



บทความวิจัย

## อิทธิพลของขนาดและความไม่สมบูรณ์ของอีพอกซีต่อการสั่นสะเทือนในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### Influence of size and epoxy imperfections on vibration in HDD actuator arm

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข<sup>1\*</sup> อธิราช โชตินอก<sup>1</sup> วันฉลอง ก้อนแหวน<sup>1</sup> ไกรฤกษ์ ฟันแจ้ง<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

<sup>2</sup> บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ปทุมธานี 12120

Kullasup Phongsrisuk<sup>1\*</sup> Athirach Chotnok<sup>1</sup> Wanchalong Konwan<sup>1</sup> Krairoek Fanchaeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300

<sup>2</sup> Belton Industrial (Thailand) Ltd. Pathumthani 12120

\* Corresponding author.

E-mail: phongsrisuk@gmail.com; Telephone: 0 5392 1444

วันที่รับบทความ 13 มกราคม 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 18 เมษายน 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 1 พฤษภาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 8 มิถุนายน 2568

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความหนา ความยาว และฟองอากาศในอีพอกซีของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อการสั่นสะเทือน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้อีพอกซีแตกหักเนื่องจากการสั่นสะเทือน โดยได้พัฒนาแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (โปรแกรม ANSYS) ให้มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 ต่ำกว่าร้อยละ 8 จากนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนความหนา ความยาว และฟองอากาศในอีพอกซีของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 สูงสุดร้อยละ 7.827 สำหรับการปรับเปลี่ยนความหนา ความยาว และฟองอากาศในอีพอกซี พบว่าไม่ส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์ม แต่ส่งผลกระทบในรูปร่างโหมดด้านคอยล์ โดยการลดความหนาและความยาวของอีพอกซีทำให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านคอยล์ลดลง ในทางกลับกันการเพิ่มความยาวของอีพอกซีทำให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านคอยล์เพิ่มขึ้น ส่วนฟองอากาศในอีพอกซีส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านคอยล์ลดลง โดยฟองอากาศแนวตั้งส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านคอยล์ลดลงมากกว่าฟองอากาศแนวนอน

#### คำสำคัญ

การสั่นสะเทือน แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ อีพอกซี

#### Abstract

This research studied the effects of the thickness, length, and air bubbles in the epoxy of the HDD actuator arm on vibration to analyze the factors that caused the epoxy to fracture due to vibration. The HDD actuator arm model was developed using finite element software (ANSYS program) to achieve a percentage error from the PSV400 test of less than 8%. Subsequently, the thickness, length, and air bubbles in the epoxy of the HDD actuator arm were adjusted. The results demonstrated that the HDD actuator arm model had a maximum error of 7.827% from the PSV400 test. Regarding the adjustments to the thickness, length, and air bubbles in the epoxy, it was found that these factors did not affect the natural frequency in the arm mode shape but had a significant impact on the coil mode shape. Reducing the thickness

and length of the epoxy decreased the natural frequency in the coil mode shape. Conversely, increasing the length of the epoxy increased the natural frequency in the coil mode shape. The presence of air bubbles in the epoxy resulted in a decrease in the natural frequency in the coil mode shape, with vertical air bubbles causing a more significant reduction than horizontal air bubbles.

## Keywords

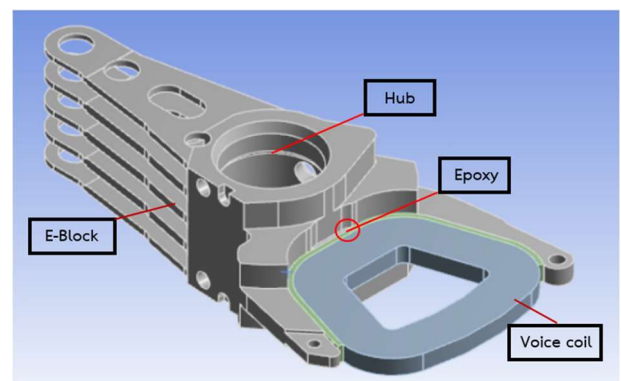
vibration, HDD actuator arm, finite element software, epoxy

## 1. คำนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตและส่งออกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive: HDD) รายใหญ่ของโลก โดยในปี 2564 มูลค่าการส่งออกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของไทยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 223,442.24 ล้านบาทต่อปี หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 1.39 ของการส่งออกสินค้าทั้งหมด[1] โดยมีตลาดการส่งออกอยู่ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลียและจีน ตามกระแสการปรับเปลี่ยนสู่ดิจิทัล (Digital transformation) อาทิเช่น การลงทุนในศูนย์ข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลมหัต (Big data) โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจและพฤติกรรมผู้บริโภค และการเก็บข้อมูลธุรกิจบนออนไลน์ (Cloud) เนื่องด้วยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเก็บข้อมูลได้ในปริมาณที่มากและราคาย่อมเยา[2] นอกจากนี้ บริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รายใหญ่ เช่น Western Digital ได้ขยายการลงทุนในไทยอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2567 ได้ลงทุนกว่า 23,000 ล้านบาท เพื่อขยายฐานการผลิตในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและปราจีนบุรี เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นในตลาดคลาวด์และศูนย์ข้อมูล[3] การลงทุนดังกล่าวไม่เพียงเสริมสร้างความแข็งแกร่งให้กับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของไทย แต่ยังช่วยเพิ่มมูลค่าการส่งออกและสร้างโอกาสการจ้างงานในประเทศอีกด้วย

การประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถบอกได้ด้วยอัตราการไหลของข้อมูล (Data rate) และเวลาในการค้นหา (Seek time) โดยอัตราการไหลของข้อมูล คือ จำนวนบิตต่อวินาที ที่แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD actuator arm) สามารถส่งไปยังหน่วยประมวลผล (Central processing unit: CPU) ส่วนเวลาในการค้นหา คือ เวลาที่ข้อมูลถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผล[4] โดยเวลาในการค้นหาสามารถลดลงได้ ถ้าหัวอ่าน/บันทึก (Read/Write head) ที่ปลายแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถอ่าน/บันทึกข้อมูลจากจานแม่เหล็ก (Platters) ได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากการอ่าน/บันทึก

