



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลของผิวสัมผัสของสลักที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

The effect of pin surface on natural frequencies of HDD actuator arm

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข^{1*} ณัฐพล พลดงเขียว¹ ณัฐพล สุริยะฉัตรมงคล¹ ไกรฤกษ์ ฟันแจ้ง²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

² บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ปทุมธานี 12120

Kullasup Phongsrisuk^{1*} Nattapon Pondongkhiao¹ Nattapol Suriyachatmongkol¹ 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 25 มกราคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 3 มีนาคม 2564 ; วันที่ตอบรับบทความ 22 เมษายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของผิวสัมผัสของสลักที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ในการศึกษา จะทำการสร้างผิวสัมผัสที่ผิวด้านนอกของสลักโดยจะทำการแปรผันจำนวนผิวสัมผัส จำนวนแถวของผิวสัมผัสและการจัดเรียงตัวของผิวสัมผัส จากผลการศึกษาพบว่าจำนวนผิวสัมผัส จำนวนแถวของผิวสัมผัสและการจัดเรียงตัวของผิวสัมผัสมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลัก โดยสลักที่ผิวด้านนอกมีจำนวนผิวสัมผัสและจำนวนแถวของผิวสัมผัสที่น้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติที่มาก ส่วนสลักที่ผิวด้านนอกมีการจัดเรียงตัวของผิวสัมผัสแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติน้อยกว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีการจัดเรียงตัวของผิวสัมผัสแบบสมมาตร

คำสำคัญ

แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ ความถี่ธรรมชาติ สลัก

Abstract

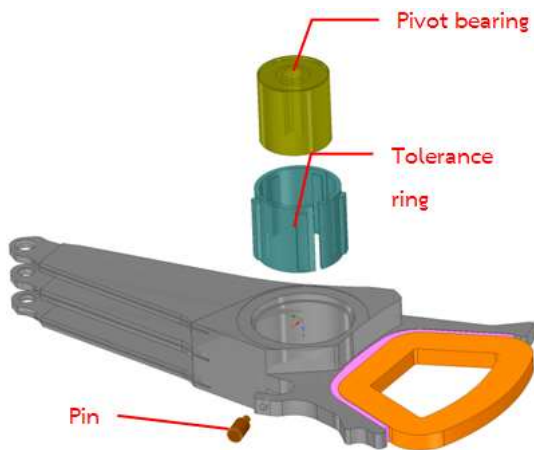
This research was to study the effect of a pin surface on the natural frequencies of the HDD actuator arm by using finite element software. In the study, the number of convex surfaces, the number of rows of convex surfaces, and the arrangement of convex surfaces were variations on the pin outer surface. From the results shown that the number of convex surfaces, the number of rows of convex surfaces, and the arrangement of convex surfaces affected the natural frequency in the Pin bending and Pin sway mode shape. A pin with a low number of convex surfaces and rows of convex surfaces had the maximum difference in natural frequencies, while a pin with asymmetrically convex surfaces had the difference in natural frequencies less than a pin with symmetrically convex surfaces.

Keywords

HDD actuator arm; finite element; natural frequency, pin

1. คำนำ

ภาคอุตสาหกรรมยังคงเป็นภาคส่วนที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์นับได้ว่าเป็นเสาหลักในภาคการส่งออก ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกถึงร้อยละ 15 ของรายได้ โดยการส่งออกเครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ มีสัดส่วนรวมกันราวร้อยละ 43 ของมูลค่าการส่งออกเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์[1] เนื่องด้วยการเติบโตของข้อมูลมหัต (Big data) ส่งผลให้อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีโอกาสเติบโตในศูนย์ข้อมูล (Data center) โดยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกนำมาใช้เก็บข้อมูลที่ไม่ได้ใช้บ่อย เช่น ข้อมูลสำรอง (Backup) เพื่อลดต้นทุนการจัดเก็บข้อมูล ทำให้อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังสามารถขยายการลงทุนเพิ่มเพื่อตอบสนองต่อการเติบโตของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในศูนย์ข้อมูล[2]



รูปที่ 1 แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลของศูนย์ข้อมูล ทำให้ผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องเพิ่มขีดความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รวมไปถึงการนำนวัตกรรมและเทคโนโลยีมาใช้ในการออกแบบและผลิต เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (Finite element software) เป็นการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบหรือปรับปรุงคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการสร้างแบบจำลองฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำให้ทราบข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยไม่ต้องทำการทดสอบ ทำให้สามารถปรับปรุงฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีคุณภาพ

ตามที่ต้องการ ก่อนที่จะนำไปผลิตจริง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบ ลดปริมาณการทดสอบจริงและลดปริมาณของเสียที่อาจเกิดขึ้น

ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive actuator arm) เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์การสั่นพ้อง (Resonance) ที่นอกจากจะทำให้หัวอ่าน/บันทึก (Read/write head) ซึ่งติดอยู่ที่ปลายแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนขนาดใหญ่ อันมีผลทำให้หัวอ่าน/บันทึก ไม่สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง (Accuracy) และเที่ยงตรง (Precision) แล้ว ยังส่งผลให้สลัก (Pin) ในรูปที่ 1 หลุดจากแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวยังจำกัดอยู่ที่การทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักและรูสวมสลักในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เหมาะสม เพื่อไม่ทำให้ผิวด้านนอกของสลักและผิวรูสวมสลักในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดความเสียหาย

ความเสียหายของผิวด้านนอกของสลักและผิวรูสวมสลักในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากการสวมอัดสลักนั้น จะคล้ายกับการสวมอัดปลอกกันรุน (Tolerance ring) เข้ากับผิวด้านในของแกนหมุนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (รูปที่ 1) ซึ่งการลดแรงในการสวมอัดปลอกกันรุนโดยการออกแบบผิวด้านนอกของปลอกกันรุนให้มีลักษณะนูนเป็นรูปครึ่งทรงกระบอก[3] รูปครึ่งวงรี[4] รูปลิ้น[5-6] ลูกคลื่น[7] จะช่วยลดความเสียหายของผิวด้านในของแกนหมุนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ แต่การที่ปลอกกันรุนทำหน้าที่เหมือนสปริงเชิงเส้นกระทำตามแนวรัศมีรอบผิวด้านนอก[8] เพื่อดันชิ้นงานที่ประกอบเข้าด้วยกัน[9] ลักษณะนูนของผิวด้านนอกของปลอกกันรุนที่ต่างกันจะทำให้เกิดแรงสปริงในการดันชิ้นงานที่ประกอบเข้าด้วยกันต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [7]

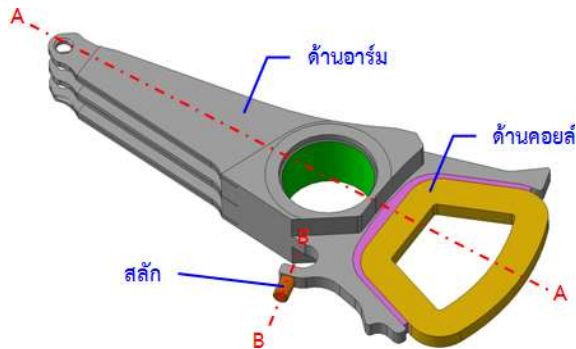
เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับผิวด้านนอกของสลักและผิวรูสวมสลักในแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากการสวมอัดสลัก งานวิจัยนี้จึงนำการออกแบบผิวด้านนอกของปลอกกันรุนที่มีลักษณะนูนมาประยุกต์ใช้ โดยจะทำการสร้างผิวนูนที่ผิวด้านนอกของสลักและทำการแปรผันจำนวนผิวนูน จำนวนแถว

ของผิววนและการจัดเรียงตัวของผิววน เพื่อศึกษาผลที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2. ทฤษฎี

2.1 การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเป็นการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รอบ ๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ในงานวิจัยนี้สนใจการสั่นสะเทือนของด้านอาร์ม ด้านคอยล์และสลัก (รูปที่ 2) โดยการสั่นสะเทือนของด้านอาร์มและด้านคอยล์จะเป็นการเคลื่อนที่ของด้านอาร์มและด้านคอยล์ผ่านเส้นประ A-A ส่วนการสั่นสะเทือนของสลักจะเป็นการเคลื่อนที่ของสลักผ่านเส้นประ B-B โดยการเคลื่อนที่ของด้านอาร์มจะทำให้เกิดรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง (Bending) แบบบิด (Torsion) และแบบแกว่งกวัด (Sway) ของด้านอาร์ม การเคลื่อนที่ของด้านคอยล์จะทำให้เกิดรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง แบบบิดและแบบแกว่งกวัดของด้านคอยล์ ส่วนการเคลื่อนที่ของสลักจะทำให้เกิดรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลัก

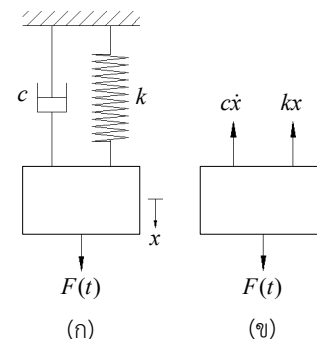


รูปที่ 2 การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

รูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งของด้านอาร์มจะเป็นการเคลื่อนที่ที่ขึ้นลงในแนวตั้งผ่านเส้นประ A-A รูปร่างการสั่นสะเทือนแบบบิดของด้านอาร์มจะเป็นการเคลื่อนที่ที่บิดกลับไปกลับมารอบเส้นประ A-A ส่วนรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัดของด้านอาร์มจะเป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวาในแนวระนาบผ่านเส้นประ A-A รูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัด

โค้ง แบบบิดและแบบแกว่งกวัดของด้านคอยล์ สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง แบบบิดและแบบแกว่งกวัดของด้านอาร์ม เพียงแต่จะเป็นการเคลื่อนที่ของด้านคอยล์ ส่วนรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งของสลักจะเป็นการเคลื่อนที่ที่ขึ้นลงในแนวตั้งผ่านเส้นประ B-B รูปร่างการสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัดของสลักจะเป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวาในแนวระนาบผ่านเส้นประ B-B

ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะได้จากการวัดและแสดงผลโดยเครื่อง Polytec scanning vibrometer 400 (PSV400) เนื่องจากแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีรูปร่างที่ซับซ้อน จึงยังขาดสมการสำหรับคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือน แต่เนื่องจากทุกระบบการสั่นสะเทือนจะมีองค์ประกอบการสั่นสะเทือนที่เหมือนกัน คือ องค์ประกอบที่สะสมพลังงานศักย์ องค์ประกอบที่สะสมพลังงานจลน์และองค์ประกอบที่หน่วงพลังงานของระบบ จึงทำให้สามารถพิจารณาการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ด้วยระบบมวล-สปริง-ตัวหน่วง ดังรูปที่ 3 (ก) ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพวัตถุอิสระได้ดังรูปที่ 3 (ข) และเมื่อใช้กฎข้อที่สองของนิวตันทำให้เขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้เป็น



รูปที่ 3 ระบบการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = f(t) \quad (1)$$

โดย ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง(Damping ratio)
 ω_n คือ ความถี่เชิงกลมธรรมชาติ (rad / s)
 $f(t)$ คือ แรงภายนอกต่อมวลของระบบ (N / kg)

จากสมการที่ (1) สามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติของระบบได้เป็น

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

โดย f_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (Hz)

k คือ ค่าคงตัวสปริงของระบบ (N/m)

m คือ มวลของระบบ (kg)

ซึ่งจากสมการที่ (2) พอจะทำให้ทราบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวสปริงของระบบและมวลของระบบ

2.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการกำกับ (Governing equation) ของปัญหา โดยการนำสมการกำกับของปัญหามาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element equation) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ จากนั้นทำการแก้สมการรวม (Global equation) ซึ่งเกิดจากการประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกันโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ (Node) ภายใต้สภาวะสมดุลของภาระภายนอกและเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง โดยขั้นตอนในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์ การแทนเงื่อนไขขอบและการแก้สมการรวม

2.2.1 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ สามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ได้ 3 ประเภท ตามมิติ คือ เอลิเมนต์หนึ่งมิติ เอลิเมนต์สองมิติและเอลิเมนต์สามมิติ โดยแต่ละเอลิเมนต์จะต่อเชื่อมกันที่จุดต่ออันเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่ทราบค่า ในกรณีของแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากเป็นปัญหาสามมิติ จึงทำการแบ่งแบบจำลองแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติ

2.2.2 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสร้างได้จากวิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีการแปรผัน (Variational approach) และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง

(Method of weighted residuals) ซึ่งจากทั้งสามวิธีสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้จะมีความสอดคล้องกับสมการกำกับของปัญหา ในปัญหาการสั่นสะเทือนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเขียนอยู่ในรูป

$$[m]\{\ddot{d}\} + [c]\{\dot{d}\} + [k]\{d\} = \{f\} \quad (3)$$

โดย $[m]$ คือ เมทริกซ์มวลของเอลิเมนต์ (kg)

$[c]$ คือ เมทริกซ์ความหน่วงของเอลิเมนต์ (N.s/m)

$[k]$ คือ เมทริกซ์สทิฟเนสของเอลิเมนต์ (N/m)

$\{d\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดของเอลิเมนต์ (m)

$\{f\}$ คือ เวกเตอร์แรงของเอลิเมนต์ (N)

2.2.3 การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน จะทำให้ได้สมการรวมซึ่งสมการรวมสำหรับปัญหาการสั่นสะเทือนจะเขียนได้เป็น

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{F\} \quad (4)$$

โดย $[M]$ คือ เมทริกซ์มวลของระบบ (kg)

$[C]$ คือ เมทริกซ์ความหน่วงของระบบ (N.s/m)

$[K]$ คือ เมทริกซ์สทิฟเนสของระบบ (N/m)

$\{D\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดของระบบ (m)

$\{F\}$ คือ เวกเตอร์แรงของระบบ (N)

2.2.4 การแทนเงื่อนไขขอบ จะเป็นการกำหนดจุดรองรับและวิธีการรองรับให้กับแบบจำลอง ในกรณีของแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผิวด้านในของแกนหมุนของแกนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกรองรับแบบยึดแน่น

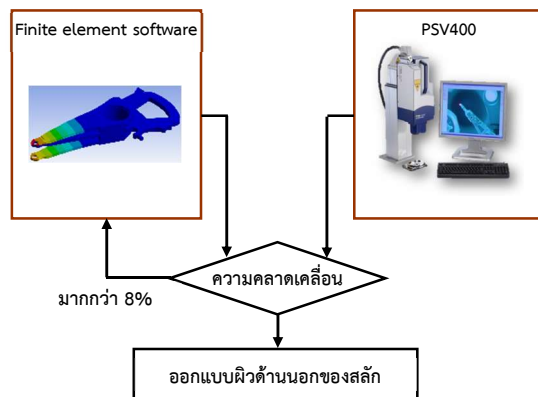
2.2.5 การแก้สมการรวม ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการรวมเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าสมการกำกับของปัญหาจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะมีการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้เครื่อง

คำนวณแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบได้ และในกรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่ก็สามารถทำเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ให้คอมพิวเตอร์ทำการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคำตอบได้

3. วิธีการศึกษา

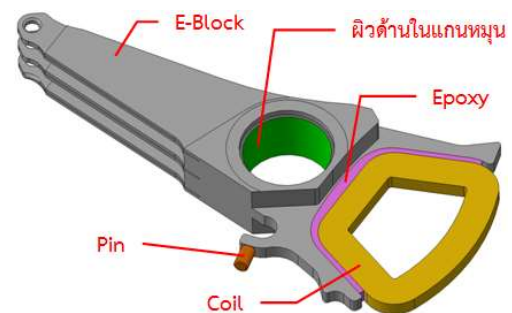
การออกแบบผิวด้านนอกของสลักให้มีลักษณะรูปร่างแบบจำลองสามมิติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์จะถูกสร้างในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ โปรแกรม ANSYS โดยผลการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง แบบบิดและแบบแกว่งกวัดของด้านอาร์มและด้านคอยล์ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ การวัดและแสดงผลด้วยเครื่อง PSV400 ดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับแบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) น้อยกว่าร้อยละ 8 จะทำการออกแบบผิวด้านนอกของสลักให้มีลักษณะรูปร่าง โดยจะทำการแปรผันจำนวนผิววน จำนวนแถวของผิววนและการจัดเรียงตัวของผิววน เพื่อศึกษาผลของผิวสัมผัสของสลักที่มีต่อค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์



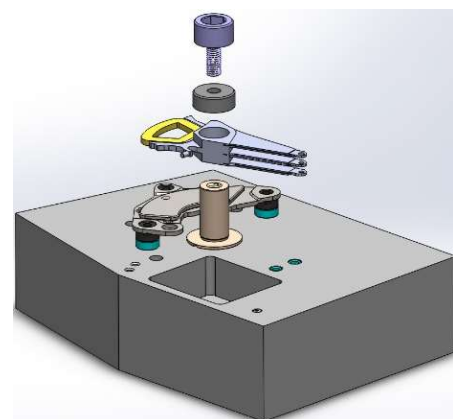
รูปที่ 4 ขั้นตอนการศึกษา

ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ แบบจำลองสามมิติของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ อันประกอบไปด้วย E-Block, Coil, Epoxy และ Pin (รูปที่ 5) จะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติชนิดพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) ที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) อัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio) และความหนาแน่น (Density) ตามแต่ชนิด

ของวัสดุ[10] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าที่ได้จาก บริษัท เบลตัน อินดัสเทรียล (ประเทศไทย) จำกัด โดยทั่วไปความถูกต้องของผลการคำนวณจะขึ้นอยู่กับขนาดของเอลิเมนต์ ถ้าต้องการความถูกต้องสูงจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก แต่จำนวนเอลิเมนต์ที่มากจะทำให้เวลาในการคำนวณมากตามไปด้วย[11] ซึ่งเมื่อพิจารณาการรู้เข้าของค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือน จึงเลือกใช้เอลิเมนต์สามมิติที่มีขนาด มิลลิเมตร ซึ่งทำให้แบบจำลอง 0002.0g แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์มี 22677 เอลิเมนต์ และ จุด 46397 ต่อ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์แบบโมดัล (Modal analysis) เพื่อคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือน โดยกำหนดให้ผิวด้านในของแกนหมุนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ถูกรองรับแบบยึดแน่น (Fix) ดังแสดงด้วยสีเขียวในรูปที่ 5

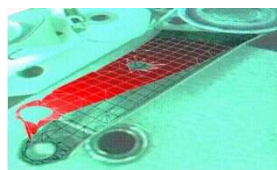


รูปที่ 5 แบบจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์

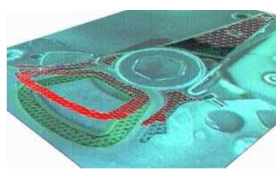


รูปที่ 6 การติดตั้งแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์บนฟิสิกเจอร์

