

อุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น  
ในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์



นายวินัย ตุ่มทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**EQUIPMENT TO DETECT BAD ISOLATOR IN  
HARD DISK DRIVE TESTING PROCESS**

**Winai Tumthong**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2013**

อุปกรณ์ตรวจสอบความถี่ของสัญญาณ  
ในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)  
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสวีผล)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)  
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ติมปิงานงค์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)  
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วินัย ตุ่มทอง : อุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น

ในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (EQUIPMENT TO DETECT BAD ISOLATOR IN HARD DISK DRIVE TESTING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 110 หน้า.

ปัจจุบันมีความต้องการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องเพิ่มกำลังการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาด โดยฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทุกตัวที่ผลิตขึ้นต้องผ่านกระบวนการทดสอบเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคในการตัดสินใจเลือกซื้อกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องใช้เวลาประมาณ 25-30 ชั่วโมงต่อการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ 1 ชุด ซึ่งหากเกิดความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบจะต้องทำการแก้ไขและทดสอบใหม่ โดยความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่เกิดจากปัญหาการสั่นของช่องทดสอบ เมื่อพิจารณาที่ช่องทดสอบพบว่า ฉนวนรองรับการสั่นที่ออกแบบมาสำหรับลดการสั่นในช่องทดสอบเกิดการเสื่อมสภาพ จึงส่งผลให้การทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความผิดพลาด โดยปกติการเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นจะกระทำเมื่อมีจำนวนช่องทดสอบเกิดความผิดพลาดถึงค่าที่กำหนด ซึ่งวิธีการเปลี่ยนนั้นจะต้องหยุดเครื่องทดสอบและเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นของช่องทดสอบที่มีปัญหาและได้มีการตรวจสอบฉนวนรองรับการสั่นตัวอื่น ๆ โดยให้ช่างเทคนิคตรวจสอบเบื้องต้นด้วยการวินิจฉัยทางกายภาพ หากพบว่าฉนวนรองรับการสั่นมีการเสื่อมสภาพจึงทำการเปลี่ยน แต่หากยังใช้งานได้ก็จะยังใช้งานต่อไปเนื่องจากฉนวนรองรับการสั่นมีราคาค่อนข้างแพง การไม่ได้เปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นครบทุกตัวในหนึ่งเครื่องทดสอบจะส่งผลให้ฉนวนรองรับการสั่นที่ไม่ได้เปลี่ยนเกิดการเสื่อมสภาพตามมา ทำให้ต้องหยุดเครื่องทดสอบเพื่อเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตสินค้า ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นโดยใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS (Microelectromechanical System) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Due โดยได้ออกแบบเงื่อนไขการบ่งชี้สภาพฉนวนรองรับการสั่นด้วยความแตกต่างของขนาดการสั่นที่เกิดจากการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่สถานะคงตัว ซึ่งผลที่ได้สามารถบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นและนำไปสู่การวางแผนในการซ่อมบำรุงเครื่องทดสอบได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

WINAI TUMTHONG : EQUIPMENT TO DETECT BAD ISOLATOR IN  
HARD DISK DRIVE TESTING PROCESS. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 110 PP.

#### HARD DISK DRIVE/ ISOLATOR/ VIBRATION

Presently, there are more demands for hard disk drives (HDDs). Every HDD produced need to be tested to entrust consumer's confidence to purchase the product. Each testing takes about 25-30 hours. If there are any errors during the test, the technicians must be checked and retested. The errors can be occurred for several reasons but one of them is the deterioration of isolators in the pocket slots. When the number of bad isolators reached the warning level, the test chamber machine has stop and replace the new isolator. Unplanned stop machine is not requirement. Therefore, this research has designed the equipment to detect bad isolator in HDDs testing process using the Microelectromechanical System (MEMS) sensor with the Arduino Due Microcontroller Board that indicates the steady state of the vibration in differently sizes which the outcomes can identify the bad isolator in the testing process then easily to monitoring the maintenance plan of the Test Chamber Machines.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บริษัท ซิเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง และขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศความรู้ สติปัญญา ความสามารถ คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือ ทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาปราณีต่อศิษย์เสมอมา

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ และอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัย ทั้งในอดีตตลอดจนถึงปัจจุบัน ด้วยความกรุณาเสมอมา

คุณประเสริฐศิริ วรรณชิตพงศา วิศวกรบริษัท ซิเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยค้นคว้า แนะนำข้อมูลต่าง ๆ และทำการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณอารณัฒพรหม ศรีอักษรวิทยา และคณะเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

คุณสุเมธ อัสวศิลาวิสุกุล คุณอัษฎายุทธ รอดพ่าย และพี่ ๆ ที่สถาบันไทย-เยอรมัน ที่ให้โอกาสได้ไปเรียนรู้งานและนำกลับมาพัฒนางานวิจัย

วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คุณเจิมชง ปรรารถนารักษ์ และพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ กลุ่มวิจัย System and Control Engineering Laboratory ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและแนะนำข้อมูลในงานวิจัยนี้เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อไพโรจน์และคุณแม่สมใจ คู่้มทอง รวมถึง ดร.วิษณุ ทรงกิติ และสมาชิกครอบครัวคู่้มทอง และครอบครัวอ้าวจันทิกทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

วินัย คู่้มทอง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ

## บทที่

<b>1</b>	<b>บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3	ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4	ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5	วิธีดำเนินงาน.....	2
1.6	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7	การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2</b>	<b>ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1	กระบวนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	5
2.2	เครื่องทดสอบ.....	6
2.3	การสั้นทางกล.....	7
2.4	การวัดการสั้น.....	14
2.5	ฉนวนรองรับการสั้น.....	28

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 สถิติสำหรับงานวิศวกรรม .....	29
2.7 ความไม่แน่นอนของการวัด .....	31
2.8 ปรีทศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.9 สรุป.....	42
<b>3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>43</b>
3.1 การวิเคราะห์แหล่งกำหนดของการสัน.....	43
3.2 การศึกษาฉนวนรองรับการสัน.....	51
3.3 การสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพ ของฉนวนรองรับการสัน .....	54
<b>4 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....</b>	<b>59</b>
4.1 การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งที่เหมาะสม .....	59
4.2 การสร้างโปรแกรมในการบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสัน .....	61
4.3 สรุป.....	68
<b>5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>70</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย .....	70
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป .....	71
รายการอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกนกับบอร์ด Arduino Due .....	74
ภาคผนวก ข. การกำหนดค่าในโปรแกรมแลบวิว (LabView) .....	80
ภาคผนวก ค. โปรแกรมในการบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสัน .....	85
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	97
ประวัติผู้เขียน .....	110



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แสดงค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจำนวน 5 โหมด..... 49
3.2	คุณสมบัติเชิงกลของฉนวนรองรับการสั่นในกรณีต่าง ๆ ..... 53
4.1	ผลการสั่นในตำแหน่งที่เลือกบนช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์..... 59
4.2	การสั่นในตำแหน่งที่เลือก ทั้ง 8 กรณี..... 60
4.3	ขนาดการสั่นของกลุ่มตัวอย่าง..... 62
4.4	ตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม..... 66
4.5	การทดสอบ โปรแกรม โดยโปรแกรมแลบVIEWกับบอร์ด NI 6008..... 66
4.6	การทดสอบ โปรแกรมภาษาซีกับบอร์ด Arduino Due ..... 68

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เครื่องทดสอบ..... 7
2.2	ขนาดการสั่น (Amplitude) ..... 10
2.3	สปริงที่มีวัตถุซึ่งมีมวล m แขนงติดอยู่ที่ปลาย..... 12
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่ง ..... 15
2.5	แผนภาพการทำงานของระบบการวัดการสั่น ..... 14
2.6	การแปลงรูปสัญญาณ ฟังก์ชันคือ สัญญาณอะนาลอกต้นฉบับ และฟังก์ชันคือ สัญญาณที่ถูกสุ่ม ..... 16
2.7	การดิจิไตซ์สัญญาณ โดยใช้ ADC 3 บิต และ ADC 16 บิต ..... 17
2.8	ช่วงการทำดิจิไตซ์เซชัน -10 V ถึง +10 V..... 18
2.9	ช่วงการทำดิจิไตซ์เซชัน -2.5 V ถึง +2.5 V ..... 18
2.10	แสดงการติดตั้งของหัววัดการกระจัด ..... 19
2.11	แสดงการทำงานของ Proximity Probe..... 20
2.12	แสดงหัววัดแบบความเร็ว..... 21
2.13	แสดงหัววัดแบบความเร่ง..... 22
2.14	เครื่องมือเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล (Analyzer) ..... 23
2.15	แสดงการตอบสนองต่อความถี่สูงสุดของการจับยึดแต่ละแบบ ..... 25
2.16	แสดงการตอบสนองต่อความถี่ธรรมชาติของ Mounting แต่ละแบบ ..... 26
2.17	กราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่ ..... 27
2.18	แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบน โดเมนเวลากับ โดเมนความถี่ ..... 27
2.19	กราฟแสดงการส่งผ่านการกระจัดกับอัตราส่วนความถี่ ..... 28
2.20	กราฟแสดงการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่ ..... 29
2.21	การออกแบบโดยเพลลาอยู่กับที่ ..... 36
2.22	การออกแบบโดยเพลลาหมุนได้ ..... 37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 รูปแบบการสมมูล (0,1).....	38
2.24 รูปแบบการไม่สมมูล (0,1).....	39
2.25 รูปแบบการสมมูล (0,0).....	40
2.26 รูปแบบการไม่สมมูล (0,0).....	40
3.1 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่ง.....	41
3.2 สเปคตรัมการสั่นของโครงสร้าง.....	45
3.3 ชั้นทดสอบและช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	47
3.4 การติดตั้งหัววัดความเร่งบนชั้นทดสอบ.....	47
3.5 สเปคตรัมของการสั่นในขณะที่ไม่มีการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ของชั้นทดสอบ.....	47
3.6 การติดตั้งหัววัดความเร่งในขณะที่การทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	48
3.7 สเปคตรัมการสั่นของชั้นทดสอบขณะกระบวนการทดสอบ.....	48
3.8 สเปคตรัมการสั่นของช่องทดสอบ.....	50
3.9 ผลความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	51
3.10 ฉนวนรองรับการสั่น.....	52
3.11 แผนผังแสดงการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพ ของฉนวนรองรับการสั่น.....	54
3.12 ทิศทางในการติดตั้งเซนเซอร์.....	55
3.13 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์.....	56
3.14 โมดูลเซนเซอร์ความเร่งแบบ 3 แกน.....	56
3.15 บอร์ด Arduino DUE.....	57
3.16 การติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS ร่วมกับ โปรแกรมแลบวิว.....	58
4.1 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดความเร่งที่เลือก.....	61
4.2 การติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนและการทดลอง.....	61
4.3 แสดงช่วงขนาดการสั่นในทิศทางแกน Z ของเซนเซอร์ 1.....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงช่วงขนาดการสั่นในทิศทางแกน Y ของเซนเซอร์ 1.....	63
4.5 แสดงช่วงขนาดการสั่นในทิศทางแกน Z ของเซนเซอร์ 2.....	63
4.6 แสดงช่วงขนาดการสั่นในทิศทางแกน X ของเซนเซอร์ 2.....	64
4.7 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม.....	65
4.8 สัญญาณการสั่นโดยใช้เซนเซอร์แบบ MEMS กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	67
ก.1 โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน.....	75
ก.2 หลักการทำงานของไมโครเซนเซอร์.....	76
ก.3 แผนผังวงจรโมดูลเซนเซอร์แบบ 3 แกน ADXL335.....	78
ก.4 ขนาดของโมดูลเซนเซอร์แบบ 3 แกน ADXL335.....	79
ข.1 การต่ออุปกรณ์ NI 6008 กับ โมดูลเซนเซอร์แบบ 3 แกน ADXL335.....	81
ข.2 บล็อก DAQ Assistant.....	82
ข.3 Analog Output ใน DAQ Assistant.....	82
ข.4 การกำหนดค่า DAQ Assistant (Analog output).....	83
ข.5 Analog Input.....	83
ข.6 การกำหนดค่า DAQ Assistant (Analog input).....	84
ค.1 แสดงหน้าต่างแสดงผล.....	86
ค.2 แสดงหน้าต่างโปรแกรม.....	87
ค.3 Arduino IDE version 1.5.2.....	89

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$T$	=	คาบการเคลื่อนที่ (second)
$f$	=	ความถี่ (Hz)
$f_n$	=	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
$\omega$	=	ความถี่เชิงมุม (rad/s)
$\omega_n$	=	ความถี่ธรรมชาติ (rad/s)
$r$	=	อัตราส่วนความถี่ ( $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ )
$k$	=	ค่าคงที่ของสปริง (N/m)
$c$	=	ค่าความหน่วง (N.s/m)
$m$	=	มวล (kg)
ADC	=	การแปลงค่าสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล
DOF	=	ลำดับชั้นความเป็นอิสระ
$\nu$	=	ลำดับชั้นความเป็นอิสระ
$\zeta$	=	อัตราส่วนหน่วง
$H_0$	=	สมมติฐานว่าง
$H_a$	=	สมมติฐานทางเลือก
$\alpha$	=	ระดับนัยสำคัญ
$\mu$	=	ความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด A
$s$	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$n$	=	จำนวนของข้อมูล
$p$	=	ความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด B
$a$	=	ค่าครึ่งหนึ่งของค่าความไม่แน่นอนที่ระบุมากับเครื่องมือวัด
$U$	=	ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด
$k$	=	ตัวคูณปรับค่า
$u_c$	=	ผลรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน
TPI	=	จำนวนร่องเก็บข้อมูลในหนึ่งหน่วยความยาวแนวรัศมี
FDBs	=	ตลับลูกปืนแบบของเหลว

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TMR	=	ค่าความคลาดเคลื่อนของหัวอ่าน
SL	=	ด้านข้างซ้าย
SR	=	ด้านข้างขวา
TL	=	ด้านบนซ้าย
TR	=	ด้านบนขวา
F	=	ด้านหน้า
MEMS	=	ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทุกตัวที่ผลิตขึ้นต้องผ่านกระบวนการทดสอบ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค ซึ่งในขั้นตอนกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องใช้เวลาานาน เมื่อเกิดความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบจะต้องทำการแก้ไขและทดสอบใหม่ ทำให้เสียเวลาและโอกาสในการจำหน่ายสินค้า

ความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดที่ตรวจพบในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นเกิดจากปัญหาการสั่นของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จากการสังเกตความผิดพลาดและความเสียหายของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ พบว่าฉนวนรองรับการสั่นของช่องทดสอบมีการเสื่อมสภาพ และเมื่อเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นตัวใหม่ ความผิดพลาดในการทดสอบจากสาเหตุของการสั่นนั้นไม่เกิดขึ้นอีก แสดงว่าความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการทดสอบ โดยทั่วไปเมื่อพบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นเกิดขึ้นกับช่องทดสอบ จะต้องงดการทดสอบกับช่องทดสอบนั้น ๆ เมื่อจำนวนช่องทดสอบที่ผิดพลาดเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงทำการหยุดเครื่องทดสอบและทำการเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่น โดยเปลี่ยนเฉพาะช่องทดสอบที่มีปัญหาก่อนและมีการตรวจสอบช่องทดสอบอื่น ๆ ด้วย โดยวิธีการให้ช่างเทคนิคโยกช่องทดสอบเพื่อตรวจสอบฉนวนรองรับการสั่น ซึ่งใช้ประสบการณ์และความชำนาญของช่างเทคนิค ทำให้ระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นไม่เท่ากันใน 1 เครื่องทดสอบ ทำให้ต้องหยุดเครื่องทดสอบถี่ขึ้นเพื่อเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่น อีกทั้งฉนวนรองรับการสั่นแต่ละตัวมีราคาค่อนข้างแพง

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาในการสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น เพื่อช่วยลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น และช่วยในการวางแผนการเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์การสั้นของช่องทดสอบในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
- 1.2.2 เพื่อป้องกันความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั้น
- 1.2.3 เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพฉนวนรองรับการสั้น

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 การวิเคราะห์การสั้นของช่องทดสอบ โดยเทคนิคการวัดการสั้น
- 1.3.2 การวิเคราะห์การสั้นและเลือกจุดวัดที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งเซนเซอร์
- 1.3.3 สร้างชุดเครื่องมือวัดอย่างง่าย

## 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 การวิเคราะห์การสั้นของเครื่องทดสอบรุ่น ST240-SP ที่มีใช้งานอยู่ในบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด
- 1.4.2 การวิเคราะห์การสั้นในกระบวนการทดสอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว
- 1.4.3 ใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนในการวัดกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due

## 1.5 วิธีการดำเนินงาน

- 1.5.1 การดำเนินงาน
  - ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
  - ศึกษาปัญหาและสาเหตุของการสั้นในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
  - ศึกษาวรรณกรรมและบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
  - ศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการสั้น
  - การวิเคราะห์การสั้นของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์และกำหนดจุดวัดที่เหมาะสม

เหมาะสม

- สร้างเครื่องมือวัดการสั้นอย่างง่าย
- บันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- จัดทำเอกสารรายงานวิจัย



### 1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

- วิเคราะห์การสั่นของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์ที่เหมาะสม
- การวิเคราะห์การสั่นในตำแหน่งที่เลือกเพื่อดูความแตกต่างระหว่างฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีและเสื่อมสภาพ
- สร้างชุดอุปกรณ์วัดการสั่นโดยใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due
- ใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนกับโปรแกรมแลบวิว (LabView) ในการบันทึกผลการทดลองและแสดงผล
- สร้างเงื่อนไขโปรแกรมเพื่อบ่งชี้การเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น
- นำเงื่อนไขโปรแกรมที่ได้ไปใช้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

### 1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- เครื่องคอมพิวเตอร์
- โปรแกรมแลบวิว
- ชุด NI 6008
- เครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณ (Dewetron Signal Analyzer)
- โปรแกรม dewesoft 7.0.5
- เซนเซอร์ความเร่ง ขนาด 50 g
- ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due
- เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS (ADXL 335 module)

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของฉนวนการสั่น ก่อนเกิดความเสียหายได้
- 1.6.2 การเขียนเงื่อนไขโปรแกรมเป็นภาษาซี สามารถเชื่อมต่อกับระบบของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ได้ง่าย
- 1.6.3 การระบุความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น นำไปสู่การวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องทดสอบได้

## 1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการสั้น อุปกรณ์ที่ใช้รองรับการสั้น รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินการทดลอง

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลองพร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเทคโนโลยีการตรวจสอบสภาพเครื่องจักรกลในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงาน (Condition Base Monitoring, CBM) โดยใช้วิธีการวัดการสั่น ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายเพราะสามารถบ่งชี้ปัญหาของเครื่องจักรได้หลากหลาย อาทิเช่น การเสียดสี การเยื้องศูนย์ การหลวมคลอน การเสียหายของตลับลูกปืน เป็นต้น การตรวจสอบสภาพของเครื่องจักรเป็นการป้องกันไม่ให้เครื่องจักรเกิดการพังเสียหาย (breakdown) ซึ่งจะทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตสินค้าและค่าใช้จ่ายในการซ่อมเครื่องจักร ซึ่งในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การสั่นนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รวมทั้งเป็นปัญหาต่อกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นนั้น จำเป็นต้องมีความรู้และความเข้าใจในเรื่องของการสั่นรวมถึงเทคนิคการวัดและการจัดเก็บข้อมูล โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทฤษฎีการสั่นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

กระบวนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

- Initial Test (SP) ทำหน้าที่ในการทดสอบการติดต่อและการทำงานเบื้องต้นของระบบกลไกต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
- Final Test (IO) ทำหน้าที่ในการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกี่ยวกับการรับและส่งข้อมูลผ่านทางอินพุตและเอาต์พุตพอร์ตและทำการทดสอบเกี่ยวกับการอ่านและเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเพื่อสร้างความเชื่อมั่นต่อผลิตภัณฑ์ก่อนจำหน่ายให้กับผู้บริโภค โดยหาความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น มอเตอร์ แผ่นจานบันทึกแถบแม่เหล็กหรือหัวอ่าน เป็นต้น ซึ่งการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นการคัดแยกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้มาตรฐานตามคุณสมบัติ เพื่อให้ผู้บริโภคเกิดความมั่นใจในการใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการเก็บข้อมูลโดยไม่ทำให้ข้อมูลเกิดการสูญหาย ซึ่งการทดสอบ

การทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นจำเป็นต้องอาศัยเครื่องทดสอบ ในการจัดการ กระบวนการทดสอบต่าง ๆ

## 2.2 เครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบ (Test Chamber Machine) แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีระบบการทำงานหลัก ๆ อยู่ 3 ส่วนคือ

### 2.2.1 ส่วนควบคุมการทำงานหลัก

ส่วนควบคุมการทำงานหลัก จะมีชุดคอมพิวเตอร์ใช้ในการควบคุมการทำงานหลัก ทั้งหมดของเครื่องทดสอบที่ประกอบไปด้วยจอแสดงผล ที่ใช้แสดงผลการทดสอบการทำงานของ ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์และใช้ในการติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องทดสอบ

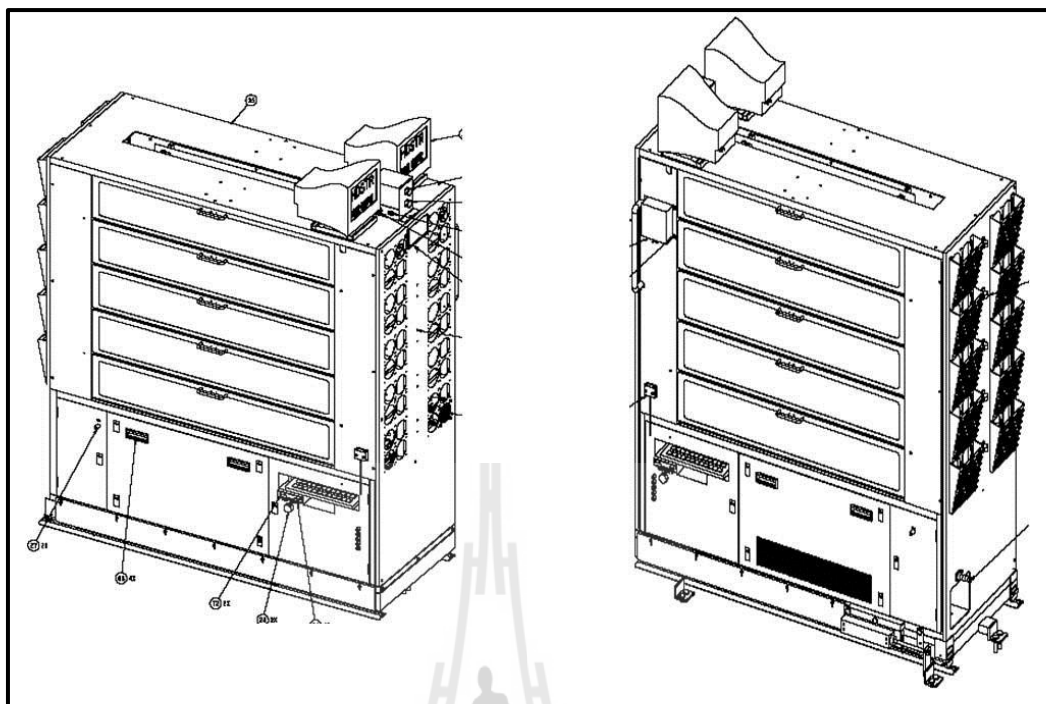
### 2.2.2 ส่วนของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ส่วนของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ส่วนนี้จะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถ ควบคุมการจ่ายแรงดันให้กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สามารถเริ่มต้น ทำการทดสอบได้

### 2.2.3 ส่วนของการควบคุมคำสั่งในการสั่งงาน

ส่วนของการควบคุมคำสั่งในการสั่งงาน จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการ ควบคุมการทำงานของระบบที่ประกอบไปด้วย ระบบการระบายความร้อนของเครื่องทดสอบและ ส่วนควบคุมการจ่ายแรงดันให้กับช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

กระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 25-30 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความจุข้อมูลของแต่ละผลิตภัณฑ์และบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จำเป็นต้องใช้เครื่องทดสอบเป็นจำนวนมากเพื่อรองรับอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ได้ทำการครอบครองกิจการของบริษัทอื่นและได้นำ เครื่องทดสอบรุ่น ST240-SP มาดัดแปลงประยุกต์ใช้ในการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ของรุ่นที่บริษัท ผลิต เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องทดสอบชนิดใหม่เพิ่มเติม โดยเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ที่มีคุณสมบัติเฉพาะ ของบริษัทนั้น ๆ ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบมาเพื่อรองรับการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันและเป็น เครื่องทดสอบที่ถูกใช้งานมาเป็นเวลานานกว่า 20 ปี เมื่อนำเครื่องทดสอบชนิดนี้มาใช้ใน กระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จึงทำให้เกิดการสั้นในกระบวนการทดสอบและส่งผลกระทบต่อฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.1 เครื่องทดสอบ

ในการวิเคราะห์การสั่นนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบทฤษฎีพื้นฐานและที่มาของการสั่น เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ปัญหาและแก้ไขได้ถูกต้อง

### 2.3 การสั่นทางกล

การสั่นทางกล (Mechanical Vibration) คือการเคลื่อนที่ของวัตถุหรืออนุภาครอบจุดสมดุล ในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะการเคลื่อนที่ที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในรูปแบบ การเคลื่อนที่เข้าไปข้างหน้าหรือการแกว่งรอบจุดสมดุลก็ตาม ซึ่งลักษณะทางกายภาพของปรากฏการณ์ การสั่นจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปพลังงาน สำหรับระบบที่มีการสั่นนั้นมีองค์ประกอบสำคัญ คือ การสะสมพลังงานศักย์ การสะสมพลังงานจลน์ และการหน่วงให้พลังงานของระบบลดลง ซึ่งการเปลี่ยนรูปของพลังงานจะทำให้เกิดการสั่นและการหน่วงพลังงานนั้นจะเปลี่ยนพลังงานศักย์ และพลังงานจลน์ของระบบให้อยู่ในรูปอื่น ๆ เช่น เสียงหรือความร้อน เป็นต้น ทำให้พลังงาน ของระบบลดลงไปเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป แต่ถ้ามีแรงมากระทำกับวัตถุหรือเครื่องจักรตลอดเวลา จะทำให้การสั่นนั้นยังคงมีอยู่

### 2.3.1 ที่มาของการสั่น

โดยทั่วไปการทำงานของชิ้นส่วนเครื่องจักรย่อมมีการสั่นเกิดขึ้น แต่ถ้าระดับการสั่นนั้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ การสั่นที่เกิดขึ้นก็จะไม่ส่งผลกับเครื่องจักร แต่ถ้าระดับการสั่นมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็จะส่งผลให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรมีอายุการใช้งานที่สั้นลง การหาสาเหตุและที่มาของการสั่นนั้น เพื่อทำการแก้ไขปัญหาของเครื่องจักรได้ถูกต้อง การสั่นนั้นมาจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น การเสียดสีจากการหมุน ซึ่งเกิดจากจุดศูนย์กลางของการหมุนและจุดศูนย์กลางของมวลไม่อยู่ในจุด ๆ เดียวกัน การเยื้องศูนย์ ซึ่งเกิดจากการจัดวางตำแหน่งของศูนย์กลางไม่ตรงกัน การหลวมคลอนของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร ซึ่งเกิดจากสกรูที่ขันยึดเกิดการหลวมคลอน เป็นต้น

### 2.3.2 ลักษณะของการสั่น

การแบ่งลักษณะของการสั่นจะทำให้สามารถวิเคราะห์การสั่นได้อย่างมีระบบ โดยจะแบ่งตามลักษณะการตอบสนองทางพลวัต ลักษณะของเงื่อนไขเริ่มต้นและแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งแบ่งได้เป็น 8 ลักษณะ ดังนี้คือ

- การสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) คือ การสั่นของระบบที่ถูกรบกวนในขณะหยุดนิ่ง ณ จุดสมดุลครั้งแรกเพื่อให้เกิดการสั่นขึ้นและการสั่นนั้นดำเนินต่อไปโดยไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำกับระบบอีก การรบกวนระบบอาจทำให้เกิดการกระจัดเริ่มต้นหรือความเร็วเริ่มต้นหรือทั้งสองแบบรวมกันก็ได้

- การสั่นแบบบังคับ (Force Vibration) คือ การสั่นของระบบภายใต้แรงกระทำจากภายนอก ซึ่งแรงกระทำจากภายนอกนี้อาจจะเป็นแรงในลักษณะซ้ำตัวเองหรือไม่ซ้ำตัวเองก็ได้ การสั่นแบบบังคับในทางปฏิบัติมักจะทำให้เกิดความถี่และถ้าความถี่ของแรงกระทำจากภายนอกตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง (resonance) โดยทั่วไปแล้วการตอบสนองของระบบที่มีแรงภายนอกมากระทำจะมีการตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) และการตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady-State Response) แต่เมื่อเวลาผ่านไปพอสมควร การตอบสนองชั่วคราวจะหายไปคงเหลือแต่การตอบสนองในสภาวะคงตัวของระบบ

- การสั่นแบบไม่มีความหน่วง (Undamped vibration) คือ การสั่นที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมของระบบ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแรงเสียดทานหรือแรงต้านอื่น ๆ การสั่นแบบไม่มีความหน่วงในความเป็นจริงจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในอวกาศเท่านั้น

- การสั่นแบบมีความหน่วง (Damped vibration) คือ การสั่นที่เกิดการสูญเสียพลังงานในระหว่างเกิดการเคลื่อนที่ ส่งผลให้พลังงานรวมของระบบมีค่าลดลง โดยทั่วไปการสั่นที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นการสั่นแบบมีความหน่วงแทบทั้งสิ้น

- การสั่นแบบเชิงเส้น (Linear vibration) คือ องค์ประกอบของระบบ เช่น มวล สปริงและตัวหน่วง มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำกับระยะทางหรือความเร็วของพิกัดที่ใช้อย่างเป็นเชิงเส้น

- การสั่นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear vibration) คือ องค์ประกอบของระบบ เช่น มวล สปริงและตัวหน่วง มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำกับระยะทางหรือความเร็วของพิกัดที่ใช้อย่างไม่เป็นเชิงเส้น

- การสั่นแบบกำหนดได้ (Deterministic vibration) คือ ระบบที่เกิดการสั่นจากแรงกระทำภายนอกที่สามารถกำหนดขนาดของแรงหรือค่าความสัมพันธ์ของแรงซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาได้

- การสั่นแบบสุ่ม (Random vibration) คือ ระบบที่เกิดการสั่นจากแรงกระทำภายนอก ซึ่งแรงกระทำนั้นไม่สามารถกำหนดขนาดของแรงหรือค่าความสัมพันธ์ของแรงซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาได้

### 2.3.3 ค่าของการสั่น

การวัดค่าการสั่นก็เพื่อนำมาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการสั่นและใช้วิเคราะห์การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร ดังนั้นเราจะต้องรู้จักและทำความเข้าใจค่า มิติและหน่วยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดการสั่นก่อนที่จะลงลึกในรายละเอียดต่อไป

- ค่าสูงสุด (Peak) คือ ค่าการสั่นจากจุดอ้างอิงที่จุดศูนย์หรือจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุดของคลื่นหรือมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าการสั่นภายในช่วงที่กำหนด เหมาะสำหรับการวัดการกระจัดและความเร่ง

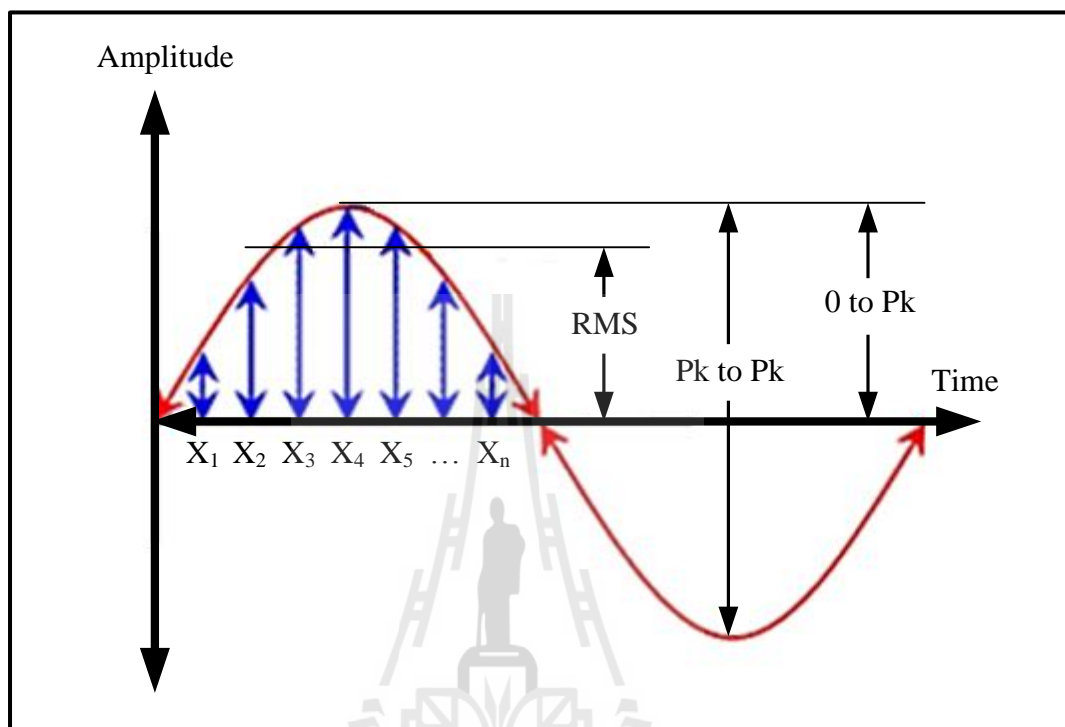
- ค่าเต็มลูกคลื่น (Peak to Peak) คือ ค่าการสั่นสองเท่าของค่าการสั่นสูงสุดเป็นค่าการสั่นที่วัดจากค่าสูงสุดบนถึงค่าต่ำสุดล่างของคลื่นในแต่ละคาบการเคลื่อนที่ เหมาะสำหรับการวัดการกระจัด

- ค่าเฉลี่ย RMS (Root Mean Square) คือ ค่ารากที่สองของผลรวมยกกำลังสองของการสั่นในช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งเป็นการเฉลี่ยตลอดคาบ ค่า RMS นิยมใช้เป็นค่าวัดสำหรับเปรียบเทียบความรุนแรงของเครื่องจักร เหมาะสำหรับการวัดความเร็วและความเร่ง ทั้งนี้ลักษณะของคลื่นต้องเป็นรูปไซน์เท่านั้นจึงจะได้ค่าเฉลี่ยที่ถูกต้อง

- อัตราส่วนสูงสุด (Peak ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเร่งสูงสุดต่อค่าความเร่ง RMS หรือเรียกว่า เครสต์แฟกเตอร์ (Crest Factor, CF) เหมาะสำหรับตรวจวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน

- ค่าการสั่น โดยรวม (Overall vibration) คือ ค่าแสดงการสั่นตลอดช่วงความถี่ที่กำหนด เนื่องจากการสั่นที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรมีความถี่และมีความถี่ที่แตกต่างกัน

ในทางปฏิบัติบางครั้งไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดทุกความถี่ แต่ต้องทราบค่าโดยรวมที่แสดงผลออกมาในลักษณะ RMS



รูปที่ 2.2 ขนาดการสั่น (Amplitude)

- ความถี่ (Frequency) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการเคลื่อนที่หรือรอบของการหมุนต่อหน่วยเวลา ในหน่วย SI ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันจะวัดเป็นรอบต่อวินาที (Rev/s หรือ Hz) ซึ่งความถี่ที่มักจะพูดถึงกันนั้นจะมีอยู่สองชนิด คือ

- ความถี่ในการสั่นของเครื่องจักร คือความถี่ที่เกิดจากการหมุนหรือการเคลื่อนที่จากการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร เช่น มอเตอร์หมุนด้วยความถี่ 25 Hz ซึ่งความถี่ที่เกิดจากการทำงานหรือการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรนี้จะมากหรือน้อยก็จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง ซึ่งจะอธิบายในรายละเอียดภายหลัง โดยที่ความถี่และเวลาในการสั่นจะเป็นไปตามสมการ

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$



หรือ

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ (Hz)

$T$  คือ คาบการเคลื่อนที่ (second)

- ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ความถี่ธรรมชาติเป็นความถี่ประจำตัวของวัตถุใด ๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะต่าง ๆ ดังนี้คือ ความยืดหยุ่น ความแข็งแกร่งของวัตถุ ขนาดของวัตถุ และรูปทรงของวัตถุ จากรูปที่ 2.3 สปริงที่มีวัตถุมวล  $m$  แขนงติคอยู่ทีปลายเมื่อเราดึงสปริงดังกล่าวให้ยืดออกและปล่อย สปริงดังกล่าวก็จะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ตามสมการที่ 2.3

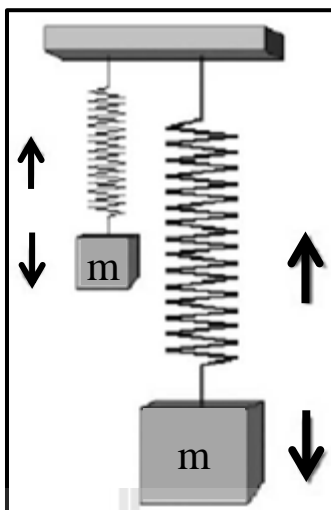
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

โดยที่  $f_n$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (Hz)

$k$  คือ ค่าคงที่ของสปริง (N/m)

$m$  คือ มวลของน้ำหนักทั้งหมด (kg)

สำหรับเครื่องจักรและชิ้นส่วนเครื่องจักรนั้น แต่ละชิ้นส่วนก็จะมีความถี่ธรรมชาติประจำตัว ซึ่งถ้าความถี่ในการสั่นหรือความถี่ในการทำงานของเครื่องจักรนั้นตรงกับความถี่ธรรมชาติก็จะเกิดการสั่นพ้อง จะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรง ในการใช้งานเครื่องจักรจึงต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้ความถี่ในการสั่นของเครื่องจักรตรงกับความถี่ธรรมชาติ ในกรณีทีเครื่องจักรต้องทำงานทีความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติหรือความถี่ในการเดินเครื่องต้องผ่านความถี่ธรรมชาติเป็นประจํา สามารถทีจะแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนรูปทรงของชิ้นส่วนของเครื่องจักร เช่น ดามให้หนาขึ้นหรือเสริมฐานจุดจับยึดของเครื่องจักรให้แข็งแรงมากยิ่งขึ้นก็จะสามารถแก้ไขปัญหาการสั่นพ้องกับความถี่ธรรมชาติได้



รูปที่ 2.3 สปริงที่มีวัตถุซึ่งมีมวล  $m$  แขนงติดอยู่ที่ปลาย

- หน่วยวัดการสั่น

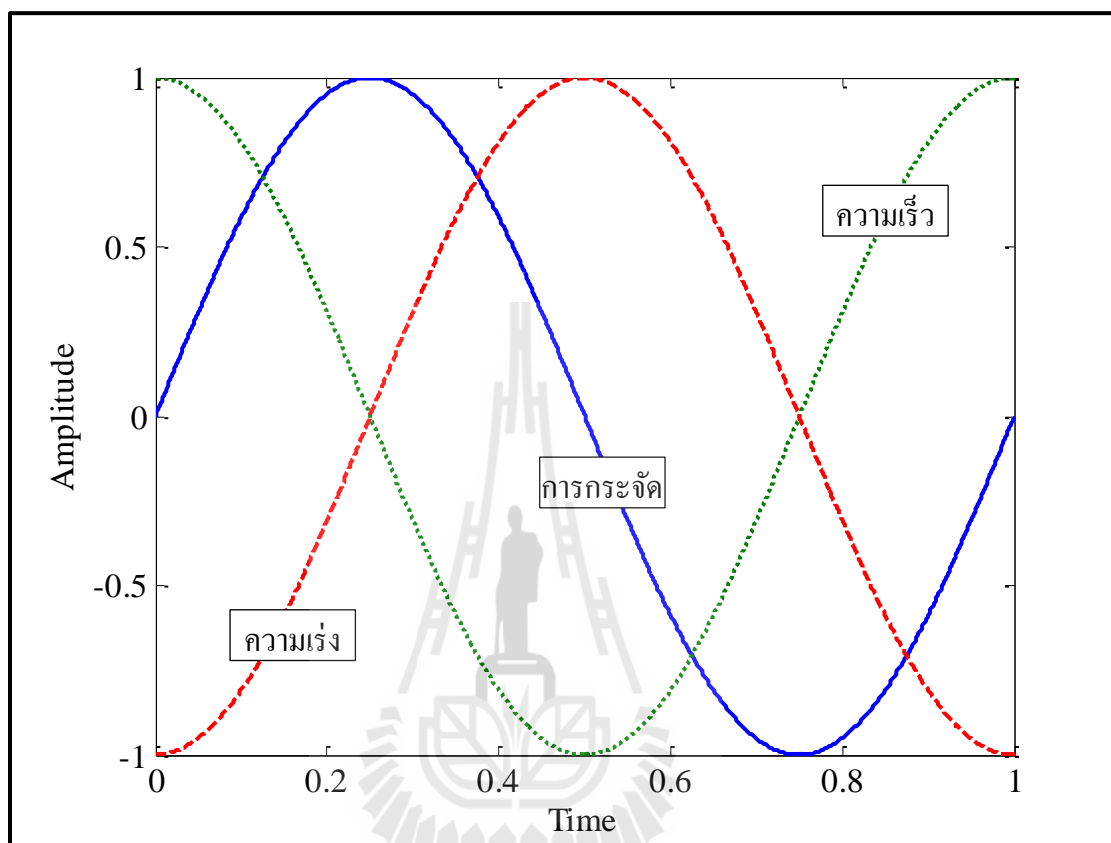
หน่วยวัดการสั่น คือ หน่วยที่ใช้ในการบอกปริมาณของการสั่นที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ต้องการวัด โดยหน่วยที่ใช้ในการวัดการสั่นจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- การวัดการกระจัด คือ การวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีการสั่นว่ามีการเคลื่อนที่ไปจากจุดอ้างอิงเท่าใดในการสั่นแต่ละรอบ โดยปกติจะนิยมวัดเป็นมิลลิเมตร ในการวัดระยะทางจะวัดแบบเต็มลูกคลื่น ส่วนมากจะใช้กับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วรอบต่ำ ๆ ที่ไม่เกิน 1200 รอบต่อนาที หรือ 20 Hz เช่น เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน หรือเครื่องจักรที่หมุนช้า เพราะที่ความเร็วรอบในการหมุนหรือเคลื่อนที่ต่ำ ๆ วัตถุจะมีระยะการเคลื่อนที่ได้มาก การสั่นที่ความเร็วต่ำ ๆ นั้น ระยะการเคลื่อนที่ของการสั่นเป็นสิ่งที่สามารถมองเห็นได้ดีที่สุด

- การวัดความเร็ว คือ การวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีการสั่นว่ามีความเร็วเท่าไรในแต่ละรอบของการสั่น โดยปกตินิยมวัดเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ในการวัดความเร็วจะวัดแบบ RMS ซึ่งเราจะใช้หน่วยนี้กับการวัดการสั่นที่มีความถี่ระหว่าง 20 Hz-1,000 Hz

- การวัดอัตราเร่ง คือ การวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราของความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อหน่วยเวลาของวัตถุที่มีการสั่น ใช้ในการวัดการสั่นที่ความถี่สูง คือ ตั้งแต่ 10,000 Hz ขึ้นไป เพราะว่าการสั่นที่ความถี่สูงนั้นระยะทางการเคลื่อนที่จะน้อยและในขณะเดียวกันอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่จะสูงมาก ดังนั้น ค่าที่สามารถจะมองเห็นได้ชัดเจนในการวัดการสั่นที่ความถี่สูงก็คืออัตราเร่ง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่ง

แสดงดังรูปที่ 2.4 จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.4 ความเร็วจะมีมุมเฟสหน้าหน้าการกระจัด อยู่ 90 องศา และความเร่งจะมีมุมเฟสหน้าหน้าการกระจัดอยู่ 180 องศา



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่ง

#### 2.3.4 พลศาสตร์ของเครื่องจักร

เหตุผลสำคัญที่ทำให้รูปแบบการสั่นของเครื่องจักรมีความหลากหลายและแตกต่างกันนั้น มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ของเครื่องจักร โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นอยู่กับมวล ความแข็งของสปริง ความหน่วงและลำดับชั้นความเป็นอิสระของการเคลื่อนที่ แต่อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องมีความระมัดระวังในการวิเคราะห์การสั่นอยู่บ้าง เพราะรูปแบบของการสั่นที่เกิดจากเครื่องจักรนั้นอาจจะแปรผันไปตามปัจจัยของตำแหน่งหรือปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ในการวัดได้อีกด้วย

- มวลเป็นคุณสมบัติของวัตถุในการอธิบายว่ามีปริมาณเนื้อวัสดุ ณ เวลานั้น แต่สำหรับหลักการของพลศาสตร์แล้ว มวลจะอธิบายถึงความสามารถของวัตถุในการต้าน

แรงจากภายนอกที่มากระทำกับวัตถุหรือเครื่องจักร หรืออาจกล่าวได้ว่า ยิ่งวัตถุมีมวลมากก็ต้องใช้แรงปริมาณมากในการทำให้วัตถุเคลื่อนที่ ในการวิเคราะห์การสั่นถ้าเครื่องจักรมีมวลมาก และเกิดการสูญเสียสภาวะสมดุลแล้ว ปริมาณการสั่นก็จะมากตามไปด้วย

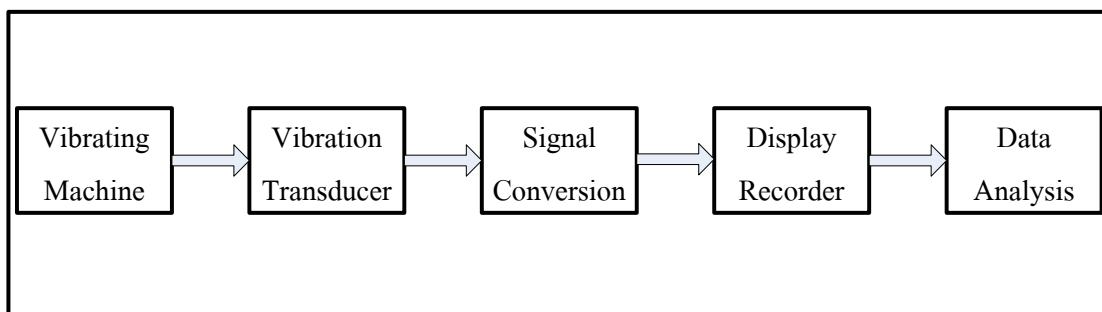
- ความแข็งของสปริงเป็นคุณสมบัติของวัตถุที่คล้ายคุณสมบัติของสปริง คือบอกถึงระดับความสามารถของวัตถุในการต้านแรงจากภายนอกที่มากระทำ ซึ่งจะส่งผลให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงระยะทางหรือมิติรูปร่าง

- ความหน่วงเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงสภาพการต้านการเคลื่อนที่ มีผลทำให้ความเร็วของการสั่นลดลง โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึงแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการกระทำของของเหลวหรือก๊าซหรือการเสียดสีของวัตถุอื่น ๆ

- ลำดับชั้นความเป็นอิสระของการวิเคราะห์การสั่นเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่า เครื่องจักรมีทิศทางเคลื่อนที่ใดทิศทาง และยิ่งไปกว่านั้นจะพบว่า คุณสมบัติของมวล ความแข็งของสปริงและความหน่วงจะมีความสัมพันธ์แตกต่างกันสำหรับแต่ละทิศทางของการเคลื่อนที่

## 2.4 การวัดการสั่น

ในวัดการสั่นจะต้องมีความรู้และความเข้าใจในเครื่องมือวัดและการวิเคราะห์สัญญาณ จากรูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบการวัดการสั่น โดยการสั่นของเครื่องจักรจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยทรานสดิวเซอร์ แต่โดยส่วนใหญ่สัญญาณที่ออกจากทรานสดิวเซอร์จะมีขนาดของสัญญาณน้อยมาก จึงต้องมีการปรับปรุงสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและลดสัญญาณรบกวน จากนั้นจึงนำสัญญาณไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 2.5 แผนภาพการทำงานของระบบการวัดการสั่น

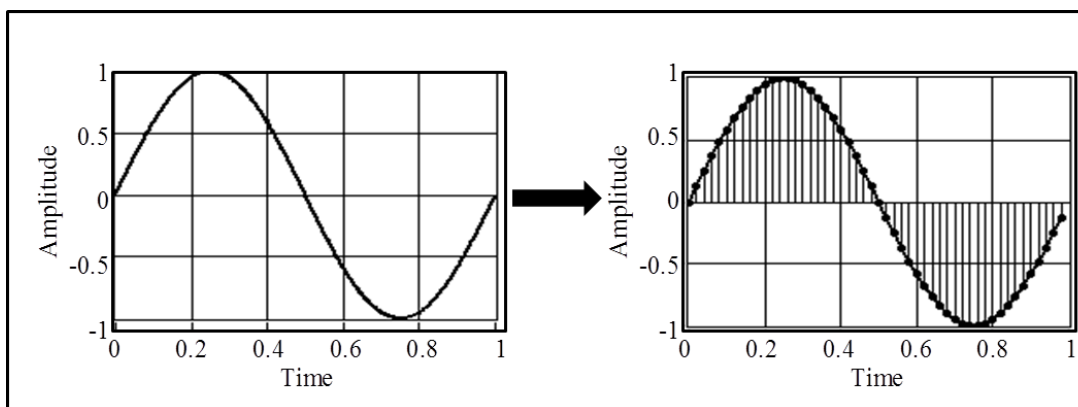
### 2.4.1 สัญญาณการสั้น

การสั้น คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของการกระจัด ความเร็ว หรือความเร่งเทียบต่อหน่วยเวลา ดังนั้น สัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง แต่ในการเก็บค่าสัญญาณและการวิเคราะห์สัญญาณการสั้น มีความต้องการสัญญาณที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องมีการแปลงค่าสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter, ADC) ซึ่งขั้นตอนการแปลงสัญญาณจากอะนาลอกเป็นดิจิทัลมีดังนี้

#### - การสุ่มสัญญาณ (Sampling)

เนื่องจากคอมพิวเตอร์จะเก็บและประมวลผลข้อมูลในรูปของดิจิทัลเท่านั้น กระบวนการนี้จึงเป็นการเปลี่ยนสัญญาณอะนาลอกที่เป็นเส้นกราฟต่อเนื่องให้กลายเป็นจุดของข้อมูลดิจิทัลที่ไม่ต่อเนื่องโดยวิธีการสุ่มสัญญาณ ด้วยอัตราเร็วที่คงที่ จากรูปที่ 2.6 แสดงการแปลงรูปสัญญาณ โดยฝั่งซ้าย คือ สัญญาณอะนาลอกต้นฉบับและฝั่งขวา คือ สัญญาณที่ถูกสุ่ม จะสังเกตได้ว่าถ้ามีการสุ่มสัญญาณเร็ว จุดที่ได้จากการสุ่มจะมีความหนาแน่นมากขึ้นจะทำให้เก็บความละเอียดของกราฟได้ใกล้เคียงกับต้นฉบับมากขึ้น ความเร็วในการสุ่มสัญญาณนี้เรียกว่า อัตราการสุ่ม (Sampling rate) มีหน่วยเป็นจุดต่อวินาที หรือเฮิรตซ์ ก็ได้ แต่ความเร็วนี้จะมีข้อจำกัดอยู่ที่สัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์ว่าจะสามารถสุ่มได้เร็วสูงสุดเท่าไร แต่การสุ่มข้อมูลด้วยความเร็วมากเกินไป ก็ไม่ใช่สิ่งที่จำเป็น เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำและพื้นที่ในการเก็บข้อมูล เราสามารถกำหนดอัตราการสุ่มในการแปลงสัญญาณที่เหมาะสมได้ โดยยึดตามหลักการแปลงสัญญาณที่เรียกว่า ทฤษฎีในควิสท์ (Nyquist Theory)

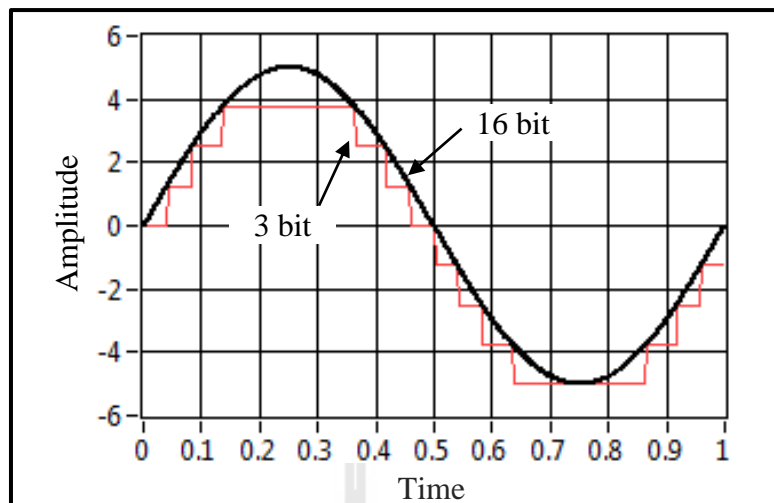
ทฤษฎีในควิสท์กล่าวว่า สัญญาณจะต้องถูกสุ่มด้วยความเร็วอย่างน้อยสองเท่าของความถี่สูงสุดที่มีอยู่ในสัญญาณ เพื่อให้สามารถนำจุดข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างเป็นรูปคลื่นกลับ ให้เหมือนกับสัญญาณต้นฉบับได้ แต่การเลือกใช้อัตราการสุ่มที่สองเท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณพอดี อาจจะได้ข้อมูลทางความถี่ของสัญญาณที่ถูกต้อง แต่จะไม่สามารถเก็บรายละเอียดของรูปทรงของกราฟได้ทั้งหมด ดังนั้นในทางปฏิบัติเราควรใช้อัตราการสุ่มประมาณ 5 เท่าถึง 10 เท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณ เพื่อให้ได้รูปทรงของกราฟที่ถูกต้องมากขึ้น กรณีที่ตั้งค่าอัตราการสุ่มช้ากว่าที่ทฤษฎีในควิสท์กำหนดไว้ เราจะได้ข้อมูลที่มีความถี่ผิดไปจากต้นฉบับ คือ จะต่ำกว่าความถี่ที่เกิดขึ้น เหตุการณ์แบบนี้เรียกว่าความถี่ผิดเพี้ยน (Aliasing frequency)



รูปที่ 2.6 การแปลงรูปสัญญาณ ฟังก์ชันคือ สัญญาณอะนาลอกต้นฉบับ  
และฟังก์ชาก็คือ สัญญาณที่ถูกสุ่ม

- ความละเอียด (Resolution)

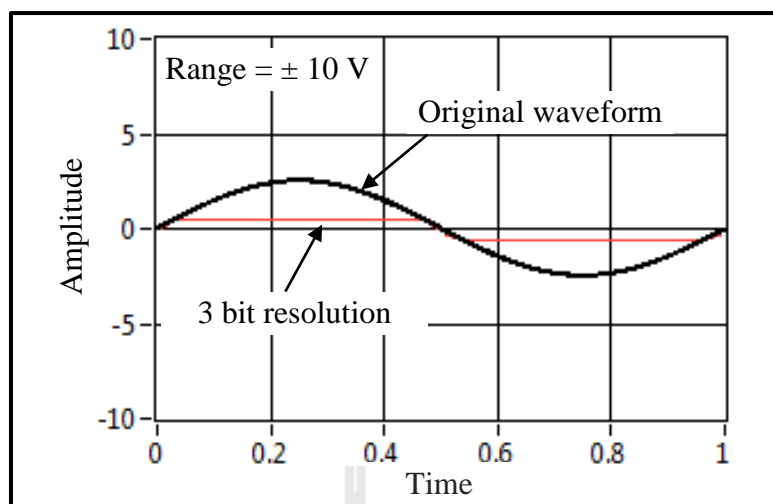
การสุ่มสัญญาณเป็นการสุ่มสัญญาณทางแกนเวลา (แกนแนวนอน) แต่สำหรับแกนตั้งซึ่งเป็นค่าของสัญญาณก็จะต้องทำการสุ่มเช่นกัน โดยวิธีการแปลงเป็นค่าทางดิจิทัลด้วยวิธีการปัดค่าทศนิยมขึ้นหรือลง เรียกขั้นตอนนี้ว่า ควอนไทเซชัน (quantization) หรือดิจิทัลไลเซชัน (digitization) ซึ่งความละเอียดของดิจิทัลไลเซชันขึ้นอยู่กับความละเอียดของ ADC ถ้ายังมีความละเอียดมากก็จะยังสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณอะนาลอกได้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งความละเอียดของ ADC จะนับเป็นจำนวนบิต ยกตัวอย่างเช่น ADC ที่มีความละเอียด 3 บิต จะสามารถแสดงระดับของสัญญาณได้ 8 ระดับ ( $2^3=8$ ) โดยเริ่มนับจากรหัสเลขฐานสอง 000 ไปจนถึง 111 ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงการดิจิทัลสัญญาณโดยใช้ ADC 3 บิต ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณที่ได้จะไม่ค่อยเหมือนต้นฉบับนัก เพราะถูกปรับค่าจนเกินไปมาก จนมองเห็นเป็นรูปขั้นบันได แต่ถ้าเราใช้ความละเอียดที่มากขึ้นก็จะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับต้นฉบับมากขึ้น เช่น การใช้ ADC ความละเอียด 16 บิต ก็จะสามารถแสดงระดับสัญญาณได้ถึง 65536 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.7



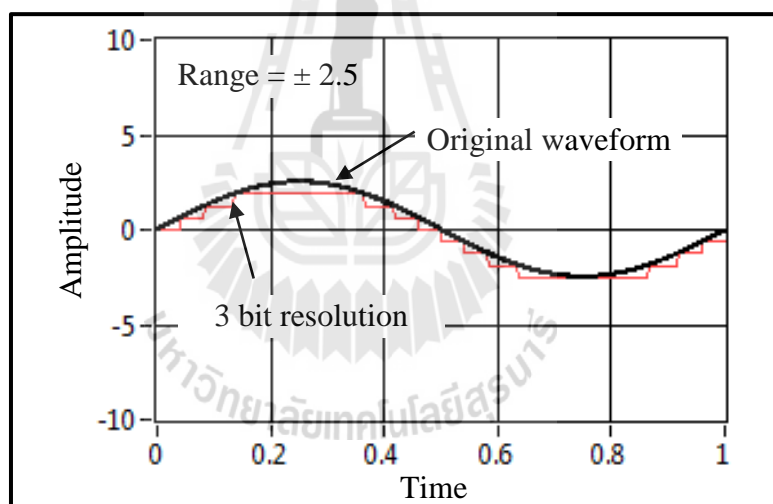
รูปที่ 2.7 การดิจิไทซ์สัญญาณ โดยใช้ ADC 3 บิต และ ADC 16 บิต

- ช่วง (Range)

ช่วง คือ การกำหนดความกว้างในขั้นตอนการทำดิจิไทเซชัน เช่น ถ้าเรามี ADC ความละเอียด 3 บิต และตั้งช่วงการวัดคือ  $-10\text{ V}$  ถึง  $+10\text{ V}$  (peak-to-peak =  $20\text{ V}$ ) แต่สัญญาณที่จะวัดกลับเล็กกว่านั้นมาก จะทำให้เราได้ผลลัพธ์ที่หยابกว่าปกติ โดยจะวัดได้ระดับละ  $2.5\text{ V}$  คำนวณได้จากช่วงหารด้วยจำนวนระดับของ ADC ( $20/8 = 2.5$ ) ดังรูปที่ 2.8 แต่ถ้าตั้งให้แคบลงใกล้เคียงกับระดับสัญญาณเหลือ  $-2.5\text{ V}$  ถึง  $+2.5\text{ V}$  (peak-to-peak =  $5\text{ V}$ ) เราจะสามารถดิจิไทซ์สัญญาณได้ดีขึ้น โดยวัดได้ระดับละ  $0.625\text{ V}$  ดังรูปที่ 2.9 ทั้งนี้การตั้งช่วงที่แคบจะสามารถตรวจวัดสัญญาณขนาดเล็กได้ดี แต่จะไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณที่เกินระดับช่วงที่กำหนดไว้ได้



รูปที่ 2.8 ช่วงการทำดิจิตัลเซชัน -10 V ถึง +10 V



รูปที่ 2.9 ช่วงการทำดิจิตัลเซชัน -2.5 V ถึง +2.5 V

#### 2.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัดการสั่น

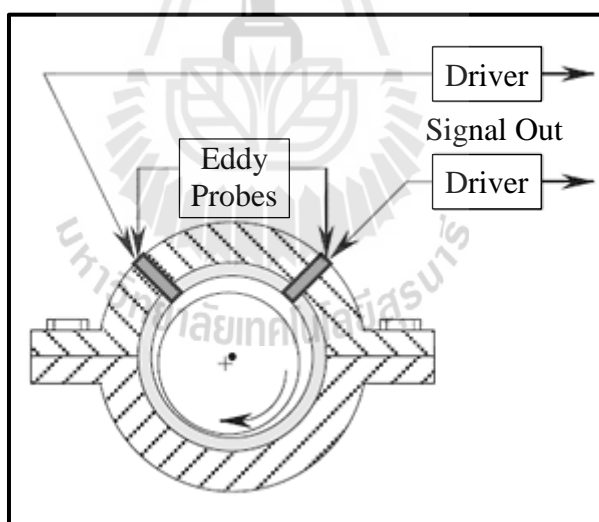
การวัดการสั่นในเครื่องจักรมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือ อุปกรณ์ตรวจวัดการสั่น สายนำสัญญาณ เครื่องมือวัดและบันทึกผลการวัด และซอฟต์แวร์สำหรับจัดเก็บข้อมูลและประมวลผล



- อุปกรณ์ตรวจวัดการสั่น

ทรานสดิวเซอร์ หรือหัววัดการสั่น เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณการสั่น เช่น การกระจัด ความเร็วและความเร่ง ให้เปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับได้ เช่น กระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า เพื่อที่จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้านั้นผ่านสายนำสัญญาณไปสู่เครื่องมือวัด เพื่อบันทึกค่าและแปลงกลับมาแสดงผลในเชิงกลหรือนำไปเก็บในอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Vibration Analyzer) แล้วส่งข้อมูลที่ได้อ่านนั้นสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นต่อไป สำหรับอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดการสั่นในเครื่องจักรนั้นมีหลายชนิด โดยทั่วไปแล้วการวัดสัญญาณการสั่นจะทำการวัดออกมาในปริมาณของการกระจัด ความเร็วและความเร่ง ซึ่งในการวัดการสั่นจะแบ่งทรานสดิวเซอร์ ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้คือ

- อุปกรณ์ตรวจวัดการกระจัด เป็นหัววัดที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นส่วนที่ต้องการวัดการเคลื่อนที่ หัววัดแบบนี้ใช้กับการวัดการเคลื่อนที่ของเพลลาหมุนหรือเพลลาหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.10

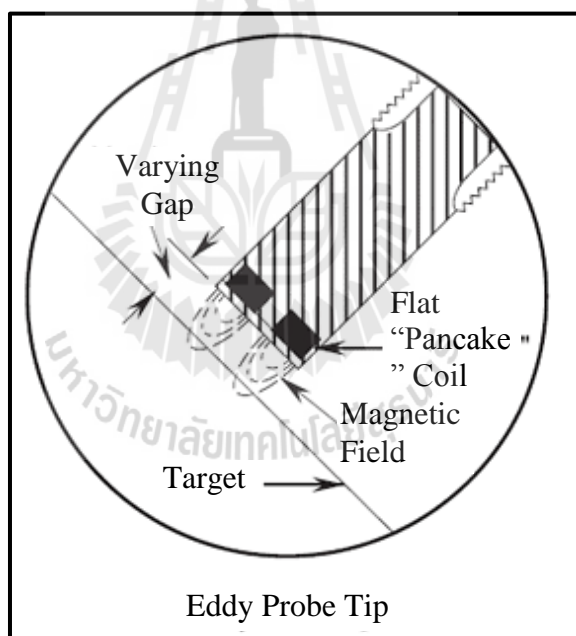


รูปที่ 2.10 แสดงการติดตั้งของหัววัดการกระจัด

สำหรับหลักการทำงานของหัววัดการกระจัดจะอาศัยการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับชิ้นส่วนที่ต้องการวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.11 กล่าวคือ เมื่อสัญญาณความถี่สูงจากแหล่งจ่าย ทำการสร้างสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ทรานสดิวเซอร์ โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับแรงดัน โดยสัญญาณจะถูกส่งออกมาในรูปของ

แรงดันไฟฟ้า ซึ่งแทนความแรงของสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กส่งผ่านไปยังผิวของวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะเกิดกระแสไหลวนขึ้นมาบนพื้นผิวดำนำ แล้วทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กเดิม ซึ่งจะมีผลทำให้สนามแม่เหล็กเดิมถูกหักล้างไป ซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กรวมมีค่าลดลง มีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมามีค่าลดลง ยิ่งผิวของเพลลาอยู่ใกล้กับหัววัดมากขึ้นเท่าใด กระแสไหลวนจะเกิดมากขึ้นเท่านั้น มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาน้อยลงตามไปด้วย

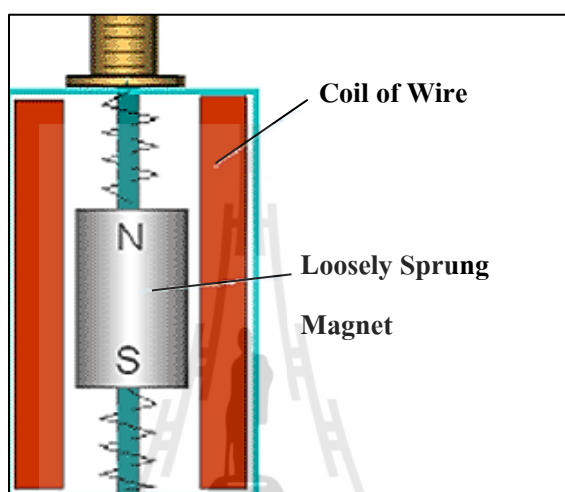
สำหรับหัววัดแบบ Proximity Probe นั้น สามารถจะใช้ได้กับโลหะที่นำไฟฟ้าได้ ตั้งแต่อะลูมิเนียมจนถึงเหล็กกล้า สำหรับระบบหัววัดแบบ Proximity Probe โดยทั่วไปแล้ว จะมีช่วงความถี่ของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ออกมากับระยะห่างของหัววัดกับเพลลาหมุนแบบเป็นเชิงเส้นที่ระยะ 0.25-2.5 มิลลิเมตร และสามารถจับสัญญาณตั้งแต่ความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่มากกว่า 10 kHz ได้



รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของ Proximity Probe

- อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็ว (Velocity Probe) ประกอบด้วยมวลที่เป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะถูกแขวนไว้กับสปริงและถูกล้อมรอบด้วยขดลวดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อหัววัดถูกทำให้สั่น จะทำให้มวลที่เป็นแม่เหล็กถาวรเกิดการสั่นขึ้นลง ซึ่งจะไปตัดผ่านขดลวด (Coil of Wire) ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก จึงเกิด

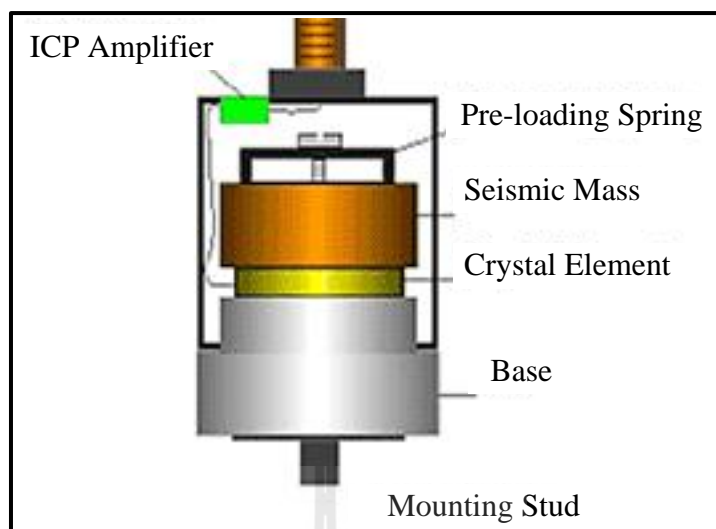
การเหนี่ยวนำกระแสในขดลวด ซึ่งปริมาณของกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของมวลที่เคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่าหัววัดความเร็วแบบนี้ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยตัวของหัววัดเอง โดยไม่ต้องการแหล่งจ่ายจากภายนอก จึงนำไปใช้งานได้ง่าย โดยทั่วไปช่วงการใช้งานของหัววัดความเร็วนี้ จะอยู่ระหว่างความถี่ 10 Hz ถึง 1500 Hz



รูปที่ 2.12 แสดงหัววัดแบบความเร็ว

- อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometers) เป็นหัววัดที่มีประจุไฟฟ้าออกมาจากหัววัดเอง เมื่อมีแรงกระตุ้นมากกระทำกับหัววัด ซึ่งปริมาณของประจุที่ออกมาจะขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ ซึ่งแรงจะแปรผันโดยตรงกับความเร่ง ดังนั้น ถ้ามีแรงกระตุ้นมากกระทำต่อหัววัดมาก ประจุไฟฟ้าก็จะคลาออกมามาก ทำให้รู้ว่ามีความเร่งมากด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้เราสามารถวัดขนาดของสัญญาณการสั่นในหน่วยของความเร่งได้ หน่วยที่ใช้ในการวัดขนาดของความเร่งนั้น จะอยู่ในหน่วยของ  $g$  ซึ่ง  $1 g = 9.81 \text{ m/s}^2$  สำหรับส่วนประกอบของหัววัดแบบความเร่งนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13

จะประกอบไปด้วย (1) ฐานรองรับหรือเฟรม (2) แผ่นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric disk) (3) มวลกค (Seismic Mass) (4) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขยายสัญญาณ (ICP Amplifier) และ (5) ตัวจับยึด (Mounting Stud) ซึ่งจะใช้จับยึดกับจุดของชิ้นงานที่ต้องการจะวัด



รูปที่ 2.13 แสดงหัววัดแบบความเร่ง

จากรูปที่ 2.13 เมื่อนำหัววัดไปจับยึดกับตำแหน่งที่ต้องการจะวัดของเครื่องจักรที่มีการสั่น แรงจากการสั่นจะกระทำผ่านมาที่ฐานของหัววัดแล้วส่งผ่านไปที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นแผ่นที่อยู่ระหว่างมวลกับฐานรองรับทำให้เกิดแรงกดอัดจากมวลในแนวตั้งฉากกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก มีคุณลักษณะแบบเดียวกับผลึกควอตซ์ (Quartz) เฟอโรโรอิเล็กทริกเซรามิก (Ferroelectric ceramics) ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งประจุไฟฟ้าที่ออกมามีค่าน้อยมาก โดยขนาดประจุไฟฟ้าที่ออกมาจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกวัดได้เป็นพิโคคูลอมบ์ (Pico-coulombs) ต่อ g ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณไฟฟ้าให้สูงขึ้นเป็นมิลลิโวลต์ต่อ g เช่น 100 mV/g เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณคือ Integrated Circuit Piezoelectric (ICP) Amplifier นั่นเอง

- เครื่องมือวัดการสั่น

เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกผลการสั่น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่อ่านค่าและบันทึกผลจากการวัดการสั่น แสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งสัญญาณที่ได้มาอาจเป็นสัญญาณในรูปแบบดิจิตอลหรืออะนาลอก แล้วแต่คุณสมบัติและความสามารถของเครื่องมือวัดนั้น ๆ ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น มิเตอร์วัดการสั่น (Vibration Meter) เครื่องมือเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลแบบ FFT (Fast Fourier Transform) หรือเครื่องมือวิเคราะห์แบบทันทีทันใด (Real-Time Analyzer) เป็นต้น



รูปที่ 2.14 เครื่องมือเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล (Analyzer)