ข้อมูลจากจานแม่เหล็กอาศัยการเคลื่อนที่หมุนกลับไปกลับมาของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นผลให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นสะเทือน[5]



รูปที่ 1 ตำแหน่งอีพอกซีที่ใช้ประสานอี-บล็อกและขดลวดเสียง

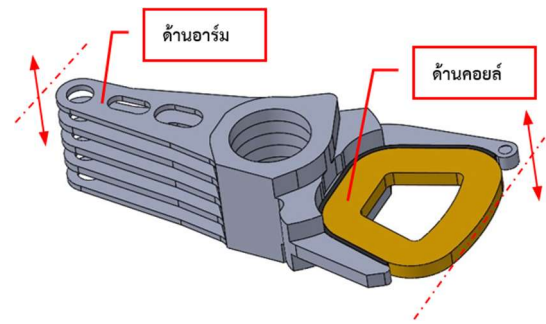
การสั่นสะเทือนจะทำให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รับแรงกระทำกลับไปกลับมา (Cyclic load) จุดบกพร่องภายในเนื้อวัสดุของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะรับความเค้นสลับ (Cyclic stress) ทำให้เกิดรอยแตกร้าว (Crack) ซึ่งรอยแตกร้าวเล็ก ๆ จะขยายตัวเป็นรอยแตก (Crack propagation) อีพอกซี (Epoxy) ซึ่งเป็นกาวประสานระหว่างอี-บล็อก (E-Block) และขดลวดเสียง (Voice coil) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (รูปที่ 1) ได้เกิดการแตกหัก ซึ่งจากการศึกษาในกระบวนการผลิตแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่าในอีพอกซีมักจะเกิดฟองอากาศ[6] และการหยอดอีพอกซียังมีความแปรปรวน[7] จึงเป็นไปได้ที่ฟองอากาศอาจเป็นจุดบกพร่องภายในอีพอกซี อันเป็นผลให้อีพอกซีเกิดการแตกหักเมื่อแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งนอกจากนี้ยังได้มีผลการศึกษาว่า พิกัดความถี่[8] ความหนา[9] และคุณสมบัติของอีพอกซี[10] ล้วนมีผลต่อความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของแขน

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลของความหนา ความยาวและฟองอากาศในอ็อกซีของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อการสั่นสะเทือน โดยจะทำการสร้างแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เพื่อวิเคราะห์ว่าขนาดของอ็อกซีและความไม่สมบูรณ์จากฟองอากาศส่งผลอย่างไรต่อความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการควบคุมคุณภาพของการใช้อ็อกซีในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้โดยตรง โดยเฉพาะการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของอ็อกซีและการลดโอกาสเกิดฟองอากาศ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติและพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านอย่างมีนัยสำคัญ การระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดจะช่วยให้สามารถกำหนดเกณฑ์การควบคุมคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดปัญหาความคลาดเคลื่อนด้านการสั่นสะเทือนของระบบ และเพิ่มความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว

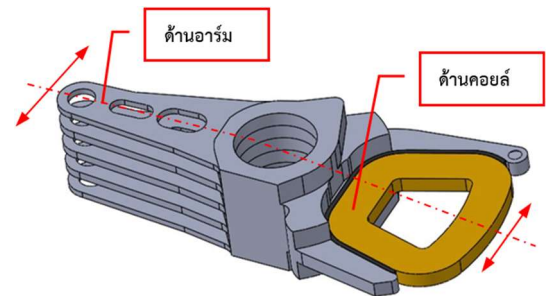
## 2. ทฤษฎี

### 2.1 การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

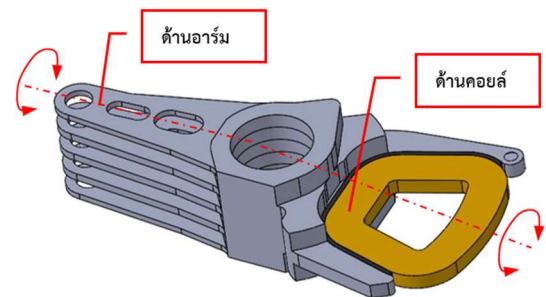
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลดิจิทัลที่ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์และข้อมูลดิจิทัลชนิดอื่น ๆ โดยการบันทึกข้อมูลอาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายหัวอ่าน/เขียน เข้าและออกในแนวตั้งฉากกับการหมุนของจานแม่เหล็ก (Platter) เพื่อเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการ จานแม่เหล็กนี้หมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้การทำงานของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องมีความแม่นยำในระดับนาโนเมตร การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพในการอ่าน/เขียนข้อมูล เนื่องจากการสั่นสะเทือนอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน ซึ่งส่งผลต่อความเร็วและความถูกต้องของกระบวนการจัดเก็บข้อมูล



(ก) การสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง



(ข) การสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัด



(ค) การสั่นสะเทือนแบบบิด

### รูปที่ 2 รูปแบบการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเป็นการสั่นสะเทือนของระบบต่อเนื่อง เนื่องจากแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีจำนวนระดับขั้นความเสรีไม่จำกัด จึงทำให้ความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าเป็นอนันต์[11] และเรียกรูปแบบการสั่นสะเทือนในแต่ละความถี่ธรรมชาติว่ารูปร่างโหมด (Mode shape) การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถแบ่งออกเป็น การสั่นสะเทือนของด้านอาร์มและด้านคอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยคัม (Hub) จะอยู่ระหว่างด้านอาร์มและ

ด้านคอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ศึกษาจะมีการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง (Bending mode shape) การสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัด (Sway mode shape) และการสั่นสะเทือนแบบบิด (Torsion mode shape) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งจะเป็นการเคลื่อนที่ขึ้นลงกลับไปกลับมาในแนวตั้งผ่านเส้นประของด้านอาร์มและด้านคอยล์ (รูปที่ 2.ก) การสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัดจะเป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวากลับไปกลับมาในแนวระนาบผ่านเส้นประของด้านอาร์มและด้านคอยล์ (รูปที่ 2.ข) การสั่นสะเทือนแบบบิดจะเป็นการเคลื่อนที่บิดกลับไปกลับมาผ่านเส้นประของด้านอาร์มและด้านคอยล์ (รูปที่ 2.ค)

การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกจำลองด้วยระบบมวล-สปริง-ตัวหน่วง (Mass-spring-damper system) โดยสมการการเคลื่อนที่ (Equations of motion) ของระบบ คือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

โดย  $m$  คือ มวลของระบบ ( $kg$ ),  $c$  คือ ค่าคงตัวการหน่วงของระบบ ( $N.s/m$ ),  $k$  คือ ค่าคงตัวสปริงของระบบ  $N/m$ ,  $x$  คือ การกระจัดของมวล ( $m$ ),  $\dot{x}$  คือ ความเร็วของมวล ( $m/s$ ),  $\ddot{x}$  คือ ความเร่งของมวล ( $m/s^2$ ) และ  $F(t)$  คือ แรงภายนอกที่กระทำกับระบบ ( $N$ ) ถ้าระบบเป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระโดยไม่มีตัวหน่วง ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ได้จะเรียกว่า “ความถี่ธรรมชาติ” [12] ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (2) โดยถ้าระบบมีค่าคงตัวสปริงที่มากจะทำให้ระบบมีความถี่ธรรมชาติที่สูง แต่ถ้าระบบมีค่าคงตัวสปริงที่น้อยจะทำให้ระบบมีความถี่ธรรมชาติที่น้อย

$$f_n = (1/2\pi)\sqrt{k/m} \quad (2)$$

เพื่อให้เข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงได้มีการพิจารณาแขนหัวอ่าน

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีรูปร่างอย่างง่าย [13] ซึ่งทำให้สามารถหาค่าคงตัวสปริงของระบบในรูปร่างโมดัดโค้งและรูปร่างโมดแกว่งกวัดได้เป็น [14]

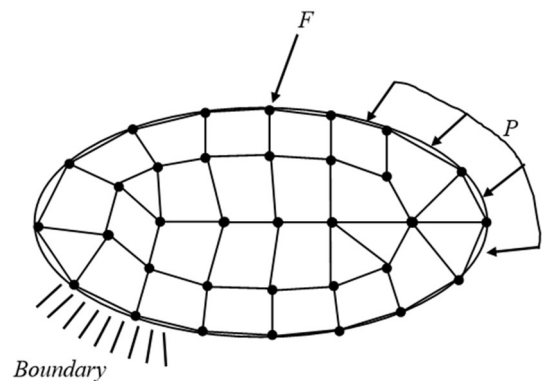
$$k = (\alpha EI) / L^3 \quad (3)$$

โดย  $\alpha$  คือ ค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับการจับยึด,  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น ( $N/m^2$ ),  $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ( $m^4$ ) และ  $L$  คือ ความยาวของชิ้นงาน ( $m$ ) ส่วนค่าคงตัวสปริงของระบบในรูปร่างโมดบิดสามารถเขียนสมการได้เป็น [14]

$$k = (\beta GJ) / L \quad (4)$$

โดย  $\beta$  คือ ค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับการจับยึด,  $G$  คือ โมดูลัสเฉือน ( $N/m^2$ ),  $J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัด ( $m$ ) และ  $L$  คือ ความยาวของชิ้นงาน  $m$

## 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแนวคิดที่ว่าวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใด ๆ สามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตง่าย ๆ ได้ โดยแต่ละส่วนย่อยสามารถ

พิจารณาแยกกันอย่างอิสระและประกอบเข้าเป็นวัตถุรูปเดิมได้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสำหรับปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนและการวิเคราะห์เลือกผลที่ดีที่สุดก่อนการทดลองหรือสร้างจริง โดยจะแก้ปัญหาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพีชคณิตแล้วใช้คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลลัพธ์ มีหลักการสำคัญ คือ แบ่งแบบจำลอง (Domain) ออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ (Elements) ให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของแบบจำลอง แต่ละเอลิเมนต์ต่อเชื่อมกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่า โดยการสร้างฟังก์ชันประมาณค่าภายในเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการควบคุม (Governing equation) ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Local equation) สำหรับเอลิเมนต์นั้น ๆ เมื่อนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันจะได้สมการรวม (Global equation) จากนั้นแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อภายในได้สภาวะสมดุลของภาระภายนอกและเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง

พิจารณาวัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่อง (Continuum domain) รับแรงแบบเป็นจุด ( $F$ ) และแรงแบบกระจาย ( $P$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ ทั้งแรงแบบเป็นจุด แรงแบบกระจาย การกระจัด และเงื่อนไขขอบจะถูกแปลงเป็นค่าลงในแต่ละจุดต่อ ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้หลักการของงานเสมือน ซึ่งมีหลักการสำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงเสมือนของพลังงานความเครียดภายในจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงเสมือนของงานเนื่องจากภาระภายนอก [15]

$$\delta U = \delta V \quad (5)$$

เมื่อ  $U$  คือ พลังงานความเครียดภายใน ( $N.m$ ),  $V$  คือ งานเนื่องจากภาระภายนอก ( $N.m$ ) และ  $\delta$  คือ ตัวดำเนินการเสมือน (Virtual operator) โดยพลังงานความเครียด คือ พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\delta U = \int \{\delta \epsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (6)$$

เมื่อ  $\{\epsilon\}$  คือ เวกเตอร์ความเครียดภายในเอลิเมนต์,  $\{\sigma\}$  คือ เวกเตอร์ความเค้นภายในเอลิเมนต์ ( $N/m^2$ ) และ  $V$  คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์ ( $m^3$ ) การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยแต่ละจุดมีการกระจัดน้อยมากมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัด (Strain-displacement relations) คือ

