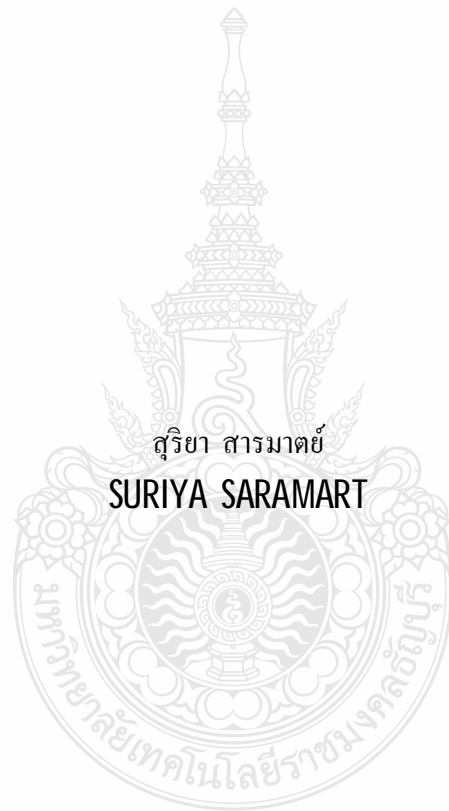


การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินอายุของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน  
โดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

## FAILURES ANALYSIS AND LIFETIME ASSESSMENT OF WHEEL BEARING IN MASS TRANSIT ELECTRIC TRAIN BY VIBRATION SIGNALS ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2553

การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินอายุของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน  
โดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

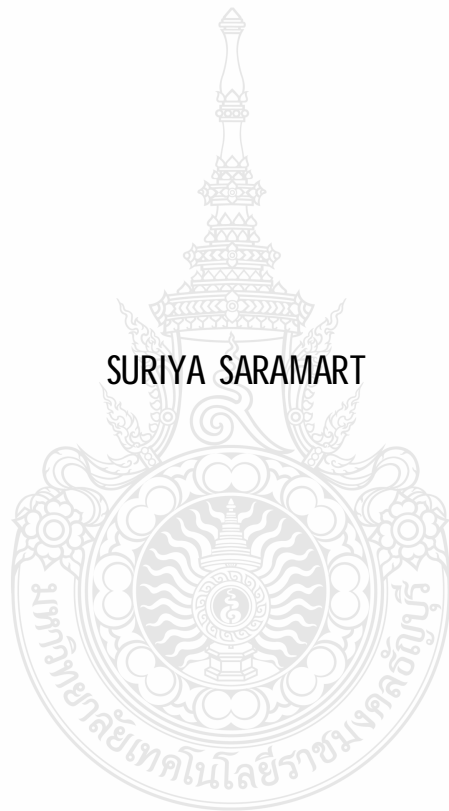


สุริยา สารมาดย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2553

**FAILURES ANALYSIS AND LIFETIME ASSESSMENT OF WHEEL BEARING  
IN MASS TRANSIT ELECTRIC TRAIN BY VIBRATION SIGNALS ANALYSIS**

**SURIYA SARAMART**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**2010**

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และจากการทำงานจริงในสถานประกอบการ ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า



นายสุริยา สารมาตย์

COPYRIGHT © 2010

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

ลิขสิทธิ์ พ.ศ 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินอายุของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน  
**FAILURES ANALYSIS AND LIFETIME ASSESSMENT OF WHEEL BEARING IN MASS TRANSIT ELECTRIC TRAIN BY VIBRATION SIGNALS ANALYSIS**

ชื่อนักศึกษา

นายสุริยา สารมาตย์

รหัสประจำตัว

115170430112-6

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ดร.เทอดเกียรติ ลิมปีทีปราการ

วัน เดือน ปี ที่สอบ

9 มีนาคม 2553

สถานที่สอบ

ห้องประชุมมีฤทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร.มนูศักดิ์ जानทอง)

.....กรรมการ

(ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์)

.....กรรมการ

(ดร.ประทีป วงศ์บัณฑิต)

.....กรรมการ

(ดร.เทอดเกียรติ ลิมปีทีปราการ)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินอายุของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

นักศึกษา นายสุริยา สารมาตย์

รหัสประจำตัว 115170430112-6

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2552

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.เทอดเกียรติ ลิมปิที่ปราการ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกความเสียหายของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 6 ปี โดยอาศัยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสตลับลูกปืนต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของตลับลูกปืน โดยอาศัยการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

จากการศึกษาพบว่าตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานตามระยะเวลาที่กำหนดสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ระดับคือระดับ A, B และ C กล่าวคือระดับ A ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ที่ 1-15% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 300,000-500,000 km ระดับ B ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอยู่ที่ 15-30% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 200,000-300,000 km และระดับ C ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30-50% จะมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยจึงไม่นำไปใช้งานเนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา

จากนั้นทำการศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินหาอายุการใช้งานก่อนเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากกราฟประเมินอายุ จากการศึกษพบว่าตลับลูกปืนที่ผ่านการบำรุงรักษาสามารถใช้งานได้ตามที่กำหนดไว้ แต่จะต้องมีค่าความถี่ของแหวนนอกและแหวนในไม่เกิน 50 mg และ 25 mg ตามลำดับและสัญญาณใน Time Domain ที่มีค่าตั้งแต่ 1000 mg ขึ้นไป จากค่าที่กำหนดไว้จะพบว่า ตลับลูกปืนจะมีอายุการใช้งานเหลืออีกประมาณ 50,000 km ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง

คำสำคัญ: การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, ตลับลูกปืน, รถไฟฟ้า

Thesis Title : FAILURES ANALYSIS AND LIFETIME ASSESSMENT OF  
WHEEL BEARING IN MASS TRANSIT ELECTRIC TRAIN  
BY VIBRATION SIGNALS ANALYSIS

Student Name : Mr. Suriya Saramart

Student ID : 115170430112-6

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Mechanical Engineering

Academic Year : 2009

Thesis Advisor : Dr. Terdkiat Limpeteeparakarn



## ABSTRACT

This paper presents a method of analyzing the failure of a 6-year used taper roller bearing unit of the wheel shaft in a mass-transit electric train. To identify the failure characteristics, a comparison of the failure area with the full surface area in the load zone is made. It also aims to develop methods to assess the remaining bearing lifetime using vibration analysis.

Based on the study result, it is found that there are 3 levels of failure types, namely Class A, Class B, and Class C. Class A has a failure area of about 1-15%, and can be used in service for another 300,000-500,000 km. Class B has about 15-30% and is expected to be used for 200,000-300,000 km. Finally, Class C has a failure area of 30-50% and should not be used in service again.

To assess the seriousness of the damage and analysis of vibration signal is used to identify the bearing lifetime. Based on the study, the used wheel bearing with proper maintenance can be used in service again; however, the outer and inner ring frequencies must not exceed 50 mg and 25 mg respectively, and the signal in time domain must exceed 1000 mg. In case that the limited values are met, the remaining bearing lifetime is approximately 50,000 km, before the bearing will get serious damage.

Keywords: Vibration Analysis, Bearing, Electric Train

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.เทอดเกียรติ ลิมปีทีปการ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และหาแนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานวิจัยโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง และขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยเหลือในด้านข้อมูลและสถานที่ และเนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้ทำงานให้กับบริษัท **Siemens Limited** ซึ่งเป็นบริษัทที่ให้บริการด้านการบำรุงรักษา รถไฟฟ้าให้กับบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ (BTS) จึงขอขอบพระคุณ คุณชรรยง ต้นศิริ ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุง คุณชัยมงคล ศรีจันทร์หา ผู้ช่วยผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุง บริษัท **Siemens Limited** และเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอด ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัย และคอยให้กำลังใจเสมอมาทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคนานาประการจนสำเร็จ ประโยชน์อันใดจากงานวิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตานุชาแก่บิดามารดา ครูอาจารย์ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุริยา สารมาตย์

9 มีนาคม 2553



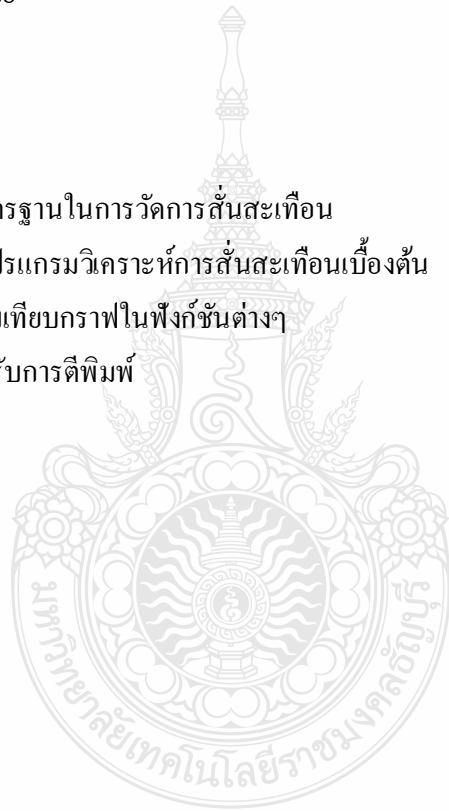


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 กรอบแนวคิดในงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
1.7 ข้อจำกัดของงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและทบทวนวรรณกรรม	6
2.1 บทนำ	6
2.2 การสั่นสะเทือน (Vibration)	6
2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณ	10
2.4 ทบทวนวรรณกรรม	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	24
3.1 การจำแนกระดับความเสียหาย	25
3.2 วิธีการดำเนินงานในการจำแนกความเสียหาย	26
3.3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน(Vibration Analysis)	31
3.4 วิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือน	32
3.5 การวิเคราะห์ความเสียหาย	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	41
4.1 บทนำ	41
4.2 ผลจากการจำแนกกลับถูกป้อน	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลจากการวัดการสั้นสะเทือน	42
4.4 ผลจากการเปรียบเทียบระดับการสั้นสะเทือนของตลับลูกปืน Class ต่างๆ	44
4.5 การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินหาอายุการใช้งาน	48
4.6 สรุปผลจากการทดลอง	60
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลงานวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ก อุปกรณ์และมาตรฐานในการวัดการสั้นสะเทือน	66
ข วิธีการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์การสั้นสะเทือนเบื้องต้น	71
ค แสดงการเปรียบเทียบกราฟในฟังก์ชันต่างๆ	83
ง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	96
ประวัติผู้เขียน	106



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวัดตลับลูกปืน	37
3.2 ข้อมูลของตัวรถไฟฟ้า	37
3.3 ข้อมูลทั่วไปของตลับลูกปืนจากผู้ผลิต SKF เบอร์ 1639590A แบบ Taper Roller Bearing Unit (TBU)	38
3.4 รายละเอียดของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบ	38
4.1 อายุการใช้งานที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการบำรุงรักษา	42
4.2 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class New จำนวน 96 ลูก หรือรถไฟฟ้า 4 ขบวน	45
4.3 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class A จำนวน 96 ลูก หรือรถไฟฟ้า 4 ขบวน	45
4.4 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class B จำนวน 48 ลูก หรือรถไฟฟ้า 2 ขบวน	46
4.5 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class C จำนวน 6 ลูก	46
4.6 ค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายก่อนการบำรุงรักษา โดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง)	56
4.7 ค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายหลังการบำรุงรักษา โดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง)	57

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบของปัญหาที่เป็นกรอบแนวคิดในงานวิจัย	2
1.2 แนวคิดในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน	3
2.1 ลักษณะของการสั่นสะเทือน	7
2.2 Damped Force Vibration System	7
2.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ลักษณะแบบเป็นคาบ	9
2.4 สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนเวลา (Time Domain) และกราฟโดเมนความถี่ (Spectrum Domain)	10
2.5 กราฟการขจัด	12
2.6 กราฟความเร็ว	13
2.7 กราฟความเร่ง	13
2.8 ความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน	15
2.9 กราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่	15
2.10 ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่	16
2.11 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ	16
2.12 ตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing	17
2.13 ลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ชั้นตอน	19
2.14 ขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping	20
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม	24
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน	26
3.3 ลักษณะความเสียหายที่ผิวมีการหลุดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เนื่องจากความล้า	27
3.4 ลักษณะความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน	27
3.5 ลักษณะความเสียหายจากการขาดสารหล่อลื่น โดยมีการเปลี่ยนสีของผิว	28
3.6 เครื่องวัดเคลียร์เร็นช	28
3.7 ภาพวาดตลับลูกปืน	28
3.8 ภาพถ่ายแสดงความสึกและการมองด้านข้าง	29
3.9 ภาพขยายความละเอียดขนาด $10 \mu m$	29
3.10 ภาพขยายบริเวณความเสียหายโดยเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระ	30
3.11 บริเวณ Load Zone	30
3.12 การหาพื้นที่ความเสียหายบริเวณ Load Zone	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.13	ขั้นตอนในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน	31
3.14	เครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe)	32
3.15	ชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อน	33
3.16	ชุดอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกลึงล้อ	33
3.17	เครื่องมือวัดและบันทึกผลการสั่นสะเทือน	34
3.18	คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	34
3.19	ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล	35
3.20	การติดตั้งหัววัดในแนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial)	36
3.21	ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวลูกปืนในขบวนรถ	36
3.22	ความถี่จากการวัด	39
3.23	สัญญาณความเสียหายของตัวลูกปืน	40
4.1	ความเร็วรอบที่มีผลต่อค่าการสั่นสะเทือน	42
4.2	ผลในช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ	43
4.3	ความละเอียดในการแสดงผล	44
4.4	การเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตัวลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM	47
4.5	กราฟแนวโน้ม	47
4.6	กราฟความถี่ใน Time Domain ของตัวลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM	49
4.7	การคำนวณหาความถี่ของชิ้นส่วน	51
4.8	ขั้นตอนในการแสดงความถี่ของชิ้นส่วน	52
4.9	การอ่านค่าความถี่ของชิ้นส่วน ในกราฟแสดงผล	53
4.10	กราฟความถี่ใน Spectrums Domain ของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 150 RPM	54
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนกับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ	55
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใน Time Domain กับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ	55
4.13	กราฟประเมินอายุการใช้งาน	58
4.14	ความคาดเคลื่อนของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าจริงและผลจากการคำนวณ	59
4.15	ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระ ในแหวนนอกประมาณ 10, 30, 80 และ 100%	59

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BPFO	Ball Pass Frequency Outer
BPFI	Ball Pass Frequency Inner
BSF	Ball Spin Frequency
CPM	Circle Per Minute
CPS	Circle Per Second
FTF	Fundamental Cage (Train) Frequency
FFT	Fast Furrier Transform
MTBF	Mean Time Between Failures
RPM	Round Per Minute
RMS	Root Mean Square
SEE	Spectral Emitted Energy
TBU	Taper Roller Bearing Unit



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

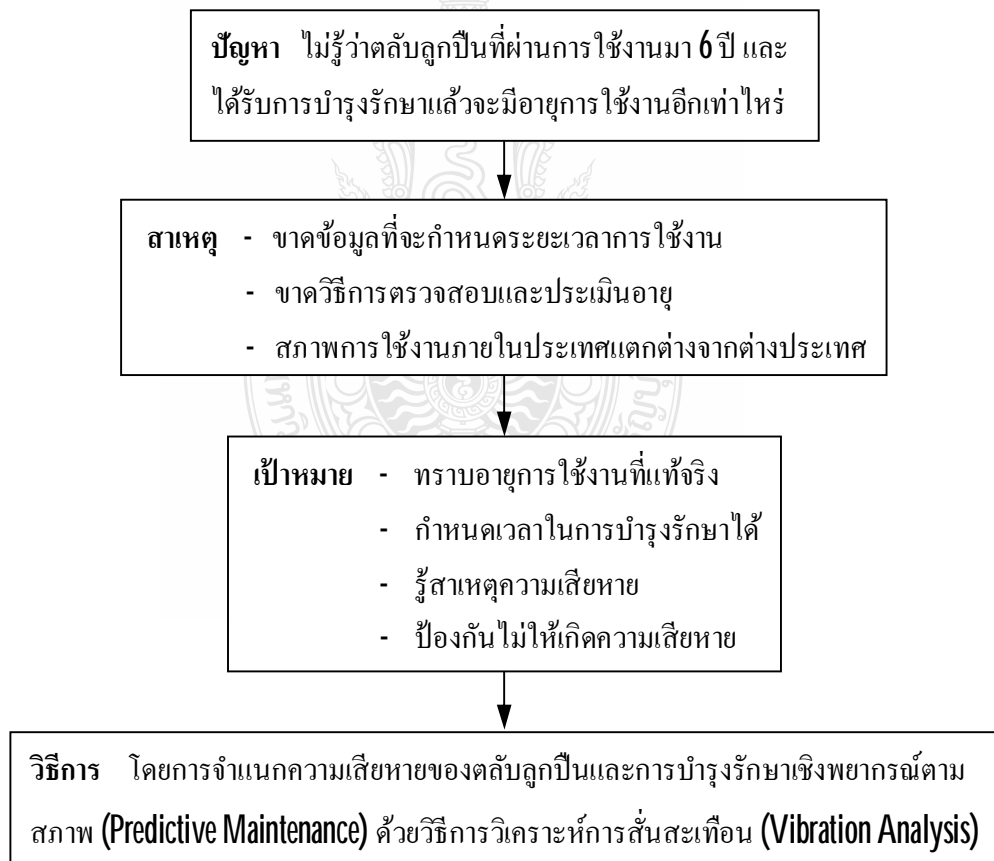
ในปัจจุบันการบำรุงรักษารถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (BTS) นั้น ได้นำกลยุทธ์งานบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) หรือการบำรุงรักษาแบบให้ความไว้วางใจสูง (Reliability Base Maintenance) มาใช้ในโรงซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าอย่างจริงจัง การบำรุงรักษาดังกล่าวจะเน้นการติดตามสภาพของเครื่องจักร (Machine Health Condition Monitoring) เป็นระยะ โดยใช้วิธีต่างๆ อาทิเช่นการวิเคราะห์สภาพการสั่นหรือของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยการวิเคราะห์น้ำมัน (Spectrometer Oil Analysis) การวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Testing) หรือการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) ซึ่งวิธีการที่ได้รับความนิยมในการตรวจสอบเครื่องจักรนั้น คือการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำนายความเสียหายของเครื่องจักร [1] เช่นการเสียสมดุล (Unbalance) การเอียงศูนย์ (Misalignment) การสึกหรอของฟันเกียร์ (Worn Gear) และความเสียหายของตลับลูกปืน (Bearing Damage) เป็นต้น

การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้อบกพร่องต่างๆ ซึ่งข้อบกพร่องแต่ละแบบจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะและความถี่เฉพาะตัว โดยความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นจะสามารถบอกสาเหตุและที่มาของการสั่นสะเทือน สำหรับการวิเคราะห์ตลับลูกปืนซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักทางด้านเครื่องกล [2] ที่จะต้องมีใช้งานอยู่ในทุกเครื่องจักรกลที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตลับลูกปืนแบบ Anti-Friction Bearing ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 4 ชิ้น คือแหวนนอก (Outer Ring) แหวนใน (Inner Ring) เม็ดลูกปืน (Ball หรือ Roller) และรัง (Cage) ตลับลูกปืนแบบนี้จะมีค่า Clearance ระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวเองและกับชิ้นส่วนที่สวมอยู่น้อยมาก เช่น เพลาหรือเสื่อของตลับลูกปืนจากเหตุผลดังกล่าวเมื่อเกิดการชำรุดขึ้นที่ตลับลูกปืนจะก่อให้เกิดผลกระทบกับชิ้นส่วนที่ตลับลูกปืนรองรับอยู่ ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายของเครื่องจักรทั้งระบบ [3] และยังส่งผลกระทบต่อทั้งในด้านความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นออกมาค่อนข้างถูกต้องทำให้สามารถแก้ไขปัญหาได้รวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่าย และข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนยังช่วยในการวางแผนตรวจสอบบำรุงหรือเปลี่ยนอะไหล่ก่อนที่จะเกิดความเสียหายแบบหยุดชะงักในทันทีทันใด (Break Down) ทำให้ลดเวลาในการหยุดเดินรถ และลดต้นทุนการสูญเสียของอุปกรณ์ต่างๆ

## 1.2 กรอบแนวคิดในงานวิจัย

เมื่อรถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในระยะหนึ่งก็จำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และรักษามาตรฐานความปลอดภัย ตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้าของ BTS เองซึ่งได้ใช้งานมาเป็นระยะเวลา 6 ปีแล้ว ได้มีการบำรุงรักษาและการตรวจสอบสภาพอยู่เสมอ ย่อมเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากชิ้นส่วนบางชิ้นอาจเกิดข้อบกพร่อง หรือชำรุดก่อนเวลาอันควร หรือจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเพราะถึงระยะเวลาที่ผู้ผลิตได้แนะนำเอาไว้

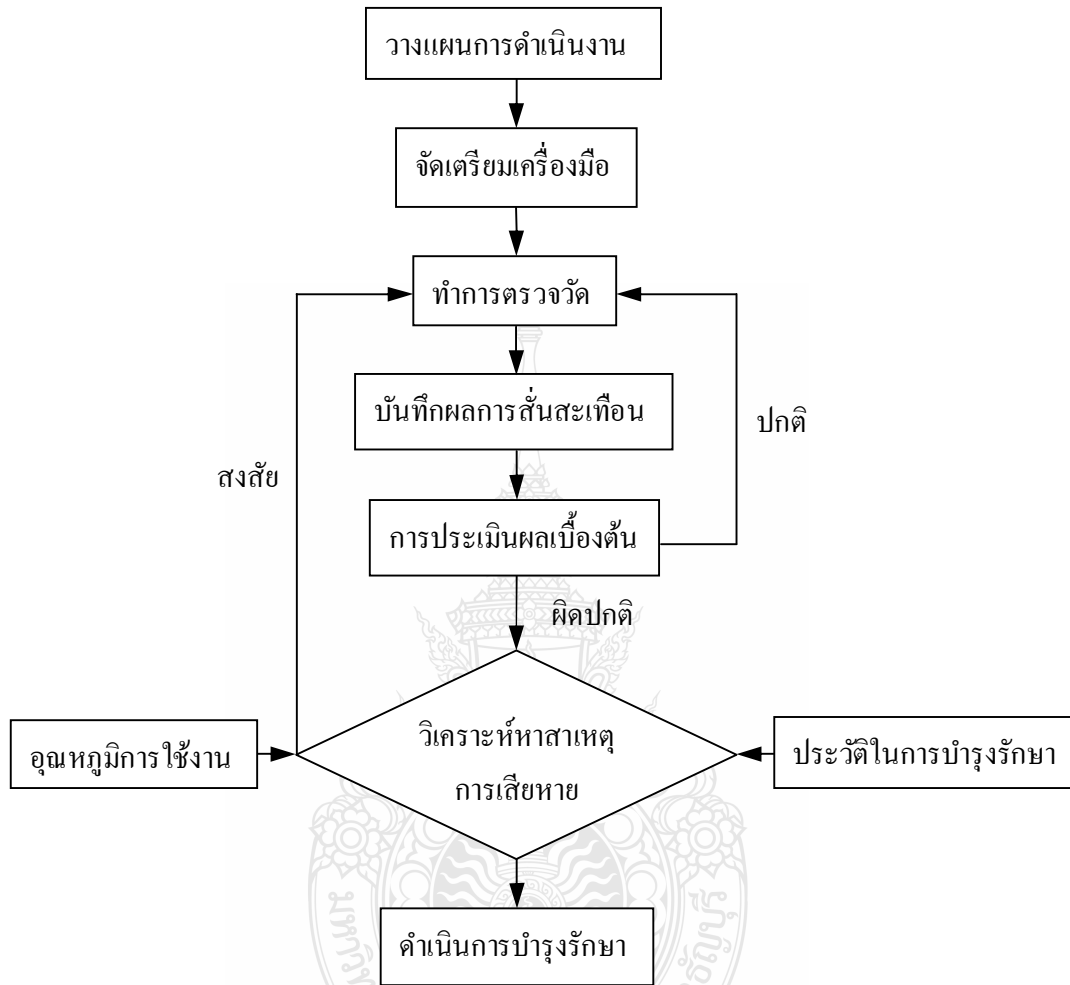
โดยทั่วไปการใช้งานตลับลูกปืนสามารถใช้งานได้มากหรือน้อยกว่าอายุการใช้งานที่ผู้ผลิตแนะนำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเงื่อนไขและสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาความเสียหายเพื่อที่จะหาอายุการใช้งานที่แท้จริงของตลับลูกปืน ซึ่งปัจจุบันนั้นจะยึดข้อมูลของตลับลูกปืนรถไฟฟ้าที่ใช้ในต่างประเทศซึ่งไม่ตรงกับการใช้งานจริงที่มีอยู่ภายในประเทศ รูปที่ 1.1 แสดงองค์ประกอบของปัญหาที่เป็นกรอบแนวคิดในงานวิจัย



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของปัญหาที่เป็นกรอบแนวคิดในงานวิจัย



กรอบแนวคิดในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) รูปที่ 1.2 แสดงแนวคิดในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน



รูปที่ 1.2 แนวคิดในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 สมมติให้รถไฟทุกขบวนมีการรับภาระที่เท่ากัน โดยตลอด
- 1.3.2 สภาพแวดล้อมในการวัดการสั่นสะเทือนต้องเหมือนกันทุกครั้ง
- 1.3.3 ไม่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก
- 1.3.4 สมมติให้การเสียหายมีลักษณะที่เหมือนกัน

## 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.4.1 เพื่อจำแนกความเสียหายของตลับลูกปืน โดยอาศัยการระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระ

1.4.2 เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายด้วยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

1.4.3 เพื่อประเมินอายุการใช้งานของตลับลูกปืนก่อนที่จะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง

1.4.4 เพื่อเสนอแนะแนวทางในการบำรุงรักษา

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวอย่างที่ได้รับการบำรุงรักษาแล้ว

1.5.2 ทำการวัดที่ช่วงความถี่ 0.3-20000 Hz

1.5.3 ใช้ความเร็วคงที่ในการวัดคือ 50, 100, 150 รอบต่อนาที

1.5.4 ใช้ค่าความละเอียดในการแสดงผลของความถี่ในกราฟ ที่ 1600 และ 3200 Lines

1.5.5 ใช้เครื่องมือในการวัดและเก็บข้อมูลของ FAG รุ่น Detector III และ Software สำเร็จรูป

1.5.6 ทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนบนเครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe)

1.5.7 ใช้หัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง (Acceleration Transducer)

1.5.8 ทำการวัดในแนวแกน และแนวรัศมี

1.5.9 วิเคราะห์ความเสียหายใน Time Domain และ Frequency Domain

1.5.10 มุมองศาของ Load Zone 100-120 องศา

1.5.11 วัดขนาดพื้นที่ความเสียหายที่ผิวรับภาระของแหวนนอก

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 จำแนกความเสียหายของตลับลูกปืนหลังจากที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 ปี

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการสั่นสะเทือน

1.6.3 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน

1.6.4 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและกรณีศึกษา

1.6.5 เก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่ยังไม่มีการสึกหรอ และตลับลูกปืนที่มีการสึกหรอในระดับต่าง ๆ

1.6.6 เปรียบเทียบผลของสัญญาณและวิเคราะห์ความเสียหาย

1.6.7 ประเมินอายุการใช้งานของตลับลูกปืน

1.6.8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 1.7 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.7.1 ข้อจำกัดของความเร็วรอบที่ใช้วัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากขึ้นกับขีดจำกัดของเครื่องกลึงล้อ
- 1.7.2 ต้องใช้ระยะเวลาและตลับลูกปืนจำนวนมาก เนื่องจากเป็นการศึกษาจากการใช้งานจริง
- 1.7.3 ต้องกลึงล้อก่อนทุกครั้งที่จะวัดค่าการสั่นสะเทือน
- 1.7.4 ผู้วิเคราะห์ความเสียหายควรจะต้องผ่านการฝึกอบรม



## บทที่ 2

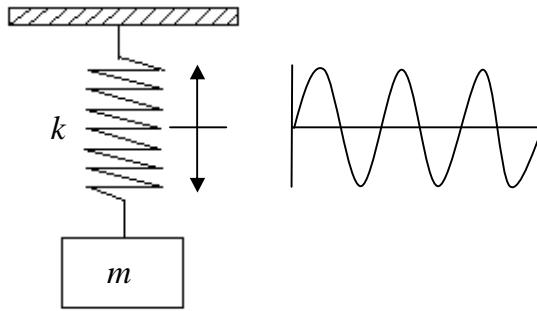
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนั้นจำเป็นต้องทราบทฤษฎีพื้นฐานและที่มาของการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุภายใต้แรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นแรงภายในหรือแรงภายนอกก็ได้ โดยทั่วไปแล้วการสั่นสะเทือนเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ แต่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อดีที่ดีที่สุดก็คือการพยายามจำกัดขนาดของการสั่นสะเทือนให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ สำหรับเครื่องจักรแล้ว การสั่นสะเทือนอาจเกิดได้หลายสาเหตุเช่น การไม่สมดุลของเครื่องจักรที่หมุน การเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของเครื่องจักรตามแนวเส้นตรง การขัดสีกันระหว่างชิ้นส่วนสองชิ้น การหลุดหลวมของชิ้นส่วนของเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งการสั่นสะเทือนเหล่านี้มักมีผลต่อสมรรถนะและสภาพการใช้งานของเครื่องจักร ดังนั้นในการทำให้เครื่องจักรทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนเพื่อที่จะได้สามารถวิเคราะห์ปัญหาและแก้ไขได้ถูกต้อง

#### 2.2 การสั่นสะเทือน (Vibration)

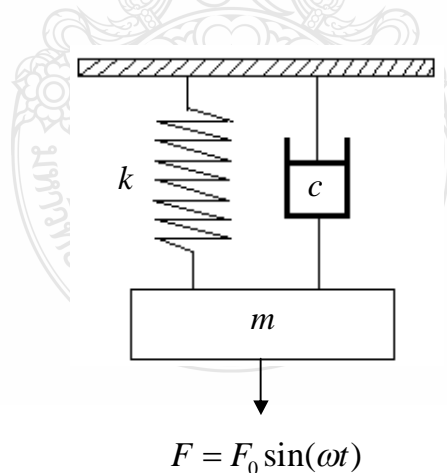
คือการเคลื่อนที่ของวัตถุรอบๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้น ในแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือจะเป็นการแกว่ง (Oscillation) รอบจุดสมดุลก็ตาม ตัวอย่างเช่น การแกว่งตัวของลูกตุ้มนาฬิกาหรือการเคลื่อนที่ของก้อนมวลที่ติดอยู่กับสปริง เป็นต้น ถ้าเราสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะที่ซ้ำมาๆ ได้เราจะพบรูปแบบของการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต่างกันขึ้นอยู่กับระยะ หรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ นั้นๆ รอบตำแหน่งหนึ่งซึ่งจะทำให้เราเห็นลักษณะรูปแบบเฉพาะของการเคลื่อนที่แบบสั่นได้ [4] รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของการสั่นสะเทือน ในการศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้น จำเป็นที่จะต้องเข้าใจพื้นฐานและองค์ประกอบต่างๆ เช่น โดเมนเวลา (Wave Form หรือ Time Domain) โดเมนความถี่ (Spectrum Domain) ความถี่ (Frequency) แอมพลิจูด (Amplitude) และการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบที่ได้กล่าวมานั้นจะนำไปใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะต่างๆ ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากความซับซ้อนของเครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนจำนวนมาก ซึ่งจะก่อให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ส่งออกมาารวมกันโดยผู้วิเคราะห์จะต้องสามารถแยกแยะลักษณะการสั่น และบอกถึงสาเหตุที่มาได้



รูปที่ 2.1 ลักษณะของการสั่นสะเทือน

### 2.2.1 การสั่นแบบมีแรงกระทำและตัวหน่วง (Force Vibration - Damped)

สำหรับระบบการสั่นสะเทือนที่มีแรงกระทำจากภายนอกพร้อมกับตัวหน่วง รูปที่ 2.2 แสดงการสั่นที่มีแรงกระทำจากภายนอกและตัวหน่วง (Damped Force Vibration System) โดยการเคลื่อนที่ของมวล  $m$  (Mass) ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือ การสั่นแบบอิสระที่มีการหน่วงที่ความถี่ธรรมชาติ และการเคลื่อนที่แบบคงตัวในรูปฮาร์มอนิกที่ความถี่ตามการกระทำของแรง ความถี่ธรรมชาติของวัตถุที่เกิดจากการหน่วงจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับกรณีความถี่แบบฮาร์มอนิก (Harmonic) ที่เกิดจากแรงกระทำจากภายนอกจะดำเนินต่อไปตราบเท่าที่ยังคงมีพลังงานจากแรงที่กระทำอยู่ [5]



รูปที่ 2.2 Damped Force Vibration System

สำหรับสมการของการสั่นแบบที่มีแรงกระทำจากภายนอกและมีความหน่วงด้วยนั้น ให้พิจารณาจากสมการของการสั่นแบบอิสระที่มีความหน่วง โดยเปลี่ยนเทอมด้านขวามือจากค่า 0 เป็นฟังก์ชันของแรงคือ  $F_0 \sin(\omega t)$  ดังแสดงในสมการที่ 2.1[6]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

โดยที่  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  และ  $\zeta = c/2m\omega_n$  สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการ 2.2

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{F_0}{m}\sin(\omega t) \quad (2.2)$$

สำหรับการสั่นแบบมีแรงมากระทำจากภายนอกนั้น พบว่ามีความถี่ที่แตกต่างกันแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบที่สำคัญดังสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5

-ความถี่ธรรมชาติไม่มีความหน่วง (Undamped Natural Frequency)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

-ความถี่ธรรมชาติโดยมีความหน่วง (Damped Natural Frequency)

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.4)$$

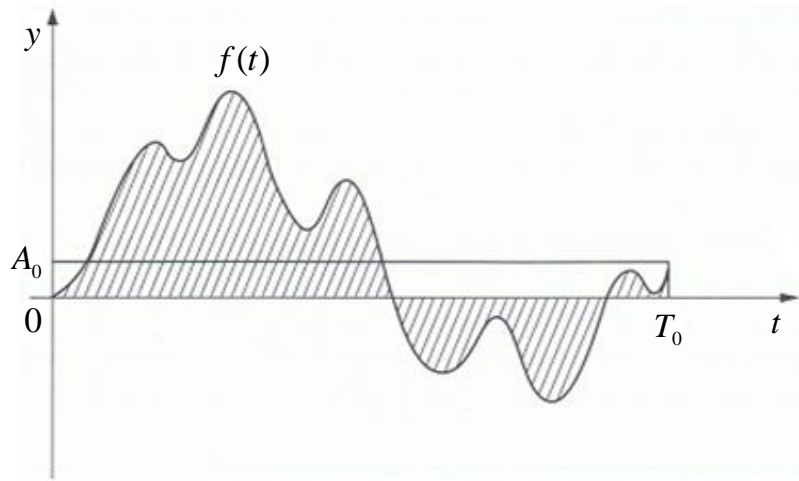
-ความถี่สั่นพ้อง (Resonance Frequency)

$$\omega = \omega_n \quad (2.5)$$

## 2.2.2 การแปลงสัญญาณฟูริเยร์ (Fourier Transform)

การสั่นสะเทือนที่ได้กล่าวถึงไปแล้วนั้น จะเป็นการสั่นสะเทือนแบบฮาร์มอนิก โดยเป็นไปตามขนาดและลักษณะของแรงที่มากระตุ้น และสัญญาณที่แสดงผลออกมาจะอยู่ในรูปของกราฟโดเมนเวลา ซึ่งแกนตั้งจะเป็นแกนของขนาดการสั่นสะเทือน ส่วนแกนนอนจะเป็นแกนของเวลาที่ผ่านไป ถ้าทำการวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักรจากกราฟโดเมนเวลาแล้ว จะทำการแยกแยะความถี่ค่อนข้างยาก ยิ่งถ้าเครื่องจักรนั้นมีชิ้นส่วนประกอบจำนวนมากและมีความซับซ้อนแล้ว ก็จะทำให้การวิเคราะห์นั้นยากลำบากมากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการที่จะแปลงกราฟจากรูปแบบโดเมนของเวลามาเป็นกราฟในรูปแบบโดเมนของความถี่ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงสัญญาณแบบฟูริเยร์ซึ่งเป็นการแปลงจากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่างๆ กันหลายความถี่ ซึ่งจะทำให้มองเห็นความถี่ได้ละเอียดและสามารถตรวจสอบถึงต้นเหตุของความเสียหายของเครื่องจักรได้ การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของความถี่คือการวิเคราะห์แบบสเปกตรัม ซึ่งจะกล่าวถึงการแปลงสัญญาณแบบฟูริเยร์โดยทำการแปลงสัญญาณลักษณะจากรูปแบบโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนของความถี่ หรือที่เรียกว่ากราฟสเปกตรัม โดยกำหนดให้  $f(t)$  จากรูปที่ 2.3 เป็น

การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบแล้ว จะทำให้สามารถเขียนสมการของ  $f(t)$  ในรูปแบบสมการฟูรีเยร์ (Fourier Transform) ได้ดังสมการ 2.5



รูปที่ 2.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ลักษณะแบบเป็นคาบ

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(\omega_k t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(\omega_k t) \quad (2.5)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ หาได้จาก

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt$$

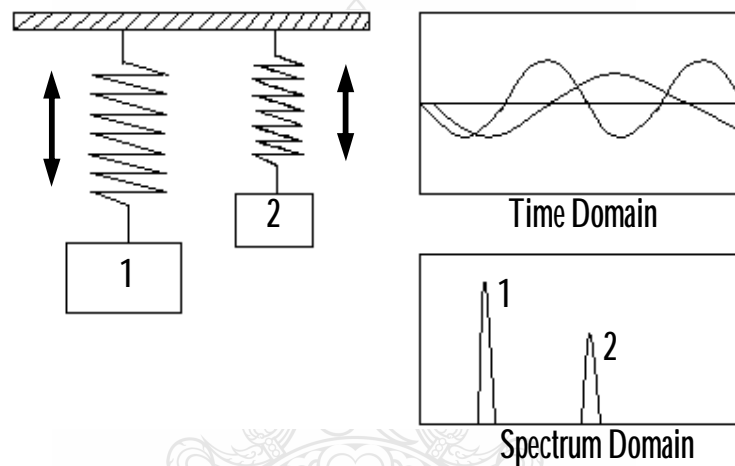
$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

โดยสมการสำหรับการแปลงสัญญาณแบบฟูรีเยร์นี้ ซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่ออำนวยความสะดวกและรวดเร็วต่อการนำไปใช้งาน ในปัจจุบันได้มีบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนหลายบริษัท ทำการบรรจุสมการสำเร็จรูปสำหรับการแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยใช้สมการของ

ฟูรีเยร์ไว้ในซอฟต์แวร์ของเครื่องวัดทำให้ผู้ใช้งานโดยทั่วไปไม่ต้องทำการแปลงสัญญาณเอง ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวเรียกว่า เครื่องวิเคราะห์แบบ FFT (Fast Furrier Transform)

### 2.2.3 การแปลงสัญญาณฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Furrier Transform: FFT)

เป็นขั้นตอนการคำนวณโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์นี้จะใช้รูปแบบของสมการ FFT เพื่อที่จะทำการแยกความถี่หลายๆ ความถี่ที่รวมกันบนโดเมนเวลาออกมาแสดงแต่ละความถี่ในโดเมนความถี่ หรือที่เรียกว่ากราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยมีขั้นตอนของการทำงานดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนเวลา (Time Domain) และกราฟโดเมนความถี่ (Spectrum Domain)

### 2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณ

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกลนั้น ก่อนอื่นควรทำความเข้าใจรูปแบบของกราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ซึ่งถ้าไม่เข้าใจความหมายและความเป็นมาของกราฟแล้ว การที่จะทำการวิเคราะห์หาความเสียหายของเครื่องจักรก็จะเป็นไปได้ยากลำบาก ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นไม่สามารถระบุปัญหาที่แท้จริงของเครื่องจักรได้ กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนที่จะนำมาวิเคราะห์หาความเสียหายของเครื่องจักรกล [7] ซึ่งจะประกอบด้วยกราฟโดเมนเวลา (Time Domain Plot) กราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) กราฟแนวโน้ม (Trend Plot) นอกจากกราฟแสดงผลแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญของการสั่นสะเทือน ซึ่งประกอบด้วยความถี่ (Frequency) ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) มุมเฟส (Phase) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักของการสั่นสะเทือน เพื่อช่วยในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล



### 2.3.1 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

เครื่องจักรกลแบบหมุนทุกชนิดจะมีการสั่นสะเทือน และต้นเหตุของการสั่นสะเทือนก็คือ ปัญหาต่างๆ ในเครื่องจักรเอง เช่น การไม่สมดุล การเยื้องแนวแกน การเยื้องศูนย์ ความเสียหายใน ตลับลูกปืน ความเสียหายของชุดเฟือง แต่ละปัญหาในเครื่องจักรจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ แตกต่างกันไป สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแสดงส่วนประกอบของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ เราสามารถแบ่งช่วงความถี่บนโดเมนความถี่ออกเป็นสองช่วงกว้างๆ โดยที่แต่ละช่วงความถี่จะ ปรากฏสัญญาณการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนทางกลต่างชนิดกันดังนี้

ก. โดเมนความถี่ต่ำ (Low Frequency Domain) เป็นช่วงความถี่ต่ำกว่าฮาร์โมนิกอันดับที่สี่ ถึงหกของความเร็วรอบการหมุนของเพลลา สัญญาณนั้นจะบอกข้อมูลเกี่ยวกับการไม่สมดุล การเยื้อง แนวแกน เพลลาแอ่น (Bent Shaft) ความเสียหายในตลับลูกปืน (Bearing Damage) และการหลุดหลวม ทางกล (Mechanical Looseness) สัญญาณการสั่นสะเทือนจากสาเหตุเหล่านี้ประกอบไปด้วยฮาร์มอ นิกหรือซัพฮาร์โมนิกของความถี่การหมุนของเพลลาที่ประกอบกับชิ้นส่วนที่มีปัญหา

ข. โดเมนความถี่สูง (High Frequency Domain) เป็นช่วงความถี่สูง สัญญาณจะบอกข้อมูล ที่เกี่ยวกับความเสียหายในเฟือง (Gear Box) และความเสียหายในตลับลูกปืน สัญญาณการสั่นสะเทือน ของชุดเฟืองประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกของความถี่การขบกันของเฟืองและแถบความถี่รอบข้าง ส่วน สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนประกอบไปด้วย ความถี่ของแหวนใน ความถี่ของแหวนนอก ความถี่เม็ดตลับลูกปืน และความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและโครงสร้าง เมื่อตรวจพบว่าการสั่นสะเทือน มีระดับสูงขึ้น และทราบว่าจะอยู่ในช่วงพิกัดความถี่ใด ก็อาจจะวิเคราะห์และหาว่าความเสียหายเกิดจาก อะไร แต่เนื่องจากความซับซ้อนของสัญญาณซึ่งอาจเกิดจากหลายๆ สาเหตุ ดังนั้นการวิเคราะห์ความถี่ ด้วยสเปกตรัมอาจจะทำได้ลำบาก จึงต้องใช้วิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการบ่งชี้สาเหตุของความ ผิดปกตินั้นๆ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ด้วยเซปัสตรัมซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับอนุกรม ของฮาร์โมนิกและแถบความถี่ข้างในสเปกตรัม

