

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	8
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	10
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	10
บทที่ 2 หลักการ เหตุผล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 ขั้นตอนสำคัญในการทำ Vibration analysis	12
2.2 การแปลงสัญญาณ Time domain และ Frequency domain	12
2.3 ความถี่ที่กำเนิดจากเครื่องจักรกล	13
2.4 ลักษณะการชำรุดที่อายุความล้าของแบริ่งแบบลูกกลิ้ง	18
2.5 ความถี่ที่เกิดจาก Anti-friction bearing	20
2.6 การปรับปรุงสัญญาณแบบ Envelope demodulation	22
2.7 หัววัดความเร่ง การติดตั้งและการเลือกหน่วยวัด	25
2.8 Window functions และการเลือกใช้	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	30
3.2 วิธีดำเนินการวัดการสั่นสะเทือน	32
3.3 การทดสอบหาอัตราการใช้ของรอยแตกของรางนอกแบริ่ง	34

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผลการวิจัย	35
4.1 ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการถูกกระตุ้นในช่วงความถี่ 20 - 30,000 Hz	35
4.2 ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการชำรุดโดยตรงของแบริ่งแบบวัดโดยตรง (linear)	45
4.3 ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการชำรุดโดยตรงของแบริ่งวัดโดยการปรับปรุงสัญญาณ	50
4.4 ผลการทดสอบหาอัตราการใช้ของรอยแตกที่ผิวภายนอกของแบริ่ง	54
4.5 การวิจารณ์ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการถูกกระตุ้นในช่วงความถี่ 20 - 30,000 Hz	60
4.6 การวิจารณ์ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการชำรุดโดยตรงของแบริ่งแบบวัดโดยตรง (linear)	61
4.7 การวิจารณ์ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการชำรุดโดยตรงของแบริ่งวัดโดยการปรับปรุงสัญญาณ	61
4.8 การประมาณค่าความถี่ที่เกิด Mounted resonance เมื่อติดตั้งหัววัดความเร่งด้วยแม่เหล็ก	62
4.9 การพิจารณาความถี่ที่ควรกรองสัญญาณออก	64
4.10 การวิจารณ์ผลการทดสอบหาอัตราการใช้ของรอยแตกที่ผิวภายนอกของแบริ่ง	64
4.11 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย	65
4.12 การนำผลการวิจัยไปใช้ในงานจริง	66
บทที่ 5 บทสรุป	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	69
5.3 ข้อคิดเห็นและเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลปั๊มไฮดรอลิค แบริ่งที่ทดสอบและการคำนวณ BPF ของแบริ่ง	74
ภาคผนวก ข ข้อมูลหัววัดความเร่งที่ใช้ในการทดสอบ	81
ภาคผนวก ค ตัวอย่างผลการวัดการสั่นสะเทือนในรูปของโดเมนความถี่และเวลา	82
ภาคผนวก ง การทำ Bump test (Impact test)	85
ภาคผนวก จ การกำหนดองค์ประกอบที่สำคัญในการวัดในโปรแกรมของ CSI	88
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการเรียงลำดับของ spectrum ที่ทำการวัดในช่วงความถี่ 20 - 30,000 Hz	90
ภาคผนวก ช ข้อมูลการเรียงลำดับของ spectrum ที่ทำการวัดแบบปรับปรุงสัญญาณ	107

ภาคผนวก ข	กราฟแสดงการติดตามแอมพลิจูดของ BPF และการสั่นสะเทือน โดยรวม ทำการวัดแบบปรับปรุงสัญญาณ	124
ภาคผนวก ฉ	ตารางการเก็บข้อมูล	136
ภาคผนวก ช	ขนาดรอยแผลแตกที่ผิวรางนอกของเบร้งเมื่อจบการทดสอบ	138
ภาคผนวก ฎ	ข้อมูลการทดลองเปลี่ยนค่า HP filter	141
ภาคผนวก ฏ	ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกที่ทำการวัดในช่วง ความถี่ 20 -30,000 Hz	146
ภาคผนวก ฐ	การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเมื่อภาระของปั้มไฮดรอลิกมีค่าต่ำ	151
ภาคผนวก ท	กราฟแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในระบบไฮดรอลิก	157
ภาคผนวก ฒ	Frequency response ของหน่วยวัด จากการวัดจริง	159
ภาคผนวก ณ	ภาพแสดงการวัดและการติดตั้งจริงบนตัวเครื่องจักร	162
ภาคผนวก ด	การทดสอบเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย	164
ภาคผนวก ต	คู่มือปฏิบัติการวัดการสั่นสะเทือนในปั้มไฮดรอลิก	165
ประวัติผู้เขียน		173