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (7)$$

เมื่อ  $[B]$  คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์การกระจัดของเอลิเมนต์และสนามความเครียดภายในเอลิเมนต์ ( $m^{-1}$ ) และ  $\{d\}$  คือ การกระจัดที่จุดต่อ ( $m$ ) เนื่องจากเอลิเมนต์ของวัสดุที่มีลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้นมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain relations) คือ

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\} \quad (8)$$

เมื่อ  $[C]$  คือ เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness matrix) เมื่อแทนสมการ (3) และ (4) ในสมการ (2) ทำให้ได้ว่า

$$\delta U = \{\delta d\}^T \int [B]^T [C] [B] \{d\} dV \quad (9)$$

ส่วนงานเสมือนเนื่องจากภาระภายนอก จะประกอบไปด้วยงานเนื่องจากแรงแบบเป็นจุด แรงแบบกระจาย และแรงเฉื่อย โดยงานเสมือนเนื่องจากแรงเฉื่อยสามารถเขียนได้ดังสมการ (10)

$$\delta V_1 = -\{\delta d\}^T \rho I [N]^T [N] (\partial^2 \{d\} / \partial t^2) dV \quad (10)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของเอลิเมนต์ ( $kg/m^3$ ),  $[N]$  คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์ (Shape

function) และ  $t$  คือ เวลา (s) งานเสมือนเนื่องจากแรงแบบกระจายสามารถเขียนได้ดังสมการ (11)

$$\delta V_2 = \{\delta d\}^T \int [N_n]^T \{P\} dA \quad (11)$$

เมื่อ  $[N_n]$  คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์สำหรับการเคลื่อนที่ติดต่อกับพื้นผิว,  $P$  คือ แรงแบบกระจาย ( $N/m^2$ ) และ  $A$  คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์ ( $m^2$ ) งานเสมือนเนื่องจากแรงแบบเป็นจุดสามารถเขียนได้ดังสมการ (12)

$$\delta V_3 = \{\delta d\}^T \{F\} \quad (12)$$

เมื่อ  $\{F\}$  คือ แรงแบบเป็นจุดกระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์ ( $N$ ) แทนสมการ (9) - (12) ในสมการ (5) ทำให้ได้ว่า

$$\begin{aligned} \{\delta d\}^T \int [B]^T [C][B]\{d\} dV = & +\{\delta d\}^T \int [N_n]^T \{P\} dA \\ & +\{\delta d\}^T \{F\} - \{\delta d\}^T \rho \int [N]^T [N](\partial^2 \{d\} / \partial t^2) dV \end{aligned} \quad (13)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการ (14)

$$[K]\{d\} = -[M]\{\ddot{d}\} + \{F^P\} + \{F\} \quad (14)$$

เมื่อ

$$[K] = \int [B]^T [C][B] dV$$

$$[M] = \rho \int [N]^T [N] dV$$

$$\{\ddot{d}\} = \partial^2 \{d\} / \partial t^2 \text{ และ } \{F^P\} = \int [N_n]^T \{P\} dA$$

หากพิจารณาการสั่นสะเทือนแบบอิสระสามารถเขียนสมการ (14) ได้เป็น

$$[M]\{\ddot{d}\} + [K]\{d\} = \{0\} \quad (15)$$

กำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์มอนิกที่มี  $\{d\} = \{\emptyset\}_i \cos(\omega_i t)$  สามารถเขียนสมการ (15) ได้เป็น

$$(-\omega_i^2 [M] + [K])\{\emptyset\}_i = \{0\} \quad (16)$$

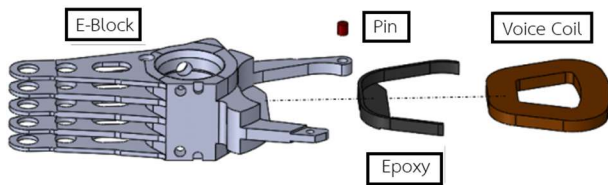
สมการ (16) เป็นปัญหาค่าเฉพาะ (Eigen problem) โดยมีค่า  $\omega_i^2$  เป็นค่าเฉพาะในการหาค่าเฉพาะจะกำหนดให้ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์  $(-\omega_i^2 [M] + [K])$  มีค่าเป็นศูนย์และเมื่อได้ค่าเฉพาะจะสามารถหาความถี่ธรรมชาติได้จากสมการ  $f_i = (\omega_i / 2\pi)$  ส่วนรูปร่างโหมดหรือเวกเตอร์เฉพาะจะได้ออกจากการแทนค่าเฉพาะในสมการ (16)

### 3. วิธีการศึกษา

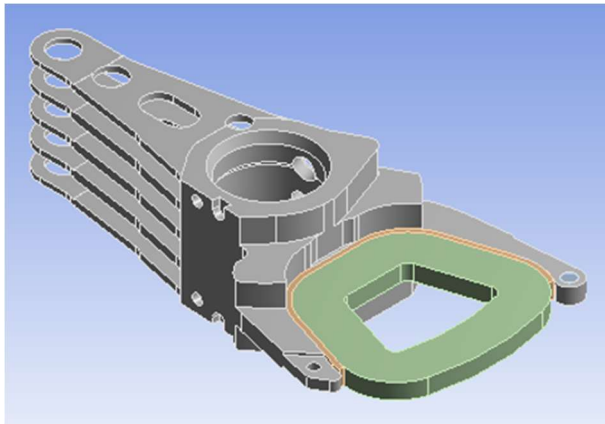
การศึกษาผลของความหนา ความยาวและฟองอากาศใน อีพอกซีของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อการสั่นสะเทือน จะทำการสร้างแบบจำลองสามมิติที่ประกอบด้วยแบบจำลองอี-บล็อก, สลัก (Pin), อีพอกซี และขดลวดเสียง (รูปที่ 4) ใน ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (โปรแกรม ANSYS) โดยแต่ละแบบจำลองจะทำจากวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic) ที่มีพฤติกรรมทางกลอยู่ในช่วงอีลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic) เนื่องจากวัสดุโลหะในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ทำงานภายใต้การเสียรูปเล็กน้อย (Small Strain) ส่วนอีพอกซีในสภาพปกติมีพฤติกรรมใกล้เคียงอีลาสติกเชิงเส้นภายใต้การสั่นสะเทือนขนาดเล็ก [16] ซึ่งคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในแต่ละแบบจำลอง ได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity:  $E$ ) อัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio:  $\nu$ ) และความหนาแน่น (Density:  $\rho$ ) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 จากนั้นจะรวมแบบจำลองทั้งหมดเข้าด้วยกันแบบผนึก (Bonded) ดังแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

