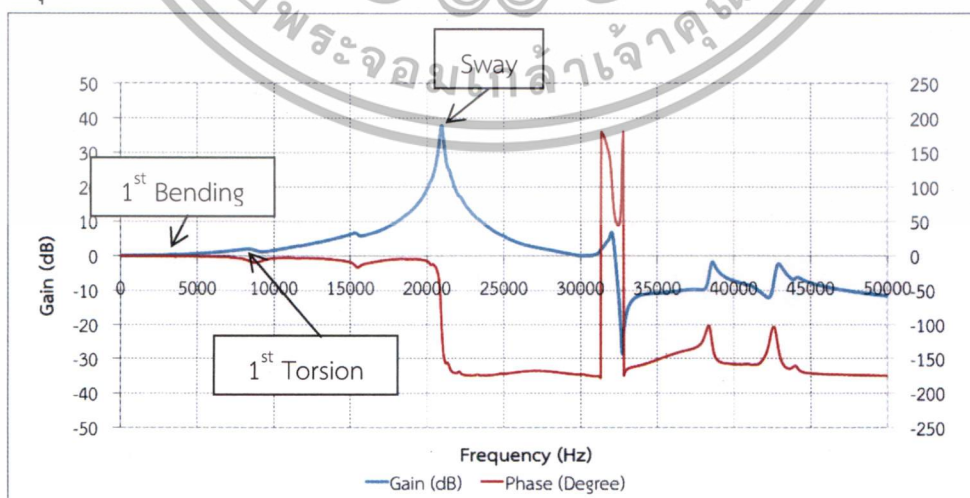
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 รูปแบบในการกระตุ้นและการวัดการสั่นสะเทือนแขนหัวอ่านเขียนสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4.3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบซิงเกิลสเตจแอกซ์วีร์เอเตอร์

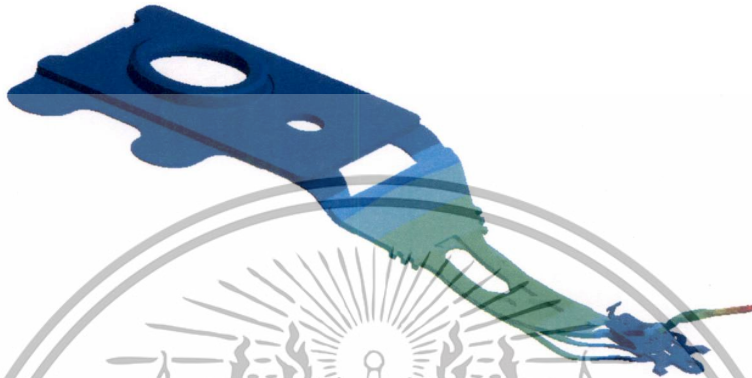
รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงในการสั่นสะเทือนต่อความถี่ในการกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงมุมของเฟสต่อความถี่ในการกระตุ้น



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟ

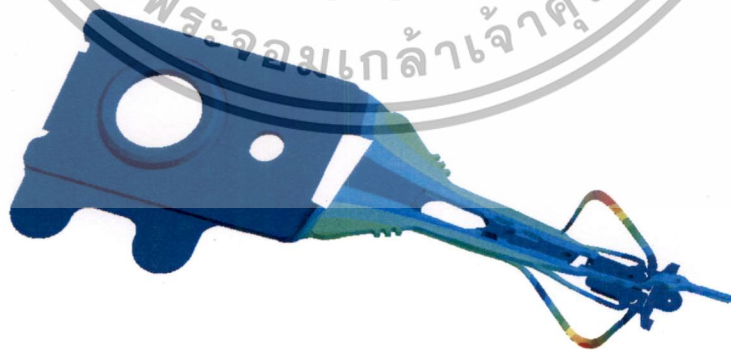
เอกสารถีนี้เป็นเอกไนต์เอลิเมนต์แบบซิงเกิลสเตจแอกซ์วีร์เอเตอร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบของการสั่นสะเทือนแบบ 1<sup>st</sup> Bending ของซิงเกิลสเตทแอกซ์วอร์เตอร์ คือส่วนบริเวณตรงกลางของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเกิดการดัดตัวอย่างชัดเจน ซึ่งถ้าดูมุมของเฟส จะไม่มีการเคลื่อนแต่อย่างใด เนื่องจากผลลัพธ์ที่จำมาวิเคราะห์จะแสดงเฉพาะในแนวแกน Y เท่านั้น ดังได้กล่าวไว้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.16 รูปแบบของการสั่นสะเทือนของโหมด 1<sup>st</sup> Bending ของซิงเกิลสเตทแอกซ์วอร์เตอร์

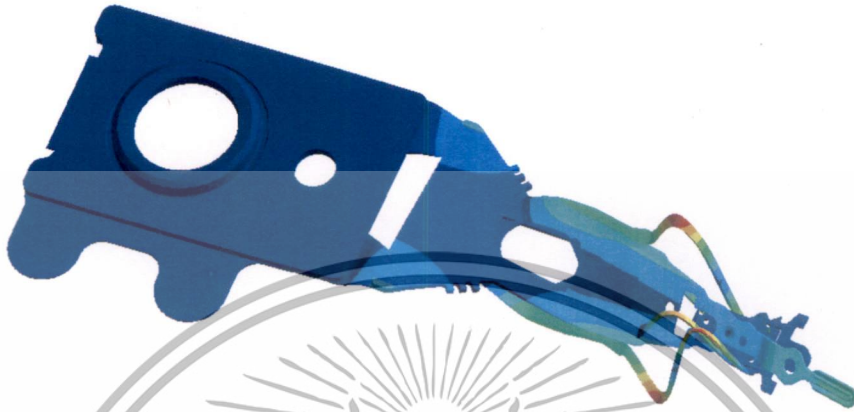
รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนของโหมด 1<sup>st</sup> Torsion ของซิงเกิลสเตทแอกซ์วอร์เตอร์คือ บริเวณโหนดบีเกิดการบิดตัวได้อย่างชัดเจน เป็นผลทำให้การควบคุมหัวอ่านเขียนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างลวดความแม่นยำลงจนถึงขั้นไม่สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 4.15 เพราะโหมด 1<sup>st</sup> Torsion แสดงมุมของเฟส 9.7 degree



รูปที่ 4.17 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมด 1<sup>st</sup> Torsion ของซิงเกิลสเตทแอกซ์วอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

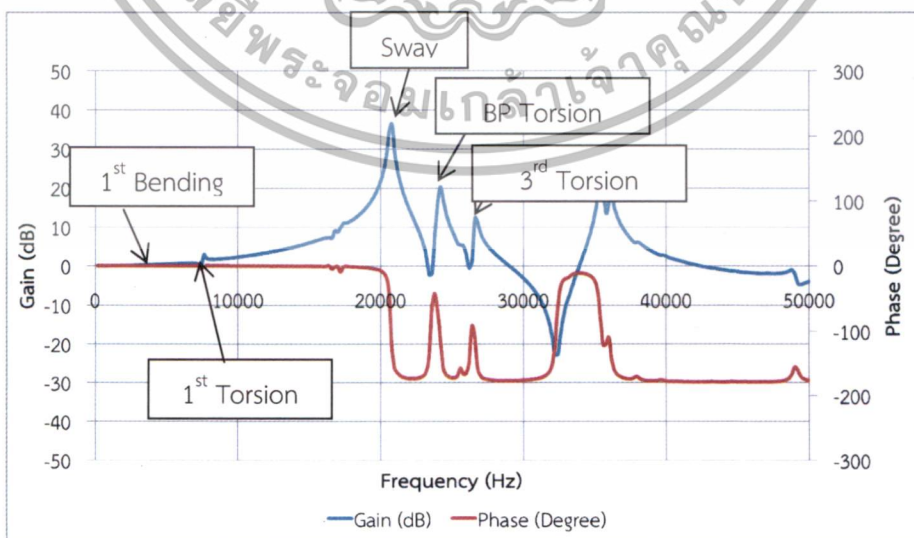
รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนของโหมด Sway คือชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวแกน Y จนไม่สามารถควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนได้ ซึ่งมีขนาดความรุนแรงมากกว่าโหมด Torsion ทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 4.15 เพราะโหมด Sway แสดงมุมของเฟส 180 degree



รูปที่ 4.18 รูปแบบของการสั่นสะเทือนของโหมด Sway ของซิงเกิลสเตจแอกซ์ฮวีเอเตอร์

#### 4.3.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบดูลัสเตทแอกซ์ฮวีเอเตอร์

รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงในการสั่นสะเทือนต่อความถี่ในการกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงมุมของเฟส ต่อความถี่ในการกระตุ้น



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการสั่นสะเทือนการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของ

ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดูลัสเตทแอกซ์ฮวีเอเตอร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.20 แสดงรูปแบบของการการันสะเทือนแบบ 1<sup>st</sup> Bending ของคูอัลสเตทแอกซ์วอร์เอเตอร์ คือส่วนบริเวณตรงกลางของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเกิดการดัดตัวอย่างชัดเจน ซึ่งถ้าดูมุมของเฟส จะไม่มีการเคลื่อนแต่อย่างใด เนื่องจากผลลัพธ์ที่จำมาวิเคราะห์จะแสดงเฉพาะในแนวแกน Y เท่านั้น ดังได้กล่าวไว้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.20 รูปแบบของการการันสะเทือนของโหมด 1<sup>st</sup> Bending ของคูอัลสเตทแอกซ์วอร์เอเตอร์

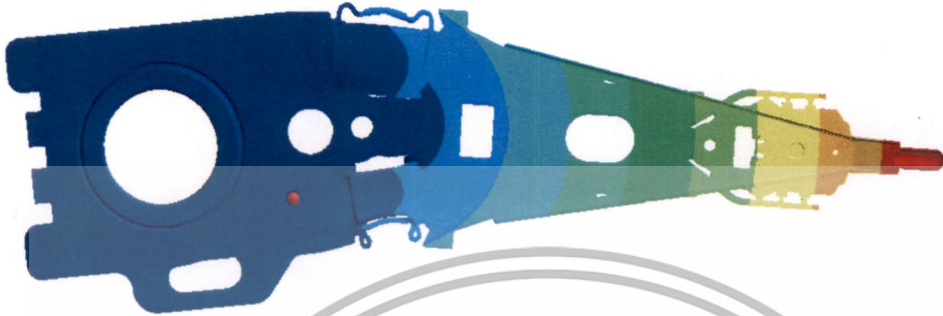
รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการการันสะเทือนของโหมด 1<sup>st</sup> Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วอร์เอเตอร์คือ บริเวณโหนดปมเกิดการบิดตัวอย่างชัดเจน เป็นผลทำให้การควบคุมหัวอ่านเขียนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างเสถียรความแม่นยำลงจนถึงขั้นไม่สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 4.19 เพราะโหมด 1<sup>st</sup> Torsion แสดงมุมของเฟส 3.5 degree



รูปที่ 4.21 รูปแบบของการการันสะเทือนของโหมด 1<sup>st</sup> Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วอร์เอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนของโหมต Sway คือชุดจับยึดหัวอ่านเขียนเคลื่อนที่กลับไป-มาในแนวแกน Y จนไม่สามารถควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนได้ ซึ่งมีขนาดความรุนแรงมากกว่าโหมต Torsion ทัวไป นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 4.19 เพราะโหมต Sway แสดงมุมของเฟส 180 degree



รูปที่ 4.22 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมต Sway ของคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์

รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนของโหมต BP Torsion ของคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์ คือบริเวณเบสเพลทเกิดการบิดตัวได้อย่างชัดเจน เป็นผลทำให้การควบคุมหัวอ่านเขียนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างเสถียรความแม่นยำลงจนถึงขั้นไม่สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 4.19 เพราะโหมต BP Torsion แสดงมุมของเฟส 42.5 degree



รูปที่ 4.23 รูปแบบของการการสั่นสะเทือนของโหมต BP Torsion ของคู่อัลสเททแอกซ์วัวร์เอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนของโหมด  $3^{\text{rd}}$  Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ คือบริเวณเบสเพลทโหลดบีมและกิมบอล เกิดการบิดตัวอย่างชัดเจน เป็นผลทำให้การควบคุมหัวอ่านเขียนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างลดความแม่นยำาลงจนถึงขั้นไม่สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 4.19 เพราะโหมด BP Torsion แสดงมุมของเฟส 92.5 degree

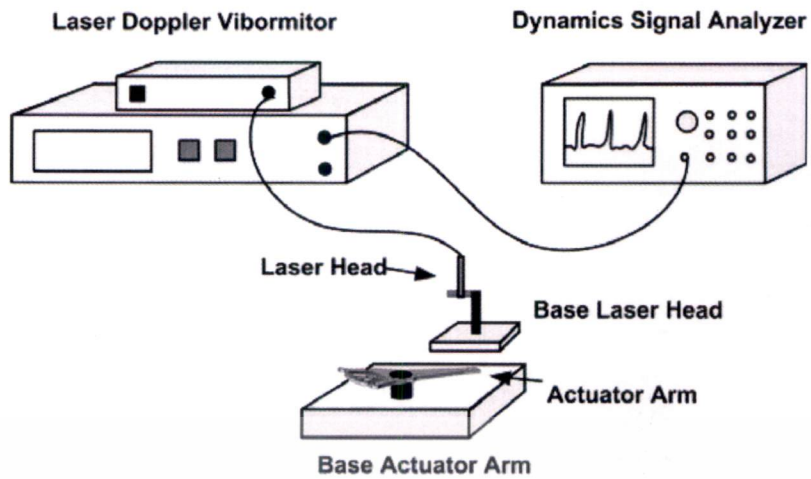


รูปที่ 4.24 รูปแบบของการสั่นสะเทือนของโหมด  $3^{\text{rd}}$  Torsion ของคูอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

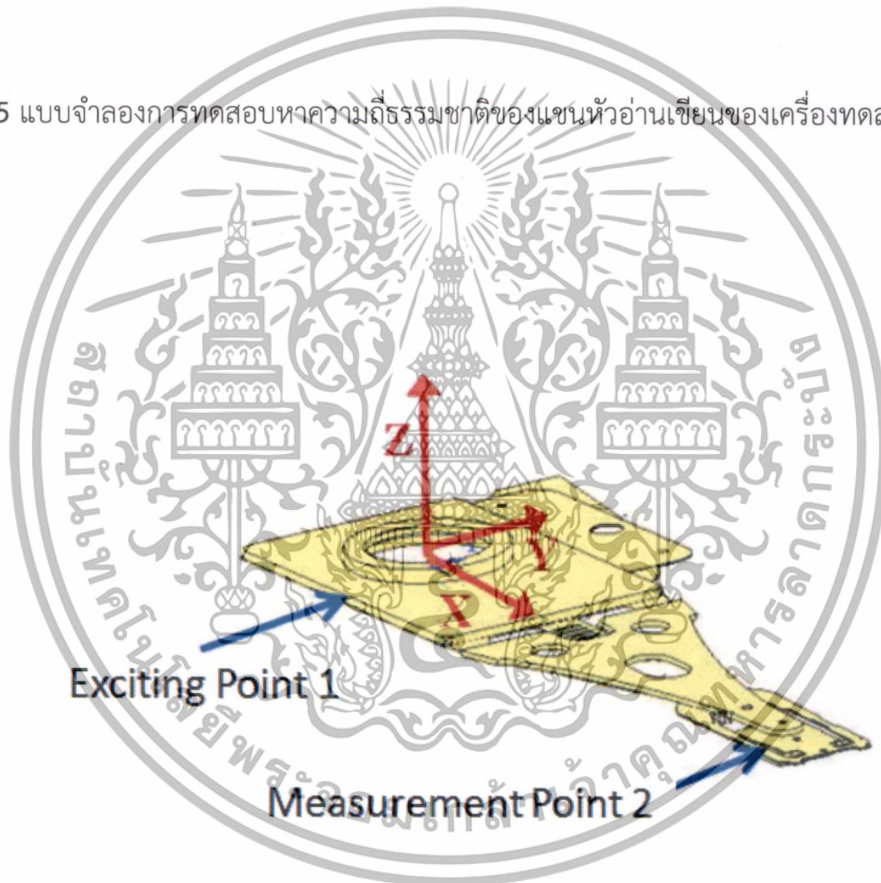
#### 4.4 การทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง Scanning laser doppler vibrometer (SLDV)

ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยที่ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนที่นำมาทดสอบนั้นเป็นแบบแขนเดียว โดยยึดแน่นติดอยู่กับส่วนที่เป็นฐานโลหะ โดยการยึดนั้นเป็นการยึดแน่นโดยไม่มีแบริง ทั้งนี้เป็นเพื่อที่จะศึกษาการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านเขียนเพียงอย่างเดียว ในการทดสอบหา Frequency response function (FRF) ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน แสดงดังรูปที่ 4.25 เพื่อวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการสั่นสะเทือน ทางผู้วิจัยทดสอบโดยใช้ Impact hammer เป็นตัวกระตุ้น ความถี่ของการกระตุ้นจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0-50 kHz โดยการเป็นการกระตุ้นที่จุดเดียว ในการทดสอบนั้นบริเวณที่จะทำการกระตุ้นจะอยู่บริเวณตำแหน่งหมายเลขที่ 1 หลังจากนั้นใช้อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนทางแสง SLDV ตรวจสอบการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของหัวอ่านเขียนที่ตำแหน่งหมายเลขที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 จากการทดสอบข้อมูลของแรงที่ใช้กระตุ้นโดย Impact hammer และสัญญาณที่ได้จาก SLDV จะถูกส่งไปยัง Dynamics signal analyzer [10] เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อหาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

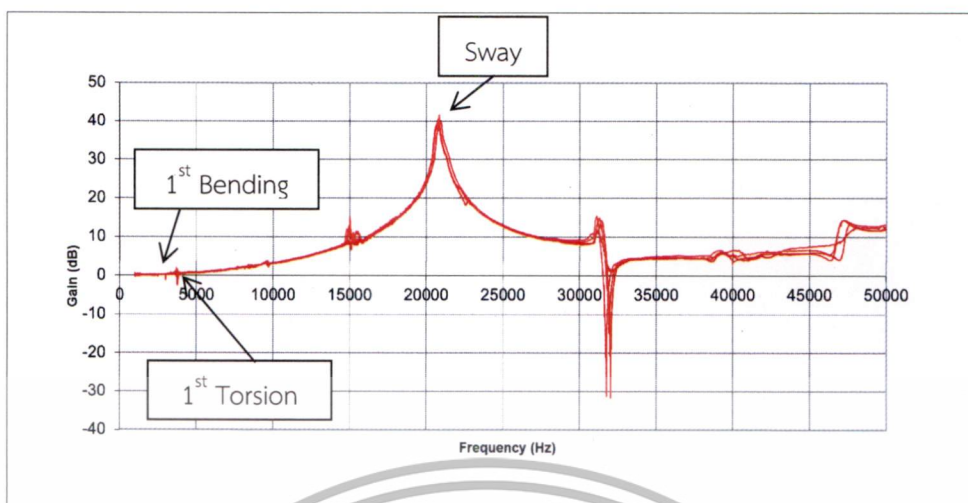


รูปที่ 4.25 แบบจำลองการทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านเขียนของเครื่องทดสอบ SLDV

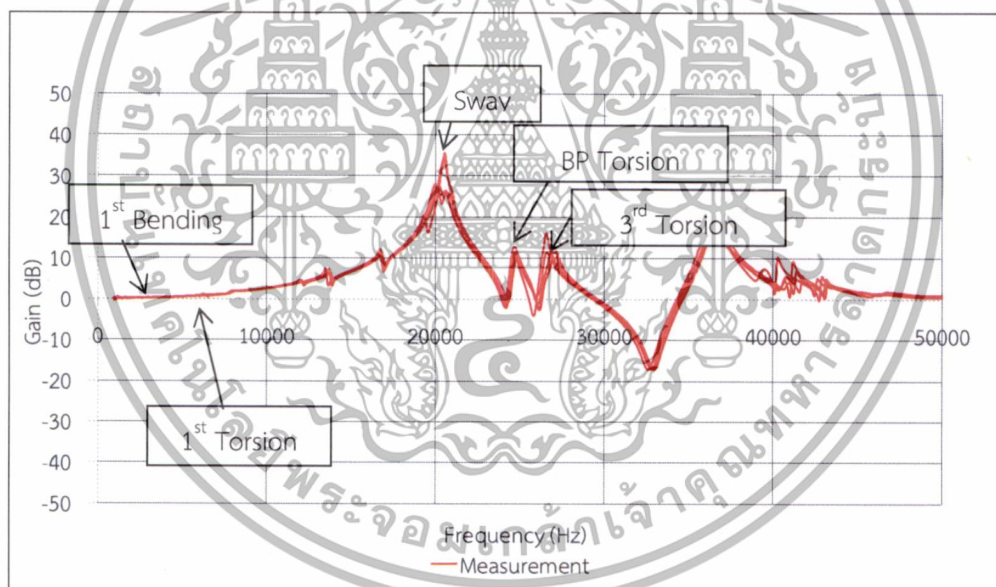


รูปที่ 4.26 รูปแบบในการกระตุ้นและการวัดการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนของซิงเกิลสเตทแอกซ์เรียเตอร์

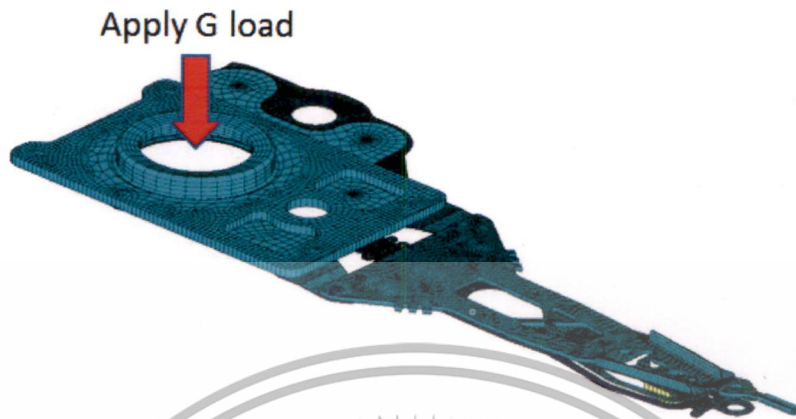


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนของดุกัลสเตทแอกซ์เรียเตอร์

#### 4.5 การวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน

การวิเคราะห์การตกกระแทกในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเฉพาะชุดจับยึดหัวอ่านเขียนที่เป็นแบบชิ้นเดียวเท่านั้น กำหนดความถี่เริ่มต้นเข้าไปบริเวณรูของเบตเพลท แสดงในรูปที่ 4.29 กำหนดโหลดที่มีความแตกต่างของความกว้างสัญญาณพัลส์ของความถี่แบบครึ่งคาบด้วย 0.5 1 และ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.30 จากนั้นวิเคราะห์หาค่าขนาดของความเร่ง (Gravity G) ของการตก กระแทกที่ส่งผลให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ ซึ่งเรียกว่า Lift-off shock = (G/gram)



รูปที่ 4.29 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน

#### 4.6 เครื่องมือสำหรับใช้ทดสอบการตกกระแทก

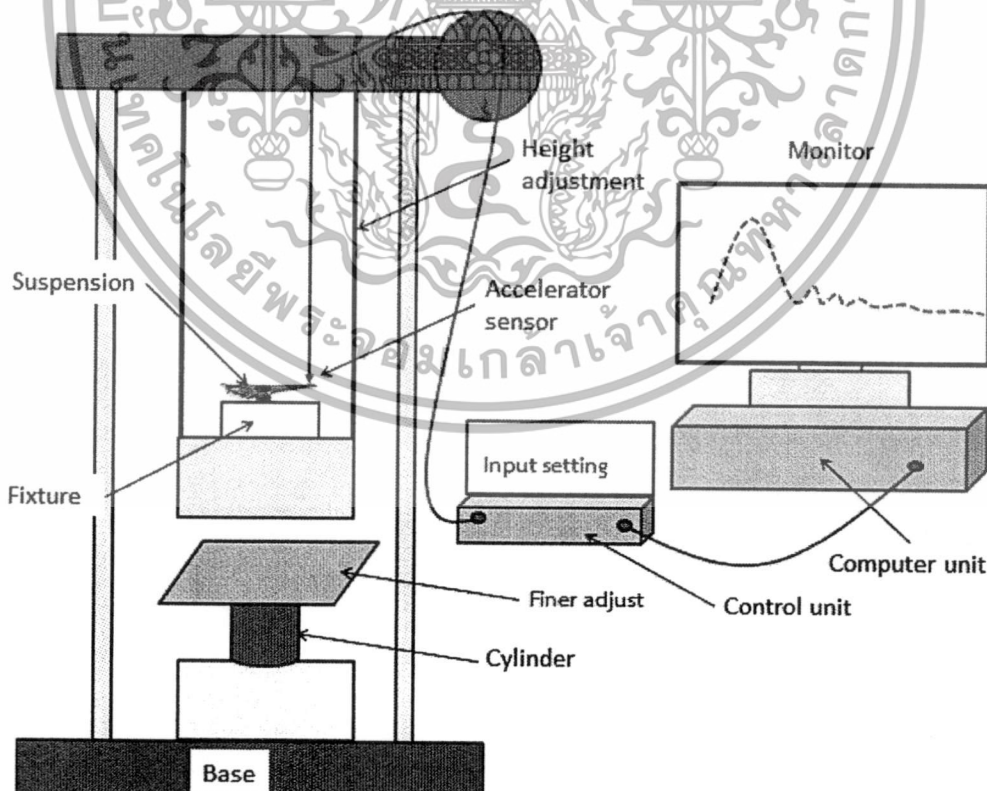
เครื่องทดสอบการตกกระแทกใช้เป็นเครื่องมือในการทดสอบการตกกระแทกชิ้นส่วนของชุด จับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั่วไป โดยเครื่องทดสอบนี้สามารถที่จะกำหนดสัญญาณพัลส์เริ่มต้น และ ค่าความเร่งเริ่มต้นได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการทดสอบที่ผู้ทดลองต้องการ ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยได้ กำหนด สัญญาณพัลส์ที่ 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที เพื่อหาความเร่งตอบสนองของหัวอ่านเขียนที่แยก ออกจาก แผ่นจานดิสก์ต่อแรงลอยตัวของหน้าพื้นผิวรองรับอากาศ ซึ่งวิธีการทดลองทำได้ดังนี้

1. เตรียมชุดจับยึดหัวอ่านเขียนที่ต้องการทำการทดสอบการตกกระแทก
2. นำชุดจับยึดหัวอ่านเขียนประกอบเข้ากับ Fixture เสมือนสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน คือใช้ Screw ยึดบริเวณรูของเบทเพลท ให้หัวอ่านเขียนสัมผัสกับ Fixture ซึ่ง เปรียบเสมือนแผ่นดิสก์ ในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน (Load state condition) พร้อมกับต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อปล่อย Voltage
3. ทำการเซตค่าสัญญาณพัลส์เริ่มต้นที่ต้องการทดสอบ
  - 3.1 ใช้ทรงกระบอกตัน ขนาดความสูง 3 เซนติเมตรสำหรับ สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที
  - 3.2 ใช้ทรงกระบอกตัน ขนาดความสูง 8 เซนติเมตรสำหรับ สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

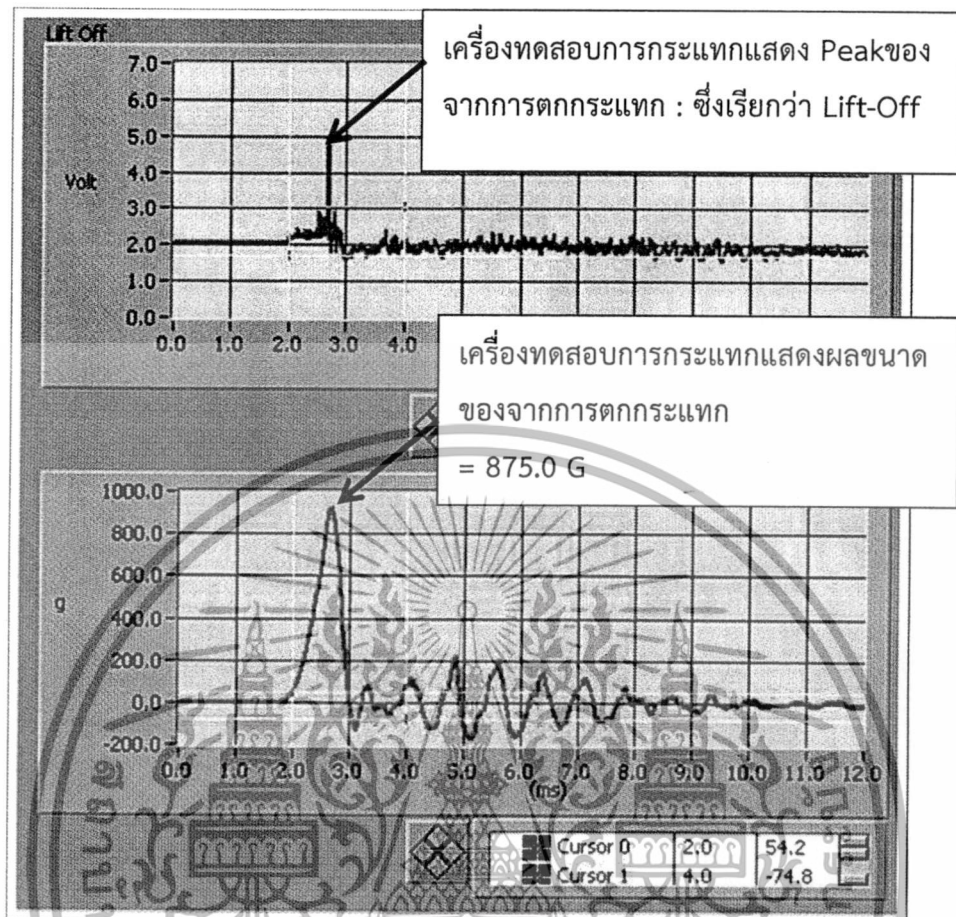
### 3.3 ใช้ทรงกระบอกตันขนาดความสูง 20 เซนติเมตรสำหรับ สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที

4. ทำการทดสอบการตกกระแทกเพื่อตรวจสอบและเซตค่าสัญญาณพัลส์ที่ต้องการ โดยที่แสดงไว้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ การใช้แผ่นรองรับการกระแทก ในกรณีปรับค่าสัญญาณพัลส์ละเอียด
5. เมื่อได้ค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ต้องการแล้ว นำชุดจับยึดหัวอ่านเขียนในข้อ 2 มาประกอบเข้ากับ Dropper หลังจากนั้นก็ให้สัญญาณไฟฟ้า (Voltage) เพื่อที่จะแสดง Peak เมื่อมีการ Lift-off ชุดจับยึดหัวอ่านยกออกจาก Fixture ซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นดิสก์
6. ทำการทดสอบการตกกระแทกของชุดประกอบที่จับยึดหัวอ่านที่ค่าความสูงที่แสดงไว้ของค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์นั้นๆ จนกว่าชุดจับยึดหัวอ่านเขียนจะ Lift-off ออกจาก Fixture
7. ขณะที่หัวอ่านเขียนแยกออกจาก Fixture จะทำให้เกิด Peak ของสัญญาณ Voltage ในขณะเดียวกันที่จะแสดง Peak ค่าขนาดของความเร่งตอบ หลังจากนั้นก็นับที่ค่า Peak ไว้เพื่อไปคำนวณหาค่า Lift-off shock ต่อไป



รูปที่ 4.30 เครื่องมือสำหรับใช้ทดสอบการตกกระแทก (Shock tower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



