



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ปัจจัยของแดมเปอร์ที่ส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

Damper factors affecting the natural frequency of the HDD actuator arm

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข^{1*} กรทิพา ทองทรัพย์¹ สุดากรณ์ เม่นสุวรรณ¹ ไกรฤกษ์ พันแจ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

² บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ปทุมธานี 12120

Kullasup Phongsrisuk^{1*} Kornthipa Thongsub¹ Sudakron Mensuwan¹ Krairoek Fanchaeng²

¹ Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300

² Belton Industrial (Thailand) Ltd. Pathumthani 12120

* Corresponding author.

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

วันที่รับบทความ 7 สิงหาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 27 ตุลาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 14 พฤศจิกายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 27 พฤศจิกายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาปัจจัยของแดมเปอร์ที่ส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยการคำนวณความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในรูปร่างโมดัดโค้ง บิดและแกว่งกวัด โดยทวนสอบความถูกต้องของการจำลองกับผลการทดสอบความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่ติดแดมเปอร์ด้วย PSV400 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 7.82 ในรูปร่างโมดัดโค้งและแกว่งกวัดของด้านอาร์ม การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาปัจจัยความหนา โมดูลัสยืดหยุ่นและตำแหน่งในการติดแดมเปอร์ จะแปรผันความหนาของแดมเปอร์สามค่า 0.11 mm 0.15 mm และ 0.19 mm ผันแปรโมดูลัสยืดหยุ่นของแดมเปอร์สามค่า 197 GPa 200 GPa และ 203 GPa และตำแหน่งในการติดแดมเปอร์สามตำแหน่ง ท้าย กลางและปลายแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลการจำลองพบว่า การติดแดมเปอร์ที่ตำแหน่งท้ายและกลางแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดัดโค้งและบิดของด้านอาร์มเพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดัดโค้งและแกว่งกวัดของด้านอาร์มลดลงเมื่อติดแดมเปอร์ที่ตำแหน่งปลายแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ความถี่ธรรมชาติลดลงในทุกูปร่างโมดเมื่อติดแดมเปอร์ที่มีความหนาและโมดูลัสยืดหยุ่นมากในตำแหน่งปลายแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

คำสำคัญ

การสั่นสะเทือน แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ แดมเปอร์

Abstract

This research employed finite element simulation to study the damper factors affecting the natural frequency of the HDD actuator arm by calculating the natural frequency of the HDD actuator arm in the bending, torsion, and sway mode shapes. The accuracy of the simulation was verified by comparing with the PSV400 test results for the natural frequency of the HDD actuator arm without a damper, which had a maximum error of 7.82 percent in the bending and sway mode shapes of the arm side. Finite element simulation, which aimed to investigate the factors of thickness, modulus of elasticity, and damper mounting positions, the damper thickness was varied in three values: 0.11 mm, 0.15 mm, and 0.19 mm. The modulus of elasticity of the damper was mutable in three values: 197 GPa, 200 GPa, and 203 GPa, along with three damper mounting positions: bottom, middle, and end of the HDD actuator arm. The simulation results demonstrated

that mounting a damper on the bottom and middle position of the HDD actuator arm increased the natural frequency in the bending and torsion mode shapes of the arm side. The natural frequency in the bending and sway mode shapes of the arm side decreased when a damper was mounted at the end position of the HDD actuator arm. In all mode shapes, the natural frequency reduced when a high thickness and modulus of elasticity damper were positioned at the end of the HDD actuator arm.

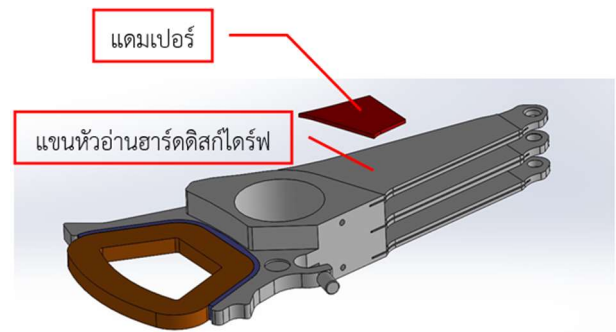
Keywords

vibration, HDD actuator arm, finite element software, damper

1. คำนำ

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive: HDD) จัดเป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญกลุ่มหนึ่งที่ทางรัฐบาลไทยพร้อมให้การส่งเสริมในด้านการลงทุน เนื่องจากประเทศไทยเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สำคัญ โดยมีผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รายใหญ่ของโลก 4 ราย จากประเทศผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้งหมด 12 ราย มาตั้งฐานการผลิตในประเทศไทย มียอดการส่งออกเฉลี่ยปีละ 200,000 ล้านบาท ซึ่งสูงเป็นอันดับสองของโลกรองจากประเทศสิงคโปร์[1] ตามการขยายตัวทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information technology: IT) ทั้งในส่วนของการข้อมูลมหัต (Big data) การพัฒนาระบบเทคโนโลยี 5G รวมไปถึงกลุ่มเงินในรูปแบบของดิจิทัล (Digital) ที่ต้องการฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการจัดเก็บข้อมูลจำนวนมาก[2]

การจัดเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังคงได้รับความนิยมเนื่องจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความทนทานและราคาต่อพื้นที่ยังคงถูกกว่าโซลิดสเตตไดรฟ์ (Solid state drive: SSD) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะจัดเก็บข้อมูลลงบนจานแม่เหล็ก (Platters) โดยมีมอเตอร์หมุนจานแม่เหล็กทำหน้าที่หมุนจานแม่เหล็กให้บริเวณพื้นที่ที่ต้องการอ่าน/เขียนข้อมูล ตรงกับหัวอ่าน/เขียน (Read/Write Head) ซึ่งติดอยู่ที่ปลายแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD Actuator Arm) แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงต้องเคลื่อนที่หมุนกลับไปกลับมาเพื่อทำการอ่าน/เขียนข้อมูล [3] จึงเป็นผลให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นสะเทือนโดยมีรูปร่างโหมด (Mode shape) ที่แตกต่างกันไปตามค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 1 แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีแดมเปอร์

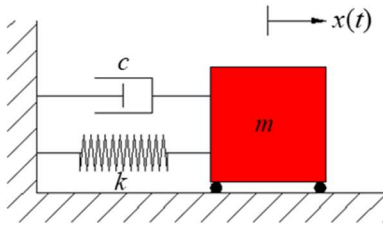
เพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทางบริษัทผู้ผลิตแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงออกแบบแผ่นโลหะที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Nonmagnetic properties) มาติดบนแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเรียกว่าแดมเปอร์ (Damper) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีทั้งแดมเปอร์หนึ่งชั้นแบบแผ่นบาง[4-6] แบบแผ่นบางที่มีบานพับ (Hinge)[7] และแบบแผ่นหนาที่มีความหนามากกว่า 0.15 มิลลิเมตร[8] แดมเปอร์สองชั้นแบบแผ่นบางที่มีคุณสมบัติเชิงกลเหมือนกัน[9] และที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่างกัน [10] แดมเปอร์สำหรับติดตั้งข้างแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [11]

ซึ่งความหนาและคุณสมบัติเชิงกลของแดมเปอร์อาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่การศึกษาเกี่ยวกับแดมเปอร์ยังจำกัดอยู่ที่ผลของตำแหน่งในการติดตั้งแดมเปอร์ที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์[12] งานวิจัยนี้จึงต้องการสร้างแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เพื่อศึกษาผลของความหนาและคุณสมบัติ

เชิงกลของแตรเปอร์ รวมไปถึงตำแหน่งในการติดแตรเปอร์ที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2. ทฤษฎี

2.1 การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 2 แบบจำลองทางกายภาพของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะเป็นการถ่ายเทพลังงานศักย์ (Potential energy) ไปเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) และจากพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานศักย์ ที่มีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม ในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพของการสั่นสะเทือนแบบอิสระของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะแทนแหล่งสะสมพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และการสูญเสียพลังงาน ด้วยมวล สปริงและตัวหน่วง ตามลำดับ (ในรูปที่ 2) ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้เป็น

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1)$$

โดย m คือ มวลของระบบ (kg), c คือ ค่าคงตัวการหน่วงของระบบ (N.s/m), k คือ ค่าคงตัวสปริงของระบบ (N/m), x คือ การกระจัดของมวล (m), $\frac{dx}{dt}$ คือ ความเร็วของมวล (m/s) และ $\frac{d^2 x}{dt^2}$ คือ ความเร่งของมวล (m/s²) ถ้าการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบไม่มีตัวหน่วง ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ได้จะเรียกว่า “ความถี่ธรรมชาติ” [13] ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (2) โดยถ้าระบบมีค่าคงตัวสปริงที่สูงจะทำให้

ระบบมีค่าความถี่ธรรมชาติที่สูง แต่ถ้าระบบมีมวลที่มากจะทำให้ระบบมีค่าความถี่ธรรมชาติที่น้อย