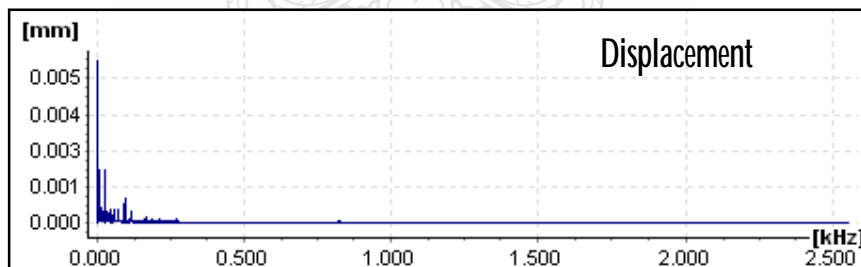
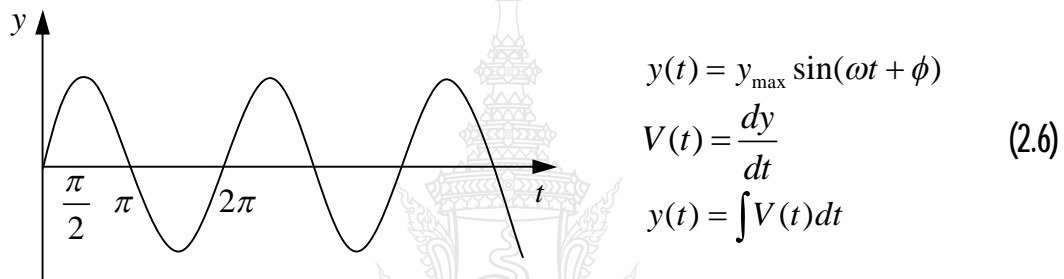
### 2.3.2 ความถี่ (Frequency)

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนกราฟโดเมนของความถี่ ในที่นี้ก็คือจำนวนรอบของการ สั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา และหน่วยที่นิยมใช้จะเป็นรอบต่อนาที (CPM) และบางครั้งใช้เป็นรอบต่อ วินาทีหรือหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz) ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงแหล่งที่มา และปัญหาของเครื่องจักร [8] ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ถึงปัญหาหรือความเสียหายต่างๆ ในเครื่องจักรกล

### 2.3.3. ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude)

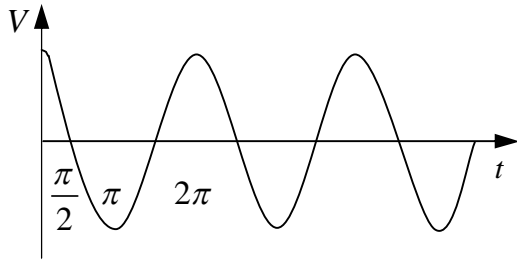
การที่จะบอกถึงระดับความรุนแรงของเครื่องจักรนั้น จะอาศัยการบอกเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน ถ้าขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับภาวะปกติแสดงว่าเครื่องจักรนั้นเริ่มมีปัญหา ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับกันมากที่สุดมีอยู่ 3 แบบคือ

ก. การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) หมายถึงระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือมวลจากจุดสมดุลเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่สูงสุดแล้วเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่ต่ำสุด (Peak to Peak) ซึ่งเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่วัตถุเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นๆ ดังสมการที่ 2.6 และรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงกราฟการขจัด



รูปที่ 2.5 กราฟการขจัด

ข. ความเร็ว (Velocity) หมายถึงความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุ วัตถุจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และมีความเร็วสูงสุดในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ซึ่งค่าการขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว ดังสมการ 2.7 และรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงกราฟความเร็ว

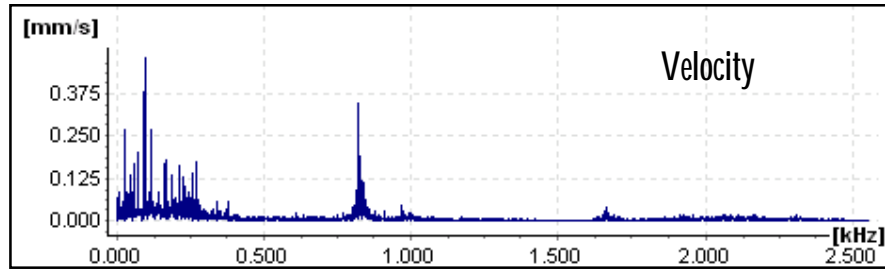


$$V_{\max} = y_{\max} \omega$$

$$V(t) = V_{\max} \cos(\omega t + \phi)$$

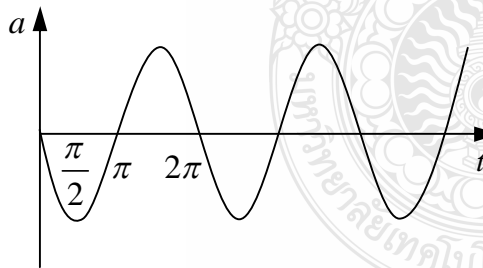
$$V(t) = y_{\max} \omega \sin(\omega t + \phi + 2 / \pi) \quad (2.7)$$

$$V(t) = V_{\max} \omega \cos(\omega t + \phi)$$



รูปที่ 2.6 กราฟความเร็ว

ค. ความเร่ง (Acceleration) หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุในขณะวัตถุที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดเมื่อผ่านจุดสมดุล ดังสมการ 2.8 และรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงกราฟความเร่ง

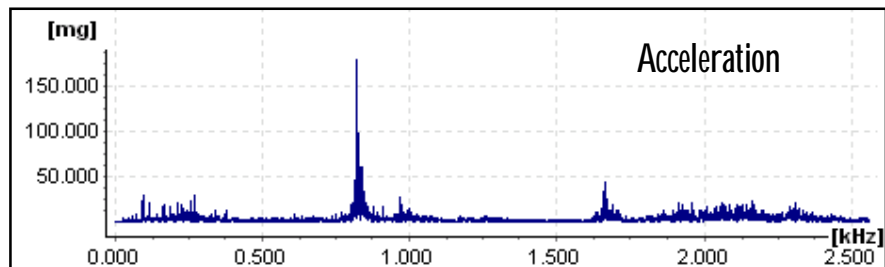


$$a_{\max} = y_{\max} \omega^2$$

$$a(t) = -a_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.8)$$

$$a(t) = y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t + \phi + \pi)$$

$$a(t) = -y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t + \phi)$$



รูปที่ 2.7 กราฟความเร่ง

### 2.3.4 มุมเฟส (Phase)

สำหรับมุมเฟสของการสั่นสะเทือน คือความแตกต่างของตำแหน่งชิ้นส่วนหรือวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนขึ้นหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกขึ้นหนึ่ง ประโยชน์เรื่องมุมเฟสของการสั่นสะเทือนสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของเครื่องจักรได้ เช่น ปัญหาการเอียงแนวแกนของเพลลา ปัญหาการหลวมคลอน ปัญหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร เป็นต้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาการสั่นสะเทือนโดยการทำคลดภาพในเครื่องจักรหมุนอีกด้วย

### 2.3.5 หน่วยวัดขนาดการสั่นสะเทือน

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ในเรื่องขนาดของการสั่นสะเทือนไม่ว่าจะเป็น การขจัดความเร็ว หรือความเร่ง สัญญาณทั้ง 3 แบบนี้จะอยู่ในรูปของคลื่นไซน์ ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา สำหรับการบอกขนาดของการสั่นสะเทือนจะบอกในลักษณะการสั่นสะเทือนแบบรวม (Overall Vibration) ที่ใช้กันทั่วไปประกอบด้วย

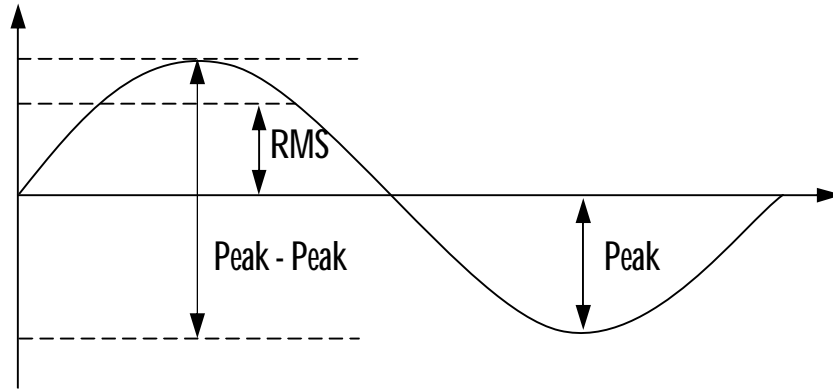
ก. ค่ายอดสูงสุด (Peak) จะบอกค่าระดับสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิง (ศูนย์) โดยไม่ได้คำนึงถึงลักษณะการสั่นสะเทือนแบบอย่างอื่น ซึ่งค่านี้ส่วนมากจะใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การเคาะเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของวัตถุ (Bump Test) เป็นต้น

ข. ค่ายอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดด้านตรงข้าม (Peak to Peak) เป็นค่าขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์กับจุดต่ำสุดของคลื่นไซน์

ค. ค่า RMS (Root Mean Square) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการนำค่าที่วัดได้ในโดเมนเวลา (Time Domain) ที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบ และถอดรากที่สองออกมา ดังสมการที่ 2.9

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t x^2(t) dt} \quad (2.9)$$

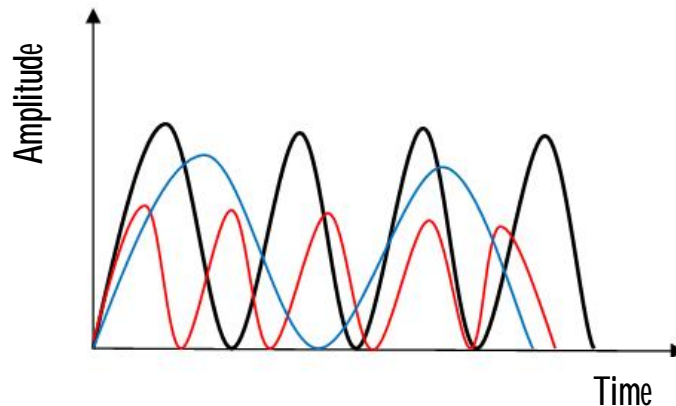
ความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แบบ รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งใช้ในกรณีสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นแบบฮาร์มอนิกรูปไซน์ โดยการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเป็นคาบเหล่านี้ก็จะสามารถแยกออกเป็นผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ของความถี่ได้ตามทฤษฎีของฟูริเยร์ (Fourier) ดังนั้นความสัมพันธ์และความหมายของหน่วยวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่กล่าวมาแล้วสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

### 2.3.6 กราฟโดเมนเวลา

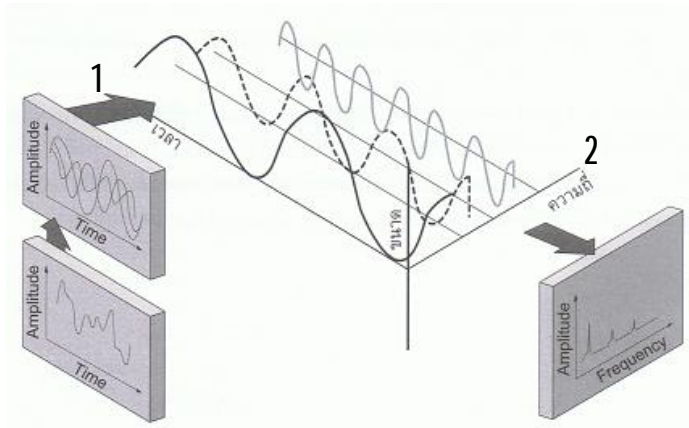
ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดการสั่นสะเทือนกับเวลาโดยแกนอนจะเป็นแกนของเวลา ส่วนในแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน รูปที่ 2.9 แสดงกราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่



รูปที่ 2.9 กราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่

### 2.3.7 กราฟสเปกตรัม

ในกราฟสเปกตรัมนั้นจะเป็นการแสดงผลการสั่นสะเทือนบนแกนของความถี่ การแสดงผลในลักษณะนี้หากนำไปใช้วิเคราะห์ความเสียหายในเครื่องจักรกลแล้ว ก็จะทำให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้มากกว่าการวิเคราะห์สัญญาณจากกราฟโดเมนของเวลา เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณจากกราฟโดเมนเวลาไปสู่สัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังนั้นการมองแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถที่จะอธิบายให้เข้าใจความหมายได้ง่ายและชัดเจน รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

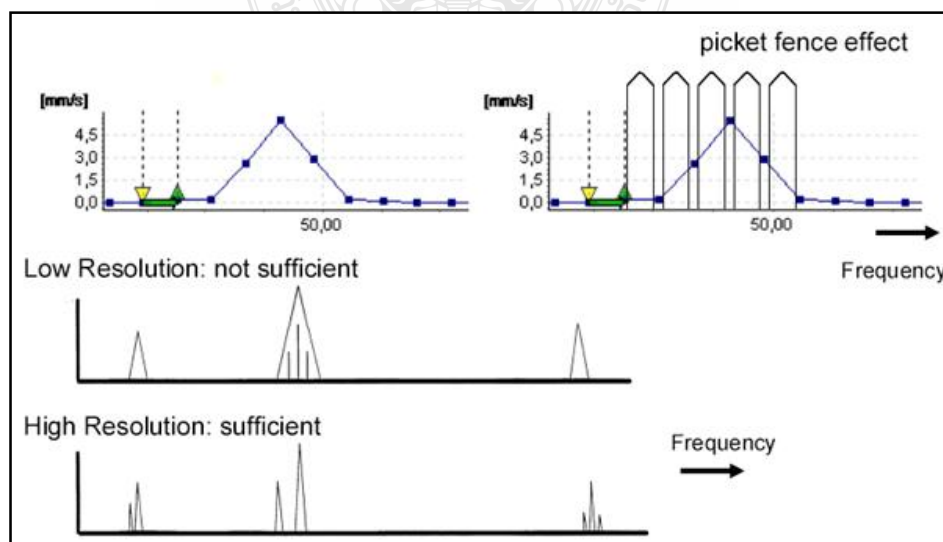


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นตัวบอกถึงความรุนแรงของความเสียหายในเครื่องจักรนั้น ถ้าหากขนาดของการสั่นสะเทือนสูงเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เครื่องจักรนั้นเสียหายเร็วยิ่งขึ้น โดยในแกนนอนที่ 1 จะเป็นแกนของเวลาและแนวแกนนอนที่ 2 ซึ่งตั้งฉากกับแกนที่ 1 จะเป็นแกนของความถี่ ซึ่งจะบ่งชี้ถึงสาเหตุและที่มาของความเสียหาย

### 2.3.8 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ (Resolution In The Spectrum)

ความละเอียดในกราฟแสดงผลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าจำนวนเส้น (Lines) ที่ได้มีการกำหนดไว้ในตอนแรกจากเงื่อนไขในการวัดอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องวัดนั้นๆ ด้วย ทั้งนี้ในการตั้งค่าให้มีความละเอียดในการแสดงผลที่สูงนั้นก็จะต้องใช้ระยะเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน รูปที่ 2.11 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ [9]



รูปที่ 2.11 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ

### 2.3.9 ความถี่ของชิ้นส่วนในตลับลูกปืน

สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนนั้น จะมีองค์ประกอบจากความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและฐานรองรับ (Natural Frequency of Installed Bearing Components and Supported Structure) ซึ่งเป็นความถี่โดยรวม ส่วนความถี่เสียหายของตลับลูกปืน (Damage Frequency of Bearing) ซึ่งจะมีส่วนประกอบด้วยกัน 4 ส่วนคือ แหวนนอก (Outer Ring) แหวนใน (Inner Ring) เม็ดลูกปืน (Roller) และตัวรัง (Cage) ดังรูปที่ 2.12 แสดงตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหายจะก่อกำเนิดความถี่ออกมาเป็น 4 ความถี่ด้วยกันคือค่า BPFO, BPFI, BSF และ FTF ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.10), (2.11), (2.12) และ (2.13) แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มากขึ้น ทำให้ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าด้วยตัวเองเพียงมีเบอร์ของตลับลูกปืน แล้วทำการป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมแปลผลทางสเปกตรัมก็จะได้ค่าความถี่ต่างๆ ของตลับลูกปืน แต่ถึงกระนั้นผู้วิเคราะห์จำเป็นที่จะต้องรู้และสามารถใช้สมการดังกล่าวได้เพื่อยืนยันความถูกต้องในกรณีที่ไม่แน่ใจจากการกำหนดเงื่อนไขในการวัด



รูปที่ 2.12 ตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing

-สมการในการคำนวณหาความถี่ของชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายโดยจะแปรผันกับความเร็วรอบ [9]

ความถี่แหวนนอก Outer Ring Frequency (BPFO)

$$BPFO = \frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) RPM \quad (2.10)$$

ความถี่แหวนใน Inner Ring Frequency (BPFI)

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) RPM \quad (2.11)$$

ความถี่ของการหมุนเม็ดลูกปืน **Ball Spin Frequency (BSF)**

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_c} \right)^2 \cos^2 \theta \right) RPM \quad (2.12)$$

ความถี่พื้นฐาน **Fundamental Cage (Train) Frequency (FTF)**

$$FTF = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) RPM \quad (2.13)$$

เมื่อ	$RPM$	คือความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
	$N_b$	คือจำนวนเม็ดลูกปืน
	$B_d$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดลูกปืน
	$P_c$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตลับลูกปืน
	$\theta$	คือมุมสัมผัส

โดยสมการที่ใช้คำนวณนี้จะมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ซึ่งสามารถทำให้เป็นเฮิรตซ์ (Hz) ได้โดยหารด้วย 60 ให้เป็นรอบต่อวินาที

ลักษณะการชำรุดของตลับลูกปืนนั้นแบ่งออกเป็นช่วงๆ หลังจากเริ่มเกิดการชำรุด ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน

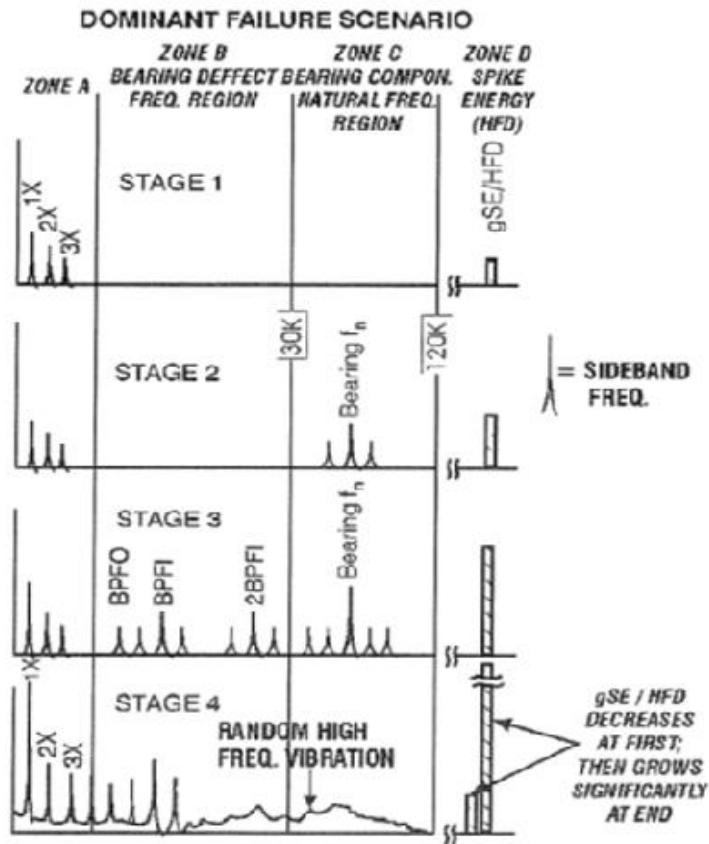
สภาวะที่ 1 เป็นสภาวะการเสียหายของตลับลูกปืนในช่วงแรกซึ่งมักไม่สามารถบ่งบอกได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนปกติ สัญญาณความเสียหายจะไปปรากฏที่ความถี่อุตสาหกรรม 250,000 - 350,000 Hz และเมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นสัญญาณมักจะเคลื่อนตัวไปปรากฏที่ความถี่ต่ำลงมาคือประมาณ 20,000 - 60,000 Hz

สภาวะที่ 2 เป็นสภาวะการเสียหายที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะแรก ทำให้เกิดการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนตลับลูกปืน ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเกิดอยู่ช่วง 30,000 - 120,000 รอบต่อนาที

สภาวะที่ 3 เป็นสภาวะการเสียหายของตลับลูกปืนที่เพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนขึ้นที่ความถี่เสียหายของตลับลูกปืน

สภาวะที่ 4 เป็นสภาวะที่ตลับลูกปืนเสียหายมาก ซึ่งสภาวะนี้สัญญาณการสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อผู้ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ 1 เท่าของรอบการหมุนและชุดฮาร์มอนิกของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่ความถี่เสียหายของตลับลูกปืนและความถี่ธรรมชาติที่เป็นลักษณะแยกกันจะถูกทำให้หายไปกลายเป็นสัญญาณที่คลุมกว้างตลอดช่วงความถี่สูง

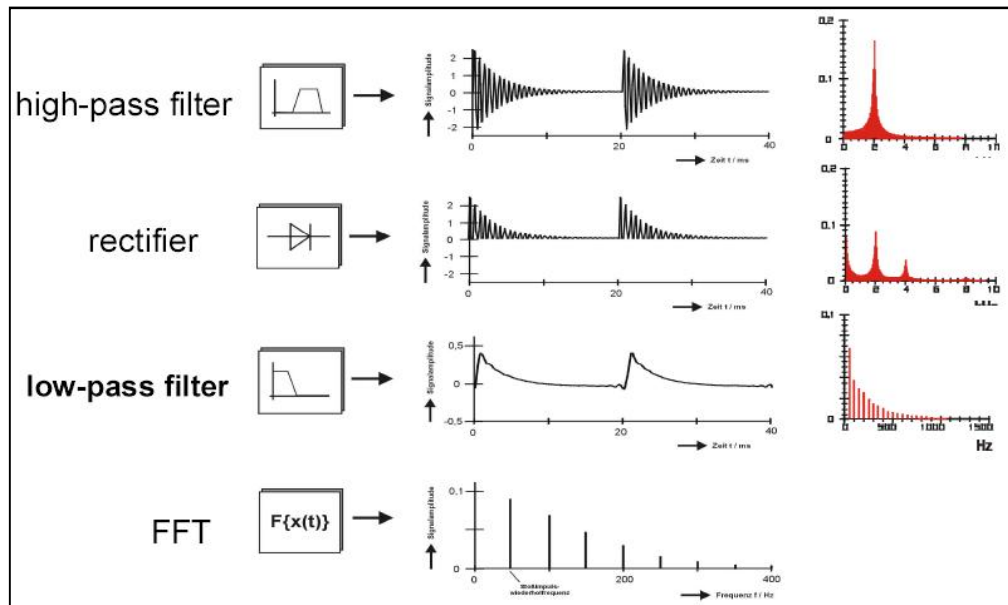




รูปที่ 2.13 ลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน [10]

### 2.3.10 การใช้สัญญาณ Demodulation Enveloping วิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน

ในการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนนั้น จะใช้การปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping [11] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนที่มีขนาดของการสั่นสะเทือนที่ต่ำ (Low Amplitude) แต่ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะอยู่ในย่านความถี่สูงภายในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เช่น การกระแทกของชิ้นส่วนภายในตลับลูกปืนหรือระหว่างเม็ดลูกปืนกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย และการขบกันของฟันเกียร์ เป็นต้น สำหรับขั้นตอนในการปรับปรุงสัญญาณแบบนี้ จะทำโดยการนำเอาสัญญาณที่มีขนาดของการสั่นสะเทือนต่ำที่อยู่ในย่านความถี่สูงออกมา เรียกว่า Band Pass Filter (BP-Filter) จากนั้นนำเอาสัญญาณไปปรับให้มีค่าเป็นสัญญาณบวกโดยผ่านชุด Rectifier แล้วทำการกรองเอาเฉพาะสัญญาณที่ย่านความถี่ต่ำที่เรียกว่า Low Pass Filter (LP-Filter) เพื่อให้ง่ายต่อการแปลผล และนำไปแสดงผลในกราฟสเปกตรัม รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping

สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้ง (Rolling Bearing) โดยใช้หัวรับสัญญาณแบบความเร่ง ซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่ที่ตลับลูกปืนเริ่มชำรุด โดยใช้เทคโนโลยีแบบ SEE (Spectral Emitted Energy) เมื่อความเสียหายเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งการตรวจวัดแบบ Demodulation Enveloping ก็จะสามารถตรวจพบได้ และถ้าการชำรุดของตลับลูกปืนนั้นเริ่มรุนแรงขึ้น จะสามารถตรวจพบโดยการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป ซึ่งการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไปจะนิยมวัดค่าในหน่วยความเร็ว (Velocity Measurement) และเมื่อการชำรุดรุนแรงมากขึ้นก็สามารถตรวจวัดโดยการฟังเสียงได้ ซึ่งเป็นช่วงระยะสุดท้ายของอายุการใช้งานของตลับลูกปืน

ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่ส่งออกมาจากบริเวณที่เกิดความเสียหายบนแหวนนอกของตลับลูกปืน [12] โดยใช้หัววัดสัญญาณแบบความเร่งที่ยึดติดกับเสื้อด้านนอกของตลับลูกปืนเป็นตัวรับสัญญาณที่ส่งออกมา สัญญาณที่ส่งออกมาครั้งแรกจะผ่านมาทางเสื้อของตลับลูกปืนและผ่านมาถึงหัวรับสัญญาณ ซึ่งจะเป็นขั้นตอนการรับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย จะส่งสัญญาณกระตุ้นให้โครงสร้างเกิดการเรโซแนนซ์ (Structural Resonance) แล้วหัวรับสัญญาณก็จะนำสัญญาณผ่านไปที่เครื่องวัดการสั่นสะเทือน แล้วนำไปสู่ขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Enveloping เพื่อการวิเคราะห์หาความเสียหายต่อไป

## 2.4 ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยชิ้นนี้ซึ่งได้ศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสั่นสะเทือนและการวิเคราะห์สัญญาณแล้วในข้างต้น และยังได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย บทความ และตำราต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งได้นำแนวทาง และข้อเสนอแนะมาประยุกต์ใช้และทำการศึกษาเพิ่มจากงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

2.4.1 ประสาสน์ สุบรรพวงค์ [13] ศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้งในปั๊มไฮดรอลิกแบบเฟือง ด้วยวิธีการทดลองจากเครื่องจักรจริง เพื่อกำหนดวิธีการในทางปฏิบัติ ในการติดตามสภาพของตลับลูกปืนในปั๊มไฮดรอลิกแบบเฟือง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในรูปของ Frequency Domain ใช้เครื่องมือในการวัดและเก็บข้อมูลยี่ห้อ CSI รุ่น 2115DX โดยใช้ Software สำเร็จรูปของ CSI ในการเก็บข้อมูล ค่าวน BPF และคำนวณค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูด โดยใช้หัววัดความเร่งแบบ Piezoelectric และวัดค่าการสั่นสะเทือนในหน่วยของความเร่ง เพื่อทำการทดสอบหาอัตราการแตกที่ผิวแหวนนอกของตลับลูกปืน เพื่อกำหนดช่วงเวลาทำการวัดที่เหมาะสม ทำการวัดในช่วงความถี่ 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่สูง 20-30,000 Hz เพื่อตรวจสอบการเกิดเรโซแนนซ์ของโครงสร้างและช่วงความถี่ต่ำ 0.5-400 Hz เพื่อตรวจสอบความถี่ที่มีตลับลูกปืนวิ่งผ่านรอยแตกของแหวนนอกของตลับลูกปืน การเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดมีค่าสูงและเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอใน 3 ช่วงความถี่ คือ 7-9 kHz 15-18 kHz และ 24-27 kHz ส่วนการวัดในช่วงความถี่ต่ำแบบวัดโดยตรง (Liner) ไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนและน่าเชื่อถือได้ว่าตลับลูกปืนเกิดการชำรุด แต่การวัดโดยใช้วิธีการปรับรูปสัญญาณแบบ Demodulate พบว่าการปรากฏของ FTF (Fundamental Train Frequency) และ GMF (Gear Mesh Frequency) ที่มีความถี่ด้านข้าง (Side Band) เท่ากับ  $\pm 1FTF$  เป็นการสนับสนุนให้เห็นว่าตลับลูกปืนเกิดการชำรุด เมื่อเริ่มเกิดการชำรุดแล้ว จะมีอายุการใช้งานต่อไปโดยไม่เกิดผลกระทบต่อระบบได้อีกไม่เกิน 22% ของอายุการใช้งานรวมหรือ 260 ชั่วโมง ช่วงระยะเวลาที่ควรทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนไม่ควรห่างกันเกิน 130 ชั่วโมงใช้งานของเครื่องจักร (หรือ 50% ของอายุตลับลูกปืนที่เหลืออยู่) เพื่อป้องกันการชำรุดรุนแรงที่จะเกิดขึ้นในระบบไฮดรอลิก

2.4.2 สมชาย เดโชธรรมสถิต [14] ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเซปต์ตรัม โดยทำการทดลองวิเคราะห์สัญญาณจากชุดทดลองซึ่งจำลองให้ชุดเฟืองมีการสึกหรอของซี่ฟันเฟืองและมีการเอียงศูนย์ของเฟืองในระดับต่างๆ กันและผลการแปลงสัญญาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในลักษณะจำเพาะบน โดเมนเวลา โดเมนความถี่ ตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณ แล้วเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากสเปกตรัมและเซปต์ตรัม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในสภาพปกติประกอบด้วย ชุดฮาร์โมนิกของ GMF และแถบความถี่ข้าง ขณะที่ชุดเซปต์ ตรัมแสดงยอดสัญญาณที่ฮาร์โมนิกของเฟืองขับและเฟืองตามที่มีแอมพลิจูดระดับหนึ่ง ในกรณี

ชุดเพื่องมีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟันจะพบว่า การสั่นสะเทือนจะมีระดับสูงขึ้นกว่าเดิมสเปกตรัมจะมีแถบความถี่ข้างที่สูงขึ้น พร้อมกับมีสัญญาณแถบความถี่กว้างและมีฮาร์มอนิกของ GMF เพิ่มขึ้น ส่วนฮาร์มอนิกของเพื่องขับที่สึกหรอจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นแต่ฮาร์มอนิกของเพื่องตามกลับมีแอมพลิจูดลดลงแตกต่างกัน ในกรณีที่เพื่องชุดมีปัญหาการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้นจะพบว่า การสั่นสะเทือนอาจมีระดับสูงขึ้นหรือลดลง สเปกตรัมจะมีแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างและแอมพลิจูดของความถี่การหมุนของเพื่องที่เชื่อมต่อเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มของแอมพลิจูดดังกล่าวมีรูปแบบไม่ชัดเจน ขณะที่ฮาร์มอนิกของเพื่องที่เชื่อมต่อมีขนาดสูงขึ้นเด่นชัดเมื่อเทียบกับเพื่องปกติ

**2.4.3** กมลวรรณ พงศาพิชญ์ [15] การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเพื่อง โดยจำลองการสึกหรอของฟันเพื่องขับที่ระดับต่างๆ กันทำการทดลองที่หลายสภาวะด้วยการปรับระดับภาระและความเร็วรอบ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปต์สตรัม จากผลของสัญญาณโดเมนเวลา ค่า Peak ของสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอของฟันเพื่องมากขึ้น ในขณะที่ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามาก ผลของสัญญาณสเปกตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ 1 GMF 2 GMF และ 3 GMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอมากขึ้น ค่าแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างเนื่องจากเพื่องขับและเพื่องตามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความถี่ GMF ผลของสัญญาณเซปต์สตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความเร็วรอบเพื่องขับ (1/P) มีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 40% ของความหนาของฟัน จากค่านั้นแอมพลิจูดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงค่าการสึกหรอสูงสุดที่ทดลอง จากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและการสึกหรอของเพื่องพบว่าวิเคราะห์เซปต์สตรัมเป็นวิธีที่ชัดเจนที่สุดในการวิเคราะห์สภาพชุดเพื่อง ซึ่งอาจใช้ค่าแอมพลิจูดสูงสุดเป็นเกณฑ์กำหนดระดับสึกหรอที่สามารถยอมรับได้

**2.4.4** จุติโรจน์ เบ็ญจลักษณ์ [16] การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน การพัฒนาโปรแกรมอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 10816-1, ISO 10816-2, และ ISO 10816-3 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานในลักษณะต่อเนื่องในเวลาจริง เปลี่ยนสัญญาณการสั่นสะเทือนในแกนเวลาให้อยู่ในแกนความถี่ วิเคราะห์ความบกพร่องของเครื่องจักรกลหมุน เก็บข้อมูลสำหรับการแสดงข้อมูลในอดีต และเตือนเมื่อเครื่องจักรกลหมุนเริ่มเสียหาย โดยเป็นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับตรวจและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน โดยได้ทำการพัฒนาตามความต้องการของผู้ใช้

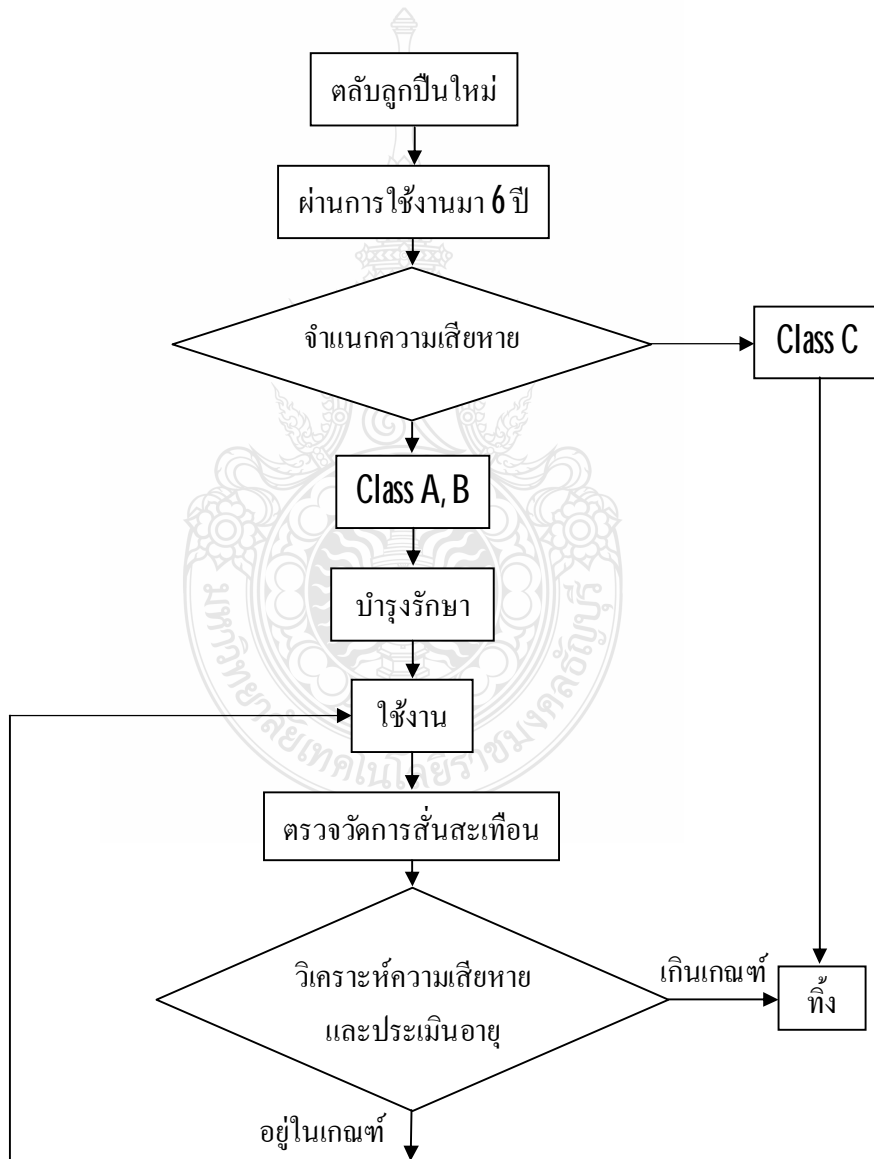
2.4.5 ประดิษฐ์ หมู่มืองสอง และสุชฌาน วรรณสุข [17] การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร กล่าวว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นแล้วจะเป็นผลให้เครื่องจักรมีอายุสั้นลง ซึ่งความเสียหายที่พบในเครื่องจักร โดยทั่วไป เช่น การไม่สมดุลของเครื่องจักร (Unbalance) การเอียงแนวแกนของเครื่องจักร (Misalignment) การหลวมคอนทางกล การโค้งของเพลลา การเสียดสีกันของชิ้นส่วน การเอียงศูนย์กลาง (Eccentric) การชำรุดของเฟืองเกียร์ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ความเสียหายโดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Analysis) หรือการแสดงผลในรูปแบบของกราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) โดยจะใช้หน่วยวัดแบบระยะทาง ความเร็ว หรือความเร่ง และแกนนอนจะแสดงค่าความถี่ (Frequency) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรนั้น ในการวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัมนี้ สามารถแปลความหมายโดยแกนตั้งจะบ่งบอกถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ส่วนแกนนอนจะบอกลักษณะปัญหาหรือแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นว่าอยู่ตรงตำแหน่งไหนของเครื่องจักร

2.4.6 วินัย เวชวิทยาลัง [18] ได้อธิบายการวัดการสั่นสะเทือนว่า เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดการสั่นสะเทือนเป็นวิวัฒนาการและใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะสามารถวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักร ได้ครอบคลุมเกือบทุกปัญหา ทั้งการติดตั้งประกอบ การสึกหรอ การหลวมคลาย การยึดไม่แน่น แท่นไม่แข็งแรง การเสียหายของฟันเกียร์ ตลับลูกปืน โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปแก้ไขปัญหา และข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนนั้น จะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษา

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

จากวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้ จะดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มต้นจากการจำแนกความเสียหายของตลับลูกปืนหลังจากที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 ปี และนำกลับไปใช้อีกครั้งหลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายด้วยวิธีการวิเคราะห์การสันสะเทือนและประเมินหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

### 3.1 การจำแนกระดับความเสียหาย

รถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในระยะเวลาหนึ่งจำเป็นจะต้องทำการบำรุงรักษาเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และรักษามาตรฐานความปลอดภัยของรถไฟฟ้า ซึ่งรถไฟฟ้า BTS [19] ได้มีการบำรุงรักษาและการตรวจสอบสภาพอยู่สม่ำเสมอแล้วนั้น เมื่อระยะเวลาการใช้งานถึง 6 ปี จะต้องมีการบำรุงรักษาครั้งใหญ่ (Overhaul) เนื่องจากชิ้นส่วนบางชิ้นอาจเกิดข้อบกพร่อง หรือชำรุดก่อนเวลาอันควร หรือจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเพราะถึงระยะเวลาที่ผู้ผลิตได้แนะนำเอาไว้ [20] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อที่จะจำแนกความเสียหาย และหาช่วงอายุการใช้งานของตลับลูกปืน ซึ่งตลับลูกปืนลื่อนนั้นจะต้องมีการตรวจสอบเมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด ก่อนที่จะนำกลับไปใช้งานอีกครั้ง ในการจำแนกความเสียหายนั้นจากการศึกษาข้อมูลที่ได้จากเอกสารของผู้ผลิตตลับลูกปืน (FAG) พบว่าได้มีการแบ่งแยกระดับความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ คือ Class A, B และ C ซึ่งในระดับต่างๆ ได้ระบุอายุการใช้งานไว้ดังนี้ Class A มีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 1-3 ปี Class B มีอายุการใช้งานประมาณ 6 เดือนถึง 1 ปี ส่วน Class C นั้นไม่นำมาใช้งาน ในงานวิจัยชิ้นนี้จะได้นำวิธีการดังกล่าวมาวิเคราะห์ตลับลูกปืนที่ใช้ในรถไฟฟ้าของประเทศไทยในการจำแนกระดับความเสียหายและหาอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้อง โดยอาศัยการเก็บข้อมูลการชำรุดที่ซ้ำๆ กัน (Repetitive Failures) มาทำการวิเคราะห์

-การหาค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (Mean Time Between Failures: MTBF) แสดงในสมการที่ 3.1

$$MTBF = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (3.1)$$

$t_1$  คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ 1

$t_2$  คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ 2

$t_n$  คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่  $n$

$n$  คือจำนวนครั้งในการบันทึก

-การกระจายทางสถิติแบบไวบูลล์เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อกำหนดรูปแบบการชำรุดว่าเป็นช่วงเริ่มต้น ช่วงใช้งาน หรือเป็นช่วงการสึกหรอ รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน โดยจะสังเกตเห็นว่าถ้าค่า  $\gamma$  ที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการชำรุดในช่วงการใช้งานเริ่มต้น ถ้าค่า  $\gamma$  ที่คำนวณได้เท่ากับ 1 จะเป็นช่วงใช้งานปกติ และถ้าค่า  $\gamma$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะเป็นช่วงการสึกหรอ โดยสมการที่ 3.2 เป็นการกระจายทางสถิติแบบไวบูลล์ [21]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right)^\gamma} \quad (3.2)$$

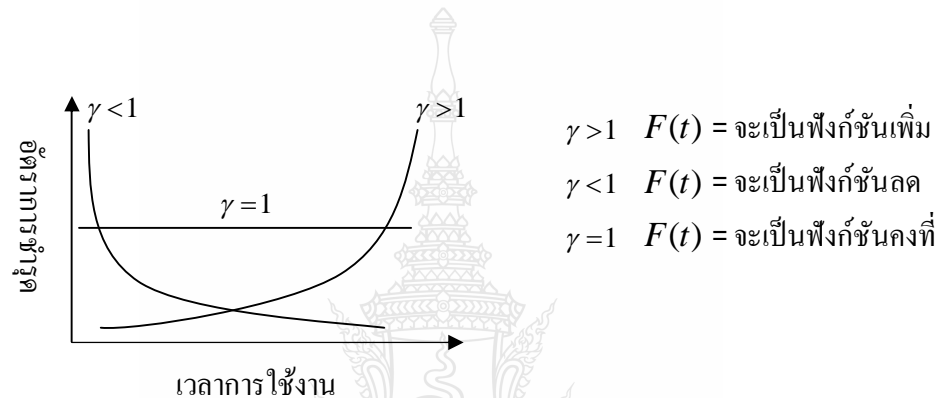
$F(t)$  คือเปอร์เซ็นต์สะสมการชำรุด

$t$  คือเวลาการใช้งานจนชิ้นงานชำรุด

$\alpha$  คือ Scale Parameter หรือ MTBF (มาจากสมการที่ 3.1)

$\beta$  คือ Location Parameter หรือค่าเวลาปลอดการชำรุด

$\gamma$  คือ Shape Parameter หรือ Weibull Index



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้และเวลาการใช้งาน

ในกรณีที่ชิ้นส่วนนั้นไม่มี Shape Life หรือช่วงเวลาปลอดการซ่อมบำรุงรักษา เมื่อนำมาใช้งาน จะมีการชำรุดได้ทันที  $t = 0$  และ  $\beta$  จะเท่ากับ 0

### 3.2 วิธีการดำเนินงานในการจำแนกความเสียหาย

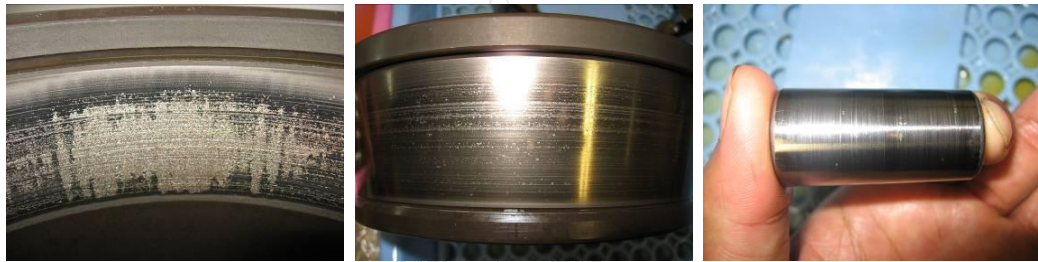
สำหรับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยนั้นได้แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้โดยเริ่มจาก (1) การวิเคราะห์สภาพความเสียหายเบื้องต้น เพื่อที่จะหาว่าความเสียหายส่วนใหญ่มีลักษณะใดบ้าง (2) การตรวจวัดค่าเคลิษฐ์เร็นช เป็นการวัดค่าการสึกหรอของชุดดัดลูกปืน (3) การตรวจสอบโดยการขยายภาพ เพื่อที่จะดูบริเวณความเสียหายโดยการขยายภาพเพื่อวิเคราะห์ดูในระดับโครงสร้าง (4) การจำแนกระดับความเสียหาย เป็นการจำแนกลักษณะความเสียหายโดยอาศัยการระบุเป็นเปอร์เซ็นต์



