



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองคอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

Coil model development of HDD actuator arm by using finite element software

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข^{1*} อธิชัย นาคทอง¹ กฤษฎา จะนา¹ สุดากรณ์ เม่นสุวรรณ¹ ไกรฤกษ์ ฟันแจ่ง²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

² บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ปทุมธานี 12120

Kullasup Phongsrisuk^{1*} Thitichai Nakthong¹ Kitsada Jana¹ 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 12 เมษายน 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 15 มิถุนายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ 9 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองคอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เนื่องจากแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติในส่วนทางด้านคอยล์อยู่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 จึงทำการสร้างแบบจำลองคอยล์สามรูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุออร์ทोटโรพิก และแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุออร์ทोटโรพิก มีร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 ใกล้เคียงกัน โดยด้านอาร์มมีร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติน้อยกว่าร้อยละ 1 ส่วนด้านคอยล์มีร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติน้อยกว่าร้อยละ 12 แต่จะใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและประมวลผลที่มากกว่า

คำสำคัญ

แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คอยล์ การสั่นสะเทือน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research was to develop a coil model of the HDD actuator arm by using finite element software. Since the HDD actuator arm model still had a high percentage error of natural frequencies on the coil side, compared with the PSV400 test results. Three types of coil models were created by making a solid body coil model made of isotropic material, a solid body coil model made of orthotropic material, and a spring-like coil model made of isotropic material. From the research results, the spring-like coil model made of isotropic material, the solid body coil model made of isotropic material and the solid body coil model made of orthotropic material had a similar percentage error of natural frequencies, which are the natural frequencies of these models compared with the natural frequencies from the samples which were tested by the PSV400. The arm side had a percentage error of natural frequencies of less than 1%. On the coil side, the

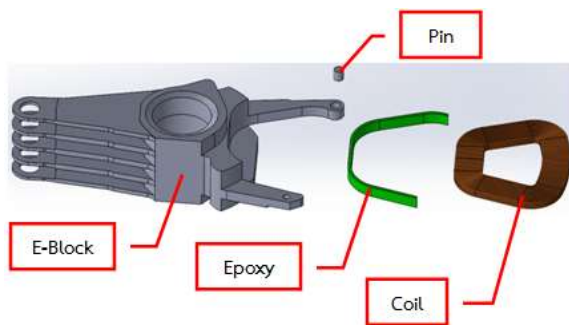
percentage error of natural frequencies was less than 12%. However, it took more time to produce the model as well as to process it.

Keywords

HDD actuator arm; coil; vibration; finite element model

1. คำนำ

ประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถบอกได้ด้วย อัตราการไหลของข้อมูล (Data rate) และเวลาในการค้นหา ร่อง (Seek time) โดยอัตราการไหลของข้อมูล คือ จำนวนไบต์ ต่อวินาที ที่แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD actuator arm) สามารถส่งไปยังหน่วยประมวลผล (Central processing unit: CPU) ส่วนเวลาในการค้นหาร่อง คือ เวลาที่ข้อมูลถูกส่งไปยัง หน่วยประมวลผล[1] ซึ่งเวลาในการค้นหาร่องสามารถลดลงได้ ถ้าหัวอ่าน/เขียน (Read/Write head) ที่ปลายแขนหัวอ่าน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อ่าน/เขียนข้อมูลจากจานแม่เหล็ก (Platters) ได้เร็วขึ้น โดยการอ่าน/เขียนข้อมูลจากจานแม่เหล็กจะอาศัย การเคลื่อนที่หมุนกลับไปกลับมาของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ ซึ่งเป็นผลให้แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการ สั่นสะเทือน



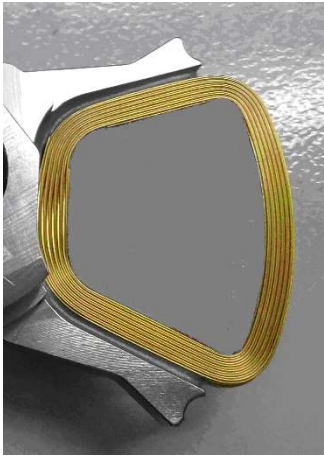
รูปที่ 1 แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ได้ถูกนำมาใช้ทำนายการ สั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทำการสร้าง แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในคอมพิวเตอร์ จากนั้น ทำการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง ทำให้สามารถ ปรับปรุงแก้ไขจนแน่ใจว่า แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มี คุณสมบัติตามที่ต้องการ ก่อนที่จะนำไปผลิตจริง และใน อนาคตหากมีการปรับเปลี่ยนรูปทรง (Geometry) หรือขนาด (Dimension) หรือวัสดุ (Material) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

