


การวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกจากสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



นางสาววัชรีย์ ภูรีเลิศวานิชย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชามাত্রวิทยา


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENT OF ACOUSTIC EMISSION FROM SPINDLE MOTOR  
USED IN HARD-DISK DRIVE

Miss Wacharee Pooreelerswanich



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University



วัชรวิ ภาวฤทธิศาสตร์ : การวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกจากสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. (MEASUREMENT OF ACOUSTIC EMISSION FROM SPINDLE MOTOR USED IN HARD-DISK DRIVE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ต้นพงศ์ แก้วคงคา, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. รัชชาติ มงคลนาวิน จำนวน 77 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก (Acoustic emission measurement) ที่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในสภาวะผิดปกติ นั่นคือสภาวะไม่สมดุล (Unbalance) ทั้งนี้เนื่องจากการหมุนของแกนสปินเดิลมอเตอร์ที่ไม่สมดุล ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการสั่นผัดกันหรือการเสียดสีของพลาสติกของส่วนประกอบต่างๆภายในสปินเดิลมอเตอร์ และลักษณะดังกล่าวล้วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดคลื่นอะคูสติกออกมา การวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกเป็นวิธีที่มีความไวในการตรวจจับสัญญาณสูง และสามารถแสดงภาพเวลาจริง ที่สำคัญยังเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายอีกด้วย ในการทดลองนี้จะใช้หัวตรวจจับสัญญาณที่มาจากสารเพียโรอิเล็กทริก ที่สามารถตรวจจับการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกที่มีความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 1.2 MHz โดยทำการขยายสัญญาณโดยตัวขยายสัญญาณ และส่งต่อไปยังขั้นตอนของการประมวลผลสัญญาณ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของสัญญาณอะคูสติกอันได้แก่ แอมพลิจูด และ อาร์เอ็มเอสของสัญญาณบนโดเมนเวลา และค่าเฟาเวอร์แมกนิจูดของสัญญาณบนโดเมนความถี่ งานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการทดลองหักใส่ดินสอบนสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอะคูสติก สามารถส่งผ่านมายังหัววัดสัญญาณ นั่นคือเราสามารถวัดสัญญาณอะคูสติกที่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์ได้ และได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณอะคูสติก กับสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะสมดุล และสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะไม่สมดุล ซึ่งค่าพารามิเตอร์ แอมพลิจูด, อาร์เอ็มเอส และเฟาเวอร์แมกนิจูดของสปินเดิลมอเตอร์สภาวะไม่สมดุลโดยมวลถ่วงจะมีค่ามากกว่าสปินเดิลมอเตอร์สภาวะสมดุล และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความไม่สมดุลโดยมวลถ่วงมีค่าสูงขึ้น

ภาควิชา.....มาตริวิทยา...

สาขาวิชา.....มาตริวิทยา...

ปีการศึกษา...2550.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*ศรัณี ภาวฤทธิศาสตร์*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ต้นพงศ์ แก้วคงคา*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*รัชชาติ มงคลนาวิน*.....



# # 4772465823 : MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KEY WORD: ACOUSTIC EMISSION / HARDDISK / SPINDLE MOTOR

WACHAREE POOREELERSWANICH: MEASUREMENT OF ACOUSTIC EMISSION FROM SPINDLE MOTOR USED IN HARD-DISK DRIVE. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. TONPHONG KAEWKONGKA, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASST.PROF. RATTACHART MONGKONNAWIN, Ph.D., 77 pp.

This research presents measurement of acoustic emission (AE) from spindle motor in hard-disk drive to monitor abnormal rotating condition. An unbalance of spindle motor rotation can cause the improper contact and plastic deformation of components inside spindle motor which sources of acoustic emission. The acoustic emission is an early detection with high sensitivity and can be performed in real-time as a non-destructive testing. In the experiment, piezoelectric transducer is used for AE detection with the frequency range between 100 kHz – 1.2 MHz. The captured AE signals from transducer is filtered and amplified by the pre-amplifier. The pre-amplified signals are then processed to obtain correlation between physical conditions of spindle motor in hard-disk and AE signals. The time-domain signal parameters are Amplitude and AE RMS were obtained. In frequency-domain, the Power magnitude can be calculated from the raw time-domain signals. The experiments show that the propagation of AE signals from the AE artificial source, pencil lead break, can be achieved using proposed method. The experimental results also show that the AE can be used to indicate different spindle motor operating condition using Amplitude, AE RMS and Power magnitude with the promising result.

Department...Metrological Science.... Student's signature... *วชิระ ปอเปลื้องวานิช*.....  
 Field of study.. Metrological Science... Advisor's signature... *[Signature]*.....  
 Academic year .....2007..... Co-advisor's signature... *[Signature]*.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งได้รับคำแนะนำและความรู้ รวมทั้งความคิดเห็นต่างๆ แนวคิดในการทำงานวิจัย รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองและการตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ ที่ให้คำแนะนำและความคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาวิชามาตรวิทยา และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาสำหรับการทำวิจัย ได้แก่บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่สำคัญขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือคุณพ่อและคุณแม่ ที่เป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการศึกษาครั้งนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก.....</b>	<b>3</b>
2.1 การเกิดสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์.....	3
2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก	
2.2.1 แหล่งกำเนิดระดับจุลภาค.....	5
2.2.2 แหล่งกำเนิดระดับมหภาค.....	5
2.3 การทดสอบ AE.....	5
2.4 วิธีการวัด AE	
2.4.1 อุปกรณ์แปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า.....	7
2.4.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมิ.....	10
2.4.3 อุปกรณ์กรองสัญญาณ.....	11
2.4.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ.....	11
2.5 ลักษณะเฉพาะของสัญญาณ.....	11
2.6 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์.....	19

<b>บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>20</b>
3.1 ฮาร์ดดิסק	
3.1.1 หน้าที่ของฮาร์ดดิस्क.....	20
3.1.2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิस्क.....	21
3.2 สปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิस्क	
3.2.1 หน้าที่ของสปินเดิลมอเตอร์.....	24
3.2.2 ส่วนประกอบของสปินเดิลมอเตอร์.....	26
3.3 การทดสอบด้วยวิธีการสั้นสะเทือน	
3.3.1 ประเภทของการสั้นสะเทือน.....	28
3.3.2 การวิเคราะห์การสั้นสะเทือน.....	28
3.3.3 ชนิดของสัญญาณการสั้นสะเทือน.....	29
3.3.4 หน่วยวัดขนาดสัญญาณการสั้นสะเทือน.....	32
3.3.5 เครื่องมือวัดการสั้นสะเทือน.....	34
<b>บทที่ 4 การตรวจจับคลื่นอะคูสติกที่ปลดปล่อยจากสปินเดิลมอเตอร์.....</b>	<b>36</b>
4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	36
4.2 พารามิเตอร์ของสัญญาณ.....	40
<b>บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....</b>	<b>42</b>
5.1 ผลการทดลองการหักใส่ดินสอบนสปินเดิลมอเตอร์.....	42
5.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Amplitude และ AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะความไม่สมดุลต่างๆ.....	44
5.3 การทดลองสัญญาณบนโดเมนความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ ในสภาวะความไม่สมดุลต่างๆ.....	51
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>60</b>
6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	61
6.2 การประยุกต์ใช้งาน.....	62
6.3 งานวิจัยที่สามารถดำเนินการต่อได้ในอนาคต.....	63



รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก รูปหน้าจอของโปรแกรม AE WIN.....	67
ภาคผนวก ข มาตรฐาน ASTM E976-05.....	68
ภาคผนวก ค รายละเอียด algorithm ของ FFT.....	69
ภาคผนวก ง รูปสัญญาณ AE บนโดเมนเวลา (Time domain) และบนโดเมนความถี่ (Frequency domain) ของสปริงเดดโหลดสมดุล (Balance) และไม่สมดุล (Unbalance) โดยมวลถ่วงในสภาวะต่างๆ ทั้ง 5 ครั้งของการวัด.....	70
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	77

## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1	การเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณในหน่วยมิลลิโวลต์ กับหน่วยเดซิเบล.....	12
ตารางที่ 2.2	ขนาดของสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในหน่วยต่างๆ.....	13
ตารางที่ 5.1	ตารางแสดงค่าปริมาณความไม่สมดุลในหน่วยของกรัม-เซนติเมตร.....	45
ตารางที่ 5.2	ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะสปินเดิลมอเตอร์ปกติ.....	45
ตารางที่ 5.3	ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปินเดิลมอเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 0.46 กรัม-เซนติเมตร....	46
ตารางที่ 5.4	ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปินเดิลมอเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 1.29 กรัม-เซนติเมตร....	46
ตารางที่ 5.5	ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปินเดิลมอเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 1.85 กรัม-เซนติเมตร....	46
ตารางที่ 5.6	ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปินเดิลมอเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 2.22 กรัม-เซนติเมตร....	46
ตารางที่ 5.7	ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปินเดิลมอเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 3.35 กรัม-เซนติเมตร....	47
ตารางที่ 5.8	ตารางแสดงค่า Mean ของ Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละสภาวะ.....	58
ตารางที่ 5.9	ตารางแสดงค่า Power Magnitude ที่ความถี่ 324 kHz ของแต่ละสภาวะ.....	58

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	ประเภทของคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว.....4
รูปที่ 2.2	การแตกแยกของคลื่นหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านผ่านไปที่ระยะหนึ่ง.....4
รูปที่ 2.3	รูปเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตรวจหารอยบกพร่องโดยใช้อัลตราโซนิก กับวิธีการตรวจสอบโดย AE.....6
รูปที่ 2.4	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัด AE.....7
รูปที่ 2.5	คุณสมบัติของเพียโรโซอิเล็กทริก.....8
รูปที่ 2.6	แสดงอุปกรณ์แปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า.....8
รูปที่ 2.7	รูปแสดงคุณลักษณะของสัญญาณ AE.....14
รูปที่ 2.8	วิธีการวัดอัตราการเกิด AE โดยกำหนดค่าสูงสุดของ AE ที่ผ่านออก จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (วิธีการนับแบบ Ring down).....15
รูปที่ 2.9	วิธีการนับสัญญาณ AE ที่ผ่านการเฉลี่ยหรือหุ้มแล้ว (วิธีการนับจำนวนการเกิด AE).....16
รูปที่ 2.10	สัญญาณบนโดเมนเวลา.....16
รูปที่ 2.11	สัญญาณบนโดเมนความถี่.....17
รูปที่ 2.12	การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนเวลา.....17
รูปที่ 2.13	การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนความถี่.....17
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา และโดเมนความถี่.....18
รูปที่ 3.1	รูป ฮาร์ดดิสก์.....20
รูปที่ 3.2	รูปส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์.....21
รูปที่ 3.3	แสดง track บนจานดิสก์ (Disk platter).....22
รูปที่ 3.4	รูปสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์.....24
รูปที่ 3.5	แสดงชิ้นส่วนในการยึดแผ่นจานกับสปินเดิลมอเตอร์.....25
รูปที่ 3.6	แสดงส่วนประกอบของสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor).....26
รูปที่ 3.7	แสดงรูปจำลองส่วนประกอบภายในเปรียบเทียบระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ ที่สมดุล (Balance motor) และไม่สมดุล (Unbalance motor).....27
รูปที่ 3.8	การสั่นสะเทือนของระบบมวลและสปริง.....30
รูปที่ 3.9	มวล 2 มวลมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา.....31
รูป 3.10	แสดงมวล 2 มวลมุมเฟสต่างกัน 180 องศา.....31

	หน้า
รูปที่ 3.11	วัตถุที่มีมุมเฟสที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกับ 0 และ 180 องศา.....32
รูปที่ 3.12	หน่วยวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและความสัมพันธ์.....33
รูปที่ 3.13	เครื่องวิเคราะห์และเก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที.....34
รูปที่ 3.14	เครื่อง Strobe light และชุด Photo cell.....35
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนการวัดสัญญาณ AE ของสปินเดิลมอเตอร์.....36
รูปที่ 4.2	แสดงสปินเดิลมอเตอร์บนฐานจับยึด.....37
รูปที่ 4.3	แสดงรูปหัวตรวจจับสัญญาณ AE รุ่น R30-alpha.....37
รูป 4.3	แสดง ใบ Calibration Certificate ของหัววัดสัญญาณ AE.....38
รูปที่ 4.4	แสดงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ.....38
รูปที่ 4.5	ไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานเครื่องมือทดสอบ AE แบบ PCI-2.....39
รูปที่ 5.1	การทดลองหาค่าไดนามิกของสปินเดิลมอเตอร์.....42
รูปที่ 5.2	แสดงสัญญาณ AE และค่าเชิงความถี่ของสัญญาณ ในการหาค่าไดนามิก.....43
รูปที่ 5.3	รูปแสดง มอเตอร์สภาวะปกติ (สมดุล) และมอเตอร์สภาวะไม่สมดุล โดยการเพิ่มมวลถ่วง.....44
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Amplitude ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่าต่างๆ.....47
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่าต่างๆ.....48
รูปที่ 5.6	สัญญาณ AE เฉลี่ยบนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ ..... 52
รูปที่ 5.7	สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล ค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร .....53
รูปที่ 5.8	สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล ค่า 1.29 กรัม-เซนติเมตร .....54
รูปที่ 5.9	สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล ค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร .....55
รูปที่ 5.10	สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล ค่า 2.22 กรัม-เซนติเมตร .....56
รูปที่ 5.11	สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล ค่า 3.35 กรัม-เซนติเมตร .....57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความเป็นมา

ปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีความสำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องพัฒนาคอมพิวเตอร์เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต ส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของคอมพิวเตอร์คือฮาร์ดดิสก์ ซึ่งมีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ และปัจจุบันก็มีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์เพื่อให้สามารถจุข้อมูล ได้มากถึงระดับ 1 เทอระบิตต่อตารางนิ้ว หรือมีการออกแบบให้มีขนาดเล็กลงถึงขนาด 1 นิ้ว เพื่อสะดวกในการพกพาและรองรับคอมพิวเตอร์ที่ขนาดเล็กลง ซึ่งในการปรับปรุงและแก้ไขดังกล่าวเป็นสาเหตุให้ฮาร์ดดิสก์มีการซับซ้อนในการทำงานมากขึ้น สปินเดิลมอเตอร์ก็เป็นส่วนประกอบหนึ่งในฮาร์ดดิสก์ที่ทำหน้าที่ในการทำให้จานดิสก์หมุน และจานดิสก์เป็นส่วนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลต่างๆ ซึ่งเป็นหน้าที่หลักของฮาร์ดดิสก์ และด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวข้างต้นที่จำเป็นต้องออกแบบให้มีความจุมากขึ้นหรือขนาดเล็กลง ทำให้การหมุนของสปินเดิลมอเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างมากในการบันทึกข้อมูล เนื่องจากถ้าการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ผิดปกติไปอาจทำให้เกิดการอ่านหรือการบันทึกข้อมูลผิดพลาดได้ และสาเหตุที่ทำให้เกิดการผิดปกติของการหมุนนั้นอาจเกิดจากการหมุนของแกนสปินเดิลมอเตอร์ที่ไม่สมดุล (Unbalance) หรือการเยื้องศูนย์ (Misalignment) ของแกนสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันหรือการเสียดสีรูปทรงพลาสติกของส่วนประกอบต่างๆภายในสปินเดิลมอเตอร์ และลักษณะดังกล่าวล้วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดคลื่นอะคูสติกออกมา

สำหรับงานวิจัยนี้ จะทำการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกที่มาจากสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะต่างๆ เช่น สภาวะการหมุนของแกนสปินเดิลมอเตอร์ที่ไม่สมดุล และสภาวะการเยื้องศูนย์ของแกนสปินเดิลมอเตอร์ เป็นต้น โดยจะใช้หัววัดสัญญาณการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก (AE transducer) ในการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีความไวในการตรวจจับสัญญาณสูง (High sensitivity) หลังจากนั้นจะทำการประมวลสัญญาณ (Signal processing) โดยอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป



## 1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกและการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ในสภาวะที่แตกต่างกัน
- 1.2.2. ทำการทดสอบระบบการวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกจากสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะการทำงานต่างๆ เพื่อใช้วิธีการประเมินผลสัญญาณในการบ่งบอกความผิดปกติ

## 1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1. เพื่อศึกษาแนวทางการปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติก
- 1.3.2. เพื่อศึกษาตัวแปรในการปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติก
- 1.3.3. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกและการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะที่แตกต่างกัน

## 1.4. ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.4.1. ศึกษาการการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก และปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสัญญาณ
- 1.4.2. ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมืออะคูสติกอิมิสชัน
- 1.4.3. ศึกษาเครื่องมือ PCI-2 โปรแกรม Labview, Matlab ที่ใช้ในการวิเคราะห์
- 1.4.4. ทดลองและทำการวิเคราะห์สัญญาณ AE เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ที่ผิดปกติ

## 1.5. ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.5.1. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติของสปินเดิลมอเตอร์และสัญญาณอะคูสติกอิมิสชัน
- 1.5.2. สามารถใช้เป็นแนวทางประยุกต์ใช้การวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกกับโรงงานอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก

#### 2.1. การเกิดสัญญาณอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission)

อะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic emission) [1] หรือการปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติก หรือที่เรียกตัวย่อว่า AE ซึ่งความหมายที่ตรงตามตัวอักษร คือ การให้เสียงออกมานั่นเอง

ประสบการณ์ที่มักพบเห็นกันอยู่เป็นประจำคือ ถ้วยชาหรือกาแฟ ที่เป็นเครื่องปั้นดินเผา หรือแก้ว นั้น ถ้าแตกก็จะเกิดเสียงขึ้น บ้านใหม่ๆ ที่สร้างจากไม้ นั้น เมื่อไม้เกิดแห้งมากขึ้นและแตกก็จะเกิดเสียงลั่นเปรี๊ยะเกิดขึ้น แผ่นดีบุกบางๆ ถ้าตัดออกก็จะเกิดเสียงก๊งก๊งที่เรียกว่า ดีบุกร้อง (Tin cry) ที่เป็นที่ยู๊จกกันมาตั้งแต่โบราณ

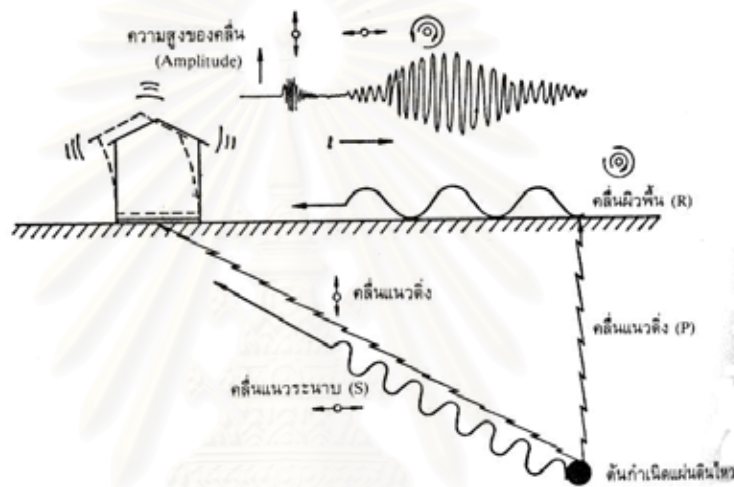
เทหวัตถุต่างๆ ไป ก่อนที่จะเกิดการแตกหักในขั้นสุดท้ายนั้น บริเวณภายในจะมีรอยเล็กมากๆ เกิดขึ้นจากนั้นก็ขยายตัวเรื่อยๆ ไปจนเกิดการแตกหักในขั้นสุดท้าย กล่าวคือ ในขณะที่ของแข็งเกิดการแตกหัก หรือมีการเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic deformation) จะเปลี่ยนพลังงานที่อยู่ในรูปของความเครียดนั้น ส่งออกมาในรูปของคลื่นอีลาสติก (Elastic wave) หรือคลื่นเสียง เราเรียกปรากฏการณ์การส่งคลื่นเสียงแบบนี้ว่า อะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic emission) หรือ AE ซึ่งแม้จะเรียกว่าเป็นเสียง แต่เนื่องจากเป็นคลื่นอีลาสติก ดังนั้นบ่อยครั้งที่จะดังจนได้ยินเป็นเสียงออกมาโดยทั่วไปมักจะเป็นคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่หูคนเรารับฟังไม่ได้โดยตรง

ปรากฏการณ์ในระดับจุลภาคนั้น จะเป็นดังนี้ ก่อนที่จะเกิดการแตกหักนั้น เมื่อความเค้นมีค่าสูงขึ้นจนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของพลาสติกแล้ว ดิสโลเคชัน (Dislocation) หรือการอยู่ผิดตำแหน่งของผลึกก็จะเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดคลื่นอีลาสติก (AE) ออกมา ถ้าความเค้นที่มากกระทำต่อวัสดุมีค่าสูงขึ้นเกินกว่าขีดจำกัดหนึ่ง บริเวณปลายของรอยแตกเล็กๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกแล้วก็จะเกิดรอยแตกกว้าง ทำให้รอยร้าวขยายตัวมากขึ้น ในกรณีนี้จะเกิด AE แบบทันทีทันใดขึ้น AE แบบนี้จะมีคามสูงของคลื่น (Amplitude) หรือความดังมากกว่าในกรณีการเคลื่อนที่ที่ดิสโลเคชัน

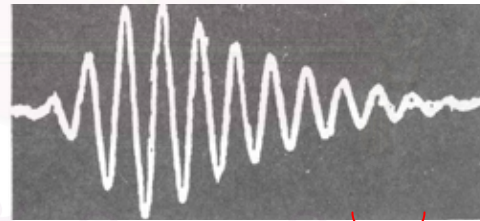
แม้แผ่นดินไหวเองเราก็อาจคิดได้ว่าเป็นการที่มี AE เกิดขึ้นในโลก ซึ่งในกรณีนี้คลื่น P (คลื่นในแนวตั้ง) จะมาถึงในที่สุด จากนั้นจึงจะเป็นคลื่น S (คลื่นในแนวระนาบ) และคลื่น R (คลื่นที่พื้นผิว) ที่จะติดตามมา ดังรูปที่ 2.1 คลื่นต่างๆ ดังกล่าวนี้นี้ ถ้าเป็นตัวกลางที่เป็นอากาศหรือน้ำแล้ว การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน ดังนั้น จึงมีเฉพาะคลื่นใน

แนวตั้งอย่างเดียว แต่ในตัวกลางที่เป็นของแข็งนั้น จะมีคลื่นในแนวระนาบที่มีทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณพื้นผิวเกิดปะปนกัน

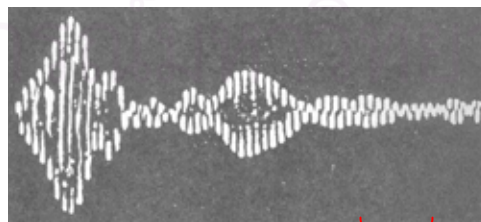
ในกรณีของวัสดุโครงสร้างทั้งหลายนั้น AE มักจะเกิดการเคลื่อนที่อยู่ในแนวระนาบขนาดใหญ่ ดังนั้นคลื่นจึงมักสะท้อนกลับไปกลับมาะหว่างผิวหน้าด้านต่างๆ คลื่นในแนวตั้งส่วนหนึ่งกลายเป็นคลื่นในแนวระนาบ ทำให้ลักษณะของคลื่นซับซ้อนมาก แม้ว่าแหล่งกำเนิดคลื่นจะก่อให้เกิด AE ที่มีรูปคลื่น (คลื่นเริ่มแรก) เป็นลักษณะคลื่นกระแทก (Impulse) แบบธรรมดา แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางหนึ่งแล้ว รูปคลื่นก็จะเกิดการแทรกซ้อน ความกว้างระหว่างคลื่นแต่ละถูกยืดขยายออกไป ทำให้รูปคลื่นต่างไปจากคลื่นเริ่มแรกได้ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ประเภทของคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว



1 ไมโครวินาที  
(ก) รูปคลื่นเริ่มแรก



5 ไมโครวินาที  
(ข) รูปคลื่นหลังจากเคลื่อนที่ไปได้ 75 ซม.

รูปที่ 2.2 การแตกแยกของคลื่นหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านไปที่ระยะทางหนึ่ง

## 2.2. แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก

แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.2.1. แหล่งกำเนิดระดับจุลภาค หมายถึงคุณสมบัติของเนื้อวัสดุเมื่อพิจารณาถึงอะตอม โมเลกุล และโครงสร้างของผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ได้แก่

2.2.1.1. การที่มีอะตอมขาดหายไป (Vacancy point defect)

2.2.1.2. การที่มีอะตอมผิดตำแหน่ง (Frankel imperfection)

2.2.1.3. การที่มีอะตอมเกินเข้ามา (Interstitial point defect)

2.2.1.4. การที่มีอะตอมอื่นแปลกปลอมเข้ามา (Impurity)

2.2.2. แหล่งกำเนิดระดับมหภาค หมายถึงส่วนต่างๆ ที่ค่อนข้างใหญ่ของวัสดุที่ตรวจสอบ ทั้งภายในและที่ผิวซึ่งปล่อยคลื่นอัลตราสติกออกมา ได้แก่

2.2.2.1. การเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic Deformation)

2.2.2.2. การแตกหัก (Cracking)

## 2.3. การทดสอบ AE

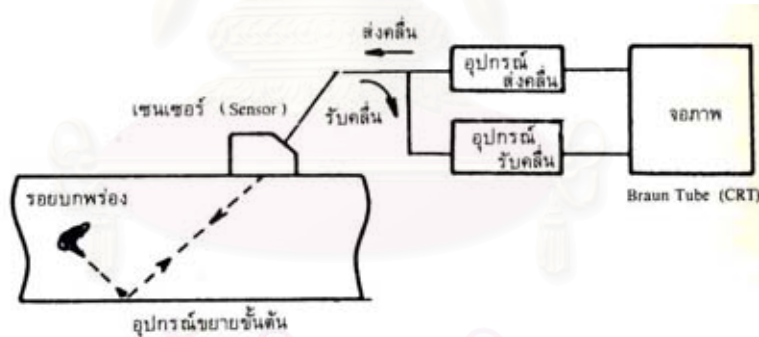
การทดสอบ AE เป็นการตรวจสอบคลื่นอัลตราสติกที่เกิดขึ้นในเวลาที่ย่อยแตกขยายตัวออกไป เป็นการทดสอบในการวิจัยทางวัสดุ การควบคุมการผลิตในงานเชื่อม หรือการตรวจสอบความแข็งแรงมั่นคงในวัสดุ โครงสร้างต่างๆ ในปัจจุบันนี้ได้มีการประยุกต์ใช้กับวัสดุต่างๆ มากมายหลายชนิด เช่น FRP (Fiber reinforced plastic- พลาสติกเสริมแรง) เซรามิกส์ คอนกรีต หิน แก้ว ไม้ และ ถ่านหิน เป็นต้น สิ่งต่างๆ ที่ประยุกต์ใช้งานนั้น นอกจากวัสดุที่ก่อเป็นโครงสร้างแล้ว ยังใช้ในการตรวจการเลื่อนไหลของพื้นดิน แผ่นดินไหว ในการทำเหมืองแร่ เหมืองถ่านหิน พลังงานความร้อนใต้พิภพ เชื้อนคอนกรีต และโครงสร้างที่ใช้ในทะเลและมหาสมุทรอีกด้วย

ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing, NDT) ที่ใช้กันมาแต่ก่อนนั้นเป็นวิธีการตรวจสอบรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นและเป็นรูปเป็นร่างแล้ว แต่ว่าการทดสอบ AE นั้นเป็นการตรวจสอบเสียงที่เกิดขึ้น จากการที่วัสดุเกิดการขาดเสถียรภาพมีรอยบกพร่องเกิดขึ้น แล้วขยายตัวออกก่อนเกิดเสียงดังกล่าว ดังนั้นจึงเป็นการประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบกระบวนการที่รอยบกพร่องเกิดการขยายตัวอยู่เท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้กันมานั้นเป็นการตรวจสอบสภาพที่ "เกิดขึ้นแล้ว" ส่วนการทดสอบ AE นั้น เป็นการตรวจสอบสภาพ "ปัจจุบัน" เป็นวิธีการแสดงสภาพเวลาจริง (Real time) ในปัจจุบัน ซึ่งในเนื้อหาแล้วแตกต่างวิธีดั้งเดิม เป็นวิธีที่ใหม่ล่าสุดนั่นเอง

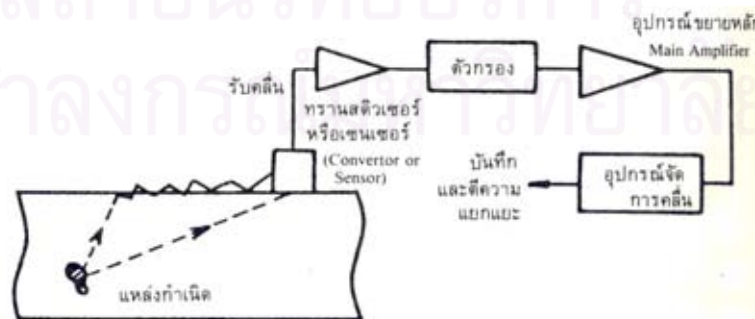
วิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมนั้น ไม่ว่าจะเป็วิธีใดจะต้องอยู่ใกล้ชิดกับสถานที่หรือบริเวณที่จะตรวจสอบให้มากที่สุด การตรวจสอบแต่ละครั้งทำให้ในช่วงแคบๆ เท่านั้น สำหรับการทดสอบแบบ AE นั้น ถ้ามีอุปกรณ์รับสัญญาณ และอุปกรณ์แยกแยะสัญญาณพร้อมแล้ว พนักงานผู้ทดสอบไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้บริเวณที่จะตรวจสอบ ทำให้สามารถตรวจสอบโครงสร้างขนาดใหญ่ ๆ ได้ในบริเวณกว้างในเวลาเดียวกัน

