



## KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

### อุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

#### Equipment to detect bad isolator in hard disk drive testing process

วินัย ตุ่มทอง<sup>1)</sup> ประเสริฐศิริ วรณชิตพงศา<sup>2)</sup> และ จิระพล ศรีเสริฐผล\*<sup>1)</sup>

Winai Tumthong<sup>1)</sup>, Prasertsiri Varunchittapongsa<sup>2)</sup> and Jiraphon Srisertpol\*<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

<sup>2)</sup>บริษัท ซีเกต เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดนครราชสีมา 30000

Seagate Technology (Thailand) Ltd., Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

Received June 2013

Accepted January 2014

#### บทคัดย่อ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันมีขนาดความจุของข้อมูลเพิ่มขึ้น ทำให้การทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องใช้เวลาประมาณ 25 - 30 ชั่วโมงต่อการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 1 ตัว การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดต่อกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเครื่องทดสอบได้มีกรอกแบบฉนวนรองรับการสั่นระหว่างช่องทดสอบและชั้นทดสอบเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการทดสอบ แต่เนื่องจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นส่งผลให้เกิดความผิดพลาดต่อกระบวนการทดสอบ ทำให้เสียเวลาในการทดสอบซ้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due ร่วมกับเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS ในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยใช้สถิติทดสอบ t-test ช่วยจัดกลุ่มของฉนวนรองรับการสั่นตามสภาพต่าง ๆ จากการทดสอบทางสถิติสามารถชี้ขนาดการสั่นสะเทือนในทิศทางต่าง ๆ เป็นเงื่อนไขในการจำแนกสภาพของฉนวนรองรับการสั่นได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบขึ้นมาสามารถตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นก่อนที่จะเกิดผลกระทบต่อกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

**คำสำคัญ :** กระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ฉนวนรองรับการสั่น การวิเคราะห์การสั่น

\*Corresponding author.

Email address: jiraphon@sut.ac.th

## Abstract

With increasing data capacity of hard disk drive (HDD) today, the testing time of a hard disk drive becomes longer. It takes approximately 25 - 30 hours. Vibrations during HDD testing process significantly contribute to testing errors. Isolator and pocket slot were used to reduce the vibration. The physical property of isolators was changed, that led to the results of HDD testing. Because of the error, the testing process needs to be redone. As a result, the testing time is extended. This research developed a system to detect isolator function using "Ariduino Due" microcontroller along with "Micro-electromechanical System – MEMS" accelerator sensor. For the precise analysis, the statistical method called t test was used to group isolators by their functioning conditions. It was found that, the measured vibration amplitude in any direction can be used as the criteria for identifying the isolator conditions. This detective system can determine the bad isolator at early stage before the exceeding vibration will affect the testing process.

**Keywords :** HDD test process, Isolator and vibration analysis

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทุกตัวที่ผลิตขึ้นต้องผ่านกระบวนการทดสอบเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค ซึ่งในขั้นตอนกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องใช้ระยะเวลาในการทำทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการทดสอบจะต้องเสียเวลาเพื่อทำการแก้ไขและทดสอบใหม่

ความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ซึ่งสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดที่ตรวจพบในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดจากปัญหาการสั่นของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากการสังเกตความผิดพลาดและความเสียหายของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ พบว่าฉนวนรองรับการสั่นของช่องทดสอบมีการเสื่อมสภาพและเมื่อเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นตัวใหม่ ความผิดพลาดในการทดสอบจากสาเหตุของการสั่นนั้นหายไป แสดงว่า การเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นส่งผลกระทบต่อกระบวนการทดสอบ โดยทั่วไปเมื่อพบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นจะต้องงดการทดสอบกับช่องทดสอบนั้น ๆ เมื่อจำนวนช่องทดสอบที่ผิดพลาดเกินกว่าค่าที่กำหนด จึงทำการหยุดเครื่องทดสอบและทำการเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่น โดยเปลี่ยนเฉพาะช่องทดสอบที่มีปัญหาและได้มีการ

ตรวจสอบช่องอื่น ๆ ด้วย โดยวิธีการให้ช่างเทคนิคโยกช่องทดสอบเพื่อตรวจสอบฉนวนรองรับการสั่นโดยวิธีใช้ประสบการณ์และความชำนาญในการตรวจสอบ ถ้าใช้งานได้อีกคงใช้งานต่อไป ทำให้ระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นไม่เท่ากัน ใน 1 เครื่องทดสอบส่งผลให้ต้องหยุดเครื่องทดสอบบ่อยขึ้นเพื่อเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่น อีกทั้งฉนวนรองรับการสั่นแต่ละตัวมีราคาค่อนข้างแพง

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due ร่วมกับเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS ในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยใช้สถิติทดสอบ t-test ช่วยจัดกลุ่มของฉนวนรองรับการสั่นตามสภาพต่าง ๆ จากการทดสอบทางสถิติสามารถใช้นาฬิกาการสั่นในทิศทางต่าง ๆ เป็นเงื่อนไขในการจำแนกสภาพของฉนวนรองรับการสั่นได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบขึ้นมานี้สามารถตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นก่อนที่จะเกิดผลกระทบต่อกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ ทำให้เกิดประโยชน์ต่อการจัดทำแผนการซ่อมบำรุง

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์การสั่นของช่องทดสอบในเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จำเป็นจะต้องเข้าใจหลักการการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และทฤษฎีการวัดการสั่น

2.1 กระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

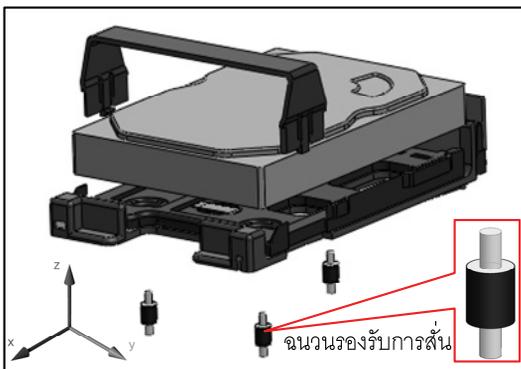
ในกระบวนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยทั่วไปนั้นจะมีอยู่ 2 ส่วนหลัก คือ

- Initial Test โดยจะทำหน้าที่ในการทดสอบการสื่อสารและการทำงานของเบื้องต้นของระบบกลไกต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น การทดสอบในการสื่อสารและส่งคำสั่งการทำงานให้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Serial communication test) หรือทดสอบการเคลื่อนที่ของกลไก (Mechanical scan) เช่น การหมุนของมอเตอร์, การเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่าน และการทำ Servo tuning เป็นต้น

- Final Test โดยจะทำหน้าที่ในการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกี่ยวกับการรับและส่ง ข้อมูลผ่านทาง อินพุตและเอาต์พุตพอร์ต และทำการทดสอบเกี่ยวกับการอ่านและเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.2 ช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำหน้าที่เป็นส่วนรองรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในกระบวนการทดสอบ โดยมีฉนวนรองรับการสั่น (Isolator) ช่วยลดการสั่นระหว่างช่องทดสอบกับชั้นทดสอบที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบ โดยฉนวนรองรับการสั่นเป็นแบบ sandwich mount มียางอยู่ระหว่างกลาง มีสกรูอยู่หัวและท้าย ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฉนวนรองรับการสั่น

ขนาดของฉนวนรองรับการสั่น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.68 เซนติเมตร ความสูง 18.1 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 1.1 กรัม ซึ่งในหนึ่งช่องทดสอบจะมีฉนวนรองรับการสั่นติดตั้งอยู่ 3 ตัว และในหนึ่งเครื่องทดสอบจะมีฉนวนรองรับการสั่นทั้งหมด 720 ตัว

2.3 ทฤษฎีการสั่น

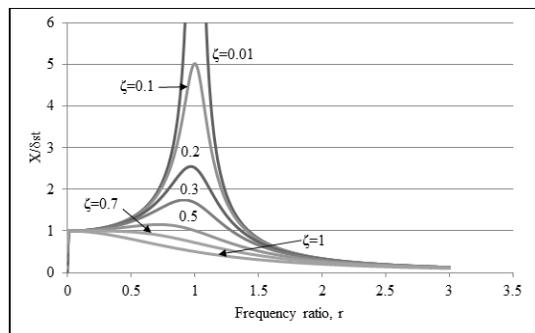
ในการวิเคราะห์การสั่นจะต้องเข้าใจทฤษฎีการสั่นและการเก็บค่าสัญญาณการสั่น เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพ

การทำงานของแผ่นดิสก์จะทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นได้ซึ่งพบการสั่นที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนี้

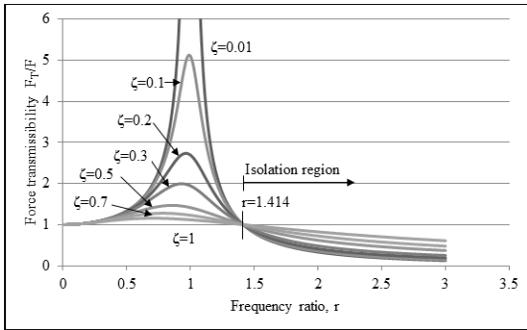
- การแกว่ง (Whirling) ของการหมุนในแนวระนาบของแผ่นดิสก์
- การสั่นของแกนหมุนในแนวแกนเพลลา
- การส่าย (Precession) หรือการโยก (Rocking) ของแกนหมุน
- การสั่นตามแนวขวางของเพลลา (Shaft flexibility) เนื่องจากความยืดหยุ่นภายในตัว
- การสั่นของแผ่นดิสก์ทั้งหลายตามแนวขวาง (Disk transverse vibration) [3-6]

จากลักษณะการสั่นที่เกิดขึ้น ได้มีการออกแบบ FDBs (Fluid dynamics bearing) ในการลดการสั่นที่เกิดขึ้นกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้ในปัจจุบันการสั่นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อยู่ในระดับที่ยอมรับได้[3] สำหรับการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้มีการออกแบบช่องสำหรับทดสอบและฉนวนรองรับการสั่น เพื่อป้องกันการสั่นในขณะการทดสอบ

ฉนวนรองรับการสั่นจะช่วยลดการสั่นที่ส่งผ่านไปยังโครงสร้างได้ โดยการออกแบบฉนวนรองรับการสั่นให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับลักษณะการสั่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่อพิจารณาความสามารถการส่งผ่านการกระจัด (Displacement transmissibility) และความสามารถในการส่งผ่านแรง (Force transmissibility) ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 การส่งผ่านการกระจัด



รูปที่ 3 การส่งผ่านแรง

จากรูปที่ 2 กราฟแสดงการส่งผ่านแรงที่จัดกับอัตราส่วนความถี่ ที่ค่าอัตราส่วนความถี่น้อยกว่า 1.414 และค่าอัตราส่วนหน่วงมีค่าน้อย จะทำให้เกิดการสั่นมากขึ้น วิธีการลดการสั่น คือการเพิ่มอัตราส่วนหน่วงให้มากขึ้น จะทำให้ขนาดการสั่นลดลงหรือการลดความถี่ธรรมชาติของระบบลง เมื่อพิจารณาการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่ในรูปที่ 3 ที่ค่าอัตราส่วนความถี่มากกว่า 1.414 ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของฉนวนรองรับการสั่น ค่าอัตราส่วนหน่วงที่มีค่าน้อยจะช่วยลดการสั่นได้มากกว่าอัตราส่วนหน่วงที่มีค่ามาก

การเก็บค่าสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นจะต้องเข้าใจหลักการของสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเก็บค่าสัญญาณ คือ

- การสุ่มสัญญาณ (Sampling) เนื่องจากคอมพิวเตอร์จะเก็บและประมวลผลข้อมูลในรูปแบบของดิจิทัลเท่านั้น กระบวนการนี้จึงเป็นการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกที่เป็นเส้นกราฟต่อเนื่องให้กลายเป็นจุดของข้อมูลดิจิทัลที่ไม่ต่อเนื่อง โดยความเร็วในการสุ่มสัญญาณนี้เรียกว่า อัตราการสุ่ม (Sampling rate) มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) แต่ความเร็ว นี้จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ Sample clock ของอุปกรณ์ว่าจะสามารถสุ่มได้เร็วสูงสุดเท่าไร การกำหนดอัตราการสุ่มในการแปลงสัญญาณที่เหมาะสมโดยยึดตามหลักการแปลงสัญญาณที่เรียกว่า ทฤษฎีไนควิสต์ (Nyquist theory)

ทฤษฎีไนควิสต์กล่าวว่า ival ว่า สัญญาณจะต้องถูกสุ่มด้วยความเร็วอย่างน้อยสองเท่าของความถี่สูงสุดที่มีอยู่ในสัญญาณ เพื่อให้สามารถนำจุดข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างเป็นรูปคลื่นกลับให้เหมือนกับสัญญาณต้นฉบับได้ แต่การเลือกใช้อัตราการสุ่มที่สองเท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณพอดีอาจจะได้ข้อมูลทางความถี่ของสัญญาณที่ถูกต้อง แต่จะไม่สามารถเก็บรายละเอียดของรูปทรงของกราฟได้ทั้งหมด ในงานวิจัยนี้ สนใจความถี่ที่เกิดขึ้นจาก

การหมุนของแผ่นดิสก์ ที่ความถี่ 120 Hz จึงได้กำหนดความถี่สูงสุดที่ 200 Hz และอัตราการสุ่มที่ 500 Hz

- ความละเอียด (Resolution) การสุ่มสัญญาณเป็นการสุ่มสัญญาณทางแกนเวลาแต่สำหรับแกนตั้งซึ่งเป็นค่าของสัญญาณก็ต้องทำการสุ่มเช่นกัน โดยใช้วิธีการแปลงเป็นค่าทางดิจิทัลด้วยวิธีการปิดค่าทศนิยมขึ้น หรือลง เรียกขั้นตอนนี้ว่า ควอนไทเซชัน (Quantization) หรือดิจิทัลไลเซชัน (Digitization) ซึ่งความละเอียดของดิจิทัลไลเซชันขึ้นอยู่กับความละเอียดของ ADC (Analog to Digital Converter) ถ้าความละเอียดมากก็จะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณอะนาลอกได้ละเอียดมากขึ้น ซึ่งความละเอียดของ ADC จะนับเป็นจำนวนบิต โดยในงานวิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์ในการแปลง ADC 12 บิต

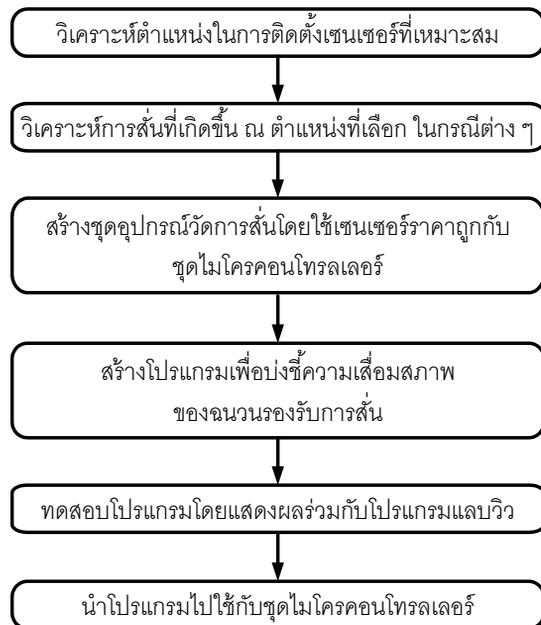
#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้ศึกษาการสั่นที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์การกระพือของแผ่นดิสก์ (Flutter disk) และวิธีในการทำนายการเกิด TMR (Track misregistration) ซึ่งในการทดสอบแผ่นดิสก์จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ RRO (Repeatable runout) และ NRRO (Non-repeatable runout) โดยที่ NRRO เป็นสาเหตุหลักในการเกิด TMR โดย TMR จะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านแทร็คค่าผิดพลาดเกิน 12 % ของความกว้างแทร็ค การสั่นที่เกิดขึ้นส่งผลต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงได้ศึกษาการลดการสั่นโดยการติดตั้งฉนวนการสั่น [1] นอกจากการกระพือของแผ่นดิสก์แล้ว ได้มีการวิเคราะห์การสั่นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทำการทดลองหาคูณลักษณะทางพลศาสตร์และสร้างแบบจำลองการสั่นของแผ่นดิสก์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์หารูปปร่างการสั่น (Mode shape) ของแผ่นดิสก์ที่ติดตั้งอยู่บนแกนหมุนของมอเตอร์และเปรียบเทียบผลการทดลองโดยวัดการสั่นด้วย SLDV (Scanning laser dopplervibrometer) เพื่อบอกความถี่และขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นจริงในขณะการหมุน และได้เลือกใช้การวิเคราะห์แบบ ODS (Operating deflection shapes) ในการดูรูปร่างการสั่นในขณะการทำงาน [8] วิธีการระบุเอกลักษณ์ในการหาค่าตัวแปรของความถี่ที่รบกวนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์แบบปรับตัวได้แบบใหม่ โดยเลือกใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์แบบปรับตัวได้ (Adaptive notch filter) และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

พบว่าผลการทดลองสามารถกันดีเสียภาพและความถูกต้องได้ [2] การสั่นที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ได้มีเพียงการสั่นที่เกิดจากแรงการหมุนของแผ่นดิสก์อย่างเดียว การได้ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางพลศาสตร์และการตอบสนองการกระแทก (Shock response) ของระบบรองรับการสั่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในแล็ปท็อป (Laptop) โดยวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่ง (Position error signal) และความสามารถในการส่งผ่านความเร่ง (Acceleration transmissibility) สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองการกระแทกได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Lumped-parameter model บนพื้นฐานความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวรองรับแบบยาง จากการศึกษพบว่า ชนิดยางที่มีค่าความแข็งของสปริงระหว่าง 0.017-0.031 MPa และค่าคงที่ความหน่วงระหว่าง 30.15-42.81 N.s/m จะเหมาะต่อการใช้เป็นตัวรองรับการสั่น [9] จะเห็นได้ว่ามีการใช้ฉนวนรองรับการสั่นเพื่อป้องกันการสั่นจากการกระแทกรูปร่างการสั่นเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ช่วยในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาการสั่นผลการวิเคราะห์การสั่นของอุปกรณ์สำหรับทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการวิเคราะห์การสั่นที่เกิดขึ้น ได้แสดงรูปร่างการสั่นและความถี่ธรรมชาติจำนวน 5 โหมด ของอุปกรณ์สำหรับทดสอบ ซึ่งจะได้ว่าความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency) ของอุปกรณ์สำหรับทดสอบจะอยู่ในช่วง ความถี่ 49 Hz ถึง 51 Hz และความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจำนวน 5 โหมดที่ได้จะอยู่ในช่วงความถี่ 51 Hz ถึง 121 Hz ผลที่ได้จากการเทคนิคการวัดจริงจากอุปกรณ์สำหรับทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมมีความถูกต้องที่สอดคล้องกัน [7]

### 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

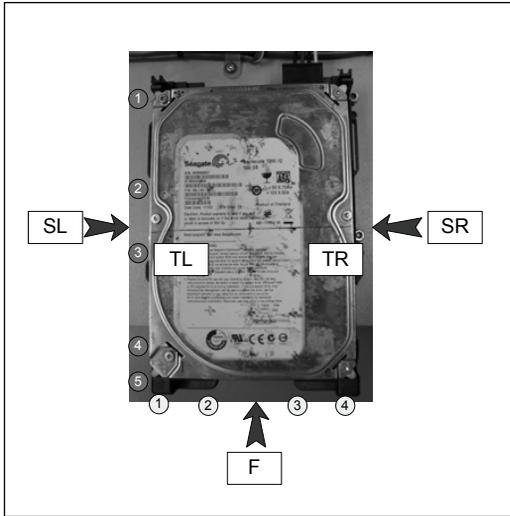
ขั้นตอนในการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นนั้นประกอบด้วยชุดอุปกรณ์การวัดการสั่น ชุดโปรแกรมในการวิเคราะห์สภาพฉนวนรองรับการสั่น และการแสดงสถานะของฉนวนรองรับการสั่นของชุดทดสอบนั้นๆ สามารถอธิบายขั้นตอนวิธีได้ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น

#### 3.1 การวิเคราะห์หาตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์ที่เหมาะสม

ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นลงบนช่องทดสอบไม่สามารถติดตั้งได้ทุกตำแหน่ง จะต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้โดยไม่กีดขวางการทำงานและผลของการวัดการสั่นที่ตำแหน่งนั้นๆ สามารถนำไปวิเคราะห์การสั่นเพื่อบ่งชี้สถานะของฉนวนรองรับการสั่นได้ ในการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม ได้พิจารณาทั้งด้านหน้า ด้านบน และด้านข้างของช่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยใช้หัววัดความเร่งแบบ Piezoelectric ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการวัดค่าการสั่น ซึ่งการติดตั้งหัววัดความเร่งได้ตั้งสมมติฐานว่า ถ้าใช้เซนเซอร์ขนาดเล็กและบางจะสามารถติดตั้งลงบนช่องทดสอบได้ ซึ่งได้กำหนดตำแหน่งวัดด้านข้างและด้านบน จำนวน 5 ตำแหน่ง และด้านหน้า 4 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์

จากรูปจะเห็นว่า มีการติดเซนเซอร์วัดความเร่งที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วย เนื่องจากเซนเซอร์วัดความเร่งที่ใช้เป็นแบบหนึ่งแกน ไม่สามารถวัดการสั่นด้านข้างของช่องทดสอบในทิศทางแกน Z ได้ จึงได้ตั้งสมมติฐานว่าการสั่นที่เกิดขึ้นบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในทิศทางแกน Z เท่ากับการสั่นที่เกิดขึ้นด้านข้างของช่องทดสอบในทิศทางแกน Z โดยในการทดลองเพื่อหาตำแหน่งนี้ ได้เลือกใช้ฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีทั้งหมด ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยการสั่น

3.2 การวิเคราะห์การสั่น ณ ตำแหน่งที่เลือก

เมื่อได้ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เหมาะสมแล้ว เราจะวิเคราะห์การสั่นในตำแหน่งที่เลือก โดยแบ่งการศึกษาเป็น 8 กรณี ตามสภาพของฉนวนรองรับการสั่นและตำแหน่งที่ติดตั้งโดยตั้งสมมติฐานว่าระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นในแต่ละตำแหน่งจะมีการเสื่อมสภาพไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดรูปร่างการสั่นและขนาดการสั่นที่แตกต่างกันโดยที่ตำแหน่งของการติดตั้งฉนวนรองรับการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 6 เราสามารถแบ่งกรณีศึกษาได้เป็น 8 กรณี ดังนี้ คือ

- กรณีที่ 1 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง ABC
- กรณีที่ 2 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง BC และเสียในตำแหน่ง A
- กรณีที่ 3 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง AC และเสียในตำแหน่ง B

กรณีที่ 4 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง AB และเสียในตำแหน่ง C

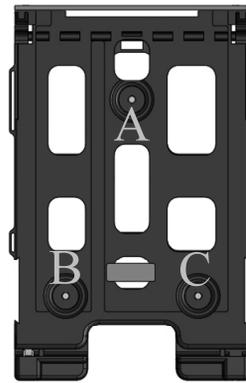
กรณีที่ 5 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง C และเสียในตำแหน่ง AB

กรณีที่ 6 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง B และเสียในตำแหน่ง AC

กรณีที่ 7 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง A และเสียในตำแหน่ง BC

กรณีที่ 8 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพเสียในตำแหน่ง ABC

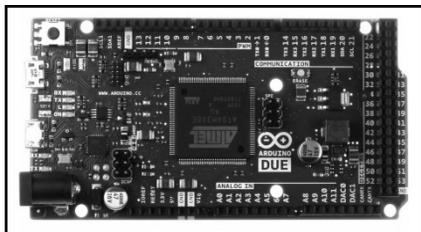
ในการวิเคราะห์การสั่นทั้ง 8 กรณีนี้ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการสร้างเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น



รูปที่ 6 ตำแหน่งของฉนวนรองรับการสั่น

3.3 การสร้างอุปกรณ์วัดการสั่นด้วยเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due

เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเซนเซอร์แล้ว ต่อมาจึงสร้างชุดอุปกรณ์การวัดและเขียนโปรแกรมในการจำแนกสภาพของฉนวนรองรับการสั่นให้เหมาะสมกับการใช้งานในเครื่องทดสอบและมีราคาไม่แพง โดยเซนเซอร์วัดการสั่นที่เลือกใช้ได้พิจารณาจากความสามารถในการรับรู้ ราคา และสามารถหาซื้อได้ง่ายซึ่งได้เลือกใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS (ADXL335 module) ซึ่งมีความสามารถในการรับรู้ (Sensitivity) 300 mV/g มีช่วงการวัด ±3g และมีขนาดของโมดูลกว้าง x ยาวเท่ากับ 15.7mm x 20.3 mm โดยใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due ที่มีความละเอียดในการแปลง ADC 12 บิต ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS(ADXL 335 module)



รูปที่ 8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due

3.4 การสร้างโปรแกรมในการบ่งชี้สภาพฉนวนรองรับการสั่น

การสร้างโปรแกรมในการจำแนกฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีและเสื่อมสภาพ ได้เลือกใช้ความแตกต่างของขนาดการสั่นในโดเมนเวลา ซึ่งการสั่นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการเสียดสีจากการหมุนของแผ่นดิสก์ โดยในการทดลองนี้ใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ความเร็วรอบ 7200 rpm หรือความถี่ 120 Hz จากสมมติฐานการสั่นที่เกิดขึ้น พิจารณาการสั่นเป็นแบบบังคับที่สถานะคงตัว และเพื่อให้ได้สัญญาณการสั่นที่ดี เราได้ใช้การกรองสัญญาณของบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth) อันดับที่สาม แบบช่วงความถี่ผ่าน (Band pass filter) และกำหนดช่วงความถี่ตัดผ่านต่ำและความถี่ตัดผ่านสูงคือ 110 Hz และ 130 Hz ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราการสุ่มที่ความถี่ 500 Hz ในการทดลองวัดการสั่นเพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นในแต่ละกรณีนี้ ได้ใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกน จำนวน 2 ตัวในการวัดการสั่นในหน่วยของความเร่ง (g) โดยเซนเซอร์ตัวที่หนึ่งวัดในแนวแกน Z และแกน Y และเซนเซอร์ตัวที่สองวัดในแนวแกน Z และแกน X โดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ NI 6008 ซึ่งใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการบันทึกข้อมูลการสั่น โดยทำการสุ่มตัวอย่างฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีจำนวน 50 ตัว และฉนวนรองรับการสั่นที่เสื่อมสภาพจำนวน 100 ตัวซึ่งการทดลองได้เก็บตัวอย่างขนาดการสั่นกรณีฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีจำนวน 50 ตัวอย่าง กรณีฉนวนรองรับการสั่น