ไดรฟ์ ก็สามารถทำได้โดยทำการปรับเปลี่ยนในไฟไนต์เอลิเมนต์ ซอฟต์แวร์ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลา ลดปริมาณการทดสอบจริง และลดปริมาณของเสียที่อาจจะเกิดขึ้น อันจะเป็นการลด ต้นทุนในการผลิตให้กับบริษัทผู้ผลิตแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ และยังเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทาง การค้า

แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะประกอบไปด้วย แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ยังไม่ได้ประกอบ คอยล์ (E-Block) แบบจำลองอีพอกซี (Epoxy) แบบจำลอง คอยล์ (Coil) และแบบจำลองสลัก (Pin) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่ง จากการกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลให้แบบจำลองคอยล์ที่เป็น วัสดุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material) พบว่าการสั่นสะเทือนในส่วน of คอยล์ยังมีความคลาดเคลื่อน จากการทดสอบจริงอยู่มาก[2-9] จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลอง คอยล์ที่เป็นวัสดุทรงตันทำจากวัสดุออร์ทोटโรปิค (Orthotropic material) ซึ่งพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริง ลดลง[5, 7, 10]

เพื่อให้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถทำนายการ สั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้อย่างแม่นยำ การพัฒนาแบบจำลองคอยล์จึงมีความจำเป็น และเนื่องจาก การขึ้นรูปคอยล์ของบริษัทผู้ผลิตแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะ เป็นการนำลวดทองแดงมาวนทับกันคล้ายสปริง (Spring) ดัง แสดงในรูปที่ 2 งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาแบบจำลองคอยล์ที่ มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก เปรียบเทียบกับ แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัสดุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก และแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัสดุทรงตันทำจากวัสดุออร์ทोटโรปิค ในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำและเวลาในการ ประมวลผล

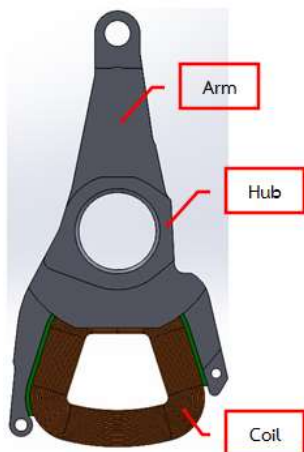


รูปที่ 2 คอยล์ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2. ทฤษฎี

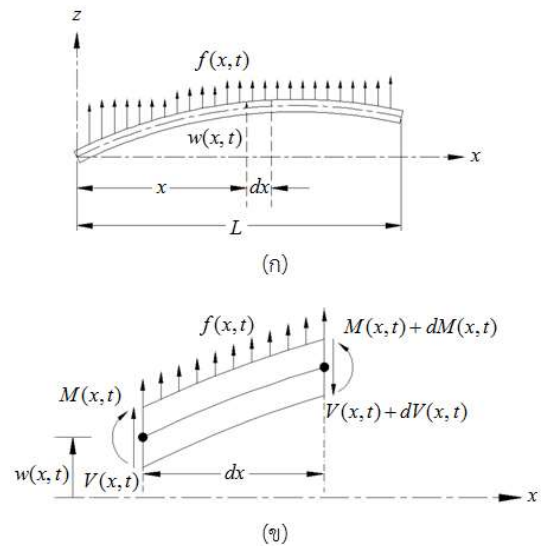
2.1 การสั่นสะเทือน

แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพิจารณาให้เป็นคานย่น[2] โดยมีดุมล้อ (Hub) เป็นตัวรองรับแบบยึดแน่น (Fix) ปลายคานย่นด้านหนึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของด้านอาร์ม (Arm) และปลายคานย่นอีกด้านหนึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของด้านคอยล์ (Coil) ดังแสดงในรูปที่ 3 จึงทำให้พิจารณาการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นการสั่นสะเทือนตามแนวขวางของคานและการสั่นสะเทือนแบบบิดของเพลลา