| แบบจำลอง   | $E$<br>(GPa) | $\nu$ | $\rho$<br>(kg / m <sup>3</sup> ) |
|------------|--------------|-------|----------------------------------|
| E-Block    | 69.00        | 0.330 | 2710                             |
| Pin        | 193.00       | 0.310 | 7750                             |
| Epoxy      | 12.51        | 0.380 | 1680                             |
| Voice coil | 110.00       | 0.364 | 8690                             |



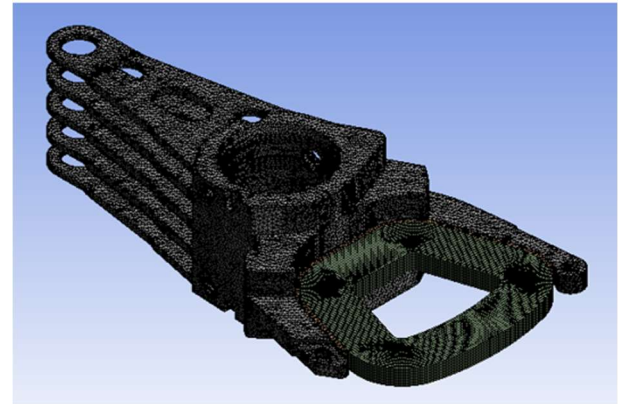
รูปที่ 4 แบบจำลองของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 5 การรวมแบบจำลองของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ โดยเบื้องต้นจะแบ่งแบบจำลองทั้งหมดออกเป็นเอลิเมนต์ชนิดพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) ขนาด 0.18 mm. ซึ่งเป็นขนาดของชิ้นส่วนที่เล็กที่สุดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากนั้นจะปรับขนาดเอลิเมนต์ให้เล็กลงจนกระทั่งความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าสู่สุดท้ายได้แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีเอลิเมนต์จำนวน 286943 เอลิเมนต์ และ 657407 จุดต่อ (รูปที่ 6) การคำนวณ

ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดจะทำการวิเคราะห์แบบโมดัล (Modal analysis) โดยกำหนดให้ผิวด้านบน ด้านล่าง และด้านในของดุม (Hub) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรองรับแบบยึดแน่น (Fix)



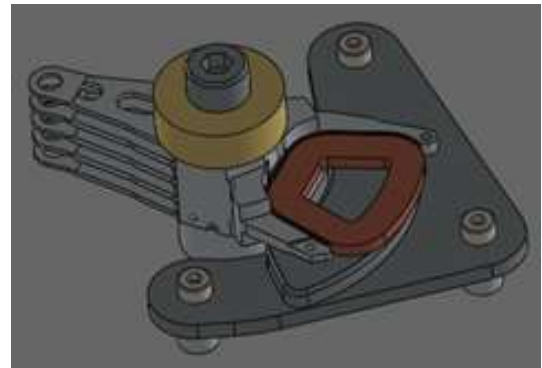
รูปที่ 6 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์

แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะถูกนำมาทดสอบกับการทดสอบด้วยเครื่อง Polytec Scanning Vibrometer 400 (PSV400) โดยจะทำการเปรียบเทียบร้อยละความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมด Arm bending (AB), Arm torsion (AT), Arm sway (AS), Coil bending (CB), Coil torsion (CT), Coil sway (CS), Coil cup (CC) และ Coil high frequency (CHF) ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 (รูปที่ 7) ในการทดสอบ แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกประกอบเข้ากับแกนเพลานพิกเจอร์ (รูปที่ 8) และยึดเข้าที่ด้วยสกรูวัดแรงบิด (Torque driver) จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับผ่านขดลวดเสียงเพื่อกระตุ้นให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นสะเทือนขณะที่เครื่อง PSV400 จะวัดความเร็วในแต่ละจุดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สัญญาณความเร็วถูกแปลงเป็นฟังก์ชันการตอบสนองความถี่ (Frequency response function: FRF) ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier transform: FFT) ค่าจุดยอดบนกราฟฟังก์ชันการตอบสนองความถี่จะคือค่าความถี่ธรรมชาติที่มีการหน่วงของแต่ละโมด [17] เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากไฟไนต์เอลิ

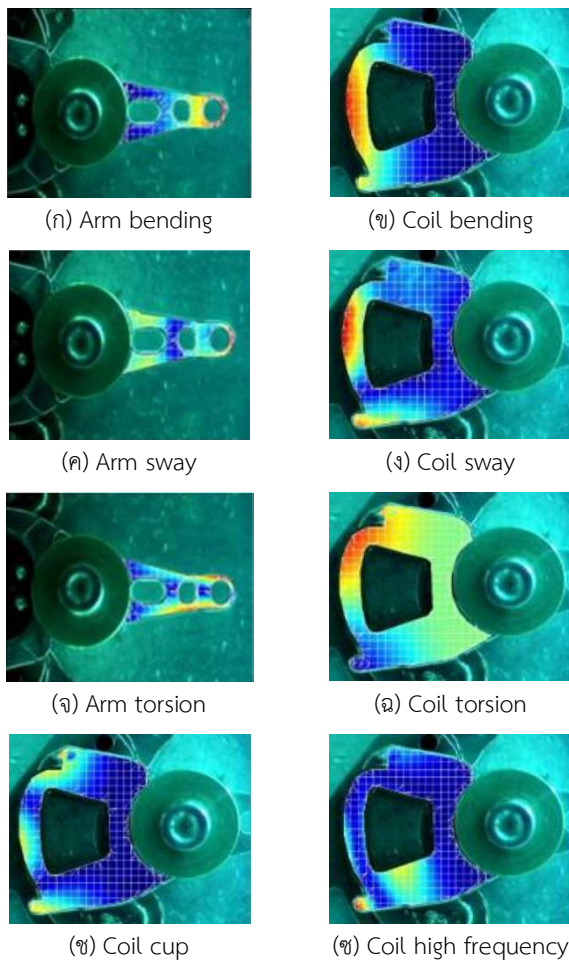
เมนต์ซอฟต์แวร์ พบว่าค่าความถี่ต่างกันเพียงเล็กน้อยเนื่องจากอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าน้อย ดังแสดงในสมการ (17)