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดต่ำสุดจากค่าสูงสุด ตลอดช่วงการวัด ตั้งแต่แบร์ริง สภาพดี จนถึงจุดชำรุด	46
4.2 ผลการทดสอบอัตราการใช้ของรอยแตก (Spall) ที่ผิวภายนอกของแบร์ริง เทียบกับจำนวนครั้งที่ยกกระบะของเครื่องจักร หมายเลขปั๊มไฮดรอลิค : 01	55
4.3 ผลการทดสอบอัตราการใช้ของรอยแตก (Spall) ที่ผิวภายนอกของแบร์ริง เทียบกับจำนวนครั้งที่ยกกระบะของเครื่องจักร หมายเลขปั๊มไฮดรอลิค : 02	56
4.4 ผลการทดสอบอัตราการใช้ของรอยแตก (Spall) ที่ผิวภายนอกของแบร์ริง เทียบกับจำนวนครั้งที่ยกกระบะของเครื่องจักร หมายเลขปั๊มไฮดรอลิค : 03	57
4.5 ความถี่ที่เกิด Mounted resonance เมื่อติดตั้งหัววัดความเร่งด้วยแม่เหล็ก	63
4.6 จำนวนครั้งที่ยกกระบะได้สูงสุด และอายุของแบร์ริงหลังการเริ่มชำรุด	65

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 อายุการใช้งานโดยเฉลี่ย ของปั๊มไฮดรอลิค รถบรรทุกเท้าย ขนาด 85 ตัน ในช่วง 10 ปี	3
1.2 การชำรุดแบบรอยครูด (scratch) ที่แผ่นกันรุนด้านข้าง เมื่อแบร้งเกิดการชำรุดแบบรุนแรง ในปั๊มไฮดรอลิคแบบเฟือง	3
1.3 การสึกหรอของเสื้อปั๊มไฮดรอลิค จากสาเหตุการชำรุดของแบร้ง ทำให้เฟืองเกียร์ไปกัดเสื้อปั๊ม	4
1.4 การชำรุดของกระบอกไฮดรอลิคเป็นจำนวนมาก ในช่วงที่เกิดการชำรุดอย่างรุนแรงของแบร้ง ในปั๊มไฮดรอลิค	4
1.5 ลักษณะการชำรุดแบบรอยครูด ภายในกระบอกไฮดรอลิค โดยมีสาเหตุจากการชำรุดแบบรุนแรงของแบร้งในปั๊มไฮดรอลิค	5
1.6 การชำรุดของเม็ดแบร้ง จากสาเหตุการชำรุดที่รางนอกของแบร้งก่อน และจะลุกลามถึงรางในของแบร้งต่อไป	5
1.7 รถบรรทุกเท้ายขนาดบรรทุก 85 ตัน ที่ใช้ทำการวิจัย	7
1.8 โครงสร้างและชิ้นส่วนในวงจรไฮดรอลิคของรถบรรทุกเท้ายขนาด 85 ตัน หมายเลข 1 คือ ปั๊มที่ทำการวิจัย	7
2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง frequency และ time domain ใน FFT	13
2.2 สาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล	14
2.3 ลักษณะทั่วไปในการแบ่งช่วงความถี่ เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล	15
2.4 ลักษณะของ spectrum ที่เกิดจากการชำรุดของแบร้ง ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น stage 1 จนถึงระยะสุดท้าย stage 4	16
2.5 GMF, BPF และ running speed (S) บนแกน linear	17

