

การศึกษาความเสียหายของเฟืองตรงด้วยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน



นายวีรเดช คุณวิทย์ไพศาล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

STUDY OF DAMAGE IN SPUR GEAR USING ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ANALYSIS

Mr. Weeraded Khunvitayapaisal



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความเสียหายของเฟืองตรงด้วยการวิเคราะห์

สัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน

โดย

นายวีรเดช คุณวิทย์ไพศาล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดนัย อาชวาคม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ สุพัฒน์ ราชณรงค์)

วีรเดช คุณวิทย์ไพศาล : การศึกษาความเสียหายของเฟืองตรงด้วยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกอิมิตชัน. (STUDY OF DAMAGE IN SPUR GEAR USING ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ, 68 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์ตรงด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณอะคูสติก(Acoustic Emission) ซึ่งเป็นการตรวจสอบที่สามารถพบรอยบกพร่องที่กำลังเกิดหรือกำลังขยายตัวภายในเนื้อของวัสดุทั้งในระดับจุลภาค(Microscopic)และระดับมหภาค(Macroscopic)ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนที่มีเกียร์เป็นส่วนประกอบหลักของระบบส่งกำลัง การศึกษาใช้ชุดเกียร์ของรถจักรยานยนต์พร้อมชุดภาระงานในระบบจำลอง 6 เงื่อนไขการทำงานของเครื่องจักรคือ สภาวะปกติ, เกียร์แตกร้าว 25% , เกียร์แตกร้าว 50% , เกียร์แตกหัก 50%, เกียร์แตกหัก 100%, เกียร์แตกหัก 50% และ100% บนเกียร์เดียวกัน การทดลองติดหัววัดสัญญาณใน 3 แกนที่ฐานตั้ลูกปืนและที่แกนเพลลาซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีที่สุด

การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกใช้จำนวน 40 ชุดข้อมูลด้วยพารามิเตอร์ คือ ค่าพลังงาน, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย, ค่าตัวประกอบยอดคลื่น, ค่าเฉลี่ย, ค่าความโด่ง, ค่าความแปรปรวน และค่าความเบ้ และการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติจำนวน 5 ชุดคือ ค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย, ค่าความโด่งกับค่าพลังงาน, ค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย, ค่าความแปรปรวนกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย และค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย เพื่อนำ 2 พารามิเตอร์มาสร้างขอบเขตการกระจายตัวข้อมูลและทดสอบความถูกต้องโดยใช้อีก 10 ชุดข้อมูล

ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา โดยการวิเคราะห์ด้วย 1 พารามิเตอร์ ไม่สามารถระบุความเสียหายของเกียร์ได้อย่างชัดเจน แต่การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติของค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยสามารถระบุความเสียหายได้อย่างชัดเจน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5370660321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ACOUSTIC EMISSION / SIGNAL ANALYSIS / CONDITION MONITORING /  
GEAR DEFECT DIAGNOSIS

WEERADED KHUNVITAYAPAISAL: STUDY OF DAMAGE IN SPUR GEAR USING  
ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ANALYSIS. ADVISOR: ASSOC. PROF. WITHAYA  
YONGCHAREON, Ph.D., 68 pp.

Objective of this research is to study how to use acoustic emission in condition monitoring of spur gear defect diagnosis which was calculated by using the statistical parameter analysis technique. Acoustic emission (AE) is defined as defect propagation rate in the microscopic and macroscopic of rotating machinery which has spur gear as the main part of power transmission system. This experiment was set up based on motorcycle spur gear with torque loading in 6 conditions such as defect free, a 25% crack tooth, a 50% crack tooth, a 50% broken tooth, a 100% broken tooth, one gear has a 50% broken tooth and a 100% broken tooth. AE sensors were placed on 3 position of the bearing casing of the wheel shaft and the shaft axis was the best signal.

Used 40 sets for AE signal analysis obtained from Energy, Root mean square, Crest factor, Mean, Kurtosis, Variance and Skewness and AE analysis with two statistical parameters amount 5 series between Kurtosis and Root mean square, Kurtosis and Energy, Variance and Mean, Variance and Root mean square, Energy and Root mean square for plot boundary conditions and Accuracy test of boundary used 10 sets in other groups.

This experiment proved that defect could not be clearly identified by using acoustic emission signal analysis with time-frequency domain and one statistical parameter, whereas, conducting analysis with two statistical parameters between Kurtosis and Root mean square can be evidently used for defect identification.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี กระผมขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ โดยตลอดการศึกษาอาจารย์ ได้ให้ความรู้ในทาง วิชาการ ให้โอกาสในการร่วมทำวิจัย ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ และให้อภัยในสิ่งที่ไม่ดีผิดพลาดทั้ง การทดลองและการเขียนบทความ ตั้งแต่เริ่มการศึกษาจนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณทุกการ สนับสนุนและทุกคำสอนจากอาจารย์

ขอบคุณอุปกรณ์ทดลองจากคุณทรงพล กลิ่นชะเอม และบริษัทไทยเอ็นดีทีจำกัด(มหาชน)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ .....	2
บทที่ 2 .....	3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 บทนำและประวัติสัญญาณอะคูสติก.....	3
2.2 การเกิดสัญญาณอะคูสติก .....	3
2.3 วิธีการวัดสัญญาณอะคูสติก .....	4
2.4 การใช้สัญญาณอะคูสติกในการตรวจสอบ .....	6
2.5 การทำงานของระบบเกียร์ .....	7
2.6 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล .....	9
2.7 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติก .....	10
2.8 วิธีวิเคราะห์สัญญาณ.....	14
บทที่ 3 .....	16
การตรวจวัดสัญญาณอะคูสติกและการทดลอง .....	16
3.1 บทนำ .....	16
3.2 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติก.....	16
3.4 อุปกรณ์การวิจัย .....	22
3.5 วิธีและขั้นตอนการวิจัย .....	24

3.6 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก.....	25
บทที่ 4 .....	27
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ .....	27
4.1 บทนำ .....	27
4.2 ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกของเกียร์ตรงบนโดเมนเวลา .....	27
4.3 ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกด้วยพารามิเตอร์ .....	33
4.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์ .....	38
4.5 ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของขอบเขตสถานะการทำงานของเกียร์ .....	45
บทที่ 5 .....	55
สรุปผลการทดสอบ.....	55
5.1 สรุป.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง .....	56
ภาคผนวก ก.....	60
คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณอะคูสติก .....	60
ภาคผนวก ข.....	61
คุณสมบัติของการ์ดรับสัญญาณอะคูสติก .....	61
ภาคผนวก ค.....	62
สัญญาณอะคูสติกของเกียร์ตรงบนโดเมนความถี่ .....	62
ภาคผนวก จ.....	67
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์.....	67
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	68



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 การจำลองความเสียหายของเกียร์ .....	23
4-1 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย .....	45
4-2 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน .....	47
4-3 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย .....	49
4-4 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย .....	51
4-5 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย .....	53



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 อุปกรณ์เบื้องต้นสำหรับวัดสัญญาณอะคูสติก.....	5
2-2 ส่วนประกอบหัววัดสัญญาณอะคูสติก.....	5
2-3 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเกียร์.....	7
2-4 ตลับลูกปืน.....	8
2-5 เพลา.....	8
2-6 เกียร์.....	9
3-1 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติก.....	17
3-2 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา.....	17
3-3 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนความถี่.....	18
3-4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบปรกติ.....	20
3-5 ระบบเกียร์ทดลอง.....	22
3-6 ทดสอบความแรงของสัญญาณอะคูสติกด้วยวิธี Nielsen.....	24
3-7 ตำแหน่งหัววัดสัญญาณอะคูสติกที่ฐานตลับลูกปืน.....	25
3-8 แผนผังการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก.....	26
4-1 สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 25 ฟันที่ไม่มีภาระงานในระบบ.....	28
4-2 สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 25 ฟันที่มีภาระงานในระบบ.....	29
4-3 สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 28 ฟันที่ไม่มีภาระงานในระบบ.....	31
4-4 สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 28 ฟันที่มีภาระงานในระบบ.....	32
4-5 แผนภูมิแท่งค่าเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติก.....	34
4-6 แผนภูมิแท่งค่าความแปรปรวนของสัญญาณอะคูสติก.....	34
4-7 แผนภูมิแท่งค่าความโค้งของสัญญาณอะคูสติก.....	35
4-8 แผนภูมิแท่งค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติก.....	35
4-9 แผนภูมิแท่งค่าพลังงานของสัญญาณอะคูสติก.....	36
4-10 แผนภูมิแท่งค่าความเบ้ของสัญญาณอะคูสติก.....	36
4-11 แผนภูมิแท่งค่าตัวประกอบยอดคลื่นของสัญญาณอะคูสติก.....	37
4-12 ขอบเขตค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบทุกเงื่อนไข.....	39