### 3.2.1 การวิเคราะห์สภาพความเสียหายเบื้องต้น

จากการศึกษาและพบว่าความเสียหายของตลับลูกปืนในล้อรถไฟที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่พบจะเกิดขึ้นจากสาเหตุหลักดังนี้

ก. ความเสียหายเนื่องจากความล้า (Normal Fatigue) สาเหตุเกิดจากตลับลูกปืนมีการใช้งานที่ยาวนานเกินอายุการใช้งานหรือรับภาระมากเกินไป [22] โดยผิวของแหวนใน แหวนนอก หรือ เม็คลูกปืน จะหลุดร่อนออกทำให้เกิดรอยเล็กๆ ขึ้นในไม่ช้าก็จะลามไปทั่วตลับลูกปืน ลักษณะเช่นนี้มักทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในขณะที่ทำงาน รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะความเสียหายในชิ้นส่วนต่างๆ ของตลับลูกปืนเนื่องจากความล้า



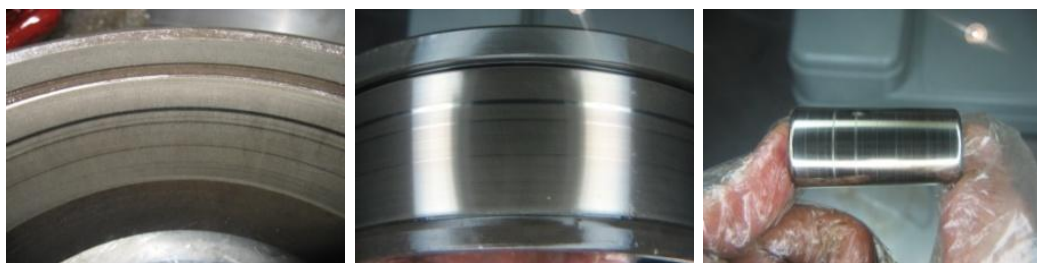
(ก) Outer Ring

(ข) Inner Ring

(ค) Roller

รูปที่ 3.3 ลักษณะความเสียหายที่ผิวมีการหลุดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เนื่องจากความล้า

ข. ความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน (Contamination) สาเหตุเกิดจากฝุ่นในอากาศ หรือ สิ่งสกปรกอื่นๆ ที่มาจากบริเวณสถานที่ทำงาน ความสกปรกของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้ง สิ่งสกปรกปนเปื้อนในสารหล่อลื่น หรือเศษจากการสึกหรอของตัวตลับลูกปืนเอง ลักษณะความเสียหายจะเป็นรอยขีดหรือเป็นหลุมลึกบนเม็คลูกปืนและบนรางวิ่งของทั้งแหวนในและแหวนนอกเมื่อใช้เล็บขูดเช็คจะสะดุดมือรู้สึกได้ชัดเจนอันเป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 3.4



(ก) Outer Ring

(ข) Inner Ring

(ค) Roller

รูปที่ 3.4 ลักษณะความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน

ง. ความเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่น (**Lubrication Failure**) สาเหตุเกิดจากการไหลของสารหล่อลื่นไม่ทั่วถึง หรือทำงานในลักษณะอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นมีคุณภาพลดลงลักษณะของความเสียหายจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของเม็ดลูกปืน แหวนใน และแหวนนอก รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆ (เป็นสีน้ำเงิน หรือสีน้ำตาล) การสึกหรอของเม็ดลูกปืน แหวนใน แหวนนอก เป็นผลทำให้เกิดความร้อนสูง



(ก) Outer Ring

(ข) Inner Ring

(ค) Roller

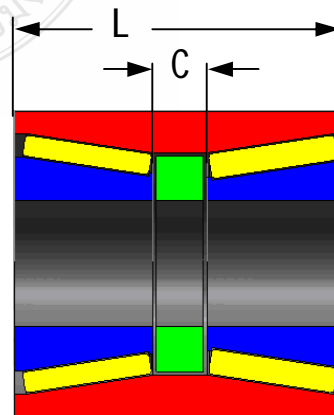
รูปที่ 3.5 ลักษณะความเสียหายจากการขาดสารหล่อลื่น โดยมีการเปลี่ยนสีของผิว

### 3.2.2 การตรวจวัดค่าเคลียร์เร้นซ (Clearance)

การวัดค่าเคลียร์เร้นซของตลับลูกปืนเป็นการวัดค่าการสึกหรอ รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องวัดเคลียร์เร้นซ โดยจะวัดระยะในแนวแกนของชุดตลับลูกปืนสองตลับซึ่งค่าที่อ่านจาก Dial Gage ต้องมีค่าไม่เกิน 700  $\mu\text{m}$  ถ้าค่ามากกว่านี้แสดงว่าตลับลูกปืนเกิดการสึกหรอมาก ซึ่งจะทำให้ตลับลูกปืนมีระยะเคลื่อนตัวค่อนข้างมากลักษณะเช่นนี้ส่งผลทำให้ตลับลูกปืนเสียหายเร็วยิ่งขึ้น รูปที่ 3.7 แสดงระยะ C ที่วัดค่าในแนวแกน เมื่อทำการวัดโดยเครื่องวัดค่าเคลียร์เร้นซแล้วค่าจะต้องลดลงจากค่าเดิมไม่เกิน 700  $\mu\text{m}$



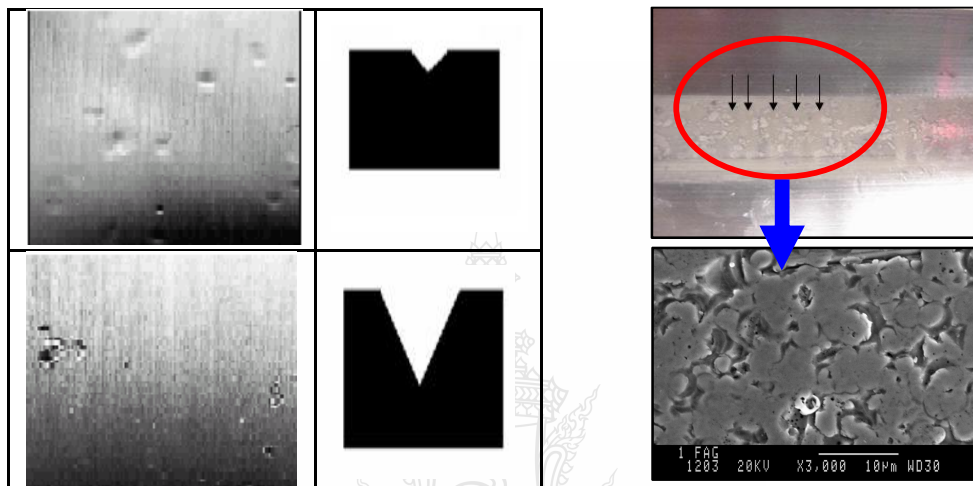
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดเคลียร์เร้นซ



รูปที่ 3.7 ภาพวาดตลับลูกปืน

### 3.2.3 การตรวจสอบโดยการขยายภาพ

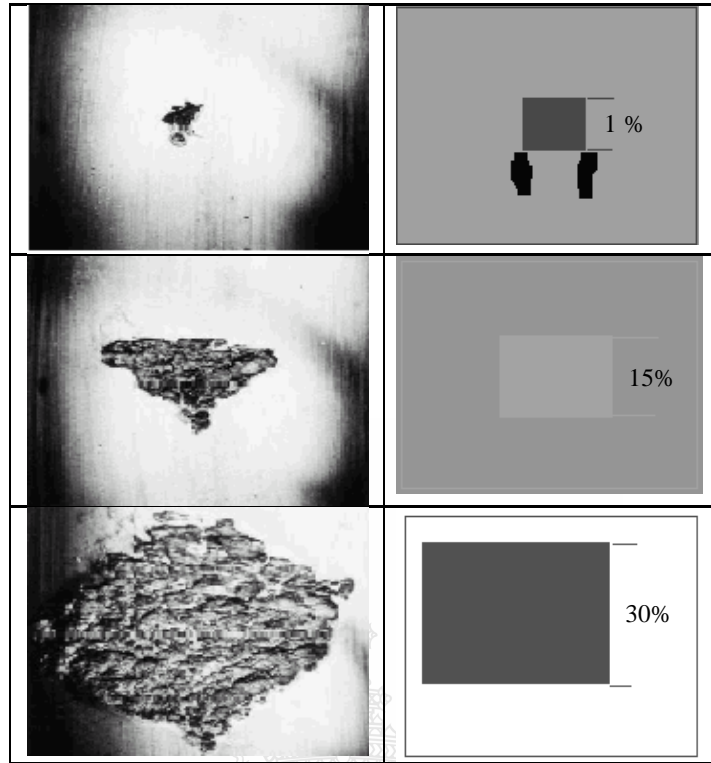
รูปที่ 3.8 แสดงการตรวจดูบริเวณความเสียหายโดยการขยายภาพเพื่อวิเคราะห์ดูความเสียหายโดยรวม และรูปที่ 3.9 แสดงภาพขยายทำให้สามารถมองเห็นความเสียหายได้อย่างชัดเจนบนเนื้อวัสดุ แต่ในการตรวจสอบวัสดุที่มีจำนวนมากทำได้ยากเนื่องจากต้องใช้เวลาาน จากศึกษาพบว่าความเสียหายที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าของตลับลูกปืนมักจะมีอายุการใช้งานเหลืออยู่ประมาณ 300,000-500,000 กิโลเมตร ซึ่งจัดอยู่ในระดับของ Class A ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อ 3.2.4



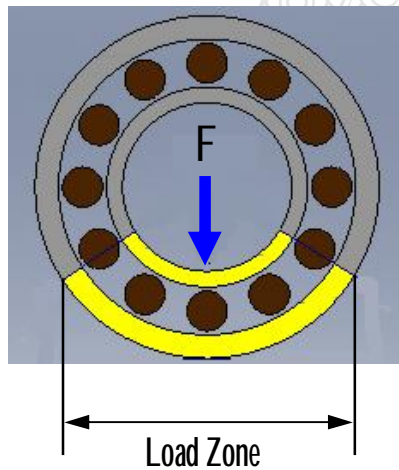
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงความลึกและการมองด้านข้าง [23] รูปที่ 3.9 ภาพขยายความละเอียดขนาด 10 µm [23]

### 3.2.4 การจำแนกระดับความเสียหายโดยอาศัยการระบุเป็นเปอร์เซ็นต์

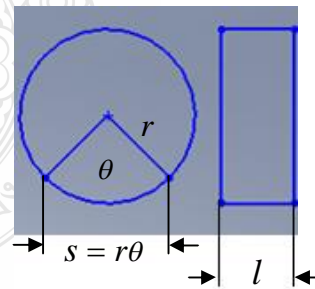
หลักการที่ใช้พิจารณานั้นจะให้ความสำคัญกับตัวแหวนนอก ตัวแหวนใน และตัวเม็ดลูกปืนตามลำดับเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นของแหวนนอกจะมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายมากที่สุด รูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นบริเวณความเสียหายของพื้นผิวบนตลับลูกปืนโดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ เพราะบริเวณรับภาระไม่มีการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 3.11 ภาพแสดงบริเวณ Load Zone ส่วนแหวนในนั้นจะเกิดขึ้นตลอดเส้นรอบวงเนื่องมาจากการหมุน และตัวเม็ดลูกปืนเองก็เหมือนกันกับตัวแหวนในและจะมีความคล้ายคลึงกันทุกเม็ด การแบ่งแยกระดับนั้นได้อ้างอิงข้อมูลการใช้งานในต่างประเทศและบริษัทผู้ผลิตตลับลูกปืน โดยจำแนกความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ คือระดับ A, B และ C ซึ่งระดับ A เปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระโหลดอยู่ที่ 1-15% ระดับ B เปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 15-30% และระดับ C มีเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 30-50% ซึ่งระดับ C มีความเสียหายค่อนข้างมากจึงไม่น่ากลับไปใช้งาน เนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา รูปที่ 3.12 แสดงการหาพื้นที่ความเสียหายบริเวณ Load Zone โดยใช้สมการที่ 3.3



(ก) รูปจากกล้องขยายที่แสดงความเสียหาย [24] (ข) วิธีการประเมินความเสียหายเป็นเปอร์เซ็นต์  
 รูปที่ 3.10 ภาพขยายบริเวณความเสียหายโดยเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระ



รูปที่ 3.11 บริเวณ Load Zone



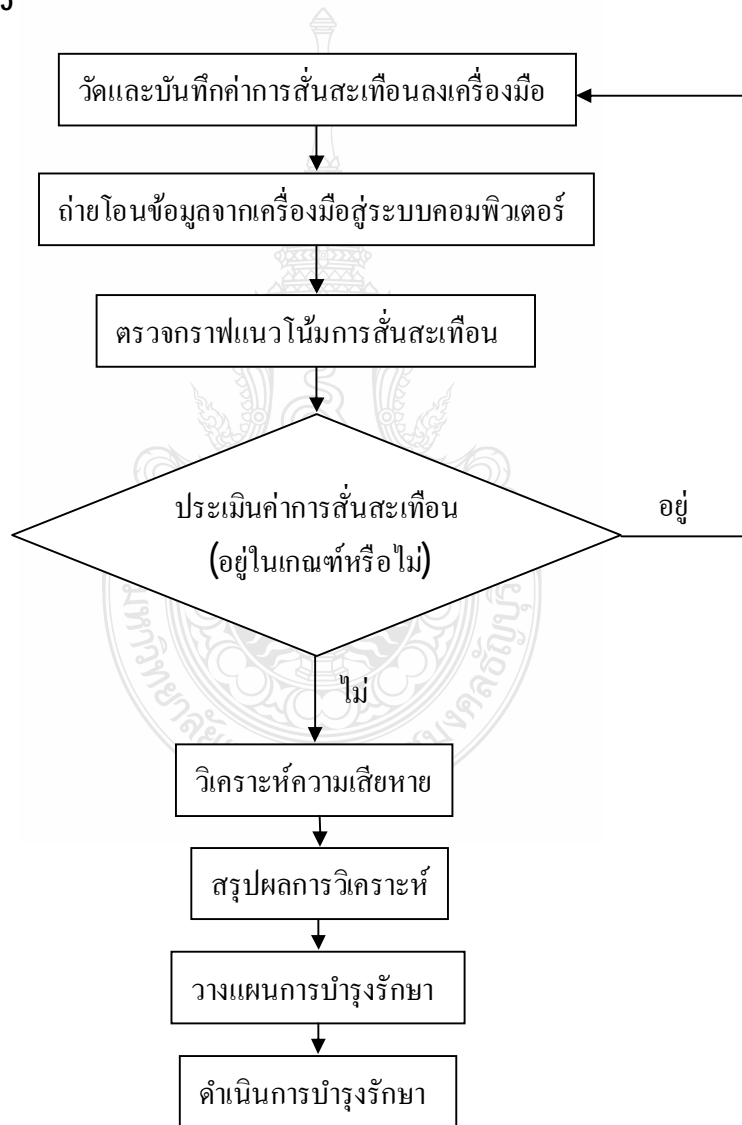
$$A = ls \quad (3.3)$$

- A คือพื้นที่ความเสียหาย
- s คือความยาวบริเวณ Load Zone
- l คือความกว้างของหน้าสัมผัส
- r คือรัศมีของตลับลูกปืน
- $\theta$  คือองศาบริเวณ Load Zone

รูปที่ 3.12 การหาพื้นที่ความเสียหายบริเวณ Load Zone

### 3.3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis)

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหัวข้อนี้ จะอธิบายถึงวิธีการในการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพโดยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ซึ่งในการวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งบุคลากรที่มีความรู้และเข้าใจในวิธีการวัดการสั่นสะเทือน เพื่อที่จะทำให้การดำเนินงานบรรลุผลสำเร็จ เมื่อดำเนินการตรวจวัดและเก็บข้อมูลมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการถ่ายโอนข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นผู้วิเคราะห์จะทำการตรวจสอบและประเมินค่าการสั่นสะเทือน ถ้าเกินค่ามาตรฐานก็จะดำเนินการวิเคราะห์หาสาเหตุพร้อมสรุปทำเป็นรายงานต่อไป สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนั้น จะลำดับเป็นขั้นตอนเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

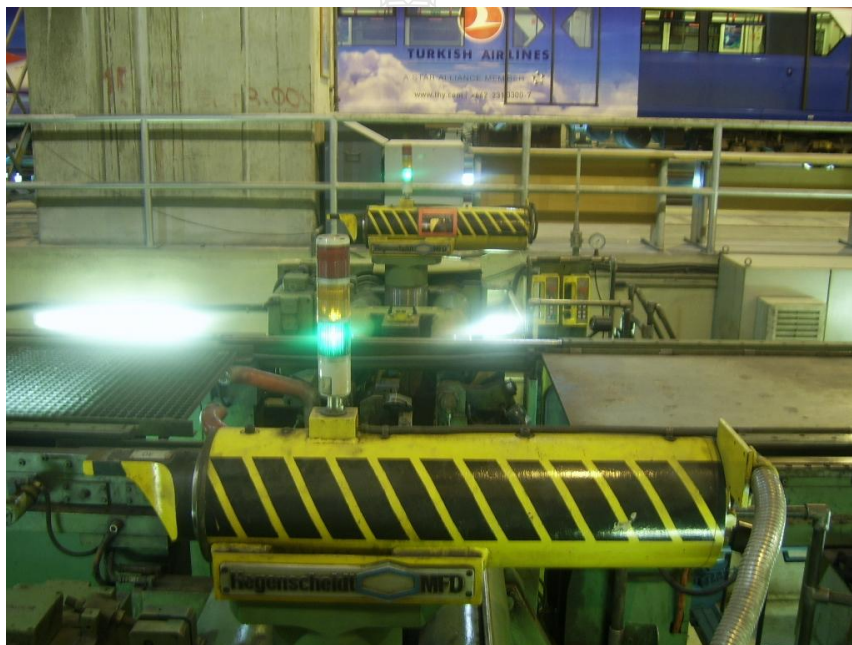


### 3.4 วิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือน

สำหรับวิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือนในหัวข้อนี้ ซึ่งในการทดลองนั้นจะประกอบไปด้วย เครื่องมือ อุปกรณ์ และขั้นตอนในการทดลอง ตามขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งจะแสดง รายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 เครื่องกลิ้งล้อ (Under Floor Wheel Lathe)

การวัดการสั่นสะเทือนในงานวิจัยนี้ซึ่งจะทำการวัดและทดสอบภายในโรงซ่อมบำรุงโดย ใช้เครื่องกลิ้งล้อ รูปที่ 3.14 แสดงเครื่องกลิ้งล้อ (Under Floor Wheel Lathe) เป็นต้นกำลังที่ใช้ในการ ขับเคลื่อนล้อให้หมุนเพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยที่ไม่ต้องถอดล้อออกมาวัดภายนอก ซึ่งจะทำให้ ลักษณะการรับภาระมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริง รูปที่ 3.15 แสดงชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อน และรูปที่ 3.16 แสดงชุดอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกลิ้งล้อ



รูปที่ 3.14 เครื่องกลิ้งล้อ (Under Floor Wheel Lathe)



รูปที่ 3.15 ชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อน



รูปที่ 3.16 ชุดอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกลึงล้อ

### 3.4.2 เครื่องมือวัดค่าการสั่นสะเทือน

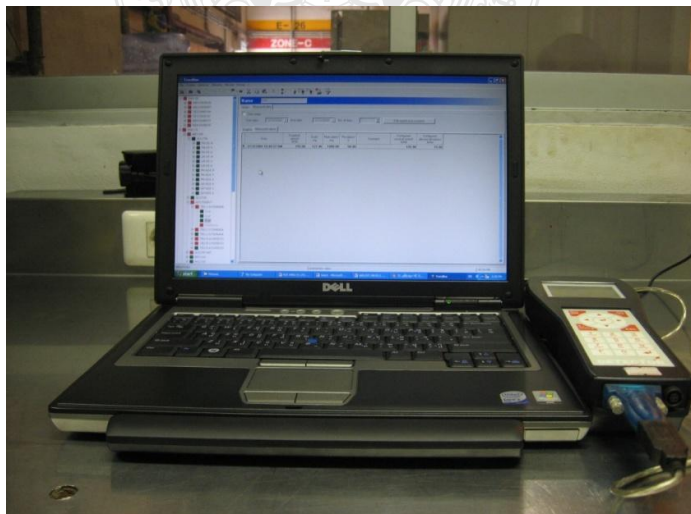
เครื่องมือวัดและบันทึกผลการสั่นสะเทือน ยี่ห้อ FAG รุ่น Detector III ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องมือวัดและบันทึกผลการสั่นสะเทือน

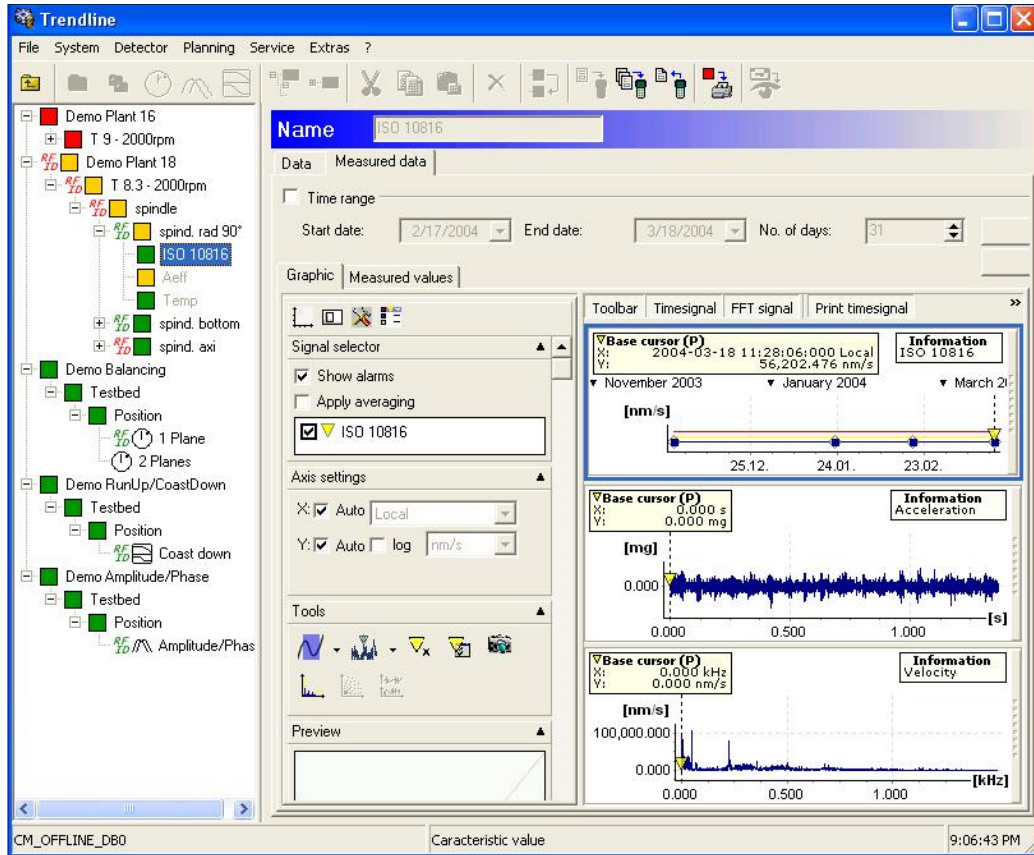
### 3.4.3 คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์

โดยจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากเครื่องมือวัดและบันทึกผล ซึ่งสามารถที่จะวิเคราะห์ผลในภายหลังได้ รูปที่ 3.18 แสดงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย และรูปที่ 3.19 แสดงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของ FAG Detector III ชื่อ โปรแกรม Trendline เวอร์ชัน 3.4.0.25



รูปที่ 3.18 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย





รูปที่ 3.19 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

### 3.4.4 การวัดการสั่นสะเทือน

โดยจะเริ่มจากการกำหนดจุดวัดในตำแหน่งที่มีการส่งผ่านสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุด จากนั้นทำความเข้าใจความสะอาดบริเวณที่จะติดตั้งหัววัด และติดตั้งหัววัดแบบความเร่งโดยยึดติดแบบแม่เหล็กที่ตำแหน่งฝาครอบและเสื้อตั้บลูกปืน รูปที่ 3.20 แสดงการติดตั้งหัววัดในแนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial) รูปที่ 3.21 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตั้บลูกปืนในขบวนรถ ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลที่ใช้วัด

- ก. การกำหนดจุดวัด (Measurement Point) แนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial)
- ข. ทำความสะอาดบริเวณที่จะติดตั้งหัววัด
- ง. ติดตั้งหัววัดแบบความเร่งโดยยึดติดแบบแม่เหล็ก
- จ. ความเร็วรอบที่ใช้ในการวัด 50, 100, 150 รอบต่อนาที
- ฉ. กำหนดช่วงความถี่ในการวัด 2 ช่วง

การวัดในช่วงความถี่ต่ำ

- ในฟังก์ชัน **Velocity** ช่วงความถี่ที่ทำการวัดคือ 10 - 1000 Hz
- ในฟังก์ชัน **Acceleration** ช่วงความถี่ที่ทำการวัดคือ 0.6 - 2000 Hz
- ในฟังก์ชัน **Demodulation** ช่วงความถี่ที่ทำการวัดคือ 0.3 - 500 Hz

การวัดในช่วงความถี่สูง

- ในฟังก์ชัน **Velocity** ช่วงความถี่ที่ทำการวัดคือ 37.5 - 20000 Hz
- ในฟังก์ชัน **Acceleration** ช่วงความถี่ที่ทำการวัดคือ 12.5 - 20000 Hz
- ในฟังก์ชัน **Demodulation** ช่วงความถี่ที่ทำการวัดคือ 12.5 - 20000 Hz

ช. กำหนดความละเอียดในการแสดงผลของความถี่ในกราฟ 1600 และ 3200 Lines

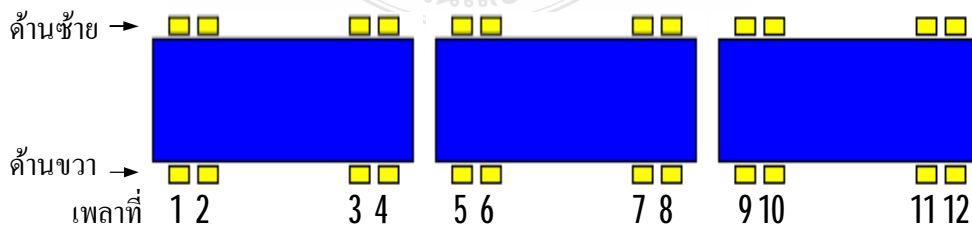
ช. กำหนดค่าเฉลี่ยในการวัดของฟังก์ชัน **Averaging** 2 ครั้ง และไม่ต้อง **Averaging**

ณ. ดำเนินการทดสอบกับรถไฟไฟฟ้าจำนวน 10 ขบวน

ณ. เก็บสัญญาณของตลับลูกปืนที่ยังไม่มีการสึกหรอ และตลับลูกปืนที่สึกหรอ



รูปที่ 3.20 การติดตั้งหัววัดในแนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial)



■ ตำแหน่งที่ติดตั้งตลับลูกปืน

รูปที่ 3.21 ตำแหน่งที่ติดตั้งตลับลูกปืนในขบวนรถ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวัดกลับลูกปืน

ฟังก์ชัน	ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบ (RPM)	ความละเอียดในการแสดงผล (Lines)	จุดวัด
Velocity	10-1000 37.5-20000	150	3200 1600	Axial Radial
		100		
		50		
Acceleration	0.6-2000 12.5-20000	150	3200 1600	Axial Radial
		100		
		50		
Demodulation	0.3-500 12.5-20000	150	3200 1600	Axial Radial
		100		
		50		

3.4.5 ข้อมูลทั่วไปของตัวรถไฟฟ้าและตลับลูกปืน

โดยข้อมูลที่จะนำมาประกอบการวิเคราะห์นั้นจะมีข้อมูลทางด้านเทคนิคของตัวรถไฟฟ้า และข้อมูลของตลับลูกปืนจากผู้ผลิต เพื่อที่จะทำให้การวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ก. ข้อมูลของตัวรถไฟฟ้า ซึ่งเป็นข้อมูลการใช้งานทั่วไปที่บอกถึง ขนาด ความเร็ว และการรับภาระ ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของตัวรถไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของตัวรถไฟฟ้า

ใน 1 ขบวนประกอบด้วยตู้โดยสาร	จำนวน 3 ตู้
ความกว้างและความสูง	กว้าง 3.20 สูง 3.8 เมตร
ความยาวทั้ง 3 ตู้ รวมกันประมาณ	65 เมตร
จำนวนเพลาล้อ	12 เพลลา
ใน 1 ขบวนมีตลับลูกปืนจำนวน	24 ลูก
ตัวรถรวมน้ำหนักบรรทุกประมาณ	155 ตัน
ความเร็วสูงสุด	80 กม/ชม.
ความเร็วเฉลี่ย	35 กม/ชม.
ขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์จำนวน	8 ตัวๆ ละ 230 กิโลวัตต์
รับกระแสไฟฟ้า	750 VDC จากรางที่สาม
รางกว้าง	1.435 เมตร
ล้อใหม่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	0.850 เมตร

ข. ข้อมูลของตลับลูกปืน โดยจะแบ่งเป็นข้อมูลทั่วไปของตลับลูกปืนที่ใช้ในล้อรถไฟฟ้  
ซึ่งบอกถึงรายละเอียดต่างๆ ของการใช้งาน ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลทั่วไปของตลับลูกปืนจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทั่วไปของตลับลูกปืนจากผู้ผลิต SKF เบอร์ 1639590A แบบ Taper Roller  
Bearing Unit (TBU) [25]

การรับภาระ โหลดสูงสุด	32 ตัน
การรับภาระปกติ	ประมาณ 7 ตัน
อุณหภูมิการใช้งานปกติของจาระบี	75 องศาเซลเซียส
ทิศทางการรับน้ำหนัก	แนวแกนและแนวรัศมี
ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของแหวนใน (BPFI)	11.70
ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของแหวนนอก (BPFO)	9.30
ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของการหมุนเม็ดลูกปืน (BSF)	4.26
ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของรังพื้นฐาน (FTF)	0.44

และข้อมูลของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 10 ขบวน จากรถไฟฟ้ทั้งหมด 35  
ขบวน และตลับลูกปืนที่ทำการทดสอบภายนอกตัวรถอีกจำนวน 6 ลูก โดยแบ่งเป็นทั้งหมด 4 Class  
ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบ

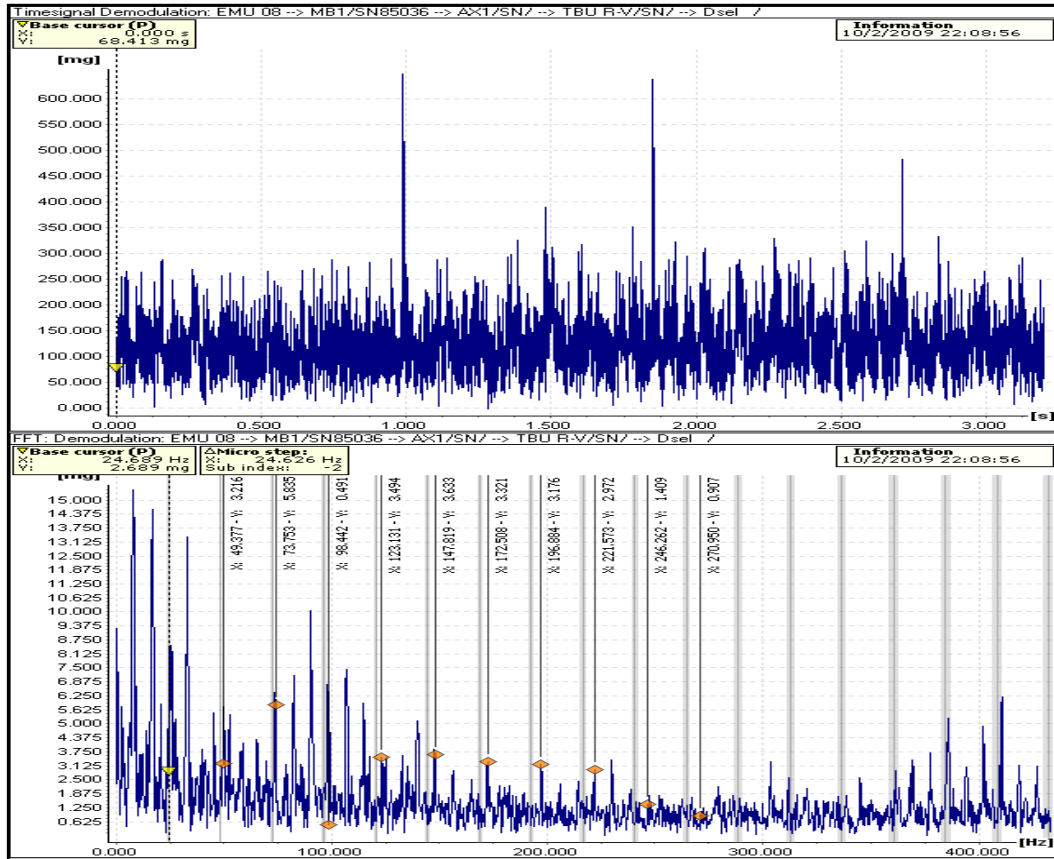
1. Class New เป็นตลับลูกปืนใหม่ที่ยังไม่มีการใช้งานมาก่อน จำนวน 96 ลูก
2. Class A เป็นตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 ปี และได้รับการบำรุงรักษาแล้ว  
(สภาพดี) จำนวน 96 ลูก
3. Class B เป็นตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 ปี และได้รับการบำรุงรักษาแล้ว  
(สภาพพอใช้) จำนวน 48 ลูก
4. Class C เป็นตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 ปี และได้รับการบำรุงรักษาแล้ว  
(สภาพแย้) เป็นตลับลูกปืนที่ทำการทดสอบภายนอกตัวรถ จำนวน 6 ลูก

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบ

Class	จำนวน (ลูก)	การใช้งาน (ปี)	สภาพ
New	96	ไม่มีการใช้งานมาก่อน	ของใหม่
A	96	6	ดี
B	48	6	พอใช้
C	6	6	แย้

### 3.4.6 สัญญาณความถี่จากการวัด

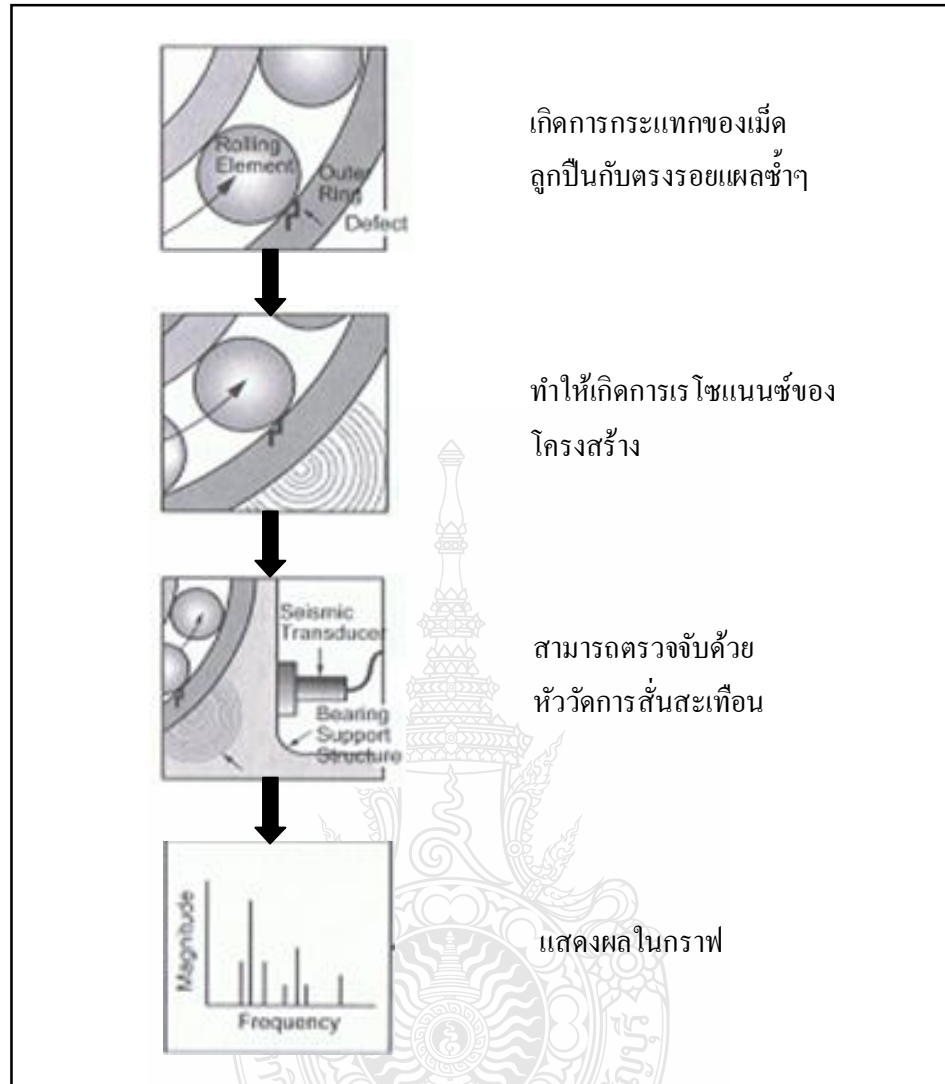
การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรนั้นมีการหมุน ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณความถี่ของชิ้นส่วนภายใน และความถี่ของการเสียหายในรูปแบบต่างๆ รูปที่ 3.22 แสดงความถี่จากการวัด



รูปที่ 3.22 ความถี่จากการวัด

### 3.5 การวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนในที่นี้จะทำการวิเคราะห์ความเสียหายโดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Analysis) หรือการแสดงผลในรูปแบบของกราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) โดยจะใช้หน่วยวัดแบบระยะทาง ความเร็ว หรือความเร่ง และแกนนอนจะแสดงค่าความถี่ (Frequency) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากตลับลูกปืนนั้น ในการวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัมนี้ สามารถแปลความหมายโดยแกนตั้งจะบ่งบอกถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือน ส่วนแกนนอนจะบอกถึงลักษณะปัญหาหรือแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นว่าอยู่ตรงตำแหน่งไหนของตลับลูกปืน และอาจจะมีการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของตลับลูกปืน รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน



รูปที่ 3.23 สัญญาณความเสียหายของดัลูกปืน

# บทที่ 4

## ผลการทดลอง

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการจำแนกความเสียหายและวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากการทดลองซึ่งจะประกอบไปด้วย การเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class ต่างๆ การวิเคราะห์ใน Time Domain และ Spectrums Domain การประเมินอายุการใช้งาน ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดลองกับตลับลูกปืนจริง โดยการจำกัดความเร็วรอบ และการรับภาระให้คงที่ เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบผลของสัญญาณจากการวัดแต่ละครั้งจนตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย และจำกัดตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานวิจัย ซึ่งได้ทำการวัดการสั่นสะเทือนภายในโรงซ่อมบำรุง โดยทำการวัดบนเครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe) ซึ่งตลับลูกปืนนั้นได้ติดตั้งอยู่กับตัวรถไฟฟ้าในลักษณะเหมือนการใช้งานจริงทุกประการ และทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เริ่มใช้งาน ไปจนตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย โดยใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบพกพา และใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปในการวิเคราะห์ผล

### 4.2 ผลจากการจำแนกตลับลูกปืน

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และถึงระยะเวลาทำการบำรุงรักษาตามกำหนดของผู้ผลิต พบว่าสามารถที่จะแบ่งระดับของความเสียหายออกได้โดยอาศัยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสตลับลูกปืน ต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ระดับคือระดับ A, B และ C โดยระดับ A ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ที่ 1-15% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 300,000-500,000 กิโลเมตร ระดับ B ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอยู่ที่ 15-30% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 200,000-300,000 กิโลเมตร และระดับ C ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30-50% จะมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยจึงไม่นำไปใช้งาน เนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา ตารางที่ 4.1 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการบำรุงรักษา โดยในตารางนั้นจะบอกถึงอายุการใช้งานเป็นปี หรือระยะทางที่ใช้ได้อีกซึ่งเทียบมาจากใน 1 ปีรถไฟฟ้านั้นจะวิ่งได้ระยะทางประมาณ 100,000 กิโลเมตร (km)

ตารางที่ 4.1 อายุการใช้งานที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการบำรุงรักษา

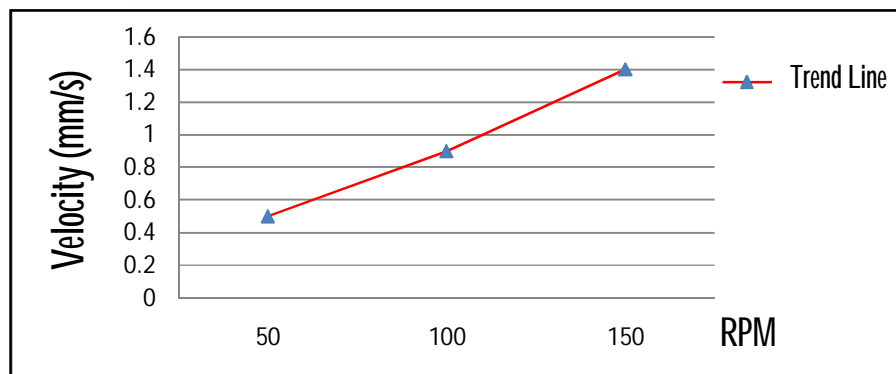
ระดับ (Class)	การใช้งานหลังจากผ่านการบำรุงรักษา	
	อายุการใช้งานที่เหลืออยู่	ระยะทางที่ใช้ได้อีก
A	3-5 ปี	300,000-500,000 km
B	2-3 ปี	200,000-300,000 km
C	ไม่แนะนำให้ใช้งาน	

### 4.3 ผลจากการวัดการสั่นสะเทือน

ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้นได้มีการทดลองและกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ผล เพื่อให้มีความเหมาะสมและสามารถแสดงรายละเอียดได้ชัดเจน ซึ่งผลที่ได้จากการกำหนดเงื่อนไขในการวัดค่าการสั่นสะเทือนเบื้องต้น ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ความเสียหายโดยหลักๆ แล้วมีดังนี้

#### 4.3.1 ผลจากความเร็รรอบ

สำหรับความเร็รรอบที่ใช้ในการวัดนั้นมีอยู่ 3 ค่าคือ 50, 100 และ 150 รอบต่อนาที รูปที่ 4.1 แสดงความเร็รรอบที่มีผลต่อค่าการสั่นสะเทือน โดยขึ้นกับขีดจำกัดของเครื่องกลิ้งล้อซึ่งเป็นต้นกำลังในการขับล้อให้หมุน จากผลที่ได้ในการวัดที่ความเร็รรอบต่างๆ นั้นจะเห็นถึงระดับการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็รรอบสูงขึ้น โดยจะทำให้เห็นรายละเอียดในกราฟแสดงผลได้ชัดเจน ซึ่งส่งผลดีในการวิเคราะห์ความเสียหาย ในงานวิจัยนี้จะเน้นใช้ความเร็รรอบสูงสุดในการวิเคราะห์คือ 150 รอบต่อนาที ซึ่งเท่ากับความเร็ว 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในขณะที่รถวิ่ง แต่ถึงกระนั้นถ้าหากทำได้ ควรจะวัดที่ความเร็รรอบสูงกว่า หรือประมาณ 300 รอบต่อนาที หรือเท่ากับความเร็ว 96 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในขณะที่รถวิ่ง ซึ่งจะใกล้เคียงกับความเร็วสูงสุดของตัวรถเพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนมากขึ้น และง่ายต่อการวิเคราะห์ความเสียหาย