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

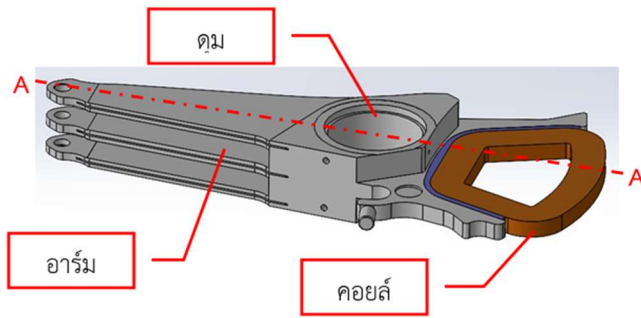
โดย f_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (Hz) ซึ่งจากการพิจารณาแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (รูปที่ 3) ให้เป็นปริซึมสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular prism) [14] โดยมีดุม (Hub) เป็นตัวรองรับทำให้มีปลายด้านหนึ่งรองรับแบบยึดแน่นและปลายอีกด้านหนึ่งรองรับแบบปล่อยอิสระ (รูปที่ 4) ค่าคงตัวสปริงของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในรูปร่างโหมดดัดโค้ง (Bending mode shape) และรูปร่างโหมดแกว่งกวัด (Sway mode shape) ของด้านอาร์มสามารถพิจารณาได้จากค่าคงตัวสปริงของคาน ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$k = \frac{\alpha EI}{L^3} \quad (3)$$

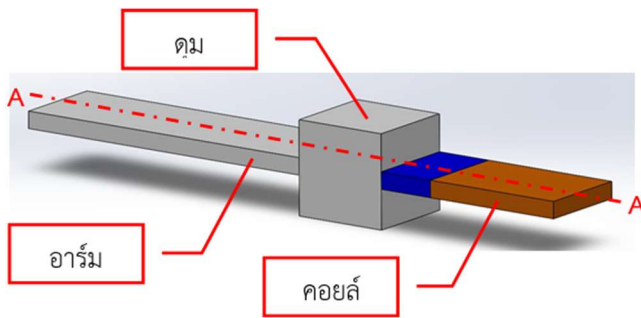
โดย α คือ ค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับการรองรับของคาน, E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (N/m²), I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (m⁴) และ L คือ ความยาวของคาน (m) ส่วนรูปร่างโหมดบิด (Torsion mode shape) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถพิจารณาได้จากค่าคงตัวสปริงของเพลลา ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$k = \frac{\beta GJ}{L} \quad (4)$$

โดย β คือ ค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับการรองรับของเพลลา, G คือ โมดูลัสเฉือน (N/m²), J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัด (m⁴) และ L คือ ความยาวของเพลลา (m)



รูปที่ 3 การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 4 ปริซึมสี่เหลี่ยมมุมฉาก

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีการประมาณที่ใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยประกอบไปด้วยกระบวนการขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์และกระบวนการขั้นตอนการขั้นตอนจะทำการแบ่งแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ออกเป็นเอลิเมนต์ โดยจำนวนเอลิเมนต์จะส่งผลต่อความถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดของแบบจำลอง จากนั้นจะทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ แล้วทำการประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกันทำให้ได้สมการรวม ท้ายสุดของกระบวนการขั้นตอนจะทำการกำหนดเงื่อนไขขอบในสมการรวม ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์จะทำการแก้สมการรวมโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ส่วนกระบวนการขั้นตอนจะเป็นการหาผลลัพธ์ที่ต้องการ ซึ่งก็คือค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีตัวหน่วงของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แบบจำลองทางกายภาพจะประกอบไปด้วย

มวลและสปริง ซึ่งสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการสั่นสะเทือนของระบบมวล-สปริง สามารถเขียนได้เป็น

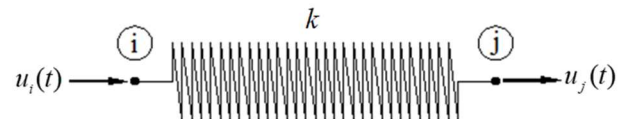
$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = \{0\} \quad (5)$$

โดย $[m]$ คือ เมทริกซ์มวลของเอลิเมนต์ (kg), $[k]$ คือ เมทริกซ์ค่าคงตัวสปริงของเอลิเมนต์ (N/m), $\{u(t)\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดของเอลิเมนต์ (m) และ $\{\ddot{u}(t)\}$ คือ เวกเตอร์ความเร่งของเอลิเมนต์ (m/s²) โดยเมทริกซ์มวลของเอลิเมนต์จะพิจารณาให้มวลของเอลิเมนต์รวมกันเป็นก้อนที่แต่ละปลายของเอลิเมนต์ ทำให้เขียนเมทริกซ์มวลของของเอลิเมนต์ได้เป็น

$$[m] = \frac{m}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ส่วนเมทริกซ์ค่าคงตัวสปริงของเอลิเมนต์จะพิจารณาจากพลังงานศักย์ของเอลิเมนต์ เมื่อกำหนดให้เอลิเมนต์สปริงมีสองจุดต่อ โดยแต่ละจุดต่อจะมีหนึ่งระดับขั้นความเสรี คือ ที่จุดต่อ i จะมีการกระจัดเชิงเส้นในแนวแกนเท่ากับ $u_i(t)$ ส่วนจุดต่อ j จะมีการกระจัดเชิงเส้นในแนวแกนเท่ากับ $u_j(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำให้พลังงานศักย์ของเอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}k[u_j(t) - u_i(t)]^2$ ซึ่งทำให้ได้เมทริกซ์ค่าคงตัวสปริงของเอลิเมนต์เป็น