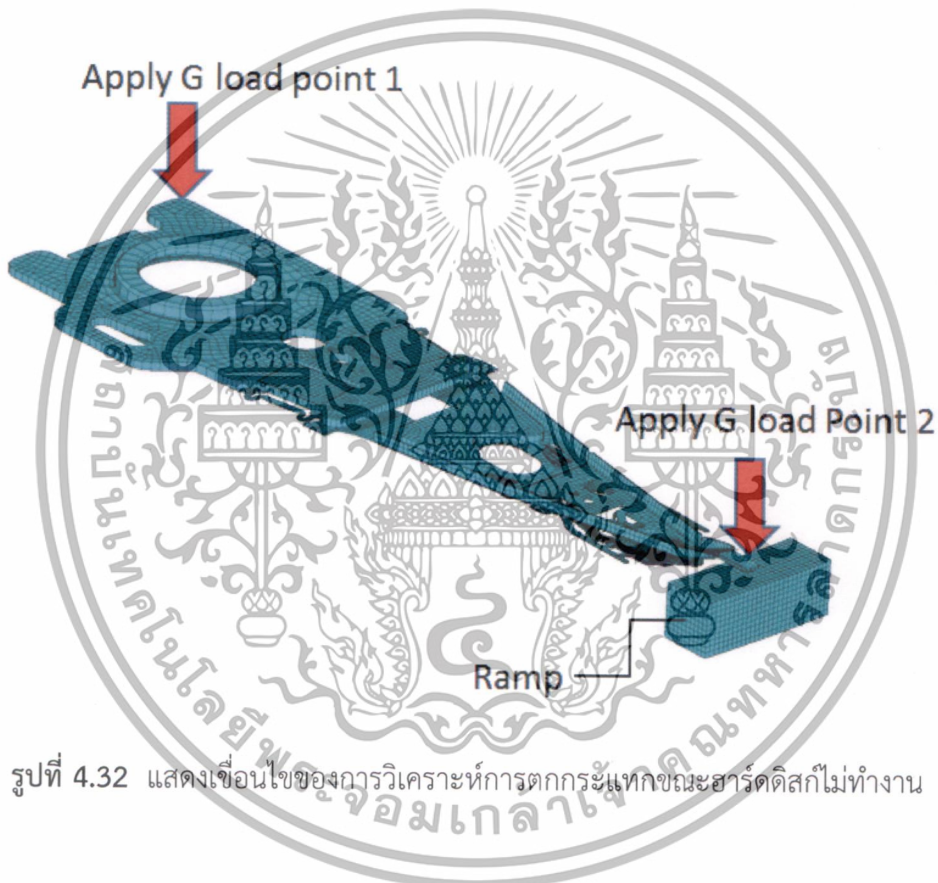
รูปที่ 4.31 ผลจากความเร่งตอบสนองที่เครื่องทดสอบแสดง

จากรูปที่ 4.31 แสดงการอ่านค่าจุดสูงสุดของแรงดันทางไฟฟ้าขณะที่หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ได้เริ่มแยกออกจากแผ่นดิสก์หรือที่เรียกว่า Lift-off shock ส่วนภาพด้านล่างแสดงถึงค่าความเร่งการตกกระแทกสูงสุดที่ทำให้หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ได้เริ่มแยกออกจากแผ่นดิสก์ ซึ่งจุดของสุดของแรงดันทางไฟฟ้าและความเร่งการตกกระแทกสูงสุดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่ของติมเฟิล กับ SST Tongue ของดูอัลสเตทแอกซ์ ซัวร์เอเตอร์

การศึกษาการตกกระแทกแบบขณะฮาร์ดดิสก์ไม่ทำงาน ซึ่งหมายความว่าชุดจับยึดหัวอ่านเขียนจะไปจอดบน Ramp หลังจากนั้นใส่ความเร่งเริ่มต้นไปที่บริเวณรูของเบสเพลทจุด Apply G load point 1 และ Apply G load point 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.32 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่ของติมเฟิล และ SST Tongue เนื่องจากสภาวะของการตกกระแทก



รูปที่ 4.32 แสดงเงื่อนไขของการวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไม่ทำงาน

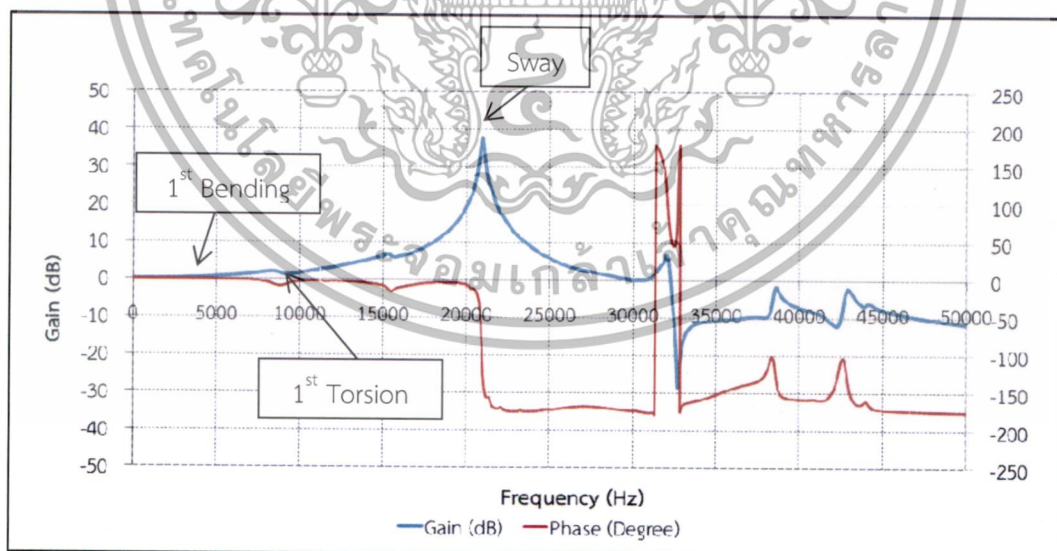
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลที่ได้จากการทำวิจัย แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สำหรับสมรรถนะเชิงพลวัตของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนหลักมี 6 ส่วนดังนี้

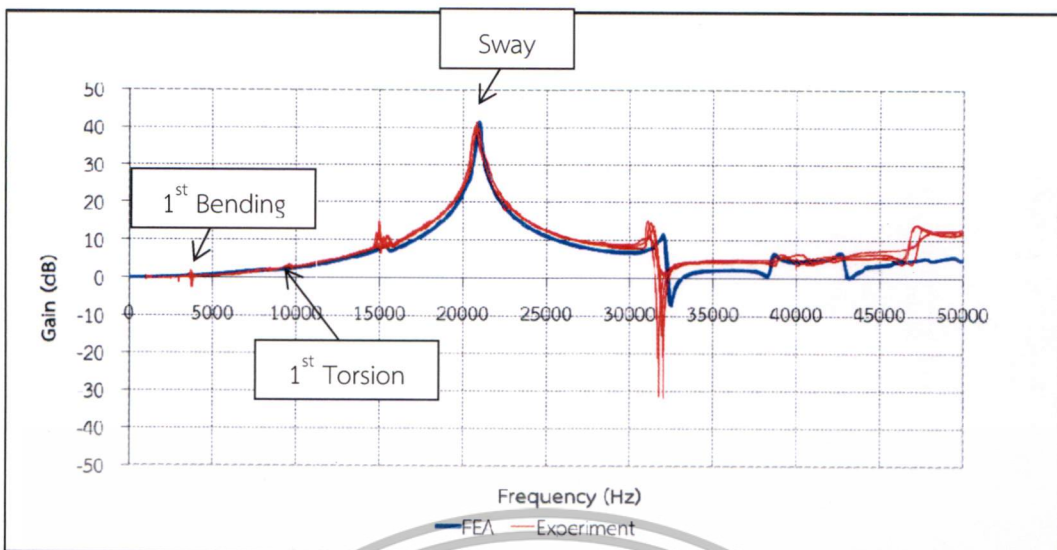
### 5.1 ผลการสั่นสะเทือนด้วยความถี่โมดอลและตรวจสอบความถูกต้องของซิงเกิลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยความถี่โมดอลจะนำมาใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน และการตรวจสอบความถูกต้องด้วยเครื่องทดสอบ แล้วเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของโหมดหลักพบว่า มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 สำหรับชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ ซิงเกิลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์ สำหรับในส่วนของกราฟแสดงค่าของ Gain (dB) ในแนวตั้ง เปรียบเทียบกับความถี่ (Hz) ในแนวแกนนอน แสดงในรูปที่ 5.11 สำหรับลักษณะรูปร่างของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแต่ละความถี่โหมดหลักด้วยโปรแกรม Ansys เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบที่ได้จากเครื่อง SLDV แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนของการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนของการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลจากการทดสอบ SLDV ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซีงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติระหว่างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซีงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์

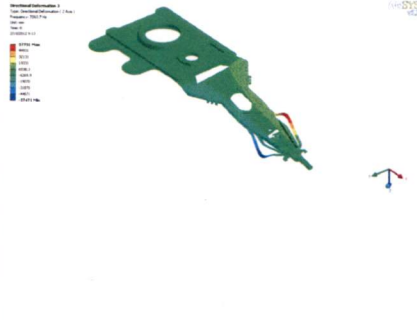
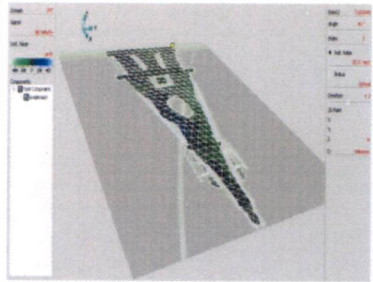

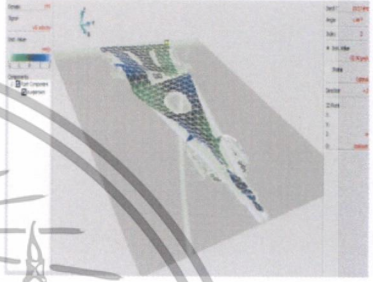
Mode ID	FEA (Hz)	Experiment (Hz)	% Difference
1st Bending	3856	3846	+0.26%
1st Torsion	8568	8523	-0.53%
Sway	20895	20958	0.30%

$$\text{Difference} = 100 * ((\text{Experiment} - \text{FEA}) / \text{Experiment})$$

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงรูปร่างลักษณะของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซีงเกิลสเตทแอกซ์วีเอเตอร์ เปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบ SLDV

รูปร่างโหมด SSA	FEA	Experiment
โหมด 1 <sup>st</sup> Bending		

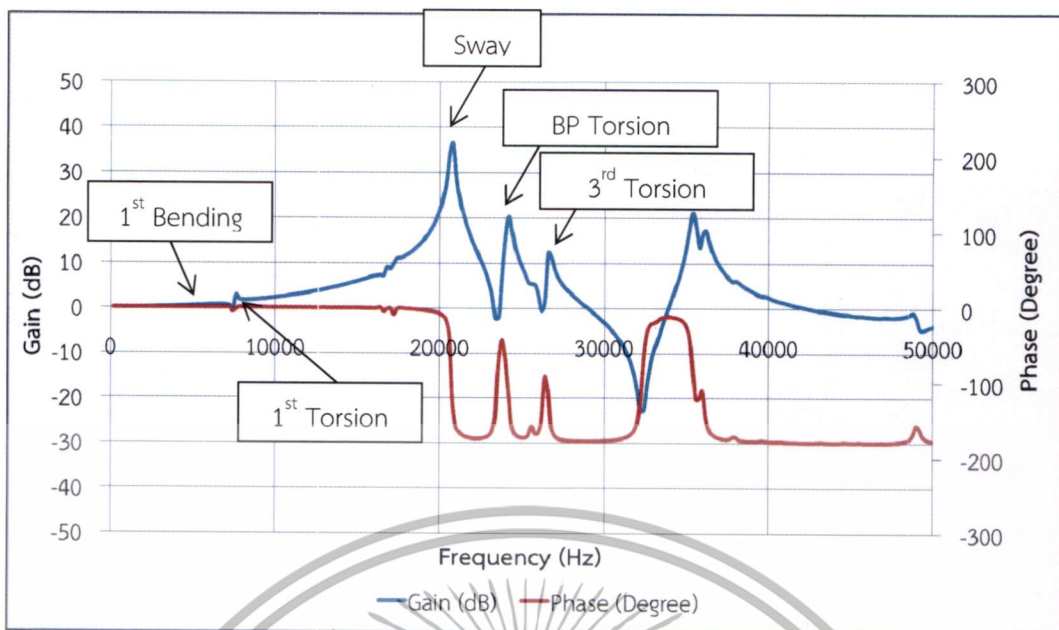
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมด 1 <sup>st</sup> Torsion		
โหมด Sway		

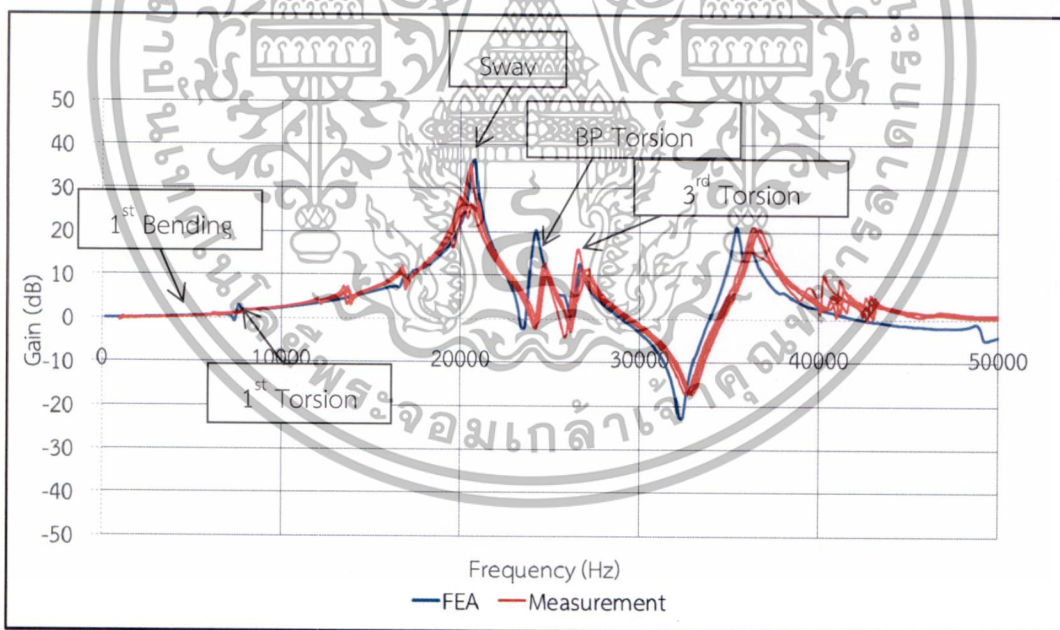
## 5.2 ผลการสันสะท้อนด้วยความถี่โมดอลและตรวจสอบความถูกต้องของคู่อัลสเททแอกซ์วาร์เอเตอร์

จากผลการวิเคราะห์การตอบสนองของการสันสะท้อนของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมกับเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลองของ ชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคู่อัลสเททแอกซ์วาร์เอเตอร์ พบว่าความถี่โมดอลแต่ละโหมดหลักมีความใกล้เคียงกันมาก คลาดเคลื่อนประมาณ 0.2-4.8 เปอร์เซ็นต์ เช่น ซึ่งในขณะเดียวกันรูปร่างที่เกิดจากการเคลื่อนไหว เช่น 1<sup>st</sup> Bending 1<sup>st</sup> Torsion Sway BP Torsion และ 3<sup>rd</sup> Torsion ที่ได้จากเครื่อง SLDV ยังมีการเคลื่อนไหวใกล้เคียงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคู่อัลสเตรทแอกซ์วีเอเตอร์



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลจากการทดสอบ SLDV ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคู่อัลสเตรทแอกซ์วีเอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความถี่ระหว่างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแบบชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดิวอัลสเททแอกซ์วีเอเตอร์

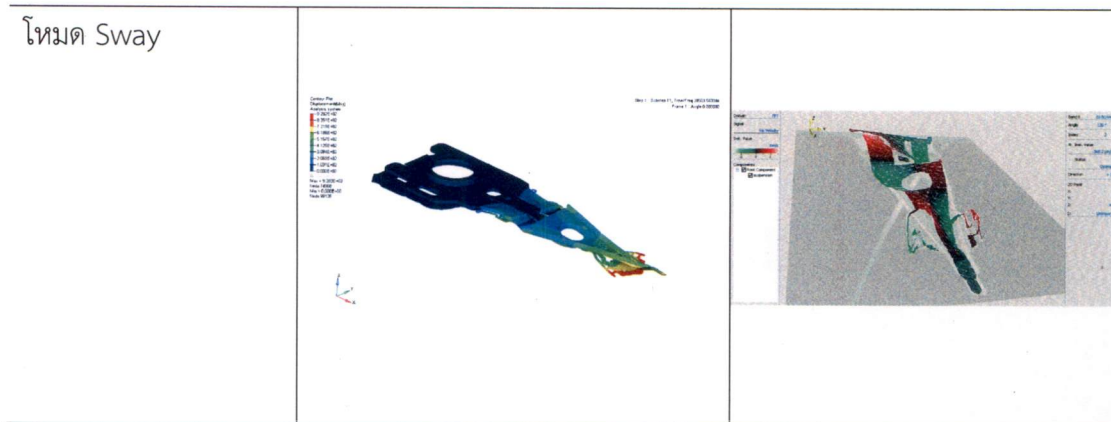
Mode ID	FEA (Hz)	Experiment (Hz)	% Difference
1st Bending	6,062	6,110	0.79%
1st Torsion	7,883	7,790	-1.19%
Sway	20,350	20,390	0.20%

$$\text{Difference} = 100 * ((\text{Experiment} - \text{FEA}) / \text{Experiment})$$