ภาพที่	หน้า
4-13 ขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ .....	39
4-14 ขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันมีภาระงานในระบบทุกเงื่อนไข.....	40
4-15 ขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันมีภาระงานในระบบ .....	40
4-16 ขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ.....	41
4-17 ขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ.....	41
4-18 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ.....	42
4-19 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันมีภาระงานในระบบ.....	42
4-20 ขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ .....	43
4-21 ขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ .....	43
4-22 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ.....	44
4-23 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันมีภาระงานในระบบ .....	44
4-24 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ .....	45
4-25 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน มีภาระงานในระบบ .....	46
4-26 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ .....	46
4-27 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ .....	46

ภาพที่	หน้า
4-28 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 ฟันไม่มีภาระงานใน ระบบ.....	47
4-29 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 ฟันมีภาระงานใน ระบบ.....	47
4-30 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 28 ฟันไม่มีภาระงานใน ระบบ.....	48
4-31 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 28 ฟันมีภาระงานใน ระบบ.....	48
4-32 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟันไม่มีภาระงานใน ระบบ.....	49
4-33 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟันมีภาระงานใน ระบบ.....	49
4-34 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟันไม่มีภาระงานใน ระบบ.....	50
4-35 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟันมีภาระงานใน ระบบ.....	50
4-36 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟันไม่มีภาระ งานในระบบ .....	51
4-37 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟันมีภาระงาน ในระบบ.....	51
4-38 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟันไม่มีภาระ งานในระบบ .....	52
4-39 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟันมีภาระงาน ในระบบ.....	52
4-40 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรกกกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 ฟันไม่มี ภาระงานในระบบ.....	53
4-41 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรกกกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 ฟันมีภาระ งานในระบบ .....	53

ภาพที่	หน้า
4-42 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 28 ฟันไม่มี ภาระงานในระบบ.....	54
4-43 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 28 ฟันมีภาระ งานในระบบ .....	54
ก-1 คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณอะคูสติค.....	60
ข-1 คุณสมบัติของการ์ดรับสัญญาณอะคูสติค.....	61
ค-1 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่สภาวะปกติ.....	62
ค-2 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 25% .....	62
ค-3 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 50% .....	63
ค-4 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50% .....	63
ค-5 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกหัก 100%.....	63
ค-6 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50% และ 100%.....	64
ค-7 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่สภาวะปกติ.....	64
ค-8 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 25% .....	64
ค-9 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 50% .....	65
ค-10 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50% .....	65
ค-11 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกหัก 100%.....	65
ค-12 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50% และ 100%.....	66

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมคือความน่าเชื่อถือและความปลอดภัย การตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักร (Condition Monitoring) เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยให้มากขึ้น ความผิดพลาดในสาขาอิเล็กทรอนิกส์ อวกาศ และปิโตรเคมี บางครั้งมีความรุนแรงถึงชีวิตและสิ่งแวดล้อมอย่างมหาศาล ผลการศึกษาการตรวจสอบและซ่อมบำรุงอย่างถูกต้องสามารถป้องกันความเสียหาย ลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องจักร วิธีการตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักรที่ได้รับความนิยมเช่น การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น (Oil analysis) คือการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี การเปลี่ยนสี และอนุภาคปนเปื้อนของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักร โดยวิธีนี้ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก วิธีการตรวจสอบการสั่นสะเทือน (Vibration measurement) คือการทดสอบลักษณะการเคลื่อนที่หรือการหมุนของเครื่องจักร วิเคราะห์ความสมดุลและลักษณะการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นวิธีตรวจสอบที่สามารถหาความเสียหายและกำหนดการซ่อมบำรุงได้อย่างถูกต้อง ในปัจจุบันได้พัฒนาการตรวจสอบอีกหนึ่งวิธีคือวิธีสัญญาณอะคูสติก (Acoustic emission) ที่สามารถตรวจสอบความบกพร่องที่กำลังเกิดหรือขยายตัวภายในเนื้อของวัสดุทั้งในระดับจุลภาค (Microscopic) และระดับมหภาค (Macroscopic) [1] การตรวจสอบด้วยสัญญาณอะคูสติกมีข้อดีคือ เป็นการตรวจสอบที่เวลาจริงทำให้สามารถตรวจสอบความเสียหายได้ก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้น และสามารถตรวจสอบได้เป็นบริเวณกว้างและครอบคลุมถึงบริเวณที่ไม่สามารถเข้าถึงได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการตรวจสอบสถานะของเครื่องจักรด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของความเสียหายเกียร์ตรง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติของสัญญาณอะคูสติก เพื่อระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเกียร์คือ สถานะการทำงานปกติ สถานะเกียร์แตกช้า และเกียร์แตกหัก ด้วยการพัฒนาวิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติเพื่อเป็นการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรที่สามารถระบุความเสียหายได้อย่างชัดเจน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของสถานะการทำงานระบบเกียร์ตรงในเครื่องจักร พัฒนาวิธีวิเคราะห์สัญญาณด้วยการสร้างขอบเขตสถานะการทำงานของเกียร์ตรงด้วยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง 2 พารามิเตอร์คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square) ค่าพลังงานของสัญญาณ (Signal Energy) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่าตัวประกอบยอดคลื่น (Crest factor)

ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าความแปรปรวน (Variance) ค่าความเบ้ (Skewness) ใช้สามารถระบุสถานะการทำงานของเกียร์ได้อย่างชัดเจน

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1. พัฒนาโปรแกรมการตรวจวัดและบันทึกสัญญาณอะคูสติกด้วยโปรแกรม Matlab
- 1.3.2. พัฒนาการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติให้สามารถระบุสถานะการทำงานของเกียร์ได้อย่างชัดเจนด้วยโปรแกรม Labview
- 1.3.3. ศึกษาลักษณะสัญญาณอะคูสติกของเกียร์ตรงที่มีและไม่มีภาระการทำงาน ที่ความเร็วเพลาคับ 1400 รอบต่อนาที
- 1.3.4. จำลองความเสียหายของเกียร์ตามทั้งหมด 6 เงื่อนไขเพื่อใช้ทดลองคือ
  - เงื่อนไขที่1 สภาวะการทำงานปกติ
  - เงื่อนไขที่2 เกียร์แตกราว 25% ของความหนาฟัน
  - เงื่อนไขที่3 เกียร์แตกราว 50% ของความหนาฟัน
  - เงื่อนไขที่4 เกียร์แตกหัก 50% ของความสูงฟัน
  - เงื่อนไขที่5 เกียร์แตกหัก 100% ของความสูงฟัน
  - เงื่อนไขที่6 เกียร์แตกหัก 50%และ100% ของความสูงฟัน ตำแหน่งตรงกันข้ามกัน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นำเสนองานวิจัยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาที่เกิดจากการขบกันของเกียร์ตรงในเครื่องจักรกล สามารถระบุชนิดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน แสดงข้อดีและข้อเสียของการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติ นำงานวิจัยไปเผยแพร่ให้ผู้สนใจนำไปใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักร หรือนำไปพัฒนาการตรวจสอบด้วยสัญญาณอะคูสติกในอนาคต

### 1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

การนำเสนอวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 5 บท โดยบทที่ 1 จะกล่าวถึงบทนำความสำคัญการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักร วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สัญญาณอะคูสติกในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรที่เกิดความเสียหายแบบต่างๆ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณในแบบต่างๆที่ใช้ในปัจจุบัน บทที่ 3 จะกล่าวถึง การเก็บข้อมูลและการพัฒนาวิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก การติดตั้งอุปกรณ์การวิจัย ชุดทดสอบสภาวะการทำงานของเกียร์ในเงื่อนไขต่างๆ บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลอง การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ การสร้างขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์ การทดสอบถูกต้องของการตรวจสอบ บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาของงานวิจัยและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยนี้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำและประวัติสัญญาณอะคูสติก

สัญญาณอะคูสติกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติเช่น รอยร้าวในไม้ หิน แตกหัก และแผ่นดินไหว เป็นต้น การใช้สัญญาณอะคูสติกในการตรวจสอบครั้งแรกประมาณ 6500 ปีก่อนคริสต์ศักราชเมื่อช่างปั้นดินเผาใช้ทดสอบคุณภาพของชิ้นงานปั้นจากเสียงแตกร้าวที่เกิดขึ้นเมื่อดินเหนียวเย็นตัวในเตาเผาเป็นเกณฑ์แยกชิ้นงานที่เสียหาย บันทึกการพบสัญญาณอะคูสติกครั้งแรกโดยชาวอาหรับในศตวรรษที่ 8 ว่าเสียงดังระหว่างตีเหล็ก เสียงนี้เกิดระหว่างเหล็กเย็นตัว ต่อมาพบในตีบุก แคดเมียม และสังกะสีด้วย ในศตวรรษที่ 19 งานวิจัยสาขาโลหะวิทยามีการศึกษาการเคลื่อนตัวของอะตอม และการเปลี่ยนสถานะของตีบุก แคดเมียม และสังกะสี พบสัญญาณอะคูสติกจากโลหะและโลหะผสม จากการทดสอบเมื่อดึงอลูมิเนียมจะพบสัญญาณอะคูสติกเมื่อแรงดึงเกินจุดความเค้นคราก (Yield stress) ของอลูมิเนียม งานวิจัยสัญญาณอะคูสติกครั้งแรกโดยนักธรณีวิทยา Fuyuhiko Kishinouye [2] ในค.ศ. 1933 ที่ประเทศญี่ปุ่น ศึกษาการตรวจวัดและบันทึกสัญญาณอะคูสติกจากรอยร้าวของไม้ ใช้เครื่องมือดึงแผ่นไม้สังเกตความเค้นเมื่อรอยร้าวขยายตัว พบว่ามีการสั่นที่รวดเร็วจำนวนมากและเสียงจากรอยร้าวที่ไม้ เป็นการบันทึกรูปคลื่นของสัญญาณอะคูสติกได้เป็นครั้งแรก