$$[k] = k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$



รูปที่ 5 เอลิเมนต์สปริง

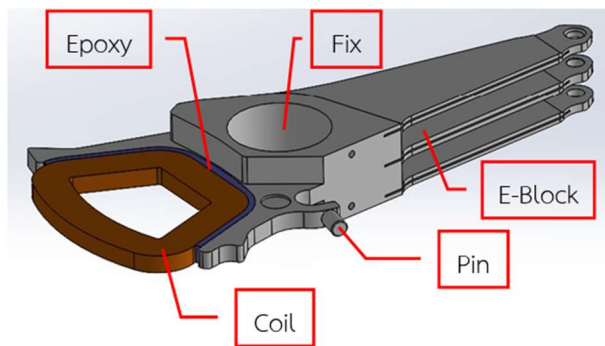
เมื่อประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน จะทำให้ได้สมการรวมเป็น

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{0\} \quad (8)$$

โดย $[M]$ คือ เมทริกซ์มวลของระบบ (kg), $[K]$ คือ เมทริกซ์ค่าคงตัวสปริงของระบบ (N/m), $\{U(t)\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดของระบบ (m) และ $\{\ddot{U}(t)\}$ คือ เวกเตอร์ความเร่งของระบบ (m/s^2) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก $U(t) = U_{\max} \sin(\omega t + \phi)$ ดังนั้นสมการ (8) สามารถเขียนได้เป็น

$$([K] - \omega^2[M])\{U_{\max}\} = \{0\} \quad (9)$$

สมการ (9) เป็นปัญหาค่าเจาะจงโดยมีค่า ω^2 เป็นค่าเจาะจง ส่วนเวกเตอร์เจาะจงจะคือ $\{U_{\max}\}$ ในการหาค่าเจาะจงจะกำหนดให้ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ $([K] - \omega^2[M])$ เท่ากับศูนย์ จากนั้นแทนค่าเจาะจงในสมการ (9) จะทำให้ได้เวกเตอร์เจาะจงซึ่งก็คือรูปร่างโมด



รูปที่ 6 แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3. วิธีการศึกษา

1) แบบจำลอง E-Block, Epoxy, Coil และ Pin ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกสร้างและรวมแบบผนึกเข้าด้วยกัน (Bonded) ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ โปรแกรม ANSYS โดยผิวด้านในของดุมจะถูกรองรับแบบยึดแน่น (Fix) ดังแสดงในรูปที่ 6 ในการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จะกำหนดคุณสมบัติเชิงกล อันได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity: E

) อัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio: ν) และความหนาแน่น (Density: ρ) ตามตารางที่ 1 โดยมวลจะได้จากการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ส่วนการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์นั้น จะพิจารณารูปร่างทางเรขาคณิตและชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กที่สุด (0.914 mm) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติชนิดพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedral element) ให้มีขนาด 0.910 mm ถึง 0.110 mm ทำให้ได้แบบจำลองที่มี 2,343,264 เอลิเมนต์ และ 3,630,808 จุดต่อ โดยเอลิเมนต์มีขนาดเล็กที่สุด 0.200 mm ซึ่งทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมด Arm bending, Arm torsion, Arm sway, Coil bending, Coil torsion, Coil sway, Coil cup และ Coil high frequency อยู่ภายในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมด ระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับการทดสอบโดยการวัดและแสดงผลด้วย Polytec Scanning Vibrometer 400 (PSV400) ไม่เกินร้อยละ 8 โดยการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 นั้น แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกติดตั้งบนฟิกเจอร์ (Fixture) จากนั้นจะสแกนแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยเลเซอร์จากหัวยิงเลเซอร์ (รูปที่ 7) โดยทำการเลื่อนตำแหน่งเลเซอร์ไปตามพื้นผิวแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คอมพิวเตอร์จะทำการสร้างจุดสำหรับการสแกน ในการสแกนจะบ่อนความถี่ไฟฟ้าไปยังคอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นสะเทือน เลเซอร์จะทำการสแกนไปตามจุดที่ได้สร้างไว้ ซึ่งจะทำให้ได้รูปร่างโมดด้านอาร์มและด้านคอยล์ ดังแสดงในตารางที่ 2

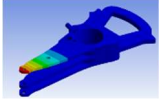
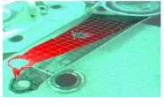
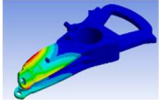
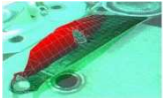
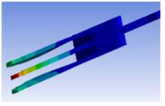
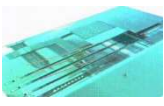
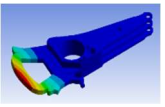
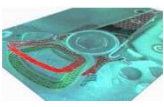
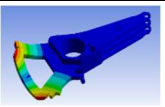
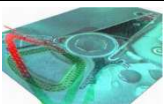
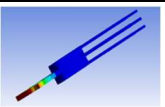
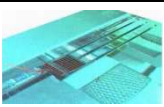
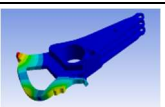
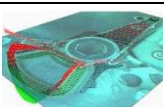
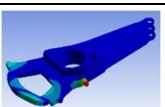
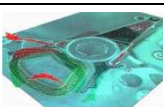


