

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์  
ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือน  
โดยใช้เลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

VIBRATION ANALYSIS OF HEAD STACK ASSEMBLY IN HARD DISK DRIVE  
USING FINITE ELEMENT METHOD AND VERIFICATION USING LASER  
DOPPLER VIBROMETER



เลขหมู่ 138850  
เลขทะเบียน  
วันเดือนปี 16 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบและข้อมูล  
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-DS-M-001-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIBRATION ANALYSIS OF HEAD STACK ASSEMBLY IN HDD  
USING FINITE ELEMENT METHOD AND VERIFICATION  
USING LASER DOPPLER VIBROMETER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION AND SYSTEM ENGINEERING  
COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

KMITL-2015-DS-M-001-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2015**

**COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน  
ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้ง  
ตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้เลเซอร์ดอปเพลอร์ไวบ्रोมิเตอร์  
Thesis Title  
VIBRATION ANALYSIS OF HEAD STACK ASSEMBLY IN  
HARD DISK DRIVE USING FINITE ELEMENT METHOD AND  
VERIFICATION USING LASER DOPPLER VIBROMETER

นักศึกษา

นายวนา ฝั่งคำ

รหัสประจำตัว

55690311

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมระบบและข้อมูล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.จตุพร ทองศรี

หมายเลขวิทยานิพนธ์

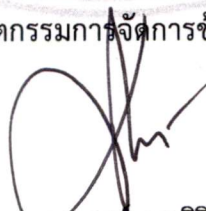
KMITL-2015-DS-M-001-03

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยันต์ เจตนาแสน	
ดร.ดำรงศักดิ์ ทองสมพร	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วิจารณ์	
ดร.วรวิมล มรรคเจริญ	
ดร.จตุพร ทองศรี	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 3 มิถุนายน 2558 เวลา 10.00 - 12.00 น.

สถานที่สอบ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง)  
คณบดี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้เลเซอร์ตอปเพลอร์เวโรบรมิเตอร์
นักศึกษา	นายวนา พึ่งคำ
รหัสสำนักศึกษา	55690311
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบและข้อมูล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. จตุพร ทองศรี
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือแบบจำลอง A B และ C เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของรูปแบบการสั่นสะเทือน ความแม่นยำของความถี่ธรรมชาติ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งแบบจำลอง A ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนมีการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นไอโซโทรปิกและไม่มีการติดตั้งไฟว้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริง ส่วนแบบจำลอง B ไม่มีการติดตั้งไฟว้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงเหมือนกับในแบบจำลอง A แต่มีการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นออร์โธโทรปิก และแบบจำลอง C จะมีการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นออร์โธโทรปิกและมีการติดตั้งไฟว้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้สมบัติวัสดุขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นออร์โธโทรปิกมีความแม่นยำในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนแบบ Coil 1<sup>st</sup> Torsion และ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly สูงกว่าการใช้สมบัติวัสดุเป็นไอโซโทรปิกอย่างมาก การติดตั้งและไม่ติดตั้งไฟว้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงมีความแม่นยำในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ ที่ไม่แตกต่างกัน แต่การติดตั้งไฟว้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการไม่ติดตั้งมากถึง 6 เท่าโดยประมาณ จากนั้นได้นำเทคนิคการติดตั้งไฟว้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงมาใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการปรับเปลี่ยนความสูงของติมเฟิลบนโทเลอร์แรนซ์ริง ซึ่งการศึกษาได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความสูงติมเฟิลแตกต่างกันทั้งหมด 5 ขนาดมาเปรียบเทียบผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนความสูงติมเฟิลส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนแบบ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly มากที่สุด โดยขนาดความสูงติมเฟิลที่ลดลงจากขนาดมาตรฐานจะส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนแบบดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ได้มีการนำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะเวลาสำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่น การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมนต์ในการใช้อีพ็อกซีเข้าแทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดติดแอกซ์วอร์เอเตอร์กับไฟร็อตแบริง  
เข้าด้วยกัน เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ** ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ทอเลอร์แรนซ์ริง ไฟร็อตแบริง และ การวิเคราะห์การ  
สิ้นสະเทือน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Vibration Analysis of Head Stack Assembly in Hard Disk Drive using Finite Element Method and Verification using Laser Doppler Vibrometer
Student	Mr.Vana Puengkom
Student ID	55690311
Degree	Master of Engineering
Program	Information and System Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Dr.Jatuporn Thongsri
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn

## ABSTRACT

This research presents to use finite element method for predicting natural frequency of Head Stack Assembly (HSA). Three finite element models, Model A, B and C, were created to compare the accuracy of mode shape, natural frequency and the time used in the calculation. The Model A used isotropic material property to simulate the coil of Voice Coil Motor (VCM) but not installed a Pivot bearing and Tolerance ring. The Model B not installed a Pivot bearing and Tolerance ring as a Model A but used orthotropic material property in the coil of VCM. The Model C also used orthotropic property but installed Pivot bearing and Tolerance ring. The results showed that using an orthotropic material property of VCM coil, accurately predicting the natural frequency in Coil 1<sup>st</sup> Torsion mode and HSA 1<sup>st</sup> Butterfly mode than using an isotropic material property as well. To install and do not install the Pivot bearing and Tolerance ring was accurate in predicting the natural frequency of mode shapes that are not different, but installation will take time to calculate more than 6 times. After that the technical installations were used to find the impact on the natural frequency of the modified Dimple height on the Tolerance ring, which have created a finite element model with a Dimple height of 5 difference sizes. The study showed that modifying the Dimple height affect the natural frequency, the most in HSA 1<sup>st</sup> Butterfly mode, which Dimple height reduction from the standard height affects the natural frequency reduced significantly. Moreover, there is presentation of finite element model to using Epoxy instead of Tolerance ring to sticking the Actuator and Pivot bearing together, which could be used to develop future technologies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KEYWORD** Head Stack Assembly, Tolerance ring, Pivot bearing and Vibration Analysis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.จตุพร ทองศรี และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะในการทำงานวิจัยนี้ และได้รับเงินทุนช่วยเหลือในการวิจัยและข้อมูลการวิจัย จากบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ตลอดจนวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือสำหรับทำการศึกษาทดลองงานวิจัย โดยอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ นายเทิดไทย เทียนทอง ซึ่งเป็นผู้ที่สนับสนุนและให้ความร่วมมือในการทำวิจัย คอยให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้อง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ให้คำแนะนำ ให้ความอบอุ่นที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วนา พึ่งคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 สรุปสาระสำคัญจากวรรณกรรม.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	13
3.2 ธรรมชาติของการสันสะเทือน.....	14
3.3 การสันสะเทือนแบบอิสระของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรี.....	14
3.3.1 การสันสะเทือนอิสระของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรีแบบไม่มีตัวหน่วง.....	15
3.3.2 การสันสะเทือนอิสระของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรีแบบมีตัวหน่วง.....	17
3.4 การสันสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรี.....	19
3.4.1 การสันสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรีแบบไม่มีตัวหน่วง.....	20
3.4.2 การสันสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรีแบบมีตัวหน่วง.....	22
3.5 การวิเคราะห์โมดัลของการสันสะเทือน.....	26
3.5.1 การวิเคราะห์โมดัลการสันสะเทือนแบบอิสระของระบบหลายระดับชั้นเสรี.....	28
3.5.2 การวิเคราะห์โมดัลการสันสะเทือนแบบบังคับของระบบหลายระดับชั้นเสรี.....	32
3.6 วิธีการรวมกันของรูปแบบการสันสะเทือน.....	35
3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	38
3.8 การทดสอบการสันสะเทือนด้วยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
4.1 บทนำ.....	40
4.1.1 การเลือกชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	40
4.1.2 การวาดแบบจำลอง.....	40
4.1.3 การสืบค้นข้อมูล.....	40
4.1.4 การวิเคราะห์โดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์.....	40
4.1.5 การวัดค่าความถี่ธรรมชาติโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์.....	41
4.2 การหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	42
4.2.1 แบบจำลอง.....	42
4.2.2 การสร้างเอลิเมนต์.....	42
4.2.3 การกำหนดสมบัติทางวัสดุ.....	43
4.2.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	44
4.2.5 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน.....	45
4.2.6 เวลาในการคำนวณ.....	45
4.3 การพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	46
4.3.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	47
4.3.2 แบบจำลอง A.....	49
4.3.3 แบบจำลอง B.....	60
4.3.4 แบบจำลอง C.....	62
4.4 การศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากการปรับเปลี่ยนความสูงดิมเปิลของโทเลอร์แรนซ์ริง.....	71
4.5 การศึกษาการใช้ฮีตซิงค์แทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดแอกซ์วอร์เอเตอร์และไฟว์อทแบร์ริง.....	73
บทที่ 5 ผลการวิจัย.....	77
5.1 บทนำ.....	77
5.2 ผลการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	77
5.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ความเหมาะสมของคุณสมบัติทางวัสดุระหว่างไอโซโทรปิกและออร์โททรอปิก...	79
5.3.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของการติดตั้งและไม่ติดตั้งโทเลอร์เรนซ์ริงและ ไฟร็อตแบริงลงบนแอกซ์ชัวร์เอเตอร์.....	82
5.3.3 ผลเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	83
5.4 ผลการศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบ หัวอ่าน-เขียนจากการปรับเปลี่ยนความสูงของติ่มเปิดของโทเลอร์เรนซ์ริง.....	84
5.5 ผลการศึกษาการใช้ฟ็อกซีแทนโทเลอร์เรนซ์ริงในการยึดแอกซ์ชัวร์เอเตอร์และไฟร็อต แบริงถึงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน- เขียน.....	91
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความถี่ธรรมชาติจากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	9
2.2 ค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดโดยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์.....	10
2.3 ค่าสมบัติทางวัสดุของขดลวดก่อนและหลังใช้โปรแกรม.....	11
2.4 ค่าความถี่ธรรมชาติจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของทั้งสองวัสดุเปรียบเทียบกับผลการวัดโดยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์.....	12
4.1 รายละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	43
4.2 สมบัติทางวัสดุในแต่ละชั้นส่วนของแบบจำลอง.....	44
4.3 รายละเอียดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง A.....	50
4.4 ค่าสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง A.....	51
4.5 สมบัติทางวัสดุชนิดออร์โธโทรปิกของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์.....	61
4.6 รายละเอียดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง C.....	64
4.7 สมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง C.....	64
4.8 ความตึงเครียดของแบบจำลองต่าง ๆ.....	72
4.9 รายละเอียดเอลิเมนต์ของอีพ็อกซี.....	74
4.10 สมบัติทางวัสดุของอีพ็อกซี.....	74
5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติและเวลาในการคำนวณของขนาดเอลิเมนต์ต่าง ๆ.....	79
5.2 ผลค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้วัสดุขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิก.....	80
5.3 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการติดตั้งและไม่ติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟว้อทแบริง.....	82
5.4 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง A B และ C.....	84
5.5 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Coil 1 <sup>st</sup> Torsion mode ของความสูงตึงเครียดขนาดต่าง ๆ.....	85
5.6 ค่าความถี่ธรรมชาติใน HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly mode ของความสูงตึงเครียดขนาดต่าง ๆ.....	86
5.7 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Arm Sway/Arm Torsion 1 mode ของความสูงตึงเครียดขนาดต่าง ๆ.....	86
5.8 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Arm Sway/Arm Torsion 2 mode ของความสูงตึงเครียดขนาดต่าง ๆ.....	87
5.9 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Arm Sway/Arm Torsion 2 mode ของความสูงตึงเครียดขนาดต่าง ๆ.....	88
5.10 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Base plate Torsion mode ของความสูงตึงเครียดขนาดต่าง ๆ.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.11 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Suspension Sway mode ของความสูงดิมเปิดขนาดต่าง ๆ.....	89
5.12 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion mode ของความสูงดิมเปิดขนาดต่าง ๆ...	89
5.13 ค่าความถี่ธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงความสูงดิมเปิดในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ.....	90
5.14 ค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้อีพ็อกซีในการสั่นสะเทือนรูปแบบต่างๆ.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากเครื่องมือวัดเลเซอร์วอโรมิเตอร์.....	5
2.2 ผลตอบสนองเชิงความถี่จากไฟไนต์เอลิเมนต์และเครื่องมือวัดเลเซอร์วอโรมิเตอร์...	6
2.3 ขั้นตอนการติดตั้งจนถึงการติดตั้งซ้ำของโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟร้อทแบริง.....	6
2.4 ตำแหน่งการวางตัวของแอกซ์วีเอเตอร์ โทเลอร์แรนซ์ริงและไฟร้อทแบริง.....	8
2.5 โครงสร้างของโทเลอร์แรนซ์ริง.....	8
2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบจำลองแอกซ์วีเอเตอร์.....	9
2.7 แบบจำลองขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่ส่วนท้ายของแอกซ์วีเอเตอร์.....	11
3.1 ภาพส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	13
3.2 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง.....	15
3.3 การเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง.....	16
3.4 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง.....	17
3.5 โอเวอร์แคมป์.....	18
3.6 คริติคอลลีแคมป์.....	18
3.7 อันเดอร์แคมป์.....	19
3.8 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่ไม่มีตัวหน่วง.....	20
3.9 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่มีตัวหน่วง.....	22
3.10 อัตราขยายการเคลื่อนที่เทียบกับอัตราส่วนความถี่.....	25
3.11 การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสเทียบกับอัตราส่วนความถี่.....	26
3.12 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ.....	27
3.13 ระบบสมมุติหลายมวลที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ.....	28
3.14 ลักษณะของระบบสมมุติมวลคู่ในระบบพิกัดปกติและระบบพิกัดโมดัล.....	32
3.15 ระบบสมมุติหลายมวลที่มีการสั่นสะเทือนแบบบังคับ.....	32
3.16 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ	35
3.17 รูปร่างการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน	37
3.18 แบบจำลองการทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่โดยเลเซอร์วอโรมิเตอร์.....	39
4.1 ส่วนประกอบแบบจำลองที่ใช้ในการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม.....	42
4.2 การแบ่งเอลิเมนต์และชนิดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง.....	44
4.4 ลักษณะทิศทางการกำหนดความอิสระของจุดต่อ.....	45
4.5 Butterfly mode.....	45
4.6 การแสดงค่า CPU Times.....	46
4.7 ส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน.....	47
4.8 โครงสร้างขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ของแบบจำลอง.....	47
4.9 โครงสร้างขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ทางกายภาพ.....	48
4.10 แบบจำลองขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์สำหรับสมบัติทางวัสดุเป็นไอโซโทรปิกและ ออร์โธโรปิก.....	48
4.11 แบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน A B และ C.....	49
4.12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง A.....	50
4.13 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง A.....	52
4.14 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง A.....	52
4.15 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง A.....	53
4.16 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง A.....	53
4.17 การตั้งค่าของการวิเคราะห์โมดัล.....	54
4.18 Coil 1 <sup>st</sup> Torsion mode.....	55
4.19 HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly mode.....	55
4.20 Arm Torsion mode.....	56
4.21 Arm Sway mode.....	56
4.22 Base plate Torsion.....	57
4.23 Suspension sway.....	57
4.24 Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion.....	58
4.25 ผิวของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่มีการใส่แรงกระตุ้นและการตั้งค่าแรง.....	59
4.26 บริเวณทดสอบผลตอบแทนเชิงความถี่.....	59
4.27 กราฟแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของชุดประกอบหัวอ่านเขียน.....	60
4.28 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง B.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.29 ตำแหน่งการกำหนดสมบัติทางวัสดุชนิดออร์โททรอปิกของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์.....	61
4.30 การกำหนดผิวสัมผัสระหว่างแอกซ์วีร์เอเตอร์และขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่ใช้วัสดุเป็นออร์โททรอปิก.....	62
4.31 ตำแหน่งการวางตัวและขั้นตอนการติดตั้งของแอกซ์วีร์เอเตอร์ โทเลอร์แรนซ์ริงและไฟว็อทแบร์ริง.....	63
4.32 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง C.....	64
4.33 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C.....	65
4.34 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C.....	66
4.35 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C.....	66
4.36 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง C.....	67
4.37 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง C.....	68
4.38 การกำหนดค่าการคำนวณในการติดตั้งไฟว็อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง.....	69
4.39 การกำหนดค่าการคำนวณในการติดตั้งไฟว็อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง.....	69
4.40 ความแตกต่างของแบบจำลองก่อนและหลังการติดตั้งไฟว็อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง.....	70
4.41 แบบจำลองของโทเลอร์แรนซ์ริง.....	71
4.42 แบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้อีพ็อกซีแทนโทเลอร์แรนซ์ริง.....	73
4.43 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองอีพ็อกซี.....	75
4.44 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองอีพ็อกซี.....	75
4.45 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองอีพ็อกซี.....	76
5.1 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้เอลิเมนต์ขนาดต่างๆ.....	78
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติและจำนวนเอลิเมนต์.....	78
5.3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง A.....	81
5.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง B.....	81
5.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง C.....	83
5.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Coil 1 <sup>st</sup> Torsion mode.....	85
5.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly mode.....	85
5.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Arm Sway/Arm Torsion 1 mode.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Arm Sway/Arm Torsion 2 mode.....	87
5.10 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Arm Sway/Arm Torsion 3 mode.....	87
5.11 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Base plate Torsion mode.....	88
5.12 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Suspension Sway mode.....	89
5.13 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion mode.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อรองรับต่อความต้องการในการจัดเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่มีปริมาณเพิ่มสูงมากขึ้น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับเป็นหน่วยความจำในการบันทึกข้อมูล ตัวอย่างเช่น ในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ ส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับต่อความต้องการต่างๆของผู้ใช้งาน เช่นในด้านขนาดพื้นที่จัดเก็บข้อมูล ความรวดเร็วในการรับและส่งข้อมูล และเสถียรภาพในการจัดเก็บข้อมูล เป็นต้น ซึ่งในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในด้านต่าง ๆ เหล่านี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาค้นคว้าถึงปัญหาต่างๆที่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนา ปัญหาการสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหนึ่งในหลาย ๆ ปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1,2] เนื่องจากการสั่นสะเทือนจะไปรบกวนการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรืออาจส่งผลทำให้เกิดการชำรุดเสียหายของอุปกรณ์จนส่งผลให้การทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีประสิทธิภาพลดลงหรือล้มเหลวในที่สุด

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มากมาย โดยชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน (Head stack assembly) เป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งหน้าที่ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนคือการพาหัวอ่านและเขียนข้อมูลไปยังแทร็กข้อมูล (Track) ที่ต้องการบนแผ่นจานแม่เหล็ก (Disk) โดยมีมอเตอร์วอยซ์คอยล์ (Voice coil motor) เป็นแหล่งกำเนิดแรงขับเคลื่อนในการหมุนไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งในการพัฒนาให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความจุและความเร็วในการรับส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น จะไม่มีทางเป็นไปได้เลยหากไม่มีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนให้สามารถพาหัวอ่านและเขียนไปยังตำแหน่งข้อมูลได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็วมากขึ้น แต่ในการเพิ่มความแม่นยำและรวดเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งข้อมูลจะมีความยากลำบากในการควบคุมอย่างมาก เนื่องจากความถี่ในการสั่นสะเทือนที่เพิ่มมากขึ้นจากการควบคุมตำแหน่งไปสอดคล้องกับค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบจนส่งผลให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ขึ้นที่ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ซึ่งการสั่นพ้องจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและส่งผลให้หัวอ่านและเขียนข้อมูลเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งข้อมูลที่ต้องการ ด้วยปัญหาดังกล่าวการออกแบบโครงสร้างของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนให้หลีกเลี่ยงจากการเกิดการสั่นพ้อง จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาโครงสร้างต่าง ๆ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมันจะช่วยประหยัดเวลาและต้นทุนในการใช้ศึกษาโครงสร้างได้อย่างมาก โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมทางกลต่าง ๆ เช่น การสั่นสะเทือน การบิดงอเสียวรูป การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์เอลิเมนต์คือโปรแกรม ANSYS [3] มาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนและค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ซึ่ง Xu และ Guo [4] ได้ใช้โปรแกรม ANSYS ในการนำมาใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนเช่นกัน ซึ่งในการวิเคราะห์ของพวกเขาได้กำหนดชิ้นส่วนของแบบจำลองทุกชิ้นมีสมบัติวัสดุเป็นไอโซโทรปิก (Isotropic) เพื่อนำมาหาค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน (Mode shape) ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติ ในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของการใช้สมบัติวัสดุขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ (VCM coil) เป็นไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิก (Orthotropic) และศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งและไม่ติดตั้งไฟร้อทแบร์ริง (Pivot bearing) และโทเลอร์แรนซ์ริง (Tolerance ring) นอกจากนี้ ยังได้นำเทคนิคการติดตั้งไฟร้อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงมาใช้ศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการปรับเปลี่ยนขนาดความสูงของดิมเพิล (Dimple) ที่อยู่บนโทเลอร์แรนซ์ริง ซึ่งขนาดความสูงของดิมเพิลส่งผลถึงแรงอัดในการติดตั้ง และสุดท้ายผู้วิจัยได้นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการใช้อีพ็อกซี่ (Epoxy) แทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดติดไฟร้อทแบร์ริงกับแอกชูเอเตอร์ (Actuator) เข้าด้วยกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่แตกต่างกันคือไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิก

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการติดตั้งและไม่ติดตั้งไฟร้อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง

1.2.3 เพื่อหาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนในการนำมาใช้คำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสะเทือน

1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลบนโทเลอร์แรนซ์ริง

1.2.5 นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการใช้อีพ็อกซี่แทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดแอกชูเอเตอร์ (Actuator) และไฟร้อทแบร์ริงเข้าด้วยกัน เพื่อนำมาใช้ในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 สมบัติทางวัสดุของขดลวดที่ใช้ศึกษาคือไอโซโทรปิกและออร์โทโทรปิก

1.3.2 การปรับเปลี่ยนแบบจำลองของโทเลอร์แรนซ์จริงจะปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าความสูงของติมเพิล

1.3.3 ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านทางโปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS เพื่อหาระยะเวลาในการคำนวณและการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในแบบจำลองต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดลองด้วยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ (Laser Doppler Vibrometer)

1.3.4 รูปแบบการสั่นสะเทือนที่ใช้ศึกษาคือ Coil 1<sup>st</sup> Torsion HSA 1<sup>st</sup> Butterfly Arm Torsion Arm Sway Base Plate Torsion Suspension Sway และ Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion

### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1.4.1 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ขนาดเอลิเมนต์แตกต่างกัน เพื่อหาความเหมาะสมของขนาดเอลิเมนต์สำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

1.4.2 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนขึ้นมาทั้งหมด 3 แบบโดยมีความแตกต่างทางคุณสมบัติทางวัสดุของขดลวดและการติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งไฟร็อตแบร์ริง และโทเลอร์แรนซ์จริงมาคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยโปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าที่ได้กับผลการทดลองจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

1.4.3 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาทั้งหมด 5 แบบ โดยมีความแตกต่างของความสูงของติมเพิลบนโทเลอร์แรนซ์จริงมาคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.4 วิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลง ตัวแปรทางด้านความสูงของติมเพิลบนโทเลอร์แรนซ์จริง

1.4.5 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการใช้ฟ็อกซี่ แทนโทเลอร์แรนซ์จริง ในการยึดติดแอกซ์ชัวร์เอเตอร์เข้ากับไฟร็อตแบร์ริงและนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถึงผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติ

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

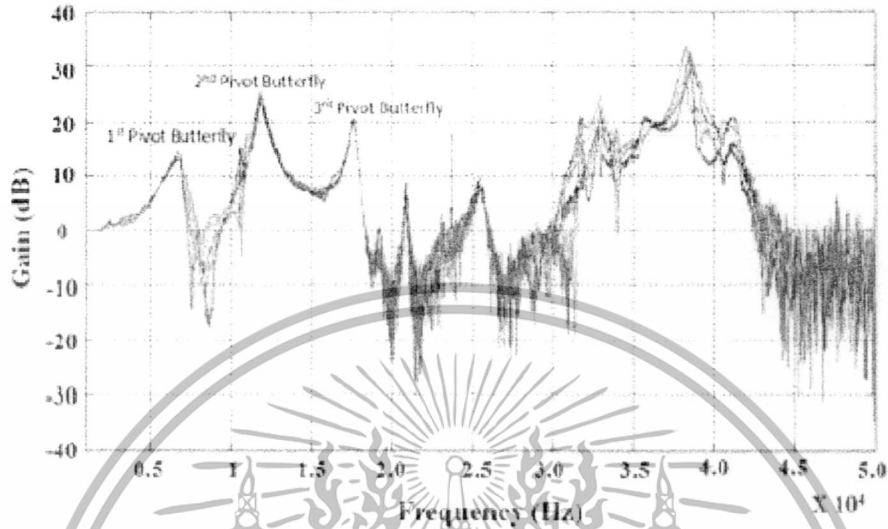
#### 2.1 สรุปสาระสำคัญจากวรรณกรรม

Ryota และคณะ [5] ได้ใช้การวิเคราะห์โหมดัล (Modal Analysis) ถึงการตรวจสอบสภาวะการสั่นสะเทือนของแกนแอกซ์ฮวีเตอร์ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อหาปัจจัยทางโครงสร้างที่จะส่งผลต่อการเกิดการสั่นพ้องของการสั่นสะเทือนแบบต่างๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน-เขียนต่ำลง ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการไปถึงตำแหน่งข้อมูลบนแผ่นจานแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น และความแม่นยำของการไปถึงตำแหน่งข้อมูลลดลง การวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติจากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากการวัดโดยเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์ในการสั่นสะเทือนรูปแบบต่างๆ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติแตกต่างกันน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจึงได้ทำการปรับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาวะการสั่นสะเทือนคือ ความหนาของแกนแอกซ์ฮวีเตอร์ ซึ่งพบว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือน Bending, Torsion, 2<sup>nd</sup> Bending ที่แกนหัวอ่าน-เขียนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งระบบรองรับ (Suspension) บนแกนหัวอ่าน-เขียน ซึ่งพบว่าระบบรองรับทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นตัวหน่วงของระบบทำให้ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนลดลง และยังได้ศึกษาผลกระทบของการติดตั้งไพว์ทแบริง ซึ่งพบว่าส่งผลต่อรูปแบบการสั่นสะเทือนที่สำคัญอย่างมากในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่านเขียน นั่นคือ Butterfly mode

ผลที่ได้จากการศึกษานี้คือเราสามารถทราบถึงปัจจัยทางกลที่ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน โดยมวลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติต่ำลง ส่วนค่าคงตัวสปริงที่สูงขึ้นทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น การติดตั้งระบบรองรับจะทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวหน่วงให้กับระบบซึ่งส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติเล็กน้อย และการติดตั้งไพว์ทแบริงจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความถี่ธรรมชาติใน Butterfly mode ซึ่งเป็นรูปแบบการสั่นสะเทือนที่สำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการทำงานในการเข้าถึงตำแหน่งข้อมูลที่ต้องการของหัวอ่านเขียนข้อมูล ซึ่งการทราบถึงปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะช่วยในการนำไปพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

สมคิดและอาบทิพย์ [6] ได้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การนำโทเลอร์แรนซ์ริงมาติดตั้งซ้ำเพื่อที่จะลดต้นทุนในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการวัดค่าการสั่นสะเทือนจากเครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

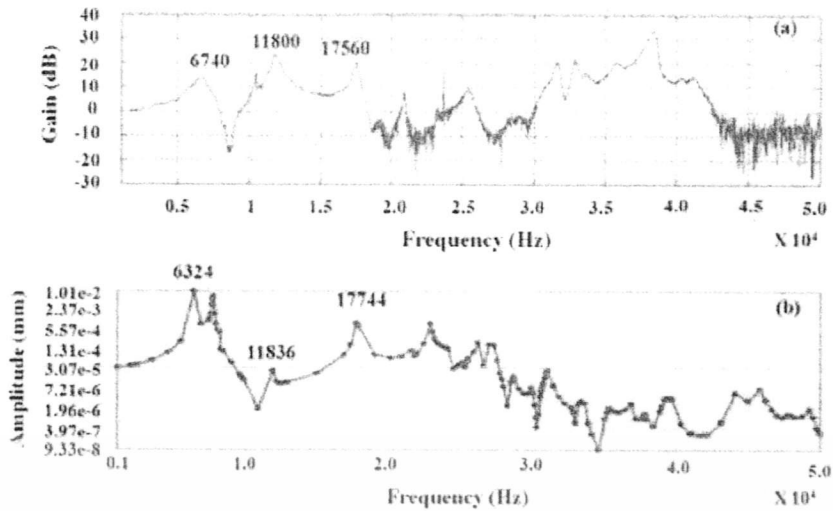
เพลอร์ไวโบรมิเตอร์ซึ่งการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนด้วยเครื่องมือวัด เลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์จะถูกนำมาหาผลตอบสนองเชิงความถี่โดยจุดที่วัดคือส่วนปลายของ แขนหัวเขียนอ่านทั้ง 5 แขนซึ่งได้ผลดังภาพที่ 2.1



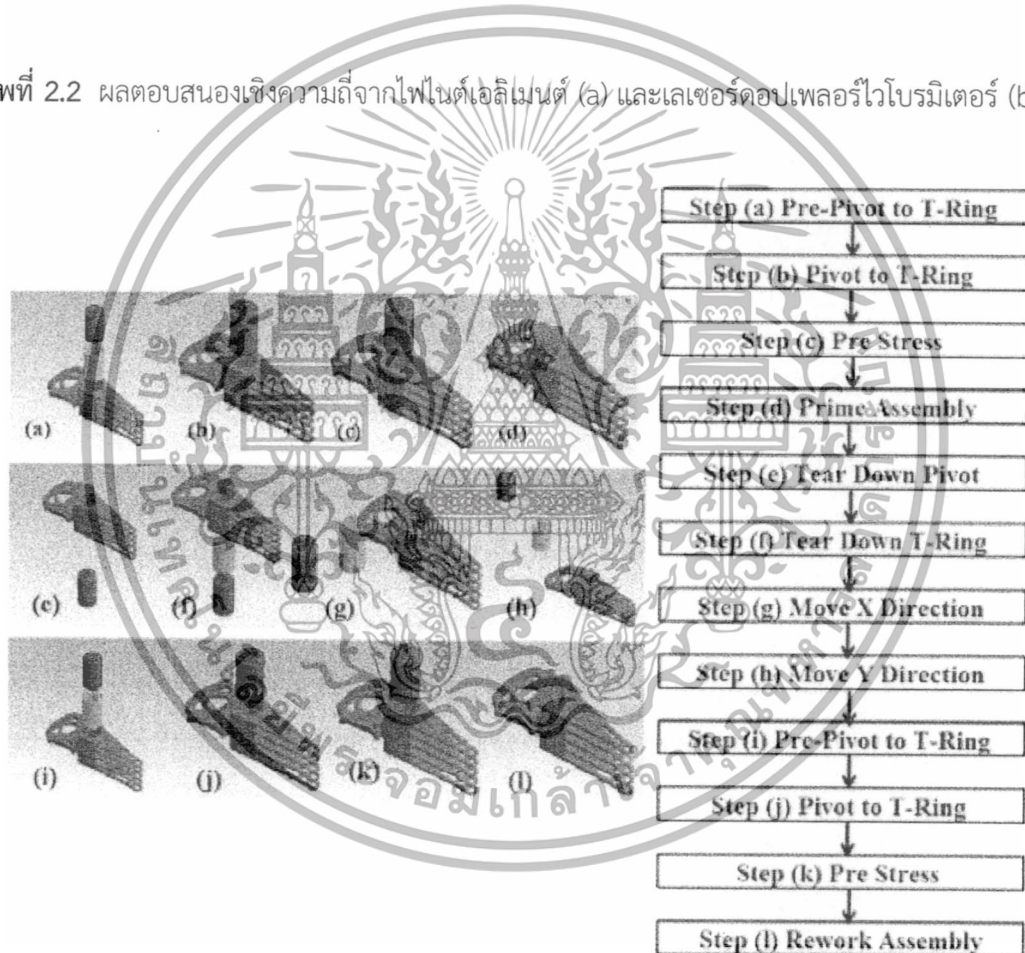
ภาพที่ 2.1 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทางผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งโทเลอร์เรนซ์ริงและ ไฟร้อทแบริงลงในแอกซ์ฮับเอเตอร์ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 ขั้นตอน a ถึง d และทำการเปรียบเทียบ ผลตอบสนองเชิงความถี่กับผลจากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์เพื่อ ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเลือกพิจารณารูปแบบของ การสั่นสะเทือน 3 รูปแบบคือ 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> Pivot Butterfly mode ซึ่งผลการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency respond) แสดงในภาพที่ 2.2 จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่ามีความใกล้เคียง กับผลจากการวัดโดยเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมในการ สั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ผลตอบสนองเชิงความถี่จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (a) และเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์ (b)