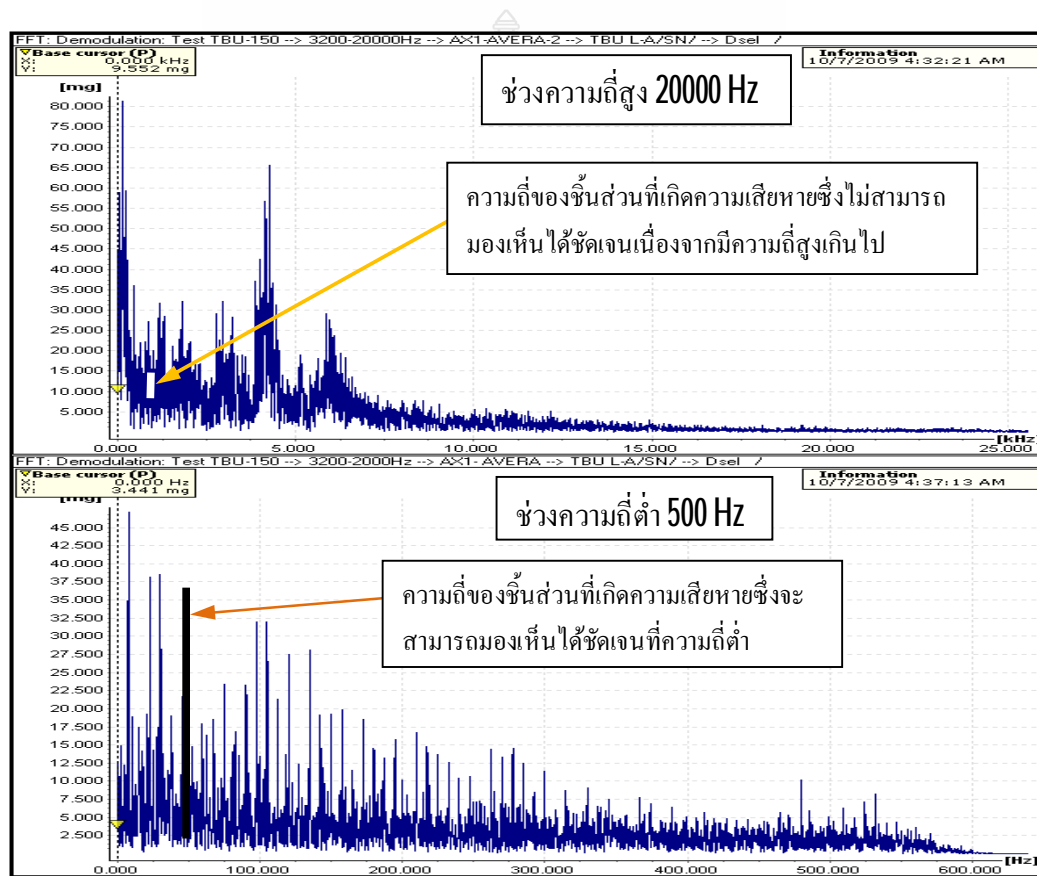


รูปที่ 4.1 ความเร็รรอบที่มีผลต่อค่าการสั่นสะเทือน



### 4.3.2 ผลจากความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือน

ซึ่งค่าความถี่ที่ใช้ในการวัดนั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือที่ช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ รูปที่ 4.2 แสดงผลในช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ โดยในช่วงความถี่สูงนั้นใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหายในช่วงเริ่มต้นที่ย่านความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic) จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า การแยกแยะความถี่ของคลื่นลูกปืนที่เกิดความเสียหายทำได้ยากเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจำนวนมาก และประกอบกับความถี่รอบที่ใช้ในการวัดค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเสียหายจะเน้นวิเคราะห์ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งจะมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์และประเมินอายุ ก่อนที่คลื่นลูกปืนนั้นจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง

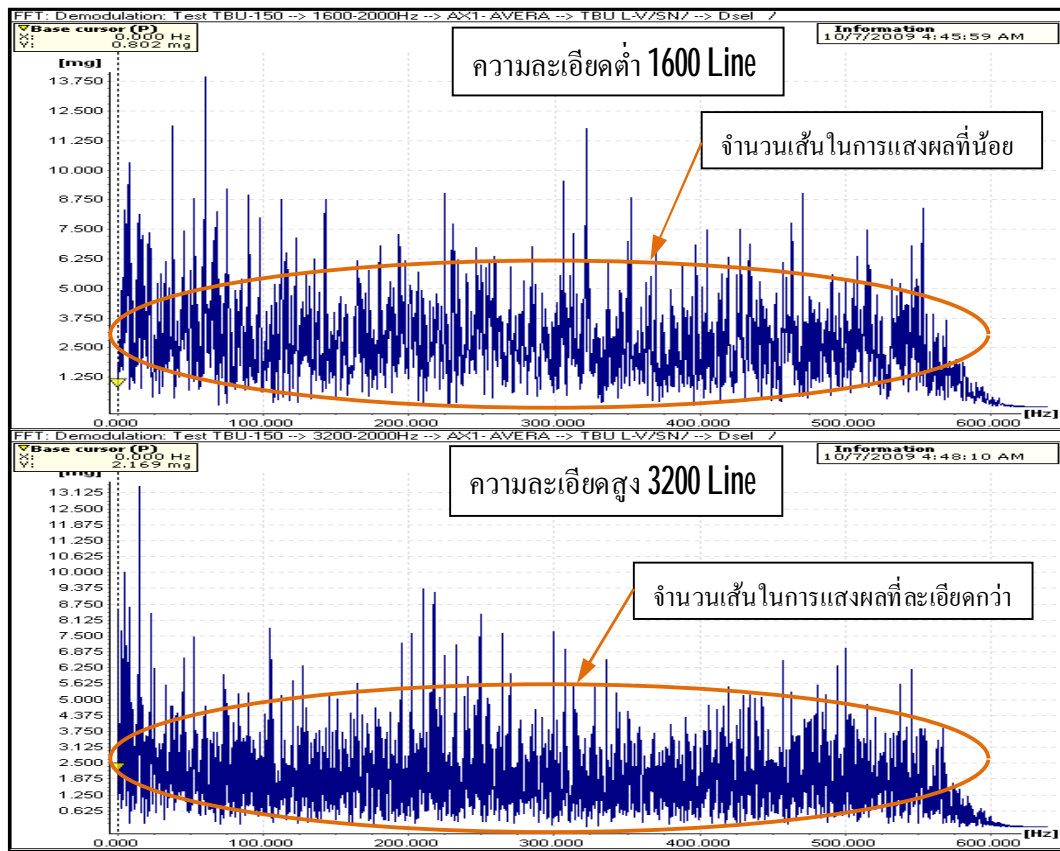


รูปที่ 4.2 ผลในช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ

### 4.3.3 ผลจากความละเอียดในการแสดงผล

ความละเอียดในกราฟแสดงผลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าจำนวนเส้น (Line) ที่ได้มีการกำหนดไว้ในตอนแรกจากเงื่อนไขในการวัด รูปที่ 4.3 แสดงความละเอียดในกราฟแสดงผล ทั้งนี้ในการตั้งค่าให้

มีความละเอียดสูงนั้นก็จะต้องใช้ระยะเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นใช้ความละเอียดที่ 3200 Line เพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 4.3 ความละเอียดในการแสดงผล

#### 4.4 ผลจากการเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class ต่างๆ

ผลของการวัดการสั่นสะเทือนนั้น ได้มีการวัดอยู่หลายรูปแบบรวมถึงตัวแปรที่มีการกำหนดไว้ในตอนแรก เพื่อที่จะนำค่าต่างๆ มาใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหาย อาทิเช่น ฟังก์ชันที่ใช้ในการวัดความถี่ที่ใช้ ความเร็วรอบ ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัด ฯลฯ โดยข้อมูลดังกล่าวนั้นจะเป็นข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลง และแสดงให้เห็นถึงลักษณะความเสียหายที่เพิ่มขึ้นในหน่วยความเร็ว (mm/s) ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class New ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class A ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class B และตารางที่ 4.5 แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class C สำหรับลักษณะของตัวรถและการติดตั้งตลับลูกปืนนั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 3.21 โดยที่ (R=ด้านซ้าย L=ด้านขวา) ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

ตารางที่ 4.2 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class New จำนวน 96 ลูก หรือรถไฟฟ้า 4 ขบวน

เพลลา ขบวน		เพลลา											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	L	0.53	0.60	0.66	0.50	0.57	0.52	0.49	0.73	0.60	0.53	0.50	0.64
	R	0.48	0.55	0.68	0.82	0.61	0.58	0.81	0.62	0.74	0.96	0.77	0.63
2	L	0.71	0.73	0.67	0.59	0.55	0.67	0.81	0.52	0.63	0.58	0.67	0.89
	R	0.64	0.56	0.50	0.62	0.71	0.52	0.64	0.68	0.50	0.76	0.82	0.46
3	L	0.90	0.54	0.62	0.71	0.51	0.48	0.55	0.53	0.56	0.64	0.48	0.59
	R	0.65	0.62	0.71	0.63	0.66	0.56	0.62	0.52	0.67	0.73	0.42	0.67
4	L	0.66	0.82	0.77	0.50	0.46	0.55	0.58	0.51	0.62	0.78	0.68	0.71
	R	0.62	0.74	0.59	0.66	0.82	0.78	0.48	0.59	0.50	0.61	0.63	0.53

ตารางที่ 4.3 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class A จำนวน 96 ลูก หรือรถไฟฟ้า 4 ขบวน

เพลลา ขบวน		เพลลา											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	L	0.90	0.82	0.98	0.79	0.84	0.96	0.78	0.96	0.84	0.99	0.86	0.77
	R	0.60	0.88	0.76	0.62	0.85	0.94	0.96	0.65	0.69	0.84	0.99	0.91
2	L	1.10	0.83	0.84	0.76	0.82	0.83	0.97	0.67	0.63	1.11	0.91	0.99
	R	0.69	0.96	0.87	0.86	0.66	0.63	0.52	0.90	0.95	0.84	0.72	0.70
3	L	0.88	0.97	0.90	0.96	1.20	0.69	0.88	0.97	1.23	0.82	0.67	0.99
	R	0.68	0.76	0.91	0.75	0.86	0.97	0.93	0.88	0.86	0.73	1.00	1.01
4	L	0.90	0.86	0.94	1.02	0.97	0.99	0.86	0.73	0.77	0.82	0.91	1.11
	R	0.69	0.82	0.97	0.93	0.94	0.99	0.91	0.92	0.82	0.94	0.96	0.88

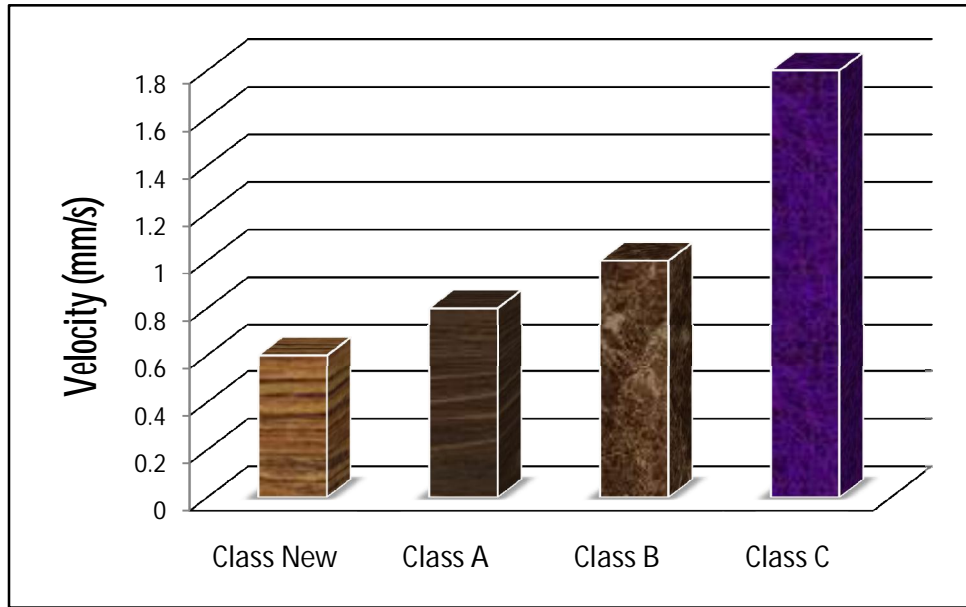
ตารางที่ 4.4 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class B จำนวน 48 ลูก หรือรถไฟฟ้ 2 ขบวน

เพลลา ขบวน		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		1	L	1.20	1.23	1.00	0.82	1.04	1.60	0.96	0.74	0.99	1.30
R	1.02		0.94	0.98	1.12	1.69	2.00	0.89	1.56	1.61	1.22	0.79	1.00
2	L	0.96	1.10	1.23	0.99	0.78	1.30	1.25	1.00	1.59	1.05	0.89	1.20
	R	0.79	0.97	1.50	1.11	1.13	0.96	1.20	0.86	1.25	1.74	0.96	1.22

ตารางที่ 4.5 ค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) Class C จำนวน 6 ลูก

เพลลา ขบวน		1	2	3
		L	1.50	1.35
R	1.2	1.78	1.89	

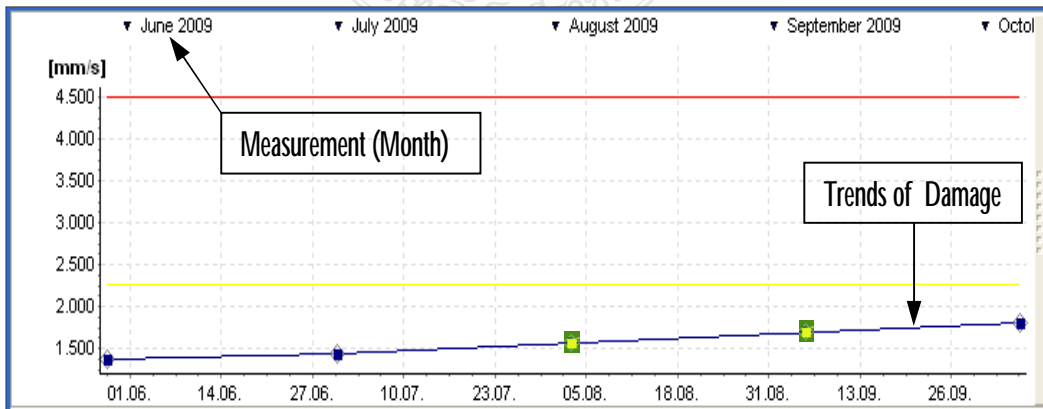
จากตารางที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 จะประกอบด้วยตลับลูกปืนทั้งหมด 4 Class ซึ่งทำการวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยใช้ค่าการสั่นสะเทือนในมาตรฐาน ISO 10816 (10 - 1000 Hz) ในหน่วย mm/s (ค่าความเร็ว) จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนในหน่วย mm/s ของตลับลูกปืนแต่ละ Class รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบตลับลูกปืนแต่ละ Class จะเห็นว่า Class C มีระดับการสั่นสะเทือนสูงที่สุด ซึ่งเป็นตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายและไม่เหมาะสมที่จะใช้งานต่อไปอีก ส่วน Class B และ A นั้นยังสามารถที่จะใช้งานต่อไปได้แต่ต้องทำการตรวจวัดเป็นระยะ เพื่อประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่จากค่าที่ได้ในการวัดแต่ละครั้ง ทั้งนี้ค่าที่ได้ในรูปด้านล่างจะมีการเปลี่ยนแปลงถ้าหากทำการวัดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่าง ซึ่งจะทำให้การประเมินมีความคลาดเคลื่อนและไม่ตรงกับความเสี่ยงจริง ส่วนในเรื่องของวิธีการประเมินนั้นจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อการวิเคราะห์ความเสี่ยงและประเมินหาอายุการใช้งาน



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

#### 4.4.1 ผลจากกราฟแนวโน้ม

เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างการวัดแต่ละครั้งเพื่อดูค่าการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้น จากการวัดตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายจะเห็นว่ามีเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิมโดยกราฟมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จนตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย รูปที่ 4.5 แสดงกราฟแนวโน้ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพโดยรวมที่ใช้ในการวัด เช่น ล้อจะต้องมีการกลิ้งก่อนที่จะทำการวัด การสั่นสะเทือนของคันทาลังจะต้องน้อย จากเหตุผลดังกล่าวซึ่งจะเป็นข้อจำกัดของการประเมินด้วยวิธีนี้



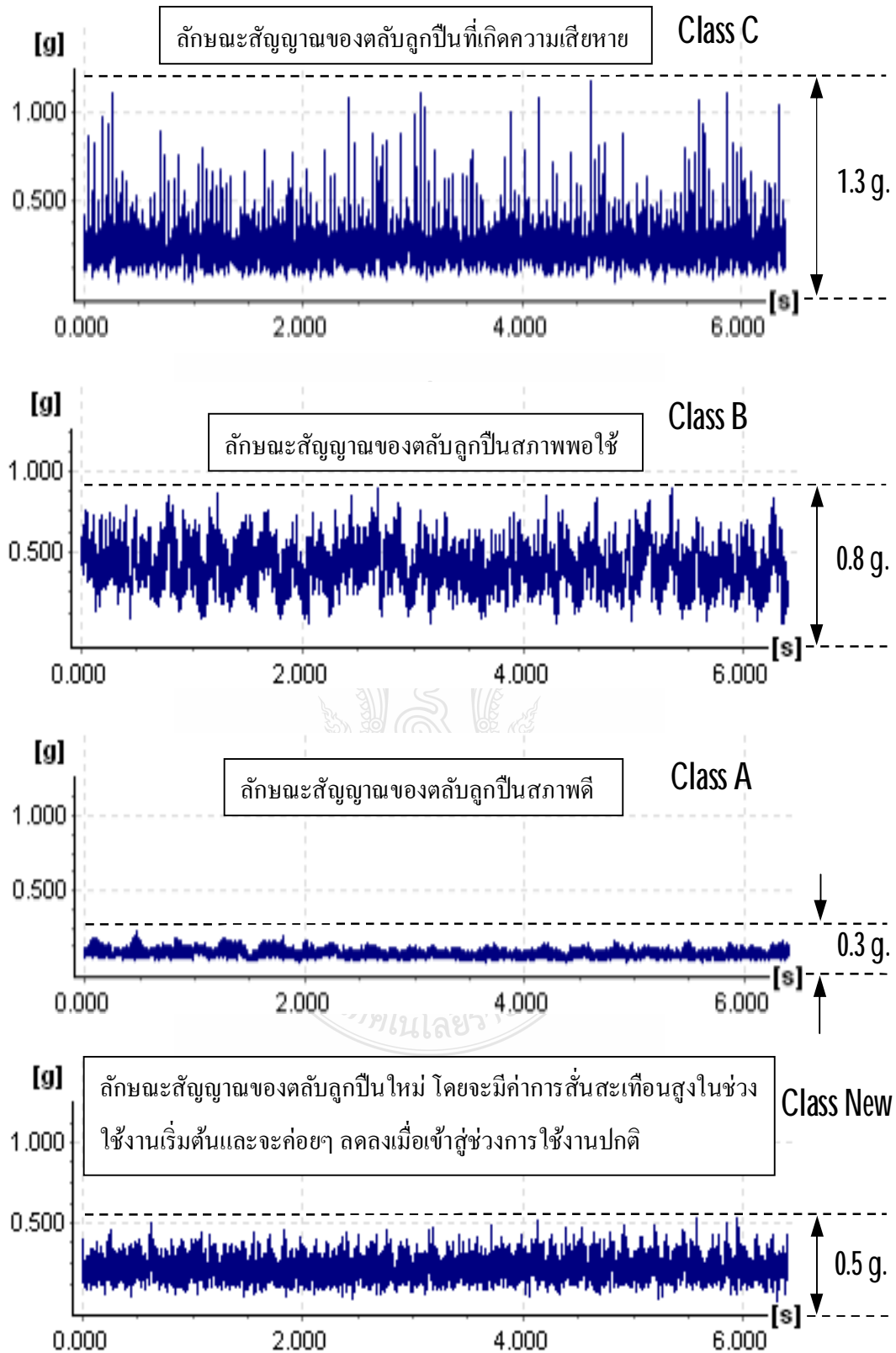
รูปที่ 4.5 กราฟแนวโน้ม

## 4.5 การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินหาอายุการใช้งาน

จากค่าการสั่นสะเทือนในมาตรฐาน ISO 10816 ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านั้นเป็นการสั่นสะเทือนแบบโดยรวม (Overall Vibration) ซึ่งจะไม่ระบุสาเหตุที่ชัดเจนของความเสียหาย เป็นเพียงการตรวจสอบสภาพโดยรวมของตลับลูกปืนทั้งคู่ และจะตรวจพบก็ต่อเมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหายในระดับที่สูงแล้ว ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเสียหายจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเจาะจงลงไปที่ชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการวัดด้วยฟังก์ชันหลักๆ 3 ฟังก์ชันด้วยกันคือ **Velocity, Acceleration** และ **Demodulation** แต่จะเน้นเฉพาะการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน **Demodulation** เป็นหลัก เนื่องจากการปรับแต่งสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนที่มีขนาดต่ำให้มีขนาดสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เห็นสัญญาณความเสียหายได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และในฟังก์ชันก็จะประกอบไปด้วยกราฟต่างๆ อาทิเช่น กราฟแนวโน้ม (Trend Line) กราฟความถี่ในโดเมนเวลา (Time Domain) กราฟความถี่ในโดเมนสเปกตรัม (Spectrums Domain) โดยการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนผิดปกติของตลับลูกปืน เป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่เป็นจุดเริ่มต้นและที่มาของความเสียหาย ว่ามาจากชิ้นส่วนใดของตลับลูกปืน ส่วนระดับความรุนแรงนั้นจะดูได้จาก **Time Domain** และ จำนวน **Harmonics** ใน **Spectrums Domain** ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

### 4.5.1 การวิเคราะห์ใน Time Domain

เป็นวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนโดยดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดการสั่นในเวลาหนึ่งๆ ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นจริงตามลักษณะสภาพตลับลูกปืน รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความถี่ในโดเมนเวลาของตลับลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM ซึ่งจะเห็นว่าตลับลูกปืนใน Class C นั้นจะมีคลื่นเวลาของการสั่นที่มีการกระแทกในบางขณะระหว่างเม็ดลูกปืนกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย ซึ่งจะมีระดับการสั่นสะเทือนที่สูงโดยมีค่าประมาณ 1.3 g ส่วน Class B นั้นจะเป็นตลับลูกปืนสภาพพอใช้ โดยมีค่าการสั่นสะเทือนในระดับปานกลางประมาณ 0.8 g และ Class A จะมีสัญญาณการสั่นสะเทือนที่น้อย ซึ่งเป็นตลับลูกปืนสภาพดีโดยมีค่าประมาณ 0.3 g สำหรับ Class New นั้นจะเป็นตลับลูกปืนใหม่ที่ยังไม่มีการใช้งานมาก่อน โดยจะมีค่าการสั่นสะเทือนสูงในช่วงการใช้งานเริ่มต้นและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงการใช้งานปกติ ซึ่งระดับความรุนแรงนั้นดูได้จากค่า **Amplitude** หน่วยเป็น g หรือ mg (ค่าความเร่ง) ในแนวแกนตั้ง โดยสัญญาณใน **Time Domain** นั้นจะเป็นความถี่จากการวัดที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงสัญญาณ ซึ่งเป็นความถี่โดยรวมของตลับลูกปืน



รูปที่ 4.6 กราฟความถี่ใน Time Domain ของตลับลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

## 4.5.2 การวิเคราะห์ใน Spectrums Domain

เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนกับความถี่แต่ละตำแหน่ง โดยการจำแนกสัญญาณคลื่นความถี่ที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนในส่วนประกอบต่างๆ ของตลับลูกปืน จากคลื่นไซน์ไปเป็นสเปกตรัมตามวิธีการของ **FFT Demodulation** และสำหรับชิ้นส่วนในตลับลูกปืน ประกอบไปด้วย แหวนนอก แหวนใน เม็ดลูกปืน และรัง โดยการวิเคราะห์ชิ้นส่วนสำหรับตลับลูกปืน ที่โซ่อยู่ในสล็อตไฟฟ้านั้น เราจะให้ความสำคัญกับตัวแหวนนอกก่อนเนื่องจากแหวนนอกจะยึดอยู่กับที่ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายบริเวณที่รับภาระเฉพาะจุด ตามด้วยตัวแหวนใน เม็ดลูกปืน และรัง ตามลำดับ จากชิ้นส่วนต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้นจะมีความถี่เฉพาะของแต่ละชิ้นส่วนซึ่งจะทำให้เราสามารถทราบว่ชิ้นส่วนไหนเกิดความเสียหาย โดยบริเวณที่เกิดความเสียหายนั้นจะส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนจากการกระแทกกันระหว่างเม็ดลูกปืนที่วิ่งผ่านบริเวณที่เกิดความเสียหาย ออกมากระตุ้นให้เกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) ของชิ้นส่วนนั้นๆ และสามารถที่จะตรวจจับด้วยเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน โดยความเสียหายของแต่ละชิ้นส่วนจะหาได้จากความถี่เฉพาะคูณด้วยความเร็วรอบ สมการที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 เป็นค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติ เมื่อได้ค่าจากการคำนวณแล้วจะนำค่าที่ได้นั้นไปใช้ในการหาตำแหน่งความถี่ของแต่ละชิ้นส่วนจากกราฟแสดงผล ซึ่งความถี่เฉพาะของตลับลูกปืนที่ใช้ในสล็อตไฟฟ้านั้นจะไม่มีในโปรแกรมสำเร็จรูป โดยจะต้องขอค่าตัวประกอบจากบริษัทผู้ผลิตและคำนวณหาความถี่เอง รูปที่ 4.7 แสดงการคำนวณหาความถี่ของชิ้นส่วน

-ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติโดยสามารถดูข้อมูลจากสมการที่ 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 และตารางที่ 3.3 สำหรับความถี่ที่ได้จากการคำนวณจะนำไปใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์ผล ดังขั้นตอนในรูปที่ 4.8 ในส่วนความถี่จากการคำนวณ

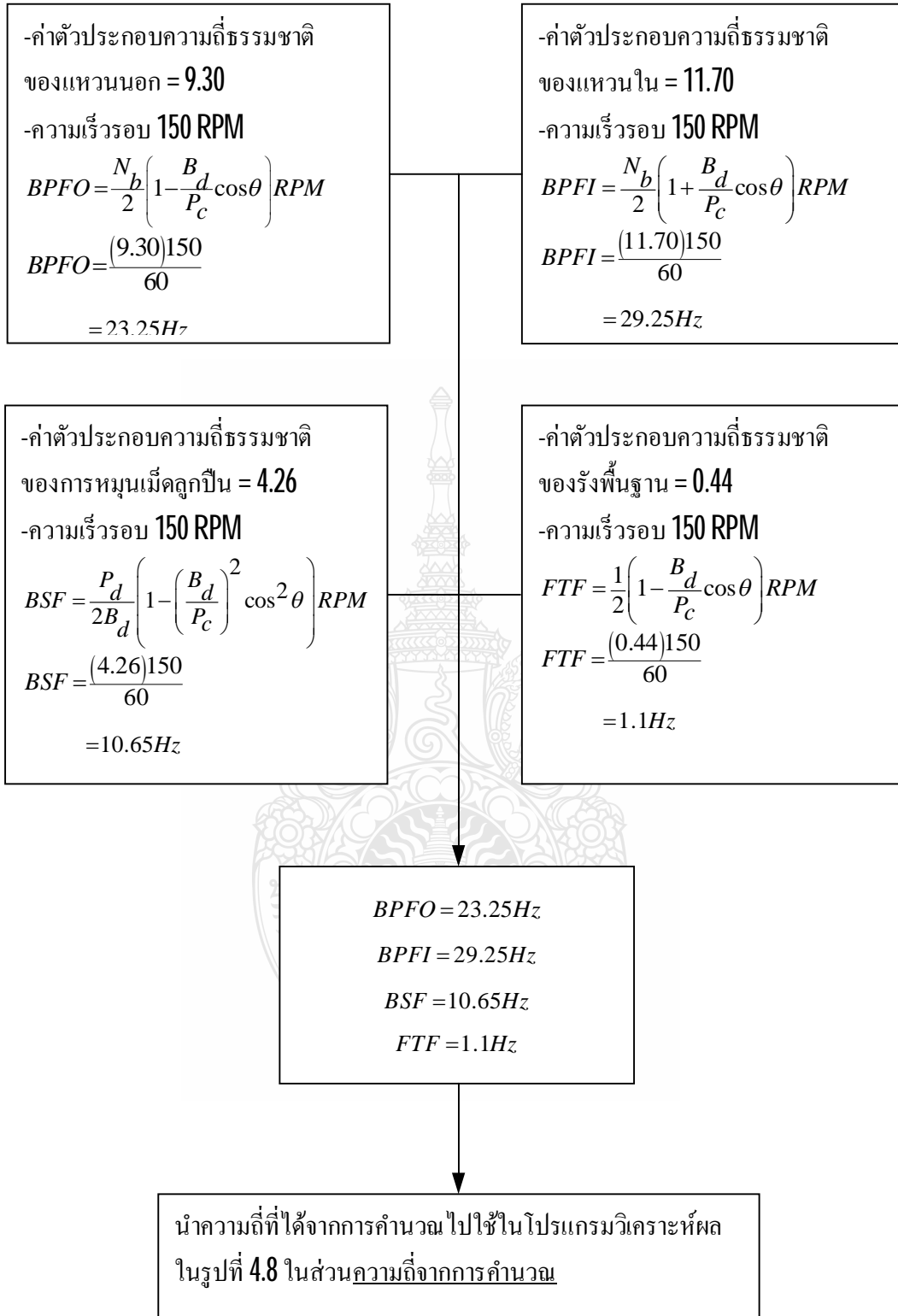
$$\frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) = \text{ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของแหวนนอก} = 9.30 \quad (4.1)$$

$$\frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) = \text{ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของแหวนใน} = 11.70 \quad (4.2)$$

$$\frac{P_d}{2B_d} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_c} \right)^2 \cos^2 \theta \right) = \text{ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของการหมุนเม็ดลูกปืน} = 4.26 \quad (4.3)$$

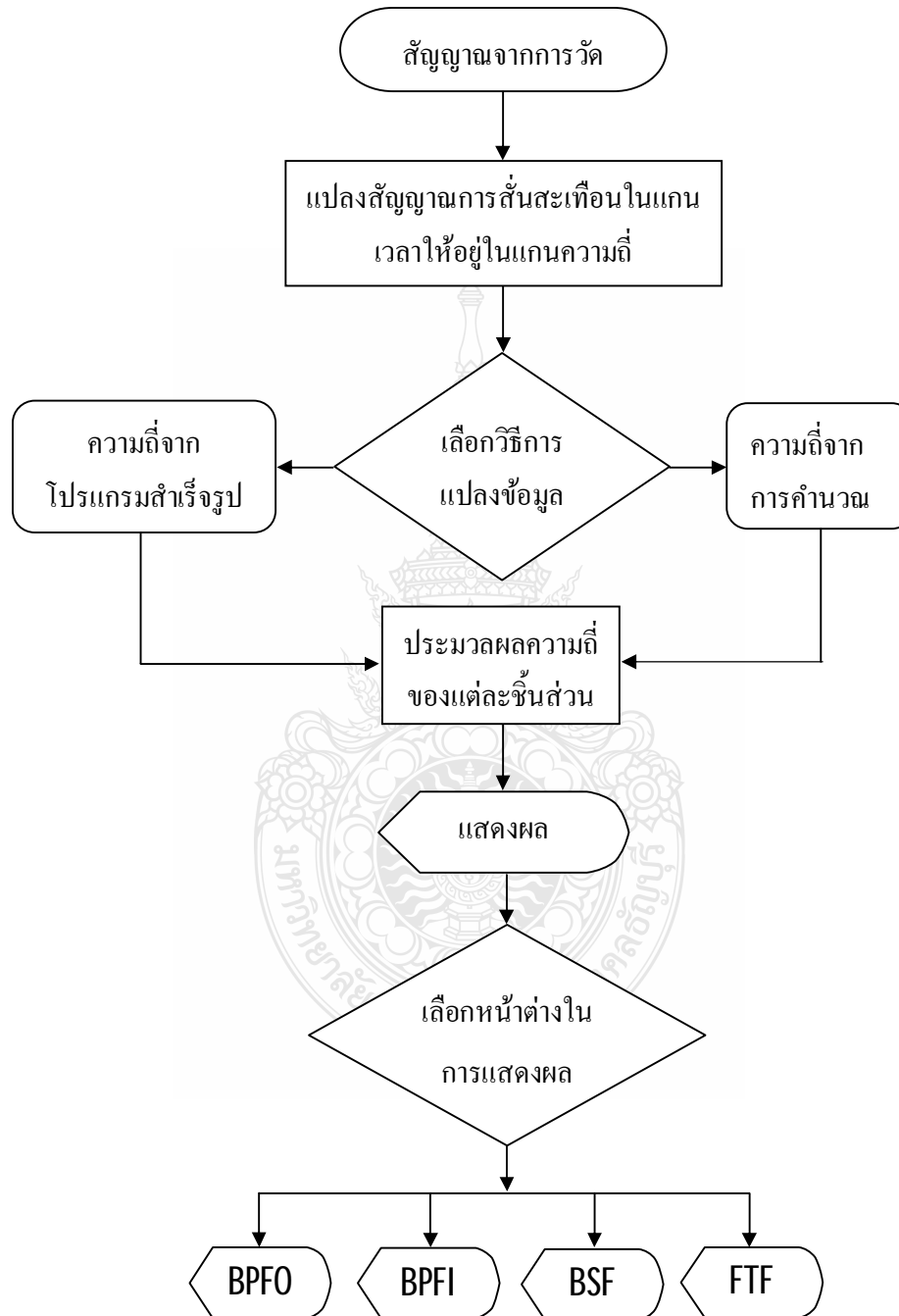
$$\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) = \text{ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติของรังพื้นฐาน} = 0.44 \quad (4.4)$$





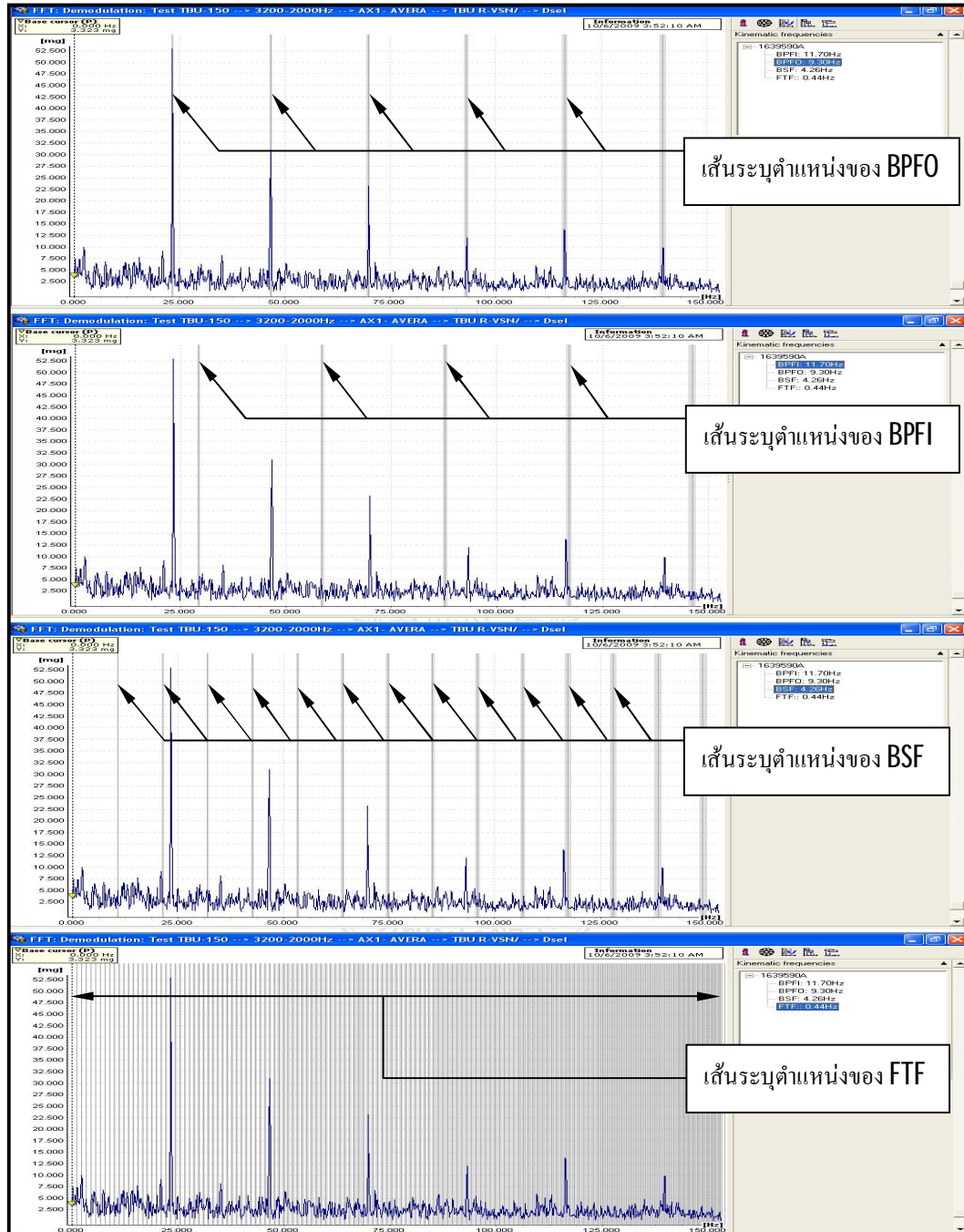
รูปที่ 4.7 การคำนวณหาความถี่ของชิ้นส่วน

ขั้นตอนในส่วนของการแสดงความถี่ของชิ้นส่วนต่างๆ โดยในส่วนนี้จะทำหน้าที่ระบุตำแหน่งความถี่ของแต่ละชิ้นส่วนในกราฟแสดงผล รูปที่ 4.8 แสดงขั้นตอนในการแสดงความถี่ของชิ้นส่วน



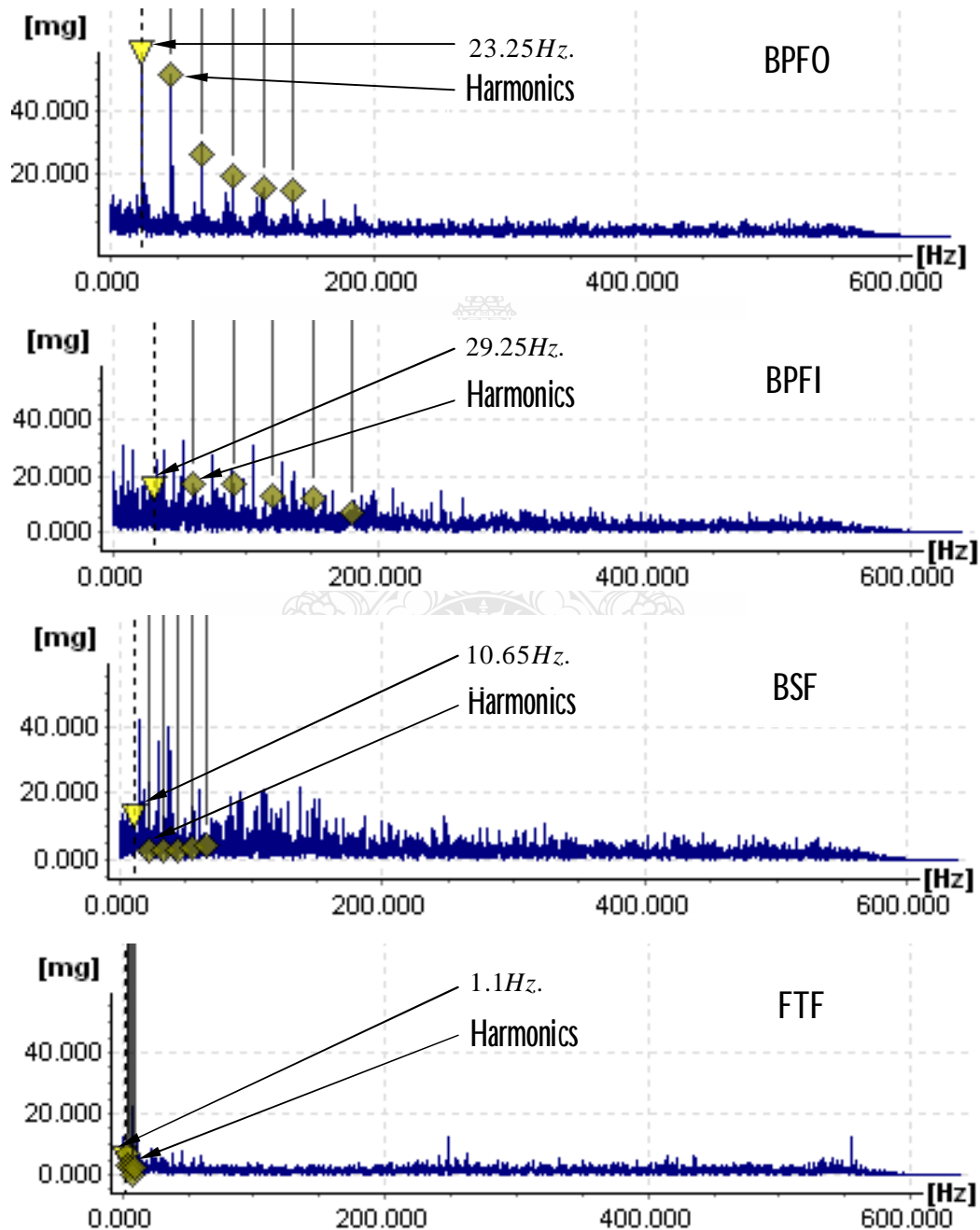
รูปที่ 4.8 ขั้นตอนในการแสดงความถี่ของชิ้นส่วน

สำหรับการอ่านผลความถี่ของชิ้นส่วนในกราฟแสดงผลนั้น เมื่อทำการป้อนความถี่ที่ได้จากการคำนวณแล้ว โปรแกรมก็จะประมวลผลและแสดงเส้นระบุตำแหน่งของความถี่ในชิ้นส่วนต่างๆ ดังในรูปที่ 4.9 แสดงการอ่านค่าความถี่ของชิ้นส่วนในกราฟแสดงผล



รูปที่ 4.9 การอ่านค่าความถี่ของชิ้นส่วน ในกราฟแสดงผล

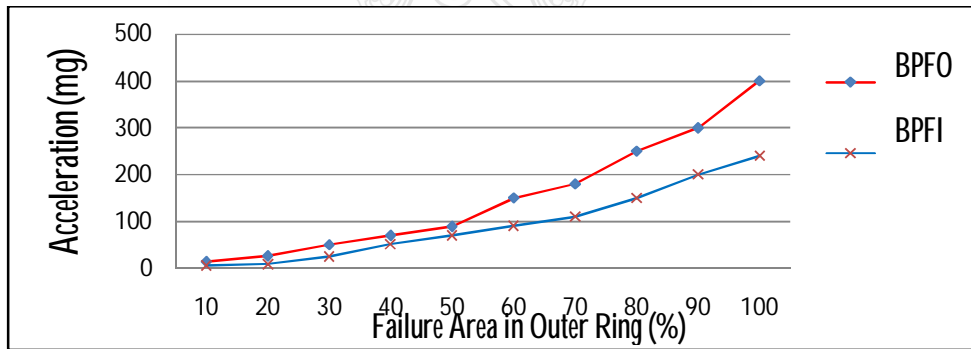
ในส่วนของการวัดแรงนั้นขึ้นอยู่กับจำนวน **Harmonics** และค่า **Amplitude** ในแกนตั้ง รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความถี่ในโดเมนสเปกตรัมของชิ้นส่วนต่างๆ จากกราฟด้านล่างนี้จะแสดงให้เห็นความถี่ของแต่ละชิ้นส่วน โดยสามารถที่จะสังเกตเห็นความถี่เฉพาะและจำนวน **Harmonics** ของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหาย ซึ่งความถี่เฉพาะของ **BPFO, BPFI** นั้นจะเห็นได้ชัดเจน ส่วน **BSF, FTF** จะมีค่าค่อนข้างต่ำทำให้ไม่สามารถมองเห็นความถี่ได้ชัดเจนที่ระดับความเสียหายเดียวกัน