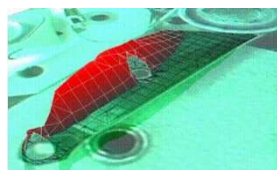
การวัดและแสดงผลค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือนโดย PSV400 นั้น แขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกติดตั้งบนฟิกเจอร์ (Fixture) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจะทำการวัดการสั่นสะเทือนด้านบนและด้านข้างของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากบางรูปร่างการสั่นสะเทือนสามารถพบได้ในแนวราบแต่ไม่พบในแนวตั้ง[12] ซึ่งการวัดการสั่นสะเทือนด้านบนจะพบรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบคัตโค้งและแบบบิดของด้านอาร์มและด้านคอยล์ ส่วนการวัดการสั่นสะเทือนด้านข้างจะพบรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบแกว่งกวัดของด้านอาร์มและด้านคอยล์ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยสีแดงจะแสดงถึงการเคลื่อนที่ของด้านอาร์ม/ด้านคอยล์



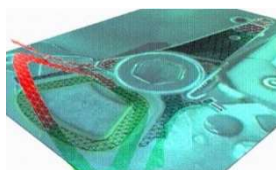
(ก) Arm bending



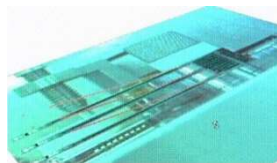
(ข) Coil bending



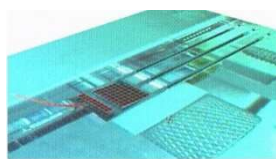
(ค) Arm torsion



(ง) Coil torsion



(จ) Arm sway



(ฉ) Coil sway

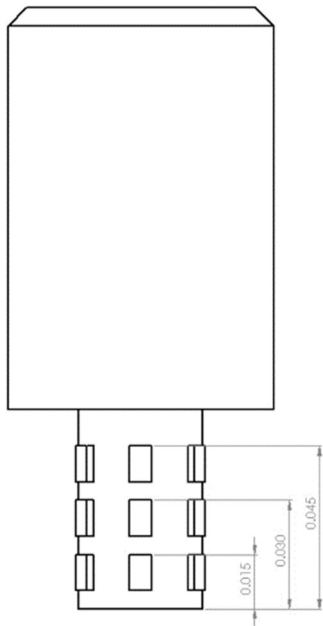
รูปที่ 7 รูปร่างการสั่นสะเทือนที่ได้จาก PSV400

การออกแบบผิวด้านนอกของสลักให้มีลักษณะนูนนั้น จะทำการสร้างผิวนูนที่มีความหนา 0.001 มิลลิเมตร ความกว้าง 0.006 มิลลิเมตร และความยาว 0.010 มิลลิเมตร ให้กับผิวด้านนอกของแบบจำลองสามมิติของสลัก โดยจะทำการสร้างผิวนูนหนึ่งแถว สองแถวสมมาตร สองแถวไม่สมมาตร สามแถวสมมาตรและสามแถวไม่สมมาตร และทำการแปรผันจำนวนผิวนูนที่ผิวด้านนอกของสลักในแต่ละแถวเป็นสองผิว สี่ผิวและแปดผิว กระจายรอบผิวด้านนอกของสลักอย่างสมมาตร ดัง

แสดงในตารางที่ 1 ทำให้ได้สลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนรวมทั้งหมด 15 แบบ โดยตำแหน่งของผิวนูนที่ผิวด้านนอกของสลักได้แสดงดังรูปที่ 8 แบบจำลองสามมิติของสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนจะถูกรวมเข้ากับแบบจำลองสามมิติของ E-Block, Coil, Epoxy เพื่อคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือนโดยการวิเคราะห์แบบโมดัล ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสั่นสะเทือนของสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูน จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสลักปกติ (สลักของทาง บริษัท เบลตันอินดัสเทรียล (ประเทศไทย) จำกัด) ที่ผิวด้านนอกมีลักษณะเรียบ

ตารางที่ 1 รูปร่างการสั่นสะเทือน

	สลัก	สองผิวนูน	สี่ผิวนูน	แปดผิวนูน
หนึ่งแถว				
สองแถวสมมาตร				
สองแถวไม่สมมาตร				
สามแถวสมมาตร				
สามแถวไม่สมมาตร				



รูปที่ 8 ตำแหน่งของผิวบนที่ผิวด้านนอกของสลัก

4. ผลการศึกษา

1) จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง แบบบิดและแบบแกว่งกวัดของด้านอาร์มและด้านคอยล์ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ กับการวัดและแสดงผลด้วยเครื่อง PSV400 พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบบิดของด้านคอยล์มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยสุดที่ร้อยละ 0.29 ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งของด้านอาร์มมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มากที่สุดที่ร้อยละ 6.66 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทวนสอบค่าความถี่ธรรมชาติ