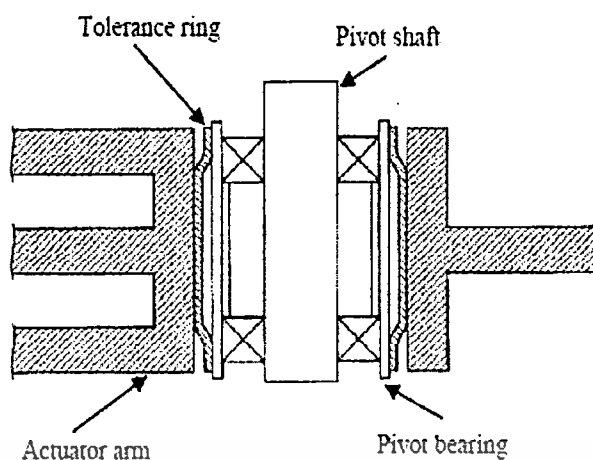
ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการติดตั้งจนถึงการติดตั้งซ้ำของโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟร็อบแบร์ริง

การวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ใหม่ของโทเลอร์แรนซ์ริงจะทำโดยติดตั้งไฟร็อบแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงบนแอกซ์เวิร์เอเตอร์และถอดออกและติดตั้งซ้ำใหม่อีกครั้งดังที่แสดงในขั้นตอน a ถึง l ของภาพที่ 2.3 เพื่อที่จะดูผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการติดตั้งซ้ำ ซึ่งพบว่ากระบวนการนำโทเลอร์แรนซ์ริงกลับมาใช้ใหม่นั้นไม่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนทางกลของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

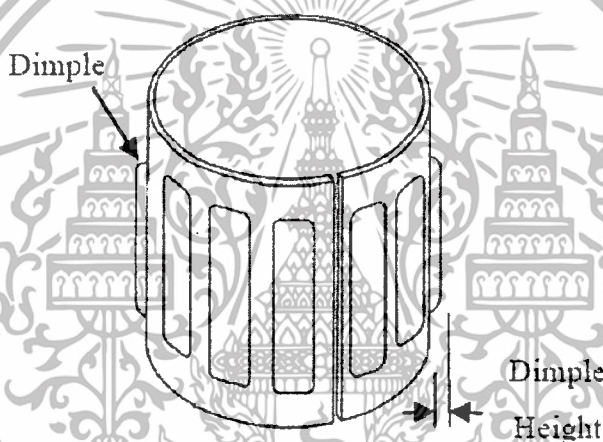
โดยผลที่ได้รับจากการศึกษางานวิจัยนี้คือทราบถึงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการประกอบโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟวอทแบริงเข้ากับแอกซ์วอร์เอเตอร์ ซึ่งสามารถนำขั้นตอนการติดตั้งเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้กับการติดตั้งไฟวอทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงในงานวิจัยนี้ และทราบถึงการเปรียบเทียบโดยใช้ผลตอบสนองเชิงความถี่จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ด้วย

ก่อก็คดีและคณะ [7] ได้ศึกษาผลกระทบทางการสั่นสะเทือนของการติดตั้งไฟวอทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงในแอกซ์วอร์เอเตอร์โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ซึ่งในการศึกษาได้เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดโดยเครื่องเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบริมิเตอร์กับผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติจากการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูของแอกซ์วอร์เอเตอร์ที่ใช้ติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟวอทแบริง โดยเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดแตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดแรงอัดของการติดตั้งที่แตกต่างกันและหลังการติดตั้งก็จะมีแรงอัดตกค้างที่ชิ้นส่วนแตกต่างกันออกไป โดยในการศึกษาต้องการที่จะหาความสัมพันธ์ของระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงอัดในการติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟวอทแบริงกับค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่างๆ

การติดตั้งไฟวอทแบริง และโทเลอร์แรนซ์ริง ลงในรูของแอกซ์วอร์เอเตอร์ ตำแหน่งของไฟวอทแบริง จะวางอยู่ด้านในโดยมีโทเลอร์แรนซ์ริงวางลงอยู่ระหว่างไฟวอทแบริงและแอกซ์วอร์เอเตอร์ โดยความสูงของติ่มเฟิลที่อยู่บนโทเลอร์แรนซ์ริงจะเป็นตัวสัมผัสกับผิวด้านในรูของแอกซ์วอร์เอเตอร์อาร์ม ซึ่งแรงอัดที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ยึดติดชิ้นส่วนทั้งสามเข้าด้วยกันคือ แอกซ์วอร์เอเตอร์ โทเลอร์แรนซ์ริงและไฟวอทแบริงโดยตำแหน่งติดตั้งและโครงสร้างของชิ้นส่วนต่าง ๆ ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.4 และ 2.5



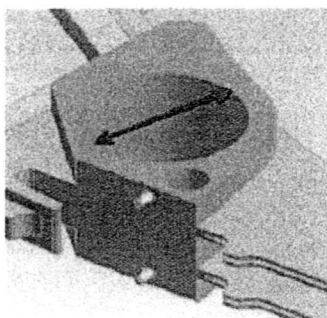
ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งการวางตัวของแอกซ์วอร์เอเตอร์ โทเลอเรนซ์ริงและไฟว้อทแบร์ริง



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของโทเลอเรนซ์ริง

ในการทดลองผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอกซ์วอร์เอเตอร์ในขนาดต่าง ๆ ดังที่ถูกต้องแสดงไว้ในภาพที่ 2.6 ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ จากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกต้องแสดงในตารางที่ 2.1 และจากการวัดโดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อไปใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของแอกซ์วอร์เอเตอร์ได้อย่างดีและแสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอกซ์วอร์เอเตอร์ในขนาดต่าง ๆ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Group	Bore size (mm)
1	$(STD - 0.015) \pm 0.002$
2	$(STD - 0.01) \pm 0.002$
3	$STD \pm 0.002$
4	$(STD + 0.01) \pm 0.002$
5	$(STD + 0.015) \pm 0.002$

STD—standard size.

ภาพที่ 2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบจำลองแอกซ์วีร์เอเตอร์

ตารางที่ 2.1 ค่าความถี่ธรรมชาติจากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Mode	Modal frequency of each group (kHz)				
	1	2	3	4	5
1	7.17	7.21	7.26	7.28	7.33
2	11.30	11.33	11.34	11.36	11.40
3	14.76	14.84	14.94	15.09	15.12
4	24.60	24.72	27.96	28.25	28.58
5	27.62	27.71	27.96	28.25	28.58
6	35.35	35.41	35.48	35.51	35.59
7	40.91	41.19	41.25	41.31	41.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดโดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

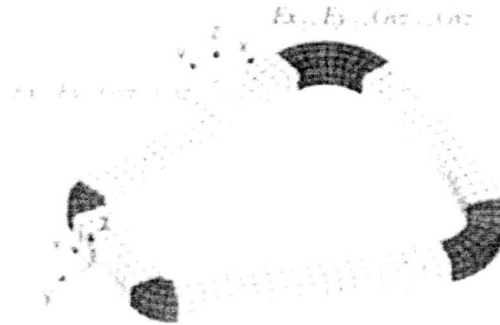
Mode	Modal frequency of each group (kHz)				
	1	2	3	4	5
1	7.23	7.10	7.37	7.42	7.47
2	11.52	11.59	11.53	11.56	11.60
3	15.36	15.44	15.38	15.49	15.52
4	26.90	26.72	26.31	26.51	27.01
5	30.72	30.71	30.15	30.58	30.34
6	38.53	38.51	38.37	38.51	38.59
7	45.11	45.29	45.22	45.21	45.43

สิ่งที่ได้รับจากการศึกษางานวิจัย คือ การปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอกซ์วีร์เอเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงอัดจากการติดตั้งที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของ ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน และนอกจากนั้นยังทำให้ทราบถึงความสามารถในการนำระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้สำหรับการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในการปรับเปลี่ยนแบบจำลองได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถนำไปใช้ศึกษาความสัมพันธ์ของการปรับเปลี่ยนปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนในอนาคต

No-Cheot และคณะ [8] ได้ศึกษาถึงความเหมาะสมในการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่ด้านท้ายของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนเป็นไอโซโทรปิกและออร์โททรอปิกถึงการส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือน โดยค่าสมบัติวัสดุที่เป็นออร์โททรอปิกจะใช้โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นคำนวณหาค่าที่เหมาะสม และใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของการใช้สมบัติวัสดุทั้งสอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ของการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่าง ๆ

การใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์แบบไอโซโทรปิกและออร์โททรอปิกจะมีความแตกต่างกัน คือ ออร์โททรอปิกนั้นจะมีค่าทางกลของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus) และค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus) ในแต่ละทิศทางที่แตกต่างกัน แต่สำหรับสมบัติวัสดุแบบไอโซโทรปิกนั้นจะมีค่าทางกลของวัสดุเหมือนกันในทุกทิศทาง หลังจากนั้นได้ออกแบบแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ โดยได้แบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนตัวต่าง ๆ เพื่อความเหมาะสมสำหรับการใช้คุณสมบัติทางวัสดุเป็นออร์โททรอปิกตามที่แสดงในภาพ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ที่ส่วนท้ายของแอกซ์โรเตอร์

ค่าสมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ก่อนและหลังจากที่ใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งเมื่อนำระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติโดยประยุกต์ค่าคุณสมบัติทางวัสดุก่อนใช้โปรแกรม คือ ไอโซโทรปิกและหลังใช้โปรแกรมคือออร์โททรอปิก พบว่าการใช้คุณสมบัติออร์โททรอปิกของขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ ส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์มากกว่าการใช้สมบัติวัสดุเป็นไอโซโทรปิกอยู่มากดังที่แสดงในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าสมบัติทางวัสดุของขดลวดก่อนและหลังใช้โปรแกรม

Design variable	Initial Values	Updated Values
$E_{x1}$ [GPa]	31.0	46.6
$E_{y1} (E_{z1})$ [GPa]	31.0	59.0
$G_{yz1}$ [GPa]	10.0	14.6
$G_{xz1} (G_{xy1})$ [GPa]	10.0	2.87
$\nu_{yz1}$	0.3	0.3
$\nu_{xz1} (\nu_{xy1})$	0.3	0.3
$E_{x2}$ [GPa]	30.0	30.0
$E_{y2} (E_{z2})$ [GPa]	30.0	39.8
$G_{yz2}$ [GPa]	10.0	10.0
$G_{xz2} (G_{xy2})$ [GPa]	10.0	3.85
$\nu_{yz2}$	0.3	0.3
$\nu_{xz2} (\nu_{xy2})$	0.3	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าความถี่ธรรมชาติจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของทั้งสองวัสดุเปรียบเทียบกับผลการวัดโดย เลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

Mode	EMA (Hz)	Initial finite element Model		Updated finite element Model	
		FEA [Hz]	Error [%]	FEA [Hz]	Error [%]
1 <sup>st</sup> Coil Torsion	2,240	3,040	35.8	2,276	1.61
1 <sup>st</sup> Coil Bending	4,010	3,730	-7.02	4,182	4.28
1 <sup>st</sup> Coil Sway	4,990	4,520	-9.41	5,059	1.38
2 <sup>nd</sup> Coil Torsion	8,100	8,120	0.24	7,782	-3.92
2 <sup>nd</sup> Coil Bending	9,360	7,960	-15.0	9,206	-1.64
2 <sup>nd</sup> Coil Sway	12,700	11,780	-7.22	12,373	-2.57

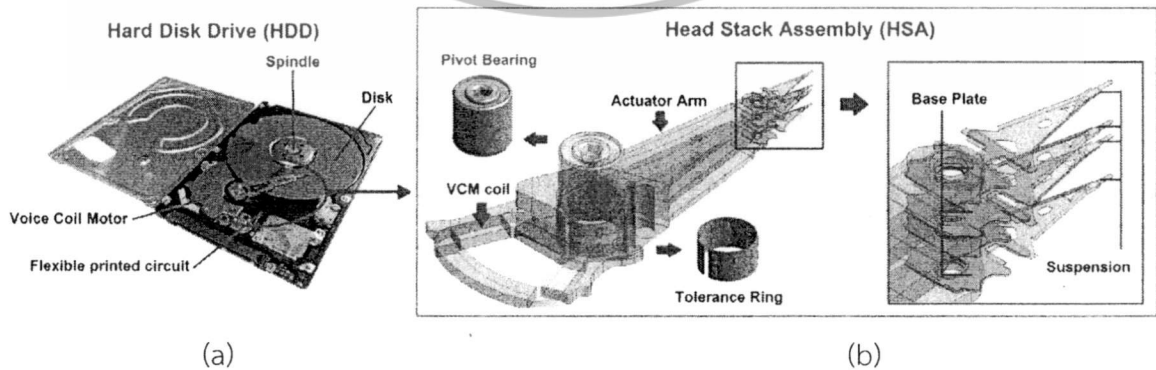
สิ่งที่ได้รับจากการศึกษาวิจัยนี้คือทราบถึงการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เพื่อที่จะใช้ในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และความเหมาะสมที่ควรจะใช้สมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นแบบออร์โธโทรปิกมากกว่าไอโซโทรปิกสำหรับการนำไปใช้ในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จนถึงทราบค่าทางวัสดุแบบออร์โธโทรปิกที่จะใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติได้อย่างเหมาะสม

# บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ อุปกรณ์ในการจัดเก็บข้อมูลซึ่งส่วนประกอบที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ โดยหน้าที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ การจัดเก็บข้อมูลต่าง ๆ และสามารถนำข้อมูลที่บันทึกไว้ออกมาเมื่อต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ปัจจุบันประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ทั้งในด้านขนาดการจัดเก็บข้อมูล ความเร็วในการรับส่งข้อมูล และอื่น ๆ อีกมาก โดยขนาดการจัดเก็บข้อมูลจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของปริมาณบิตข้อมูลที่สามารถบันทึกลงไปได้ต่อพื้นที่บนแผ่นจานแม่เหล็ก และความเร็วในการรับส่งข้อมูลนั้นจะขึ้นกับความเร็วรอบการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กและความเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งข้อมูลนั้น ๆ บนแผ่นจานแม่เหล็ก การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นข้อมูลจะถูกบันทึกลงบนแผ่นจานแม่เหล็กในตำแหน่งที่ต้องการโดยมีชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่นำพาหัวเขียนและอ่านไปยังตำแหน่งต่าง ๆ บนแผ่นจานแม่เหล็ก ซึ่งการสั่นสะเทือนจะเป็นสิ่งรบกวนที่ส่งผลให้เกิดความยากในการควบคุมหัวอ่านและเขียนข้อมูลไปยังตำแหน่งที่ต้องการหรืออาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่ง โดยส่วนประกอบหลัก ๆ ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจะประกอบไปด้วยหัวอ่านและเขียนข้อมูลซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนระบรองรับที่ถูกยึดติดอยู่บนแขนต่าง ๆ ของแอกซ์ชัวร์เอเตอร์โดยมีโทเลอร์เรนซ์ริงทำหน้าที่ยึดติดแอกซ์ชัวร์เอเตอร์เข้ากับเฟืองทแบริงเพื่อทำหน้าที่เป็นจุดหมุนในการเคลื่อนที่ โดยมีมอเตอร์รอยซ์คอยล์ ทำหน้าที่ในกรสร้างแรงหมุนในการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กติดกับกระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านขดลวดมอเตอร์รอยซ์คอยล์ที่ถูกติดตั้งอยู่ส่วนท้ายของแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ดังที่แสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ภาพส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (a) และชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน (b)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

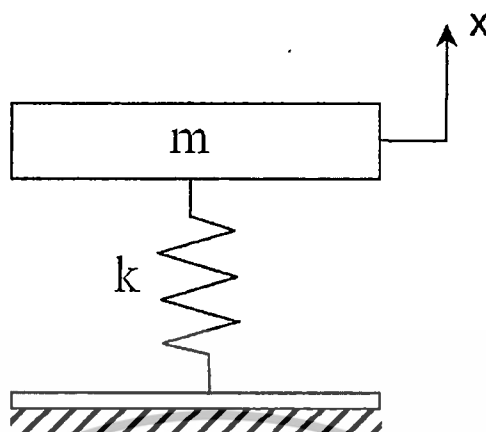
### 3.2 ธรรมชาติของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนคือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของระบบ การเคลื่อนที่ดังกล่าวอาจมีลักษณะรูปร่างที่แน่นอน (Regular form) หรืออาจจะไม่แน่นอน (Irregular) ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งการสั่นสะเทือนออกเป็นสองกรณี คือ การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) และการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced vibration) การสั่นสะเทือนอิสระจะเกิดขึ้นในลักษณะที่ระบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยการสั่นสะเทือนดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายค่าความถี่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะระบบที่เกิดการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนแบบบังคับ คือการเคลื่อนที่ในขณะที่มีแรงภายนอกกระทำกับระบบและทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เช่นเดียวกับแรงที่กระทำ หรือมีความถี่เท่ากับค่าความถี่ของแรงกระทำ ถ้าความถี่ของแรงที่มากกระทำมีค่าเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ จะเรียกว่า ระบบนั้นอยู่ในสภาพเกิดการสั่นพ้อง ซึ่งจะเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง และเป็นอันตรายต่อระบบอย่างมาก สำหรับในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นพ้องอาจไม่ส่งผลถึงขั้นทำให้อุปกรณ์ภายในเกิดความเสียหายแต่มันจะไปรบกวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้เกิดความผิดพลาดได้ ตัวอย่างเช่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงลมในการหมุนของจานแม่เหล็ก [9] หรือจากสั่นสะเทือนจากมอเตอร์วอลซ์คอยล์หรือสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor) [10] ไปทำให้เกิดการสั่นพ้องขึ้นที่ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน จนส่งผลให้ตำแหน่งในการเข้าถึงข้อมูลผิดพลาดได้ ดังนั้นการศึกษากการสั่นสะเทือนจึงมีความจำเป็นต่อการนำไปพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### 3.3 การสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรี

การสั่นสะเทือนอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีคือการสั่นสะเทือนที่ไม่มีแรงจากภายนอกกระทำกับระบบ ซึ่งระบบที่สมมุติขึ้นจะประกอบไปด้วยมวลเพียงอันเดียวเชื่อมต่อกับสปริงจะเรียกว่าระบบแบบไม่มีตัวหน่วง โดยปกติโครงสร้างพื้นฐานของระบบต่างๆ จะมีตัวหน่วง (Damper) อยู่ในระบบด้วยเช่น การเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน การเสียดทานในเนื้อวัสดุ ในขณะที่วัสดุมีการยืด-หดตัว หรือการต้านการเคลื่อนที่อื่นๆ เป็นต้น โดยตัวหน่วงจะช่วยลดความรุนแรงในการสั่นสะเทือนและส่งผลให้ระบบหยุดนิ่งในที่สุด ซึ่งในบางกรณีที่ระบบมีค่าตัวหน่วงมากอาจจะส่งผลให้ระบบไม่เกิดการสั่นสะเทือนและเข้าสู่สภาวะปกติในที่สุด โดยระบบที่มวลเชื่อมต่อกับสปริงและตัวหน่วงจะเรียกว่าระบบแบบมีตัวหน่วง [11] โดยในภาพที่ 3.2 แสดงระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วงและภาพที่ 3.4 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง

### 3.3.1 การสั่นสะเทือนอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบไม่มีตัวหน่วง



ภาพที่ 3.2 ระบบสมมติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง

จากภาพที่ 3.2 แสดงระบบสมมติการสั่นสะเทือนอิสระของมวล  $m$  ที่ไม่มีตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equations) ของการเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่ายได้ คือ

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

ซึ่งผลเฉลยทั่วไป (General solution) ของสมการเชิงอนุพันธ์ คือ

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

โดยที่

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

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

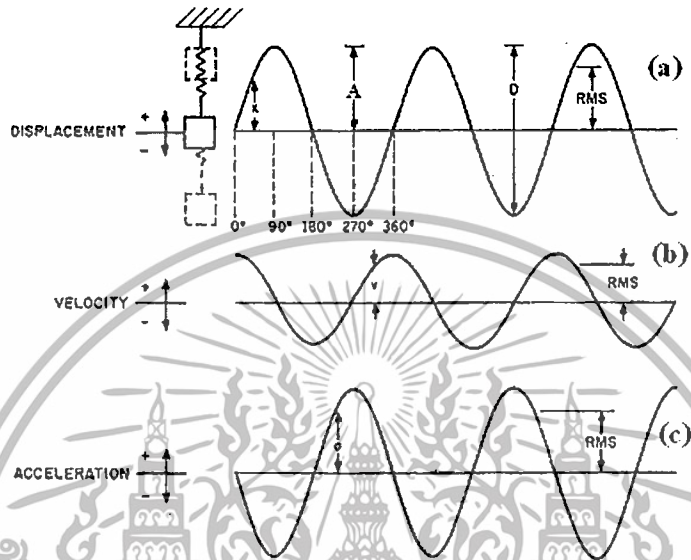
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{ความถี่ธรรมชาติ}$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

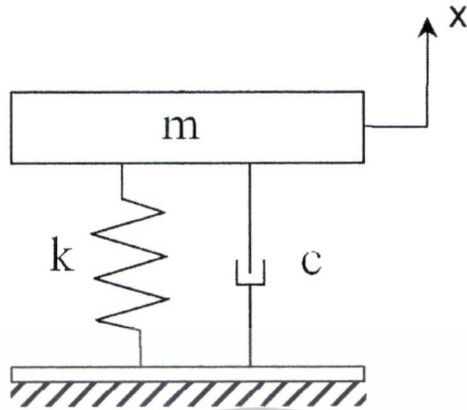
ผลเฉลยทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่จะอยู่ในลักษณะของฟังก์ชันไซน์ (Sine) หรือ โคไซน์ (Cosine) โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ (initial condition) ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำกันในเวลาเท่ากันและเรียกว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (Harmonic) โดยภาพที่ 3.3 แสดงการเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง



ภาพที่ 3.3 การเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง

ภาพที่ 3.3 แสดงการเคลื่อนที่ของระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วง ซึ่งการเคลื่อนที่เป็นไปตามสมการที่ 3.2 โดยมุมเฟสมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งภาพ 3.3 (a) แสดงถึงการกระจัดของระบบซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ ภาพที่ 3.3 (b) แสดงถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของการกระจัดเทียบกับเวลา ภาพที่ 3.3 (c) แสดงถึงความเร่งในการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของการกระจัดเทียบกับเวลา

3.3.2 การสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบมีตัวหน่วง



ภาพที่ 3.4 ระบบสมมติการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง

จากภาพที่ 3.4 แสดงระบบสมมติการสั่นสะเทือนอิสระของระบบที่มีตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่ายได้คือ

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

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

โดย

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (3.3) จะพิจารณาจาก  $\zeta$  คือ ค่าอัตราส่วนตัวหน่วง (damping ratio) ซึ่งได้จากการจัดรูปสมการที่ 3.3 และถูกแสดงอยู่ในสมการที่ 3.4 โดยค่าอัตราส่วนตัวหน่วงจะบ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนที่ได้ 3 แบบ คือ

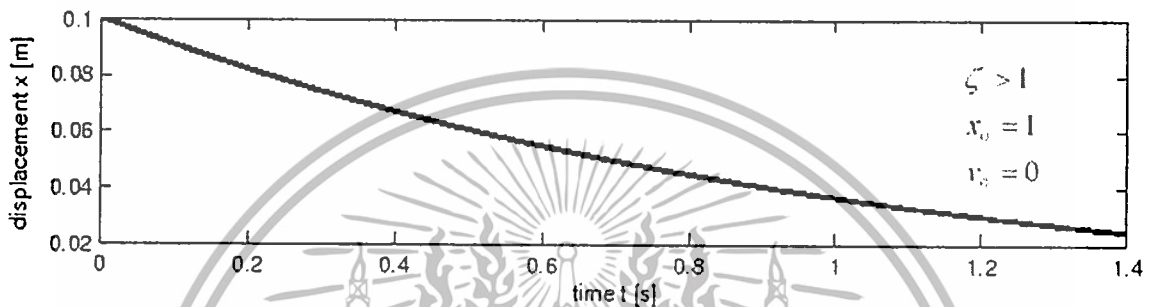
โอเวอร์แดมป์ (Overdamped Motion) คือ การที่ระบบมีค่าอัตราส่วนตัวหน่วงมีค่ามากกว่าหนึ่ง ( $\zeta > 1$ ) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ (3.3) ในกรณีนี้ คือ

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

โดยที่

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

จากผลเฉลยทั่วของการเคลื่อนที่กรณีโอเวอร์แดมป์ในสมการที่ (3.5) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ที่จะไม่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยการกระจัดจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไปและเข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุดดังที่ได้แสดงในภาพที่ 3.5

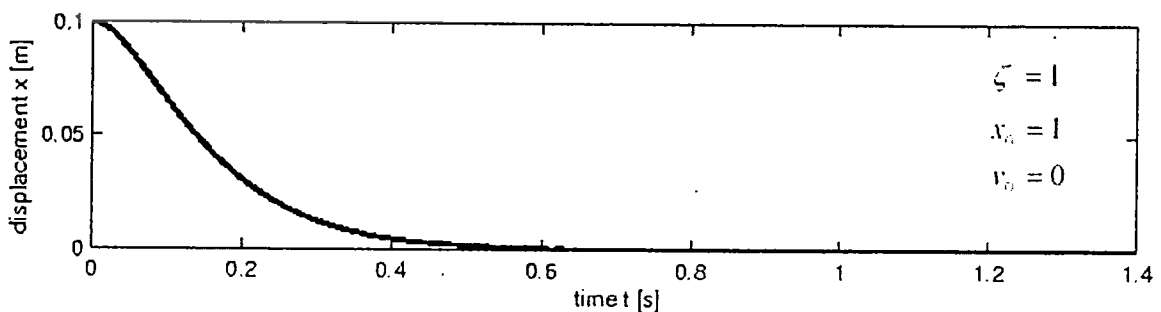


ภาพที่ 3.5 โอเวอร์แดมป์

คริติคอลลีแดมป์ (Critically Damped Motion) คือ การที่ระบบมีค่าอัตราส่วนตัวหน่วงเท่ากับหนึ่ง ( $\zeta = 1$ ) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ (3.3) ในกรณีนี้ คือ

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

จากผลเฉลยทั่วไปของการเคลื่อนที่กรณีคริติคอลลีแดมป์ในสมการที่ (3.6) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ที่จะไม่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยการกระจัดจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไปและเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างรวดเร็วดังที่แสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 คริติคอลลีแดมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันเดอร์แดมป์ (Underdamped Motion) คือ การที่ระบบมีค่าอัตราส่วนตัวหน่วงน้อยกว่าหนึ่ง ( $0 < \zeta < 1$ ) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปของสมการ (3.3) ในกรณีนี้ คือ

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

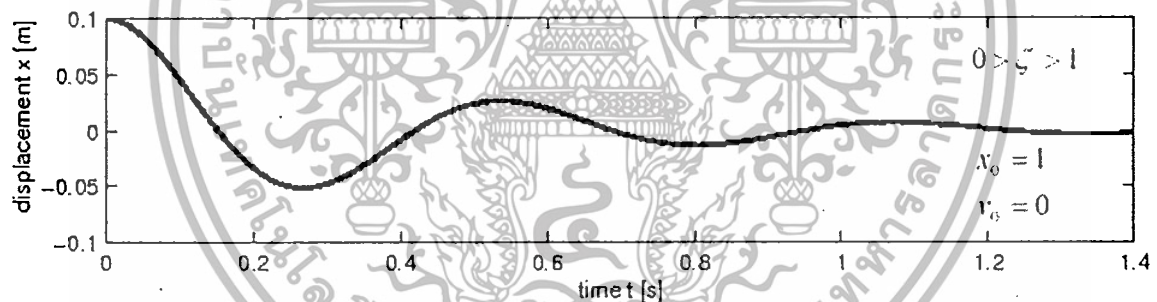
โดยที่

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

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

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

จากผลเฉลยทั่วไปของการเคลื่อนที่กรณีอันเดอร์แดมป์ในสมการที่ (3.7) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่มีลักษณะการสั่นสะท้อนเกิดขึ้นโดยการกระจัดจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยที่สอดคล้องดังที่ได้แสดงในภาพที่ 3.7



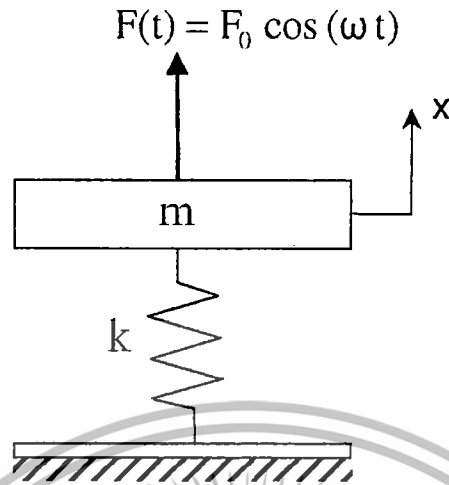
ภาพที่ 3.7 อันเดอร์แดมป์

### 3.4 การสั่นสะท้อนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับชั้นเสรี

การสั่นสะท้อนแบบบังคับคือ การสั่นสะท้อนของวัตถุหรือระบบที่เกิดจากแรงกระทำที่ต่อเนื่องตลอดเวลาเช่น การสั่นสะท้อนจากเครื่องยนต์ ซึ่งความถี่ในการสั่นของระบบจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงที่มากระทำ ด้วยเหตุนี้ ความถี่ที่เกิดจากแรงภายนอกมากกว่า จึงเป็นไปได้ที่จะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่เกิดจากการสั่นของระบบเอง ในขณะที่ไม่มีแรงกระทำที่เรียกว่าความถี่ธรรมชาติของระบบและส่งผลทำให้เกิดการสั่นพ้อง [11] โดยในภาพที่ 3.8 แสดงระบบสมมุติการสั่นสะท้อนแบบบังคับที่ไม่มีตัวหน่วง และภาพที่ 3.9 ระบบสมมุติการสั่นสะท้อนแบบอิสระที่มีตัวหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบไม่มีตัวหน่วง



ภาพที่ 3.8 ระบบสมมุติการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่ไม่มีตัวหน่วง

ในภาพที่ 3.8 แสดงก้อนน้ำหนักมวล  $m$  ตั้งอยู่บนสปริงโดยให้แรง  $F(t)$  กระทำต่อมวลนี้ โดยให้  $F(t)$  กระทำอยู่ในลักษณะฟังก์ชันโคไซน์

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่ของแรงกระทำต่อมวล  $m$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใด ๆ จะมีแรงกระทำบนมวล  $m$  2 แรง คือ แรงจากสปริงและแรงกระทำภายนอกซึ่งเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ได้เป็น

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

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (3.10)$$

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

$$x = x_c + x_p \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $x$  คือ ผลเฉลยทั่วไป

$x_c$  คือ ผลเฉลยเต็มเต็ม

$x_p$  คือ ผลเฉลยเฉพาะ

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) ได้ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

### 3.4.2 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหนึ่งระดับขั้นเสรีแบบมีตัวหน่วง



รูปที่ 3.9 ระบบสมมติการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่มีตัวหน่วง

ในภาพที่ 3.9 แสดงมวล  $m$  ตั้งอยู่บนสปริงและตัวหน่วงโดยให้แรง  $F(t)$  กระทำต่อมวลนี้ โดยให้  $F(t)$  กระทำอยู่ในลักษณะฟังก์ชันโคไซน์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.9 แสดงระบบสมมติการสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่ายได้ คือ

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

นำ  $m$  ทหารสมการที่ (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) โดยเลือกพิจารณาเฉพาะในกรณีการเคลื่อนที่ของระบบแบบอานเดอร์แดมป์ ( $0 < \zeta < 1$ ) เนื่องจากเป็นกรณีที่มีการเกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น โดยผลเฉลยเต็มเต็มจะหาได้จากการเปลี่ยนสมการที่ (3.22) ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสองแบบเอกพันธ์โดยการกำหนดให้  $F(t) = 0$  ทำให้มีรูปสมการเหมือนกับสมการที่ (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

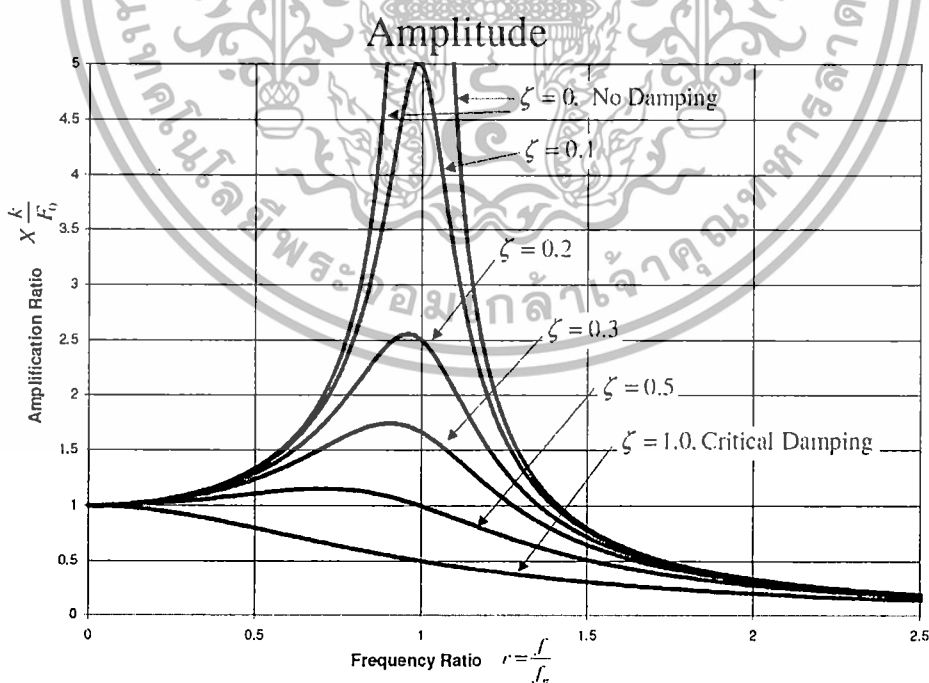
$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta \omega_n \omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