วิธีสัญญาณอะคูสติกเริ่มใช้ในการตรวจสอบเมื่อ ค.ศ. 1945 จากการศึกษาปรากฏการณ์ Kaiser Effect โดยพบว่าสัญญาณอะคูสติกจะไม่เกิดในวัสดุจนกว่าจะมีแรงกระทำเกินจุดความเค้นคราก การพัฒนาเทคโนโลยีสัญญาณอะคูสติกในสาขาการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) เช่น หัววัดสัญญาณ ระบบเก็บข้อมูล และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมนิวเคลียร์ และปิโตรเคมี เป็นอุตสาหกรรมแรกๆที่เริ่มใช้วิธีสัญญาณอะคูสติกตรวจสอบความแข็งแรงของอุปกรณ์ความดัน Stahlkopf และ Green [3] ใช้ตรวจสอบความบกพร่องของอุปกรณ์ความดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก สามารถตรวจสอบกับเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์เมื่อเกิดการสูญเสียความร้อนในสถานะเริ่มต้น และสามารถระบุชนิดความเสียหายจากวิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกได้สำเร็จ ในปัจจุบันวิธีสัญญาณอะคูสติกใช้ตรวจสอบในหลายสาขาเช่น อวกาศ ยานยนต์ พลังงาน และการเชื่อมโลหะ เป็นต้น

#### 2.2 การเกิดสัญญาณอะคูสติก

ปรากฏการณ์สัญญาณอะคูสติก คือการปล่อยพลังงานในวัสดุแล้วเปลี่ยนพลังงานเป็นคลื่นอีลาสติกอย่างรวดเร็ว หรือการเกิดคลื่นอีลาสติกอย่างรวดเร็วในวัสดุ สัญญาณอะคูสติกเกิดขึ้นได้ทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ [4, 5] แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในธรรมชาติมีหลายแบบเช่น การเปลี่ยนรูปทรงของวัสดุ การเกิดรอยร้าว แผ่นดินไหวและการระเบิดหินในเหมือง แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดสัญญาณอะคูสติกเช่น รอยร้าวภาชนะความดัน แรงเสียดทานในเครื่องจักร การเรียงตัวใหม่หรือการเกิดขอบเขตแม่เหล็ก การหลอมเหลวและการแข็งตัว การเปลี่ยนสถานะของวัสดุ การเกิดสัญญาณอะคูสติกมีทั้งระดับมหภาค (Macroscopic) และระดับ



จุลภาค (Microscopic) แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในระดับมหภาคเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากความเสียหายภายในเนื้อของวัสดุ 2 ชนิดคือ

1. การเปลี่ยนรูปทรงแบบพลาสติกเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกเริ่มต้นเมื่อมีแรงกระทำในวัสดุ การเริ่มเปลี่ยนรูปทรงแบบพลาสติกจะเกิดสัญญาณอะคูสติกมาก หรือบางครั้งจะเกิดสัญญาณใกล้จุดความเค้นคราก เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุและเป็นวิธีตรวจสอบสัญญาณในระดับจุลภาคเริ่มต้น

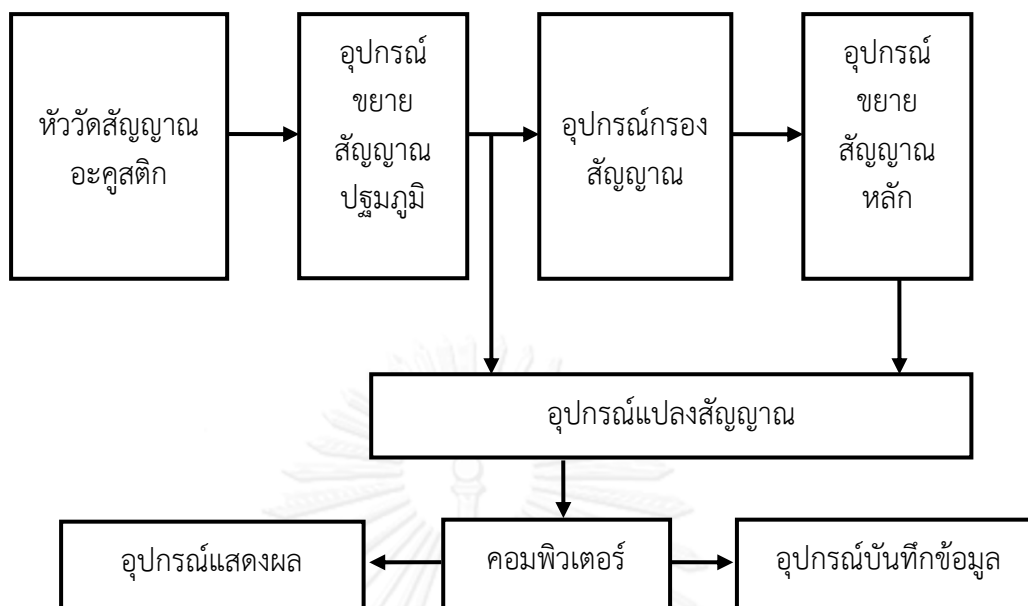
2. การเกิดรอยร้าวเมื่อมีแรงมากระทำภายในเนื้อของวัสดุ จะมีความเค้น (Stress) ที่จุดแตกร้าวและความเครียด (Strain) ที่ปลายรอยร้าว สามารถตรวจสอบแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกได้ที่จุดเริ่มต้นเมื่อเกิดการแตกร้าว จึงเป็นวิธีวิเคราะห์ระหว่างสัญญาณอะคูสติกกับความเค้นในเนื้อวัสดุ

แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในระดับจุลภาคเกิดจากอะตอมขาด อะตอมผิดตำแหน่ง อะตอมเกิน และมีอะตอมแปลกปลอมภายในเนื้อของวัสดุเป็นการเริ่มต้นในการเกิดรอยร้าวเมื่อมีความเค้นในวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปทรงแบบพลาสติก การผิดตำแหน่งของโครงสร้างวัสดุจะเกิดการเคลื่อนทำให้มีการปล่อยพลังงานแบบคลื่นอัลตราซาวด์ออกมาถ้าความเค้นสูงมากกระทำต่อโครงสร้างที่ปลายรอยร้าวที่เกิดการเปลี่ยนรูปทรงแบบพลาสติกจะทำให้รอยร้าวขยายตัวมากขึ้นทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกแบบชั่วขณะขึ้น

สัญญาณอะคูสติกจะเคลื่อนที่ภายในเนื้อของวัสดุส่วนใหญ่อยู่ที่ผิวหน้าและสะท้อนกลับไปถึงมาระหว่างผิวด้านต่างๆ เมื่อสัญญาณเคลื่อนที่จะเกิดการสัญญาณรบกวนระหว่างกันทำจึงให้สัญญาณซับซ้อนมากขึ้นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

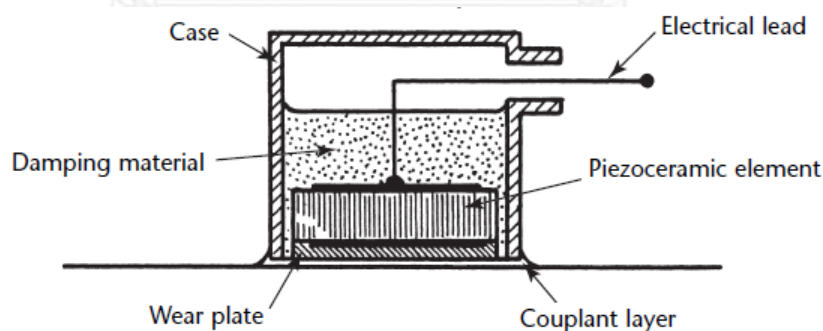
### 2.3 วิธีการวัดสัญญาณอะคูสติก

อุปกรณ์วัดสัญญาณอะคูสติกมีหลายชนิดทั้งแบบเคลื่อนย้ายได้ถึงระบบขนาดใหญ่หลายหัววัด อุปกรณ์ประกอบด้วยหัววัดสัญญาณอะคูสติก, ตัวขยายสัญญาณปฐมภูมิ, ตัวกรองสัญญาณ และตัวขยายสัญญาณหลัก อุปกรณ์ที่ใช้ในประมวลผลสัญญาณประกอบด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณ, อุปกรณ์แสดงผล และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล อุปกรณ์ต่างๆขึ้นอยู่กับผู้ทดลองสามารถเลือกใช้ได้ ภาพที่ 2-1 แสดงระบบวัดสัญญาณอะคูสติก