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (17)$$

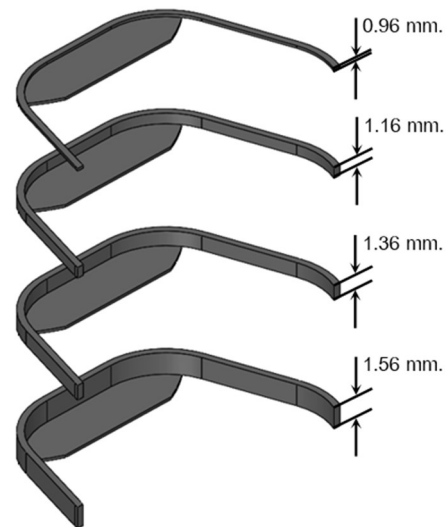
โดย  $f_d$  คือ ความถี่ธรรมชาติที่มีการหน่วง (Hz) และ  $\zeta$  คือ อัตราส่วนการหน่วง



รูปที่ 8 แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์บนฟิกเจอร์

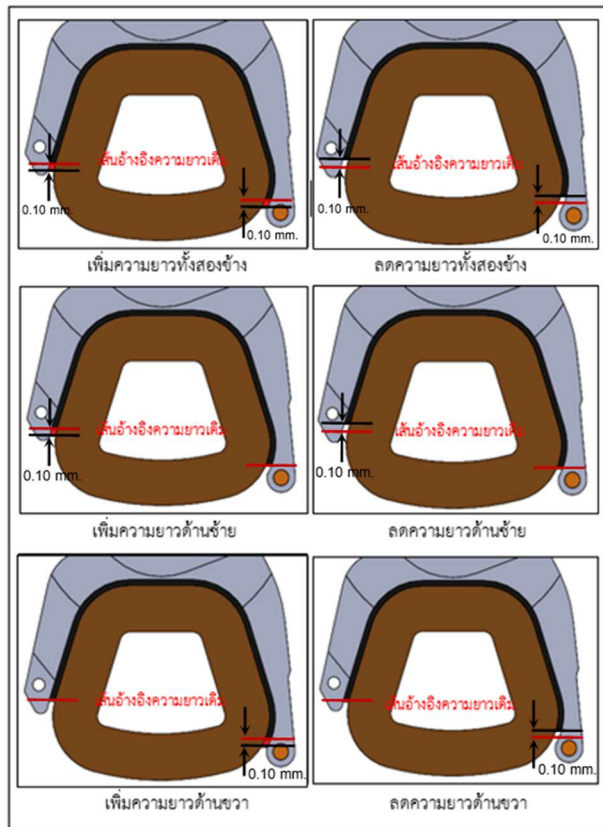


รูปที่ 7 รูปร่างโมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ได้จาก PSV400

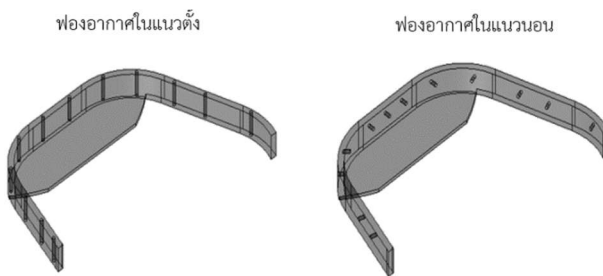


รูปที่ 9 การปรับความหนาของอีพอกซี

แบบจำลองอีพอกซีในแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 8 จะถูกนำมาปรับเปลี่ยนทั้งหมด 12 รูปแบบ ได้แก่ การปรับความหนาของอีพอกซี 4 ระดับ ได้แก่ 1.56, 1.36, 1.16 และ 0.96 mm. โดยอ้างอิงความหนาจากขอบด้านล่างสุด (รูปที่ 9) การปรับเพิ่มและลดความยาวของอีพอกซีอย่างละ 3 รูปแบบ โดยความหนาและความยาวที่เพิ่มหรือลดจะอ้างอิงตามพิกัดความเผื่อต่ำสุดและสูงสุดของ บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด[17] ดังแสดงในรูปที่ 10 และการออกแบบอีพอกซีให้มีฟองอากาศ 2 รูปแบบ ได้แก่ ฟองอากาศในแนวตั้งและแนวนอน ในการจำลอง ได้สร้างฟองอากาศจำนวน 14 ฟอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm. ให้เจาะทะลุผ่านเนื้ออีพอกซี ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 การปรับความยาวของอีพอกซี