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

จากผลเฉลยทั่วไปในสมการที่ (3.36) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาผ่านไปขนาดการกระจัดของผลเฉลยเต็มเต็มจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่ส่งผลกับการเคลื่อนที่ของระบบ โดยจะเหลือแต่เพียงผลของการกระจัดจากผลเฉลยเฉพาะในสมการที่ (3.35) และเมื่อนำแอมพลิจูดของผลเฉลยเฉพาะในสมการที่ (3.35) มาทำการนอร์มัลไลซ์ (normalized) เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่จะได้เป็นดังสมการที่ (3.37) และมีผลดังที่แสดงในภาพที่ 3.10

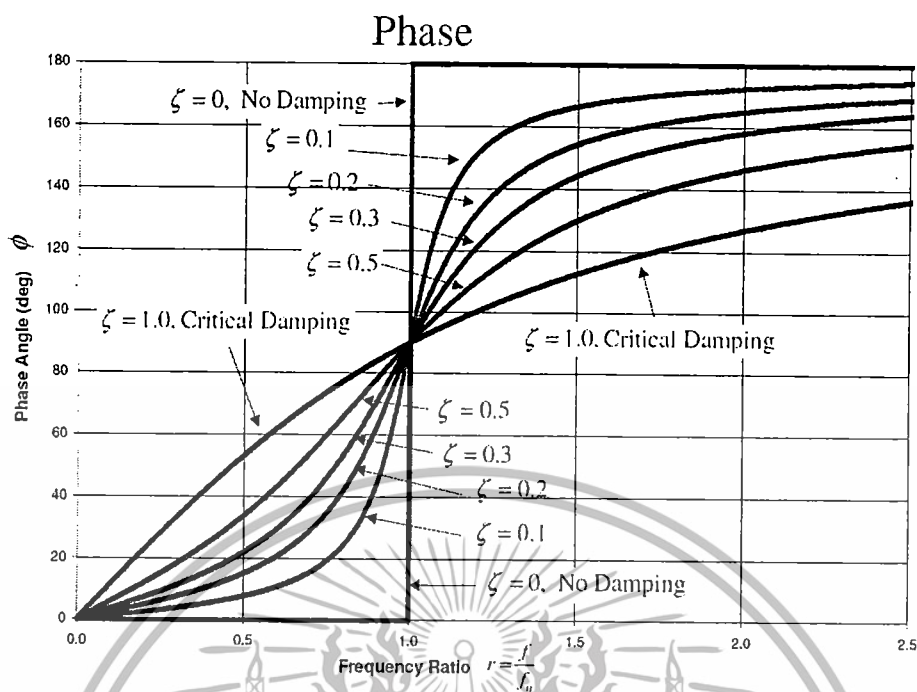
$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad \text{และ} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (3.37)$$

โดยที่  $r = \omega / \omega_n$



ภาพที่ 3.10 อัตราขยายการเคลื่อนที่เทียบกับอัตราส่วนความถี่

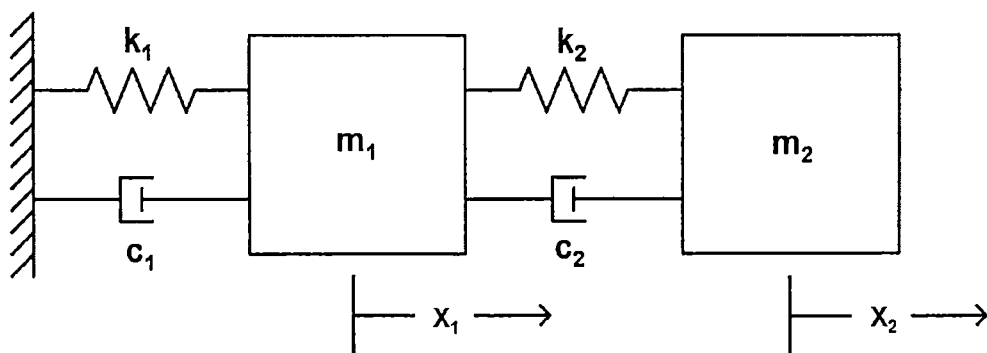
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสเทียบกับอัตราส่วนความถี่

### 3.5 การวิเคราะห์โหมดัลของการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบที่มีระดับความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไป จะมีความซับซ้อนอย่างมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์บนระบบพิกัดปกติ ซึ่งการวิเคราะห์โหมดัล คือ วิธีที่ใช้สำหรับการนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่มีระดับความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไป เพื่อช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์บนพิกัดปกติ (Original coordinate system) โดยการสร้างระบบพิกัดใหม่ขึ้นมา คือระบบพิกัดโหมดัล (Modal coordinate system) การจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดปกติให้มาอยู่ในพิกัดโหมดัลจะช่วยให้สมการในแต่ละสมการมีความอิสระจากกันซึ่งจะทำให้สามารถนำมาคิดแยกในแต่ละสมการได้อย่างสะดวก โดยสมการที่ถูกสร้างขึ้นในระบบพิกัดโหมดัลจะเรียกว่า สมการโหมดัล (Modal equations) [11] โดยจะนำเสนอขั้นตอนอย่างง่ายในการใช้วิธีการวิเคราะห์โหมดัลสำหรับการหาผลเฉลยสำหรับระบบมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระดังที่แสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ระบบสมมุติมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

จากภาพที่ 3.12 แสดงการจำลองระบบมวลคู่ที่มีสปริงและตัวหน่วงซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละมวลในรู้อย่างง่ายได้คือ

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

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

นำสมการที่ (3.38) และ (3.39) มาจัดรูปใหม่ได้เป็น

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

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

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  $M$  คือ เมทริกซ์ของมวล

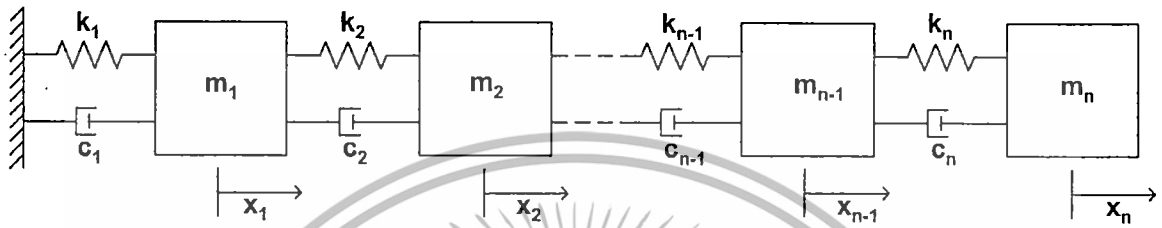
$C$  คือ เมทริกซ์ของค่าคงที่ตัวหน่วง

$K$  คือ เมทริกซ์ของค่าคงที่สปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.40) และ (3.41) แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนในการหาผลเฉลยเนื่องจากในแต่ละสมการมีความเกี่ยวข้องกันอยู่และจะมีความซับซ้อนมากขึ้นในระบบที่มีระดับความอิสระที่สูงมากขึ้น โดยเมทริกซ์และระบบที่มีระดับความอิสระใดๆจะถูกแสดงในสมการที่ (3.43) และภาพที่ (3.13) ตามลำดับ

### 3.5.1 การวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบหลายระดับขั้นเสรี



ภาพที่ 3.13 ระบบสมมติหลายมวลที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบจะถูกเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ คือ

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0$$

(3.43)

โดยที่

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดปกติให้อยู่ในระบบพิกัดโมดัลจะต้องมีการหาค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งอยู่ในค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) และนำไปเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector) โดยกำหนดให้

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

โดย  $\mathbf{v}$  คือ เมทริกซ์เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะและนำสมการที่ (3.44) แทนลงในสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ในสมการที่ (3.43) โดยไม่คิดตัวห่วงได้เป็น

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

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

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

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

กำหนดให้เมทริกซ์  $\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{K} \mathbf{M}^{-1/2}$  ค่า  $\omega^2 = \lambda$  และ  $\mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{M} \mathbf{M}^{-1/2} = \mathbf{I}$  โดย  $\lambda$  คือ ค่าลักษณะเฉพาะและ  $\mathbf{I}$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) ซึ่งนำสมการที่ (3.47) มาเขียนได้ใหม่ คือ

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

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

$$\tilde{\mathbf{K}} \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v} \quad (3.49)$$

โดย  $\lambda = \omega^2$

ซึ่งเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของในแต่ละค่าลักษณะเฉพาะจะถูกนำมาสร้างเป็นเมทริกซ์  $\mathbf{P}$  คือ

$$\mathbf{P} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \mathbf{v}_3 \quad \dots \quad \mathbf{v}_n] \quad (3.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบในสมการที่ (3.43) สามารถเปลี่ยนอยู่ในระบบพิกัดโมดัลโดยการกำหนดให้

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

นำสมการที่ (3.51) แทนลงในสมการที่ (3.43) จะได้เป็น

$$\mathbf{M} \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{P} \ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{C} \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{P} \dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{P} \mathbf{r}(t) = 0 \quad (3.52)$$

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

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

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

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

โดย

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

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

ซึ่ง  $\zeta_i$  ได้จาก

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเขียนสมการที่ (3.54) กระจายได้เป็น

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

หรือ

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

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

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

โดยที่

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

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

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

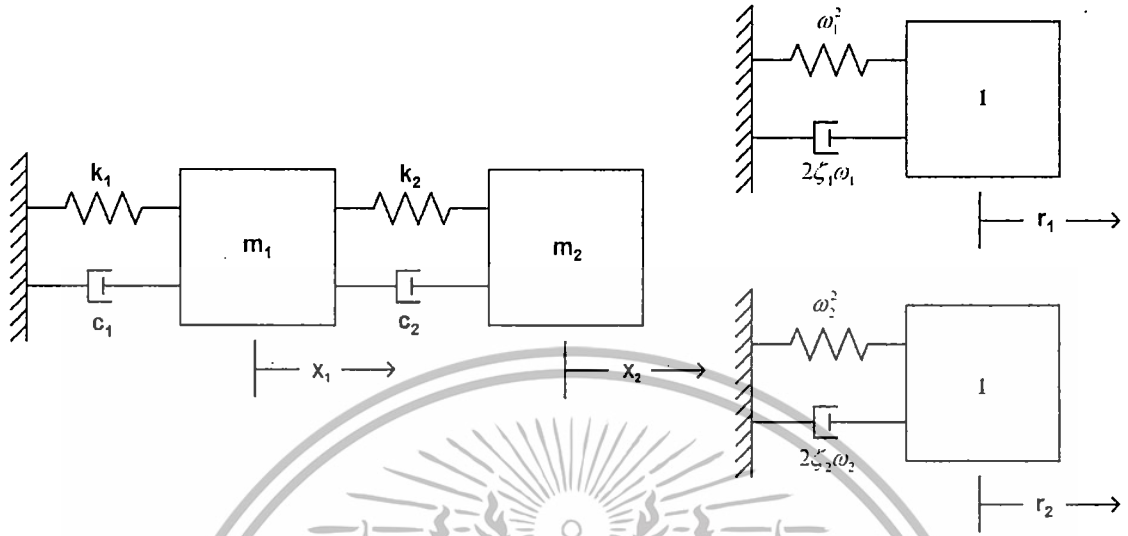
ซึ่งค่า  $A_i$  และ  $\phi_i$  จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบซึ่งค่า  $r_{i0}$  และ  $\dot{r}_{i0}$  หาได้จาก

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0 = \mathbf{P}^T \mathbf{M}^{1/2} \mathbf{x}_0 \quad (3.57)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

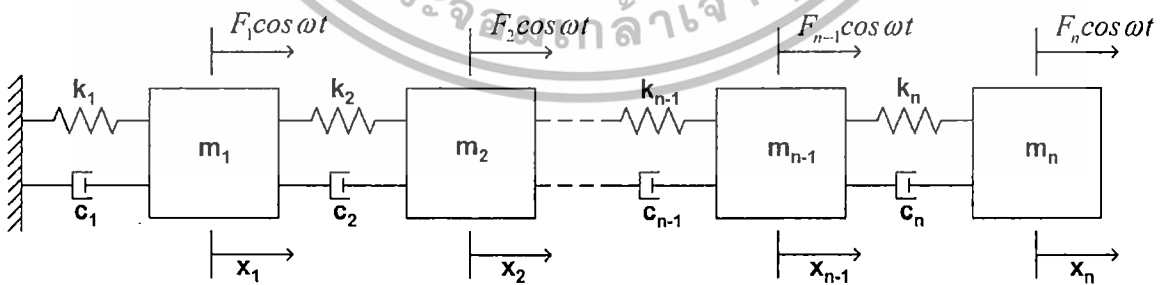
เมื่อได้คำตอบของสมการต่าง ๆ ของระบบในระบบพิกัดโมดัลสามารถแปลงกลับไปในระบบพิกัดปกติ โดยการใช้สมการที่ (3.51) โดยภาพที่ 3.14 แสดงแผนภาพความแตกต่างระหว่างการใช้ระบบพิกัดปกติและระบบพิกัดโมดัลของระบบมวลคู่



ภาพที่ 3.14 ลักษณะของระบบสมมติมวลคู่ในระบบพิกัดปกติและระบบพิกัดโมดัล

### 3.5.2 การวิเคราะห์ที่โมดัลการสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบหลายระดับขั้นเสรี

การใช้วิธีวิเคราะห์ที่โมดัลเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบที่ระดับความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไปจะมีความแตกต่างจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากระบบที่นำมาวิเคราะห์ในส่วนนี้จะมีการเพิ่มแรงกระตุ้นเข้ามาโดยกำหนดให้แรงที่ทำให้การกระตุ้นเข้ามานั้นมีลักษณะ คือ  $F(t) = F_i \cos \omega t$  ทำให้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบแตกต่างไปจากเดิม ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังที่แสดงในสมการที่ (3.59) โดยในภาพที่ 3.15 แสดงแผนภาพจำลองของระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยแรง



ภาพที่ 3.15 ระบบสมมติหลายมวลที่มีการสั่นสะเทือนแบบบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบจะถูกเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ คือ

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

โดย

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

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

นำสมการที่ (3.51) แทนลงในสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่อยู่ในสมการที่ (3.59) ได้เป็น

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

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

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

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

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

โดย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\begin{aligned} \omega_{di} &= \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} \\ \phi_i &= \tan^{-1} \frac{\omega_{di} (r_{i0} - X_i \cos \theta_i)}{\dot{r}_{i0} + (r_{i0} - X_i \cos \theta_i) \zeta_i \omega_i - \omega X_i \sin \theta_i} \\ A_i &= \frac{r_{i0} - X_i \cos \theta_i}{\sin \phi_i} \\ \theta_i &= \tan^{-1} \frac{2\zeta_i \omega_i \omega}{\omega_i^2 - \omega^2} \end{aligned}$$

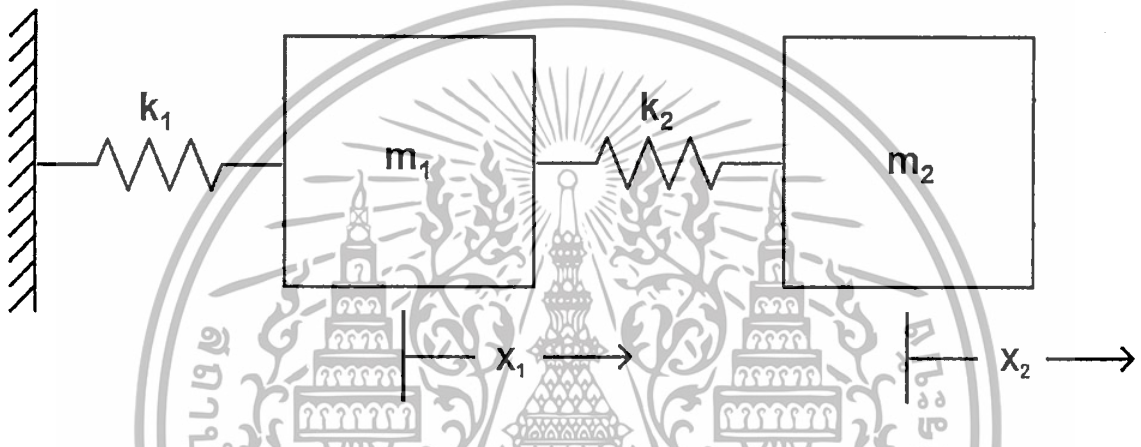
$$X_i = \frac{f_i}{\sqrt{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_i \omega_i \omega)^2}}$$

เมื่อได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการต่างๆของระบบในระบบพิกัดโมดัลดังที่แสดงในสมการที่ (3.63) สามารถแปลงกลับไปในระบบพิกัดปกติโดยการใช้สมการที่ (3.51) ซึ่งทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีการสั่นสะเทือนแบบบังคับในระบบพิกัดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วิธีการรวมกันของรูปแบบการสั่นสะเทือน (Mode Summation Method)

การสั่นสะเทือนของระบบต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบโดยขึ้นกับเงื่อนไขเริ่มต้นและลักษณะของระบบ ซึ่งในการสั่นสะเทือนจะมีรูปแบบในการสั่นสะเทือนเฉพาะในแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติเกิดขึ้นมากมายซ้อนทับกันจนกลายเป็นการเคลื่อนที่ของระบบ โดยเงื่อนไขเริ่มต้นจะส่งผลให้การสั่นสะเทือนในแต่ละรูปแบบมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันออกไป [11] ซึ่งจะสามารถบอกรูปแบบการเคลื่อนที่ของในแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติและอิทธิพลในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.16 ระบบสมมติมวลคู่ที่มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

ภาพที่ 3.16 มวล  $m_1$  และ  $m_2$  ถูกเชื่อมต่อกันด้วยสปริงและถูกยึดกับกำแพงด้านหนึ่งโดยไม่มีแรงจากภายนอกกระทำซึ่งจะสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปเมทริกซ์ดังที่แสดงในสมการที่ (3.42) ได้ คือ

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

กำหนดให้  $x = M^{-1/2}q(t)$  และคูณสมการที่ ด้วย  $M^{-1/2}$  จะได้สมการใหม่เป็น

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

ซึ่งผลเฉลยของสมการที่ (3.65) ในแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติจะได้ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดย  $d_i$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Expansion coefficient) ในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนและสามารถเขียนสมการที่ (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  $v_i^T$  คูณเข้าในสมการที่ (3.69) และ (3.70) จะพบว่า  $v_i^T v_i = 0$  เมื่อ  $i \neq j$  และ  $v_i^T v_i = 1$  เมื่อ  $i = j$  ทำให้สามารถเขียนสมการได้ใหม่ คือ

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

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

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

และ

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

ซึ่ง  $\phi_i$  คือ มุมเฟส และ  $d_i$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่แสดงถึงอิทธิพลของในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของระบบ

$$u_i = M^{-1/2} v_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$u_i$  คือ รูปแบบการสั่นสะเทือนที่จะบ่งบอกถึงรูปร่างในการเสียรูปในรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ค่าความถี่ธรรมชาติต่าง ๆ

จากภาพที่ 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

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad v_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

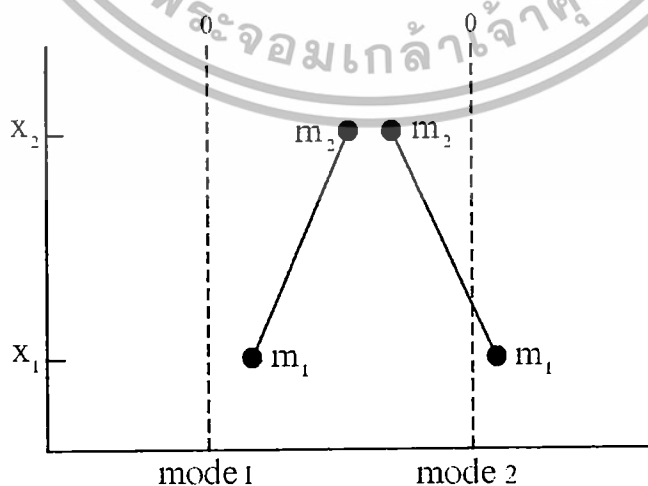
โดยนำมาหาค่า  $\phi_i$ ,  $u_i$  และ  $d_i$  ได้เป็น

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

$$u_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad u_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$d_1 = 2\sqrt{2} \quad d_2 = \sqrt{2}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการสั่นสะเทือนที่หนึ่ง (first mode shape) มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของระบบมากกว่ารูปแบบการสั่นสะเทือนที่สอง (second mode shape) โดยรูปร่างในการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนจะถูกแสดงดังภาพที่ 3.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารภาพที่ 3.17 รูปร่างการเคลื่อนที่ของระบบในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง โดยจะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาต่าง ๆ เช่น ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน วิเคราะห์การไหลของของไหล และปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เป็นต้น หลักการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีรูปร่างอยู่หลายลักษณะ โดยจุดตัดที่เชื่อมต่อกันในแต่ละเอลิเมนต์จะถูกเรียกว่าจุดต่อ (Node) ซึ่งจะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อจะคำนวณหาค่าของตัวแปรที่ต้องการบนตำแหน่งจุดต่อต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในทางปฏิบัติทั่วไป แรงจากภายนอกที่กระทำต่อวัตถุโดยปกติแล้วจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของระบบ และเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะส่งผลให้เกิดแรงต้านเพิ่มขึ้นมานั้นคือ แรงเฉื่อย (Inertia Force) และแรงหน่วง (Damping Force) ซึ่งจะมีทิศสวนทางกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ จากสมการที่ (3.59) จะเห็นว่าโพลีโนเมียล  $F(t)$  ที่ด้านขวาของสมการจะแสดงถึงแรงทุก ๆ ชนิดที่กระทำต่อระบบ ซึ่งก่อนหน้านี้ได้กล่าวเฉพาะแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยขึ้นกับฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine) ซึ่งส่งผลให้ความเครียดและความเค้นจะแปรผันตามเวลาด้วย ดังนั้นการแก้สมการไฟไนต์เพื่อคำนวณหาการเคลื่อนที่ที่แปรผันไปตามเวลาจะใช้หลักการของการวิเคราะห์โมดัล ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการในการหาค่าลักษณะเฉพาะ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ และกระบวนการแก้สมการเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ ดังที่ได้แสดงไว้เบื้องต้นในหัวข้อ 3.5

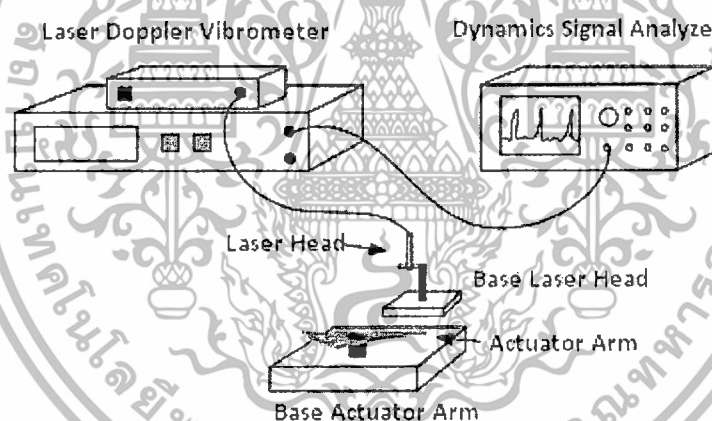
### 3.8 การทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

ในการทดสอบวัดการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ได้ใช้เครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ในการวัดการสั่นสะเทือน โดยการตรวจวัดจะทำการใส่แรงกระตุ้นที่มีความถี่ต่าง ๆ ให้กับชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน โดยใช้มอเตอร์วอยซ์คอยล์ และยิงแสงไปยังตำแหน่งต่าง ๆ บนชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ที่ต้องการทดสอบ โดยแสงที่ถูกยิงไปตกลงบนจุดทดสอบจะสะท้อนกลับมายังตัวรับของเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์และใช้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแสงเพื่อใช้หาระยะทาง ความเร็วและความเร่งในการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และหลักการของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) ความถี่ของแสงที่กระเจิงกลับจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Blue Shift คือ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิด คือ ความถี่ของแสงเพิ่มขึ้น และเกิด Red Shift เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด คือความถี่ของแสงลดลง ซึ่งความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำไปหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุได้และการเปลี่ยนแปลงมุมของการสะท้อนกลับ (Phase angle) ของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กระเจิงกลับจากวัตถุจะสามารถใช้หาระยะการเคลื่อนที่ของจุดที่ต้องการทดสอบได้ ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแปลงมุมของการสะท้อนกลับและความถี่ที่วัดได้จะถูกส่งไปยัง Dynamics Signal Analyzer (DSA) เพื่อแปลงเป็นผลการตอบสนองต่าง ๆ [12] ดังที่แสดงในภาพที่ 3.18 ซึ่ง DSA เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณในช่วงความถี่ต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนการทำงาน คือ DSA จะรับสัญญาณจากตัวควบคุมของเครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอวโอบริเตอร์และทำการจัดเก็บสัญญาณเพื่อมาแปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) โดยใช้ ADC (Analog to Digital Converter) หลังจากนั้นทำการใช้ FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลที่ได้รับเข้ามาซึ่งอยู่ในรูปของ Time Domain ให้อยู่ในรูปของ Frequency Domain เพื่อที่แยกให้อยู่ในรูปของความถี่ต่าง ๆ และทำการแสดงผลที่หน้าจอโดยผลที่แสดงในช่วงความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าอัตราการขยายการสั่นสะเทือน (gain) ที่แตกต่างกันซึ่งคำนวณจากสัญญาณป้อนเข้า (input) ในระบบและสัญญาณการตอบสนอง (output) จากระบบซึ่งคำนวณได้จากสมการ

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



ภาพที่ 3.18 แบบจำลองการทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่โดยเลเซอร์คอปเพลอวโอบริเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# วิธีดำเนินการวิจัย

### 4.1 บทนำ

วิธีการทำวิจัยประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ซึ่งประกอบไปด้วยการเลือกชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน การวาดแบบจำลอง การสืบค้นข้อมูล การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวัดค่าความถี่ธรรมชาติโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

#### 4.1.1 การเลือกชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้ถูกเลือกโดยบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมีการเลือกจากรุ่นที่มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบันเพื่อมาทำการศึกษา

#### 4.1.2 การวาดแบบจำลอง

การวาดแบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ได้ใช้โปรแกรม ANSYS ในการวาด ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ คือ แอคซัวร์เอเตอร์ ขดลวดมอเตอร์รอยซ์คอยล์ ไฟร็อตแบร์ริง ระบบรองรับ โทเลอร์แรนซ์ริงและเบสเพลท โดยข้อมูลในการวาดชิ้นส่วนต่าง ๆ เหล่านี้ ได้รับมาจากบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

#### 4.1.3 การสืบค้นข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการสืบค้นข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อมูลวัสดุที่ถูกกำหนดในชิ้นส่วนต่าง ๆ และขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันจนเป็นชุดประกอบหัวอ่านเขียน ซึ่งได้รับข้อมูลชนิดของวัสดุในแต่ละชิ้นส่วนและได้เข้าไปศึกษาขั้นตอนการประกอบชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ในกระบวนการผลิตจากบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และนอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

#### 4.1.4 การวิเคราะห์โดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือ การหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มต้นจากการปรับเปลี่ยนขนาดเอลิเมนต์เป็นขนาดต่าง ๆ และทำการตรวจสอบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้โดยเลือกพิจารณาเพียงเฉพาะการสั่นสะเทือนแบบ 1<sup>st</sup> Butterfly ซึ่งการนำค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ มาเปรียบเทียบ จะแสดงถึงขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่สอง คือ การพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยการกำหนดสมบัติทางวัสดุ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และลักษณะรูปร่างเรขาคณิต (Geometry) โดยส่วนนี้จะมีการสร้างแบบจำลองขึ้นมาทั้งหมด 3 แบบจำลองที่มีความแตกต่างกัน คือ ความแตกต่างทางสมบัติวัสดุบนขดลวดของมอเตอร์วอยซ์คอยล์ และการติดตั้งโทเลอร์เรนซ์ริงและไฟร้อทแบร์ริงเพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบสำหรับการนำแบบจำลองไปใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดด้วยเครื่องเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์เพื่อหาความแตกต่างของค่าความถี่ธรรมชาติและเวลาในการคำนวณของแต่ละแบบจำลอง

ส่วนที่สาม คือ การศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน จากการปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลบนโทเลอร์เรนซ์ริง โดยจะมีการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโทเลอร์เรนซ์ริงที่มีความสูงของดิมเพิลแตกต่างกัน 5 ขนาด คือ มีขนาดสูงกว่าขนาดมาตรฐาน 2 ขนาดและขนาดต่ำกว่ามาตรฐาน 2 ขนาด และทำการติดตั้งลงบนแอกซ์ชัวร์เอเตอร์พร้อมทั้งไฟร้อทแบร์ริง ซึ่งความสูงของดิมเพิลจะส่งผลกระทบต่อแรงอัดที่ทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างไฟร้อทแบร์ริง ทอเลอร์เรนซ์ริงและแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ซึ่งแบบจำลองทั้ง 5 แบบจะถูกนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของดิมเพิลที่ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

ส่วนที่สี่ คือ การนำเสนอการใช้ฟ็อกซ์แทนโทเลอร์เรนซ์ริงในการยึดติดแอกซ์ชัวร์เอเตอร์และไฟร้อทแบร์ริงเข้าด้วยกัน เพื่อแสดงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน โดยผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดค่าความถี่ธรรมชาติโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน

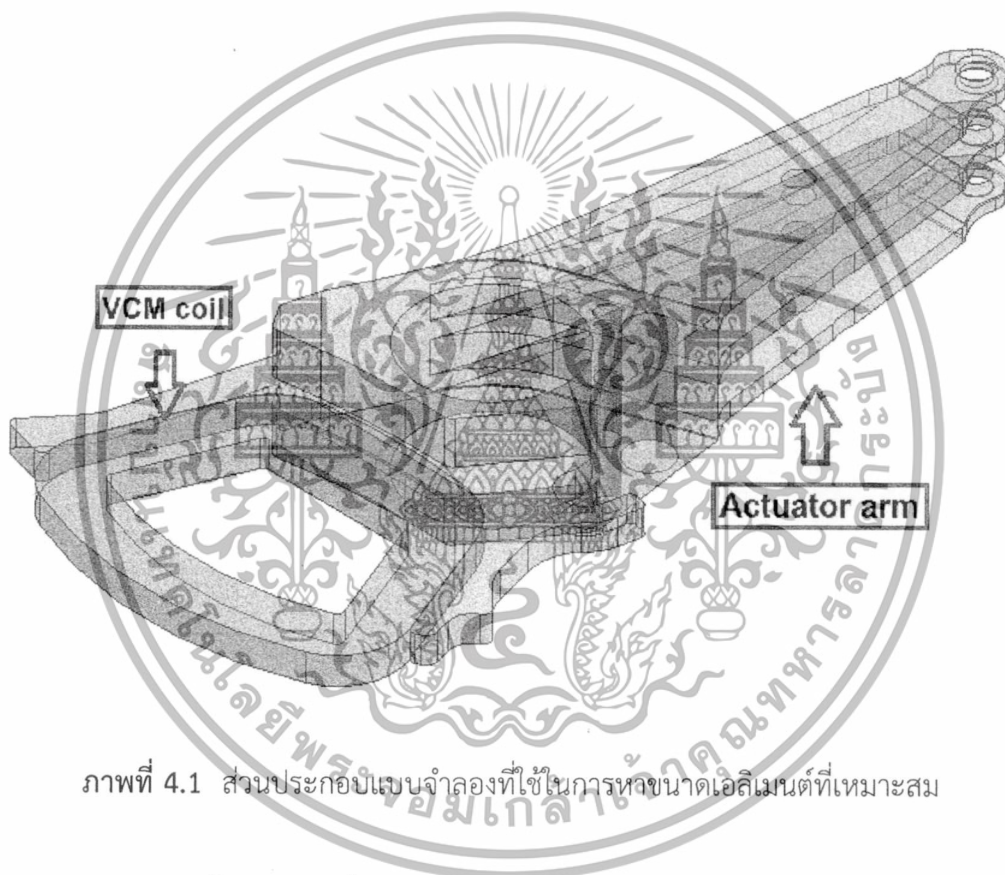
#### 4.1.5 การวัดค่าความถี่ธรรมชาติโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

การวัดค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ด้วยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ ทางผู้วิจัยได้รับผลการวัดค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนมาจากบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

## 4.2 การหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

### 4.2.1 แบบจำลอง

การหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมเป็นการหาความเหมาะสมเบื้องต้นเพื่อที่จะไปใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้จะมีเพียงส่วนของแอกซ์ชัวร์เอเตอร์และขดลวดเพียงเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.1 เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์