ภาพที่ 2-1 อุปกรณ์เบื้องต้นสำหรับวัดสัญญาณอะคูสติก

2.3.1 หัววัดสัญญาณอะคูสติก (AE sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอะคูสติกที่เคลื่อนผ่านภายในเนื้อของวัสดุแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ส่วนมากทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณที่ดีคือ มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง (Acoustic impedance) ของเพียโซอิเล็กทริกใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุที่ตรวจสอบ มีค่าความการตอบสนองที่ดี (Sensitivity) ขนาดของแอมพลิจูดที่ตรวจจับได้สูงกว่าขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน ส่วนประกอบของหัววัดสัญญาณดังภาพที่ 2-2 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2-2 ส่วนประกอบหัววัดสัญญาณอะคูสติก [5]

สารคู่ควบ (Couplant) เป็นสารตัวกลางที่ช่วยในการส่งผ่านสัญญาณอะคูสติกจากวัสดุที่ตรวจสอบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายในหัววัด ช่วยลดความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับวัสดุที่ตรวจสอบ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoceramic element) เป็นวัสดุที่สามารถให้กระแสไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำทางกลต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกหรือในทางกลับกันถ้าให้กระแสไฟฟ้าผ่านก็จะทำให้รูปร่างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงทางกล

วัสดุเสริมหลัง (Damping material) เป็นตัวช่วยดูดซับสัญญาณอะคูสติกที่ไม่อยู่ในช่วงความถี่เดียวกันกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและทำให้สัญญาณไม่สะท้อนกลับ เพื่อให้หัววัดสัญญาณมีสมบัติที่ดีต้องมีวัสดุที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงใกล้เคียงกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาเป็นตัวเสริมด้านหลัง มีผลให้สามารถแยกรายละเอียดของสัญญาณได้สูงขึ้น ทำให้ความไวต่อการตอบสนองของสัญญาณและค่าความถี่ต่อการตอบสนองดีขึ้น วัสดุเสริมหลังมีส่วนประกอบของทั้งสแตนเลสชุบแข็งสูง ทำให้สัญญาณสะท้อนกลับได้น้อย

ฝาครอบหัววัด (Case) เป็นตัวรวมส่วนประกอบทั้งหมดป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนและป้องกันสายเคเบิลที่ต่อกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ฝาครอบหัววัดมีหลายชนิดเช่น ชนิดที่ใช้งานกับอุณหภูมิสูง ชนิดรูปทรงฝาครอบแบบต่างๆ เป็นต้น

2.3.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณและความถี่ (Amplifier) สัญญาณอะคูสติกที่ได้หัววัดสัญญาณอะคูสติกจะเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับไมโครโวลต์ ( $\mu\text{V}$ ) ถึงมิลลิโวลต์ (mV) ซึ่งมีขนาดต่ำ จึงต้องมีอุปกรณ์ที่ขยายสัญญาณให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมกับการตรวจสอบ โดยทั่วไปจะขยายสัญญาณประมาณ 40 เดซิเบล ในการเลือกอุปกรณ์ขยายสัญญาณมี 2 ปัจจัยคือ

- 1.เลือกช่วงความถี่ให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ของสัญญาณอะคูสติกที่ต้องการตรวจสอบ เพื่อให้ได้การตอบสนองสูงสุด

- 2.การเลือกอัตราการขยายให้เหมาะสมแอมพลิจูดของสัญญาณไม่เกินค่าที่อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณรองรับได้

2.3.3 อุปกรณ์กรองสัญญาณ (Filter) สัญญาณอะคูสติกที่ได้หัววัดโดยทั่วไปจะมีสัญญาณรบกวนจากวัสดุที่ตรวจสอบหรือสิ่งแวดล้อม ต้องมีอุปกรณ์กรองสัญญาณเพื่อแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออก ให้ได้สัญญาณอะคูสติกมีค่าความถี่อยู่ระหว่างกิโลเฮิรตซ์ (KHz) ถึงเมกะเฮิรตซ์ (MHz) ที่ใช้ในการตรวจสอบ

2.3.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Discriminator) สัญญาณอะคูสติกที่ได้จากอุปกรณ์วัดสัญญาณจะเป็นสัญญาณอนาล็อก ต้องมีอุปกรณ์แปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณโดยคอมพิวเตอร์ หรือบันทึกข้อมูลในอุปกรณ์อื่นได้

2.3.5 ระบบคอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณดิจิทัล มีหลายระบบและขนาดเช่น วัดสัญญาณที่บนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ สามารถคำนวณพารามิเตอร์ บันทึกข้อมูลสัญญาณระบบเตือนอัตโนมัติ หรือแบบต่างๆขึ้นอยู่กับการใช้งาน

2.3.6 การแสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก ปัจจุบันระบบวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกมีทั้งแสดงผลทันทีระหว่างการตรวจสอบ หรือแสดงผลแบบตาราง แบบกราฟ แบบแผนภูมิแท่ง แสดงรายละเอียดเช่น ความแรงสัญญาณ เวลา แรงกระทำ และข้อมูลต่างๆได้

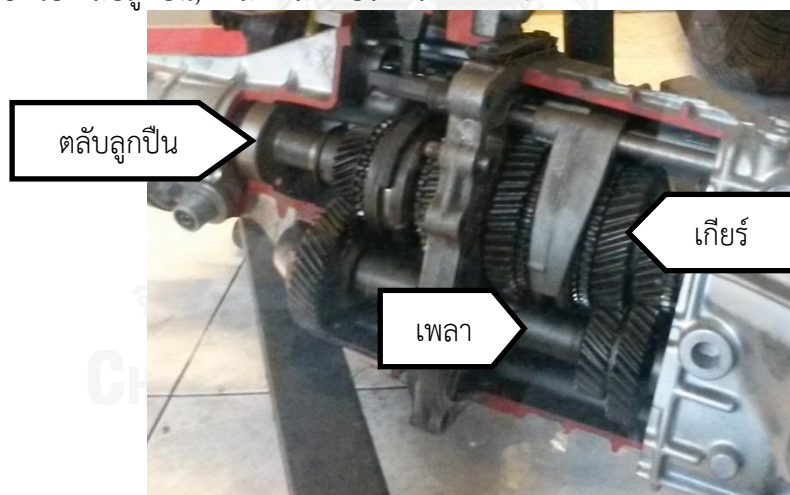
## 2.4 การใช้สัญญาณอะคูสติกในการตรวจสอบ

วิธีสัญญาณอะคูสติกเป็นการวัดพลังงานอีลาสติกที่เกิดขึ้นในวัสดุที่ตรวจสอบ การสังเกตผล การเกิดสัญญาณอะคูสติกเป็นหลักการในการวิเคราะห์สัญญาณ ปัจจุบันกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณมีหลายวิธีทั้งเช่น แบบรูปภาพ แบบกราฟ และความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับแรงกระทำ เป็นต้น ผลการวิเคราะห์สามารถระบุชนิดแหล่งกำเนิด ความผิดปกติ ความแรงของสัญญาณได้อย่างแม่นยำ

วิธีสัญญาณอะคูสติคเป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่ใช้ตรวจสอบกับความสำเร็จของโครงสร้างวัสดุ การหารอยร้าว การเริ่มต้นของความเสียหายในเครื่องจักร ตรวจสอบงานเชื่อม ทดสอบทางธรณีวิทยา และคุณสมบัติของโลหะ การใช้สัญญาณอะคูสติคในการตรวจสอบโดยไม่ทำลายเริ่มค.ศ. 1960 วิธีสัญญาณอะคูสติคแตกต่างจากวิธีตรวจสอบโดยไม่ทำลายอื่นๆคือ เป็นการตรวจสอบพลังงานที่ออกมาจากวัสดุทดสอบโดยไม่มีการใช้พลังงานกับวัสดุ เป็นการตรวจสอบในขณะที่วัสดุทดสอบสามารถทำงานอยู่ได้ แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติคจะปล่อยพลังงานเป็นทรงกลมทุกทิศทางหัววัดสัญญาณติดบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดก็สามารถจับสัญญาณอะคูสติคได้ มีการตรวจสอบเช่น ตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ อโลหะ และโลหะผสมสามารถตรวจสอบโดยสัญญาณอะคูสติคระหว่างมีความเค้นกระทำในโครงสร้าง วิเคราะห์ลักษณะและความแข็งแรงของโครงสร้าง คำนวณชนิดความบกพร่องของโครงสร้าง ตรวจสอบภาชนะความดันหรือระบบความดันสามารถตรวจสอบโดยสัญญาณอะคูสติคเมื่อมีเกิดความเค้นจากอุณหภูมิ ความเค้นดึง และความเค้นบิดที่ต่ำกว่าความเค้นคราก วิเคราะห์ตำแหน่งและความเสียหายได้เช่น รอยร้าว รอยร้าว และจุดที่เริ่มเสียหาย มีการใช้งานและประยุกต์ใช้สัญญาณอะคูสติคทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ทำให้วิธีสัญญาณอะคูสติคมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