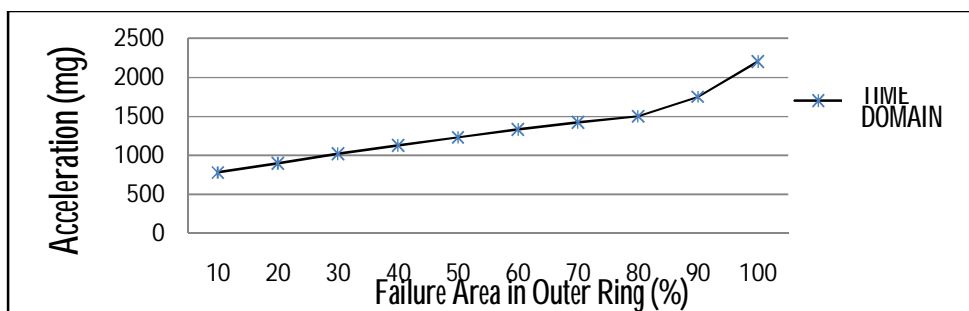
รูปที่ 4.10 กราฟความถี่ใน Spectrums Domain ของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

### 4.5.3 ผลการประเมินอายุการใช้งาน

ผลจากการวิเคราะห์ในวิธีข้างต้นสามารถที่จะนำมาเปรียบเทียบค่าสัญญาณของความเสียหายที่เพิ่มขึ้นกับอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ โดยจะมีค่าที่นำมาประเมินอยู่ 3 ค่าหลักๆ คือค่า **BPFO**, **BPFI** และ **Time Domain** สาเหตุที่นำเฉพาะค่าเหล่านี้มาประเมินจากค่าทั้งหมดที่ได้กล่าวมานั้นเป็นเพราะว่าค่า **BPFO** จะเกิดการเสียหายมากที่สุด และค่า **BPFI** จะเสียหายรองลงมาประมาณครึ่งหนึ่งของ **BPFO** ส่วน **Time Domain** นั้นจะเป็นตัวบ่งบอก **Class** ของตลับลูกปืน ซึ่งการใช้งานตลับลูกปืนในสล็อตไฟฟ้านั้นจะตั้งค่าความปลอดภัยไว้ที่ประมาณ 50,000 กิโลเมตร ก่อนที่ตลับลูกปืนจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง คือมีความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระเลข 50% ขึ้นไปถือเป็นขั้นรุนแรง รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนกับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ (**Load Zone**) จากรูปจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนที่เพิ่มขึ้นกับพื้นที่ความเสียหายที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของบริเวณผิวที่รับภาระ โดยค่าความถี่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30% ของพื้นที่ความเสียหาย และจะเป็นระดับของตลับลูกปืน **Class C** ซึ่งมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยและไม่ควรใช้งานตลับลูกปืนอีกต่อไป และรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใน **Time Domain** กับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟความถี่ของชิ้นส่วน โดยเมื่อมีพื้นที่ความเสียหายมากขึ้นค่าสัญญาณใน **Time Domain** ก็จะสูงขึ้นตาม ซึ่งบ่งชี้ความถี่โดยรวมของตลับลูกปืนทั้งลูก



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนกับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใน Time Domain กับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ

ผลจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหาย โดยจะแบ่งเป็นผลที่ได้ก่อนและหลังการบำรุงรักษา ซึ่งผลที่ได้นั้นจะแสดงให้เห็นค่าความถี่ของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหาย โดยจะดูที่อายุการใช้งาน 50,000 กิโลเมตรหรือ 6 เดือน ซึ่งเทียบจากใน 1 ปี นั้นรถไฟจะวิ่งได้ระยะทางประมาณ 100,000 กิโลเมตร ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ก่อนที่ตลับลูกปืนจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรงจากระยะเวลาที่ทำการตรวจวัดภายในช่วง 12 เดือนสำหรับการประเมิน โดยจะแบ่งเป็นช่วงการวัดก่อนถึงเกณฑ์และหลังเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ สำหรับก่อนถึงเกณฑ์จะวัดทุกๆ 3 เดือน และสำหรับหลังเกณฑ์นั้นจะวัดทุกๆ 1 เดือน โดยค่าต่างๆ นั้นจะคิดมาจากแผนในการบำรุงรักษาหลักของตัวรถ ไฟฟ้า และความเหมาะสมในด้านความคุ้มค่าของการใช้งานตลับลูกปืนรวมทั้งด้านความปลอดภัยด้วย ตารางที่ 4.6 แสดงค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายก่อนการบำรุงรักษา โดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง) และตารางที่ 4.7 แสดงค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายหลังการบำรุงรักษา ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเสียหายก่อนการบำรุงรักษาจะสูงกว่า เนื่องจากสภาพของจาระบีที่ใช้งานมานานกว่า โดยค่าที่ได้นั้นจะนำไปพล็อตกราฟเพื่อประเมินหาอายุการใช้งาน

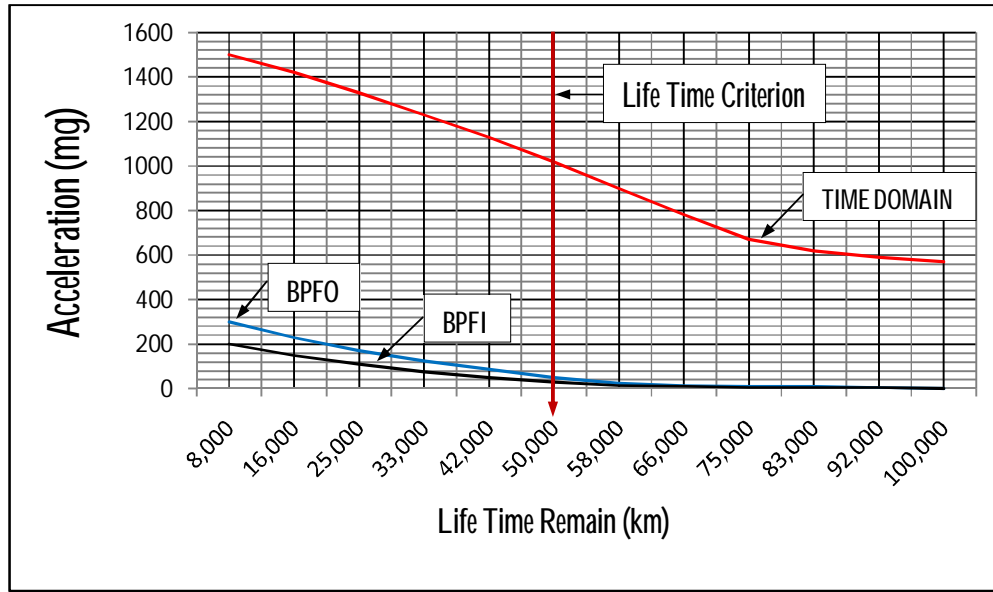
ตารางที่ 4.6 ค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายก่อนการบำรุงรักษา โดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง)

ตัวแปรหลักในการประเมิน ลำดับความเสียหาย	BPFO (mg)	BPMI (mg)	Time Domain (mg)	อายุที่เหลือ (km)
เริ่มเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง โดยจะมีความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่ รับภาระเลข 50% ขึ้นไป	380	230	1840	8,000
	245	170	1750	16,000
	196	130	1590	25,000
ช่วงเตรียมการและบำรุงรักษา	150	82	1430	33,000
	92	57	1360	42,000
เกณฑ์ที่ตั้งไว้	63	32	1250	50,000
ใช้งานได้ตามปกติ	31	29	1120	58,000
	19	15	980	66,000
	15	9	820	75,000
	10	8	710	83,000
	9	8	630	92,000
	7	6	520	100,000

ตารางที่ 4.7 ค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายหลังการบำรุงรักษาโดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง)

ตัวแปรหลักในการประเมิน ลำดับความเสียหาย	BPFO (mg)	BPFI (mg)	Time Domain (mg)	อายุที่เหลือ (km)
เริ่มเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง โดยจะมีความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่ รับภาระเลข 50% ขึ้นไป	300	200	1500	8,000
	230	150	1420	16,000
	170	110	1330	25,000
ช่วงเตรียมการและบำรุงรักษา	125	75	1230	33,000
	87	52	1130	42,000
เกณฑ์ที่ตั้งไว้	45	22	1020	50,000
ใช้งานได้ตามปกติ	26	10	900	58,000
	14	8	780	66,000
	10	6	670	75,000
	9	5	600	83,000
	7	4	580	92,000
	6	3	480	100,000

จากตารางก่อนและหลังการบำรุงรักษาซึ่งมีค่าการสั่นสะเทือนที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยทำการเฉลี่ยจากค่าความเสียหายก่อนและหลังการบำรุงรักษา รวมทั้งจากประสบการณ์ในการใช้งานซึ่งผลที่ได้ คือค่าความถี่ของแหวนนอก (BPFO) จะต้องไม่ค่าไม่เกิน 50 mg และค่าความถี่ของแหวนใน (BPFI) จะต้องไม่ค่าไม่เกิน 25 mg ส่วนค่าสัญญาณใน Time Domain นั้นถ้ามีค่าตั้งแต่ 1000 mg ขึ้นไป จะจัดให้ตลับลูกปืนนี้อยู่ในระดับของ Class C ซึ่งเป็นตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายและไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถที่จะประเมินอายุได้โดยการพล็อตกราฟประเมินอายุการใช้งานด้านล่าง รูปที่ 4.13 แสดงกราฟประเมินอายุการใช้งาน จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าตลับลูกปืนจะมีอายุการใช้งานอีกประมาณ 50,000 กิโลเมตร ก่อนที่ตลับลูกปืนนั้นจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง โดยเป็นอายุการใช้งานในระยะสุดท้ายจากที่เคยได้กำหนดไว้ในวิธีการจำแนกนั้น ซึ่งจะเป็นช่วงอายุการใช้งานแบบกว้างๆ จากช่วงระยะสุดท้ายของการใช้งานที่เหลืออยู่นั้นควรจะเตรียมการในการบำรุงรักษา และทางผู้วิจัยยังพบอีกว่าโดยส่วนใหญ่แล้วตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายนั้นจะมีสาเหตุมาจากความล้า



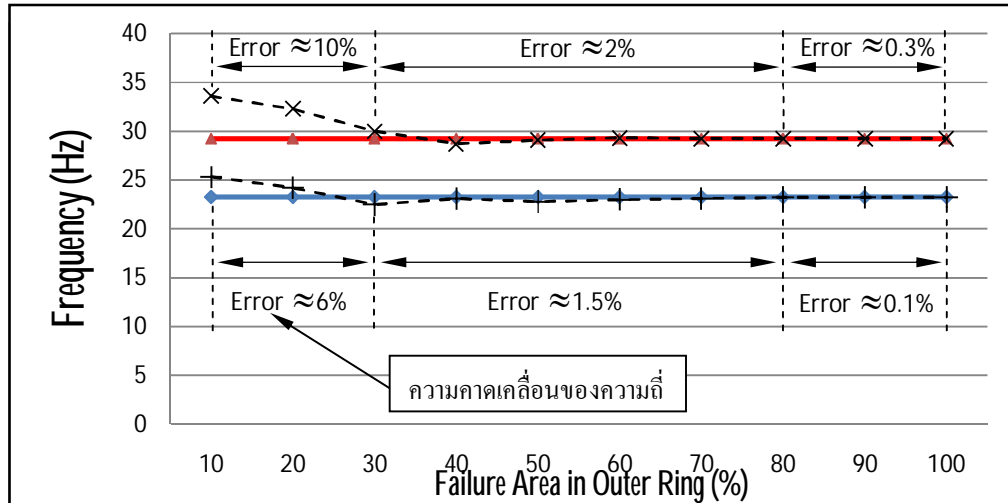
รูปที่ 4.13 กราฟประเมินอายุการใช้งาน

#### 4.5.4 ความคาดเคลื่อนของควมถึที่ได้จากการวัดค่าจริงและผลจากการคำนวณ

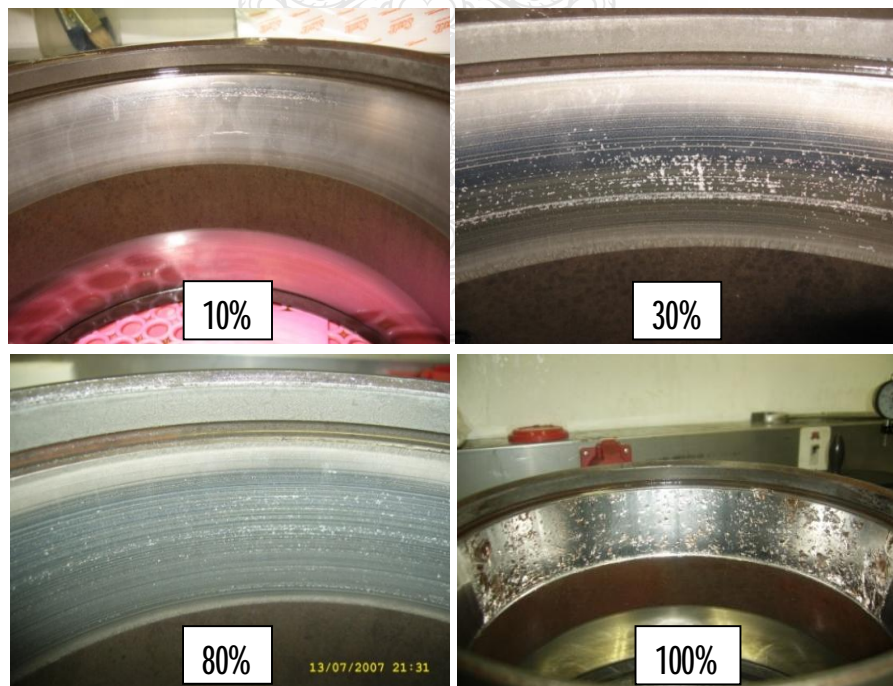
ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนนั้น ซึ่งผลของควมถึที่ได้จะมีความคาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการคำนวณสำหรับในช่วงความเสียหายเริ่มต้นและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อมีระดับความเสียหายที่เพิ่มขึ้น โดยจะแบ่งเป็น 3 ช่วง ตามพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ รูปที่ 4.14 แสดงความคาดเคลื่อนของควมถึที่ได้จากการวัดค่าจริงและผลจากการคำนวณ ซึ่งในช่วงแรกนั้นจะเป็นช่วงความเสียหายเริ่มต้นซึ่งจะเห็นว่ามีความคาดเคลื่อนค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในการคำนวณ โดยจะมีความคาดเคลื่อน 10% สำหรับควมถึแหวนในและ 6% สำหรับควมถึแหวนนอก ในช่วงที่ 2 จะเป็นช่วงความเสียหายในระดับเริ่มรุนแรง ซึ่งในช่วงนี้ค่าความคาดเคลื่อนจะเริ่มเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยจะมีความคาดเคลื่อน 2% สำหรับควมถึแหวนในและ 1.5% สำหรับควมถึแหวนนอก ส่วนในช่วงที่ 3 นั้นจะเป็นช่วงความเสียหายในระดับที่รุนแรงมาก โดยจะมีความคาดเคลื่อน 0.3% สำหรับควมถึแหวนในและ 0.1% สำหรับควมถึแหวนนอก ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นความเสียหายในระยะสุดท้ายหรือความเสียหายในระดับที่รุนแรง โดยจะสังเกตเห็นค่าควมถึที่มีความคาดเคลื่อนน้อยลงจนเกือบจะตรงกับควมถึที่ได้จากการคำนวณ จากค่าความคาดเคลื่อนที่ได้กล่าวมานั้น จะแสดงให้เห็นว่าค่าควมถึเฉพาะของชิ้นส่วนจะขึ้นกับขนาดของพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระนั้นๆ รูปที่ 4.15 แสดงความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระในแหวนนอกประมาณ 10, 30, 80 และ 100% และเนื่อง มาจากข้อจำกัดของความถี่รอบที่ใช้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งทำให้สัญญาณควมถึที่ได้ นั้นมีความชัดเจนน้อยลง อีกทั้งมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดจริงกับผลการคำนวณในทางทฤษฎี



- ▲— ค่าความถี่แหวนใน (BPFI) ที่ได้จากการคำนวณ
- ×- ค่าความถี่แหวนใน (BPFI) ที่ได้จากการวัดจริง
- ◆— ค่าความถี่แหวนนอก (BPFO) ที่ได้จากการคำนวณ
- +- ค่าความถี่แหวนนอก (BPFO) ที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.14 ความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าจริงและผลจากการคำนวณ



รูปที่ 4.15 ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระในแหวนนอกประมาณ 10, 30, 80 และ 100%

## 4.6 สรุปผลจากการทดลอง

4.6.1 จากการศึกษาเบื้องต้นของตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลา 6 ปี พบว่าสามารถที่จะจำแนกระดับของความเสียหายออกได้เป็น 3 ระดับคือ Class A, B และ C โดยมีตลับลูกปืนจำนวน 840 ลูก ที่ทำการบำรุงรักษาไปแล้ว และสามารถนำกลับไปใช้ได้ถึง 70% โดยแบ่งเป็น Class A 60% Class B 10% นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนและค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (MTBF) แสดงให้เห็นว่า อายุการใช้งานของตลับลูกปืน Class A สามารถใช้งานได้อีกในช่วง 300,000-500,000 กิโลเมตร โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากจำนวนตลับลูกปืนที่นำกลับมาใช้งานทั้งหมด 60% ต่ำกว่า 30% เริ่มเสียหายในช่วงหลัง 300,000 กิโลเมตร นับจากเริ่มใช้งาน และมากกว่า 30% ที่ใช้งานได้ถึง 500,000 กิโลเมตร ส่วน Class B สามารถที่จะใช้งานได้ 200,000-300,000 กิโลเมตร จากจำนวนตลับลูกปืนที่นำกลับมาใช้งานทั้งหมด 10% ต่ำกว่า 5% เริ่มเสียหายในช่วง 200,000 กิโลเมตร นับจากเริ่มใช้งาน และมากกว่า 5% ที่สามารถใช้งานได้ถึง 300,000 กิโลเมตร จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า จากสภาพการใช้งานของรถไฟฟ้าในประเทศไทยซึ่งมีความแตกต่างกับการใช้งานในต่างประเทศเป็นผลให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนล้อที่ใช้งานภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนมีความแตกต่างกัน สำหรับข้อเสนอแนะในการจำแนกความเสียหาย โดยให้มีการเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหาย และควรให้ความสำคัญกับความเสียหายเนื่องจากความล้าเป็นอันดับต้นๆ ก่อนเพราะว่าความเสียหายในลักษณะนี้หลักๆ แล้วเกิดจากระยะเวลาในการใช้งาน ซึ่งไม่สามารถที่จะแก้ไขได้ ตามด้วยความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน ซึ่งจะเกิดจากสิ่งสกปรกจากการใช้งานหรือการบำรุงรักษา โดยความเสียหายในลักษณะนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำความสะอาดและเปลี่ยนสารหล่อลื่นใหม่ และความเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่น ก็สามารถที่จะแก้ไขได้โดยการเพิ่มสารหล่อลื่นเช่นเดียวกัน ส่วนการแบ่งระดับของความเสียหายนั้นควรมีการเพิ่มระดับความเสียหายออก เป็น 4 ระดับ โดยการเพิ่ม Class D ขึ้นมาอีกหนึ่งระดับกล่าวคือ ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ในช่วง 30%-40% ให้จำแนกเป็น Class C ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในกรณีฉุกเฉินได้ในช่วง 10,000-30,000 กิโลเมตร ในระหว่างการรอจากการขนส่งตลับลูกปืนจากต่างประเทศ หรือการนำไปใช้ภายนอกตัวรถ อาทิเช่น การกลึงล้อภายนอกตัวรถและนำไปใช้ในกรณีทดสอบอื่นๆ และถ้ามีความเสียหายมากกว่า 40% ขึ้นไปให้เป็น Class D ซึ่งห้ามนำกลับไปใช้งาน และจากความเสียหายเนื่องจากความล้าบริเวณพื้นที่รับภาระจริงของตลับลูกปืน (Load Zone) ในการใช้งาน น่าจะมีความเป็นไปได้ในการทำวิจัยเพื่อยืดอายุการใช้งานโดยการเปลี่ยนพื้นที่รับภาระของตลับลูกปืน ซึ่งน่าจะทำให้ตลับลูกปืนมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น

4.6.2 จากการศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน ซึ่งทำการวัดด้วยหัววัดความเร่งแบบ Piezoelectric และวัดค่าการสั่นสะเทือนในฟังก์ชัน Velocity, Acceleration และ Demodulation แต่จะเน้นวิเคราะห์ไปที่ฟังก์ชัน Demodulation เป็นหลัก เนื่องจากเป็นการปรับ

แต่ตั้งสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนที่มีขนาดต่ำให้มีขนาดสูงขึ้น ซึ่งจะให้เห็นสัญญาณความเสียหายได้ชัดเจน โดยทำการทดสอบหาอัตราความเสียหายที่เพิ่มขึ้นต่อสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน ซึ่งได้กำหนดช่วงการวัดที่เหมาะสมออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่สูง 12.5-20000 Hz เพื่อตรวจสอบการเกิดเรโซแนนซ์ของโครงสร้างซึ่งจะเป็นความเสียหายในช่วงเริ่มต้นโดยผลที่ได้จากการทดลองสำหรับการวัดในช่วงความถี่สูงนี้ ซึ่งในการวิเคราะห์ทำได้ยากลำบากเนื่องจากในช่วงความถี่สูงมีสัญญาณรบกวนเป็นจำนวนมากประกอบกับความเร็วจุดที่วัดก่อนข้างต่ำจึงทำให้เห็นความถี่ของความเสียหายไม่ชัดเจน และช่วงความถี่ต่ำ 0.3-500 Hz เพื่อตรวจสอบความถี่ของชิ้นส่วนในตลับลูกปืน โดยจะเห็นว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความเสียหายนั้น เมื่อระดับความเสียหายมีค่ามากขึ้นค่าสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถที่จะประเมินอายุการใช้งานได้โดยการเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนกับระดับความเสียหาย เมื่อสัญญาณความถี่ของแหวนนอก (BPFO) และแหวนใน (BPMI) จะต้องมีค่าไม่เกิน 50 mg และ 25 mg ตามลำดับโดยที่สัญญาณใน Time Domain มีค่าตั้งแต่ 1000 mg ขึ้นไปนั้นจะจัดให้ตลับลูกปืนนี้อยู่ในระดับของ Class C ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระ 30-50% จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถที่จะประเมินอายุจากกราฟประเมินอายุการใช้งาน ซึ่งผลที่ได้นั้นจะพบว่าตลับลูกปืนจะมีอายุการใช้งานอีกประมาณ 50,000 กิโลเมตร ก่อนที่ตลับลูกปืนจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง (มีความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระเลข 50% ขึ้นไป ถือเป็นระดับที่รุนแรง) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่จะต้องเฝ้าระวังเป็นพิเศษและควรเตรียมการในการบำรุงรักษาอย่างเร่งด่วน ทั้งนี้จากลักษณะการใช้งานที่มีผลกระทบกับการประเมินอายุ เนื่องจากการใช้งานของตัวรถไฟฟ้ามัน ได้ส่งผลกระทบโดยตรงซึ่งทำให้ตลับลูกปืนเกิดความเสียหายที่ไม่เท่ากันทั้งสองด้าน โดยส่วนใหญ่แล้วตลับลูกปืนด้านขวาจะเสียหายมากกว่าด้านซ้าย สาเหตุหลักๆ เป็นเพราะว่าการวิ่งของรถไฟฟ้าในขณะที่เข้าโค้งซึ่งล้อด้านขวาจะรับภาระมากกว่าด้านซ้ายโดยตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน อาทิเช่น โค้งอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ อีกทั้งตัวรถนั้นสามารถควบคุมได้ทั้งสองด้าน คือ ด้านหน้ากับด้านหลังดังนั้นจึงไม่มีการกลับทิศทางของตัวรถคืออยู่ในแนวเดิมตลอดจึงทำให้ล้อด้านขวารับภาระที่มากกว่าเช่นเดิมตลอด ดังนั้นจากอายุประเมินที่เหลือประมาณ 50,000 กิโลเมตร สำหรับตลับลูกปืนด้านขวาควรจะให้อายุการใช้งานน้อยกว่าด้านซ้ายโดยให้เหลือน้อยกว่า 10,000 กิโลเมตร เพื่อความเหมาะสมในการวางแผนดำเนินการบำรุงรักษา และหลังจากที่ได้ค่าอายุการประเมินดังกล่าวนี้ควรจะทำการบำรุงรักษาภายในช่วง 1-2 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตลับลูกปืนอย่างคุ้มค่าและมีค่าความปลอดภัยที่เชื่อถือได้ จากประสบการณ์ในการใช้งานตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าพบว่าสามารถใช้งานได้ถึง 11 ปี

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์ความเสียหาย โดยจะแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็นสองช่วง คือในช่วงแรกนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ความเสียหายด้วยวิธีการจำแนกตลับลูกปืนโดยอาศัยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสตลับลูกปืนต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระ ส่วนช่วงที่สองนั้นจะเป็นการวิเคราะห์เจาะจงลงไปในรายละเอียดของชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายด้วยวิธีการวิเคราะห์การสันสะเทือนเพื่อเพิ่มเติมและเสริมผลที่ได้จากวิธีแรก

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 จากการศึกษาตลับลูกปืนในล้อรถไฟไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 6 ปีสามารถที่จะจำแนกระดับ โดยอาศัยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสตลับลูกปืนต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานตามระยะเวลาที่กำหนดสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ระดับคือระดับ A, B และ C กล่าวคือระดับ A ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ที่ 1-15% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 300,000-500,000 กิโลเมตร ระดับ B ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอยู่ที่ 15-30% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 200,000-300,000 กิโลเมตร และระดับ C ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30-50% จะมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยจึงไม่นำไปใช้งานเนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา จากการศึกษาข้างต้นโดยใช้วิธีการดังกล่าวซึ่งผลที่ได้คือช่วงอายุการใช้งานของทั้ง 3 ระดับ ในแบบกว้างๆ เพื่อใช้ในการวางแผนและกำหนดระยะเวลาในการบำรุงรักษาเบื้องต้น แต่เนื่องจากการใช้งานจริงนั้นจะต้องใช้ตลับลูกปืนอย่างคุ้มค่าและค่าความปลอดภัยต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม

5.1.2 จากการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนของตลับลูกปืน โดยได้กำหนดช่วงการวัดที่เหมาะสมออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่สูง 12.5-20000 Hz เพื่อตรวจสอบความเสียหายในช่วงเริ่มต้น และช่วงความถี่ต่ำ 0.3-500 Hz เพื่อตรวจสอบหาความถี่ของชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในตลับลูกปืน พบว่าเมื่อระดับความเสียหายมีค่ามากขึ้นค่าสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถที่จะประเมินอายุการใช้งานได้โดยการเปรียบเทียบค่าการสันสะเทือนกับระดับความเสียหายจากกราฟประเมินอายุการใช้งาน ซึ่งเป็นผลของสัญญาณที่ได้จากพารามิเตอร์ในการวัดแบบเดียวกัน โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าสัญญาณความถี่ของ BPFO และ BPFI มีค่าไม่เกิน 50 mg และ 25 mg ตามลำดับ โดยที่สัญญาณใน Time Domain ที่มีค่าตั้งแต่ 1000 mg ขึ้นไปนั้น จะเป็นตลับลูกปืนซึ่งอยู่ในระดับของ Class C โดยมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระประมาณ 30% โดยจะมีอายุ

การใช้งานเหลืออีกประมาณ 50,000 กิโลเมตร ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง คือมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระทั้งหมดตั้งแต่ 50% ขึ้นไปถือเป็นระดับรุนแรง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่จะต้องเฝ้าระวังเป็นพิเศษและควรเตรียมการในการบำรุงรักษาอย่างเร่งด่วน เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจนส่งผลถึงขั้นทำให้ต้องหยุดเดินรถแบบกระทันหัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่า การวิเคราะห์ความเสียหายในทั้งสองวิธีนั้น ยังมีอยู่หลายตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ อีกทั้งผลพลอยได้นอกเหนือจากวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ในข้างต้นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจหรือผู้ที่นำไปทำการศึกษาเพิ่มเติม

**5.2.1** ทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการจำแนกความเสียหาย โดยให้มีการเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหาย และควรให้ความสำคัญกับความเสียหายเนื่องจากความล้าเป็นอันดับต้นๆ ก่อนเพราะว่าความเสียหายในลักษณะนี้จะไม่มีการแก้ไข ตามด้วยความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน ความเสียหายในลักษณะนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำความสะอาดและเปลี่ยนสารหล่อลื่นใหม่ และความเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่น ก็สามารถที่จะแก้ไขได้โดยการเพิ่มสารหล่อลื่นเช่นเดียวกัน ส่วนการแบ่งระดับของความเสียหายนั้นควรมีการเพิ่มระดับความเสียหายออก เป็น 4 ระดับ โดยการเพิ่ม Class D ขึ้นมาอีกหนึ่งระดับกล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30%-40% ให้จำแนกเป็น Class C ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในกรณีฉุกเฉินได้ในช่วง 10,000-30,000 กิโลเมตร และถ้ามากกว่า 40% ขึ้นไปให้เป็น Class D ซึ่งห้ามนำกลับมาใช้งาน และจากความเสียหายเนื่องจากความล้าบริเวณพื้นที่รับภาระจริงของตลับลูกปืน (Load Zone) ในการใช้งาน น่าจะมีความเป็นไปได้ในการทำวิจัยเพื่อยืดอายุการใช้งาน โดยการเปลี่ยนพื้นที่รับภาระของตลับลูกปืน

**5.2.2** ทั้งนี้ทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน สำหรับในขั้นตอนการวัดและเก็บสัญญาณเนื่องจากมีสัญญาณและเสียงรบกวนจำนวนมากจากล้อที่มีการใช้งานจนเกิดการสึกหรอดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกลึงล้อก่อนการวัดและเก็บสัญญาณทุกครั้ง และสำหรับการประเมินอายุการใช้งาน เนื่องจากลักษณะการใช้งานของตัวรถไฟฟ้านั้นได้ส่งผลกระทบต่อโดยตรงซึ่งทำให้ตลับลูกปืนเกิดความเสียหายที่ไม่เท่ากันทั้งสองด้าน โดยตลับลูกปืนด้านขวาจะเสียหายมากกว่าด้านซ้าย เป็นเพราะว่าการวิ่งของรถไฟฟ้าในขณะที่เข้าโค้งซึ่งล้อด้านขวาจะรับภาระมากกว่าด้านซ้ายโดยตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน อาทิเช่น โค้งอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ อีกทั้งตัวรถไม่มีการกลับทิศทาง ดังนั้นจากอายุประเมินที่เหลือประมาณ 50,000 กิโลเมตร สำหรับตลับลูกปืนด้านขวาควรจะให้อายุการใช้งานน้อยกว่าด้านซ้าย 10,000 กิโลเมตรและควรเตรียมการในการบำรุงรักษาหลังจากได้อายุประเมินดังกล่าว

**5.2.3** ควรจะวิเคราะห์ลึกลงไปอีกว่า ลักษณะความถี่ของความเสียหายเนื่องจากความล้าเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน และจากการขาดสารหล่อลื่นนั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ก่อเกียรติ บุญชูกุล, “และคณะ” “การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน: การเฝ้าตรวจและการจัดการบำรุงรักษา” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 2540.
- [2] แผนกเทคโนโลยีการบำรุงรักษา สถาบันไทย-เยอรมัน [www.tgipmt.com/vibration-analysis-services](http://www.tgipmt.com/vibration-analysis-services)
- [3] Bearing Failure Analysis FAG industrial services <http://www.fag.com/content.fag.de/en/index/////http://www.railways.skf.com/portal/skf/home/industries.html>.//Retrieved July 2008.
- [4] Tay Sheen, Yuh., “An Impulse-response Extracting Method From the Modulated Signal In a Roller Bearing,” Measurement (Electronic), 2007 No.40. pp. 868-875. Available: Science Direct (20 July 2009).
- [5] “Force Vibration – damped” [www-math.mit.edu/daimp/ForcedDampedVib.html](http://www-math.mit.edu/daimp/ForcedDampedVib.html).
- [6] อิศริย์ หารราชครูโรจน์, “การสั่นสะเทือนเชิงกล” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล 2543.
- [7] Taylor, J. I., Determination of Antifriction Bearing Condition by Spectral Analysis, Vibration Institued, 1978.
- [8] Takafumi, N., “Measurement of Acoustic Emission and Vibration of Rolling Bearings With an Artificial Defect” Quarterly Report of RTRI 2000, Vol. 41 No. 3 pp.119-124. Available: Railway Technical Research Institute (18 Jul 2009).
- [9] Schaeffler Gruppe basis vibration analysis hands on with FAG detector III 2007.
- [10] Berry, J. E., Tracking of Rolling Element Bearing Failure Stages Using Both Vibration Signature
- [11] Takafumi Nagatomo and David G. Toth “Bearing Damage” Quarterly Report of RTRI Vol. 47 2006, No. 3 pp.119-124.
- [12] Cao, M. and Xiao. J., “A Comprehensive Dynamic Model of Double-row Spherical Roller Bearing Model Development and Case Studies on Surface Defects Preloads and Radial Clearance,” Mechanical Systems and Signal Processing (Electronic), 2008, No. 22. pp. 467-489. Available: Science Direct (20 July 2009).
- [13] ประศาสน์ สุบรรพวงศ์ “การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบริ่ง แบบเม็ดลูกปัดในปีไฮดรอลิกแบบเฟือง” มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2542: 1-2.
- [14] สมชาย เดโชธรรมสถิต “การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเซปส์ตรัม” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540: 1.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] กมลวรรณ พงศาพิชญ์ “การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544: 2-4.
- [16] จุติโรจน์ เบ็ญจลักษณ์ “การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545: 21-23.
- [17] ประดิษฐ์ หมุ่มเมืองสอง, สุขญาณ หารรรษสุข “การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน” ซีอีดูเคชั่น 2550. หน้า 86-99.
- [18] วินัย เวชวิทยาลัง “เทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเพื่องานบำรุงรักษา” เอ็มแอนคี่ 2552. หน้า 11-22.
- [19] BTS บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ <http://www.bts.co.th/th/index.asp>
- [20] Siemens Ltd. ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้างุดจักร 2551.
- [21] ปานเพชร ชินินทร เอกสารการสอน “เทคโนโลยีการบำรุงรักษา (Maintenance Technology)” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล 2548.
- [22] Viktor Gerdun. and Others “ Failures of Bearing ” Engineering Failure Analysis 2007. 884-894.
- [23] Rolling bearing damage “contamination of raceways” 2007.
- [24] “Normal fatigue of the running surfaces” <http://www.schaeffler.com> 2008.
- [25] “The commitment of SKF to the world rail industry”/2006.//[Online].//Available:/ Analysis as Well as High Frequency Enveloping and Demodulation Spectral Techniques 3<sup>rd</sup> Edition, Technical Associates of Charlotte, Inc., 1993.
- [26] International Standart ISO 10816-1 Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Part1: General Guidelines. 1<sup>st</sup> Ed. Geneva: ISO, 1995.
- [27] International Standart ISO 10816-3 Mechanical vibration -- Evaluation Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Part2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min. 2<sup>nd</sup> Ed. Geneva: ISO, 2001.
- [28] International Standart ISO 10816-3 Mechanical vibration -- Evaluation Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Part3: Industrial Machines with Nominal Power Above 15 kW and Nominal Speeds Between 120 r/min and 15000 r/min When Measured in litu. 1<sup>st</sup> Ed. Geneva: ISO, 1998.

ภาคผนวก ก

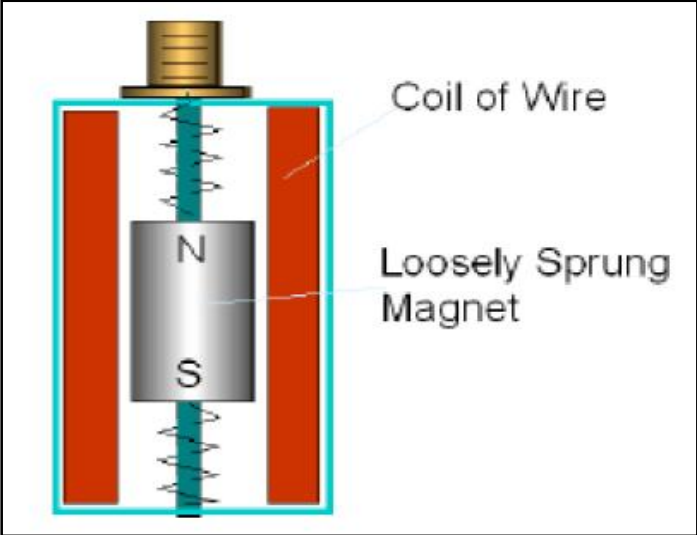
อุปกรณ์และมาตรฐานในการวัดการสิ้นสະเทือน



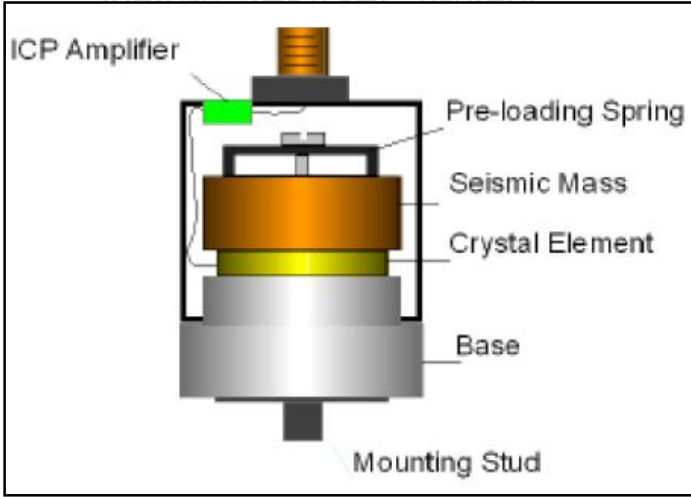


# ลักษณะของหัววัดการสั่นสะเทือน

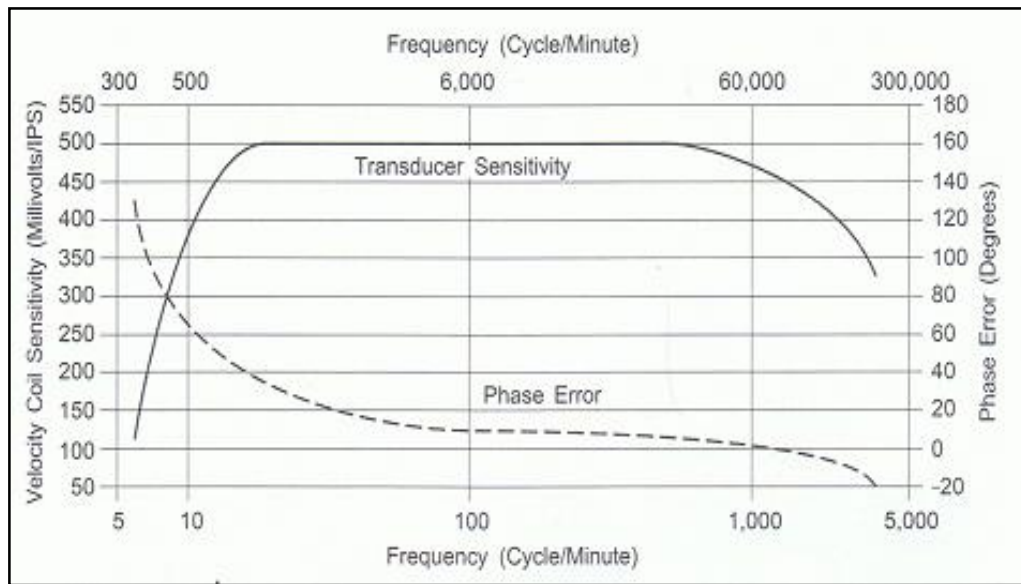
แสดงหัววัดการสั่นสะเทือน ค่าความไว (Sensitivity) และการเปลี่ยนแปลงของความเร่งตามวิธีการติดตั้งหัววัด



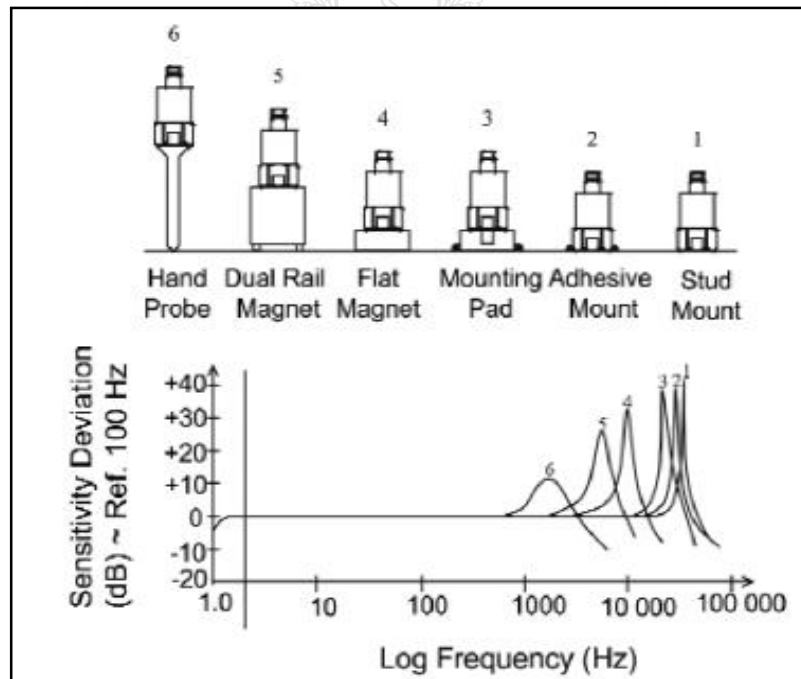
รูปที่ 1 หัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร็วที่ใช้หลักการขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2 หัววัดแบบความเร่งทั่วไป



รูปที่ 3 ค่าความไว (Sensitivity) ของหัววัดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 4 ความถี่ธรรมชาติของหัววัดความเร่งเปลี่ยนแปลงตามวิธีการติดตั้งหัววัด

## มาตรฐานการสั่นสะเทือนสากล (ISO Standards)

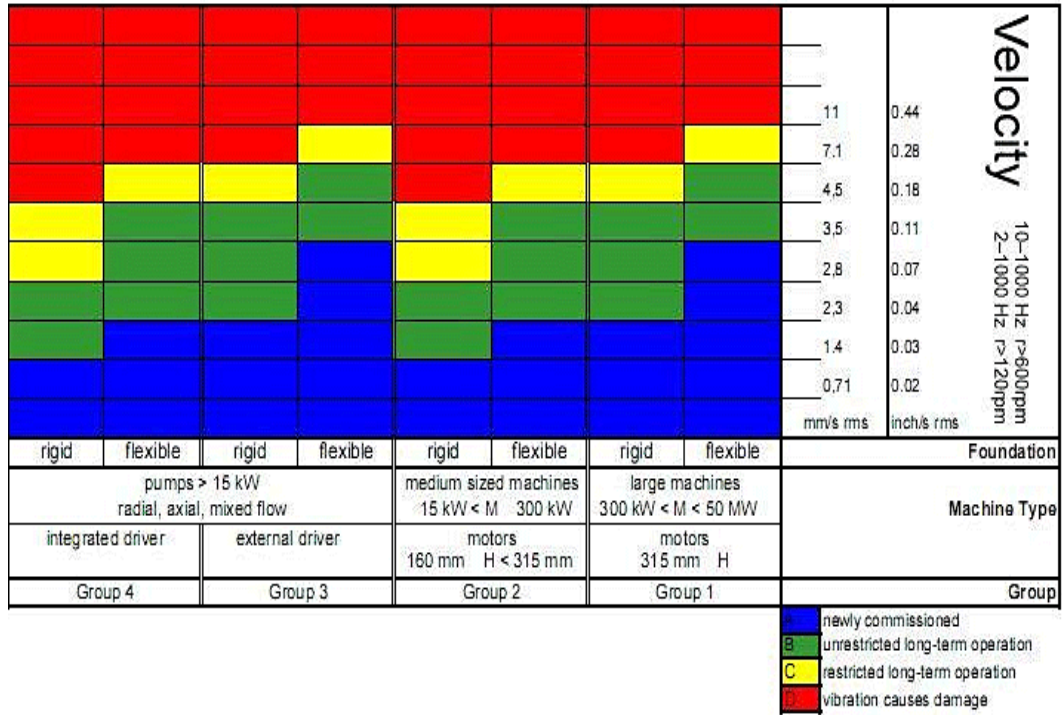
มาตรฐานสากลที่ใช้กันมากในส่วนของการผลิตการบำรุงรักษา รวมทั้งการทดสอบเครื่องจักร หลังจากการติดตั้งใหม่และหลังจากการซ่อมบำรุง ซึ่งประกอบไปด้วย ISO 10816-1, 10816-2, 10816-3