ในจุดที่การทดสอบ AE นั้น ใช้คลื่นอัลตราซิก จะมีความคล้ายคลึงกับการตรวจสอบรอยบกร่องโดยวิธีอัลตราซิก แต่ทว่าการทดสอบ AE นั้น สิ่งที่จะทดสอบเป็นตัวส่งสัญญาณคลื่นอัลตราซิกออกมา เพียงแต่รับสัญญาณได้ก็สามารถตรวจสอบได้ ดังรูปที่ 2.3

การเกิด AE นั้น เป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่หลายปีก่อนมาแล้ว คือ นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 1920 ได้มีรายงานเกี่ยวกับเรื่องนี้ออกมา ซึ่งเป็นเรื่องเกี่ยวกับขั้นตอนหรือวิธีการในการวิจัยทางวัสดุศาสตร์ที่ใช้ AE กันอยู่ ครั้นถึงทศวรรษที่ 1960 งานวิจัยการประยุกต์ใช้ AE ได้ก้าวหน้ารวดเร็วมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอเมริกาได้มีการใช้ AE ในงานเกี่ยวกับจรวด เตาปฏิกรณ์ปรมาณู การเตือนล่วงหน้า เมื่อมีรอยแตกในการทดสอบความทนทานต่อแรงดันของภาชนะอัดแรงดัน การประเมินผลตำแน่งรอยบกร่อง การตรวจสอบระหว่างการใช้งาน หรือการใช้ AE ในการตรวจสอบรอยแตก ซึ่งได้มีการใช้งานกันอย่างมากมาย คุณค่าของการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้เป็นที่ประจักษ์กันอย่างกว้างขวาง ทำให้ AE เริ่มโดดเด่นเป็นจุดสนใจทั่วไป



(ก) วิธีการตรวจหารอยบกร่องโดยใช้อัลตราซิก



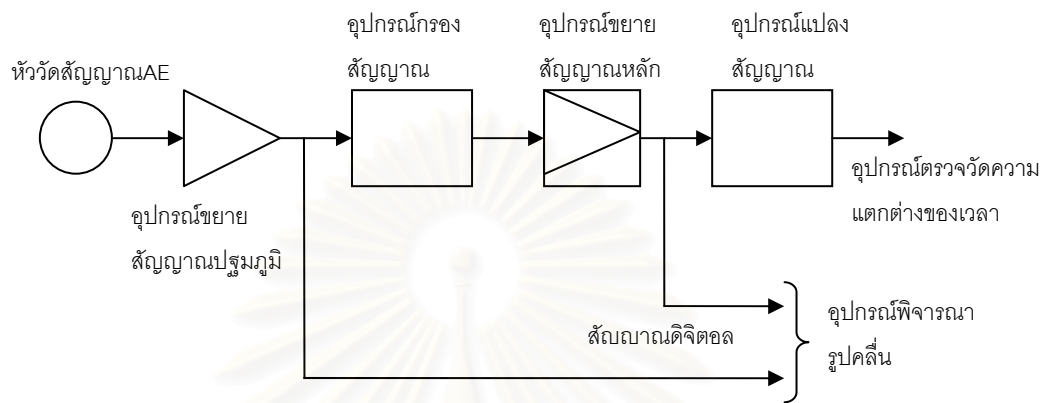
(ข) วิธีการตรวจสอบโดย AE

รูปที่ 2.3 รูปเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตรวจหารอยบกร่องโดยใช้อัลตราซิก กับวิธีการตรวจสอบโดย AE



## 2.4. วิธีการวัด AE

รูปที่ 2.4 เป็นภาพร่างของระบบอุปกรณ์ตรวจวัด AE ที่ประกอบขึ้นเพื่อให้มีสมรรถภาพพื้นฐานในการตรวจวัดได้



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัด AE

อุปกรณ์แต่ละตัว ถูกอธิบายดังต่อไปนี้

### 2.4.1. อุปกรณ์แปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (AE Transducer)

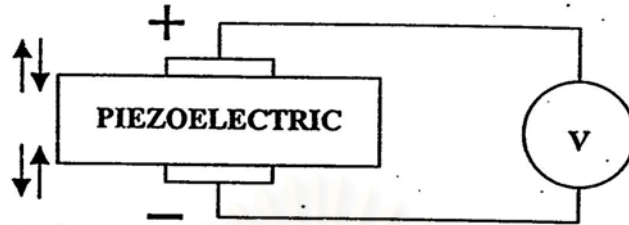
โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกตามวิธีการวัดได้ 3 ชนิด คือ

2.4.1.1. หัวตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์แม่เหล็ก (Electromagnetic transducer) เป็นหัวรับแบบไม่ต้องสัมผัสชิ้นงานซึ่งใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดเหนี่ยวนำกระแสไหลวน เมื่อพื้นผิวมีการขยับเคลื่อนที่ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง อิมพีแดนซ์ ซึ่งตรวจวัดได้ด้วยวงจรบริดจ์อิมพีแดนซ์

2.4.1.2. หัวตรวจสอบคาปาซิแตนซ์ (Capacitance transducer) เป็นหัวรับสัญญาณแบบไม่ต้องสัมผัสชิ้นงานอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้ค่าความจุไฟฟ้าของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนที่มีความไวของหัวรับสัญญาณกับพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อพื้นผิวมีการขยับเคลื่อนที่ ค่าความจุไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไป ซึ่งตรวจวัดได้ด้วยวงจรบริดจ์ความจุไฟฟ้า

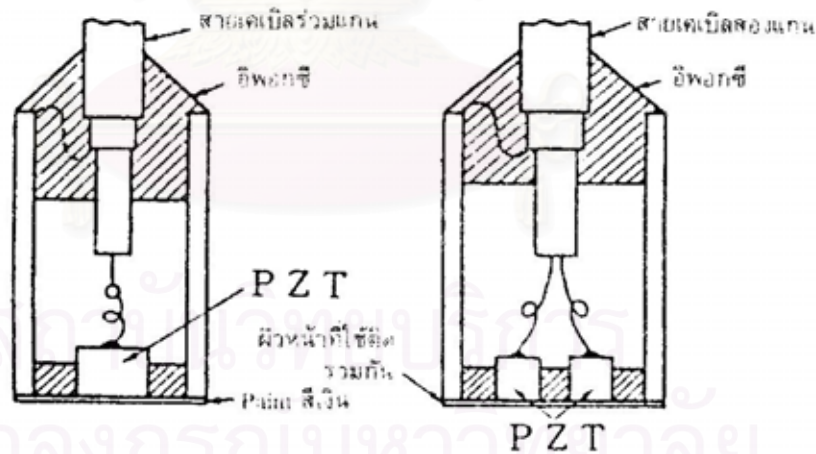
2.4.1.3. หัวตรวจสอบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric transducer) ใช้ผลึกชนิดเดียวกับควอตซ์ หรือใช้วัสดุเซรามิกส์ ที่เรียกว่า (Ferroelectric) เช่น ตะกั่วเซอร์โคไนต์ไตตาเนต (Lead Zirconite-Titanate Ceramic : PZT) โดยให้รับสนามไฟฟ้าความเข้มสูงกับเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เมื่อผลึกควอตซ์เกิดการสั่นสะเทือนก็จะเกิดประจุไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์ Piezoelectric นั่นคือ การเกิดขึ้นของประจุทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนรูปทางกลของวัสดุ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ย้อนกลับได้เช่นกัน นั่นคือเมื่อทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับวัสดุ วัสดุจะสามารถเกิด

การเปลี่ยนรูปได้เช่นกัน ซึ่ง Piezoelectric เป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่มีในวัสดุเพียโรโซอิเล็กทริก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของเพียโรโซอิเล็กทริก

การทดสอบด้วยวิธีอะคูสติกส่วนใหญ่จะใช้หัวตรวจสอบที่ประกอบด้วย เพียโรโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer) โดยทั่วไปทำมาจาก PZT (Lead zirconite titanite) ดังรูปที่ 2.6 อุปกรณ์นี้จะติดเข้ากับผิวหน้าของสิ่งที่ตรวจสอบ ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณคลื่นอัลตราซาวด์ AE ที่ได้รับเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูง มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบหาแรงดันไฟฟ้าในลักษณะอุปกรณ์เซนเซอร์หรือโพรวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบแบบอัลตราโซนิก



รูปที่ 2.6 แสดงอุปกรณ์แปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

หัวตรวจสอบอะคูสติกนี้จะมีชนิดของการตอบสนองต่อความถี่ที่สัญญาณที่ทำการตรวจวัด อยู่ 2 ชนิด คือ

- (1) แบบ Resonant เป็นชนิดของหัวตรวจสอบที่มีการตอบสนองต่อสัญญาณอะคูสติก เฉพาะช่วงความถี่หนึ่งๆ ซึ่งเป็นช่วงแคบได้ดีที่สุด
- (2) แบบ Damped หรือ Broadband เป็นชนิดของหัวตรวจสอบที่มีการตอบสนองต่อ สัญญาณอะคูสติกในช่วงความถี่กว้างๆ ซึ่งตอบสนองต่อความถี่ต่างๆ ในช่วงนั้นๆ จะมีการตอบสนองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกหัวตรวจสอบเพื่อการใช้งานด้านต่างๆ

(1) ช่วงความถี่ในการใช้งาน เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดโดยจะต้องพิจารณาว่า ประเภทของงาน หรือลักษณะของสัญญาณที่ต้องการทำการตรวจจับนั้นมีความถี่สัญญาณอยู่ในช่วงความถี่เท่าไร เพื่อมาทำการเลือกหัวตรวจสอบที่ตอบสนองต่อความถี่ในช่วงนั้นมากที่สุด ซึ่งจะทำให้การตรวจจับ เป็นไปอย่างประสิทธิภาพ

(2) ความไวในการตอบสนอง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมสำหรับงาน จะต้องคำนึงถึงความ ไวของหัวตรวจสอบที่สามารถจับสัญญาณอะคูสติก และแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ดี เพียงใด หากเลือกหัวตรวจสอบที่มีความไวต่ำในงานบางประเภทก็จะวิเคราะห์ผลเกิดความ ผิดพลาดหรือประสิทธิภาพต่ำได้ โดยความไวนี้จะมีค่าคงที่ไม่เกี่ยวกับการเลือกช่วงความถี่ใช้งาน

(3) ขนาดของหัวตรวจสอบ โดยจะต้องคำนึงถึงขนาดของพื้นที่ หรือ โครงสร้างนั้นๆ ว่ามี ขนาดเท่าไร เพื่อการเลือกขนาดของหัวตรวจสอบให้มีความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งบนวัสดุหรือ โครงสร้างที่ต้องการทดสอบ

วิธีการติดตั้ง และจับยึดหัวตรวจสอบ

(1) สารช่วยสัมผัส (Couplant) คือสารประกอบที่มีความจำเป็นในการติดตั้ง เพื่อป้องกันการ เกิดช่องว่างของอากาศ (Air Gap) ระหว่างหัวตรวจสอบกับชิ้นงานหรือโครงสร้างทำให้การส่งผ่าน ของพลังงานคลื่นอะคูสติกจากชิ้นงานสู่หัวตรวจสอบเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวอย่างของ สารช่วยสัมผัสที่ใช้ใน AE เช่น กาว ซิลิโคน สารช่วยสัมผัสที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิก หรือปิโตรเลียมเจล เป็นต้น

(2) ส่วนของการจับยึด (Mounting) คือ ส่วนประกอบที่จำเป็นในการจับยึดหัวตรวจสอบ ณ ตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งหัวตรวจสอบบนชิ้นงาน โดยจะทำให้การติดตั้งหัวตรวจสอบมีความมั่นคง และทนทานในระหว่างที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งการจับยึดนี้อาจทำได้โดยอาศัยสารช่วยสัมผัสบางชนิด ที่มีคุณสมบัติในการเกาะติดเนื้อวัสดุ ทำหน้าที่เป็นตัวยึดระหว่างหัวตรวจสอบกับชิ้นงานไปด้วย หรือ การใช้อุปกรณ์จับยึดเฉพาะงานก็ได้ ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้จับยึดนั้น เช่น เทปกาว แผ่นยาง ตัวจับยึดแบบแม่เหล็ก เป็นต้น

คุณสมบัติเฉพาะที่จำเป็นของสารช่วยสัมผัส

- (1) จะต้องมีความสามารถที่ทำให้พื้นผิวทดสอบ และผิวหน้าของหัวตรวจสอบมีลักษณะเปียกได้
- (2) มีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสม กล่าวคือ จะต้องไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับผิวทดสอบ หรือ หัวตรวจสอบ
- (3) จะต้องไม่เกิดการไหลบนพื้นผิวเมื่อทำการวางวัสดุทดสอบในแนวตั้ง หรือที่อุณหภูมิสูง และต้องไม่เกิดการชะล้างเมื่อถูกฝนได้
- (4) จะต้องมีความสามารถในการขจัดออกได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ เมื่อต้องการเคลื่อนย้าย หรือเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งหัวตรวจสอบ จะต้องสามารถทำได้ง่าย ไม่เกิดการเกาะติดอย่างถาวรบนวัสดุนั้นๆ
- (5) จะต้องมีการส่งผ่านพลังงานคลื่นอะคูสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.4.2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมิ (Pre-amplifier)

สัญญาณ AE ที่รับได้โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณนั้น โดยปกติจะเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับไมโครโวลต์ ( $\mu\text{V}$ ) ถึงมิลลิโวลต์ (mV) ซึ่งมีขนาดสัญญาณต่ำ อุปกรณ์ขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายขนาดของสัญญาณให้เกิดความเหมาะสมของการวัด แล้วส่งผ่านไปยังอุปกรณ์จัดการสัญญาณต่างๆ ต่อไป อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมินี้จะวางในตำแหน่งที่ใกล้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณขึ้นเป็นขนาดประมาณ 40 เดซิเบล หลังจากนั้นแม้จะส่งผ่านสายเคเบิลเป็นระยะทางไกลๆ ก็สามารถส่งสัญญาณที่มีเสถียรภาพได้

ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมิ

(1) ช่วงความถี่ในการตอบสนอง ควรเลือกให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ของสัญญาณอะคูสติกที่ต้องการตรวจจับเพื่อให้เกิดการตอบสนองสูงสุด

(2) อัตราการขยาย ในการใช้งานด้านตรวจสอบจะต้องทำการเลือกอัตราการขยายให้เกิดความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ เนื่องจากหากเลือกอย่างไม่เหมาะสมจะทำให้ไม่สามารถทำการตรวจจับสัญญาณได้เลย หรือ อาจจะได้น้ำหนักของสัญญาณที่ต้องการสูงมากจนไม่สามารถส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลได้เพราะว่ามีแอมพลิจูดสูงเกินขอบเขตของเครื่องนั่นเอง

#### 2.4.3. อุปกรณ์กรองสัญญาณ (Filter)

สัญญาณ AE ที่ใช้งานได้นั้น โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ (KHz) ถึงระดับหลายเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ระบบการตรวจวัดนั้นอาจมีสัญญาณรบกวน หรือสัญญาณจักรกลรบกวนเนื่องจากสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณพิเศษที่ตัดคลื่นอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นออกไป

#### 2.4.4. อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Discriminator)

คลื่นสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณหลักนั้น จะป้อนเข้าสู่อุปกรณ์อนาล็อกโดยตรง และส่วนหนึ่งจะถูกแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ตัวเลข) ที่จะย่นเข้าสู่อุปกรณ์จัดการสัญญาณ อุปกรณ์นับ (Counter) หรืออุปกรณ์จัดการข้อมูล (Information processing) อื่นๆ ต่อไป

### 2.5. ลักษณะเฉพาะของสัญญาณ

สัญญาณอะคูสติกส่วนใหญ่ที่ได้มีการศึกษานั้นจะมีขนาดของสัญญาณที่ต่ำมาก ซึ่งจำเป็นต้องมีหัวตรวจจับที่มีความไว และการขยายสัญญาณที่สูงสำหรับการตรวจจับอย่างมีประสิทธิภาพ การขยายสัญญาณระดับต่ำสามารถใช้หัวตรวจจับที่มีความไวทั่วๆ ไปได้ แต่กลไกของแหล่งกำเนิดบางอย่างนั้นจะให้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วงกว้างในหน่วยไมโครโวลต์ จนถึงหน่วยโวลต์ ดังนั้นเพื่อที่จะอธิบายถึงการเกิดช่วงที่กว้างของสัญญาณให้อยู่ทิศทางเดียวกัน ทางอุตสาหกรรมจึงกำหนดให้สัญญาณอะคูสติกแสดงแอมพลิจูดในหน่วยเดซิเบล (dB) ซึ่งหน่วยเดซิเบลจะใช้เป็นมาตรฐานทางอุตสาหกรรม ที่ง่ายต่อการอธิบายถึงแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก โดยการเปรียบเทียบของหน่วยไมโครโวลต์ต่อโวลต์ กับหน่วยเดซิเบล ดังแสดงในตารางที่ 2.1



ตาราง 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณในหน่วยไมโครโวลต์กับหน่วยเดซิเบล

แอมพลิจูดของสัญญาณที่วัดจากสัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นในหน่วย ไมโครโวลต์	แอมพลิจูด ในหน่วย เดซิเบล
1	0
10	20
100	40
1000	60
10000	80
100000	100

สมการ (2.1) แสดงการคำนวณหาค่าของ dB คือ

$$dB = 20 \text{Log}(V / V^{ref}) \quad (2.1)$$

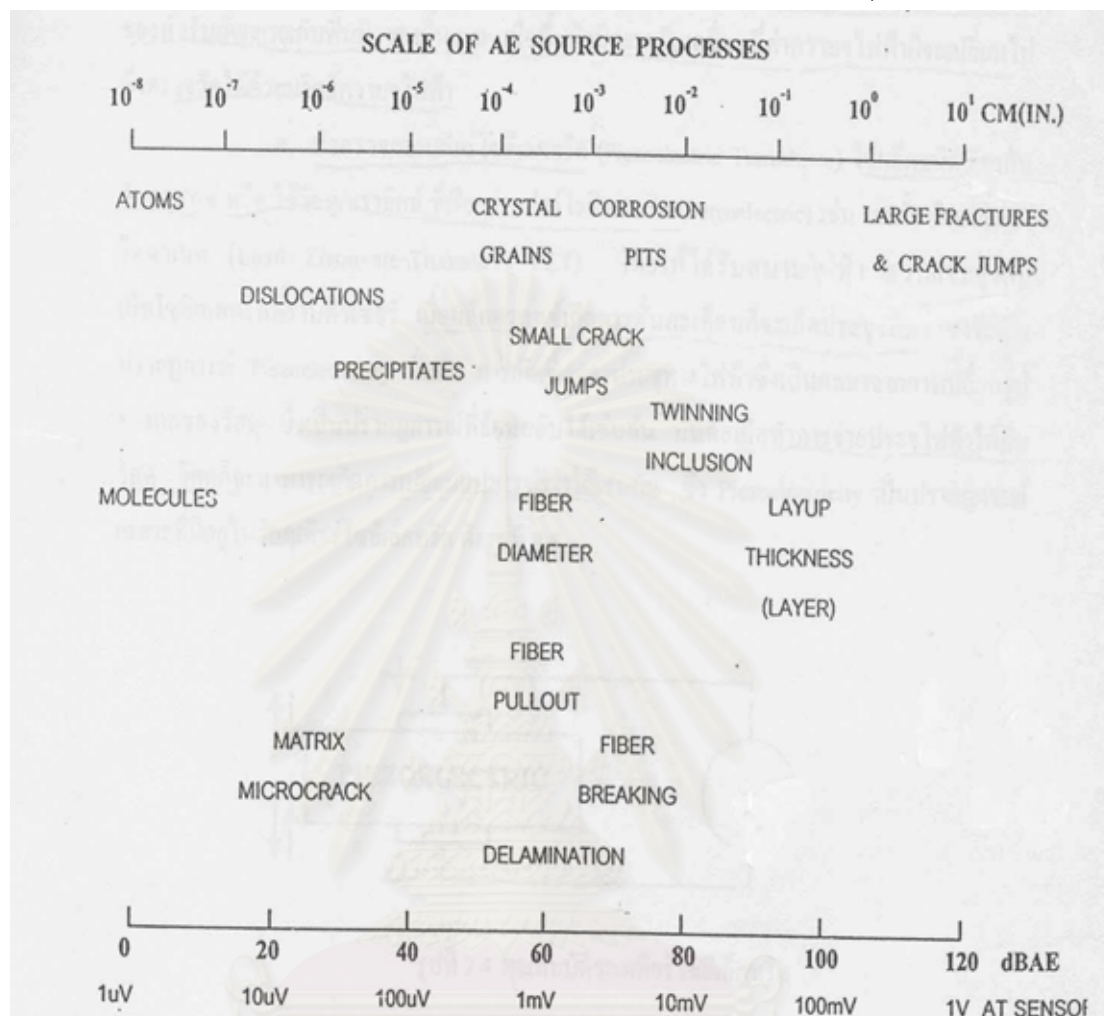
โดยที่  $V$  คือ ค่าแรงดันของสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

$V^{ref}$  คือ ค่าแรงดันของสัญญาณอ้างอิง ซึ่งกำหนดให้เป็น 1 ไมโครโวลต์ที่สัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น

ขนาดของสัญญาณอะคูสติคที่ปลดปล่อยออกมาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่างๆ ของวัสดุจะแสดงในหน่วยต่างๆ ดัง ตารางที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

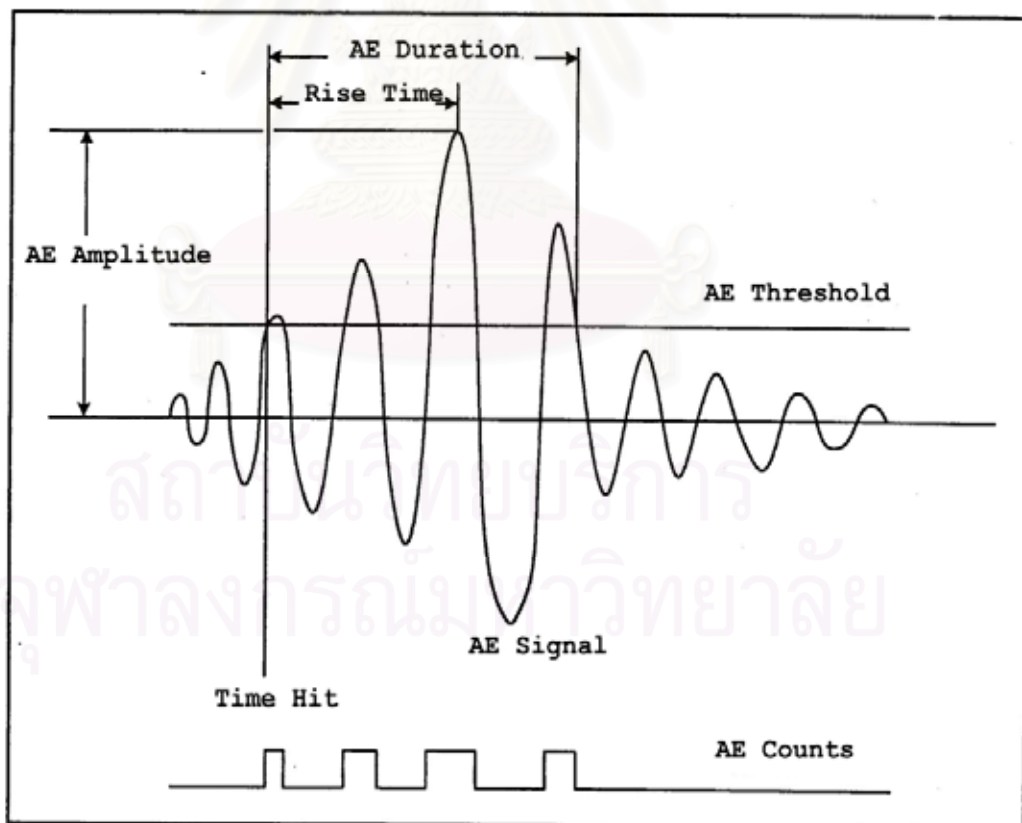
ตารางที่ 2.2 ขนาดของสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในหน่วยต่างๆ



เมื่อหวัรับสัญญาณแปลงคลื่นสัญญาณอะคูสติกเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณจะถูกขยายและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวงจรวัดเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ประมวลผลลักษณะรูปคลื่นอะคูสติกต่างๆไป การปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกอาจเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (Continuous emission) หรือ เป็นการปลดปล่อยแบบเป็นช่วง (Burst Emission) ก็ได้

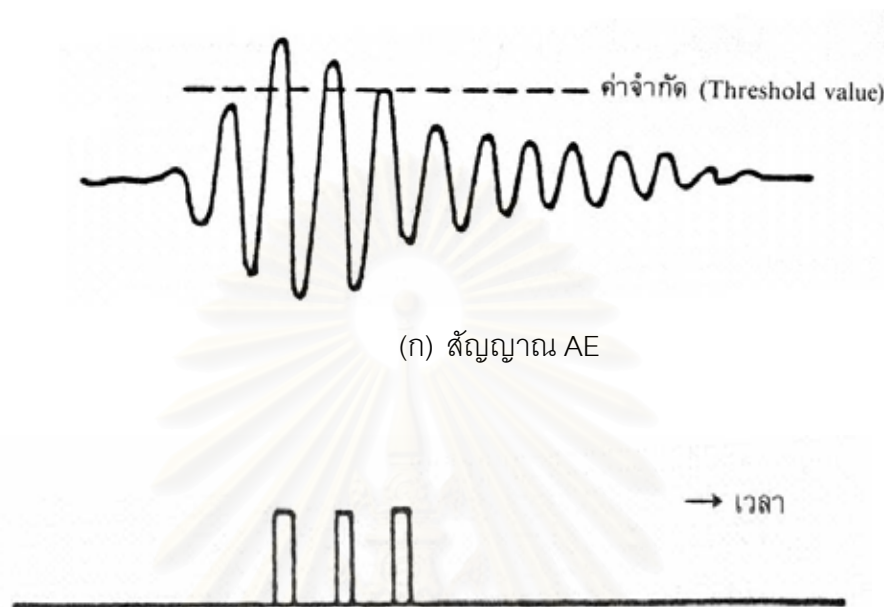
รูปแบบของสัญญาณอะคูสติกในโดเมนของเวลา จะบ่งถึงแหล่งกำเนิดและความสำคัญตลอดจนคุณลักษณะของสัญญาณอะคูสติก แต่เนื่องจากคลื่นหรือสัญญาณรบกวน (Noise) การวิเคราะห์และการประเมินผลสัญญาณจึงต้องมีการกำหนดค่าจำกัดเริ่มต้น (Threshold) ของสัญญาณเพื่อให้สามารถตรวจวัดข้อมูลได้ถูกต้องมากขึ้นและเพื่อเป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบอีกด้วย ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ (แสดงดังรูปที่ 2.7) จะมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- (1) AE Count คือ จำนวนครั้งที่สัญญาณคลื่นอะคูสติกมีขนาดสูงเกินค่าจำกัดเริ่มต้น
- (2) AE Amplitude คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- (3) AE Rise Time คือ ระยะเวลาระหว่างช่วงตั้งแต่สัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าจำกัด เริ่มต้นครั้งแรกจนถึงสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงสุด
- (4) AE Duration Time คือ ระยะเวลาตั้งแต่สัญญาณแรกมีค่าสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น จนถึงเวลาของแอมพลิจูดของสัญญาณสุดท้ายที่สูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น
- (5) AE Event คือ จำนวนครั้งที่เกิดสัญญาณการปล่อยคลื่นอะคูสติก ทั้งนี้โดยไม่ได้ คำนึงถึงระยะเวลาในการเกิดแอมพลิจูด เวลาในการเกิดแอมพลิจูดสูงสุด (Rise time) หรือ คุณลักษณะอื่นๆ
- (6) AE RMS คือ ค่ารากที่สองเฉลี่ย (Root mean square) ของแรงดันไฟฟ้า
- (7) การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม (Spectrum analysis) คือวิเคราะห์สัญญาณในเชิง ความถี่



รูปที่ 2.7 รูปแสดงคุณลักษณะของสัญญาณ AE

การวัดอัตราการเกิด AE นั้น แบ่งเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ วิธีหนึ่งนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 นั่นคือ กำหนดระดับสูงสุดหรือค่าสูงสุด (Threshold level) ไว้ค่าหนึ่ง เมื่อคลื่น AE ออกจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ก็จะตัดช่วงที่เกินกว่าค่าสูงสุด แล้วนับจำนวนรอบทั้งหมดของสัญญาณส่วนที่เกินกว่าค่าสูงสุดนั้น