รูปที่ 7 เครื่อง PSV400^[16]

ตารางที่ 1. คุณสมบัติเชิงกลของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์^[12, 15]

แบบจำลอง	E-Block	Epoxy	Coil	Pin
มอดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	68.9	1.45	90	200
อัตราส่วนปัวซองส์	0.33	0.29	0.34	0.28
ความหนาแน่น (kgm ³)	2700	720	5470	7600
มวล (g)	17.066	0.493	3.745	0.067

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแบบจำลอง

Mode	FEM	PSV400	%Error
Arm bending			7.82
	1712.00 Hz	1578.20 Hz	
Arm torsion			6.77
	10480.00 Hz	11189.00 Hz	
Arm sway			7.82
	11552.00 Hz	12455.00 Hz	
Coil bending			7.44
	1712.00 Hz	1584.70 Hz	
Coil torsion			5.90
	3344.00 Hz	3146.80 Hz	
Coil sway			6.46
	6048.00 Hz	6439.00 Hz	
Coil cup			3.99
	7600.00 Hz	7296.50 Hz	
Coil high frequency			6.61
	13968.00 Hz	13045.00 Hz	

2) แบบจำลองแตรเปอร์ที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กจะถูกสร้างและรวมแบบฝึกเข้าด้วยกันกับแบบจำลอง E-Block, Epoxy, Coil และ Pin ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ โปรแกรม ANSYS เพื่อศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อันได้แก่ Arm bending, Arm torsion และ Arm sway โดยจะทำการแปรผันความหนาของแตรเปอร์ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.11 mm, 0.15 mm และ 0.19 mm และติดแตรเปอร์บนแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งปลาย ตำแหน่งกลางและตำแหน่งท้ายของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (รูปที่ 8) ส่วนคุณสมบัติเชิงกลของแตรเปอร์จะใช้วัสดุที่มีความหนาแน่น 7600 kg/m³ อัตราส่วนปัวซองส์ 0.28 โดยทำการแปรผันค่ามอดูลัสยืดหยุ่นทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 197 GPa, 200 GPa และ 203 GPa ซึ่งจะทำให้แบบจำลองแตรเปอร์มีมวลดังแสดงในตารางที่ 3

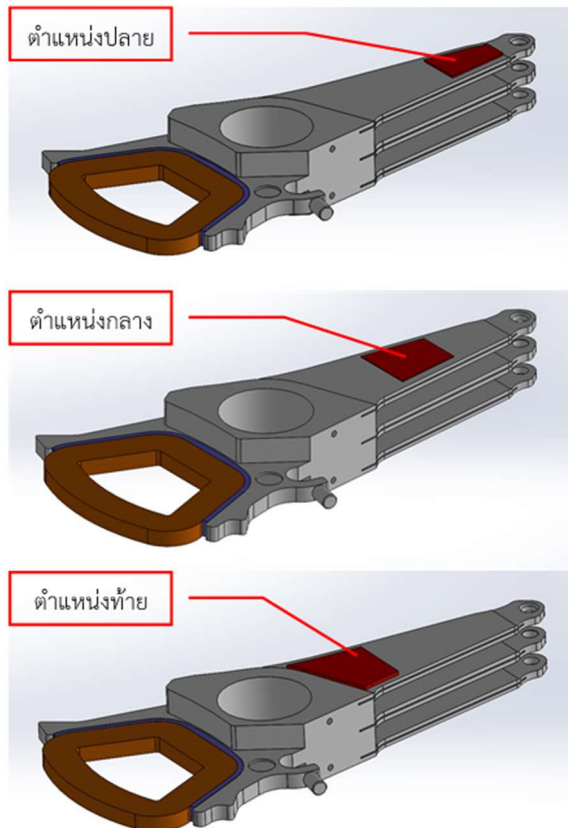
ตารางที่ 3. มวลของแตรเปอร์ (μg) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ตำแหน่ง	0.11 (mm)	0.15 (mm)	0.19 (mm)
ท้าย	55.795	76.084	96.373
กลาง	49.305	67.234	85.163
ปลาย	33.039	45.053	57.067

4. ผลการศึกษา

1) จากการทดสอบแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับการทดสอบโดยการวัดและแสดงผลด้วย PSV400 พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบด้วย PSV400 ไม่เกินร้อยละ 8 (ตารางที่ 2) โดยความคลาดเคลื่อนเกิดจากค่าพิสัยความเผื่อ (Tolerance) ในการผลิตแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงทำให้ขนาดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่นำไปทดสอบด้วย PSV400 มีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ซึ่งขนาดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมด[17] รวมไปถึงการกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลให้แก่แบบจำลองคอยล์ในแขนหัวอ่าน