Mode shape	PSV400 (Hz)	FEM (Hz)	%Error
Arm bending	0.16630	1552.20	6.66
Arm torsion	10,450.00	10,977.00	5.04
Arm sway	8652.00	9069.70	4.83
Coil bending	1748.00	1702.30	2.61
Coil torsion	3379.00	3369.30	0.29
Coil sway	5977.00	6027.70	0.85

2) จากการออกแบบผิวด้านนอกของสลักให้มีลักษณะนูนรวมทั้งหมด 15 แบบ พบว่าส่งผลน้อยมากต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้ง แบบบิดและแบบแกว่งกวัดของด้านอาร์มและด้านคอยล์ แต่ส่งผลอย่างมากต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลัก ดังแสดงในตารางที่ 3-7 โดยสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนจะมีค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลักน้อยกว่าสลักปกติซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลักเท่ากับ 12387 Hz และ 17983 Hz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9-13

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสลักที่มีผิวนูนหนึ่งแถวเทียบกับสลักปกติ

Mode shape	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	แถวละ 2 ผิว	แถวละ 4 ผิว	แถวละ 8 ผิว
Arm bending	0.00	0.00	0.00
Arm torsion	189.00	184.00	188.00
Arm sway	19.30	20.80	15.70
Coil bending	0.30	0.30	0.30
Coil torsion	0.10	0.10	0.20
Coil sway	49.10	1.60	0.60
Pin bending	2400.30	2344.00	1963.00
Pin sway	12639.50	6229.00	5838.00

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสลักที่มีผิวนูนสองแถวสมมาตรเทียบกับสลักปกติ

Mode shape	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	แถวละ 2 ผิว	แถวละ 4 ผิว	แถวละ 8 ผิว
Arm bending	0.00	0.00	0.00
Arm torsion	189.00	190.00	189.00
Arm sway	9.50	5.50	7.20
Coil bending	0.30	0.30	0.30
Coil torsion	0.00	0.00	0.80
Coil sway	3.60	1.70	0.20
Pin bending	1388.00	1339.00	1182.00
Pin sway	6779.00	3305.00	3008.00

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสลักที่มีผิววนสองไม่แถวสมมาตรเทียบกับสลักปกติ

Mode shape	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	แถวละ 2 ผิว	แถวละ 4 ผิว	แถวละ 8 ผิว
Arm bending	0.00	0.00	0.00
Arm torsion	189.00	184.00	188.00
Arm sway	19.30	20.80	15.70
Coil bending	0.30	0.30	0.30
Coil torsion	0.10	0.10	0.20
Coil sway	49.10	1.60	0.60
Pin bending	1235.00	1174.00	1003.00
Pin sway	6656.00	3047.00	2658.00

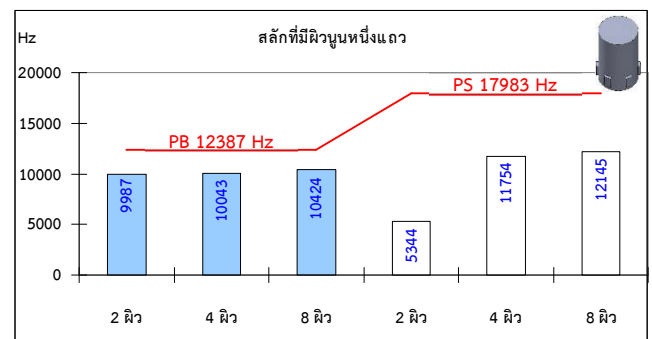
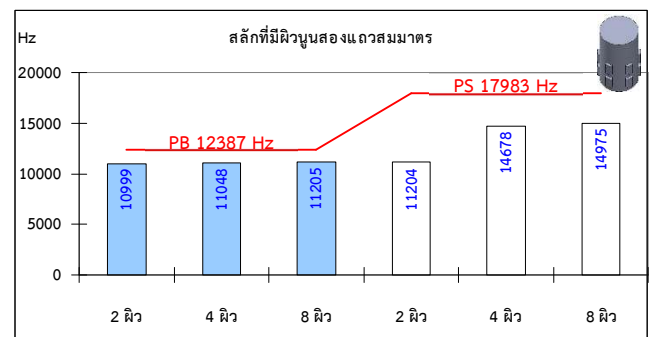
ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสลักที่มีผิววนสามแถวสมมาตรเทียบกับสลักปกติ

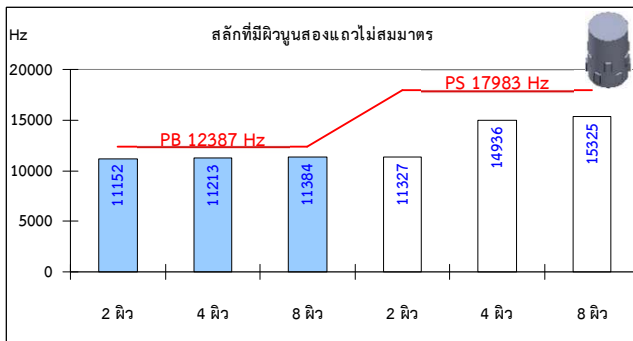
Mode shape	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	แถวละ 2 ผิว	แถวละ 4 ผิว	แถวละ 8 ผิว
Arm bending	0.00	0.00	0.00
Arm torsion	189.00	183.00	188.00
Arm sway	19.30	20.80	15.70
Coil bending	0.30	0.30	0.30
Coil torsion	0.10	0.10	0.20
Coil sway	49.10	1.60	0.60
Pin bending	656.00	583.00	443.00
Pin sway	3161.00	1402.00	1025.00

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสลักที่มีผิววนสามไม่แถวสมมาตรเทียบกับสลักปกติ

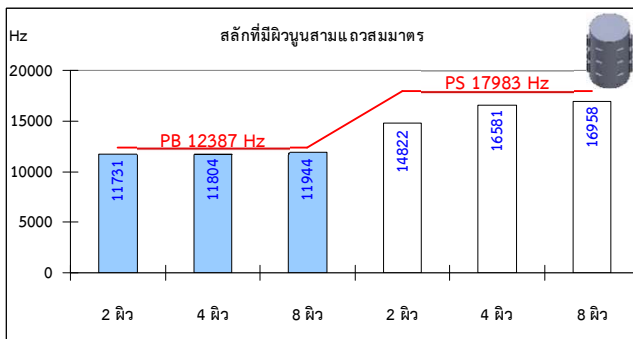
Mode shape	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	แถวละ 2 ผิว	แถวละ 4 ผิว	แถวละ 8 ผิว
Arm bending	0.00	0.00	0.00
Arm torsion	191.00	187.00	188.00
Arm sway	4.20	7.10	4.30
Coil bending	0.30	0.30	0.30
Coil torsion	0.20	0.10	0.10
Coil sway	0.70	0.70	0.00
Pin bending	653.00	573.00	436.00
Pin sway	2550.00	1373.00	1006.00

3) เมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนแบบดัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลัก (รูปที่ 9-13) จากการแปรผันจำนวนผิววนที่ผิวด้านนอกของสลัก โดยที่จำนวนแถวของผิววนและการจัดเรียงตัวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลักมีลักษณะเหมือนกัน พบว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะวนจำนวนสองผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากสลักปกติมากที่สุด รองมาจะเป็นสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะวนจำนวนสี่ผิวและแปดผิว ตามลำดับ เนื่องจากจำนวนผิววนที่ผิวด้านนอกของสลักที่มากจะทำให้มีแรงสปริงในการดันชิ้นงานที่ประกอบเข้าด้วยกันมาก ทำให้การสวมอัดสลักมีความแน่น ซึ่งส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสั่นสะเทือนของสลักมีค่าสูง[13-14] ทำนองเดียวกันกับการแปรผันจำนวนแถวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลัก จะพบว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะวนจำนวนหนึ่งแถวจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากสลักปกติมากที่สุด รองมาจะเป็นสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะวนจำนวนสองแถวและสามแถว ตามลำดับ

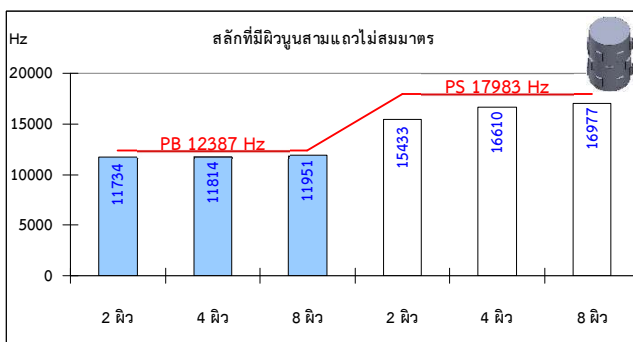
**รูปที่ 9** ค่าความถี่ธรรมชาติของของสลักที่มีผิววนหนึ่งแถว**รูปที่ 10** ค่าความถี่ธรรมชาติของของสลักที่มีผิววนสองแถวสมมาตร



รูปที่ 11 ค่าความถี่ธรรมชาติของของสลักที่มีผิววนสองแถวไม่สมมาตร



รูปที่ 12 ค่าความถี่ธรรมชาติของของสลักที่มีผิววนสามแถวสมมาตร



รูปที่ 13 ค่าความถี่ธรรมชาติของของสลักที่มีผิววนสามแถวไม่สมมาตร

4) เมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสันสะท้อนแบบตัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลัก (รูปที่ 9-13) จากการแปรผันการจัดเรียงตัวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลัก โดยที่จำนวนผิววนและจำนวนแถวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลักมีลักษณะเหมือนกัน พบว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจากสลักปกติต่ำกว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบสมมาตร เนื่องจากความไม่สมมาตรของผิววนจะเพิ่ม