RMS vibration velocity mm/s	I	II	III	IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.8				
2.8	C	C	B	B
4.5				
7.1	D	D	C	C
11.2		D	D	D
18				
28				
45			D	D

รูปที่ 5 ตารางมาตรฐาน ISO 10816-1 [26]

ISO 10816-2		Steam Turbines and Generators	
Velocity		Speed (rpm)	
CMVP 40 in/sec eq. Peak	CMVP 50 mm/sec RMS	1500 or 1800	3000 or 3600
0.66	11.8	<b>DAMAGE OCCURS</b>	
0.56	10.0		
0.47	8.5		
0.42	7.5	<b>RESTRICTED OPERATION</b>	
0.29	5.3		
0.21	3.8	<b>UNRESTRICTED OPERATION</b>	
0.16	2.8		
0.08	1.4	<b>NEWLY COMMISSIONED MACHINERY</b>	
0.00	0.0		

รูปที่ 6 ตารางมาตรฐาน ISO 10816-2 [27]



รูปที่ 7 ตารางมาตรฐาน ISO 10816-3 [28]



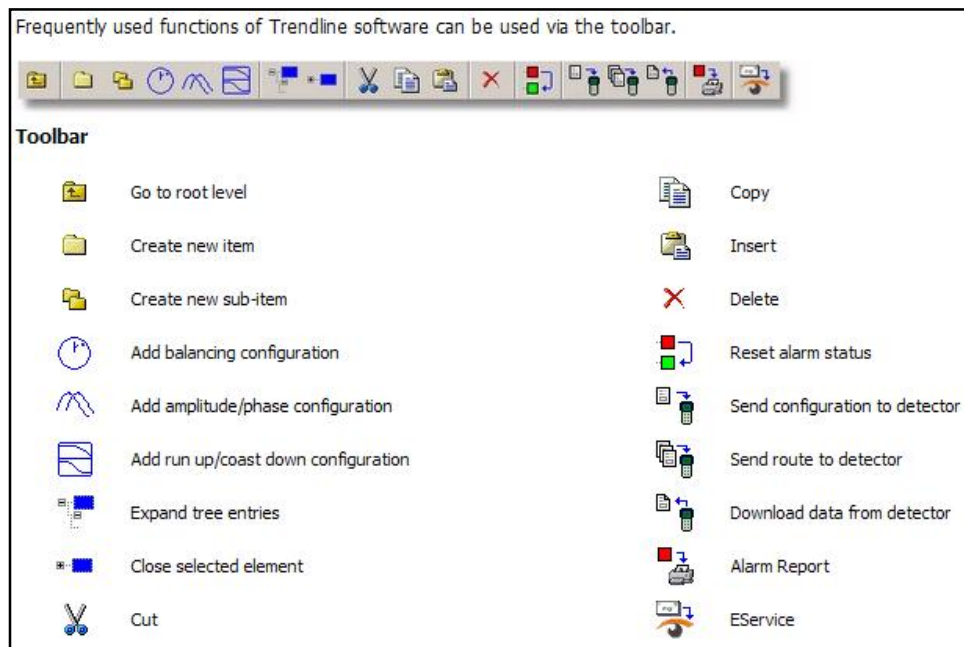
ภาคผนวก ข

วิธีการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์การสันตะเพื่อนเบื้องต้น



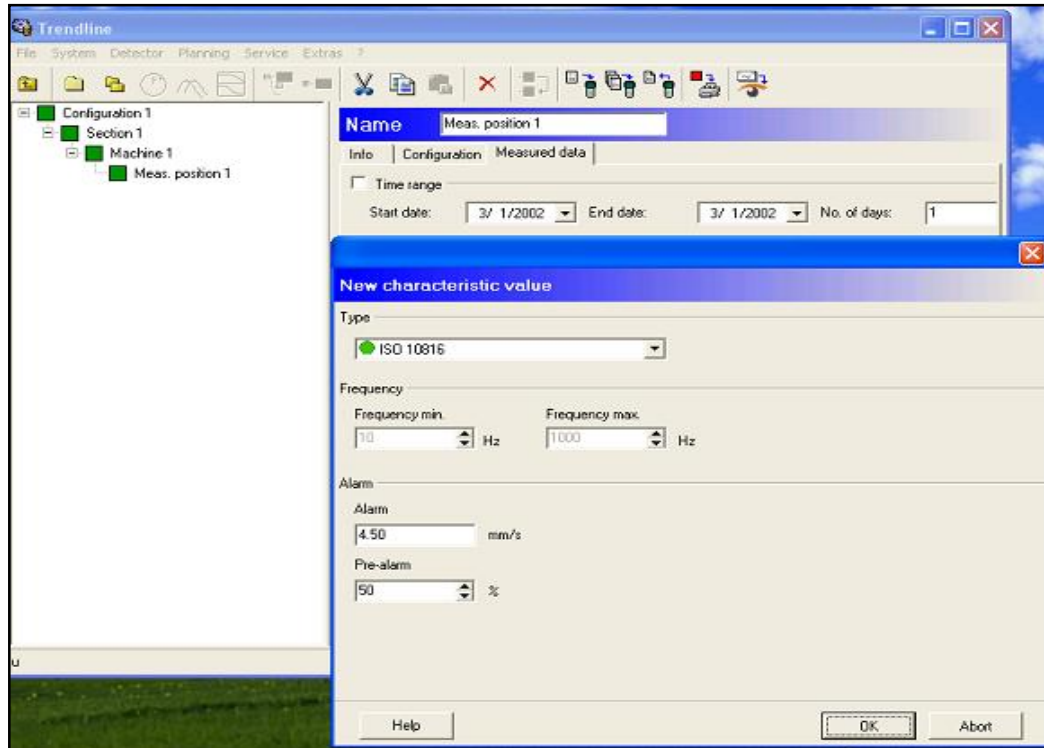
## วิธีการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเบื้องต้น

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนั้น นอกจากต้องทราบทฤษฎีพื้นฐานและการวิเคราะห์สัญญาณเบื้องต้นแล้ว ยังมีส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือการใช้งาน โปรแกรมในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้อธิบายวิธีการใช้งานเบื้องต้น อาทิเช่น วิธีการใช้เครื่องมือ (Toolbar) การเขียนโปรแกรมเฉพาะสำหรับงานนั้นๆ การสร้าง (Routes) และการวิเคราะห์ผล ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของ FAG Detector III ชื่อโปรแกรม Trendline เวอร์ชัน 3.4.0.25

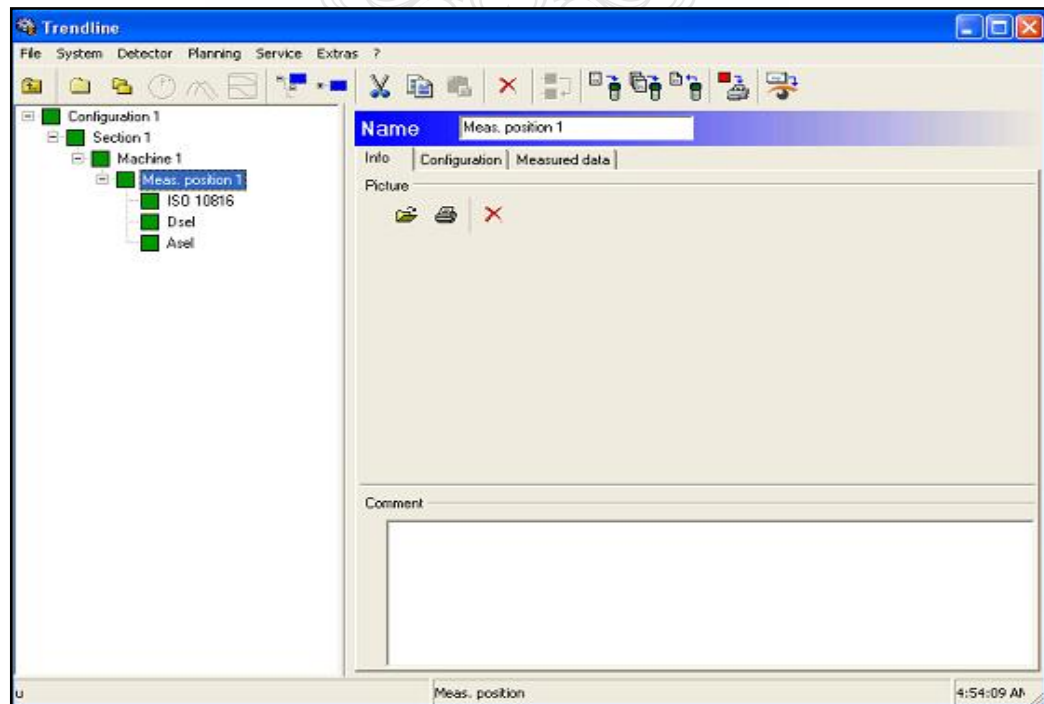


รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของเครื่องมือและคำอธิบายต่างๆ

การสร้าง Routes ซึ่งจะเป็นการกำหนดค่าและรายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการวัด

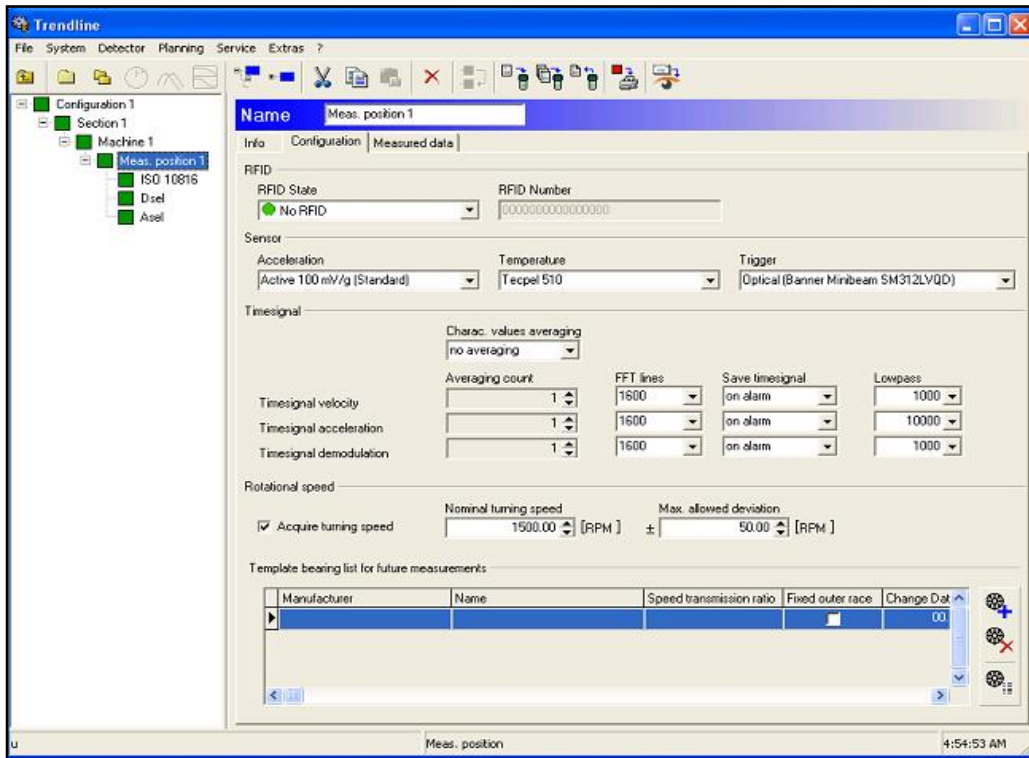


รูปที่ 2 การสร้าง Routes

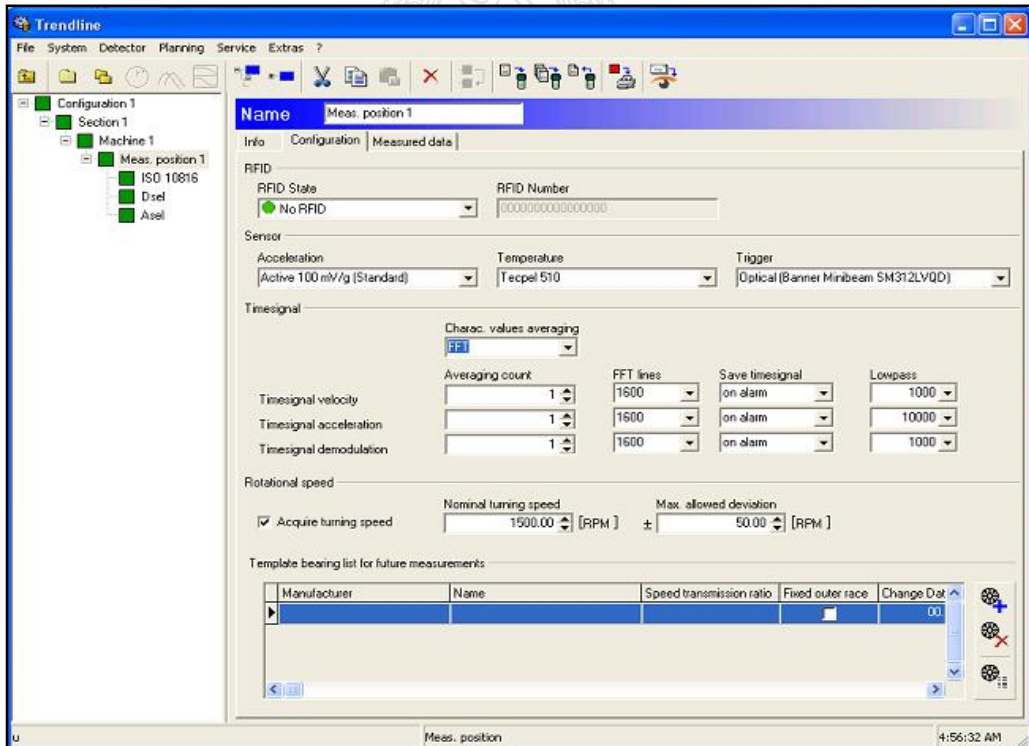


รูปที่ 3 การกำหนดฟังก์ชันย่อย



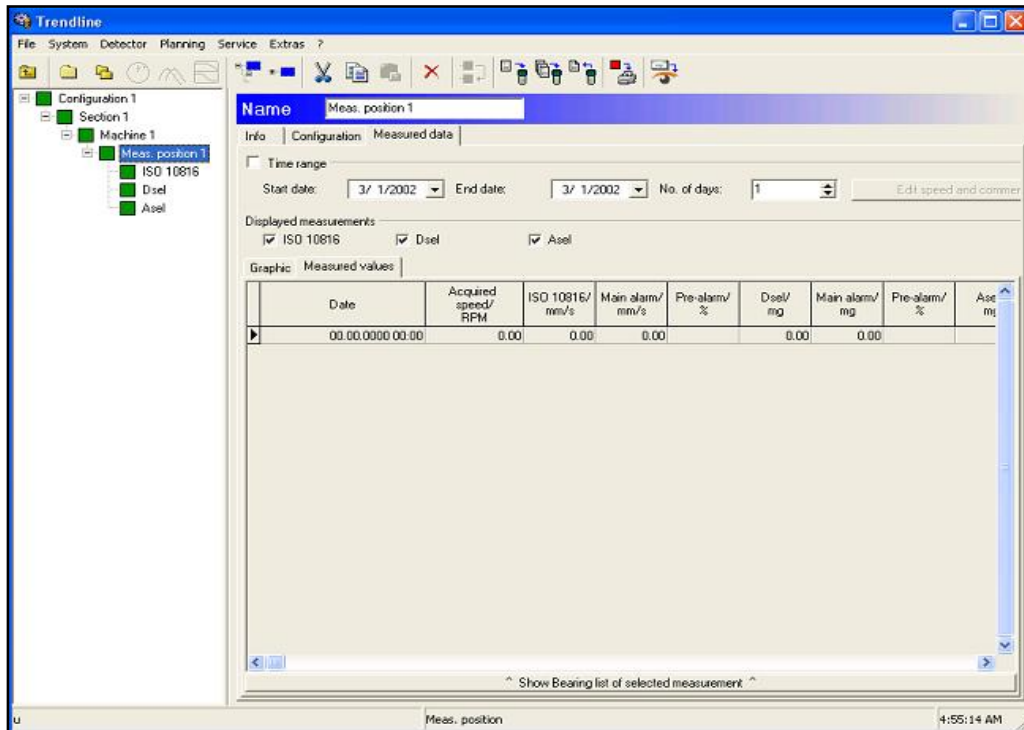


รูปที่ 4 การกำหนดความละเอียดในการแสดงผล ความเร็วรอบ และช่วงความถี่

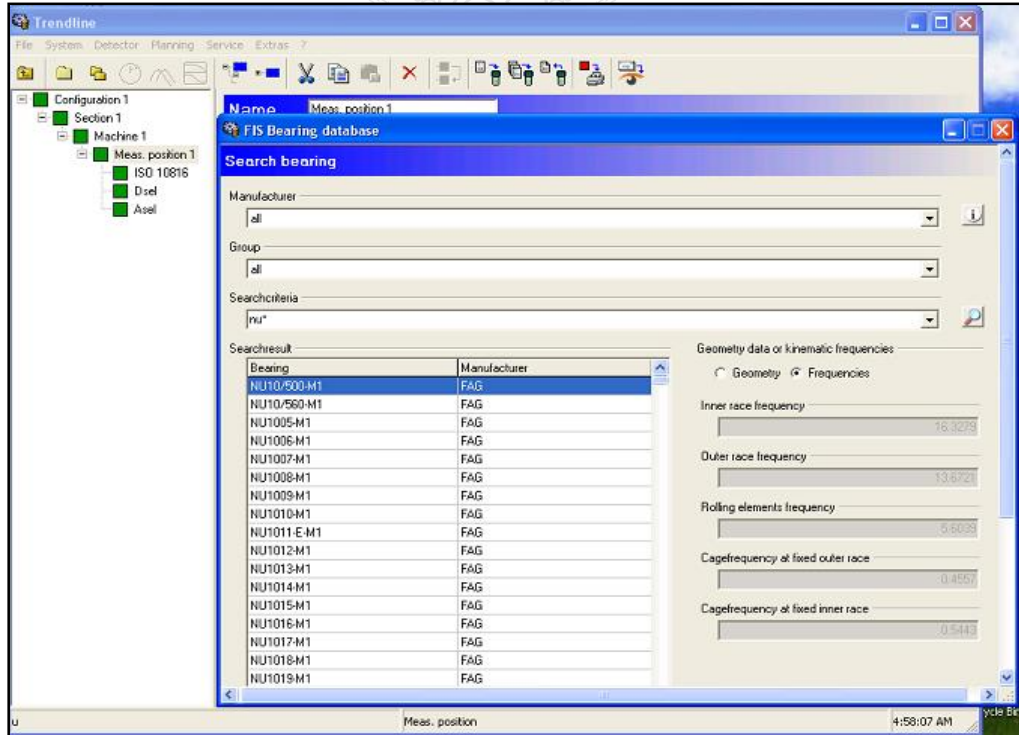


รูปที่ 5 เลือกวิเคราะห์สัญญาณเป็นแบบ FFT

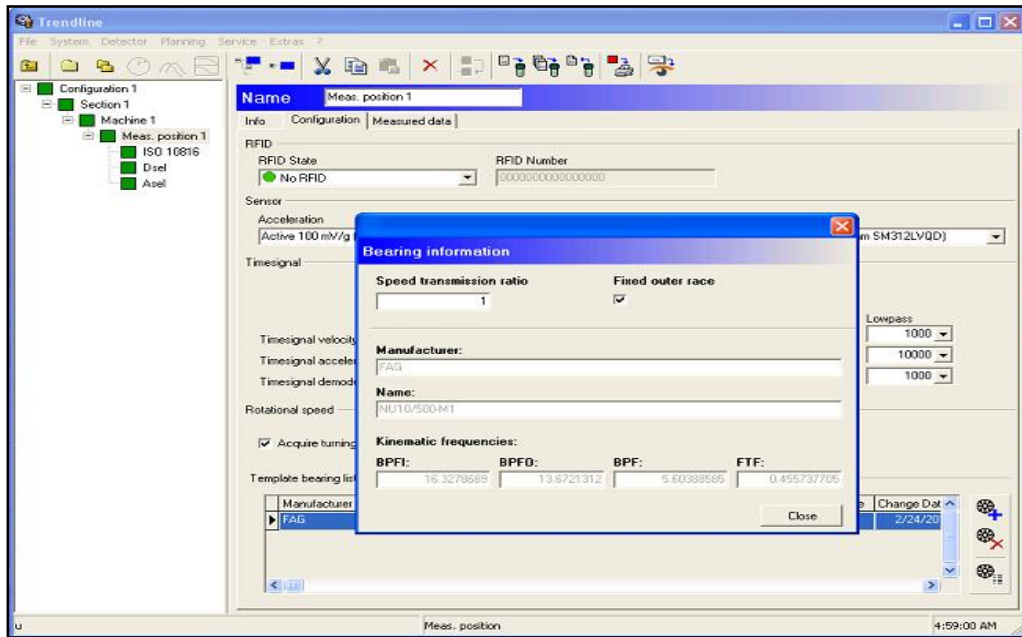




รูปที่ 6 เลือกค่าที่จะแสดงผล

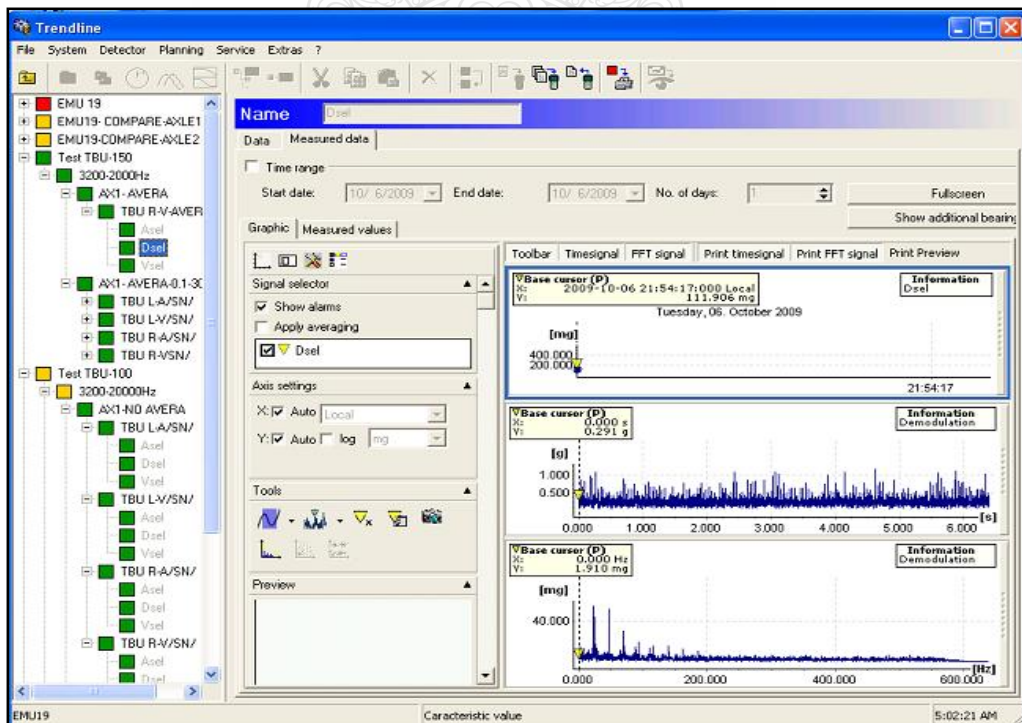


รูปที่ 7 เลือกกลับลูกปืน

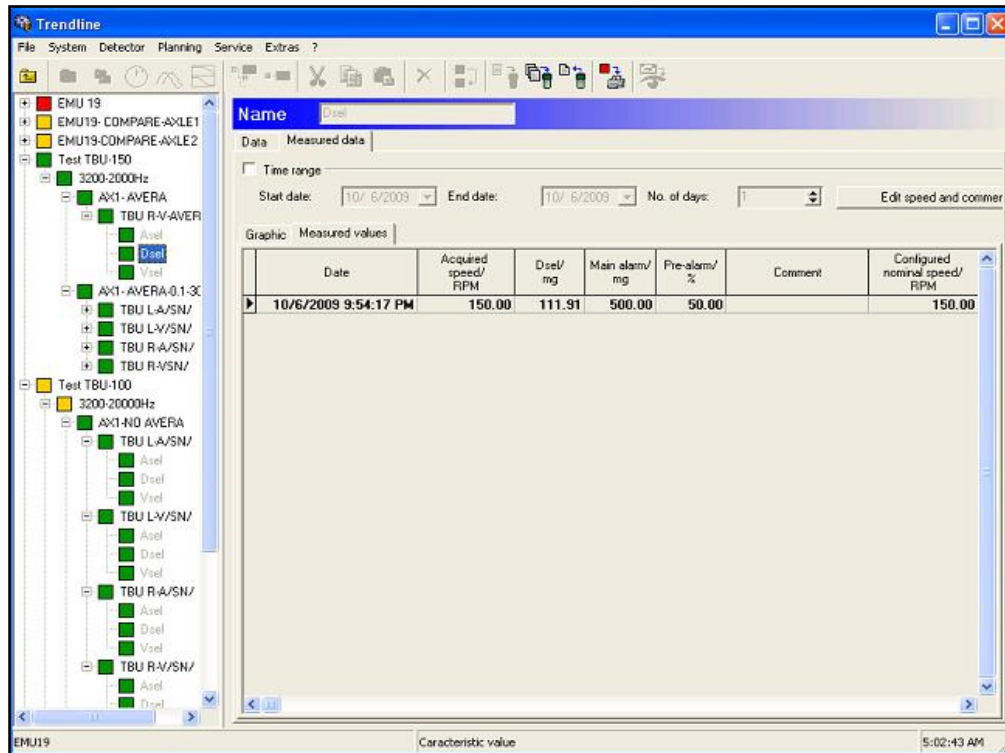


รูปที่ 8 ตรวจสอบความถี่

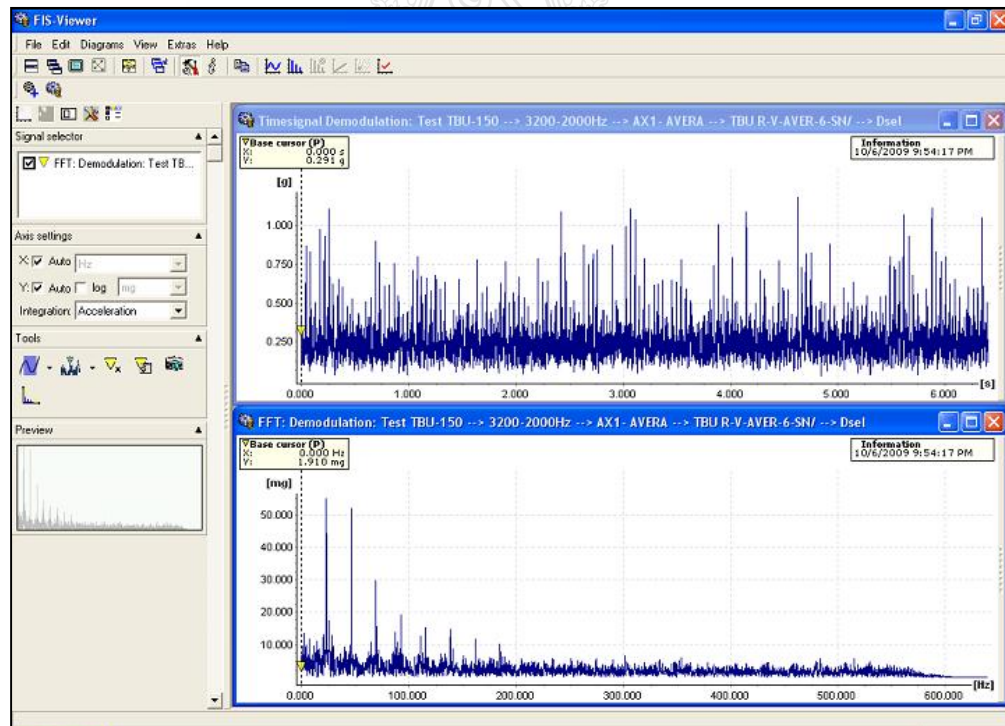
การวิเคราะห์ผล โดยจะแสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการวัด ในรูปแบบต่างๆ เพื่อตรวจสอบหาความผิดปกติ



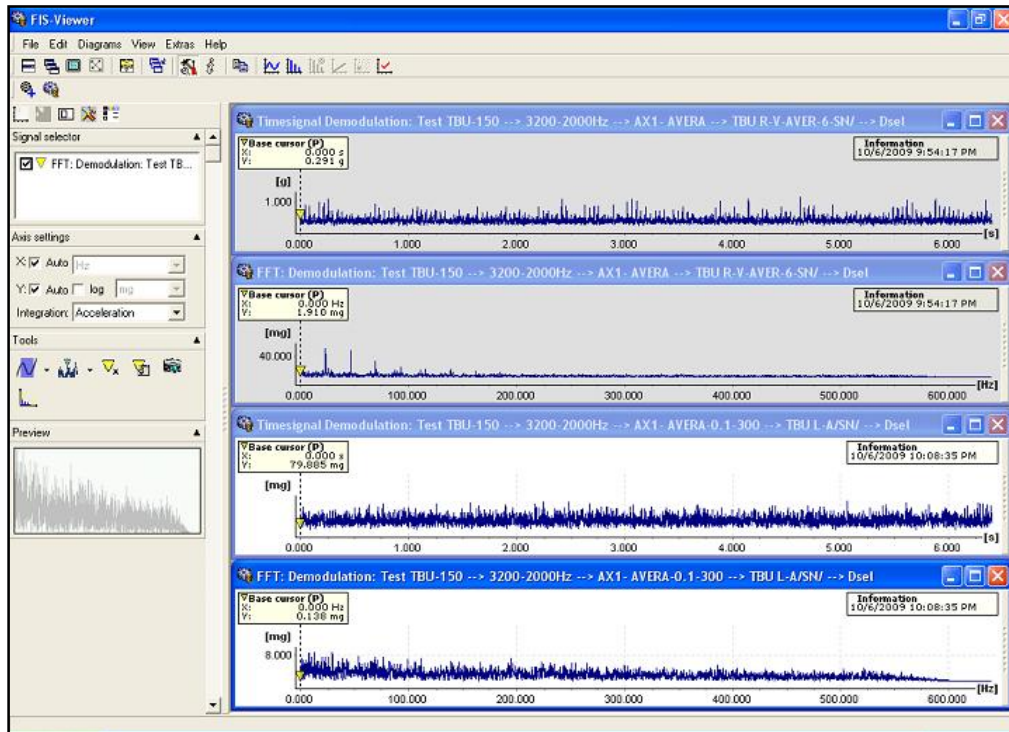
รูปที่ 9 ผลของความถี่



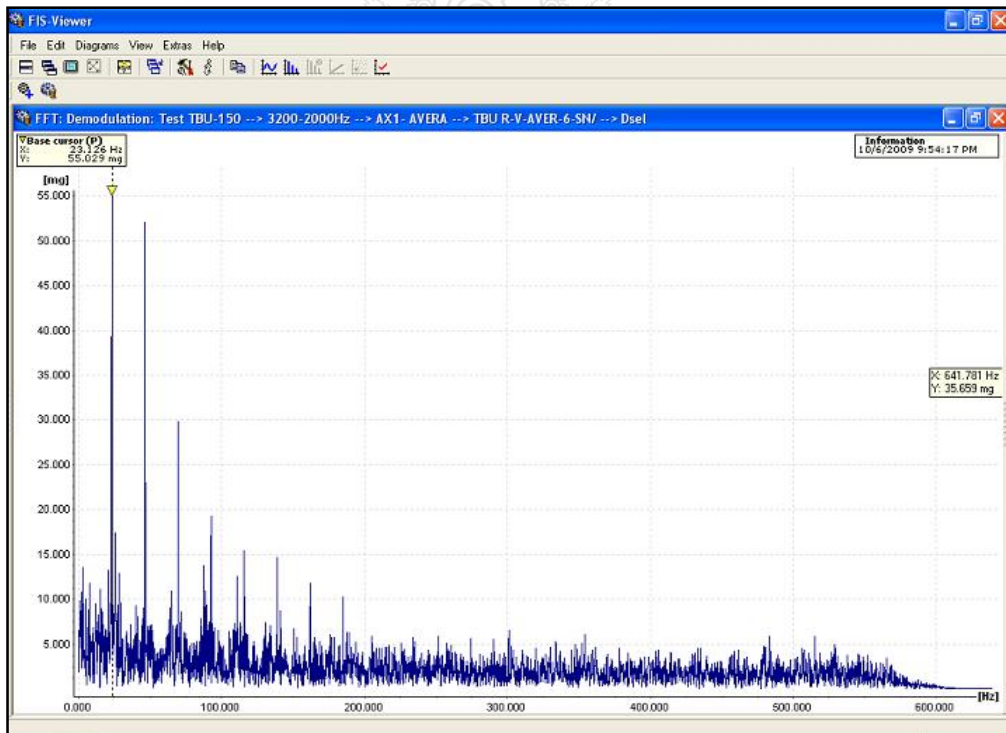
รูปที่ 10 การเลือกตำแหน่งที่จะแสดงผล



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบกันระหว่างกราฟ Time Domain และ Spectrum Domain

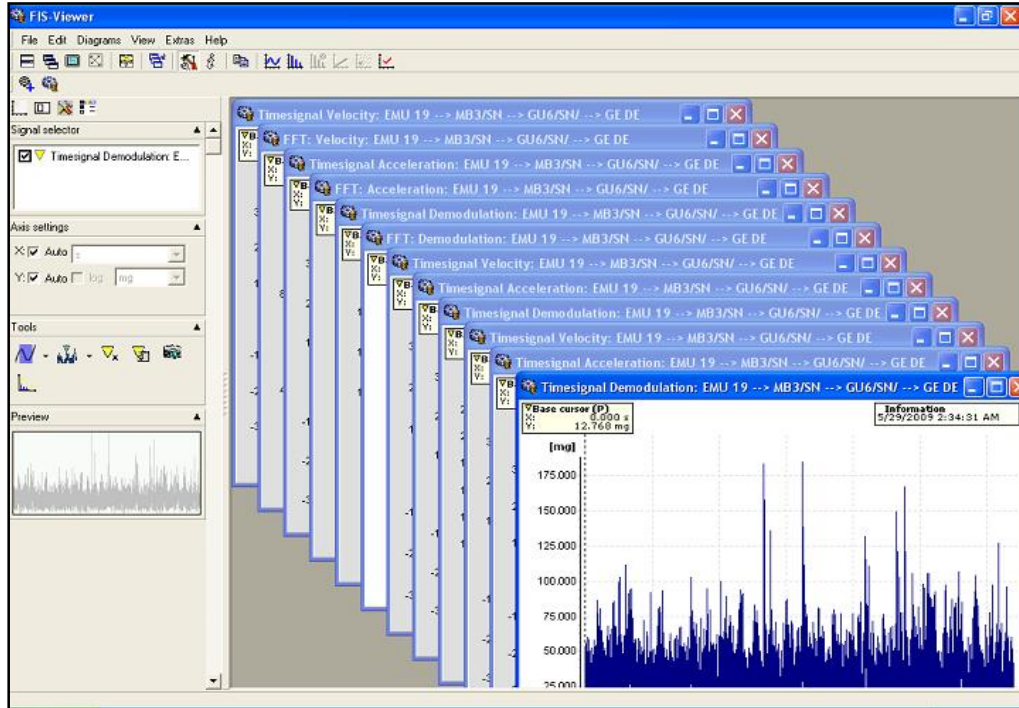


รูปที่ 12 การเปรียบเทียบความถี่ของคลื่นลูกปืนหลายลูก

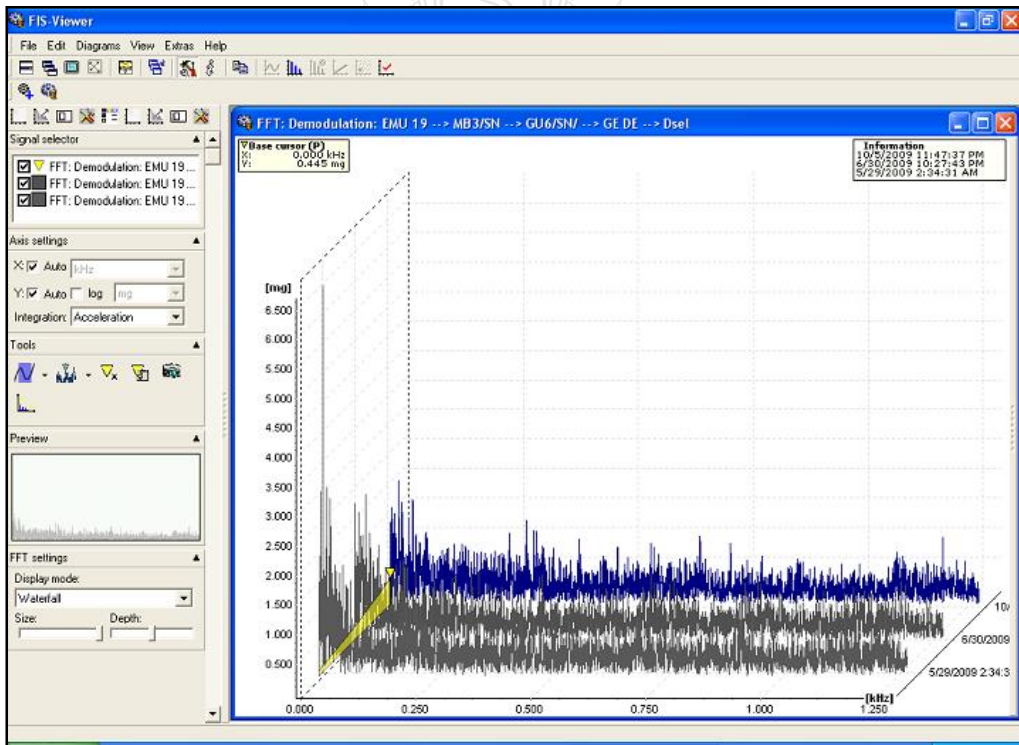


รูปที่ 13 การเลือกแสดงผลที่หน้าจอ

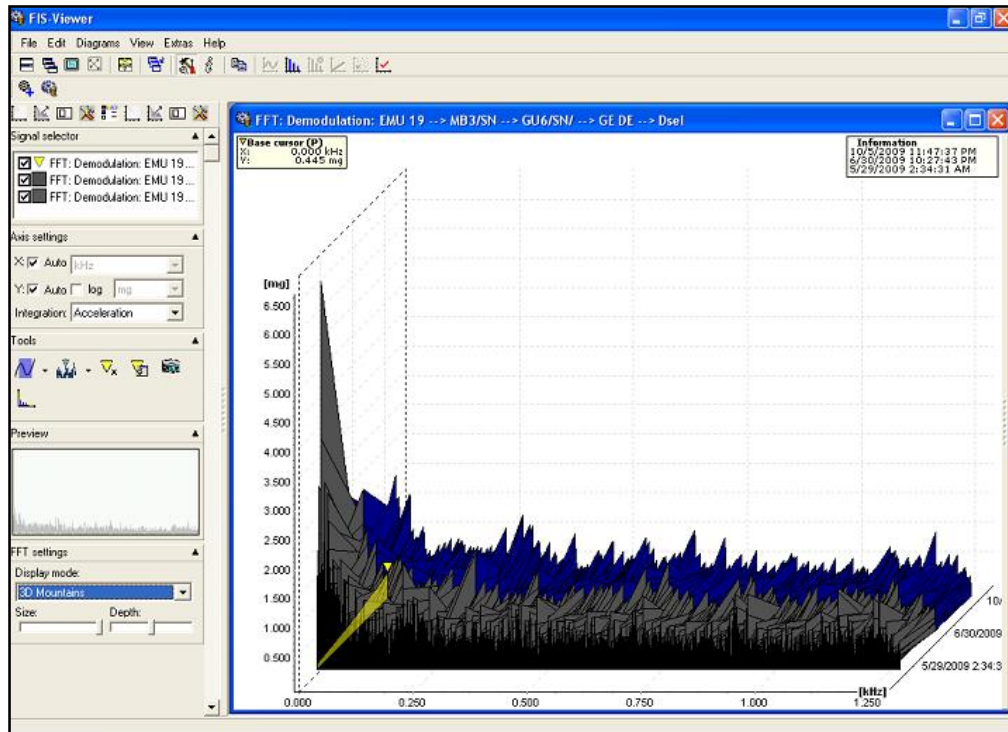




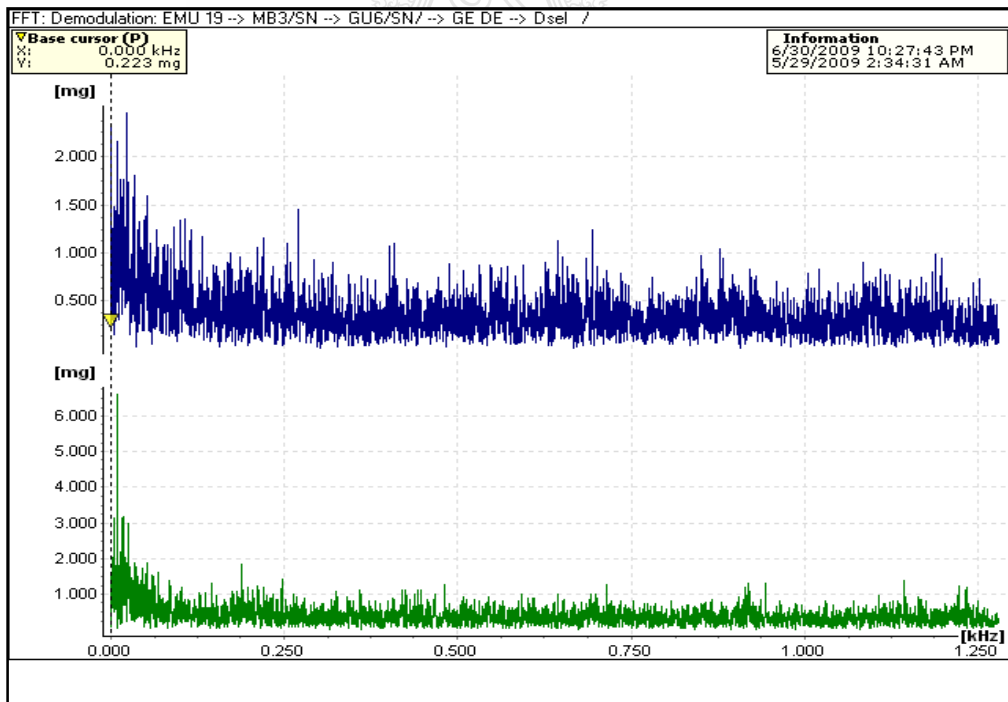
รูปที่ 14 การเลือกแสดงผลทีละหลายหน้าจอ



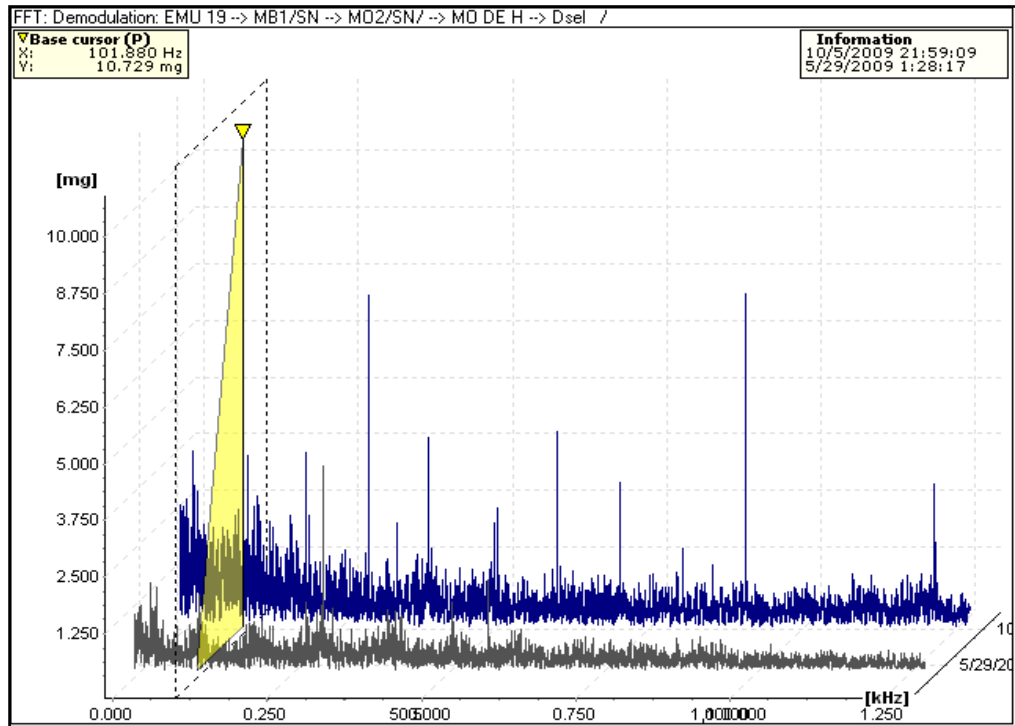
รูปที่ 15 การแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติ



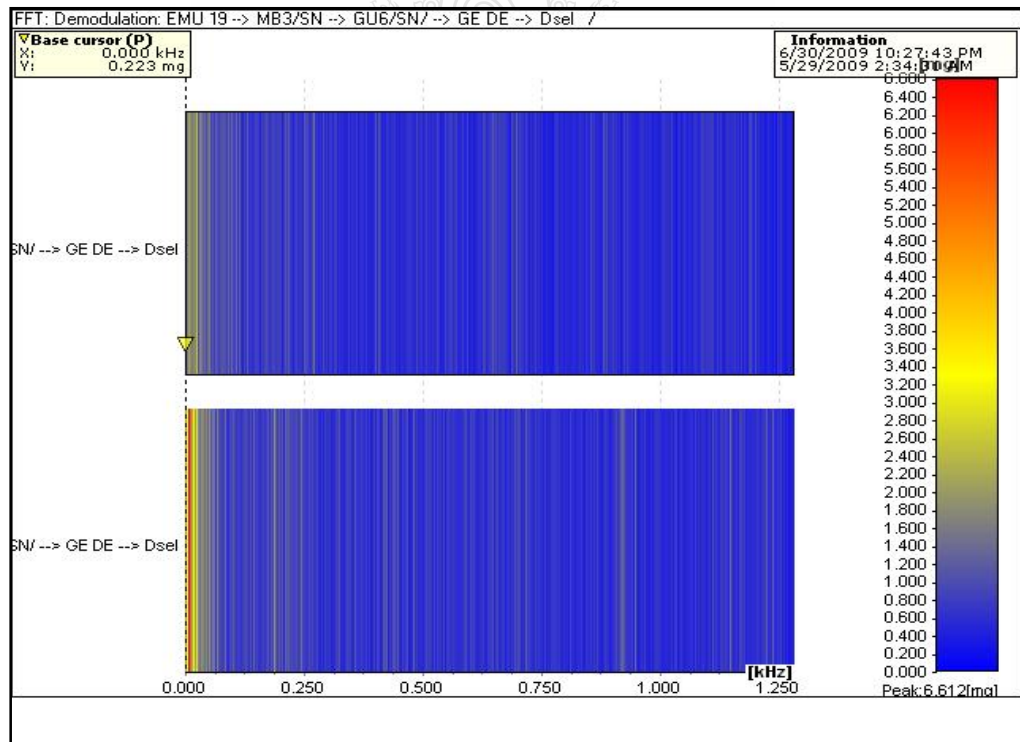
รูปที่ 16 การแสดงผลในรูปแบบ 3D Mountains



รูปที่ 17 การแสดงผลในรูปแบบ 2D Stacked



รูปที่ 18 การแสดงผลในรูปแบบ Waterfall



รูปที่ 19 การแสดงผลในรูปแบบ Sonagram

Characteristic value	Analog channel	Frequency range
$a_{eff}$	Acceleration	2 kHz - lowpass a
$a_{sel}$	Acceleration	$f_{min\_a}$ - lowpass a (both frequencies adjustable, see table below)
ISO 10816	Speed	10 Hz - 1 kHz
$v_{sel}$	Speed	$f_{min\_v}$ - lowpass v (both frequencies adjustable, see table below)
$d_{eff}$	Demodulation	$f_{min}$ - lowpass d
$d_{sel}$	Demodulation	$f_{min}$ - lowpass d (both frequencies adjustable, see table below)

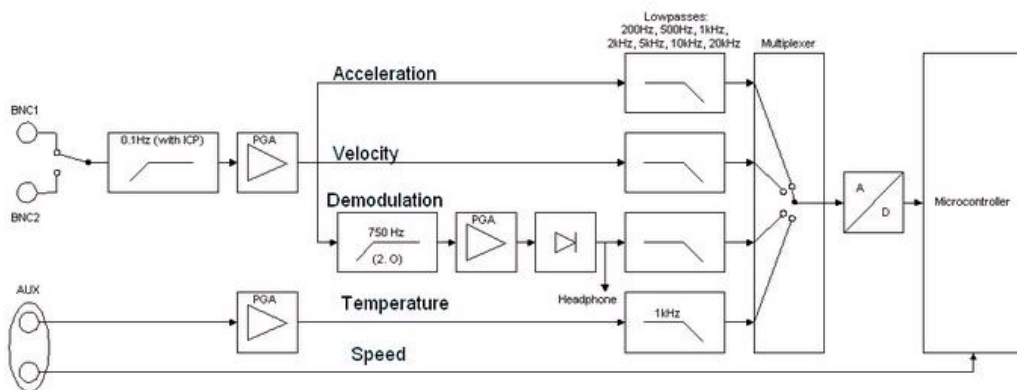
รูปที่ 20 ข้อมูลทางด้านเทคนิค 1

Lowpass	Sampling rate	FFT-length	$f_{min}$	$f_{min\_v}^{(*)}$	Frequency resolution
200 Hz	512 SPS	1600 lines	0.125 Hz	0.375 Hz	0.125 Hz
200 Hz	512 SPS	3200 lines	0.1 Hz	0.19 Hz	0.0625 Hz
500 Hz	1.28 kSPS	1600 lines	0.3125 Hz	0.94 Hz	0.3125 Hz
500 Hz	1.28 kSPS	3200 lines	0.156 Hz	0.47 Hz	0.156 Hz
1 kHz	2.56 kSPS	1600 lines	0.625 Hz	1.875 Hz	0.625 Hz
1 kHz	2.56 kSPS	3200 lines	0.3125 Hz	0.94 Hz	0.3125 Hz
2 kHz	5.12 kSPS	1600 lines	1.25 Hz	3.75 Hz	1.25 Hz
2 kHz	5.12 kSPS	3200 lines	0.625 Hz	1.875 Hz	0.625 Hz
5 kHz	12.8 kSPS	1600 lines	3.125 Hz	9.375 Hz	3.125 Hz
5 kHz	12.8 kSPS	3200 lines	1.56 Hz	4.7 Hz	1.56 Hz
10 kHz	25.6 kSPS	1600 lines	6.25 Hz	18.75 Hz	6.25 Hz
10 kHz	25.6 kSPS	3200 lines	3.125 Hz	9.375 Hz	3.125 Hz
20 kHz	51.2 kSPS	1600 lines	12.5 Hz	37.5 Hz	12.5 Hz
20 kHz	51.2 kSPS	3200 lines	6.25 Hz	18.75 Hz	6.25 Hz

(SPS = Samples per second)

(\*) In the case of characteristic values for speed the minimum frequency is the third line in the spectrum as the first lines may become overly large as a result of the integration.

รูปที่ 21 ข้อมูลทางด้านเทคนิค 2



รูปที่ 22 วงจรของเครื่องวัด



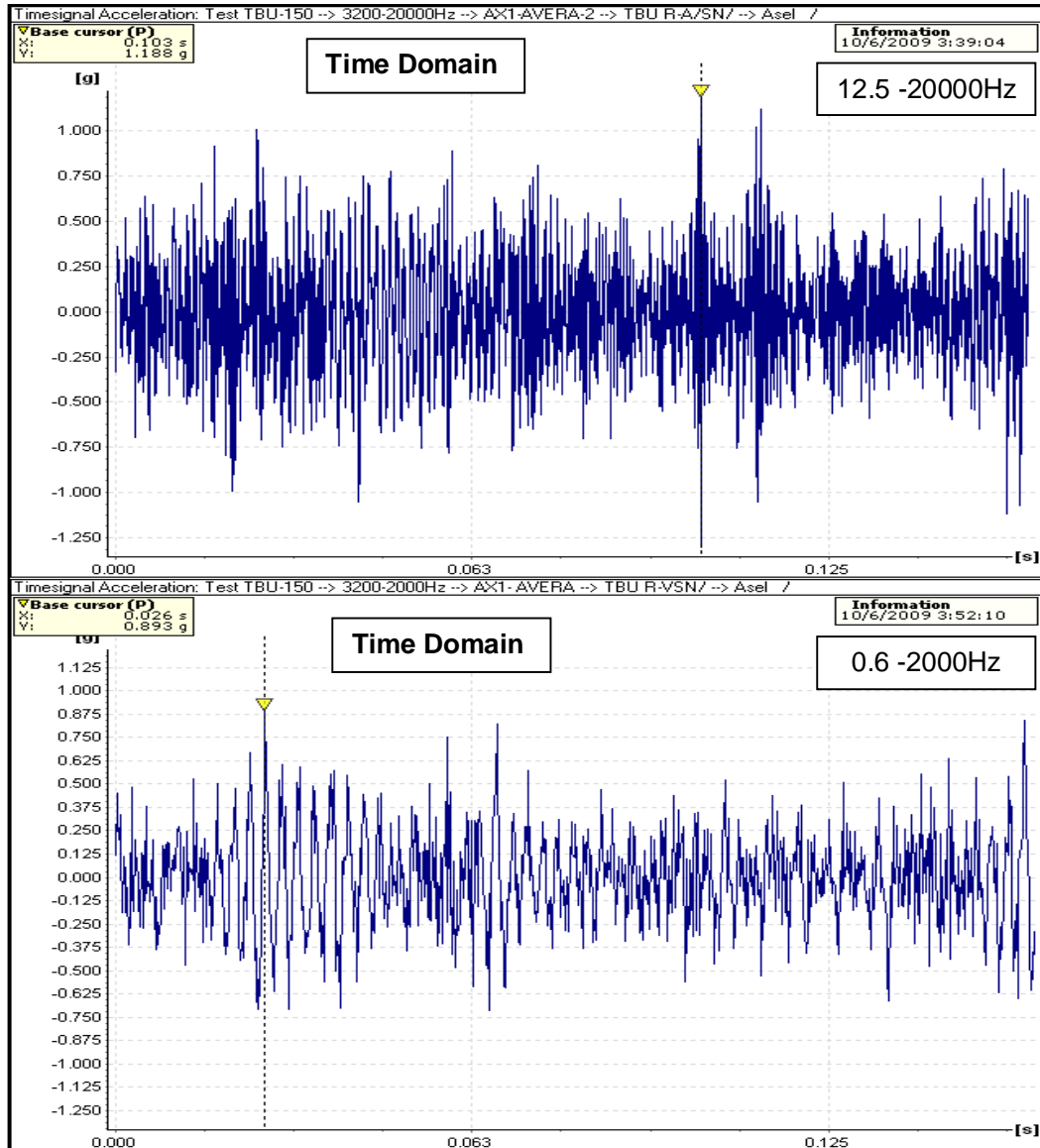
ภาคผนวก ค

แสดงการเปรียบเทียบกราฟในฟังก์ชันต่างๆ



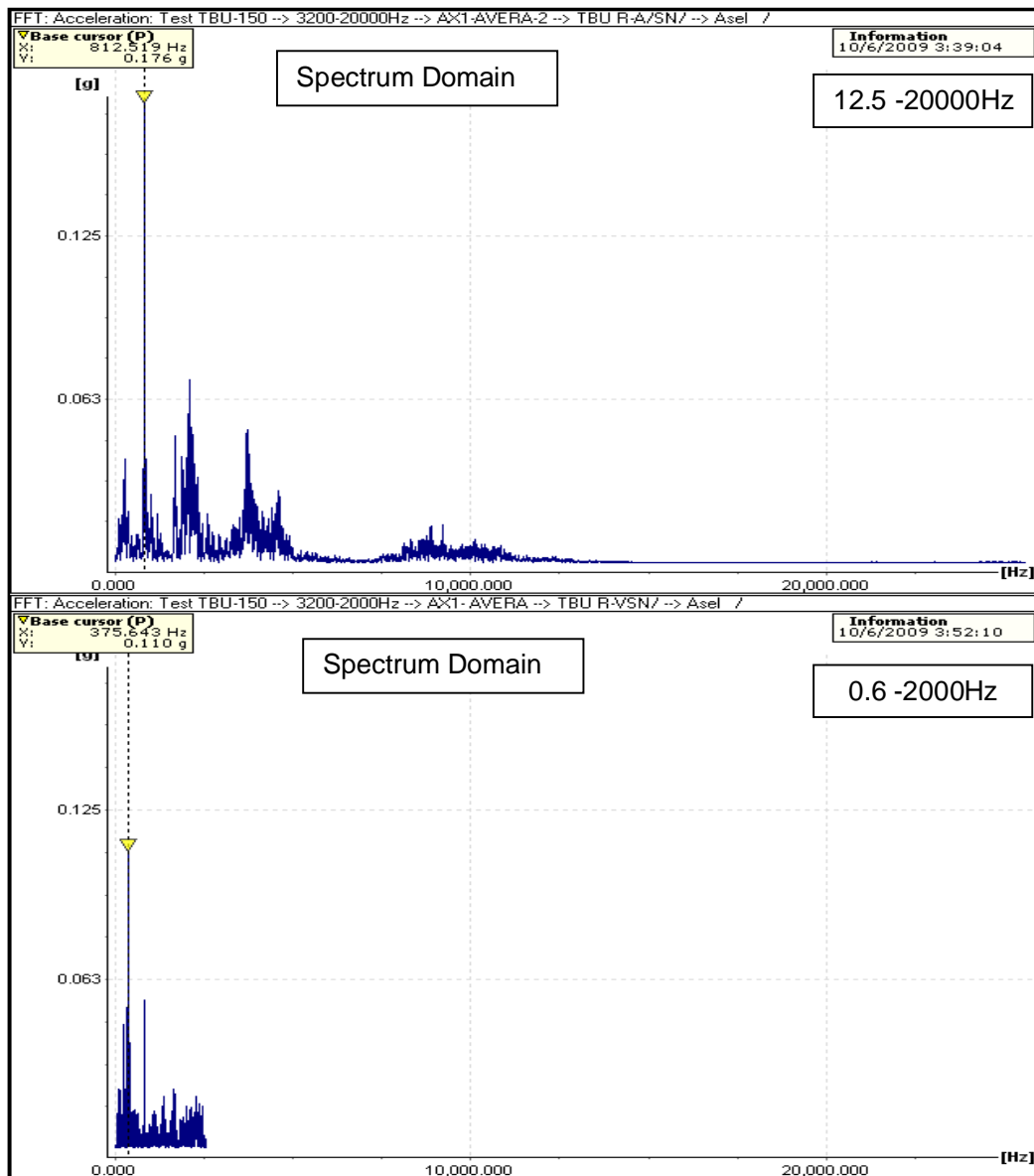
## เปรียบเทียบกราฟในฟังก์ชัน Acceleration ในตลับลูกปืนตัวเดียวกัน

เปรียบเทียบกันระหว่าง การวัดในช่วงความถี่สูงกับต่ำ (12.5-20000 Hz กับ 0.6-2000 Hz) ใน Time Domain ที่ความเร็วรอบ 150 RPM แสดงให้เห็นความแตกต่างของความถี่ การวัดที่ความถี่สูงจะมีความละเอียดของสัญญาณมากจะเหมาะกับการเสียหายในระยะเริ่มต้น ส่วนการวัดในย่านความถี่ต่ำ นั้นจะเหมาะกับการเสียหายในระยะที่เกิดความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนตลับลูกปืน เพราะการเสียหายระยะนี้ จะเกิดในย่านความถี่ต่ำ



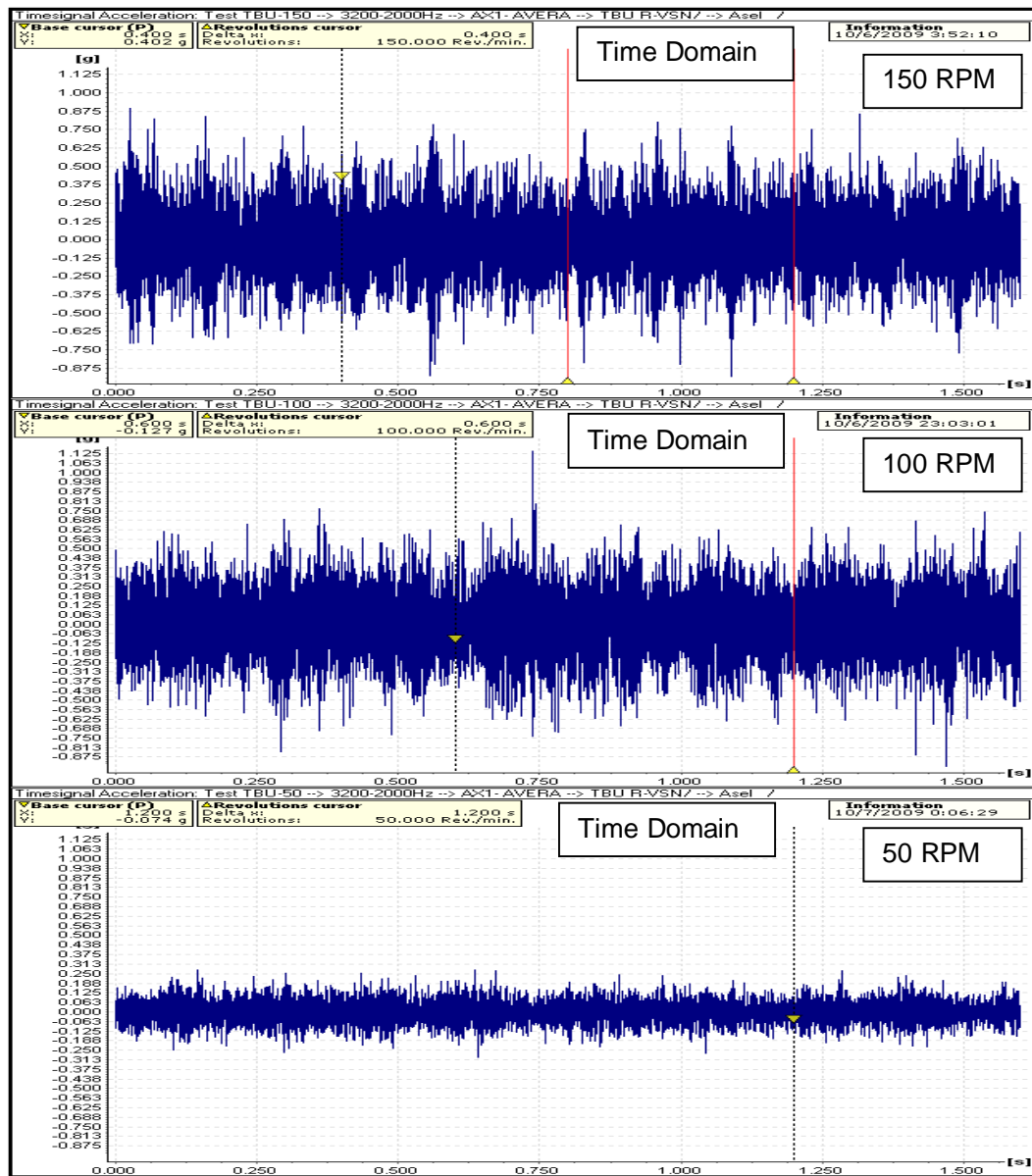
รูปที่ 1 กราฟ Time Domain ในฟังก์ชัน Acceleration

เปรียบเทียบกันระหว่าง การวัดในช่วงความถี่สูงกับต่ำ (12.5-20000 Hz กับ 0.6-2000 Hz) ใน Spectrum Domain ที่ความเร็วรอบ 150 RPM



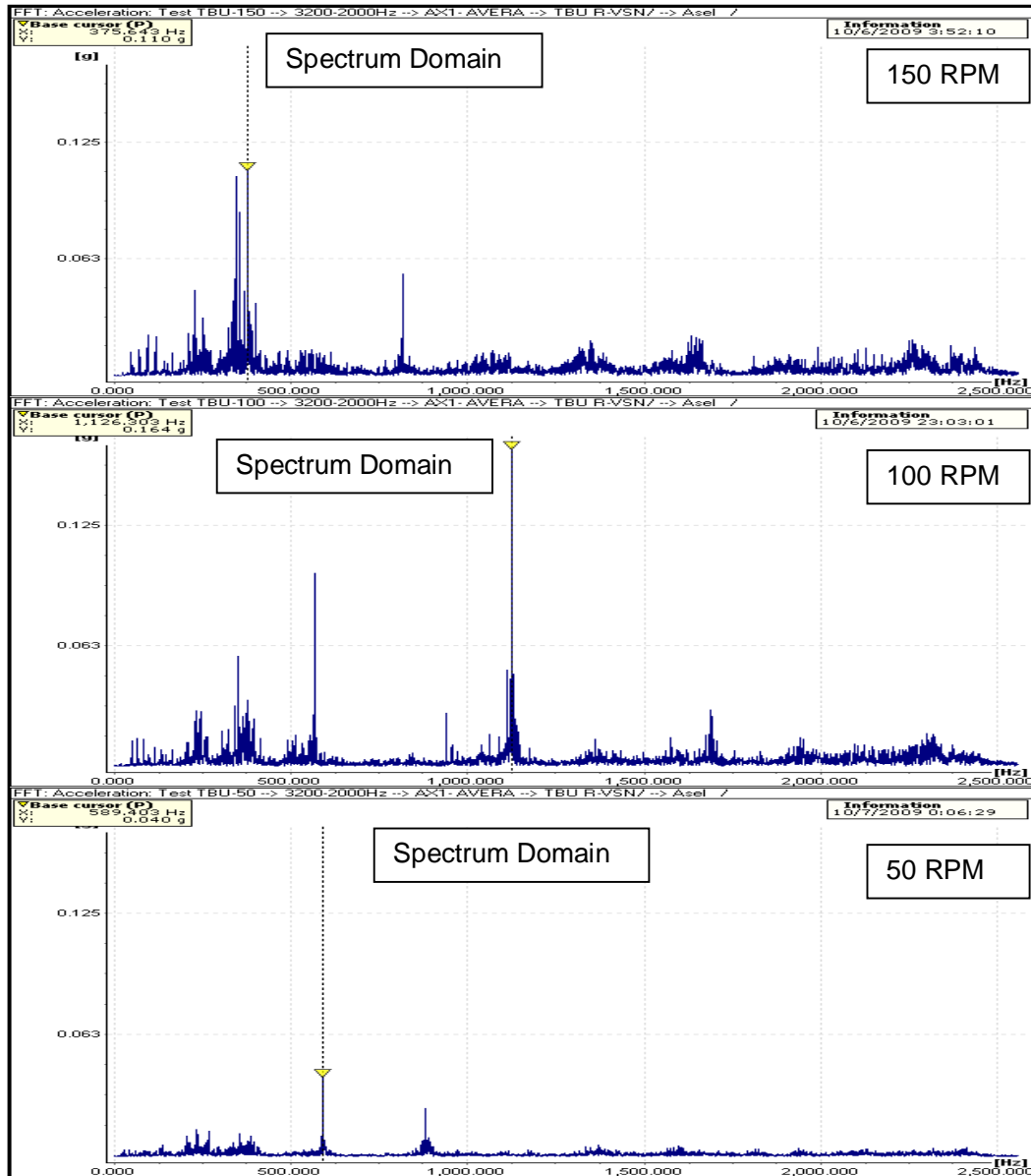
รูปที่ 2 กราฟ Spectrum Domain ในฟังก์ชัน Acceleration

เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ที่วัดในช่วงความถี่ต่ำ (0.6-2000 Hz) ใน Time Domain



รูปที่ 3 กราฟ Time Domain เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ในฟังก์ชัน Acceleration

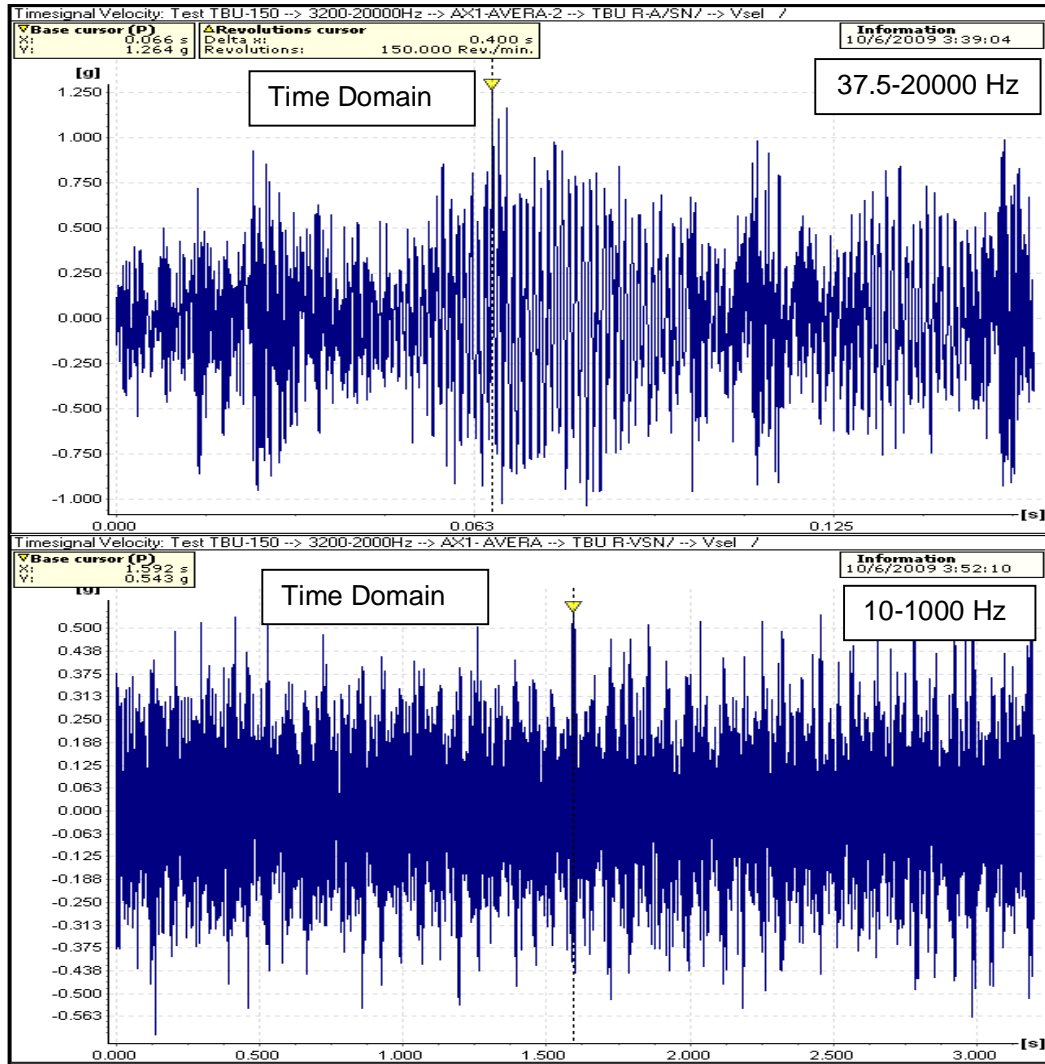
เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ที่วัดในช่วงความถี่ต่ำ (0.6-2000 Hz) ใน Spectrum Domain



รูปที่ 4 กราฟ Spectrum Domain เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ในฟังก์ชัน Acceleration

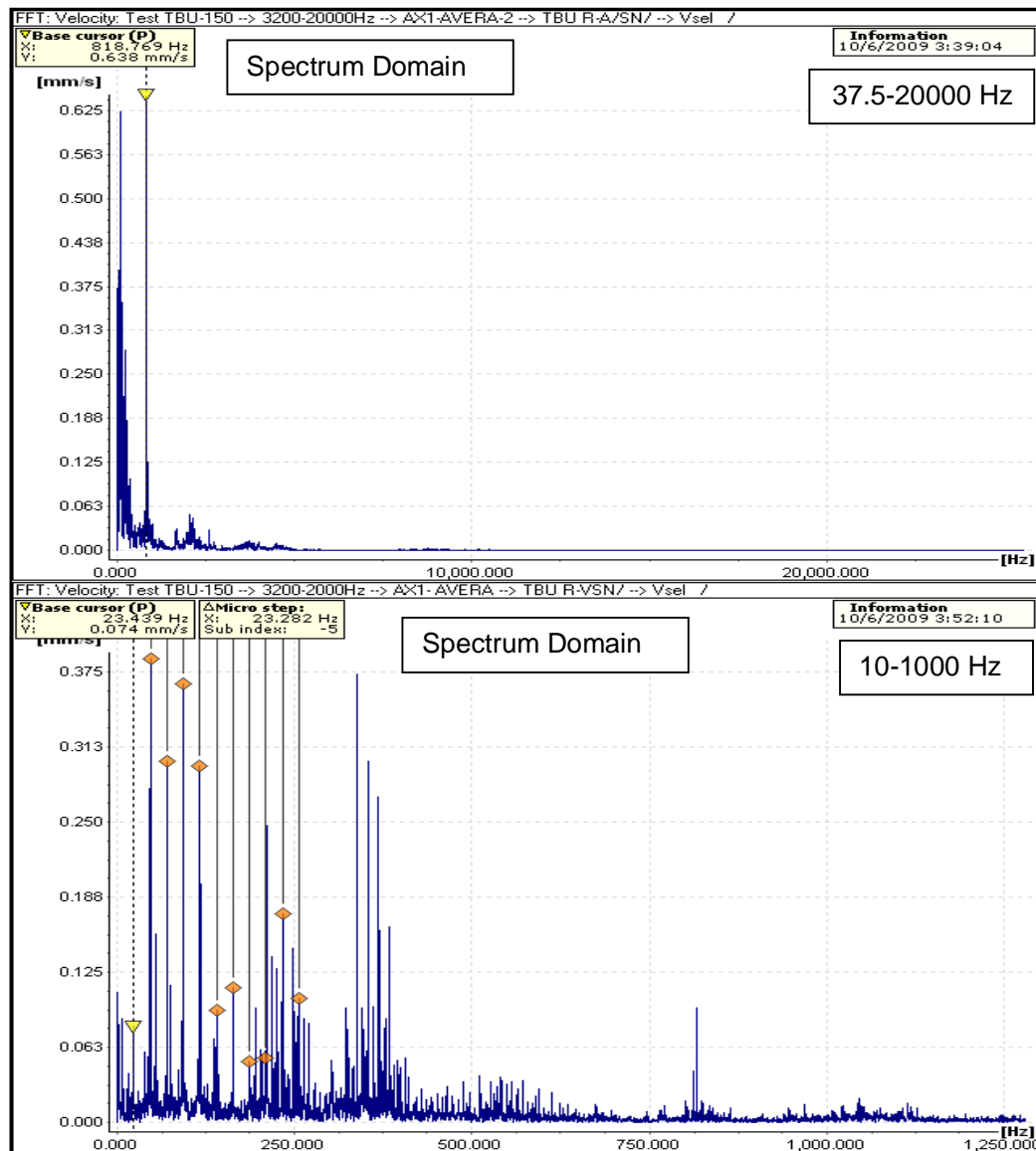
## เปรียบเทียบกราฟในฟังก์ชัน Velocity ในตลับลูกปืนตัวเดียวกัน

เปรียบเทียบกันระหว่าง การวัดในช่วงความถี่สูงกับต่ำ (37.5-20000 Hz กับ 10-1000 Hz) ใน Time Domain ที่ความเร็วรอบ 150 RPM แสดงให้เห็นความแตกต่างของความถี่ การวัดที่ความถี่สูงจะมีความละเอียดของสัญญาณมากจะเหมาะกับการเสียหายในระยะเริ่มต้น ส่วนการวัดในย่านความถี่ต่ำ นั้นจะเหมาะกับการเสียหายในระยะที่เกิดความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนตลับลูกปืน เพราะการเสียหายระยะนี้ จะเกิดในย่านความถี่ต่ำ



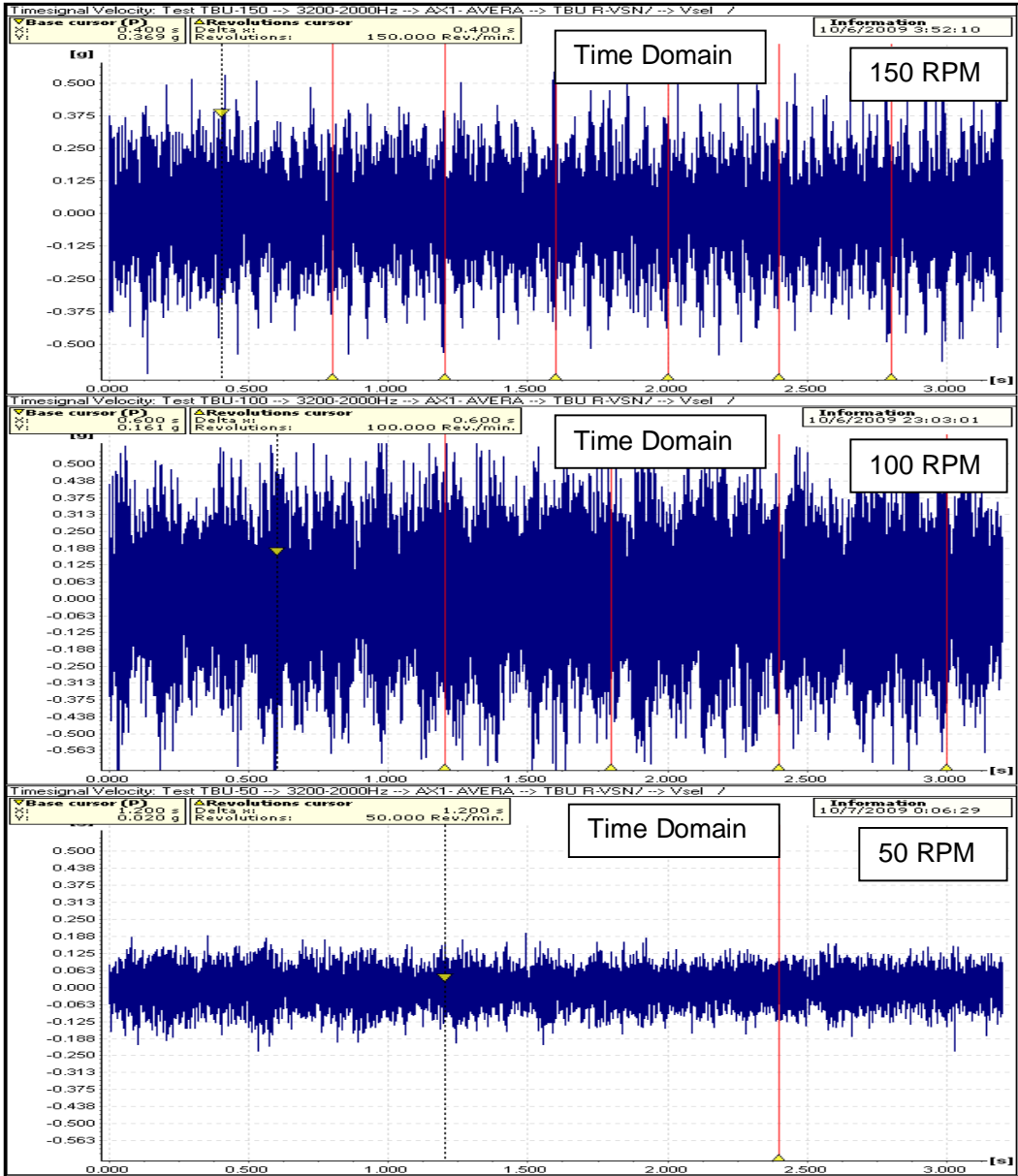
รูปที่ 5 กราฟ Time Domain ในฟังก์ชัน Velocity

เปรียบเทียบกันระหว่าง การวัดในช่วงความถี่สูงกับต่ำ (37.5-20000 Hz กับ 10-1000 Hz) ใน Spectrum Domain ที่ความเร็วรอบ 150 RPM



รูปที่ 6 กราฟ Spectrum Domain ในฟังก์ชัน Velocity

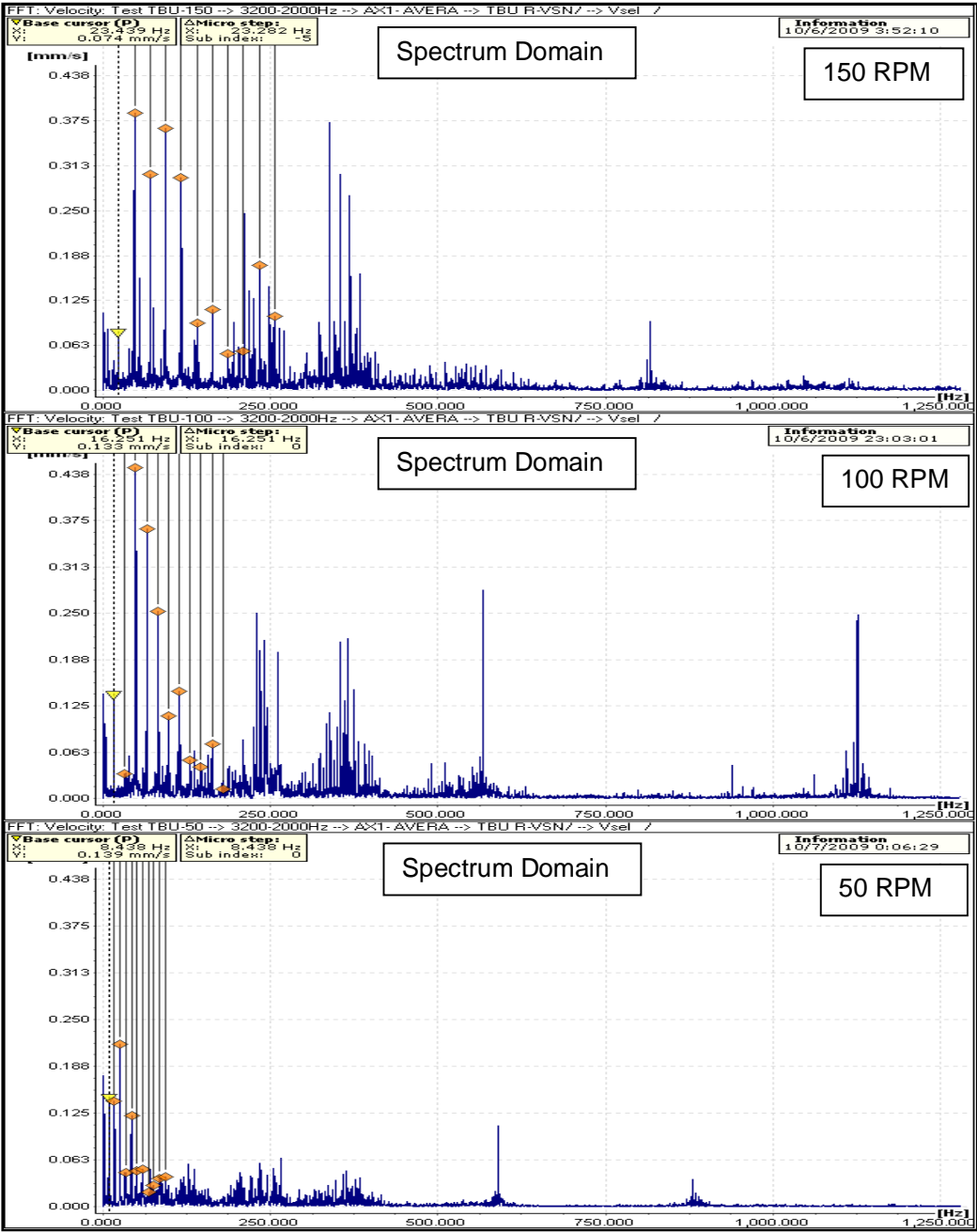
เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ที่วัดในช่วงความถี่ต่ำ (10-1000Hz) ใน Time Domain



รูปที่ 7 กราฟ Time Domain เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ในฟังก์ชัน Velocity



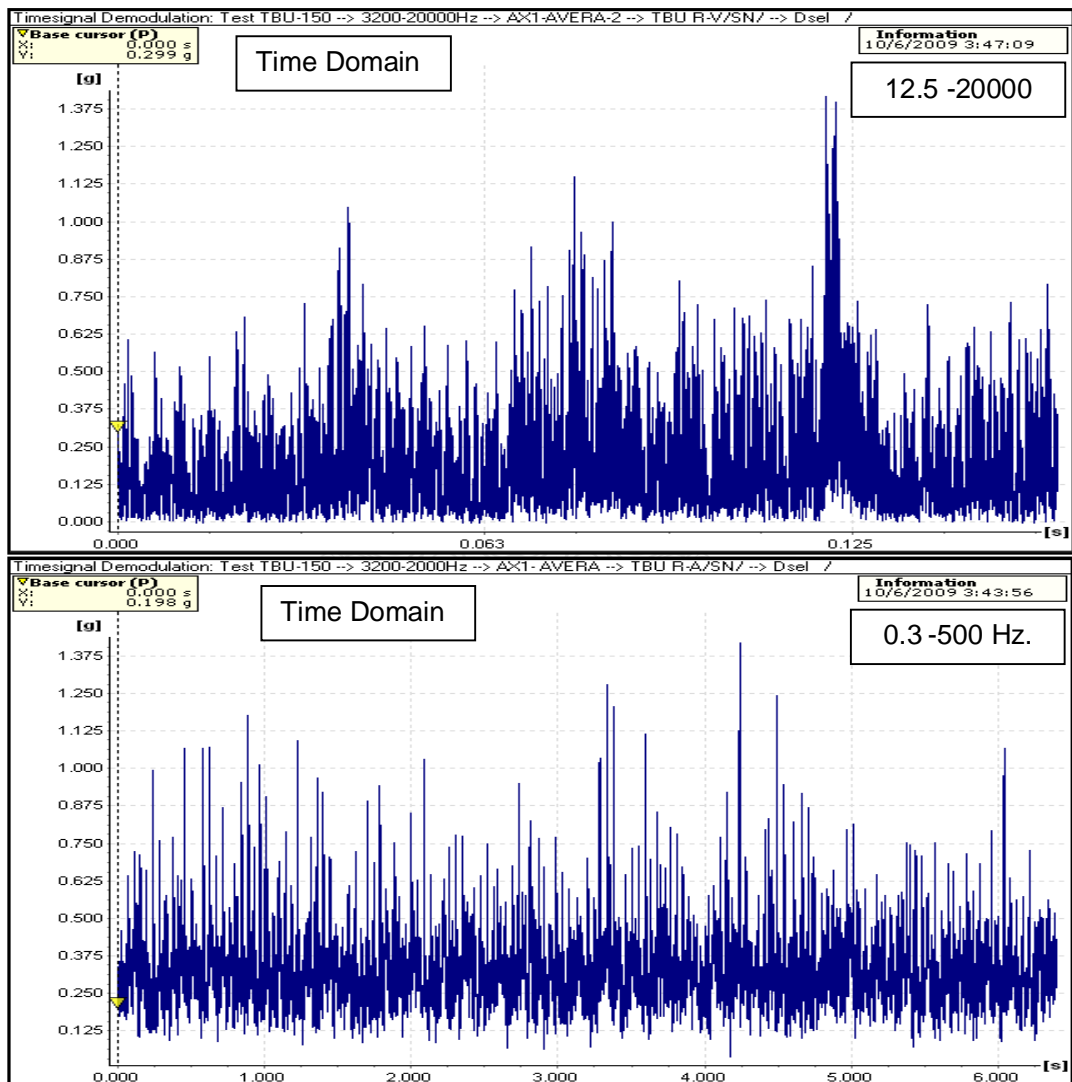
เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ที่วัดในช่วงความถี่ต่ำ (10-1000Hz) ใน Spectrum Domain