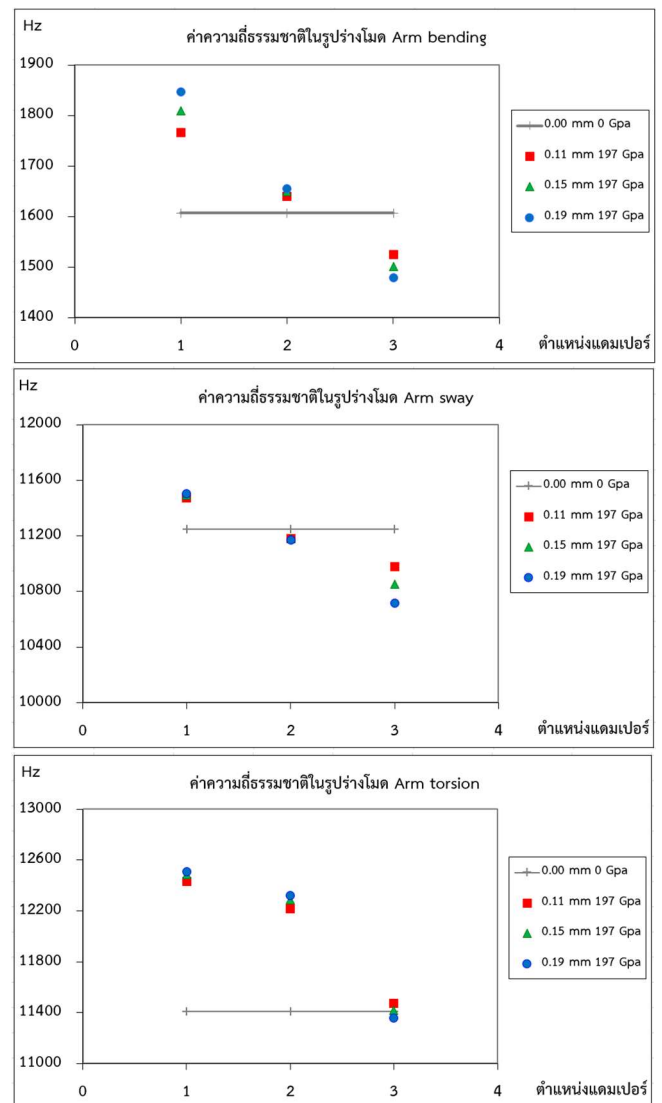
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งยังคงเป็นค่าประมาณ[18] จึงทำให้เมทริกซ์มวลของระบบ $[M]$ และเมทริกซ์ค่าคงตัวสปริงของระบบ $[K]$ ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าการทดสอบด้วย PSV400



รูปที่ 8 ตำแหน่งในการติดแอมเปอร์

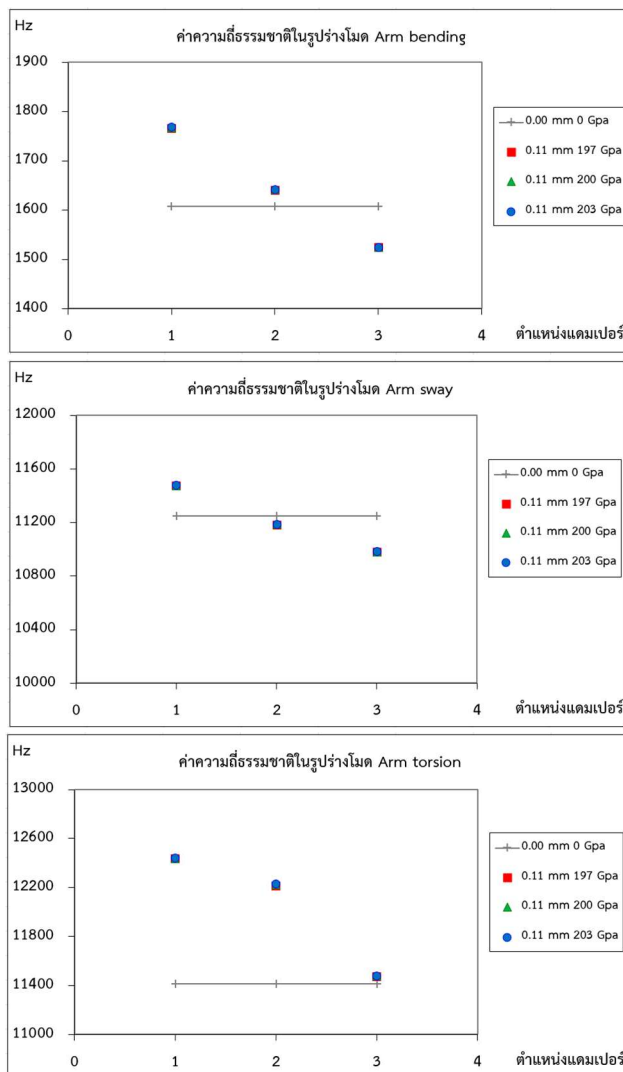
2) จากการที่แอมเปอร์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ส่วนแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีลักษณะเป็นแผ่น จึงทำให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ติดแอมเปอร์มีลักษณะเป็นแผ่นวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) ซึ่งค่าคงตัวสปริงของรูปร่างโมดัดโค้งและแกว่งกวัดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งเกร็งดัด (Bending stiffness) ส่วนค่าคงตัวสปริงของรูปร่างบิดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งเกร็งเชื่อมต่อ (Coupling stiffness) ซึ่งทั้งสองค่าจะขึ้นอยู่กับความหนาและมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นวัสดุเชิง