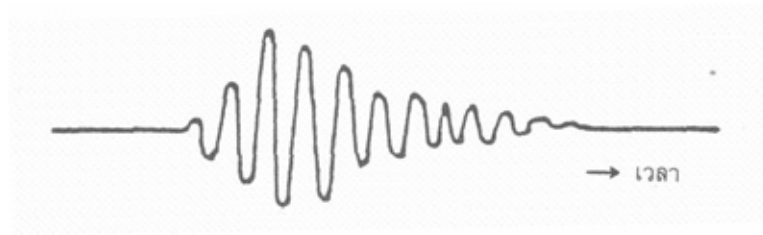


รูปที่ 2.8 วิธีการวัดอัตราการเกิด AE โดยกำหนดค่าสูงสุดของ AE ที่ผ่านออกจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (วิธีการนับแบบ Ring down)

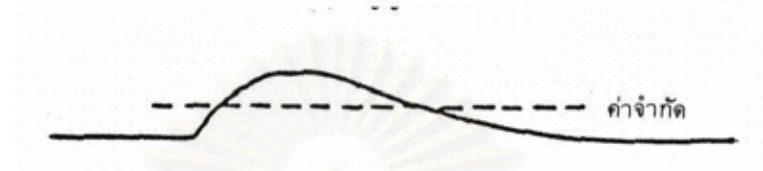
ตามวิธีการนี้ จะเป็นวิธีการนับจำนวนยอดคลื่นที่มีความไวสูง (Amplitude) เกินกว่าขีดจำกัด ซึ่งเรียกว่า วิธีการนับแบบ Ring down method

ส่วนอีกวิธีหนึ่งนั้น จะเป็นการนับยอดคลื่นเฉลี่ยจากยอดคลื่นทั้งหมดหรือเป็นคลื่นหุ้ม (Envelope wave) ซึ่งมีค่าเกินกว่าค่าสูงสุด ค่าหนึ่งเป็นค่าจำนวนการเกิด AE วิธีการนี้เรียกว่า วิธีการนับจำนวนการเกิด AE ซึ่งปัจจุบันใช้วิธีการนี้กันมาก ดังรูปที่ 2.9

อิทธิพลจากคลื่นโดยรอบและคลื่นสะท้อนนั้นไม่มีผลทำให้คลื่น AE นั้นลดลงอย่างสม่ำเสมอ เปรียบเทียบกันแล้วคลื่น AE จะเป็นคลื่นที่สั้นอยู่เป็นระยะเวลาสั้น ดังนั้น คลื่น AE 1 ลูก อาจถูกนับเป็นหลายๆ ลูกได้ ดังนั้น จึงต้องมีการ เก็บ (Hold) คลื่นส่วนหนึ่งไว้ไม่นับรวมเข้าไป เช่น ที่เป็นเส้นประในรูปที่ 2.9 (ค)



(ก) สัญญาณ AE



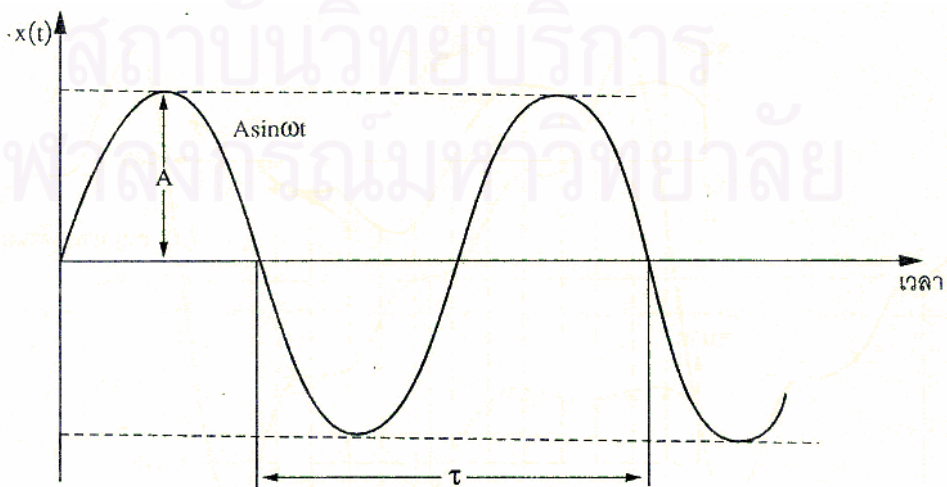
(ข) เอ้าท์พุทของคลื่นเฉลี่ย



(ค) เอ้าท์พุทจากอุปกรณ์จากอุปกรณ์แปลงสัญญาณ

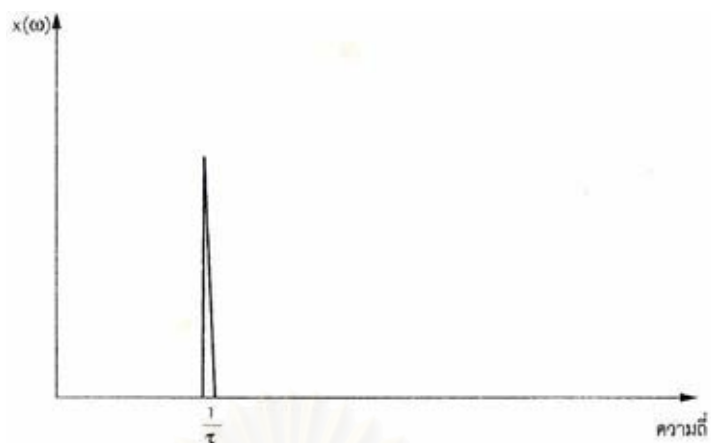
รูปที่ 2.9 วิธีการนับสัญญาณ AE ที่ผ่านการเฉลี่ยหรือหุ้มแล้ว (วิธีการนับจำนวนการเกิด AE)

การวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่[2] จะใช้หลักการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) มาใช้แปลงสัญญาณในโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ ยกตัวอย่างสัญญาณคลื่นรูปไซน์บนโดเมนเวลาถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 สัญญาณนี้จะมีค่าความถี่ค่าเดียว ซึ่งก็คือ  $1/\tau$  เมื่อ  $\tau$  คือคาบของสัญญาณที่ครบ 1 รอบ ดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวนี้ไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ ก็จะมีสัญญาณเพียงค่าเดียวบนแกนความถี่ดังรูปที่ 2.11



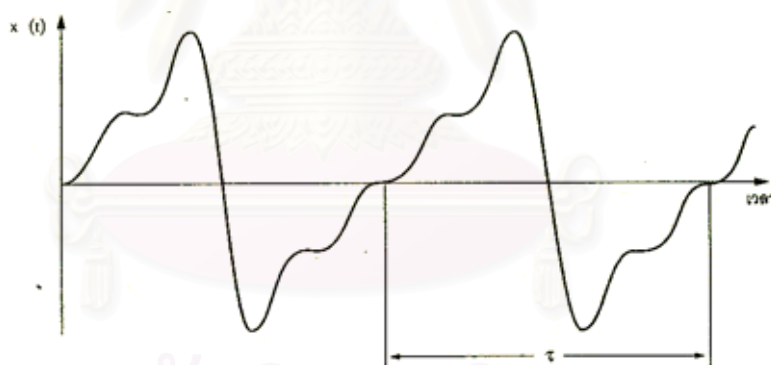
รูปที่ 2.10 สัญญาณบนโดเมนเวลา



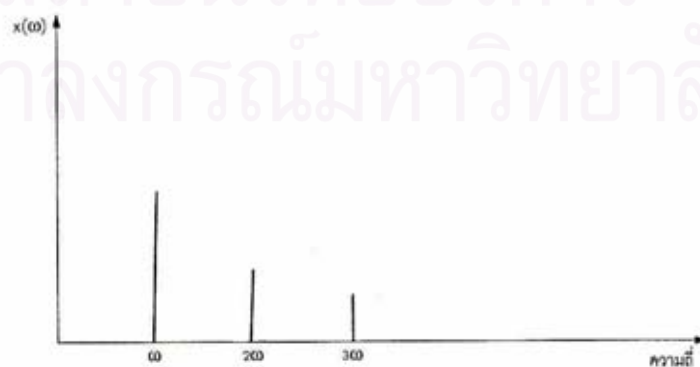


รูปที่ 2.11 สัญญาณบนโดเมนความถี่

ในตัวอย่างที่สองเมื่อมีสัญญาณอยู่ในรูปของลักษณะเป็นคาบซึ่งเขียนบนโดเมนเวลา เมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้จะสามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์มอนิกได้หลายความถี่โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้สัญญาณโดเมนเวลาสามารถเขียนเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3 ความถี่คือ ที่  $\omega$ ,  $2\omega$  และ  $3\omega$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 และ 2.13 โดย  $\omega = 1/\tau$

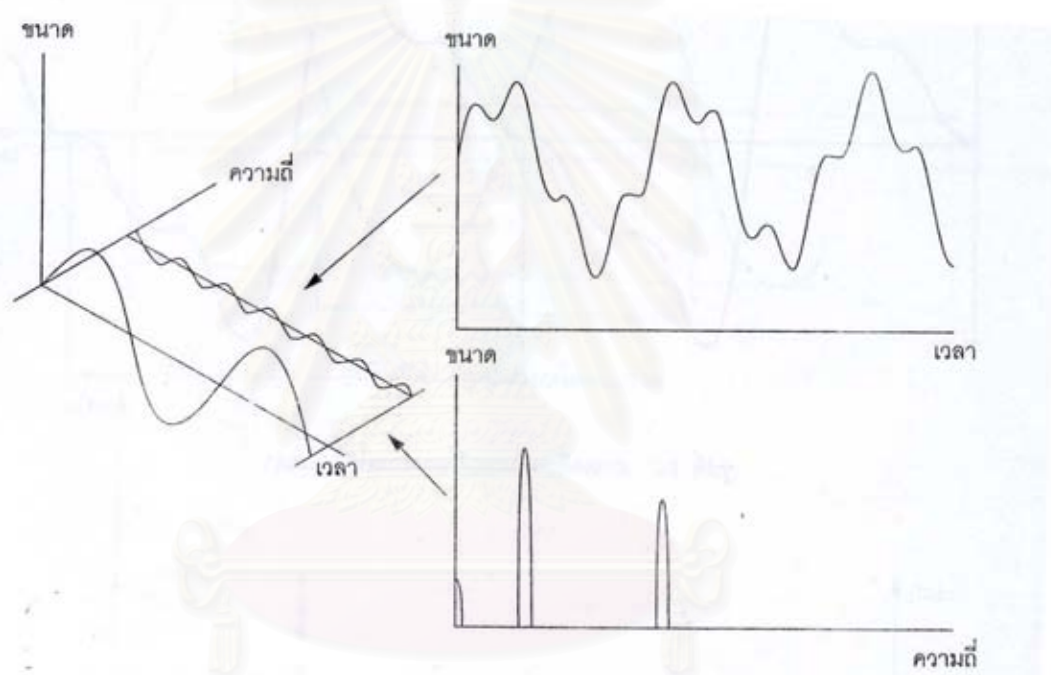


รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนเวลา



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนความถี่

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน ถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาสู่สัญญาณบนโดเมนความถี่ การมองแบบ 3 มิติจึงถูกเขียนขึ้น และแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ซึ่งภาพ 3 มิตินี้จะมีแกนตั้งเป็นแกนที่แสดงถึงขนาดของสัญญาณ ในขณะที่แกนนอนหนึ่งเป็นแกนเวลาและแกนในแนวนอนซึ่งตั้งฉากกับแกนแนวนอนแรกจะเป็นแกนความถี่ ในรูปที่ 2.14 นี้จะแสดงถึงสัญญาณคลื่นรูปไซน์ 2 รูป ที่มีความถี่ต่างกัน โดยมีรูปคลื่นรูปใหญ่มีความถี่น้อยกว่าคลื่นรูปเล็ก เมื่อมองสัญญาณในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนเวลา จะเห็นเป็นสัญญาณลักษณะเป็นคาบของโดเมนเวลา ตามที่แสดงไว้ในภาพทางขวามือบน และเมื่อมองสัญญาณในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนความถี่ก็จะเห็นเป็นสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน โดยสัญญาณขนาดใหญ่อยู่ที่ความถี่ต่ำ และสัญญาณในขนาดที่เล็กกว่าอยู่ที่ความถี่สูงกว่า



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา และโดเมนความถี่

และนอกจากพารามิเตอร์ของ AE ที่กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังมีพารามิเตอร์อีกมากมาย ซึ่งในขั้นต้นจะไม่ขอกล่าวไว้ในครั้งนี้

## 2.6. ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์

วิธีอะคูสติกอิมพัลส์จะมีข้อจำกัดในส่วนต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นข้อดี และข้อเสียได้ดังนี้

ข้อดี

- (1) สามารถตรวจสอบชิ้นงาน ขณะเกิดความเสียหายได้
- (2) การตรวจสอบสามารถตรวจจับและประเมินค่ารอยบกพร่องที่สำคัญทั่วทั้ง

โครงสร้างในการตรวจสอบครั้งเดียว

- (3) สามารถตรวจสอบโดยเครื่องจักรไม่ต้องหยุดการทำงาน
- (4) สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเครื่องจักรได้

ข้อเสีย

- (1) ไม่สามารถทำการตรวจสอบซ้ำได้
- (2) ไม่สามารถทำการตรวจสอบชิ้นงานที่มีความเสียหายอยู่ก่อนแล้วได้
- (3) การวิเคราะห์ผลการทดสอบจำเป็นต้องใช้ความรู้ความชำนาญมาก

ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกที่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ โดยมีข้อดี คือ สามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกก่อนที่สปินเดิลมอเตอร์จะเกิดความเสียหาย และอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน เช่นการทดสอบด้วยวิธีการสั่นสะเทือน (Vibration testing) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 ฮาร์ดดิสก์

##### 3.1.1 หน้าที่ของฮาร์ดดิสก์

คอมพิวเตอร์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนประมวลผล ส่วนรับข้อมูล และส่วนแสดงผล การที่คอมพิวเตอร์จะสามารถนำข้อมูลมาประมวลผลได้นั้นก็จำเป็นต้องมีข้อมูล ซึ่งข้อมูลนั้นจะถูกนำมาจากที่แห่งหนึ่ง นั่นก็คือส่วนที่เรียกว่า Storage คอมพิวเตอร์ในยุคแรกจะเป็นกระดาษที่เป็นรู ซึ่งใช้งานยาก จากนั้นได้ถูกพัฒนามาใช้แผ่นพลาสติกที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็ก ที่เรียกว่า Diskette ต่อมาเมื่อข้อมูลมากขึ้น จำนวนการเก็บข้อมูลก็มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้การเก็บข้อมูลลงบนแผ่น Diskette นั้นไม่เพียงพอ ต่อมาจึงพัฒนาการเก็บข้อมูลมาเป็นการเก็บข้อมูลลงในอุปกรณ์ที่เรียกว่าฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) หรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) ถูกแสดงในรูปแบบที่ 3.1



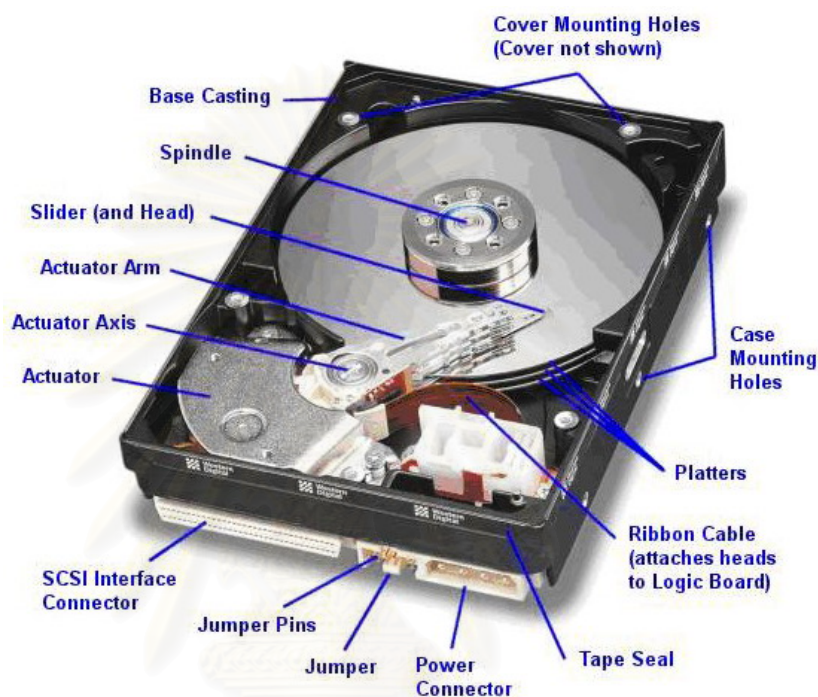
รูปที่ 3.1 ฮาร์ดดิสก์

ฮาร์ดดิสก์เป็นอุปกรณ์สำหรับการเก็บข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ซึ่งต่างจาก RAM (เป็นหน่วยความจำของระบบ) คือ ฮาร์ดดิสก์จะยังจำข้อมูลได้แม้ว่าจะปิดเครื่องไปแล้วเหมือนเทป ฮาร์ดดิสก์ประสบความสำเร็จโดยการบันทึกข้อมูลเป็นแม่เหล็กลงบนพื้นผิวชนิดพิเศษ (ไม่มีสนามแม่เหล็กแรงสูงมากๆ มาเกี่ยวข้อง) สามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้เป็นเวลาหลายๆ ปี ฮาร์ดดิสก์ตัวแรกถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ.1950 และใช้งานหมุนวงกลมขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเกือบ 2 ฟุต เก็บข้อมูลได้เพียงไม่กี่เมกกะไบต์ ลักษณะทางกายภาพต่างไปจาก Floppy

Disk ที่จานเหล่านี้จะมีความแข็งแรงมากกว่า ดังนั้นจึงได้ชื่อว่า Hard Disk ในปัจจุบันจานฮาร์ดดิสก์เหล่านี้มีขนาดเล็กลงมากและหมุนได้เร็วมาก รวมทั้งเก็บข้อมูลได้มากกว่าอีกด้วย

### 3.1.2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

องค์ประกอบหลักที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์โดยพื้นฐาน(แสดงดังรูปที่ 3.2) มีดังนี้



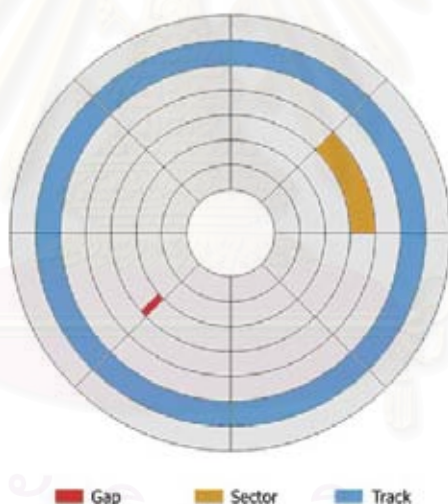
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

- (1) จานฮาร์ดดิสก์ (Disk platters)
- (2) หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Read/Write heads)
- (3) แขนที่ใช้ขับเคลื่อนหัวฮาร์ดดิสก์ (Head Arm/Head Slide)
- (4) มอเตอร์ที่ใช้หมุนจานฮาร์ดดิสก์ หรือ สปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor)
- (5) แผงวงจรควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ (Logic board)
- (6) ส่วนที่ใช้กรองอากาศ (Air filter)
- (7) สายสัญญาณและ Connector (Cables and connectors)
- (8) กลไกที่ใช้ขับเคลื่อนหัวฮาร์ดดิสก์ (Head actuator mechanism)
- (9) Jumper ที่ใช้จัดตั้ง Configuration ของฮาร์ดดิสก์
- (10) สาย Pair Ribbon ที่เชื่อมระหว่างหัวฮาร์ดดิสก์ กับ Logic Board



ฮาร์ดดิสก์ถูกป้อนแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงผ่านทางสาย Power Connector ซึ่งใช้สายไฟ 4 เส้น ได้แก่ สีแดง สำหรับไฟ +5V สีเหลือง สำหรับไฟ +12V ส่วนสีดำ จะเป็น Ground แรงดันไฟที่ใช้เลี้ยงฮาร์ดดิสก์นี้ หากมีความคลาดเคลื่อนก็ต้องไม่เกินบวกลบ 0.5V

จานดิสก์ (Disk platter) เป็นส่วนประกอบในรูปแบบของจานโลหะติดตั้งอยู่ภายในตัวฮาร์ดดิสก์โดยจานดิสก์จะมีขนาด และจำนวนแผ่นในฮาร์ดดิสก์ของแต่ละรุ่นจะไม่เท่ากัน ขนาดของจานดิสก์ เรียกว่า Form Factor ของฮาร์ดดิสก์ มีขนาดต่างๆ เช่น 5.25 นิ้ว 3.5 นิ้ว 2.5 นิ้ว และปัจจุบันมีขนาดเล็กถึง 1 นิ้ว แผ่นจานแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ จะมีความหนาแน่นของการจัดข้อมูลบนผิวหน้าได้สูงกว่าแผ่นดิสเกตต์มาก เช่น แผ่นดิสเกตต์มาตรฐานขนาด 5.25 นิ้ว ความจุ 360 กิโลไบต์ จะมีจำนวนวงรอบบันทึกข้อมูลหรือเรียกว่า แทร็ก(track) อยู่ 40 แทร็ก กรณีของฮาร์ดดิสก์ขนาดเดียวกันจะมีจำนวนวงรอบสูงมากกว่า 1000 แทร็กขึ้นไป ขณะเดียวกันความจุในแต่ละแทร็กของฮาร์ดดิสก์ก็จะสูงกว่า ซึ่งประมาณได้ถึง 5 เท่าของความจุในแต่ละแทร็กของแผ่นดิสเกตต์ รูปที่ 3.3 แสดง แทร็ก (track) และ เซ็กเตอร์ (sector) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของแทร็กอีกที



รูปที่ 3.3 แสดงแทร็กบนจานดิสก์ (Disk platter)

อุปกรณ์อีกชิ้นที่อยู่ในฮาร์ดดิสก์ คือแขนกลที่ติดตั้งหัวฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่า Head Slider ซึ่งตัว Slider นั้นมีรูปร่างคล้ายกับยอดแหลมของเรือใบโดยมีจุดกึ่งกลางที่มีไว้เป็นตัวนำพาหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ให้วิ่งไปมาเหนือจานฮาร์ดดิสก์ (Disk platter) ขนาดมาตรฐานของ Slider โดยทั่วไปจะอยู่ที่  $0.08 \times 0.063$  นิ้ว สำหรับฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว ขนาดของ Slider นี้ ถูกเรียกว่า "Nano Slider" เนื่องจากมีขนาดเล็ก

หัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ (Read/Write head) นั้นสามารถบินอยู่เหนือพื้นที่จัดเก็บข้อมูลหรือจานดิสก์ ทันทีที่ได้รับตำแหน่งมาจากซีพียู ซึ่งการเข้าถึงข้อมูลแบบสุ่มนี้เป็นเหตุผลสำคัญ ที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์ สามารถแทนที่เทปในการเก็บข้อมูลหลักของคอมพิวเตอร์ ปกติจำนวนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของจานดิสก์ ซึ่งหมายความว่า ฮาร์ดดิสก์ที่มี 2 จาน จะต้องมีย่านอ่านของฮาร์ดดิสก์นี้ถึง 2 หัว (หัวบนและหัวล่างต่อ 1 จานฮาร์ดดิสก์)

การเขียนข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์นั้นจะเริ่มเขียนจากรอบนอกสุด ของฮาร์ดดิสก์ก่อน จากนั้นเมื่อข้อมูลใน Track นอกสุดถูกเขียนจนเต็มหัวอ่านก็จะเคลื่อนมายังแทร็กถัดมา ที่ว่างแล้วทำการเขียน ข้อมูลต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งก็ด้วยวิธีการนี้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงเป็นอย่างมาก เพราะหัวอ่านเขียนสามารถบันทึกข้อมูลได้มากกว่า ในตำแหน่งหนึ่งก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปยังแทร็กถัดไป ตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีฮาร์ดดิสก์แบบ 4 จานดิสก์อยู่และหัวอ่านเขียนอยู่ที่แทร็ก 15 ไดรฟ์จะเขียนข้อมูลลงในแทร็ก 15 บนทั้ง 2 ด้านของจานดิสก์ทั้ง 4 จนเต็มจากนั้นจึงเคลื่อนเข้าไปหาที่แทร็ก 16 ต่อไป การหมุนของจานดิสก์นั้นนับได้ว่า เร็วมาก ความเร็วต่ำสุดก็เท่ากับ 3,600 รอบต่อนาที และปัจจุบันสูงสุดนับหมื่นรอบ ซึ่งเป็นการทำงานที่เร็วกว่า ฟลอปปีดิสก์หรือเทปมาก

ด้วยความเร็วขนาดนี้ทำให้หัวอ่านขนาดเล็กสามารถลอยหรือบินอยู่เหนือพื้นผิวได้ หัวอ่านนั้นได้รับการออกแบบให้บินอยู่เหนือแผ่นจานดิสก์ที่กำลังหมุนอยู่ด้วยความเร็วสูงนี้ ในความสูงเพียง 3 ล้านส่วนของนิ้ว ซึ่งเท่ากับวาระยะห่างระหว่างหัวอ่านและจานดิสก์นั้นมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคนเราหรือแม้กระทั่งฝุ่นมาก ปกติหัวฮาร์ดดิสก์ หรือ Read/Write Head นี้จะต้องไม่สัมผัสกับจานดิสก์ ขณะที่มีการทำงานปกติ แต่เมื่อใดที่ฮาร์ดดิสก์หยุดการทำงาน หัวอ่านของฮาร์ดดิสก์นี้จะสัมผัสกับจานดิสก์ สาเหตุที่หัวฮาร์ดดิสก์สามารถลอยตัวอยู่เหนือจาน ได้ เนื่องจากการหมุนด้วยความเร็วสูงของจานดิสก์ ทำให้เกิดแรงกระพือของลมที่อยู่ภายในตัวฮาร์ดดิสก์ ขณะที่จานหมุนจะช่วยยกหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ให้ลอยตัวขึ้นจากจานดิสก์ได้ แต่ถ้าหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์มีการสัมผัสกับจานดิสก์ในขณะหมุน จะทำให้เกิดการผิดพลาดในการอ่านและบันทึกข้อมูล ระดับความสูงของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ ที่ลอยเหนือจานฮาร์ดดิสก์ (Disk Platter) ซึ่งโดยปกติมีค่าประมาณ 5-7 ไมโครเมตรเท่านั้น แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทั้งความจุข้อมูล (Recording Densities) ที่มากถึงระดับ 1 เทอระบิตต่อตารางนิ้ว (Terabit per square inch) และออกแบบให้ขนาดของฮาร์ดดิสก์เล็กลงถึง 1 นิ้ว ทำให้หัวอ่านลอยอยู่เหนือจานดิสก์ เพียง 0.07-0.12 ไมโครเมตรเท่านั้น

ด้วยสาเหตุนี้ทำให้การหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ จึงมีความสำคัญอย่างมากในการบันทึกข้อมูล เนื่องจากว่าสปินเดิลมอเตอร์เป็นตัวทำให้ให้จานดิสก์หมุน ซึ่งถ้าสปินเดิลมอเตอร์หมุน

แบบไม่สมดุล จะทำให้การหมุนของจานดิสก์ไม่สมดุลเช่นกัน และอาจก่อให้เกิดอ่านหรือบันทึกข้อมูลที่ผิดพลาดได้ ซึ่งสปินเดิลมอเตอร์จะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไป

## 3.2 สปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

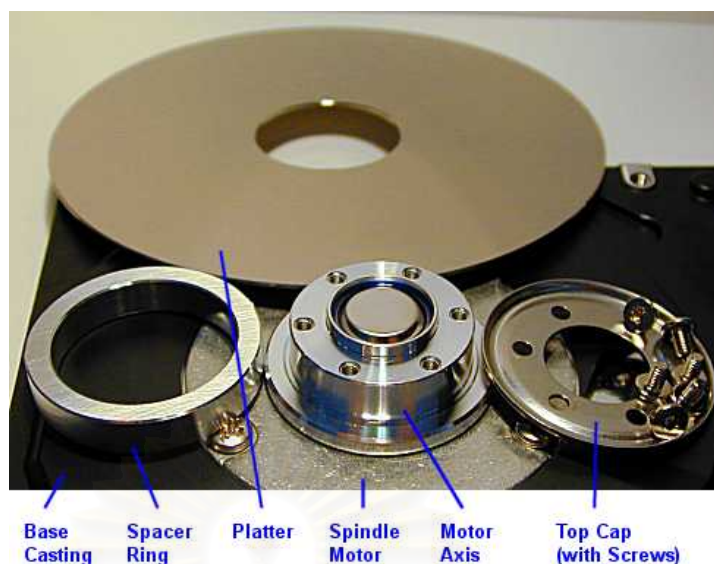
### 3.2.1 หน้าที่ของสปินเดิลมอเตอร์

สปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor) (ถูกแสดงในรูปที่ 3.4) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หมุนจานดิสก์ ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อให้ผิวของจานดิสก์เคลื่อนที่ผ่านหัวอ่านที่ทำหน้าที่อ่านข้อมูลที่บันทึกอยู่บนแผ่นจานดิสก์ ความเร็วในการหมุนแผ่นนี้มีผลต่อความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล (Access Time) และความเร็วในการอ่านข้อมูลด้วย โดยถ้ามีความเร็วสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลก็จะน้อยลง และขณะเดียวกันจานดิสก์ ก็จะเคลื่อนที่ผ่านหัวอ่านได้เร็วขึ้น ทำให้อ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วที่มากขึ้นด้วย ความเร็วของสปินเดิลของฮาร์ดดิสก์แต่ละตัว มักจะปรากฏในคุณสมบัติของฮาร์ดดิสก์ตัวนั้น เช่น 5400 7200 RPM (Revolutions per minute) เป็นต้น