## 2.5 การทำงานของระบบเกียร์

ระบบเกียร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องจักรเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนแรงบิดและความเร็วจากแหล่งกำเนิดกำลังไปยังส่วนประกอบอื่นของเครื่องจักร ส่วนประกอบหลักของระบบเกียร์ประกอบด้วย ตลับลูกปืน, เพลา และเกียร์ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเกียร์

2.5.1 ตลับลูกปืน (Bearing) ดังภาพที่ 2-4 เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระบบเกียร์ ความผิดพลาดของตลับลูกปืนมีผลให้การทำงานของระบบเกียร์ผิดพลาด ตลับลูกปืนมีสารหล่อลื่นเป็นของแข็งที่ใช้กับระบบเกียร์ความร้อนและความดันสูง สารหล่อลื่นของเหลวใช้กับความเร็วสูง และสารหล่อลื่นจาระบีใช้กับความเร็วสูงมาก ความเสียหายของตลับลูกปืนเกิดจากหลายสาเหตุเช่น สารหล่อลื่นไม่เหมาะสม การสั่นสะเทือนมากเกินไป และการประกอบผิดพลาด เป็นต้น มีความเสียหายเช่น

ตลับลูกปืนเยื้องศูนย์กลาง และรอยถลอกของเปลือกตลับลูกปืน เป็นต้น การเลือกตลับลูกปืนขึ้นกับ 2 ปัจจัยสำคัญคือ

- 1.ตลับลูกปืนไม่เสียรูปทรงเกิน 0.1%ของเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อมีรับแรงจากระบบเกียร์
- 2.ตลับลูกปืนมีจำนวนรอบการหมุนมากกว่า 1,000,000 รอบแล้วไม่เกิดความเสียหาย



ภาพที่ 2-4 ตลับลูกปืน

2.5.2 เพลา (Shaft) ดังภาพที่ 2-5 เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายแรงบิดจากแหล่งกำเนิดกำลังไปขับระบบเกียร์ให้หมุนต้องทำด้วยเหล็กกล้าชนิดพิเศษที่ทนแรงบิดจากการส่งถ่ายกำลังได้สูง ลักษณะของเพลาต้องเหมาะสมกับสภาพของการเคลื่อนที่ ความเสียหายส่วนมากเกิดจากการใช้งาน รอยร้าวจากความล้าเป็นจุดเริ่มของความเสียหาย เมื่อความเค้นมากขึ้นการเปลี่ยนรูปจะเกิดที่ขอบและปลายเพลา เพราะเป็นจุดที่มีความเค้นสูงในเพลา ความเสียหายของเพลาเช่น การโก่งของเพลามาจากความเค้นดึงและความเค้นกดในเส้นรอบวง

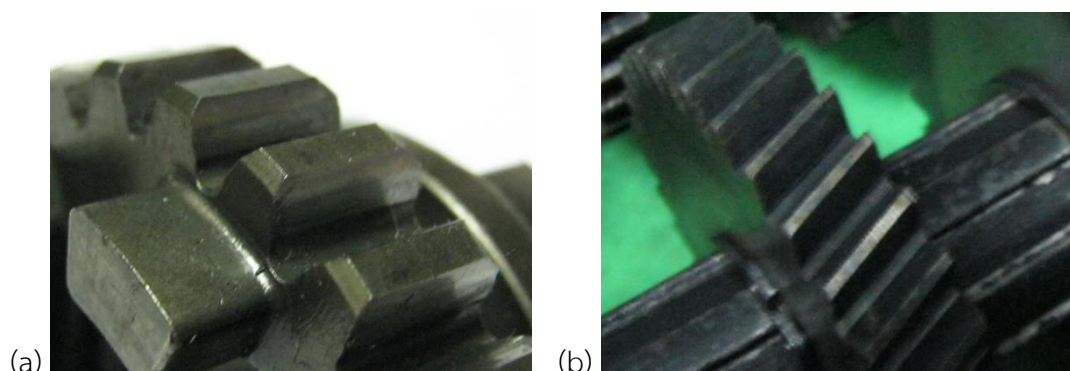


ภาพที่ 2-5 เพลา

2.5.3 เกียร์ (Gear) ดังภาพที่ 2-6เป็นอุปกรณ์สำคัญในการเปลี่ยนแรงบิดและความเร็วจากเพลาขับและเพลาตาม เกียร์มี 2 ชนิดคือ

- 1.เกียร์ตรงใช้กับความเร็รรอบต่ำมีเสียงเบาและราบเรียบ
- 2.เกียร์เอียงใช้กับการเปลี่ยนกำลังขนาดใหญ่ที่ความเร็วสูง

ความเสียหายเกียร์เช่น ผิวหน้าเกียร์ล้าและโก่งทำให้เกิดรอยร้าวใกล้ฐานฟันเกียร์และทำให้เกียร์แตกหักในที่สุด ความเสียหายแบบหลุมและรอยถลอกบนผิวเกียร์เกิดจากการขบกันที่บริเวณเกียร์สัมผัสกันและเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดจากรอยร้าว จุดที่เกิดหลุมและถลอกคือบริเวณที่มีการสัมผัสของสองผิวหน้าเกียร์ระหว่างเกียร์หมุนเป็นบริเวณที่มีความเค้นเฉียงสูงใต้ผิวเกียร์เป็นจุดเริ่มเกิดรอยร้าว การใช้สารหล่อลื่นช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเกียร์ระหว่างเกียร์ขบกันและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 2-6 เกียร์ (a) เกียร์ตรง (b) เกียร์เอียง

## 2.6 การตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรกล

วิธีการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรเพื่อหาความบกพร่องแบบต่างๆ เช่น การเยื้องศูนย์แนวเพลลา การผิดปกติของสายพาน ความเสียหายในชุดเกียร์ การเสียดสมดุของเพลลาหมุน ความเสียหายภายในตลับลูกปืน สภาพการหลวมของอุปกรณ์ สภาพการหล่อลื่น และระบบไฟฟ้ามีความบกพร่อง เป็นต้น ในปัจจุบันการวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องจักร หรือวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักรก่อนเกิดความเสียหายด้วยเทคโนโลยีต่างๆ มาวิเคราะห์สถานะการทำงานของเครื่องจักรว่าอยู่ในสภาพปกติหรือเกิดความเสียหาย ถ้าตรวจสอบพบความเสียหายจะวางแผนการซ่อมบำรุง ได้อย่างเหมาะสมตามการใช้งานของเครื่องจักร การซ่อมบำรุงเครื่องจักรแต่ละครั้งขึ้นกับหลายปัจจัยเช่น ลักษณะการใช้งานของเครื่องจักรว่ามีผลกับกระบวนการผลิต ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ความปลอดภัยในการทำงาน คุณภาพในการทำงานของเครื่องจักร เป็นต้น วิธีการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักร มีอยู่หลายวิธีดังนี้

วิธีเทอร์โมกราฟี (Thermography) คือการวิเคราะห์อุณหภูมิของอุปกรณ์ในเครื่องจักร ที่สภาวะปกติกับสภาวะเสียหายจะมีอุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นวิธีในการตรวจสอบที่มีราคาสูง

วิธีการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น (Oil analysis) คือการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักรกลมีการเปลี่ยนสีและความหนืดเมื่อมีการใช้งาน หรือมีอนุภาคของเครื่องจักรปนมากับน้ำมันเมื่อเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้เครื่องมือและเวลาในการวิเคราะห์สูง

วิธีการตรวจสอบการสั่นสะเทือน (Vibration monitoring) คือการตรวจสอบสมดุเครื่องจักรกลที่มีลักษณะการเคลื่อนที่หรือทำงานแบบหมุน เมื่อนำสัญญาณการสั่นสะเทือนมาคำนวณในวิธีต่างๆ ในแกนเวลาหรือความถี่สามารถระบุความผิดปกติของเครื่องจักร ซึ่งผู้วิเคราะห์สัญญาณต้องมีความรู้ในการแปลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนสูง จึงวิเคราะห์ได้ถูกต้อง

วิธีสัญญาณอะคูสติก (Acoustic emission) คือการตรวจสอบสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นในเครื่องจักร มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบสถานะเริ่มต้นของความเสียหาย เป็นวิธีที่เริ่มพัฒนาในปัจจุบันและศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้