ประกอบแต่ละชั้น[19] การที่แอมเปอร์มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงกว่าแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประมาณ 3 เท่า จึงทำให้การติดแอมเปอร์ส่งผลต่อค่าคงตัวสปริง (k) ของระบบ แต่การที่แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีมวลมากกว่าแอมเปอร์ประมาณ 177-517 เท่า จึงทำให้การติดแอมเปอร์ไม่ส่งผลต่อมวล (m) ของระบบ เมื่อพิจารณาสมการ (2) จึงทำให้ได้ว่าการติดแอมเปอร์จะส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติแต่ละรูปร่างโมดในดำนอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 9 ผลของการแปรผันความหนาของแอมเปอร์

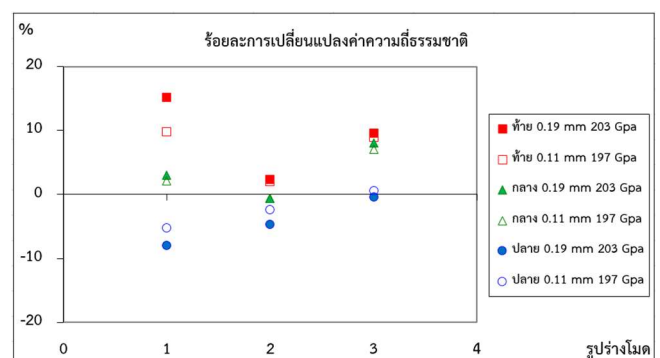
3) จากการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการติดแอมเปอร์หนา 0.11 mm, 0.15 mm และ 0.19 mm โดยมีความอดุลย์ยืดหยุ่นและตำแหน่งในการติดแอมเปอร์เหมือนกัน พบว่าความหนาของแอมเปอร์ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มเมื่อเทียบกับแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่ติดแอมเปอร์ (0.00 mm 0 GPa) ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากความหนา (h) จะส่งผลต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (I และ J) ซึ่งเมื่อโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดมีการเปลี่ยนแปลงมากจะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงมากตาม ทำให้แอมเปอร์ที่มีความหนา 0.19 mm จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มมากกว่าแอมเปอร์ที่มีความหนา 0.15 mm และ 0.11 mm ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลของการแปรผันค่าความอดุลย์ยืดหยุ่นของแอมเปอร์

4) จากการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการติดแอมเปอร์ด้วยค่าความอดุลย์ยืดหยุ่น 197 GPa, 200 GPa และ 203 GPa โดยมีความหนาของแอมเปอร์และตำแหน่งในการติดแอมเปอร์เหมือนกัน พบว่าค่าความอดุลย์ยืดหยุ่นของแอมเปอร์ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มเมื่อเทียบกับแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่ติดแอมเปอร์ (รูปที่ 10) โดยถ้าค่าความอดุลย์ยืดหยุ่น (E) มีการเปลี่ยนแปลงมาก จะทำให้ค่าความอดุลย์เฉือน (G) และค่าความถี่ธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงมากตาม ทำให้แอมเปอร์ที่มีความอดุลย์ยืดหยุ่น 203 GPa จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มมากกว่าแอมเปอร์ที่มีความอดุลย์ยืดหยุ่น 200 GPa และ 197 GPa ตามลำดับ

5) จากการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการติดแอมเปอร์ตำแหน่งปลาย ตำแหน่งกลางและตำแหน่งท้ายของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีความหนาและค่าความอดุลย์ยืดหยุ่นของแอมเปอร์เหมือนกัน พบว่าตำแหน่งในการติดแอมเปอร์ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์ม (รูปที่ 11) โดยการติดแอมเปอร์ตำแหน่งท้ายของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มมากกว่าแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่ติดแอมเปอร์ การติดแอมเปอร์ตำแหน่งกลางของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีแนวโน้มให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มมากกว่าแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่ติดแอมเปอร์ ส่วนการติดแอมเปอร์ตำแหน่งปลายของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดด้านอาร์มน้อยกว่าแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไม่ติดแอมเปอร์