รูปที่ 3.4 รูปสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

จากรูปที่ 3.4 สปินเดิลมอเตอร์จะถูกยึดกับฐานมอเตอร์ (Motor base หรือ base casting) ด้วยสกรู โดยยึดในตำแหน่ง รูทั้ง 3 รูรอบๆ สปินเดิลมอเตอร์ สปินเดิลมอเตอร์จะยึดโดยตรงกับแผ่นจานดิสก์ โดยไม่มีสายพาน (Belt) หรือ ฟันเฟือง(Gear) ช่วยในการยึด และแผ่นจานดิสก์จะถูกยึดกับสปินเดิลมอเตอร์ด้วยสกรูในตำแหน่ง รูเล็กๆทั้ง 6 รู บนส่วนบนของสปินเดิลมอเตอร์ และมี Spacer ring คั่นระหว่างแผ่นจาน (ในกรณีมีหลายแผ่นจานดิสก์) ปิดท้ายด้วย Top cap ซึ่งยึดด้วยสกรู กับรูในตำแหน่งแกนกลาง (Shaft) หรือถ้าไม่มีรูแกนกลาง (shaft) ก็จะใช้ยึดกับรูเล็กๆ ทั้ง 6 รู ซึ่งเป็นรูเดียวกับที่ยึดแผ่นจาน ดังรูปที่ 3.5 นอกจากนี้สายไฟ เส้นสี ดำ ขาว แดง และเขียว ถูกเชื่อมต่อกับแผงวงจรควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ (Logic board)



รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นส่วนในการยึดแผ่นจานกับสปินเดิลมอเตอร์

เป็นที่ทราบดีว่า ความถูกต้องแม่นยำ (Precision) มีความสำคัญมากต่อฮาร์ดดิสก์ ดังนั้นในการสร้างสปินเดิลมอเตอร์ จำเป็นต้องออกแบบอย่างซับซ้อน และมีคุณสมบัติดังนี้

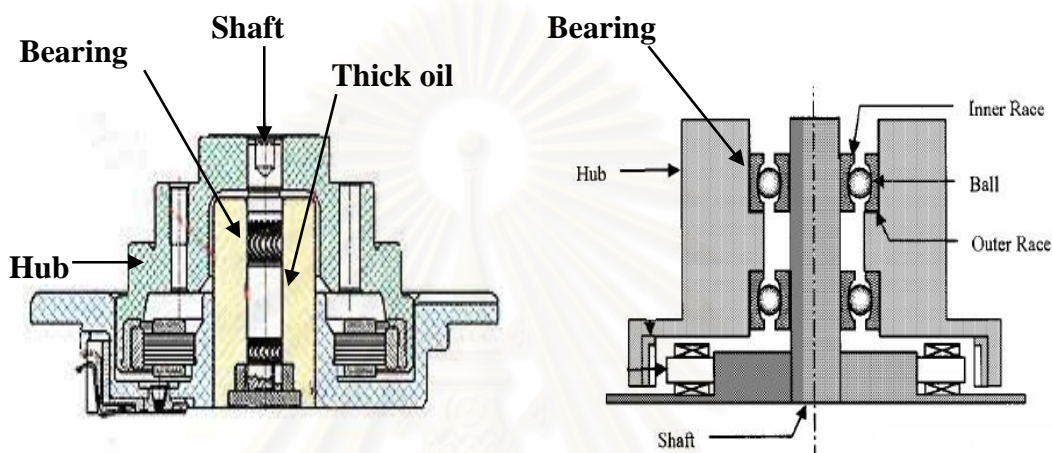
- (1) มีคุณภาพสูง (High quality) คือสามารถหมุนได้หลายพันรอบต่อชั่วโมง โดยจะต้องมีความแตกต่างกันน้อยที่สุดทั้งรอบแรกและรอบสุดท้ายของการหมุน
- (2) หมุนอย่างราบเรียบ (smooth) มีการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด เนื่องจากมันต้องยึดติดกับแผ่นจานดิสก์
- (3) ผลิตสัญญาณรบกวนและความร้อนที่ไม่มากเกินไป
- (4) ใช้กำลังไฟต่ำ

สิ่งหนึ่งที่สำคัญมาก ที่จำเป็นต้องคำนึงถึงในฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน คือสัญญาณรบกวน (Noise) , ความร้อน (Heat) และการสั่นสะเทือน (Vibration) ของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ เดิมฮาร์ดดิสก์หมุนด้วยความเร็ว 3600 RPM ทำให้ปัญหาเหล่านี้เกิดน้อย แต่ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์มีความเร็วถึง 7200 หรือ 10000 RPM ซึ่งสามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวน, ความร้อนและการสั่นสะเทือนที่มากขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ให้ซับซ้อนมากขึ้นใน อาทิเช่น มีการใช้ระบบหล่อเย็น เข้ามาช่วยในระบบระบายความร้อน เป็นต้น



### 3.2.2 ส่วนประกอบของสปินเดิลมอเตอร์

ส่วนประกอบของสปินเดิลมอเตอร์ ถูกแสดงดังรูปที่ 3.6 โดย แบริ่ง (Bearing) เป็นส่วนประกอบที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน และการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ แบริ่ง (Bearing) เป็นส่วนที่อยู่รอบๆ แกนหมุน (Shaft) ซึ่งเป็นส่วนที่วิศวกรออกแบบจะต้องทำการออกแบบให้เป็นอย่างดี



(ก) สปินเดิลมอเตอร์ชนิดฟลูอิดไดนามิกแบริ่ง

(ข) สปินเดิลมอเตอร์ชนิดบอลแบริ่ง

รูปที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบของสปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor)

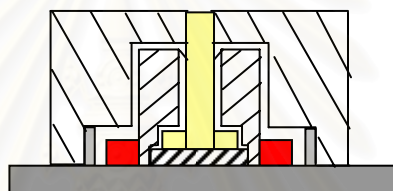
ฮาร์ดดิสก์ส่วนใหญ่ใช้บอลแบริ่ง (Ball bearing) หรือตลับลูกปืน โดยจะมีโลหะกลมขนาดเล็กอยู่ภายในช่องว่างวงแหวนรอบๆ แกนหมุน ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นแกนหมุน (Shaft) เวลาหมุน การกระทบกันระหว่างโลหะกลมนี้เองเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) และความร้อน (Heat) เกิดขึ้น ปัจจุบันมีการออกแบบแบริ่งที่เรียกว่า ฟลูอิดไดนามิกแบริ่ง (Fluid-dynamic bearings) จะใช้ของเหลว (Thick oil) แทนที่โลหะกลม โดยจะอยู่ระหว่างแกนหมุนกับแบริ่ง เพื่อลดสัญญาณรบกวน และความร้อนนั่นเอง

จากที่กล่าวการสั่นสะเทือนของแบริ่ง หรือสปินเดิลมอเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากเป็นส่วนที่ยึดติดกับแผ่นจานดิสก์ ซึ่งถ้าสปินเดิลมอเตอร์มีการสั่นสะเทือนมาก จนทำให้เกิดการสัมผัสกันของหัวอ่านและแผ่นจานดิสก์ จะทำให้การอ่านข้อมูลมีความผิดพลาดนั่นเอง การสั่นสะเทือนเป็นรูปแบบของการหมุนที่ไม่สมดุลของมอเตอร์ (Unbalance motor) โดยความไม่สมดุล (Unbalance) นี้จะเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญที่จำเป็นต้องตรวจสอบในกระบวนการผลิตสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

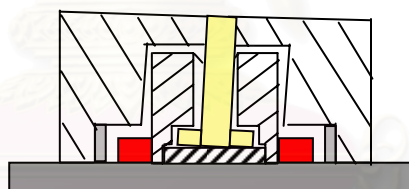


ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ หรือสปินเดิลมอเตอร์มีวิธีในการตรวจสอบความไม่สมดุล (Unbalance) ของสปินเดิลมอเตอร์อยู่หลายวิธี อาทิเช่น การทดสอบการสั่นสะเทือน (Vibration testing) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่เก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที (FFT data collector and analyzer) ซึ่งจะถูกลำถึงในหัวข้อต่อไป

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้วิธีการทดสอบด้วยวิธีอะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic emission, AE) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์กับค่าสัญญาณ AE โดยสันนิษฐานว่าถ้าความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์มีค่ามากขึ้นจะทำให้เกิดการสัมผัสกันหรือการเสียดสีทางพลาสติกของส่วนประกอบต่างๆภายในสปินเดิลมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสัมผัส หรือการเสียดสีกันของลูกปืนภายในตลับลูกปืน และลักษณะดังกล่าวล้วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดคลื่นอะคูสติกออกมา รูปที่ 3.7 แสดงการสัมผัสกันของส่วนประกอบภายในของสปินเดิลมอเตอร์ชนิดฟลูอิดไดนามิกแบร์ริง



(ก) รูปสปินเดิลมอเตอร์สภาวะสมดุล (Balance motor)



(ข) รูปสปินเดิลมอเตอร์สภาวะไม่สมดุล (Unbalance motor)

รูปที่ 3.7 แสดงรูปจำลองส่วนประกอบภายในเปรียบเทียบระหว่าง สปินเดิลมอเตอร์ที่สมดุล (Balance motor) และไม่สมดุล (Unbalance motor) ของสปินเดิลมอเตอร์ชนิดฟลูอิดไดนามิกแบร์ริง

สาเหตุที่ใช้วิธีการทดสอบแบบ AE มาทดสอบความไม่สมดุลของมอเตอร์ (Unbalance motor) เนื่องจากการทดสอบแบบแสดงภาพเวลาจริง (Real time) มีความไวในการตรวจจับสัญญาณสูง (High sensitivity) และเป็นการทดสอบที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ เนื่องจากมีระบบการทดสอบที่ดี และการทดสอบแบบ AE เป็นการทดสอบคลื่นความถี่สูงทำให้สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ต่ำถูกตัดออกไป นอกจากนี้สามารถควบคุมการวัดได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องควบคุมสิ่งแวดล้อมในการวัดมากเท่ากับการทดสอบแบบการสั่นสะเทือน (Vibration testing)

### 3.3 การทดสอบด้วยวิธีการสั่นสะเทือน (Vibration testing)

การสั่นสะเทือน[2] คือ ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุภายใต้แรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นแรงภายในหรือภายนอกก็ได้

#### 3.3.1 ประเภทของการสั่นสะเทือน

##### (1) การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration)

คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบ โดยปราศจากแรงภายนอกกระทำ

##### (2) การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้น (Forced vibration)

คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบอันเกิดจากแรงภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นไปตามลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ของแรงที่มากระตุ้นระบบ หากความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำนั้นตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบ ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance) ขึ้น นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายขึ้นอย่างมากจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ ความเสียหายที่เกิดจากโครงสร้างใหญ่ๆ อาทิ สะพาน อาคารสูง หรือปีกเครื่องบิน ในหลายๆเหตุการณ์เกิดจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์เป็นสาเหตุหลักสาเหตุหนึ่ง ดังนั้นการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก

#### 3.3.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน สามารถกระทำโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น แล้วนำผลเฉลยทางคณิตศาสตร์มาพิจารณา ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้บรรยายปรากฏการณ์ทางคณิตศาสตร์นั้น จำนวนพิกัดอิสระ (Independent coordinate) ที่ใช้ในการบรรยายการเคลื่อนที่ของระบบจะถูกเรียกว่า จำนวนลำดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ของระบบนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าอนุภาคอิสระเคลื่อนที่ไปในสามมิติ อนุภาคก็จะมีลำดับขั้นเสรีเท่ากับ 3 เพราะต้องการพิกัด  $x, y, z$  ในการกำหนดตำแหน่งของอนุภาค ในขณะที่วัตถุเกร็งเคลื่อนที่ในสามมิติ ต้องการลำดับขั้นความเสรีเท่ากับ 6 กล่าวคือ ใช้พิกัด  $x, y, z$  ในการกำหนดตำแหน่ง และมุมอีกสามมุมในการกำหนดลักษณะการหมุนของวัตถุเกร็งรอบแกน  $x, y, z$  ด้วย นอกจากนี้สำหรับวัตถุยืดหยุ่นที่ยาวต่อเนื่อง (Continuous elastic body) นั้น ต้องใช้จำนวนพิกัดเป็นอนันต์ในการบรรยายการเคลื่อนที่หรือตำแหน่งของวัตถุดังกล่าว (6 พิกัด สำหรับตำแหน่งแต่ละตำแหน่งบนวัตถุต่อเนื่อง) อย่างไรก็ตาม ในหลายกรณี การวิเคราะห์ระบบดังกล่าวจะสามารถ

กระทำได้ โดยการให้สมมติฐานและการประมาณการใช้ระบบดังกล่าวมีลำดับชั้นความเร็วเป็นจำนวนที่นับได้ และเป็นที่น่าสนใจว่าในหลายๆ กรณี การวิเคราะห์ระบบดังกล่าวสามารถกระทำได้อย่างแม่นยำ โดยการสมมติฐานให้ระบบมีการเคลื่อนที่ที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมพื้นฐานของการสั่นสะเทือนจึงจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับหนึ่งมาบรรยาย เพื่อการศึกษาผลตอบสนองในโหมด (Mode) โดโหมดหนึ่ง ในการครั้งนี้จะขออธิบายเพียงหลักการเบื้องต้น เพื่อความเข้าใจ

### 3.3.3 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักร จะสามารถนำมาช่วยในการบ่งบอกถึงสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักร พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบด้วย

#### (1) ความถี่

ความถี่ในที่นี้หมายถึงความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งหากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาก็จะหมายถึง จำนวนของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น CPM (Cycle Per Minute) พารามิเตอร์ความถี่นี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพความเสียหายได้ถ้าหากนำพารามิเตอร์นี้ไปใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

#### (2) ขนาดของการสั่นสะเทือน

เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัว ที่ใช้บ่งบอกสภาพของวัตถุ การสั่นสะเทือนอาจเปรียบเทียบได้กับการสั่นสะเทือนของระบบมวลและสปริง ดูได้จากรูปที่ 3.8 โดยทั่วไปแล้วขนาดของการสั่นสะเทือนหากมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึงวัตถุนั้นเริ่มมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์หลักที่นิยมใช้ได้แก่

(ก) การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ คือ ระยะการเคลื่อนที่ของมวลจากสมดุล ในกรณีนี้วัดค่าจากค่าสูงสุดไปยังค่าต่ำสุด (Peak to peak) จะเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่ตัวมวลเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละวัฏจักร

(ข) ความเร็วของการสั่นสะเทือน คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวล ดังนั้นมวลจะมีความเร็วศูนย์เมื่อมวลเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และจะมีความเร็วสูงสุดในขณะที่มวลเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ค่าการขจัดจะสัมพันธ์กับค่าความเร็วเป็นซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (3.1)

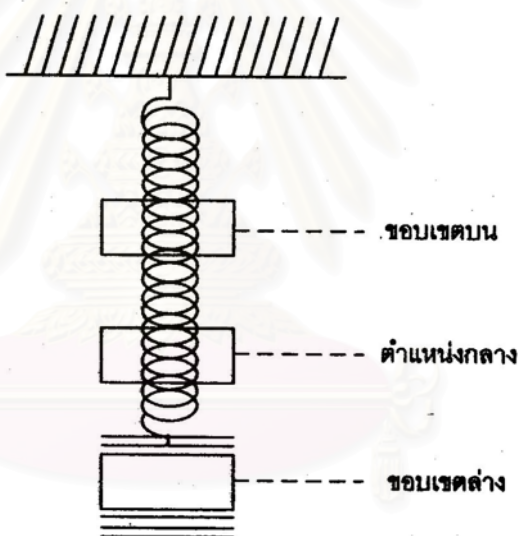
$$V = \frac{dx}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $V$  คือ ความเร็วของการสั่นสะเทือน  
 $x$  คือ ระยะการเคลื่อนที่  
 $t$  คือ เวลาในการเคลื่อนที่

(ค) ความเร่งในการสั่นสะเทือน คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมวลในขณะเคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลอยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (3.2)

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.2)$$

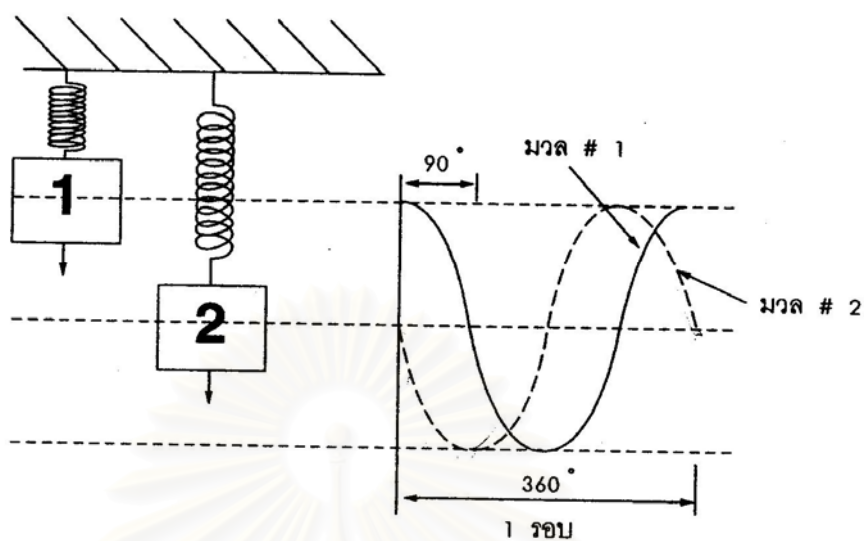
เมื่อ  $a$  คือ ความเร่งในการสั่นสะเทือน



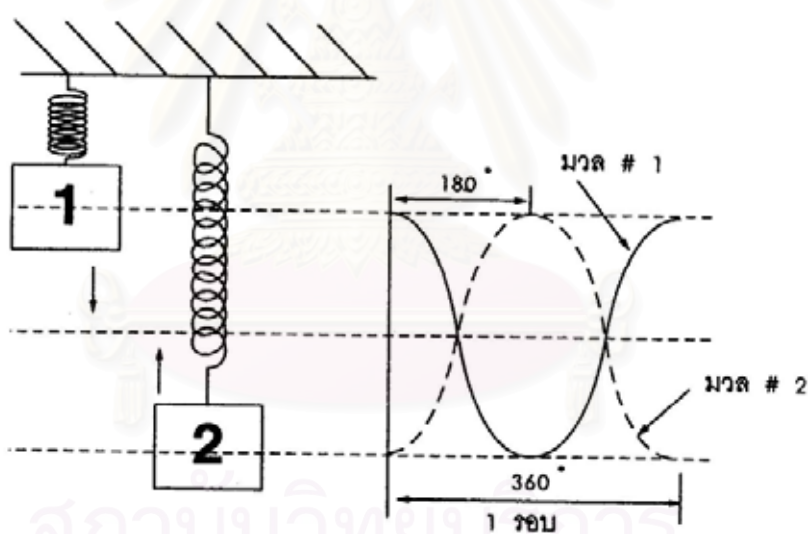
รูปที่ 3.8 การสั่นสะเทือนของระบบมวลและสปริง

### (3) มุมเฟส

จะเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งขึ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนขึ้นหนึ่งเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือขึ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกขึ้นหนึ่ง รูปที่ 3.9 แสดงถึงมวล 2 มวล ที่มีการเคลื่อนที่ต่างกันเป็นมุมเฟส 90 องศา นั่นคือมวล 2 จะเคลื่อนที่นำหน้ามวล 1 อยู่หนึ่งในสี่รอบของการเคลื่อนที่ (หรือ 90 องศา) ดังนั้นมวล 2 จะมีมุมเฟสนำหน้ามวล 1 อยู่ 90 องศา หรือหากมองจากอีกมุมหนึ่งอาจกล่าวได้ว่า มวล 1 มีมุมเฟสตามหลังการเคลื่อนที่ของมวล 2 อยู่ 90 องศา และรูป 3.10 แสดงมวล 2 มวล ที่มีการเคลื่อนที่โดยมีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา



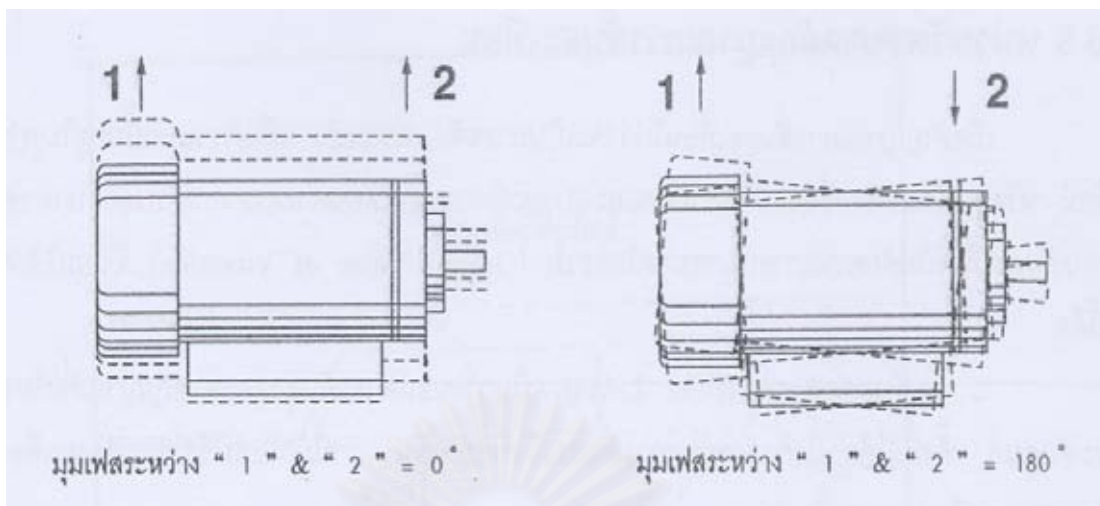
รูปที่ 3.9 มวล 2 มวลมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา



รูป 3.10 แสดงมวล 2 มวลมีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา

มุมเฟสจะใช้เป็นข้อมูลบอกลักษณะการเคลื่อนที่ตำแหน่งต่างๆ บนวัตถุที่เราต้องการวัด และรูป 3.11 แสดงถึงตัวอย่างการวัดมุมเฟสที่นำไปใช้กับการตรวจวัดการสั่นสะเทือน เพื่อบอกลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยรูปทางซ้ายแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2 เท่ากัน คือ มีค่ามุมเฟสต่างกัน 0 องศา หรือมักเรียกว่า การเคลื่อนที่ในเฟสเดียวกัน (In-phase motion) ในขณะที่รูปทางขวามือจะแสดงถึงมุมเฟสระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกัน 180 องศา หรือเป็นการเคลื่อนที่แบบ Out of phase





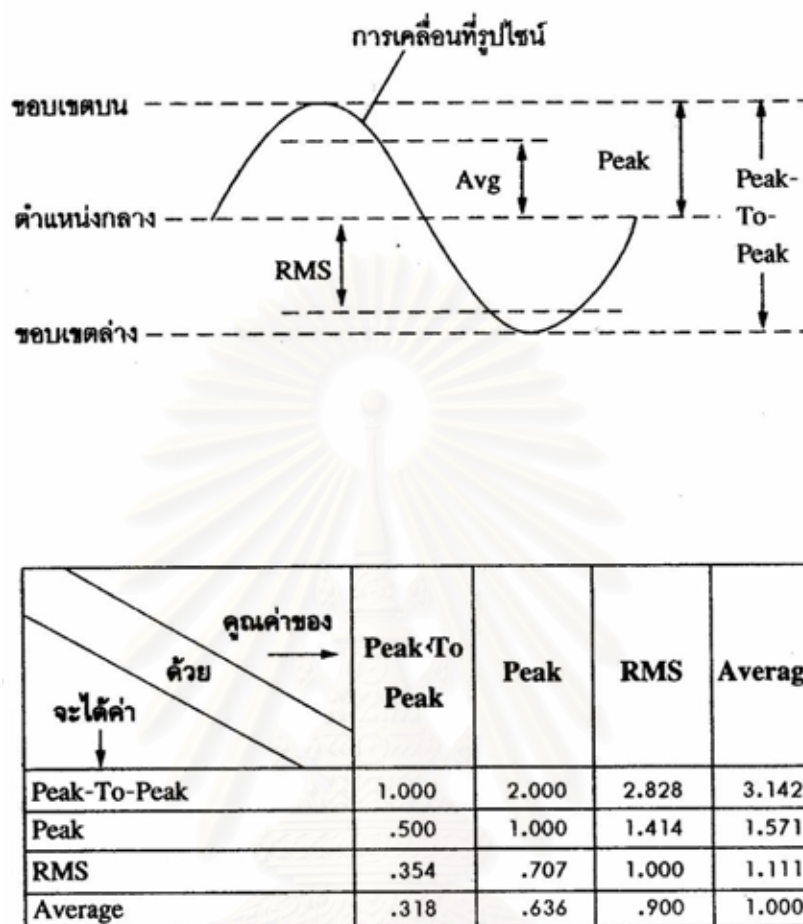
รูปที่ 3.11 วัตถุที่มีมุมเฟสที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกัน 0 และ 180 องศา

### 3.3.4 หน่วยวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือน

เมื่อสัญญาณการสั่นสะเทือนไม่ว่าจะเป็นการขจัด ความเร็ว หรือความเร่งนั้นอยู่ในรูปของคลื่นรูปไซน์ หรือรูปเป็นคาบ ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและลบและมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา การบอกขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนในลักษณะการบอกขนาดโดยรวม (Overall value of vibration) ที่นิยมใช้กัน มีดังต่อไปนี้คือ

- (1) ระดับยอดสูงสุด (Peak level) เป็นการบอกค่าระดับสูงสุดของสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปจากระดับศูนย์ ค่านี้นิยมใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ
- (2) ระดับยอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดอีกยอดหนึ่ง (Peak to peak) ซึ่งก็คือการบอกขนาดของสัญญาณที่วัดจากจุดสูงสุดทางบวกกับจุดต่ำสุดทางลบ
- (3) ค่าเฉลี่ย (Average level) เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ในกรณีทั่วไป ที่สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่าเป็นทั้งบวกและลบเมื่อเทียบกับตำแหน่งสมดุล ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ค่าเฉลี่ยในกรณีนี้จะคิดโดยทำการเปลี่ยนเครื่องหมายของขนาดสัญญาณที่ลบให้เป็นบวก (Rectified) แล้วจึงคิดค่าเฉลี่ยออกมา
- (4) ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS, Root mean square) เป็นค่าที่ได้จากการนำสัญญาณที่วัดได้ในโดเมนของเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสองและทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สอง
- (5) ค่าแฟกเตอร์เครสท์ (Crest factor) เป็นค่าอัตราส่วน Peak level กับ RMS level ซึ่งค่าดังกล่าวจะให้ข้อมูลว่าลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีแนวโน้มเป็นการสั่นสะเทือนลักษณะแบบกระแทก (Impulse) หรือแบบสุ่ม (Random) ในกรณีที่เป็นการสั่นสะเทือนลักษณะแบบกระแทกค่าแฟกเตอร์เครสท์จะสูง ส่วนกรณีที่เป็นลักษณะสุ่มค่าแฟกเตอร์เครสท์จะต่ำ

รูปที่ 3.12 แสดงถึงความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแบบต่างๆ กัน ทั้ง 4 แบบ



รูปที่ 3.12 หน่วยวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและความสัมพันธ์

ในการหมุนที่ไม่สมดุล (Unbalance) ของสปินเดิลมอเตอร์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยขนาดของการสั่นสะเทือนนั้น จะมีค่าสูงในบริเวณที่ความถี่ ( $\omega$ ) เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) (Resonance) [8] และเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุลจะส่งผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการวัดขนาดของการสั่นสะเทือนซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไป

### 3.3.5 เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

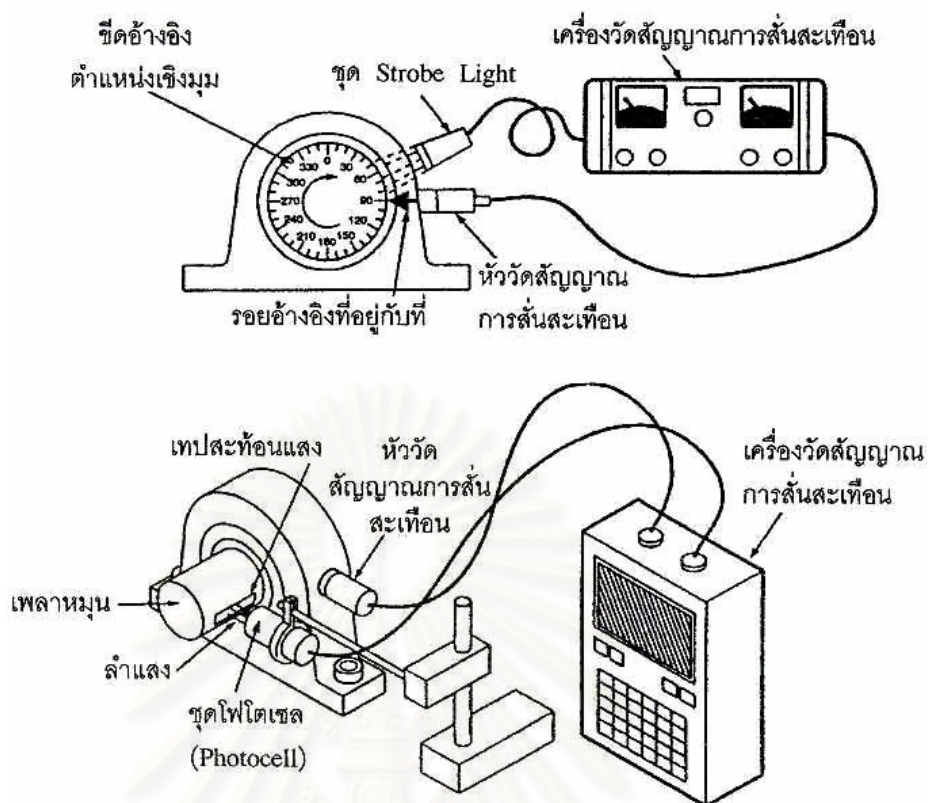
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนประกอบไปด้วย หัวตรวจจับสัญญาณ สายเคเบิล และเครื่องประมวลผลและอ่านผล สำหรับเครื่องประมวลผลและอ่านผลนั้นมีหลายแบบ อาทิ มิเตอร์วัดการสั่นสะเทือน (Vibration meter) เครื่องเฝ้าตรวจการสั่นสะเทือน (Vibration monitor) เครื่องวิเคราะห์แบบตัวกรองกวาด (Swept-filter analyzer) เครื่องวิเคราะห์และเก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที (FFT data collector and analyzer) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบเวลาจริง (Real time spectrum analyzer) และอื่นๆ ในการทดลองนี้ จะขอก้าวถึงเครื่องวิเคราะห์และเก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบความไม่สมดุล (Unbalance) ของสปินเดิลมอเตอร์

เครื่องวิเคราะห์และเก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที (FFT data collector and analyzer) เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นทั้งแบบรวม (Overall value) และสัญญาณบนโดเมนความถี่เป็นอย่างน้อย เครื่องบางเครื่องสามารถวัดข้อมูลเฟสได้ และมักแสดงผลเป็นกราฟของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่บนจอภาพ ในเครื่องที่มีราคาแพงจะมีฟังก์ชันการใช้งานที่ซับซ้อนขึ้น อาทิสามารถเก็บข้อมูลได้จำนวนมาก และสามารถถ่ายถอดข้อมูลสู่คอมพิวเตอร์ได้ รูปที่ 3.13 จะแสดงถึงตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์และเก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที การวัดมุมเฟสจะทำการวัดได้ โดยใช้เครื่อง Strobe light หรือใช้ชุด Photo cell ร่วมกับหัวตรวจจับสัญญาณ และเครื่องวิเคราะห์ รูปที่ 3.14 แสดงถึงเครื่อง Strobe light และชุด Photo cell ที่ใช้ในการวัดมุมเฟส



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์และเก็บข้อมูลชนิดเอฟเอฟที





รูปที่ 3.14 เครื่อง Strobe light และชุด Photo cell

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากสปริงเดิลมอเตอร์นั้น เป็นการสั่นสะเทือนระดับน้อยมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมสภาพแวดล้อมให้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะต้องควบคุมในเรื่องของการสั่นที่เกิดจากสภาพแวดล้อม เพราะถ้ามีการสั่นจากภายนอกเข้ามารบกวนเพียงนิดเดียวก็จะทำให้เกิดการวัดที่ผิดเพี้ยนไป ซึ่งวิธีการตรวจสอบด้วยวิธี AE ในการทดลองนี้ เป็นวิธีที่ตรวจสอบสัญญาณ AE ซึ่งเกิดจากการแตกหัก การปิดกั้นของอะตอม หรือการเปลี่ยนรูปทรงทางพลาสติก เป็นการจับสัญญาณที่มีความถี่สูง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องควบคุมสภาพแวดล้อมเท่ากับการทดสอบด้วยวิธีการสั่นสะเทือน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

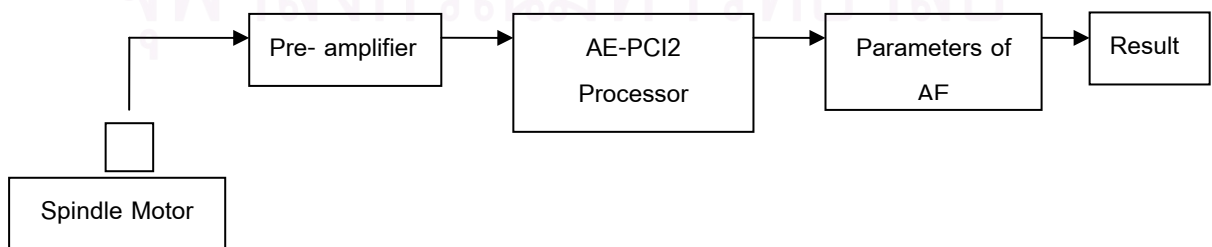
### การตรวจจับคลื่นอะคูสติกที่ปลดปล่อยจากสปินเดิลมอเตอร์

#### 4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

ในการขั้นตอนของการทดลอง จะใช้ฮาร์ดดิสก์ยี่ห้อ Seagate ความเร็ว 5400 rpm มาใช้ในการทดลองหา ความไม่สมดุล (unbalance) ของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระทำโดยมวลถ่วงที่ใส่เข้าไป อุปกรณ์การทดลองประกอบไปด้วยหัววัดสัญญาณซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณ ตัวขยายสัญญาณ และ ระบบการทดสอบ AEแบบ PCI-2 PCI-2นี้เป็นเครื่องมือสำหรับการประมวลผลสัญญาณอะคูสติกอีมีสชันรุ่นใหม่ สามารถวัดสัญญาณได้ 2 ช่อง (2-Channel) และมีกระบวนการประมวลผลสัญญาณในตัว (Digital signal processing, DSP) รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการวัดสัญญาณ AE ของสปินเดิลมอเตอร์



(ก) รูปแสดงการวัดสัญญาณ AE โดยเครื่องมือ PCI-2

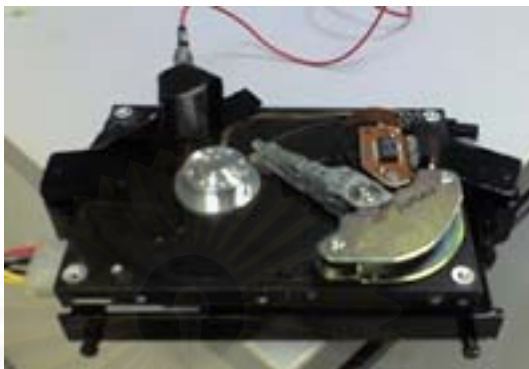


(ข) ไดอะแกรมขั้นตอนการวัดสัญญาณ AE

รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการวัดสัญญาณ AE ของสปินเดิลมอเตอร์



ในการทดลองได้มีการออกแบบให้สปินเดิลมอเตอร์จะถูกวางบนฐานจับยึด (Test rig) ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise) จากภายนอก โดยใช้แผ่นยางรองไว้ใต้ชิ้นงานทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สปินเดิลมอเตอร์บนฐานจับยึด

#### 4.1.1 หัววัดสัญญาณ (AE Sensor)

หัววัดสัญญาณ AE จะถูกวางบนฐานของมอเตอร์ ให้ใกล้สปินเดิลมอเตอร์ ให้มากที่สุด เพื่อการรับสัญญาณที่ดี และถูกยึดไว้ด้วยสารหล่อลื่น (Couplant) เพื่อลดการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งรูปถูกแสดงดังรูป 4.2

ในการทดลองนี้ สัญญาณ AE ที่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์จะถูกตรวจจับโดยหัววัดสัญญาณอะคูสติก รุ่น R30-alpha แสดงในรูป 4.3 ที่ซึ่งมีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) สูงถึงค่า  $1 \text{ V}/\mu\text{bar}$  สามารถตรวจจับสัญญาณได้ในช่วงความถี่ 100 KHz – 1 MHz และมีค่าความถี่สูงที่สุด (Peak Frequency) อยู่ที่ความถี่ 324.33 KHz มีค่า -66.05 dB ดังรูปที่ 4.3



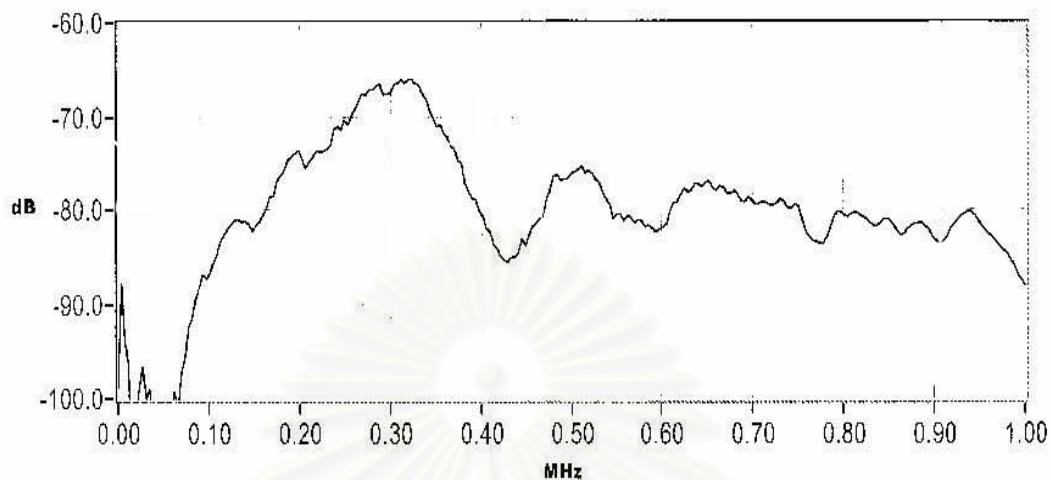
(ก) ภาพด้านข้าง



(ข) ภาพด้านบน

รูปที่ 4.3 แสดงรูปหัวตรวจจับสัญญาณ AE รุ่น R30-alpha

**Sensor Name:** R30-alpha      **Test Date:** 6/7/07      **Max. Value (dB):** -66.05  
**Sensor S/N:** AA41      **Tested By:** L.C.      **Peak Freq.(kHz):** 324.22  
**Comment:**



รูป 4.3 ใบ Calibration Certificate ของหัววัดสัญญาณ AE

#### 4.1.2 ตัวขยายสัญญาณ (Preamplifier)

อุปกรณ์ขยายสัญญาณจะรับสัญญาณจากหัววัดสัญญาณทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณ โดยจะถูกวางให้ใกล้กับหัววัดสัญญาณมากที่สุดเพื่อการถ่ายทอดสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ ในการทดลองนี้สามารถขยายสัญญาณรุ่น 2/4/6 ซึ่งสามารถขยายสัญญาณได้ 20, 40 และ 60 dB แล้วแต่ความเหมาะสมของการวัด แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

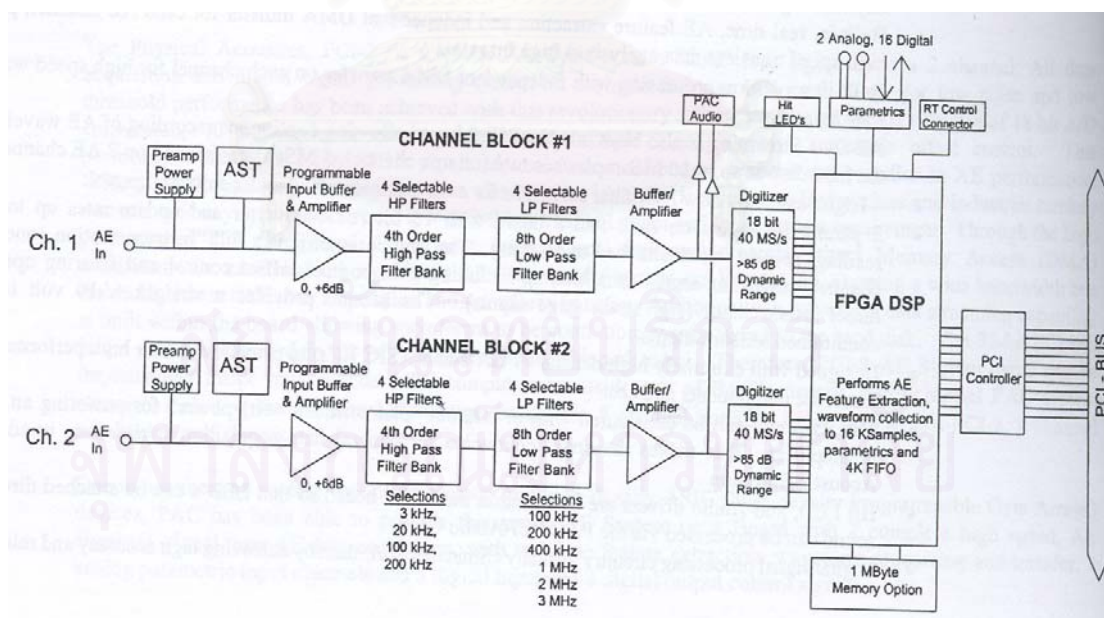
สัญญาณที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณจะส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณ ในที่นี้ใช้ ระบบการทดสอบ AE แบบ PCI-2 ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 4.1.3 ระบบการทดสอบ AE แบบ PCI-2

เครื่องมือสำหรับการประมวลผลสัญญาณอะคูสติกอีมีสชันรุ่นใหม่ สามารถวัดสัญญาณได้ 2 ช่อง (2-Channel) และมีกระบวนการประมวลผลสัญญาณในตัว (Digital signal processing, DSP) สามารถปฏิบัติการได้บนคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง 32-bit PCI-Card โดยลักษณะพิเศษของเครื่องมือ PCI-2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- (1) สัญญาณรบกวนต่ำ (very low noise)
- (2) แปลงสัญญาณ A/D 18 bit และมีความละเอียดในการวัด(resolution) น้อยกว่า 1 dB
- (3) วัดสัญญาณจริง (real time) โดยสามารถเก็บสัญญาณได้มากถึง 40 MSample/second

อุปกรณ์ PCI-2 สามารถตอบสนองของสัญญาณในช่วงความถี่ที่กว้างถึง 3kHz - 3MHz มีการกรองสัญญาณ (Filter) แบบ Band pass filter โดยมี 4 High Pass (1kHz, 20 kHz, 100kHz, 200kHz) และ 6 Low Pass (100kHz, 200kHz, 400kHz, 1MHz) ซึ่งมีไดอะแกรมขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานเครื่องมือทดสอบ AE แบบ PCI-2

ในการประมวลผลสัญญาณ โปรแกรม AEwin ถูกใช้ในการบูท (booting up) ระบบทดสอบ AE แบบ PCI-2 ขึ้นมา โดยโปรแกรม AEwin นี้เปรียบได้กับโปรแกรมทั่วไปใน Window ลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ถูกแสดงในภาคผนวก ก โปรแกรม AEwin ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้การวัดง่ายต่อการใช้งานในระบบการวัด โดยเราสามารถกำหนดค่าช่วงการกรองสัญญาณ กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด กำหนดค่ากราฟต่างๆ ที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ และอื่นๆ ได้จากโปรแกรมนี้เอง นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลต่างๆ อาทิเช่น สรุปผลการทดลองค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่า standard deviation นอกจากนี้ยังสามารถดึงข้อมูลของ waveform โดยแปลงออกมาในรูปแบบของ text file ได้ เป็นต้น

## 4.2 พารามิเตอร์ของสัญญาณ

พารามิเตอร์ที่เราใช้วิเคราะห์ในการทดลองครั้งนี้ มีดังนี้

(1) Amplitude คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดในช่วงการเกิดสัญญาณ AE ถูกแสดงในรูปของหน่วย เดซิเบล (dB) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (4.1)

$$dB = 20 \log(V_{MAX} / 1\mu\text{volt}) - \text{Preamplifier Gain}(dB) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $V_{MAX}$  คือค่าระดับแรงดันสูงสุด (Volt)

เช่น ถ้า Preamplifier gain คือ 40 dB และแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดที่วัดได้มีค่า 1 volt จะได้ amplitude มีค่าเท่ากับ 80 dB

(2) AE RMS คือค่ารากที่สองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า (Root mean square) มีหน่วยเป็น volt ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2)

$$AE \text{ RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A^2(t) dt} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $AE \text{ RMS}$  คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของ AE

$T$  คือ ค่าช่วงของเวลา

$A$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ AE

(3) Magnitude คือ ขนาดของสัญญาณบนโดเมนความถี่ โดยใช้หลักการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) มาใช้แปลงสัญญาณในโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ ซึ่งค่า magnitude ( $X(j\omega)$ ) สามารถหาได้ดังสมการ (4.3)

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.3)$$

เมื่อ	$X(j\omega)$	คือ ค่าขนาดของสัญญาณบนโดเมนความถี่ (Magnitude)
	$x(t)$	คือ ค่าขนาดของสัญญาณบนโดเมนเวลา (Amplitude)
	$t$	คือ เวลา
	$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม

ในการทดลองนี้จะใช้ค่า Power magnitude ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ Magnitude กำลังสอง ดังสมการที่ (4.4)

$$\text{Power magnitude} = [X(j\omega)]^2 \quad (4.4)$$

โดยหน่วยของ Power magnitude จะมีค่าเท่ากับ  $V^2 / Hz$  ซึ่งหมายความว่าถ้าพิจารณาสัญญาณที่ความต้านทาน 1 โอห์ม จะได้ค่า Power magnitude จะมีค่าเท่ากับ  $V^2$  และสาเหตุที่นำค่า Power magnitude มาวิเคราะห์แทนค่า Magnitude นี้เนื่องจาก

- (1) ค่า Magnitude เป็นจำนวนเชิงซ้อน (complex) ซึ่งทำให้ทำความเข้าใจจากการวิเคราะห์
- (2) ค่า Power magnitude มีค่าเป็นสองเท่าของค่า Magnitude ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

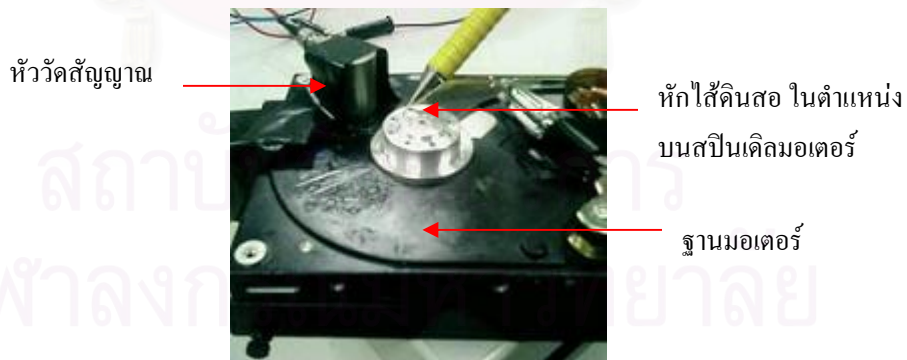
### ผลการทดลอง

#### 5.1 การทดลองการหักใ้ดินสอบนสปินเดิลมอเตอร์

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อทดสอบว่าสัญญาณ AE ที่สร้างขึ้นโดยการหักใ้ดินสอบนสปินเดิลมอเตอร์นั้น สามารถส่งผ่านมายังหัววัดสัญญาณที่ติดตั้งอยู่บนฐานมอเตอร์ได้ ตามมาตรฐาน ASTM E976-05 ว่าด้วยเรื่อง “Standard guide for determine the reproducibility of acoustic emission sensor response” รายละเอียดดูในภาคผนวก ข โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าระดับสูงสุด (Threshold level) ไว้ที่ระดับ 45 dB, กรองสัญญาณ (Band pass filter) เฉพาะช่วง 100 kHz – 1MHz, preamplifier ทำการขยายสัญญาณ 40 dB (Gain) และกำหนดค่า sampling rate เท่ากับ 1 MSPS

##### 5.1.1 วิธีการทดลอง

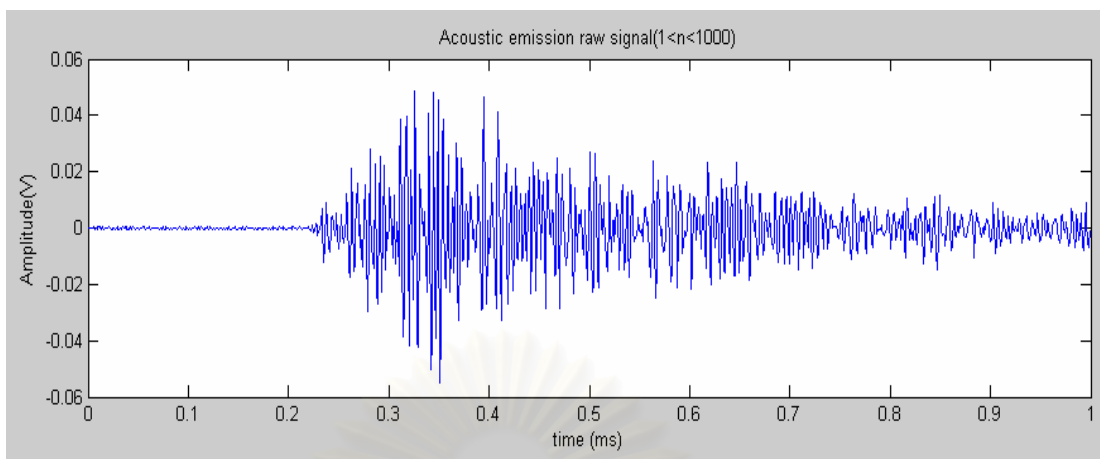
หักใ้ดินสอ เบอร์ 2H ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มม. ความยาว 4-5 มม. บนสปินเดิลมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ AE แล้วนำสัญญาณที่ได้บนโดเมนเวลา (Time domain) มาแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมและการแปลงฟูเรียร์ ถูกแสดงในภาคผนวก ค



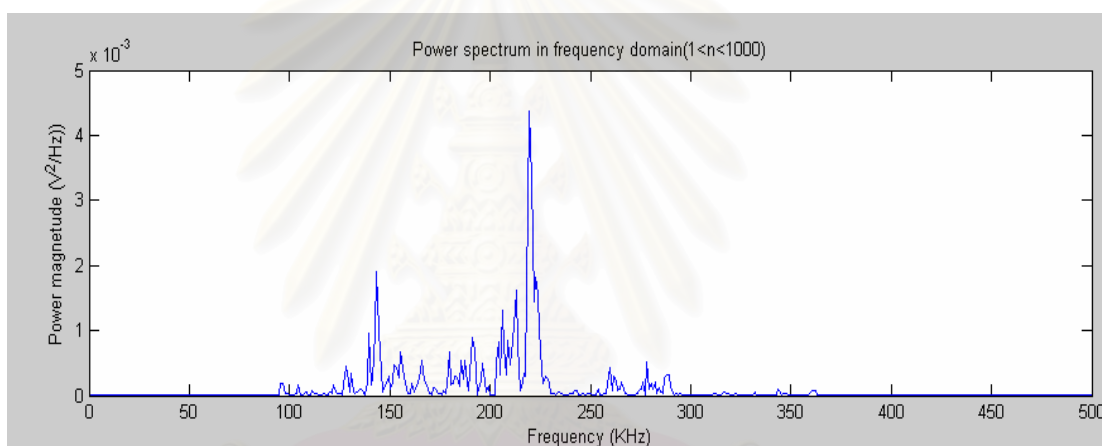
รูปที่ 5.1 การทดลองหักใ้ดินสอบนสปินเดิลมอเตอร์

##### 5.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

สัญญาณบนโดเมนเวลาและสัญญาณบนโดเมนความถี่ของการหักใ้ดินสอ ถูกแสดงดังรูป 5.2



(ก) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลา



(ข) สัญญาณ AE บนโดเมนความถี่

รูปที่ 5.2 สัญญาณ AE ของการหักไส้ดินสอบนโดเมนเวลาและความถี่

จากผลการทดลอง รูป 5.2 (ก) พบว่ามีคลื่นสัญญาณ AE เกิดขึ้นบนโดเมนเวลา และเมื่อแปลงสัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 5.2 (ข) พบว่ามีค่าความถี่สูงสุดอยู่ที่ 220 kHz ซึ่งถ้าเทียบกับค่าการตอบสนองความถี่สูงสุด (Peak Frequency) ของหัววัดสัญญาณที่แสดงดังรูป 4.3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 324 kHz แล้ว จะเห็นว่ามีความแตกต่างกันอยู่ประมาณ 100 kHz ทั้งนี้ น่าจะเกิดมาจากการที่สัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆภายในสปินเดิลมอเตอร์ ก่อนจะมาถึงหัววัดสัญญาณ เกิดการลดทอนของสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามค่าความถี่สูงสุดในการหักไส้ดินสอนี้ ก็ยังมีค่าอยู่ในช่วงการตอบสนองความถี่สูงสุดของหัววัดสัญญาณ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่เกิดในตำแหน่งของสปินเดิลมอเตอร์นี้สามารถส่งผ่านมายังหัววัดสัญญาณได้

## 5.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Amplitude และ AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ ในสภาวะความไม่สมดุลต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะสมดุล กับสภาวะไม่สมดุล (Unbalance) โดยมวลถ่วง ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และ AE RMS โดยแบ่งการเพิ่มความไม่สมดุลออกเป็น 3 ส่วนคือ การเพิ่มความไม่สมดุลโดยมวลถ่วงที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน โดยระยะจากแกนหมุน (Shaft) คงที่, การเพิ่มความไม่สมดุลโดยมวลถ่วงที่น้ำหนักเดียวกัน แต่เพิ่มระยะจากแกนหมุน และการเพิ่มความไม่สมดุลโดยมวลถ่วงที่เกิดจากทั้งการเพิ่มน้ำหนักและเพิ่มระยะทางจากแกนหมุน ซึ่งการทดลองนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่นเดียวกับ การทดลอง 5.1

### 5.2.1 วิธีการทดลอง

ทำการวัดสัญญาณที่เกิดจากสปินเดิลมอเตอร์ปกติ (สมดุล) เปรียบเทียบกับสปินเดิลมอเตอร์สภาวะไม่สมดุลโดยมวลถ่วง 5 สภาวะด้วยกัน โดย 3 สภาวะแรกเกิดจากการเพิ่มมวลถ่วง น้ำหนัก 0.46, 1.29, 1.85 กรัมที่ระยะทางจากแกนหมุน (Shaft) คงที่ที่ 10 มิลลิเมตร สภาวะที่ 4 เกิดจากการใช้มวลถ่วงเท่าเดิมที่ 1.85 กรัมแต่เพิ่มระยะทางจากแกนหมุนมาอยู่ที่ 12 มิลลิเมตร สภาวะสุดท้ายเกิดจากการที่เพิ่มทั้งมวลถ่วงเป็น 2.23 กรัม และเพิ่มระยะทางเป็น 15 มิลลิเมตร โดยแต่ละสภาวะนั้นจะทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งต่อสภาวะ และการติดตั้งมวลถ่วงบนสปินเดิลมอเตอร์ถูก แสดง ดังรูปที่ 5.3



(ก) มอเตอร์สภาวะปกติ (สมดุล)



(ข) มอเตอร์สภาวะไม่สมดุลโดยการเพิ่มมวลถ่วง

รูปที่ 5.3 รูปแสดง มอเตอร์สภาวะปกติ (สมดุล) และมอเตอร์สภาวะไม่สมดุลโดยการเพิ่มมวลถ่วง

สภาวะความไม่สมดุลโดยมวลถ่วงทั้ง 5 สภาวะดังกล่าว สามารถแสดงเป็นค่าในหน่วยของกรัม-เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าแสดงปริมาณของความไม่สมดุล (MR-Product) โดยการนำค่าน้ำหนักมวลถ่วงคูณกับค่าระยะทางจากแกนหมุน ค่าปริมาณความไม่สมดุลนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความไม่สมดุลโดยถ้ามีปริมาณมากจะแสดงถึงค่าความไม่สมดุลที่มาก ในทางตรงกันข้ามถ้ามีปริมาณน้อยจะแสดงถึงความไม่สมดุลที่น้อยด้วย ซึ่งตารางแสดงค่าปริมาณความไม่สมดุลจะถูกแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าปริมาณความไม่สมดุลในหน่วยของกรัม-เซนติเมตร

สภาวะความไม่สมดุล	ค่าปริมาณความไม่สมดุล (กรัม-เซนติเมตร)
สภาวะความไม่สมดุล โดยมวลถ่วงหนัก 0.46 กรัม ที่ระยะ 1.0 ซม.	0.46
สภาวะความไม่สมดุล โดยมวลถ่วงหนัก 1.29 กรัม ที่ระยะ 1.0 ซม.	1.29
สภาวะความไม่สมดุล โดยมวลถ่วงหนัก 1.85 กรัม ที่ระยะ 1.0 ซม.	1.85
สภาวะความไม่สมดุล โดยมวลถ่วงหนัก 1.85 กรัม ที่ระยะ 1.2 ซม.	2.22
สภาวะความไม่สมดุล โดยมวลถ่วงหนัก 2.23 กรัม ที่ระยะ 1.5 ซม.	3.35