#### 2.4.3 การติดตั้งและการกำหนดตำแหน่งการวัด

การวัดการสั่นในเครื่องจักรนอกจากองค์ประกอบหลักที่สำคัญที่สุดซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์การตรวจวัดการสั่น สายนำสัญญาณและเครื่องมือการวัดการสั่นแล้ว ไม่เพียงพอที่จะได้ข้อมูลที่ดีต่อการวิเคราะห์การสั่น เพราะว่าเมื่อลองปฏิบัติจริงเปรียบเทียบกันแล้วจะพบปัญหาและข้อปลีกย่อยอีกมากมาย บางเรื่องอาจจะเป็นเรื่องเล็กน้อยไม่น่าที่จะมีผลกระทบต่อการวิเคราะห์การสั่น ทำให้ผลของการวิเคราะห์นั้นขาดความน่าเชื่อถือหรือไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร สูญเสียเวลาในการทำการวัดค่าและเก็บข้อมูลหลายครั้ง ซึ่งหลักการที่นำมาใช้และเทคนิคการวัดการสั่นให้เกิดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประกอบด้วย การเลือกตำแหน่งการวัดและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่น การศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมต่อการวัดการสั่น การเลือกหน่วยของการวัดการสั่น การศึกษาสภาวะการทำงานของเครื่องจักร การกำหนดสเกลและการตั้งค่าความถี่ เป็นต้น การกำหนดมาตรฐานของการสั่นเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการกำหนดความรุนแรงของการสั่นในเครื่องจักร ซึ่งปัจจุบันมาตรฐานการสั่นที่เผยแพร่ทั่วไปจะมีหลายสถาบันด้วยกัน อาทิเช่น (1) ISO Standard (2) VDI Standard (3) API Standard หรือ (4) NEMA Standard เป็นต้น

- การกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งหัววัดการสั่น

หลักพื้นฐานของการสั่นในรูปแบบอย่างง่าย คือ การสั่นจะเป็นผลคูณของแรงกับความสามารถของการเคลื่อนที่ จากหลักการดังกล่าวจะนำไปสู่การเลือกตำแหน่งเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่น โดยทั่วไปแล้วจะนิยมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นในทิศทางที่มีการเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในการวัดการสั่นของเครื่องจักรจะมี 3 ทิศทางในการวัด คือ แนวระดับ แนวตั้งและแนวแกน

- การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่น

ความเข้าใจในหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับวัดการสั่นนั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อการเก็บข้อมูลการสั่นในเครื่องจักร เพราะถ้ามีการเก็บข้อมูลที่ไม่ถูกต้องเมื่อนำไปใช้ในการวินิจฉัยความบกพร่องของเครื่องจักรแล้ว จะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบความเร่ง เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบความเร่งจะทำการติดตั้งแบบสัมผัส ซึ่งจุดที่สำคัญที่สุดของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดนี้คือ การเกิดการสั่นพ้องของอุปกรณ์ตรวจวัดเอง วิธีการติดตั้งหัววัดแบบความเร่งทำได้หลายวิธีและสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมของช่วงความถี่ที่ต้องการได้

- การยึดอุปกรณ์ตรวจวัดโดยใช้มือกด การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยวิธีนี้เป็นที่ยึดด้วยการกดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยมือลงบนเครื่องจักร ในกรณีที่เครื่องจักรบางชนิดไม่สามารถยึดแบบแม่เหล็กได้ เนื่องจากตัวเรือนเครื่องจักรไม่ได้ทำจากเหล็ก ดังนั้นการยึดด้วยวิธีนี้จะสะดวกกว่า

- การยึดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยแม่เหล็ก การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยวิธีนี้เป็นที่ยึดด้วยแม่เหล็กถาวรที่ขันแน่นกับอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง แล้วนำไปยึดติดกับอุปกรณ์ของชิ้นส่วนของเครื่องจักร วิธีนี้เหมาะสำหรับการตรวจวัดค่าการสั่นเพียงชั่วคราวเนื่องจากสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งการยึดติดด้วยแม่เหล็กถาวรนี้จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบแม่เหล็กแบนเรียบและแบบแม่เหล็กสองขา โดยแบบแม่เหล็กสองขาจะมีความสะดวกในกรณีที่ทำการยึดอุปกรณ์ตรวจวัดกับชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีลักษณะทรงกระบอก

- การยึดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยเทปกาวสองหน้า การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยวิธีนี้ เหมือนกับการติดตั้งด้วยจีฟิ่งหรือกาวอีพอกซี แต่วิธีนี้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีกว่า

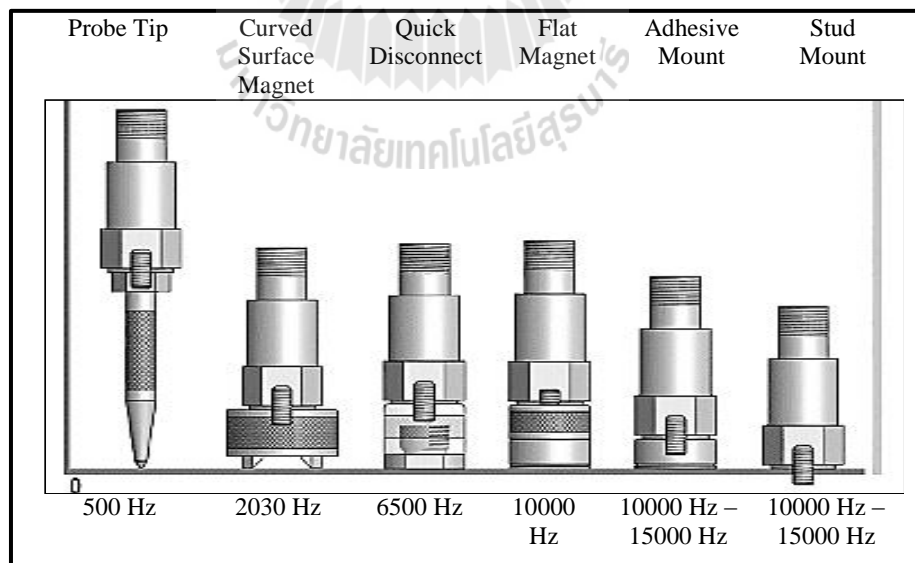
- การยึดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยกาวอีพอกซี การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยวิธีนี้ จะสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ดีกว่าจีฟิ่งเล็กน้อย วิธีติดตั้งเหมือนกับการติดตั้งด้วยจีฟิ่ง คือ ต้องทำการปรับแต่งผิวหน้าของชิ้นส่วนเครื่องจักรเสียก่อน จากนั้นทำการเช็ดผิวให้แห้งและสะอาด

เพื่อที่จะทำให้กาวอีพอกซีประสานระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งกับผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรได้ดีขึ้น

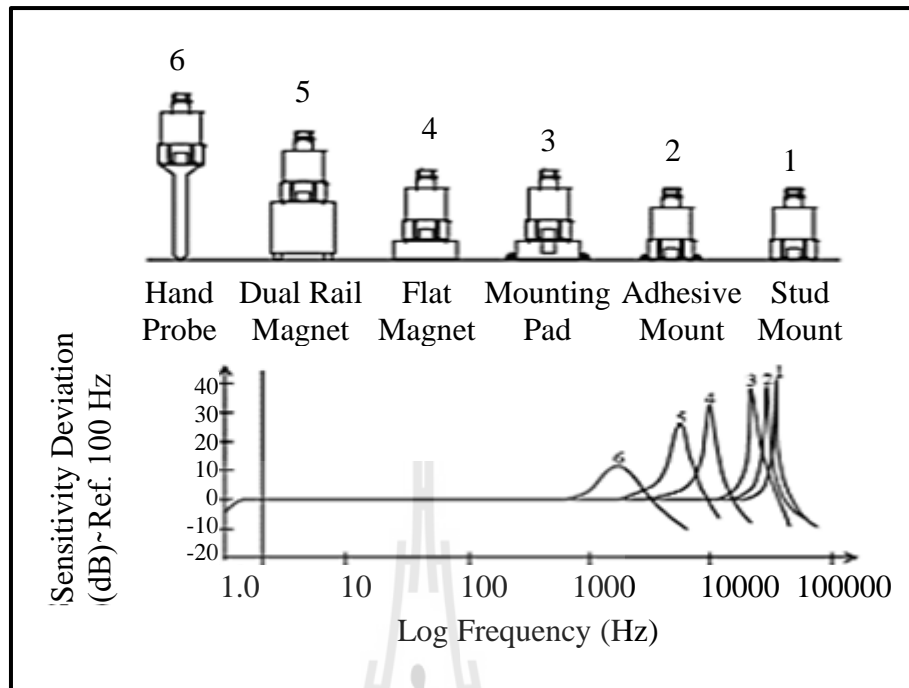
- การยึดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยซีพิ้ง การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยวิธีนี้เป็นการยึดด้วยซีพิ้ง ซึ่งวิธีการติดตั้งจะต้องทำการปรับแต่งผิวหน้าของชิ้นส่วนเครื่องจักรให้เรียบเสียก่อนและทำการเช็ดผิวให้แห้งสะอาด เพื่อที่จะทำให้ซีพิ้งประสานระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งกับผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรได้ดี ส่วนมากการยึดอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งด้วยวิธีนี้จะเหมาะสมกับอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีขนาดเล็ก ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่การใช้งานจะใกล้เคียงกับการยึดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยสลักเกลียว แต่การยึดด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถใช้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากจะทำให้ซีพิ้งเกิดการละลาย

- การยึดอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยสลัก การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยวิธีนี้เป็นการยึดหัววัดที่แน่นหนาแน่นคงที่ที่สุด ความถี่ตอบสนองของการใช้งานจึงมีย่านความถี่ใช้งานมากที่สุด การยึดด้วยวิธีนี้จึงเหมาะสมสำหรับวัดการสั่นบนเครื่องจักรที่มีความถี่สูงได้

จากรูปที่ 2.15 และ 2.16 แสดงให้เห็นว่า แม้จะเป็นหัววัดประเภทเดียวกัน แต่ถ้าวัดติดตั้งกับตัวจับยึดคนละประเภทกัน ช่วงสัญญาณการสั่นที่สามารถเก็บได้ก็จะมีค่าแตกต่างกันด้วย การเลือกใช้ตัวจับยึดแต่ละแบบจะมีผลต่อความถี่ธรรมชาติ ซึ่งต้องระมัดระวังในการเลือกใช้ด้วย



รูปที่ 2.15 แสดงการตอบสนองต่อความถี่สูงสุดของการจับยึดแต่ละแบบ



รูปที่ 2.16 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ธรรมชาติของการจับยึดแต่ละแบบ

#### 2.4.4 การวิเคราะห์การสั่น

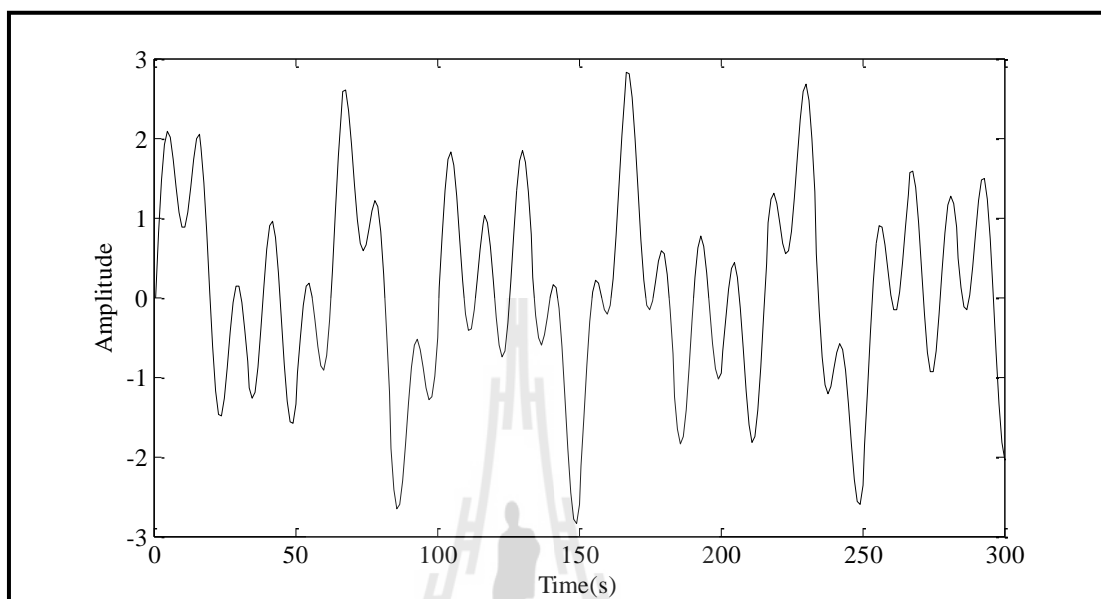
การวิเคราะห์การสั่นในเครื่องจักรกลนั้น ต้องอาศัยความเข้าใจในรูปแบบของกราฟแสดงผล ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงกราฟแสดงผลการสั่นที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความบกพร่องของเครื่องจักร เช่น กราฟโดเมนเวลาและกราฟโดเมนความถี่

- กราฟโดเมนเวลา (Time Domain) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของการสั่นเทียบกับเวลา เป็นการแสดงการสั่นที่เกิดขึ้นจริงในขณะนั้น โดยส่วนใหญ่การสั่นที่เกิดขึ้นจะมีหลายความถี่รวมกันอยู่ในโดเมนเวลา แสดงดังรูปที่ 2.17 จึงยากต่อการวิเคราะห์การสั่น จึงได้มีการคิดค้นวิธีการแปลงค่าให้อยู่ในโดเมนความถี่ แต่ในกรณีที่ความถี่มีค่าคงที่ การวิเคราะห์บนโดเมนเวลาที่สามารถทำได้

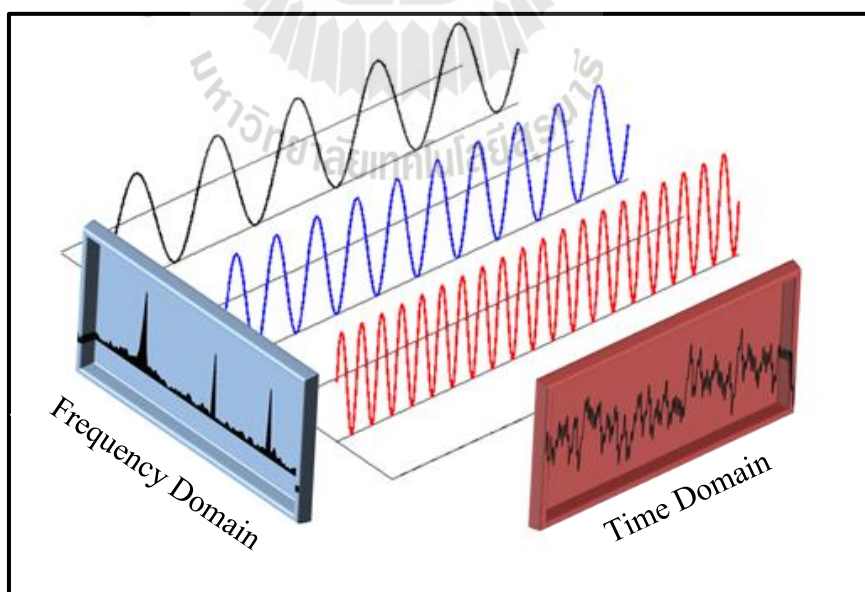
- กราฟสเปกตรัม (Spectrum) เป็นกราฟที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นในเครื่องจักร โดยส่วนใหญ่จะแสดงในรูปแบบกราฟสเปกตรัม หรือที่เรียกอีกชื่อว่ากราฟโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งกราฟสเปกตรัมนี้จะเป็นกราฟที่แปลงสัญญาณจากสัญญาณโดเมนเวลา ในกราฟสเปกตรัมนั้นจะเป็นการแสดงผลการสั่นบนแกนของความถี่ การแสดงผลในลักษณะนี้ ถ้านำไปใช้วิเคราะห์ความเสียหายในเครื่องจักรจะทำให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณการสั่นได้มากกว่าการวิเคราะห์สัญญาณจากกราฟโดเมนเวลา เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน



ถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณจากกราฟโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.18 จะสามารถที่จะอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายและชัดเจน



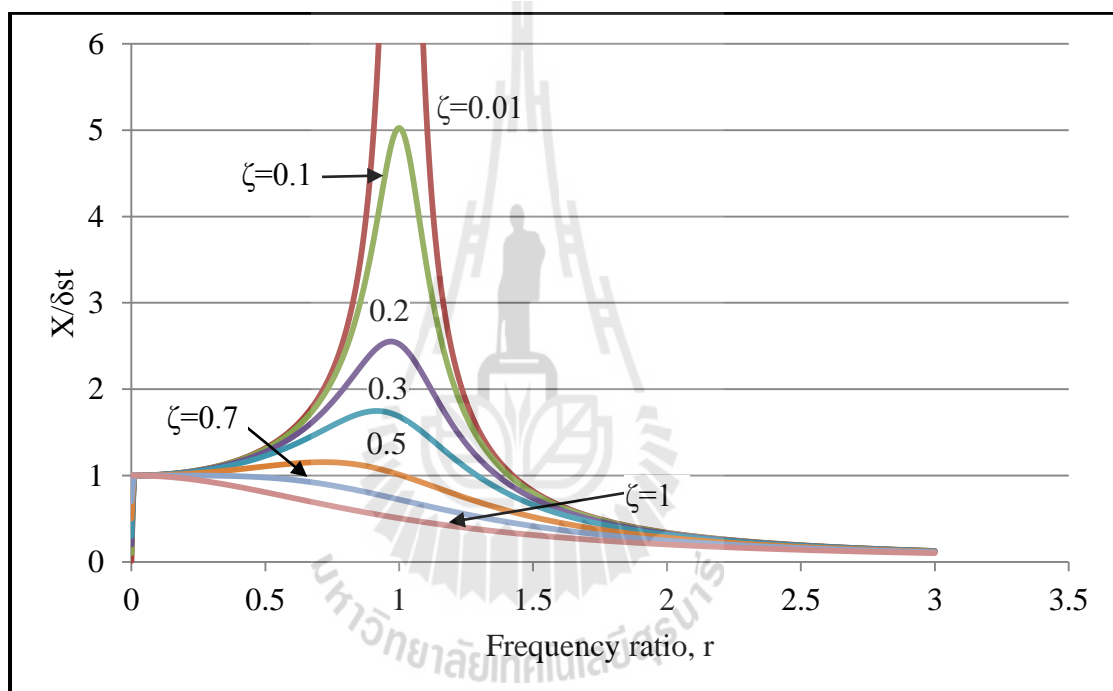
รูปที่ 2.17 กราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่



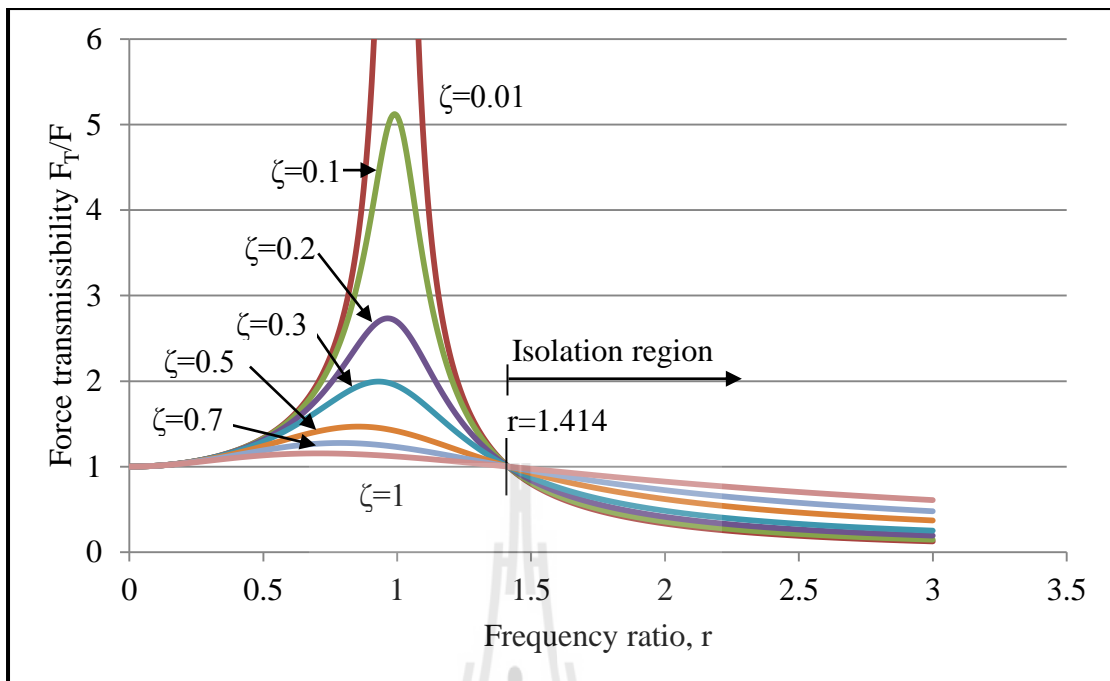
รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของการสับบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

## 2.5 ฉนวนรองรับการสั่น

การสั่นส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมาจากการทำงานของเครื่องจักรเอง แรงดังกล่าวอาจทำให้โครงสร้างหรือพื้นรองรับเสียหาย หรืออาจส่งผลไปยังเครื่องจักรข้างเคียงได้ การออกแบบฉนวนรองรับการสั่นจะช่วยลดการสั่นที่ส่งผ่านไปยังโครงสร้างได้ โดยการออกแบบฉนวนรองรับการสั่นให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับลักษณะการสั่นตามธรรมชาติของการทำงานของเครื่องจักร เมื่อพิจารณาความสามารถการส่งผ่านการกระจัด (Displacement transmissibility) และความสามารถในการส่งผ่านแรง (Force transmissibility) แสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงการส่งผ่านการกระจัดกับอัตราส่วนความถี่



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่

จากรูปที่ 2.19 กราฟแสดงการส่งผ่านการกระจัดกับอัตราส่วนความถี่ ที่ค่าอัตราส่วนความถี่ น้อยกว่า 1.414 และค่าอัตราส่วนหน่วงมีค่าน้อย จะทำให้เกิดการสั่นมากขึ้น วิธีการลดการสั่น คือ การเพิ่มอัตราส่วนหน่วงให้มากขึ้น จะทำให้ขนาดการสั่นลดลงหรือการลดความถี่ธรรมชาติ ของระบบลง เมื่อพิจารณาการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่ในรูปที่ 2.20 ที่ค่าอัตราส่วนความถี่ มากกว่า 1.414 ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของฉนวนรองรับการสั่น ค่าอัตราส่วนหน่วงที่มีค่าน้อยจะ ช่วยลดการสั่นได้มากกว่าอัตราส่วนหน่วงที่มีค่ามาก

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทางสถิติเข้ามาช่วยในการตัดสินใจ หลังจากที่ได้รวบรวมข้อมูล และดำเนินการจัดระเบียบข้อมูลให้อยู่ในสภาพที่เรียบร้อย พร้อมทั้งจะนำไปวิเคราะห์ได้แล้ว โดยผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับสถิติดังนี้

## 2.6 สถิติสำหรับงานวิศวกรรม

ในงานวิจัยได้ใช้วิธีทางสถิติเข้ามาช่วยในการหาความสัมพันธ์ของขนาดการสั่น ในกรณีต่าง ๆ จากการสุ่มกลุ่มตัวอย่างฉนวนรองรับการสั่น เพื่อสร้างเงื่อนไขในการเขียนโปรแกรม เพื่อบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยได้เลือกใช้สถิติ t-test ในการทดสอบ

### 2.6.1 สถิติ t-test

สถิติ t-test เป็นหนึ่งในสถิติทดสอบ ซึ่ง  $t$  เป็นค่าหนึ่งที่ใช้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) การแจกแจงตัวแปรแบบ  $t$  ถูกค้นพบโดยนักสถิติชื่อ วิลเลียม กอสเสต (William Gosset) ในปี ค.ศ. 1908 และมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแจกแจง  $t$  ของสตีวเดนต์ (Student's  $t$  distribution) ซึ่งลักษณะการแจกแจง  $t$  เป็นเส้นโค้งรูประฆังคว่ำคล้ายการแจกแจงแบบปกติ แต่เส้นโค้งลาดต่ำกว่า ความโค้งของการแจกแจงขึ้นอยู่กับลำดับชั้นความเป็นอิสระ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $V$  เมื่อ  $V$  มีค่าเพิ่มขึ้น การแจกแจง  $t$  จะประมาณได้ดีด้วยการแจกแจงแบบปกติ

### 2.6.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ เป็นการศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มมาจากกลุ่มประชากรและนำข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ โดยค่าที่วิเคราะห์ได้จากกลุ่มตัวอย่าง เรียกว่า ค่าสถิติ และนำค่าสถิตินี้ไปสรุปอ้างอิงคุณลักษณะของประชากรหรือค่าพารามิเตอร์

### 2.6.3 การตั้งสมมติฐาน

การตั้งสมมติฐานมี 2 ข้อ คือ สมมติฐานว่าง (null hypothesis) เขียนแทนด้วย  $H_0$  และสมมติฐานทางเลือก (alternative hypothesis) เขียนแทนด้วย  $H_a$  โดยมีหลักการเขียนสมมติฐานดังนี้ คือ เป็นข้อความที่กะทัดรัด ชัดเจน สอดคล้องกับจุดประสงค์ของงานวิจัยหรือเขียนในรูปของสมการและอสมการที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ของประชากร ซึ่งข้อความใน  $H_0$  และ  $H_a$  ต้องมีความขัดแย้งกัน โดยในการวิเคราะห์ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างเพื่อหาเหตุผลสนับสนุน  $H_0$  หรือ  $H_a$  ใดๆอย่างหนึ่ง

### 2.6.4 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานทางสถิติมีดังนี้

- ตั้งสมมติฐาน  $H_0$  และ  $H_a$
- เลือกสถิติที่ใช้ทดสอบและคำนวณค่าทางสถิติ เช่น ค่าสถิติ  $t$ ,  $z$ ,  $f$ ,  $\chi^2$  เป็นต้น
- กำหนดระดับนัยสำคัญ (level of significant) หรือค่า  $\alpha$  ซึ่งเป็นค่าของความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่เกิดความผิดพลาดจากสาเหตุที่สรุปผลการทดสอบว่า

ไม่ยอมรับ  $H_0$  เป็นจริง แต่  $H_0$  เป็นจริง เรียกว่า ความผิดพลาดประเภทที่ 1

- เปรียบเทียบค่าสถิติที่คำนวณได้กับส่วนกลับของ  $\alpha$  หรือเปรียบเทียบค่า  $p$ -value หรือ ค่า sig (probability) ของค่าสถิติที่คำนวณได้กับค่า  $\alpha$  ที่กำหนด

- จากการเปรียบเทียบข้อก่อนหน้า นำไปสู่การสรุปผลยอมรับ  $H_0$  เป็นจริงหรือไม่ยอมรับ  $H_0$  เป็นจริง ถ้าไม่ยอมรับ  $H_0$  เป็นจริง ก็หมายความว่ายอมรับ  $H_a$  เป็นจริง

### 2.6.5 ข้อตกลงในการใช้ค่าสถิติ t

การเลือกใช้ค่าสถิติ t ทดสอบ เพื่อช่วยให้ผลการวิจัยมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ มีข้อตกลงเบื้องต้นดังนี้

- ข้อมูลมีลักษณะเป็นปริมาณ มีมาตรวัดอัตราส่วนหรือมีอันตรภาค
- ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ
- ไม่ทราบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร

## 2.7 ความไม่แน่นอนของการวัด

ในการวัดค่าของสิ่งต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือวัด เป็นธรรมชาติที่ค่าที่วัดได้จะไม่มีทางเที่ยงตรง 100% จะต้องมีความผิดพลาดจากการวัดเกิดขึ้นเสมอ ถ้าเป็นการวัดแบบปกติ เช่นในชีวิตประจำวันเรื่องของความผิดพลาดจากการวัดอาจไม่เป็นที่น่าสนใจมากมายนัก แต่ถ้าเป็นการวัดที่ต้องการความแม่นยำ และต้องนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดจะเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจ สิ่งที่จะต้องพิจารณาห้ออกมาและจะต้องทำเป็นรายงานที่แนบติดไปกับผลของการวัดนั้นถูกเรียกว่า ความไม่แน่นอนของการวัด

การวัดนั้นเป็นการบอกถึงคุณสมบัติของสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น ขนาด ปริมาณ หรือ อุณหภูมิ เป็นต้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ในการวัดมักจะมี ความไม่แน่นอนเกิดขึ้นเสมอ ความไม่แน่นอนของการวัดนี้เป็นความสงสัยที่เกิดขึ้นจากผลของการวัดว่ามีความน่าเชื่อถือและให้ความถูกต้องเพียงใด แต่ในความเป็นจริงนั้นผลที่ได้จากการวัดในทุก ๆ สิ่ง จะมีความน่าสงสัยนี้แฝงอยู่เสมอ คำถามที่อาจมีอยู่ในใจของผู้ที่เกี่ยวข้องคือ ความไม่แน่นอนนี้มีค่าเท่าใดและสิ่งที่ใช้ในการบอกความสงสัยนี้มีอยู่ 2 จำนวน คือ ขนาดของความไม่แน่นอน (interval) และระดับความเชื่อมั่น (confidence level) เช่น ความยาวของแท่งเหล็ก A เท่ากับ  $45 \pm 2$  เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความหมายว่า มีความมั่นใจ 95% ว่าแท่งเหล็ก A มีขนาดความยาวอยู่ระหว่าง 43 ถึง 47 เซนติเมตร เป็นต้น

### 2.7.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของการวัด

- เครื่องมือวัด
  - เครื่องมือวัดที่เก่าและขาดการดูแลหรือมีการปรับแต่งที่ไม่ถูกต้อง รวมถึงไม่ได้รับการสอบเทียบหรือสอบเทียบไม่ดีพอ ทำให้การอ่านค่ามีความไม่แน่นอน
- ชี้นำงานที่นำมาวัด

การนำชิ้นงานที่ไม่เสถียรหรือไม่คงตัวมาทำการวัด ทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดได้ เช่น ชิ้นงานที่เคลื่อนที่หรือชิ้นงานที่เปลี่ยนสถานะได้ง่าย เช่น จากของแข็งเป็นของเหลว เป็นต้น

- กระบวนการวัด

ในบางกรณี การวัดอาจทำได้ยากและสิ่งที่จะวัดอาจเข้าถึงได้ยาก เช่น การชั่งน้ำหนักของที่มีขนาดเล็ก และถ้ามีการเคลื่อนไหวด้วย ก็ยิ่งทำให้การวัดลำบากยิ่งขึ้น เช่น การชั่งน้ำหนักสัตว์ตัวเล็ก ๆ เป็นต้น

- ผู้ทำการวัด

ผู้ทำการวัด ถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมาก เช่น ขาดทักษะ ไม้มีความชำนาญในการวัด หรืออยู่ในสภาพที่ไม่พร้อมที่จะทำงาน หรือความสามารถในการตอบสนองของผู้วัด เช่น การจับเวลาด้วยนาฬิกาพก เป็นต้น

- กระบวนการเก็บตัวอย่าง

โดยปกติ การเก็บตัวอย่างต้องใช้วิธีการสุ่ม ซึ่งถ้าสุ่มตัวอย่างไม่เหมาะสม ก็จะสร้างความผิดพลาดได้ และถ้าคุณสมบัติของตัวอย่างที่เก็บมามีความเหมือนกันจะช่วยลดความผิดพลาดได้ แต่ถ้ากลุ่มตัวอย่างมาจากกระบวนการผลิตที่ไม่เหมือนกันจะทำให้มีความไม่แน่นอนในการวัดเพิ่มมากขึ้นได้

- สภาพแวดล้อม

สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ล้วนมีผลต่อผลการวัดทั้งสิ้น

## 2.7.2 รูปแบบของความไม่แน่นอนของการวัด

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของความไม่แน่นอนของการวัด สามารถที่จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

- แบบสุ่ม (Random) ลักษณะที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนแบบนี้จะสามารถ

สังเกตได้จากผลของการวัดที่แปรเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ การวัดซ้ำกันหลายครั้งและหาค่าเฉลี่ยจะทำให้สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงได้

- แบบเป็นระบบ (Systematic) ผลของการวัดที่มีลักษณะแบบนี้คือ ค่าที่วัดได้

จะซ้ำ ๆ กัน เมื่อเป็นลักษณะเช่นนี้ การวัดซ้ำกันหลายครั้งจะไม่ทำให้สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงได้ เพราะค่าจะซ้ำเหมือนเดิมทุกครั้ง จึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด เช่น เปลี่ยนวิธีการวัด หรือเปลี่ยนวิธีการคำนวณ เป็นต้น

### 2.7.3 ประเภทของการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องระบุสาเหตุหรือแหล่งของความไม่แน่นอนในการวัด จากนั้นจึงประเมินขนาดของความไม่แน่นอนของแต่ละแหล่งโดยแยกจากกัน แล้วจึงนำทั้งหมดมารวมกัน การประเมินค่าความไม่แน่นอนนี้มี 2 แนวทางคือ Type A และ Type B ซึ่งตามปกติแล้วจะมีการใช้ทั้งสองแนวทางไปพร้อมกัน

- การประเมินแบบ A (Type A Evaluation) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนโดยใช้เทคนิคสถิติ
- การประเมินแบบ B (Type B Evaluation) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากข้อมูลข่าวสารอย่างอื่นที่อาจประกอบด้วยประสบการณ์ในอดีตของการวัด จากใบรับรองการสอบเทียบจากข้อกำหนดของผู้ผลิต จากการคำนวณจากสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ และจากสามัญสำนึก

### 2.7.4 ขั้นตอนในการประเมินค่าความไม่แน่นอน

ขั้นตอนในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดมี 8 ขั้นตอนคือ

- กำหนดสิ่งที่จะวัด เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีการวัด ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นและวิธีการคำนวณ
- ทำการวัด
- ประเมินค่าความไม่แน่นอนจากปริมาณของสิ่งป้อนเข้าของแต่ละรายการ โดยค่าของการประเมินต้องมีลักษณะเช่นเดียวกัน
- พิจารณาว่าความไม่แน่นอนที่ได้จากสิ่งป้อนเข้าของแต่ละตัวเป็นอิสระจากกันหรือไม่ ถ้าไม่เป็นอิสระจากกันอาจต้องมีการคำนวณเพิ่มเติม ซึ่งเกี่ยวข้องกับสหสัมพันธ์
- คำนวณผลของการวัด โดยถ้ามีตัวปรับแก้ต่าง ๆ ให้รวมเข้ามาด้วย
- รวมค่าความไม่แน่นอนของการวัดเข้าด้วยกัน
- ระบุค่าความไม่แน่นอนออกมาในรูปแบบของช่วงความไม่แน่นอนและระดับของความเชื่อมั่น
- เขียนผลการวัด และค่าความไม่แน่นอนและบอกวิธีการได้มาของสิ่งเหล่านี้

### 2.7.5 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ก่อนเริ่มการคำนวณจะต้องมีความเข้าใจว่าค่าความไม่แน่นอนของแต่ละสิ่งป้อนเข้านั้น จะต้องเป็นหน่วยเดียวกันและมีระดับของความเชื่อมั่นเดียวกันถึงจะสามารถรวมกันได้ และสิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจไว้ก่อน คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty) ซึ่งขนาดของความไม่แน่นอนมาตรฐานจะมีค่าเท่ากับบวกหรือลบ 1 ซิกมา

(1 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน) โดยค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของความไม่แน่นอน ไม่ใช่ค่าการกระจาย โดยสัญลักษณ์ที่ใช้คือ  $\mu$

สูตรที่ใช้ในการคำนวณของ Type A คือ

$$\mu = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.4)$$

โดยที่  $s$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณของ Type B คือ

$$p = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

โดยที่  $p$  คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$a$  คือ ครึ่งหนึ่งของค่าความไม่แน่นอนที่ระบุมากับเครื่องมือ

การกระจายแบบ Type B นี้มักเกิดขึ้นบ่อยครั้งในการวัด แต่ถ้าสามารถที่จะนำรูปแบบการคำนวณของการกระจายแบบอื่นมาใช้ก็ได้

#### 2.7.6 การรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน

การรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานนี้ต้องใช้วิธีทางสถิติเรียกว่า รากที่สองของผลรวมยกกำลังสอง (root sum of the squares) ซึ่งผลของการรวมเรียกว่า ผลรวมความไม่แน่นอน (combined uncertainty) ซึ่งวิธีการรวมได้แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

- การบวกหรือหักล้างกัน ซึ่งเป็นกรณีแบบง่ายที่เป็นการรวมกันหรือลบออกจากกันของผลการวัดใน 1 มิติ

$$\text{combined uncertainty} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots} \quad (2.6)$$

โดยที่  $a, b, c, d, \dots$  คือ ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละสิ่งป้อนเข้า