## 2.7 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติก

งานวิจัยจำนวนมากศึกษาการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณอะคูสติก ได้นำเสนอการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องหรือเป็นคาบเวลา เช่น ตลับลูกปืน คอมเพรสเซอร์ และเครื่องยนต์ เป็นต้น งานวิจัยที่ศึกษาตรวจสอบความเสียหายของระบบเกียร์ชนิดต่างๆ เป็นส่วนประกอบ ได้อธิบายหลักการตรวจสอบ เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ ชนิดของความเสียหาย และข้อจำกัดต่างๆของสัญญาณอะคูสติก

แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในเครื่องจักร คือการปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์จากการเคลื่อนที่ของวัสดุในเครื่องจักรเช่น การหมุนของเกียร์เกิดสัญญาณอะคูสติกจากความแรงในการกระทบกัน, ความล่าช้าในการหมุน, แรงเสียดทาน, ความเสียหายและช่องว่างระหว่างเกียร์ เป็นต้น ข้อดีของวิธีอะคูสติกคือ สัญญาณอะคูสติกเกิดในระดับจุลภาคสามารถตรวจสอบสภาวะความเสียหายที่สภาวะเริ่มต้น มีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้วิธีสัญญาณอะคูสติกตรวจสอบเกียร์ บางงานวิจัยสนใจตรวจสอบความบกพร่องจากกลไกและพารามิเตอร์ของสัญญาณอะคูสติกระหว่างเกียร์ขบกัน

การศึกษาการใช้สัญญาณอะคูสติกตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรมีหลายงานวิจัย Wheither และคณะ [6] ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายจากการโค้งงอของเกียร์หลายชนิดด้วยวิธีการสั่นสะเทือนและสัญญาณอะคูสติก ที่สภาวะเริ่มเกิดรอยร้าวและรอยร้าวขยายตัว ทดสอบความเสียหายของเกียร์ตามมาตรฐานของ Society of Automotive Engineering (SAE) [7] หัววัดสัญญาณอะคูสติกมีช่วงความถี่ตอบสนอง 300 kHz ติดที่เกียร์ หัววัดการสั่นสะเทือนติดที่โครงระบบเกียร์ มีแรงกระทำแบบวงรอบ 10 ครั้งต่อวินาที เมื่อเริ่มการทดสอบไม่มีสัญญาณอะคูสติก จากนั้นอัตราการเพิ่มของสัญญาณอะคูสติกเพิ่มขึ้นคงที่ตามการขยายตัวรอยร้าว และอัตราการเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกียร์หัก ทำการทดสอบเหมือนกันด้วยวิธีการสั่นสะเทือน สรุปว่าทั้งวิธีการสั่นสะเทือนและสัญญาณอะคูสติกสามารถตรวจสอบการขยายตัวของรอยร้าวได้ แต่วิธีสัญญาณอะคูสติกมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบสภาวะเริ่มเกิดรอยร้าวได้ดีกว่า

Singh และคณะ [8] ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจสอบการเกิดการแตกร้าวของเกียร์ด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติกและวิธีการสั่นสะเทือน ระบบเกียร์ทดสอบอัตราทด 42:28 ความเร็ว 1775 รอบต่อนาที มีแรงกระทำแบบวงรอบ 40 ครั้งต่อวินาที การทดสอบติดหัววัดสัญญาณอะคูสติกและหัววัดการสั่นสะเทือนใกล้กับเกียร์ วิธีสัญญาณอะคูสติกสามารถตรวจจับได้ตั้งแต่เกียร์แตกร้าว 90% จนถึง 100% ลักษณะสัญญาณเป็นแบบ Burst มีแอมพลิจูดสูง วิธีสั่นสะเทือนสามารถตรวจจับได้เมื่อเกียร์แตกหักแล้ว Singh และคณะสรุปว่าวิธีสัญญาณอะคูสติกมีประสิทธิภาพตรวจสอบรอยร้าวของเกียร์ดีกว่า

ผิวเกียร์เสียหายเป็นความบกพร่องที่พบมากที่สุดของเกียร์ การใช้สัญญาณอะคูสติกตรวจสอบความเสียหายวิจัยโดย Soares และ Negro [9] ศึกษาความเสียหายของเกียร์แบบ ถลอกและเป็นหลุมลึก ในระบบเกียร์ขับ 45 ฟันและเกียร์ตาม 20 ฟัน เกียร์กว้าง 21.5 มิลลิเมตรเอียง 20 องศา ตัวขับใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบปรับความเร็วรอบได้ ใช้หัววัดสัญญาณอะคูสติกช่วงความถี่ 175 kHz ติดที่โครงระบบเกียร์และความถี่สุ่ม 640 kHz ก่อนทดสอบเดินเครื่อง 4 ชั่วโมงและมีภาระงานในระบบ 1 ชั่วโมงเพื่อให้ระบบเกียร์เข้าสู่สภาวะคงตัว ทดสอบที่ความเร็ว 300 และ 600 รอบต่อนาที แสดงผล

แบบกราฟระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) กับระยะเวลาการทำงาน วิเคราะห์สัญญาณระหว่างสถานะปกติกับความเสียหายแบบถลอกและหลุมลึก สรุปว่าวิธีสัญญาณอะคูสติกสามารถตรวจสอบที่ความเสียหายที่ผิวเกียร์ได้

Amani Raad และคณะ [10] ศึกษาความเสียหายที่เกิดจากการใช้งานเป็นเวลานานของระบบเกียร์ตรง 20 ฟันหนึ่งคู่ ใช้หัววัดสัญญาณอะคูสติกช่วงความถี่กว้าง 2 ตัวเปรียบเทียบกับหัววัดการสั่นสะเทือน ติดหัววัดทั้งสองที่ฐานตลับลูกปืนเหมือนกัน มีแรงกระทำในระบบเกียร์ บันทึกสัญญาณทุก 1 ชั่วโมง วิเคราะห์สัญญาณด้วยค่าความโด่ง (Kurtosis) และลักษณะสัญญาณ หลังเดินเครื่องสองสัปดาห์ต่อเนื่องเกิดรอยร้าวที่ผิวเกียร์ ผลการทดสอบค่าความโด่งของสัญญาณอะคูสติกจะเพิ่มขึ้นหลังเกิดความเสียหาย 300 รอบ และค่าความโด่งของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะเพิ่มหลังเกิดความเสียหาย 5,000 รอบ การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ความเข้มของสัญญาณอะคูสติกและการสั่นสะเทือนจะสูงขึ้นก่อนและหลังเกิดความรอยร้าว การวิเคราะห์แบบล็อกการที่มสัญญาณอะคูสติกตรวจสอบรอยร้าวได้ แต่วิธีการสั่นสะเทือนตรวจสอบไม่ได้ Amani Raad และคณะสรุปว่าวิธีสัญญาณอะคูสติกตรวจสอบรอยร้าวที่สถานะเริ่มต้นได้เร็วกว่าการสั่นสะเทือน และแนะนำว่าควรศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคอื่นในการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์

Sentoku [11] ศึกษาการใช้สัญญาณอะคูสติกตรวจสอบการเกิดรอยถลอกบนผิวเกียร์ ใช้ระบบเกียร์ตรงหนึ่งคู่มีภาระงานในระบบควบคุมให้อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นคงที่ หัววัดสัญญาณอะคูสติกติดที่เกียร์ การทดสอบแรกใช้เกียร์ธรรมดาความเร็ว 990 รอบต่อนาทีที่มีความเค้นกระทำ 960 Mpa ผลคือสัญญาณอะคูสติกไม่เปลี่ยนแปลง การทดสอบที่สองใช้เกียร์ซูปแข็ง ค่าพลังงานของสัญญาณอะคูสติกเพิ่มตามพื้นที่รอยถลอกบนผิวเกียร์ สรุปว่าการเพิ่มความเค้นในเกียร์มีผลกับรอยถลอก และสัญญาณอะคูสติกมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบการเกิดรอยถลอกบนผิวเกียร์ และการขยายตัวของความเสียหายบนผิวเกียร์อย่างชัดเจน

Badi และคณะ [12] ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์ด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติกและการสั่นสะเทือน จำลองความเสียหายของเกียร์ด้วยการเจาะ และการตะไบ ติดหัววัดสัญญาณทั้งสองที่โครงสร้างเกียร์ตำแหน่งต่างกัน วิเคราะห์สัญญาณด้วยค่าตัวประกอบยอดคลื่น (Crest factor) และค่าความโด่ง สรุปว่าความเสียหายจากการเจาะสามารถตรวจสอบได้ทั้งสองวิธี แต่ความเสียหายจากการตะไบตรวจสอบได้เพียงวิธีสัญญาณอะคูสติก Badi และคณะแนะนำว่าควรใช้การวิเคราะห์สัญญาณอื่นๆ ช่วยในการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์