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดิวอัลสเททแอกซ์วีเอเตอร์ เปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบ SL-DV

รูปร่างโหมด	FEA	Experiment
โหมด 1 <sup>st</sup> Bending		
โหมด 1 <sup>st</sup> Torsion		

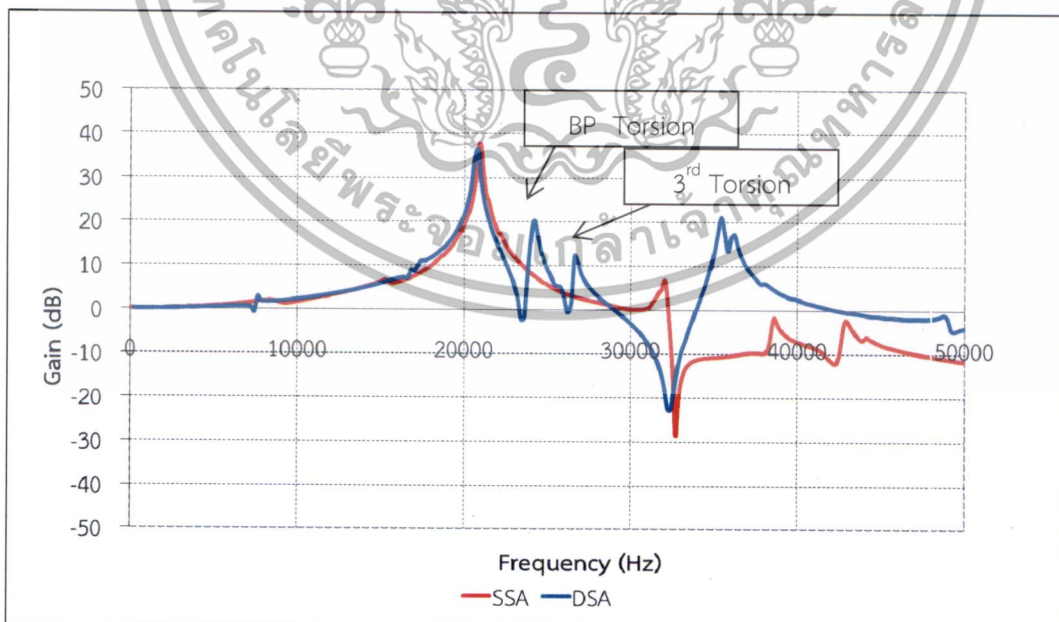
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบความถี่จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลระหว่างซิงเกิลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์กับคู่อัลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์

Mode ID	SSA (Hz)	DSA (Hz)	% Difference
1st Bending	3,856	6,062	36.39%
1st Torsion	8,568	7,883	-8.69%
Sway	20,895	20,350	-2.68%
BP Torsion	24,080	24,080	0%
3rd Torsion	-	34,270	-

$$\text{Difference} = 100 * ((\text{SSA} - \text{DSA}) / \text{SSA})$$



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ระหว่างระหว่างซิงเกิลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์กับคู่อัลสเตทแอกซ์วี่เอเตอร์

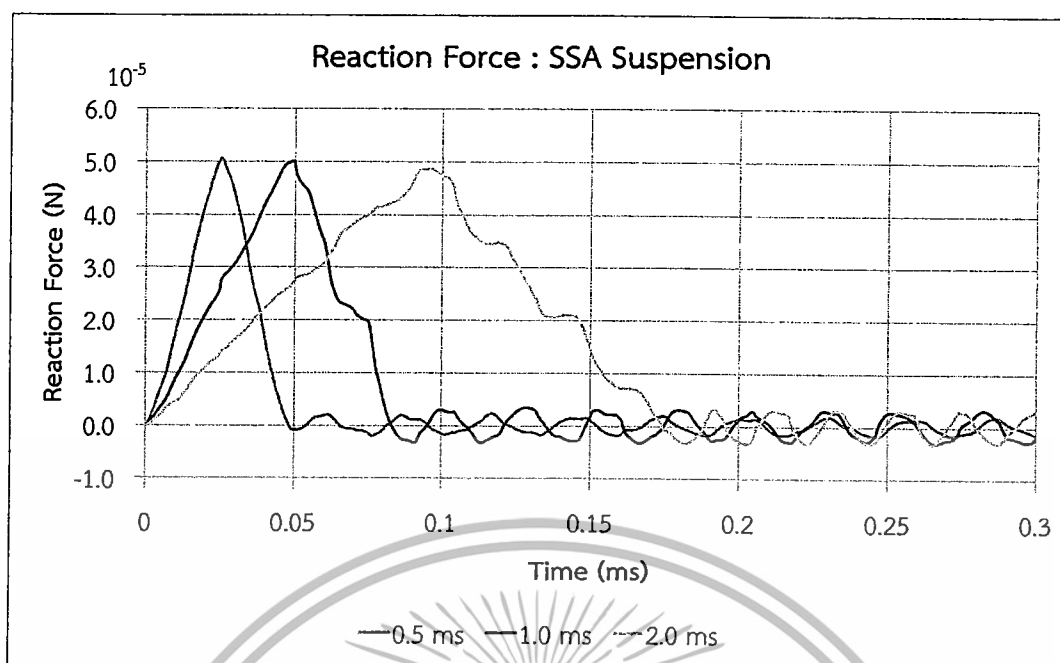
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของการสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างชุดจับยึดหัวอ่านแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์กับดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ พบว่า ดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ มีความถี่ธรรมชาติเพิ่มขึ้นของโหมด 1<sup>st</sup> Bending 36.39 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโหมด 1<sup>st</sup> Torsion และโหมด Sway มีความถี่ลดลง 8.69 เปอร์เซ็นต์ และ 2.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดจับยึดหัวอ่านแบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ มีโหมดเพิ่มขึ้นคือโหมด BP Torsion ที่ความถี่ 24,200 Hz และ โหมด 3<sup>rd</sup> Torsion ที่ความถี่ 26,600 Hz ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบเบสเพลทเพื่อให้มีพื้นที่สำหรับการวาง PZT ซึ่งส่งผลให้มีความถี่ธรรมชาติที่เปลี่ยนไปด้วยเช่นเดียวกัน

### 5.3 ผลการวิเคราะห์การตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงาน (Hard Disk Drive Operation shock analysis)

การวิเคราะห์การตกกระแทกในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไม่ทำงาน ในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงาน นั้นหัวอ่านเขียนจะถูกยกด้วยแรง Air Bearing Surface ABS มีหน่วยเป็นกรัม (Gram) ซึ่งการวิเคราะห์การตกกระแทกในสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำงานนั้นเป็นการทำนายหาค่าขนาดของความเร่ง (Gravity G) ของการตกกระแทกที่ส่งผลให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ ซึ่งเรียกว่า Lift-off shock นั้นหมายความว่าต้องมี ปริมาณความเร่งของการตกกระแทกที่มากพอเพื่อทำให้หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นดิสก์ ซึ่งการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อเพิ่ม Lift-off Shock จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการจำลองหาค่าความเร่งการตกกระแทกนั้น ได้ศึกษาที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกต่างกันคือ 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที จากการผลการศึกษาพบว่าความกว้างของสัญญาณพัลส์นั้นมีผลให้ค่า Lift-off shock เพิ่มขึ้น สำหรับ ชุดจับยึดหัวอ่านแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ค่า Lift-off shock คือ 194.69 G/gram 195.83 G/gram และ 200.81 G/gram ในส่วนของชุดจับยึดหัวอ่านแบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ค่า Lift-off shock คือ 352.44 G/gram 354.76 G/gram และ 359.89 G/gram ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 6.79 เปอร์เซ็นต์ และ 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ และชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดิวอัลสเตทแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



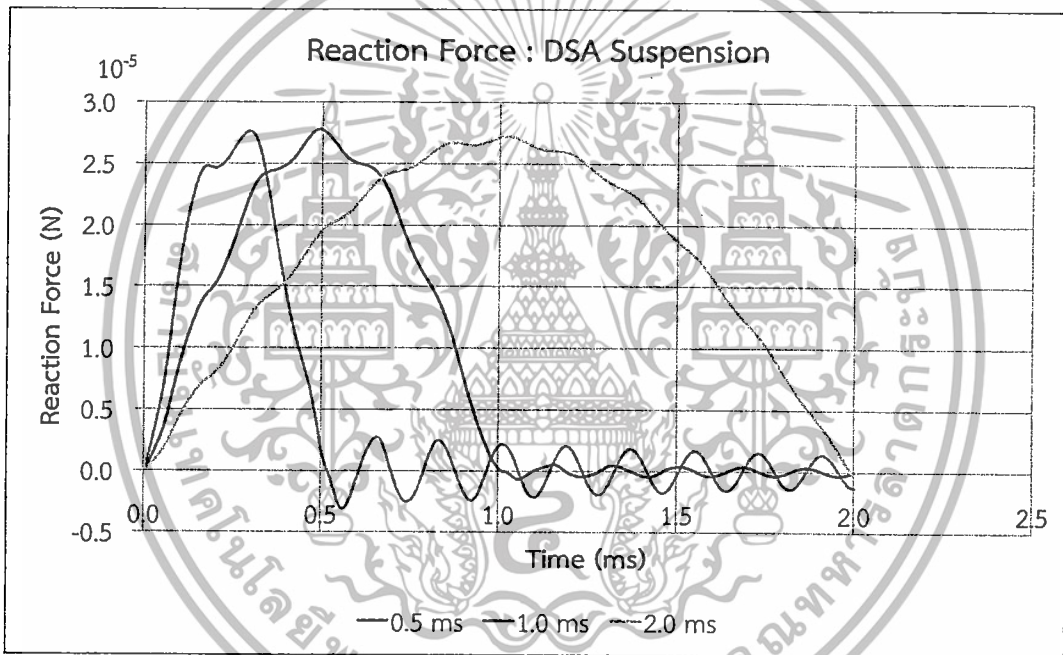
รูปที่ 5.6 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของ ชุดจับยึดหัวอ่านแบบซิงเกิลสเตท แอคชูเอเตอร์

จากรูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองของการตกกระแทกที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกต่างกันคือ 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที แกนตั้งแสดงผลแรงตอบสนองจากการตกกระแทก ส่วนแกนนอนคือเวลาจากการตกกระแทก จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจุดสูงสุดของแรงตอบสนองในแนวแกนตั้งจะลดลงเมื่อความกว้างของสัญญาณพัลส์มากขึ้น

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบจากเครื่องซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

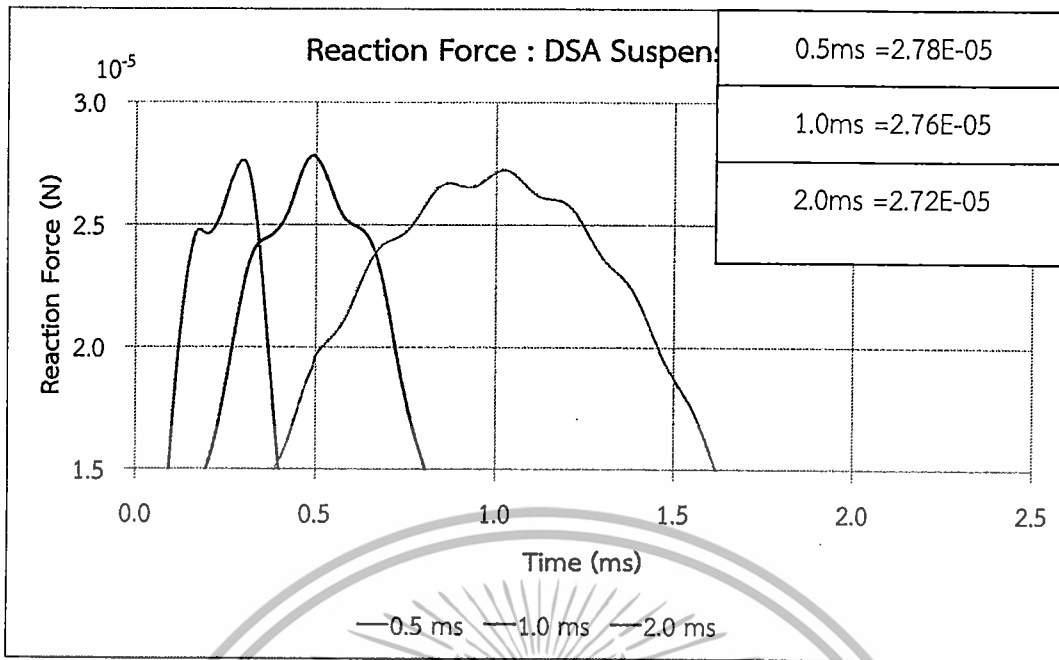
Time (ms)	Lift-off shock (G/gram)		
	FEA	Experiment	% Difference
0.5	194.69	203.53	4.54%
1.0	195.83	207.54	5.98%
2.0	200.81	214.45	6.79%

$$\text{Difference} = 100 * ((\text{Experiment} - \text{FEA}) / \text{Experiment})$$



รูปที่ 5.7 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านแบบดิวอัลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์

จากรูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองของการตกกระแทกที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกต่างกันกันคือ 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที แกนตั้งแสดงผลแรงตอบสนองจากการตกกระแทก ส่วนแกนนอนคือเวลาจากการตกกระแทก จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจุดสูงสุดของแรงตอบสนองในแนวแกนตั้งจะลดลงเมื่อความกว้างของสัญญาณพัลส์มากขึ้น



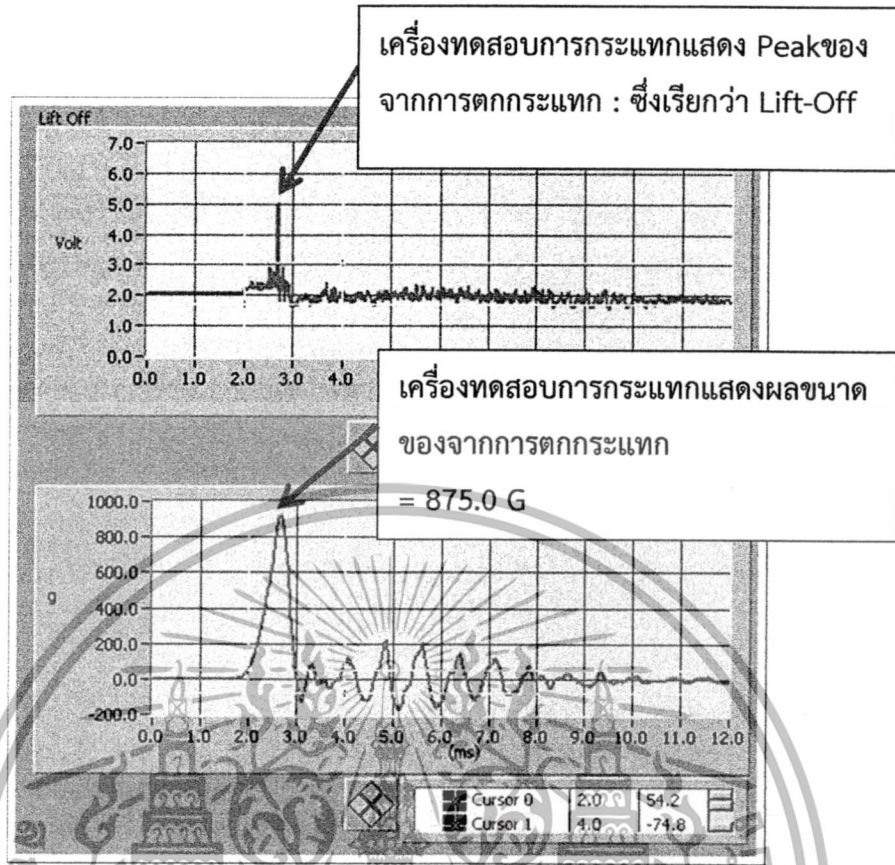
รูปที่ 5.9 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของแบบเฉพาะบริเวณของชุดจับยึดหัวอ่านแบบ DSA