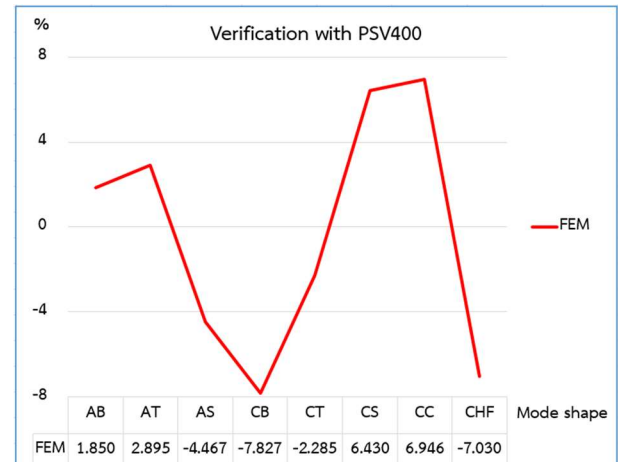


รูปที่ 11 แบบจำลองฟองอากาศในอีพอกซี

#### 4. ผลการศึกษา

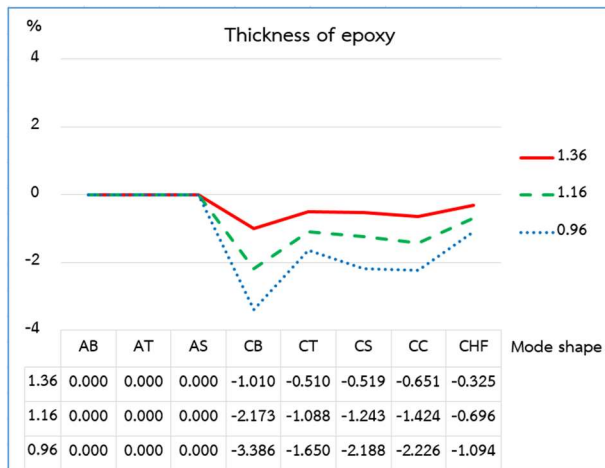
จากการพัฒนาแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ พบว่าความถี่ธรรมชาติทั้ง 8 รูปร่างโมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่ทวนสอบกับการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าร้อยละ 8 (รูปที่ 12) โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 7.827 ที่รูปร่างโมด Coil bending ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจ

เกิดจากค่าพิกัดความถี่ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในกระบวนการผลิตจริง[8] ซึ่งไม่ถูกรวมไว้ในแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ และจากการที่แบบจำลองไม่ได้กำหนดค่าความหน่วงในคุณสมบัติของวัสดุ



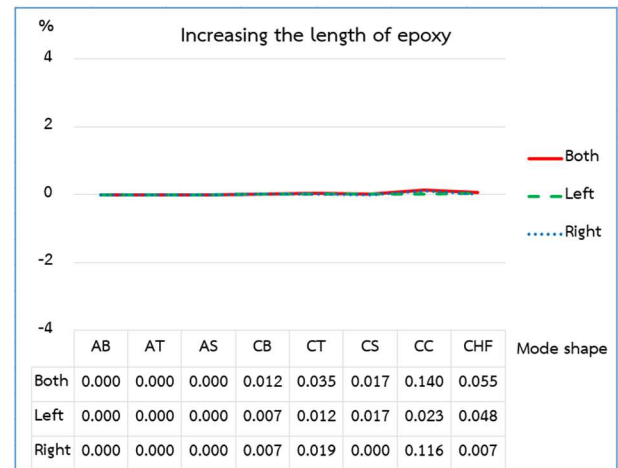
รูปที่ 12 ร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จากการปรับลดความหนาของอีพอกซีจาก 1.56 mm. (มาตรฐาน) เป็น 1.36, 1.16 และ 0.96 mm. พบว่ามีผลต่อความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมด Coil bending, Coil torsion, Coil sway, Coil cup และ Coil high frequency (รูปที่ 13) เนื่องจากการปรับลดความหนาทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ( $I$ ). ในรูปร่างโมดดัดโค้งและรูปร่างโมดแกว่งกวัดลดลง ส่งผลให้ค่าคงตัวสปริง ( $k$ ) ในสมการ (3) ลดลง ส่วนในรูปร่างโมดบิด การปรับลดความหนาส่งผลให้โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัด ( $J$ ) ลดลง ทำให้ค่าคงตัวสปริง ( $k$ ) ในสมการ (4) ลดลงเช่นกัน ดังนั้น การปรับลดความหนาของอีพอกซีเป็น 0.96 mm. จึงส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมด Coil bending, Coil torsion, Coil sway, Coil cup และ Coil high frequency ลดลงมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ที่ความถี่ต่ำลง



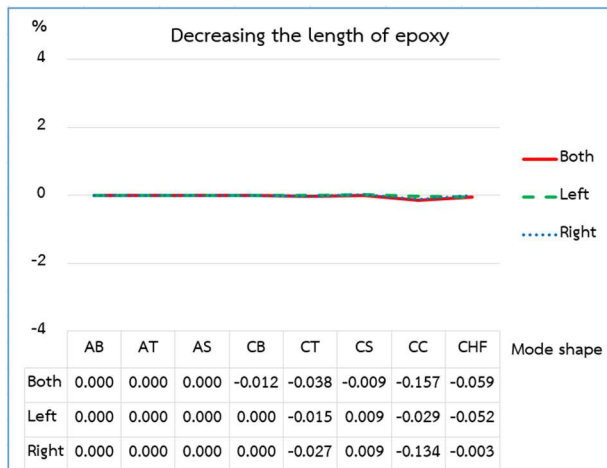
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติจากการปรับลดความหนาของอีพอกซี

จากการปรับเพิ่มและลดความยาวของอีพอกซีอย่างละ 3 รูปแบบ พบว่ามีผลต่อความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมด Coil bending, Coil torsion, Coil sway, Coil cup และ Coil high frequency ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 โดยการเพิ่มความยาวของอีพอกซีจะทำให้พื้นที่จับยึดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\alpha$  ในรูปร่างโมดดัดโค้งและรูปร่างโมดแกว่งกวัด และค่า  $\beta$  ในรูปร่างโมดบิดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าคงตัวสปริง ( $k$ ) ในสมการ (3) และ (4) เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น การปรับเพิ่มความยาวของอีพอกซีทั้งสองข้างจึงส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านคอยล์เพิ่มขึ้นมากที่สุดในทางกลับกัน การปรับลดความยาวของอีพอกซีทั้งสองข้างจะทำให้พื้นที่จับยึดลดลง ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านคอยล์ลดลงมากที่สุด