รูปที่ 8 กราฟ Spectrum Domain เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ในฟังก์ชัน Velocity

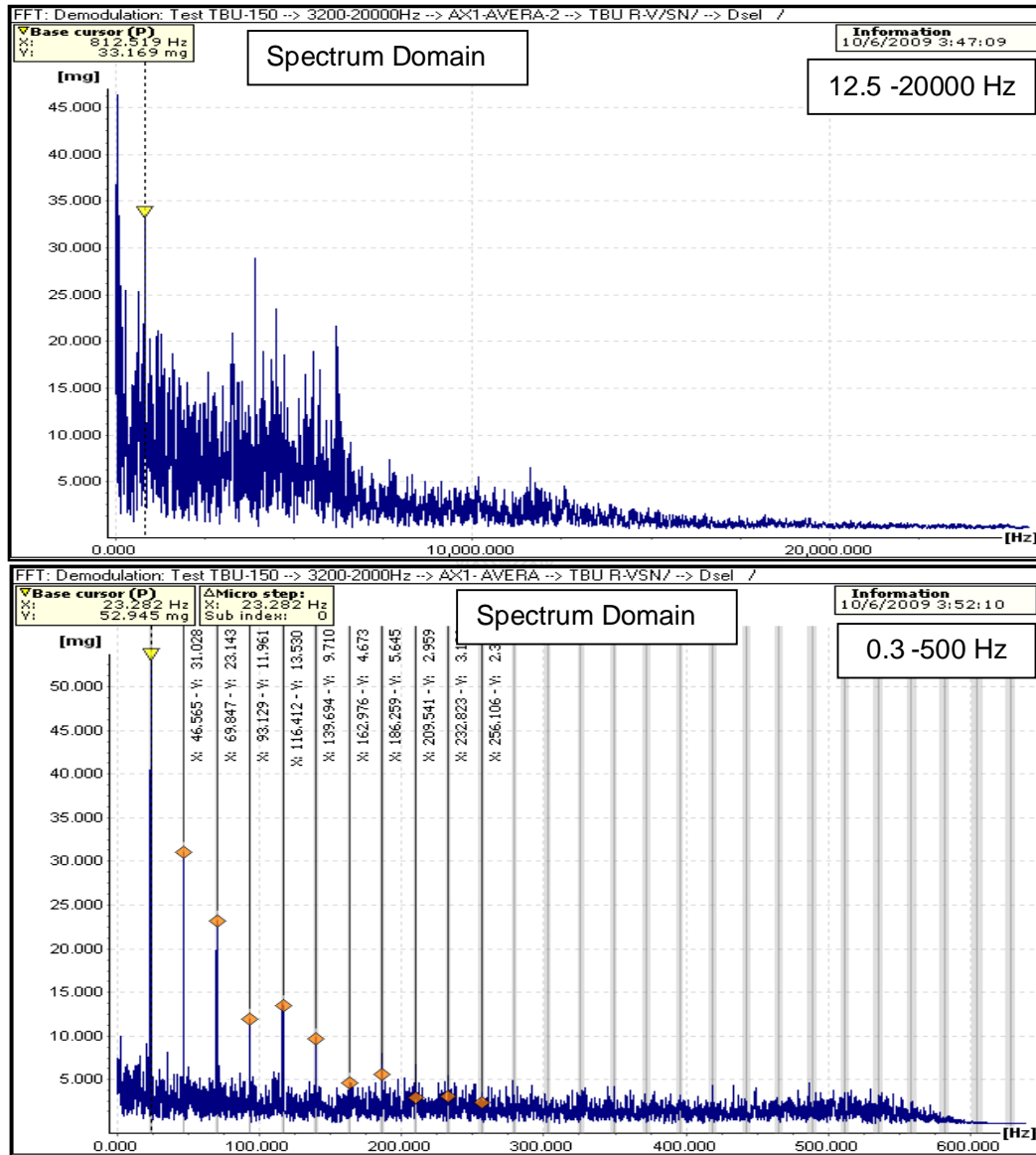
## เปรียบเทียบกราฟในฟังก์ชัน Demodulation ในตลับลูกปืนตัวเดียวกัน

เปรียบเทียบกันระหว่าง การวัดในช่วงความถี่สูงกับต่ำ (12.5-20000 Hz กับ 0.3-500 Hz) ใน Time Domain ที่ความเร็วรอบ 150 RPM แสดงให้เห็นความแตกต่างของความถี่ การวัดที่ความถี่สูงจะมีความละเอียดของสัญญาณมากจะเหมาะกับการเสียหายในระยะเริ่มต้น ส่วนการวัดในย่านความถี่ต่ำ นั้นจะเหมาะสำหรับการเสียหายในระยะที่เกิดความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนตลับลูกปืน เพราะการเสียหายระยะนี้ จะเกิดในย่านความถี่ต่ำ



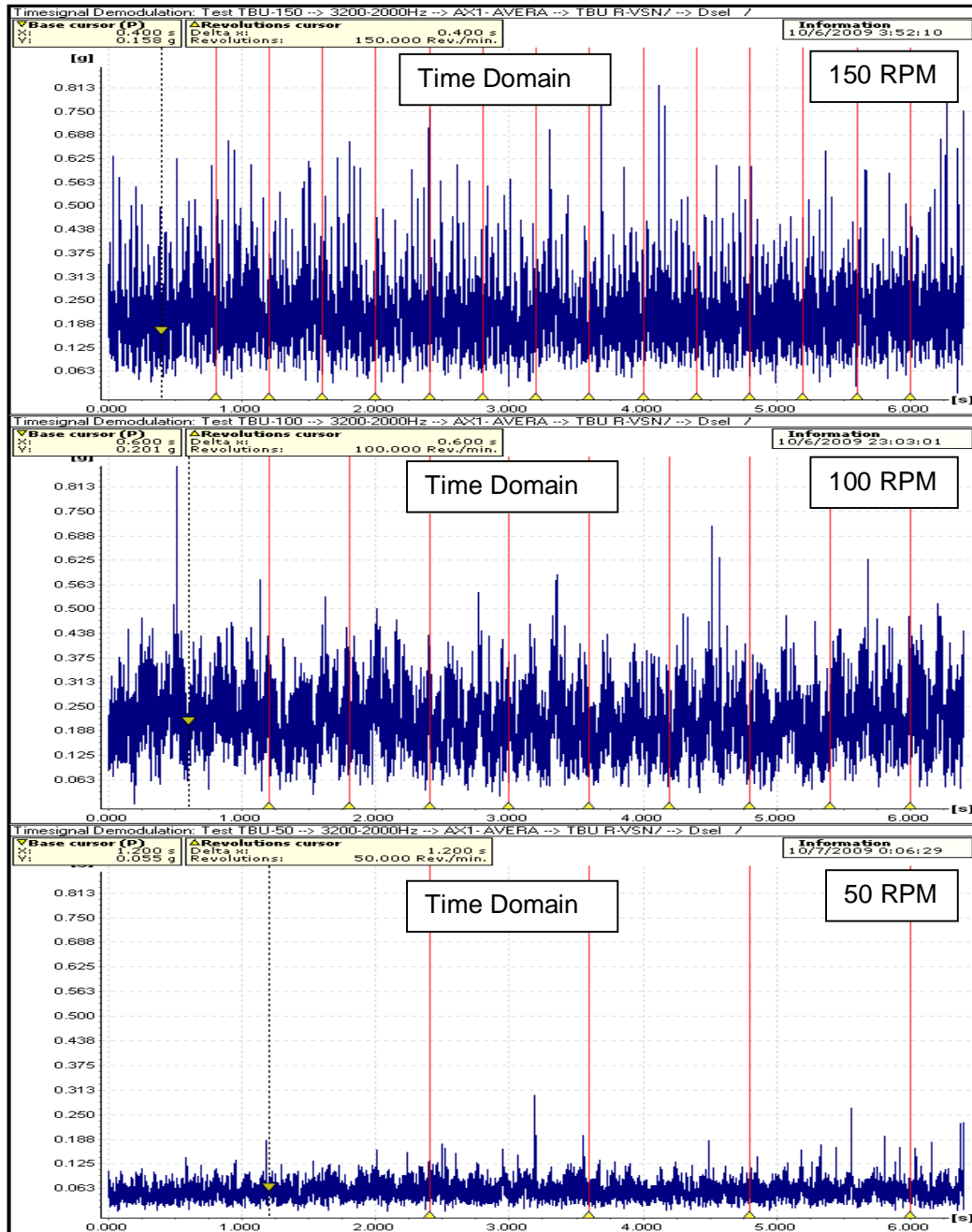
รูปที่ 9 กราฟ Time Domain ในฟังก์ชัน Demodulation

เปรียบเทียบระหว่าง การวัดในช่วงความถี่สูงกับต่ำ (12.5-20000 Hz กับ 0.3-500 Hz) ใน Spectrum Domain ที่ความเร็วรอบ 150 RPM



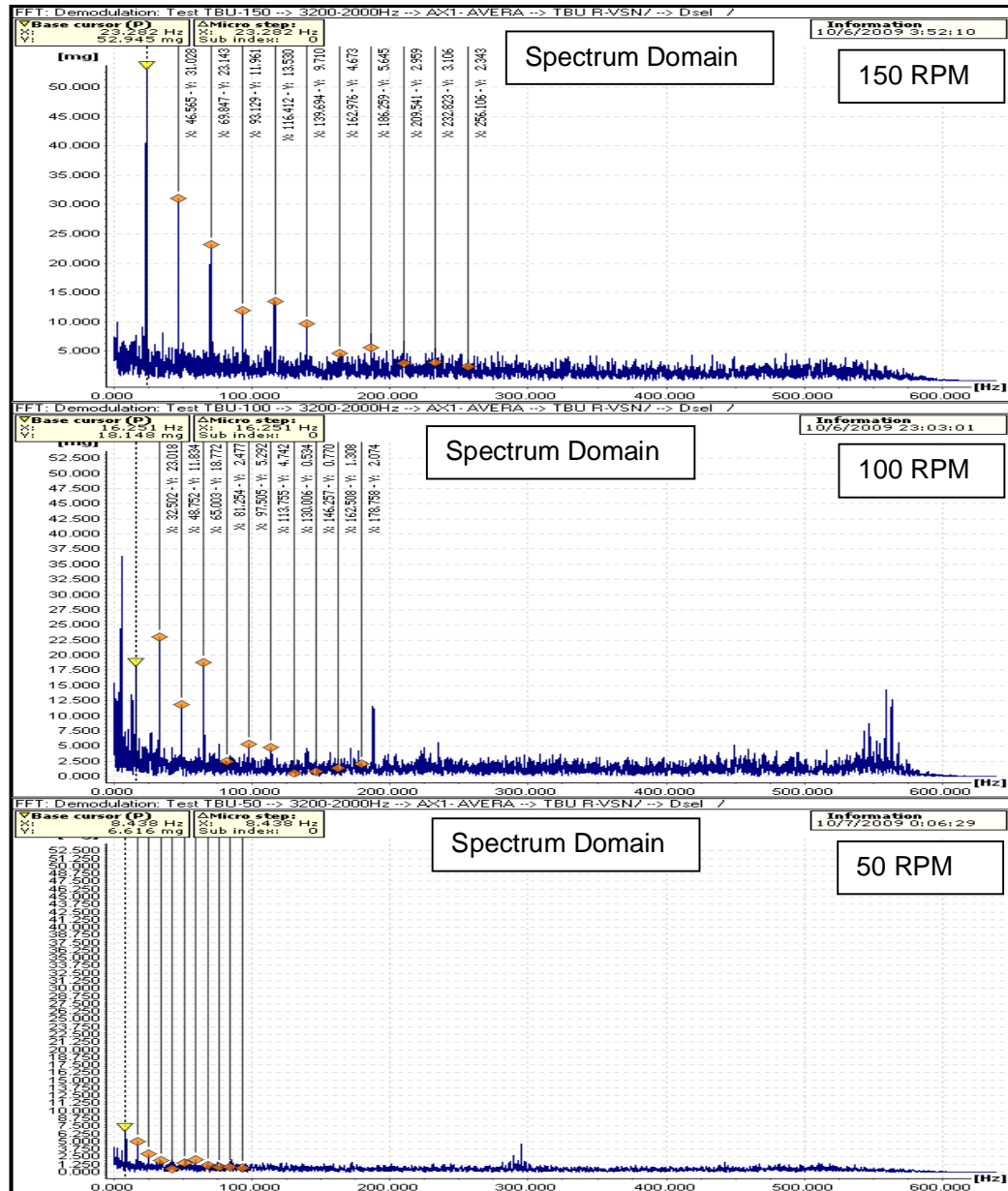
รูปที่ 10 กราฟ Spectrum Domain ในฟังก์ชัน Demodulation

เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ที่วัดในช่วงความถี่ต่ำ (0.3-500 Hz) ใน Time Domain



รูปที่ 11 กราฟ Time Domain เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ในฟังก์ชัน Demodulation

เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ที่วัดในช่วงความถี่ต่ำ (0.3-500 Hz) ใน Spectrum Domain เพื่อแสดงให้เห็นความสูงของสัญญาณที่แตกต่างกันโดยในความเร็วรอบ 150 จะมีสัญญาณสูงกว่าการวัดในความเร็วรอบต่ำ โดยจะสังเกตเห็นสัญญาณฮาร์มอนิกได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 12 กราฟ Spectrum Domain เปรียบเทียบกันระหว่างการวัดที่ความเร็วรอบ 150, 100, 50 RPM ในฟังก์ชัน Demodulation



ภาคผนวก ง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ศุริยา สารมาตย์ และเทอดเกียรติ ลิ้มปีทีปการ, “การวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อที่จะหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน”, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, 3-5 กุมภาพันธ์ 2553, หน้า 83-90.





เรื่องเติมการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๔๘ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เล่มที่ 7 สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

(Subject: Architecture and Engineering)



ฟื้นเศรษฐกิจชาติ เกษตรศาสตร์กู้วิกฤต พิชิตโลกร้อน

The Roles of Agriculture Science in Fueling Economic Revival, Resolving the Crisis and Battling Global Warming



# การวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อที่จะหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน Failures Analysis for Service Life of Bearing in Mass Transit Electric Train

สุริยา สารมарт<sup>1</sup> เทอดเกียรติ ลิ้มปิที่ปรากฏ<sup>2</sup>  
Suriya Saramart<sup>1</sup> Terdkiat Limpeteeparakarn<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายในประเทศ ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 6 ปี การวิเคราะห์เริ่มต้นจากการศึกษาลักษณะความเสียหายของตลับลูกปืนโดยอาศัยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสตลับลูกปืนต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานตามระยะเวลาที่กำหนดสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ระดับคือระดับ A, B และ C กล่าวคือระดับ A ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ที่ 1-15% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 3-5 ปี หรือ 300,000 - 500,000 km. ระดับ B ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอยู่ที่ 15-30% จะมีอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 2-3 ปี หรือ 200,000 - 300,000 km. และระดับ C ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30-50% จะมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยจึงไม่นำไปใช้งาน เนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา

## ABSTRACT

This paper presents a method of analyzing the failure of a 6-year used taper roller bearing unit of the shaft in a mass-transit electric train. To identify the failure characteristic, a comparison of the failure area with the full surface area in the load zone is made. Based on the study result, it is found that there are 3 levels of failure types, namely Class A, Class B, and Class C. Class A has a failure area of about 1-15%, and can be used in service for another 3-5 year or 300,000-500,000 km. Class B has about 15-30% and expected to be used for 2-3 year or 200,000-300,000 km. Finally, Class C has a failure area of 30-50% and should not be used in service again.

Key Words: Bearing Service Life, Bearing, Electric Train

S Saramart: siemens-overhaul@hotmail.com

<sup>1</sup>ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า BTS จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

BTS Depot, Chatuchak, Bangkok 10900

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Phatumthani 12110



## คำนำ

ในปัจจุบันการหันมาใช้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนอกจากจะเป็นการลดปัญหาการจราจรติดขัดแล้วยังเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานของประเทศอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันรถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในระยะเวลาหนึ่งก็จำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และรักษามาตรฐานความปลอดภัยของรถไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้า BTS [1] เองซึ่งได้มีการบำรุงรักษาและการตรวจสอบสภาพอยู่สม่ำเสมอแล้วนั้น เมื่อระยะเวลาการใช้งานถึง 6 ปี จะต้องมีการบำรุงรักษาครั้งใหญ่ (Overhaul) เนื่องจากชิ้นส่วนบางชิ้นอาจเกิดข้อบกพร่อง หรือชำรุดก่อนเวลาอันควร หรือจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเพราะถึงระยะเวลาที่ผู้ผลิตได้แนะนำเอาไว้ [2]

โดยส่วนใหญ่แล้วการใช้งานตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้า BTS สามารถใช้งานได้มากกว่าอายุการใช้งานที่ผู้ผลิตแนะนำทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเงื่อนไขและสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเพื่อที่จะจำแนกความเสียหาย [3] และหาอายุการใช้งานที่แท้จริงของตลับลูกปืน รูปที่ 1 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนที่ใช้อยู่ในล้อรถไฟฟ้า รูปที่ 2 แสดงลักษณะตลับลูกปืนที่ติดตั้งอยู่กับเพลาล้อรถไฟฟ้า ซึ่งตลับลูกปืนล่อนนั้นจะต้องมีการตรวจสอบเมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนดก่อนที่จะนำกลับไปใช้งานอีกครั้ง ในการจำแนกความเสียหายนั้นจากการศึกษาข้อมูลที่ได้จากเอกสารของผู้ผลิตตลับลูกปืน (FAG) พบว่าได้มีการแบ่งแยกระดับความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ คือ Class A, B และ C ซึ่งในระดับต่างๆ ได้ระบุอายุการใช้งานไว้ดังนี้ Class A มีอายุการใช้งานประมาณ 1-3 ปี Class B มีอายุการใช้งานประมาณ 6 เดือนถึง 1 ปี ส่วน Class C นั้นไม่นำมาใช้งาน [4] ในงานวิจัยชิ้นนี้จะได้นำวิธีการดังกล่าวมาวิเคราะห์ตลับลูกปืนที่ใช้ในรถไฟฟ้าของประเทศไทยในการจำแนกระดับความเสียหายและหาอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องโดยอาศัยการเก็บข้อมูลการชำรุดที่ซ้ำ ๆ กัน (Repetitive failures) มาทำการวิเคราะห์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อจำแนกสภาพความเสียหายของตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และหาอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของตลับลูกปืนหลังจากการบำรุงรักษาแล้ว



ตำแหน่งที่ติดตั้ง  
ตลับลูกปืน



รูปที่ 1 ตลับลูกปืนแบบ Taper roller bearing unit ที่ใช้ในล้อรถไฟฟ้า รูปที่ 2 ตลับลูกปืนที่ติดตั้งอยู่กับเพลาล้อ

- การหาค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (Mean Time Between Failures; MTBF)

$$MTBF = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (1)$$

$t_1$  คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ 1

$t_2$  คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ 2

$t_n$  คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่  $n$

$n$  คือจำนวนครั้งในการบันทึก

- การกระจายทางสถิติแบบไวบูลล์เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อกำหนดรูปแบบการชำรุดว่า เป็นช่วงเริ่มต้น ช่วงใช้งาน หรือเป็นช่วงการสึกหรอ รูปที่ 3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน โดยสมการที่ 2 เป็นการกระจายทางสถิติแบบไวบูลล์ [5]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right)^\gamma} \quad (2)$$

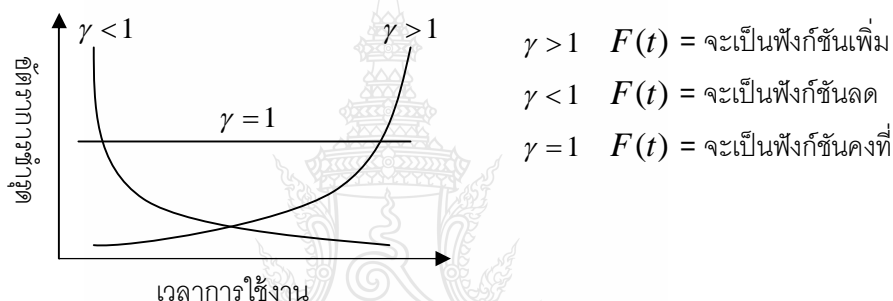
$F(t)$  คือเปอร์เซ็นต์สะสมการชำรุด

$t$  คือเวลาการใช้งานจนถึงงานชำรุด

$\alpha$  คือ Scale parameter หรือ MTBF (มาจากสมการที่ 1)

$\beta$  คือ Location parameter หรือค่าเวลาปลอดภัยการชำรุด

$\gamma$  คือ Shape parameter หรือ Weibull index



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน

ในกรณีที่ชิ้นส่วนนั้นไม่มี Shape life หรือช่วงเวลาปลอดภัยซ่อมบำรุงรักษา เมื่อนำมาใช้งานจะมีการชำรุดได้ทันที  $t = 0$  และ  $\beta$  จะเท่ากับ 0 ซึ่งสมการดังกล่าวนี้จะได้นำไปใช้ในหัวข้อที่ 5 การตรวจวัดและติดตามผล

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

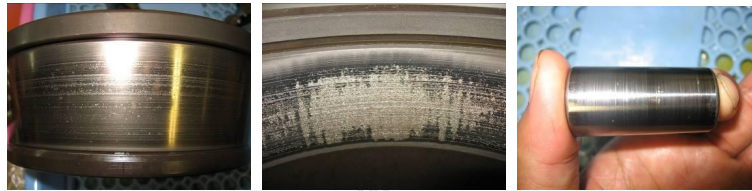
สำหรับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยนั้นได้แบ่งเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้โดยเริ่ม (1) จากการวิเคราะห์สภาพความเสียหายเบื้องต้น เพื่อที่จะหาว่าความเสียหายส่วนใหญ่มีลักษณะใดบ้าง (2) การตรวจวัดค่าเคลียร์เร็นช เป็นการวัดค่าการสึกหรอของชุดตลับลูกปืน (3) การตรวจจสอบโดยการขยายภาพ เพื่อที่จะดูบริเวณความเสียหายโดยการขยายภาพเพื่อวิเคราะห์ดูในระดับโครงสร้าง (4) การจำแนกระดับความเสียหาย เป็นการจำแนกลักษณะความเสียหายโดยอาศัยการระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ (5) การตรวจวัดและติดตามผล เพื่อที่จะได้ทราบถึงอายุการใช้งานที่แท้จริงของตลับลูกปืน

## 1. การวิเคราะห์สภาพความเสียหายเบื้องต้น

จากการศึกษาและพบว่าความเสียหายของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้่าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่พบจะเกิดขึ้นจากสาเหตุหลักดังนี้

### 1.1. ความเสียหายเนื่องจากความล้า (Normal Fatigue)

สาเหตุเกิดจากตลับลูกปืนมีการใช้งานที่ยาวนานเกินอายุการใช้งานหรือรับภาระมากเกินไปโดยผิวของแหวนใน แหวนนอก หรือเม็ดลูกปืน จะหลุดร่อนออกทำให้เกิดรอยเล็กๆ ขึ้นในไม่ช้าก็จะลามไปทั่วตลับลูกปืน ลักษณะเช่นนี้มักทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในขณะทำงาน รูปที่ 4 แสดงลักษณะความเสียหายในส่วนต่างๆ ของตลับลูกปืนเนื่องจากความล้า



(ก) Inner Ring

(ข) Outer Ring

(ค) Roller

รูปที่ 4 ลักษณะความเสียหายที่ผิวมีการหลุดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เนื่องจากความล้า

### 1.2. ความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน (Contamination)

สาเหตุเกิดจากฝุ่นในอากาศ หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่มาจากบริเวณสถานที่ทำงาน ความสกปรกของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้ง สิ่งสกปรกปนเปื้อนในสารหล่อลื่น หรือเศษจากการสึกหรอของตัวตลับลูกปืนเอง ลักษณะความเสียหายจะเป็นรอยขีดหรือเป็นหลุมลึกบนเม็ดลูกปืนและบนรางวิ่งของทั้งแหวนในและแหวนนอกเมื่อใช้เล็บขูดเช็คจะสะดุดมือรู้สึกได้ชัดเจนอันเป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 5



(ก) Inner Ring

(ข) Outer Ring

(ค) Roller

รูปที่ 5 ลักษณะความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน

### 1.3. ความเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่น (Lubrication Failure)

สาเหตุเกิดจากการไหลของสารหล่อลื่นไม่ทั่วถึง หรือทำงานในลักษณะอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นมีคุณภาพลดลงลักษณะของความเสียหายจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของเม็ดลูกปืน แหวนใน และแหวนนอก รูปที่ 6 แสดงลักษณะความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆ (เป็นสีน้ำเงิน หรือสีน้ำตาล) การสึกหรอของเม็ดลูกปืน แหวนใน แหวนนอก เป็นผลทำให้เกิดความร้อนสูง



(ก) Inner Ring

(ข) Outer Ring

(ค) Roller

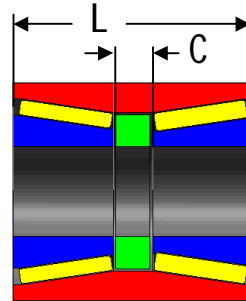
รูปที่ 6 ลักษณะความเสียหายจากการขาดสารหล่อลื่นโดยมีการเปลี่ยนสีของผิว

## 2. การตรวจวัดค่าเคลียร์แรนซ์ (Clearance)

การวัดค่าเคลียร์แรนซ์ของตลับลูกปืนเป็นการวัดค่าการสึกหรอ รูปที่ 7 แสดงเครื่องวัดเคลียร์แรนซ์ โดยจะวัดระยะในแนวแกนของชุดตลับลูกปืนสองตลับซึ่งค่าที่อ่านจาก Dial gage ต้องมีค่าไม่เกิน  $700\ \mu\text{m}$  ถ้าค่ามากกว่านี้แสดงว่าตลับลูกปืนเกิดการสึกหรอมาก [6] ซึ่งจะทำให้ตลับลูกปืนมีระยะเคลียร์แรนซ์ตัวค่อนข้างมากลักษณะเช่นนี้ส่งผลทำให้ตลับลูกปืนเสียหายเร็วขึ้น รูปที่ 8 แสดงระยะ C ที่วัดค่าในแนวแกน เมื่อทำการวัดโดยเครื่องวัดค่าเคลียร์แรนซ์แล้วค่าจะต้องลดลงจากค่าเดิมไม่เกิน  $700\ \mu\text{m}$



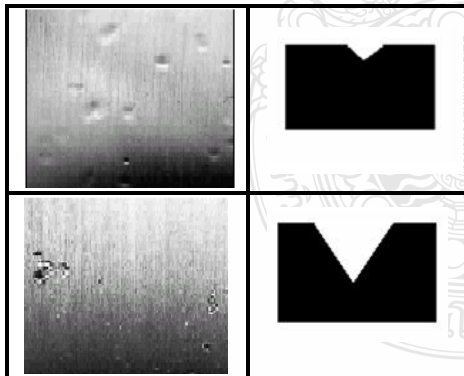
รูปที่ 7 เครื่องวัดเคลียร์แรนซ์



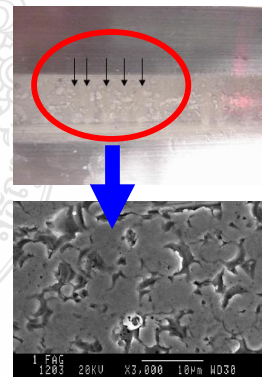
รูปที่ 8 ภาพวาดตลับลูกปืน

## 3. การตรวจสอบโดยการขยายภาพ

รูปที่ 9 แสดงการตรวจดูบริเวณความเสียหายโดยการขยายภาพเพื่อวิเคราะห์ดูความเสียหายโดยรวม และรูปที่ 10 แสดงภาพขยายทำให้สามารถมองเห็นความเสียหายได้อย่างชัดเจนบนเนื้อวัสดุ แต่ในการตรวจสอบวัสดุที่มีจำนวนมากทำได้ยากเนื่องจากต้องใช้เวลาานาน จากศึกษาพบว่าความเสียหายที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าของตลับลูกปืนมักจะมีอายุการใช้งานเหลืออยู่ประมาณ 3-5 ปี ซึ่งจัดอยู่ในระดับของ Class A ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อ 4



รูปที่ 9 ภาพถ่ายแสดงความลึกและการมองด้านข้าง [7]

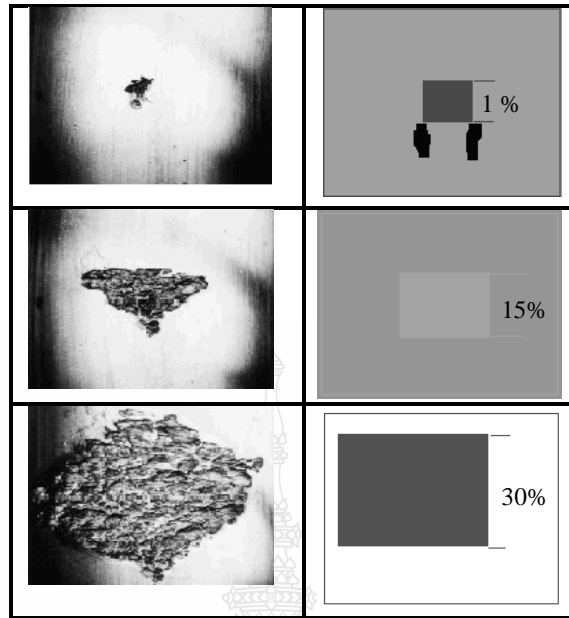


รูปที่ 10 ภาพขยายความละเอียดขนาด  $10\ \mu\text{m}$  [8]

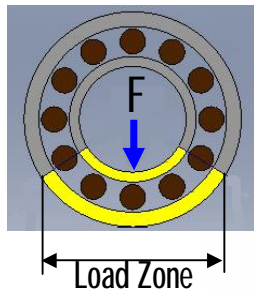
## 4. การจำแนกระดับความเสียหายโดยอาศัยการระบุเป็นเปอร์เซ็นต์

หลักการที่ใช้พิจารณานั้นจะให้ความสำคัญกับตัวรางนอก ตัวรางใน และตัวเม็ดลูกปืนตามลำดับเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นของรางนอกจะมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายมากที่สุด รูปที่ 11 แสดงให้เห็นบริเวณความเสียหายของพื้นผิวบนตลับลูกปืนโดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ เพราะบริเวณรับภาระไม่มีการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 12 ภาพแสดงบริเวณ Load Zone ส่วนรางในนั้นจะเกิดขึ้นตลอดเส้นรอบวงเนื่องมาจากการหมุน และตัวเม็ดลูกปืนเองก็เหมือนกันกับตัวรางในและจะมีความคล้ายคลึงกันทุกเม็ด การแบ่งแยกระดับนั้นได้อ้างอิงข้อมูลการใช้งานในต่างประเทศและบริษัทผู้ผลิตตลับลูกปืนโดยจำแนกความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ คือระดับ A, B และ C ซึ่งระดับ

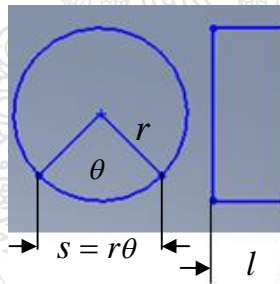
A เปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระโหลดอยู่ที่ 1-15% ระดับ B เปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 15-30% และระดับ C มีเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 30-50% ซึ่งระดับ C มีความเสียหายค่อนข้างมากจึงไม่น่ากลับไปใช้งาน เนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา รูปที่ 13 แสดงการหาพื้นที่ความเสียหายบริเวณ Load Zone



(ก) รูปจากกล้องขยายที่แสดงความเสียหาย [9] (ข) วิธีการประเมินความเสียหายเป็นเปอร์เซ็นต์  
รูปที่ 11 ภาพขยายบริเวณความเสียหายโดยเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระโหลด



รูปที่ 12 บริเวณ Load Zone



รูปที่ 13 การหาพื้นที่ความเสียหายบริเวณ Load Zone

$$A = ls \quad (3)$$

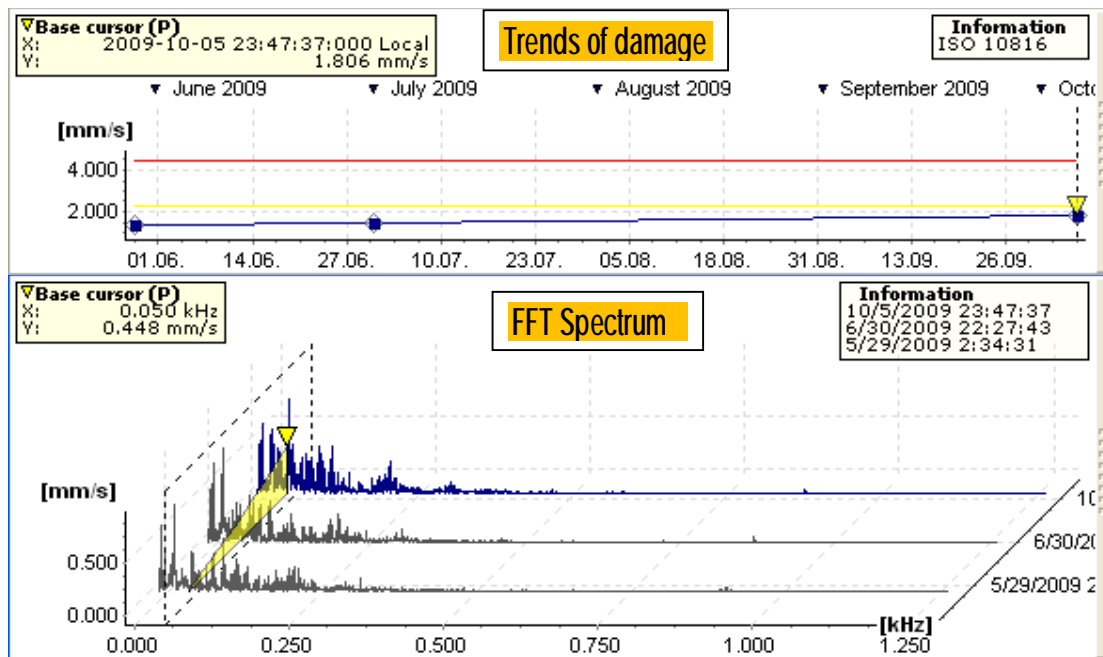
- A คือพื้นที่ความเสียหาย
- S คือความยาวบริเวณ Load Zone
- l คือความกว้างของหน้าสัมผัส
- r คือรัศมีของดัลบลูกปืน
- $\theta$  คือองศาบริเวณ Load Zone

### 5. การตรวจวัดและติดตามผลของดัลบลูกปืนที่บำรุงรักษาแล้วและนำกลับไปใช้งาน

การตรวจสอบความเสียหายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้ใช้การวัดการสั่นสะเทือน (Vibration analysis) โดยการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง[10] รูปที่ 14 แสดงกราฟแนวโน้มของความเสียหายและกราฟสเปกตรัม โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างค่า Amplitude กับค่าของเวลา(ระยะห่างในการวัดแต่ละครั้ง) ส่วนกราฟสเปกตรัมนั้นจะเปรียบเทียบระหว่างค่า Amplitude กับความถี่ และระยะห่างในการวัดแต่ละครั้งเพื่อแสดงให้เห็นค่าความเสียหายที่เพิ่มขึ้นโดยอ้างอิงกับมาตรฐาน ISO 10816 จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนมาวิเคราะห์ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบไวบูลล์ ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อกำหนดรูปแบบการชำรุดว่า เป็นช่วงเริ่มต้น ช่วงใช้งาน หรือเป็นช่วงการสึกหรอ จากตัวอย่างข้อมูลที่ทำการศึกษาพบว่าค่า Shape parameter จะมีค่ามากกว่า 1 ( $\gamma > 1$ ) แสดงให้เห็นว่าการชำรุดนั้นเป็นช่วงการสึกหรอ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการสั่นสะเทือนที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากการวัดแต่ละครั้งไปจนถึงดัลบลูกปืนเกิดความเสียหาย และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ซึ่งได้นำมา



ทำนายช่วงอายุการใช้งานที่คาดว่าจะใช้ต่อไปได้อีก เนื่องจากไม่สามารถที่จะถอดตั้บลูกปืนออกมาดูภายนอกได้ เพราะมีความยุ่งยากและใช้เวลานาน ในขณะที่เดียวกันตั้บลูกปืนต้องไม่เกิดความเสียหายในขณะที่ที่รอกวิ่งให้บริการ อยู่จนถึงขั้นต้องหยุดให้บริการ นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดอุณหภูมิโดยใช้สติ๊กเกอร์วัดอุณหภูมิเพื่อเป็นการ ตรวจสอบช่วยอีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 14 กราฟแนวโน้มความเสียหาย และกราฟสเปกตรัม

### ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาตั้บลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลา 6 ปี มีตั้บลูกปืนจำนวน 840 ลูก ที่ทำการบำรุงรักษาไปแล้ว พบว่าสามารถนำกลับไปใช้ได้ถึง 70% โดยแบ่งเป็น Class A 60% Class B 10% นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนและค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (MTBF) แสดงให้เห็นว่า อายุการใช้งานของตั้บลูกปืน Class A สามารถใช้งานได้ในช่วง 3-5 ปี โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากจำนวนตั้บลูกปืนที่นำกลับมาใช้งานทั้งหมด 60% ต่ำกว่า 30% เริ่มเสียหายในช่วงหลัง 3 ปี นับจากเริ่มใช้งาน และมากกว่า 30% ที่ใช้งานได้ถึง 5 ปี ส่วน Class B สามารถที่จะใช้งานได้อีก 2-3 ปี จากจำนวนตั้บลูกปืนที่นำกลับมาใช้งานทั้งหมด 10% ต่ำกว่า 5% เริ่มเสียหายในช่วงปีที่ 2 นับจากเริ่มใช้งาน และมากกว่า 5% ที่สามารถใช้งานได้ถึง 3 ปี จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า จากสภาพการใช้งานของรถไฟฟ้าในประเทศไทยซึ่งมีความแตกต่างกับการใช้งานในต่างประเทศ เป็นผลให้อายุการใช้งานของตั้บลูกปืนล้อที่ใช้งานภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ อายุการใช้งานของตั้บลูกปืนมีความแตกต่างกันดัง ตารางที่ 1 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่หรือระยะทาง หลังจากผ่านการบำรุงรักษาแล้ว จากการนำข้อมูลการใช้งานในต่างประเทศและบริษัทผู้ผลิตตั้บลูกปืนมาใช้ในการจำแนกแล้วนั้น แต่ทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้มีการเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหาย โดยควรให้ความสำคัญกับความเสียหายเนื่องจากความล้าเป็นอันดับต้นๆ[11] ก่อนเพราะว่าความเสียหายในลักษณะนี้จะไม่มีการแก้ไข ตามด้วยความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อน ความเสียหายในลักษณะนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการทำความสะอาดและเปลี่ยนสารหล่อลื่นใหม่ และความเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่น ก็สามารถที่จะแก้ไขได้โดยการเพิ่มสารหล่อลื่นเช่นเดียวกัน ส่วนการแบ่งระดับของความเสียหายนั้นควรมีการเพิ่มระดับความ

เสียหายออก เป็น 4 ระดับ โดยการเพิ่ม Class D ขึ้นมาอีกหนึ่งระดับกล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30%-40% ให้จำแนกเป็น Class C ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในกรณีฉุกเฉินได้ในช่วง 1-3 เดือน และถ้ามากกว่า 40% ขึ้นไปให้เป็น Class D ซึ่งห้ามนำกลับไปใช้งาน และจากความเสียหายเนื่องจากความล้าบริเวณพื้นที่รับภาระจริงของตลับลูกปืน (Load Zone) ในการใช้งาน น่าจะมีความเป็นไปได้ในการทำวิจัยเพื่อยืดอายุการใช้งานโดยการเปลี่ยนพื้นที่รับภาระของตลับลูกปืน

ตารางที่ 1 อายุการใช้งานที่เหลืออยู่หรือระยะทางหลังจากผ่านการบำรุงรักษา

ระดับ(Class)	การใช้งานหลังจากผ่านการบำรุงรักษา	
	อายุการใช้งานที่เหลืออยู่	ระยะทางที่ใช้ได้อีก
A	3-5 ปี	300,000-500,000 Km.
B	2-3 ปี	200,000-300,000 Km.
C	ไม่แนะนำให้ใช้งาน	

### สรุป

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและถึงระยะเวลาทำการบำรุงรักษาตามกำหนดของผู้ผลิต พบว่าสามารถที่จะแบ่งระดับของความเสียหายออกได้เป็น 3 ระดับคือ Class A, B และ C โดยที่ตลับลูกปืนที่เป็น Class A เมื่อผ่านการบำรุงรักษาแล้วสามารถนำใช้งานได้อีก 3-5 ปี Class B 2-3 ปี ส่วน Class C ไม่นำไปกลับไปใช้งานอีก แต่ทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้แบ่งระดับออกเป็น 4 ระดับกล่าวคือให้เพิ่ม Class D เข้าไปอีก 1 ระดับเพื่อที่จะสามารถนำกลับไปใช้ในกรณีฉุกเฉิน และควรจะมีการทำวิจัยเพื่อยืดอายุการใช้งานโดยการเปลี่ยนพื้นที่รับภาระของตลับลูกปืน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] BTS บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ <http://www.bts.co.th/th/index.asp>
- [2] Siemens Ltd. ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้างุดจจักร 2551.
- [3] รัชสรรค์ โพธิกุล "ชุดประลองการรับภาระของลูกปืน" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2549:1-5.
- [4] Bearing Failure Analysis FAG industrial service.<http://www.fag.com/content.fag.de/en/index.jsp2007>.
- [5] ปานเพชร ชินินทร เอกสารการสอน "เทคโนโลยีการบำรุงรักษา (Maintenance Technology)" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล 2548.
- [6] "The commitment of SKF to the world rail industry,"/2006.//[Online].//Available: /  
/////http://www.railways.skf.com/portal/skf/home/industries.html.//Retrieved July 2008.
- [7] Rolling bearing damage "contamination of raceways" 2007.
- [8] "Normal fatigue of the running surfaces" <http://www.schaeffler.com> 2008.
- [9] Schaeffler Gruppe basis vibration analysis hands on with FAG detector III 2007.
- [10] Viktor Gerdun. and Others " Failures of Bearing " Engineering Failure Analysis 2007. 884-894.
- [11] Takafumi Nagatomo and David G. Toth "Bearing Damage" Quarterly Report of RTRI Vol. 47 2006, No. 3 pp.119-124.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายสุริยา สารมาตย์
วัน เดือน ปีเกิด	11 กุมภาพันธ์ 2527
ที่อยู่	93/4 บ.หนองแสง ต.หนองบัวแก้ว อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม 44110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ. 2550
ความชำนาญเฉพาะทาง	1. การวิเคราะห์ความเสียหายและบำรุงรักษาตลับลูกปืน (Analysis and Refurbishment) 2. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) 3. การปรับดุลยภาพในเครื่องจักร (Balancing) 4. การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Testing)
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกลแผนกซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า (BTS) บริษัท Siemens Limited
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	สุริยา สารมาตย์ และเทอดเกียรติ ลิ้มปิที่ปราการ, "การวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อที่จะหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน", การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, 3-5 กุมภาพันธ์ 2553, หน้า 83-90.