รูปที่ 11 ผลของการแปรผันตำแหน่งในการติดแอมเปอร์

5. สรุปผลการศึกษา

ความหนาและคุณสมบัติเชิงกลของแฉกเพอร์บอนแนทหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยแฉกเพอร์ที่มีความหนาและค่าคุณสมบัติเชิงกลมากจะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มมีการเปลี่ยนแปลงมาก ส่วนตำแหน่งในการติดตั้งแฉกเพอร์บอนแนทหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลต่อการเพิ่มหรือลดค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการติดตั้งแฉกเพอร์ตำแหน่งท้ายของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มเพิ่มขึ้น การติดตั้งแฉกเพอร์ตำแหน่งกลางของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีแนวโน้มให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มเพิ่มขึ้น ส่วนการติดตั้งแฉกเพอร์ตำแหน่งปลายของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มลดลง จึงทำให้การติดตั้งแฉกเพอร์ที่มีความหนาและค่าคุณสมบัติเชิงกลมากในตำแหน่งปลายของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มลดลงมากที่สุด และการติดตั้งแฉกเพอร์ที่มีความหนาและค่าคุณสมบัติเชิงกลมากในตำแหน่งท้ายของแฉกหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโมดด้านอาร์มเพิ่มขึ้นมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณโครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) ประจำปีงบประมาณ 2559 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณตลอดโครงการวิจัย และขอขอบคุณบริษัท เบลตันอินดัสเทรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบและไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Business and Industry Development. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: www.nectec.or.th/bid/hotissue.html [เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม 2565].
- [2] เฉลิมชัย ศิรินันทวิทยา. HTECH ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พุ่ง เจาะตลาดสหรัฐ-เวียดนาม. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: <https://thunhoon.com/article/238960> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 มิถุนายน 2565].
- [3] กองบรรณาธิการ บริษัท โพรวิชั่น. *มือใหม่หัดใช้คอมพิวเตอร์ 2007 ฉบับสมบูรณ์*. กรุงเทพฯ: โพรวิชั่น; 2550.
- [4] Lowry MG. Damped high strain region beam for a disk drive head suspension. *United States Patent*. 2012:US 8, 213,122 B1.
- [5] Renken FP, Hammel BD, McReynolds DP, Bhattacharya S. Head suspension with vibration damping for a data storage device. *United States Patent*. 2009:US 7,551,400 B2.
- [6] Chen SH, Chang S, Tseng CW. Method and apparatus for at least one actuator arm damper covering at least one lightening hole in a hard disk drive to reduce track mis-registration (TMR). *United States Patent*. 2011:US 2011/0211280 A1.
- [7] Lowry MG, Bjorstrom JD. Disk drive head suspension with damper hinge. *United States Patent*. 2011:US 7,933,097 B1.
- [8] Dominguez M, Huang FY, Kerner JA, Radwan H. Tuned damper for disk drive actuator arm. *United States Patent*. 2008:US 7,352,537 B2.
- [9] Witting LE, Dobosz S. Damper for attenuating hard disk drive suspension vibration. *United States Patent*. 2004:US 6,697,225 B2.
- [10] Hahn P, Misuta S. Disk drive suspension having dual vibration damper. *United States Patent*. 2016:US 9,368,129 B1.
- [11] Nguyen T. Disk drive with transverse plane damper. *United States Patent*. 2013: US 8,345,387 B1.
- [12] Ruangsinchaiwanich S, Phanphanit S. Influence of damper position on multi-arm actuator resonance in HDD. In IEEE (ed.) *2009 International Conference on Electrical Machines and System*, 15-18 November 2009, Tokyo, Japan. p. 1-6.

- [13] มนตรี พิรุณเกษตร. *การสั่นสะเทือนทางกล*. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2548.
- [14] 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.
- [15] Puengkhom V, Thongsri J, Pimsarn M. On finite element modeling aspect of HDD's head stack assembly vibration analysis. In: *Proceeding of The 5th Thai Society of Mechanical Engineers, International Conference on Mechanical Engineering*, 17-19 December 2014, Chiangmai, Thailand. AMM055-p. 67.
- [16] อิศรพงษ์ สุวรรณ. *การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา; 2559.
- [17] Phongsrisuk K, Suwan I, Nakthong T, Fanchaeng K. The tolerance effect of natural frequencies of HDD actuator arm. *Journal of Engineering and Innovation*. 2022; 15(1): 1-10.
- [18] Phongsrisuk K, Jana K, Nakthong T, Fanchaeng K. The effect of the position constraining of HDD actuator arm to the natural frequencies. *UBU Engineering Journal*. 2021; 14(4): 38-47.
- [19] Phongsrisuk K, Phewdum A, Sonyam P. Estimation of natural frequency of composite plate with three edge clamped and the other edge free. *Engineering Journal Chiang Mai University*. 2021; 28(1): 185-194.