Tandon และ Mata [13] ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายแบบหลุมลึกบนผิวเกียร์ ของระบบเกียร์ตรงหนึ่งคู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องบินไอพ่น ด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติกและวิธีการสั่นสะเทือน ติดหัววัดทั้งสองที่ฐานตลับลูกปืน ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที มีแรงกระทำในระบบเกียร์ ตั้งแต่ 0 ถึง 10 กิโลกรัม หลุมบนผิวเกียร์มีขนาดรัศมี 250 ถึง 2,200 ไมโครเมตร ความลึกคงที่ 500 ไมโครเมตร สรุปผลทดสอบโดยการวิเคราะห์สัญญาณด้วยค่าพลังงานของสัญญาณ และจำนวนการเกิดสัญญาณอะคูสติกจะเพิ่มขึ้นตามขนาดความกว้างของรัศมีหลุมและแรงที่กระทำในระบบเกียร์ จำนวนการเกิดสัญญาณมีผลตอบสนองที่ดีกว่าค่าพลังงาน วิธีสัญญาณอะคูสติกตรวจสอบความเสียหายขนาดเล็กได้ดีกว่าวิธีการสั่นสะเทือน



Toutountzakis และคณะ [14] ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายแบบหลุมลึกบนผิวเกียร์ของระบบเกียร์ตรง 49 และ 65 ฟัน หัววัดสัญญาณมีความถี่ตอบสนองระหว่าง 100 kHz ถึง 1 MHz ติดที่เพลาชับและฐานตลับลูกปืน ให้ระบบบันทึกสัญญาณอะคูสติก 1 ชุดข้อมูลเท่ากับ 16 ฟันเกียร์ ก่อนเริ่มทดสอบเดินเครื่อง 15 ชั่วโมง มีภาระงานในระบบคือ 0, 55 และ 100 นิวตันเมตร ความเร็ว 745 รอบต่อนาที ความเสียหายแบบที่หนึ่งหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความเสียหายแบบที่สองถลอกขนาด 12 x 3 มิลลิเมตร บนผิวเกียร์ขับ วิเคราะห์ผลด้วยค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ผลการทดสอบเมื่อแบ่งสัญญาณอะคูสติกของเกียร์ 16 ฟันเป็น 5, 8 และ 16 ช่วงสัญญาณ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยสูงสุดไม่ตรงกับช่วงสัญญาณที่เกิดความเสียหาย จึงไม่สามารถระบุตำแหน่งที่เสียหายบนเกียร์ได้ Toutountzakis และคณะ สรุปว่าความเสียหายที่ผิวเกียร์มีข้อจำกัดในการตรวจสอบด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติก ความขรุขระของเสียหายมีผลกับความแรงของสัญญาณอะคูสติก Tan และ Mba [15] ทำการทดสอบเหมือน Toutountzakis และคณะ [14] มีความเสียหายที่ใหญ่กว่าบนผิวเกียร์สรุปผลเหมือนกับ Toutountzakis และคณะ ยืนยันว่าสัญญาณอะคูสติกมีข้อจำกัดในการระบุความเสียหายบนผิวเกียร์

Tan และ Mba [15] ศึกษาข้อจำกัดของการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์ด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติกการระบุชนิดความเสียหาย ทำการทดสอบเหมือน Toutountzakis และคณะ [14] วิเคราะห์ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยและพลังงานของสัญญาณต่อเนื่องทุก 15 นาที วัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นทุก 15 นาที ใช้ความเร็ว 745 และ 1460 รอบต่อนาที มีภาระงานในระบบคือ 0, 55 และ 100 นิวตันเมตร สรุปว่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นจะคงที่หลังจากเดินเครื่องไป 1 ชั่วโมง ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยและพลังงานของสัญญาณจะเบี่ยงเบนประมาณ 50% ที่ความเร็ว 745 รอบต่อนาที และเบี่ยงเบนประมาณ 125% ที่ความเร็ว 1460 รอบต่อนาที ลักษณะสัญญาณอะคูสติกในตรวจสอบความเสียหายที่ผิวเกียร์มีปัจจัยเกี่ยวกับแรงกระทำและอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น เพราะความหนาของชั้นน้ำมันระหว่างผิวเกียร์มีผลกับความแรงในการชกกันของเกียร์ งานวิจัยนี้สรุปว่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นเป็นปัจจัยสำคัญในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติก Tan และ Mba ทดสอบระบบเกียร์ที่อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นคงที่ เมื่อเปลี่ยนความเร็วจาก 745 เป็น 1460 รอบต่อนาที ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าจากค่าเดิม งานวิจัยนี้แนะนำว่าค่าสัญญาณอะคูสติกจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ น้ำมัน ความเร็วรอบ และแรงกระทำในระบบเกียร์

Tan และ Mba [16] ศึกษาข้อจำกัดของการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์ เพิ่มจากงานวิจัยของ Tan และ Mba [15] โดยเปลี่ยนแรงกระทำในระบบเป็นแบบวงรอบและช่วงความเร็วรอบ ผลการทดสอบเหมือนงานวิจัยเดิม [15] ความแรงของสัญญาณอะคูสติกมีปัจจัยเกี่ยวกับ แรงกระทำ ความเร็วรอบ และความหนาชั้นน้ำมันหล่อลื่น แต่แรงกระทำมีผลน้อยกว่าความเร็วรอบ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระทำคงที่ของงานวิจัยเดิม [15] การเพิ่มความเร็วรอบมีผลทำให้ความหนาชั้นน้ำมันหล่อลื่นและความแรงในการชกกันของเกียร์เพิ่มขึ้น แตกต่างกับงานวิจัยเดิม [15] คือ อุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นและความเร็วรอบที่สูงมีผลทำให้ค่าสัญญาณอะคูสติกสูงขึ้น ทั้งสัญญาณแบบชั่วขณะ และต่อเนื่องที่เกิดจากระบบเกียร์

Tan และคณะ [17] ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายแบบหลุมลึกบนผิวเกียร์ ด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติก, วิธีการสั่นสะเทือน และวิธีการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น ระบบเกียร์ในการทดสอบ

เหมือน Toutountzakis และคณะ[14] ความเสียหายแบบหลุมขนาด 50% ของพื้นที่ผิว ความเร็ว 745 รอบต่อนาที ภาระงานในระบบ 73, 147 และ 220 นิวตันเมตร ระหว่างทดสอบจะเกิดการเกิดความเสียหายที่ผิวเกียร์และวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น วิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกและการสั่นสะเทือนด้วยค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเปรียบเทียบกับโลหะที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นจากการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นสรุปว่าสัญญาณอะคูสติกที่วัดจากเพลาชับแปรผันตามกับขนาดความเสียหาย และสัญญาณอะคูสติกจากเพลาชับตอบสนองดีกว่าจากฐานตลับลูกปืน เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองวิธีสัญญาณอะคูสติกดีกว่าที่ระบบมีภาระงาน 220 นิวตันเมตร และวิธีการสั่นสะเทือนตอบสนองดีกว่าที่ระบบมีภาระงาน 73 และ 147 นิวตันเมตร Tan และคณะแนะนำว่าวิธีสัญญาณอะคูสติกตรวจสอบความเสียหายแบบหลุมได้ดีเพราะมีความแปรผันตามขนาดความเสียหายและระยะเวลาความเสียหาย งานวิจัยนี้วิเคราะห์ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเพียงพารามิเตอร์เดียวในการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์

Raja Hamazah และ Mba [18] ศึกษาเกี่ยวกับภาระงานและความเร็วของระบบเกียร์ในการเกิดสัญญาณอะคูสติก ใช้ระบบเกียร์ตรง 49 ฟันกับเกียร์ตรง 65 ฟัน และเกียร์เอียง 51 ฟันกับเกียร์เอียง 70 ฟัน ใช้หัววัดสัญญาณอะคูสติกช่วงความถี่กว้างกำลังขยาย 20 เดซิเบลกับเกียร์ตรง และกำลังขยาย 40 เดซิเบลกับเกียร์เอียง และหัววัดอุณหภูมิ 2 ตัวติดที่เกียร์ขับ หัววัดอุณหภูมิ 1 ตัวติดในถังน้ำมัน ก่อนเริ่มทดสอบทุกครั้งเดินเครื่องประมาณ 30 นาทีจนอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นคงที่ การทดสอบที่หนึ่งใช้ระบบเกียร์ตรงและเกียร์เอียงความเร็ว 700 รอบต่อนาทีคง เปลี่ยนแปลงภาระงานในระบบคือ 60, 120, 180, 250 และ 370 นิวตันเมตร สรุปว่าการเพิ่มภาระงานในระบบจาก 60 ถึง 370 นิวตันเมตร ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณเพิ่มขึ้น 187% และ 177% ทั้งเกียร์ตรงและเอียงตามลำดับ การทดสอบที่สองใช้ระบบเกียร์ตรงและเกียร์เอียงภาระงานในระบบคือ 60, 120, 180, 250 และ 370 นิวตันเมตรคงที่ เปลี่ยนแปลงความเร็ว 700, 1450 และ 2850 รอบต่อนาที สรุปว่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ อุณหภูมิระหว่างทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด 9.6 องศาเซลเซียสมีผลให้ขึ้นความหนาน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงทำให้การตอบสนองของระบบเกียร์ตรงดีกว่าระบบเกียร์เอียง