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบจากเครื่อง (SSA Suspension)

Time (ms)	Lift-off shock (G/gram)		
	FEA	Experiment	% Difference
0.5	352.44	350.06	-0.68%
1.0	354.76	354.77	0.01%
2.0	359.89	362.50	-0.73%

$$\text{Difference} = 100 * ((\text{Experiment} - \text{FEA}) / \text{Experiment})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงผลของความเร่งตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของเครื่องทดสอบ

จากรูปที่ 5.8 แสดงการคำนวณดังนี้

เครื่องทดสอบการตกกระแทกอ่านค่าความเร่งสูงสุด ได้ 875.0 G

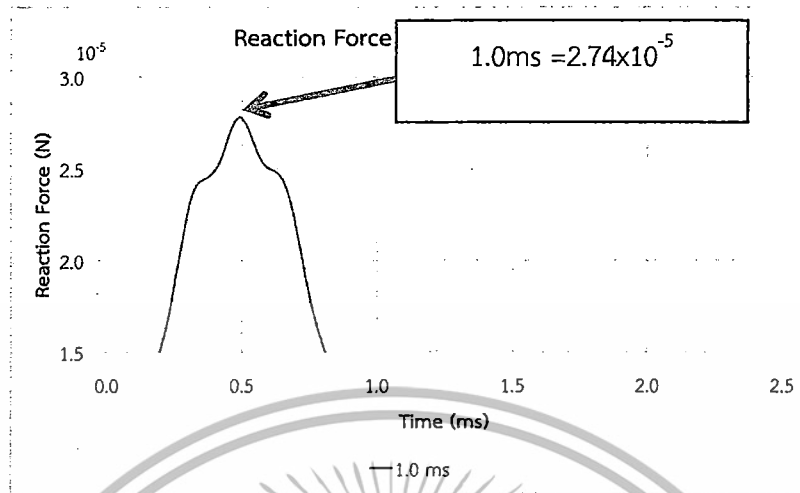
เครื่องทดสอบการหาค่า Gram load ได้ 2.47 Gram.

เพราะฉะนั้นค่า

$$\text{Lift-off shock} = \frac{875}{2.47} = 353.96 \text{ G/gram}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.2 วิธีการคำนวณหาค่าของแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกจากการจำลองของ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5.9 แสดงผลแรงตอบสนองขณะเกิดการตกกระแทกของตุลัสเตทแอกซ์วีเอเตอร์

รูปที่ 5.9 แสดงการคำนวณดังนี้

จากการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์การตกกระแทกอ่านค่า Reaction force ได้  $2.74 \times 10^{-5}$  N

จากนั้นคำนวณค่า Reaction force ต่อการตกกระแทกต่อ 1G

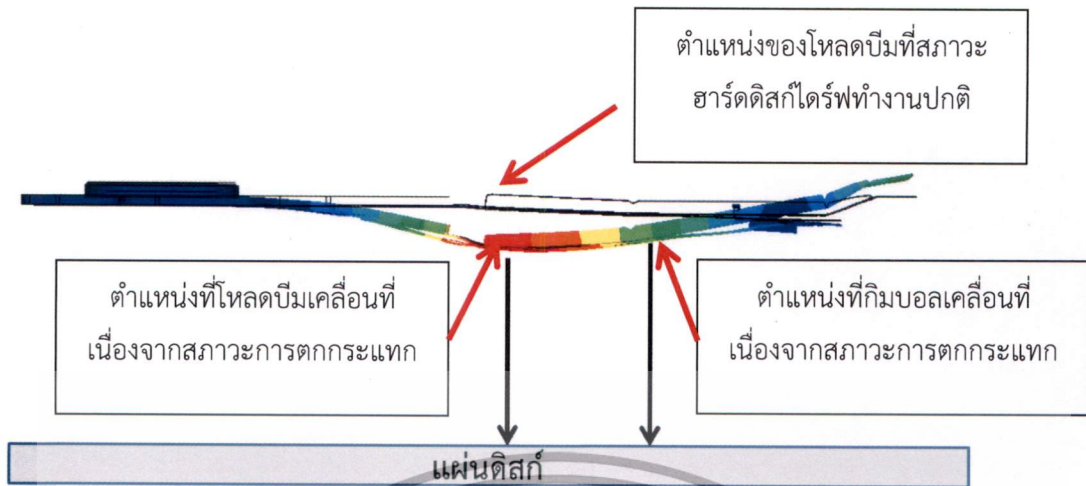
เพราะฉะนั้นค่า Lift-off shock จะได้

$$\text{Lift-off shock} = \frac{1}{((2.74 \times 10^{-5}) \times 101.97)} = 354.76 \text{ G/gram}$$

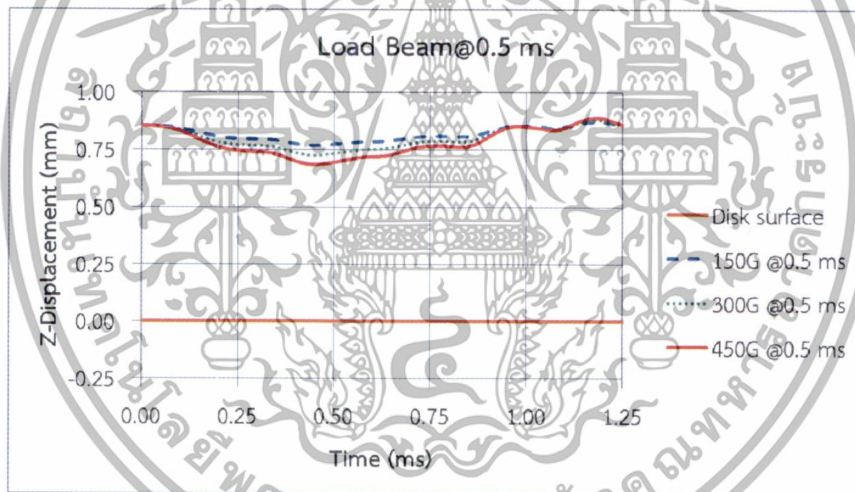
#### 5.5 ผลของการเคลื่อนที่ของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนจากการตกกระแทก

ศึกษาระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน คือ โหลดปัม และ กิมบอล ที่สภาวะที่ฮาร์ดดิสก์ทำงานนั้น ระยะระหว่าง โหลดปัม ถึง แผ่นดิสก์ 0.85 มิลลิเมตร และ กิมบอล ถึง แผ่นดิสก์ 0.71 มิลลิเมตร ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการศึกษาคือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิวินาที และความแรงของการตกกระแทกที่แตกต่างกัน 150G 300G และ 450G ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความกว้างสัญญาณพัลส์และค่าความแรงของการตกกระแทกมากขึ้นส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย จนทำให้ โหลดปัม สัมผัสกับแผ่นดิสก์ได้ที่ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที และความแรงของการตกกระแทก 300G และ 450G ส่วนของ กิมบอล สัมผัสกับแผ่นดิสก์ได้ที่ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที และความแรงของการตกกระแทก 450G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



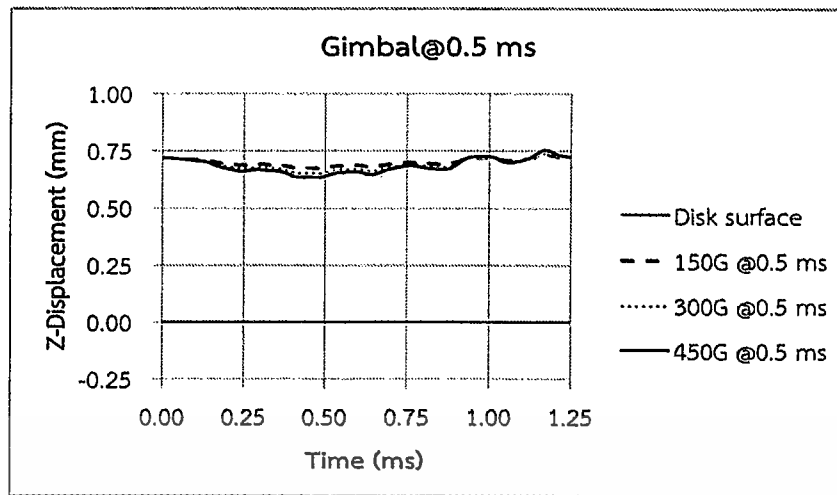
รูปที่ 5.10 แสดงชุดจับยึดหัวอ่านขณะเกิดจากสภาวะการตกกระแทก



รูปที่ 5.11 แสดงการเคลื่อนที่ของโหลดบีบที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที

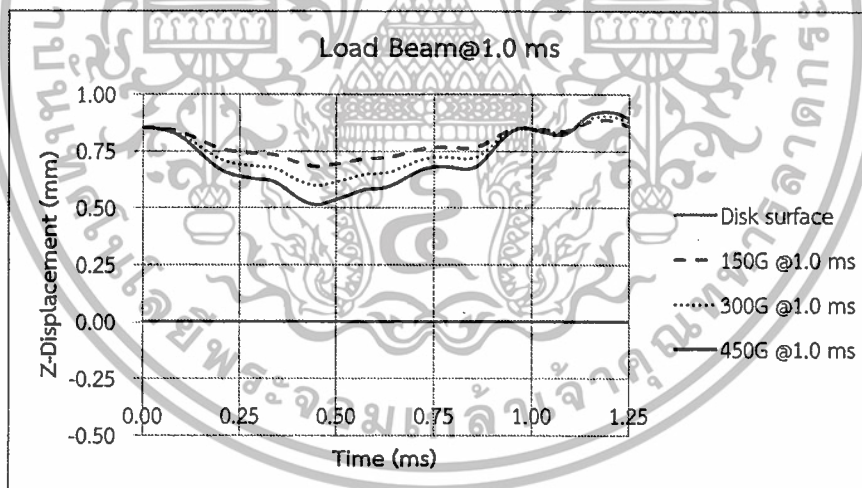
รูปที่ 5.11 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของโหลดบีบที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของโหลดบีบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทกจนเข้าใกล้กับแผ่นดิสก์มากที่สุดที่เวลา 0.40 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของโหลดบีบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดงการเคลื่อนที่ของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที

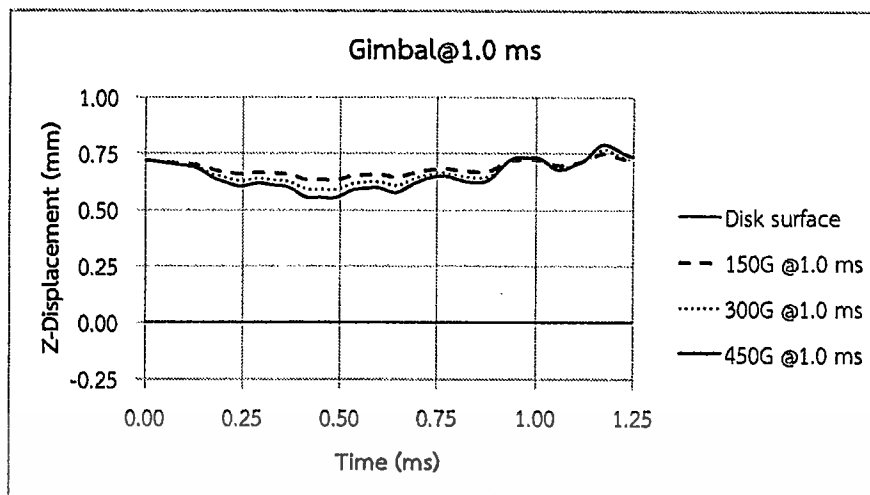
รูปที่ 5.12 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของกิมบอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทกจนเข้าใกล้กับแผ่นดิสก์มากที่สุดที่เวลา 0.45 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของกิมบอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.13 แสดงการเคลื่อนที่ของโหลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที

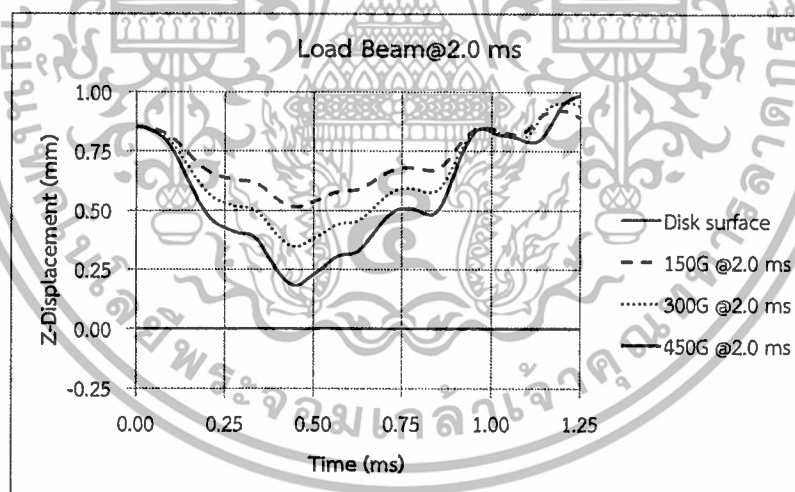
รูปที่ 5.13 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของโหลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของโหลดบีมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทกจนเข้าใกล้กับแผ่นดิสก์มากที่สุดที่เวลา 0.40 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของโหลดบีมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แสดงการเคลื่อนที่ของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที

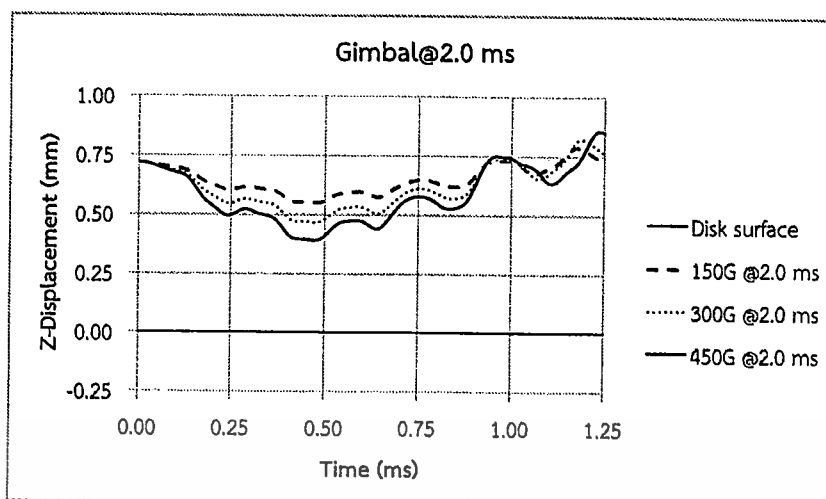
รูปที่ 5.14 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของกิมบอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทกจนเข้าใกล้กับแผ่นดิสก์มากที่สุดที่เวลา 0.45 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของกิมบอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.15 แสดงการเคลื่อนที่ของโหลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที

รูปที่ 5.15 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของโหลดบีมที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของโหลดบีมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทกจนเข้าใกล้กับแผ่นดิสก์มากที่สุดที่เวลา 0.40 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของโหลดบีมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