2.6	GMF, BPF และ running speed (S) บนแกน logarithm	17
2.7	เปรียบเทียบ spectrum ก่อนเกิด (บน) และหลังเกิด resonance (ล่าง) เมื่อแบริ่งเริ่มชำรุด	18
2.8	รอยแตกที่ผิวของเม็ดแบริ่งขนาด 0.5 นิ้ว ซึ่งชุบแข็งโดย case - carburized	19
2.9	การเริ่มต้นแตกที่ผิวจากสาเหตุ stress concentration ที่ผิวของแบริ่ง	19
2.10	Axial view of bearing	21
2.11	Cross - sectional view of bearing	22
2.12	Amplitude modulation and demodulation ในรูปของ time domain	23
2.13	Frequency spectrum จากการทำ demodulate แบบ full wave, phase sensitive rectifier	23
2.14	Functional block diagram ซึ่งเพิ่มชุดขยายสัญญาณและตัวกรองสัญญาณ ก่อนทำการ demodulate	24
2.15	วงจรพื้นฐาน RC filter, high-pass filter (บน) และ low-pass filter (ล่าง)	24
2.16	Response curve ของ CR filter แบบ HP	25
2.17	Response curve ของ RC filter แบบ LP และกราฟแสดงค่าผิดพลาด 2 %	25
2.18	หลักการพื้นฐานของหัววัดความเร่งที่ทำจากวัสดุ piezoelectric material	26
2.19	โครงสร้างภายในหัววัดความเร่งแบบ piezoelectric แบบกดอัด (compression)	27
2.20	Mounted resonance เปลี่ยนแปลงตามวิธีการติดตั้งหัววัดความเร่ง	27
2.21	Frequency response curves เปรียบเทียบระยะขจัด ความเร็ว และความเร่ง	28
2.22	ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างข้อมูล 4 ขั้นตอนใน digital frequency analyzer	29
2.23	Characteristic ของ window function ทั้ง 4 แบบ ใน time domain	29
3.1	ตำแหน่งการติดตั้งของปั๊มไฮดรอลิค (4) บนตัวเครื่องจักร	31
3.2	ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่ง และระยะห่างจากแบริ่ง	31
3.3	อุปกรณ์ที่สำคัญในการวิจัย	32
4.1	อัตราส่วนของแอมพลิจูด จุดวัด L01S เมื่อแบริ่งยังไม่เกิดการชำรุด	36
4.2	อัตราส่วนของแอมพลิจูด จุดวัด L01S เมื่อเริ่มทำดำนี	36
4.3	อัตราส่วนของแอมพลิจูด จุดวัด L01S เมื่อแบริ่งเกิดการชำรุดรุนแรง	37
4.4	อัตราส่วนของแอมพลิจูด จุดวัด L01M เมื่อแบริ่งยังไม่เกิดการชำรุด	37
4.5	อัตราส่วนของแอมพลิจูด จุดวัด L01M เมื่อเริ่มทำดำนี	38
4.6	อัตราส่วนของแอมพลิจูด จุดวัด L01M เมื่อแบริ่งเกิดการชำรุดรุนแรง	38

4.7 Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L01S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	39
4.8 Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L01M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	39
4.9 Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L02S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	40
4.10 Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L02M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	40
4.11 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0046	41
4.12 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0047	41
4.13 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0049	42
4.14 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0050	42
4.15 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0051	43
4.16 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0052	43
4.17 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0032	44
4.18 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0033	44
4.19 Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รท 62-0036	45
4.20 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L01S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	47
4.21 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L01M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	47
4.22 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L02S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	48
4.23 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L02M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	48
4.24 การสันนิษฐานโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L01S รท 62-0036	49
4.25 การสันนิษฐานโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L01M รท 62-0036	49
4.26 การสันนิษฐานโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L02S รท 62-0036	49
4.27 การสันนิษฐานโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L02S รท 62-0036	50
4.28 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H01S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	51
4.29 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H01M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	51
4.30 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H02S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	52
4.31 Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H02M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	52
4.32 การสันนิษฐานโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด H01S รท 62-0036	53
4.33 การสันนิษฐานโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด H01M รท 62-0036	53
4.34 การสันนิษฐานโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด H02S รท 62-0036	53
4.35 การสันนิษฐานโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด H02M รท 62-0036	54
4.36 อัตราการเติบโตของรอยแตก (Spall) ที่ผิวภายนอกของเบริง	58