### 5.2.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดสัญญาณที่เกิดจากสปินเดิลมอเตอร์ปกติ และสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลโดยมวลถ่วงสภาวะต่างๆ ที่ทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และ AE RMS ถูกแสดงดังตาราง 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และ AE RMS ในสภาวะสปินเดิลมอเตอร์ปกติ

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Amplitude (dB)	68.20	68.37	68.09	68.43	68.30	68.28
AE RMS (Volt)	0.0528	0.0533	0.0541	0.0559	0.0548	0.0542

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปริงเดลิทโมเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 0.46 กรัม-เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Amplitude (dB)	68.60	68.41	68.54	68.52	68.61	68.53
AE RMS (Volt)	0.0556	0.0562	0.0569	0.0574	0.0578	0.0568

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปริงเดลิทโมเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 1.29 กรัม-เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Amplitude (dB)	68.76	68.67	68.81	68.85	68.73	68.76
AE RMS (Volt)	0.0575	0.0580	0.0583	0.0589	0.0591	0.0584

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปริงเดลิทโมเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 1.85 กรัม-เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Amplitude (dB)	68.93	68.80	68.96	68.91	69.07	68.93
AE RMS (Volt)	0.0577	0.0580	0.0585	0.0587	0.0594	0.0585

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และAE RMS ในสภาวะที่สปริงเดลิทโมเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 2.22 กรัม-เซนติเมตร

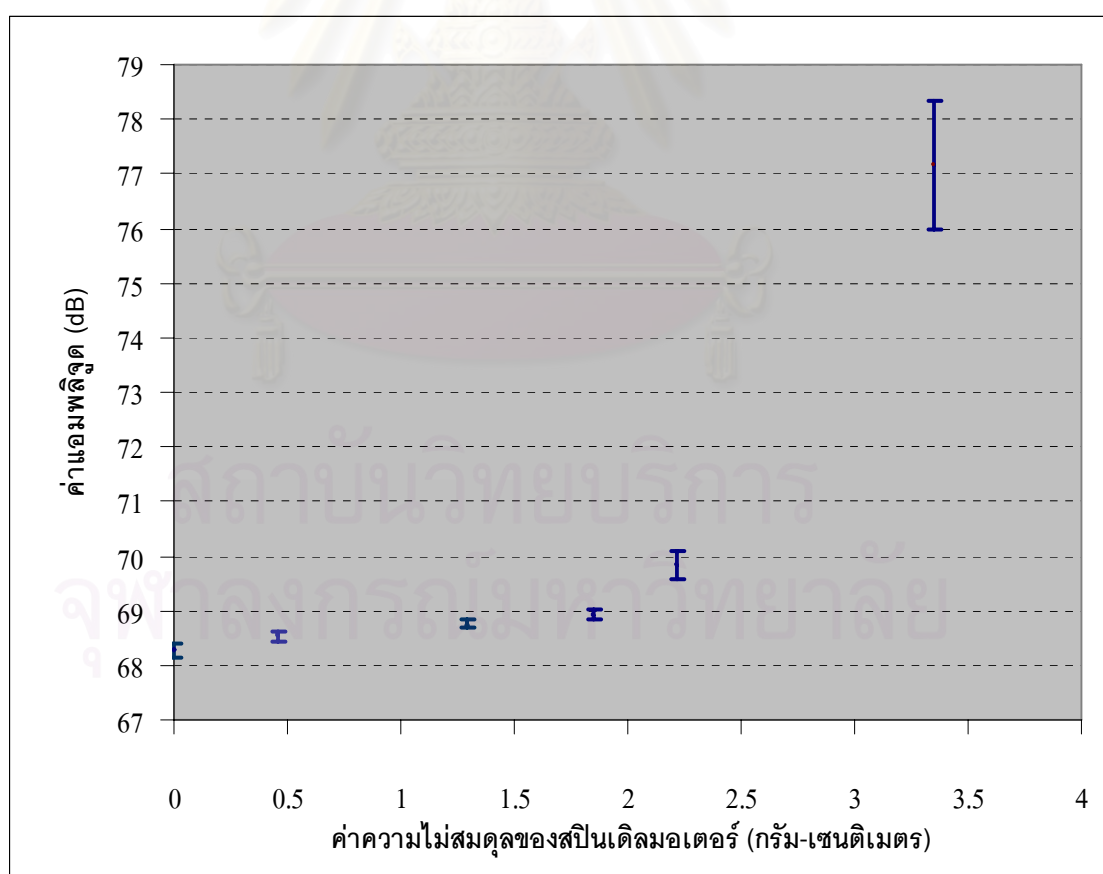
พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Amplitude (dB)	69.88	69.45	69.76	70.14	69.91	69.83
AE RMS (Volt)	0.0587	0.0584	0.0588	0.0591	0.0599	0.0590



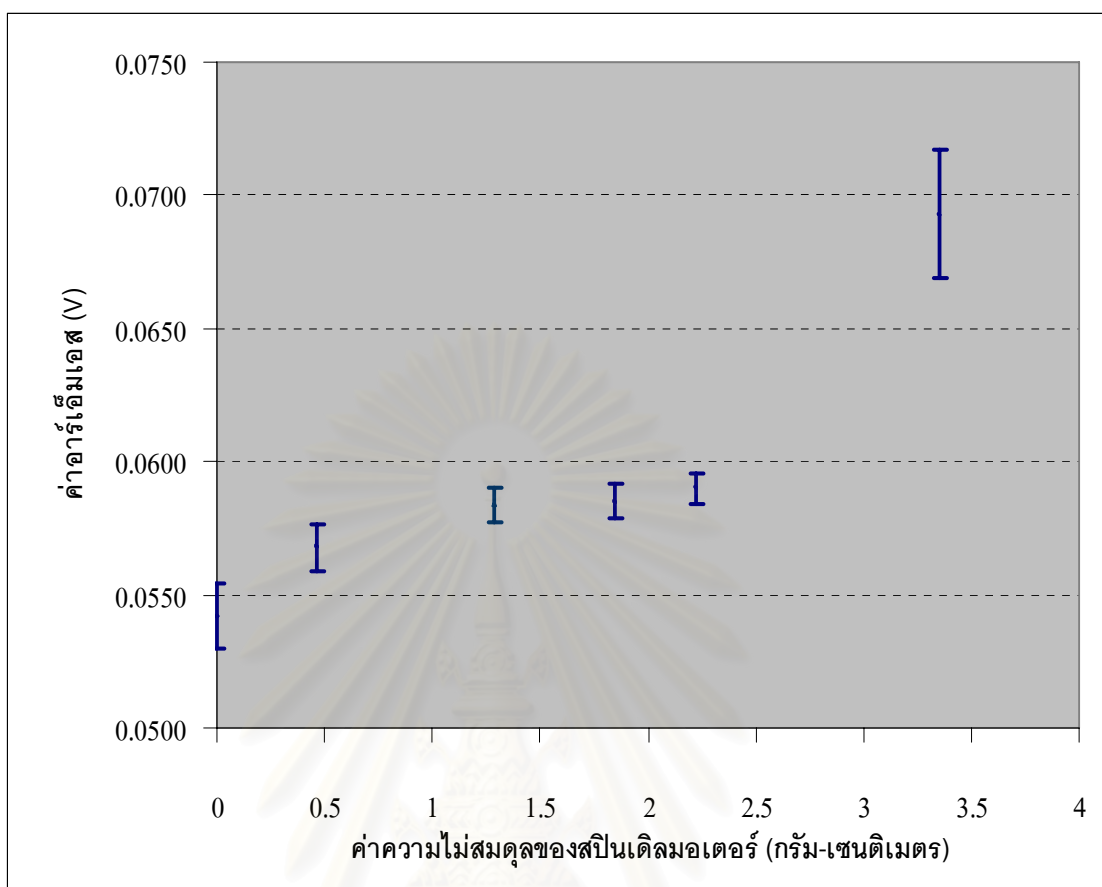
ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงสัญญาณ AE ในพารามิเตอร์ของ Amplitude และ AE RMS ในสภาวะที่สปินเดิลมอเตอร์มีความไม่สมดุลเท่ากับ 3.35 กรัม-เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Amplitude (dB)	76.07	78.08	78.61	77.00	76.06	77.16
AE RMS (Volt)	0.0675	0.0703	0.0727	0.0692	0.0666	0.0693

จากตาราง 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 จะเห็นว่า ค่า Amplitude และ AE RMS ของสปินเดิลไม่สมดุลจะมีค่ามากกว่าสปินเดิลมอเตอร์สมดุล และเมื่อนำค่าเฉลี่ยทั้ง 5 ครั้ง ในตาราง 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 นี้มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ปกติ และสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะไม่สมดุลค่าต่างๆ เพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงพารามิเตอร์ Amplitude และ AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติและสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่าต่างๆ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Amplitude ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่าต่างๆ



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่าต่างๆ

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่า สปินเดิลมอเตอร์ที่ความไม่สมดุลเท่ากับ 0 กรัม-เซนติเมตร นั้นคือสปินเดิลมอเตอร์สภาวะปกติจะมีค่าเฉลี่ยของค่า Amplitude น้อยที่สุด คือเท่ากับ 68.28 dB แต่เมื่อเพิ่มความไม่สมดุลขึ้นเป็นค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร จะทำให้ค่าแอมพลิจูดมีค่าสูงขึ้นเป็น 68.53 dB ซึ่งมีค่าความแตกต่างเท่ากับ 0.25 dB หรือเท่ากับ 0.0075 V หรือแตกต่างกันอยู่ 2.92 % และเมื่อเพิ่มค่าความไม่สมดุลมากขึ้นเป็น 1.29, 1.85, 2.22 และ 3.35 กรัม-เซนติเมตร ค่า Amplitude ของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับด้วย

ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 5.5 สปินเดิลมอเตอร์ที่ความไม่สมดุลเท่ากับ 0 กรัม-เซนติเมตรจะมีค่าเฉลี่ยของค่า AE RMS น้อยที่สุด คือเท่ากับ 0.0542 V และเมื่อเพิ่มความไม่สมดุลเป็น 0.46 กรัม-เซนติเมตร จะมีค่า AE RMS เพิ่มขึ้นเป็น 0.068 V ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอยู่ 0.0026 V หรือประมาณ 4.43 % และเมื่อเพิ่มค่าความไม่สมดุลมากขึ้นเป็น 1.29, 1.85, 2.22 และ 3.35 กรัม-เซนติเมตร ค่า AE RMS ของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับด้วย เช่นเดียวกับ ค่า Amplitude

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนค่าความไม่สมดุล ในทางฟิสิกส์นั้นเปรียบเสมือนกับการเปลี่ยน ค่าศูนย์กลางมวล (Center of mass) โดยค่าศูนย์กลางมวลเป็นค่าบอกตำแหน่งของวัตถุ โดยในทางกลศาสตร์แล้วจะกำหนดตำแหน่งของวัตถุหรือกลุ่มอนุภาคด้วยตำแหน่งของศูนย์กลางมวล ถ้าพิจารณาอนุภาคที่  $i$  ในกลุ่ม  $N$  อนุภาค และให้อนุภาคนี้มีมวล  $m_i$  และมีเวกเตอร์บอกตำแหน่ง  $r_i$  จะนิยามเวกเตอร์บอกตำแหน่งศูนย์กลางมวล ( $R_{CM}$ ) ได้ดังสมการ (5.1)

$$R_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N m_i r_i \quad (5.1)$$

โดยที่  $M$  เป็นมวลรวมทั้งหมดของ  $N$  อนุภาค

$$M = \sum_{i=1}^N m_i \quad (5.2)$$

สมมติให้สปินเดิลมอเตอร์น้ำหนัก  $m_1$  มีเวกเตอร์ศูนย์กลางมวลเท่ากับค่า  $r_1$  จากสมการ (5.1) จะได้ค่าศูนย์กลางมวลของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ ( $R_{CM}(\text{normal})$ ) จะมีค่า

$$R_{CM}(\text{normal}) = \frac{1}{m_1} (m_1 r_1) = r_1$$

เมื่อเพิ่มปริมาณความไม่สมดุล โดยการใส่มวลถ่วงน้ำหนัก  $m_2$  ที่ระยะ  $r_2$  จะได้ค่าศูนย์กลางมวลของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีความไม่สมดุลนี้ ( $R_{CM}(\text{unbalance})$ ) มีค่าเท่ากับสมการ (5.4)

$$R_{CM}(\text{unbalance}) = \frac{1}{(m_1 + m_2)} (m_1 r_1 + m_2 r_2) \quad (5.4)$$

ถ้ากำหนดให้  $r_1 = 0$  นั่นคือ ค่าศูนย์กลางมวลของสปินเดิลปกติ อยู่ที่ตำแหน่งแกนหมุนหรือ จุดหมุนพอดี แทนค่าในสมการ (5.4) จะได้

$$R_{CM}(\text{unbalance}) = \frac{1}{(m_1 + m_2)} (0 + m_2 r_2)$$

$$R_{CM}(\text{unbalance}) = \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} r_2 \quad (5.5)$$

จากสมการ (5.5) จะเห็นว่าค่าศูนย์กลางมวลของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีความไม่สมดุล ( $R_{CM}(\text{unbalance})$ ) มีค่ามากกว่า 0 นั่นหมายความว่าค่าศูนย์กลางมวลของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีความไม่สมดุลนี้ไม่ได้อยู่ตำแหน่งแกนหมุน และเมื่อสปินเดิลมอเตอร์นี้มีการหมุน จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบภายในของสปินเดิลมอเตอร์ในลักษณะที่ไม่สมดุล และทำให้เกิดการสัมผัสกันของส่วนประกอบต่างๆ จนทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติกที่มากขึ้น

ออกมา และด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ค่า Amplitude และ AE RMS ของสัญญาณของสปินเดิลมอเตอร์ ไม่สมดุลมีค่ามากกว่าสปินเดิลมอเตอร์สมดุล

พิจารณาสมการ (5.5) พบว่าค่าศูนย์กลางมวลจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่ามวลถ่วง ( $m_i$ ) มีค่ามากขึ้น หรือ ค่าระยะจากแกนหมุน ( $r_i$ ) นั่นคือค่าศูนย์กลางมวลจะเพิ่มขึ้นตามค่าความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์ ในทำนองเดียวกับข้างต้นคือ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติคที่สูงขึ้นตามความไม่สมดุลนั่นเอง และเป็นสาเหตุให้ค่า Amplitude และ AE RMS สูงขึ้นด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้น ถึงแม้ว่าจะเห็นค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์ Amplitude และ AE RMS (ซึ่งเป็นพารามิเตอร์บนโดเมนเวลา (Time domain)) ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ที่สมดุลและไม่สมดุล แต่ก็มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันน้อย ทำให้ไม่สามารถบ่งชี้ความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงพิจารณาค่า Power magnitude ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain) และเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ของวัตถุ ซึ่งจะกล่าวถึงในการทดลองถัดไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3 การทดลองสัญญาณบนโดเมนความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะความไม่สมดุลต่างๆ

การทดลองนี้จะทำการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain) เป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์สมดุลกับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลในสภาวะต่างๆ

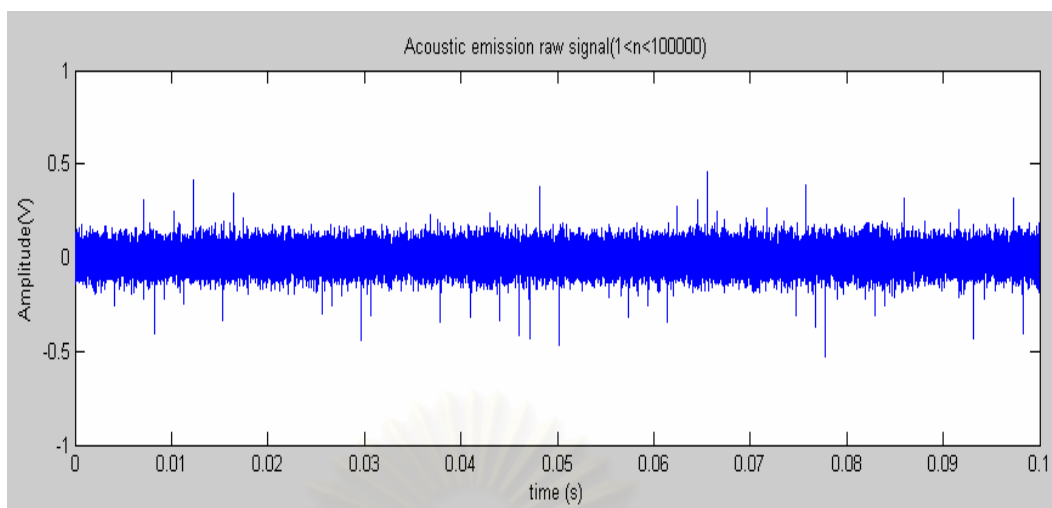
#### 5.3.1 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ใช้วิธีการเดียวกับ การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ในสภาวะต่างๆ ในหัวข้อ 5.2 แล้วนำค่าสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ได้จากหัววัดสัญญาณ มาแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform)

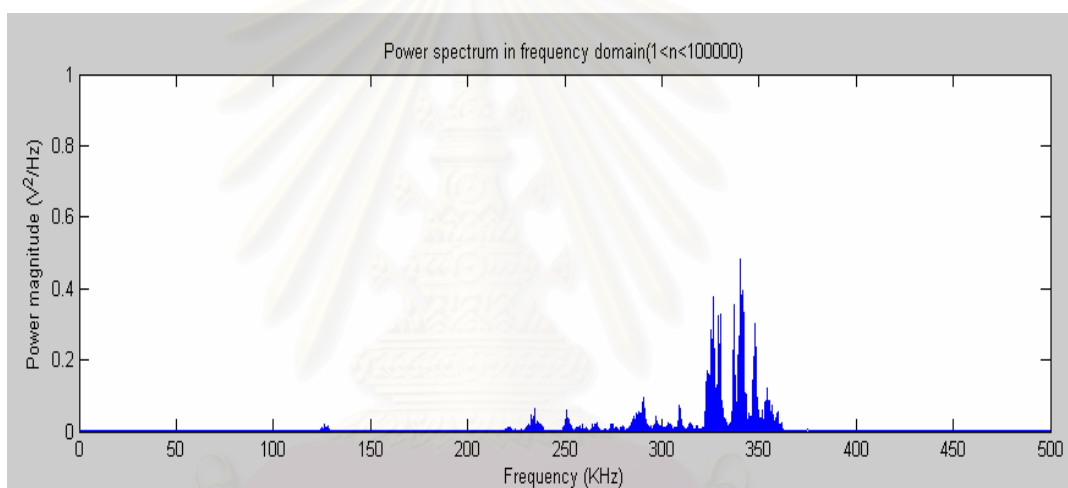
#### 5.3.2 ผลการทดลอง

สัญญาณ AE ( 5 ครั้ง ) บนโดเมนเวลาและบนโดเมนความถี่ ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ที่ปกติ (สมดุล) กับสปินเดิลมอเตอร์ที่มีความไม่สมดุลเท่ากับค่า 0.46, 1.29, 1.85, 2.22 และ 3.35 กรัม-เซนติเมตร จะถูกแสดงในรูป 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ และกราฟแสดงรายละเอียดของสัญญาณทั้ง 5 ครั้ง จะถูกแสดงในภาคผนวก ค





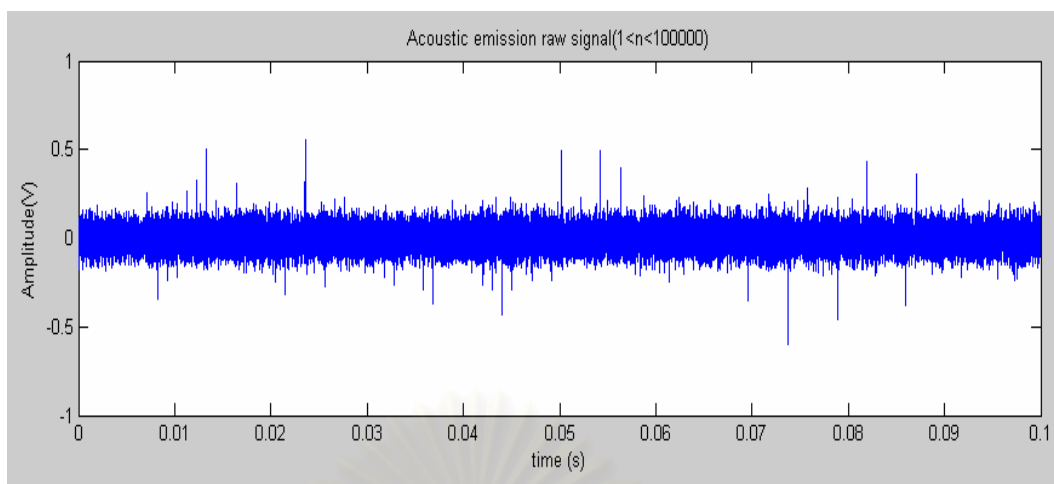
(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain)



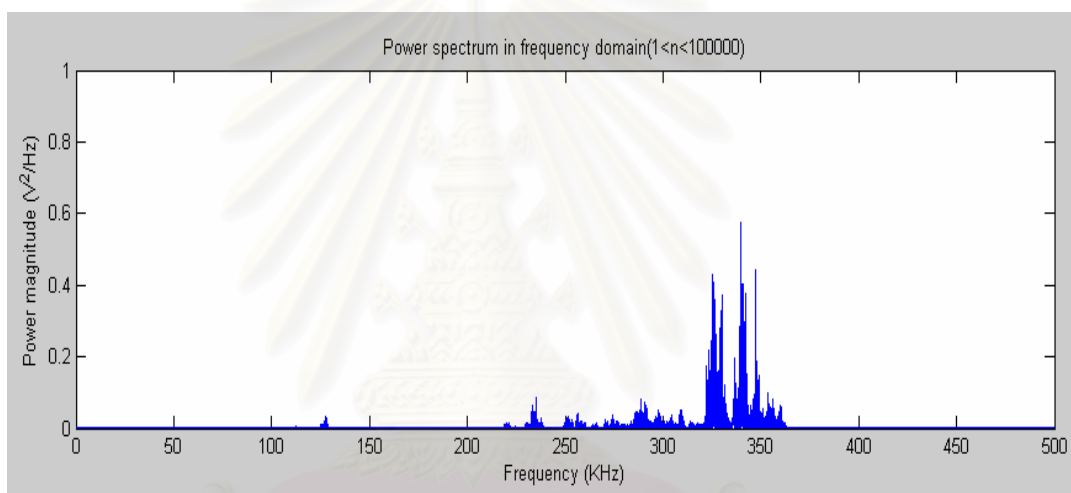
(ข) สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain)

รูปที่ 5.6 สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ (สมดุล)

จากกราฟ 5.7 (ข) ซึ่งแสดงค่าสัญญาณบนโดเมนความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ จะเห็นว่ามีค่าความถี่เกิดขึ้นในช่วงกว้าง (Board band) และเกิดมากที่สุดที่ช่วง 300 – 350 kHz โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ 324, 340 และ 350 kHz ซึ่งให้ค่า Power magnitude มากที่สุด โดยที่ความถี่ 324 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.375 \text{ V}^2 / \text{Hz}$ , ที่ความถี่ 340 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.481 \text{ V}^2 / \text{Hz}$  และที่ความถี่ 350 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.301 \text{ V}^2 / \text{Hz}$



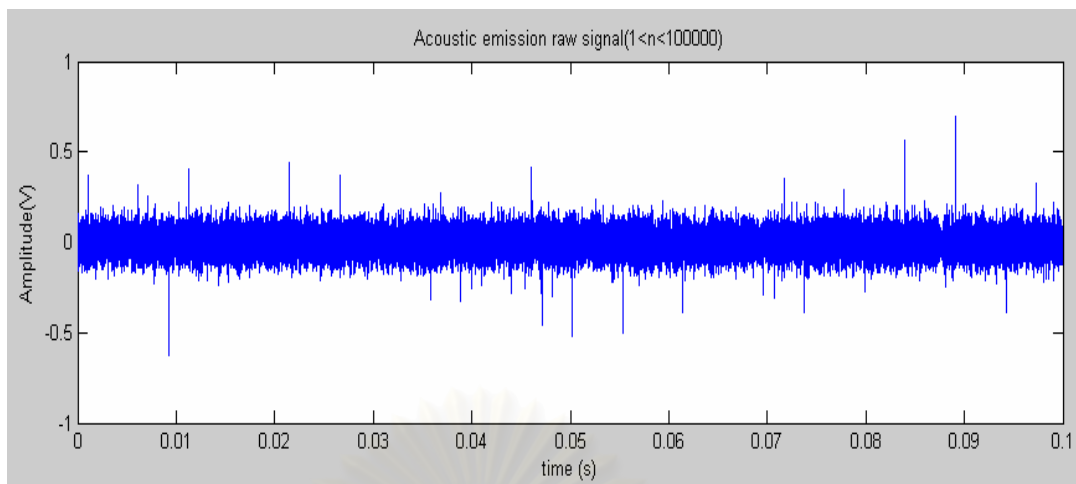
(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain)



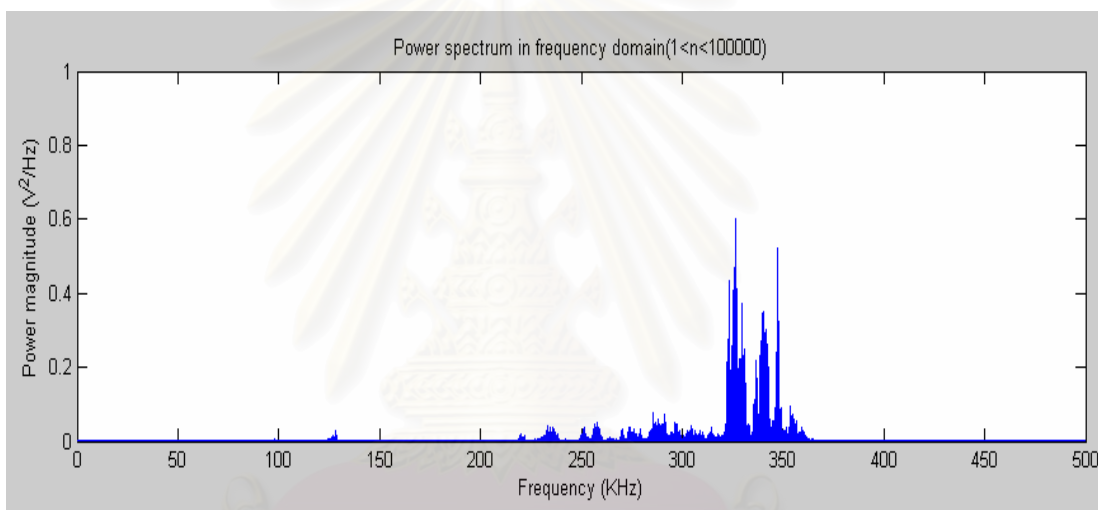
(ข) สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain)

รูปที่ 5.7 สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.8 (ข) แสดงค่าสัญญาณบนโดเมนความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร ซึ่งพบว่ามีค่า Power magnitude มากกว่าสปริงเดลมอเตอร์สมดุล (ในรูปที่  
5.7) อย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ ที่ความถี่ 324 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.430 \text{ V}^2 / \text{Hz}$ , ที่ความถี่ 340 kHz มี  
ค่าเท่ากับ  $0.574 \text{ V}^2 / \text{Hz}$  และที่ความถี่ 350 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.443 \text{ V}^2 / \text{Hz}$  และถ้าคิดเป็นค่า  
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างแล้ว มีค่าความแตกต่างเท่ากับ 19 % ที่ความถี่ 324 kHz, 15 % ที่ความถี่  
340 kHz และ 50% ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าความแตกต่างมากกว่าการเปรียบเทียบใน  
พารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา (Amplitude, AE RMS) จากการทดลองที่แล้ว



(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain)

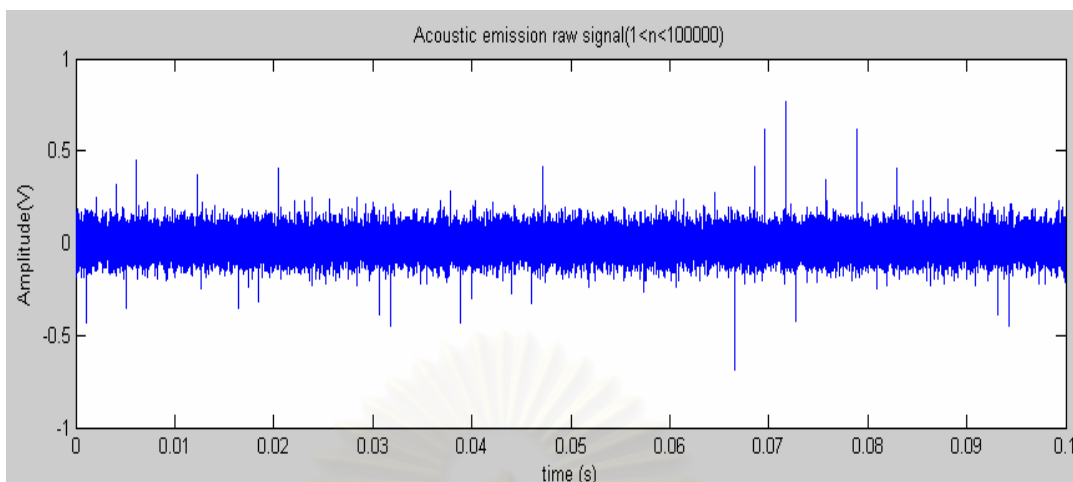


(ข) สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain)