รูปที่ 3 การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.1.1 การสั่นสะเทือนตามแนวขวางของคาน



รูปที่ 4 การสั่นสะเทือนตามแนวขวางของคาน

การสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง (Bending vibration) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ส่วนการสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัด (Sway vibration) ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวาในแนวระนาบของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสามารถพิจารณาการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและการสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระตามแนวขวางของคานได้ และเมื่อพิจารณาคานในรูปที่ 4 สามารถเขียนสมการกำกับ (Governing equation) ได้ดังสมการ (1)

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

โดย E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (N/m^2), I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (m^4), w คือ การกระจัดในแนวแกน z (m), ρ คือ ความหนาแน่นของคาน (kg/m^3) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน (m^2) ในกรณีที่คานมีการรองรับแบบยึดแน่นและปล่อยอิสระ สามารถเขียนสมการรูปร่างโมดได้เป็น

$$W(x) = C_n [\sin \beta_n x - \sinh \beta_n x - \alpha_n (\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x)]$$

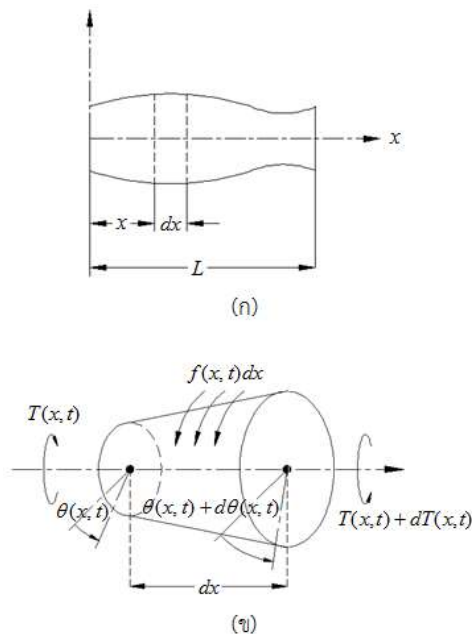
โดย C_n คือ ค่าคงตัว และ $\alpha_n = \left(\frac{\sin \beta_n L + \sinh \beta_n L}{\cos \beta_n L + \cosh \beta_n L} \right)$ และสามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติได้เป็น

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

โดย β_n สามารถหาได้จากสมการความถี่ (Frequency equation)

$$\cos(\beta_n L) \cdot \cosh(\beta_n L) = -1$$

2.1.2 การสั่นสะเทือนแบบบิดของเพล



รูปที่ 5 การสั่นสะเทือนแบบบิดของเพล

การสั่นสะเทือนแบบบิด (Torsion vibration) ของแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นการเคลื่อนที่บิดกลับไปกลับมาของแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระแบบบิดของเพลได้ และเมื่อพิจารณาเพลในรูปที่ 5 สามารถเขียนสมการกำกับได้ดังสมการ (3)

$$GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = I_o \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (3)$$

โดย G คือ มอดุลัสเฉือน (N/m^2), J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัด (m^4), θ คือ การกระจัดเชิงมุมในแนวแกน x (rad) และ I_o คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลในแนวแกน x ($kg.m^2$) ในกรณีที่เพลมีการรองรับแบบยึดแน่นและปล่อยอิสระ สามารถเขียนสมการรูปร่างโมดได้เป็น

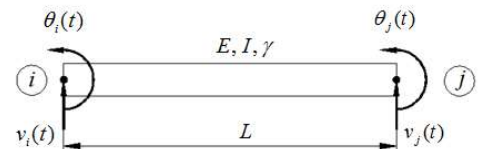
$$\Theta(x) = C_n \sin \frac{(2n+1)\pi x}{2L}$$

โดย C_n คือ ค่าคงตัว และสามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติได้เป็น

$$\omega_n = \frac{(2n+1)\pi}{2L} \sqrt{\frac{GJ}{I_o}} \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (4)$$

2.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2.1 การสั่นสะเทือนตามแนวขวางของคาน