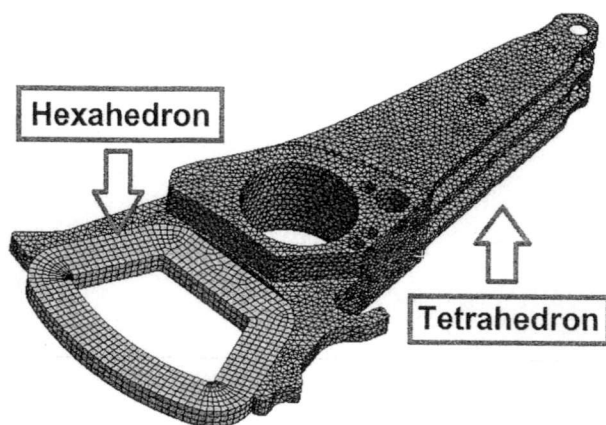


ภาพที่ 4.1 ส่วนประกอบแบบจำลองที่ใช้ในการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

### 4.2.2 การสร้างเอลิเมนต์

โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนในครั้งนี้คือ ANSYS Software โดยใช้สร้างเอลิเมนต์ของแอกซ์ชัวร์เอเตอร์และขดลวดเป็นชนิด Tetrahedron และ Hexahedron ดังที่แสดงในภาพที่ 4.2 ตามลำดับ โดยขนาดของเอลิเมนต์ของแอกซ์ชัวร์เอเตอร์จะถูกสร้างขึ้นที่ขนาดแตกต่างกันทั้งหมด 7 ขนาด คือ 3.0 2.5 2.0 1.5 1.0 0.8 และ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนเอลิเมนต์และโหนดต่าง ๆ กันดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 การแบ่งเอลิเมนต์และชนิดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง

Element size (mm)	Actuator arm		VCM coil	
	No. of elements	No. of nodes	No. of elements	No. of nodes
3.0	8,684	16,448	1,815	10,164
2.5	10,743	19,976	1,815	10,164
2.0	12,081	23,288	1,815	10,164
1.5	14,885	28,588	1,815	10,164
1.0	29,570	54,713	1,815	10,164
0.8	47,363	83,791	1,815	10,164
0.5	162,813	268,497	1,815	10,164

#### 4.2.3 การกำหนดสมบัติทางวัสดุ

การกำหนดสมบัติทางวัสดุต่าง ๆ เป็นส่วนที่สำคัญต่อการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของขดลวดและแอคชูเอเตอร์ซึ่งจะประกอบไปด้วย ความหนาแน่น (Density) ความเค้นวิกฤติ (Yield Strength) โมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) โมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's ratio) ดังในตารางที่ 4.2

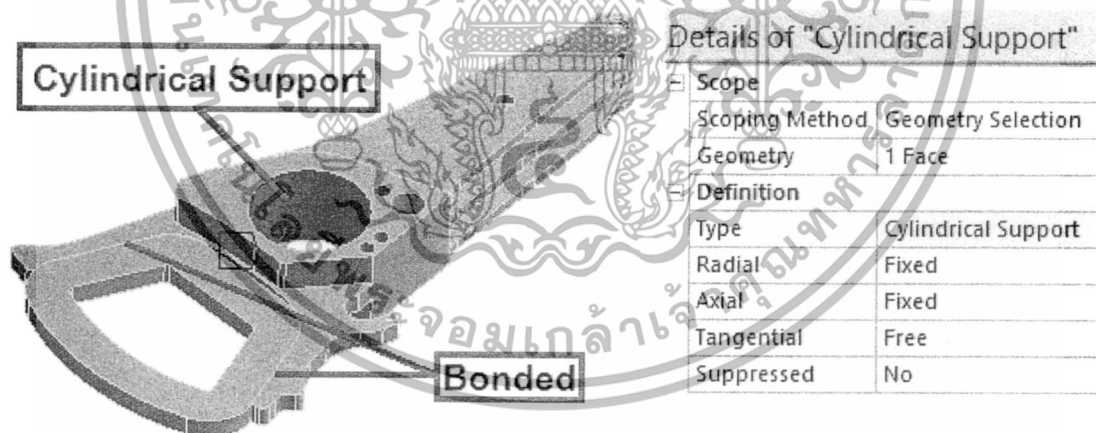
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางวัสดุในแต่ละชั้นส่วนของแบบจำลอง

Parts	Material	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Yield Strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio
Actuator arm	Aluminum	2,700	280	500	68.9	0.33
VCM coil	Copper	5,470	-	-	90	0.34

#### 4.2.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

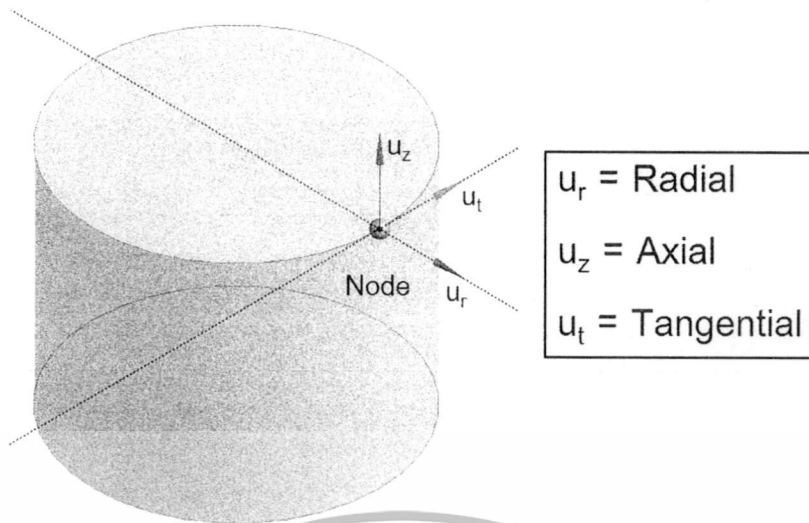
การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ คือการกำหนดความอิสระของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นโดยเราได้กำหนดการเชื่อมต่อของผิวสัมผัสระหว่างขดลวดและแอคชูเอเตอร์เป็นชนิด Bonded หมายถึงให้ผิวสัมผัสทั้งสองไม่สามารถแยกหรือเลื่อนไถลออกจากกันได้ และได้กำหนดความอิสระของผิวภายในรูของแอคชูเอเตอร์โดยใช้คำสั่ง Cylindrical Support ภายในโปรแกรม ANSYS โดยตั้งค่าให้ Radial และ Axial เป็น Fixed คือไม่ยินยอมให้มีการเคลื่อนที่หรือเลื่อนในทิศทางของรัศมีและแกนหมุน และตั้งค่าให้ Tangential เป็น Free คือยินยอมให้มีการเคลื่อนที่รอบแกนหมุนซึ่งถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

Cylindrical Support คือคำสั่งในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตภายในโปรแกรม ANSYS ซึ่งใช้สำหรับการกำหนดความอิสระของโหนดที่อยู่บนผิวข้างทรงกระบอก ภาพที่ 4.4 แสดงถึงการกำหนดความอิสระของโหนดบนพื้นที่ทรงกระบอก โดยการกำหนดความอิสระในทิศ  $u_r$ ,  $u_z$  และ  $u_t$  จะถูกกำหนดแทนด้วยคำสั่ง Radial Axial และ Tangential ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ลักษณะทิศทางการกำหนดความอิสระของจุดต่อ

#### 4.2.5 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยการวิเคราะห์โหมดผ่านทางโปรแกรม ANSYS เพื่อเปรียบเทียบหาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนได้อย่างเหมาะสม โดยจะเลือกพิจารณาเฉพาะค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนแบบ Butterfly mode ดังที่แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 1<sup>st</sup> Butterfly mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.6 เวลาในการคำนวณ

การตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการคำนวณเป็นอีกส่วนที่มีความสำคัญที่บ่งบอกประสิทธิภาพการนำไปใช้งานของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่า CPU times ซึ่งถูกแสดงไว้ในส่วน Solver Output ใน Solution Information ของโปรแกรม ANSYS ดังที่แสดงในภาพที่ 4.6 ซึ่งในแบบจำลอง A ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะประกอบไปด้วยส่วนการวิเคราะห์โมเดลและผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งจะมีค่า CPU Times ในแต่ละส่วนที่แตกต่างกัน

```

*-----*
|
|                                ANSYS RUN COMPLETED                                |
|-----|
|                                Release 15.0                                UP20131014                                WINDOWS x64                                |
|-----|
| Database Requested(-db) 512 MB Scratch Memory Requested 512 MB |
| Maximum Database Used 307 MB Maximum Scratch Memory Used 5624 MB |
|-----|
| CPU Time (sec) = 912.719 Time = 01:34:32 |
| Elapsed Time (sec) = 287.000 Date = 07/22/2014 |
|-----|

```

ภาพที่ 4.6 การแสดงค่า CPU Times

#### 4.3 การพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

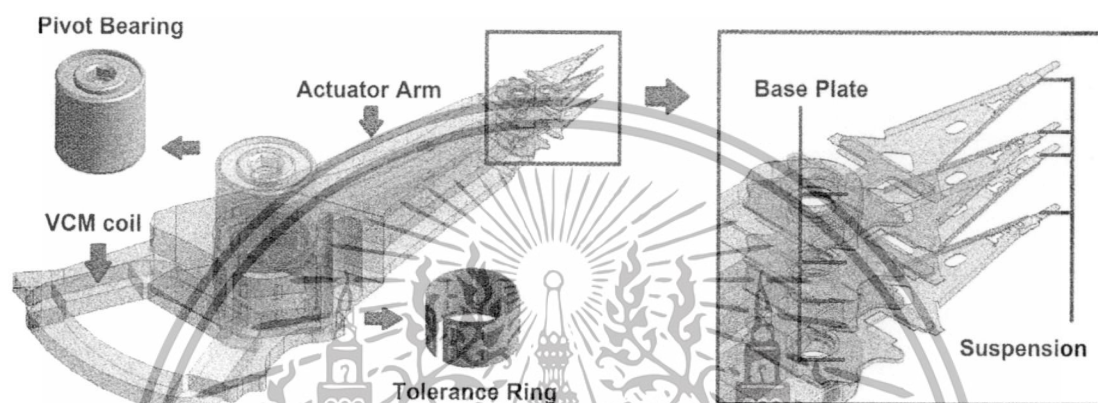
แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปวิเคราะห์การสั่นสะเทือน แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมจะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีความจำเป็นที่ควรได้รับศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนโดยคำนึงถึงการนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งได้พิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ คือ ความแม่นยำในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติ และระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลมาจากการใช้ค่าสมบัติทางวัสดุ และความสมบูรณ์ของแบบจำลอง โดยทางผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความแตกต่างกันขึ้นมา 3 ชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกัน คือ สมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์เป็นแบบไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิก และการติดตั้งชิ้นส่วนของไฟร้อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงในแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้จะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้พิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

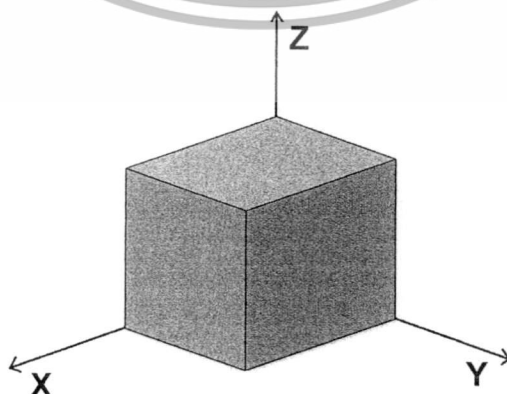
#### 4.3.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

การสร้างแบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ คือ แอคชูเอเตอร์ ไฟว็อทแบร์ริง โทเลอร์แรนซ์ริง ระบบรองรับ เบสเพลท (Base plate) และขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ ดังภาพที่ 4.7

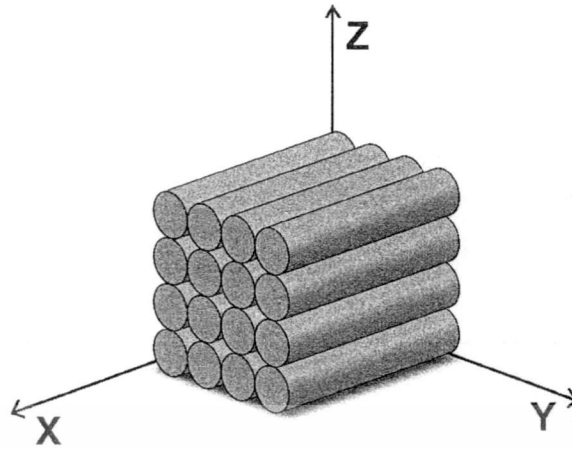


ภาพที่ 4.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแบบจำลองชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

การออกแบบแบบจำลองของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์จะถูกสร้างขึ้นมา 2 แบบ คือ แบบที่ใช้สมบัติทางวัสดุเป็น ไอโซโทรปิกและออร์โทโทรปิก เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ไม่ได้เป็นทรงตันดังที่แสดงในภาพที่ 4.8 แต่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.9 จึงมีความเป็นไปได้ว่าสมบัติวัสดุในแต่ละทิศทางของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์มีความแตกต่างกันออกไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โครงสร้างขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ของแบบจำลองที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ทางกายภาพ

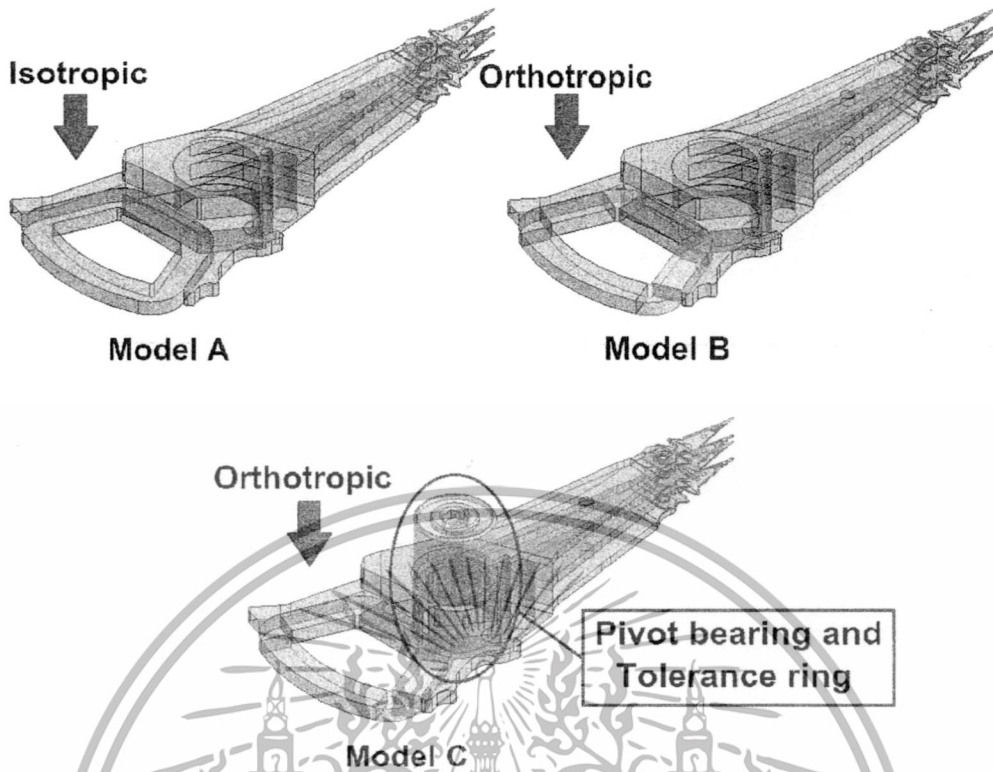
แบบจำลองขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์จะถูกแบ่งออกเป็น 8 ชั้นส่วน เพื่อใช้สำหรับการกำหนดสมบัติทางวัสดุแบบออร์โททรอปิกได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากในแต่ละชั้นส่วนจะมีการใช้ค่าสมบัติทางวัสดุแตกต่างกัน แต่สำหรับการกำหนดสมบัติวัสดุแบบไอโซทรอปิกจะไม่มีการตัดแบ่งชั้นส่วนของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แบบจำลองขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์สำหรับสมบัติทางวัสดุเป็นไอโซทรอปิกและออร์โททรอปิก

ในงานวิจัยนี้ จะทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนขึ้นมาทั้งหมด 3 แบบคือ A B และ C โดยแบบจำลอง A และ B จะใช้ค่าสมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่ต่างกันคือเป็น ไอโซทรอปิกและออร์โททรอปิก ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง C จะแตกต่างจากสองแบบแรกคือมีการติดตั้งโพลีเมอร์เรซินและไฟร้อทแบริงเข้ากับตัวแอกซ์วีเอเตอร์และใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นออร์โททรอปิกเหมือนในแบบจำลอง B ดังที่แสดงในภาพที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



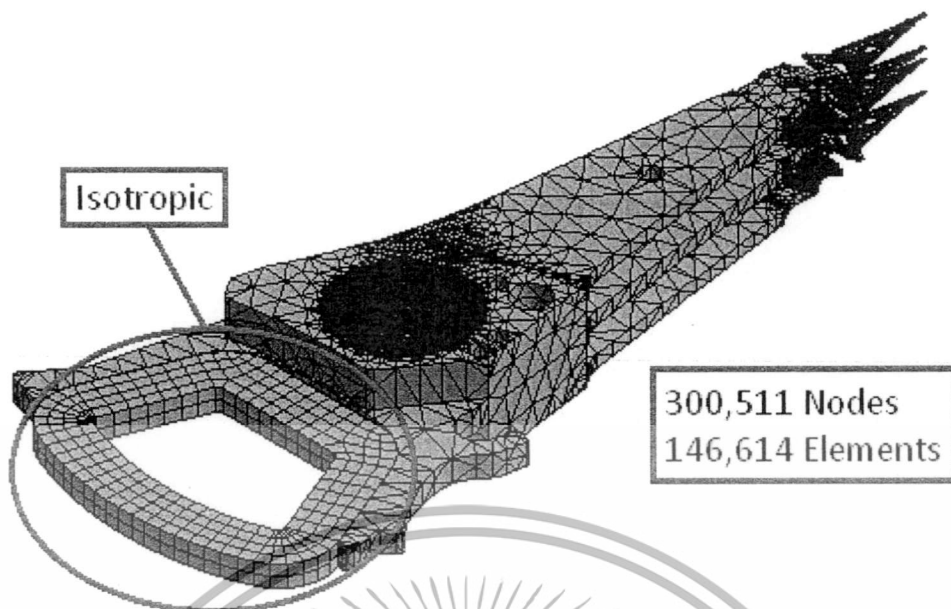
ภาพที่ 4.11 แบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่านเขียน A B และ C

#### 4.3.2 แบบจำลอง A

##### 4.3.2.1 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง A

แบบจำลอง A เป็นแบบจำลองที่มีการใช้สมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นชนิดไอโซโทรปิก โดยแบบจำลองจะถูกนำมาแบ่งรูปร่างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ซึ่งจะมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไป โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะเชื่อมต่อกันที่จุดต่อที่เรียกว่าโหนด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าตัวแปรของสมการ ซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้ง 3 นี้ จะได้จำนวนเอลิเมนต์และโหนดประมาณ 147,013 และ 283,101 ตามลำดับซึ่งการสร้างเอลิเมนต์สำหรับขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์จะใช้เป็นชนิด Hexahedron และชิ้นส่วนอื่น ๆ นอกจากนี้จะใช้เอลิเมนต์ชนิด Tetrahedron ดังที่แสดงในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง A

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง A

Parts	No. of elements	No. of nodes	Element type
Actuator arm	29,640	52,467	Tetrahedron
Suspension	99,211	206,853	Tetrahedron
Base plate	16,191	33,995	Tetrahedron
VCM coil	1,572	7,196	Hexahedron

#### 4.3.2.2 การกำหนดสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง A

ค่าสมบัติวัสดุที่จะกำหนดให้กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลอง A ประกอบไปด้วย ความหนาแน่น ความเค้นวิกฤติ โมดูลัสสัมผัส โมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวร์ซองจะถูกกำหนดลงในแบบจำลอง A ดังที่แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งค่าสมบัติวัสดุเหล่านี้ ทางผู้วิจัยได้รับมาจากอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.4 ค่าสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง A

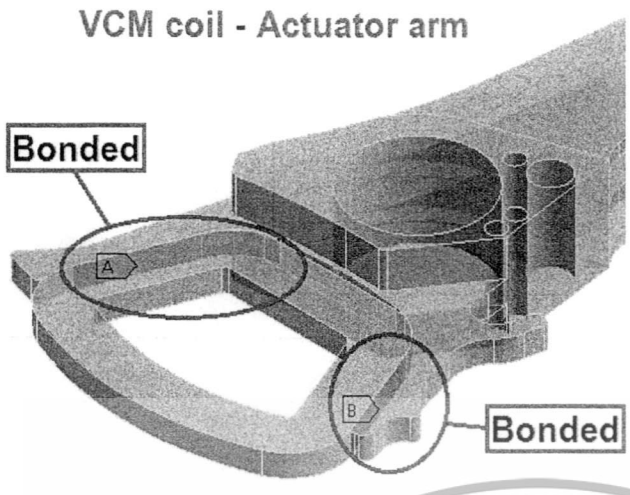
Parts	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio
Actuator arm	Aluminum	2,700	280	500	68.9	0.33
Suspension	Stainless steel	8,000	210	1800	195	0.29
Base plate	Stainless steel	7,830	210	1800	195	0.28
VCM coil (isotropic)	Copper	5,470	-	-	90	0.34

#### 4.3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง A

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต คือ การกำหนดความอิสระในแต่ละโหนดของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลอง A จะถูกกำหนดเงื่อนไขที่แตกต่างกันตามลักษณะ โดยคำนึงถึงความอิสระทางกายภาพจริงของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทางผู้วิจัยจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

ผิวสัมผัสของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกันในแบบจำลอง A จะถูกกำหนดให้เป็นชนิด Bonded และตั้งค่าให้ใช้ Formulation เป็น MPC (Multi Point Constrain) หมายถึง ไม่ยอมรื้อให้ผิวสัมผัสมีการเลื่อนไถลหรือแยกออกจากกัน โหนดที่อยู่บนผิวสัมผัสทั้งสองจะถูกบังคับให้ยึดติดกันไว้ตลอด ซึ่งค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปภายใต้แรงกระทำ (Stiffness) ของการสัมผัสจะไม่ถูกนำมาคำนวณ โดยบริเวณผิวสัมผัสและการตั้งค่าจะแสดงไว้ในภาพที่ 4.13 ถึงภาพที่ 4.16

ภาพที่ 4.13 แสดงถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์และแอกซ์วอร์-เอเตอร์โดยด้านข้างของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์จะมีการสัมผัสกับหางส่วนท้ายของแอกซ์วอร์-เอเตอร์ ซึ่งใช้การเชื่อมต่อของการสัมผัสเป็นชนิด Bonded

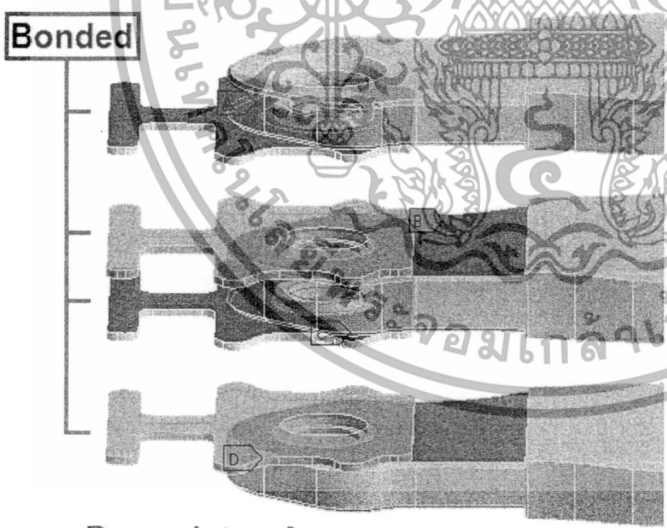


Details of "Bonded - coil corner 1 To Part5;"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Faces
Target	2 Faces
Contact Bodies	coil corner 1
Target Bodies	Part5;
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	MPC
Detection Method	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None

ภาพที่ 4.13 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง A

ภาพที่ 4.14 แสดงถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเบสเพลทและแอกชูเอเตอร์โดยมีผิวการสัมผัสเกิดขึ้นทั้งหมด 4 คู่ จากเบสเพลททั้ง 4 ชั้น เชื่อมต่อกับปลายแขนของแอกชูเอเตอร์ซึ่งใช้การเชื่อมต่อของการสัมผัสเป็นชนิด Bonded



Details of "Bonded - baseplate; To Part5;"

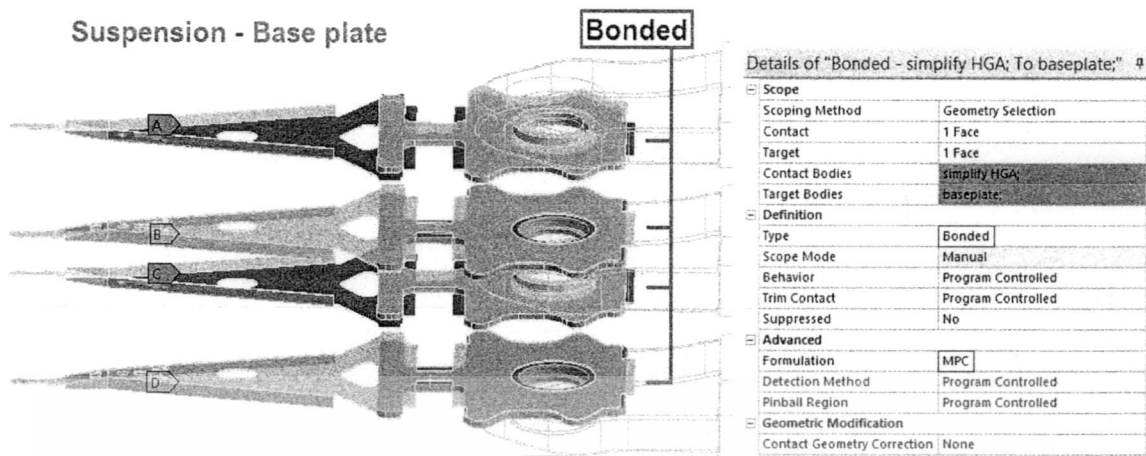
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	baseplate;
Target Bodies	Part5;
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	MPC
Detection Method	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None

Base plate - Actuator arm

ภาพที่ 4.14 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง A

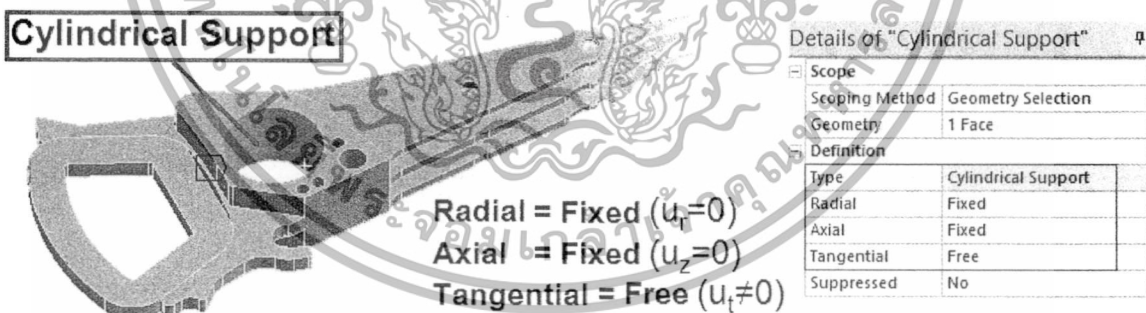
ภาพที่ 4.15 แสดงถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างระบบรองรับและเบสเพลทโดยมีผิวการสัมผัสเกิดขึ้นทั้งหมด 4 คู่ จากการเชื่อมต่อของระบบรองรับ 4 ชั้นเข้ากับเบสเพลท 4 ชั้น ซึ่งใช้การเชื่อมต่อของการสัมผัสเป็นชนิด Bonded

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง A

ภาพที่ 4.16 แสดงถึงบริเวณพื้นที่ผิวที่มีการใช้คำสั่ง Cylindrical Support ช่วยกำหนดความอิสระของโหนดต่าง ๆ บนผิวนั้น ซึ่งตั้งค่าให้ Radial และ Axial เป็น Fixed และ Tangential เป็น Free ซึ่งการตั้งค่านี้น่าหมายถึงมีการยินยอมให้เหนดบนพื้นที่ผิวที่กำหนดเคลื่อนรอบแกนหมุนได้อย่างอิสระแต่ไม่ยินยอมให้มีการเคลื่อนที่ตามทิศทางรัศมีและเคลื่อนที่ตามแนวแกนของแกนหมุน



ภาพที่ 4.16 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง A

#### 4.3.2.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบบจำลอง A

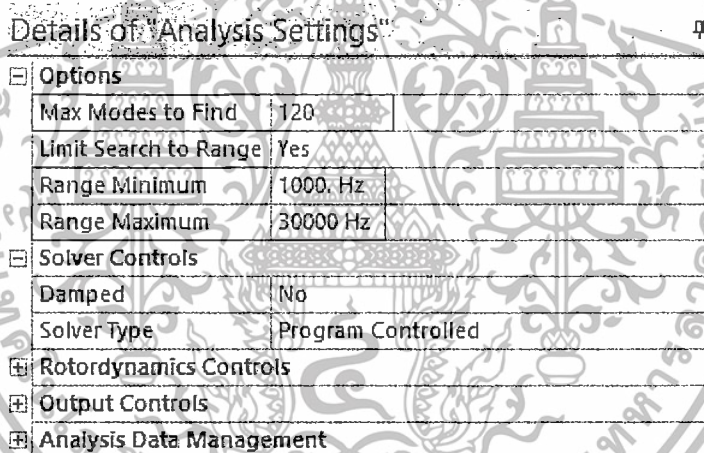
การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบบจำลอง A จะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์โมดัลและผลตอบสนองเชิงความถี่ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์โดยรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ผู้วิจัยเลือกมาศึกษาคือ Coil 1<sup>st</sup> Torsion HSA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1<sup>st</sup> Butterfly Arm Torsion Arm Sway Base plate Torsion Suspension Sway และ Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion

### 1 การวิเคราะห์โหมดัล

การหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการวิเคราะห์โหมดัลผู้วิจัยได้ศึกษาโดยใช้คำสั่ง Modal ของโปรแกรม ANSYS โดยรูปแบบการสั่นสะเทือนที่เลือกศึกษา คือ Coil 1<sup>st</sup> Torsion HSA 1<sup>st</sup> Butterfly Arm Torsion Arm Sway Base plate Torsion Suspension Sway และ Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion ดังที่ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.18 ถึง 4.24 ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 1,000 ถึง 30,000 เฮิรตซ์ ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากเครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์โดยการตั้งค่าและลักษณะรูปแบบการสั่นสะเทือนจะถูกแสดงดังต่อไปนี้

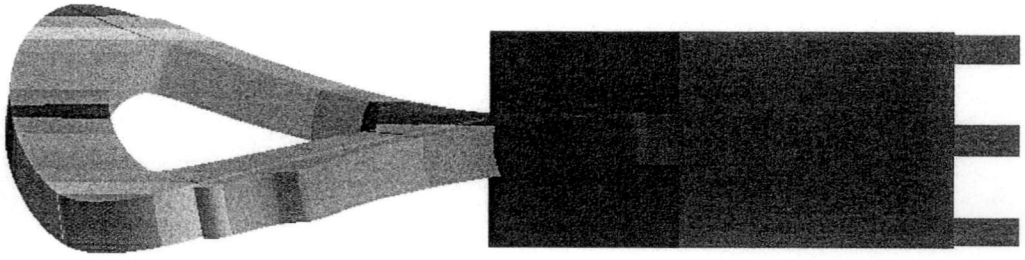
ภาพที่ 4.17 แสดงวิธีการตั้งค่าใน Analysis Settings ของการวิเคราะห์โหมดัลบนโปรแกรม ANSYS โดยกำหนดช่วงความถี่และจำนวนรูปแบบการสั่นสะเทือนเป็น 120 รูปแบบ



Details of "Analysis Settings"	
Options	
Max Modes to Find	120
Limit Search to Range	Yes
Range Minimum	1000. Hz
Range Maximum	30000 Hz
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

ภาพที่ 4.17 การตั้งค่าของการวิเคราะห์โหมดัล

ภาพที่ 4.18 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Coil 1<sup>st</sup> Torsion คือ การที่ขดลวดมอเตอร์ วอยซ์คอยล์เกิดการบิดงอในลักษณะมุมส่วนท้ายจะมีการเสียรูปในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้จะส่งผลให้แรงบิดที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกับขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เกิดความไม่เสถียร เป็นผลให้เกิดความยากลำบากในการควบคุมหัวอ่านและเขียนข้อมูลไปยังตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพที่ 4.18 Coil 1<sup>st</sup> Torsion mode