การกระจายของแรงสปริงในการดันชิ้นงานที่ประกอบเข้าด้วยกัน[6] ทำให้สลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบไม่สมมาตรมีค่าความถี่ธรรมชาติสูงกว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบสมมาตร

5. สรุปผลการศึกษา

1) การจำลองแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถทำนายค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปร่างการสันสะท้อนของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์จากการวัดและแสดงผลด้วยเครื่อง PSV400 สูงสุดร้อยละ 6.66

2) จำนวนผิววน จำนวนแถวของผิววนและการจัดเรียงตัวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลักส่งผลอย่างมากต่อค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสันสะท้อนแบบตัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลัก โดยสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนจะมีค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสันสะท้อนแบบตัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลักน้อยกว่าสลักปกติ

3) สลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร ถ้ามีจำนวนผิววนและจำนวนแถวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลักที่น้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสันสะท้อนแบบตัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลักจากสลักปกติที่มาก

4) สลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนโดยที่จำนวนผิววนและจำนวนแถวของผิววนที่ผิวด้านนอกของสลักมีลักษณะเหมือนกัน สลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างการสันสะท้อนแบบตัดโค้งและแบบแกว่งกวัดของสลักจากสลักปกติต่ำกว่าสลักที่ผิวด้านนอกมีลักษณะนูนแบบสมมาตร

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณโครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) ประจำปีงบประมาณ 2559 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณตลอดโครงการวิจัย และขอขอบคุณ

บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบและไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] การค้าไทย. สินค้าออกสำคัญ 10 อันดับแรก. เข้าถึงได้จาก: <http://www2.ops3.moc.go.th/> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 มกราคม 2564].
- [2] Kasikorn AEC+ Business Advisory. แนวนโยบายอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) ปี 2562. เข้าถึงได้จาก: https://kasikornbank.com/international-business/th/Thailand/IndustryBusiness/Pages/201902_Thailand_HDD_outlook2019.aspx [เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 มกราคม 2564].
- [3] Misso NF, Seewald DA, Jones IL, Eddings DP. Tolerance ring with high hoop strength to resist deformation. *World Intellectual Property Organization*. 2001:WO 01/59314 A1.
- [4] Misso NF, Seewald DA, Jones IL. Tolerance ring with low consistent installation force profile. *United States Patent*. 2001:US 6,333,839 B1.
- [5] Hanrahan KP, Dexter DD, Schmidt RJ, Sprinkle MS. *Tolerance ring with high axial static friction*. United States Patent. 2006:US 2006/0275076 A1.
- [6] Hanrahan KP, Dexter DD, Schmidt RJ, Sprinkle MS. *Tolerance ring with having variable height and/or asymmetrically located bumps*. United States Patent. 2009:US 7,611,303 B2.
- [7] Suthaweesub S, Dheeravongkit A. Design of the tolerance ring in the actuator arm of a hard disk drive using finite element analysis. *Computer-Aided Design & Applications*. 2011;8(a):1-14.
- [8] Luo J, Shu DW, Ng QY, Zambri R, Lau JHT, Shi BJ. On the simulation of the pivot bearing inside HDD. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006;303:e81-e85.
- [9] สืหรราช สกุลพยัคฆ์, ชีระ เจียศิริพงษ์กุล. การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะประกอบ Tolerance ring โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์. *การประชุมวิชาการเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*, 4-7 พฤศจิกายน 2552, เชียงใหม่, ประเทศไทย. CST055-p. 67.
- [10] ณัฐ ดวงรัตน์ประทีป, พิมพ์เดือน รังสิยากุล, ชาย รังสิยากุล, กุลภพ สุทธิอาจ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรมรากเทียม. *ชม. ทันตสาร*. 2561;39(3):29-42.
- [11] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ชีรวัฒน์ สุวังบุตร. วิธีการปรับขนาดไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างแผ่น. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*. 2538;6(2):34-44.
- [12] สราวุธ สุขสวัสดิ์, ชีระ เจียศิริพงษ์กุล. การวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบและแนวตั้งของ Actuator Arm โดยใช้ Laser Doppler Vibrometer. *การประชุมวิชาการเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25*, 19-21 ตุลาคม 2554, กระบี่, ประเทศไทย. AMM56-p. 124.
- [13] Mohamed SS, Juel TJ, Fidlin BM, Dmitri AT. Estimating bolt tightness using transverse natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*. 2018;431:137-149.
- [14] Toh G, Gwon J, Park J. Determination of clamping force using bolt vibration responses during the tightening process. *Applied Sciences*. 2019;9:5379-5390.