รูปที่ 6 เอลิเมนต์คาน

เอลิเมนต์คานมีความยาว L (รูปที่ 6) ประกอบด้วยสองจุดต่อ (Node) โดยแต่ละจุดต่อจะมีสองระดับขั้นความเสรี คือ จะมีการกระจัดเชิงเส้นในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน และการกระจัดเชิงมุมในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน จึงทำให้เอลิเมนต์คานมีตัวไม่ทราบค่าสี่ค่า คือ $v_i(t)$, $\theta_i(t)$, $v_j(t)$ และ $\theta_j(t)$ ซึ่งสามารถเขียนเมทริกซ์สตีฟเนส $[k]$ และเมทริกซ์มวล $[m]$ ของเอลิเมนต์คานได้เป็น

$$[k] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$[m] = \frac{\gamma L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

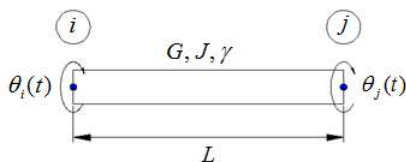
เมื่อประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน จะทำให้ได้สมการการสั่นสะเทือนแบบอิสระตามแนวขวางของคานเป็น[11]

$$[M]\{\ddot{v}(t)\} + [K]\{v(t)\} = \{0\} \quad (5)$$

ในการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก $v(t) = v_{\max} \sin(\omega t + \phi)$ ดังนั้นสมการ (5) สามารถเขียนได้เป็น

$$([K] - \omega^2[M])\{v_{\max}\} = \{0\} \quad (6)$$

2.2.2 การสั่นสะเทือนแบบบิดของเพลลา



รูปที่ 7 เอลิเมนต์เพลลา

เอลิเมนต์เพลลามีความยาว L (รูปที่ 7) ประกอบด้วยสองจุดต่อ โดยแต่ละจุดต่อจะมีหนึ่งระดับชั้นความเสรี คือ จะมีการกระจัดเชิงมุมในแนวแกน จึงทำให้เอลิเมนต์เพลลามีตัวไม่ทราบค่าสองค่า คือ $\theta_i(t)$ และ $\theta_j(t)$ ซึ่งสามารถเขียนเมทริกซ์สทียเฟเนส $[k]$ และเมทริกซ์โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงชั่วของมวล $[i_o]$ ของเอลิเมนต์เพลลาได้เป็น

$$[k] = \frac{GJ}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[i_o] = \frac{\gamma L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

เมื่อประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน จะทำให้ได้สมการการสั่นสะเทือนแบบอิสระตามแนวขวางของเพลลาเป็น[11]

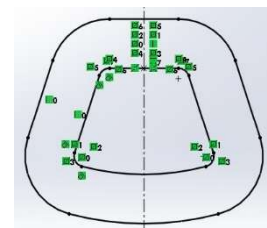
$$[I_o]\{\ddot{\theta}(t)\} + [K]\{\theta(t)\} = \{0\} \quad (7)$$

ในการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก $\theta(t) = \theta_{\max} \sin(\omega t + \phi)$ ดังนั้นสมการ (7) สามารถเขียนได้เป็น

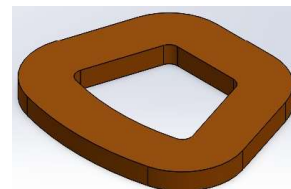
$$([K] - \omega^2[I_o])\{\theta_{\max}\} = \{0\} \quad (8)$$

3. วิธีการศึกษา

การพัฒนาแบบจำลองคอยล์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์นั้น จะทำการสร้างแบบจำลองคอยล์สามรูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิก และแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก



(ก) แบบจำลองสองมิติของคอยล์

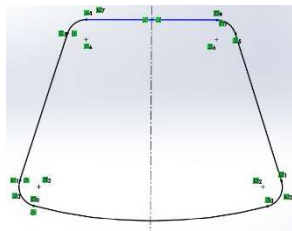


(ข) แบบจำลองสามมิติของคอยล์

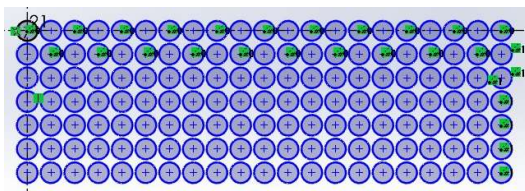
รูปที่ 8 การสร้างแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตัน

(1) การสร้างแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก จะวาดแบบจำลองสองมิติของคอยล์ในระนาบด้านบน (Plane top) ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของคอยล์โดยการให้ความหนา (Extruded Boss/Base) จากแบบจำลองสองมิติของคอยล์ ซึ่งรูปทรงของคอยล์จะมีลักษณะคงที่ตลอดความหนา ทำให้ได้แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข)