- การคูณและการหารกัน ซึ่งเป็นกรณีที่ซับซ้อนขึ้น โดยที่ผลการวัดอาจเป็น 2 มิติ เช่น พื้นที่ที่มีความกว้างคูณกับความยาว ซึ่งค่าที่ได้จะออกมาในรูปของค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (relative uncertainty)

$$\text{relative uncertainty} = \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(W)}{W}\right)^2} \quad (2.7)$$

โดยที่  $u(L)$  คือ ความไม่แน่นอนของความยาว

$L$  คือ ความยาว

$u(W)$  คือ ความไม่แน่นอนของความกว้าง

$W$  คือ ความกว้าง

กรณีค่าความไม่แน่นอนมีมากกว่า 2 มิติ หรือความซับซ้อนมากขึ้น ค่าที่บวกกันในเรื่องหมายรากที่สองในสมการที่ 2.7 ก็ขยายเพิ่มตามไป มีข้อสังเกตที่สำคัญว่าการคำนวณที่ผ่านมาในการรวมค่าความไม่แน่นอนในการวัดนี้ จะถูกต้องเมื่อสิ่งที่เข้าสู่กระบวนการเป็นอิสระจากกันเท่านั้น แต่ถ้าไม่เป็นอิสระจากกัน การคำนวณจะยิ่งซับซ้อนขึ้นไปอีก เช่น สมมุติว่าอุณหภูมิเป็นสิ่งป้อนเข้าตัวหนึ่งซึ่งผลกระทบกับปัจจัยอื่นที่เป็นสิ่งป้อนเข้าเช่นกัน การคำนวณตามสมการข้างต้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากต้องใช้สมการทางสถิติที่ซับซ้อน

#### 2.7.7 การปรับสเกล (coverage factor)

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น คือ ความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นค่าหนึ่งเท่านั้น ในบางกรณีอาจต้องการระดับความเชื่อมั่นอื่น ๆ จึงจำเป็นต้องมีการปรับสเกลใหม่ค่าที่นำมาปรับ แทนด้วยสัญลักษณ์  $k$  ซึ่งค่าของ  $k$  ที่เปลี่ยนไปก็จะให้ค่าในแต่ละระดับความเชื่อมั่นซึ่งเป็นตามสมการที่ 2.8

$$U = k u_c \quad (2.8)$$

โดย  $U$  คือ ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด

$k$  คือ สเกลปรับค่า

$u_c$  คือ ผลรวมความไม่แน่นอนมาตรฐาน

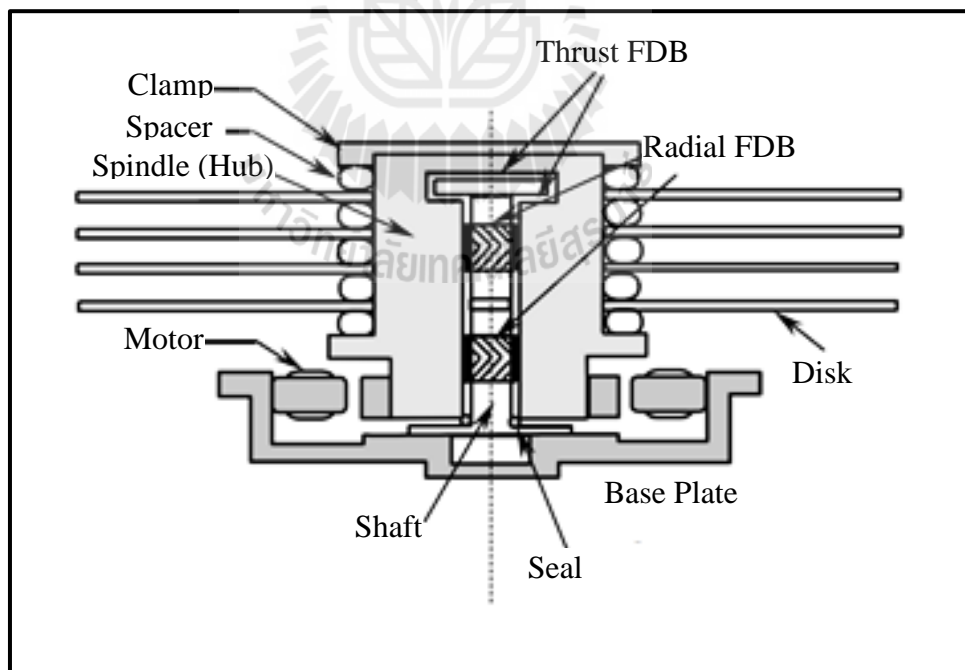
โดยทั่วไป  $k=1$  ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 68%  $k=2$  ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95%  $k=2.58$  ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 99%  $k=3$  ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 99.7% เป็นต้น

## 2.8 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการสั่น และการวิเคราะห์สัญญาณไปแล้ว ในข้างต้น อีกทั้งยังได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย บทความ และตำราต่าง ๆ ที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งเนื้อหาต่าง ๆ ที่ได้ศึกษานั้นสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ ดังนี้

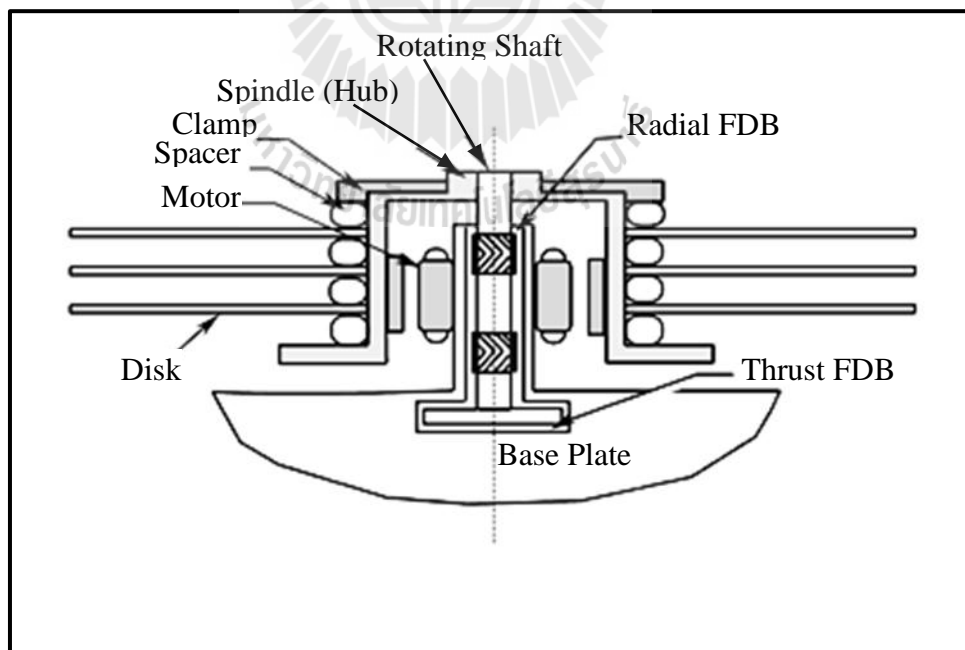
### 2.8.1 การศึกษาการสั่นของแผ่นดิสก์

เมื่อความต้องการในการจุข้อมูลและความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลมากขึ้น ทำให้แผ่นดิสก์ต้องหมุนเร็วขึ้นและแผ่นดิสก์ก็ต้องมีจำนวนร่องต่อนิ้ว (TPI) เพิ่มขึ้นด้วย แต่น่าเสียดายเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น นำไปสู่การอ่านข้อมูลที่ผิดพลาดบ่อยขึ้น เนื่องจากความเร็วในการหมุนทำให้เกิดการสั่นมากขึ้น จึงได้มีงานวิจัยที่วิเคราะห์การสั่นที่เกิดขึ้นกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 2.21 การออกแบบโดยเฟลได้ออกแบบที่

Jintanawan (2001) ได้ศึกษาการสั้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และออกแบบตลับลูกปืนแบบของเหลว (Fluid Dynamics Bearing, FDBs) เพื่อลดการสั้นที่เกิดขึ้น โดยได้นำเสนอการสั้นที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยได้แบ่งระบบของจานหมุนเป็น 2 รูปแบบ คือ (1) ระบบของจานหมุนแบบเพลาอยู่กับที่ และ (2) ระบบของจานหมุนแบบเพลาหมุนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 จากรูปที่ 2.21 แสดงระบบจานหมุนที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งระบบนี้จะประกอบไปด้วยแกนหมุนที่มีจานหมุนสวมอยู่ โดยจานหมุนแต่ละแผ่นจะถูกขึ้นด้วยแผ่นรอง (spacers) ด้านบนสุดของแกนหมุนจะถูกยึดด้วยตัวหนีบและสกรู โดยแกนหมุนจะต่อเข้ากับเพลาที่ไม่หมุนและมีตลับลูกปืนแบบบอลหรือตลับลูกปืนแบบของเหลวรองรับ และปลายด้านล่างของเพลาจะยึดติดกับฐานของมอเตอร์ เรียกการออกแบบนี้ว่า การออกแบบโดยเพลาอยู่กับที่ (stationary-shaft design) การออกแบบลักษณะนี้มีใช้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่รองรับด้วยตลับลูกปืนแบบบอล แต่ยังมีกรออกแบบอีกอย่างเรียกว่า การออกแบบโดยเพลาหมุนได้ (rotating-shaft design) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในรูปแบบนี้ เพลาจะถูกสวมแบบกดอัดอยู่กับแกนหมุน ทำให้เพลาและแกนหมุนจะหมุนไปด้วยกัน การออกแบบลักษณะนี้นิยมใช้กับตลับลูกปืนแบบ FDBs เพราะช่วยป้องกันการรั่วไหลของของเหลวในตลับลูกปืนได้ดีกว่าแบบแรก ซึ่งในปัจจุบันนิยมออกแบบให้เพลาหมุนได้



รูปที่ 2.22 การออกแบบโดยเพลาหมุนได้

พฤติกรรมการสั่นทางกลของระบบจานหมุนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยดูจากลำดับชั้นความเป็นอิสระที่เด่นชัดและเป็นผลทำให้เกิดการสั่นทางกลของระบบจานหมุนประกอบด้วย

- การแกว่ง (whirling) ของการหมุนในแนวระนาบของจานหมุน
- การสั่นของแกนหมุนในแนวแกนเพลลา
- การส่าย (precession) หรือการโยก (rocking) ของแกนหมุน
- การสั่นตามแนวขวางของเพลลา (shaft flexibility) เนื่องจากความยืดหยุ่น

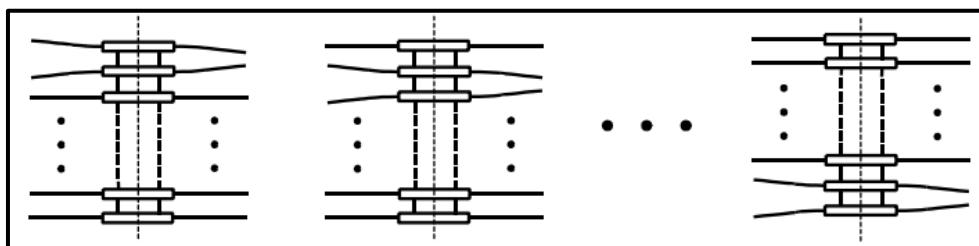
ภายในตัว

- การสั่นของแผ่นดิสก์ทั้งหลายตามแนวขวาง (disk transverse vibration)

จากพฤติกรรมการสั่นที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถแยกการตอบสนองของระบบได้ดังนี้

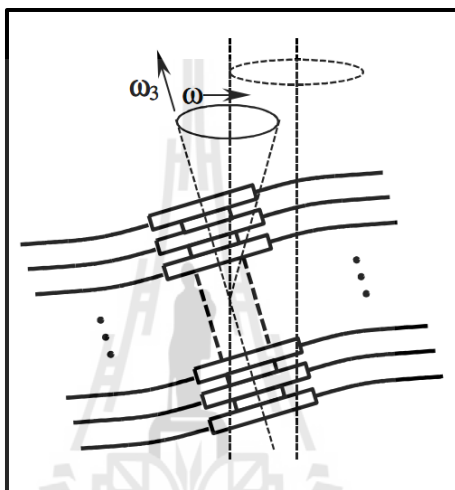
- การแกว่งและการส่ายของแกนหมุน

การสั่นตามแนวขวางของเพลลาและการสั่นของจานหมุนในแต่ละแผ่นเป็นแบบหนึ่งโหนดการสั่น (one-nodal-diameter modes) โดยจะเกิดการสั่นควบคู่กัน ถ้ามีจำนวนจานหมุนอยู่  $N$  แผ่น การสั่นแบบนี้จะแบ่งได้เป็น  $N-1$  กลุ่มของรูปแบบการสมดุล (0,1) และอีกกลุ่มของรูปแบบการไม่สมดุล (0,1) ในแต่ละกลุ่มของรูปแบบการสมดุลของจานหมุนสองแผ่นใด ๆ จะมีการสั่นแบบกลับเฟส (out of phase) ในขณะที่จานหมุนที่เหลือจะไม่มีการสั่น แสดงในรูปที่ 2.23 การสั่นของจานหมุนที่กลับเฟส จะทำให้แรงเฉื่อยของระบบหักล้างกันหมดไป และส่งผลให้ไม่มีการสั่นของแกนหมุนและเพลลา เนื่องจากระบบหมุนสามารถมองการสั่นของจานหมุนเสมือนคลื่นเดินทางไปข้างหน้าและย้อนกลับได้ ดังนั้นรูปแบบการสมดุลยังสามารถแบ่งออกเป็นรูปแบบการสมดุลไปข้างหน้าและรูปแบบการสมดุลย้อนกลับ โดยรูปแบบการสมดุลของระบบจะมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับความถี่ธรรมชาติของจานหมุนหนึ่งแผ่น



รูปที่ 2.23 รูปแบบการสมดุล (0,1)

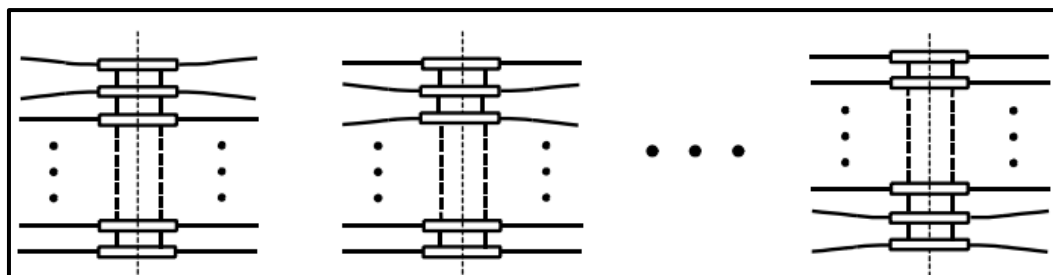
สำหรับกลุ่มของรูปแบบการไม่สมดุล (0,1) งานหมุนทุกแผ่นจะเกิดการสั่นที่เฟสตรงกัน (in phase) ดังนั้นแรงเฉื่อยรวมของระบบเนื่องจากการสั่นของงานหมุนจะเกิดขึ้นในรูปแบบของการเสียดสมมูลโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางและการเสียดสมมูลโมเมนต์นี้เป็นผลให้แกนหมุนซึ่งกำลังหมุนอยู่ เกิดการส่ายและแรงดึงกลับของตลับลูกปืน ทำให้เกิดการแกว่งของแกนหมุน แสดงดังรูปที่ 2.24 และ รูปแบบการไม่สมดุล (0,1) ยังประกอบด้วยรูปแบบการไม่สมดุลไปข้างหน้าและรูปแบบการไม่สมดุลย้อนกลับ



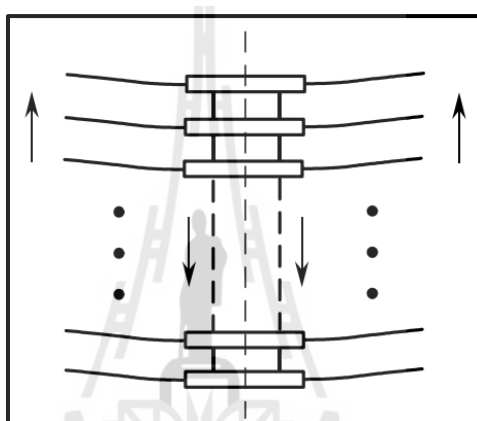
รูปที่ 2.24 รูปแบบการไม่สมดุล (0,1)

- การสั่นของแกนหมุนในแนวแกน Z

การสั่นของแกนหมุนในแนวแกน Z เกิดขึ้นควบคู่กับการสั่นของงานหมุนแบบแกนสมมาตร (การสั่นของงานหมุนแบบแกนสมมาตรมีรูปร่างคล้ายร่มหรือเห็ด) การสั่นแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น N-1 กลุ่มของรูปแบบการสมมูล (0,0) และรูปแบบการไม่สมดุล (0,0) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26



รูปที่ 2.25 รูปแบบการสมดุล (0,0)



รูปที่ 2.26 รูปแบบการไม่สมดุล (0,0)

- การสั่นของจานหมุนทั้งหลายแบบมากกว่าหนึ่ง โหนดการสั่น  
การสั่นของจานหมุนทั้งหลายแบบมากกว่าหนึ่ง โหนดการสั่นจะแยกอิสระ  
จากการสั่นของแกนหมุน จะเห็นได้ว่าการสั่นตอบสนองของระบบจานหมุนในรูปแบบ  
การสมดุล (0,1) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า การโยก (rocking modes) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิด TMR  
(Track Misregistration) เพราะการสั่นดังกล่าวเกิดขึ้นในแนวระนาบของจานหมุน

Chang et al. (2002) ได้ศึกษาการกระพือของจานหมุน (flutter disk) และสร้างวิธี  
ในการทำนายการเกิด TMR ซึ่งในการทดสอบจานหมุน จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ repeatable  
runout (RRO) และ nonrepeatable runout (NRRO) โดยที่ NRRO เป็นสาเหตุหลักในการเกิด TMR  
โดย TMR จะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านแตร็คค่าผิดพลาดเกิน 12 % ของความกว้างแตร็ค การสั่นที่เกิดขึ้น  
แม้จะน้อยแต่ส่งผลกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จึงมีศึกษาการลดการสั่น โดยการติดตั้งฉนวนรองรับการสั่น

Pang et al. (2008) ได้ทำการทดลองคุณลักษณะทางพลศาสตร์และสร้างแบบจำลองการสั่นของจานหมุนสำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หารูปปร่างการสั่น (Mode shape) ของจานหมุนที่ติดตั้งอยู่บนแกนหมุนของมอเตอร์ และเปรียบเทียบผลการทดลองโดยวัดการสั่นด้วย SLDV (Scanning Laser Doppler Vibrometer) ในการจะบอกความถี่และขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นจริงในขณะการหมุน เขาได้เลือกใช้การวิเคราะห์แบบ ODS (Operating Deflection Shapes) ในการพิจารณารูปปร่างการสั่นด้วย

Jia and Wang (2008) ได้คิดค้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ในการหาค่าตัวแปรจำนวนมากของความถี่ที่รบกวนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์แบบปรับตัวได้แบบใหม่ โดยเลือกใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ความถี่ด้วยเทคนิคการกรองรอยหยักแบบปรับตัวได้ (adaptive notch filter) และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าผลการทดลองสามารถการันตีเสถียรภาพและความถูกต้องได้

## 2.8.2 การศึกษาและวิเคราะห์จำนวนรองรับการสั่น

เมื่อการทำงานของเครื่องจักรหมุนเกิดการสั่นที่ไม่พึงประสงค์ การติดตั้งจำนวนรองรับการสั่นที่เหมาะสมจะช่วยลดการสั่นลงได้ จึงมีผู้สนใจศึกษาและทำวิจัย ดังนี้

Park et al. ได้ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางพลศาสตร์และการตอบสนองการกระแทก (shock response) ของระบบรองรับการสั่นของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในแล็ปท็อป (Laptop) โดยวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่ง (position error signal) และความสามารถในการส่งผ่านของความเร่ง (acceleration transmissibility) สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองการกระแทกได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบก้อน (lumped-parameter model) บนพื้นฐานความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวรองรับแบบยาง จากการศึกษาพบว่า ชนิดของยางที่มีค่าความแข็งแรงแรงระหว่าง 0.017-0.031 MPa และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงระหว่าง 30.15-42.81 N.s/m เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นจำนวนรองรับการสั่น

Forrest (2006) ได้ทำการทดลองวิเคราะห์แบบโมดอลของจำนวนรองรับการสั่นขนาดเล็ก 3 รูปแบบ คือ (1) แผ่นเหล็ก 2 แผ่นประกบกับจำนวนรองรับการสั่น 2 ตัว (2) แผ่นเหล็ก 2 แผ่นประกบกับจำนวนรองรับการสั่น 4 ตัว และ (3) แผ่นเหล็ก 3 แผ่น มีจำนวนรองรับการสั่น 3 ตัว โดยแบ่งเป็นชั้นละ 4 ตัว จากการทดลองแบบ โมดอลเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ รูปปร่างการสั่นและค่าความหน่วง ของจำนวนรองรับการสั่นมีความซับซ้อนมาก ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง เขาจึงได้ใช้วิธี four-pole parameter หรือ various transmissibility ที่ใช้งานร่วมกับการทำ FRFs ที่ปรับโครงสร้างใหม่แล้ว

จิระพล ศรีเสริฐผล และ สมใจ สุนทรสกุล (2552) ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ ลักษณะการตอบสนองของตัวดูดซับการสั่นขนาดเล็ก (Miniature Shock Absorber) ตามสภาพ การใช้งานจริง เพื่อหาตัวแปรบ่งชี้ความสัมพันธ์แบบมีนัยสำคัญต่อลักษณะการทำงานของ ชุดขนถ่ายชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดความเสียหายโดยตรงต่อหัวอ่านและการบันทึก ข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อันเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของหัวอ่านและการบันทึกข้อมูลลดลง โดย ทำการทดสอบและเปรียบเทียบการสั่นที่เกิดจากการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นที่มีคุณสมบัติที่ แตกต่างกันกับระบบ ผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมและการเลือกตัวดูดซับการสั่นของ ชุดขนถ่ายชิ้นงานให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.8.3 การวิเคราะห์การสั่นของอุปกรณ์สำหรับทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จิระพล ศรีเสริฐผล สุเมธิ ธิสูงเนิน และพีระยุทธ หวังรักไพบูลย์ (2552) ได้ วิเคราะห์การสั่นของอุปกรณ์สำหรับทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ ทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในการวิเคราะห์การสั่นที่เกิดขึ้น ได้แสดงรูปร่างการสั่นและ ความถี่ธรรมชาติจำนวน 5 โหมดของอุปกรณ์สำหรับทดสอบ ซึ่งจะได้ว่าความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency) ของอุปกรณ์สำหรับทดสอบจะอยู่ในช่วงความถี่ 49 Hz ถึง 51 Hz และ ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจำนวน 5 โหมดที่ได้จะอยู่ในช่วงความถี่ 51 Hz ถึง 121 HZ ผลที่ ได้จากการเทคนิคการวัดจริงจากอุปกรณ์สำหรับทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระเบียบวิธี ไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมมีความถูกต้องที่สอดคล้องกัน

## 2.9 สรุป

ในกระบวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สิ่งที่ไม่ดีคือ การสั่นที่เกิดจาก การหมุนของจานหมุน จากวิวัฒนาการทางด้านวิศวกรรมทำให้ปัจจุบันการสั่นเกิดขึ้นในระดับ ที่ยอมรับได้ แต่ถ้ามีสิ่งใดมารบกวนกับระบบ ระบบก็จะแสดงการสั่นออกมาให้เห็นอีก ในการลด การสั่นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้ฉนวนรองรับการสั่น (Isolator) ซึ่งฉนวนรองรับการสั่นส่วนใหญ่ จะเป็นยาง เมื่อเวลาผ่านไปก็จะมีเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลทำให้การสั่นเกิดขึ้นมาใหม่ได้



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเพื่อสร้างอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น ได้ศึกษาและวิเคราะห์หาสาเหตุต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดการสั่นขึ้นกับเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (Test Chamber Machines) เช่น การสั่นที่ส่งผ่านมากับโครงสร้างเครื่องทดสอบ ส่วนหมุนต่าง ๆ ภายในเครื่องทดสอบ เป็นต้น รวมถึงวิเคราะห์การสั่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าแหล่งกำเนิดการสั่นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งรายละเอียดในการวิเคราะห์หาสาเหตุของแหล่งกำเนิดการสั่นจะได้อีกต่อไป ในการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะมีฉนวนรองรับการสั่นป้องกันไม่ให้เกิดการสั่นส่งไปยังชั้นทดสอบ แต่เมื่อเวลาผ่านไปการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นส่งผลให้กระบวนการทดสอบเกิดความผิดพลาดขึ้น จึงได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของฉนวนรองรับการสั่นและพิจารณาการตอบสนองต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยรายละเอียดจะได้อีกต่อไป จากการทดลอง การตอบสนองการสั่นของฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีและเสื่อมสภาพมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สามารถนำไปสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบสภาพของฉนวนรองรับการสั่นได้

ในการดำเนินงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของการสั่น การวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตตามสภาพของฉนวนรองรับการสั่นและการออกแบบชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบสภาพของฉนวนรองรับการสั่น

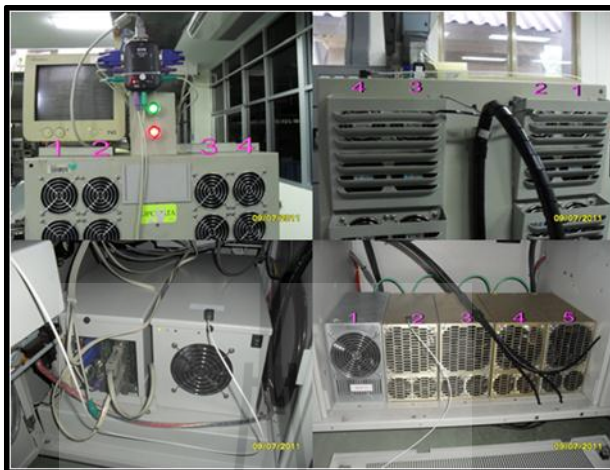
#### 3.1 การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของการสั่น

การวิเคราะห์หาสาเหตุของการสั่นได้พิจารณาตามส่วนประกอบของเครื่องทดสอบ คือ โครงสร้างเครื่องทดสอบ ชั้นทดสอบและช่องทดสอบ

##### 3.1.1 การวิเคราะห์การสั่นของโครงสร้างเครื่องทดสอบ

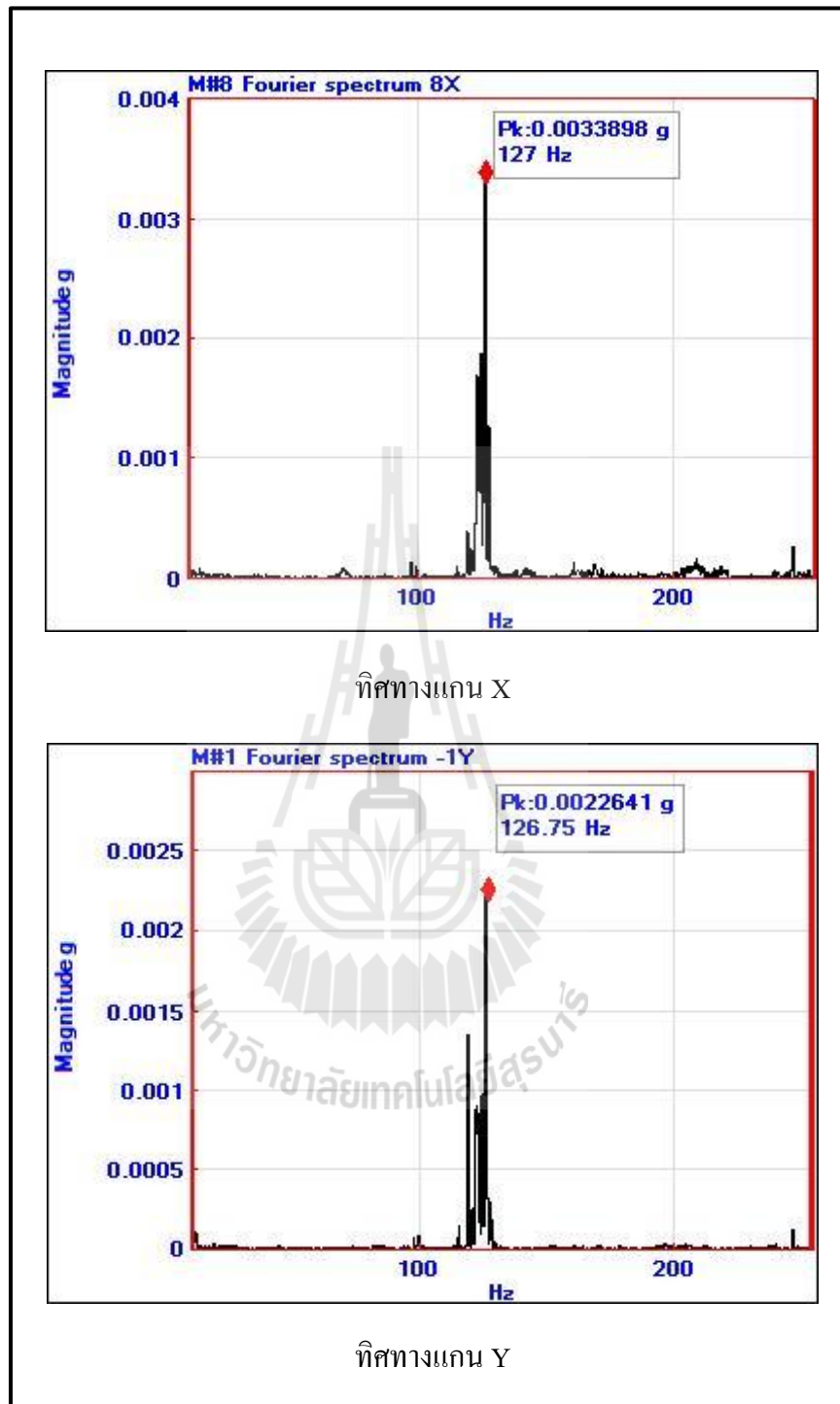
จากสมมติฐานว่าแหล่งกำเนิดการสั่นมาจากส่วนหมุน เช่น พัดลมระบายอากาศ พัดลมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหรือจากเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงได้ทำการวัดการสั่นของโครงสร้าง โดยกำหนดเงื่อนไขให้พัดลมระบายอากาศ พัดลมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ทำงาน โดยไม่มีการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในการติดตั้งหัววัดความเร่งได้คำนึงถึงการสั่นที่จะเกิดจากแหล่งกำเนิดการสั่น โดยได้ติดตั้งหัววัดความเร่งดังแสดงในรูปที่ 3.1

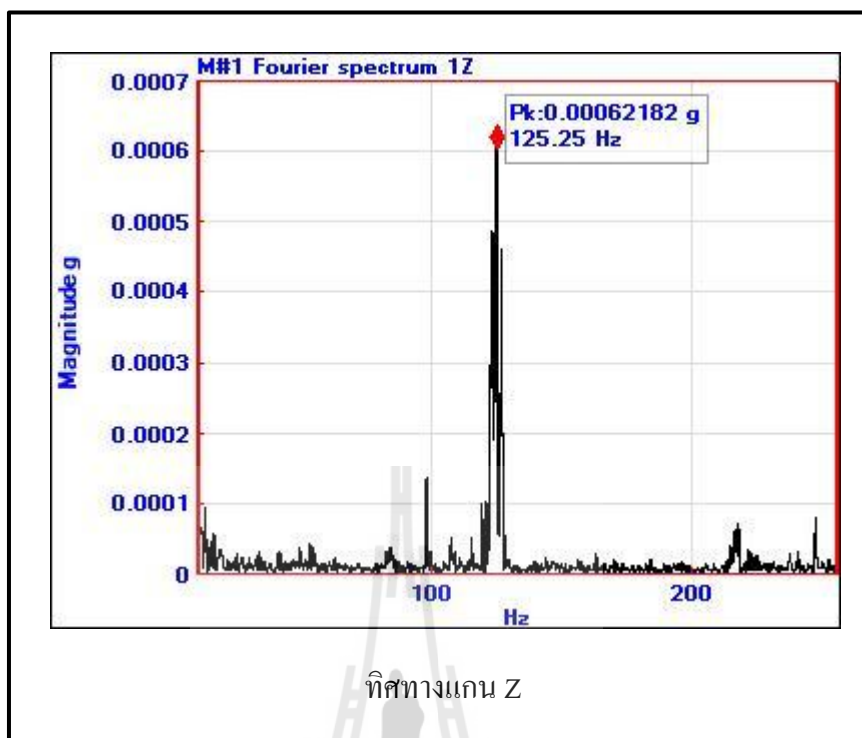


รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่ง

จากการทดลอง การสั่นที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศ พัดลมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของเครื่องทดสอบ ต่อมาจึงได้ทำการวัดการสั่นภายใต้เงื่อนไขการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โดยทำการวัดในทิศทางแกน X Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองพบความถี่ในช่วง 120 – 127 Hz แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากผลการวิเคราะห์การสั่นของโครงสร้างพบว่า แรงที่เกิดขึ้นมาจากการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และได้ส่งผ่านมายังโครงสร้าง โดยความถี่อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างมีขนาดการสั่นน้อยมาก ดังนั้นการสั่นที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศและแหล่งจ่ายไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยมาก จากนั้นจึงได้พิจารณาในส่วนของชั้นทดสอบต่อไป



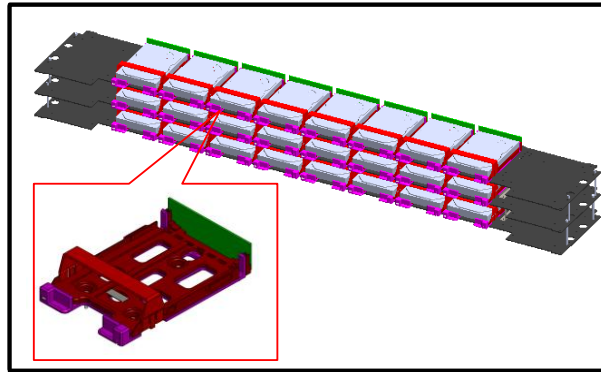
รูปที่ 3.2 สเปกตรัมการสั่นของโครงสร้าง



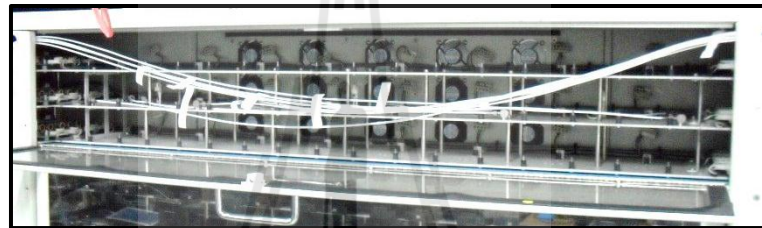
รูปที่ 3.2 สเปกตรัมการสั่นของโครงสร้าง (ต่อ)

### 3.1.2 การวิเคราะห์การสั่นของชั้นทดสอบ

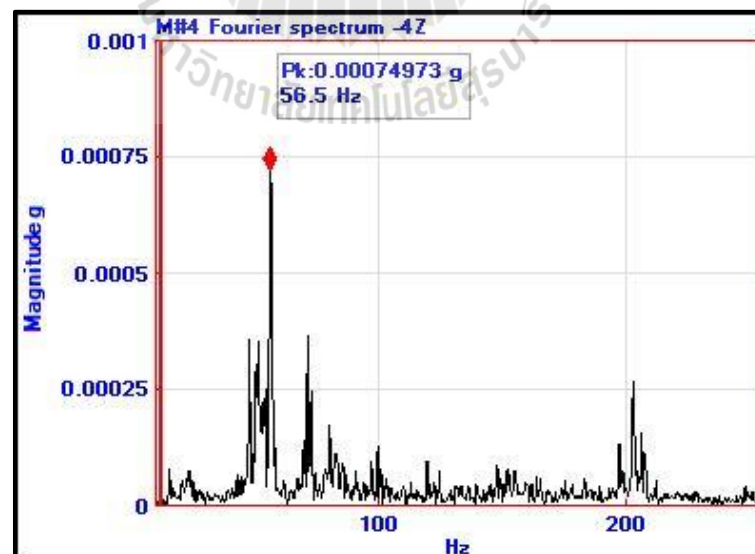
ชั้นทดสอบเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องทดสอบ โดยในหนึ่งเครื่องทดสอบจะมีชั้นทดสอบอยู่ทั้งหมด 10 ชั้น โดยแบ่งเป็นข้างละ 5 ชั้น และในหนึ่งชั้นทดสอบจะมีแผ่นเหล็กประกบกันอยู่ 3 แผ่น และมีช่องทดสอบรวมกัน 24 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในการวิเคราะห์การสั่นของชั้นทดสอบนั้น ได้แบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี คือ การวิเคราะห์การสั่นในขณะที่ไม่มีการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยกำหนดให้พัฒนาระบายอากาศและแหล่งจ่ายไฟฟ้าทำงาน เพื่อพิจารณาว่าการทำงานของพัฒนาระบายอากาศและแหล่งจ่ายไฟฟ้าส่งผลต่อชั้นทดสอบอย่างไร ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยได้ทำการวัดการสั่นของแต่ละชั้นจากการทดลองพบความถี่ของพัฒนาระบายอากาศเกิดขึ้น ซึ่งในเครื่องทดสอบจะมีพัฒนาระบายอากาศจำนวน 2 ชุดคือความเร็วรอบ 3250 รอบต่อนาที หรือความถี่ 54.17 Hz และ 4900 รอบต่อนาที หรือความถี่ 81.67 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และจากรูปจะเห็นว่า ขนาดการสั่นมากที่สุดมีค่า 0.0007 g ที่ความถี่ประมาณ 50-60 Hz จากนั้นได้ทำการวัดการสั่นที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อพิจารณาว่าในขณะที่การทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีความถี่อื่นเกิดขึ้นหรือไม่ โดยในการวัดได้ใช้หัววัดความเร่ง 9 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.6