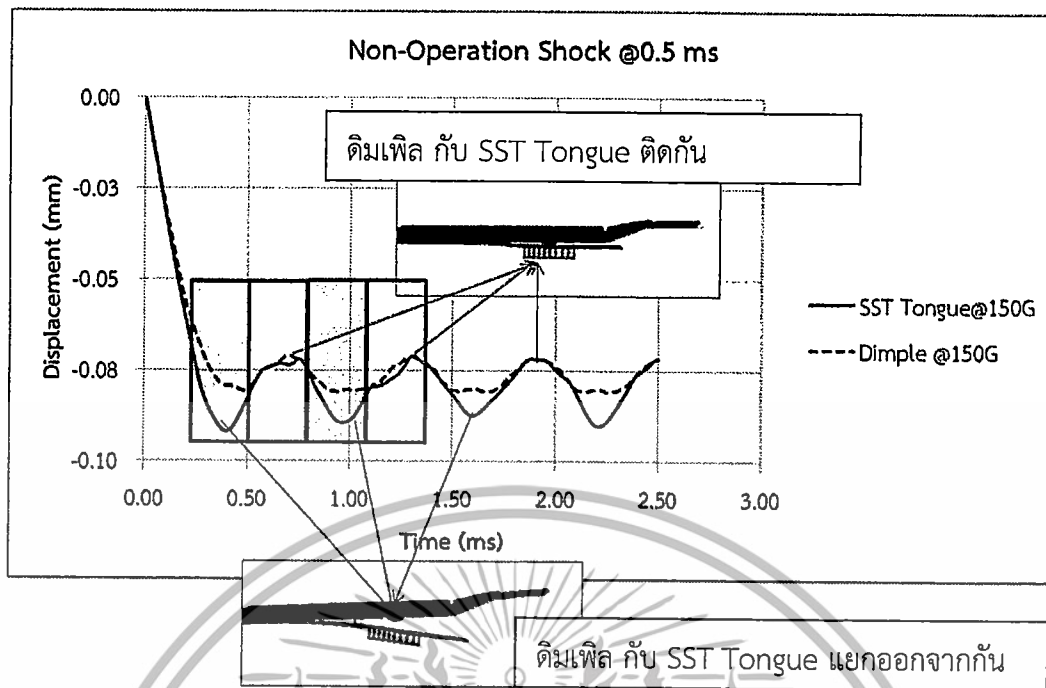


รูปที่ 5.16 แสดงการเคลื่อนที่ของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที

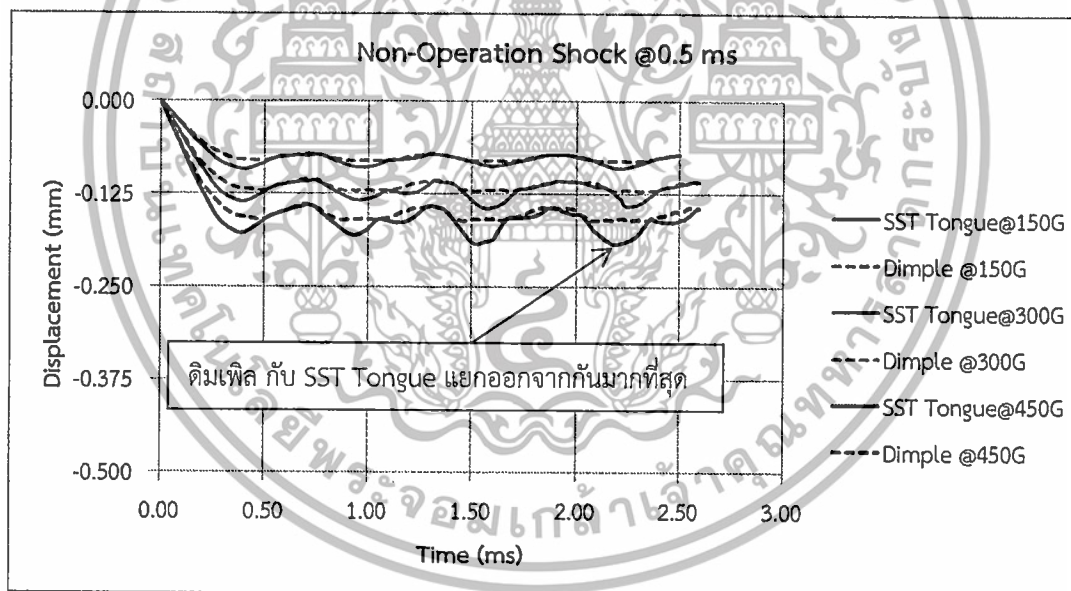
รูปที่ 5.16 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของกิมบอลที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของกิมบอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทกจนเข้าใกล้กับแผ่นดิสก์มากที่สุดที่เวลา 0.50 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของกิมบอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

## 5.6 การวิเคราะห์หาระยะของการเคลื่อนที่ของติมเพิล กับ SST Tongue ขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน (Non-Operation shock Analysis)

สำหรับผลการวิเคราะห์การตกกระแทกในสภาวะขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงานนั้น จะทำการวิเคราะห์เฉพาะชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดual สเตอแอคซัวร์เอเตอร์ และโดยใช่ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น จะทำนายระยะการเคลื่อนที่ของ SST Tongue (SST Tongue คือบริเวณที่ยึดติดกับหัวอ่านเขียน) กับ ติมเพิล (ติมเพิล คือส่วนของ โหลดบีม ที่รองรับ SST Tongue) เพื่อศึกษาระยะที่ SST Tongue กับ ติมเพิล แยกออกจากกัน ซึ่งปัจจุบันผู้ออกแบบให้ SST Tongue กับ ติมเพิล แยกออกจากกันได้ไม่เกิน 0.055 มิลลิเมตร โดยการออกแบบให้มี Limiter bar ของ SST Tongue กับ โหลดบีม slot เพราะฉะนั้นการศึกษาเรื่อง ติมเพิล แยกออกจาก SST Tongue จากสภาวะของการตกกระแทกจึงมีความจำเป็น ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการศึกษาคือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกต่างกัน 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิวินาที และค่าแรงตึงดูดที่แตกต่างกัน 150G 300G และ 450G ผลการศึกษาพบว่า ที่ความแรงของการตกกระแทก 450G และ 2.0 มิลลิวินาที จะส่งผลให้ ติมเพิล และ SST Tongue แยกออกจากกันในระยะห่างกัน 0.057 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่าที่ผู้ออกแบบชุดจับยึดหัวอ่านกำหนดไว้ในขั้นต้น



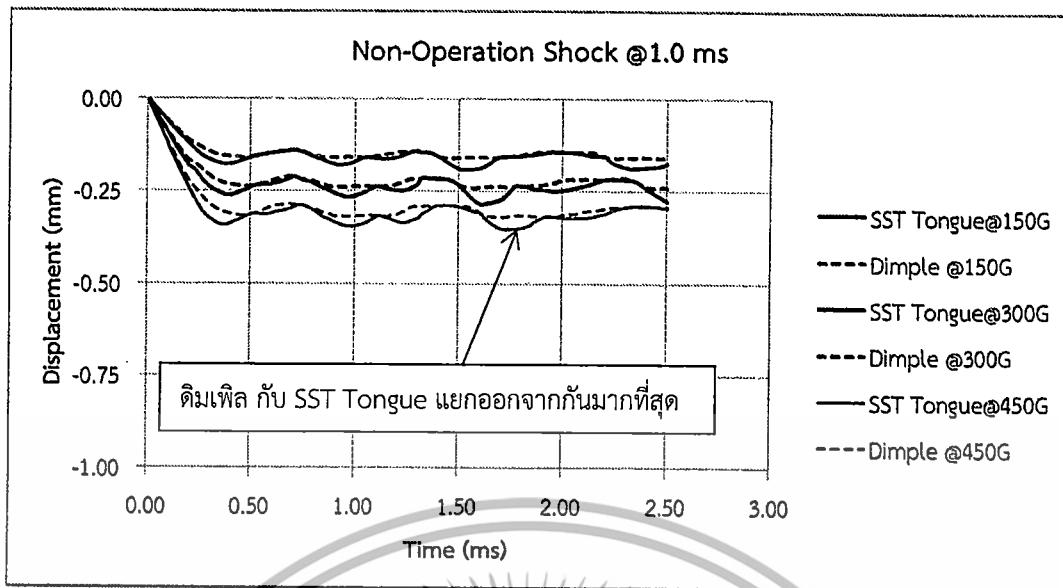
รูปที่ 5.17 แสดงการเคลื่อนที่ของดิมเพิล กับ SST Tongue



รูปที่ 5.18 แสดงการเคลื่อนที่ของ SST Tongue และดิมเพิลที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที

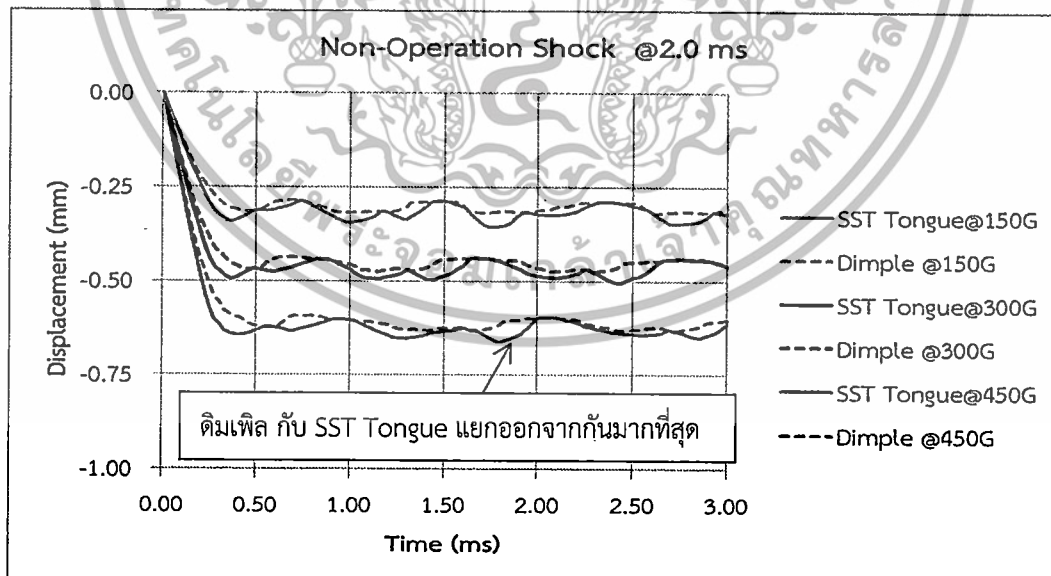
รูปที่ 5.18 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของ SST Tongue และดิมเพิลที่สัญญาณพัลส์ 0.5 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของ SST Tongue และดิมเพิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทก พบว่าระยะการแยกกันระหว่าง SST Tongue และดิมเพิลจะมากที่สุดที่เวลา 2.25 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเร่งการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการแยกกันระหว่าง SST Tongue และดิมเพิลเพิ่มมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดงการเคลื่อนที่ของ SST Tongue และดิมเพิลที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที

รูปที่ 5.19 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของ SST Tongue และดิมเพิลที่สัญญาณพัลส์ 1.0 มิลลิวินาที การเคลื่อนที่ของ SST Tongue และดิมเพิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทก พบว่าระยะการแยกกันระหว่าง SST Tongue และดิมเพิลจะมากที่สุดที่เวลา 1.75 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแรงการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะการแยกกันระหว่าง SST Tongue และดิมเพิลเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.20 แสดงการเคลื่อนที่ของ SST Tongue และดิมเพิลที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองการตกกระแทกของ SST Tongue และติมเฟิลที่สัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที การเคลื่อนของ SST Tongue และติมเฟิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการตกกระแทก พบว่าระยะเวลาการแยกกันระหว่าง SST Tongue และติมเฟิลจะมากที่สุดที่เวลา 1.75 มิลลิวินาที จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเร่งการตกกระแทกเพิ่มขึ้นระยะเวลาการแยกกันระหว่าง SST Tongue และติมเฟิลเพิ่มมากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงกลและผลกระทบจากการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบและการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งผู้ทำวิจัยใช้คือ โปรแกรม Ansys V.13 จะเห็นได้ว่าได้ผลใกล้เคียงกัน ซึ่งการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้เป็นการแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) จากผลการวิเคราะห์การตอบสนองของการสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมกับเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลองของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์พบว่าความถี่ธรรมชาติแต่ละโหมดหลักมีความใกล้เคียงกันมาก คลาดเคลื่อนประมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในขณะเดียวกันรูปร่างที่เกิดจากการเคลื่อนไหว เช่น 1<sup>st</sup> Bending 1<sup>st</sup> Torsion และ Sway ที่ได้จากเครื่อง SLDV ยังมีลักษณะรูปร่างการเคลื่อนไหวใกล้เคียงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบดualสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ พบว่าความถี่ธรรมชาติแต่ละโหมดหลักมีความใกล้เคียงกัน คลาดเคลื่อนประมาณ 0.2-4.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในขณะเดียวกันรูปร่างที่เกิดจากการเคลื่อนไหว เช่น 1<sup>st</sup> Bending 1<sup>st</sup> Torsion Sway BP Torsion และ 3<sup>rd</sup> Torsion ที่ได้จากเครื่อง SLDV ยังมีการเคลื่อนไหวใกล้เคียงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของการสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างชุดจับยึดหัวอ่านแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์กับแบบดualสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ พบว่าแบบดualสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์ มีความถี่ธรรมชาติเพิ่มขึ้นของโหมด 1<sup>st</sup> Bending 36.39 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโหมด 1<sup>st</sup> Torsion และโหมด Sway มีความถี่ลดลง 8.69 เปอร์เซ็นต์ และ 2.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดจับยึดหัวอ่านแบบแบบดualสเตทแอกซ์วัวร์เอเตอร์มีโหมดเพิ่มขึ้นคือโหมด BP Torsion ที่ความถี่ 24,200 Hz และ โหมด 3<sup>rd</sup> Torsion ที่ความถี่ 26,600 Hz ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบเบสเพลท เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับการวางวัสดุเพียโรโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ (PZT) ซึ่งส่งผลให้มีความถี่ธรรมชาติที่เปลี่ยนไปด้วยเช่นเดียวกัน

2) จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการตกกระแทกที่มีผลต่อความเร่งตอบสนองที่หัวอ่านเขียนแยกออกจากแผ่นจานดิสก์ด้วยแรงลอยตัวของหน้าพื้นผิวรองรับอากาศของหัวอ่านเขียน เมื่อเพิ่มสัญญาณพัลส์มากขึ้นจะส่งผลทำให้ ความเร่งตอบสนองของหัวอ่านเขียนที่แยกออกจากแผ่นจานดิสก์ต่อแรงลอยตัวของหน้าพื้นผิวรองรับอากาศ (Lift-off shock หน่วย = (G/gram) มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าสัญญาณพัลส์ที่ทำการศึกษามีดังนี้ 0.5 1 และ 2 มิลลิวินาที ส่งผลให้ค่า Lift-off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shock เพิ่มขึ้นจาก 194.69 G/gram 195.83 G/gram และ 200.81 G/gram ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนต่างกันประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบซิงเกิลสเตทแอกซ์ัวร์ สำหรับคูอัลสเตทซ์ัวร์เอเตอร์ พบว่าค่า Lift-off shock เพิ่มขึ้น 352.44 G/gram 354.76 G/gram และ 359.89 G/gram ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผล จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนต่างกันประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบ คูอัลสเตทซ์ัวร์เอเตอร์

3) จากผลการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านเขียน คือ โหลดปัม และ กิมบอล ที่สภาวะที่ฮาร์ดดิสก์ทำงานนั้น ระยะระหว่างโหลดปัมถึงแผ่นดิสก์ 0.35 มิลลิเมตร และกิมบอลถึงแผ่นดิสก์ 0.27 มิลลิเมตร ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการศึกษาคือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกกัน 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิวินาที และความแรงของการตกกระแทกที่แตกต่างกัน 150G 300G และ 450G ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความกว้างสัญญาณพัลส์และค่าความแรงของการตกกระแทกมากขึ้นส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย จนทำให้โหลดปัมสัมผัสกับแผ่นดิสก์ได้ที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที และความแรงของการตกกระแทก 300G และ 450G ส่วนของกิมบอลสัมผัสกับแผ่นดิสก์ได้ที่ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 2.0 มิลลิวินาที และความแรงของการตกกระแทก 450G

4) การวิเคราะห์การตกกระแทกในสภาวะขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงานนั้น จะทำการวิเคราะห์เฉพาะชุดจับยึดหัวอ่านเขียนแบบคูอัลสเตทซ์ัวร์เอเตอร์ และโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น จะทำนายระยะการเคลื่อนที่ของ SST Tongue กับดิมเพิลเพื่อศึกษาระยะที่ SST Tongue กับดิมเพิลที่แยกออกจากกัน ซึ่งปัจจุบันผู้ออกแบบให้ SST Tongue กับ ดิมเพิล แยกออกจากกันได้ไม่เกิน 0.055 มิลลิเมตร โดยการออกแบบให้มีมิติเตอร์บาร์ของ SST Tongue กับ ร่องบากของโหลดปัมเกี่ยวกันไว้ เพราะฉะนั้นการศึกษาเรื่อง ดิมเพิล แยกออกจาก SST Tongue จากสภาวะของการตกกระแทกจึงมีความจำเป็น ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการศึกษาคือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกกัน 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิวินาที และค่าแรงตึงดูดที่แตกต่างกัน 150G 300G และ 450G ผลการศึกษาพบว่า ที่ความแรงของการตกกระแทก 450G และ 2.0 มิลลิวินาที จะส่งผลให้ดิมเพิลและ SST Tong แยกออกจากกันในระยะห่างกัน 0.057 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่าที่ผู้ออกแบบชุดจับยึดหัวอ่านกำหนดไว้ขั้นต่ำ

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การตกกระแทกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นสถานการณ์ที่ผู้ใช้งานไม่อาจคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่า เหตุสุดวิสัยดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อไหร่ ซึ่งการศึกษาปัจจัยที่มีผลจากการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านเขียนจึงมีความจำเป็นสำหรับผู้ออกแบบ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับผู้ออกแบบก็คือชิ้นส่วนของชุดจับยึดหัวอ่านนั้นจะต้องมีความทนทานจากการตกกระแทก ในขณะที่เดียวกันก็ต้องคำนึงถึงการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเชิงกลในขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานด้วย เพราะบางช่วงความถี่อาจจะมีผลกระทบต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ต้องหลีกเลี่ยง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kilian, U. Zander, F.E. Talke, Suspension modeling and optimization Using finite element analysis. Tribology International 36, 317–324, <http://www.elsevier.com/locate/triboint>, 2003
- [2] Altair HyperWorks, OptiStruct. United States of America
- [3] พิพัฒน์ อำไพพิพัฒน์กุล, สันติ เศรษฐ์สิทธิโชค, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Pivot Bearing โดยการใช้ LDV พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี
- [4] นายเทวิน พันภัย, ดร.ธีระ เจียศิริพงษ์กุล, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ HSA ใน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยการใช้ SLDV, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี
- [5] สราวุธ สุขสวัสดิ์ และ ธีระ เจียศิริพงษ์กุล, การวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบและแนวตั้งของ Actuator arm โดยการใช้ Laser Doppler Vibrometer, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, 19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่
- [6] Dong-Wei Shua, Bao-Jun Shia, Shock analysis of a head actuator assembly subjected to half-sine acceleration pulses, International Journal of Impact Engineering 34, 1342–1349, [www.elsevier.com/locate/ijimpeng](http://www.elsevier.com/locate/ijimpeng)
- [7] J. Lao, D.W. Shu, B.J. Shi, B. Gu. The pulse width effect on the shock response of the hard disk drive, International Journal of Impact Engineering 34, 1342–1349 <http://www.elsevier.com/locate/ijimpeng>, 2006
- [8] เรืองฤทธิ์ สารางค์ และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์, การจำลองการตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ Simulation on Impact Drop Test of Hard Disk Drive Packaging, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
- [9] เจษสุดา ตรีธารทิพย์กุล, การออกแบบสแน็บเบอร์เพื่อช่วยลดการสั่นของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายใต้ผลกระทบของแรงกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ทำงาน, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555
- [10] นันทชญาณ์ จารัตน์, การลดปริมาณอนุภาคเป็อร์โซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์ที่หลุดออกมาจากแขนจับหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้แนวทางซิกซ์ซิกมา, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554

- [11] วนา พึ่งคำ, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้เลเซอร์ดอปเพลอร์ ไวโบริเมตร, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [12] ตรีนุส คชพลายุกต์, การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสตีปดาวน์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552
- [13] SolidWorks Corporation, ©2015 Dassault Systemes. United States of America
- [14] ANSYS, Inc. ANSYS version13.0, Pennsylvania, United States of America
- [15] <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/ANSYS>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 26  
24-27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
24 – 27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



20 กันยายน พ.ศ. 2555

เรื่อง แจ้งการรับบทความ

เรียน ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และ คุณปรีชา สุดาจันทร์

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (24 – 27 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ณ จังหวัดเชียงราย) ซึ่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพ ทางฝ่ายประสานงานการรับส่งบทความได้รับบทความของท่าน นำส่งกระบวนการประเมินบทความโดยคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิแล้วนั้น จึงขอเรียนแจ้งผลการประเมินบทความจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ดังนี้

บทความ

AMM2039 การวิเคราะห์การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ไต่ฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการพิจารณา

รับเข้าร่วมนำเสนอ

ซึ่งคณะกรรมการจัดการประชุมฯ จะนำบทความของท่านตีพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26

และใคร่ขอเรียนเชิญท่านและคณะวิจัยเข้าร่วมนำเสนอในการประชุมฯ เพื่อเผยแพร่และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นร่วมกัน

ด้วยความเคารพอย่างสูง

(รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์)

ประธานกรรมการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การวิเคราะห์การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟต์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Shock Analysis of Suspension Assembly using Finite Element Method

ปรีชา สุดาจันทร์<sup>1\*</sup> และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
\*ติดต่อ: E-mail: psudachun@yahoo.com, Tel. 089-4011405

**บทคัดย่อ**

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟต์มีขนาดเล็กลงทำให้มีการพกพาได้สะดวก อย่างไรก็ตามเมื่อพกพาไปที่ต่างๆ แล้วอาจทำให้เกิดการตกหล่นซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับหัวอ่าน/เขียน ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการตกกระแทกของหัวอ่าน/เขียนเอง ในบทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟต์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในเบื้องต้นได้นำเสนอรูปแบบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลอง ผลการเปรียบเทียบพบว่า เมื่อดูค่าผลของแรงตอบสนอง จากการตกกระแทกขณะที่หัวอ่าน/เขียน แยกออกจากแผ่นจานดิสก์นั้นพบว่ามีค่าความแตกต่างกันประมาณ 4%-6% และการตอบสนองการตกกระแทกจากทั้งสองวิธีมีรูปแบบเดียวกัน จากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของการกระแทกของหัวอ่าน/เขียน ซึ่งค่าที่ทำการศึกษามีดังนี้ 0.5, 1 และ 2 มิลลิวินาที ผลของการวิเคราะห์ยังพบอีกว่าผลจากตอบสนองของแรงจากการตกกระแทกที่เวลา 2 มิลลิวินาทีนั้นให้ค่ามากที่สุดและจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการตกกระแทกที่ 1 และ 0.5 มิลลิวินาทีตามลำดับ<sup>[2]</sup>

**คำหลัก:** การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, หัวอ่าน/เขียน

**Abstract**

Nowadays, the hard disk drive is developed to be a small piece for portable purpose which will cause damage to the head if it falls. Therefore, the design must consider the impact of the fall. This article presents the analysis of the fall using finite element method. At first, the finite element model of suspension arm with slider head is proposed and validated with the experimental result. The comparison between the simulated results and experimental results show that the reaction force during head slap out from the disk are difference about 4%-6% with the same response pattern. After that the study of pulse duration effect is carried out with 0.5, 1 and 2 ms. The results show that highest reaction force is found when the pulse duration is 2 ms and its magnitude is gradually reduced when the pulse durations are 1 ms. and 0.5 ms., accordingly.

**Keywords:** Shock Analysis of Suspension. Finite Element Method, Slider head

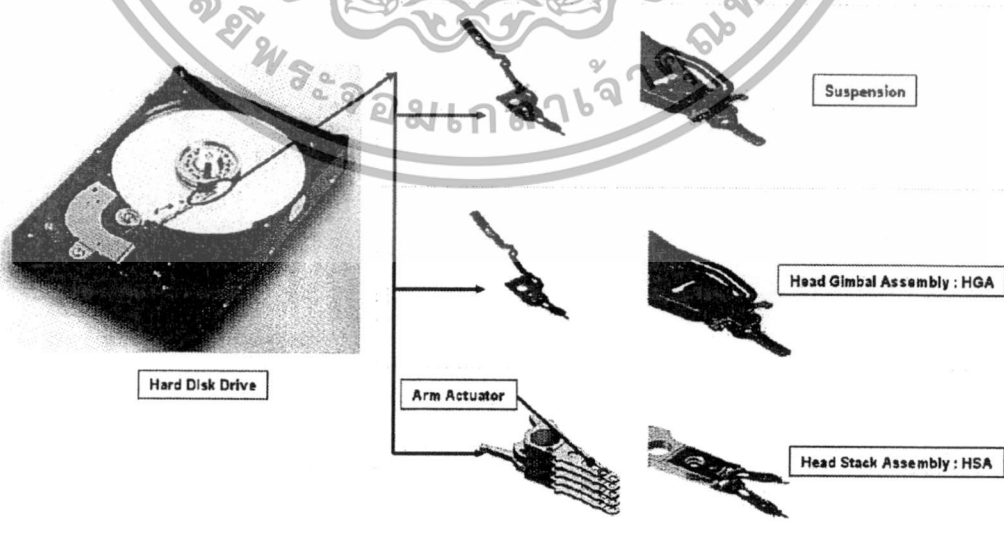
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้พัฒนาประสิทธิภาพเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างกว้างขวางเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นแต่ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กลง เช่น เครื่องเล่น เอ็มพีสาม กล้องดิจิทัล ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบพกพา เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะสำนักงาน จนกระทั่งรวมไปถึงคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ของระบบเครือข่าย

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบขึ้นจากชุดหัวอ่านสำเร็จ (Head Stack Assembly : HSA) ที่เกิดจากการประกอบชิ้นส่วนหัวอ่าน/เขียนประกอบสำเร็จ (Head Gimbal Assembly: HGA) หลายตัวเข้าด้วยกันบน E-Block (Actuator Pivot Flex Assembly) โดย HGA จากการประกอบหัวอ่าน/เขียน (Head Slider) เข้ากับแขนจับหัวอ่าน/เขียน (Suspension) ดังรูปที่ 1.<sup>[6]</sup>

ชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน (Suspension) เป็นชิ้นส่วนที่รองรับทางกลศาสตร์ ใช้สำหรับจับยึดหัวอ่าน/เขียน (Head Slider) และพาหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการเขียนหรืออ่านบนแผ่นจานบันทึกข้อมูล (Disk) ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยไม่เกิดการชนระหว่างหัวอ่าน/เขียนกับผิวหน้าของแผ่นจานบันทึกข้อมูล ด้วยเหตุนี้เอง แขนจับยึดหัวอ่าน/เขียน จึงเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องถูกประกอบเข้าไปใน HSA ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทุกตัว เนื่องด้วยขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานต้องมีการเคลื่อนที่และสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน หรือผู้ใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เองอาจจะมีการทำหล่น จึงมีผลทำให้มีสั่นสะเทือนหรือกระแทกกันระหว่าง หัวอ่าน/เขียนกับแผ่นจานบันทึกข้อมูล เพราะฉะนั้นความทนทานต่อการตกกระแทกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ก็เช่นกันที่นักออกแบบต้องการพัฒนาให้สามารถทนทานต่อการตกกระแทกได้มากขึ้น ซึ่งบทความนี้เป็นการศึกษาสภาวะของการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ลักษณะการตกกระแทกขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานคือตัวหัวอ่าน/เขียนจะไปกระแทกกับแผ่นจานบันทึกข้อมูลนั้นอาจจะทำให้เกิดความเสียหายบริเวณหน้าสัมผัสบนจานบันทึกข้อมูลได้

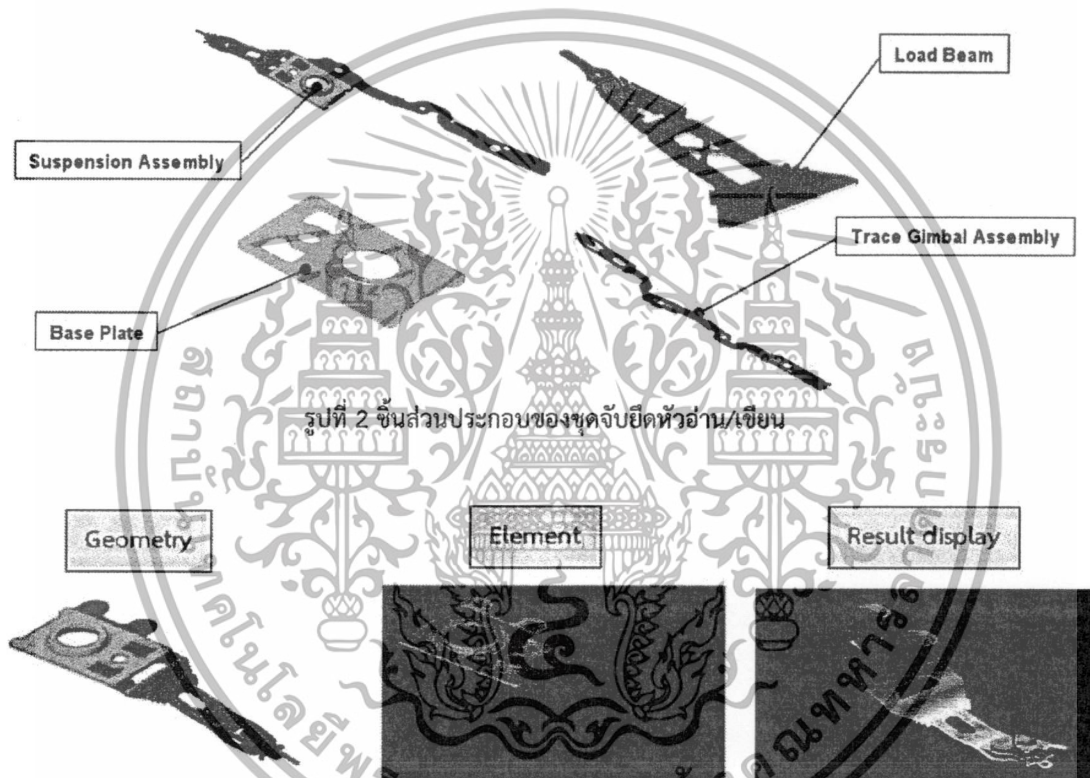


รูปที่ 1. รูปฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้านซ้าย ชิ้นส่วนประกอบด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ออกแบบโครงสร้างของตัวชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ได้ขนาดรูปร่างตามที่กำหนดด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) แสดงดังรูปที่ 2. หลังจากนั้นก็สามารถนำโครงสร้างนี้ไปสร้างให้เป็นเอลิเมนต์ (Element) ด้วยโปรแกรม ไฮเปอร์เมช (Hypermesh) สำหรับจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 32950 เอลิเมนต์ ส่วนจำนวนโหนด (Node) เท่ากับ 61279 โหนด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและตกแตกด้วยโปรแกรมแอนซิส (Ansys) แสดงดังรูปที่ 3.