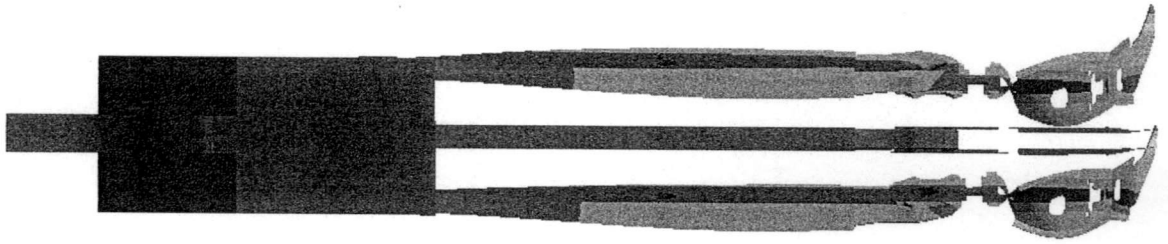
ภาพที่ 4.19 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด HSA 1<sup>st</sup> Butterfly คือ การที่ส่วนหัวและหางของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนเกิดการเสียรูปไปในทิศทางเดียวกันคล้ายกับการกระพือของปีกผีเสื้อ ซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้ จะส่งผลให้แรงบิดที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ส่วนท้ายไม่เสถียรเพราะเกิดการเสียรูป และตำแหน่งของหัวอ่านและเขียน ข้อมูลที่ส่วนปลายคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม เป็นผลให้เกิดความยากลำบากในการควบคุมหัวเขียนและอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 4.19 HSA 1<sup>st</sup> Butterfly mode

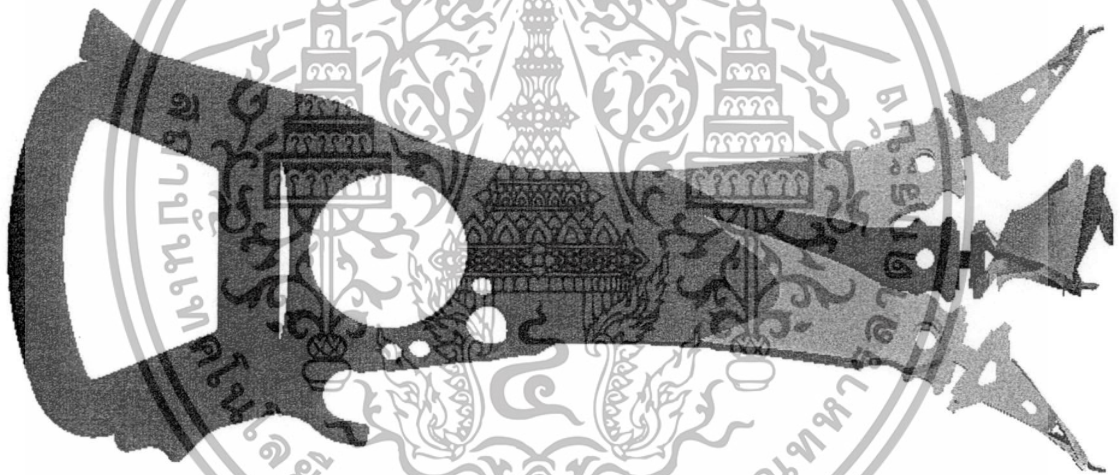
ภาพที่ 4.20 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Arm Torsion คือการที่แขนของแอกซ์ฮวีเอเตอร์เกิดการบิดงอ ซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้จะส่งผลให้ระบบรองรับที่ยึดติดกับส่วนปลายของแขนแอกซ์ฮวีเอเตอร์เกิดการบิดงอตามไปด้วยเป็นสาเหตุให้ตำแหน่งของหัวอ่านและเขียนข้อมูลคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 Arm Torsion mode

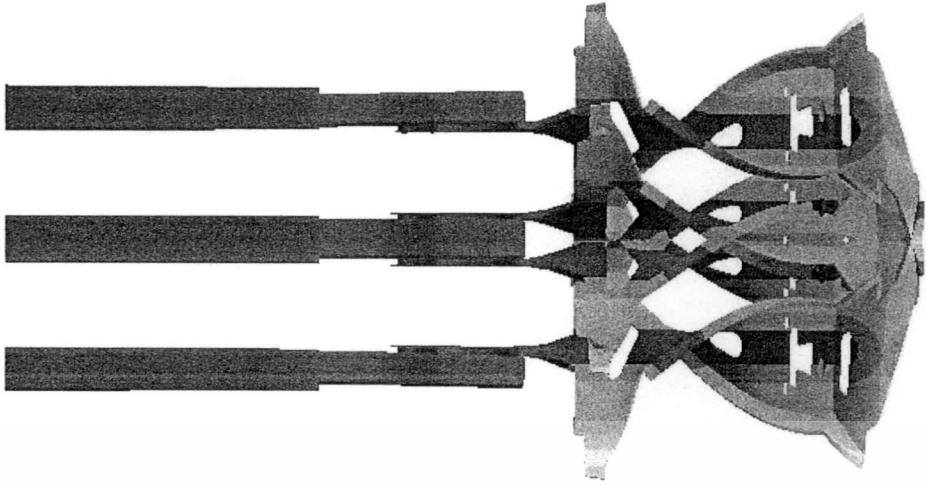
ภาพที่ 4.21 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Arm Sway คือ การที่แขนของแอดซัวร์-เอเตอร์เกิดการโค้งงอในลักษณะขนาดไปกับทิศทางการหมุนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้จะส่งผลให้ระบบรองรับที่ยึดติดกับส่วนปลายของแขนแอดซัวร์เอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ตามไปด้วยเป็นสาเหตุให้ตำแหน่งของหัวอ่านและเขียนข้อมูลคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพที่ 4.21 Arm Sway mode

ภาพที่ 4.22 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Base plate Torsion คือ การที่เบสเพลทเกิดการบิดงอซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้ จะส่งผลให้ระบบรองรับที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกันเกิดการบิดงอตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้หัวอ่านและเขียนข้อมูลที่อยู่ส่วนปลายของระบบรองรับบิดงอจนตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 Base plate Torsion

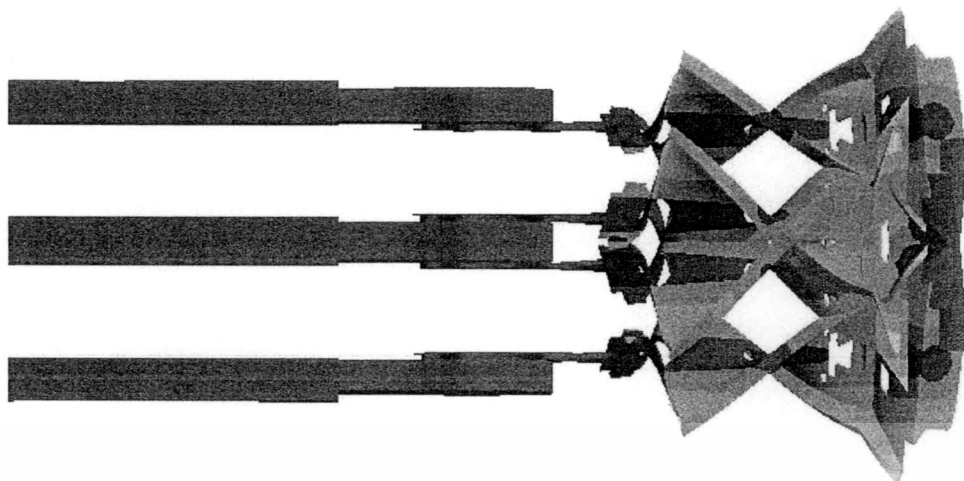
ภาพที่ 4.23 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Suspension Sway คือ การที่ระบบรองรับเกิดการโค้งงอในลักษณะขนาดไปกับทิศทางการหมุนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้จะส่งผลให้หัวอ่านและเขียนข้อมูลที่ยึดติดกับส่วนปลายเกิดการเคลื่อนที่ตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้ตำแหน่งของหัวอ่านและเขียนข้อมูลคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพที่ 4.23 Suspension sway

ภาพที่ 4.24 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion คือ การที่ระบบรองรับเกิดการบิดงอในลักษณะด้านข้างทั้งสองฝั่งเสียรูปไปในทิศทางตรงกันข้ามและบิดตัวกลับไปกลับมาสามครั้ง ซึ่งการสั่นสะเทือนในรูปแบบนี้ จะส่งผลให้หัวอ่านและเขียนข้อมูลที่ถูกยึดติดที่ส่วนปลายเกิดการบิดงอตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้ตำแหน่งที่ต้องการอ่านและเขียนข้อมูลคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

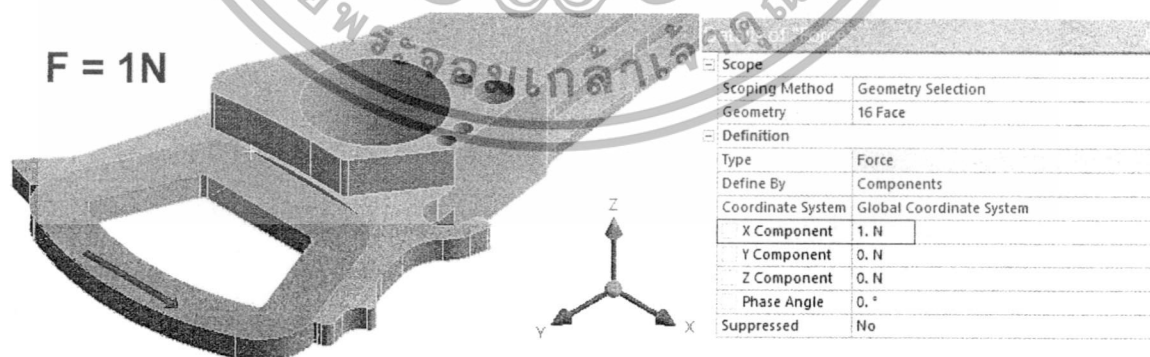


ภาพที่ 4.24 Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion

## 2 ผลตอบสนองเชิงความถี่

การหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง A ทางผู้วิจัยได้ใช้การวิเคราะห์ผ่านทางฟังก์ชัน Harmonic Response จากโปรแกรม ANSYS ซึ่งในการวิเคราะห์ที่ได้ใส่แรงกระตุ้นขนาด 1 นิวตันไปที่ส่วนของขดลวดมอเตอร์ร้อยช่อโดยเริ่มกระตุ้นที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์แล้วเพิ่มทีละ 50 เฮิร์ตซ์จนไปหยุดที่ 30,000 เฮิร์ตซ์โดยมีการเลือกวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ที่ส่วนต่าง ๆ ของชุดประกอบหัวอกัน-เขียน ซึ่งการตั้งค่าการวิเคราะห์และบริเวณที่เลือกวิเคราะห์จะแสดงในภาพที่ 4.25 ถึง 4.27

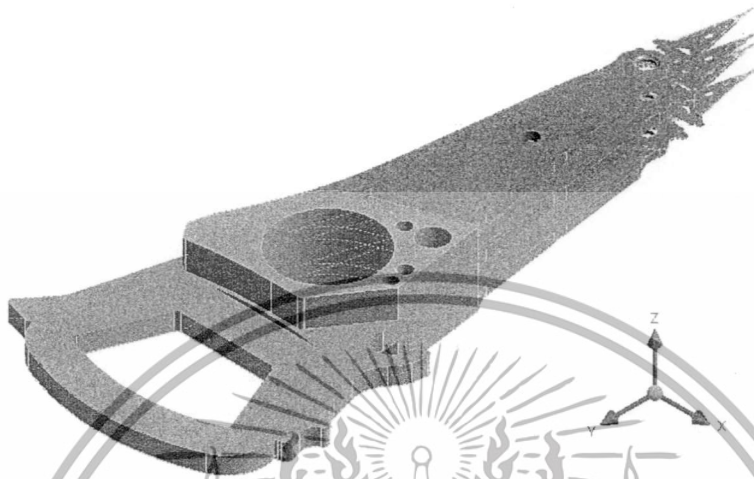
ภาพที่ 4.25 แสดงการตั้งค่าบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างของขดลวดมอเตอร์ร้อยช่อคอลลี่ที่มีการกำหนดขนาดและทิศทางของแรงที่ใช้กระตุ้นผ่านโปรแกรม ANSYS



ภาพที่ 4.25 ผิวของขดลวดมอเตอร์ร้อยช่อคอลลี่ที่มีการใส่แรงกระตุ้นและการตั้งค่าแรง

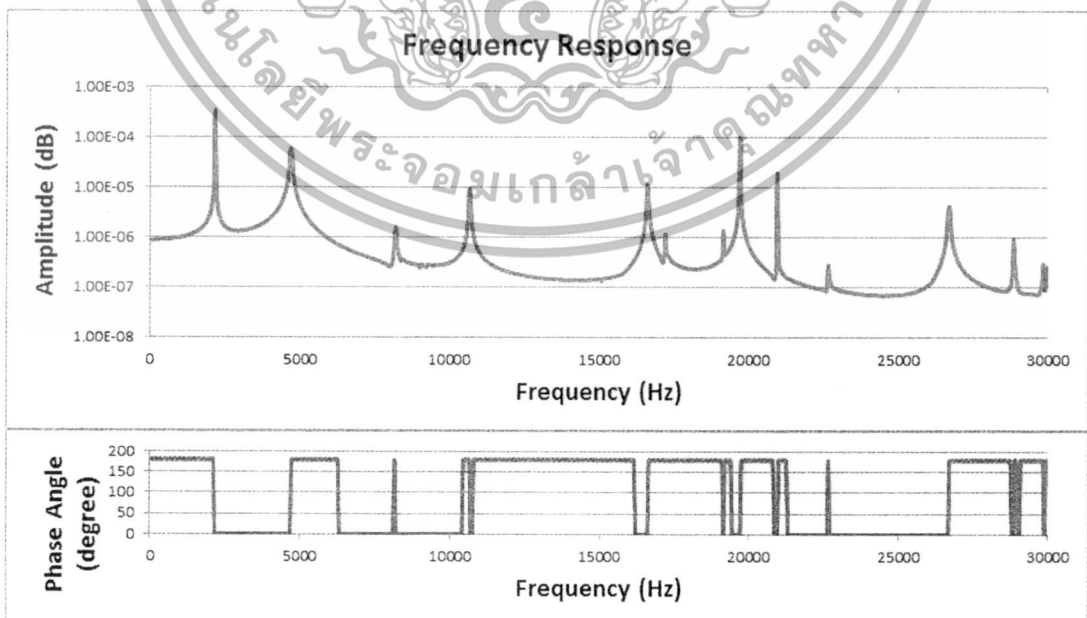
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดบริเวณพื้นผิวที่ต้องการทราบผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกผิวด้านบนและด้านล่างของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ แอคซัวร์เอเตอร์ เบสเพลทและระบบรองรับ ซึ่งถูกแสดงไว้ในพื้นที่สีเขียวดังในภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 บริเวณทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่

ภาพที่ 4.27 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งจะประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงในการสั่นสะท้อนต่อความถี่ในการกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟส (Phase Shift) ต่อความถี่ในการกระตุ้น



ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของชุดประกอบหัวอ่านเขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น แม้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.5 การตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง A

การตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง A จะประกอบไปด้วยส่วนการวิเคราะห์โมดัลและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งวิธีการหาเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งสองส่วนนี้จะพิจารณาจากค่า CPU Time ซึ่งวิธีการหาได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.6

### 4.3.3 แบบจำลอง B

#### 4.3.3.1 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง B

การสร้างเอลิเมนต์ในแบบจำลอง B มีการสร้างเหมือนในแบบจำลอง A ทุกประการ ทั้งจำนวนเอลิเมนต์และโหนดดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.2.1 ซึ่งการสร้างเอลิเมนต์จะมีความแตกต่างจากแบบจำลอง A ในส่วนของชิ้นส่วนขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ที่มีการใช้แบบจำลองที่มีการตัดแบ่งแบบจำลองเป็น 8 ชิ้นส่วนเพื่อรองรับการกำหนดค่าทางวัสดุเป็นชนิดออร์โธทรอปิกดังที่แสดงในภาพที่ 4.28

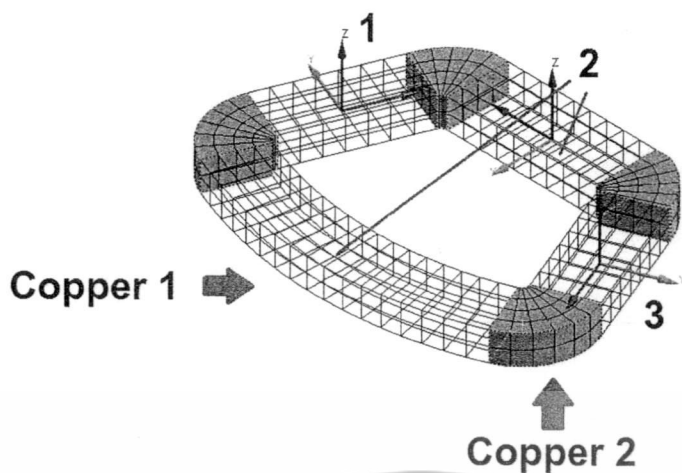


ภาพที่ 4.28 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง B

#### 4.3.3.2 การกำหนดสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง B

การกำหนดค่าสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง B จะถูกกำหนดเหมือนในแบบจำลอง A ทุกประการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2.2 เพียงแต่มีความแตกต่างในการกำหนดค่าทางวัสดุเฉพาะในชิ้นส่วนขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ ซึ่งใช้เป็นชนิดออร์โธทรอปิก ซึ่งการกำหนดค่าสมบัติทางวัสดุชนิดออร์โธทรอปิกในขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ของแบบจำลอง B จะประกอบไปด้วย ความหนาแน่น โมดูลัสความยืดหยุ่น โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) และอัตราส่วนปัวร์ซองที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง ซึ่งจะถูกกำหนดค่าลงในแบบจำลองของขดลวดมอเตอร์ร้อยซ์คอยล์ที่ถูกแบ่งออกเป็น 8 ชิ้นส่วนดังที่แสดงในภาพที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 ตำแหน่งการกำหนดสมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์

ค่าสมบัติวัสดุแบบอורתโรติกของแบบจำลองขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์จะถูกกำหนดลงในส่วนทั้ง 8 ชิ้น โดยค่าสมบัติวัสดุ Copper 2 จะถูกกำหนดลงในชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมที่อยู่มุมต่าง ๆ ของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ทั้งหมด 4 ชิ้นโดยขึ้นกับระบบโคออดิเนต (Coordinates System) หมายเลข 2 และค่าสมบัติวัสดุ Copper 1 จะถูกกำหนดลงในชิ้นส่วนที่เป็นโครงตาข่าย (wireframe) ที่อยู่ระหว่างชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมโดยขึ้นกับระบบโคออดิเนตต่าง ๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.29 โดยค่าสมบัติวัสดุของ Copper 1 และ Copper 2 จะถูกแสดงในตารางที่ 4.5

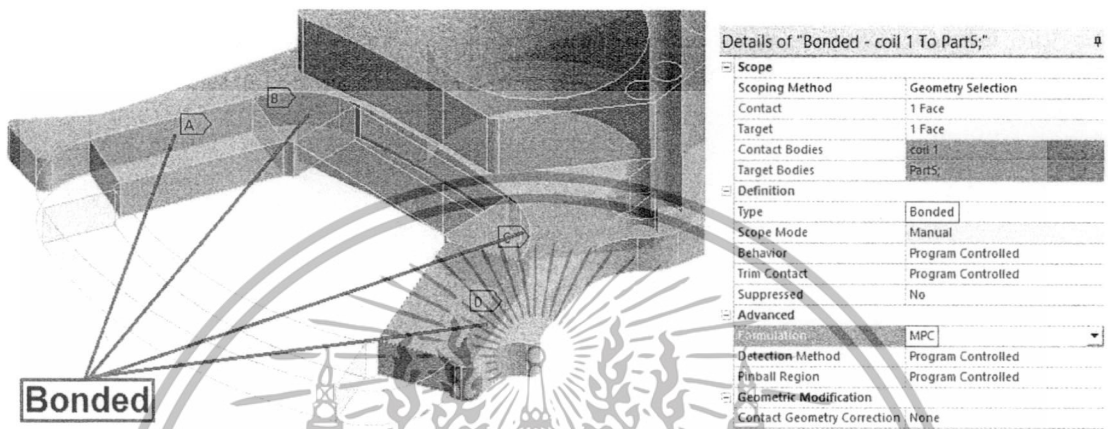
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์

Parts	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus (GPa)			Shear Modulus (GPa)			Poisson's ratio		
			$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$
VCM coil orthotropic	Copper1	5,470	46.6	59	59	2.87	14.6	2.87	0.3	0.3	0.3
	Copper2	5,470	30	39.8	39.8	3.85	10	3.85	0.3	0.3	0.3

#### 4.3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง B

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง B จะมีการกำหนดจะมีการกำหนดเหมือนกับในแบบจำลอง A ทุกประการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2.3 ยกเว้นแต่บริเวณผิวสัมผัสของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ ที่ถูกแบ่งออกเป็น 8 ชิ้นส่วน โดยภาพที่ 4.30 แสดงถึงบริเวณผิวสัมผัสของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์กับแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีชิ้นส่วนขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เพียง 4 ชิ้นที่สัมผัสกับแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ซึ่งกำหนดให้การเชื่อมต่อเป็นชนิด Bonded และตั้งค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Formulation เป็นชนิด MPC นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ามีผิวสัมผัสของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ด้วยกันที่เกิดจากการตัดแบ่งออกเป็น 8 ชิ้นส่วน ผิวสัมผัสเหล่านี้จะไม่ตั้งกำหนดการเชื่อมต่อใด ๆ เนื่องจากทางผู้วิจัยได้สร้างกลุ่มของชิ้นส่วนทั้ง 8 ชิ้น ให้รวมเป็นกลุ่มเดียว ดังนั้นชิ้นส่วนทั้ง 8 ชิ้นจะแสดงพฤติกรรมเปรียบเสมือนเป็นชิ้นส่วนอันเดียวกันเพียงแต่สามารถแยกบริเวณการกำหนดค่าสมบัติวัสดุและเงื่อนไขขอบได้



ภาพที่ 4.30 การกำหนดผิวสัมผัสระหว่างแอคซัวร์มอเตอร์และขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่ใช้วัสดุเป็นออร์โธโทรอปิก

#### 4.3.3.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบบจำลอง B

ขั้นตอนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบบจะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์โมดัลและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่โดยจะมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนแบบจำลอง A ทุกประการดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.2.4

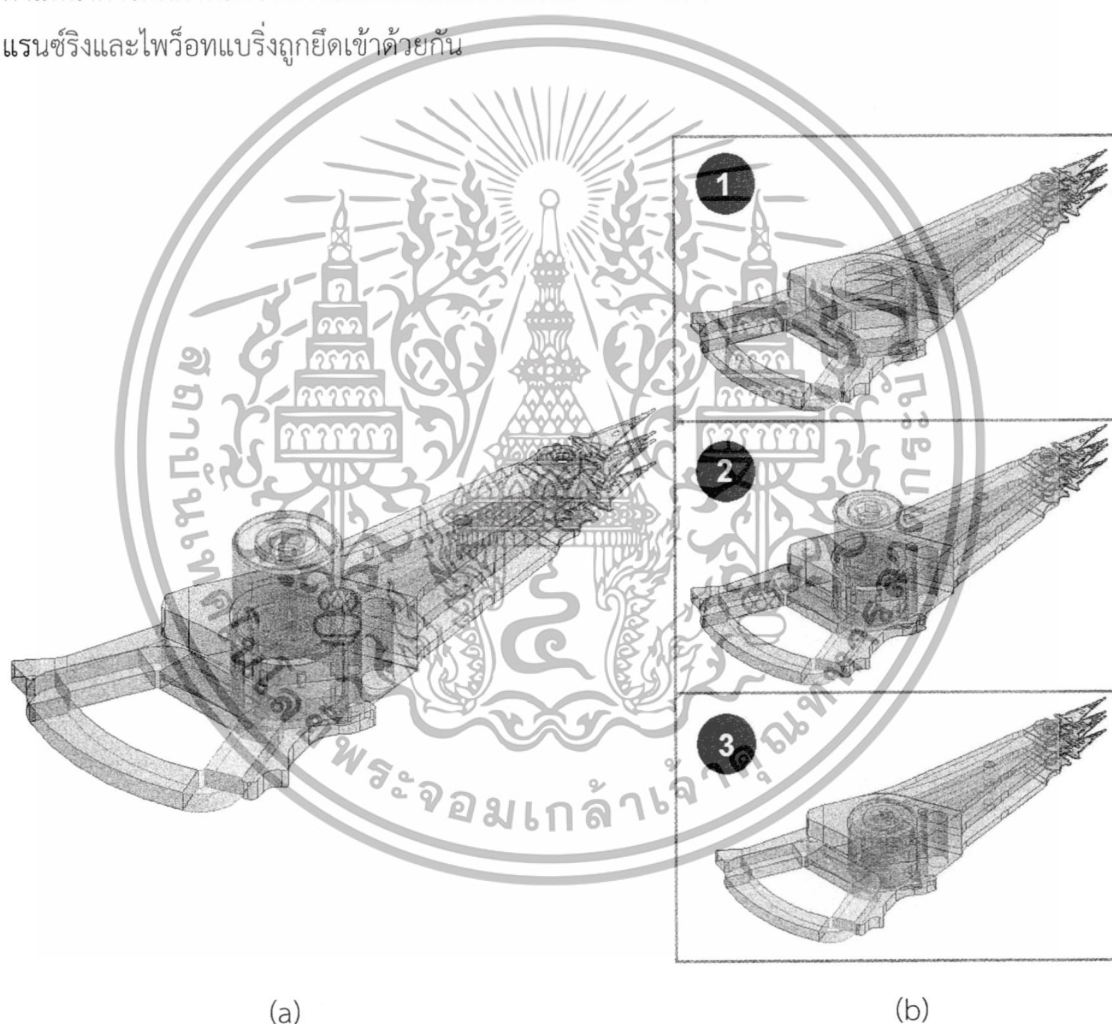
#### 4.3.3.5 การตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง B

ขั้นตอนการตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง B จะประกอบไปด้วยส่วนของ การวิเคราะห์โมดัลและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งขั้นตอนในการตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.6

#### 4.3.4 แบบจำลอง C

แบบจำลอง C จะมีความแตกต่างจากแบบจำลองอื่นๆในส่วนที่มีการติดตั้งไฟวอทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงบนแอคซัวร์มอเตอร์เพิ่มเข้ามา การติดตั้งจะทำให้เกิดแรงอัดขึ้นที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน โดยผู้วิจัยได้ใช้การวิเคราะห์การติดตั้งด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านฟังก์ชัน Static Structural ของโปรแกรม ANSYS ซึ่งตำแหน่งการวางตัวและขั้นตอนการติดตั้งของโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟวอทแบริงจะถูกแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ณาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังภาพที่ 4.31 ซ้ายและขวาตามลำดับ โดยภาพที่ 4.31 ซ้ายแสดงตำแหน่งการวางตัวของโทเลอร์ แรนซ์ริงและไฟว็อตแบร์ริงในแบบจำลอง C โดยโทเลอร์แรนซ์ริงจะถูกวางไว้ในรูของแอกซ์ฮับ-เอเตอร์ และไฟว็อตแบร์ริงจะลอยอยู่ด้านบนกึ่งกลางของรูแอกซ์ฮับเอเตอร์โดยไม่มีการสัมผัสกับชิ้นส่วนใด ๆ ภาพที่ 4.31 ขวาแสดงลำดับขั้นตอนการติดตั้งไฟว็อตแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงโดยภาพหมายเลข 1 แสดงการวางตัวของชิ้นส่วนต่าง ๆ ก่อนที่จะถูกติดตั้งซึ่งจะถูกยึดไว้อยู่กับที่ด้วยคำสั่ง Cylindrical Support ไม่ให้เลื่อนตามแนวแกนหมุน ภาพหมายเลข 2 แสดงการวางตัวของไฟว็อตแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง โดยโทเลอร์แรนซ์ริงจะถูกวางลงในรูของแอกซ์ฮับเอเตอร์และถูกยึดไว้ด้วยคำสั่ง Cylindrical Support เช่นกันเพื่อไม่ให้เลื่อนตามแนวแกนหมุน และภาพหมายเลข 3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหลังจากการกดไฟว็อตแบร์ริงลงในโทเลอร์แรนซ์ริง เพื่อให้แอกซ์ฮับเอเตอร์ โทเลอร์แรนซ์ริงและไฟว็อตแบร์ริงถูกยึดเข้าด้วยกัน

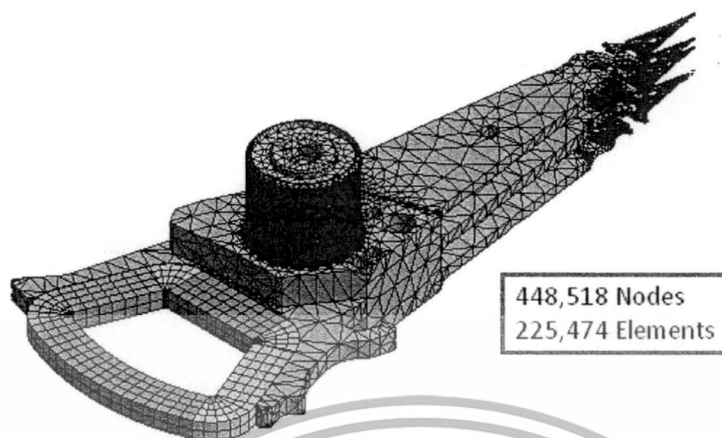


ภาพที่ 4.31 ตำแหน่งการวางตัว (a) และขั้นตอนการติดตั้ง (b) ของแอกซ์ฮับเอเตอร์ โทเลอร์แรนซ์ริงและไฟว็อตแบร์ริง

#### 4.3.4.1 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง C

การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง C มีขั้นตอนเหมือนในแบบจำลอง B ดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.3.3.1 เพียงแต่จะมีการสร้างเอลิเมนต์ของชิ้นส่วนโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟว็อตแบร์ริงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มเข้ามาเพื่อทำการติดตั้งเข้าไปด้วยโดยจำนวนเอลิเมนต์และโหนดจนถึงชนิดจะถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.32 และตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.32 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง C

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง C

Parts	No. of elements	No. of nodes	Element type
Pivot bearing	45,484	89,998	Tetrahedron
Tolerance ring	33,376	58,009	Tetrahedron

#### 4.3.4.2 การกำหนดสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง C

การกำหนดค่าสมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง C จะเหมือนในแบบจำลอง B ทุกประการดังที่แสดงในหัวข้อ 4.3.3.2 แต่จะมีการเพิ่มการกำหนดสมบัติวัสดุของไฟร็อกแบบรีงและโทเลอร์แรนซ์ริงเพิ่มเข้ามาซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าความหนาแน่น ความเค้นวิกฤติ โมดูลัสสัมผัส โมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวร์ซอง ดังที่แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางวัสดุของแบบจำลอง C

Parts	Material	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Yield strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio
Pivot bearing	Stainless steel	8,000	210	1800	193	0.25
Tolerance ring	Stainless steel	7,880	210	1800	193	0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C

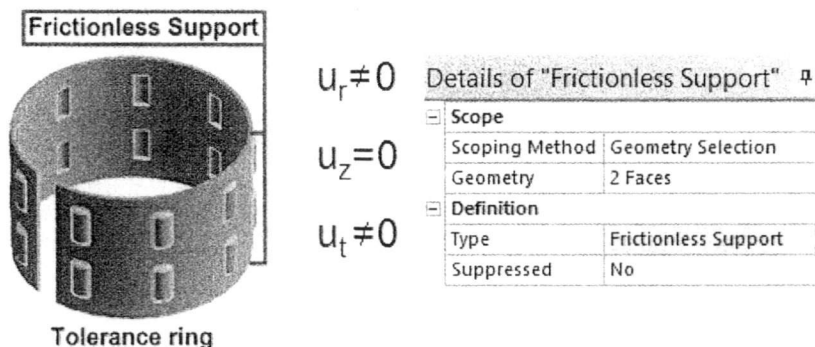
การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลอง B เป็นอย่างมาก ดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.3.3.3 เพียงแต่ในแบบจำลอง C จะต้องมีการเพิ่มเงื่อนไขขอบเขตจากผิวสัมผัสที่เกิดจากการติดตั้งไพรอทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงบนแอกซ์วิร์เอเตอร์เพิ่มขึ้นมา ซึ่งทางผู้วิจัยจะกล่าวแต่เพียงการตั้งเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างจากแบบจำลอง B ดังที่ได้แสดงไว้ภาพที่ 4.33 ถึง 4.37

ภาพที่ 4.33 แสดงถึงบริเวณพื้นที่ผิวที่มีการใช้คำสั่ง Cylindrical Support ช่วยกำหนดความอิสระของโหนดต่าง ๆ บนผิวที่กำหนด ซึ่งตั้งค่าให้ Radial และ Tangential เป็น Free และ Axial เป็น Fixed ซึ่งการตั้งค่านี้นี้ หมายถึง ไม่มีการยินยอมให้โหนดบนพื้นที่ผิวที่กำหนดเคลื่อนที่ตามแนวแกนหมุนแต่สามารถเคลื่อนที่ในทิศของรัศมีและอื่น ๆ ได้อิสระ