4.7	Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L01S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	39
4.8	Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L01M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	39
4.9	Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L02S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	40
4.10	Spectra ที่ 30 kHz จุดวัด L02M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดที่ชำรุดรุนแรง	40
4.11	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0046	41
4.12	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0047	41
4.13	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0049	42
4.14	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0050	42
4.15	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0051	43
4.16	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0052	43
4.17	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0032	44
4.18	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0033	44
4.19	Peak amplitude ratio ใน 3 ช่วงความถี่ รก 62-0036	45
4.20	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L01S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	47
4.21	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L01M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	47
4.22	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L02S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	48
4.23	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด L02M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	48
4.24	การสั่นสะเทือนโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L01S รก 62-0036	49
4.25	การสั่นสะเทือนโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L01M รก 62-0036	49
4.26	การสั่นสะเทือนโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L02S รก 62-0036	49
4.27	การสั่นสะเทือนโดยรวมและ BPF ที่ 400 Hz จุดวัด L02S รก 62-0036	50
4.28	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H01S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	51
4.29	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H01M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	51
4.30	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H02S ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	52
4.31	Spectra ที่ 400 Hz จุดวัด H02M ตั้งแต่เบริงยังไม่ชำรุดจนถึงจุดชำรุดรุนแรง	52
4.32	การสั่นสะเทือนโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด HO1S รก 62-0036	53
4.33	การสั่นสะเทือนโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด HO1M รก 62-0036	53
4.34	การสั่นสะเทือนโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด HO2S รก 62-0036	53
4.35	การสั่นสะเทือนโดยรวม และ BPF ที่ 400 HZ จุดวัด HO2M รก 62-0036	54
4.36	อัตราการเติบโตของรอยแตก (Spall) ที่ผิวรางนอกของเบริง	58

4.37	เศษเหล็กชิ้นแรกของการชำรุด ที่ผิวภายนอกของแบร็ง ขนาด 0.76 x 1.69 x 0.26 มม. ก. คว่ำลง และ ข. หายขึ้น	58
4.38	การเริ่มชำรุดที่ผิวภายนอกของแบร็ง ขนาดรอยแผล 3 x 3 มม.	59
4.39	การชำรุดรุนแรงที่ผิวภายนอกของแบร็ง ขนาดรอยแผล 15 x 20 มม.	59
4.40	อัตราส่วนของแอมป์ลิจูด ติดตั้งหัววัดด้วยแม่เหล็ก / ติดตั้งหัววัดด้วยสลักเกลียว	63
4.41	ลักษณะทั่วไปของขั้นตอนการชำรุดของแบร็ง เทียบเป็นอายุการใช้งานที่เหลือ	65

อักษรย่อและสัญลักษณ์

อักษรย่อ

ความหมาย

AFBMA	Anti-Friction Bearing Manufacturers Association
BPF	Ball pass frequency
BPI	Ball pass frequency of the inner race
BPFO	Ball pass frequency of the outer race
BSF	Ball spin frequency
CSI	Computational Systems Incorporated
dB	เดซิเบล
FD	แบริ่งตำแหน่งด้านหน้าขับ
FDN	แบริ่งตำแหน่งด้านหน้าตาม
FFT	Fast Fourier Transform
FTF	Fundamental train frequency
G	Gravity acceleration
GMF	Gear mesh frequency
HP	High pass
HFRD	High frequency resonance demodulation
HRC	Rockwell hardness, C scale
Hz	Hertz (round per second)
ICP	Integrated circuit piezoelectric
ISO	International Organization for Standardization
LP	Low pass
MHz	Mega hertz
NDT	Nondestructive testing
psi	Pound per square inch
RC	Resistance - capacitance
RD	แบริ่งตำแหน่งด้านหลังขับ

RDN	แปรงตำแหน่งด้านหลังตาม
RPM	Round per minute
S	Rotating unit frequency or speed
SAE	Society of Automotive Engineers
SOA	Spectrometer oil analysis
UNF	Unified fine thread series
WR	Wilcoxon Research

สัญลักษณ์

ความหมาย

B_d	Ball diameter (mm)
C	Capacitance (farad)
f	ความถี่ (s^{-1})
$G(f)$	ฟังก์ชันของความถี่
$g(t)$	ฟังก์ชันของเวลา
N_b	จำนวนเม็ดแปรง (roller)
P_d	Pitch diameter (mm.)
R	Resistance (ohm)
r	รัศมี (mm.)
r_i	รัศมีผิวนอกของ inner race (mm.)
r_o	รัศมีผิวในของ outer race (mm.)
r_b	รัศมีของเม็ดลูกปืน (mm.)
t	เวลา (s)
V	ความเร็วเชิงเส้น (m/s)
V_c	ความเร็วเชิงเส้นของ cage (m/s)
V_i	ความเร็วเชิงเส้นของ เส้น inner race (m/s)
V_o	ความเร็วเชิงเส้นของ outer race (m/s)
ω	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
ω_c	ความเร็วเชิงมุมของ cage (rad/s)
ω_i	ความเร็วเชิงมุมของ inner race (rad/s)
ω_o	ความเร็วเชิงมุมของ outer race (rad/s)
ϕ	Contact angle (degree)