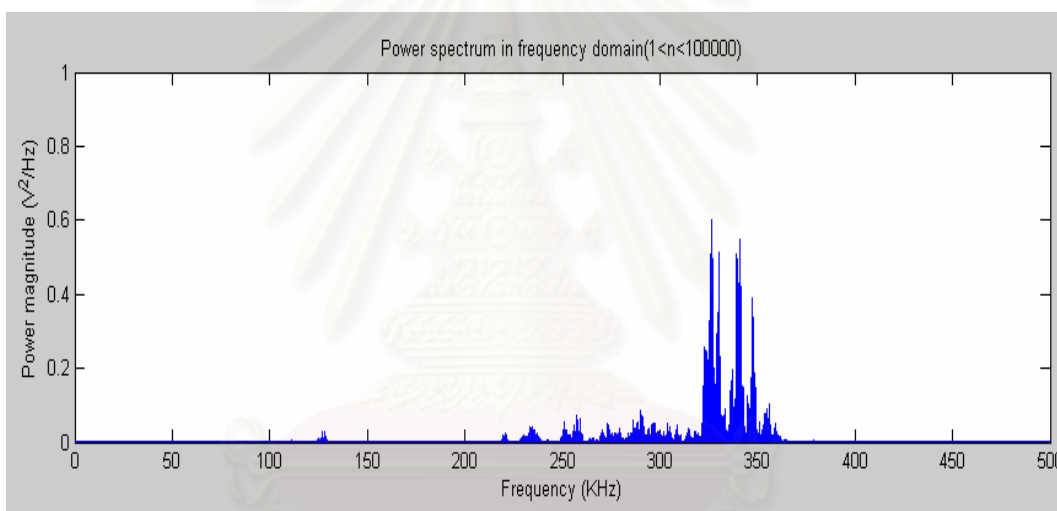
รูปที่ 5.8 สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล

ค่า 1.29 กรัม-เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.9 (ข) แสดงสัญญาณบนโดเมนความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์สภาวะไม่สมดุลค่า 1.29 กรัม-เซนติเมตร และพบว่ามีค่า Power magnitude เท่ากับ  $0.599 \text{ V}^2/\text{Hz}$  ที่ความถี่ 324 kHz, เท่ากับ  $0.348 \text{ V}^2/\text{Hz}$  ที่ความถี่ 340 kHz และเท่ากับ  $0.521 \text{ V}^2/\text{Hz}$  ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุลโดยมวลถ่วง 0.45 กรัม ระยะ 10 มม. (ในรูปที่ 5.8) แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้อีกว่าเกิดสัญญาณในช่วงความถี่ 324 kHz - 350 kHz มากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ในช่วง 324 kHz จะมีค่า Power magnitude ที่สูงจนสังเกตได้



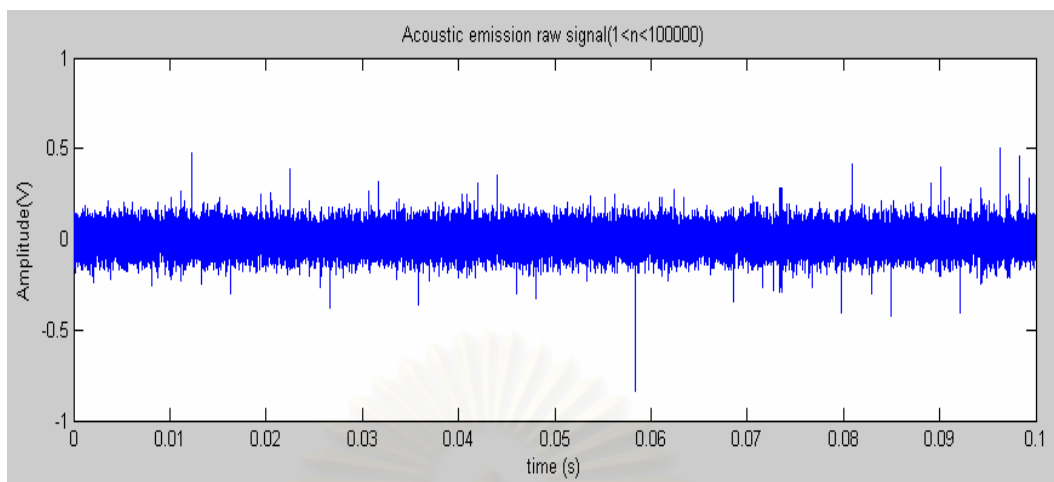
(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain)



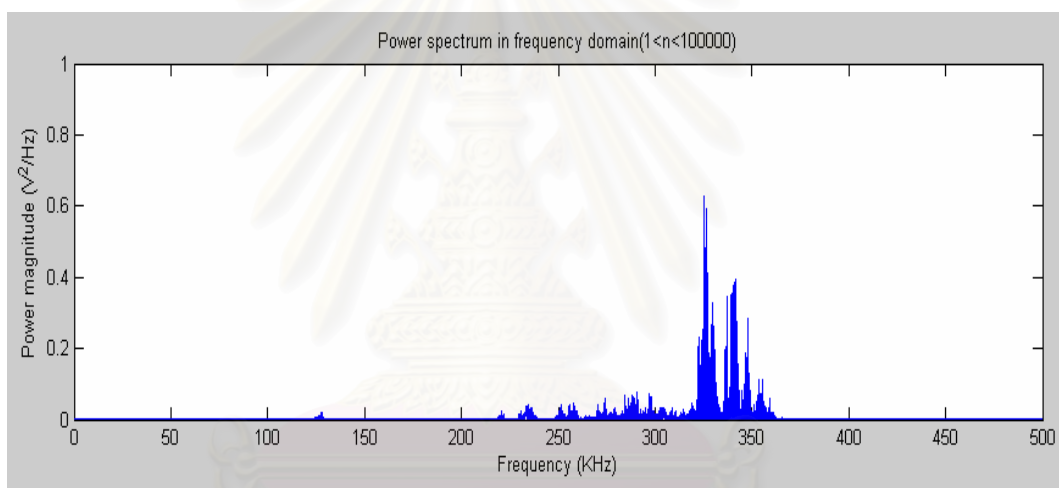
(ข) สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain)

รูปที่ 5.9 สัญญาณ AE เฉลี่ยบนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.10 (ข) แสดงสัญญาณบนโดเมนความถี่ของสปริงเดียมอเตอร์ในสภาวะไม่สมดุลค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร ซึ่งมีค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.601 \text{ V}^2/\text{Hz}$ , ที่ความถี่ 340 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.550 \text{ V}^2/\text{Hz}$  และที่ความถี่ 350 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.389 \text{ V}^2/\text{Hz}$  และโดยรวมแล้วค่า magnitude ของความถี่ในช่วง 324 kHz – 350 kHz มีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าค่า Power magnitude ของสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุลค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร (ในรูปที่ 5.8), 1.29 กรัม-เซนติเมตร (ในรูปที่ 5.9) และ 1.85 กรัม-เซนติเมตร (ในรูปที่ 5.10) มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าน้ำหนักมวลถ่วงที่ต่างกันไม่มากนักเอง



(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain)

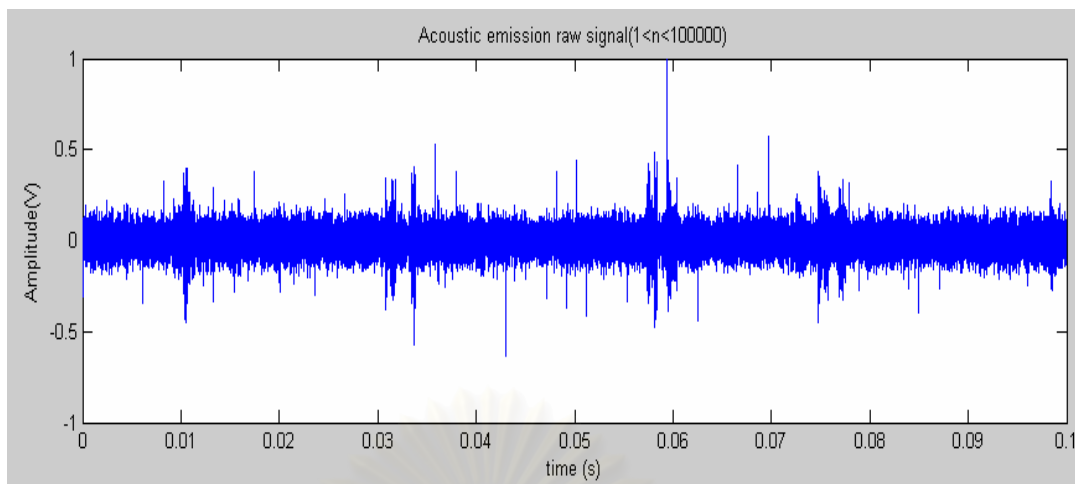


(ข) สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain)

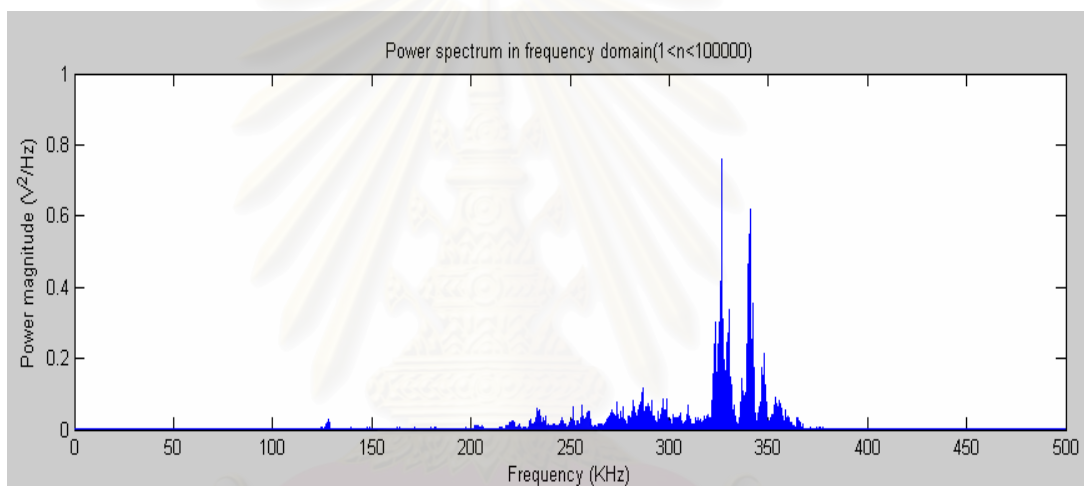
รูปที่ 5.10 สัญญาณ AE เฉลี่ยบนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 2.22 กรัม-เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.11 (ข) แสดงสัญญาณบนโดเมนความถี่ของสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 2.22 กรัม-เซนติเมตร จะเห็นว่าค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.630 \text{ V}^2/\text{Hz}$ ,  
ที่ความถี่ 340 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.395 \text{ V}^2/\text{Hz}$  และที่ความถี่ 350 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.285 \text{ V}^2/\text{Hz}$   
ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุลค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร (จากรูปที่ 5.10)  
แต่จะพบความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่ 324 kHz มีค่าสูงขึ้น





(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain)



(ข) สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency domain)

รูปที่ 5.11 สัญญาณ AE เฉลี่ยบนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 3.35 กรัม-เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.12 (ข) แสดงสัญญาณบนโดเมนความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 3.35 กรัม-เซนติเมตร พบว่ามีค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.760 V^2/Hz$ ,  
ที่ความถี่ 340 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.621 V^2/Hz$  และที่ความถี่ 350 kHz มีค่าเท่ากับ  $0.214 V^2/Hz$   
ซึ่งจะเห็นว่าสภาวะความไม่สมดุลนี้จะให้ค่า Power magnitude ของสัญญาณสูง  
ที่สุด โดยเฉพาะช่วงความถี่ที่ 324 kHz และ 340 kHz นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นสัญญาณบน  
โดเมนเวลา จากรูป 5.12 (ก) เกิด Amplitude ของสัญญาณมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจ  
เนื่องมาจากความไม่สมดุลที่มากขึ้น ทั้งที่เกิดจากมวลถ่วงและระยะจากแกนหมุนที่เพิ่มขึ้น

จากการทดลองนี้ จะเห็นว่าสัญญาณอะคูสติกส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่ 324-350 kHz ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเสียดสีกันของวัสดุภายในสปินเดิลมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเสียดสีกันของลูกปืนภายในตลับลูกปืน[13] เนื่องจากการใส่มวลถ่วงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเสียดสีหรือกันสัมผัสกันนั่นเอง จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกออกมา และมีการถ่ายทอดสัญญาณสู่ชิ้นส่วนที่อยู่ติดๆกัน จนถึงหัวตรวจจับสัญญาณในที่สุด และจากผลการทดลอง พบว่าค่า Mean ของ Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละสภาวะ มีค่าดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงค่า Mean ของ Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละสภาวะ

สภาวะ	ค่า Mean ของ Power magnitude ( $V^2 / Hz$ )
สภาวะปกติ	0.003198 +/- 0.000232
สภาวะไม่สมดุลค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร	0.003503 +/- 0.000152
สภาวะไม่สมดุลค่า 1.29 กรัม-เซนติเมตร	0.003719 +/- 0.000204
สภาวะไม่สมดุลค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร	0.003653 +/- 0.000041
สภาวะไม่สมดุลค่า 2.23 กรัม-เซนติเมตร	0.003722 +/- 0.000121
สภาวะไม่สมดุลค่า 3.35 กรัม-เซนติเมตร	0.004395 +/- 0.000303

จากตารางที่ 5.8 พบว่าค่า Mean ของ Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์ สภาวะปกติมีค่าน้อยที่สุด คือ  $0.003198 V^2 / Hz$  และสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลที่ 0.46 กรัม-เซนติเมตรมี Mean ของ Power magnitude เท่ากับ  $0.003503 V^2 / Hz$  ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างสภาวะทั้งสองนี้มีค่าเท่ากับ  $0.000305 V^2 / Hz$  หรือเท่ากับ 9.4 %

และเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 324 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่หัวจับสัญญาณสามารถจับสัญญาณได้ดีที่สุด พบว่าค่า Power magnitude ของแต่ละสภาวะมีค่าดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงค่า Power Magnitude ที่ความถี่ 324 kHz ของแต่ละสภาวะ

สภาวะ	Power magnitude ( $V^2 / Hz$ )
สภาวะปกติ	0.375
สภาวะไม่สมดุลค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร	0.430
สภาวะไม่สมดุลค่า 1.29 กรัม-เซนติเมตร	0.599
สภาวะไม่สมดุลค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร	0.601
สภาวะไม่สมดุลค่า 2.23 กรัม-เซนติเมตร	0.630
สภาวะไม่สมดุลค่า 3.35 กรัม-เซนติเมตร	0.760

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 kHz ของสปินเดิล ไม่สมดุลมีค่ามากกว่าสถานะสมดุล และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าความไม่สมดุลมีค่ามากขึ้น และค่า Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร มีค่าสูงกว่าค่า Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติอยู่  $0.055 \text{ V}^2 / \text{Hz}$  หรือ 19.0 %

จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาสัญญาณบนโดเมนของความถี่ในการทดลองนี้ พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ปกติ กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลที่สูงกว่าการทดลองที่ 5.2 ซึ่งพิจารณาสัญญาณบนโดเมนของเวลา ดังนั้นในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ จะสามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนของเวลานั่นเอง

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่าเราสามารถบ่งบอกความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์ได้โดยการพิจารณาจากค่า Mean ของ Power magnitude หรือจากค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 Hz ซึ่งถ้าสปินเดิลมอเตอร์มีค่าความแตกต่างของค่า Mean มากกว่า 9.4 % จากค่าของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ หรือ ค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 kHz มากกว่า 19.0 % จากค่าของสปินเดิลมอเตอร์ปกติแล้ว แสดงว่าสปินเดิลมอเตอร์นั้นมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้ทั้งนั้นอาจกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยลงหรือมากกว่านี้ก็ได้ ขึ้นอยู่กับการยอมรับได้ของผู้ใช้งาน

และในการทดลองทั้งหมดนี้ เป็นการทดลองกับสปินเดิลมอเตอร์ชนิดหนึ่งเท่านั้น (ยี่ห้อ Seagate, 5400 rpm) ดังนั้นถ้าต้องการเอาไปประยุกต์ใช้กับสปินเดิลมอเตอร์ชนิดอื่น จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลใหม่ในพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิเช่น Amplitude, AE RMS และค่า Power magnitude ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ (สมดุล) มาเปรียบเทียบกับสปินเดิลมอเตอร์ไม่ปกติ (ไม่สมดุล) ที่มีค่าความไม่สมดุล โดยเปรียบเทียบในลักษณะการดูค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเหมือนที่เคยกล่าวมาแล้วข้างต้น

อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้ จะเห็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณอะคูสติกอิมิสชัน (AE) กับค่าความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์ ในพารามิเตอร์ทั้ง Amplitude และ AE RMS บนโดเมนเวลา และ ค่า Power magnitude ของสัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังนั้นจะสรุปได้ว่าสัญญาณอะคูสติกอิมิสชันที่เกิดขึ้นจากสปินเดิลมอเตอร์นี้ จะสามารถบ่งบอกถึงความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์ได้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ สามารถสรุปผลเป็นข้อๆ ดังนี้

1. สามารถตรวจจับสัญญาณบนสปินเดิลมอเตอร์ได้

จากการทดลองที่ 5.1 พบว่าสัญญาณ AE ที่เกิดขึ้นจากการหักใส่ดินสอ สามารถส่งผ่านมายังหัววัดสัญญาณ AE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ AE ที่เกิดบริเวณสปินเดิลมอเตอร์ จะสามารถตรวจจับได้ด้วยหัววัดสัญญาณ

2. สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์สมดุล กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลโดยมวลถ่วงในสภาวะต่างๆ กับค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลาโดยพิจารณาในพารามิเตอร์ของ Amplitude และ AE RMS ได้

จากการทดลองที่ 5.2 จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ Amplitude และ AE RMS ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่า 0.46 กรัมเซนติเมตร มีค่ามากกว่าค่าสปินเดิลมอเตอร์สมดุล และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความไม่สมดุลโดยมวลถ่วงมากขึ้น ทั้งในสภาวะความไม่สมดุลที่มวลถ่วงมีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นและมีระยะจากแกนหมุนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองยังสรุปได้อีกว่า สามารถบ่งบอกความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง โดยในงานวิจัยนี้พบว่า ถ้าสปินเดิลมอเตอร์มีค่าความแตกต่างไปจากสปินเดิลมอเตอร์ปกติเกิน 2.92 % สำหรับพารามิเตอร์ Amplitude หรือเกิน 4.43 % สำหรับพารามิเตอร์ AE RMS แสดงว่าสปินเดิลมอเตอร์นั้นเกิดความไม่สมดุลเกิดขึ้น

3. สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์สมดุล กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลโดยมวลถ่วงในสภาวะต่างๆ กับค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนความถี่โดยพิจารณาในพารามิเตอร์ของ Power magnitude ได้

จากการทดลองที่ 5.3 พบว่าค่า Power magnitude ในช่วงความถี่ 300 kHz – 350 kHz ของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่า 0.46 กรัมเซนติเมตร มีค่ามากกว่าสปินเดิลมอเตอร์สมดุล

โดยเฉพาะที่ความถี่ 324 kHz, 340 kHz และ 350 kHz และเมื่อพิจารณาค่า Mean ของ Power magnitude จะเห็นว่าสปีนเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลค่า 0.46 กรัมเซนติเมตร มีค่า Mean สูงกว่าสปีนเดิลมอเตอร์ปกติอยู่ 9.4 % ซึ่งในการทดลองนี้เองทำให้สามารถบ่งบอกถึงความไม่สมดุลของสปีนเดิลมอเตอร์ได้โดยการพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง โดยถ้าสปีนเดิลมอเตอร์มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากค่าสปีนเดิลมอเตอร์ปกติ มากกว่า 9.4 % ของค่า Mean ของ Power magnitude แสดงว่าสปีนเดิลนั้นมีความไม่สมดุล

ทั้งนี้ทั้งนั้น เปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างที่จะบ่งบอกความไม่สมดุลนี้อาจมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานจะกำหนด อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างนี้ใช้ได้กับสปีนเดิลมอเตอร์ยี่ห้อ Seagate ความเร็วรอบ 5400 rpm เท่านั้น ซึ่งเป็นชนิดที่ถูกใช้ในการทดลอง แต่ถ้าต้องการไปประยุกต์ใช้กับสปีนเดิลมอเตอร์ชนิดอื่น จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลและคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างใหม่



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 6.2 การประยุกต์ใช้งาน

ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ คือสามารถบ่งบอกความไม่สมดุลของสปินเดิลมอเตอร์ได้ โดยเทียบจากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง และวิธีที่ใช้ในการบ่งบอกความไม่สมดุลนี้ จะมีขั้นตอนการดำเนินการที่กล่าวโดยสรุปคือ

(1) ติดตั้งหัววัดสัญญาณบนฐานมอเตอร์ให้ใกล้กับสปินเดิลมอเตอร์มากที่สุด โดยในการยึดหัววัดสัญญาณนี้ จะต้องใช้สารหล่อลื่นช่วยในการยึด เพื่อลดการลดทอนของสัญญาณ

(2) ทำการตรวจสอบว่าสัญญาณ AE ที่เกิดขึ้นจากสปินเดิลมอเตอร์ สามารถส่งผ่านมาถึงหัววัดสัญญาณได้ โดยใช้สัญญาณ AE ที่เกิดจากการหักได้ดินสอ หักตรงบริเวณตำแหน่งสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งถ้าหัววัดสัญญาณสามารถตรวจจับสัญญาณ AE ที่เกิดขึ้นได้นั้นแสดงว่าจะสามารถดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ แต่ถ้าหัววัดสัญญาณไม่สามารถตรวจจับสัญญาณ จำเป็นต้องตรวจสอบระบบการวัด อาทิเช่น ตรวจสอบการติดตั้งหัววัดสัญญาณ, ตรวจสอบวิธีการประมวลผลสัญญาณ รวมถึงตรวจสอบสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นต้น และทำการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านั้น ก่อนที่ดำเนินการในขั้นต่อไป

(3) ทำการวัดสัญญาณ AE จากสปินเดิลมอเตอร์ปกติ ในพารามิเตอร์ของค่า Amplitude และ AE RMS ที่เกิดจากสัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain) ซึ่งเก็บจำนวน 5 ครั้ง (อาจจะเก็บจำนวนครั้งมากขึ้นเพื่อความถูกต้องในการวัดก็ได้) แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้ง ซึ่งในที่นี้จะได้อาเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดจากสปินเดิลมอเตอร์ปกตินั่นเอง

(4) ทำการวัดสัญญาณ AE จากสปินเดิลมอเตอร์ที่ไม่สมดุล (Unbalance) ในพารามิเตอร์ของค่า Amplitude และ AE RMS ที่เกิดจากสัญญาณบนโดเมนเวลา (Time domain) ซึ่งเก็บจำนวน 5 ครั้ง เช่นเดียวกับข้อ 3 แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้ง ซึ่งในที่นี้จะได้อาเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดจากสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล

(5) นำสัญญาณที่ได้จากหัววัดสัญญาณบนโดเมนเวลา ที่ได้จากข้อ 3 และข้อ 4 มาแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ สังเกตค่า Power magnitude ของความถี่ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของทั้งสปินเดิลมอเตอร์สมดุลกับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล ซึ่งในการทดลองนี้จะพิจารณาค่า Power magnitude ที่ความถี่ 324 kHz

(6) คำนวณหาค่าความแตกต่างระหว่างทั้งสปินเดิลมอเตอร์สมดุล กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่สมดุลในพารามิเตอร์ของ Amplitude, AE RMS และ Power magnitude แล้วนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ค่าอยู่ที่ 2.92 % สำหรับค่า Amplitude, 4.43 % สำหรับค่า AE RMS และ 9.4 % สำหรับค่า Mean ของ Power magnitude

(7) นำสปีนเดิลมอเตอร์ที่ต้องการวัด (unknown) มาวัด ถ้าสปีนเดิลมอเตอร์นั้นมีค่า Amplitude, AE RMS หรือ Power magnitude มากกว่าค่าเฉลี่ยของสปีนเดิลมอเตอร์สมดุลงเกินกว่าค่าที่คำนวณได้จากข้อที่ 6 แสดงว่าสปีนเดิลมอเตอร์นั้นเป็นสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีความไม่สมดุลงนั่นเอง

### 6.3 งานวิจัยที่สามารถดำเนินการต่อได้ในอนาคต

- (1) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณอะคูสติคกับความความผิดปกติของสปีนเดิลมอเตอร์ในสภาวะอื่นๆ เช่นสภาวะการเยื้องศูนย์ (Misalignment) ของแกนสปีนเดิลมอเตอร์ หรือความเร็วรอบของสปีนเดิลมอเตอร์ เป็นต้น
- (2) ตรวจจับสัญญาณอะคูสติคจากฮาร์ดดิสก์ ในสภาวะสปีนเดิลมอเตอร์ที่ไม่สมดุลง
- (3) ตรวจจับสัญญาณอะคูสติคจากฮาร์ดดิสก์ที่ผิดปกติอื่นๆ

## รายการอ้างอิง

1. ซาโตะ ฟุอิจิ. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.
2. ก่อเกียรติ บุญชูกุล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และชัยโรจน์ คุณพินิจกิจ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.
3. T Kaewkongka, Y H Joe Au, R T Rakowski and B E Jones. Application of acoustic emission to condition monitoring of rolling element bearings. Measurement and control 34 (2001): 245-247.
4. C. James Li and S. Y. Li. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. Wear 185 (June 1995): 67-74.
5. Sung-Chang Lee and Andreas A. Polycarpou. Effect of hard-disk drive spindle motor vibration on dynamic microwaviness and flying height modulation. Tribology international 38 (2005): 665-674.
6. Bernhard Knigge and Frank E. Talke. Contact force measurement using acoustic emission analysis and system identification methods. Tribology International 33 (2000): 639-646.
7. Yoshihiro Hirao, Kohei Yamamoto, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha. Development of a hand-held sensor probe for detection of sound components radiated from a specific device using surface intensity measurement. Applied Acoustics 65 (2004): 719-735.
8. ชานนท์ วรวรรษนันท์, สุภาพณีย์ ภมรบุตร และนภดน้อย อาชาวาคม. การสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. บทความในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย (20<sup>th</sup> ME NETT) (2549).
9. นพรัตน์ สีม่วง, จิรพงศ์ ลิ้ม และต้นพงศ์ แก้วคงคา. การศึกษาการแตกร้าวของเหล็กกล้าในการรับภาระแบบล้าตัวโดยใช้เทคนิคอคูสติกส์อิมิตชันส์. บทความความการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE NETWORK 2007) (2550).
10. S. Anuphap-udom, K. Ratanathampan and T. Kaewkongka. Fabricated PVDF Acoustic Emission Sensor for Lubricated Bearing Monitoring. J. Science Research Chulalongkorn University 30 2 (2006): 115-119.