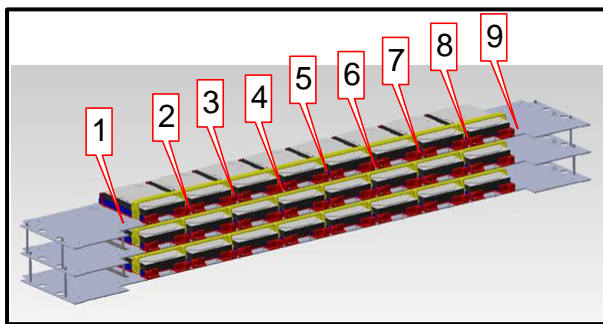
รูปที่ 3.3 ชั้นทดสอบและช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์



รูปที่ 3.4 การติดตั้งหัววัดความเร่งบนชั้นทดสอบ

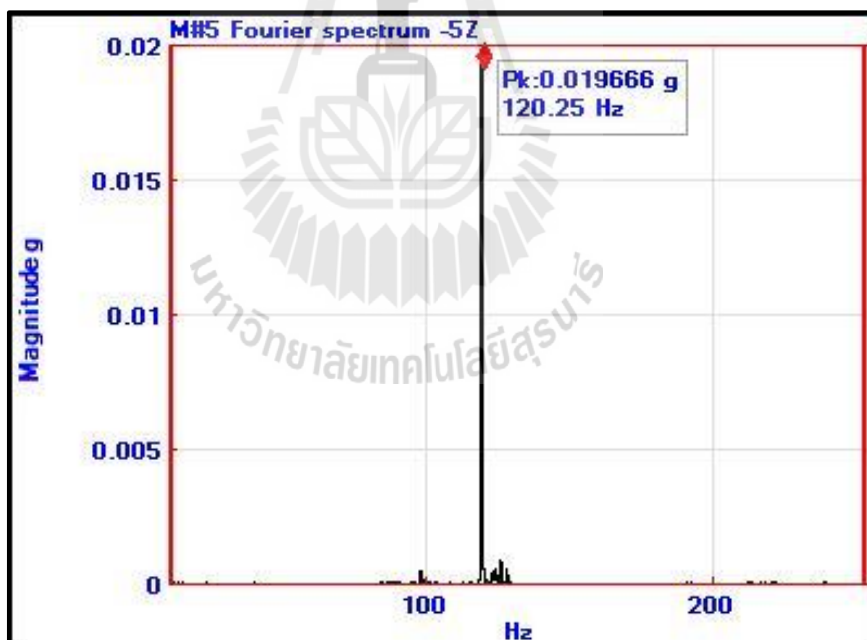


รูปที่ 3.5 สเปกตรัมของการสั่นในขณะที่ไม่มีการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ของชั้นทดสอบ



รูปที่ 3.6 การติดตั้งหัววัดความเร่งในขณะการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จากการทดลอง ความถี่ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ 120 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ด้วยขนาดการสั่นประมาณ 0.0197 g ซึ่งตรงกับการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และจากการสังเกตจะเห็นว่า ความถี่ของพัลลมาระบายอากาศไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการทดสอบเลย



รูปที่ 3.7 สเปกตรัมการสั่นของชั้นทดสอบขณะกระบวนการทดสอบ

จากการทดลองวัดค่าการสั่นของชั้นทดสอบและโครงสร้างเครื่องทดสอบในขณะที่ไม่มีการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ พบความถี่ของพัลลมาระบายอากาศและแหล่งจ่ายไฟฟ้า แต่มีขนาดการสั่นน้อยมากและเมื่อทดลองวัดการสั่นในขณะที่มีการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

พบว่า ขนาดการสั่นที่ความถี่ของพัลลมระบายอากาศและแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อเทียบกับความถี่จากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ถือว่าน้อยมาก ดังนั้น ในระหว่างกระบวนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ การสั่นที่เกิดขึ้นมีความถี่ตรงกับการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์พอดี แสดงว่าแหล่งกำเนิดการสั่นเกิดจากการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์การสั่นของช่องทดสอบซึ่งอยู่ใกล้กับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มากที่สุดและมีการป้องกันการสั่นโดยใช้ฉนวนรองรับการสั่นต่อไป

### 3.1.3 การวิเคราะห์การสั่นของช่องทดสอบ

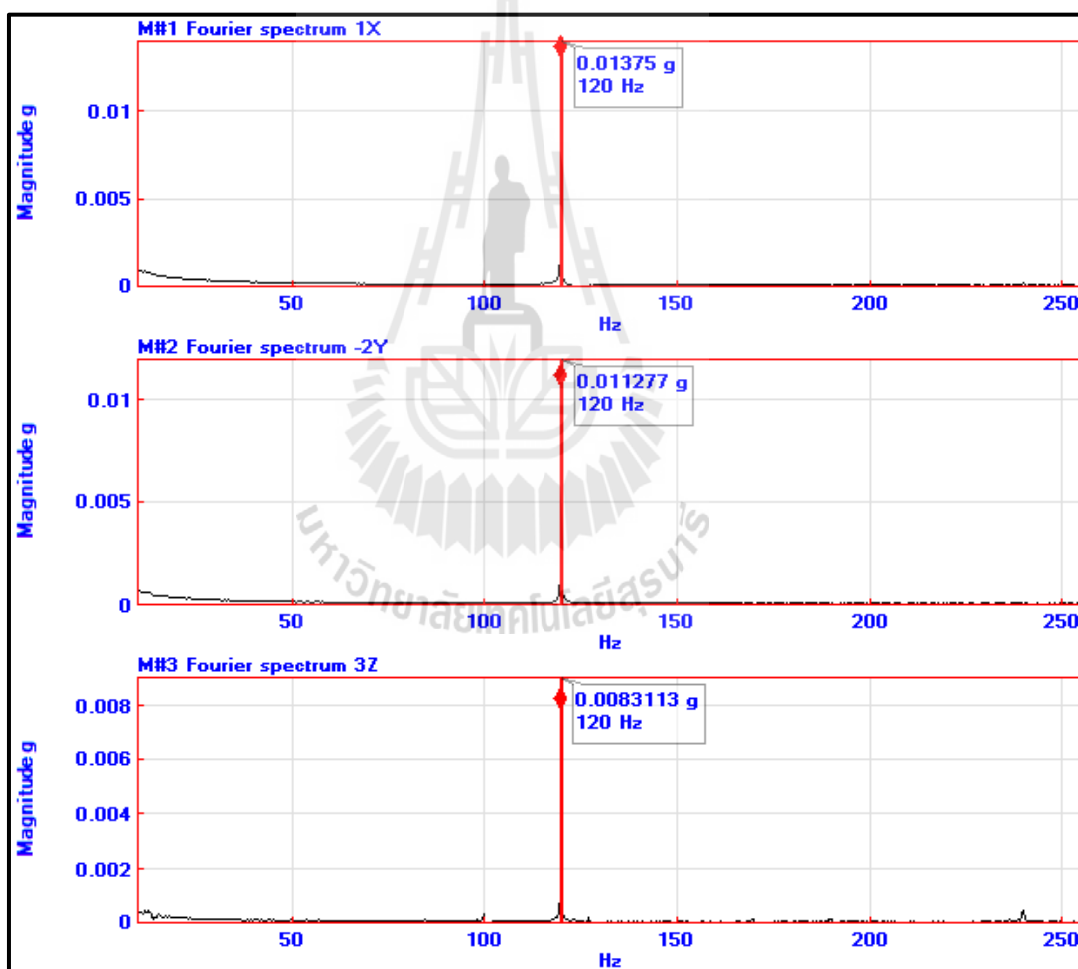
ช่องทดสอบถูกติดตั้งอยู่บนชั้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีฉนวนรองรับการสั่นจำนวน 3 ตัว เป็นตัวป้องกันการสั่นระหว่างช่องทดสอบกับชั้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ในการวิเคราะห์การสั่นของช่องทดสอบ ได้ทำการหาความถี่ธรรมชาติ 5 โหมด และวัดการสั่นที่เกิดขึ้นจริงในขณะการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งในส่วนของหาความถี่ธรรมชาติ 5 โหมดของช่องทดสอบในขณะมีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เป็นการศึกษาและทำวิจัยร่วมกับคุณประเสริฐศิริ วรรณชิตพงศา (วิทยานิพนธ์ เรื่อง การวิเคราะห์การสั่นของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในกระบวนการทดสอบ) จากผลการศึกษารูปร่างการสั่น 5 โหมดแรกอยู่ในช่วงความถี่ 40-99 Hz และรูปร่างการสั่นแสดงในตารางที่ 3.1 จากการทดลองทำให้ทราบรูปร่างการสั่นที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และต่อมาได้ทำการวัดการสั่นที่เกิดขึ้นจริงในขณะการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจำนวน 5 โหมด

โหมดการสั่น	ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวัด (Hz)	รูปร่างการสั่น
1	40	Bending 1 (Y axis)
2	54	Bending 2 (X axis)
3	62	Torsion (Z axis)
4	78	Translation (Z axis)
5	99	Bending 3 (Y axis)

สำหรับการวัดการสั่นในขณะการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยทำการวัดในทิศทางแนวแกนของช่องทดสอบ ซึ่งจากการทดสอบพบความถี่ที่ 120 Hz เกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 3.8 โดยภาพ (ด้านบน) แสดงสเปกตรัมการสั่นในทิศทางแกน X และมีขนาดการสั่นเท่ากับ 0.0137 g ภาพ (กลาง) แสดงสเปกตรัมการสั่นในทิศทางแกน Y และมีขนาดการสั่นเท่ากับ 0.01227 g และภาพ

(ด้านล่าง) แสดงสเปกตรัมการสั่นในทิศทางแกน Z และมีขนาดการสั่นเท่ากับ 0.00831 g และจากการเก็บข้อมูลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อพบความผิดพลาดขึ้นกับช่องทดสอบ จะต้องงคใช้งานช่องทดสอบนั้นและทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยความผิดพลาดในการทดสอบเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุจากการวิเคราะห์สาเหตุของวิศวกรของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด พบว่า สาเหตุหนึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สีที่บคือช่องทดสอบที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น และเมื่อทำการเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นตัวใหม่ ผลจากการทดสอบผิดพลาดจะหายไป จึงได้พิจารณาที่ฉนวนรองรับการสั่น



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมการสั่นของช่องทดสอบ



	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	61	62	63	64
2	5	6	7	8	65	66	67	68
3	9	10	11	12	69	70	71	72
4	13	14	15	16	73	74	75	76
5	17	18	19	20	77	78	79	80
6	21	22	23	24	81	82	83	84
7	25	26	27	28	85	86	87	88
8	29	30	31	32	89	90	91	92
9	33	34	35	36	93	94	95	96
10	37	38	39	40	97	98	99	100
11	41	42	43	44	101	102	103	104
12	45	46	47	48	105	106	107	108
13	49	50	51	52	109	110	111	112
14	53	54	55	56	113	114	115	116
15	57	58	59	60	117	118	119	120

รูปที่ 3.9 ผลความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

### 3.2 การศึกษาฉนวนรองรับการสั่น

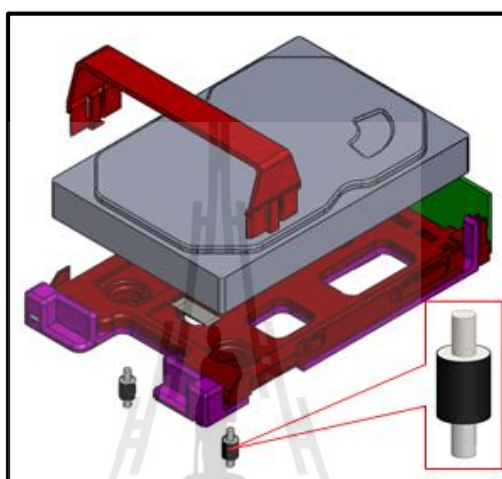
ฉนวนรองรับการสั่น (Isolator) เป็นแบบ sandwich mount มียางอยู่ระหว่างกลาง มีสกรูอยู่หัวและท้าย ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยขนาดของฉนวนรองรับการสั่น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.68 เซนติเมตร ความสูง 18.1 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 0.0011 กิโลกรัม ฉนวนรองรับการสั่นจะถูกติดตั้งระหว่างช่องทดสอบกับชั้นทดสอบ เพื่อลดการสั่นจากช่องทดสอบไปสู่ชั้นทดสอบ จากปัญหาที่พบคือ เมื่อเวลาผ่านไปฉนวนรองรับการสั่นมีการเสื่อมสภาพ ทำให้ผลการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความผิดพลาด จึงได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของฉนวนรองรับการสั่น โดยใช้เครื่องเขย่า (shaker) ร่วมกับวิธีการประมาณค่าตัวแปร (Parameter Estimation) ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของฉนวนรองรับการสั่นได้แบ่งการศึกษาเป็น 8 กรณี ตามสภาพและตำแหน่งในการติดตั้งฉนวนรองรับการสั่น ดังนี้คือ

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



รูปที่ 3.10 ฉนวนรองรับการสั่น

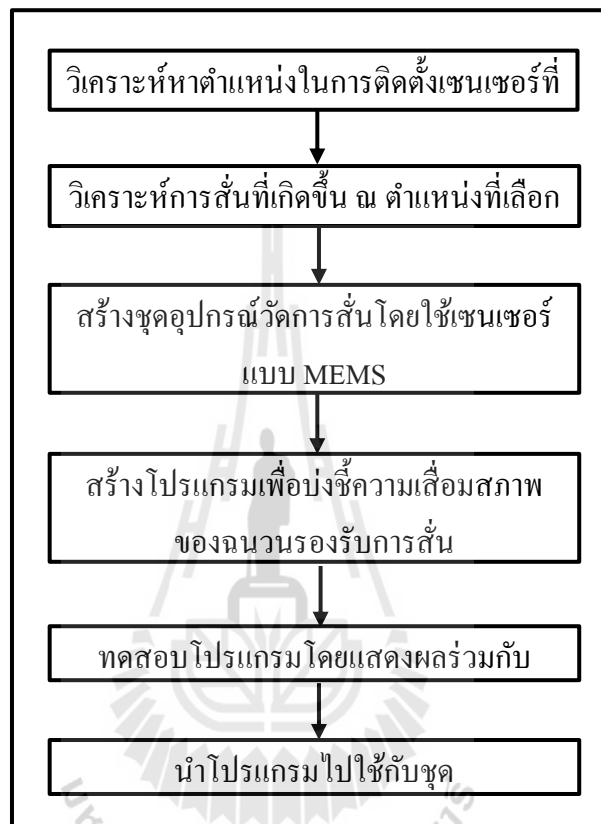
จากการทดลอง ฉนวนการสั่นที่อยู่ในสภาพดีมีค่าความแข็งของสปริงประมาณ  $0.133 \text{ MN/m}$  และค่าความหน่วงประมาณ  $11.39 \text{ N.s/m}$  และในกรณีอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 3.2 เมื่อมีการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นจะทำให้ค่าความแข็งของสปริงและความหน่วงมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 2.20 เมื่ออัตราส่วนหน่วงและค่าสัมประสิทธิ์ความถี่ธรรมชาติมีค่าเปลี่ยนแปลง ทำให้ช่วงของการทำงานของฉนวนรองรับการสั่น มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นนี้ส่งผลให้การทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความผิดพลาดขึ้น ทำให้เสียเวลาในการนำกลับมาทดสอบใหม่ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการตรวจสอบสภาพของฉนวนรองรับการสั่นโดยการหยุดเครื่องจักร และให้ช่างเทคนิคเป็นผู้ตรวจสอบโดยวิธีการใช้แรงโยกช่องทดสอบ เมื่อรู้ดีว่าโยกได้มากจึงทำการเปลี่ยนฉนวนรองรับการสั่นตัวใหม่ ส่วนฉนวนรองรับการสั่นที่ยังใช้งานได้ ก็ยังไม่ได้เปลี่ยน ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปฉนวนรองรับการสั่นที่ยังไม่ได้เปลี่ยนเกิดความเสื่อมสภาพ และส่งผลต่อการทดสอบ จึงได้มีการออกแบบชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นในขณะการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่นก่อนเกิดความเสียหายและเป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของฉนวนรองรับการสั่นในกรณีต่าง ๆ

กรณีศึกษา	K (MN/m)	C (N.s/m)
กรณีที่ 1 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง ABC	0.133	11.39
กรณีที่ 2 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง BC และเสียในตำแหน่ง A	2.224	42.85
กรณีที่ 3 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง AC และเสียในตำแหน่ง B	2.364	84.17
กรณีที่ 4 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง AB และเสียในตำแหน่ง C	2.427	103.92
กรณีที่ 5 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง C และเสียในตำแหน่ง AB	2.614	470.21
กรณีที่ 6 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง B และเสียในตำแหน่ง AC	2.788	487.71
กรณีที่ 7 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพดีในตำแหน่ง A และเสียในตำแหน่ง BC	2.874	624.69
กรณีที่ 8 ฉนวนรองรับการสั่นที่อยู่ในสภาพเสียในตำแหน่ง ABC	4.682	2341.80

### 3.3 การสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น

การสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นมีขั้นตอนวิธี ดังแสดงในรูปที่ 3.11

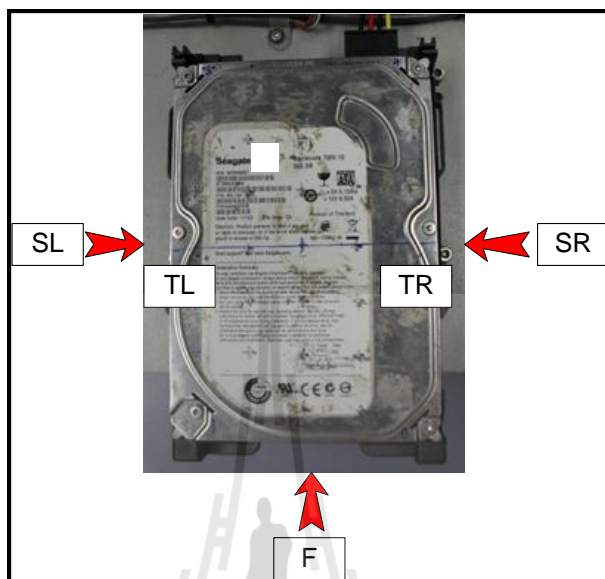


รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น

#### 3.1.1 การหาตำแหน่งในการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เหมาะสม

การติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นลงบนช่องทดสอบไม่สามารถติดตั้งได้ทุกตำแหน่งจะต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้โดยไม่กีดขวางการทำงานและจะต้องให้ผลการสั่นพอสมควร การพิจารณาเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม ได้พิจารณาทั้งด้านหน้า ด้านบนและด้านข้างซ้าย-ขวา ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดย SL หมายถึงด้านข้างซ้าย TL หมายถึง ด้านบนซ้าย SR หมายถึง ด้านข้างขวา TR หมายถึง ด้านบนขวาและ F หมายถึง ด้านหน้า โดยในการติดตั้งหัววัดความเร่งได้ตั้งสมมติฐานว่า ถ้าใช้เซนเซอร์ขนาดเล็กและบางจะสามารถติดตั้งลงบนช่องทดสอบได้ ซึ่งได้กำหนดจุดวัดด้านข้างซ้าย-ขวาและด้านบน จำนวน 5 จุด และด้านหน้า 4 จุด แสดง

ในรูปที่ 3.13 ได้พิจารณาถึงรูปร่างการสั่นที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ



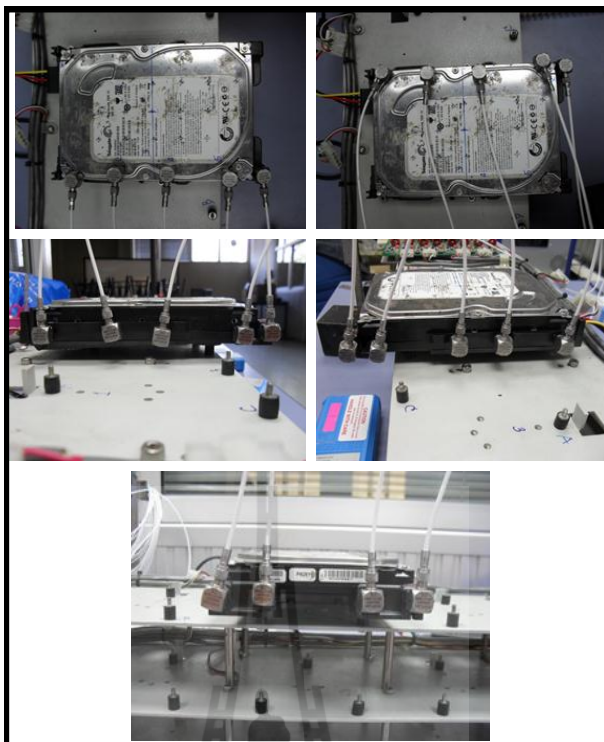
รูปที่ 3.12 ทิศทางในการติดตั้งเซนเซอร์

3.3.2 การวัดค่าการสั่น ณ ตำแหน่งที่เลือกบนช่องทดสอบ ในกรณีต่าง ๆ

เมื่อเลือกตำแหน่งในการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เหมาะสมแล้ว ต่อมาได้วิเคราะห์การตอบสนองในตำแหน่งที่เลือก โดยได้ทำการทดลองทั้ง 8 กรณีข้างต้น โดยตั้งสมมติฐานว่าระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่นในแต่ละตำแหน่งจะมีการเสื่อมสภาพไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดรูปร่างการสั่นและการตอบสนองแตกต่างกัน

3.3.3 การสร้างชุดอุปกรณ์วัดการสั่น

จากการทดลองโดยใช้หัววัดความเร่งแบบ PiezoBeam กับเครื่องมือวิเคราะห์การสั่นของ Dewetron โดยการสั่นที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีสามารถบ่งชี้ได้ด้วยขนาดการสั่น จึงได้สร้างชุดอุปกรณ์วัดการสั่น โดยได้เลือกใช้ไมโครเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนสำเร็จรูปซึ่งหาซื้อได้ง่ายและสามารถเชื่อมต่อผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์

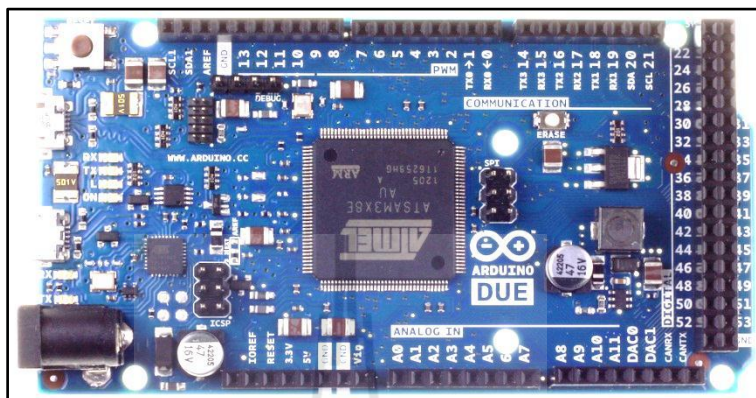


รูปที่ 3.14 โมดูลเซนเซอร์ความเร่งแบบ 3 แกน

รายละเอียดเบื้องต้นของโมดูลเซนเซอร์ความเร่งแบบ 3 แกน

- ขนาด 2 x 1.5 มิลลิเมตร
- ใช้ไมโครชิป รุ่น ADXL335 ของ Analog Devices (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค)
- อ่านค่าในระบบแกน X Y และ Z

- แรงดันใช้งานประมาณ 3-5 V
- การใช้พลังงานต่ำ 400 uA
- อุณหภูมิใช้งาน -40-85 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.15 บอร์ด Arduino Due

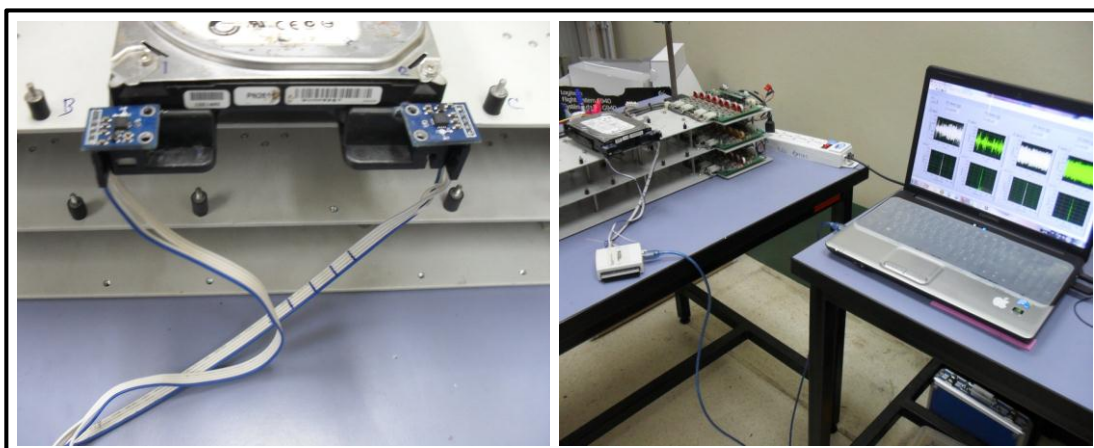
3.3.4 การวัดการสั่นโดยใช้ไมโครเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกนร่วมกับโปรแกรมแลบVIEW การเลือกใช้โปรแกรมแลบVIEW ในการแสดงผล เพราะผู้วิจัยมีความชำนาญในการเขียนโปรแกรม อีกทั้งยังง่ายต่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมแลบVIEW เก็บค่าการสั่น เพื่อนำไปสร้างเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของจนวนรองรับการสั่นสภาพดีและเสื่อมสภาพออกจากกัน (รายละเอียดของโปรแกรมแลบVIEW แสดงในภาคผนวก ข) ในการทดลองได้ใช้เซนเซอร์จำนวน 2 ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะเลือกใช้เพียง 2 แกน คือ เซนเซอร์ด้านซ้ายมือ เลือกใช้ในแกน Y และ Z ส่วนด้านขวามือเลือกใช้แกน X และ Z แสดงในรูปที่ 3.16 เนื่องจากแกน X และแกน Y ด้านซ้ายและขวา ให้ผลการสั่นที่ใกล้เคียงกัน จึงเลือกรับค่าเพียงหนึ่งแกนเท่านั้น

3.3.5 การวัดการสั่นโดยใช้ไมโครเซนเซอร์แบบ 3 แกนร่วมกับบอร์ด Arduino Due เมื่อทดสอบเงื่อนไขกับโปรแกรมแลบVIEW เรียบร้อยแล้ว จึงนำเงื่อนไขมาเขียนโปรแกรมภาษาซีที่สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino Due ได้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค) และเนื่องจากเป็นวิธีการที่ยังไม่มีใครเคยทำมาก่อนจึงได้กำหนดวิธีการศึกษา ดังนี้

- การรับค่าสัญญาณ

โดยทั่วไปการทำงานของโปรแกรมภาษาซีจะดำเนินการจากซ้ายไปขวาและจากบนลงล่าง โดยค่าของเวลาจะถูกกำหนดโดยค่าสัญญาณนาฬิกาของชิป ดังนั้นการกำหนดอัตราการสุ่ม จึงเลือกใช้วิธีการรอเวลา (delay) ในการกำหนดอัตราการสุ่มและเก็บค่าไว้ในอะเรย์





รูปที่ 3.16 การติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS ร่วมกับโปรแกรมแลบวิว

- การตรวจสอบความถี่  
เนื่องจากโปรแกรม Arduino.cc ไม่สามารถแสดงกราฟได้ จึงได้นำค่ามาพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรมแมทแลบ (MatLab) เพื่อตรวจสอบความถี่ที่อ่านได้
- การกรองความถี่  
ความถี่อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นมีผลต่อขนาดการสั่นที่อ่านได้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องกรองความถี่อื่นที่ไม่ต้องการทิ้งไป โดยได้เลือกใช้การกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth filter) อันดับที่ 3 โดยกำหนดความถี่ตัดผ่านต่ำ (Low cutoff frequency) 110 Hz และความถี่ตัดผ่านสูง (High cutoff frequency) 130 Hz  
จากนั้นจึงเขียนเงื่อนไขเพื่อบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น และทดสอบโปรแกรมโดยได้แบ่งออกเป็น 8 กรณี และสุ่มฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีและเสื่อมสภาพกรณีละ 5 ครั้ง



## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการวิจัย

การสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น จะต้องหาตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สัญญาณการสั่นที่ดี และนำมาสร้างโปรแกรมเพื่อบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น สำหรับการศึกษาเรื่องการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ก็เป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อให้ได้สัญญาณที่ถูกต้อง ดังนั้น การวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสม การกำหนดเงื่อนไขเพื่อบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น รวมถึงการสร้างอุปกรณ์วัดการสั่นร่วมกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อรับค่าสัญญาณ ทั้งหมดนี้จะได้กล่าวต่อไป

#### 4.1 การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งที่เหมาะสม

ในการวัดการสั่นของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เราไม่สามารถจะติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นได้ทุกตำแหน่ง จึงได้พิจารณาจุดที่จะสามารถติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นได้ จากการทดลองได้เลือกจุดวัดด้านข้างซ้าย-ขวา และด้านบน จำนวน 5 จุดวัด และด้านหน้าจำนวน 4 จุดวัด ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการสั่นในตำแหน่งที่เลือกบนช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

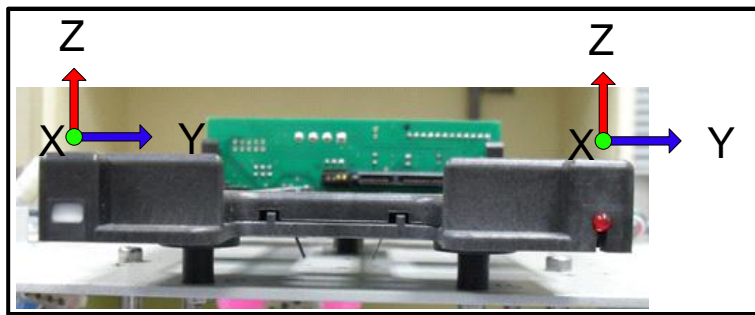
ตำแหน่งขนาดการสั่น	TL (g)	TR (g)	SL (g)	SR (g)	F (g)
P1	0.0504	0.0272	0.0116	0.0152	0.0203
P2	0.0346	0.0226	0.0183	0.0212	0.0199
P3	0.0287	0.0269	0.0231	0.0248	0.0197
P4	0.0387	0.0456	0.0301	0.0317	0.0195
P5	0.0457	0.0502	0.0325	0.0355	-

จากผลการทดลองข้างต้น TL หมายถึง ด้านบนซ้าย P คือ ตำแหน่งการวัด โดยเรียงจากด้านหลังมาด้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จากตารางจะเห็นว่า ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 5 ให้ขนาดการสั่นที่มาก แต่ตำแหน่งที่ 1 ไม่เหมาะสมต่อการติดตั้งหัววัดความเร่ง ดังนั้น จึงเลือกตำแหน่งที่ 5

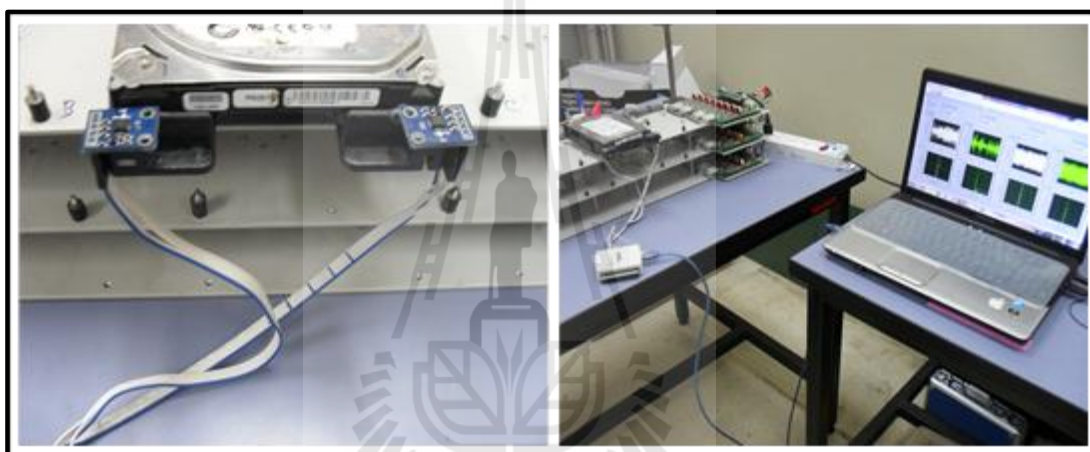
เป็นตำแหน่งในการวัด ในส่วนของ TR หมายถึง ด้านบนขวา ตำแหน่งที่ 5 ก็ให้ผลการสั้นมากที่สุด และเหมาะต่อการติดตั้งหัววัดความเร่ง ในส่วนของ SL และ SR หมายถึง ด้านข้างซ้ายและขวา ตำแหน่งที่ 5 ก็ให้ผลการสั้นที่เหมาะสมและมีค่าใกล้เคียงกัน สุดท้ายด้านหน้า แทนด้วยอักษร F ผลการสั้นมีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง จากผลการทดลองจึงเลือกตำแหน่งที่ 5 ในการติดตั้งหัววัดความเร่ง แสดงในรูปที่ 4.9 จากนั้นได้ทำการทดลองวัดการตอบสนองการสั้น ณ ตำแหน่งที่เลือก ทั้ง 8 กรณี ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 จากตาราง เมื่อพิจารณาในแต่ละทิศทางการวัด พบว่า ในกรณีของฉนวนรองรับการสั้นสภาพดีทั้ง 3 ตำแหน่งจะให้ค่าขนาดการสั้นที่สูงและเมื่อมีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพ 1 ตัว ขนาดการสั้นจะมีค่าลดลงและจะลดลงอีกเมื่อมีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพ 2 ตัว และขนาดการสั้นจะมีค่าน้อยสุดเมื่อมีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพ ทั้งหมด 3 ตัว จากการทดลองเราสามารถให้ความแตกต่างของขนาดการสั้นในแต่ละกรณีเป็นเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั้นได้ ในการสร้างอุปกรณ์วัดการสั้น ได้เลือกใช้ เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกน 2 ตัวในการวัดการสั้น โดยแต่ละตัวได้กำหนดให้วัดใน 2 ทิศทาง คือ เซนเซอร์ตัวที่ 1 วัดในทิศทางแกน Z (TL) และแกน Y (SL) และเซนเซอร์ตัวที่ 2 วัดในทิศทางแกน Z (TR) และแกน X (F) เนื่องจากในทิศทาง SL และ SR ในผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกวัดในทิศทางแกน Y โดยใช้เซนเซอร์เพียง 1 ตัว แสดงในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การสั้นในตำแหน่งที่เลือก ทั้ง 8 กรณี