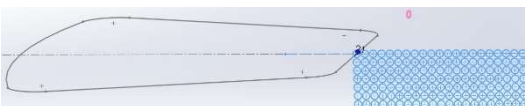
(2) การสร้างแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอไอโซทรอปิก จะมีวิธีการสร้างเช่นเดียวกับแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก



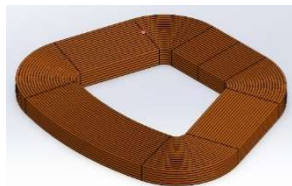
(ก) แบบจำลองสองมิติของคอยล์



(ข) แบบจำลองสองมิติของลวดทองแดง



(ค) การกำหนดการกวาดหน้าตัดวัตถุ



(ง) แบบจำลองสามมิติของคอยล์

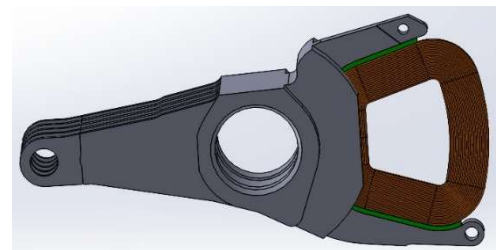
รูปที่ 9 การสร้างแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริง

(3) การสร้างแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก จะวาดแบบจำลองสองมิติของคอยล์ในระนาบด้านบนดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) จากนั้นวาดแบบจำลอง

สองมิติของลวดทองแดงในระนาบด้านขวา (Plane right) ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) แล้วทำการกำหนดความสัมพันธ์ให้กับแบบจำลองสองมิติของคอยล์ในระนาบด้านบนและแบบจำลองสองมิติของลวดทองแดงในระนาบด้านขวา เพื่อทำการกวาดหน้าตัดวัตถุ (Swept Boss/Base) ดังแสดงในรูปที่ 9 (ค) ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก ดังแสดงในรูปที่ 9 (ง)

ในการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์นั้น จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) รวมแบบจำลองแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ยังไม่ได้ประกอบคอยล์ แบบจำลองอีพอกซีและแบบจำลองคอยล์ แบบผนึกเข้าด้วยกัน (Bonded) ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การรวมแบบจำลองแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

(2) กำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลให้แก่แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก ตามตารางที่ 1 ส่วนแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอไอโซทรอปิก จะนำค่าคุณสมบัติเชิงกลของคอยล์ที่ทำจากวัสดุไอโซทรอปิกมาทำการปรับเปลี่ยนโดยใช้หลักการของ Kim DW และคนอื่น ๆ [10] คือ กำหนดให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นในแนวแกน y (E_y) และในแนวแกน z (E_z) มีค่ามากกว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นในแนวแกน x (E_x) ร้อยละ 26.61 ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเฉือนในระนาบ yz (G_{yz}) มีค่ามากกว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเฉือนในระนาบ xz (G_{xz}) และในระนาบ xy (G_{xy}) ร้อยละ 19.66 ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในระนาบ xy (ν_{xy}) ในระนาบ xz (ν_{xz}) และในระนาบ yz (ν_{yz}) มีค่าเท่ากัน ซึ่งจะทำให้แบบจำลองคอยล์ทั้งสามรูปแบบมีจุดศูนย์กลางมวล (Center of mass) ในแนวแกน x , y และ z และมวล (Mass) ดังแสดงในตารางที่ 2

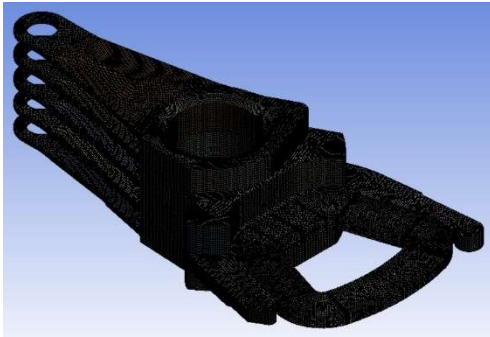
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลอง^[5]

แบบจำลอง	E-Block	Epoxy	Coil
มอดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	68.9	12.5	90
อัตราส่วนปัวซองส์	0.33	0.38	0.34
ความหนาแน่น (kg/m ³)	2700	1680	5470