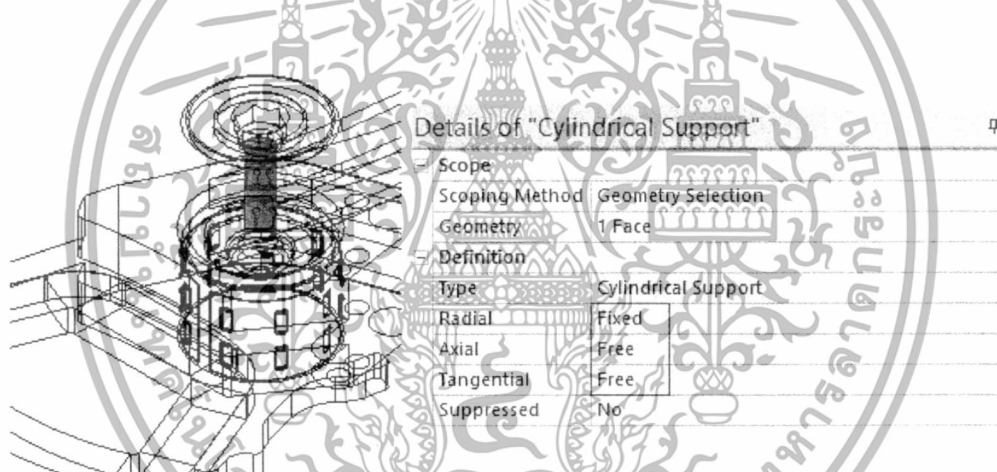
ภาพที่ 4.33 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C

ภาพที่ 4.34 แสดงถึงบริเวณพื้นที่ผิวส่วนบนและส่วนล่างของ Tolerance ring ที่มีการใช้คำสั่ง Frictionless Support ช่วยกำหนดความอิสระของโหนดต่าง ๆ บนผิวที่กำหนด ซึ่งโหนดต่าง ๆ บนผิวที่กำหนดจะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระบนระนาบของผิวที่เลือกแต่เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.34 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C

ภาพที่ 4.35 แสดงบริเวณผิวที่มีการกำหนดความอิสระของโหนดบนผิวนั้นโดยใช้ Cylindrical Support โดยกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางของ Radial แต่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในทิศทาง Axial และ Tangential

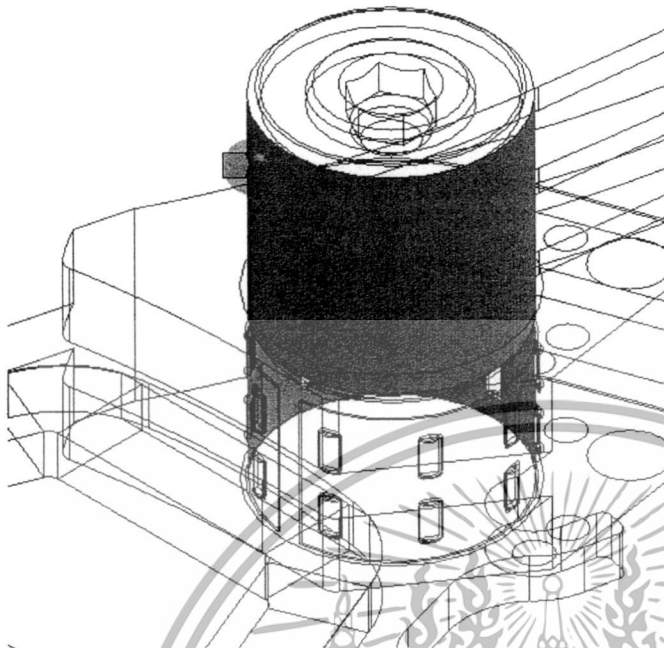


ภาพที่ 4.35 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง C

ภาพที่ 4.36 แสดงถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวด้านในของไพร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงซึ่งจะถูกตั้งค่าให้เป็น Frictional คือ ผิวสัมผัสระหว่างทั้งสองมีแรงเสียดทานกันโดยมีการตั้งค่ารายละเอียดหลัก ๆ คือ กำหนดค่า Friction Coefficient เป็น 0.2 ใช้ Formulation เป็น Augmented Lagrange ใช้ Normal Stiffness Factor เป็น 0.01 ใช้ Update Stiffness เป็น Each Iteration และใช้ Interface Treatment เป็น Adjust to Touch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Pivot bearing - Tolerance ring



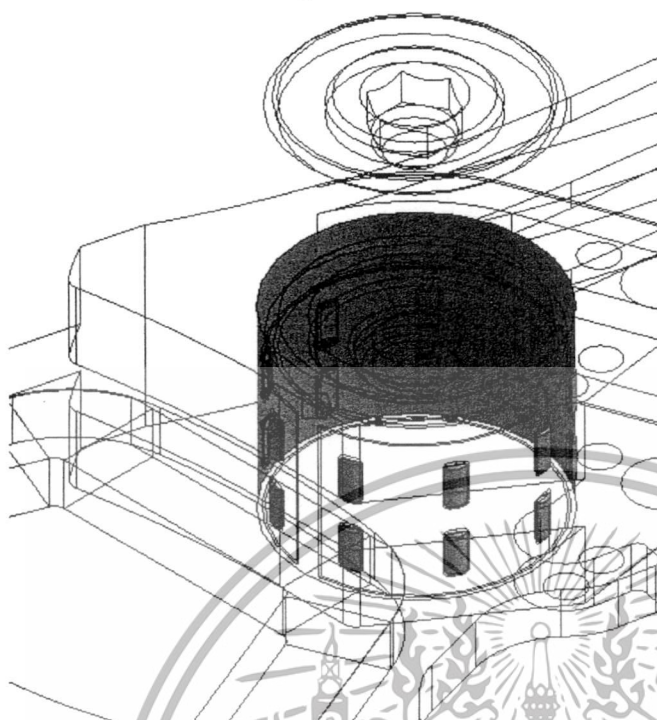
Details of Contact Region	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	pivot bearing
Target Bodies	T-ring
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0.2
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Manual
Normal Stiffness Factor	1.e-002
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	4.e-002 in
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Contact Geometry Correction	None

ภาพที่ 4.36 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง ©

ภาพที่ 3.37 แสดงถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโพลีเอทรีนซิ่งและแอกซ์วีเอเตอร์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าส่วนที่สัมผัสกันคือผิวด้านนอกของส่วนหมุนบนโพลีเอทรีนซิ่งกับผิวด้านในของแอกซ์วีเอเตอร์และจะถูกตั้งค่าการสัมผัสเป็น Frictional คือมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสของผิวทั้งสอง โดยมีการตั้งค่ารายละเอียดหลักๆคือ กำหนดค่า Friction Coefficient เป็น 0.2 ใช้ Formulation เป็น Augmented Lagrange ใช้ Normal Stiffness Factor เป็น 0.01 ใช้ Update Stiffness เป็น Each iteration และใช้ Interface Treatment เป็น Add Offset, Ramped Effects

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Tolerance ring - Actuator arm



Details of Frictional Contact	
Scoping Method	Named Selection
Contact	bumb
Target	inner_HSA
Contact Bodies	T-ring
Target Bodies	Part5
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0.2
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Manual
Normal Stiffness Factor	1.e-002
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	1.e-002 in
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, Ramped Effects
Offset	0. in
Contact Geometry Correction	None

ภาพที่ 4.37 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง C

### 4.3.4.4 การติดตั้งไฟวอทแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริงของแบบจำลอง C

การติดตั้งไฟวอทแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริงทางผู้วิจัยได้ใช้การวิเคราะห์การติดตั้งโดยผ่านฟังก์ชัน Static Structural ของโปรแกรม ANSYS ซึ่งการตั้งค่าจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

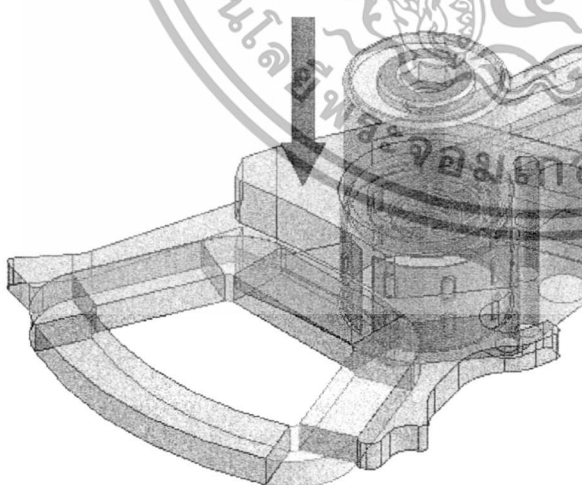
ขั้นตอนที่ 1 ทำการตั้งค่าการประกอบไฟวอทแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริงโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือการประกอบโทเลอร์แรนซ์ริงและการประกอบไฟวอทแบร็ง ซึ่งจะทำให้ได้โดยการตั้งค่าภายใน Analysis Settings กำหนดค่า Number Of Steps เป็น 2 คือการกำหนดช่วงการวิเคราะห์ห้ออกเป็น 2 ช่วง ซึ่งจะมีการตั้งค่าการคำนวณในแต่ละส่วนแตกต่างกันซึ่งจะถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Details of "Analysis Settings"		Details of "Analysis Settings"	
<b>Step Controls</b>		<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	2.	Number Of Steps	2.
Current Step Number	1.	Current Step Number	2.
Step End Time	1. s	Step End Time	2. s
Auto Time Stepping	On	Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps	Define By	Substeps
Initial Substeps	50.	Carry Over Time Step	Off
Minimum Substeps	10.	Initial Substeps	200.
Maximum Substeps	100.	Minimum Substeps	100.
		Maximum Substeps	1000.
<b>Solver Controls</b>		<b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled	Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled	Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On	Large Deflection	On
Inertia Relief	Off	Inertia Relief	Off
<b>Restart Controls</b>		<b>Restart Controls</b>	
Generate Restart Points	Manual	Generate Restart Points	Manual
Load Step	All	Load Step	All
Substep	All	Substep	All
Maximum Points to Save Per Step	All	Maximum Points to Save Per Step	All
Retain Files After Full Solve	Yes	Retain Files After Full Solve	Yes
<b>Nonlinear Controls</b>			

ภาพที่ 4.38 การกำหนดค่าการคำนวณในการติดตั้งเฟืองกับแบริ่งและโทเลอร์แรนซ์ริง

ขั้นตอนที่ 2 ตั้งค่าการติดตั้งเฟืองกับแบริ่งโดยกำหนดผิวด้านบนของเฟืองกับแบริ่งให้เคลื่อนที่ลงไปประกบกับโทเลอร์แรนซ์ริง โดยใช้คำสั่ง Displacement และกำหนดให้เคลื่อนที่ในทิศ -Z เป็นระยะ 0.3 นิ้ว ซึ่งจำถูกกำหนดอยู่ในช่วงที่ 2 ของการคำนวณดังที่แสดงในภาพที่ 3.39

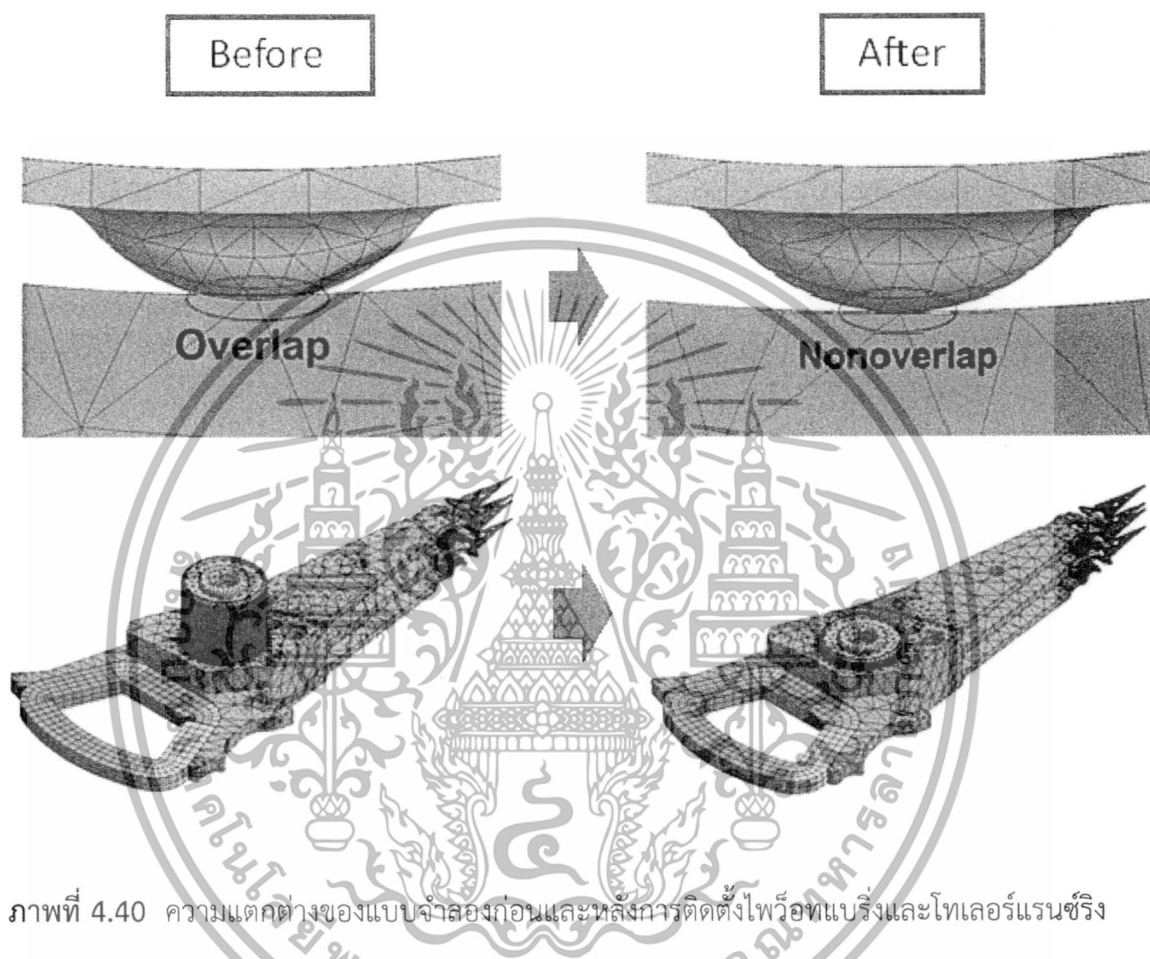


Details of "Displacement"				
<b>Scope</b>				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	2 Faces			
<b>Definition</b>				
Type	Displacement			
Define By	Components			
Coordinate System	Global Coordinate System			
X Component	0. in (ramped)			
Y Component	0. in (ramped)			
Z Component	Tabular Data			
Suppressed	No			
<b>Tabular Data</b>				
Independent Variable	Time			
<b>Tabular Data</b>				
Steps	Time [s]	X [in]	Y [in]	Z [in]
1	0.	0.	0.	0.
2	1.	0.	0.	0.
3	2.	= 0.	0.	-0.3
*				

ภาพที่ 4.39 การกำหนดค่าการคำนวณในการติดตั้งเฟืองกับแบริ่งและโทเลอร์แรนซ์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประกอบไฟว็อตแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริงจะทำให้มีแรงอัดเกิดขึ้น ซึ่งมันส่งผลให้ไฟว็อตแบร็ง โทเลอร์แรนซ์ริงและแอกซ์วัวร์เอเตอร์ถูกยึดติดเข้าด้วยกัน หลังจากการติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงจะถูกบีบอัดทำให้ส่วนที่เคยทับซ้อนกับแอกซ์วัวร์เอเตอร์หายไป และไฟว็อตแบร็งเลื่อนลงมายังตำแหน่งที่กำหนดซึ่งเป็นตำแหน่งที่ได้รับข้อมูลมาจากบริษัทฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังที่แสดงในภาพที่ 4.40



ภาพที่ 4.40 ความแตกต่างของแบบจำลองก่อนและหลังการติดตั้งไฟว็อตแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริง

#### 4.3.4.5 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบบจำลอง C

ขั้นตอนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบบจะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์โมดัลและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ โดยจะมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนแบบจำลอง A ทุกประการดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.2.4 แต่จะต่างกันเพียงเล็กน้อยคือในแบบจำลอง C จะใช้ผลการวิเคราะห์ของการวิเคราะห์โมดัลมาใช้ในการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ เนื่องจากในแบบจำลอง C มีการติดตั้งไฟว็อตแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริงเข้ามา การใช้วิธีดังกล่าวในการหาผลตอบสนองเชิงความถี่จะลดเวลาในการคำนวณลงได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

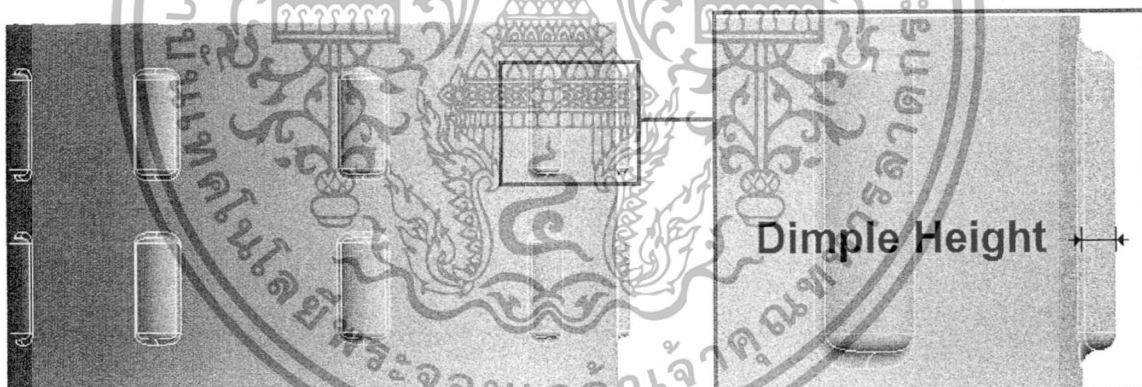
#### 4.3.4.6 การตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง C

ขั้นตอนการตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง C จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ การติดตั้งพริ้วทแบร็งและโทเลอร์แรนซ์ริง การวิเคราะห์โมดัลและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งขั้นตอนในการตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.6

### 4.4 การศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากการปรับเปลี่ยนความสูงดิมเพิลของโทเลอร์แรนซ์ริง

#### 4.4.1 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจะถูกสร้างขึ้นแบบเดียวกับแบบจำลอง C ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 แต่จะมีความแตกต่างกันคือผู้วิจัยจะสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่มีความสูงของดิมเพิลแตกต่างกัน 5 แบบจำลอง โดยภาพที่ 4.41 แสดงส่วนที่มีการปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลและตารางที่ 4.8 แสดงค่าความสูงต่าง ๆ ของดิมเพิลที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน



ภาพที่ 4.41 แบบจำลองของโทเลอร์แรนซ์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.8 ความตึงเครียดของแบบจำลองต่างๆ

Model	Dimple Height (inch)
1	STD - 0.000450
2	STD - 0.000225
3	STD (0.008)
4	STD + 0.000225
5	STD + 0.000450

#### 4.4.2 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้ง 5 มีขั้นตอนวิธีการสร้างเหมือนกับในแบบจำลอง C ทุกประการซึ่งวิธีการสร้างถูกแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3.4.1

#### 4.4.3 การกำหนดค่าสมบัติวัสดุ

การกำหนดค่าสมบัติวัสดุมีการกำหนดเหมือนในแบบจำลอง C อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ซึ่งค่าสมบัติวัสดุจะถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.4.2

#### 4.3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีการกำหนดเหมือนในแบบจำลอง C อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจะถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.4.3

#### 4.3.5 การติดตั้งไฟวอทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง

การติดตั้งไฟวอทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงจะขั้นตอนการติดตั้งแบบเดียวกับในแบบจำลอง C ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ซึ่งวิธีการติดตั้งจะถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.4.4

#### 4.3.6 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในการศึกษานี้จะประกอบด้วยวิเคราะห์โหมดัลซึ่งวิธีการวิเคราะห์จนถึงรูปแบบการสั่นสะเทือนที่สนใจศึกษาผู้วิจัยได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อ 4.3.2.4

#### 4.3.6 การตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ขั้นตอนการตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองนี้ จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ การติดตั้งไฟวอทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง การวิเคราะห์โหมดัลและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งขั้นตอนในการตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.6

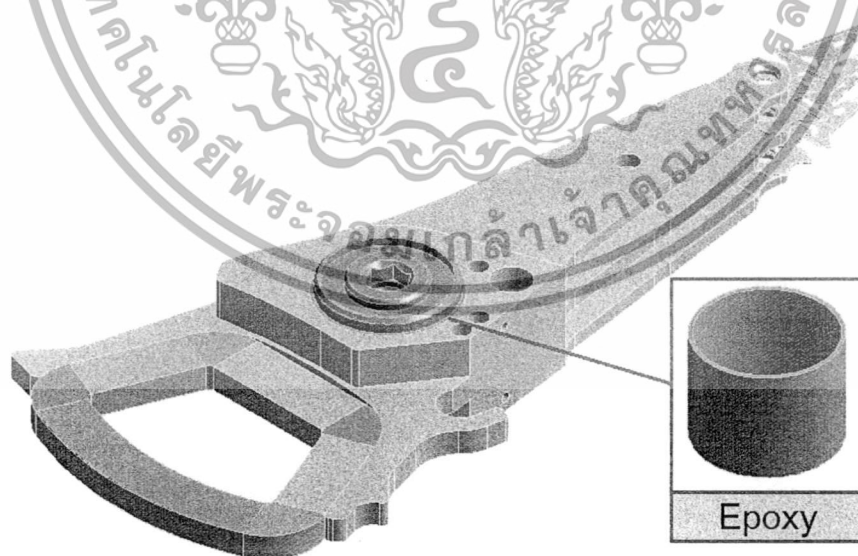
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การศึกษาการใช้ฮีฟ็อกซี่แทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดแอกซ์วอร์เอเตอร์และไฟว็อทแบร์ริง

การเชื่อมต่อเพื่อยึดไฟว็อทแบร์ริงและแอกซ์วอร์เอเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบันจะใช้การยึดโดยใช้โทเลอร์แรนซ์ริงเข้าระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองเพื่อทำให้เกิดแรงอัดขึ้น ซึ่งในส่วนนี้จะนำเสนอการนำฮีฟ็อกซี่ คือ กาวที่นำมาใช้เป็นตัวผสมเพื่อยึดไฟว็อทแบร์ริงและแอกซ์วอร์เอเตอร์เข้าด้วยกันแทนโทเลอร์แรนซ์ริงเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต โดยจะนำมาหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือนและเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์จากชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ยังคงใช้โทเลอร์แรนซ์ริงในการประกอบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของการนำฮีฟ็อกซี่มาใช้แทนโทเลอร์แรนซ์ริง

### 4.5.1 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับในแบบจำลอง C แต่จะมีความแตกต่างกันอยู่ที่บริเวณของการยึดติดไฟว็อทแบร์ริงและแอกซ์วอร์เอเตอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งแบบจำลองของฮีฟ็อกซี่จะถูกนำเข้ามาใช้แทนโทเลอร์แรนซ์ริงโดยถูกวางไว้ภายในรูของแอกซ์วอร์เอเตอร์และไฟว็อทแบร์ริงถูกติดตั้งอยู่ภายในรูปของฮีฟ็อกซี่ดังที่แสดงในภาพที่ 4.42



ภาพที่ 4.42 แบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้ฮีฟ็อกซี่แทนโทเลอร์แรนซ์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

รายละเอียดของการสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลองนี้จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 ซึ่งแสดงจำนวนเอลิเมนต์ จำนวนโนด และชนิดเอลิเมนต์ของอีพ็อกซีเท่านั้น เนื่องจากเอลิเมนต์ของส่วนอื่น ๆ ถูกสร้างขึ้นแบบเดียวกับในแบบจำลอง C ซึ่งถูกแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.4.1

ตารางที่ 4.9 รายละเอียดเอลิเมนต์ของอีพ็อกซี

Parts	No. of elements	No. of nodes	Element type
Epoxy	360	2,720	Hexahedron

#### 4.5.3 การกำหนดค่าสมบัติทางวัสดุ

การกำหนดค่าสมบัติทางวัสดุของแบบจำลองนี้จะมีการกำหนดในชั้นส่วนต่าง ๆ เหมือนในแบบจำลอง C ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.4.2 โดยในส่วนนี้ จะแสดงเฉพาะสมบัติทางวัสดุของอีพ็อกซี [13] แต่เพียงอย่างเดียวซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10

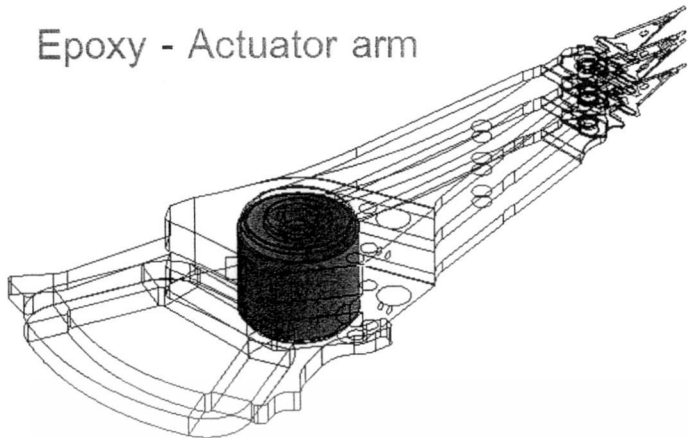
ตารางที่ 4.10 สมบัติทางวัสดุของอีพ็อกซี

Parts	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio
Epoxy	Epoxy resin	1,120	-	-	1.7	0.3

#### 4.5.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบในแบบจำลองนี้เหมือนกับแบบจำลอง B ทุกประการดังที่ได้แสดงในข้อ 4.3.3.3 เว้นแต่การกำหนดบริเวณผิวด้านในรูของแอกซ์ฮวีเอเตอร์ ซึ่งจะมีการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสชนิดเป็น Bonded ระหว่างผิวสัมผัสแอกซ์ฮวีเอเตอร์กับอีพ็อกซีและอีพ็อกซีกับไฟร็อตแบร์ริง และใช้คำสั่ง Cylindrical Support กำหนดความอิสระของผิวด้านในรูแกนหมุนของไฟร็อตแบร์ริงซึ่งวิธีกำหนดจะถูกแสดงในภาพที่ 4.43 ถึง 4.45

ภาพที่ 4.43 แสดงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอีพ็อกซีและแอกซ์ฮวีเอเตอร์ ซึ่งใช้การสัมผัสเป็นชนิด Bonded และกำหนด Formulation เป็นชนิด MPC

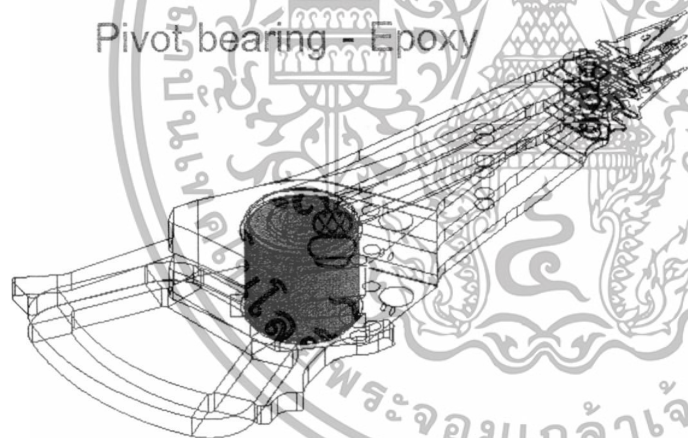


Details of "Bonded - epoxy To Part5"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	epoxy
Target Bodies	Part5
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	MPC
Detection Method	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None

ภาพที่ 4.43 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองอีพ็อกซี

ภาพที่ 4.44 แสดงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเพอิวทแบร์ริงและอีพ็อกซีซึ่งใช้การสัมผัสเป็นชนิด Bonded และกำหนด Formulation เป็นชนิด MPC



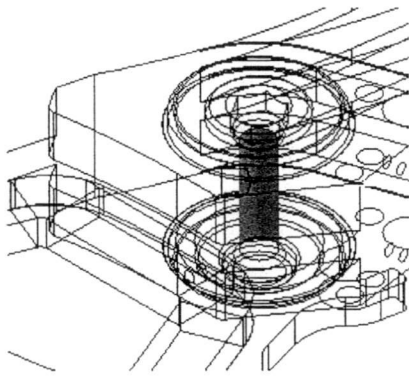
Details of "Bonded - pivot bearing To epoxy"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	pivot bearing
Target Bodies	epoxy
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	MPC
Detection Method	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None

ภาพที่ 4.44 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองอีพ็อกซี

ภาพที่ 4.45 แสดงบริเวณผิวที่มีการกำหนดความอิสระของโหนดบนผิวนั้นโดยใช้คำสั่ง Cylindrical Support โดยกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางของ Radial และ Axial แต่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในทิศทาง Tangential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Radial = Fixed ( $u_r=0$ )

Axial = Fixed ( $u_z=0$ )

Tangential = Free ( $u_t=0$ )

Details of "Cylindrical Support" <sup>#</sup>

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Cylindrical Support
Radial	Fixed
Axial	Fixed
Tangential	Free
Suppressed	No

ภาพที่ 4.45 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองอีพ็อกซี

#### 4.5.5 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์โมดัลจะนำมาใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของแบบจำลองที่ใช้อีพ็อกซีพร้อมทั้งนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน ที่ใช้เทอร์แรนซ์ริง จากการวัดโดยเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์โมดัลได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการวิจัย

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอผลการวิจัย 4 ส่วน ได้แก่ 1) ผลการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนในชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) ผลการพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนซึ่งประกอบไปด้วย ความเหมาะสมของคุณสมบัติทางวัสดุระหว่างไอโซโทรปิกและออร์โทโทรปิก การเปรียบเทียบความแตกต่างของการติดตั้งและไม่ติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟว็อทแบริงลงบนแอกซ์ชัวร์เอเตอร์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3) ผลการศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากการปรับเปลี่ยนขนาดความสูงของคิมเพิลบนโทเลอร์แรนซ์ริง 4) ผลการศึกษาการใช้ฟ็อกซ์แทนที่โทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดติดแอกซ์ชัวร์เอเตอร์และไฟว็อทแบริงเพื่อหาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

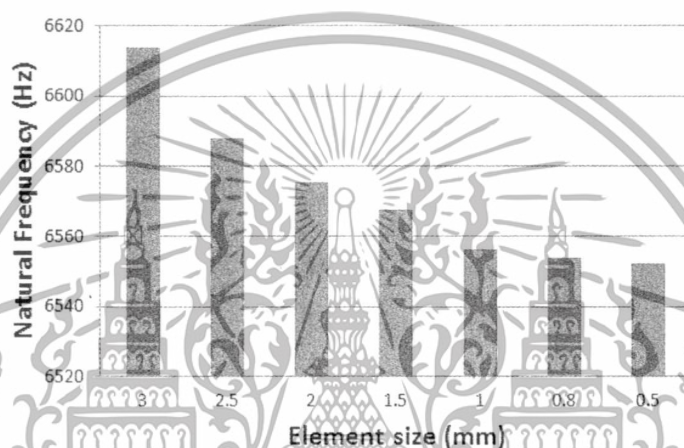
#### 5.2 ผลการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

ผลการศึกษาแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ในขนาดต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับนำไปวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่ต่างกันคือ 3.0 2.5 2.0 1.5 1.0 0.8 และ 0.5 มิลลิเมตรจะทำให้มีจำนวนเอลิเมนต์และจุดต่อที่ต่างกันในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือน Butterfly mode มีความแตกต่างกันคือ 6,614 6,588 6,575.2 6,567.6 6,556.4 6,553.8 และ 6,552.4 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเอลิเมนต์ขนาด 3.0 มิลลิเมตรจะคำนวณได้ค่าความถี่ธรรมชาติที่สูงที่สุด และเอลิเมนต์ขนาด 0.5 มิลลิเมตรจะได้ผลของค่าความถี่ธรรมชาติต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติแตกต่างกันประมาณ 60 เฮิร์ตซ์คิดเป็นร้อยละ 0.94 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับที่ใช้ขนาดเอลิเมนต์เล็กที่สุด แต่ในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนคือแบบจำลองที่ใช้ขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ที่สุด 52 วินาที และขนาดเอลิเมนต์เล็กสุด 838 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้ระยะเวลาในการคำนวณต่างกันประมาณ 16 เท่า ดังนั้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดของเอลิเมนต์ในช่วง 0.5 ถึง 3.0 มิลลิเมตร ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติเพียงเล็กน้อย แต่จะส่งผลกระทบอย่างมากในด้าน

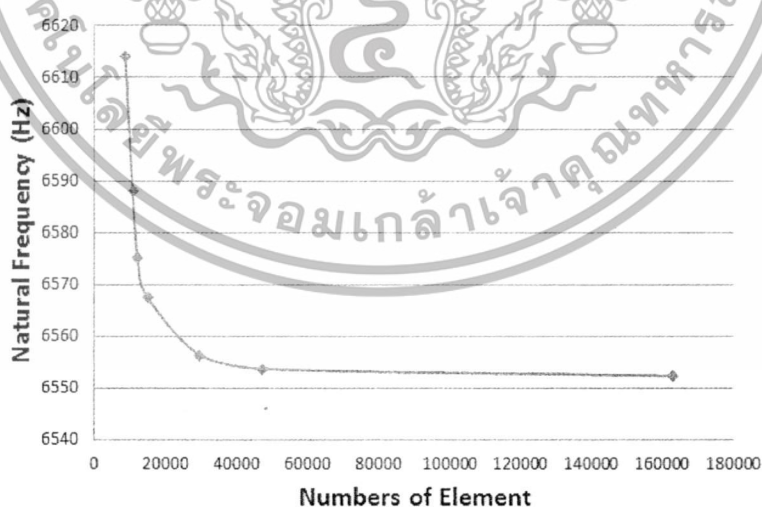
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกเอลิเมนต์ขนาด 1 มิลลิเมตรสำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองลำดับต่อไปเนื่องจากมีค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กที่สุดค่อนข้างสูงและเวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่สูงเกินไป โดยผลการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนในชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจะถูกแสดงไว้ดังต่อไปนี้

ภาพที่ 5.1 ภาพแสดงค่าความถี่ธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ในแต่ละแบบจำลองโดยแสดงจากเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ด้านซ้ายตลอดจนไปถึงเอลิเมนต์ขนาดเล็กที่สุดอยู่ด้านขวา



ภาพที่ 5.1 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้เอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ



ภาพที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติและจำนวนเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ จำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดในแต่ละขนาดเอลิเมนต์ และแสดงค่าการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติกับแบบจำลองที่ใช้ขนาดเอลิเมนต์เล็กที่สุด คือ 0.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติและเวลาในการคำนวณของขนาดเอลิเมนต์ต่าง ๆ

Element size (mm)	Actuator arm		Natural Frequency (Hz)	CPU Time (sec)	% Difference
	No. of elements	No. of nodes			
3.0	8,684	16,448	6,614	52	0.94
2.5	10,743	19,976	6,588	63	0.54
2.0	12,081	23,288	6,575.2	67	0.34
1.5	14,885	28,588	6,567.6	72	0.23
1.0	29,570	54,713	6,556.4	121	0.06
0.8	47,363	83,791	6,553.8	212	0.02
0.5	162,813	268,497	6,552.4	838	0

หมายเหตุ

$$\% \text{ Difference} = \left( \frac{\text{Natural Frequency from FEA} - \text{Natural Frequency from LDV}}{\text{Natural Frequency from LDV}} \right) \times 100$$

### 5.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

#### 5.3.1 ความเหมาะสมของคุณสมบัติทางวัสดุระหว่างไอโซโทรปิกและออร์โทโทรปิก

ผลศึกษา การใช้สมบัติทางวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์ที่แตกต่างกัน คือ ไอโซโทรปิกและออร์โทโทรปิก ซึ่งจะถูกเปรียบเทียบในแบบจำลอง A และ B จากผลการทดลองที่ถูกแสดงในภาพที่ 5.3, 5.4 และตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันอยู่เพียงเล็กน้อย คืออยู่ในช่วงน้อยกว่าร้อยละ 9 ยกเว้นแต่ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Coil 1<sup>st</sup> Torsion และ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly ในแบบจำลอง A ที่ใช้คุณสมบัติวัสดุเป็นไอโซโทรปิก มีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างจากผลจากการวัดค่าความถี่ธรรมชาติจากเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์อยู่ถึงร้อยละ 52.59 และ 43.46 ตามลำดับ จากผลความแตกต่างแสดงถึงความเหมาะสมที่จะใช้สมบัติวัสดุเป็นออร์โทโทรปิกมากกว่าไอโซโทรปิกในการกำหนดสมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เพื่อใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

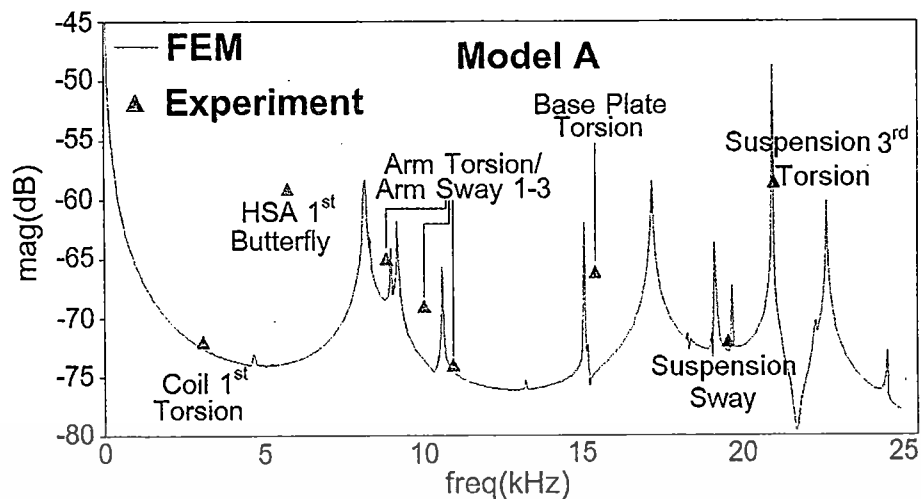
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการใช้คุณสมบัติวัสดุที่แตกต่างกัน คือ ไอโซโทรปิกและออร์โททรอปิกเปรียบเทียบกับผลจากการวัดค่าความถี่ธรรมชาติโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์

ตารางที่ 5.2 ผลค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้วัสดุขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นไอโซโทรปิกและออร์โททรอปิก

Mode Shape	Frequency (kHz)			%	%
	FEA (Model A)	FEA (Model B)	LDV Measurement	Difference (Model A)	Difference (Model B)
Coil 1 <sup>st</sup> Torsion	4.7	3.12	3.08	+52.59	+1.29
HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly	8.22	6.22	5.73	+43.46	+8.55
Arm Torsion/Arm Sway 1	9.10	9.10	8.84	+2.94	+2.94
Arm Torsion/Arm Sway 2	9.26	10.55	10.03	-7.67	+5.18
Arm Torsion/Arm Sway 3	11.54	11.05	10.93	+5.58	+1.09
Base Plate Torsion	15.13	15.30	15.38	-1.62	-0.52
Suspension Sway	19.41	19.33	19.55	-0.71	-1.13
Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion	22.33	21.50	21.00	+6.33	+2.38

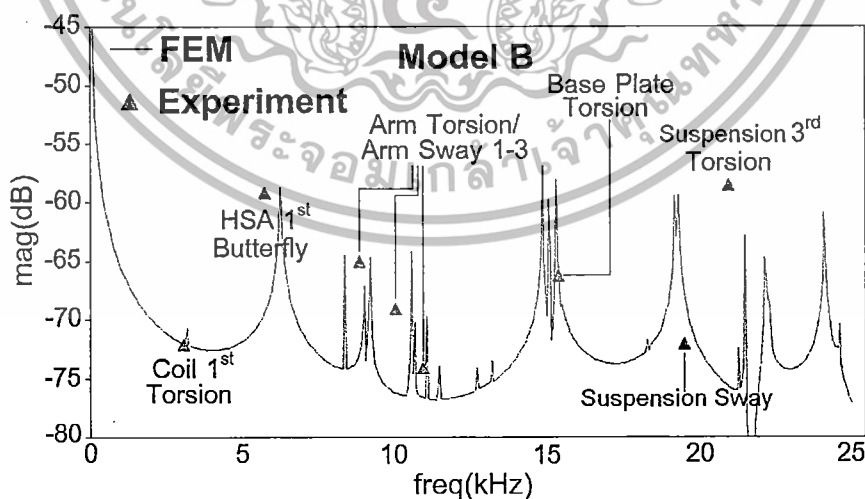
ภาพที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง A จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ โดยเส้นสีแดงแสดงถึงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจุดสูงสุดในแต่ละช่วงของกราฟแสดงถึงตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ และสามเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความถี่ธรรมชาติจากผลจากการวัดโดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ซึ่งในภาพจะไม่สนใจถึงค่าความแรงในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ที่ทำให้การสั่นพ้องในช่วงต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัดโดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ เว้นแต่ในรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Coil 1<sup>st</sup> torsion และ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง A

ภาพที่ 5.4 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง B จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์โดยเส้นสีแดงแสดงถึงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจุดสูงสุดในแต่ละช่วงของกราฟแสดงถึงตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ และสามเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความถี่ธรรมชาติจากผลการวัดโดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ ซึ่งในภาพจะไม่สนใจถึงค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องในช่วงต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัดโดยเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์



ภาพที่ 5.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของการติดตั้งและไม่ติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟร้อทแบริงลงบนแอกซ์ฮวีเอเตอร์

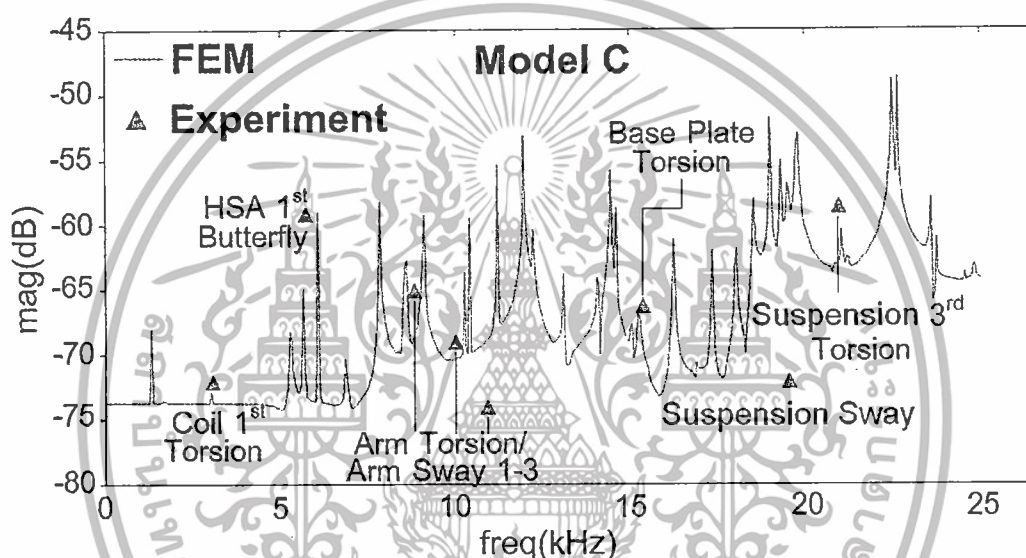
ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของการติดตั้งและไม่ติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟร้อทแบริงลงบนแอกซ์ฮวีเอเตอร์จะถูกแสดงให้เห็นโดยการเปรียบเทียบในแบบจำลอง B และ C ดังตารางที่ 5.3 และภาพที่ 5.4 และ 5.5 ซึ่งมีการไม่ติดตั้งและติดตั้งไฟร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงตามลำดับ โดยค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง B และ C เปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวัดโดยเครื่องเลเซอร์ดอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์มีความแตกต่างอยู่เพียงเล็กน้อยคือมีค่าความถี่ต่างน้อยกว่าร้อยละ 9 โดยประมาณ โดยความแตกต่างเพียงเล็กน้อยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งสองมีความสามารถในการนำไปใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ผู้วิจัยศึกษาได้เป็นอย่างดี เพียงแต่ในแบบจำลอง B จะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติที่น้อยกว่าในแบบจำลอง C เนื่องจากไม่มีการติดตั้งไฟร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริง ดังนั้นการใช้แบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้งไฟร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงจะสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ผู้วิจัยเลือกศึกษาได้สะดวกมากกว่า

ตารางที่ 5.3 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการติดตั้งและไม่ติดตั้งโทเลอร์แรนซ์ริงและไฟร้อทแบริง

Mode Shape	Frequency (kHz)			%	%
	FEA (Model B)	FEA (Model C)	LDV Measurement	Difference (Model B)	Difference (Model C)
Coil 1 <sup>st</sup> Torsion	3.12	3.01	3.08	+1.29	-2.27
HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly	6.22	5.37	5.73	+8.55	-6.28
Arm Torsion/Arm Sway 1	9.10	9.08	8.84	+2.94	+2.71
Arm Torsion/Arm Sway 2	10.55	10.19	10.03	+5.18	+1.59
Arm Torsion/Arm Sway 3	11.05	11.8	10.93	+1.09	+7.95
Base Plate Torsion	15.30	15.27	15.38	-0.52	-0.71
Load Arm Sway	19.33	19.51	19.55	-1.13	-0.20
Load Arm 3 <sup>rd</sup> Torsion	21.50	19.78	21.00	+2.38	-5.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง C ที่มีการติดตั้งไฟร้อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากผลจากการวัด โดยเครื่องมือวัดเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์โดยเส้นสีแดงแสดงถึงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจุดสูงสุดในแต่ละช่วงของกราฟแสดงถึงตำแหน่งที่เกิดการสั่นพ้องและสามเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดโดยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ซึ่งในภาพจะไม่สนใจถึงค่าความแรงในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัดโดยเลเซอร์คอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์และยังพบตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่อื่นๆอีกมาก



ภาพที่ 5.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลอง C

### 5.3.3 ผลเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง A B และ C จะประกอบไปด้วยการหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการวิเคราะห์โหมดและการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งในแบบจำลอง C จะมีเวลาที่ใช้คำนวณในขั้นตอนการประกอบไฟร้อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงเพิ่มขึ้นมาดังที่แสดงในตารางที่ 5.4 โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง C ที่มีขั้นตอนการติดตั้งเพิ่มขึ้นมาใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากที่สุดประมาณ 150,000 วินาที และระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลอง A และ B ใช้เวลาคำนวณโดยประมาณ 25,000 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง C ใช้เวลามากกว่าแบบจำลอง A และ B ถึง 6 เท่าโดยประมาณ โดยระยะเวลาที่เสียไปในการคำนวณส่วนใหญ่อยู่ในขั้นตอนการติดตั้งไฟร้อทแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงแต่จะสังเกตเห็นว่าในแบบจำลอง C ใช้ระยะเวลาในการคำนวณหาผลตอบสนองเชิงความถี่น้อยกว่าในแบบจำลองอื่นๆเนื่องมาจากมีขั้นตอนการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ที่แตกต่างจากแบบจำลองอื่น ๆ คือมีการใช้ผลลัพธ์จากการหาค่าความถี่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติในส่วนของกราฟวิเคราะห์โมดัลมาใช้ในการคำนวณผลตอบสนองเชิงความถี่เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

ตารางที่ 5.4 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง A B และ C

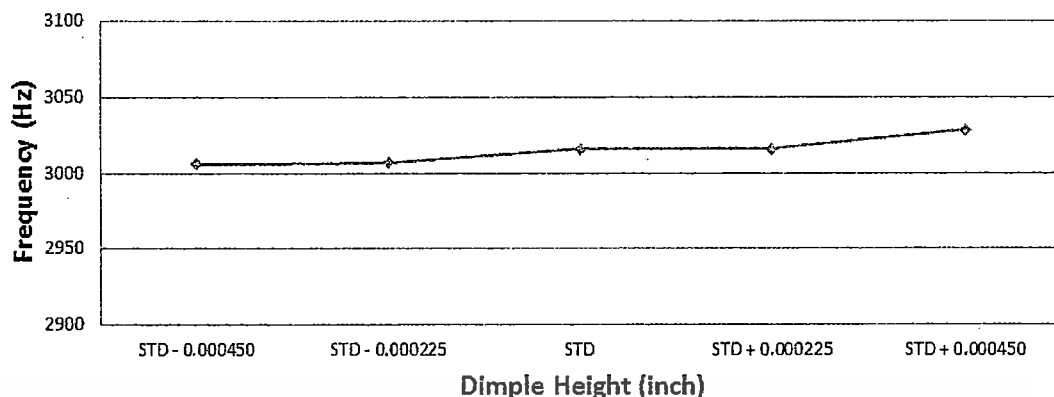
Types of calculation	CPU Time (sec)		
	Model A	Model B	Model C
Pivot bearing and Tolerance ring installation	-	-	138,533
Natural Frequency	913	1,042	4,430
Frequency Response	23,571	25,068	8,545
Total Times	24,484	26,110	151,508

#### 5.4 ผลการศึกษาผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนจากการปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลของโทเลอร์เรนซ์ริง

ผลของการเปลี่ยนแปลงความสูงดิมเพิลของโทเลอร์เรนซ์ริงที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนจะถูกแสดงในรูปที่ 5.6 ถึง 5.13 และตารางที่ 5.5 ถึง 5.13 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพิลมีผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติที่น้อยที่สุดในรูปแบบการสั่นสะเทือน Coil 1<sup>st</sup> Torsion และ Arm Sway/Arm Torsion 1 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ 22 และ 96 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ แต่จะมีผลมากขึ้นในรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Base plate Torsion Arm Sway/Arm Torsion 2 Arm Sway/Arm Torsion 3 Suspension Sway และ Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ 148, 187, 259, 253 และ 594 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ และมีผลมากที่สุดในรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด HSA 1<sup>st</sup> Butterfly ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ 2,364 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลจะส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly เป็นหลัก โดยความสูงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly มีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย

ภาพที่ 5.6 และตารางที่ 5.5 แสดงผลของรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Coil 1<sup>st</sup> Torsion จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพิลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 22 เฮิร์ตซ์

### Coil 1<sup>st</sup> Torsion



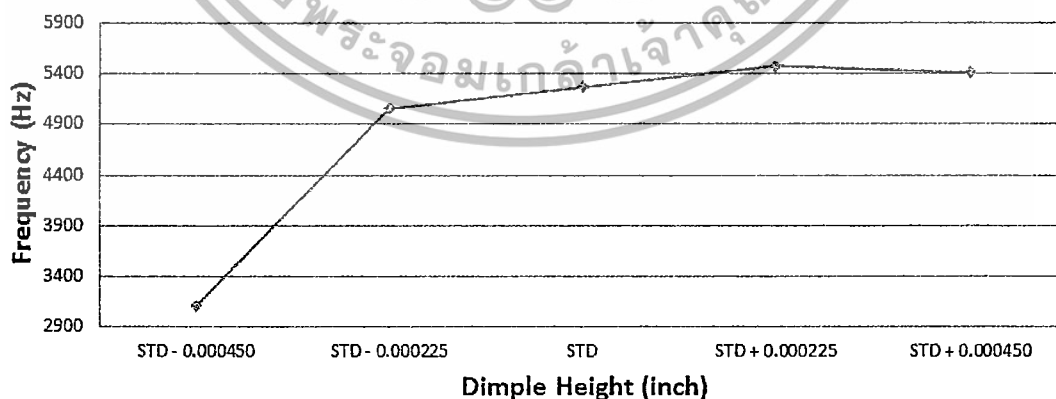
ภาพที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Coil 1<sup>st</sup> Torsion mode

ตารางที่ 5.5 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Coil 1<sup>st</sup> Torsion mode ของความสูงดิมเพิลขนาดต่าง ๆ

Coil 1 <sup>st</sup> Torsion	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	3006	3007	3016	3016	3028

ภาพที่ 5.7 และตารางที่ 5.6 แสดงผลของรูปแบบการสันสะเทือนชนิด HSA 1<sup>st</sup> Butterfly จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพิลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ จากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 2,364 เฮิร์ตซ์

### HSA 1<sup>st</sup> Butterfly



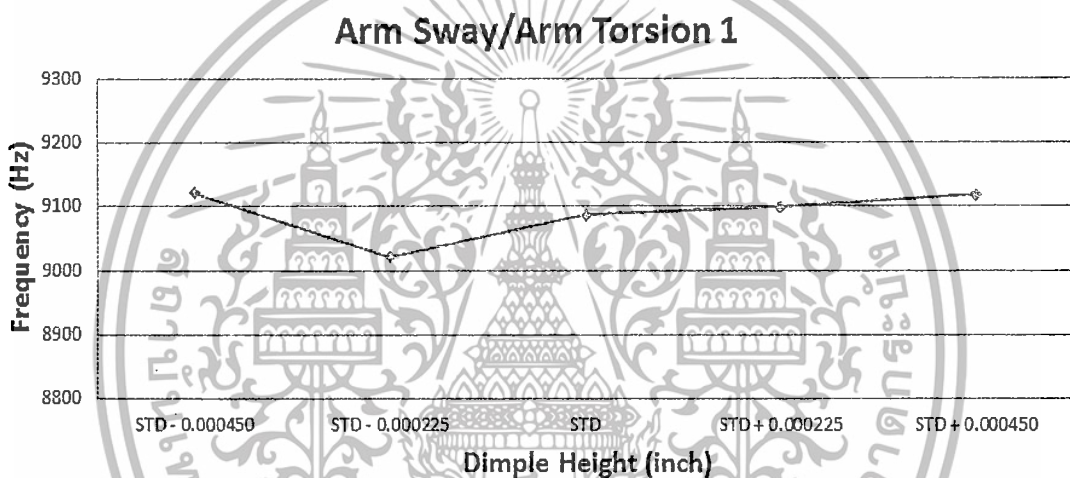
ภาพที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ค่าความถี่ธรรมชาติใน HSA 1<sup>st</sup> Butterfly mode ของความสูงดิมเพลขนาดต่างๆ

HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	3113	5054	5270	5477	5409

ภาพที่ 5.8 และตารางที่ 5.7 แสดงผลของรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Arm Sway/Arm Torsion 1 จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 96 เฮิรตซ์



ภาพที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Arm Sway/Arm Torsion 1 mode

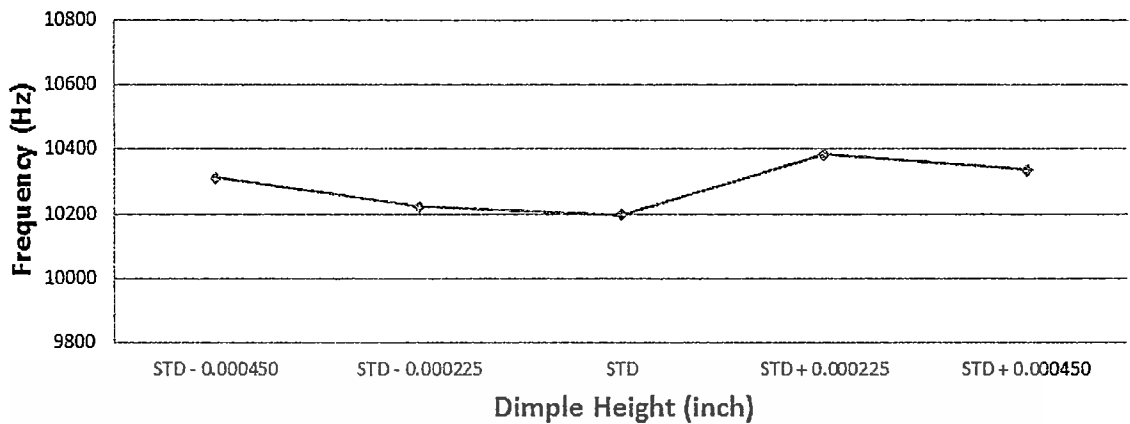
ตารางที่ 5.7 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Arm Sway/Arm Torsion 1 mode ของความสูงดิมเพลขนาดต่างๆ

Arm Sway/Arm Torsion 1	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	9122	9022	9087	9099	9118

ภาพที่ 5.9 และตารางที่ 5.8 แสดงผลของรูปแบบการสั่นสะเทือนชนิด Arm Sway/Arm Torsion 2 จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 187 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Arm Sway/Arm Torsion 2



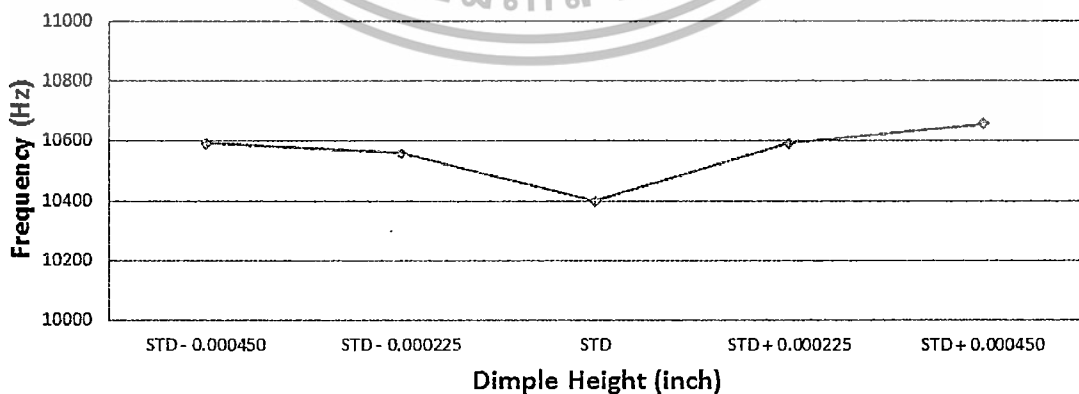
ภาพที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Arm Sway/Arm Torsion 2 mode

ตารางที่ 5.8 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Arm Sway/Arm Torsion 2 mode ของความสูงดิมเพลขนาดต่าง ๆ

Arm Sway/Arm Torsion 2	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	10,313	10,224	10,197	10,384	10,338

ภาพที่ 5.10 และตารางที่ 5.9 แสดงผลของรูปแบบการสันสะเทือนชนิด Arm Sway/Arm Torsion 3 จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 259 เฮิรตซ์

### Arm Sway/Arm Torsion 3



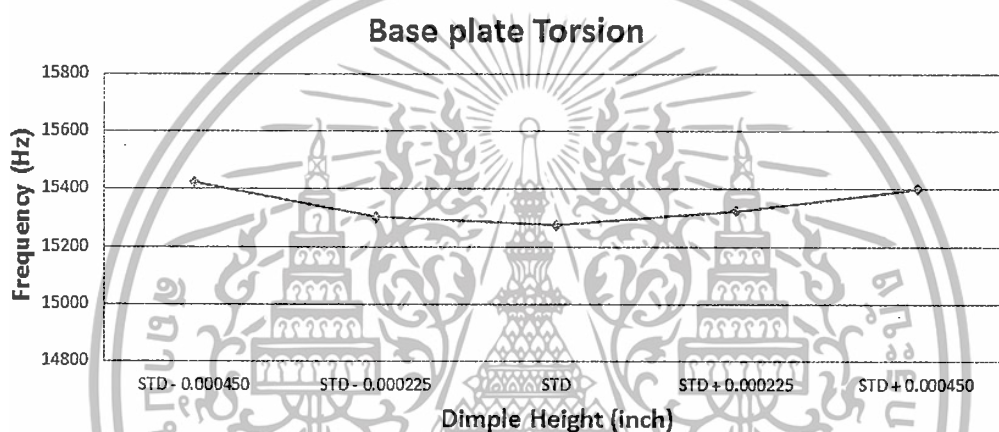
ภาพที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Arm Sway/Arm Torsion 3 mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Arm Sway/Arm Torsion 2 mode ของความสูงดิมเพลขนาดต่าง ๆ

Arm Sway/Arm Torsion 3	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	10,593	10,560	10,399	10,594	10,658

ภาพที่ 5.11 และตารางที่ 5.10 แสดงผลของรูปแบบการสันสะเทือนชนิด Base plate Torsion จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 148 เฮิร์ตซ์



ภาพที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Base plate Torsion mode

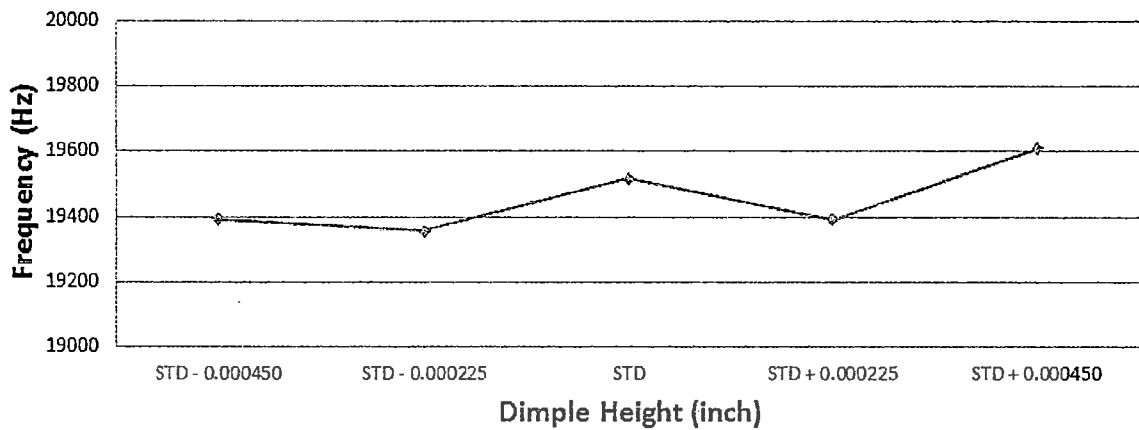
ตารางที่ 5.10 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Base plate Torsion mode ของความสูงดิมเพลขนาดต่าง ๆ

Base plate Torsion	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	15,424	15,303	15,276	15,326	15,401

ภาพที่ 5.12 และตารางที่ 5.11 แสดงผลของรูปแบบการสันสะเทือนชนิด Suspension Sway จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 253 เฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Suspension Sway



ภาพที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Suspension Sway mode

ตารางที่ 5.11 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Suspension Sway mode ของความสูงดิมเพิลขนาดต่าง ๆ

Suspension Sway	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	19,392	19,358	19,519	19,393	19,611

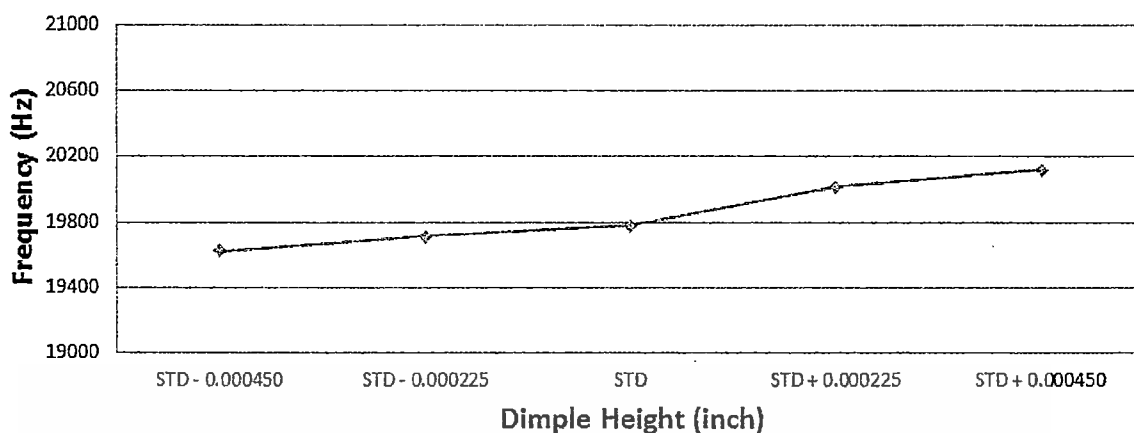
ภาพที่ 5.13 และตารางที่ 5.12 แสดงผลของรูปแบบการสันสะเทือนชนิด Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิมเพิลโดยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากความสูงน้อยสุดไปมากที่สุดประมาณ 594 เฮิรตซ์

ตารางที่ 5.12 ค่าความถี่ธรรมชาติใน Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion mode ของความสูงดิมเพิลขนาดต่าง ๆ

Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion	Dimple Height (inch)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Frequency (Hz)	19,625	19,714	19,778	20,017	20,119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion



ภาพที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อ Suspension 3<sup>rd</sup> Torsion mode

ตารางที่ 5.13 ค่าความถี่ธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงความสูงดิมเพิลในรูปแบบการสันสะท้อนต่าง ๆ

Mode Shape	Frequency (kHz)				
	STD - 0.000450	STD - 0.000225	STD	STD + 0.000225	STD + 0.000450
Coil 1 <sup>st</sup> Torsion	3006	3007	3016	3016	3028
HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly	3113	5054	5270	5477	5409
Arm Torsion/Arm Sway 1	9122	9022	9087	9099	9118
Arm Torsion/Arm Sway 2	10,313	10,224	10,197	10,384	10,338
Arm Torsion/Arm Sway 3	10,593	10,560	10,399	10,594	10,658
Base Plate Torsion	15,424	15,303	15,276	15,326	15,401
Suspension Sway	19,392	19,358	19,519	19,393	19,611
Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion	19,625	19,714	19,778	20,017	20,119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 ผลการศึกษาการใช้ฮีฟ็อกซีแทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดแคว์เอเตอร์และไฟร้อทแบร์ริงถึงผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

ผลค่าความถี่ธรรมชาติ จากการศึกษาการใช้ฮีฟ็อกซีแทนโทเลอร์แรนซ์ริง ในการยึดแคว์เอเตอร์และไฟร้อทแบร์ริงโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดค่าความถี่ธรรมชาติ โดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์จากชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้โทเลอร์แรนซ์ริงซึ่งจะถูกแสดงในตารางที่ 5.14 ซึ่งพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ มีความแตกต่างจากผลจากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ตอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ต่ำกว่าร้อยละ 8 โดยการสั่นสะเทือนในรูปแบบ HSA 1<sup>st</sup> Butterfly จะมีความแตกต่างสูงที่สุด คือ ร้อยละ 7.75