เสื่อมสภาพจำนวน 100 ตัวอย่างและกรณีอื่นๆ กรณีละ 50 ตัวอย่าง การกำหนดช่วงของขนาดการสั่นในแต่ละกรณีที่เป็นไปได้ โดยใช้ข้อมูลที่วัดได้มาวิเคราะห์ทางสถิติแบบ t-test ที่ความเชื่อมั่น 95% ของข้อมูลในการเขียนโปรแกรมเพื่อบ่งชี้สภาพ ฉนวนรองรับ การสั่นซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ของช่วงขนาดการสั่นในแต่ละกรณี

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์ที่เหมาะสม

ในการหาตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ที่เหมาะสมได้พิจารณาตำแหน่งที่สามารถจะติดตั้งเซนเซอร์ได้และให้ค่าสัญญาณการสั่นอยู่ในเกณฑ์ที่บ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่นได้ผลการวัดการสั่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

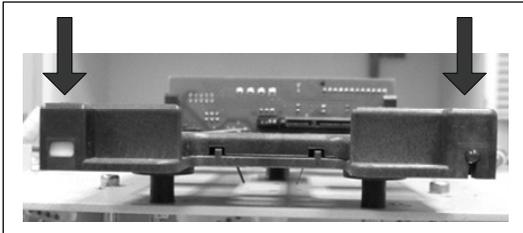
ตารางที่ 1 ขนาดการสั่นในตำแหน่งที่เลือก

	TL	TR	SL	SR	F
	Ampl.	Ampl.	Ampl.	Ampl.	Ampl.
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
P1	0.0504	0.0272	0.0116	0.0152	0.0203
P2	0.0346	0.0226	0.0183	0.0212	0.0199
P3	0.0287	0.0269	0.0231	0.0248	0.0197
P4	0.0387	0.0456	0.0301	0.0317	0.0195
P5	0.0457	0.0502	0.0325	0.0355	-

\* Ampl. หมายถึง ขนาดการสั่น

จากผลการทดลองข้างต้น TL หมายถึง ด้านบนข้างซ้าย P คือ ตำแหน่งวัดที่เรียงจากด้านหลังมาด้านหน้า จากตารางจะเห็นว่า ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 5 ให้ขนาดการสั่นที่มาก แต่ตำแหน่งที่ 1 ไม่เหมาะต่อการติดตั้งเซนเซอร์ ดังนั้นจึงเลือกตำแหน่งที่ 5 ในส่วนของ TR หมายถึง ด้านบนข้างขวา ตำแหน่งที่ 5 ให้ผลการสั่นมากที่สุดและเหมาะต่อการติดตั้งเซนเซอร์เช่นเดียวกัน ในส่วนของ SL และ SR คือด้านข้างซ้าย และขวา ตำแหน่งที่ 5 ก็ให้ผลการสั่นที่เหมาะสมและมีค่าใกล้เคียงกัน และสุดท้ายด้านหน้า แทนด้วยอักษร F ผลการสั่นมีค่าใกล้เคียงกันทุก

ตำแหน่งดังนั้นในการเลือกติดตั้งเซนเซอร์แบบ MEMS แสดงในรูปที่ 9 โดยใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ 3 แกน 2 ตัว ตัวที่ 1 อยู่ทางซ้ายมือ เลือกวัดในทิศทางแกน Z และแกน Y ตัวที่ 2 อยู่ทางขวามือ เลือกวัดในทิศทางแกน Z และแกน X



รูปที่ 9 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ที่เลือก

#### 4.2 การวิเคราะห์การสั่นในกรณีต่าง ๆ

ผลทดลองได้แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ 5 เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่น ต่อมาได้พิจารณาการตอบสนองการสั่นในตำแหน่งนี้โดยทำการทดลองทั้ง 8 กรณี ผลการวัดการสั่น ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับกรณีของจำนวนรอบการสั่นสภาพดีทั้ง 3 ตำแหน่ง ให้ค่าขนาดการสั่นที่สูงและเมื่อมีจำนวนรอบการสั่นเสื่อมสภาพ 1 ตัว ขนาดการสั่นจะมีค่าลดลง และขนาดการสั่นจะมีค่าน้อยสุดเมื่อมีจำนวนรอบการสั่นทั้งหมด 3 ตัว ดังนั้นเราสามารถให้ความแตกต่างของขนาดการสั่นในแต่ละกรณีเป็นตัวบ่งชี้สภาพของจำนวนรอบการสั่นได้

ตารางที่ 2 ขนาดการสั่นทั้ง 8 กรณี

Case	TL Ampl. (g)	TR Ampl. (g)	SL Ampl. (g)	SR Ampl. (g)	F Ampl. (g)
Good	0.04	0.047	0.035	0.034	0.017
Bad A	0.034	0.037	0.031	0.031	0.014
Bad B	0.033	0.024	0.025	0.024	0.019
Bad C	0.021	0.035	0.023	0.024	0.018
Bad AB	0.024	0.039	0.025	0.024	0.012
Bad AC	0.035	0.02	0.026	0.026	0.011
Bad BC	0.014	0.016	0.022	0.021	0.019
Bad ABC	0.011	0.014	0.02	0.019	0.016

#### 4.3 การออกแบบโปรแกรม

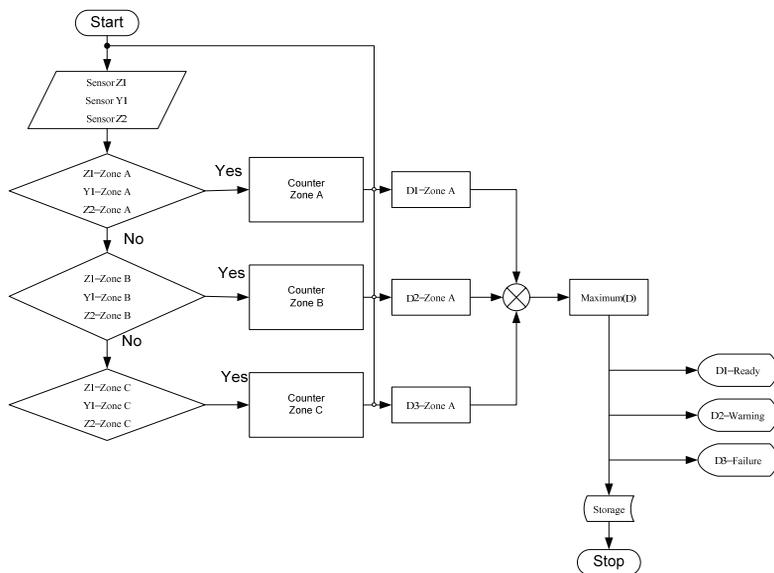
ในการสร้างเงื่อนไขโปรแกรมเพื่อบ่งชี้สภาพของจำนวนรอบการสั่นโดยใช้ความแตกต่างของขนาดการสั่น โดยเก็บข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างให้เพียงพอ ซึ่งในการทดลองได้สุ่มตัวอย่างจำนวนรอบการสั่นสภาพดีจำนวน 50 ตัวอย่างและจำนวนรอบการสั่นเสื่อมสภาพจำนวน 100 ตัวอย่าง และเก็บข้อมูลการสั่นทั้ง 8 กรณีโดยในการเก็บข้อมูลการสั่น ได้ทำการทดลองโดย กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 7 ได้สุ่มตัวอย่างจำนวน 50 ตัวอย่างและกรณีที่ 8 จำนวน 100 ตัวอย่าง โดยการวัดค่าการสั่นตัวอย่างละ 10 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย ในการหาความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นนั้นได้เลือกใช้สถิติทดสอบแบบ t test ที่ระดับช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลการวัดการสั่นจากการทดลองแสดงในตารางที่ 3 ขนาดการสั่นของกรณีที่มีจำนวนรอบการสั่นที่เสื่อมสภาพจะมีค่าน้อยกว่าขนาดการสั่นที่สภาพดีและในกรณีที่ไม่มีของเสีย 1 ตัวที่มีขนาดการสั่นมากที่สุดอยู่ในกรณีของจำนวนรอบการสั่นเสีย 1 ตัวในตำแหน่ง A เราสามารถแบ่งโซนได้ 3 โซนในแต่ละทิศทางการวัด คือ โซน A เป็นโซนของจำนวนรอบการสั่นสภาพดี โซน B เป็นโซนการเฝ้าระวังและโซน C เป็นโซนของจำนวนรอบการสั่นที่เสื่อมสภาพ ขนาดการสั่นของกรณีที่มีจำนวนรอบการสั่นที่เสื่อมสภาพบางกรณีมีขนาดการสั่นมากกว่าขนาดการสั่นของจำนวนรอบการสั่นสภาพดีทำให้ไม่สามารถแยกของดีกับของเสียได้ในทิศทางแกน X นี้ จึงทำให้การวัดการสั่นเหลือ 3 ทิศทาง คือ แกน Z1 แกน Y1 และแกน Z2 จากนั้นได้นำไปเป็นเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของจำนวนรอบการสั่นดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อได้รับคำสั่งสัญญาณจากเซนเซอร์ในแกน Z1 Y1 และ Z2 โดยค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ครั้ง จากนั้นเข้าสู่เงื่อนไข เช่น ถ้าขนาดการสั่นตรงเงื่อนไขโซน A ให้นับว่าเป็นของสภาพดี และทำการวนรอบรับค่า 5 รอบ จากนั้นตรวจสอบว่า เมื่อครบ 5 รอบแล้วเกิดโซนไหนมากที่สุด ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อครบ 5 รอบแล้ว การสั่นเกิดขึ้นในโซน A มากที่สุด คือ 8 ครั้งและเกิดขึ้นในโซน B 7 ครั้ง และโซน C ไม่เกิดขึ้นเลย แสดงว่าจำนวนรอบการสั่นที่ทดสอบอยู่ในสภาพดี

ตารางที่ 3 ช่วงขนาดการสั่นของแต่ละกรณี

Case	Z1 Ampl. (g)	Y1 Ampl. (g)	Z2 Ampl. (g)	X2 Ampl. (g)
Good	0.0308±0.0005	0.0277±0.0003	0.0361±0.0008	0.0175±0.0001
Bad A	0.0252±0.0013	0.0265±0.0005	0.0297±0.0014	0.0147±0.0006
Bad B	0.0253±0.0004	0.0233±0.0005	0.0190±0.0004	0.0190±0.0001
Bad C	0.0181±0.0002	0.0217±0.0005	0.0273±0.0006	0.0191±0.0001
Bad AB	0.0182±0.0001	0.0223±0.0003	0.0170±0.0002	0.0104±0.0003
Bad AC	0.0171±0.0002	0.0228±0.0005	0.0297±0.0002	0.0118±0.0003
Bad BC	0.0152±0.0002	0.0210±0.0003	0.0176±0.0004	0.0185±0.0002
Bad ABC	0.0128±0.0002	0.0199±0.0001	0.0152±0.0002	0.0159±0.0002