Case	TL(g)	TR(g)	SL(g)	SR(g)	F(g)
Good	$0.0399 \pm 8 \times 10^{-3}$	$0.0465 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0.0353 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0337 \pm 8 \times 10^{-3}$	$0.0172 \pm 4 \times 10^{-3}$
Bad A	$0.0339 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0373 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0313 \pm 7 \times 10^{-3}$	$0.0313 \pm 7 \times 10^{-3}$	$0.0140 \pm 8 \times 10^{-3}$
Bad B	$0.0326 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0236 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0245 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0238 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0191 \pm 4 \times 10^{-3}$
Bad C	$0.0207 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0347 \pm 7 \times 10^{-3}$	$0.0234 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0237 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0182 \pm 3 \times 10^{-3}$
Bad AB	$0.0235 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0387 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0252 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0243 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0119 \pm 5 \times 10^{-3}$
Bad AC	$0.0354 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0196 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0262 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0261 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0113 \pm 5 \times 10^{-3}$
Bad BC	$0.0141 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0162 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0215 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.021 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0186 \pm 9 \times 10^{-3}$
Bad ABC	$0.0112 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0138 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0196 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0193 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0158 \pm 6 \times 10^{-3}$



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดความเร่งที่เลือก



รูปที่ 4.2 การติดตั้งเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกนและการทดลอง

## 4.2 การสร้างโปรแกรมในการบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั่น

การสร้างเงื่อนไขโปรแกรมเพื่อบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น โดยใช้ความแตกต่างของขนาดการสั่น จะต้องทำการเก็บข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างให้เพียงพอ เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งในการทดลองได้สุ่มตัวอย่างฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีจำนวน 50 ตัวอย่าง และฉนวนรองรับการสั่นเสื่อมสภาพจำนวน 100 ตัวอย่าง และเก็บข้อมูลการสั่นทั้ง 8 กรณี

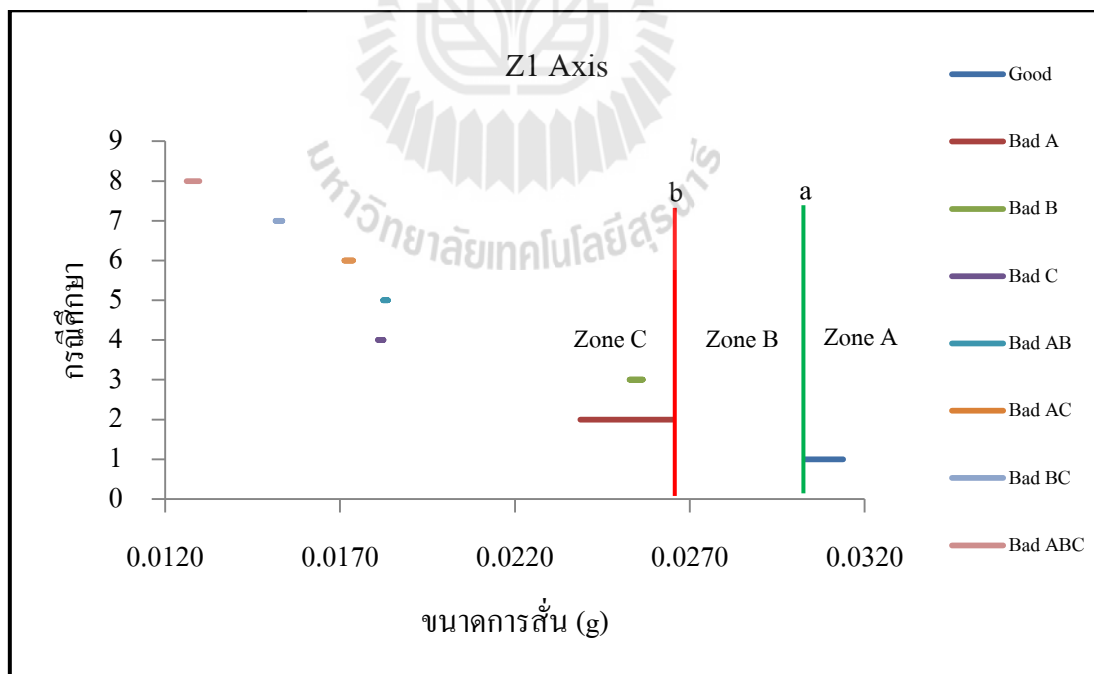
### 4.2.1 การเก็บข้อมูลการสั่นทั้ง 8 กรณี

การเก็บข้อมูลการสั่น ได้ทำการทดลองโดย กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 7 ได้สุ่มตัวอย่างจำนวน 50 ชุดตัวอย่างและกรณีที่ 8 จำนวน 100 ชุดตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าการสั่นชุดตัวอย่างละ 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย ในการหาความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นนั้นได้เลือกใช้สถิติทดสอบแบบ t test ที่ระดับช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

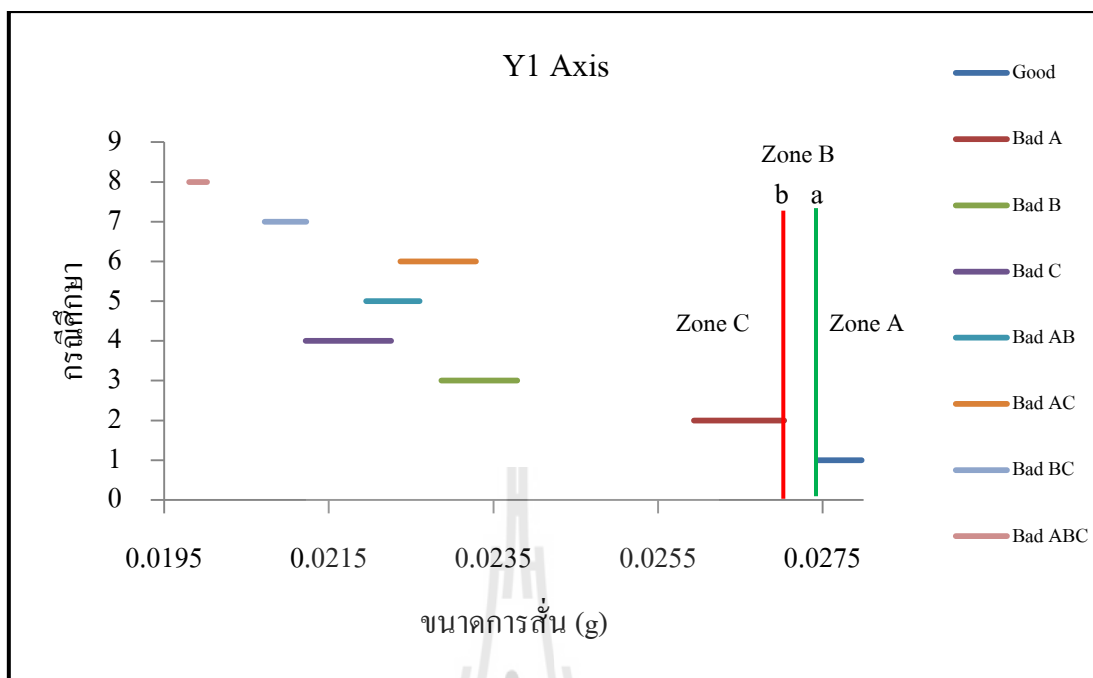
ตารางที่ 4.3 ขนาดการสั้นของกลุ่มตัวอย่าง

Case	Z1 (g)	Y1 (g)	Z2 (g)	X2 (g)
Good	$0.0308 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0277 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0361 \pm 8 \times 10^{-3}$	$0.0175 \pm 1 \times 10^{-3}$
Bad A	$0.0252 \pm 13 \times 10^{-3}$	$0.0265 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0297 \pm 14 \times 10^{-3}$	$0.0147 \pm 6 \times 10^{-3}$
Bad B	$0.0253 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0233 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0190 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0190 \pm 1 \times 10^{-3}$
Bad C	$0.0181 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0217 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0273 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0.0191 \pm 1 \times 10^{-3}$
Bad AB	$0.0182 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0223 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0170 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0104 \pm 3 \times 10^{-3}$
Bad AC	$0.0171 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0228 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0.0297 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0118 \pm 3 \times 10^{-3}$
Bad BC	$0.0152 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0210 \pm 3 \times 10^{-3}$	$0.0176 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.0185 \pm 2 \times 10^{-3}$
Bad ABC	$0.0128 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0199 \pm 1 \times 10^{-3}$	$0.0152 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.0159 \pm 2 \times 10^{-3}$

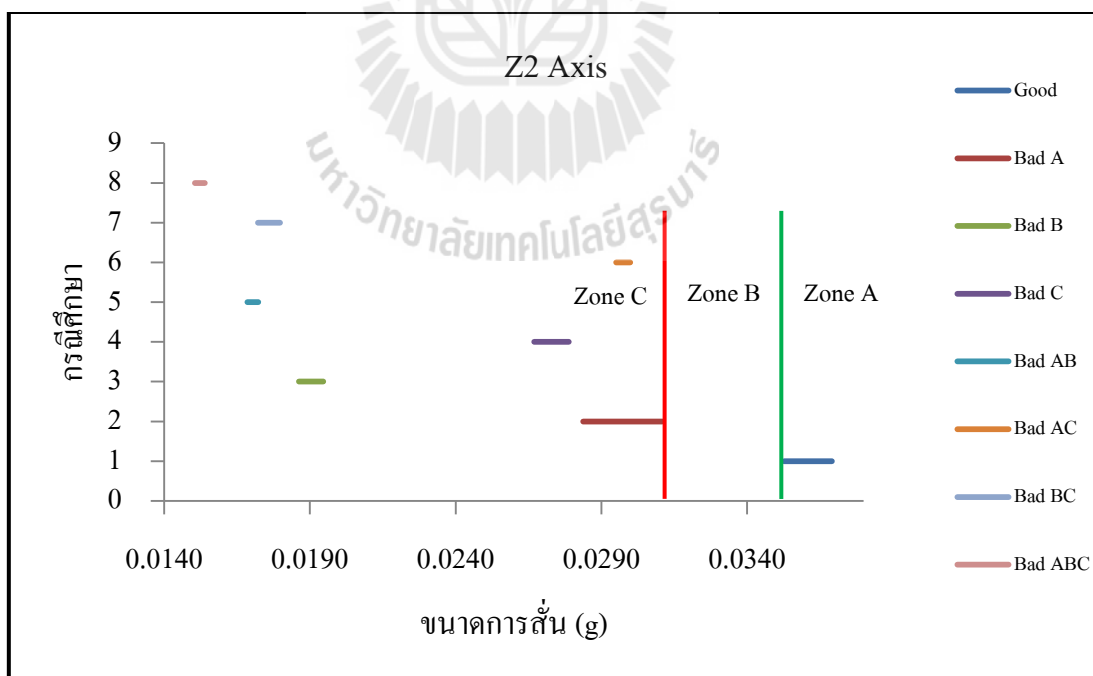
จากผลการทดลองเราจะได้ช่วงของขนาดการสั้น เมื่อมาพล็อตช่วงของขนาดการสั้นในแต่ละแนวแกน ในแต่ละกรณี แสดงในรูปที่ 4.3-4.6



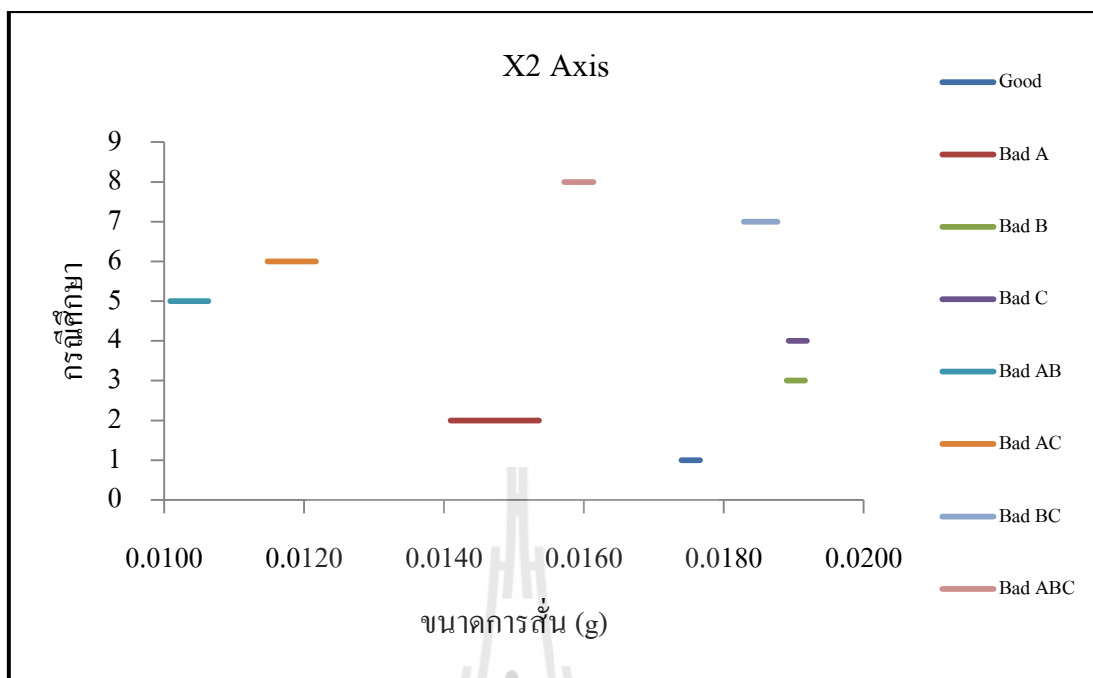
รูปที่ 4.3 แสดงช่วงขนาดการสั้นในทิศทางแกน Z ของเซนเซอร์ 1



รูปที่ 4.4 แสดงช่วงขนาดการสั่นในทิศทางแกน Y ของเซนเซอร์ 1



รูปที่ 4.5 แสดงช่วงขนาดการสั่นในทิศทางแกน Z ของเซนเซอร์ 2



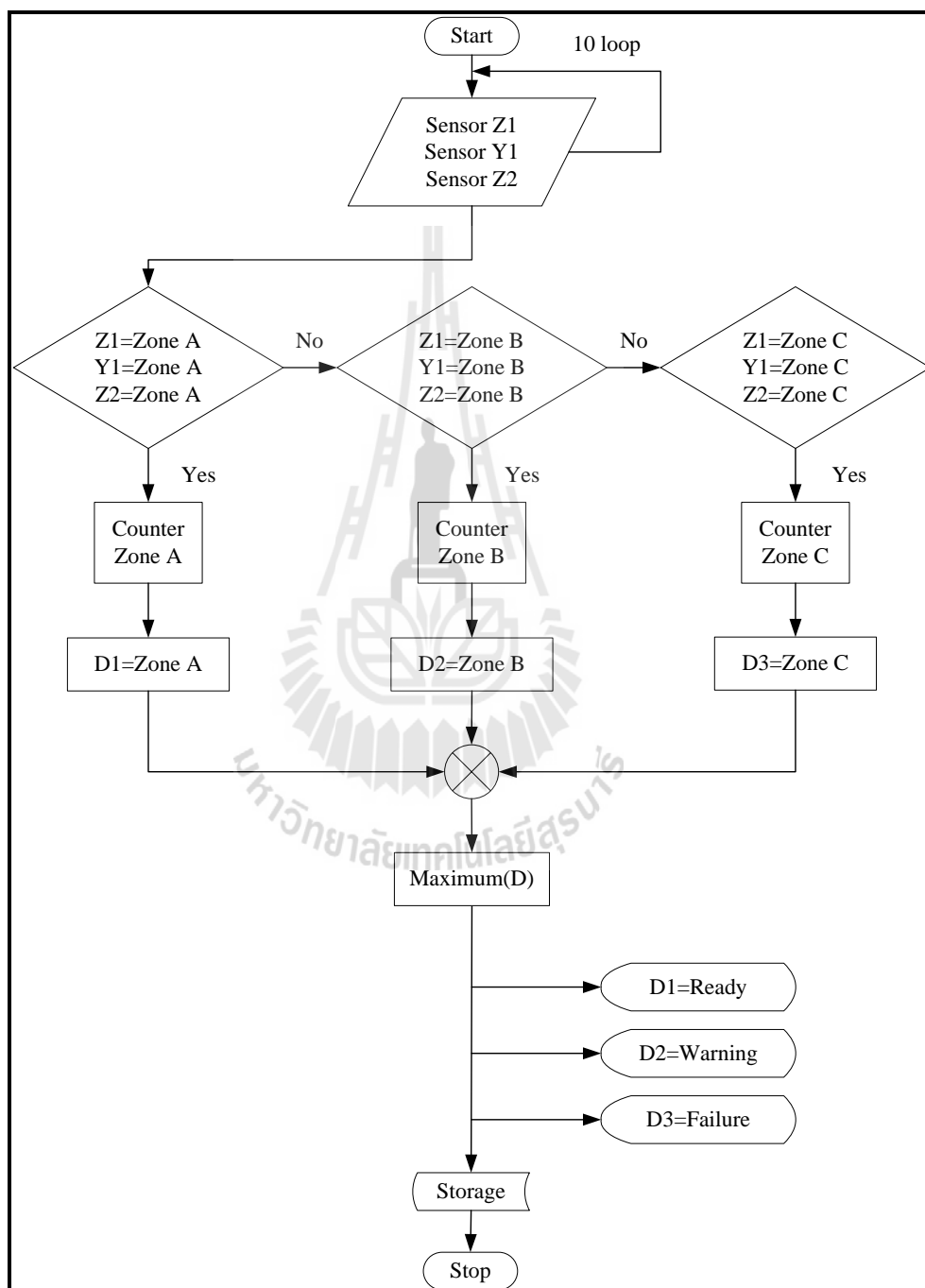
รูปที่ 4.6 แสดงช่วงขนาดการสั้นในทิศทางแกน X ของเซนเซอร์ 2

จากรูปที่ 4.6 เมื่อทำการพล็อตช่วงของขนาดการสั้นในทุกกรณี พบว่า ขนาดการสั้นของกรณีที่มีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพจะมีค่าน้อยกว่าขนาดการสั้นของฉนวนรองรับการสั้นสภาพดีและในกรณีที่มีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพ 1 ตัวที่มีขนาดการสั้นมากที่สุดจะอยู่ในกรณีของฉนวนรองรับการสั้นเสีย 1 ตัวในตำแหน่ง A เมื่อพิจารณาในช่วงระดับความเชื่อมั่น 95% เราจะได้ขอบของช่วงการสั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11–4.13 จากนั้นได้แบ่งขอบเขตเป็น 3 ช่วง คือ โชน A เป็นโชนของฉนวนรองรับการสั้นสภาพดี โชน B เป็นโชนการเฝ้าระวังและโชน C เป็นโชนของฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพ สำหรับในทิศทางแกน X ขนาดการสั้นของกรณีที่มีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพบางกรณี จะมีขนาดการสั้นมากกว่าขนาดการสั้นของฉนวนรองรับการสั้นสภาพดี ทำให้ไม่สามารถแยกของดีกับของเสียออกจากกันได้ ในทิศทางแกน X นี้ ทำให้การวัดการสั้นเหลือ 3 ทิศทาง คือ แกน Z1 Y1 และ Z2 จากนั้นจึงได้นำไปเขียนเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั้นต่อไป

#### 4.2.2 หลักการทำงานของเงื่อนไขโปรแกรม

จากการทดลองวัดค่าการสั่นในกรณีต่าง ๆ สามารถนำมาเขียนโปรแกรมดังแสดง

ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม

จากรูปที่ 4.7 เมื่อรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ในแกน Z1 Y1 และ Z2 โดยค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ครั้ง จากนั้นเข้าสู่เงื่อนไข เช่น ถ้าขนาดการสั่นตรงเงื่อนไขโซน A ให้นับว่าเป็นของสภาพดี และทำการวนรอบรับค่าจำนวน 5 รอบ จากนั้นตรวจสอบว่า เมื่อครบจำนวน 5 รอบแล้ว การสั่นเกิดขึ้นในโซนไหนมากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ทำการรับค่าสัญญาณการสั่นแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 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

จะเห็นว่าเมื่อครบจำนวน 5 รอบแล้ว การสั่นเกิดขึ้นในโซน A มากที่สุด คือเกิดขึ้นจำนวน 8 ครั้ง และเกิดขึ้นในโซน B จำนวน 7 ครั้ง และโซน C ไม่เกิดขึ้นเลย แสดงว่าจำนวนรอบรับการสั่นที่ทดสอบ อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน ซึ่งในการทดสอบการทำงานของโปรแกรม เบื้องต้นได้ทดสอบกับชุด NI 6008 กับโปรแกรมแลบวิวก่อน ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5 จาก การทดลองสุ่มกลุ่มตัวอย่างมาจำนวน 5 ชุด

ตารางที่ 4.5 การทดสอบโปรแกรมโดยโปรแกรมแลบวิวกับบอร์ด NI 6008

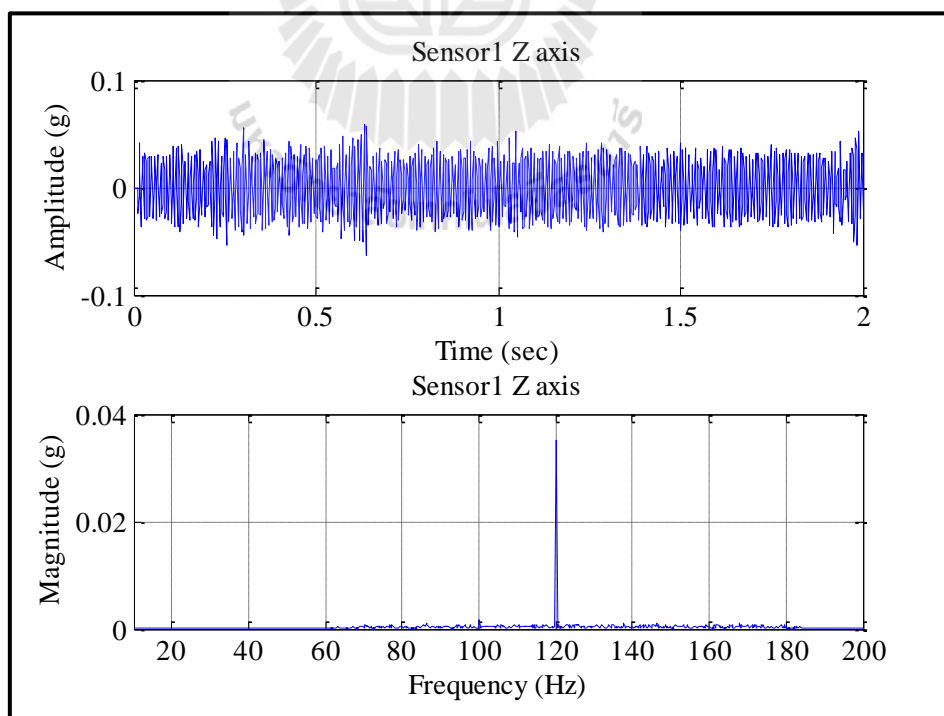
Case\No.	1	2	3	4	5
Good	Ready	Ready	Ready	Ready	Ready
Bad A	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad B	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad C	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad AB	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad AC	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure
Bad BC	Failure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



จากตารางที่ 4.5 การทดสอบโปรแกรมในกรณีฉนวนรองรับการสั่นสภาพดีทุกตัว โปรแกรมสามารถระบุสถานะพร้อมใช้งาน (Ready) ได้ทุกชุด และในกรณีที่มีฉนวนรองรับการสั่นที่เสื่อมสภาพ โปรแกรมสามารถระบุสถานะเสื่อมสภาพ (Failure) ได้ทุกกรณี จากผลการทดลอง โปรแกรมสามารถใช้งานได้ ต่อมาจึงได้นำไปเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อเชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino Due และทดสอบการทำงานต่อไป

#### 4.2.3 การทดสอบโปรแกรมโดยใช้งานร่วมกับบอร์ด Arduino Due

การใช้งานเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จำเป็นต้องตรวจสอบการอ่านค่าสัญญาณการสั่นก่อนเป็นลำดับแรก ซึ่งจากการตรวจสอบการอ่านค่าที่ความเร็วรอบการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ 7200 รอบต่อนาที หรือ 120 Hz โดยเลือกใช้อัตราการสุ่มที่ 500 Hz และการกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทอนดับที่สาม แสดงในรูปที่ 4.8 โดยการนำข้อมูลมาพล็อตกราฟบนโปรแกรมแมทแล็บ ซึ่งจากรูปที่ 4.8 กราฟด้านบนแสดงสัญญาณการสั่นในโดเมนเวลาและกราฟด้านล่างแสดงสเปกตรัมการสั่นที่ความถี่ 120 Hz ซึ่งตรงกับความถี่ในการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จากผลการทดลองในการอ่านค่าขนาดการสั่นพบว่าอุปกรณ์สามารถตรวจวัดการสั่นได้ จากนั้นได้เขียนเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.8 สัญญาณการสั่นโดยใช้เซนเซอร์แบบ MEMS กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางที่ 4.6 การทดสอบโปรแกรมภาษาซีกับบอร์ด Arduino Due

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

จากตารางที่ 4.6 การทดสอบโปรแกรมในกรณีฉนวนรองรับการสั้นสภาพดีทุกตัว โปรแกรมสามารถระบุสถานะพร้อมใช้งานได้ทุกชุด และในกรณีที่มีฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพ โปรแกรมสามารถระบุสถานะเสื่อมสภาพได้ทุกกรณี ซึ่งจากผลการทดลองโปรแกรมสามารถใช้งานได้

### 4.3 สรุป

จากการศึกษาและวิเคราะห์การสั้นของเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (โครงสร้างชั้นทดสอบและช่องทดสอบ) พบว่าการสั้นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการหมุนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยมีฉนวนรองรับการสั้นเป็นตัวป้องกันการสั้นระหว่างช่องทดสอบกับชั้นทดสอบ แต่เมื่อเวลาผ่านไป ฉนวนรองรับการสั้นมีการเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดปัญหาการสั้นขึ้นในระหว่างการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความเสียหาย การสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพ จะช่วยบ่งชี้สภาพก่อนเกิดความเสียหายต่อฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งในการติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดการสั้นจำเป็นจะต้องวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดลอง ตำแหน่งที่เหมาะสมอยู่ในตำแหน่งด้านหน้าของช่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยให้ค่าขนาดการสั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และต่อมาได้ทำการวัดขนาดการสั้นของฉนวนรองรับการสั้นสภาพดีและเสื่อมสภาพในกรณีต่าง ๆ เพื่อสร้างเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั้น จากผลการทดลอง ขนาดการสั้นของฉนวนรองรับการสั้นสภาพดีมีความต่างกับขนาดการสั้นของฉนวนรองรับการสั้นเสื่อมสภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำไปสร้างเป็นเงื่อนไขในการแยกฉนวนรองรับการสั้นสภาพดีและเสื่อมสภาพได้ และเนื่องจากยังไม่มีใครเคยเขียนโปรแกรม

รับคำสั่งญาณการสั่งจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มาก่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบการอ่านคำสั่งญาณก่อนนำไปใช้งาน จากผลการทดลอง โมดูลเซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกน (ADXL335) กับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due สามารถรับคำสั่งญาณได้ถูกต้อง และเมื่อนำไปทดสอบการทำงาน พบว่า สามารถจำแนกคนนอนรองรับการสั่งสภาพดีและเสื่อมสภาพออกจากกันได้



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการสั้นของเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์และสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั้น โดยใช้เซนเซอร์ความเร่งแบบ MEMS 3 แกน ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due และยังสามารถสื่อสารกับระบบของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัญหาการสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้เทคนิคการวัดการสั้นและสร้างอุปกรณ์เพื่อป้องกันความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั้น

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

แรงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ และส่งผ่านการสั้นไปยังชั้นทดสอบและโครงสร้างเครื่องทดสอบ ผ่านทางฉนวนรองรับการสั้น

การเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั้น ส่งผลให้การทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความผิดพลาดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ฉนวนรองรับการสั้น พบว่าฉนวนรองรับการสั้นที่เสื่อมสภาพจะมีค่าความหน่วงและความแข็งของสปริงเพิ่มขึ้น

การสร้างชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั้น ในขณะการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จำเป็นต้องวิเคราะห์หาตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั้นที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดลอง ตำแหน่งด้านหน้าของช่องทดสอบเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด

การสร้างเงื่อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั้น ได้ใช้สถิติทดสอบแบบ t-test เข้ามาช่วยในการตัดสินใจเลือกขนาดการสั้น ซึ่งจากผลการทดลอง ได้เงื่อนไขในการแยกฉนวนรองรับการสั้นดีและเสื่อมสภาพออกจากกันได้

การทดสอบโปรแกรม ได้เลือกใช้การแสดงผลบนชุดโปรแกรมแลบวิวและชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจากผลการทดลอง โปรแกรมทั้งสอง สามารถบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั้นได้

ดังนั้นการออกแบบชุดอุปกรณ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพนี้ สามารถบ่งชี้สถานะของฉนวนรองรับการสั้นได้ และการเขียนโปรแกรมเป็นภาษาซีสามารถเชื่อมต่อกับระบบการทำงานของ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องทดสอบต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

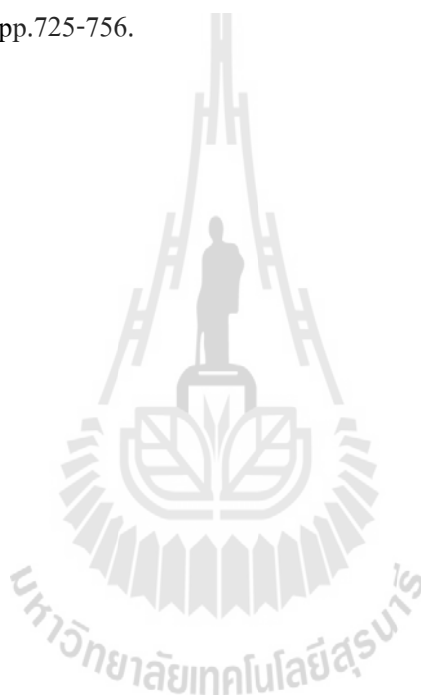
1. ในงานวิจัย ผู้วิจัยได้เลือกใช้เซ็นเซอร์ที่มีความสามารถในการรับรู้  $330 \text{ mV/g}$  ซึ่งถ้าต้องการผลที่ดีขึ้น ควรเลือกใช้เซ็นเซอร์ที่มีความสามารถในการรับรู้  $1000 \text{ mV/g}$
2. ในงานวิจัยต่อไป อาจจะมีการพัฒนาให้ติดตั้งอุปกรณ์ไวในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อเป็นตัวทดสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการสั้นได้
3. การสั้นของช่องทดสอบตัวข้างเคียงอาจจะส่งผลต่อขนาดการสั้นได้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม
4. ควรมีการศึกษาอายุการใช้งานของชุดอุปกรณ์ด้วย



## รายการอ้างอิง

- กนต์ธร ชำนิประศาสน์ (2545). การสั่นทางกล. (แปลจากต้นฉบับ Mechanical Vibrations ของ Rao, S.S.) กรุงเทพมหานคร, เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. 464 หน้า.
- กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี (2554). LabView ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนากระบวนการวัดและควบคุม. กรุงเทพมหานคร, ซีเอ็ดดูเคชั่น. 267 หน้า.
- จิระพล ศรีเสริฐผล และ สมใจ สุนทรสกุล (2552). การวิเคราะห์การสั่นของชุดขนถ่ายชิ้นงานที่มีผลต่อชิ้นงานหัวอ่านและบันทึกข้อมูล ตามสภาวะการใช้งานจริง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ขอนแก่น. 21-22 ตุลาคม 2552. หน้า 1556-1561.
- จิระพล ศรีเสริฐผล สุเมธี ถีสุงเนิน และ พีระยุทธ หวังรักไพบูลย์ (2552). การศึกษาและวิเคราะห์การสั่นของอุปกรณ์สำหรับทดสอบโดยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, เชียงใหม่. 4-7 พฤศจิกายน 2552.
- จิระพล ศรีเสริฐผล (2554). การสั่นทางกล, เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา 425304 และ 525307 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 450 หน้า.
- ประดิษฐ์ หมู่มืองสอง และ สุขญาณ หรรษสุข (2550). การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน. กรุงเทพมหานคร, ซีเอ็ดดูเคชั่น. 288 หน้า.
- สมนึก บุญพาไสว (2550). การวัดและเครื่องมือวัด. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ท็อป. 356 หน้า.
- Chang, Y.B., Park, D.K., Park, N.C., and Park, Y.P. (2002). Prediction of Track Misregistration Due to Disk Flutter in Hard Disk Drive. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol.38: No.2, March 2002. pp.1441-1446.
- Forrest, J.A. (2006). Experimental Modal Analysis of Three Small-Scale Vibration Isolator Models. **Journal of Sound and Vibration**. Vol.289: No.1-2, January 3, 2006. pp.382-412.
- Jia, Q.W., and Wang, Z.F. (2008). A New Adaptive Method for Identification of Multiple Unknown Disturbance Frequencies in HDDs. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol.44: No.11, November 2008. pp.3746-3749.
- Jintanawan, T. (2001). Mechanical Vibration of Computer Hard Disk Drives (HDD). **Journal of Thai Robotics Society**, Vol.1: No.1, pp.54-60.

- Pang, C.K., Ong, E.H., Guo, G., and Qian, H. (2008). Experimental Dynamic Characterizations and Modelling of Disk Vibrations for HDDs. **ISA Transactions**. Vol.47: No.1, January 2008. pp.85-93.
- Park, K.S., Lim, S.H., Park, Y.P., Chang, Y.B., and Park, N.C. (2012). Shock and Vibration Isolation of Laptop Hard Disk Drive using Rubber Mount. **Microsystem Technologies**. Vol.18, September 24, 2012. pp.1559-1566.
- Shen, J.Y., Tseng, C.W., and Shen, I.Y. (2004). Vibration of Rotating Disk/Spindle Systems with Flexible Housing/Stator Assemblies. **Journal of Sound and Vibration**. Vol.271: No.3-5, April 6, 2004. pp.725-756.





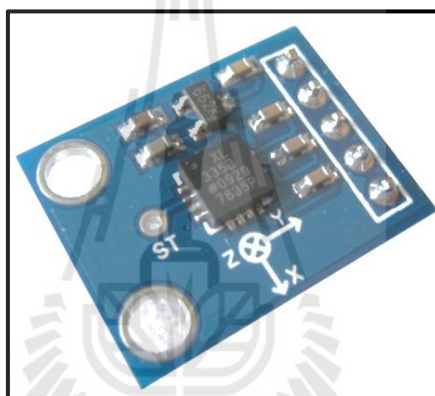
ภาคผนวก ก

โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกนกับบอร์ด Arduino Due



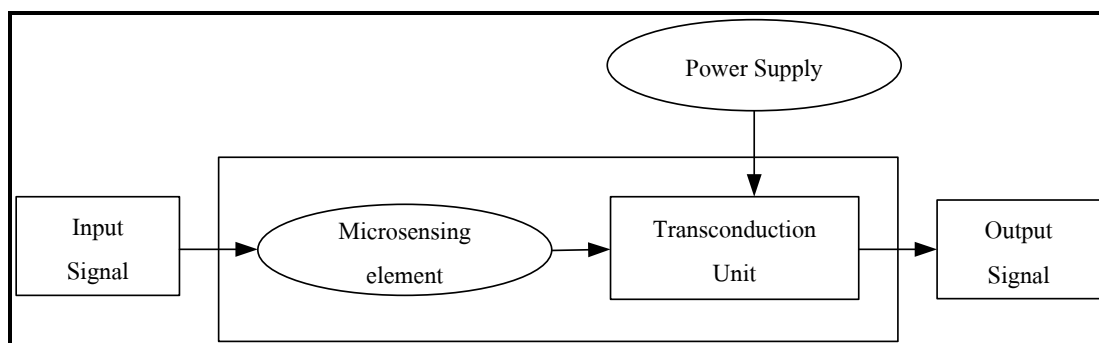
### ก.1 โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน

โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน แสดงดังรูป ก.1 เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ประกอบไปด้วยส่วนที่ใช้ในการขับเคลื่อนโดยใช้ไฟฟ้า เรียกว่า วงจรรวม (integrated circuit หรือ IC) และส่วนที่เป็นระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งมีชื่อเรียกต่างกันในแต่ละทวีป ซึ่ง MEMS จะแตกต่างจากอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ คือ MEMS สามารถทำงานเชิงกลได้ ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ (sensors) และแอคทูเอเตอร์ (actuator) MEMS เป็นต้น โดย MEMS จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญสองส่วน คือ ส่วนที่ใช้สำหรับการรับสัมผัสหรือตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอก ซึ่งจะเรียกว่า ไมโครเซนเซอร์ (microsensors) หรือ ไมโครแอคทูเอเตอร์ (microactuators) และส่วนที่ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณ (transduction unit) สำหรับ



รูปที่ ก.1 โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน

ไมโครเซนเซอร์ เป็นส่วนที่มีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่มาจากสิ่งเร้าและพลังงานประเภทต่าง ๆ ที่มากระตุ้นได้อย่างแม่นยำ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แรงสั่นสะเทือน อุณหภูมิ แรงดัน สารชีวภาพ หรือการแผ่รังสี เป็นต้น MEMS ที่เป็นไมโครเซนเซอร์นั้นทั้งอินพุตและเอาต์พุตจะเป็นลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยหลักการทำงานของไมโครเซนเซอร์แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 หลักการทำงานของไมโครเซนเซอร์

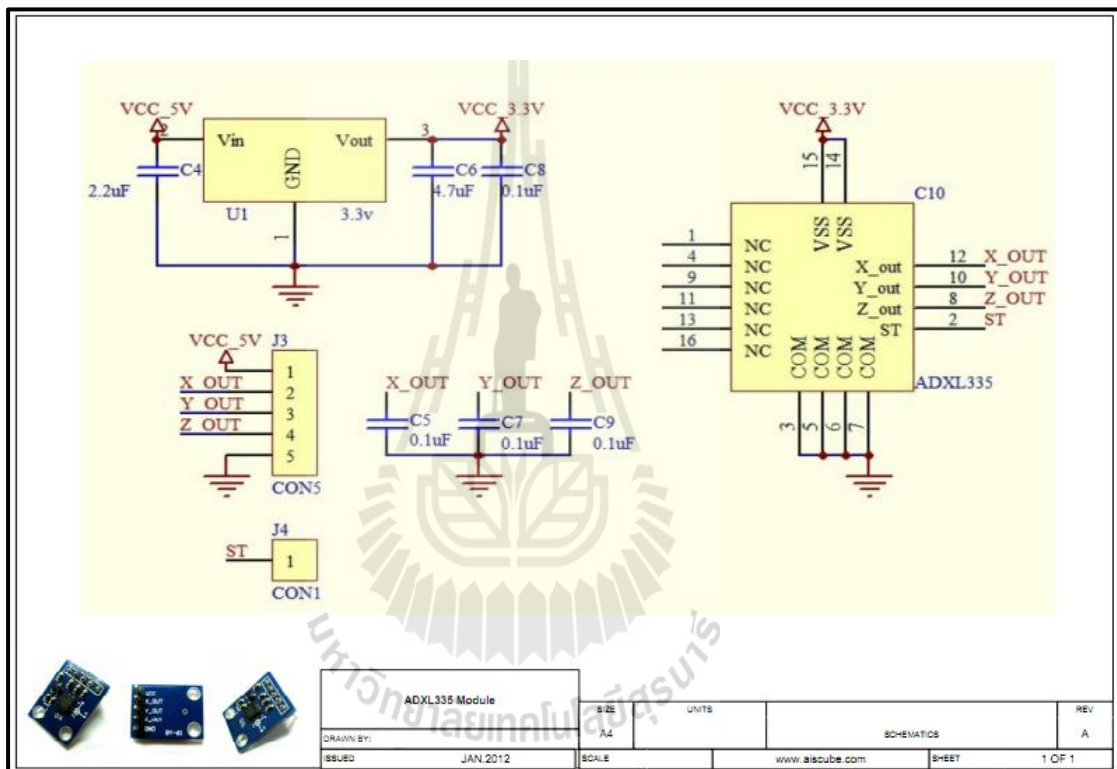
ก.2 รายละเอียดต่าง ๆ ของ MEMS (ADXL335)

Parameter	Conditions	Min	Type	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis	±3	±3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		±0.3		%
Package Alignment Error			±1		Degrees
Interaxis Alignment Error			±0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity <sup>1</sup>			±1		%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at Xout,Yout,Zout	Vs = 3V	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	Vs = 3V		±0.01		%/°C
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>					
0 g Voltage at Xout,Yout	Vs = 3V	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at Zout	Vs = 3V	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			±1		mg/°C

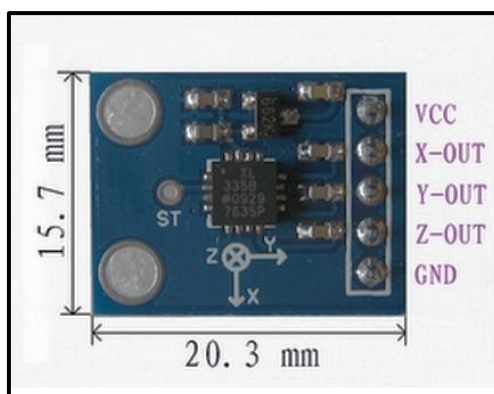
Parameter	Conditions	Min	Type	Max	Unit
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density Xout, Yout			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density Zout			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
<b>REQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
Bandwidth Xout, Yout <sup>5</sup>	No external filter		1600		
Bandwidth Zout <sup>5</sup>	No external filter		550		
R <sub>FILT</sub> Tolerance		32 ± 15%			k $\Omega$
Sensor Resonant Frequency		5.5			kHz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		$\mu\text{A}$
Output Change at Xout	Self-Test 0 to Self-Test 1	-15 0	-325	-600	mV
Output Change at Yout	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at Zout	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	V <sub>s</sub> = 3V		350		$\mu\text{A}$
Turn-On Time <sup>7</sup>	No external filter		1		ms

Parameter	Conditions	Min	Type	Max	Unit
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C

### ก.3 แผนผังวงจรของโมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน



รูปที่ ก.3 แผนผังวงจรโมดูลเซนเซอร์แบบ 3 แกน ADXL335



รูปที่ ก.4 ขนาดของโมดูลเซนเซอร์แบบ 3 แกน ADXL335

#### ก.4 บอร์ด Arduino Due

Arduino Due เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นแรกสุดของครอบครัว Arduino ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต ของรุ่น ARM Cortex M3 โดย Arduino Due มีคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญ ดังนี้

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น AT91SAM3X8E ของบริษัท Atmel โดยมีหน่วยความจำแฟลช 512 กิโลไบต์และแรม 96 กิโลไบต์
- ความถี่สัญญาณนาฬิกา 84 MHz
- ไฟเลี้ยงทำงาน 3.3 V
- ย่านไฟเลี้ยงอินพุต 7-12 V
- พอร์ตอินพุตเอาต์พุตจำนวน 54 ช่อง (รวมเอาต์พุต PWM จำนวน 12 ช่อง)
- อินพุตอะนาล็อกจำนวน 12 ช่อง โดยมีความละเอียด 12 บิต และรับแรงดันไฟฟ้าได้ 0-3.3 V
- เอาต์พุตอะนาล็อก จำนวน 2 ช่อง โดยมีความละเอียด 12 บิต และให้แรงดันไฟฟ้าได้ 0-3.3 V
- ติดต่อคอมพิวเตอร์โดยพอร์ต USB

ในการสื่อสารกับบอร์ด Arduino Due ต้องใช้กับซอฟต์แวร์ Arduino IDE เวอร์ชัน 1.5 ขึ้นไป



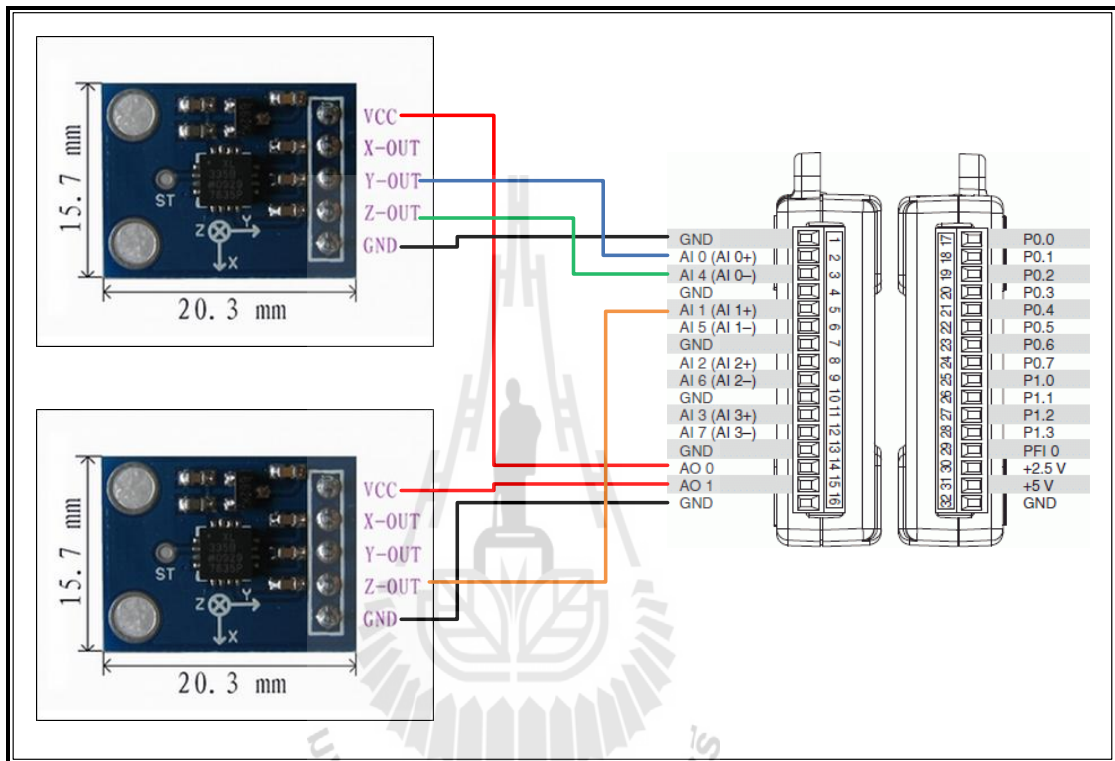
ภาคผนวก ข

การกำหนดค่าในโปรแกรมแลบวิว (LabView)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ข.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ NI 6008 กับโมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน ADXL335

ในการทดลองได้เลือกใช้โมดูลแบบ MEMS 3 แกน ADXL335 จำนวน 2 ตัว โดยเซนเซอร์ตัวที่ 1 ใช้วัดในทิศทางแกน Y และ Z ส่วนเซนเซอร์ตัวที่ 2 ใช้วัดในทิศทางแกน Z เพียงแกนเดียวเท่านั้น โดยจะรับค่าสัญญาณเป็นอนาลอก ดังแสดงในรูป ข.1



รูปที่ ข.1 การต่ออุปกรณ์ NI 6008 กับ โมดูลเซนเซอร์แบบ 3 แกน ADXL335

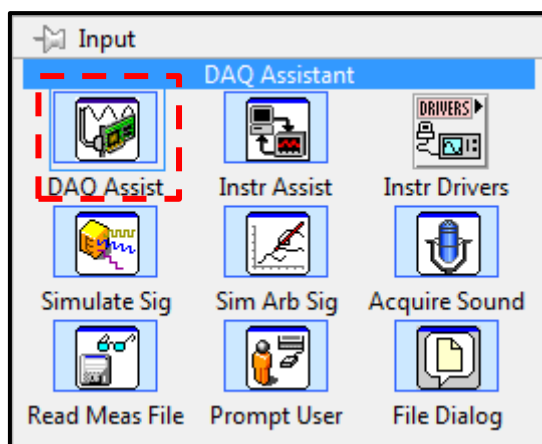
### ข.2 การกำหนดค่าในโปรแกรมแลบวิว

โมดูลเซนเซอร์แบบ MEMS 3 แกน ADXL335 ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 3.3 V และจะส่งสัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น เราจึงต้องสั่งอุปกรณ์ NI 6008 ให้จ่ายไฟฟ้าให้กับโมดูลเซนเซอร์และให้รับค่าอินพุตเป็นแรงดัน

- การกำหนดค่า Analog output

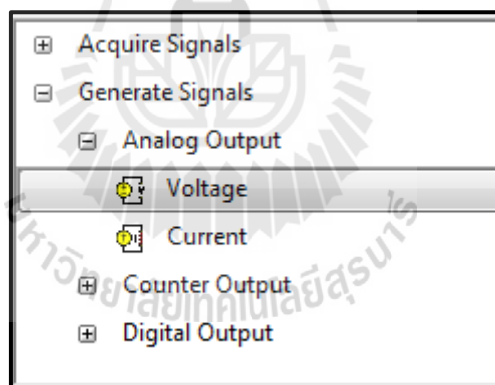
- การเชื่อมต่ออุปกรณ์ NI 6008 กับโปรแกรมแลบวิว จะเลือกใช้บล็อก DAQ

Assistant แสดงในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 บล็อก DAQ Assistant

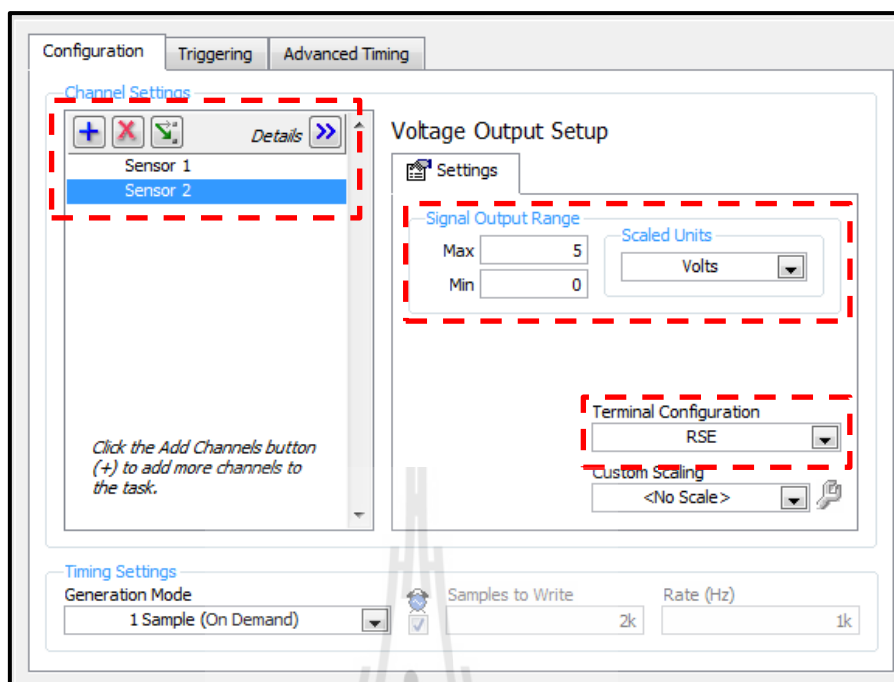
- การกำหนดค่า Analog output ใน DAQ Assistant
  - เลือก >> Generate Signals >> Analog Output >> Voltage



รูปที่ ข.3 Analog Output ใน DAQ Assistant

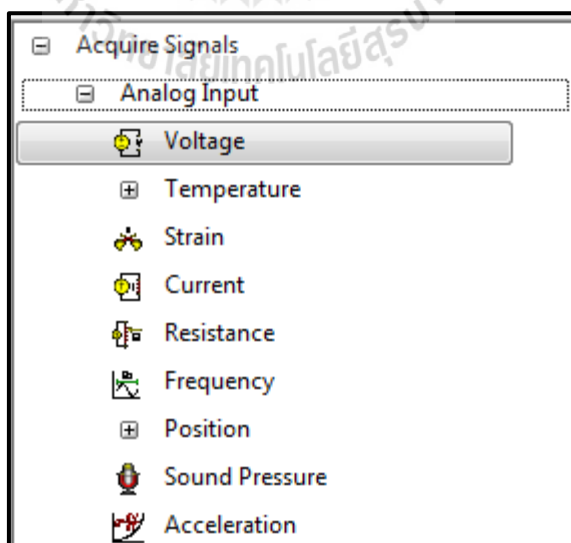
- การกำหนดค่า Configuration
  - Channel Settings >> ให้เพิ่มช่องสัญญาณเอาต์พุต
  - Voltage Output Setup >> กำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุด
  - Terminal Configuration >> เลือก RSE (คือ การใช้กราวด์ร่วมกัน)





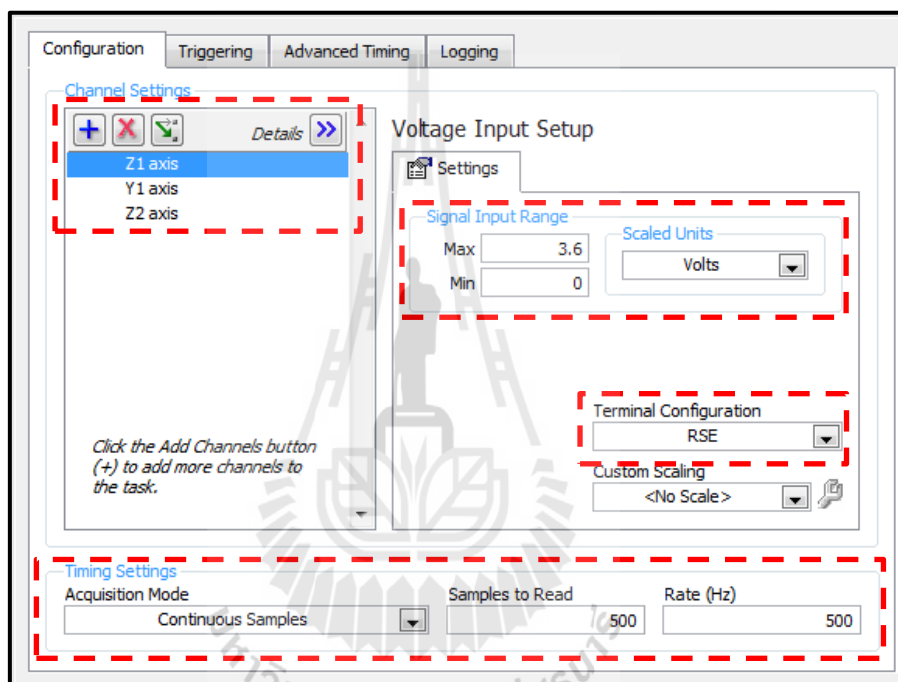
รูปที่ ข.4 การกำหนดค่า DAQ Assistant (Analog output)

- การกำหนดค่า Analog Input ใน DAQ Assistant
  - เลือก >> Acquire Signals >> Analog Input >> Voltage



รูปที่ ข.5 Analog Input

- การกำหนดค่า Configuration
  - Channel Settings >> ให้เพิ่มช่องสัญญาณอินพุต
  - Voltage Output Setup >> กำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุด
  - Terminal Configuration >> เลือก RSE (คือ การใช้กราวด์ร่วมกัน)
  - Timing Setting >> Acquisition Mode >> Continuous Samples >> Sample to Read >> 500 >> Rate (Hz) >> 500



รูปที่ ข.6 การกำหนดค่า DAQ Assistant (Analog input)

*Tip* : อัตราส่วนของค่า Sample to Read ต่อ Rate มีความสัมพันธ์ต่อการใช้เวลาในการดึงสัญญาณ

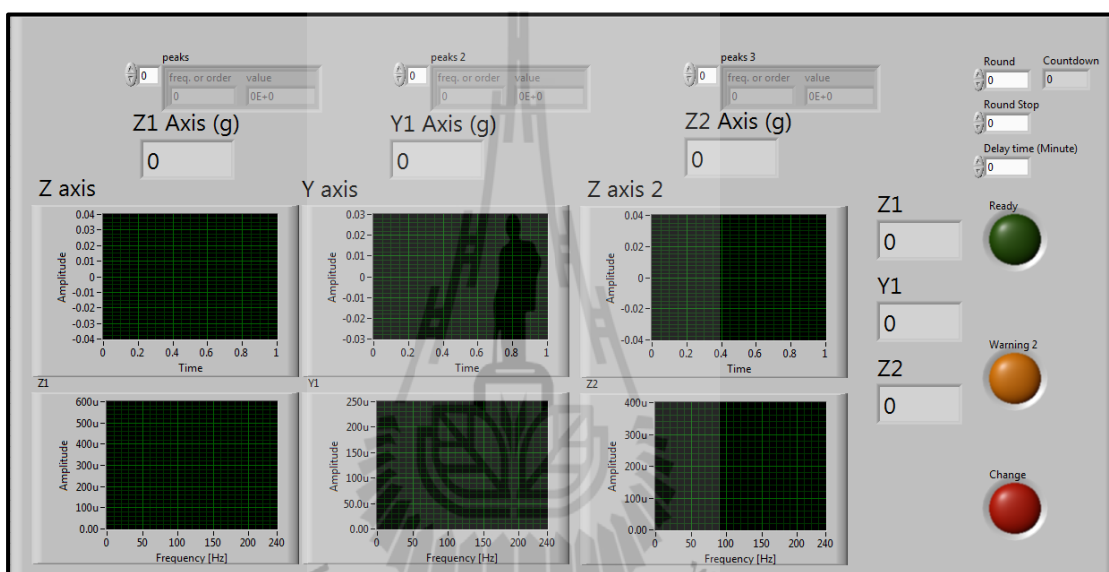


ภาคผนวก ค

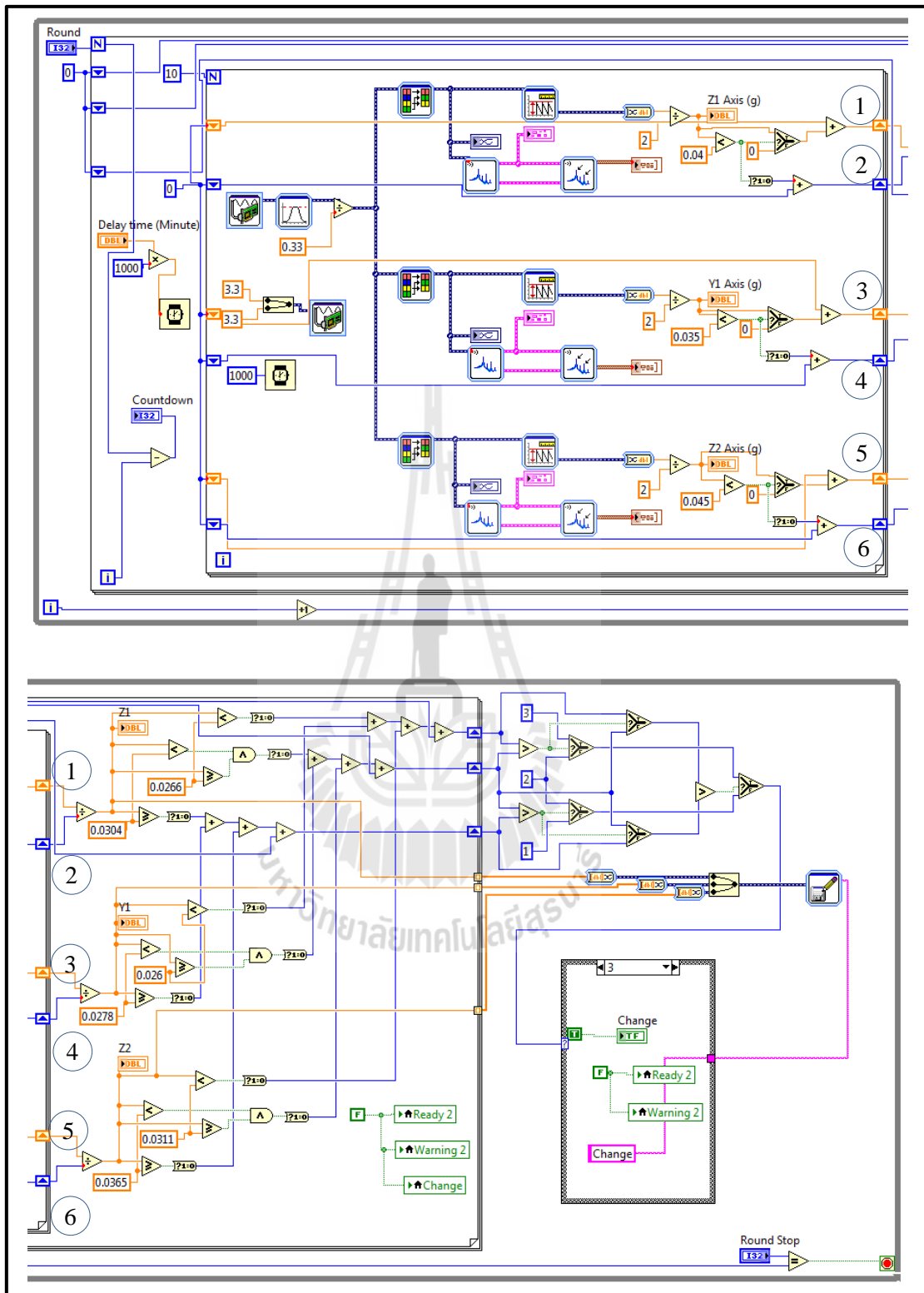
โปรแกรมในการบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของฉนวนรองรับการลั่น

### ค.1 เจ็อนไขการทำงานร่วมกับโปรแกรมแลบวิ

ในการทดลองหาขนาดการสั่น เพื่อสร้างเจ็อนไขในการบ่งชี้สภาพของฉนวนรองรับการสั่น ได้เลือกใช้โปรแกรมแลบวิกับชุด NI 6008 โดยหน้าต่างแสดงผล (Front panel) แสดงในรูปที่ ค.1 และหน้าต่างโปรแกรม (Block diagram) แสดงในรูปที่ ค.2 สำหรับหน้าต่างการทำงานจะมีการแสดงผลขนาดการสั่นทั้งที่เป็น ตัวเลข กราฟ และสเปคตรัม อีกทั้งยังแสดงผลเป็นดวงไฟสีต่าง ๆ เช่น สีเขียว แสดงสถานะพร้อมใช้งาน สีเหลือง แสดงสถานะเฝ้าระวัง และสีแดง แสดงสถานะเสื่อมสภาพ เป็นต้น



รูปที่ ค.1 แสดงหน้าต่างแสดงผล



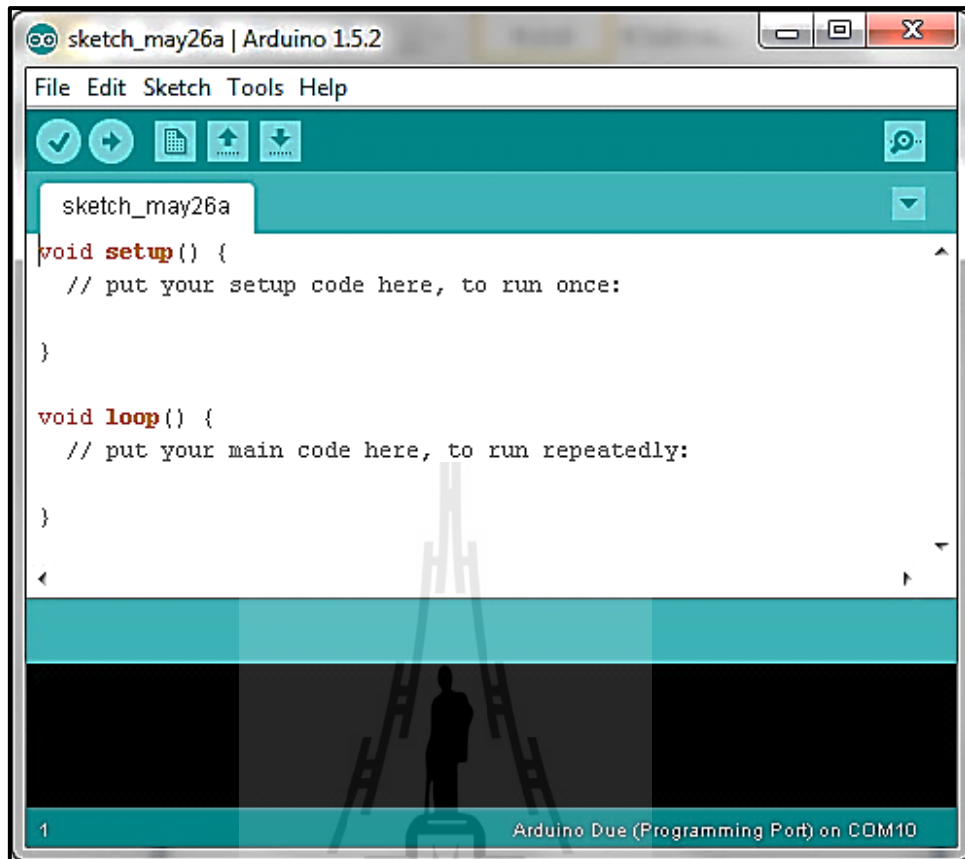
รูปที่ ค.2 แสดงหน้าต่างโปรแกรม

สำหรับหลักการการทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ ค.2 เมื่อรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์แล้ว สัญญาณจะถูกกรองความถี่ด้วยวิธีการกรองความถี่ผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่สาม จากนั้นแปลงค่าสัญญาณให้อยู่ในรูปของความเร่ง ต่อมาหาขนาดการสั่น โดยพิจารณาขนาดการสั่นสูงสุด (0 to peak) และมีการป้องกันขนาดการสั่นรอบกวนอื่น ๆ เช่น การกระแทก การรบกวนอื่น ๆ ที่ไม่ได้เกิดจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นต้น ในการนำขนาดการสั่นมาพิจารณาได้ทำการวนรอบรับค่าจำนวน 10 รอบและหาค่าเฉลี่ย แล้วจึงนำไปตรวจสอบเงื่อนไขการเสื่อมสภาพ โดยการวนซ้ำอีกจำนวน 5 รอบ ต่อมาพิจารณาว่า เมื่อครบจำนวน 5 รอบแล้วเงื่อนไขใดเกิดขึ้นมากที่สุด โดยให้แสดงผลเป็นดวงไฟและข้อความบอกสถานะ เช่น ถ้าขนาดการสั่นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกรณีของการเสื่อมสภาพ ดวงไฟสีแดงและข้อความ Failure จะปรากฏขึ้นในหน้าต่างการทำงาน เป็นต้น

## ค.2 เงื่อนไขการทำงานร่วมกับบอร์ด Arduino Due

ในการทดสอบอัลกอริทึม ได้เขียนโค้ดเป็นภาษาซีลงบน Arduino IDE เวอร์ชัน 1.5.2 ดังแสดงในรูปที่ ค.3 ซึ่ง Arduino IDE มีการทำงานอยู่ 2 ส่วนคือ

- void setup() คือการกำหนดค่าเริ่มต้น เช่น อัตราการเชื่อมต่อ (baud rate) การกำหนดความละเอียดในการแปลง ADC เป็นต้น
- void loop() คือการทำงานเป็นรอบของโปรแกรม เช่น การรับและส่งค่าสัญญาณ เป็นต้น



รูปที่ ค.3 Arduino IDE version 1.5.2

### ค.3 ตัวอย่างโปรแกรมภาษาซีที่ใช้เชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino Due

```

// ***** การกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้น *****
//Arrays size
const int arrSize = 500;// Sample size
const int avgSize = 10;// Average size
const int ReadSize = 1;// Delay to read average
// Arrays to save our results in
unsigned long start_times[arrSize];
unsigned long stop_times[arrSize];
float Z1_Val[arrSize];
  
```

```

float Y1_Val[arrSize];
float Z2_Val[arrSize];
float zero_G = 2048.0; // Set zero
float scale = 409.5; // Convert to g
float k=0.48; // Gain
float filtZ1[arrSize];
float filtY1[arrSize];
float filtZ2[arrSize];

// ***** การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับบอร์ด *****

void setup() {
  Serial.begin(57600); // อัตราการเชื่อมต่อกับบอร์ด
  analogReadResolution(12); //set ADC 12 bit
  eAnalogReference(EXTERNAL); //Set reference
  Serial.println("\n--- Initial Program ---");
  unsigned int i;

// ***** การกำหนดค่าเริ่มต้นให้ตัวแปร *****

  for(i=0;i<arrSize;i++) {
    start_times[i] = millis();
    delay(2); //Sampling Rate 500 Hz
    float Z1_value = analogRead(A0);
    float Y1_value = analogRead(A1);
    float Z2_value = analogRead(A2);
    Z1_Val[i] = (Z1_value-zero_G)/scale;
    Y1_Val[i] = (Y1_value-zero_G)/scale;
    Z2_Val[i] = (Z2_value-zero_G)/scale;
    stop_times[i] = millis();
  }
  Serial.println("\n--- OK. ---");

```



```

}

// *****การทำงานในส่วนของโปรแกรม*****

void loop() {
  Serial.println(" Z1\t Y1\t Z2");
  int u=0;
  int v=0;
  int w=0;
  unsigned int h;

  // ***** ค่าเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไข *****

  for(h=0;h<10;h++) {
    unsigned int j;
    int Z1index = 0;
    int Y1index = 0;
    int Z2index = 0;
    float SumZ1=0.0;
    float SumY1=0.0;
    float SumZ2=0.0;

    // ***** ค่าเฉลี่ยของขนาดการสั้น *****

    for(j=0;j<avgSize;j++) {
      unsigned int i;

      // ***** การอ่านค่าสัญญาณ *****

      for(i=0;i<arrSize;i++) {
        start_times[i] = millis();
        delay(2);//Sampling Rate 500 Hz
        float Z1_value = analogRead(A0);
        float Y1_value = analogRead(A1);

```

```

float Z2_value = analogRead(A2);
Z1_Val[i] = (Z1_value-zero_G)/scale;
Y1_Val[i] = (Y1_value-zero_G)/scale;
Z2_Val[i] = (Z2_value-zero_G)/scale;
stop_times[i] = millis();
}

// ***** Bandpass Filter 110 - 130 Hz *****
for(i=6;i<arrSize;i++) {
filtZ1[i] = k*((-1*Z1_Val[i-6]) + (0*Z1_Val[i-5]) + (3*Z1_Val[i-4]) + (0*Z1_Val[i-3])
+ (-3*Z1_Val[i-2]) + (0*Z1_Val[i-1]) + (1*Z1_Val[i-0])
+ (-0.6041096995*filtZ1[i-6]) + (0.2485750800*filtZ1[i-5])
+ (-2.1494674901*filtZ1[i-4]) + (0.5855951295*filtZ1[i-3])
+ (-2.5391145597*filtZ1[i-2]) + (0.3480045948*filtZ1[i-1]));
filtY1[i] = k*((-1*Y1_Val[i-6]) + (0*Y1_Val[i-5]) + (3*Y1_Val[i-4]) + (0*Y1_Val[i-3])
+ (-3*Y1_Val[i-2]) + (0*Y1_Val[i-1]) + (1*Y1_Val[i-0])
+ (-0.6041096995*filtY1[i-6]) + (0.2485750800*filtY1[i-5])
+ (-2.1494674901*filtY1[i-4]) + (0.5855951295*filtY1[i-3])
+ (-2.5391145597*filtY1[i-2]) + (0.3480045948*filtY1[i-1]));
filtZ2[i] = k*((-1*Z2_Val[i-6]) + (0*Z2_Val[i-5]) + (3*Z2_Val[i-4]) + (0*Z2_Val[i-3])
+ (-3*Z2_Val[i-2]) + (0*Z2_Val[i-1]) + (1*Z2_Val[i-0])
+ (-0.6041096995*filtZ2[i-6]) + (0.2485750800*filtZ2[i-5])
+ (-2.1494674901*filtZ2[i-4]) + (0.5855951295*filtZ2[i-3])
+ (-2.5391145597*filtZ2[i-2]) + (0.3480045948*filtZ2[i-1]));
}

// ***** การหาขนาดการสั่น *****
// Z axis of sensor 1
float Z1Max = filtZ1[getMaximumValue(filtZ1,arrSize)];
float Z1Min = filtZ1[getMinimumValue(filtZ1,arrSize)];

```

```

float zeroPk_Z1 = getDeltaValue(Z1Max,Z1Min);
// Y axis of sensor 1
float Y1Max = filtY1[getMaximumValue(filtY1,arrSize)];
float Y1Min = filtY1[getMinimumValue(filtY1,arrSize)];
float zeroPk_Y1 = getDeltaValue(Y1Max,Y1Min);
// Z axis of sensor 2
float Z2Max = filtZ2[getMaximumValue(filtZ2,arrSize)];
float Z2Min = filtZ2[getMinimumValue(filtZ2,arrSize)];
float zeroPk_Z2 = getDeltaValue(Z2Max,Z2Min);
//Check Amplitude Z1 axis
if(zeroPk_Z1 < .04){
    zeroPk_Z1=zeroPk_Z1;
    Z1index = Z1index+1;
}
else{
    zeroPk_Z1=0;
    Z1index = Z1index;
}
//Check Amplitude Y1 axis
if(zeroPk_Y1 < 0.045){
    zeroPk_Y1=zeroPk_Y1;
    Y1index = Y1index+1;
}
else{
    zeroPk_Y1=0;
    Y1index = Y1index;
}
//Check Amplitude Z2 axis
if(zeroPk_Z2 < .05){
    zeroPk_Z2=zeroPk_Z2;

```

```

    Z2index = Z2index+1;
}
else{
    zeroPk_Z2=0;
    Z2index = Z2index;
}
delay(ReadSize);
SumZ1=SumZ1+zeroPk_Z1;
SumY1=SumY1+zeroPk_Y1;
SumZ2=SumZ2+zeroPk_Z2;
}
// Averaging
float Z1 = SumZ1/Z1index;
float Y1 = SumY1/Y1index;
float Z2 = SumZ2/Z2index;

// *****การแสดงผล*****
Serial.print(Z1,4);
Serial.print("\t");
Serial.print(Y1,4);
Serial.print("\t");
Serial.println(Z2,4);

// *****เงื่อนไข *****
if(Z1>=0.03 || Y1>=0.03 || Z2>=0.04){
    u=u+1;
}
if((Z1>=0.027 && Z1<0.03) || (Y1>=0.027 && Y1<0.03) || (Z2>=0.029 && Z2<0.04)){
    v=v+1;
}
if(Z1<0.027 || Y1<0.027 || Z2<0.029){


```

```

    w=w+1;
}
}
if( u>v && u>w ){
    Serial.println("%%%%%%%%%");
    Serial.println("++Ready++");
    Serial.println("%%%%%%%%%");
} else if( v>u && v>w ){
    Serial.println("#####");
    Serial.println("++Warning++");
    Serial.println("#####");
}
else {
    Serial.println("&&&&&&&&&&&&&&&");
    Serial.println("++Failure++");
    Serial.println("&&&&&&&&&&&&&&&");
}
}
// Find maximum
int getMaximumValue(float* maxArray, int arrSize)
{
    int maxIndex = 0;
    float maxVal = maxArray[maxIndex];
    for (int i=1; i<arrSize; i++){
        if (maxVal<maxArray[i]){
            maxVal = maxArray[i];
            maxIndex = i;
        }
    }
    return maxIndex;
}

```

```
}  
  
// Find Minimum  
int getMinimumValue(float* minArray, int arrSize)  
{  
    int minIndex = 0;  
    float minVal = minArray[minIndex];  
  
    for (int i=1; i<arrSize; i++){  
        if (minVal>minArray[i]){  
            minVal = minArray[i];  
            minIndex = i;  
        }  
    }  
    return minIndex; }  
  
// Zero - Peak  
float getDeltaValue(float a, float b)  
{  
    float zeropeak = 0.05*(a-b);  
    return zeropeak;  
}
```

The watermark is a circular emblem for Suranaree University of Technology. It features a central figure of a person standing on a pedestal, flanked by two stylized figures. The emblem is surrounded by a gear-like border and the university's name in Thai script: "มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี".