11. A.I. Sagaidak a and S.V. Elizarov. Acoustic emission parameters correlated with fracture and deformation processes of concrete members. Construction and Building Materials 21 (2007):477–482.
12. Rongsheng Geng. Modern acoustic emission technique and its application in aviation industry. Ultrasonics 44 (2006): e102.
13. L. Wang and R.J.K. Wood. The influence of contact conditions on surface reaction layers formed between steel surfaces lubricated by an aviation oil. Tribology International, 40 (2007): 1655–1666.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

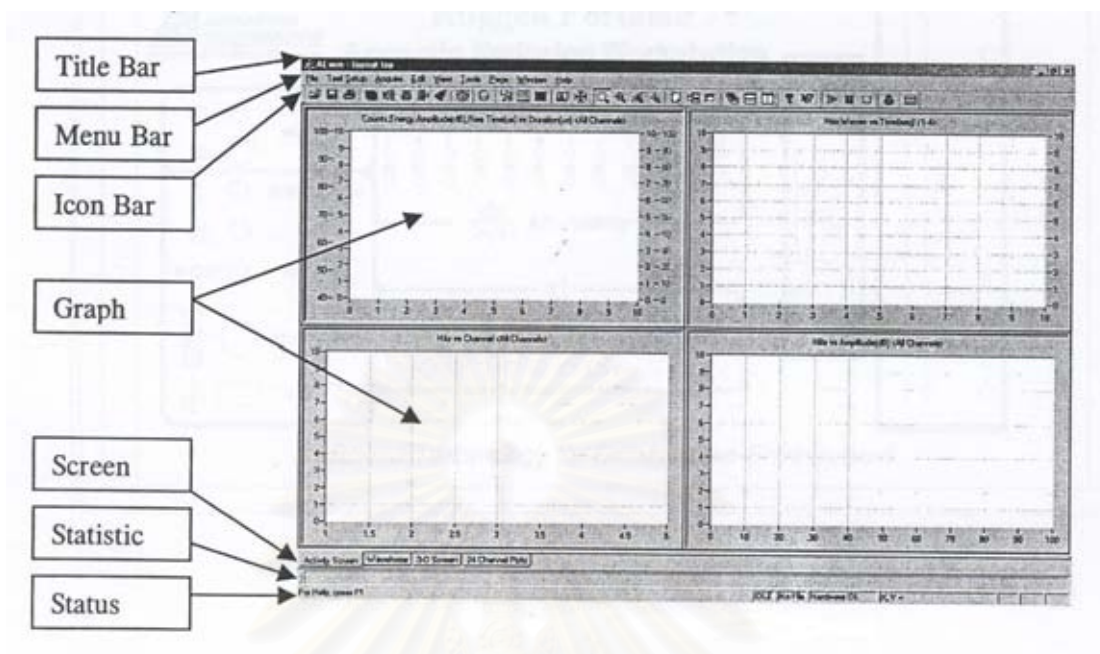


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก รูปหน้าจอของโปรแกรม AE WIN



Title Bar: แสดงแถบชื่อโปรแกรม

Menu Bar: แสดงแถบเมนูหลักที่เป็นคำสั่งข้อมูล

Icon Bar: แสดงแถบไอคอนเครื่องมือทางลัด

Graph: แสดงพื้นที่แสดงกราฟ

Screen: แสดงหน้าของหน้าจอกราฟต่างๆ

Statistic: แสดงข้อมูลทางสถิติของการทดสอบ

Status: แสดงข้อมูลของสถานะการทดสอบ

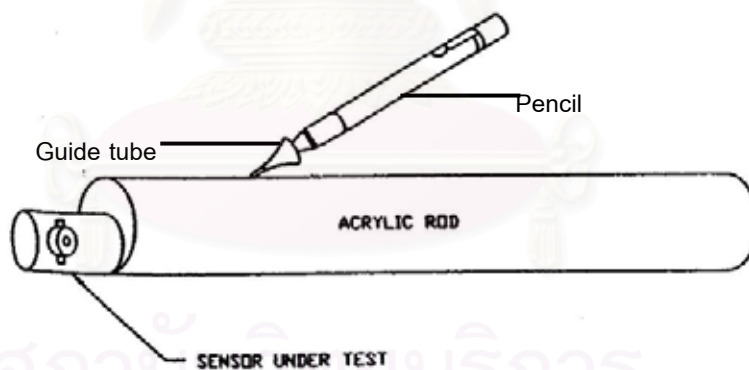
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข มาตรฐาน ASTM E976-05

มาตรฐาน ASTM E976-05 ว่าด้วยเรื่อง “Standard guide for determine the reproducibility of acoustic emission sensor response” เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบหรือเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวตรวจจับสัญญาณ และในมาตรฐานนี้เองจะใช้วิธีการหักได้ดินสอเป็นตัวกำเนิดสัญญาณอะคูสติก ทั้งนี้เนื่องจากการหักได้ดินสอนั้นจะให้กำเนิดสัญญาณอะคูสติกที่แน่นอน (Repeatable acoustic wave)

โดยในกระบวนการทดสอบนั้น สัญญาณอะคูสติกจะเกิดจากการหักได้ดินสอเบอร์ 2H ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.3 มิลลิเมตร ความยาวที่ยื่นออกมาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และดินสอต้องเอียงทำมุมตามหลอดไกด์ (Guide tube) โดยจะหักได้ดินสอลงบนท่ออะคริลิก (Acrylic rod) ให้อยู่ห่างจากหัวจับสัญญาณที่ยึดอยู่กับท่ออะคริลิกด้วยประมาณ 10 เซนติเมตร ดังรูปข้างล่าง และสัญญาณอะคูสติกที่ได้ จะนำมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบหรือเปรียบเทียบสัญญาณอะคูสติกโดยผ่านกระบวนการประมวลผลสัญญาณ และวิเคราะห์ออกมาในรูปสัญญาณบนโดเมนความถี่ โดยวิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform)

### รูปแสดงวิธีการหักได้ดินสอ

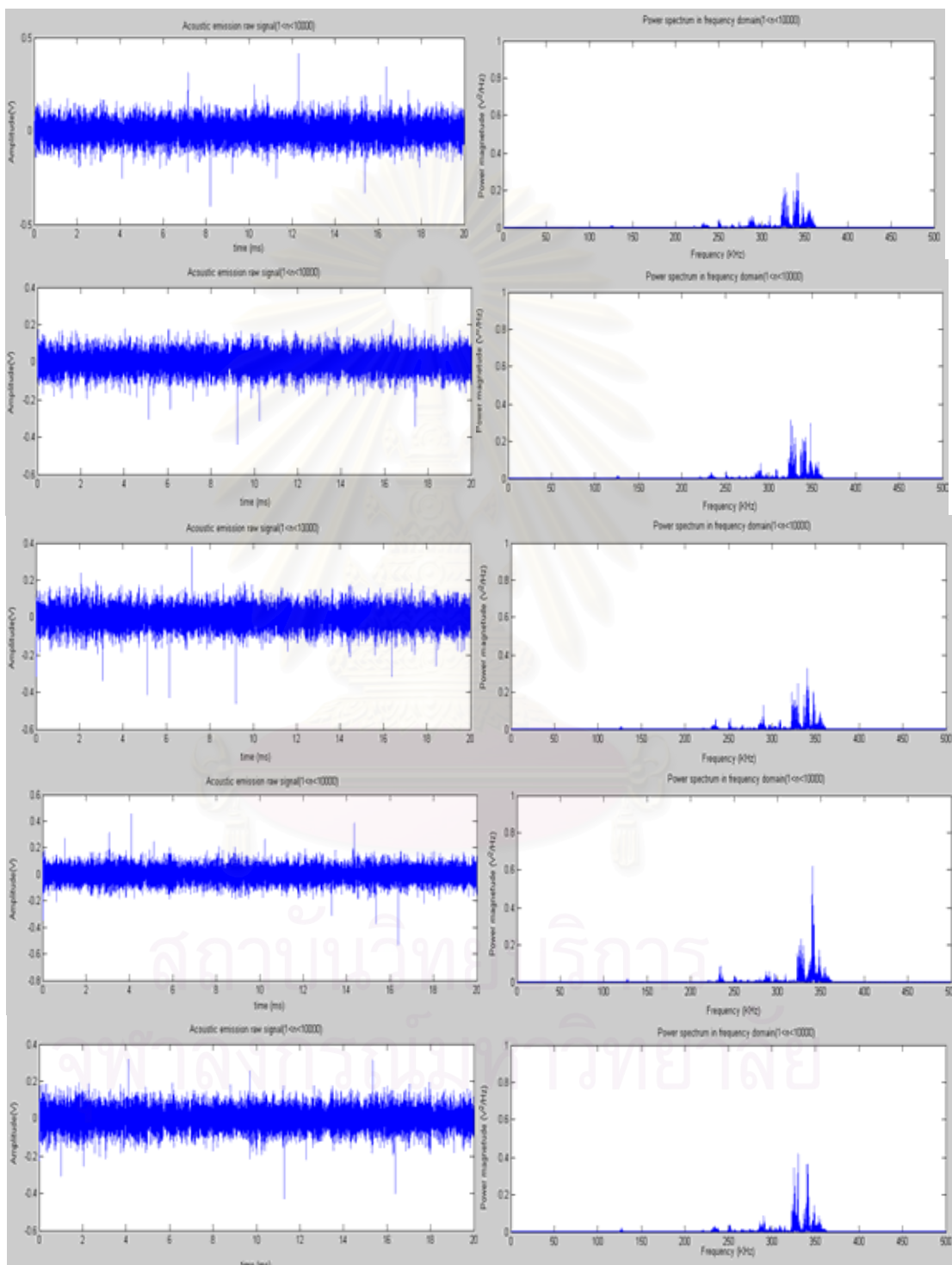


### ภาคผนวก ค รายละเอียด algorithm ของ FFT

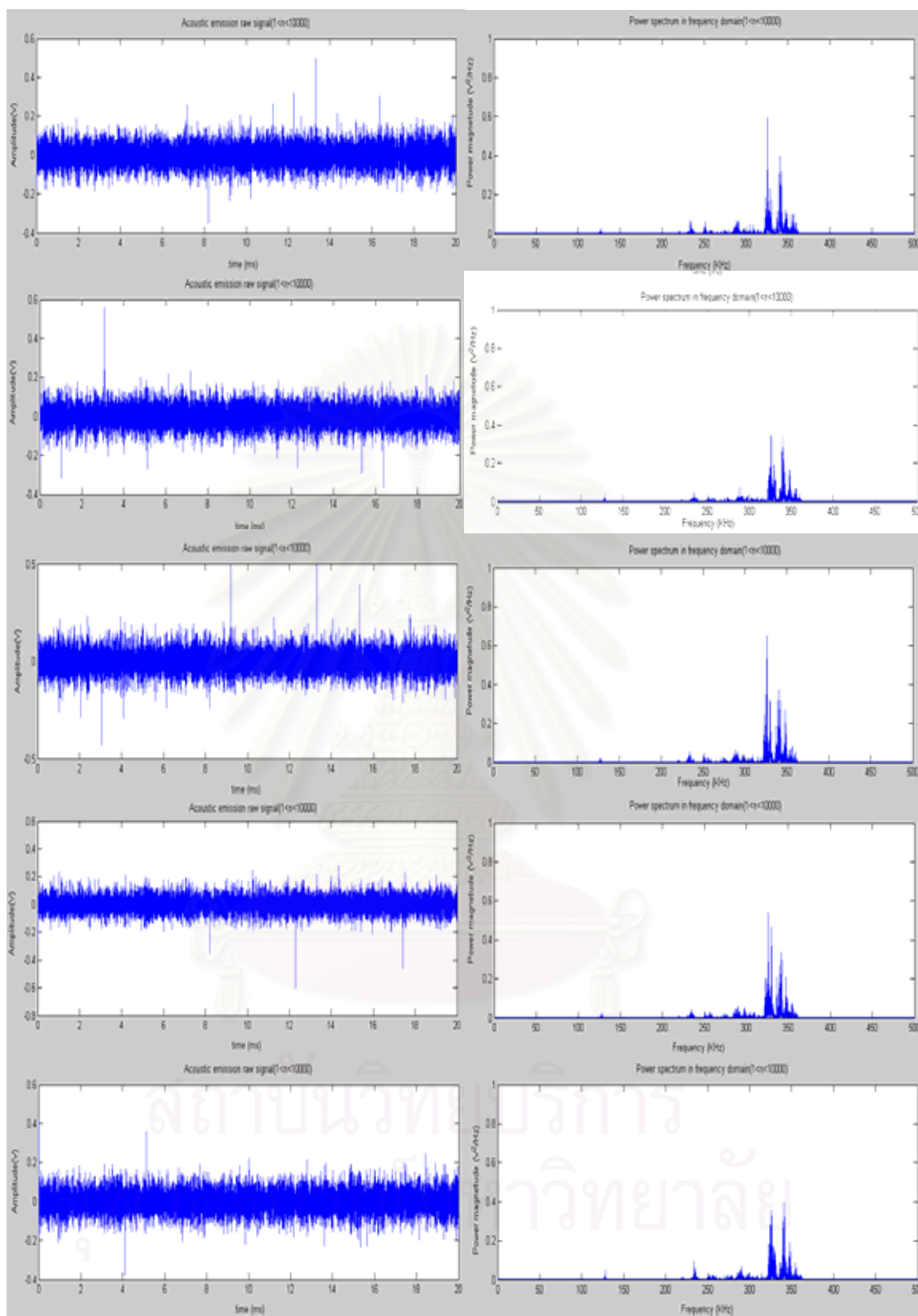
Algorithm ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้กับโปรแกรม Matlab โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลจาก text file ที่ชื่อว่า test จำนวน 1000 จุด กำหนดค่า sampling rate(fs) เท่ากับ 1000000 ซึ่งใช้เวลา(t) ในการตรวจจับทั้งหมด 0.001 วินาที โดยกำหนดให้ A เป็นแอมพลิจูดจากข้อมูล test, Py เป็นค่ากำลัง, f เป็นค่าความถี่ และเขียนกราฟแอมพลิจูด A เทียบกับเวลา t กับกราฟค่ากำลัง Py เทียบกับความถี่ f ซึ่ง algorithm ที่ถูกสร้างขึ้นแสดงให้เห็นดังนี้

```
load test.txt;
fs = 1000000;
t = 0:1/fs:0.001;
A = test(:,1);
subplot(211)
plot(1000*t(1:1000),A(1:1000))
title('Acoustic emission raw signal(1<n<1000)')
xlabel('time (ms)')
ylabel('Amplitude(V)')
n = length(A);
Y = fft(A,n);
Py = Y.*conj(Y)/n;
f = (1:n/2)*fs/(n);
subplot(212)
plot(f/1000,1000*Py(1:n/2))
title('Power spectrum in frequency domain(1<n<1000)')
xlabel('Frequency (KHz)')
ylabel('Power magnetude (V2/Hz)')
```

ภาคผนวก ง รูปสัญญาณ AE บนโดเมนเวลา (Time domain) และบนโดเมนความถี่ (Frequency domain) ของสปินเดิลมอเตอร์สมดุล (Balance) และไม่สมดุล (Unbalance) โดยมวลถ่วงในสภาวะต่างๆ ทั้ง 5 ครั้งของการวัด

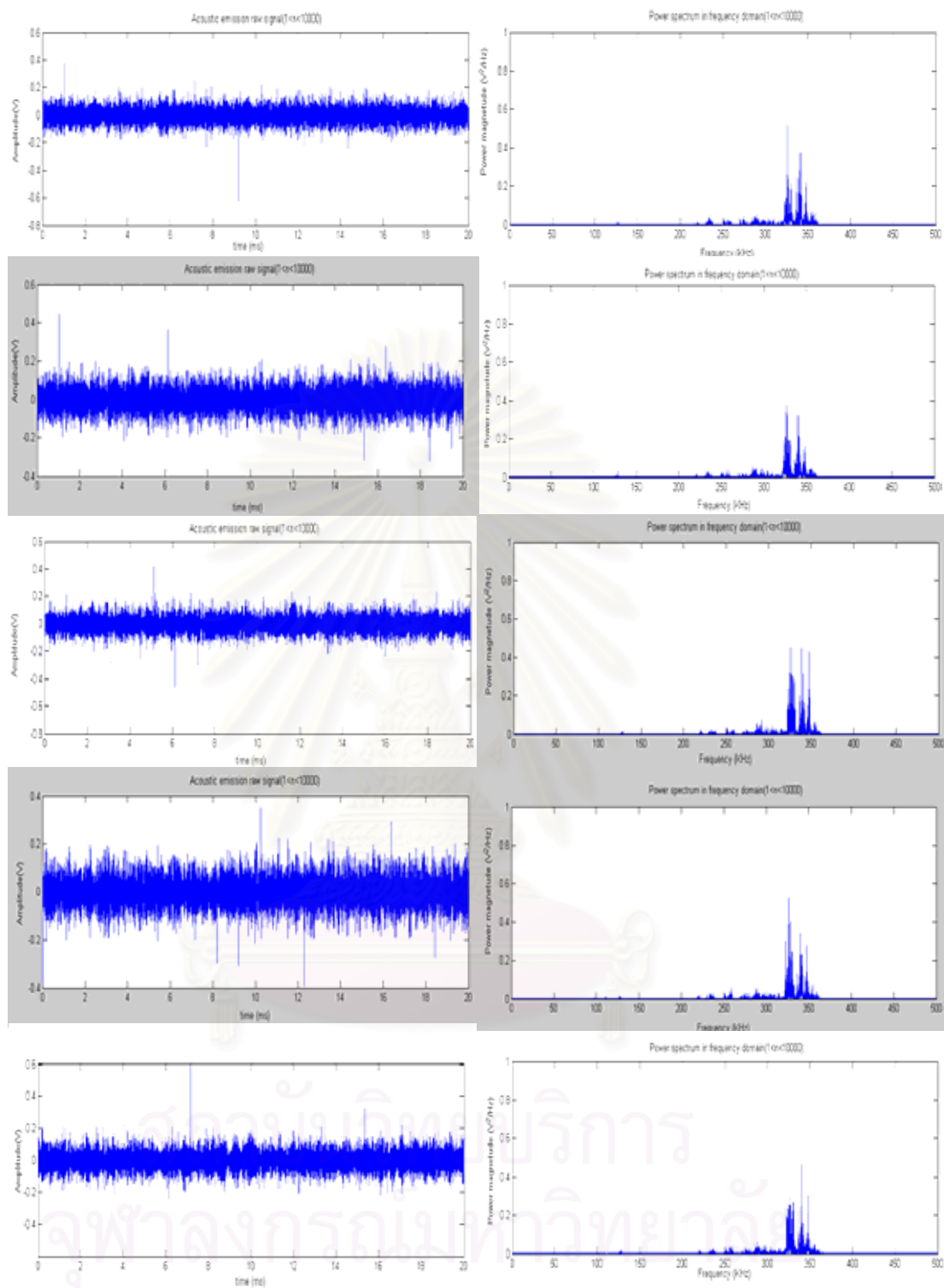


(ก) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ปกติ (สมดุล) ทั้ง 5 ครั้ง

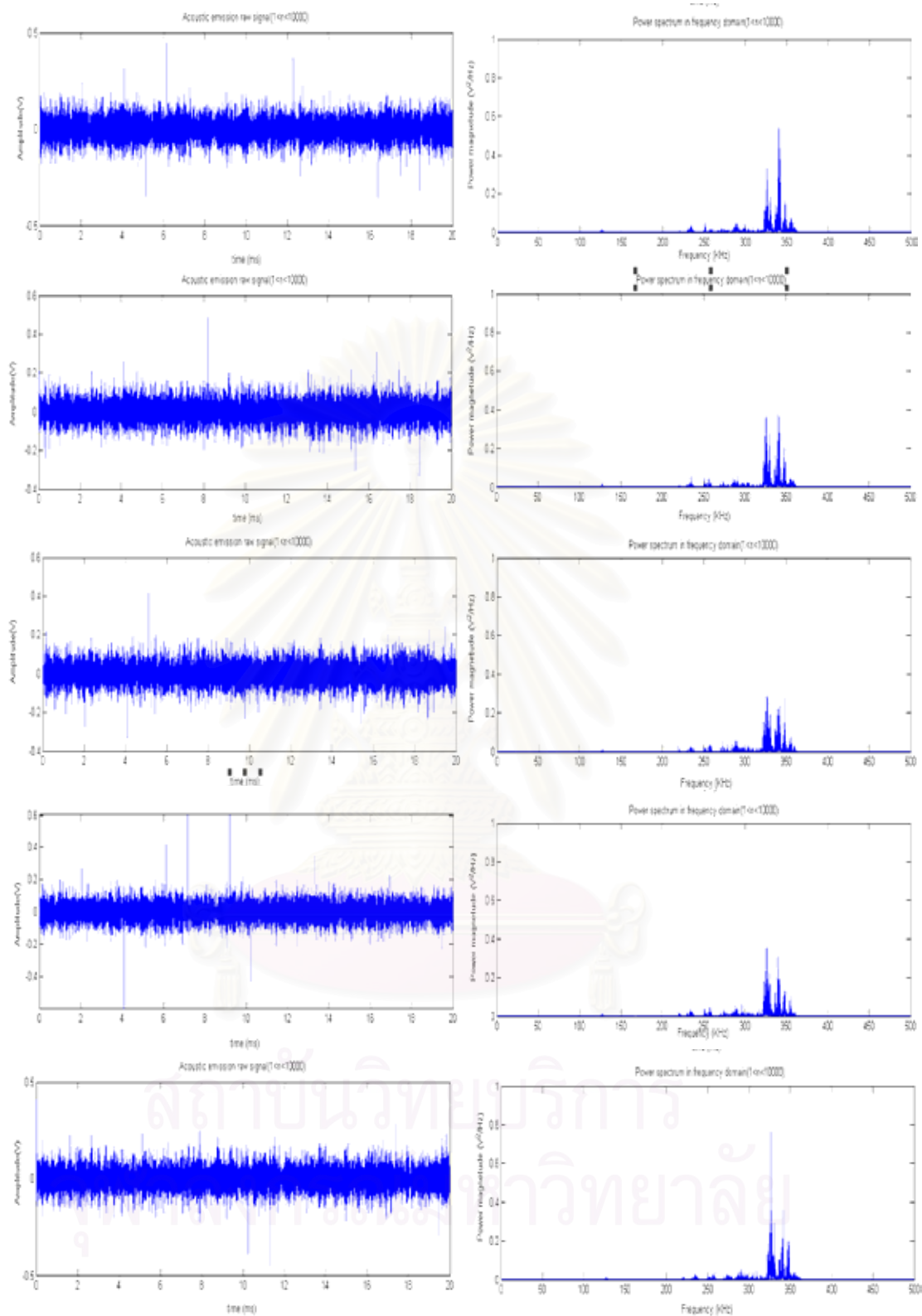


(ข) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 0.46 กรัม-เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง

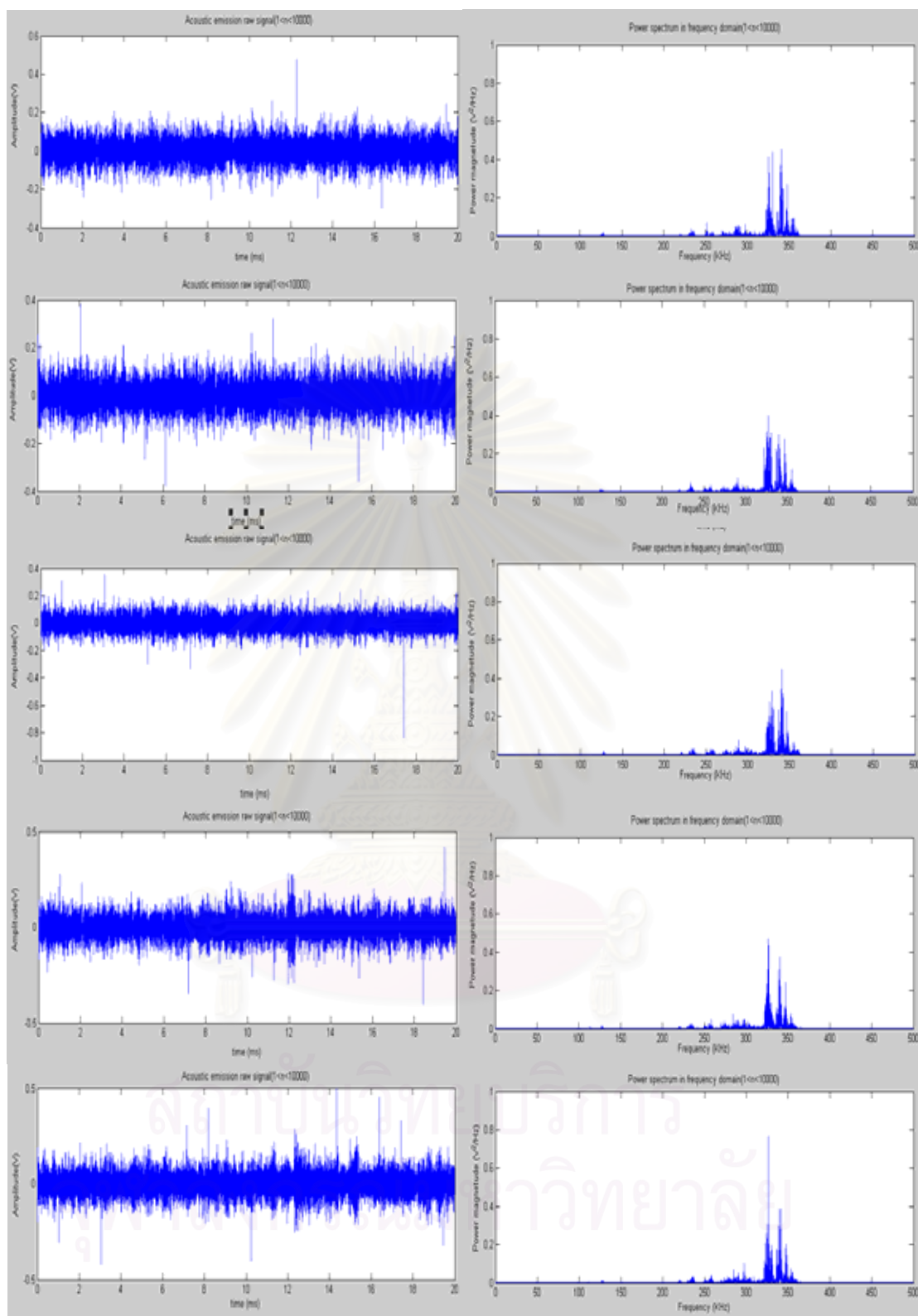




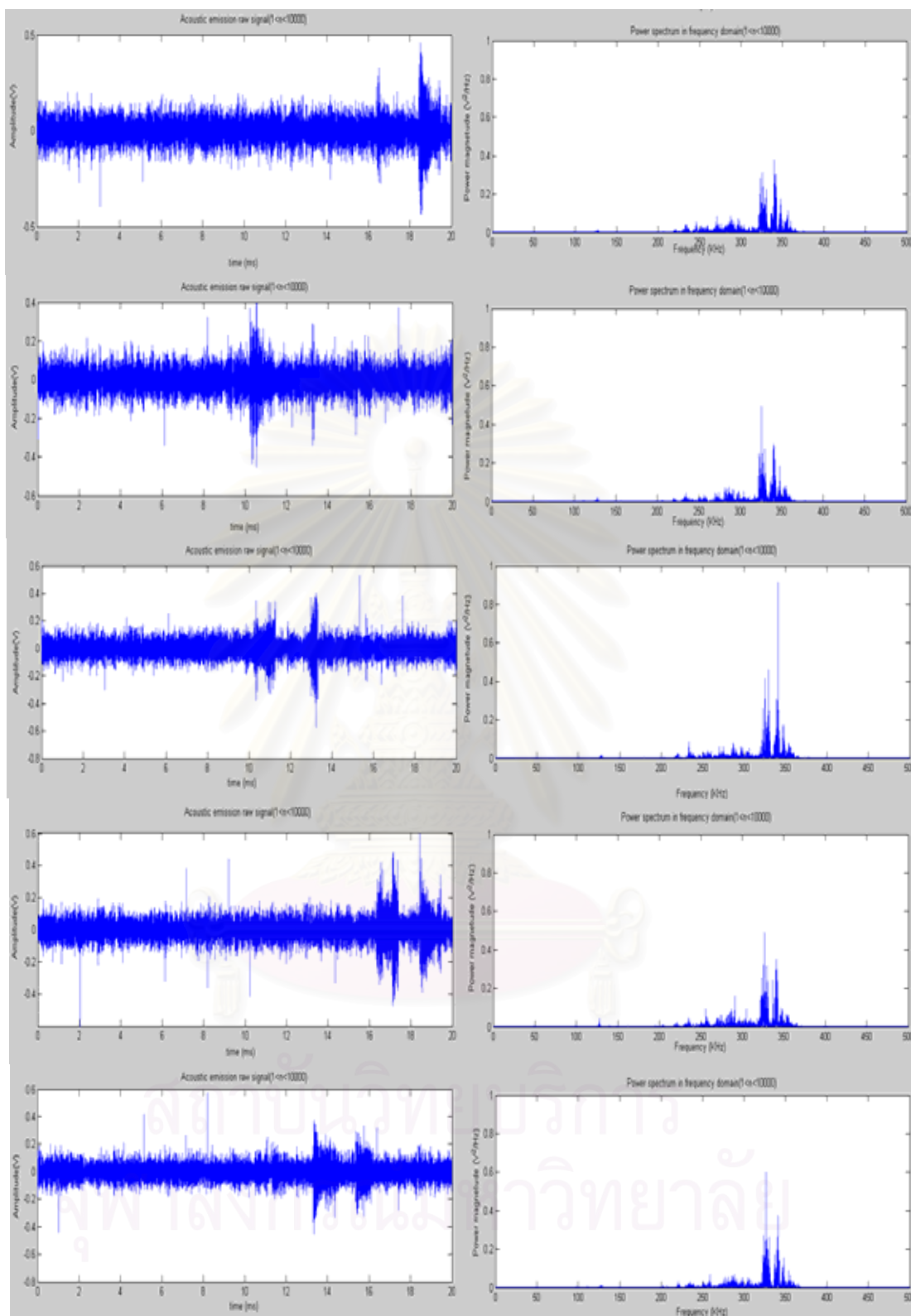
(ค) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดลมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 1.29 กรัม-เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง



(ง) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 1.85 กรัม-เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง



(จ) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดิลมอเตอร์ไม่สมดุล  
 ค่า 2.22 กรัม-เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง



(๑) สัญญาณ AE บนโดเมนเวลาและความถี่ของสปริงเดียมอเตอร์ไม่สมดุล  
ค่า 3.35 กรัม-เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง

## ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์

### การประชุมวิชาการ

1. วัชรีย์ ภูรีเลิศวาณิชย์ , ผศ.ดร. ต้นพงศ์ แก้วคงคา , ผศ.ดร. รัฐชาติ มงคลนาวัน, การวัดการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกจากสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, บทความในการประชุมวิชาการสมาคมมาตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, 2008



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววัชรีย์ ภูรีเลิศวาณิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2522 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสระบุรีวิทยาคม จังหวัดสระบุรี ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2542 ในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาตรีแล้ว ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย