

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องทดสอบอายุการใช้งานของตลับลูกปืนสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

Testing Machine for Service Life of Railroad Bearing for Mass Transit Electric Train

โดย

เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ

ศุริยา สารมาตย์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2553

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

บทคัดย่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ส่วนที่ 1 รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย เครื่องทดสอบอายุการใช้งานของตลับลูกปืนสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
Testing Machine for Service Life of Railroad Bearing for Mass Transit Electric Train
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปี.....2553..... จำนวนเงิน.....210,000.....บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี 9 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2552 ถึง 30 มิถุนายน 2554

รายนามผู้ร่วมโครงการวิจัยย่อย พร้อมทั้งหน่วยงานที่สังกัดและหมายเลขโทรศัพท์

1.1 หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล : ดร. เทอดเกียรติ ลิ้มปีทีปราการ
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อยู่: ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์/โทรสาร : 02-549-4419 / 02-549-3420
E-mail address : terdkiat.rmutt@gmail.com
ความรับผิดชอบในโครงการ (คิดเป็นร้อยละ 60)

1.2 ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นาย สุริยา สารมาดย์
หน่วยงาน: นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อยู่: ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์/โทรสาร : 02-549-4419 / 02-549-3420
E-mail address: siemens-overhaul@hotmail.com
ความรับผิดชอบในโครงการ (คิดเป็นร้อยละ 40)

1.3 หน่วยงานหลัก

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่อยู่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์/โทรสาร : 02-549-4419 / 02-549-3432

ส่วนที่ 2 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกความเสียหายของตลับลูกปืนและวิเคราะห์หาตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของตลับ จากการศึกษตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลา 6 ปี พบว่าความเสียหายของตลับลูกปืนจำแนกได้เป็น 3 ระดับตามลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รับแรง คือ Class A B และ C โดยที่แต่ละระดับมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ที่ 1-15% 15-30% และ 30-50% ตามลำดับ นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้นำอาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนมาใช้จำแนกระดับความเสียหายให้มีความชัดเจนเพิ่มขึ้นอีกด้วย จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (Mean time between failures: MTBF) พบว่า อายุการใช้งานของตลับลูกปืน Class A สามารถใช้งานได้อีกในช่วง 300,000-500,000 กิโลเมตร Class B สามารถใช้งานได้อีกในช่วง 200,000-300,000 กิโลเมตร ส่วนใน Class C ไม่แนะนำให้นำกลับมาใช้อีก นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบตลับลูกปืนเครื่องที่ให้แรงแนวรัศมีได้ 3,000 นิวตันและแรงในแนวแกนได้ 1,000 นิวตันอีกด้วยเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของตลับลูกปืนในอนาคตอีกด้วย

The research objectives are twofold: to identify damage type of the tapered roller bearings and to analysis key factors influencing the bearing lifetime. By studying 6 –year used roller bearings , it was found that the damage of the bearings can be classified into three levels according to the damage of the load zone surface area, namely Class A, B, and C, which have percentage damage to the surface area about 1-15%, 15-30% and 30-50%, respectively. Moreover, the researchers used vibrational signal analysis to clarify the damage level. The analysis of the mean time between failures: MTBF found that the lifetime of the Class A roller bearing can be used again in the period of 300,000 to 500,000 km, Class B in the range of 200,000 to 300,000 km, and Class C is not recommended to reuse again. In addition, the researchers also designed and built the roller bearing testing machine that can apply a radial force of 3000 N and an axial force of 1000 N in order to study the behavior of roller bearding in future.

ส่วนที่ 3 คำสำคัญ

อายุการใช้งานของลูกปืน, การสั่นสะเทือน, รถไฟฟ้า
Bearing Service Life, Vibration, Electric Vehicle

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553 ผู้จัดทำโครงการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และความสะดวกต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

นอกจากนี้ ยังขอบคุณนักศึกษาภาคสมทบ ซึ่งก็คือ นายคัมภีร์ รักไทย และนายวัชร พันธ์จันทร์ ที่ได้เข้ามามีส่วนร่วมเป็นผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการ โดยเฉพาะนายคัมภีร์ รักไทย ที่ทุ่มเทแรงกายและแรงใจ ช่วยให้โครงการนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากโครงการวิจัยฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแก่ประเทศชาติ ศาสนา และพระมหากษัตริย์ อีกทั้งแก่ประชาชน ผู้เสียภาษีทุกท่าน

ผู้จัดทำ



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญเรื่อง

สารบัญตาราง

สารบัญรูป

บทคัดย่อ

บทที่ 1 บทนำ

- | | |
|--|---|
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย | 3 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 5 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย | 5 |
| 1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย | 5 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 7 |

บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

- | | |
|--|----|
| 2.1 ตลับลูกปืน | 8 |
| 2.2 การสั่นสะเทือนและการวิเคราะห์สัญญาณ | 9 |
| 2.3 ตัวแปลที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน | 15 |
| 2.4 การใช้สัญญาณ Demodulation Enveloping วิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน | 17 |
| 2.5 ทบทวนวรรณกรรม | 19 |

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

- | | |
|---|----|
| 3.1 การจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน | 24 |
| 3.2 การจำแนกระดับความเสียหาย | 25 |
| 3.3 วิธีการดำเนินงานในการจำแนกความเสียหาย | 26 |
| 3.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) | 26 |
| 3.5 วิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือน | 27 |
| 3.6 การวัดการสั่นสะเทือน | 29 |

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 สัญญาณความถี่จากการวัด	31
3.8 การวิเคราะห์ความเสียหาย	32
3.9 การออกแบบเครื่องทดสอบตลับลูกปืนแบบรับแรงในแนวรัศมีและแนวแกน	32
บทที่ 4 การทดสอบและผลการวิจัย	
4.1 การจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน	38
4.2 การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินหาอายุการใช้งาน	41
4.3 ขั้นตอนการจัดทำเครื่องทดสอบตลับลูกปืน	49
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ประวัตินักวิจัย	ก-1



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการวัดตลับลูกปืน	1-31
2 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่หรือระยะทางที่ใช้ได้อีกหลังจากผ่านการบำรุงรักษา	1-38
3 แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) ของ Class ต่างๆ	1-41
4 แสดงการคำนวณหาค่าความถี่ในชิ้นส่วนต่างๆของตลับลูกปืน	1-44
5 แสดงค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายก่อนและ หลังการบำรุงรักษาโดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง)	1-48
6 ค่าที่ได้จากการทดลองเครื่องทดสอบตลับลูกปืนแบบรับแรงกระทำในแนวรัศมี และแรงกระทำในแนวแกนที่ค่าคงที่ 1,000 นิวตัน	1-51



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 แสดงรูปรถไฟฟ้าของ BTS	1-4
2 แสดงตลับลูกปืนล้อรถไฟฟ้า	1-4
3 แสดงลักษณะตัวเพลาล้อรถไฟฟ้า	1-6
4 แสดงการรับแรงของตลับลูกปืน	1-6
5 แสดงลักษณะการรับแรงของตลับลูกปืน	1-8
6 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนกาบ	1-8
7 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้ง	1-9
8 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบเจอร์นัล	1-9
9 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบกันรุน	1-9
10 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบลิเนียร์	1-9
11 แสดงกราฟการขจัด	1-11
12 แสดงกราฟความเร็ว	1-12
13 แสดงกราฟความเร่ง	1-12
14 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน	1-13
15 แสดงกราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่	1-14
16 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่	1-14
17 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ	1-15
18 แสดงตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing	1-15
19 แสดงลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน	1-17
20 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping	1-18
21 แสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัยที่แบ่งเป็น 2 ส่วน	1-23
22 แสดงขั้นตอนการจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อประเมินอายุการใช้งาน	1-24
23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน	1-26
24 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน	1-27
25 เครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe)	1-28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
26 ชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อน	1-28
27 ชุดอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกลึงล้อ	1-28
28 เครื่องมือวัดและบันทึกผลการสั่นสะเทือน	1-29
29 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	1-29
30 ซอฟแวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล	1-29
31 แสดงการติดตั้งหัววัดในแนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial)	1-30
32 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตั้บลูกปืนในขบวนรถ	1-30
33 แสดงความถี่จากการวัด	1-31
34 แสดงลักษณะการรับแรงของจุดรองรับกระบอกนิวแมติกส์	1-33
35 แสดงลักษณะการส่งกำลังของมอเตอร์	1-34
36 แสดงลักษณะการรับแรงของเพลลา	1-35
37 แสดงจุดการรับแรงของเพลลา	1-35
38 แสดงการรับแรงในลักษณะคานยื่น	1-35
39 แสดงระยะในการรับแรงของคาน	1-36
40 แสดงลักษณะการ โกงของเพลลา	1-37
41 แสดงความเร็วรอบที่มีผลต่อค่าการสั่นสะเทือน	1-39
42 แสดงผลในช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ	1-40
43 การเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตั้บลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM	1-41
44 กราฟความถี่ใน Time Domain ของตั้บลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM	1-43
45 ขั้นตอนในการแสดงความถี่ของชิ้นส่วน	1-45
46 กราฟความถี่ใน Spectrums Domain ของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 150 RPM	1-46
47 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนกับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ	1-47
48 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใน Time Domain กับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ	1-47
49 กราฟประเมินอายุการใช้งาน	1-49
50 แสดงการตัดเหล็กโครงสร้าง	1-50
51 แสดงการประกอบคัปปลิง	1-50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
52 แสดงการประกอบชุดสวิตช์ไฟฟ้า	1-50
53 แสดงการประกอบกระบอกนิวแมติกส์	1-50
54 แสดงการทดสอบด้านข้าง	1-51
55 แสดงการทดสอบด้านบน	1-51
56 แสดงการทดสอบด้านเอียงซ้าย	1-51
57 แสดงการทดสอบด้านเอียงขวา	1-51



บทที่ 1

บทนำ

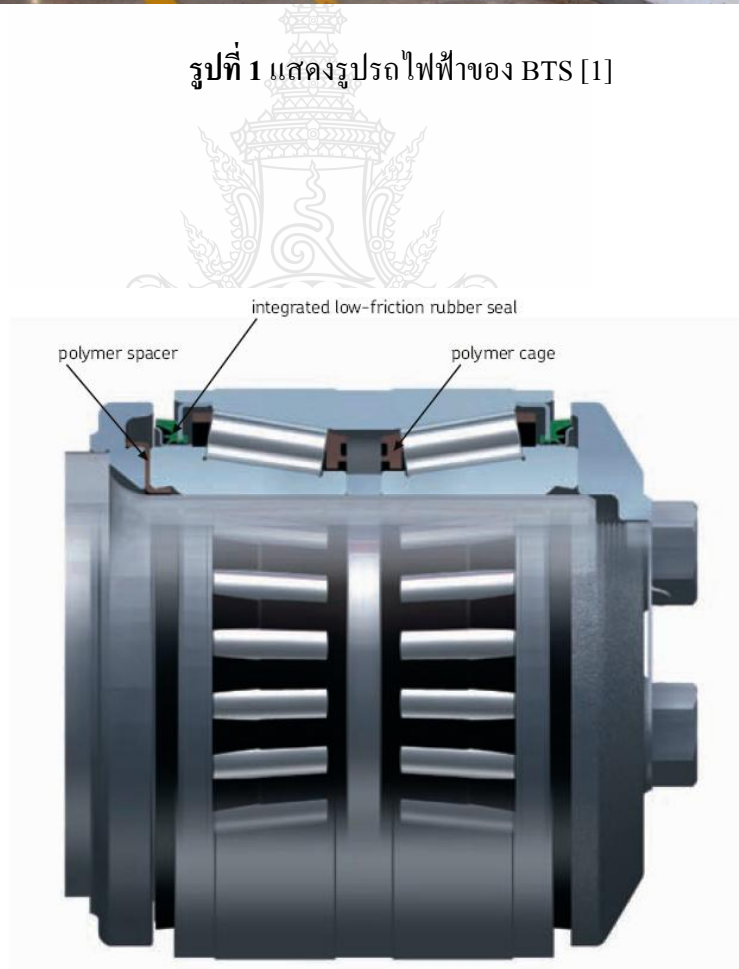
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จากปัญหาราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา ทำให้ทุกภาคส่วนให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานฟอสซิล การหันมาใช้ยานยนต์ที่ใช้พลังงานอื่นทดแทนพลังงานจากฟอสซิลน่าจะเป็นทางออกที่ดีที่สุด พลังงานไฟฟ้าถือว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้า รถมินิคอล์ฟ เรือไฟฟ้า หรือรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนั้นไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งถือเป็นการแก้ปัญหามลพิษระยะยาว การหันมาใช้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนอกจากเป็นการลดปัญหาการจราจรติดขัดแล้ว ยังเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานของประเทศอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ตัวอย่างเช่น การใช้รถไฟฟ้า BTS และการใช้รถไฟฟ้าใต้ดิน MRT

เมื่อรถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในระยะเวลาหนึ่งก็จำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และรักษามาตรฐานของความปลอดภัยของผู้โดยสารให้ได้ ตามเกณฑ์มาตรฐานของรถไฟฟ้า รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของรถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลา 9 ปีแล้ว และได้รับการบำรุงรักษา และตรวจสอบสภาพอยู่เสมอ แต่จากการใช้งานมาเป็นระยะเวลานานชิ้นส่วนบางชิ้นอาจเกิดข้อบกพร่อง หรือชำรุดก่อนเวลาอันควร หรือจำเป็นต้องเปลี่ยนออก อาทิเช่น เบรก ล้อ ตลับลูกปืน ล้อ ฯลฯ ตลับลูกปืน (Bearing) ของล้อเองซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการรับน้ำหนักจากตัวรถ รูปที่ 2 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งถ้าตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย ตัวรถก็จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้และผลที่ตามมาคือจะต้องหยุดรถเพื่อที่จะทำการซ่อมบำรุงและเปลี่ยนลูกปืนใหม่ ส่งผลเสียอย่างยิ่งในการดำเนินธุรกิจทั้งของบริษัทผู้ดูแลบำรุงรักษาตัวรถ และบริษัทที่รับสัมปทานในการเดินรถ และนอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารด้วย ถ้าหากลูกปืนล้อเกิดความเสียหายในขณะที่รถไฟฟ้าวิ่งอยู่บนรางก็มีโอกาสสูงที่จะก่อให้เกิดอุบัติเหตุและอาจจะสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของตลับลูกปืนล้อที่ผ่านการใช้งานและได้รับการบำรุงรักษาแล้ว เพื่อที่จะนำกลับไปใช้งานอีกครั้ง เพื่อที่จะได้ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืนล้อรถไฟฟ้าและความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากการวิเคราะห์อายุการใช้งานของตลับลูกปืนที่ใช้กับรถไฟฟ้าซึ่งมีขนาดใหญ่ ยังจะสามารถนำไปใช้กับงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานตลับลูกปืนในการรับภาระที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 1 แสดงรูปรถไฟฟ้าของ BTS [1]



รูปที่ 2 แสดงตลับลูกปืนล้อรถไฟฟ้า [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อทบทวนวรรณกรรม และข้อมูลเกี่ยวกับตลับลูกปืนที่ใช้กับรถไฟฟ้าในระบบขนส่งมวลชน
- 2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตลับลูกปืนล้อที่ผ่านการใช้งานและได้รับการบำรุงรักษาแล้วของรถไฟฟ้า
- 2.3 เพื่อจำแนกสภาพของตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว
- 2.4 เพื่อสร้างเครื่องทดสอบตลับลูกปืนภายใต้สภาวะการทำงานจำลองที่รับแรงได้ทั้งแนวแกนและแนวรัศมี
- 2.5 เพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 3.1 แรงกระทำมีทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี อยู่ระหว่าง 10,000 - 70,000 นิวตัน
- 3.2 ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบไม่เกิน 150 รอบต่อนาที
- 3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส
- 3.4 ตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวอย่างที่ได้รับการบำรุงรักษาแล้ว
- 3.5 การทดสอบเป็นแบบสถิติศาสตร์

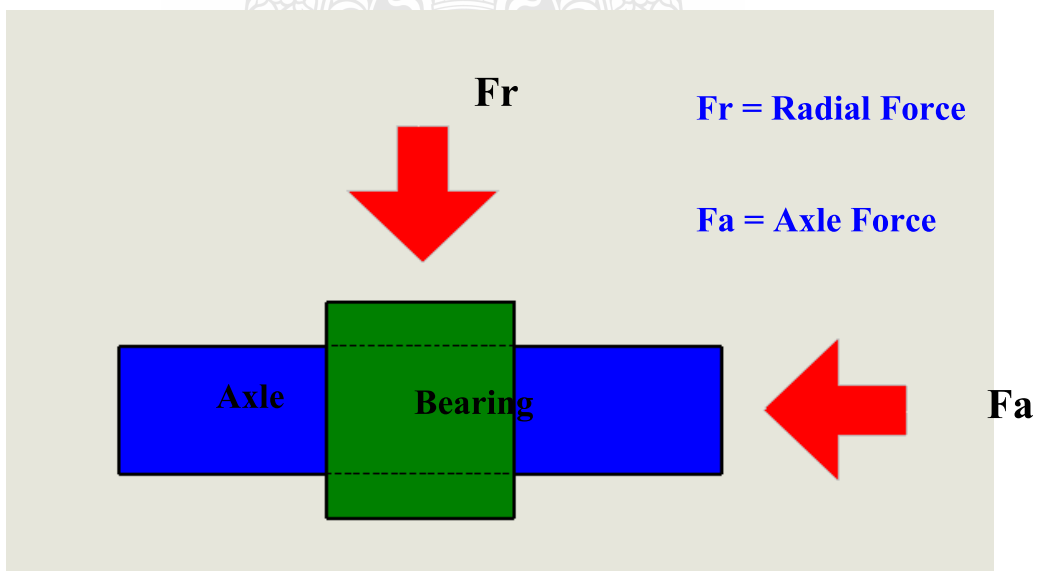
1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งาน และรูปแบบความเสียหาย ของตลับลูกปืนขนาดใหญ่ อาทิเช่น ในล้อรถไฟฟ้าของระบบขนส่งมวลชน โดยทั่วไป ลูกปืนใหม่จะมีข้อมูลจากผู้ผลิต ไม่ว่าจะ เป็น วิธีการบำรุงรักษาและข้อกำหนดในการใช้งาน แต่หลังจากที่ได้ผ่านการใช้งานมาแล้วระยะหนึ่ง และได้ทำการบำรุงรักษาแล้วนั้น ข้อมูลจากผู้ผลิตไม่สามารถที่จะนำมาใช้อ้างอิงสำหรับการบำรุงรักษาครั้งต่อไปได้ เพราะการสึกหรอของตลับลูกปืนจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและสภาวะแวดล้อม ในกรณีที่ตลับลูกปืนขาดการบำรุงรักษาที่ดี ก็มีโอกาสูงที่ลูกปืนจะเกิดการเสียหายก่อนระยะเวลาอันควร ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ตลับลูกปืน นอกจากตัวรถจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้แล้วยังส่งผลกระทบต่อโครงกระดูกด้วย

การวิจัยครั้งนี้ นอกจากจะศึกษาทางทฤษฎีแล้วยังจะทำการทดสอบหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตลับลูกปืนในเพลลาของล้อรถไฟฟ้า ในขณะที่รูปที่ 4 แสดงลักษณะของแรงที่กระทำกับตลับลูกปืนทั้งในแนวแกน (Axle Force) และแนวรัศมี (Radial Force) การทดสอบมี 2 รูปแบบ คือ แบบแรกเป็นการทดสอบตลับลูกปืนจริง ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องกลึงล้อในโรงซ่อมบำรุงมาทำการหมุนล้อรถไฟฟ้า และแบบที่สองเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตลับลูกปืนชนิดเดียวกันแต่มีขนาดเล็กกว่าของจริง การทดสอบนอกจากจะช่วยทำให้เข้าใจรูปแบบของความเสียหายแล้วยังทำให้สามารถวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืนที่ผ่านการบำรุงรักษาแล้ว



รูปที่ 3 แสดงลักษณะตัวเพลาล้อรถไฟ [2]



รูปที่ 4 แสดงการรับแรงของตลับลูกปืน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น ตัวเครื่อง องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัย การเผยแพร่ในวารสาร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 5.1 ได้เครื่องทดสอบตลับลูกปืนที่อยู่ภายใต้สภาวะการทำงานจำลอง
- 5.2 ได้องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานของตลับลูกปืนในแนวแกน และแนวรัศมี
- 5.3 เป็นประโยชน์กับบริษัทผู้ดูแลบำรุงรักษาตัวรถ และบริษัทที่รับสัมปทานในการเดินรถ
- 5.4 เผยแพร่บทความในงานประชุมวิชาการทั้งภายในหรือนอกประเทศไม่น้อยกว่า 1 บทความ การเผยแพร่นั้นนอกจากจะกระทำในรูปของการเปิดให้ศึกษาดูงานจากคณาจารย์ นักวิจัย วิศวกร และประชาชนผู้สนใจทั่วไปเพื่อให้ทราบหลักการ โดยทั่วไป



บทที่ 2

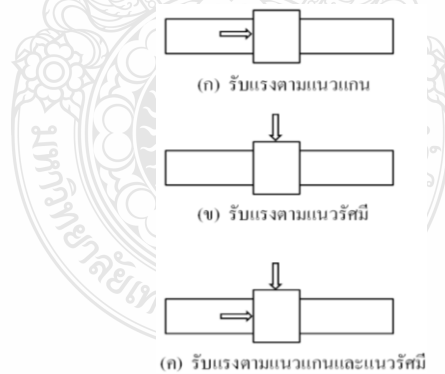
ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในเนื้อหาของบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของตลับลูกปืน การสันสะเทือนและการวิเคราะห์สัญญาณ การศึกษาตัวแปลที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน การใช้สัญญาณ Demodulation Enveloping วิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน รวมทั้งทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องด้วย

2.1 ตลับลูกปืน [4]

ตลับลูกปืน (Bearing) เป็นอุปกรณ์ซึ่งช่วยในการค้ำจุนแกนที่มีการหมุน หรืออีกลักษณะหนึ่งเป็นตัวค้ำจุนการเลื่อนไปมาระหว่างชิ้นงานสองชิ้น นอกจากหน้าที่ในการค้ำจุนแล้ว ตลับลูกปืนยังถูกออกแบบให้มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบที่แยกกันเป็น 2 ชั้น ให้ปรากฏว่าเกิดความต้านทานฝืดระหว่างผิวงานทั้งสองน้อยที่สุด กลไกส่วนใหญ่ด้านงานอุตสาหกรรมยังคงมีส่วนซึ่งต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างผิวหน้าสัมผัส พิจารณาตามแรงที่ตลับลูกปืนรับแรงจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. แบริ่งรับแรงในแนวรัศมี (Radial) ดังแสดงในรูป 5 ก
2. แบริ่งรับแรงในแนวแกน (Axial) ดังแสดงในรูป 5 ข
3. แบริ่งรับแรงในแนวรัศมีและแนวแกน (Combination) ดังแสดงในรูป 5 ค



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการรับแรงของตลับลูกปืน

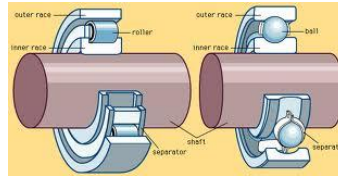
โดยหลักสำคัญแล้วตลับลูกปืนแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. ตลับลูกปืนกบ (Plain Bearing) เป็นลักษณะของผิวหน้าส่วนประกอบชนิดหนึ่งที่เลื่อนไถลบนผิวหน้าของส่วนประกอบอีกชิ้นหนึ่ง ซึ่งระหว่างผิวหน้าที่สัมผัสกันนี้จะลดแรงเสียดทานและการสึกหรอในการใช้งาน



รูปที่ 6 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนกบ

2. ตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้ง (Rolling Element Bearing) ชุดลูกกลิ้งเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกลมหลายขนาดประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างผิวหน้าทั้งสอง เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ได้สะดวกระหว่างผิวงานทั้งสอง ตลับลูกปืนชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าเป็นชนิดต่อต้านความเสียดทาน เพราะที่สัมผัสของตลับลูกปืนชนิดนี้มีน้อย จึงช่วยลดความต้านทานในการเคลื่อนที่



รูปที่ 7 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้ง

3. เจอร์นัลแบร์ริง (Journal Bearing) เป็นตลับลูกปืนซึ่งใช้ค่ามุมการหมุนของแกนเพลลาในการเคลื่อนที่แนวรัศมี



รูปที่ 8 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบเจอร์นัล

4. แบร์ริงกันรุน (Thrust Bearing) เป็นตลับลูกปืนป้องกันการรุนของเพลลา



รูปที่ 9 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบกันรุน

5. ลิเนียร์แบร์ริง (Linear Bearing) เป็นตลับลูกปืนใช้ค่ามุมความสัมผัสการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นส่วนในแนวเส้นตรง



รูปที่ 10 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบลิเนียร์

2.2 การสันนิษฐานและการวิเคราะห์สัญญาณ [5]

ก่อนจะทำการวิเคราะห์การสันนิษฐานในเครื่องจักรกลนั้น จะต้องทำความเข้าใจรูปแบบของกราฟแสดงผลของการสันนิษฐานของเครื่องจักรก่อน ซึ่งถ้าไม่เข้าใจความหมายและความ

เป็นมาของกราฟแล้ว การที่จะทำการวิเคราะห์หาความเสียหายของเครื่องจักรก็จะเป็นไปได้ยากลำบาก ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นไม่สามารถระบุปัญหาที่แท้จริงของเครื่องจักรได้ กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนที่จะนำมาวิเคราะห์หาความเสียหายของเครื่องจักรกล ซึ่งจะประกอบด้วยกราฟโดเมนเวลา (Time Domain Plot) กราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) กราฟแนวโน้ม (Trend Plot) นอกจากกราฟแสดงผลแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญของการสั่นสะเทือน ซึ่งประกอบด้วยความถี่ (Frequency) ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) มุมเฟส (Phase) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักของการสั่นสะเทือน เพื่อช่วยในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล

2.2.1 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

เครื่องจักรกลแบบหมุนทุกชนิดจะมีการสั่นสะเทือน และต้นเหตุของการสั่นสะเทือนก็คือปัญหาต่างๆ ในเครื่องจักรเอง เช่น การไม่สมดุล การเอียงแนวแกน การเอียงศูนย์ ความเสียหายในตลับลูกปืน ความเสียหายของชุดเฟือง แต่ละปัญหาในเครื่องจักรจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกัน สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแสดงส่วนประกอบของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ เราสามารถแบ่งช่วงความถี่บน โดเมนความถี่ออกเป็นสองช่วงกว้างๆ โดยที่แต่ละช่วงความถี่จะปรากฏสัญญาณการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนทางกลต่างชนิดกันดังนี้

ก. โดเมนความถี่ต่ำ (Low Frequency Domain) เป็นช่วงความถี่ต่ำกว่าฮาร์โมนิกอันดับที่สี่ถึงหกของความเร็วรอบการหมุนของเพลลา สัญญาณนั้นจะบอกข้อมูลเกี่ยวกับการไม่สมดุล การเอียงแนวแกน เพลลาแอ่น (Bent Shaft) ความเสียหายในตลับลูกปืน (Bearing Damage) และการหลุดหลวมทางกล (Mechanical Looseness) สัญญาณการสั่นสะเทือนจากสาเหตุเหล่านี้ประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกหรือซับฮาร์โมนิกของความถี่การหมุนของเพลลาที่ประกอบกับชิ้นส่วนที่มีปัญหา

ข. โดเมนความถี่สูง (High Frequency Domain) เป็นช่วงความถี่สูง สัญญาณจะบอกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายในเฟือง (Gear Box) และความเสียหายในตลับลูกปืน สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกของความถี่การขบกันของเฟืองและแถบความถี่รอบข้าง ส่วนสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนประกอบไปด้วย ความถี่ของแหวนใน ความถี่ของแหวนนอก ความถี่เม็ดลูกปืน และความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและโครงสร้าง เมื่อตรวจพบว่าการสั่นสะเทือนมีระดับสูงขึ้น และทราบว่ายู่ในช่วงพิกัดความถี่ใด ก็อาจจะวิเคราะห์และหาว่าความเสียหายเกิดจากอะไร แต่เนื่องจากความซับซ้อนของสัญญาณซึ่งอาจเกิดจากหลายๆ สาเหตุ ดังนั้นการวิเคราะห์ความถี่ด้วยสเปกตรัมอาจจะทำได้ลำบาก จึงต้องใช้วิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการบ่งชี้สาเหตุของความผิดปกตินี้ๆ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ด้วยเซปส์ตรัมซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับอนุกรมของฮาร์โมนิกและแถบความถี่ข้างในสเปกตรัม

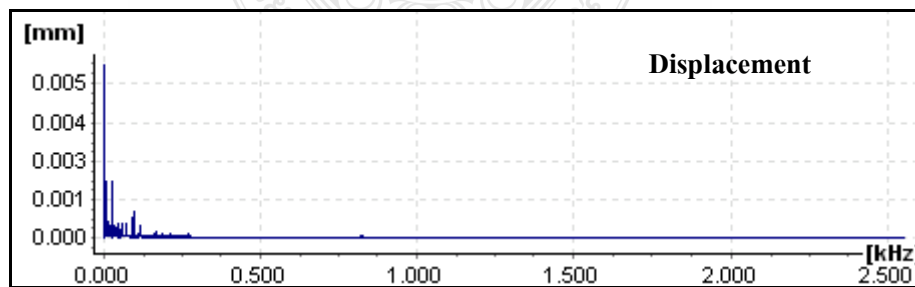
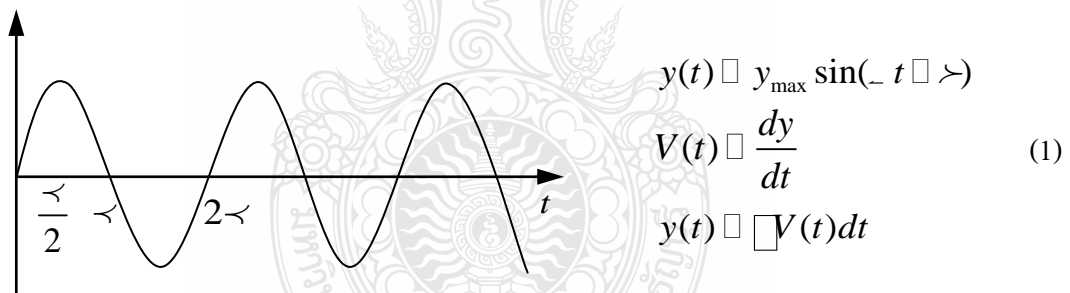
2.2.2 ความถี่ (Frequency)

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนกราฟโดเมนของความถี่ ในที่นี้ก็คือจำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา และหน่วยที่นิยมใช้จะเป็นรอบต่อนาที (CPM) และบางครั้งใช้เป็นรอบต่อวินาทีหรือหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz) ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงแหล่งที่มาและปัญหาของเครื่องจักร ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ถึงปัญหาหรือความเสียหายต่างๆ ในเครื่องจักรกล

2.2.3. ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude)

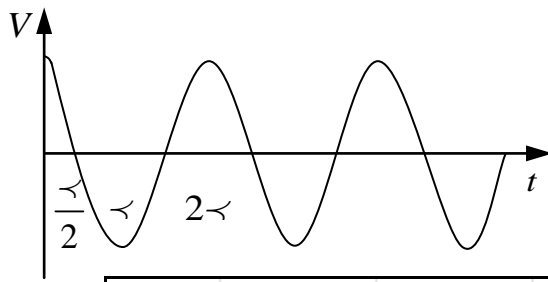
การที่จะบอกถึงระดับความรุนแรงของเครื่องจักรนั้น จะอาศัยการบอกเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน ถ้าขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับภาวะปกติแสดงว่าเครื่องจักรนั้นเริ่มมีปัญหา ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับกันมากที่สุดมีอยู่ 3 แบบคือ

ก. การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) หมายถึงระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือมวลจากจุดสมดุลเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่สูงสุดแล้วเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่ต่ำสุด (Peak to Peak) ซึ่งเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่วัตถุเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ของวัตถุ นั้นๆ ดังสมการที่ 1 และรูปที่ 11 ซึ่งแสดงกราฟการขจัด



รูปที่ 11 แสดงกราฟการขจัด

ข. ความเร็ว (Velocity) หมายถึงความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุ วัตถุ จะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และมีความเร็วสูงสุดในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ซึ่งค่าการขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว ดังสมการ 2 และรูปที่ 12 ซึ่งแสดงกราฟความเร็ว

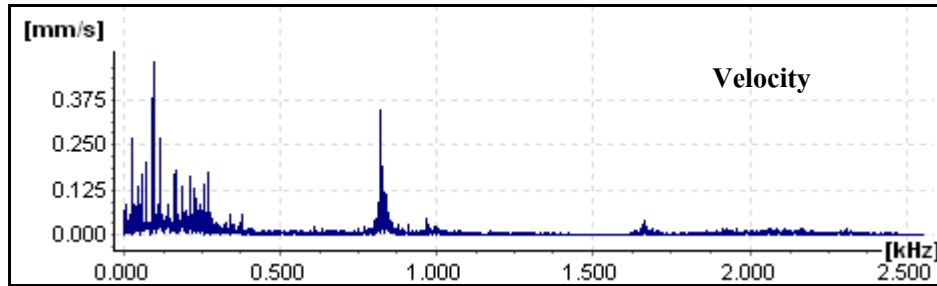


$$V_{\max} = y_{\max} \omega$$

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

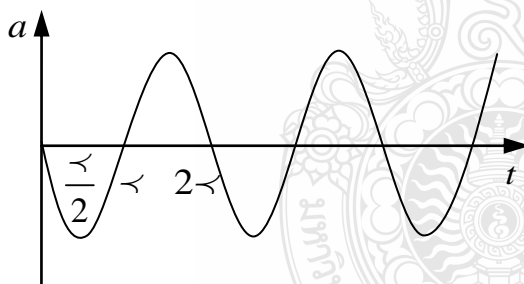
$$V(t) = y_{\max} \omega \sin(\omega t - \phi + \pi/2) \quad (2)$$

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



รูปที่ 12 แสดงกราฟความเร็ว

ค. ความเร่ง (Acceleration) หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุในขณะที่วัตถุที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดเมื่อผ่านจุดสมดุล ดังสมการ 3 และรูปที่ 13 ซึ่งแสดงกราฟความเร่ง

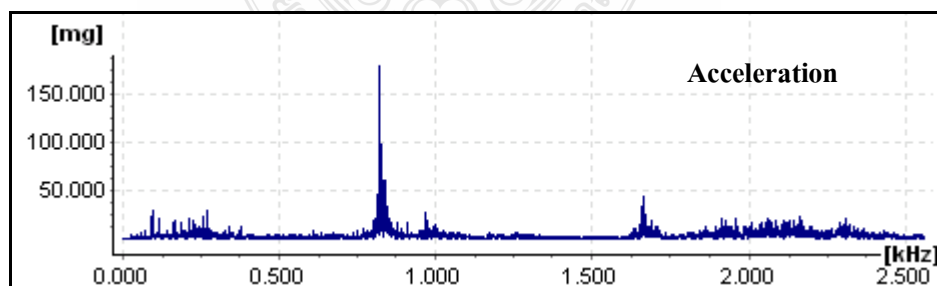


$$a_{\max} = y_{\max} \omega^2$$

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

$$a(t) = y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t - \phi + \pi) \quad (3)$$

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



รูปที่ 13 แสดงกราฟความเร่ง

2.2.4 มุมเฟส (Phase)

สำหรับมุมเฟสของการสั่นสะเทือน คือความแตกต่างของตำแหน่งชิ้นส่วนหรือวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนขึ้นหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกขึ้นหนึ่ง ประโยชน์เรื่องมุมเฟสของการสั่นสะเทือนสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของ

เครื่องจักรได้ เช่น ปัญหาการเอียงแนวแกนของเพลลา ปัญหาการหลวมคลอน ปัญหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร เป็นต้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาการสั่นสะเทือน โดยการทำคุณภาพในเครื่องจักรหมุนอีกด้วย

2.2.5 หน่วยวัดขนาดการสั่นสะเทือน

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

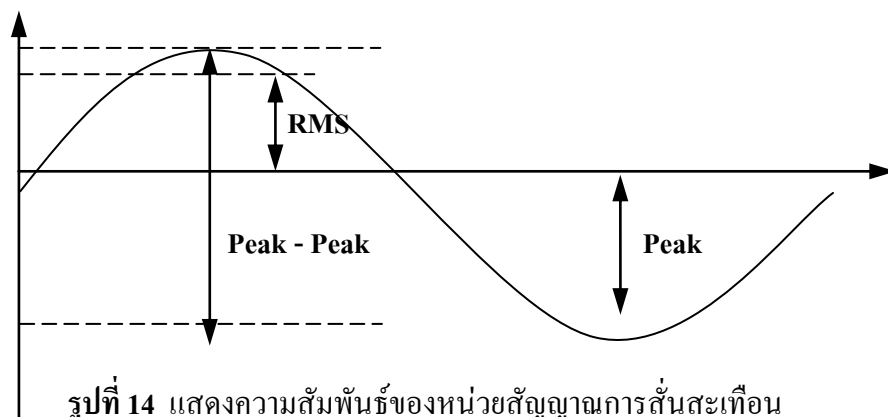
ก. ค่ายอดสูงสุด (Peak) จะบอกค่าระดับสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิง (ศูนย์) โดยไม่ได้คำนึงถึงลักษณะการสั่นสะเทือนแบบอย่างอื่น ซึ่งค่านี้ส่วนมากจะใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การเคาะเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของวัตถุ (Bump Test) เป็นต้น

ข. ค่ายอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดด้านตรงข้าม (Peak to Peak) เป็นค่าขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์กับจุดต่ำสุดของคลื่นไซน์

ค. ค่า RMS (Root Mean Square) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการนำค่าที่วัดได้ในโดเมนเวลา (Time Domain) ที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สองออกมา ดังสมการ

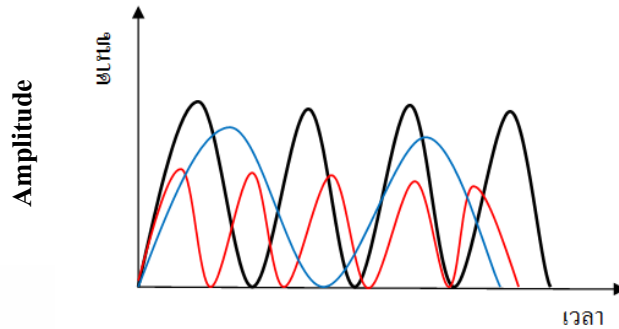
$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t x^2(t) dt} \quad (4)$$

ความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แบบ รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งใช้ในกรณีสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นแบบฮาร์มอนิกรูปไซน์ โดยการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเป็นคาบเหล่านี้ก็จะสามารถแยกออกเป็นผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ของความถี่ได้ตามทฤษฎีของฟูรีเยร์ (Fourier) ดังนั้นความสัมพันธ์และความหมายของหน่วยวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่กล่าวมาแล้วสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้



2.2.6 กราฟโดเมนเวลา

ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดการสั่นสะเทือนกับเวลา โดยแกนนอนจะเป็นแกนของเวลา ส่วนในแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน รูปที่ 15 แสดงกราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่

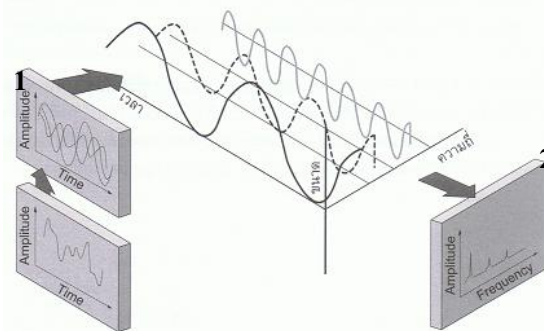


รูปที่ 15 แสดงกราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่

Time

2.2.7 กราฟสเปกตรัม

ในกราฟสเปกตรัมนั้นจะเป็นการแสดงผลการสั่นสะเทือนบนแกนของความถี่ การแสดงผลในลักษณะนี้หากนำไปใช้วิเคราะห์ความเสียหายในเครื่องจักรกลแล้ว ก็จะทำให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณการสั่นสะเทือน ได้มากกว่าการวิเคราะห์สัญญาณจากกราฟโดเมนของเวลา เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณจากกราฟโดเมนเวลาไปสู่สัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังนั้นการมองแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถที่จะอธิบายให้เข้าใจความหมายได้ง่าย และชัดเจน รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

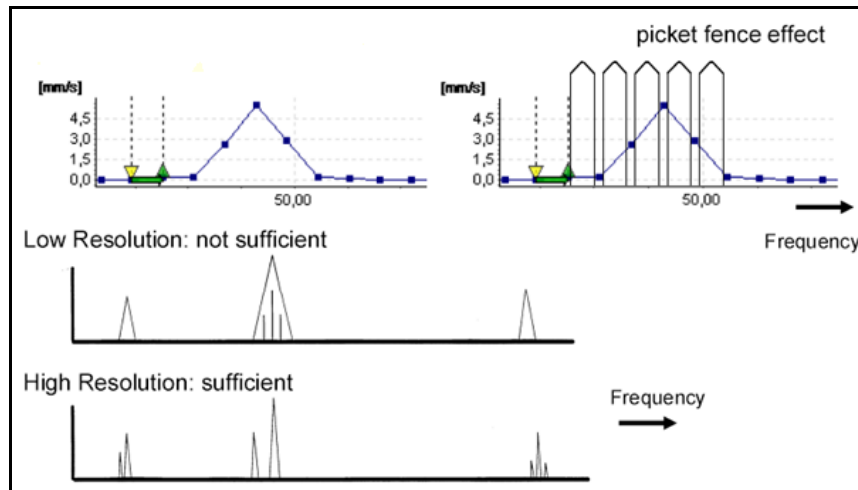


รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของความเสียหายในเครื่องจักรนั้น ถ้าหากขนาดของการสั่นสะเทือนสูงเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เครื่องจักรนั้นเสียหายเร็วยิ่งขึ้น โดยในแกนนอนที่ 1 จะเป็นแกนของเวลาและแนวแกนนอนที่ 2 ซึ่งตั้งฉากกับแกนที่ 1 จะเป็นแกนของความถี่ ซึ่งจะบ่งชี้ถึงสาเหตุและที่มาของความเสียหาย

2.2.8 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ (Resolution In The Spectrum)

ความละเอียดในกราฟแสดงผลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าจำนวนเส้น (Lines) ที่ได้มีการกำหนดไว้ในตอนแรกจากเงื่อนไขในการวัดอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องวัดนั้นๆ ด้วย ทั้งนี้ในการตั้งค่าให้มีความละเอียดในการแสดงผลที่สูงขึ้นก็จะต้องใช้ระยะเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน รูปที่ 17 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ



รูปที่ 17 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ

2.3 ตัวแปลที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน [5]

สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนนั้น จะมียอดประกอบจากความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและฐานรองรับ (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 18 แสดงตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหายจะก่อกำเนิดความถี่ออกมาเป็น 4 ความถี่ด้วยกันคือค่า BPFO, BPFI, BSF และ FTF ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มากขึ้น ทำให้ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องคำนวณหาค่าด้วยตัวเองเพียงมีเบอร์ของตลับลูกปืน แล้วทำการป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมแปลผลทางสเปกตรัมก็จะได้ค่าความถี่ต่างๆ ของตลับลูกปืน แต่ถึงกระนั้นผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องรู้และสามารถใช้สมการดังกล่าวได้เพื่อยืนยันความถูกต้องในกรณีที่ไม่แน่ใจจากการกำหนดเงื่อนไขในการวัด



รูปที่ 18 แสดงตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing

สมการในการคำนวณหาความถี่ของชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายโดยจะแปรผันกับความเร็รรอบ [6]

ความถี่แหวนนอก Outer Ring Frequency (BPFO)

$$BPFO = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \phi \right) RPM \quad (5)$$

ความถี่แหวนใน Inner Ring Frequency (BPFI)

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_c} \cos \phi \right) RPM \quad (6)$$

ความถี่ของการหมุนเม็ดลูกปืน Ball Spin Frequency (BSF)

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 + \frac{B_d}{P_c} \right)^2 \cos^2 \phi RPM \quad (7)$$

ความถี่พื้นฐาน Fundamental Cage (Train) Frequency (FTF)

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_c} \cos \phi \right) RPM \quad (8)$$

- เมื่อ RPM คือความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
 N_b คือจำนวนเม็ดลูกปืน
 B_d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดลูกปืน
 P_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตลับลูกปืน
 ϕ คือมุมสัมผัส

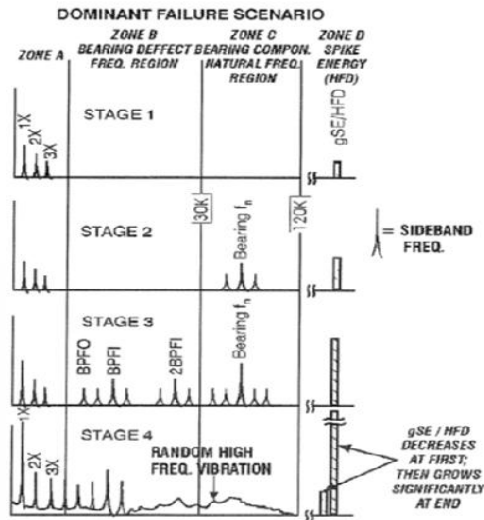
โดยสมการที่ใช้คำนวณนี้จะมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ซึ่งสามารถทำให้เป็นเฮิรตซ์ (Hz) ได้โดยหารด้วย 60 ให้เป็นรอบต่อวินาที ลักษณะการชำรุดของตลับลูกปืนนั้นแบ่งออกเป็นช่วงๆ หลังจากเริ่มเกิดการชำรุด ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง รูปที่ 19 แสดงลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน

สภาวะที่ 1 เป็นสภาวะการเสียหายของตลับลูกปืนในช่วงแรกซึ่งมักไม่สามารถบ่งบอกได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนปกติ สัญญาณความเสียหายจะไปปรากฏที่ความถี่อุตสาหกรรม 250,000 – 350,000 Hz และเมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นสัญญาณมักจะเคลื่อนตัวไปปรากฏที่ความถี่ต่ำลงมาคือ ประมาณ 20,000 – 60,000 Hz

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

สภาวะที่ 3 เป็นสภาวะการเสียหายของตลับลูกปืนที่เพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนขึ้นที่ความถี่เสียหายของตลับลูกปืน

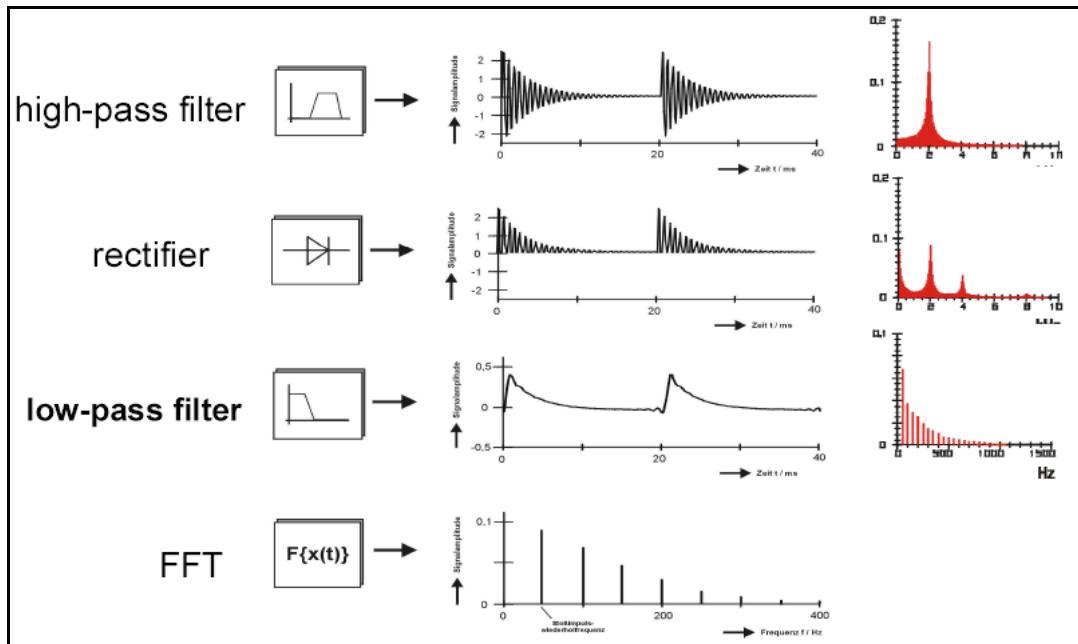
สภาวะที่ 4 เป็นสภาวะที่ตลับลูกปืนเสียหายมาก ซึ่งสภาวะนี้สัญญาณการสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อไปสู่นขนาดของสัญญาณที่ความถี่ 1 เท่าของรอบการหมุนและชุดฮาร์มอนิกของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่ความถี่เสียหายของตลับลูกปืนและความถี่ธรรมชาติที่เป็นลักษณะแยกกันจะถูกทำให้หายไปกลายเป็นสัญญาณที่คลุมกว้างตลอดช่วงความถี่สูง



รูปที่ 19 แสดงลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน [7]

2.4 การใช้สัญญาณ Demodulation Enveloping วิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน [5]

ในการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนนั้น จะใช้หลักการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping [8] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนที่มีขนาดต่ำ (Low Amplitude) แต่ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะอยู่ในย่านความถี่สูงภายในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เช่น การกระแทกของชิ้นส่วนภายในตลับลูกปืนหรือระหว่างเม็ดลูกปืนกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย และการขบกันของฟันเกียร์ เป็นต้น สำหรับขั้นตอนในการปรับปรุงสัญญาณแบบนี้ จะทำโดยการดึงเอาสัญญาณที่มีขนาดของการสั่นสะเทือนต่ำที่อยู่ในย่านความถี่สูงออกมา เรียกว่า Band Pass Filter (BP-Filter) จากนั้นนำเอาสัญญาณไปปรับให้มีค่าเป็นสัญญาณบวกโดยผ่านชุด Rectifier แล้วทำการกรองเอาเฉพาะสัญญาณที่ย่านความถี่ต่ำที่เรียกว่า Low Pass Filter (LP-Filter) เพื่อให้ง่ายต่อการแปลผล และนำไปแสดงผลในกราฟสเปกตรัม รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping



รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping

การวัดสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้งจะใช้หัวรับสัญญาณแบบความถี่ ซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่ที่ตลับลูกปืนเริ่มชำรุดโดยใช้เทคโนโลยีแบบ SEE (Spectral Emitted Energy) เมื่อความเสียหายเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งการตรวจวัดแบบ Demodulation Enveloping ก็จะสามารถตรวจพบได้ และถ้าการชำรุดของตลับลูกปืนนั้นเริ่มรุนแรงขึ้น จะสามารถตรวจพบโดยการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป ซึ่งการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไปจะนิยมวัดค่าในหน่วยความเร็ว (Velocity Measurement) และเมื่อการชำรุดรุนแรงมากขึ้นก็จะสามารถตรวจวัดโดยการฟังเสียงได้ ซึ่งเป็นช่วงระยะสุดท้ายของอายุการใช้งานของตลับลูกปืน

การวัดสัญญาณที่ส่งออกมาจากบริเวณที่เกิดความเสียหายบนแหวนนอกของตลับลูกปืนจะทำโดยใช้หัววัดสัญญาณแบบความถี่ที่ยึดติดกับเสื้อด้านนอกของตลับลูกปืนเป็นตัวรับสัญญาณที่ส่งออกมา สัญญาณที่ส่งออกมาครั้งแรกจะผ่านมาทางเสื้อของตลับลูกปืนและผ่านมาถึงหัวรับสัญญาณ เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย จะส่งกระตุ้นโครงสร้างตลับลูกปืนให้เกิดเรโซแนนซ์ (Structural Resonance) แล้วหัวรับสัญญาณก็จะนำสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนไปเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Enveloping เพื่อการวิเคราะห์หาความเสียหายต่อไป

2.5 ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน การจำแนกความเสียหายเพื่อหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน โดยเครื่องกลึงล้อ และการสร้างเครื่องทดสอบตลับลูกปืน ซึ่งได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย บทความ และตำราต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้นำแนวทาง และข้อเสนอแนะมาประยุกต์ใช้ และทำการศึกษาเพิ่มจากงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

2.5.1 ประศาสน์ สุบรรพวงศ์ [9] ศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนแบบ ลูก กลิ้งในปั๊มไฮดรอลิกแบบเฟือง ด้วยวิธีการทดลองจากเครื่องจักรจริง เพื่อกำหนดวิธีการในทาง ปฏิบัติในการติดตามสภาพของตลับลูกปืนในปั๊มไฮดรอลิกแบบเฟือง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การ สั่นสะเทือนในรูปของ Frequency Domain ในการเก็บข้อมูล จำนวน BPF และจำนวนค่าอัตราส่วน ของแอมพลิจูด โดยใช้หัววัดความเร่งแบบ Piezoelectric และวัดค่าการสั่นสะเทือนในหน่วยของ ความเร่ง เพื่อทำการทดสอบหาอัตราการแตกที่ผิวแหวนนอกของตลับลูกปืน เพื่อกำหนดช่วงเวลาทำ การวัดที่เหมาะสม ทำการวัดที่ช่วงความถี่ 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่สูง 20-30,000 Hz เพื่อตรวจสอบการ เกิดเรโซแนนซ์ของโครงสร้างและช่วงความถี่ต่ำ 0.5-400 Hz เพื่อตรวจสอบความถี่ที่เกิดลูกปืนวิ่ง ผ่านรอยแตกของแหวนนอกของตลับลูกปืน การเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดมีค่าสูงและเกิดขึ้นอย่าง สม่ำเสมอใน 3 ช่วงความถี่ คือ 7-9 kHz 15-18 kHz และ 24-27 kHz ส่วนการวัดในช่วงความถี่ต่ำ แบบวัดโดยตรง (Liner) ไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนและน่าเชื่อถือได้ว่าตลับลูกปืนเกิด การชำรุด แต่การวัดโดยใช้วิธีการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulate พบว่าการปรากฏของ FTF (Fundamental Train Frequency) และ GMF (Gear Mesh Frequency) ที่มีความถี่ด้านข้าง (Side Band) เป็นการสนับสนุนให้เห็นว่าตลับลูกปืนเกิดการชำรุด เมื่อเริ่มเกิดการชำรุดแล้ว จะมีอายุการ ใช้งานต่อไปโดยไม่เกิดผลกระทบต่อระบบได้อีกไม่เกิน 22% ของอายุการใช้งานรวมหรือ 260 ชั่วโมง ช่วงระยะเวลาที่ควรทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนไม่ควรห่างกันเกิน 130 ชั่วโมงใช้งานของ เครื่องจักร (หรือ 50% ของอายุตลับลูกปืนที่เหลืออยู่) เพื่อป้องกันการชำรุดรุนแรงที่จะเกิดขึ้นใน ระบบไฮดรอลิก

2.5.2 สมชาย เดโชธรรมสถิต [10] ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วย สเปกตรัมและเซปต์ตรัม โดยทำการทดลองวิเคราะห์สัญญาณจากชุดทดลองซึ่งจำลองให้ชุดเฟืองมี การสึกหรอของซี่ฟันเฟืองและมีการเอียงศูนย์ของเฟืองในระดับต่างๆ กันและผลการแปลงสัญญาณ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในลักษณะจำเพาะ บนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ ตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณ แล้วเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จาก สเปกตรัมและเซปต์ตรัม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือน ของชุดเฟืองในสภาพปกติประกอบด้วย ชุดฮาร์มอนิกของ GMF และแถบความถี่ข้าง ขณะที่ชุด เซปต์ ตรัมแสดงยอดสัญญาณที่ฮาร์มอนิกของเฟืองขับและเฟืองตามที่มีแอมพลิจูดระดับหนึ่ง ในกรณี

ชุดเฟืองมีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟันจะพบว่า การสั่นสะเทือนจะมีระดับสูงขึ้นกว่าเดิมสเปกตรัมจะมีแถบความถี่ข้างที่สูงขึ้น พร้อมกับมีสัญญาณแถบความถี่กว้างและมีฮาร์มอนิกของ GMF เพิ่มขึ้น ส่วนฮาร์มอนิกของเฟืองขับที่สึกหรอจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นแต่ฮาร์มอนิกของเฟืองตามกลับมีแอมพลิจูดลดลงแตกต่างกัน ในกรณีที่เฟืองชุดมีปัญหาการเชื่อมศูนย์เพิ่มมากขึ้นจะพบว่า การสั่นสะเทือนอาจมีระดับสูงขึ้นหรือลดลง สเปกตรัมจะมีแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างและแอมพลิจูดของความถี่การหมุนของเฟืองที่เชื่อมศูนย์เพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มของแอมพลิจูดดังกล่าวมีรูปแบบไม่ชัดเจน ขณะที่ฮาร์มอนิกของเฟืองที่เชื่อมศูนย์มีขนาดสูงขึ้นเด่นชัดเมื่อเทียบกับเฟืองปกติ

2.5.3 กมลวรรณ พงศาพิชญ์ [11] การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง โดยจำลองการสึกหรอของฟันเฟืองขับที่ระดับต่างๆ กันทำการทดลองที่หลายสภาวะด้วยการปรับระดับภาระและความเร็วรอบ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม จากผลของสัญญาณโดเมนเวลา ค่า Peak ของสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอของฟันเฟืองมากขึ้น ในขณะที่ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามาก ผลของสัญญาณสเปกตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ 1 GMF 2 GMF และ 3 GMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอมากขึ้น ค่าแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างเนื่องจากเฟืองขับและเฟืองตามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความถี่ GMF ผลของสัญญาณเซปส์ตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความเร็วรอบเฟืองขับ (1/P) มีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 40% ของความหนาของฟัน จากค่านั้นแอมพลิจูดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงค่าการสึกหรอสูงสุดที่ทดลอง จากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและการสึกหรอของเฟืองพบว่า การวิเคราะห์เซปส์ตรัมเป็นวิธีที่ชัดเจนที่สุดในการวิเคราะห์สภาพชุดเฟือง ซึ่งอาจใช้ค่าแอมพลิจูดสูงสุดเป็นเกณฑ์กำหนดระดับสึกหรอที่สามารถยอมรับได้

2.5.4 จุติโรจน์ เบ็ญจลักษณ์ [12] การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน การพัฒนาโปรแกรมอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 10816-1, ISO 10816-2, และ ISO 10816-3 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานในลักษณะต่อเนื่องในเวลาจริง เปลี่ยนสัญญาณการสั่นสะเทือนในแกนเวลาให้อยู่ในแกนความถี่ วิเคราะห์ความบกพร่องของเครื่องจักรกลหมุน เก็บข้อมูลสำหรับการแสดงข้อมูลในอดีต และเตือนเมื่อเครื่องจักรกลหมุนเริ่มเสียหาย โดยเป็นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับตรวจและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน โดยได้ทำการพัฒนาตามความต้องการของผู้ใช้

2.5.5 ประดิษฐ์ หมู่เมืองสอง และสุชญา นรรัชช [13] การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร กล่าวถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นแล้วจะเป็นผลให้

เครื่องจักรมีอายุสั้นลง ซึ่งความเสียหายที่พบในเครื่องจักรโดยทั่วไป เช่น การไม่สมดุลของเครื่องจักร (Unbalance) การเอียงแนวแกนของเครื่องจักร (Misalignment) การหลวมคอนทางกล การโก่งของเพลลา การเสียดสีกันของชิ้นส่วน การเอียงศูนย์กลาง (Eccentric) การชำรุดของเฟืองเกียร์ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ความเสียหายโดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Analysis) หรือการแสดงผลในรูปแบบของกราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) โดยจะใช้หน่วยวัดแบบระยะทาง ความเร็ว หรือ ความเร่ง และแกนนอนจะแสดงค่าความถี่ (Frequency) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรนั้น ในการวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัมนี้ สามารถแปลความหมายโดยแกนตั้งจะบ่งบอกถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ส่วนแกนนอนจะบอกลักษณะปัญหาหรือแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นว่าอยู่ตรงตำแหน่งไหนของเครื่องจักร

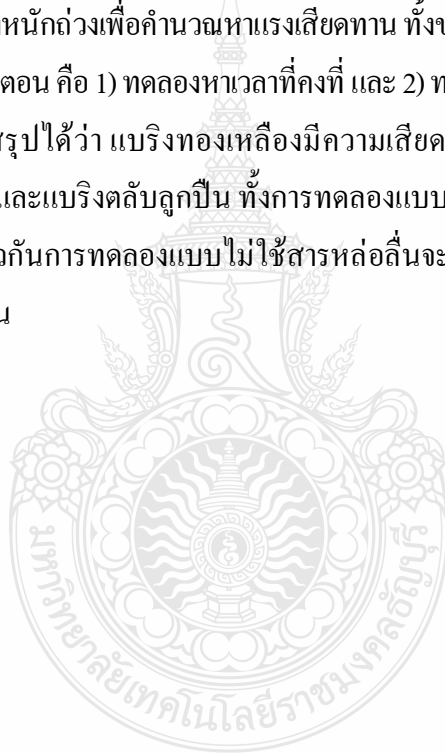
2.5.6 วินัย เวชวิทยาลัง [14] ได้อธิบายการวัดการสั่นสะเทือนว่าเป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจ สอบการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดการสั่นสะเทือนเป็นวิวัฒนาการและใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะสามารถวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรได้ครอบคลุมเกือบทุกปัญหา ทั้ง การติดตั้งประกอบ การสึกหรอ การหลวมคลาย การยึดไม่แน่น แท่นไม่แข็งแรง การเสียหายของฟันเกียร์ ตลับลูกปืน โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปแก้ไขปัญหา และข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนนั้น จะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษา

2.5.7 ญัฐพร ไส้แข็ง, วุฒิสักดิ์ บุตหนู [15] ได้ศึกษาการออกแบบแบร็งก์ในโครงสร้างการศึกษาแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งศึกษาหน้าที่ การทำงานของแบร็งก์ชนิดต่างๆ ได้แก่ แบร็งก์เชิงกล แบร็งก์ยาง แบร็งก์แบบเลื่อนไถล และแบบจุดหมุนคอนกรีต ผลการศึกษาสรุปได้ว่าหน้าที่ การทำงานของแบร็งก์ คือ 1) เป็นตัวถ่ายแรงจากโครงสร้างตัวสะพานไปยังโครงสร้างส่วนที่รองรับ 2) ขอมให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ต้องการสำหรับโครงสร้าง และ 3) บังคับการเคลื่อนที่ของสะพานให้ไปในทิศทางที่กำหนด แบร็งก์แต่ละชนิดส่วนใหญ่จะให้หน้าที่คล้ายกัน แต่จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป จากข้อดีข้อเสียนี้จะทำให้ผู้ทำการศึกษา สามารถเลือกใช้แบร็งก์ได้อย่างเหมาะสมกับโครงสร้าง ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาการออกแบบแบร็งก์โดยใช้มาตรฐานอังกฤษ (British Standards Institution) เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันมาก และยังเป็นที่ยอมรับในหน่วยงานราชการ ในการศึกษาการออกแบบทำให้ได้หลักการ และวิธีการออกแบบ ภายใต้ข้อกำหนดในการออกแบบ เพื่อสามารถใช้ในการคำนวณออกแบบแบร็งก์ในโครงสร้างได้ นอกจากนี้ มีตัวอย่างในการออกแบบแบร็งก์ชนิดต่างๆหลายตัวอย่าง

2.5.8 ประจวบ ปานเพชร, ประทีป มุขศรี, ประเสริฐ กลับรอด [16] ได้ศึกษาเครื่องสาธิตการทดลองความเสียหายของเบริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องสาธิตการทดลองความเสียหายของเบริง เพื่อใช้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของเบริงผิวเรียบที่ทำมาจากทองเหลือง เหล็กหล่อ แกรไฟต์และเบริงตลับลูกปืน ทั้งแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นและแบบใช้สารหล่อลื่น ที่ใช้กับเพลลาขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เครื่องสาธิตการทดลองความเสียหายของเบริงมีขนาด โครงฐาน กว้าง 390 มิลลิเมตร ยาว 580 มิลลิเมตร และสูง 140 มิลลิเมตร ล้อหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตรและหนา 40 มิลลิเมตร หลังจากศึกษาถึงความเสียหายของเบริงผิวเรียบ เบริงตลับลูกปืนและลักษณะโครงสร้าง ของเครื่องสาธิตความเสียหายของเบริง จึงทำการเขียนแบบ กำหนดและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ จากนั้นจึงดำเนินการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นเครื่องสาธิตการทดลอง ความเสียหายของเบริงที่สมบูรณ์และสามารถใช้งานได้ตามต้องการ

การทดลองหาน้ำหนักถ่วงเพื่อคำนวณหาแรงเสียหาย ทั้งขณะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้ สารหล่อลื่น แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ทดลองหาเวลาที่คงที่ และ 2) ทดลองหาน้ำหนักถ่วงที่เวลาคงที่

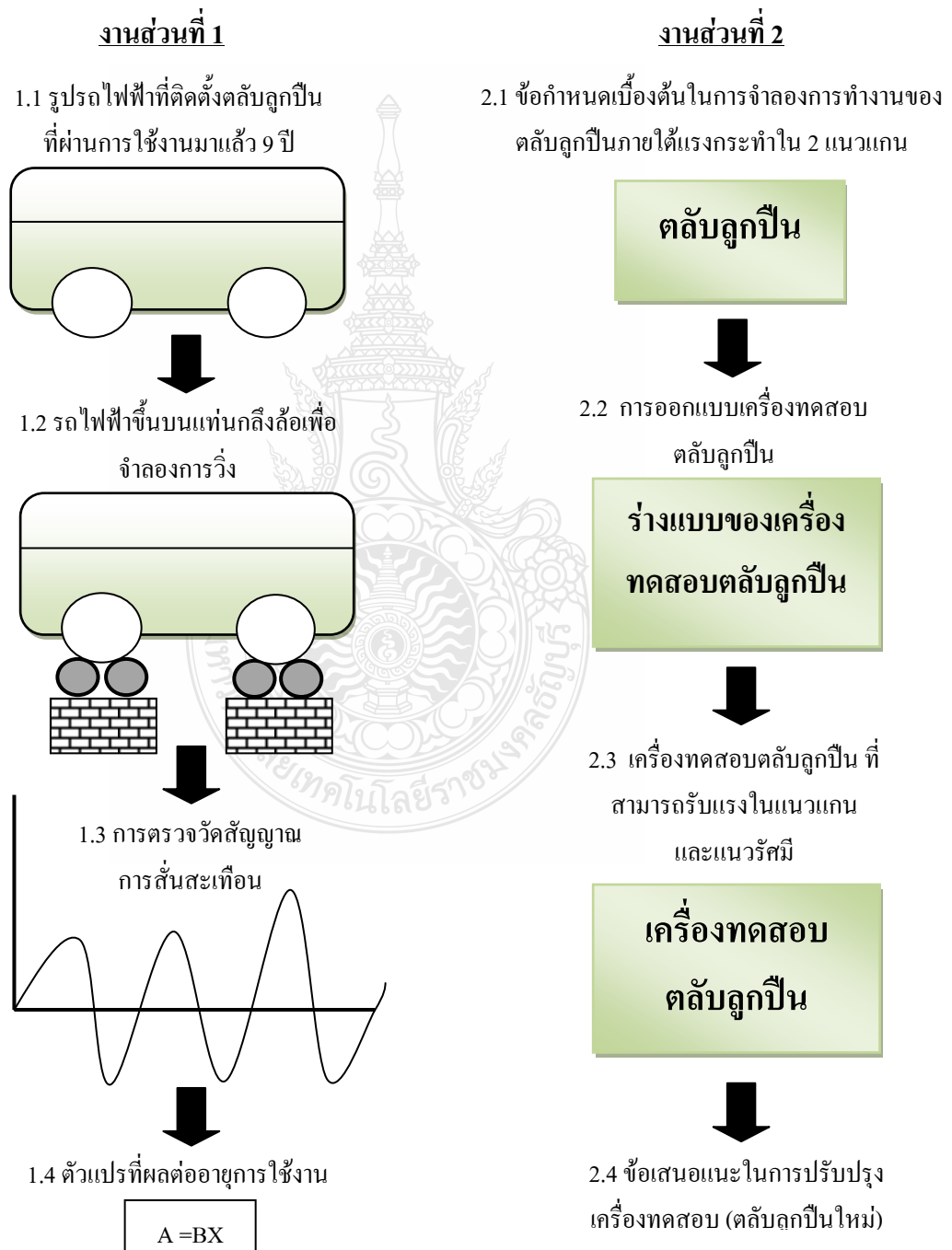
ผลการทดลองสรุปได้ว่า เบริงทองเหลืองมีความเสียหายมากที่สุด รองลงมาคือเบริงเหล็กหล่อ เบริงแกรไฟต์ และเบริงตลับลูกปืน ทั้งการทดลองแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นและแบบใช้สารหล่อลื่น ในเบริงชนิดเดียวกันการทดลองแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมากกว่า แบบใช้สารหล่อลื่น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

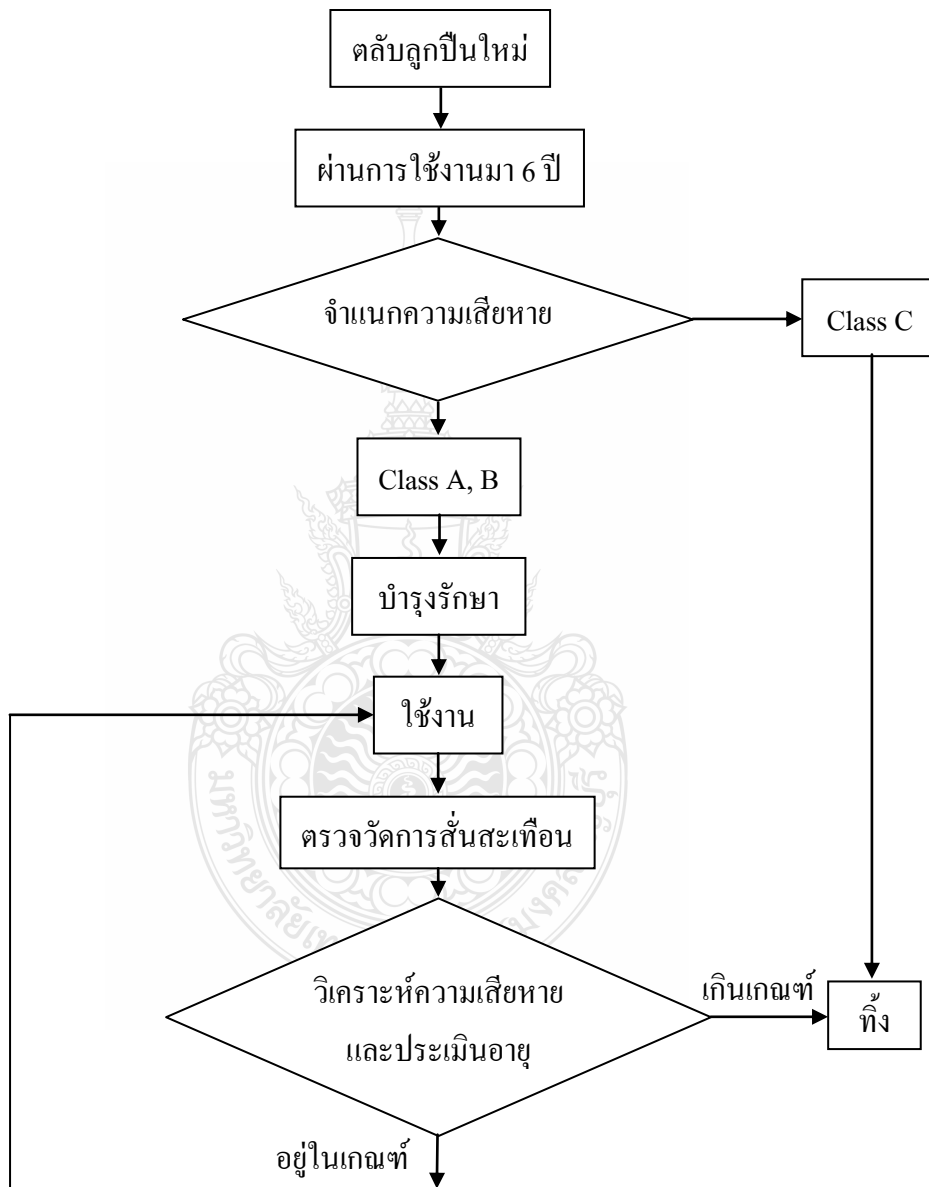
ในงานวิจัยนี้ จะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการวิเคราะห์หารูปแบบและวิธีการประเมินอายุการใช้งานของตลับลูกปืนจริงในล้อรถไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ส่วนที่ 2 จะเป็นการศึกษาหารูปแบบของเครื่องทดสอบตลับลูกปืนที่สามารถรับแรงทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี รูปที่ 21 แสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัยทั้งสองส่วน



รูปที่ 21 แสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัยที่แบ่งเป็น 2 ส่วน

3.1 การจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน

จากวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้ จะดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มต้นจากการจำแนกความเสียหายของตลับลูกปืน การวิเคราะห์ความเสียหายด้วยการสันนิษฐานเพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน และวิเคราะห์หาตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งาน รวมทั้งสร้างเครื่องทดสอบตลับลูกปืนภายใต้สภาวะการทำงานจำลองที่รับแรงได้ทั้งแนวแกนและแนวรัศมี



รูปที่ 22 แสดงขั้นตอนการจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อประเมินอายุการใช้งาน

3.2 การจำแนกระดับความเสียหาย

รถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในระยะหนึ่งจำเป็นจะต้องทำการบำรุงรักษาเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และรักษามาตรฐานความปลอดภัยของรถไฟฟ้า ซึ่งรถไฟฟ้า BTS ได้มีการบำรุงรักษาและการตรวจสอบสภาพอยู่เสมอแล้วนั้น เมื่อระยะเวลาการใช้งานถึง 6 ปี จะต้องมีการบำรุงรักษาครั้งใหญ่ (Overhaul) เนื่องจากชิ้นส่วนบางชิ้นอาจเกิดข้อบกพร่อง หรือชำรุดก่อนเวลาอันควร หรือจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเพราะถึงระยะเวลาที่ผู้ผลิตได้แนะนำเอาไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อที่จะจำแนกความเสียหาย และหาช่วงอายุการใช้งานของตลับลูกปืน ซึ่งตลับลูกปืนล้อนั้นจะต้องมีการตรวจสอบเมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด ก่อนที่จะนำกลับไปใช้งานอีกครั้ง ในการจำแนกความเสียหายนั้นจากการศึกษาข้อมูลที่ได้จากเอกสารของผู้ผลิตตลับลูกปืน (Friedrich Fischer, 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 นั้นไม่นำมาใช้งานในงานวิจัยชิ้นนี้จะได้แนวทางการดังกล่าวมาวิเคราะห์ตลับลูกปืนที่ใช้ในรถไฟฟ้าของประเทศไทยในการจำแนกระดับความเสียหายและหาอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องโดยอาศัยการเก็บข้อมูลการชำรุดที่ซ้ำ ๆ กัน (Repetitive Failures) มาทำการวิเคราะห์

- การหาค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (Mean Time Between Failures: MTBF)

$$MTBF = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (8)$$

t_1 คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ 1

t_2 คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ 2

t_n คือเวลาการใช้งานที่บันทึกไว้ก่อนที่ชิ้นส่วนจะเกิดการชำรุดครั้งที่ n

n คือจำนวนครั้งในการบันทึก

- การกระจายทางสถิติแบบไวบูลล์เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อกำหนดรูปแบบการชำรุดว่าเป็นช่วงเริ่มต้น ช่วงใช้งาน หรือเป็นช่วงการสึกหรอ รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน โดยจะสังเกตเห็นว่าถ้าค่า λ ที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการชำรุดในช่วงการใช้งานเริ่มต้น ถ้าค่า λ ที่คำนวณได้เท่ากับ 1 จะเป็นช่วงใช้งานปกติ และถ้าค่า λ ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะเป็นช่วงการสึกหรอ โดยสมการที่ 9 เป็นการกระจายทางสถิติแบบไวบูลล์

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - \beta}{\theta}\right)^\nu} \quad (9)$$

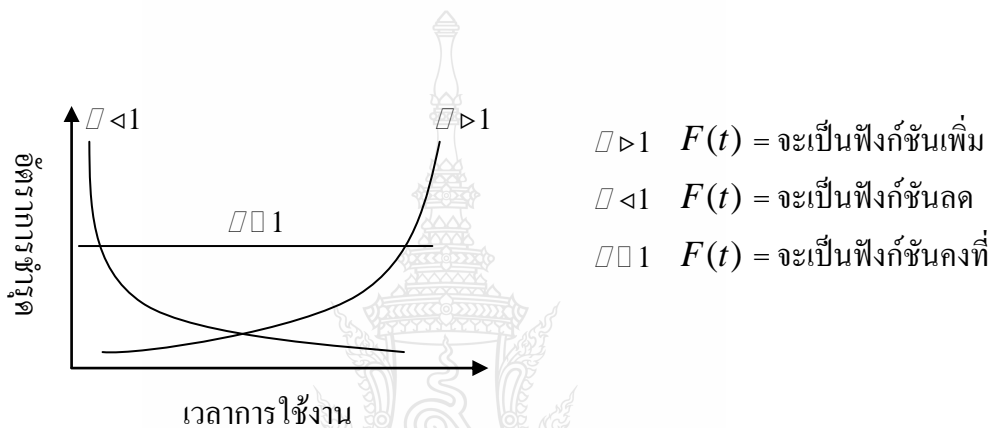
$F(t)$ คือเปอร์เซ็นต์สะสมการชำรุด

t คือเวลาการใช้งานจนชิ้นงานชำรุด

θ คือ Scale Parameter หรือ MTBF (มาจากสมการที่ 3.1)

β คือ Location Parameter หรือค่าเวลาปลอดการชำรุด

ν คือ Shape Parameter หรือ Weibull Index



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชำรุดและเวลาการใช้งาน

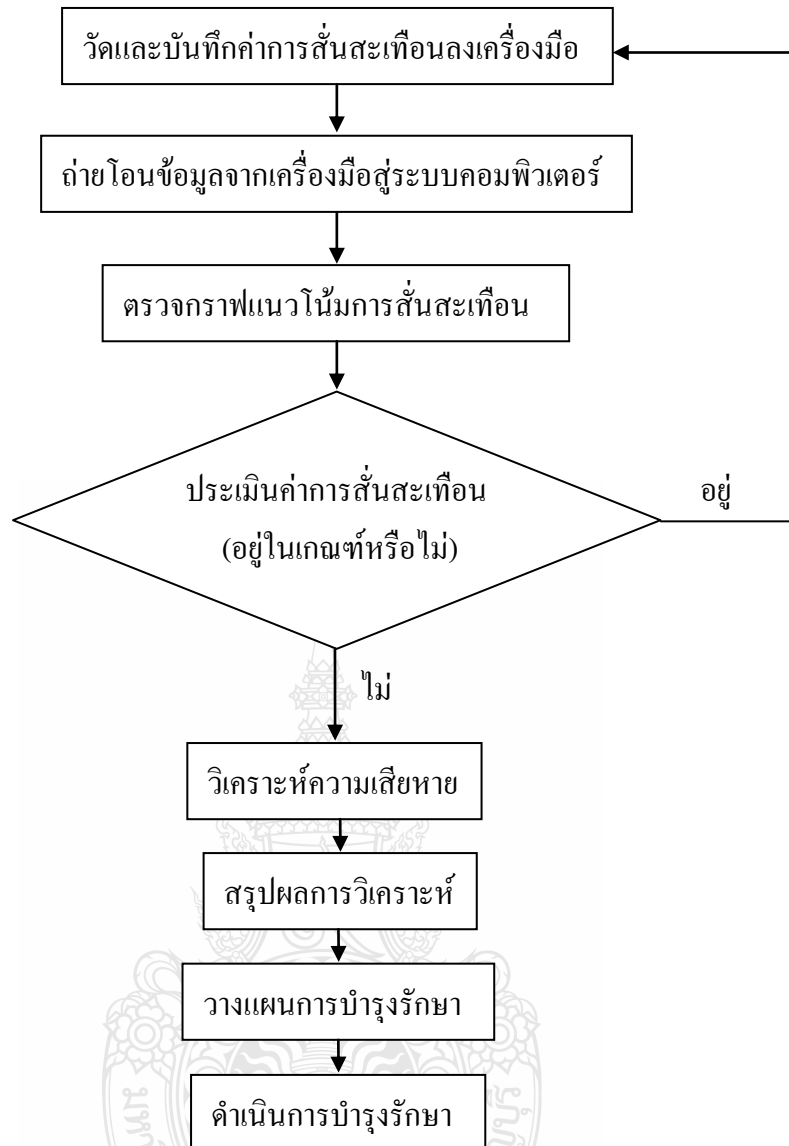
ในกรณีที่ชิ้นส่วนนั้นไม่มี Shape Life หรือช่วงเวลาปลอดการซ่อมบำรุงรักษา เมื่อนำมาใช้ งานจะมีการชำรุดได้ทันที $t = 0$ และ β จะเท่ากับ 0

3.3 วิธีการดำเนินงานในการจำแนกความเสียหาย

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

3.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis)

สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนั้น จะแสดงดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

3.5 วิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือน

สำหรับวิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือนในหัวข้อนี้ ซึ่งในการทดลองนั้นจะประกอบไปด้วย เครื่องมือ อุปกรณ์ และขั้นตอนในการทดลอง ตามขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 เครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe)

การวัดการสั่นสะเทือนในงานวิจัยนี้ซึ่งจะทำการวัดและทดสอบภายในโรงซ่อมบำรุงโดยใช้เครื่องกลึงล้อ รูปที่ 25 แสดงเครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe) เป็นต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อให้หมุนเพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยไม่ต้องถอดล้อออกมาวัดภายนอก ซึ่งจะทำให้ลักษณะการรับภาระมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริง รูปที่ 26 แสดงชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อน และรูปที่ 27 แสดงชุดอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกลึงล้อ



รูปที่ 25 เครื่องกลึงล้อ (Under Floor Wheel Lathe)



รูปที่ 26 ชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อน



รูปที่ 27 ชุดอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกลึงล้อ

3.5.2 เครื่องมือวัดค่าการสั่นสะเทือน

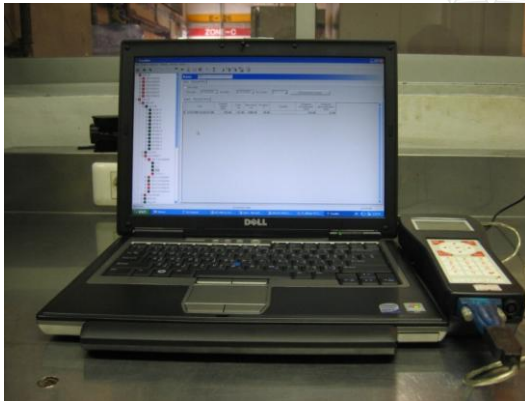
เครื่องมือวัดและบันทึกผลการสั่นสะเทือน ยี่ห้อ FAG รุ่น Detector III ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 28



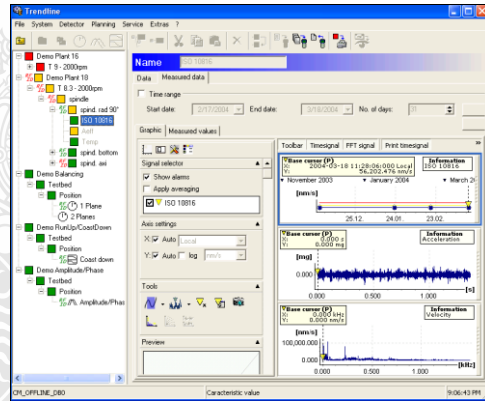
รูปที่ 28 เครื่องมือวัดและบันทึกผลการสั่นสะเทือน

3.5.3 คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์

โดยจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากเครื่องมือวัดและบันทึกผล ซึ่งสามารถที่จะวิเคราะห์ผลในภายหลังได้ รูปที่ 29 แสดงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย และรูปที่ 30 แสดงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของ FAG Detector III ชื่อ โปรแกรม Trendline เวอร์ชัน 3.4.0.25



รูปที่ 29 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 30 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

3.6 การวัดการสั่นสะเทือน

โดยจะเริ่มจากการกำหนดจุดวัดในตำแหน่งที่มีการส่งผ่านสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุด จากนั้นทำความเข้าใจความสะอาดบริเวณที่จะติดตั้งหัววัด และติดตั้งหัววัดแบบความเร่งโดยยึดติดแบบแม่เหล็กที่ตำแหน่งฝาครอบและเสื้อตั้บลูกปืน รูปที่ 33 แสดงการติดตั้งหัววัดในแนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial) รูปที่ 31 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตั้บลูกปืนในขบวนรถ ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลที่ใช้วัด

- ก. การกำหนดจุดวัด (Measurement Point) แนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial)
- ข. ทำความสะอาดบริเวณที่จะติดตั้งหัววัด
- ง. ติดตั้งหัววัดแบบความเร่ง โดยยึดติดแบบแม่เหล็ก
- 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

ข. กำหนดความละเอียดในการแสดงผลของความถี่ในกราฟ 1600 และ 3200 Lines

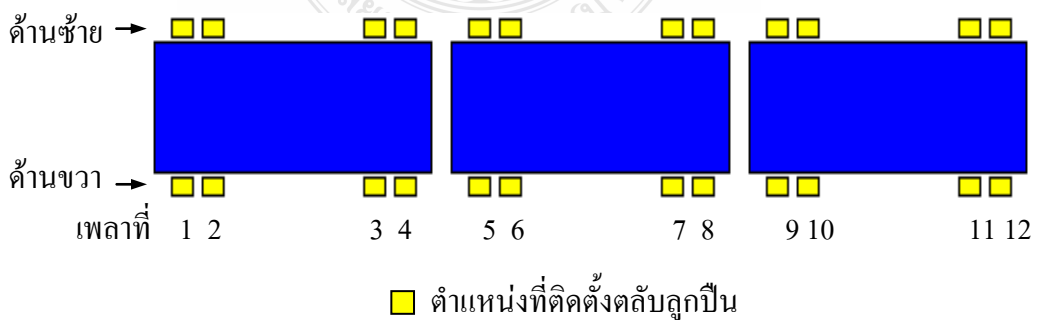
ข. กำหนดค่าเฉลี่ยในการวัดของฟังก์ชัน Averaging 2 ครั้ง และไม่ต้อง Averaging

ณ. ดำเนินการทดสอบกับรถไฟจำนวน 10 ขบวน

ณ. เก็บสัญญาณของตลับลูกปืนที่ยังไม่มีการสึกหรอ และตลับลูกปืนที่สึกหรอ



รูปที่ 31 การติดตั้งหัววัดในแนวแกนและแนวรัศมี (Axial, Radial)



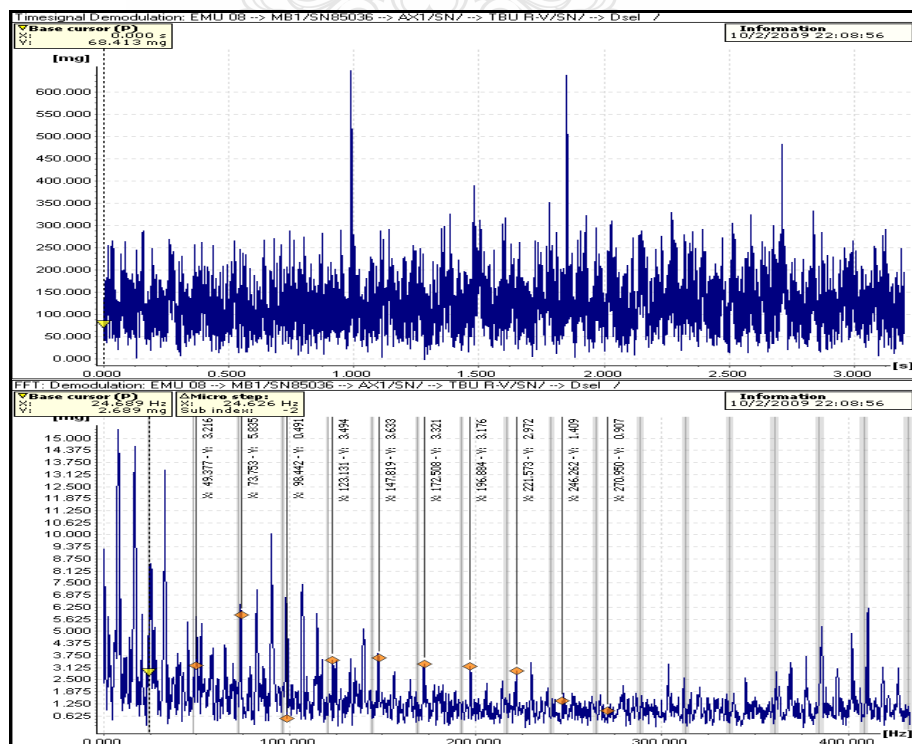
รูปที่ 32 ตำแหน่งที่ติดตั้งตลับลูกปืนในขบวนรถ

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการวัดสับลูกปืน

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

3.7 สัญญาณความถี่จากการวัด

การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรนั้นมีการหมุน ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณความถี่ของชิ้นส่วนภายใน และความถี่ของการเสียหายในรูปแบบต่างๆ รูปที่ 33 แสดงความถี่จากการวัด



รูปที่ 33 ความถี่จากการวัด

3.8 การวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนในที่นี้จะทำการวิเคราะห์ความเสียหายโดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Analysis) หรือการแสดงผลในรูปแบบของกราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) โดยจะใช้หน่วยวัดแบบระยะทาง ความเร็ว หรือความเร่ง และแกนนอนจะแสดงค่าความถี่ (Frequency) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากตลับลูกปืนนั้น ในการวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัมนี้ สามารถแปลความหมายโดยแกนตั้งจะบ่งบอกถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือน ส่วนแกนนอนจะบ่งบอกถึงลักษณะปัญหาหรือแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นว่าอยู่ตรงตำแหน่งไหนของตลับลูกปืน และอาจจะมีกราฟวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของตลับลูกปืน

3.9 การออกแบบเครื่องทดสอบตลับลูกปืนแบบรับแรงในแนวรัศมีและแนวแกน[4]

3.9.1 ข้อกำหนด (Specification)

- รับแรงในแนวรัศมีได้ไม่เกิน 3000 นิวตัน
- รับแรงในแนวแกนได้ไม่เกิน 1000 นิวตัน
- ความเร็วรอบรอบไม่เกิน 150 รอบต่อนาที
- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบไม่เกิน 0.01 เมตรต่อวินาที

3.9.2 เงื่อนไข (Condition)

- มอเตอร์ไฟฟ้าแบบ 220 โวลต์ 1 เฟส
- ตลับลูกปืนที่สามารถรับแรงได้สองแนว คือ แนวแกนและแนวรัศมี
- แรงที่กดบนตลับลูกปืนใช้ระบบนิวแมติกส์

3.9.3 การคำนวณระบบนิวแมติกส์

3.9.3.1 แรงในแนวรัศมี เนื่องจากแรงที่จะใช้ทดสอบในแนวรัศมีสูงสุดคือ 3000 N ถึงเก็บความดันที่ใช้อยู่ที่ 6 บาร์ และเลือกใช้น้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบขนาด 80 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางก้านสูบขนาด 25 มิลลิเมตร สามารถคำนวณหาแรงที่กระทำได้ดังนี้

$$\text{จากสูตร} \quad P \square \frac{F}{A} \quad \text{N/m}^2, \quad A \square \frac{F}{P} \quad \text{m}^2$$

$$\text{หาพื้นที่ด้านก้านสูบจาก} \quad A \square \frac{\pi(D^2 - d^2) \square 10^{-4}}{4} \quad \text{m}^2$$

$$\text{จะได้} \quad A \square \frac{\pi(8^2 - 2.5^2) \square 10^{-4}}{4} \square 0.0045356 \quad \text{m}^2$$

ดังนั้นแรงในแนวรัศมีที่คำนวณได้ทางทฤษฎีขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออก

จากสูตร	$F_h \square A \square P$	m^2
จะได้	$\square 0.0045356 \square 6 \square 10^5 \square 2721.36 \text{ N.}$	
แต่แรงเสียดทานมีค่า 10% ของแรงทางทฤษฎี		
ค่าแรงเสียดทาน	$\square 2721.36 \square \frac{10}{100} \square 272.136$	N
แรงที่ได้จริง	$F_n \square 2721.36 \square 272.136 \square 2449.224$	N

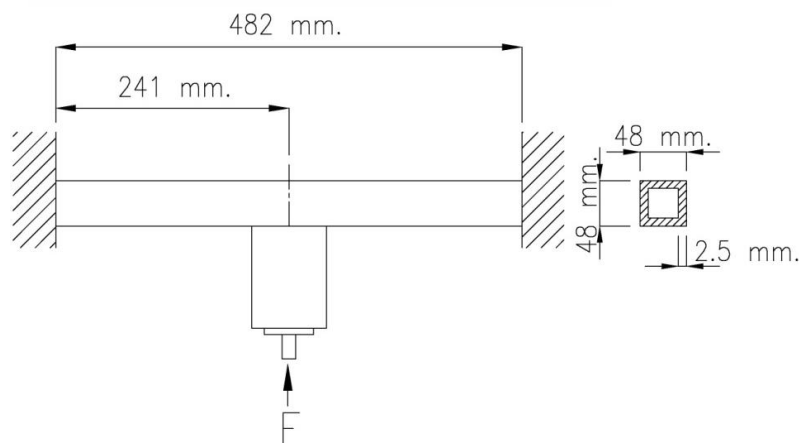
3.9.3.2 แรงในแนวแกน เนื่องจากแรงที่จะใช้ทดสอบในแนวแกนสูงสุดคือ 1000 N ถึงเก็บความดันที่ใช้อยู่ที่ 6 บาร์ และเลือกใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบขนาด 50 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางก้านสูบขนาด 16 มิลลิเมตร สามารถคำนวณหาแรงที่กระทำได้ดังนี้

จากสูตร	$P \square \frac{F}{A} \text{ N/m}^2$, $A \square \frac{F}{P}$	m^2
หาพื้นที่ด้านก้านสูบจาก	$A' \square \frac{\pi(D^2 \square d^2) \square 10^{-4}}{4}$	m^2
จะได้	$A' \square \frac{\pi(5^2 \square 1.6^2) \square 10^{-4}}{4} \square 0.0017624$	m^2

ดังนั้นแรงในแนวรัศมีที่คำนวณได้ทางทฤษฎีขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออก

จากสูตร	$F_h \square A \square P$	m^2
จะได้	$\square 0.0019635 \square 6 \square 10^5 \square 1178.1$	N
แต่แรงเสียดทานมีค่า 10% ของแรงทางทฤษฎี		
ค่าแรงเสียดทาน	$\square 1178.1 \square \frac{10}{100} \square 117.810$	N
แรงที่ได้จริง	$F_n \square 1178.1 \square 117.81 \square 1060.29$	N

3.9.4 การคำนวณการโค้งงอของจตุรกรงรับกระบอกนิวแมติกส์



รูป 34 ลักษณะการรับแรงของจตุรกรงรับกระบอกนิวแมติกส์

จากลักษณะการจับยึดจะเห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นกับคานจะทำขึ้นที่คาน 2 อัน แต่ในการวิเคราะห์ เราจะวิเคราะห์การโก่งที่เกิดขึ้นเพียงคานเดียวเท่านั้น โดยกำหนดการโก่งไม่เกิน 1 mm.

จากสูตร $\delta = FL^3/48EI$

โดยกำหนด $\delta =$ ระยะโก่งสูงสุดของคาน < 1 mm.

$F =$ แรงที่กระทำกับคานเท่ากับ 3000 N

$E =$ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กคือ 200×10^3 N/mm²

$I =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียลของเหล็ก

$L =$ ระยะความยาวของคานเท่ากับ 482 mm.

$I = \frac{1}{2} \times 48 \times 48^3 - \frac{1}{12} \times 43 \times 43^3$

157468 mm⁴
แทนค่าในสูตร

$$\delta = \frac{3000 \times 482^3}{48 \times 200 \times 10^3 \times 157468}$$

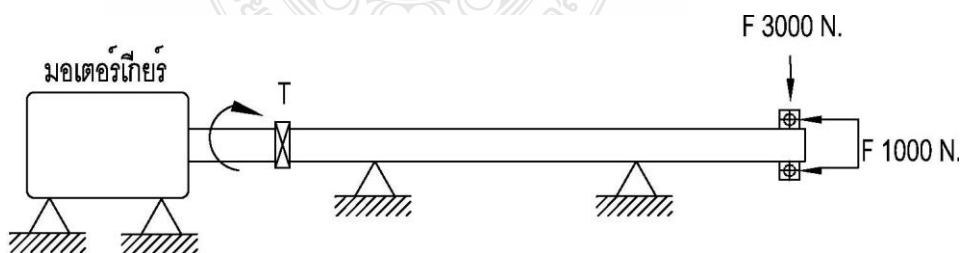
$$= 0.222 \text{ mm}$$

∴ แสดงว่าถ้าใช้คานนี้รับแรงจะทำให้เกิดระยะโก่งของคาน เท่ากับ 0.222 mm แต่ถ้าเราใช้การเพิ่มจำนวนคานในการรับแรงเป็น 2 จะทำให้ระยะโก่งของคานเป็น

$$\frac{0.222}{2} = 0.111 \text{ mm}$$

แสดงว่าเหล็กนี้ใช้ในการทำคานได้

3.9.5 การหาขนาดของมอเตอร์



รูป 35 ลักษณะการส่งกำลังของมอเตอร์

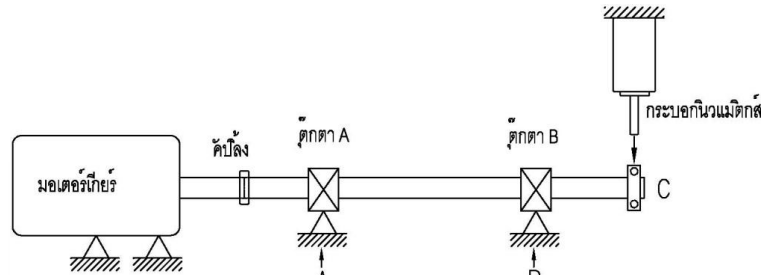
จากข้อกำหนดต้องการแรงที่ 3000 นิวตัน และความเร็วรอบที่ 150 รอบต่อนาที จึงทดลองคำนวณมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า หรือ 746 วัตต์

จากสูตร $P_w = \frac{2 \cdot NT}{60}$

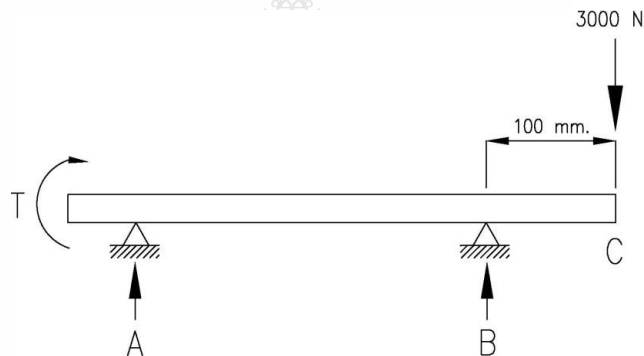
$$\begin{aligned}
 T &= \frac{(P_w)(60)}{2-N} \\
 &= \frac{746 \times 60}{2 \times 150} \\
 T &= 407.5 \quad N.m.
 \end{aligned}$$

∴ แสดงว่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ที่เราจะใช้ คือ 47.5 N.m.

3.9.6 การหาขนาดของเพลลา

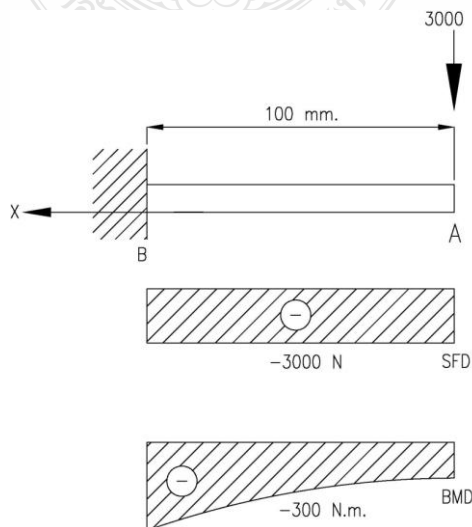


รูป 36 ลักษณะการรับแรงของเพลลา

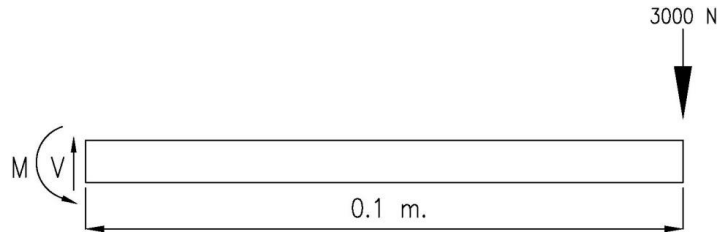


รูป 37 จุดการรับแรงของเพลลา

ในการหาขนาดของเพลลาเมื่อทราบแรงบิดสูงสุดของเพลลาที่จะได้รับและเพลลาที่ใช้งานมีลักษณะเป็นคานยื่น ดังนั้นจึงจะต้องคำนวณหาโมเมนต์คัตสูงสุดของเพลลาโดยวิธีการดังนี้



รูป 38 การรับแรงในลักษณะคานยื่น



รูป 39 แสดงระยะในการรับแรงของคาน

จากรูปจะได้ว่า

$$V = 3000 \text{ N}$$

$$M = 3000 \times 0.1 \text{ N.m}$$

$$= 300 \text{ N.m}$$

∴ แรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ -3000 N กระทำที่จุดยึดแน่น

โมเมนต์สูงสุดเท่ากับ -300 N.m กระทำที่จุดยึดแน่น

เมื่อเราทราบ

$$T = 48000 \text{ N.m}$$

$$M_{\max} = 30000 \text{ N.m}$$

ฉะนั้นสามารถแทนค่าลงในสูตรการหาขนาดของเพลาดังนี้

$$d^3 = \frac{16}{\pi} \sqrt{C_t T^2 + C_m M^2} \quad \text{เมื่อ}$$

C_t คือ ตัวประกอบ ความล้าเนื่องจากการบิด

เท่ากับ 1.0

C_m คือ ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัดเท่ากับ 1.5

d คือ ค่าความเค้นเฉือนใช้งานสำหรับเพล่าที่ไม่มีลิ้มเท่ากับ 55 N/mm^2

แทนค่า

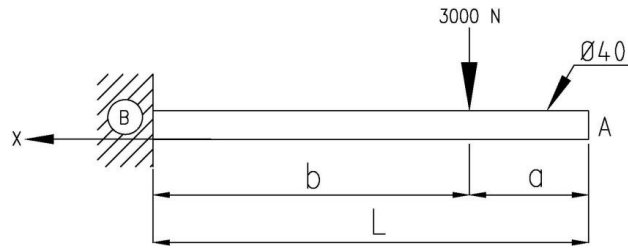
$$d^3 = \frac{16}{55} \sqrt{1.0 \times 48000^2 + 1.5 \times 30000^2}$$

$$d = \sqrt[3]{0.09248 \times 452552.75}$$

$$d = 34.72 \text{ mm.}$$

∴ จึงเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพล่าเท่ากับ 40 มม.

3.9.7 การหาระยะโก่งของเพลลา



รูป 40 แสดงลักษณะการโก่งของเพลลา

ในการหาระยะการโก่งสูงสุดของเพลลาจากรูปจะเห็นว่าที่จุดรับแรง 3000N นั้นจะมีลักษณะเหมือนคานยื่นซึ่งมีสูตรในการคำนวณ คือ

$$\delta = \frac{F}{6EI} (2L^3 + 3aL^2 + a^3)$$

โดยกำหนด

$$\delta = \text{ระยะการโก่งสูงสุดของเพลลา}$$

$$E = 200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$L = 100 \text{ mm}^2$$

$$a = 18 \text{ mm}$$

$$I = 40^4 \text{ mm}^4$$

แทนค่า

$$\delta = \frac{3000}{6 \cdot 200000 \cdot 10^3 \cdot 40^4} (2 \cdot 100^3 + 3 \cdot 18 \cdot 100^2 + 18^3)$$

$$\delta = 0.0291 \text{ mm}$$

∴ แสดงว่าระยะการโก่งสูงสุดของเพลลาเท่ากับ 0.0291 มม. ซึ่งเป็นระยะโก่งที่เกิดขึ้นในระบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงานของคลัทช์ลูกปืน

บทที่ 4

การทดสอบและผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการจำแนกความเสียหาย การวิเคราะห์การสันตะเทือนจากการทดลอง ซึ่งจะประกอบไปด้วย การเปรียบเทียบระดับการสันตะเทือนของตลับลูกปืน Class ต่างๆ การวิเคราะห์ใน Time Domain และ Spectrums Domain การประเมินอายุการใช้งาน ผลการทดลองและวิจารณ์ผล ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดลองกับตลับลูกปืนจริง และผลที่ได้จากการออกแบบและคำนวณหาขนาดชิ้นส่วนในการสร้างเครื่องทดสอบลูกปืน

4.1 การจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน

4.1.1 การจำแนกตลับลูกปืน

จากการศึกษาตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและถึงระยะเวลาทำการบำรุงรักษาตามกำหนดของผู้ผลิต พบว่าสามารถที่จะแบ่งระดับของความเสียหายออกได้โดยอาศัยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสตลับลูกปืนต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระทั้งหมด สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ระดับคือระดับ A, B และ C โดยระดับ 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% จะมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยจึงไม่นำไปใช้งาน เนื่องจากไม่คุ้มค่ากับการบำรุงรักษา ตารางที่ 2 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการบำรุงรักษา โดยในตารางนั้นจะบอกถึงอายุการใช้งานเป็นปี หรือระยะทางที่ใช้ได้อีกซึ่งเทียบมาจากใน 1 ปีรถไฟฟ้านั้นจะวิ่งได้ระยะทางประมาณ 100,000 กิโลเมตร

ตารางที่ 2 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่หรือระยะทางที่ใช้ได้อีกหลังจากผ่านการบำรุงรักษา

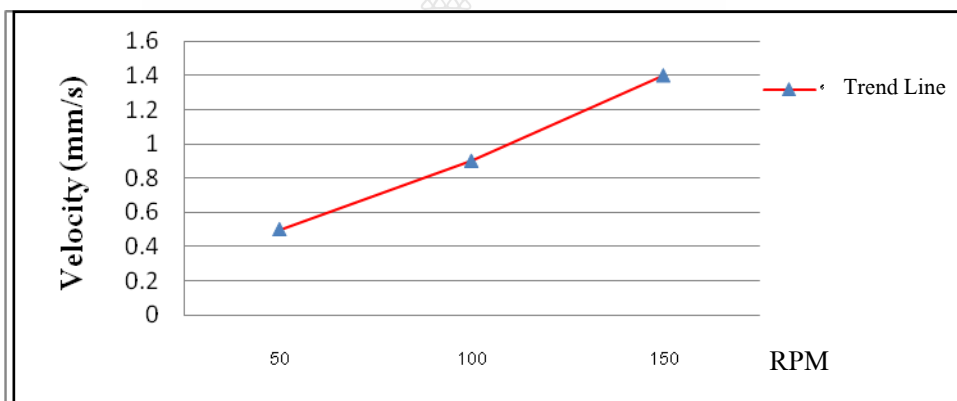
ระดับ (Class)	การใช้งานหลังจากผ่านการบำรุงรักษา	
	อายุการใช้งานที่เหลืออยู่ (ปี)	ระยะทางที่ใช้ได้อีก (กิโลเมตร)
A	3-5 ปี	300,000-500,000 km
B	2-3 ปี	200,000-300,000 km
C	ไม่แนะนำให้ใช้งาน	

4.1.2 ผลจากการวัดการสั่นสะเทือน

ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้นได้มีการทดลองและวัดค่าตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหาย และอายุการใช้งานของตลับลูกปืน ดังนี้

1. ความเร็วรอบ

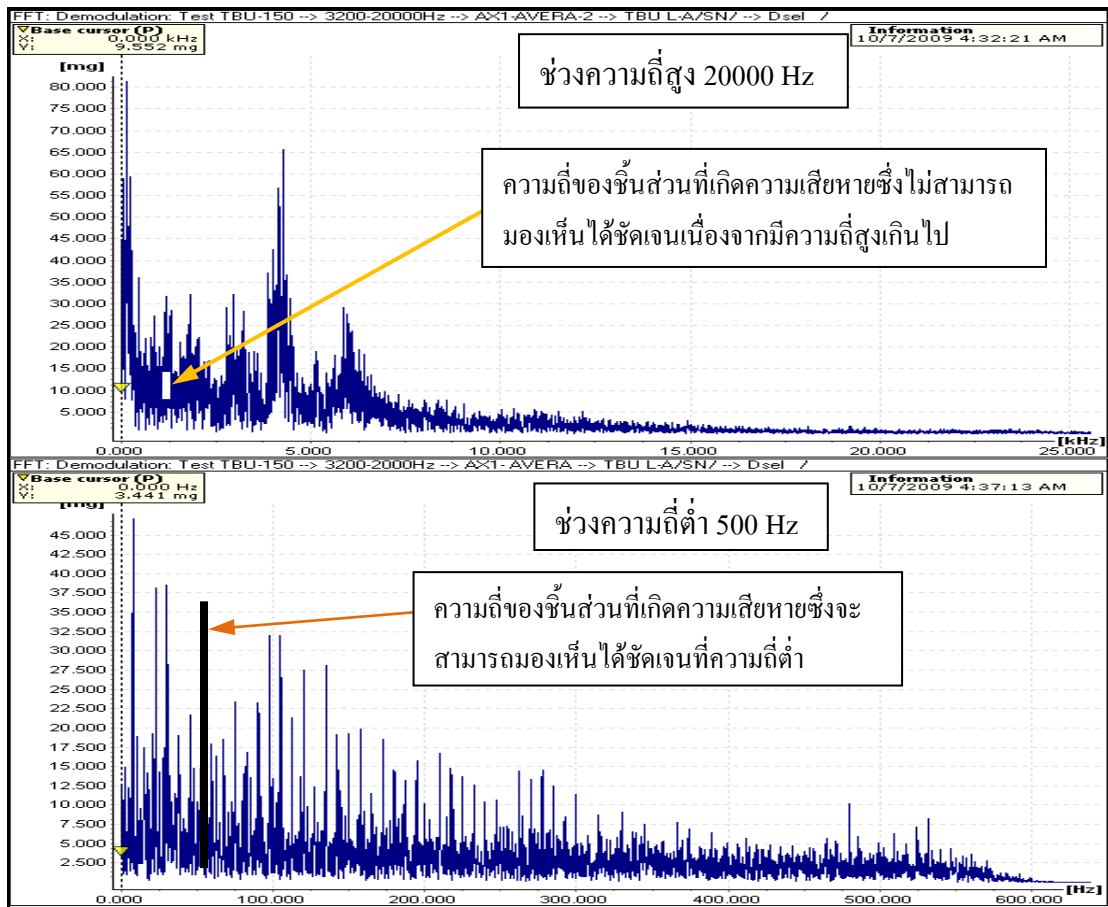
สำหรับความเร็วรอบที่ใช้ในการวัดนั้นมีอยู่ 3 ค่าคือ 50, 100 และ 150 รอบต่อนาที รูปที่ 41 แสดงความเร็วรอบที่มีผลต่อค่าการสั่นสะเทือน โดยขึ้นกับขีดจำกัดของเครื่องกลึงล้อซึ่งเป็นต้นกำลังในการขับล้อให้หมุน จากผลที่ได้ในการวัดที่ความเร็วรอบต่างๆ นั้นจะเห็นถึงระดับการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นโดยจะทำให้เห็นรายละเอียดในกราฟแสดงผลได้ชัดเจน ซึ่งส่งผลดีในการวิเคราะห์ความเสียหาย ในงานวิจัยนี้จะเน้นใช้ความเร็วรอบสูงสุดในการวิเคราะห์คือ 150 รอบต่อนาที ซึ่งเท่ากับความเร็ว 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในขณะรถวิ่ง แต่ถึงกระนั้นถ้าหากทำได้ควรจะวัดที่ความเร็วรอบสูงกว่า หรือประมาณ 300 รอบต่อนาที หรือเท่ากับความเร็ว 96 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในขณะรถวิ่ง ซึ่งจะใกล้เคียงกับความเร็วสูงสุดของตัวรถเพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนมากขึ้นและง่ายต่อการวิเคราะห์ความเสียหาย



รูปที่ 41 แสดงความเร็วรอบที่มีผลต่อค่าการสั่นสะเทือน

2. ผลจากความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือน

ซึ่งค่าความถี่ที่ใช้ในการวัดนั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือที่ช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ รูปที่ 42 แสดงผลในช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ โดยในช่วงความถี่สูงนั้นใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหายในช่วงเริ่มต้นที่ยานความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic) จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า การแยกแยะความถี่ของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายทำได้ยากเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจำนวนมาก และประกอบกับความเร็วรอบที่ใช้ในการวัดค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเสียหายจะเน้นวิเคราะห์ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งจะมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์และประเมินอายุก่อนที่ตลับลูกปืนนั้นจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง



รูปที่ 42 แสดงผลในช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ

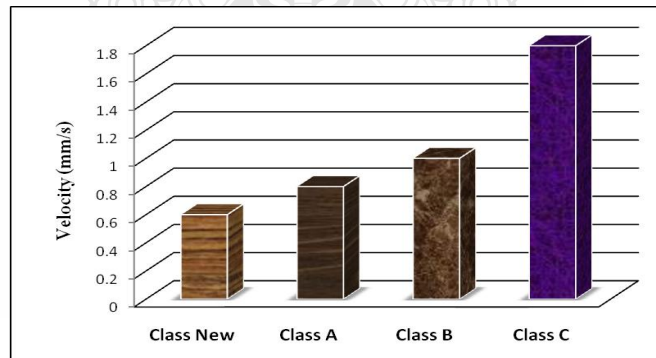
3. ผลจากการเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class ต่างๆ

ผลของการวัดการสั่นสะเทือนนั้น ได้มีการวัดอยู่หลายรูปแบบรวมถึงตัวแปรที่มีการกำหนดไว้ในตอนแรก เพื่อที่จะนำค่าต่างๆ มาใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหาย อาทิเช่น ฟังก์ชันที่ใช้ในการวัด ความถี่ที่ใช้ ความเร็วรอบ ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัด ฯลฯ โดยข้อมูลดังกล่าวนั้นจะเป็นข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลง และแสดงให้เห็นถึงลักษณะความเสียหายที่เพิ่มขึ้นในหน่วยความเร็ว (mm/s) ตารางที่ 3 แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน Class New Class B และ Class C สำหรับเพลลาที่ 1 และ 2 ของรถไฟฟ้าชานบที่ 1 โดยลักษณะของตัวรถ และการติดตั้งตลับลูกปืนนั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 43 โดยที่ (R=ด้านซ้าย L=ด้านขวา) ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

ตารางที่ 3. แสดงค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนในหน่วยความเร็ว (mm/s) ของ Class ต่างๆ

		New		Class A		Class B		Class C	
		1	2	1	2	1	2	1	
1	L	0.53	0.60	0.90	0.82	1.20	1.25	1.52	1.35
	R	0.48	0.55	0.60	0.88	1.02	0.94	1.21	0.78

จากตารางที่ 3 แสดงค่าการสั่นสะเทือนในหน่วยความเร็ว ตลับลูกปืนทั้ง 4 Class ซึ่งทำการวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยใช้ค่าการสั่นสะเทือนในมาตรฐาน ISO 10816 (10 - 1000 Hz) ในหน่วย mm/s (ค่าความเร็ว) เมื่อนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนในหน่วย mm/s ของตลับลูกปืนแต่ละ Class และจะเห็นได้ว่า Class C มีระดับการสั่นสะเทือนสูงที่สุด ซึ่งเป็นตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายและไม่เหมาะสมที่จะใช้งานต่อไปอีก ส่วน Class B และ A นั้นยังสามารถที่จะใช้งานต่อไปได้แต่จะต้องทำการตรวจวัดเป็นระยะ เพื่อประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่จากค่าที่ได้ในการวัดแต่ละครั้ง ทั้งนี้ค่าที่ได้ในรูปแบบด้านล่างจะมีการเปลี่ยนแปลงถ้าหากทำการวัดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การประเมินมีความคลาดเคลื่อนและไม่ตรงกับความเสี่ยงจริง ส่วนในเรื่องของวิธีการประเมินนั้นจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อการวิเคราะห์ความเสี่ยงและประเมินหาอายุการใช้งาน



รูปที่ 43 การเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

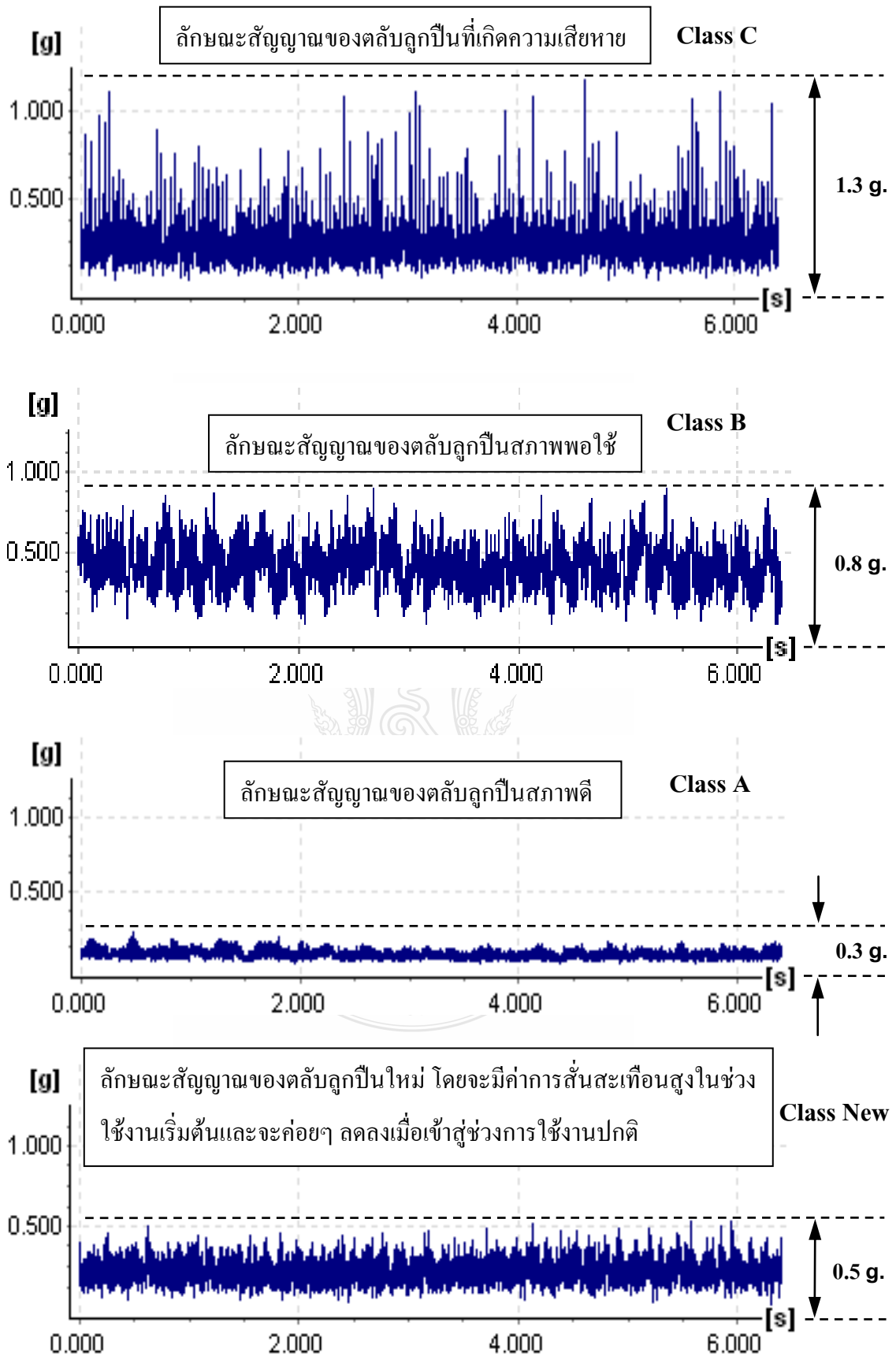
4.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงและประเมินหาอายุการใช้งาน

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO 10816 นั้น เป็นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบโดยรวม (Overall Vibration) ซึ่งจะไม่ระบุสาเหตุที่ชัดเจนของความเสียหาย เป็นเพียงการตรวจ สอบสภาพโดยรวมของตลับลูกปืนทั้งลูก และจะตรวจพบก็ต่อเมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหายในระดับที่สูงแล้ว ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเสี่ยงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์

แบบเจาะจงลงไปที่ยื่นส่วนต่างๆ 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 ว่ามาจากชิ้นส่วนใดของตลับลูกปืนส่วนระดับความรุนแรงนั้นจะดูได้จาก Time Domain และ จำนวน Harmonics ใน Spectrums Domain ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ใน Time Domain

เป็นวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือน โดยคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดการสั่นในเวลาหนึ่งๆ ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นจริงตามลักษณะสภาพตลับลูกปืน รูปที่ 44 แสดงกราฟความถี่ในโดเมนเวลาของตลับลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM ซึ่งจะเห็นว่าตลับลูกปืนใน Class C นั้นจะมีคลื่นเวลาของการสั่นที่มีการกระแทกในบางขณะระหว่างเม็ดลูกปืนกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย ซึ่งจะมีระดับการสั่นสะเทือนที่สูง โดยมีค่าประมาณ 1.3 g ส่วน Class B นั้นจะเป็นตลับลูกปืนสภาพพอใช้ โดยมีค่าการสั่นสะเทือนในระดับปานกลางประมาณ 0.8 g และ Class A จะมีสัญญาณการสั่นสะเทือนที่น้อย ซึ่งเป็นตลับลูกปืนสภาพดี โดยมีค่าประมาณ 0.3 g สำหรับ Class New นั้นจะเป็นตลับลูกปืนใหม่ที่ยังไม่มีการใช้งานมาก่อน โดยจะมีค่าการสั่นสะเทือนสูงในช่วงการใช้งานเริ่มต้นและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงการใช้งานปกติ ซึ่งระดับความรุนแรงนั้นดูได้จากค่า Amplitude หน่วยเป็น g หรือ mg (ค่าความเร่ง) ในแนวแกนตั้ง โดยสัญญาณใน Time Domain นั้นจะเป็นความถี่จากการวัดที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงสัญญาณ ซึ่งเป็นความถี่โดยรวมของตลับลูกปืน



รูปที่ 44 กราฟความถี่ใน Time Domain ของตลับลูกปืนแต่ละ Class ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

4.2.2 การวิเคราะห์ใน Spectrums Domain

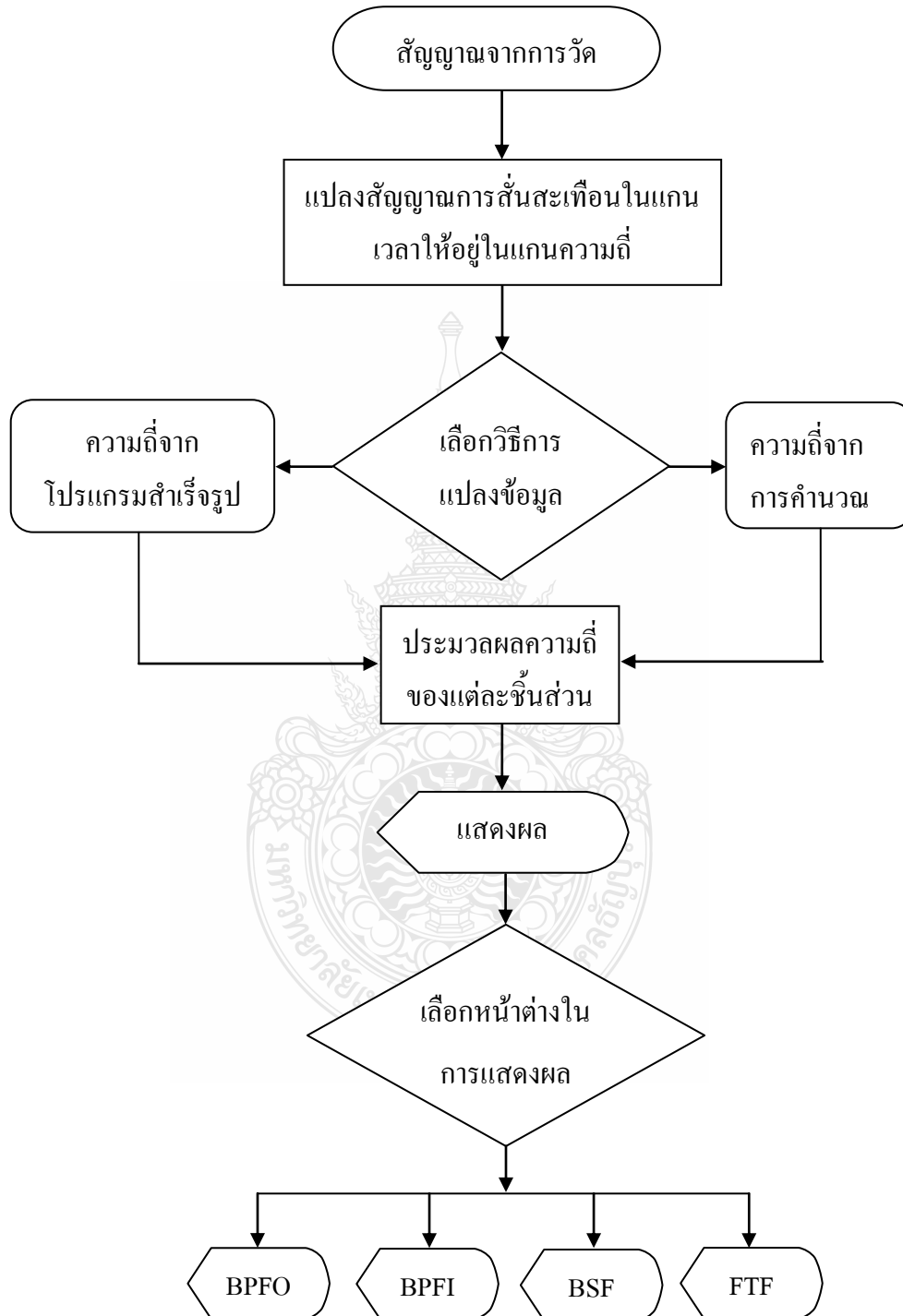
เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนกับความถี่แต่ละตำแหน่ง โดยการจำแนกสัญญาณคลื่นความถี่ที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนในส่วนประกอบต่างๆ ของตลับลูกปืนจากคลื่นไซน์ไปเป็นสเปกตรัมตามวิธีการของ FFT Demodulation และสำหรับชิ้นส่วนในตลับลูกปืนประกอบไปด้วย แหวนนอก แหวนใน เม็ดลูกปืน และรัง โดยการวิเคราะห์ชิ้นส่วนสำหรับตลับลูกปืนที่ใช้อยู่ในล้อรถไฟฟ้านั้น เราจะให้ความสำคัญกับตัวแหวนนอกก่อนเนื่องมาจากแหวนนอกจะยึดอยู่กับที่ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายบริเวณที่รับภาระเฉพาะจุด ตามด้วยตัวแหวนใน เม็ดลูกปืน และรัง ตามลำดับ จากชิ้นส่วนต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้นจะมีความถี่เฉพาะของแต่ละชิ้นส่วนซึ่งจะทำให้เราสามารถทราบว่ามีชิ้นส่วนไหนเกิดความเสียหาย โดยบริเวณที่เกิดความเสียหายนั้นจะส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนจากการกระแทกกันระหว่างเม็ดลูกปืนที่วิ่งผ่านบริเวณที่เกิดความเสียหาย ออกมากระตุ้นให้เกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) ของชิ้นส่วนนั้นๆ และสามารถที่จะตรวจจับด้วยเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน โดยความเสียหายของแต่ละชิ้นส่วนจะหาได้จากความถี่เฉพาะคุณด้วยความเร็วรอบ

ตารางที่ 4 แสดงการคำนวณหาค่าความถี่ของชิ้นส่วนต่างๆ ในตลับลูกปืนโดยการทดลองที่ความเร็วรอบ 150 RPM ส่วนค่าตัวประกอบต่างๆที่อยู่ในตารางนั้น ได้มาจากบริษัทผู้ผลิตตลับลูกปืน

ตารางที่ 4 การคำนวณหาค่าความถี่ในชิ้นส่วนต่างๆของตลับลูกปืน

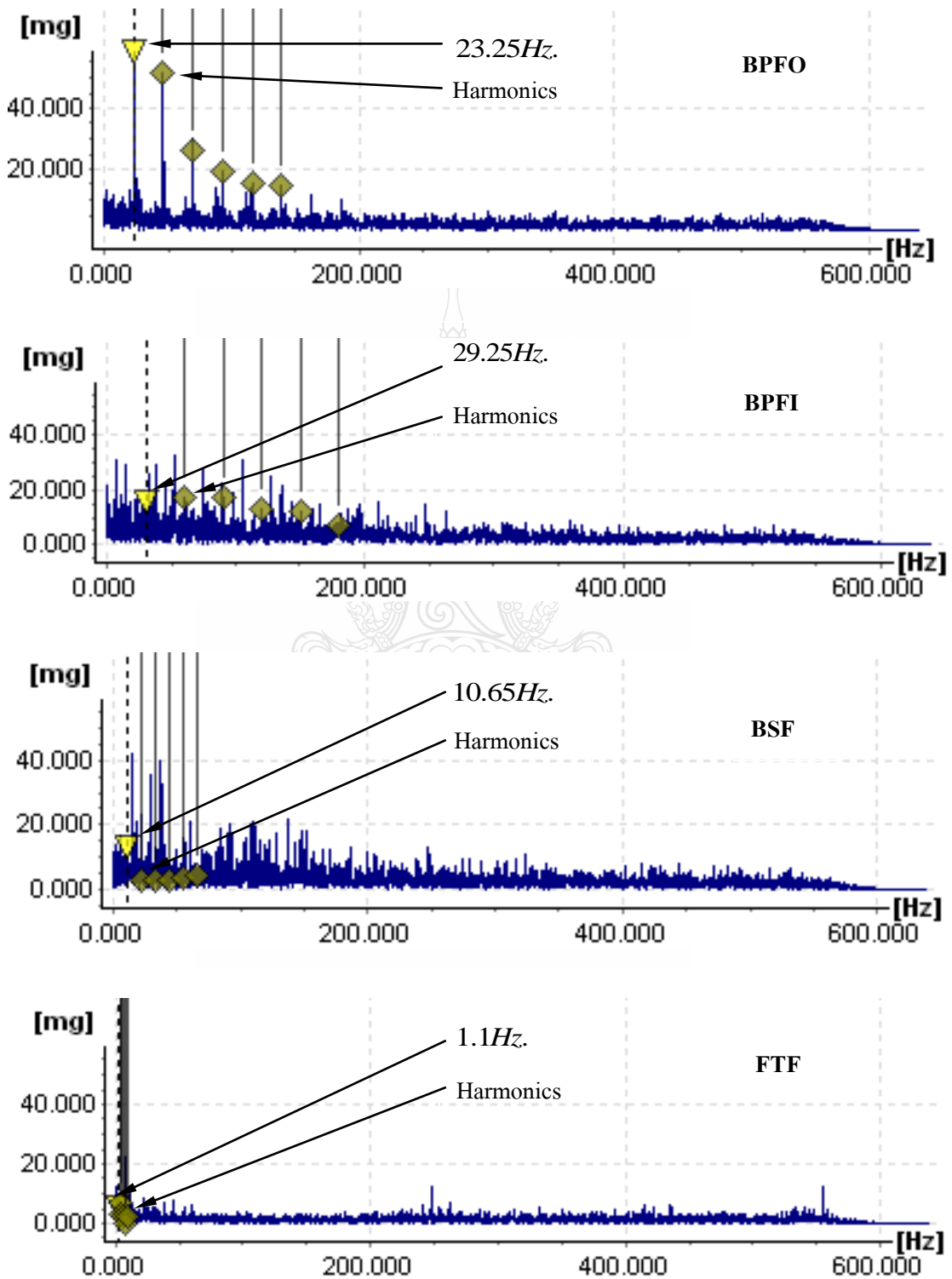
หัวข้อ	ความถี่ในชิ้นส่วนต่างๆของตลับลูกปืน			
	ค่า BPFO	ค่า BPFI	ค่า BSF	ค่า FTF
1. สมการที่ใช้ในการคำนวณ	$BPFO = \frac{N_b}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \gamma \right] RPM$	$BPFI = \frac{N_b}{2} \left[1 + \frac{B_d}{P_c} \cos \gamma \right] RPM$	$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left[1 - \frac{B_d}{P_c} \cos^2 \gamma \right] RPM$	$FTF = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \gamma \right] RPM$
2. ค่าตัวประกอบความถี่ธรรมชาติ	แหวนนอก (9.30)	แหวนใน (11.70)	การหมุนเม็ดลูกปืน (4.26)	รังพื้นฐาน (0.44)
3. การคำนวณ	$BPFO = \frac{9.30 \cdot 150}{60}$	$BPFI = \frac{11.70 \cdot 150}{60}$	$BSF = \frac{4.26 \cdot 150}{60}$	$FTF = \frac{0.44 \cdot 150}{60}$
4. ค่าที่ได้	□ 23.25Hz	□ 29.25Hz	□ 10.65Hz	□ 1.1Hz

การวิเคราะห์ใน Spectrums Domain นั้น จะอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งจำเป็นที่จะต้องใส่ค่าความถี่ของชิ้นส่วนต่างๆเข้าไป รูปที่ 45 แสดงขั้นตอนการวัดและการเลือกรูปแบบการแสดงผลของค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนต่างๆ



รูปที่ 45 ขั้นตอนในการแสดงค่าความถี่ของชิ้นส่วน

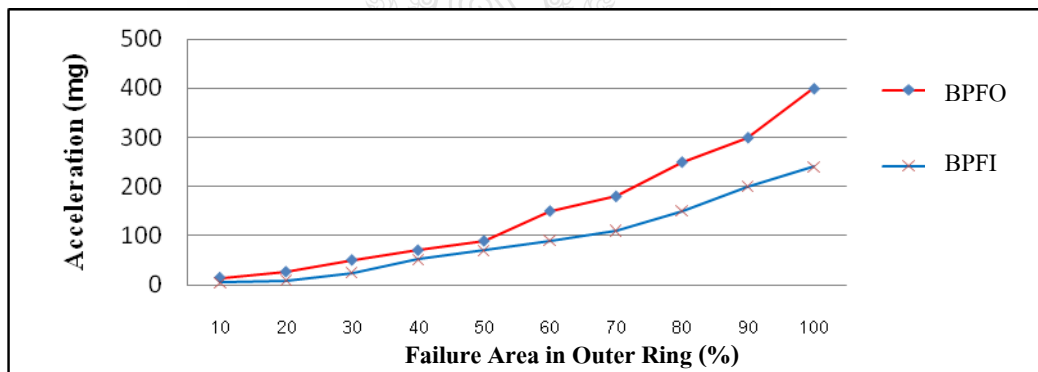
รูปที่ 46 แสดงกราฟความถี่เฉพาะใน Spectrums Domain ของชิ้นส่วนต่างๆ นอกจากนี้ยังแสดงจำนวน Harmonics ของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหาย ความถี่เฉพาะของ BPFO และ BPFI นั้นสามารถสังเกตเพิ่มเติมได้ ในขณะที่ความถี่ BSF และ FTF จะมีค่าน้อยมากที่ระดับความเสียหายเดียวกัน



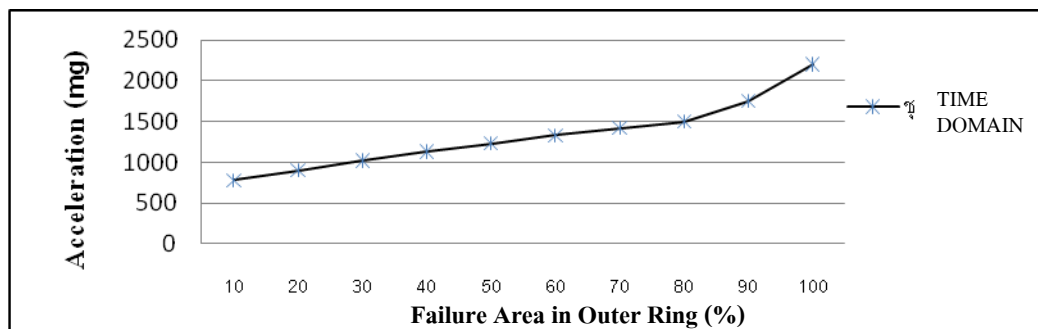
รูปที่ 46 กราฟความถี่ใน Spectrums Domain ของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 150 RPM

4.2.3 การประเมินอายุการใช้งาน

ผลจากการวิเคราะห์ในวิธีข้างต้นสามารถที่จะนำมาเปรียบเทียบค่าสัญญาณของความเสียหายที่เพิ่มขึ้นกับอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ โดยจะมีค่าที่นำมาประเมินอยู่ 3 ค่าหลักๆ คือค่า BPFO, BPFI และ Time Domain สาเหตุที่นำเฉพาะค่าเหล่านี้มาประเมินจากค่าทั้งหมดที่ได้กล่าวมานั้นเป็นเพราะว่าค่า BPFO จะเกิดการเสียหายมากที่สุด และค่า BPFI จะเสียหายรองลงมาประมาณครึ่งหนึ่งของ BPFO ส่วน Time Domain นั้นจะเป็นตัวบ่งบอก Class ของตลับลูกปืน ซึ่งการใช้งานตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้านั้นจะตั้งค่าความปลอดภัยไว้ที่ประมาณ 50,000 กิโลเมตร ก่อนที่ตลับลูกปืนจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง คือมีความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระเลย 50% ขึ้นไป รูปที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนกับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ (Load Zone) จากรูปจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนที่เพิ่มขึ้นกับพื้นที่ความเสียหายที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของบริเวณผิวที่รับภาระ โดยค่าความถี่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30% ของพื้นที่ความเสียหาย และจะเป็นระดับของตลับลูกปืน Class C ซึ่งมีอายุการใช้งานค่อนข้างน้อยและไม่ควรใช้งานตลับลูกปืนอีกต่อไป และรูปที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใน Time Domain กับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟความถี่ของชิ้นส่วน โดยเมื่อมีพื้นที่ความเสียหายมากขึ้นค่าสัญญาณใน Time Domain ก็จะสูงขึ้นตาม ซึ่งเป็นความถี่โดยรวมของตลับลูกปืนทั้งลูก



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของชิ้นส่วนกับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ



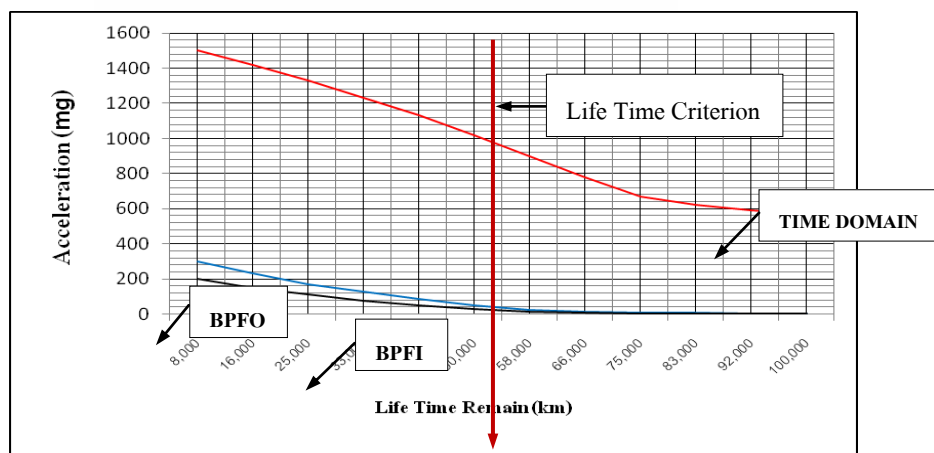
รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใน Time Domain กับพื้นที่ความเสียหายบริเวณผิวที่รับภาระ

การวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนจะกระทำใน 2 ลักษณะ คือ การวัดค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่ไม่ผ่านการบำรุงรักษาจนกระทั่งเกิดความเสียหาย และการวัดค่าการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่ได้ผ่านการบำรุงรักษาจนกระทั่งเกิดความเสียหาย ซึ่งความเสียหายแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ระดับที่มีอายุการใช้งาน 50,000 กิโลเมตร หรือ 6 เดือน ซึ่งเป็นระดับที่ตั้งไว้เป็นเกณฑ์ในการวัดว่าตลับลูกปืนเกิดความเสียหายขึ้น และระดับที่มีอายุการใช้งาน 100,000 กิโลเมตร หรือ 1 ปี ซึ่งเป็นระดับที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง สำหรับการประเมินจะแบ่งเป็นช่วงการวัดก่อนถึงเกณฑ์และหลังเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ สำหรับก่อนถึงเกณฑ์จะวัดทุกๆ 3 เดือน และสำหรับหลังเกณฑ์นั้นจะวัดทุกๆ 1 เดือน โดยค่าต่างๆ นั้นจะคิดมาจากแผนในการบำรุงรักษาหลักของตัวรถไฟฟ้า และความเหมาะสมในด้านความคุ้มค่าของการใช้งานตลับลูกปืนรวมทั้งด้านความปลอดภัยด้วย ตารางที่ 5 แสดงค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่มีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง) ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเสียหายก่อนการบำรุงรักษาจะสูงกว่า เนื่องจากสภาพของจาระบีที่ใช้งานมานานกว่า โดยค่าที่ได้นั้นจะนำไปพล็อตกราฟเพื่อประเมินหาอายุการใช้งาน

ตารางที่ 5 ค่าจากการวัดการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายก่อนและหลังการบำรุงรักษาโดยมีหน่วยเป็น mg (หน่วยความเร่ง)

ตัวแปรหลักในการประเมิน ลำดับความเสียหาย	อายุที่เหลือ (km)	BPFO (mg)		BPFI (mg)		Time Domain (mg)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
เริ่มเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง โดยจะมีความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระเลข 50% ขึ้นไป	8,000	380	300	230	200	1840	1500
	16,000	245	230	170	150	1750	1420
	25,000	196	170	130	110	1590	1330
ช่วงเตรียมการและบำรุงรักษา	33,000	150	125	82	75	1430	1230
	42,000	92	87	57	52	1360	1130
เกณฑ์ที่ตั้งไว้	50,000	63	45	32	22	1250	1020
ใช้งานได้ตามปกติ	58,000	31	26	29	10	1120	900
	66,000	19	14	15	8	980	780
	75,000	15	10	9	6	820	670
	83,000	10	9	8	5	710	600
	92,000	9	7	8	4	630	580
	100,000	7	6	6	3	520	480

จากตารางก่อนและหลังการบำรุงรักษาซึ่งมีค่าการสั่นสะเทือนที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยทำการเฉลี่ยจากค่าความเสียหายก่อนและหลังการบำรุงรักษา รวมทั้งจากประสบการณ์ในการใช้งาน ผลที่ได้คือค่าความถี่ของแหวนนอก (BPFO) จะต้องมีค่าไม่เกิน 50 mg และค่าความถี่ของแหวนใน (BPFI) จะต้องมีค่าไม่เกิน 25 mg ส่วนค่าสัญญาณใน Time Domain นั้นถ้ามีค่าตั้งแต่ 1000 mg ขึ้นไปจะจัดให้ตลับลูกปืนนี้อยู่ในระดับของ Class C ซึ่งเป็นตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายและไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถที่จะพล็อตกราฟประเมินอายุการใช้งานได้ ด้านล่าง รูปที่ 49 แสดงกราฟประเมินอายุการใช้งาน (Life Time Criterion, km) จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าตลับลูกปืนจะมีอายุการใช้งานอีกประมาณ 50,000 กิโลเมตร ก่อนที่ตลับลูกปืนนั้นจะเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง ซึ่งก็คือ 100,000 กิโลเมตร



รูปที่ 49 กราฟประเมินอายุการใช้งาน

4.3 ขั้นตอนการจัดทำเครื่องทดสอบตลับลูกปืน

4.3.1 ขั้นตอนการสร้าง

รูปที่ 50-53 แสดงภาพการทำงานอย่างคร่าวๆ ในการสร้างเครื่องทดสอบลูกปืนที่มีแรงกระทำ 2 แนวตั้งแต่เริ่มสร้างจนกระทั่งสำเร็จ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาการทำงานของระบบนิวแมติกส์ และไฟฟ้าจากคู่มือและแคทล็อกของบริษัทผู้ผลิต
2. จัดซื้ออุปกรณ์นิวแมติกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า
3. ทำการเชื่อมประกอบโครงสร้าง
4. ติดตั้งอุปกรณ์นิวแมติกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า
5. ทดลองและปรับแต่ง



รูปที่ 50 แสดงการตัดเหล็กโครงสร้าง



รูปที่ 51 แสดงการประกอบคัปปลิง



รูปที่ 52 แสดงการประกอบชุดสวิทซ์ไฟฟ้า



รูปที่ 53 แสดงการประกอบกระบอกนิวแมติกส์

4.3.2 วิธีการทดลอง

1. นำตลับลูกปืนที่จะทดสอบคือ ตลับลูกปืนเบอร์ 32208 ประกอบเข้าเครื่องทดสอบให้เรียบร้อย
2. ต่อระบบไฟฟ้าและระบบลมจากแหล่งจ่ายเข้ากับเครื่อง
3. เปิดสวิทช์โซลินอยด์วาล์ว 5/2 , 220V (ปุ่ม Start) ของกระบอกนิวแมติกส์ แรงที่กระทำด้านหน้าของตลับลูกปืน
4. เปิดสวิทช์โซลินอยด์วาล์ว 5/2 , 220V (ปุ่ม Start) ของกระบอกนิวแมติกส์ แรงที่กระทำด้านบนของตลับลูกปืน
5. เปิดสวิทช์ ON ของมอเตอร์

หมายเหตุ ในขั้นตอนการปิดเครื่องนั้นมีขั้นตอนดังนี้

1. ปิดสวิทช์ OFF ของมอเตอร์
2. ปิดสวิทช์ STOP ของกระบอกนิวแมติกส์แรงที่กระทำด้านบนของตลับลูกปืน
3. ปิดสวิทช์ STOP ของกระบอกนิวแมติกส์แรงที่กระทำด้านหน้าของตลับลูกปืน



รูปที่ 54 แสดงการทดสอบด้านข้าง



รูปที่ 55 แสดงการทดสอบด้านบน



รูปที่ 56 แสดงการทดสอบด้านเอียงซ้าย



รูปที่ 57 แสดงการทดสอบด้านเอียงขวา

ตารางที่ 6 ค่าที่ได้จากการทดลองเครื่องทดสอบตลับลูกปืนแบบรับแรงกระทำในแนวรัศมี และแรงกระทำในแนวแกนที่ค่าคงที่ 1,000 นิวตัน

แรงกระทำในแนวรัศมี (N)	ความเร็วรอบ (RPM)	การโก่งของเพลลา (mm)	การกินกระแสไฟฟ้า (A)
1,000	148.5	0.19	0.25
2,000	148.5	0.27	0.25
3,000	148.1	0.39	0.26

ตารางที่ 6 ค่าที่ได้จากการทดลองเครื่องทดสอบตลับลูกปืนที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำในแนวรัศมี จำนวน 3 ระดับคือ 1,000 2,000 และ 3,000 นิวตัน จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าความเร็วรอบเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ที่ 150 รอบต่อนาที โดยที่ระยะ โกงและการกินไฟ สูงสุดอยู่ที่ 0.39 มิลลิเมตร และ 0.26 แอมป์ ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

5.1.1 การจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน

จากการศึกษาและวิเคราะห์ตลับลูกปืนที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลา 6 ปี พบว่าความเสียหายของตลับลูกปืนสามารถที่จะจำแนกออกได้เป็น 3 ระดับตามลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น บริเวณพื้นที่รับแรง (Load zone) คือ A B และ C โดยที่ระดับ A จะมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ที่ 1-15% ระดับ B จะมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอยู่ที่ 15-30% และระดับ C จะมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 30-50% ในการวิเคราะห์ตลับลูกปืนจำนวน 840 ลูกพบว่าเมื่อทำการบำรุงรักษาจะสามารถนำกลับมาใช้ได้ถึง 70% โดยแบ่งเป็นตลับลูกปืนแบบระดับ A 60% และตลับลูกปืนแบบระดับ B 10%

5.1.2 การประเมินอายุการใช้งานของตลับลูกปืนโดยการวัดการสั่นสะเทือน

นอกจากการจำแนกความเสียหายของตลับลูกปืนโดยดูจากความเสียหายที่เกิดขึ้นในพื้นที่รับแรงแล้ว คณะผู้วิจัยยังได้นำเอาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนมาใช้จำแนกระดับความเสียหายให้ชัดเจนเพิ่มขึ้นอีกด้วย การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนจะกระทำโดยอาศัยหัววัดความเร่งแบบ Piezoelectric ซึ่งจะบันทึกค่าการสั่นสะเทือนในฟังก์ชัน Velocity Acceleration และ Demodulation สำหรับในงานวิจัยนี้จะเน้นวิเคราะห์ไปที่ฟังก์ชัน Demodulation เป็นหลักก่อน เนื่องจากต้องการให้มีการปรับแต่งสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนที่มีขนาดต่ำให้มีขนาดสูงขึ้นก่อนเพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณความเสียหายได้ชัดเจน ในการทดสอบหาอัตราความเสียหายที่เพิ่มขึ้นต่อสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน ได้กำหนดเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่สูง 12.5-20000 Hz เพื่อตรวจสอบการเกิดเรโซแนนซ์ในโครงสร้างตลับลูกปืนซึ่งจะเป็นความเสียหายในช่วงเริ่มต้น และช่วงความถี่ต่ำ 0.3-500 Hz เพื่อตรวจสอบความถี่ของชิ้นส่วนเฉพาะในตลับลูกปืน

จากการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลพบว่า ตลับลูกปืนจะอยู่ในระดับของ Class C ก็ต่อเมื่อสัญญาณความถี่ของการสั่นสะเทือนของแหวนนอก (BPFO) และแหวนใน (BPFI) มีค่าเกิน 50 mg และ 25 mg ตามลำดับซึ่งรวมทั้งสัญญาณใน Time Domain ต้องมีค่า 1000 mg ขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการชำรุดแต่ละครั้ง (Mean time between failures: MTBF) แสดงให้เห็นว่า อายุการใช้งานของตลับลูกปืน Class A สามารถใช้งานได้อีกในช่วง 300,000-500,000 กิโลเมตร Class B สามารถใช้งานได้อีกในช่วง 200,000-300,000 กิโลเมตร ส่วนใน Class C ไม่แนะนำให้ นำกลับมาใช้อีก

5.1.3 เครื่องทดสอบตลับลูกปืนที่รับแรงในแนวรัศมีและแนวแกน

เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของลูกปืนในอนาคต คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบตลับลูกปืนขึ้น โดยเครื่องดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้ในโรงงานทั่วไป เนื่องจากอาศัยต้นกำลังเป็นระบบนิวแมติกส์ เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถให้แรงแนวรัศมีได้ 3,000 นิวตัน และแรงในแนวแกนได้ 1,000 นิวตัน โดยที่ความเร็วในการใส่แรงให้กับตลับลูกปืนทั้งสองแนวแกนอยู่ที่ความเร็ว 0.01 เมตรต่อวินาทีและความเร็วของการหมุนตลับลูกปืนเป็นไปตามข้อกำหนดที่ประมาณ 150 รอบต่อนาที จากทดลองยังพบว่าเพลลาที่ใช้รองรับการทดสอบตลับลูกปืนมีการโค้งงอสูงสุดที่ 0.39 มิลลิเมตรและมอเตอร์กินกระแสไฟฟ้าคงที่ 0.26 แอมป์แปร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิเคราะห์ความเสียหายนั้นควรจัดให้มีการเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ควรให้ความสำคัญกับความเสียหายเนื่องจากความล้าเป็นอันดับต้นๆ ก่อนเนื่องจากเป็นสาเหตุที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ตามด้วยความเสียหายเนื่องจากสิ่งปนเปื้อนซึ่งจะเกิดจากสิ่งสกปรกจากการใช้งานหรือการบำรุงรักษาโดยความเสียหายในลักษณะนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำความสะอาดและเปลี่ยนสารหล่อลื่นใหม่ และความเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่นซึ่งสามารถที่จะแก้ไขได้โดยการเพิ่มสารหล่อลื่นเช่นเดียวกัน

2. การแบ่งระดับของความเสียหายนั้นควรมีการเพิ่มระดับความเสียหายออก เป็น 4 ระดับ โดยการเพิ่ม Class D ขึ้นมาอีกหนึ่งระดับกล่าวคือ ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่อพื้นที่ผิวที่รับภาระอยู่ในช่วง 30%-40% ให้จำแนกเป็น Class C ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในกรณีฉุกเฉินได้ในช่วง 10,000-30,000 กิโลเมตร ในระหว่างการรอการขนส่งตลับลูกปืนมาจากต่างประเทศ หรือการนำไปใช้ภายนอกตัวรถอาทิเช่น การกลิ้งล้อภายนอกตัวรถและนำไปใช้ในกรณีทดสอบอื่นๆ และถ้ามีความเสียหายมากกว่า 40% ขึ้นไปให้เป็น Class D ซึ่งห้ามนำกลับไปใช้งานอีก จากประสบการณ์ในการใช้งานตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้าพบว่าสามารถใช้งานได้ถึง 11 ปี

3. ความมีเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยในการใช้เครื่องทดสอบตลับลูกปืน เช่น การติดตั้งกระจกหรือพลาสติกใสบริเวณรอบๆจุดที่มีแรงกระทำ และต้องออกแบบวงจรการทำงานของระบบนิวแมติกส์ให้มีลำดับการทำงานก่อนหลัง

บรรณานุกรม (Bibliography)

- [1,2] Siemens Ltd. ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้างู้อักร. 2551.
- [3] “ 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].
- [4] วัชระ พันธุ์จันทร์, คัมภีร์ รักไทย. ปรึญญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2553.
- [5] สุรียา สารมาตย์, เทิดเกียรติ ลิ้มปีทีปราการ “การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินอายุการใ้
งานของตลับลูกปืนในล้อรถไฟฟ้
- [6] Schaeffler Gruppe basis vibration analysis hands on with FAG detector III 2007.
- [7] Berry, J. E., Tracking of Rolling Element Bearing Failure Stages Using Both Vibration Signature
- [8] Takafumi Nagatomo and David G. Toth “Bearing Damage” Quarterly Report of RTRI
Vol. 47 2006, No. 3 pp.119-124.
- [9] ประศาสน์ สุบรรพวงศ์ “การวิเคราะห์การสันสะเทือนของแบร้งแบบเม็ดลูกปืนใน
ปั้มไฮดรอลิกแบบเฟือง” มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2542: 1-2.
- [10] สมชาย เดโชธรรมสติด “การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนของชุดเฟืองด้วย
สเปก ตรัมและเซปส์ตรัม” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540: 1.
- [11] กมลวรรณ พงสาพิชญ์ “การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสันสะเทือนและระดับ
การสึกหรอของเฟือง” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544: 2-4.
- [12] จุติโรจน์ เบ็ญจลักษณ์ “การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสันสะเทือนของเครื่องจักรหมุน”
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545: 21-23.
- [13] ประดิษฐ์ หมู่เมืองสอง, สุขญาณ หารฤษฎ “การวิเคราะห์การสันสะเทือน” ซีดีเคยูเคชั่น 2550.
หน้า 86-99.
- [14] วินัย เวชวิทยาลัง “เทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสันสะเทือนเพื่องานบำรุงรักษา”
เอ็มแอนด์อี 2552. หน้า 11-22.
- [15] ณัฐพร ไ้แก่ง, วุฒิสักดิ์ บุตน์ “การศึกษาการออกแบบแบร้งในโครงสร้าง” วิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2543.
- [16] ประจวบ ปานเพชร, ประทีป มุฑุศรี, ประเสริฐ กลัปรอด “เครื่องสาธิตการทดลองความเสียดทาน
ของแบร้ง” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2546.

ประวัติและผลงานวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล ดร. เทอดเกียรติ ลิมปีทีปราการ
Terdkiat Limpeteeparakarn, Ph.D.
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-3499-00408-28-6
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 7
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ที่ตั้งเลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ที่ทำงาน 0 2549 3430 โทรศัพท์มือถือ 084-142-5915
โทรสาร 02-549-3432 อีเมลล์: terdkiat@rmutt.ac.th, terdkiat@yahoo.com
- ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2549 Ph.D. (Mechanical Engineering) Florida Atlantic University, USA
พ.ศ. 2542 M.S. (Mechanical Engineering) Oklahoma State University, USA
พ.ศ. 2537 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
(เกียรตินิยมอันดับ 2)
- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
6.1 การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
6.2 การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ
6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรด้วยวิธีไฟไนต์อีเมนต์
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพ
ในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ
ข้อเสนอการวิจัย
7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ไม่มี
7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย:
 - การวิจัยและพัฒนาแบบจำลองและต้นแบบรถไฟฟ้าขนาด ๔ ที่นั่ง: ระบบควบคุมการเคลื่อนที่และตรวจรู้ตำแหน่งของแบบจำลองรถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยเอซีมอเตอร์
 - การพัฒนาตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ทรงพาราโบลิกสำหรับผลิตน้ำร้อนหรือไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

1. ประพนธ์ ชูประเสริฐ และ เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ. 2554. **“การประเมินศักยภาพการนำความร้อนทิ้งมาใช้ในการอบกากอ้อยในโรงงานน้ำตาล”**. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. 3-5 พฤษภาคม 2554. จังหวัดภูเก็ต

2. อภิเดช บุญเจือ, เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ, สุเทพ วัชรารื่องวิทย์ และสถาพร ทองวิก. 2553. **“ผลของความยาวท่อสารทำความเย็นต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศชุดคอยล์เย็นอยู่ต่ำกว่าชุดคอยล์ร้อน”**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. 20-22 ตุลาคม 2553. จังหวัดอุบลราชธานี

3. ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, ศิริชัย แดงแอม, เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ, สถาพร ทองวิก, จักรี ศรีนนท์ฉัตร และสมชัย หิรัญวโรดม. 2553. **“การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 600 โวลต์ สำหรับรถไฟฟ้าที่รับไฟด้านบน”**. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3. 24-26 พฤศจิกายน 2553. ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์

4. สุริยา สารมาตย์ และ เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ. 2553. **“การวิเคราะห์ความเสียหายเพื่อที่จะหาอายุการใช้งานของตัวลูปปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน”**. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48.

5. สุริยา สารมาตย์ และ เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ. 2553. **“การวิเคราะห์ความเสียหายและประเมินอายุการใช้งานของตัวลูปปืนในล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน”**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8. 22-23 เมษายน 2553

6. Jakkee Srinonchat, Paisan Boonjeam, Sirichai Dang-aem and Teadkiat Limpiteeprakarn. 2551. **“Monitoring System for Electrical Vehicle Model”**. The 2nd International Conference on Robotics, Informatics, and Intelligent Technology (RIIT2009). December 11st – 14th, 2009 at Bangkok, Thailand

7. นพจุง ฤทธานนท์, ไพศาล บุญเจียม, ศิริชัย แดงแอม, เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ, จักรี ศรีนนท์ฉัตร และ สมชัย หิรัญวโรดม. 2552. **“การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบ PWM สำหรับรถไฟฟ้าขนาด 4 ที่นั่ง”**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32. 28-30 ตุลาคม 2552. โรงแรมทราวดี รีสอร์ท ปรานีนบุรี

8. Prempraneerach P., Roynarin W., Limpiteeprakarn T. 2551. **“Effect of Stochastic Wind Loads on Wind Turbine”**. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4.

9. Limpiteeprakarn , T., Modeling Of Flexible Pipe For Culvert Application Under Shallow Burial Condition Ph.D. Dissertation, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, December 2006.

10. Arockiasamy, M., Chaallal, O., and Limpeteprakarn, T., “Full-Scale Field Tests on Flexible Pipes under Live Load Application”, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 20, No. 1, 2006, pp. 21-27.

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำอยู่ :

1. ระบบปรับอากาศรถไฟฟ้านคร 2 ที่นั่ง, 2552: รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ: เสร็จเรียบร้อยประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์
2. การพัฒนาตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ทรงพาราโบลิกสำหรับผลิตน้ำร้อนหรือไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า: สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาแห่งชาติ: เสร็จเรียบร้อยประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์
3. การพัฒนาอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าจากรางที่สามของรถไฟฟ้าในระบบขนส่งมวลชน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ: เสร็จเรียบร้อยประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล นายสุริยา สารมัตย์
2. วัน เดือน ปีเกิด 11 กุมภาพันธ์ 2527
3. ที่อยู่ 93/4 บ.หนองแสง ต.หนองบัวแก้ว
อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม 44110
4. ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ. 2550
5. ความชำนาญเฉพาะทาง
 1. การวิเคราะห์ความเสียหายและบำรุงรักษาตลับลูกปืน (Analysis and Refurbishment)
 2. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis)
 3. การปรับดุลยภาพในเครื่องจักร (Balancing)
 4. การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Testing)
6. ประวัติการทำงาน
พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกลแผนกซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า (BTS)
บริษัท Siemens Limited