## Vibration Analysis of Pocket Slot Using Finite Element Method

WINAI TUMTHONG<sup>1</sup>, PRASERTSIRI VARUNCHITTAPONGSA<sup>1</sup>, JIRAPHON SRISERTPOL<sup>1</sup>  
 and CHERMDHONGPRATTANARAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> System & Control Engineering Laboratory, School of Mechanical Engineering Institute of  
 Engineering Suranaree University of Technology NakhonRatchasima 30000, Thailand

jiraphon@sut.ac.th

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Phetchaburi Rajabhat University Institute of Engineering  
 Phetchaburi, Thailand

renonic9@hotmail.com

**Abstract.** This paper presents a study and an analysis of a pocket slot in hard disk drive testing process. The process is in general industries especially in hard disc drive testing process. The vibration occurred in the process lead to testing error and defection of hard disk drive. Also, a resonant of the product will happen. In the study, five natural frequencies and mode shapes of a pocket slot are computed using measuring technique. The measured values of natural frequencies and mode shapes are compared with the results from finite element method. The SolidWorks program is used in simulation process. The results of the article will have many benefits for hard disk drive testing process.

**Keywords:** Vibration analysis, Experimental design and Finite element method

### 1. Introduction

Automatic systems and testing processes are widely used in hard disk drive industries. The mechanical vibration analysis of a pocket slot used in hard disk drive packing has important effects during the testing process such as testing error and defection of hard disk drive. Therefore, the vibration problems have significant effect in hard disk drive testing process. In the vibration analysis process, an operating data of a testing machine will be record and analyze in real time. Consequently, the defection of hard disk drive can be eliminated. The vibration measuring equipment can be used in testing process because it has many advantages such as increase testing stability, enhance system reliability and reduce operating cost of maintenance. The hard disk drive testing machine having pocket slot and three isolator support is shown in Fig.1. The machine is implemented in a new hard disk drive testing process. All of products must be tested before end of production processes.

In 2006, Zhi-Liang Zhang et al.[1] represented to natural frequencies and mode shapes for axisymmetric vibrations of shells in turning-point range, in which the most basic nature is the coupling of bending and membrane solutions for frequencies and modes. Present, Analytical solutions are useful either in the form of a primary solution or as a means of supplementing results determined using the finite element method (FEM). X.H. Wang et al.[2] determined natural frequencies and mode shapes of an orthotropic thin shell of revolution by the differential quadrature method (DQM). And comparison result with the finite element method (FEM). Clarence W. et al.[3] had analyzed the natural frequency of vibration in parts of a shaker by a method of Experimental Modal Analysis (EMA). The results were displayed in both time and frequency domains. Song Han et al.[4] presented to algorithm for rapid estimating mode shape and checking the corresponding mode for inter-area oscillation (IAO) using correlation analysis (CA) technique which used to

determine the IAO mode shape for tie-line power deviation or equivalent speed deviation. The algorithm is efficient and effective. Christof Devriendt et al.[5] introduced to a new post-processing method based on transmissibility measurements is introduced that allows the estimation of the modal parameters and in particular the unscaled mode shapes. Jiraphon Srisertpol et al. [6], [7] had analyzed the vibration of transfer module that effects to Head Gimbal Assembly(HGA) base on operating Walter D. Pilkey and Sergev V.Purtsezov [8] to present finding of the appropriate variables to get a shock isolator to control the mechanical properties.

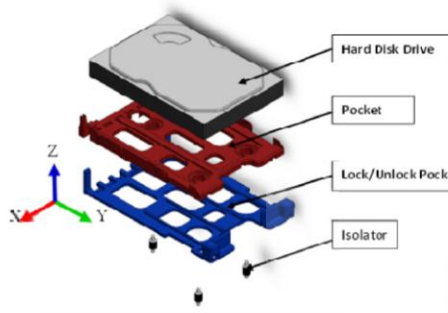


Fig. 1 Pocket slot in test process

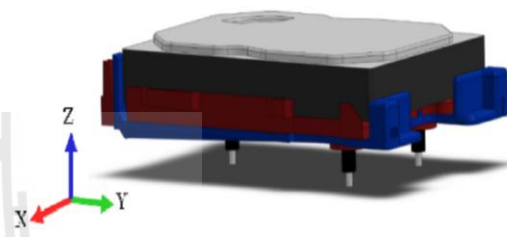


Fig. 2 Pocket slot assembly

This paper demonstrates the analysis of pocket slot vibration. The five values of natural frequencies and mode shapes will be computed using finite element method in solidworks simulation program. The results are compared with measured values from measuring process. Fig.2

## 2. RESEARCH PROCEDURE

The study and analysis of pocket slot vibration in hard disk drive testing process is shown in Fig 2. The five values of natural frequencies and mode shapes will be computed using finite element method in solidworks simulation program. The results are compared with measured values from measuring process. In the testing process, a vibration shaker is used to generate single frequency force as  $y(t) = 0.10 \sin t$  mm. The natural frequencies of each part of pocket slot will be calculated. Subsequently, change the force frequency for searching other natural frequencies and amplitude of them. The measured results will consider both in time domain and frequency domain. For the mechanical properties derived from the experiment Shown in table 1

Table 1. Material Property

• Material property	• Value	• Unit
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mass Density</li> <li>- Hard disk drive</li> <li>- Pocket</li> <li>- Lock/Unlock Pocket</li> <li>- Isolator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confidential</li> <li>• 0.0712</li> <li>• 0.0765</li> <li>• 0.0011</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kg</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stiffness of isolator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 43000 - 45000</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N/m</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Damped of isolator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 - 5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N*s/m</li> </ul>

In the 4 components of pocket slot such hard disk drive, pocket, lock/unlock pocket and isolator shown in Fig. 1. Basically the configuration shown in table 2. Material of each part interest only mass and setting part to rigid body exclude isolator. The isolator replace spring/damper (from experiment).



Table 2. Configuration of the Solidworks Simulation program

• Simulation Settings	• Step 1	• Step 2	• Step 3
• Option	• Number of frequencies • - 5 mode	• Incompatible bonding option • - Automatic	• Solver • - Direct sparse
• Connection	• Spring	•	•
• Fixture	• Fixed geometry	•	•
• Mesh	• Standard mesh • - Node 70933 • - Element 42672	•	•

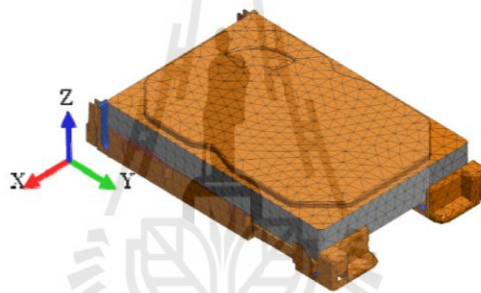


Fig. 3 Element of Hard Disk Drive testing

## 2.1 TESTING EQUIPMENT AND MEASURING ELEMENT

In the experimental procedure, there are three main instruments. Firstly, the Dynamic Signal Analyzer used as measuring equipment is shown Fig 4. The equipment is the product of Agilent Technologies (model 35670A). Secondly, a triaxial accelerometer (Kistler's model 8792A) is acceleration sensor. Finally, shaker model M1200w used for input generation. The Fig. 5 and Fig. 6 is accelerometer and vibration shaker respectively.

## 3. SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

The results of vibration study and analysis in five modes of equipment are shown in Table.3 and 4. The measures natural frequencies are compared with simulation results both amplitude and frequency mode by mode. During testing process, the shaker will generate the vibration displacement along z axis. It has the frequency range from 30 to 110 Hz. The result show that the amplitude of vibration will increase. The resonances occur when the forced frequency and system natural frequency is equal. Therefore, the effect of this behavior leads to defection of hard disk drive productions.



Fig.4 Dynamic Signal Analyzer



Fig. 5 Accelerometer



Fig. 6 Vibration Shaker

Table 3. Natural frequencies

• Mode	• Measurement • (Hz)	• Solidworks Simulation • (Hz)	• Description	• Figure
• 1	• 40	• 43.3	• Bending about Y axis	• 8
• 2	• 54	• 53.0	• Bending about X axis	• 9
• 3	• 62	• 60.1	• Torsional about Z axis	• 10
• 4	• 78	• 72.8	• Translation in Z axis	• 11
• 5	• 99	• 92.1	• Bending about Y axis	• 12

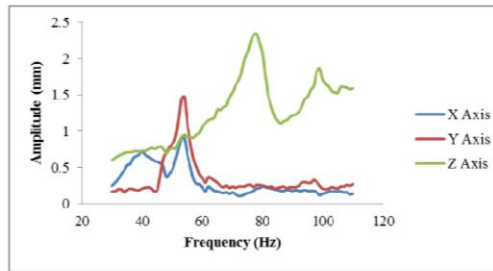


Fig. 7 Amplitude of natural frequencies

Table 4. Amplitude of five mode shape

• Frequency • (Hz)	• Amplitude ( mm )		
	• X Axis	• Y Axis	• Z Axis
• 40	• 0.73	• 0.21	• 0.73
• 54	• 0.90	• 1.47	• 0.95
• 62	• 0.24	• 0.37	• 1.15
• 78	• 0.21	• 0.26	• 2.34
• 99	• 0.12	• 0.25	• 1.86

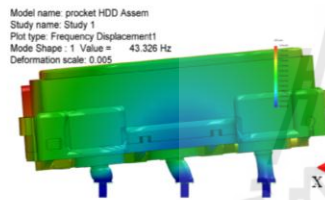


Fig. 8 The 1<sup>st</sup> mode



Fig. 9 The 2<sup>nd</sup> mode

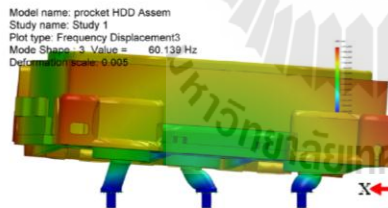


Fig. 10 The 3<sup>rd</sup> mode

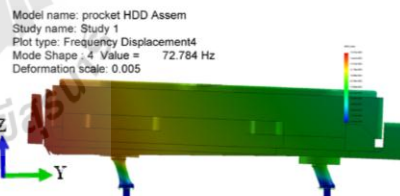


Fig. 11 The 4<sup>th</sup> mode

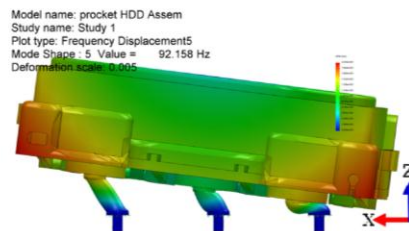


Fig. 12 The 5<sup>th</sup> mode

Table 5. Natural frequencies and corresponding mode shapes.

• Mode	• SolidWorks Simulation(Hz)	• Description	• Figure
• 1	• 43.3	• Bending about Y axis	• 8
• 2	• 53.0	• Bending about X axis	• 9
• 3	• 60.1	• Torsional about Z axis	• 10
• 4	• 72.8	• Translation in Z axis	• 11
• 5	• 92.1	• Bending about Y axis	• 12

#### 4. Summaries

The results of vibration analysis of five mode vibration both natural frequency and mode shapes show the value of fundamental natural frequencies and mode shapes. The range of natural frequency of pocket slot is from 40 Hz to 105 Hz. There are five modes of natural frequency and mode shapes that are the value from 40 Hz to 101 Hz. The measured results from measuring technique and the simulation results from simulation program (using finite element method) have the same trend. Therefore, the study and analysis of vibration of pocket slot in hard disk drive testing process using finite element method can be used to detect the natural frequencies and mode shape of pocket slot. Moreover, the results lead to analyze and solve the vibration problems in the testing process.

#### 4. Acknowledgment

This project is financially supported by the Industry/ University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, the Faculty of Engineering, Khon Kaen University and National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency.

#### 5. References

- [1] Zhi-Liang Zhang; Chang-Jun Cheng. Natural frequencies and mode shapes for axisymmetric vibrations of shells in turning-point range, *International Journal of Solids and Structures* 43, 2006, pp.5525-5540.
- [2] X.H. Wang; D. Redekop. Natural frequencies and mode shapes of an orthotropic thin shell of revolution, *Thin-Walled Structures* 43, 2005, pp.735-750.
- [3] DeSilva, C.W; Palusamy, S.S. Experimental Modal Analysis A modeling and design tool, *Mechanical Engineering, ASME*, vol.106(6), pp.56-65.
- [4] Song Han.;ZhengXu; Cheng Wu. Mode shape estimation and mode checking for IAO using correlation analysis technique, *Electric Power Systems Research* 81,2011,pp. 1181–1187.
- [5] ChristofDevriendt; Gunther Steenackers; Gert De Sitter; Patrick Guillaume.From operating deflection shapes towards mode shapes using transmissibility measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, 2010, pp.665–677.
- [6] JiraphonSrisertpol; SomjaiSoonthornsakul. Vibration Analysis of Transfer Module Effects to Head Gimbal Assembly(HGA) Base on Operating Situation, in *Proceedings of the Industrial Engineering Network Conference 2009*, 21-22 October 2009, KhonKaen, Thailand, pp.1556-1561.
- [7] JiraphonSrisertpol; SumeteeTheesungnern; AdisolBoonmag.Testing of a Miniature Shock Absorber Base on Operating Situation to Obtain Its Parameters, in *Proceedings of the Industrial Engineering Network Conference 2008*, pp.921-926.
- [8] Walter D.Pilkey; SergevV.Purtsezov. Optimization of parameters of shock isolator with preview control, in *Proceeding of International Conference Physics and Control*, St.Petersburg, Russia, August 24-26, 2005, pp.330-334.
- [9] Singiresu S. Rao.(2007). *Vibration of Continuous Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey.

รหัสบทความ

CST 2028

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

## รูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงานของปล่องลมระบายความร้อน Operational Deflection Shapes (ODS) of Stack Cooling

วินัย ตุ่มทอง<sup>1\*</sup>, จิระพล ศรีเสริญผล<sup>1</sup>, สุวัฒน์ กล้าเกิดผล<sup>2</sup> และ เสกสรรค์ ไชยภักดี<sup>3</sup><sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000<sup>2</sup> สถาบันไทย – เยอรมัน 700/1 หมู่ 1 นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร ถ.บางนา-ตราด กม. 57 ต.คลองตำหรุ อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000<sup>3</sup> BLISS SERVICE (THAILAND) CO., LTD อาคารฟอร์จูน ชั้น 26 โซนบี 1, ยูนิท #02, 1 ถนนรัชดาภิเษก ดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400

\*ติดต่อ: E-mail: all\_on\_one@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 087-2556750, เบอร์โทรสาร: 0-4422-4163

### บทคัดย่อ

การหาความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์หรือเทคนิคทางโมดอล เป็นการวิเคราะห์ ออกแบบโครงสร้าง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัววัดความเร่งจำนวนมากเพื่อวัดค่าในตำแหน่งที่สนใจและแสดงการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการหารูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงาน ในการวิเคราะห์การสั่นและแสดงรูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่ในขณะปฏิบัติงาน โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับข้อมูลจากการวัดที่ใช้ตัววัดความเร่งเพียง 4 ตัวเท่านั้น

**คำหลัก:** การวิเคราะห์การสั่น, รูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงาน, ปล่องลมระบายความร้อน

### Abstract

The natural frequency and mode shape of the large structural using Finite Element Method or Modal technique is to analysis, design structure which is necessary to more accelerometer for measurement at interested position and indicating the movement of structure. This paper presents an Operational Deflection Shapes (ODS) technique to analysis and demonstrating the mode shape of large stack cooling in operating speed using finite element analysis with measurement data only 4 accelerometers.

**Keywords:** Vibration Analysis, Operational Deflection Shape (ODS), Stack Cooling

### 1. บทนำ

โดยส่วนใหญ่ปัญหาการสั่นของโครงสร้างเกิดจากความถี่ของแรงกระทำจากภายนอกตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทำให้เกิดการสั่นพ้อง การวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดการสั่นเป็นสิ่งสำคัญต่อการวิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างเพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นพ้อง โดยทั่วไปการวิเคราะห์เพื่อหารูปร่างการสั่น มี 2 วิธี คือ

การทดสอบแบบโมดอล (Modal testing) เป็นเทคนิคในการหาคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และรูปร่างโหมดการสั่น (Mode shape) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางธรรมชาติของโครงสร้างและจะไม่เปลี่ยนแปลงจนกว่า

คุณสมบัติทางกายภาพ (มวล, ค่าความแข็งของสปริง และค่าความหน่วง) หรือเงื่อนไขขอบเขตมีการเปลี่ยนแปลง รูปร่างโหมดการสั่นเป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของตำแหน่งบนโครงสร้างที่ความถี่ที่เราสนใจ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเบื้องต้น เมื่อนำโครงสร้างนั้นไปประกอบกับส่วนอื่นๆ เช่น พัดลม มอเตอร์ เป็นต้น ลักษณะการสั่นที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากการออกแบบเบื้องต้น เพราะมีแรงที่กระทำจากภายนอก และการประกอบโครงสร้างเข้ากับเครื่องจักรทำให้เงื่อนไขขอบเขตเปลี่ยนแปลง ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการหารูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงาน (Operational Deflection Shapes, ODS) การหารูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงานเป็น



## รหัสบทความ

CST 2028

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



การหารูปร่างการสั่น โดยการวัดค่าการสั่นที่สถานะคงตัว หรือที่ความเร็วรอบใช้งาน (Operating speed) ทำให้ ทรารูปร่างการสั่นขณะปฏิบัติงานที่เป็นปัญหาการสั่นที่ เกิดขึ้นในขณะนั้นได้ การประยุกต์ใช้เทคนิคการหารูปร่าง การสั่นขณะปฏิบัติงานในการวิเคราะห์การสั่นและแสดง รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่ ในขณะปฏิบัติงาน โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับ ข้อมูลจากการวัด ปล่องลมระบายความร้อน คือ โครงสร้างของปล่องลมที่อยู่บนหอคอยทำความเย็น (Cooling tower) ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะใช้หอคอยทำความเย็นแบบอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะติดตั้งปล่องลมระบายความร้อนหลายตัวบน โครงสร้างเดียวกัน ซึ่งในโรงงานที่ได้เข้าไปทดลองมีปล่อง ลมระบายความร้อนทั้งหมด 8 ตัว เรียงตามตัวอักษร A - H ปัญหาที่พบคือ การสั่นอย่างรุนแรงของปล่องลมระบาย ความร้อนตัวที่ C และตัวที่ H เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุม องศาของใบพัด เพื่อให้เป็นการประหยัดพลังงานและได้ กำลังการผลิตสูงสุด

ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้เทคนิคการหารูปร่าง การสั่นขณะปฏิบัติงาน ได้มีบทความงานวิจัยที่ศึกษาและ วิเคราะห์รูปร่างการสั่น โดย Tony DeMatteo [1] ได้นำเสนอการแก้ปัญหาเรโซแนนซ์ของปั๊มแนวแกนตั้ง (Vertical pump case history) ด้วยเทคนิค ในการหา แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน (Source of vibration) และแก้ปัญหาด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ B. Schwarz[2] ได้นำเสนอ “ความต้องการการวัดสำหรับการ แสดงผล ODS” โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น Transmissibility, Auto spectrum, and Cross spectrum เพื่อยืนยันขนาดการสั่นและมุมเฟสของการ แสดงผลของ ODS นั้นเป็นการเคลื่อนที่ที่ผิวอาจอยู่ในรูป ของการกระจัด ความเร็วหรือความเร่งก็ได้ Surendra N.[3-4] ได้นำเสนอการใช้ ODS ในการตรวจสอบ Misalignment และ Unbalance ในอุปกรณ์หมุน โดย ใช้ค่า MAC (Modal Assurance Criterion) เป็น ตัวกำหนด ค่า MAC มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ถ้าค่า มากกว่า 0.9 แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และถ้าน้อย กว่า 0.9 แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลง

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การหารูปร่างการสั่นด้วยเทคนิคการหารูปร่างการสั่น ขณะปฏิบัติงาน (ODS) มีขั้นตอนดังนี้

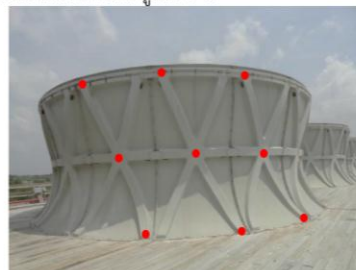
### 2.1. ข้อมูลเบื้องต้นของปล่องลมระบายความร้อน

- โครงสร้างฐานทั้งหมดทำมาจากไม้
- ตัวปล่องลมระบายความร้อนทำมาจากวัสดุผสม มี ทั้งหมด 16 แผ่นประกอบกัน โดยยึดด้วยสกรู และมียาง กันระหว่างกลาง เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายปล่อง 11 เมตร และที่ตรงกลางปล่องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เมตร สูง 4.19 เมตร ยึดกับโครงสร้างฐานด้วยสกรู
- พัดลมติดตั้งตรงกลางของปล่อง และมีใบพัด จำนวน 8 ใบ
- ความเร็วรอบพัดลม 2 Hz โดยประมาณ
- มอเตอร์อยู่ด้านนอกต่อผ่านเฟลาและลทรอบของ มอเตอร์ ด้วยอัตราทดเกียร์ 12.93:1
- ความเร็วรอบมอเตอร์ 25 Hz โดยประมาณ
- ความถี่ผ่านของใบพัด (Blade Pass Frequency, BPF) 15 Hz โดยประมาณ

### 2.2. สร้างแบบจำลองของปล่องลมระบายความร้อน

ในการหารูปร่างการสั่นสะเทือนด้วยวิธี ODS จำเป็นต้องมีแบบจำลอง เพราะ ODS สามารถแสดง รูปร่างการสั่นที่เกิดขึ้นเป็นภาพเคลื่อนไหวได้ โดยใช้ ร่วมกับโปรแกรม ME'scope VES

สำหรับบทความนี้ได้สร้างแบบจำลองโดยใช้ โปรแกรม Solidworks และบันทึกไฟล์เป็นชนิด \*.STL เราจำเป็นต้องกำหนดจุดที่เป็นตำแหน่งการวัดก่อนแล้ว จึงสร้างเอลิเมนต์ โปรแกรมจะสร้างเอลิเมนต์ที่เป็นรูป สามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 1-2

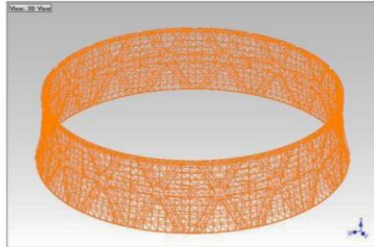


รูปที่ 1 ปล่องลมระบายความร้อนและตำแหน่งการวัด \* จุดสีแดง แสดงตำแหน่งในการติดตามเซนเซอร์

## รหัสบทความ

### CST 2028

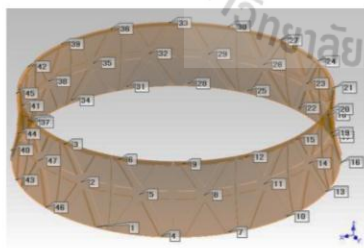
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2 แบบจำลองของปล่องลมระบายความร้อนในโปรแกรม ME'scope VES

#### 2.3. การวัดการสั่น

ในการแสดงผลของ ODS จะแสดงขนาดการสั่นและมุมเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดจุดวัดทั้งหมด 48 จุด เนื่องจากตัวปล่องลมระบายความร้อนมีขนาดใหญ่และทำมาจากวัสดุผสมไม่สามารถติดกับตัววัดความเร่งที่มีหัวติดแบบแม่เหล็กได้ จึงต้องใช้แหวนรองติดกับกาวอีพ็อกซี ซึ่งทำให้เสียเวลาในการเก็บข้อมูล ในการเก็บข้อมูลเราใช้ตัววัดความเร่งทั้งหมด 4 ตัว โดยตัววัดความเร่งหนึ่งตัวจะวัดที่ตำแหน่งที่ 2 และกำหนดตำแหน่งนี้เป็นจุดอ้างอิงของการเก็บข้อมูลทั้งหมด ดังนั้นจะติดตัววัดความเร่งไว้ที่ตำแหน่งนี้ตลอดเวลา ส่วนตัววัดความเร่ง อีก 3 ตัวที่เคลื่อนย้ายไปตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการวัดจะวัดครั้งละ 3 จุดพร้อมกัน ทำการวัดค่าในแนวรัศมีของปล่องลมระบายความร้อน



รูปที่ 3 กำหนดจุดวัดให้กับแบบจำลอง

#### 2.4. การกำหนดค่าการเก็บข้อมูล

ในการวิเคราะห์การสั่นของปล่องลมระบายความร้อนเราสนใจในช่วงความถี่ 0 – 50 Hz ดังนั้นการเก็บค่าที่วัด เราได้ใช้โปรแกรม eZ-analyze ของ Dynamic Signal Analyzers IO tech โดยมีกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

- Analysis Frequency : 100 Hz
- Spectral lines : 400
- Nyquist Factor : 2.56
- Averaging : Linear(+) ,30 average

#### 2.4. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เทคนิคการหารูปการสั่นในขณะปฏิบัติงานจะใช้ Dynamic Signal Analyzers IO tech 655u ขนาด 10 ช่องสัญญาณเป็นอุปกรณ์ในการเก็บค่าการสั่นที่วัดได้จากตัววัดความเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 IO tech 655u

อุปกรณ์ตัววัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) ของบริษัท CSI รุ่น A0760GP จำนวน 4 ตัว โดยตัวจับยึดเป็นชนิดแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุปกรณ์ตัววัดความเร่ง รุ่น A0760GP

#### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

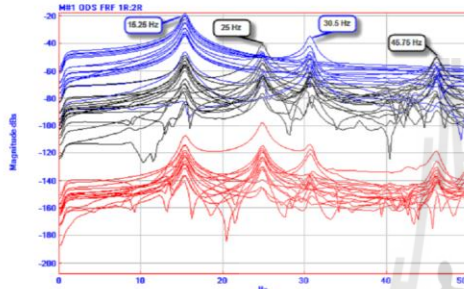
ในการทดลองได้ทำการวัดค่าความเร่งของปล่องลมระบายความร้อนทั้งหมด 3 ตัว คือ ตัวที่ C และ ตัวที่ H (เกิดการสั่นรุนแรง) ตัวที่ B (ไม่เกิดการสั่น) จากผลการวัดที่ได้นำมาแสดงผลในรูปของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function, FRF) ในช่วงความถี่ 0-50 Hz พบว่า ตัวที่ C และตัวที่ H มีขนาดการสั่นที่มากที่สุดที่ความถี่ตรงกับความถี่ของมอเตอร์พัดลมและความถี่ผ่านของใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 6 – 7 ในส่วนของตัวที่ B พบความถี่ในตำแหน่งเดียวกันแต่มีขนาดการสั่นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวที่ C และตัวที่ H ดังแสดง

รหัสบทความ  
CST 2028

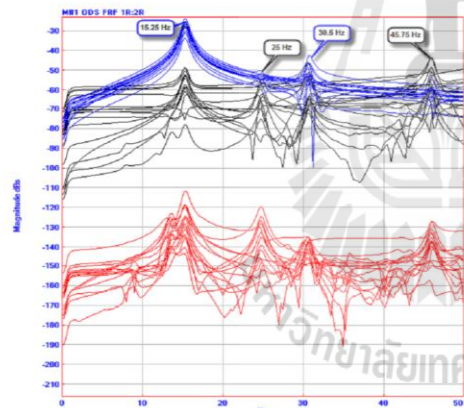
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



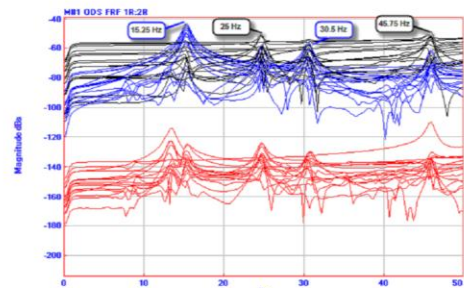
ในรูปที่ 8 โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงขนาดการสั่นของจุดวัดที่ขอบบนของปล่องลมระบายความร้อน เส้นสีดำแสดงขนาดการสั่นของจุดวัดที่ตรงกลางของปล่องลมระบายความร้อน และเส้นสีแดงแสดงขนาดการสั่นของจุดวัดที่ฐานของปล่องลมระบายความร้อน จากกราฟจะเห็นว่าการสั่นที่ขอบบนของปล่องจะมีการสั่นมากกว่าที่ฐาน



รูปที่ 6 FRFของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ H



รูปที่ 7 FRF ของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ C



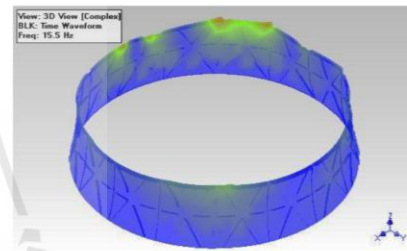
รูปที่ 8 FRF ของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ B ผลการวัดการสั่นของมอเตอร์พัดลมในขณะที่ปฏิบัติงานที่ 25 Hz ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดการสั่นของมอเตอร์ที่ความถี่ใช้งาน

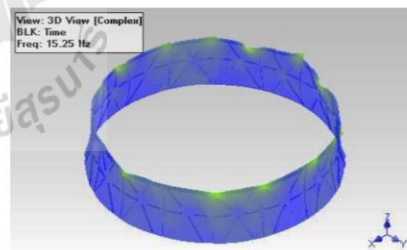
Stack	Direction	Frequency (Hz)	Amplitude (g RMS)
C	H	25	0.0862
	V	25	0.0608
H	H	25	0.1389
	V	25	0.0965

\*หมายเหตุ H=Horizontal, V=Vertical

เมื่อนำข้อมูลที่ความถี่ผ่านของไบพาส (BPF) มาแสดงร่วมกับโปรแกรม ME'scope VES เราจะได้รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ C และ H ที่ความถี่ 15 โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 9 -10 และเมื่อพิจารณาความถี่เดียวกับมอเตอร์ที่ 25 Hz โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 11 - 12



รูปที่ 9 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ H ที่ f= 15.5 Hz



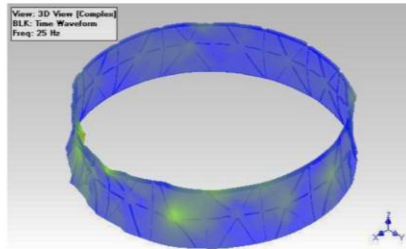
รูปที่ 10 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ C ที่ f= 15.25 Hz



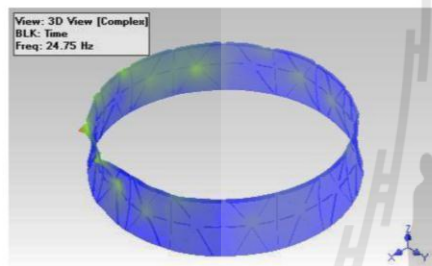
## รหัสบทความ

CST 2028

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 11 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ H ที่  $f=25$  Hz



รูปที่ 12 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ C ที่  $f=24.75$  Hz

### 4. สรุปผล

ผลการทดลองวัดและวิเคราะห์โดยวิธี ODS ได้แสดงรูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนที่ตัว C และ H ที่เกิดขึ้น ซึ่งเราพบว่า การสั่นที่มีขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นที่ความถี่ผ่านไบพัต (BPF) ที่ 15 Hz และฮาร์โมนิกส์ของความถี่ผ่านไบพัตที่ 30 Hz และ 45 Hz โดยประมาณ และที่ความถี่เดียวกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 25 Hz โดยประมาณ โดยรูปร่างการสั่นที่ทราบนั้น สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการแก้ไขโครงสร้าง จุดจับยึด หรือลดการสั่นจากแหล่งกำเนิดของแรงที่กระทำของไบพัต และมอเตอร์ ต่อไปได้ เทคนิควิธี ODS เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นของโครงสร้างขนาดใหญ่ขณะปฏิบัติงานได้ โดยใช้ตัววัดความเร่งเพียง 4 ตัวเท่านั้น

### 5. ข้อเสนอแนะ

ในการวิเคราะห์การสั่นของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ นั้น การกำหนดจุดวัด และการติดตั้งระยะห่างระหว่างตัววัดความเร่งส่งผลต่อรูปร่างการสั่นที่ได้ และการแก้ปัญหาการสั่นนั้น ควรจะค้นหาและลดการสั่นของแหล่งกำเนิดการสั่นที่กระทำต่อโครงสร้างด้วย

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (I/U CRC) ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] DeMatteo, T. (2001), Operational Deflection Shape and Modal Analysis Testing To Solve Resonance Problems, ODS & Modal, CSI RBM University 2001.
- [2] Schwarz, B. and Richardson, M.H.(2004). Measurements Required for Displaying Operating Deflection Shapes, Proceedings of IMAC XXII, January 26, 2004.
- [3] Surendra, N. G, Li Zhuang, and Richardson, M.H.(2008). Using Operating Deflection Shapes to Detect Shaft Misalignment in Rotating Equipment, Proceedings of International Modal Analysis Conference (IMAC XXVI), February, 2008.
- [4] Surendra, N. G, Schwarz, B. and Richardson, M.H.(2009). Using Operating Deflection Shapes to Detect Unbalance in Rotating Equipment, Proceedings of International Modal Analysis Conference (IMAC XXVII), February, 2009.
- [5] Schwarz, B. and Richardson, M.H.(1999), Experiment Modal Analysis, Proceedings of CSI Reliability Week, October, 1999.
- [6] Richardson, M.H.(1997), Is It a Mode Shape or an Operating Deflection Shape?, Sound and Vibration magazine, March, 1997.
- [7] Daniel J. Inman (2008). *Engineering Vibrations*, 3<sup>rd</sup> edition, Pearson International Edition.
- [8] Singiresu S. (2004). *Mechanical Vibrations*, SI edition, Pearson Prentice Hall.

## ประวัติผู้เขียน

นายวินัย ตุ่มทอง เกิดเมื่อวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านหนองบัว จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสีคิ้ว “สวัสดิ์ผดุงวิทยา” จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมยานยนต์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และในปีเดียวกันได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม ในขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 4 รายวิชาดังนี้ (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3 (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3 (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 3 และ (4) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 อีกทั้งยังมีประสบการณ์ในการทำงานที่สถาบันไทย-เยอรมัน โดยทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิศวกร ดูแลงานด้านการวิเคราะห์การสั่นของโรงงานต่าง ๆ และยังมีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก.