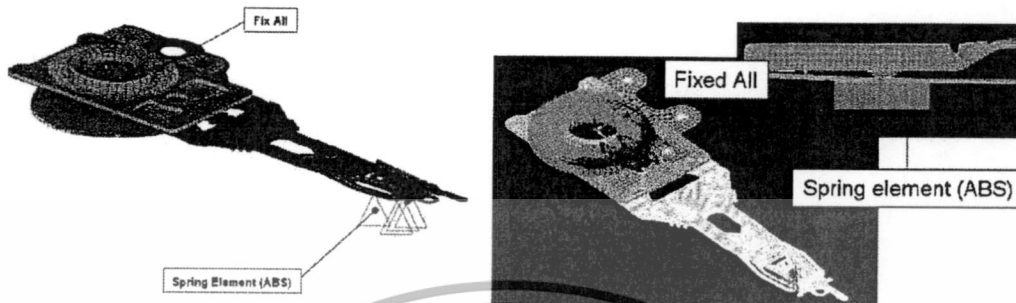


รูปที่ 3 รูปแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์

## 3. เงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์

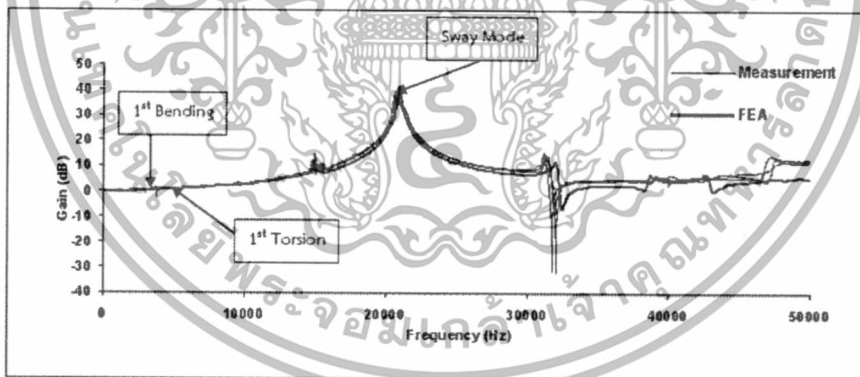
ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นตัวชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะต้องประกอบเข้ากับชุดแอกชูเอเตอร์ ซึ่งจะถูกระงับยึดติดไว้กับชุดไพลอทแบร์ริง (Pivot bearing) และตัวโครงสร้างของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เอง ซึ่งในการวิเคราะห์นี้เราจะให้ชุดแอกชูเอเตอร์เป็นจุดยึดหนึ่ง สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการตกกระแทกครั้งนี้เฉพาะตัวชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เท่านั้น (Suspension Level) ส่วนบริเวณหน้าผิวสัมผัสระหว่างเบสเพลท (Base Plate) กับผิวหน้าของแอกชูเอเตอร์จะถูกกำหนดให้เป็นจุดยึดติด (Fix all) และกำหนดให้บริเวณหัวอ่าน/เขียนเปรียบเสมือนสปริง (Spring Element) ผลมาจากแรงยก (Air Bearing Surface : ABS) เปรียบเสมือนสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

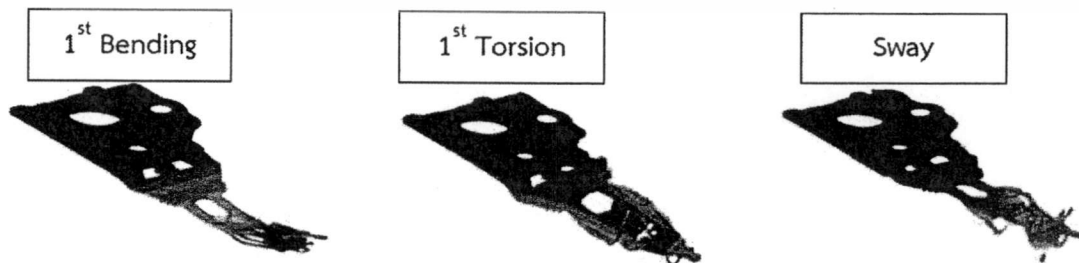


รูปที่ 4 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

4. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยความถี่โมดอล (Modal Frequency) และการตรวจสอบพิสูจน์สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนกำหนดบริเวณหน้าสัมผัสของเบสเพลทเป็นจุดยึดติด หลังจากนั้นทำวิเคราะห์ด้วยโมดอลทั้งกึ่งขั้นแล้ววิเคราะห์ผลการกระจัดที่หัวอ่าน/เขียน และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของโหมดหลักพบว่า มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.3-1.3 % ดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับในส่วนของกราฟเปรียบเทียบค่าของ Gain (dB) ในแนวแกน ว่าย (Y) เปรียบเทียบกับความถี่ในแนวแกน เอ็กซ์ (X) แสดงดังตารางที่ 1<sup>(3)</sup> สำหรับลักษณะรูปร่าง (Mode Shape) ของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนแต่ละความถี่โหมดหลักด้วยโปรแกรม Ansys. แสดงดังรูปที่ 6.



รูปที่ 5. Frequency Response Function (FRF)



รูปที่ 6. แสดงพฤติกรรมรูปร่างของ Suspension ของแต่ละความถี่โหมดหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

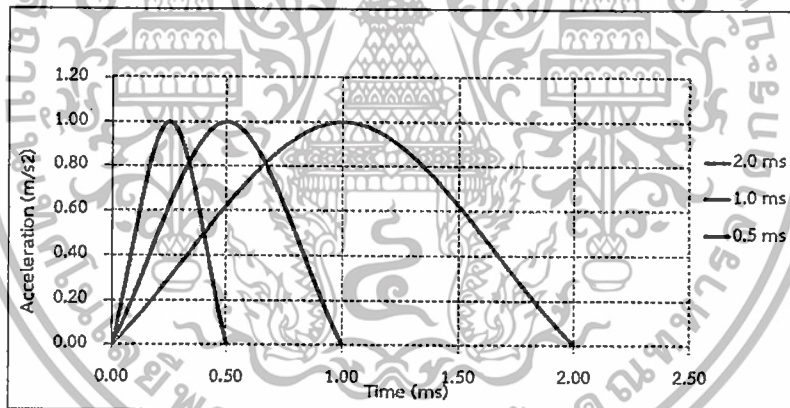


Main Mode	Measurement (Hz)	FEA (Hz)	% difference
1st Bending	3846	3856	1.32
1st Torsion	8523	8568	0.77
Sway	20958	20895	0.30

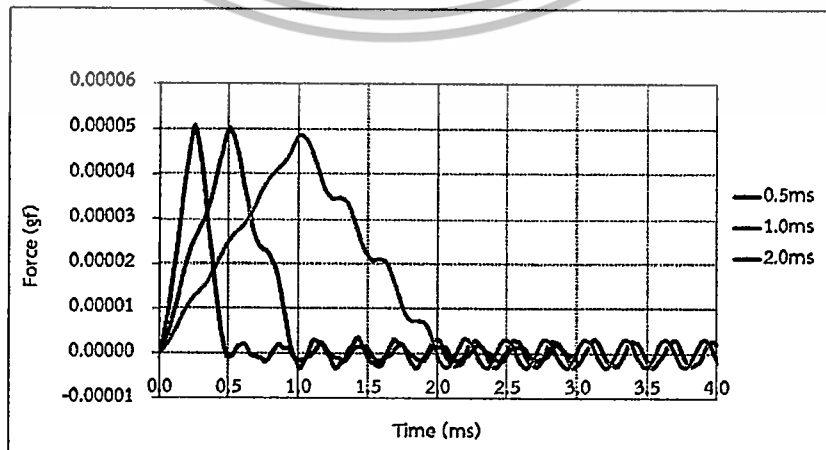
ตารางที่ 1 แสดงผลเปรียบเทียบผลการตอบสนองของการสั่นสะเทือน

5. การวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วคราว (Transients Analysis)

การวิเคราะห์การตกกระแทกในบทความนี้ ทำการศึกษาเฉพาะชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนที่เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Single Suspension) กำหนดโพลด์ที่มีความแตกต่างของความกว้างสัญญาณพัลส์ (Pulse width) ของความเร่งแบบครึ่งคาบ (Single half-sine acceleration) เริ่มต้นด้วย 0.5 , 1 และ 2 มิลลิวินาทีที่แสดงในรูปที่ 7 จากนั้นวิเคราะห์ผลกระทบทบของแรงตอบสนองที่บริเวณหัวอ่าน/เขียน ซึ่งกำหนดให้บริเวณเบสเพลทเป็นจุดยึดหนึ่ง จากนั้นศึกษาการจำลองสภาวะการตกกระแทกด้วยค่าเวลาเบื้องต้นดังกล่าวเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหัวอ่านกับเบสเพลทขณะที่สภาวะการตกกระแทกที่แตกต่างกันของค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ตั้งที่กล่าวไว้เบื้องต้น ผลของการวิเคราะห์ที่แสดงดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4%-6% ดังแสดงในตารางที่ 3.

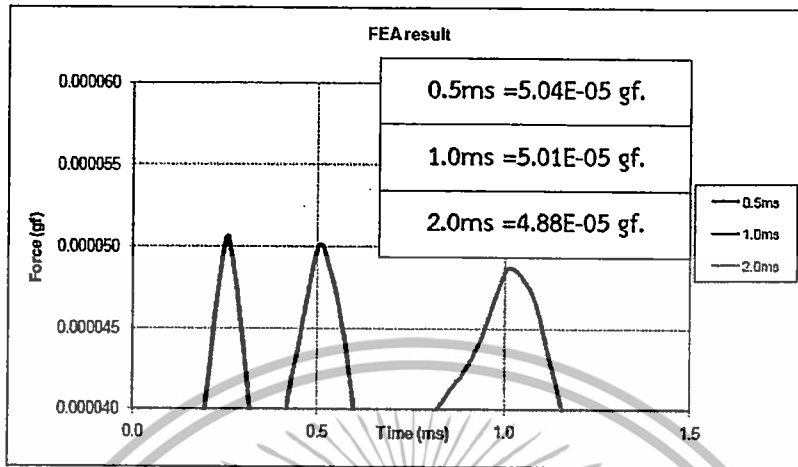


รูปที่ 7 แสดงค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์เริ่มต้น (Input pulse duration)



รูปที่ 8 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะที่หัวอ่านแยกออกจากแผ่นจานดิสก์ (ศึกษาในกรณีที่มีระบบไม่มีความหน่วง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะที่หัวอ่านแยกออกจากแผ่นจานดิสก์แบบเฉพาะบริเวณ

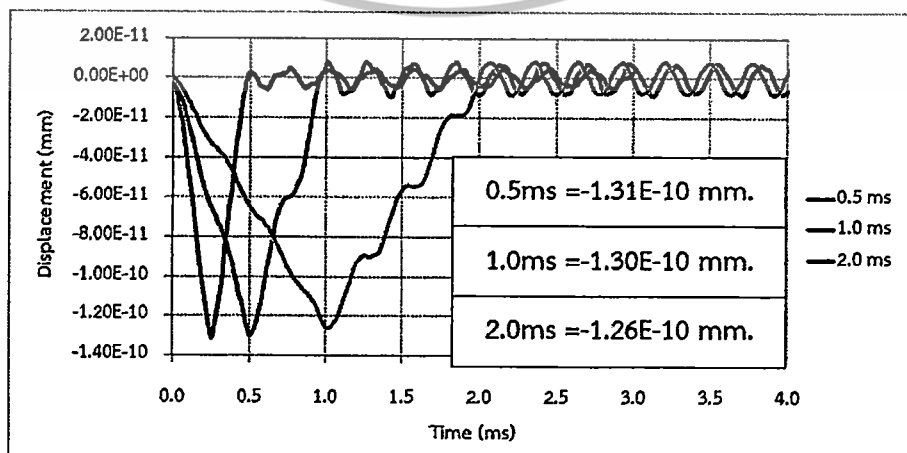
ค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์	ผลของแรงตอบสนอง (gf)	เปรียบเทียบกับ 1 หน่วยความเร่ง
0.5 ms	5.04E-05	194.69
1.0 ms	5.01E-05	195.83
2.0 ms	4.88E-05	200.81

**\*\*0.5 ms → G's/gram = 1/(5.04 E-05\*101.98)=194.69 G's/gram \*\***

ตารางที่ 2 แสดงผลของแรงตอบสนองจากการตกกระแทกขณะที่หัวอ่าน/เขียนแยกออกจากแผ่นจานดิสก์

Description	Unit	Measurement	FEA	% difference
0.5 ms Op-Shock	G's/gram	203.53	194.69	4.34
1 ms Op-Shock	G's/gram	207.54	195.83	5.64
2 ms Op-Shock	G's/gram	214.45	200.81	6.36

ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลของแรงตอบสนองจากการตกกระแทกขณะที่หัวอ่าน/เขียน



รูปที่ 10 แสดงผลของระยะการกระจัดที่หัวอ่าน/เขียน แยกออกจากเบสเพลทในแนวแกน Z. [1]

นอกจากนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากผลการวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วคราวนั้นยังสามารถทราบค่าระยะการกระจัดระหว่างหัวอ่าน/เขียน กับเบสเพลทในแนวแกน Z ซึ่งระยะการกระจัดที่มากที่สุดคือ 0.5 มิลลิวินาที ระยะการกระจัดเท่ากับ  $1.31E-10$  มิลลิเมตร, เวลา 1.0 มิลลิวินาที ระยะการกระจัดเท่ากับ  $1.30E-10$  มิลลิเมตร, และเวลา 2.0 มิลลิวินาที ระยะการกระจัดเท่ากับ  $1.26E-10$  มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10.<sup>[1]</sup>

ส่วนประกอบของ HSA Head Stack Assembly	Property name	Yung's modulus (E) (MPa.)	Poisson's ratio	Density (Kg/mm <sup>3</sup> )
Arm Actuator	Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
Base plate	Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
Load Beam	Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
Trace Gimbal Assembly	1. Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
	2. Polyimide	5860	0.33	1.83e-6
	3. Copper	1.24e5	0.34	8.878e-6
	4. Cover layer	2.5	0.35	1.4e-6
Slider	Silicon Wafer	4.0e5	0.30	4.0e5

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางวัสดุที่ใช้สำหรับแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์<sup>[7]</sup>

## 6. สรุปผล

การวิเคราะห์การตกกระแทกนั้นพบว่าผลของแรงจากการตกกระแทกขณะที่หัวอ่าน/เขียนแยกออกจากแผ่นจานดิสก์โดยสรุปได้ดังนี้

6.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการสั่นและการตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน สามารถกระทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6.2 จากผลการศึกษาวิเคราะห์หาผลกระทบของระยะเวลาในการตกกระแทกพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงตอบสนองของการตกกระแทกเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่าที่เวลา 2 มิลลิวินาทีจะมีค่าผลแรงตอบสนองมากที่สุดคือ 200.81 G's/gram.

6.3 จากผลการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ามากกว่าผลการทดลอง 4.34% ที่เวลา 0.5 มิลลิวินาที, 5.64% ที่เวลา 1 มิลลิวินาที และ 6.36% ที่เวลา 2 มิลลิวินาที ตามลำดับ

6.4 จากผลการวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วคราวนั้นยังสามารถทราบค่าระยะการกระจัดระหว่างหัวอ่าน/เขียน กับเบสเพลทในแนวแกน Z ซึ่งระยะการกระจัดที่มากที่สุดคือ 0.5 มิลลิวินาที, 1.0 มิลลิวินาที และ 2.0 มิลลิวินาที ตามลำดับ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Lao, D.W Shu, B.J. Shi, B. Gu. (2006) The pulse width effect on the shock response of the hard disk drive. *Impact Engineering*, December 21, 2006.
- [2] Shock analysis of a head actuator assembly subjected to half-sine acceleration pulses, Dong-Wei Shua, Bao-Jun Shia, Hui Menga, Fook Fah Yapa, Da-Zhi Jianga, Quock Ngb, Razman Zambrimb, Joseph H.T. Laub, Chao-Shan Chengb, *Impact Engineering*, September 26, 2005.
- [3] Chung Joo Kim, Jeong Il Chun, Young Kyu Byu, Kwang Choon Ro, Chung Choo Chung, Tae gun Jeong, (1997). Suspension Dynamics of HDD for High Track Density, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol 21, No 11, pp. 1885-1895.
- [4] Edwards JR. Finite element analysis of the shock response and head slap behavior of a hard disk drive. *IEEE Trans Magn* 1999;35(2):863-7.
- [5] G.H. Jang and C.H. Seo, (2007) Finite Element Shock Analysis of an Operating Hard Disk Drive Considering the Flexibility of a Spinning Disk-Spindle, a Head-Suspension-Actuator, and a Supporting Structure.
- [6] ชาญชัย บวรโชคชัย. การลดของเสียแขนจับหัวอ่านด้วยวิธีซิกซ์ซิกมา : กรณีศึกษากระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [7] ภากรณ์ ทรัพย์เจริญ (2551). การวิเคราะห์มุมลอยตัวของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายปรีชา สุตาจันทร์

ที่อยู่ 125/93 หมู่ที่ 4 หมู่บ้านโยธยาวิลเลจ ตำบลคู้้งลาน  
อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13160

E-mail psudachun@yahoo.com

ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
ออกแบบชิ้นส่วนเชิงกล

ประสบการณ์การทำงาน พ.ศ. 2550-2553  
แผนก Mechanical Design  
บริษัท Microchip Technology (Thailand) Co., Ltd  
พ.ศ. 2553 – ปัจจุบัน  
แผนก New Product Design and Development  
บริษัท Megnecomp Precision Technology Public Co., Ltd

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ Preecha S., Monsak P. "Shock Analysis of Suspension  
Assembly using Finite Element Method", MENETT,  
Vol26, Oct 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้