ตารางที่ 2 จุดศูนย์กลางมวลและมวลของแบบจำลองคอยล์

แบบจำลองคอยล์	Center of mass (mm)			Mass (g)
	x	y	z	
วัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก	-0.002	0.780	14.800	0.260
วัตถุทรงตันทำจากวัสดุอไอโซทรอปิก	-0.002	0.780	14.800	0.260
คล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก	-0.002	0.780	14.800	0.200

(3) แบ่งแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติที่มีขนาดเอลิเมนต์เล็กสุด 0.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเป็นขนาดของเอลิเมนต์ที่ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดมีค่าคู่เข้า ทำให้แบบจำลองคอยล์มีจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อ ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 11 เอลิเมนต์ของแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ตารางที่ 3 จำนวนเอลิเมนต์และจุดต่อ

แบบจำลองคอยล์	เอลิเมนต์	จุดต่อ
วัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก	60363	268649
วัตถุทรงตันทำจากวัสดุอไอโซทรอปิก	60363	268649
คล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก	635520	1415141

ตารางที่ 4 ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดที่ได้จาก PSV400

	รูปร่างโหมด	ความถี่ (Hz)
Arm bending		2406.00
Arm torsion		12160.00
Arm sway		22230.00
Coil bending		4344.00
Coil torsion		7953.00
Coil sway		10980.00

(4) กำหนดการแสดงผลค่าความถี่ธรรมชาติในช่วง 0 – 50 กิโลเฮิร์ต ภายใต้การรองรับแบบยึดแน่นบริเวณผิวด้านในของแกนหมุน เพื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างโหมดแบบดัดโค้ง (Bending mode shape) ของด้านอาร์มและด้านคอยล์ อันได้แก่ Arm bending และ Coil bending รูปร่างโหมดแบบบิด (Torsion mode shape) ของด้านอาร์มและด้านคอยล์ อันได้แก่ Arm torsion และ Coil torsion รูปร่างโหมดแบบแกว่งกวัด (Sway mode shape) ของด้านอาร์มและด้านคอยล์ อันได้แก่ Arm sway และ Coil sway ที่ได้จากเครื่อง Polytec Scanning Vibrometer 400 (PSV400) ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยรูปร่างโหมดแบบดัดโค้งจะเป็นการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งของด้านอาร์มและด้านคอยล์ผ่านเส้นแนวแกนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รูปร่างโหมดแบบบิดจะเป็นการ

เคลื่อนที่บิดกลับไปกลับของด้านอาร์มและด้านคอยล์รอบเส้นแนวแกนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ส่วนรูปร่างโมดแบบแกว่งกวัดจะเป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวาในแนวระนาบของด้านอาร์มและด้านคอยล์ผ่านเส้นแนวแกนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ผลการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จะถูกเปรียบเทียบกับการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 เพื่อหาร้อยละความคลาดเคลื่อน (Percentage error) ดังสมการ (9)

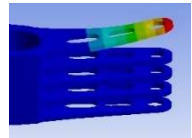
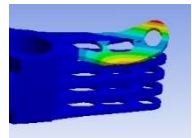
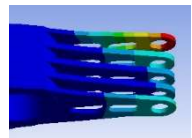
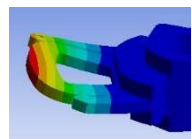
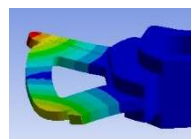
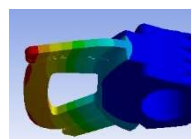
$$E_{err} = \left| \frac{F_p - F_F}{F_p} \right| \times 100 \quad (9)$$

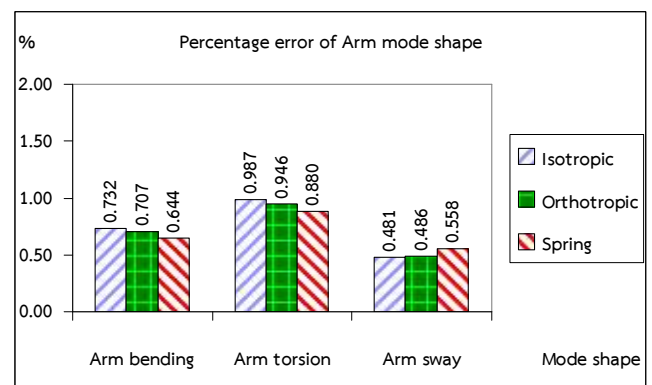
โดย E_{err} คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน, F_p คือ ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 (Hz), F_F คือ ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (Hz)