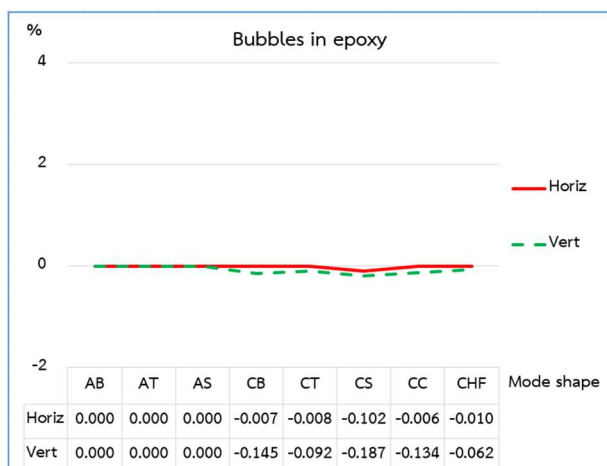


รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติจากการปรับเพิ่มความยาวของอีพอกซี

จากการจำลองอีพอกซีให้มีฟองอากาศในแนวตั้งและแนวนอน พบว่ามีผลต่อความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมด Coil bending, Coil torsion, Coil sway, Coil cup และ Coil high frequency ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยฟองอากาศในอีพอกซีไม่เพียงแต่ทำให้สูญเสียมวล ( $m$ ) ของอีพอกซีเท่านั้น แต่ยังส่งผลให้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ( $I$ ) ในรูปร่างโมดดัดโค้งและรูปร่างโมดแกว่งกวัด และโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัด ( $J$ ) ในรูปร่างโมดบิดลดลง ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่าคงตัวสปริง ( $k$ ) ในสมการ (3) และ (4) อีกด้วย ทั้งนี้ ฟองอากาศในแนวตั้งทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดและโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัดลดลงมากกว่าฟองอากาศในแนวนอน ส่งผลให้ฟองอากาศในแนวตั้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติมากกว่าฟองอากาศในแนวนอน



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติจากการปรับลดความยาวของอีพอกซี



รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติจากการมีฟองอากาศในอีพอกซี

## 5. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีความแม่นยำสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 7.827 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 ทั้งนี้ ขนาดของอีพอกซีและความไม่สมบูรณ์ของอีพอกซีเนื่องจากฟองอากาศส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านคอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการลดความหนาของอีพอกซีส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการเพิ่มความยาวของอีพอกซีช่วยเพิ่มความถี่

ธรรมชาติ ขณะที่การลดความยาวของอีพอกซีส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติลดลง ส่วนความไม่สมบูรณ์ของอีพอกซีเนื่องจากฟองอากาศส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติลดลง โดยฟองอากาศในแนวตั้งมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติมากกว่าฟองอากาศในแนวนอน ในกระบวนการผลิตแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงควรให้ความสำคัญกับการควบคุมความหนาและความยาวของอีพอกซีเป็นลำดับแรก เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อความถี่ธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การควบคุมความสมบูรณ์ของอีพอกซี เช่น การป้องกันฟองอากาศ ควรพิจารณาเพื่อเพิ่มเสถียรของความถี่ธรรมชาติ โดยเฉพาะฟองอากาศในแนวตั้งที่มีผลกระทบมากกว่า

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบและไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Luksameearunothai M. The Structure of Thailand's Hard Disk Drive Sector and International Production Networks: An Input – Output Analysis. *Journal of Multidisciplinary in Humanities and Social Sciences*. 2023;6(1): 448-468.
- [2] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. ส่งออก HDD ปี 62 เติบโตทะลุ 250 ล้านชิ้น ตามการฟื้นตัวของตลาดคอมพิวเตอร์โลก และการย้ายฐานผลิตมาไทยอย่างต่อเนื่อง. เข้าถึงได้จาก: <https://shorturl.at/3NQZn> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 มกราคม 2567].
- [3] เสาวลักษณ์ เขตสูงเนิน. Western Digital ผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ระดับโลกสัญชาติอเมริกันทุ่ม 2.3 หมื่นล้านบาท ขยายฐานผลิตในไทยที่อยุธยาและปราจีนบุรีรองรับ Cloud-Data Center. เข้าถึงได้จาก: <https://shorturl.at/JMKru> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 มกราคม 2567].

- [4] ปัทมา ลงานี. *สถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์*. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2564.
- [5] Pongpanich N, Chatlatanagulchai W. Vibration reduction of hard disk actuator using command shaping. In: The Thailand Research Fund (ed) *Proceedings of 47<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering*, 17-20 March 2009, Bangkok, Thailand. p. 238-245.
- [6] ทศพล บุญเลิศอุทัย, อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์. การศึกษาปัญหาของกาวอีพอกซีต่อกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ*. 2557;8(3): 166-175.
- [7] ฤชา วงษ์ชาลี. *การปรับปรุงกระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2564.
- [8] Phongsrisuk K, Suwan I, Nakthong T, Fanchaeng K. The tolerance effect of natural frequencies of HDD actuator arm. *Journal of Engineering and Innovation*. 2023; 15(1): 1-10.
- [9] Kaitwanidvilai S, Ngamroo I. *FEM with PSO based Non-Uniform Refinement: An Application to Resonance Vibration Analysis in Double Acting Arm*. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang; 2009.
- [10] สุริยา พันธุ์พานิชย์. *การวิเคราะห์เรโซแนนซ์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2553.
- [11] Rao SS. *Mechanical Vibrations*. 5<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.; 2011.
- [12] มนต์รี พิรุณเกษตร. *การสั่นสะเทือนทางกล*. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2548.
- [13] Okawa R, Terada K, Ito K, Watanabe S, Imai T, Tanihira. K. Modal analysis of HDD's actuators. *Fujikura Technical Review*. 2002;31: 7-11.
- [12] Phongsrisuk K, Thongsub K, Mensuwan S, Fanchaeng K. Damper factors affecting the natural frequency of the HDD actuator arm. *Journal of Engineering and Innovation*. 2024; 17(4): 18-27.
- [13] Reddy JN. *Mechanics of laminated composite plates and shells theory and analysis*. Boca Raton: CRC Press LLC.; 2004.
- [14] Cook RD, Malkus DS, Plesha ME. *Concepts and applications of finite element analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2007.
- [15] อิศรพงษ์ สุวรรณ. *ศึกษาผลของพิกัดความถี่ที่มีต่อการสั่นสะเทือนแบบอิสระของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา; 2559.