ตารางที่ 5.14 ค่าความถี่ธรรมชาติของการใช้ฮีฟ็อกซีในการสั่นสะเทือนรูปแบบต่าง ๆ

Mode Shape	Frequency (kHz)		%
	FEA (Epoxy)	LDV Measurement	Difference (Epoxy)
Coil 1 <sup>st</sup> Torsion	3.12	3.08	+1.20
HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly	6.17	5.73	+7.75
Arm Torsion/Arm Sway 1	8.87	8.84	+0.33
Arm Torsion/Arm Sway 2	10.30	10.03	+2.71
Arm Torsion/Arm Sway 3	10.37	10.93	-5.16
Base Plate Torsion	15.30	15.38	-0.52
Suspension Sway	19.45	19.55	-0.52
Suspension 3 <sup>rd</sup> Torsion	19.61	21.00	-6.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 การกำหนดสมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นชนิดไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิก

การกำหนดสมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นชนิดไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิกส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือน HSA 1<sup>st</sup> Butterfly และ Coil 1<sup>st</sup> Torsion มากที่สุด ซึ่งรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้งสองมีการเสียรูปร่างของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่มีความเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นส่วนใหญ่ โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้สมบัติวัสดุเป็นไอโซโทรปิกทำนายค่าความถี่ธรรมชาติแตกต่างจากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ไดโพลาร์ไฮโดรไมเตอร์สูงกว่าร้อยละ 40 โดยประมาณ แต่การใช้สมบัติวัสดุเป็นออร์โธโทรปิกมีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างต่ำกว่าร้อยละ 10 ซึ่งแสดงถึงการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดมอเตอร์วอยซ์คอยล์เป็นออร์โธโทรปิกจะมีความแม่นยำในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้งสองมากกว่าการใช้สมบัติวัสดุเป็นไอโซโทรปิก แต่สำหรับการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนอื่น ๆ การใช้สมบัติวัสดุไอโซโทรปิกและออร์โธโทรปิกมีความแม่นยำที่ดีและแตกต่างกันอยู่เพียงเล็กน้อย ดังนั้นการใช้สมบัติวัสดุของขดลวดเป็นชนิดออร์โธโทรปิกจึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

### 6.2 การติดตั้งและไม่ติดตั้งชิ้นส่วนของไฟร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงในแอกซ์ชัวร์เอเตอร์

การติดตั้งและไม่ติดตั้งชิ้นส่วนของไฟร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงลงในแอกซ์ชัวร์เอเตอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดโดยเครื่องมือวัดเลเซอร์ไดโพลาร์ไฮโดรไมเตอร์ ดังนั้นการติดตั้งและไม่ติดตั้งมีความแม่นยำในการนำไปใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ได้ไม่แตกต่างกัน แต่จะมีความแตกต่างกันในด้านของความซับซ้อนของขั้นตอนในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งการไม่ติดตั้งไฟร้อทแบริงและโทเลอร์แรนซ์ริงจะมีความสะดวกมากกว่าในการนำไปใช้ทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้สมบัติวัสดุเป็น ออร์โททรอปิกและไม่มีการติดตั้งไฟร็อตแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้สมบัติวัสดุเป็นออร์โททรอปิก และไม่มีการติดตั้งไฟร็อตแบร์ริงและโทเลอร์แรนซ์ริงจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทำนายหาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบที่ผู้วิจัยได้ทำเลือกศึกษา เนื่องจากมีความแม่นยำ กระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและประหยัดเวลาในการคำนวณสำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติ จึงทำให้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีความสะดวกสบายสำหรับการนำไปใช้งาน

### 6.4 การปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลที่ขนาดต่าง ๆ

การปรับเปลี่ยนความสูงของดิมเพิลที่ขนาดต่าง ๆ จะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ โดยจะส่งผลมากที่สุดในรูปแบบการสันสะเทือน HSA 1<sup>st</sup> Butterfly ซึ่งในรูปแบบการสันสะเทือนนี้ความสูงของดิมเพิลที่ต่ำกว่าขนาดมาตรฐานจะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับในรูปแบบการสันสะเทือนอื่น ๆ การปรับเปลี่ยนขนาดความสูงของดิมเพิลจะส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการสันสะเทือน HSA 1<sup>st</sup> Butterfly

### 6.5 การใช้ฟ็อกซ์แทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดแอกซ์ฮูเอเตอร์และไฟร็อตแบร์ริง

การใช้ฟ็อกซ์แทนโทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดแอกซ์ฮูเอเตอร์และไฟร็อตแบร์ริงเข้าด้วยกัน แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนที่ใช้โทเลอร์แรนซ์ริงในการยึดติด

### 6.6 ข้อเสนอแนะ การพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียน

ข้อเสนอแนะ การพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนควรคำนึงถึงการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งในแต่ละแบบจำลองอาจมีประโยชน์ที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น การหาค่าความถี่ธรรมชาติในบางรูปแบบการสันสะเทือนอาจไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อนก็สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้อย่างแม่นยำ แต่สำหรับในบางรูปแบบการสันสะเทือนอาจมีความจำเป็นที่ต้องแบบจำลองที่มีความซับซ้อนเพื่อที่จะหาค่าความถี่ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อย่างแม่นยำ สำหรับการปรับเปลี่ยนความสูงของติมเพิลอาจไม่ได้ส่งผลกระทบต่อในด้านของค่าความถี่ธรรมชาติเพียงอย่างเดียว แต่อาจส่งผลในด้านอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงเป็นเรื่องที่มีความน่าสนใจในการศึกษาถึงผลกระทบในด้านต่าง ๆ ต่อในอนาคต และในส่วนตัวท้าย ถึงแม้ว่าการนำเสนอการใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เทคโนโลยีแฟลชของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนแสดงถึงผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าความถี่ธรรมชาติ แต่ควรจะต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบในด้านอื่น เช่น ความคงทน อายุการใช้งาน หรือการออกแบบรูปร่างของฮาร์ดดิสก์ถึงความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] He, Z. Venkataramanan, V. Ng, C.Y. and Ong, E.H. 2009. "Vibration Characteristics of Hard Disk Drives with Different Internal Air Pressures." 1-2. **Asia-Pacific Magnetic Recording Conference 9<sup>th</sup>**. Singapore : IEEE.
- [2] Ku, C.-P.R. Juang, J.-Y. Sun, X. Huang, L. and Huang F.-Y. 2011. "High Frequency Radial Mode Vibration in Hard Disk Drive." **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**. 47(7) : 1893-1898.
- [3] ANSYS, Inc. ANSYS version 15.0, Pennsylvania, United States of America.
- [4] Xu, L.M. and Guo, N. 2003. "Modal Testing and Finite Element Modelling of Subsystem in Hard Disk Drive" **Mechanical Systems and Signal Processing**. 17(4), 747-764.
- [5] Okawa, R. Terada, K. Ito, K. Watanabe, S. Imai, T. and Tanihira, K. 2002. " Modal Analysis of HDD's Actuator" **Fujikura Technical Review**. No.31 : 7-11.
- [6] Suthaweesub, S. and Dheeravongkit, A. "Finite Element Analysis of a Reworking Process of a Tolerance Ring in a HDD's Actuator Arm." **DST-CON 2011 The 4<sup>th</sup> International Data Storage Technology Conference**. January 9-10. 2012 Impact Convention Center, Nonthaburi, Thailand.
- [7] Achawakorn, K. Jearsiripongkul, T. Suksawat, S. and Fanchaeng, K. 2013. "The Effect of Pivot Bearing Assembly Process on Natural Frequency of Actuator Arm." **Journal of Energy and Power Engineering**. 7 : 301-304.
- [8] Kim, D.-W. Lee, J.-K. Park N.-C. Park, Y.-P. 2003. "Vibration Analysis of HDD Actuator with Equivalent Finite Element Model of VCM Coil." **KSME International Journal**. 17(5) : 679-690.
- [9] Jang, E. and Chang, J. 2008. "Overwrite Performance Chang due to Air-Flow Induced Vibration of Head Stack Assembly." **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**. 44(11) : 3734-3737.
- [10] Jintanawan, T. Roger Ku, C.-P. and Zhu, J. 2004. "Effect of Thrust Hydrodynamic Bearing Stiffness and Damping on Disk-Spindle Axial Vibration in Hard Disk Drives." **Microsystem Technologies**. 10(4) : 338-344.
- [11] Daniel j. Inman. **Engineering Vibration**. 2<sup>nd</sup> ED. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] เทวิน พันภัย และ ชีระ เจียศิริพงษ์กุล. 2550. “การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยการใช้ LDV.” วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 34(4) : 477-488.
- [13] DELO, DELO Technical Information, Windach, Germany.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

The 5<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering  
17-19<sup>th</sup> December 2014, The Empress, Chiang Mai

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2014 TSME-ICoME

## THE 5<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING



**WHEN**  
Dec 17-19, 2014

**WHERE**  
Chiang Mai, Thailand  
The Empress hotel

**MORE DETAILS**  
[WWW.ME.ENG.KMITL.AC.TH/ICOME2014](http://WWW.ME.ENG.KMITL.AC.TH/ICOME2014)

### RELATED TOPICS

- Alternative Energy and Combustion : AEC
- Aerospace and Marine Engineering : AME
- Applied Mechanics, Materials and Manufacturing : AMM
- Biomechanics : BME
- Computation and Simulation Techniques : CST
- Dynamic systems, Robotics and Control : DRC
- Energy Technology and Management : ETM
- Thermal System and Fluid Mechanics : TSF

### Hosted by

King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang, KMITL  
And  
Thai Society of Mechanical  
Engineers, TSME

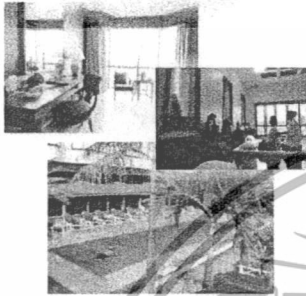
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**VENUE**

**THE EMPRESS HOTEL  
CHIANG MAI**

The 4-star luxury hotel situated in the city center within 15 minutes from the airport offers the finest place to stay in Chiang Mai and full ranges of amenities from Thai massages and children-friendly swimming pools to business facilities and the best meetings/conference venue in town for exhibitions, weddings and product launches.

Award: The Winner of Zoover Hotel Awards 2012 and 2013, voted one of the top 25 hotels in Thailand.



The Empress Hotel, Chiang Mai  
199/42 Chang Klan Road  
Chiang Mai 50100, Thailand  
Tel + (66-53) 253 199  
Email: rsvn@empresshotels.com  
www.empresshotels.com

**IMPORTANT DATES**

May 1, 2014	Abstract submission deadline
June 1, 2014	Notification of abstract acceptance
August 1, 2014	Full manuscript submission deadline
September 1, 2014	Notification of full manuscript acceptance
September 20, 2014	Submission deadline for camera-ready
October 10, 2014	Early bird registration deadline
December 17-19, 2014	ICoME-2014



**The 5th International  
Conference on Mechanical  
Engineering**  
On December 17-19, 2014  
in Chiang Mai, Thailand



**CONTACT DETAILS**

Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang  
1 Chalongkhong Road Ladkrabang  
Bangkok Thailand 10520

Phone : (66)2 329 8351; (66)2 329 8352  
Email : icome2014@gmail.com

Website : www.me.eng.kmitl.ac.th/icom2014

Hosted by

Department of Mechanical Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang

and

Thai Society of Mechanical Engineers (TSME)

**ABOUT THE  
CONFERENCE**

THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
MECHANICAL ENGINEERING WILL BE HELD  
AT THE EMPRESS HOTEL,  
CHIANG MAI, THAILAND

This is the fifth international conference, aiming to provide an international forum for researchers, scientists, engineers as well as industrial professionals from all over the world to share, discuss and disseminate their current research activities and experiences related to the discipline of mechanical engineering.

The conference will be held in Chiang Mai province, the cultural capital of northern Thailand renowned for its hospitality, accessibility and wide range of attractions: Chiang Mai is a city of artists and history, rich with Buddhist temples, ancient ruins and heritage sites.

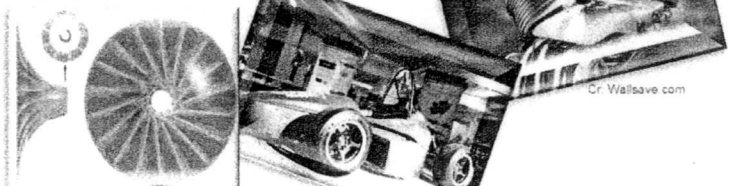
**ABSTRACT  
GUIDELINE**

<http://me.eng.kmitl.ac.th/icom2014>

The overview guideline and the abstract template are available for download at the above link. Authors must register and submit the final version of your manuscript by **May 1, 2014**.

**RELATED TOPICS**

- Alternative Energy and Combustion : AEC
- Aerospace and Marine Engineering : AME
- Applied Mechanics, Materials and Manufacturing : AMM
- Biomechanics : BME
- Computation and Simulation Techniques : CST
- Dynamic systems, Robotics and Control : DRC
- Energy Technology and Management : ETM
- Thermal System and Fluid Mechanics : TSF



Cr. Wallsave.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**AMM055**

## On Finite Element Modeling Aspect of HDD's Head Stack Assembly Vibration Analysis

Vana Puengkhom<sup>1\*</sup>, Jatuporn Thongsri<sup>1</sup> and Monsak Pimsarn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok  
Thailand, 10520

\*Corresponding Author: [Y\\_mon\\_shinmail@hotmail.com](mailto:Y_mon_shinmail@hotmail.com), Tel. +668 7675 1512

### Abstract

To evaluate accuracy and effectiveness, three finite element models of a head stack assembly (HSA) of hard disk drive (HDD) incorporating features suggested by the latest findings in the literature were created and tested against the experimental data. The simplest model, Model A, used isotropic material property to simulate the voice coil motor (VCM coil) of the HSA while the second model, Model B, used orthotropic material property instead. The most complex model, Model C, also used orthotropic property but added extra structure, a pivot bearing and tolerance ring. Simulation runs of these models produced sets of natural frequencies of the HSA that were compared with the actual natural frequencies measured with a Laser Doppler Vibrometer. It was found that Model B and C were much more accurate at predicting natural frequencies than Model A, but while Model C gave only a marginally better result, it took 6 times longer to simulate than Model B did. The most useful finding from this study is that using orthotropic property to simulate the VCM coil of an HSA greatly improved the model's accuracy in predicting the HSA's natural frequencies.

**Keywords:** Hard Disk Drive, Natural Frequency, Vibration, Head Stack Assembly.

### 1. Introduction

Today, the need for computer storage space is ever increasing. Hard disk drive (HDD) (Fig. 1(a)), the most widely used type of computer storage space, has been constantly developed to meet this demand. One of the key issues in designing a bigger, faster HDD is the vibration of its parts. Excessive vibration of the head stack assembly (HSA) (Fig. 1(b)), a moving part that reads and writes data to and from the hard disk,

can cause serious problems, from minor read and write errors to HDD failure. Therefore, an effective means to design a vibration-proof HSA is much in need. Finite element modeling (FEM) is a reliable design tool that has been widely used to investigate structural vibration problems in various industries. The purpose of this study was to construct FEM models that can predict the vibrational behavior of an HSA accurately and efficiently.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMM055

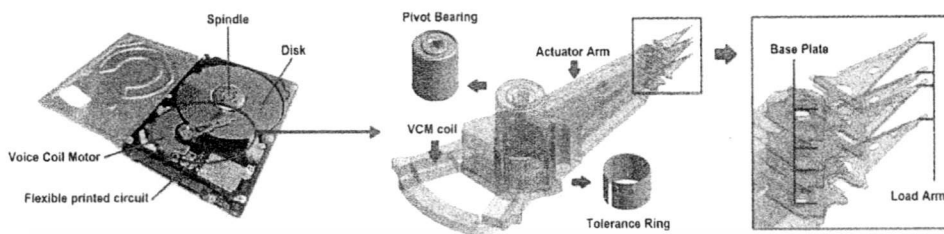


Fig. 1 (a) Hard disk drive

Fig. 1 (b) Head stack assembly

Vibration is pervasive. Vibration of an HSA can occur from many sources such as the airflow inside the HDD or the movement of the spindle motor. However, small vibration does not cause serious problem. It is when the vibration frequency coincides with a natural frequency of the structure, a phenomenon called resonance, that the magnitude of the vibration gets amplified dramatically to the point that it becomes a very serious problem. Hence, the focus of this study was to construct FEM models that can accurately predict the HSA's natural frequencies.

There have been several previous FEM studies on the vibration of HSA and its components. Ryota Okawa et al. [1] conducted an FEM study on HSA vibration and reported that the arm thickness of the HSA affected its natural frequency, and the horizontal vibrational mode shapes of the VCM coil, a component of the HSA, affected the read and write head positioning control. In another study, No-Cheol Park et al. [2] investigated the material properties of a VCM coil and suggested that modeling with orthotropic material property is suitable for predicting the natural frequencies of an HSA. Khasak et al. [3] studied another aspect of HSA vibration. They incorporated pivot bearing and tolerance ring, moving parts of HSA, in their model and found that varying parameters of the pivot bearing

This study was based on the above investigations. We created FEM models of an actual HSA. The simplest one, Model A, used isotropic material property to simulate the VCM coil. The second one, Model B, used orthotropic material property instead. The most complex one, Model C, used orthotropic material and incorporated pivot bearing and tolerance ring in the model. Then, we compared the natural frequencies of the HSA found from simulation to the actual natural frequencies measured with a Laser Doppler Vibrometer (LDV) to check the accuracy of the models in predicting the natural frequencies (the actual frequency data were supplied by an HDD manufacturer in Thailand). The time expended to calculate each model (CPU time) was also tracked to see how efficient the model was.

2. Methodology

2.1 Description of models

This study investigated 3 created models of an HSA which is produced by an HDD manufacturer in Thailand. Model A differed from Model B only in the simulated material properties of its VCM coil: Model A's coil property was isotropic while Model B's coil property was orthotropic. Both models were constructed without a pivot bearing and tolerance ring of the actuator arm of the HSA. Model C, however, was

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลจากนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่กรณีที่มีการขออนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

AMM055

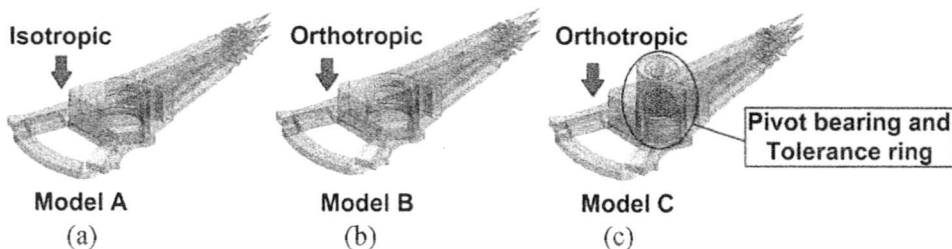


Fig. 2 HSA models with (a) isotropic property; (b) orthotropic property; (c) orthotropic with pivot bearing and tolerance ring

constructed with these bearing and ring as well as orthotropic VCM coil; this model was intended to be compared with Model B. Fig. 2 shows the pictures of these 3 models.

2.2 Finite element modeling

ANSYS software [4] was used to construct the models and calculate their natural frequencies. ANSYS is a finite element computer program that is widely used in analysis and design of mechanical structure in various industries. Our institute has legally obtained the right for using software for academic purpose.

2.2.1 Mesh creation

To simplify the model's high complexity, tetrahedral meshes were created to represent asymmetrical shape parts while hexagonal meshes were created to represent the VCM coil, a symmetrical shape part. Data on the created meshes—number of nodes and type and number of elements—are shown in Table 1. A picture of the mesh model of the HSA is also shown in Fig. 3.

Table. 1 Mesh description

Parts	No. of nodes	No. of elements	Element type
Actuator arm	52,467	29,640	Tetrahedron
Load arm	206,853	99,211	Tetrahedron
Base plate	33,995	16,191	Tetrahedron
Pivot bearing	89,998	45,484	Tetrahedron
Tolerance ring	58,009	33,376	Tetrahedron
VCM coil	7,196	1,572	hexahedron

2.2.2 Material properties

Components of the HSA—actuator arm, load arm, base plate, pivot bearing, tolerance ring, and VCM coil—are made from various types of materials, and therefore, have different mechanical properties. These properties needed to be specified precisely for accurate simulation of the vibrational behavior of the HSA. Data on these materials and their properties were obtained from the HDD manufacturer except the data on orthotropic material used to construct the VCM coil of Model B and C. The latter data were obtained from No-Cheol Park's study [2]. Orthotropic material's mechanical properties such as Young's modulus and Poisson's ratio are different in different spatial directions. A picture of the modeled VCM coil showing the spatial coordinates where each orthotropic property was applied is illustrated in Fig. 4, while all of the types of materials and their properties are listed in Table 2.

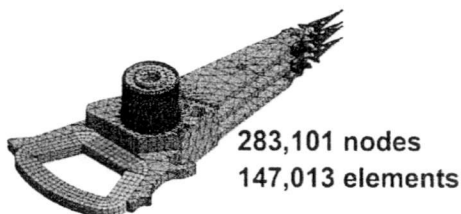


Fig. 3 Mesh model of HSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMM055

Table. 2 Material properties

Parts	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Young's Modulus (GPa)			Poisson's ratio		
					x	y	z	xy	yz	xz
Actuator arm	Aluminum	2,700	280	500	68.9			0.33		
Load arm	Stainless steel	8,000	210	1800	195			0.29		
Base plate	Stainless steel	7,830	210	1800	195			0.28		
Pivot bearing	Stainless steel	8,000	210	1800	193			0.25		
Tolerance ring	Stainless steel	7,880	210	1800	193			0.31		
VCM (isotropic)	Copper	5,470	-	-	90			0.34		
VCM (orthotropic)	Copper 1	5,470	-	-	46.6	59	59	0.3	0.3	0.3
	Copper 2	5,470	-	-	30	39.8	39.8	0.3	0.3	0.3



Fig. 4 orthotropic properties of VCM coil

2.2.3 Boundary conditions

For ANSYS software to be able to simulate the displacement and rotation of nodes and faces according to the dynamics of real HSA components, suitable boundary conditions needed to be specified. A boundary condition called 'cylindrical support' was used in all 3 models—A, B and C—to constrain the cylindrical faces to be radially and axially fixed but free to move in circumferential direction, as shown in Fig. 5.

Another boundary condition called 'frictionless support' was used for the faces of the upper and lower surfaces of the tolerance ring in Model C to constrain the faces' movement in the direction perpendicular to the surfaces but allow them to slide freely in the rotation direction, as shown in Fig. 6.

Another special boundary condition to be mentioned is the boundary condition at the faces

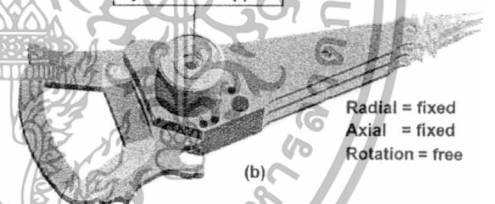


Fig. 5 (a) Boundary condition of model A and B; (b) Boundary condition of model C

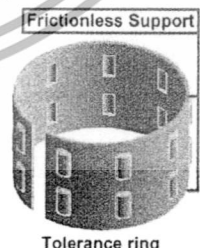


Fig. 6 Boundary condition of tolerance ring in Model C

of bonded contact. In all 3 models, each component of the HSA was connected by bonded contact to its adjoining components, meaning that the contact faces could not move apart or slide against each other. This held true for all contact

**AMM055**

faces except those between the actuator arm, tolerance ring, and pivot bearing in Model C. The contacts between these latter components were 'frictional contact'—the components could slide against each other with some friction specified by a friction coefficient.

**3. Results and discussion**

In this study, 3 types of desired simulation results were produced by ANSYS: numerical value of natural frequency, frequency response graph, and CPU time. The natural frequencies found by simulation were compared to real natural frequencies of the HSA supplied by the HDD manufacturer. The manufacturer agreed to disclose them for only a few important vibrational modes that have a big impact on the HDD performance. Fig. 7 shows the shapes of 6 of these vibrational modes.

**3.1 Accuracy of the finite element models**

Accuracy of each model was evaluated in terms of closeness of the natural frequencies found by the simulation of that model to the measured frequencies: the closer they were, the more accurate the model was. Table 3 shows these frequency values along with the percentage errors of 8 vibrational modes.

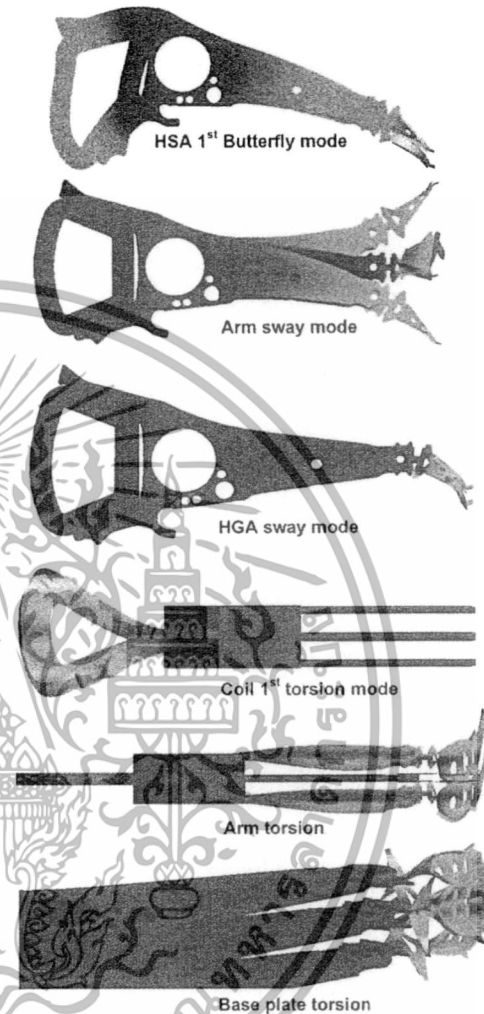


Fig. 7. Tested mode shapes in all 3 models

Table. 3 Natural frequencies from simulation and from measurement

Mode Shape	Frequency (kHz)				% Error (Model A)	% Error (Model B)	% Error (Model C)
	FEA (Model A)	FEA (Model B)	FEA (Model C)	LDV Measurement			
Coil 1 <sup>st</sup> Torsion	4.7	3.12	3.01	3.08	52.59	1.29	2.27
HSA 1 <sup>st</sup> Butterfly	8.22	6.22	5.37	5.73	43.46	8.55	6.28
Arm Torsion/ Arm Sway 1	9.10	9.10	9.08	8.84	2.94	2.94	2.71
Arm Torsion/ Arm Sway 2	9.26	10.55	10.19	10.03	7.67	5.18	1.59
Arm Torsion/ Arm Sway 3	11.54	11.05	11.8	10.93	5.58	1.09	7.95
Base Plate Torsion	15.13	15.30	15.27	15.38	1.62	0.52	0.71
HGA Sway	19.41	19.33	19.51	19.55	0.71	1.13	0.20
HGA 3 <sup>rd</sup> Torsion	22.33	21.50	19.78	21.00	6.33	2.38	5.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMM055

The data in Table 3 are exact figures of natural frequencies. ANSYS also reported frequency response graphs. These graphs show natural frequencies as resonance peaks in the frequency spectrum. The blue triangles represent certain measured natural frequencies supplied by the manufacturer. It can be visually observed that there were peaks near the triangles, as shown in Fig 8. In addition, there were additional peaks representing vibrational modes that were not covered by the manufacturer's provided data. These peaks can be identified as more data become available, further validating the robustness of a particular model.

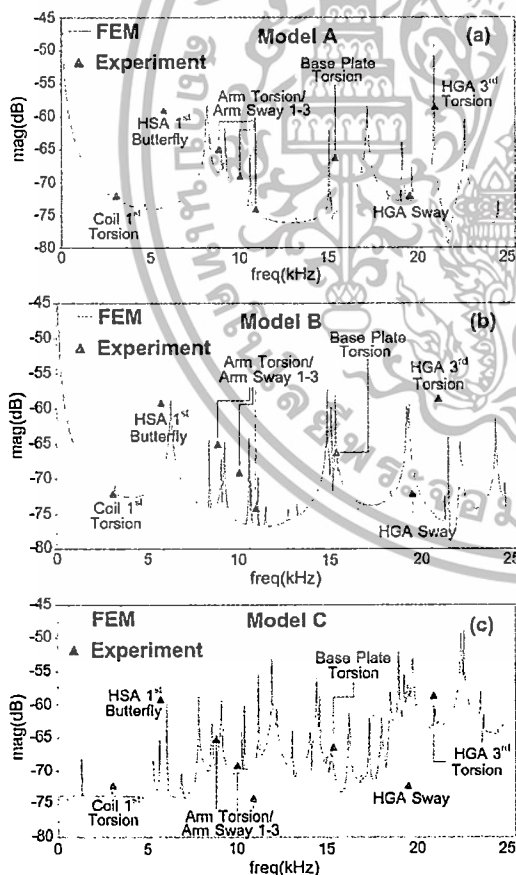


Fig. 8 Frequency responses and natural frequency peaks

3.2 CPU time

ANSYS also reported the CPU time expended for each type of calculation. Table 4 shows the CPU times expended for calculating the natural frequencies and frequency responses of all 3 models (including calculation of installed pivot bearing and tolerance ring in Model C).

Table. 4 CPU time used

Types of calculation	CPU time (sec)		
	Model A	Model B	Model C
Pivot bearing and Tolerance ring installation	-	-	138,533
Natural frequency	913	1,042	4,430
Frequency response	23,571	25,068	8,545

3.3 Comparison of the models

3.3.1 Isotropic versus orthotropic

We found that representing the VCM coil with orthotropic material gave much more accurate results than with isotropic material. As can be seen in Table 3, the percentage errors of Model B with orthotropic material were in the range of 1-9% for all vibrational modes tested, whereas the percentage errors of Model A with isotropic material were in the range of 43-53% for the coil torsion and HSA butterfly vibrational modes.

3.3.2 With tolerance ring and pivot bearing installed versus without

3.3.2.1 Reliable

We found that incorporating pivot bearing and tolerance ring in a model did not significantly improve the model's accuracy. Namely, the range of percentage errors of Model B without the mentioned components installed was 0.5-9% for all vibrational modes, while that of Model C with

## AMM055

the components installed was 0.2-8%, numerically lower but insignificant in practical terms.

### 3.3.2.2 Effectiveness

As can be seen in Table 4, the CPU time for calculating Model C with pivot bearing and tolerance ring installed was around 6 times longer than that for calculating Model B without them installed. Since both models gave the same level of accuracy, Model B is the better model to use for simulating the HSA for the tested vibrational modes. However, as can be seen in Fig. 8, Model C yielded additional modes that may prove to be important in future exploration.

### 4. Conclusion

Three finite element models of an actual HSA were created. They were tested for accuracy of the natural frequencies that they produced against those measured with an LDV by an HDD manufacturer. It was found that the 2 models that used orthotropic material property to simulate a component of the HSA, the VCM coil, were more accurate than the model that used isotropic material property to do the same simulation. In addition, the more complex model that simulated additional moving parts was not significantly more accurate than the simpler one with the same base components, but the complex model took 6 times longer time to simulate. So if we take into account the effectiveness. Using a model that is not installed in tolerance ring and pivot bearing is a great model to calculate. The most useful finding from this study is that using orthotropic material property instead of isotropic property in a certain way to construct an HSA model greatly improved the accuracy of the model.

### 5. Acknowledgement

The authors take great pleasure in acknowledging the financial support from Seagate Technology (Thailand) Ltd., National Science and Technology Development Agency and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Finally, special thanks to CAD-IT Consultants (Asia) Pte Ltd for great technical support.

### 6. References

- [1] Ryota Okawa, Kazuhiro Terada, Kenichiro Ito, Shigeru Watanabe, Takayuki Imai and Kazuo Tanihira, Modal Analysis of HDD's Actuators, Fufikura Technical Review, no.31, January 2002, pp. 7-11.
- [2] Dong-Woohn Kim, Jin-Koo Lee, No-Chrol Park and Young-Pil Park, Vibration Analysis of HDD Actuator with Equivalent Finite Element Model of VCM coil, KSME International journal, vol.17, no.5, 2003, pp. 679-690.
- [3] Khosak Achawakorn, Thira Jearsiripongkul, Sarawut Suksawat and Krairoek Fanchaeng, The Effect of Pivot Bearing Assembly Process on Natural Frequency of Actuator Arm, Journal of Energy and Power Engineering, vol.7, February 2013, pp. 301-305.
- [4] L.M. Xu and N. Guo, Modal Testing and Finite Element Modeling of Subsystem in Hard Disk Drive, Mechanical Systems and Signal Processing, vol.17, issue 4, July 2003, pp. 747-764.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายวนา พึ่งคำ
วันเดือนปีเกิด	27 กุมภาพันธ์ 2533
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัยนครปฐม พระตำหนักสวนกุหลาบมัธยม (มัธยมต้น) พ.ศ. 2545
	โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย (มัธยมปลาย) พ.ศ. 2548
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2551
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบและข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2555



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้