4. ผลการศึกษา

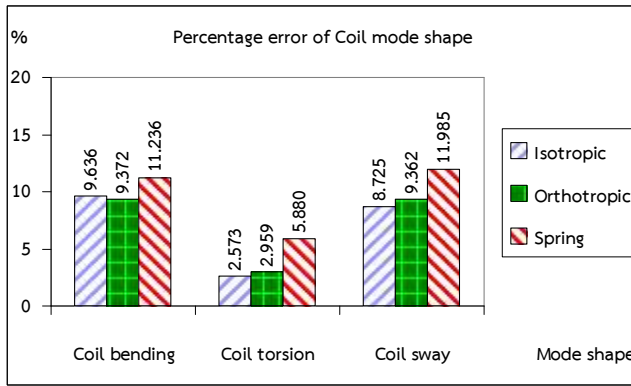
1) ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (ตารางที่ 5) ในรูปร่างโมด Arm bending, Arm torsion และ Arm sway แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 น้อยกว่าร้อยละ 1 (รูปที่ 12) ส่วนรูปร่างโมด Coil bending, Coil torsion และ Coil sway มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 น้อยกว่าร้อยละ 12 (รูปที่ 13)

ตารางที่ 5 ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

รูปร่างโมด		ความถี่ (Hz)		
		Isotropic	Orthotropic	Spring
Arm bending		2423.60	2423.01	2421.49
Arm torsion		12280.00	12275.00	12267.00
Arm sway		22123.10	22122.00	22106.00
Coil bending		3925.41	3936.88	3855.91
Coil torsion		7748.37	7717.67	7485.36
Coil sway		11938.00	12007.00	12296.00

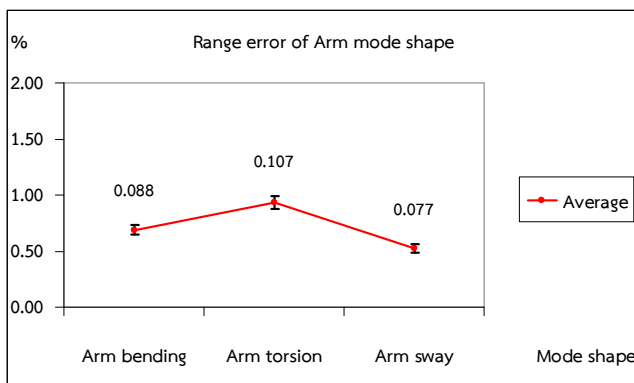


รูปที่ 12 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในรูปร่างโมดด้านอาร์ม

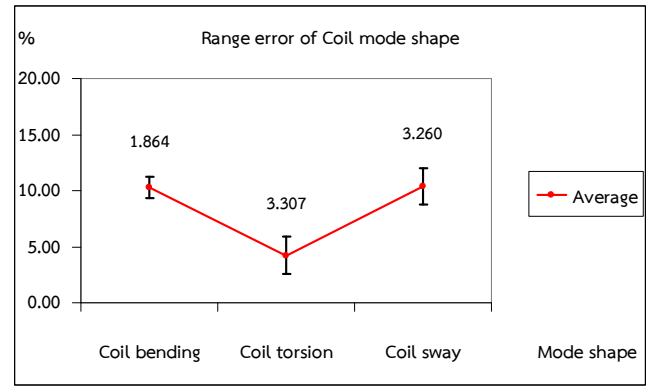


รูปที่ 13 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในรูปร่างโหมดด้านคอยล์

2) แบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิกมีแนวโน้มของร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 ในรูปร่างโหมดด้านอาร์มน้อยกว่าแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิกเล็กน้อย โดยมีพิสัยของร้อยละความคลาดเคลื่อนในรูปร่างโหมดด้านอาร์มสูงสุดร้อยละ 0.107 ที่รูปร่างโหมด Arm torsion (รูปที่ 14) แต่มีร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบด้วยเครื่อง PSV400 ในรูปร่างโหมดด้านคอยล์มากกว่าแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิก โดยมีพิสัยของร้อยละความคลาดเคลื่อนในรูปร่างโหมดด้านคอยล์สูงสุดร้อยละ 3.307 ที่รูปร่างโหมด Coil torsion (รูปที่ 15)