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม

แกน/รอบ	1	2	3	4	5
Z1	A	B	B	A	B
Y1	A	A	B	A	A
Z2	B	B	A	A	B



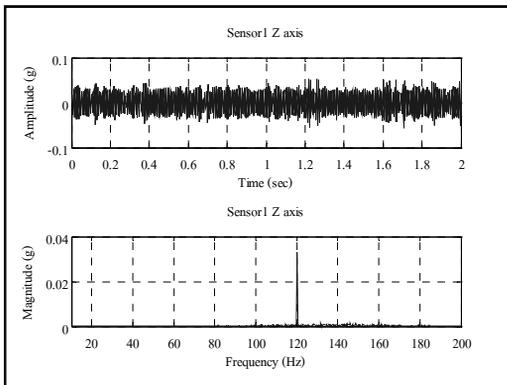
รูปที่ 10 แผนผังโปรแกรม

4.4 การใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกน (ADXL335 module) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due ในการวัดการสั่น

การติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 11 ผลการทดสอบอ่านค่าสัญญาณการวัดจากเซ็นเซอร์ความเร่งที่ความเร็วรอบการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ 120Hz โดยเลือกใช้อัตราการสุ่มข้อมูลที่ 500Hz และการกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่สาม ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยนำข้อมูลมาเขียนกราฟบนโปรแกรม MATLAB กราฟด้านบนแสดงสัญญาณการสั่นในโดเมนเวลา และกราฟด้านล่างแสดงสเปกตรัมการสั่นที่ความถี่ 120Hz ซึ่งตรงกับความเร็วในการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 11 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ความเร่ง



รูปที่ 12 สัญญาณการสั่นโดยใช้เซนเซอร์แบบ MEMS กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ผลการทดสอบโปรแกรมเพื่อการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยสุ่มตัวอย่างกรณีละ 5 ชุด ทั้งหมด 8 กรณี พบว่า ฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีให้ผลว่าสถานะพร้อมใช้งาน และฉนวนรองรับการสั่นที่เสื่อมสภาพ ให้ผลว่าเสื่อมสภาพทั้ง 7 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น

Case\No.	1	2	3	4	5
Good	Ready	Ready	Ready	Ready	Ready
Bad A	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad B	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad C	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad AB	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad AC	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad BC	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad ABC	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure

5. สรุปผลการวิจัย

อุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นโดยใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS (ADXL335 module) ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์(Arduino Due)ในการวัดการสั่น โดยใช้เทคนิคการจับกลุ่มตัวอย่างฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีและเสื่อมสภาพ และใช้ขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นเป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบสภาพ พบว่า โปรแกรมสามารถจำแนกความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นได้ ซึ่งทำให้สามารถช่วยลดปัญหาความผิดพลาดของการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จากการสั่นของฉนวนรองรับการสั่นที่เสื่อมสภาพและข้อมูลสภาพของฉนวนรองรับการสั่นได้ สามารถนำไปจัดทำแผนการซ่อมบำรุงแบบทำนายได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Chang Y B, Park D K, Park N C, Park Y P. Prediction of Track Misregistration Due to Disk Flutter in Hard Disk Drive. IEEE Transactions on Magnetics. 2002;38(2): 1441-1446.

[2] Jia Q W, Wang Z F. A New Adaptive Method for Identification of Multiple Unknown Disturbance Frequencies in HDDs. IEEE Transactions on Magnetics. 2008;44(11): 3746-3749.

- [3] Jintanawan T, Shen I Y, Ku C P R. Free and Forced Vibration of a Rotating Disk Pack and Spindle Motor System with Hydrodynamic Bearings. *Journal of Information Storage and Processing Systems*. 1999;1(1):45 - 58.
- [4] Jintanawan T, Shen I.Y. Free Vibration of a Rotating Disk Pack and Spindle Motor System with Rotating Shaft Design. *Journal of Information Storage and Processing Systems*. 2000;2:129 - 139.
- [5] Jintanawan T, Shen I Y, Tanaka K. Free Vibration of a Rotating Disk Pack and Spindle Motor System with Rotating Shaft Design. *Journal of Information Storage and Processing Systems*. 2000;37(2):799 - 803.
- [6] Jintanawan T. Mechanical Vibration of Computer Hard Disk Drives (HDD). *Journal of Thai Robotics Society*. 2001;1(1):54 - 60.
- [7] Srisertpol J, Theesungnem S, Wangrakpaiboon P. Vibration Study and Analysis of Test Chamber using Finite Element Method, The 23<sup>rd</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand. 2009; Nov 4-7: Chiangmai, Thailand. (In Thai).
- [8] Pang CK, Ong EH, Guo G, Qian H. Experimental Dynamic Characterizations and Modelling of Disk Vibrations for HDDs. *ISA Transactions*. 2008;47(1):85 - 93.
- [9] Park KS, Lim SH, Park YP, Chang YB, Park NC. Shock and Vibration Isolation of Laptop Hard Disk Drive using Rubber Mount. *Microsystem Technologies*. 2012;18:1559 -1566.
- [10] Shen JY, Tseng CW, Shen IY. Vibration of Rotating Disk/Spindle Systems with Flexible Housing/Stator Assemblies. *Journal of Sound and Vibration*. 2004;271:725 - 756.