รูปที่ 14 พิสัยของร้อยละความคลาดเคลื่อนในรูปร่างโหมดด้านอาร์ม



รูปที่ 15 พิสัยของร้อยละความคลาดเคลื่อนในรูปร่างโหมดด้านคอยล์

3) แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิก มีการสร้างแบบจำลองเหมือนกันแต่มีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่างกัน เนื่องจากค่าคุณสมบัติเชิงกลอันประกอบไปด้วยค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (E) และค่ามอดุลัสเฉือน (G) มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ ในสมการ (2) และ (4) ตามลำดับ

4) แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก มีการสร้างแบบจำลองต่างกันแต่มีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่เหมือนกัน จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่างกัน เนื่องจากรูปร่างของแบบจำลองมีผลต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (I) และพื้นที่หน้าตัด (A) ในสมการ (2) และมีผลต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมวล (I_o) และโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่หน้าตัด (J) ในสมการ (4)

5) แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิก แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก ใช้เวลาในการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโหมดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจากกระบวนการหาผลเฉลยในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะดำเนินการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งแบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้าย

สปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิกมีจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อที่มาก (ตารางที่ 3) จึงทำให้ขนาดของเมทริกซ์ในสมการ (6) และ (8) มีขนาดใหญ่ ทำให้กระบวนการหาผลเฉลยใช้เวลานานกว่าแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิกอยู่ 30 นาที

ตารางที่ 6.ระยะเวลาในการประมวลผล

แบบจำลองคอยล์	เวลา (วินาที)
วัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซ	1657
วัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโร	1657
คล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซ	3457

5. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลองคอยล์ทั้งสามแบบ ได้แก่ แบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิก แบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิก สามารถทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างของค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จากแบบจำลองคอยล์ทั้งสามรูปแบบนั้น เป็นผลมาจากวิธีการสร้างแบบจำลองคอยล์และการกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลให้แก่แบบจำลองคอยล์ ส่วนระยะเวลาในการประมวลผลเพื่อคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างโมดนั้น แบบจำลองคอยล์ที่มีลักษณะคล้ายสปริงทำจากวัสดุไอโซทรอปิกจะใช้ระยะเวลามากกว่าแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุไอโซทรอปิกและแบบจำลองคอยล์ที่เป็นวัตถุทรงตันทำจากวัสดุอโรทรอปิกอยู่ 30 นาที

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณโครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) ประจำปีงบประมาณ 2559 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณตลอดโครงการวิจัย และขอขอบคุณ

บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบและไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. ฮาร์ดดิสก์ทำงานอย่างไร. เข้าถึงได้จาก : <http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/sci2/harddisk/harddisk.htm> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2565].
- [2] 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.
- [3] Phonpai T, Jearsipongkul T. Vibration analysis of actuator arm in HDD using FEM and identification using LDV. *KKU Engineering Journal*. 2007;34(4): 477-488.
- [4] 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.
- [5] Puengkhom V, Thongsri J, Pimsarn M. On finite element modeling aspect of HDD's head stack assembly vibration analysis. In: King Mongkut's Institute of Technology Ladkraband (ed.). *The 5th Thai Society of Mechanical Engineers, International Conference on Mechanical Engineering*, 17-19 December 2014, Chiangmai, Thailand. AMM055-p. 67.
- [6] Phongrsisuk 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.
- [7] Phongrsisuk 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.

- [8] Phongsrisuk K, Pondongkhiao N, Suriyachatmongkol N, Fanchaeng K. The effect of pin surface on natural frequencies of HDD actuator arm. *Journal of Engineering and Innovation*. 2022; 15(2): 1-10.
- [9] อธิราช โชตินอก, วันฉลอง ก้อนแหวน. การศึกษาผลของความหนา ความยาวและฟองอากาศของกาวอีพอกซีในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อการสั่นสะเทือนโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา; 2564.
- [10] Kim DW, Lee JK, Park NC, Park YP. Vibration Analysis of HDD Actuator with equivalent finite element model of VCM coil. *KSME International Journal*. 2003;17(5): 679-690.
- [11] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข. ตำราการสั่นสะเทือนเชิงกล. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัดจรัสธุรกิจการพิมพ์; 2564.