Raja Hamzah และ Mba [19] ศึกษาความหนาของชั้นน้ำมันหล่อลื่นกับสัญญาณอะคูสติก อุปกรณ์ทดสอบเหมือน Raja Hamazah และ Mba [18] ลดความหนาของชั้นน้ำมันด้วยการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ผิวเกียร์ด้วยการฉีดไนโตรเจนเหลวเข้าไปในระบบเกียร์ให้ผิวเกียร์มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ใช้ น้ำมันหล่อลื่นสองชนิดที่มีค่าความหนืดต่างกัน วัดความหนาของชั้นน้ำมันจากอ่างน้ำมัน และผิวเกียร์ขับทุกอุณหภูมิ ผลทดสอบค่ารากกำลังสองเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสวัดสัญญาณอะคูสติกไม่ได้ Raja Hamzah และ Mba สรุปว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกจากระบบเกียร์คือการขบกันของเกียร์ อุณหภูมิที่ผิวหน้าเกียร์มีผลกับสัญญาณมากกว่าอุณหภูมิที่อ่างน้ำมัน และวิธีสัญญาณอะคูสติกสามารถตรวจสอบความแรงของการขบกันของเกียร์ได้

งานวิจัยของ Raja Hamzah และ Mba [18, 19] ศึกษาแบบเกียร์ตรงและเกียร์เอียงด้วยสัญญาณอะคูสติก กลไกการขบกันของเกียร์เอียงต่างกับเกียร์ตรง ในเกียร์เอียงพื้นที่ผิวเกียร์ที่สัมผัสกันจะมีการเพิ่มขึ้นและลดลง แต่ในเกียร์ตรงจะมีค่าคงที่ ทำให้สัญญาณอะคูสติกเกิดจากเกียร์เอียงมี

ความต่อเนื่องมากกว่าเกียร์ตรง มีผลกับประสิทธิภาพของการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบเกียร์

Elforjani และ Mba [20] ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายของเพลาด้วยวิธีสัญญาณอะคูสติค การทดลองจำลองความเสียหายรูปทรงตัววีบนเพลา แกนเพลาทิ้งสองข้างยึดด้วยสลักปูนอยู่ในอ่างน้ำมัน ติดหัววัดสัญญาณที่ผนังอ่างน้ำมันเพื่อวัดสัญญาณอะคูสติคจากเพลา ทดสอบที่ความเร็ว 72 รอบต่อนาที การทดสอบที่ 1 มีแรงกระทำในระบบ 4 กิโลนิวตัน ผลการทดสอบก่อนเพลาแตกหัก 1 ชั่วโมงรอยร้าวที่เพลาจะเกิดการขยายตัวพลังงานของสัญญาณที่วัดได้เพิ่มขึ้น ทดสอบที่ 2 มีแรงกระทำในระบบ 8 กิโลนิวตัน ผลการทดสอบเมื่อมีแรงกระทำมากขึ้นไม่สามารถวัดสัญญาณอะคูสติคในการเกิดรอยร้าวที่สถานะเริ่มต้นได้ Elforjani และ Mba สรุปว่าวิธีสัญญาณอะคูสติคสามารถตรวจสอบความเสียหายที่เพลาได้

## 2.8 วิธีวิเคราะห์สัญญาณ

วิธีการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคและสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักร มีหลายวิธีมีข้อดีต่างกันเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คำนวณหาแหล่งกำเนิด, คุณภาพสัญญาณ ลักษณะของสัญญาณ และพารามิเตอร์ต่างๆ มาใช้ตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักร จากงานวิจัยต่างๆมีวิธีวิเคราะห์สัญญาณดังนี้

### 2.8.1 วิธีวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา

สัญญาณอะคูสติคที่ได้จากอุปกรณ์วัดสัญญาณโดยปกติจะได้สัญญาณแบบ เวลาต่อกระแสไฟฟ้า เป็นสัญญาณบนโดเมนเวลากับแอมพลิจูดที่สูงต่ำสลับเป็นตามรอบการหมุนของเครื่องจักร การวิเคราะห์สัญญาณจะใช้พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าพลังงาน ค่าความโด่ง และค่ารากกำลังสองเฉลี่ย เป็นต้น การเปรียบเทียบสัญญาณกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยจะนิยมใช้คำนวณหาความเข้มของสัญญาณ Chee Keong และคณะ[15] ได้ตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรโดยวิเคราะห์ชนิดของความเสียหายชนิดแบบต่างๆ และตำแหน่งความเสียหายโดยการคำนวณความแรงของค่ารากกำลังสองเฉลี่ย แสดงผลเป็นแผนภูมิเส้นใช้ความแตกต่างของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักร Dyer และ Stewart [21] เป็นคนแรกที่ใช้ค่าความโด่งวิเคราะห์ความเสียหายของสลักปูน สำหรับสลักปูนปกติการกระจายของสัญญาณเป็นไปตามหลักของเกาส์เซียน (Gaussian) ค่าความโด่งมีค่าใกล้ 3 เมื่อค่าความโด่งมากกว่า 3 สรุปว่ามีกรบกพร่องที่สลักปูน

### 2.8.2 วิธีวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่

การศึกษาสัญญาณอะคูสติคบนโดเมนความถี่ ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักร การวิเคราะห์บนโดเมนความถี่กับส่วนประกอบเครื่องจักรเช่น เกียร์, เพลา และสลักปูน ในความเป็นจริงทุกชิ้นส่วนเครื่องจักรมีความถี่การหมุนเฉพาะตัว การศึกษาความเสียหายบนสลักปูนทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพลังงานบนโดเมนความถี่ Tandon และ Choudhury [22] ศึกษาวิธีวิเคราะห์สัญญาณจากสูตร Fast Fourier Transform (FFT) ทำให้เกิดสเปกตรัมความถี่ของข้อมูลสัญญาณ วิธีนี้ใช้หลักการ Fourier transform ในหลายช่วงความถี่ [23] และสเปกตรัมของสัญญาณจากทุกค่าแอมพลิจูดเทียบกับทุกช่วงความถี่ ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบเกียร์

### 2.8.3 วิธีวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและความถี่

วิธีวิเคราะห์บนโดเมนเวลาหรือบนโดเมนความถี่อย่างใดอย่างหนึ่งมีข้อจำกัดกับสัญญาณไม่คงที่ ดังนั้นเครื่องจักรหมุนมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน หรือมีความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ สัญญาณที่ออกมาจะมีบางช่วงที่ไม่คงที่ ในช่วงสัญญาณที่ไม่คงที่เป็นส่วนที่ทำให้การวิเคราะห์สัญญาณผิดพลาด การศึกษาวิธีวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่ร่วมกันเป็นวิธีวิเคราะห์สัญญาณที่มีประสิทธิภาพในสัญญาณไม่คงที่ Peng และคณะ [24] วิจัยการวิเคราะห์สัญญาณแบบ Wavelet transform Winger-Ville distribution (WVD) และ Short Time Furrier Transform (STFT) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่ที่ได้รับความนิยม Meng และ Qu [25] ใช้วิธี WVD วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการความเสียหายตลับลูกปืนและเกียร์ สามารถตรวจสอบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ลดลงเปรียบเทียบกับ การแปลงโดเมนเวลาและความถี่ การคำนวณเป็นช่วงความถี่จากสัญญาณทั้งหมด อธิบายได้ดีกว่าการรวมสัญญาณทั้งหมด [26]

### 2.8.4 วิธีวิเคราะห์แบบ Amplitude Demodulation

การศึกษาสัญญาณที่มีแอมพลิจูดลดลงจากความถี่สูงและความถี่ต่ำของสัญญาณ สเปกตรัมเมื่อแอมพลิจูดประกอบด้วยความถี่สูงสุดและช่วงความถี่ลดลง McInerny และ Dai [27] ศึกษาวิธีวิเคราะห์สัญญาณแบบ Amplitude Demodulation สามารถตรวจสอบความเสียหายของตลับลูกปืนได้สำเร็จ McFadden [28] ศึกษาการตรวจสอบการเริ่มเกิดรอยร้าว ใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Amplitude Demodulation กับสัญญาณการสั่นสะเทือน มีขั้นตอนการวิเคราะห์คือ 1.แยกสัญญาณต่ำออก 2. แปลงสัญญาณโดยใช้วิธี Hibert transform [29] 3.วิเคราะห์สัญญาณและรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน

### 2.8.5 วิธีวิเคราะห์แบบ Spectral Kurtosis

Spectral Kurtosis (SK) คือวิธีวิเคราะห์สัญญาณที่เริ่มจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน การคำนวณ SK จากสัญญาณบนโดเมนความถี่และเวลาหลังจากการหาค่า Kurtosis ทุกช่วงความถี่ [30] วิธีวิเคราะห์แบบ SK พัฒนาต่อโดย Dwyer [31] เป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบสัญญาณที่ไม่กระจายตามหลักของเกาส์เซียน (non-Gaussian) ในหลายช่วงความถี่ Dwyer สรุปว่าการวิเคราะห์แบบ SK สามารถวิเคราะห์กับสภาวะที่เสถียรแต่ไม่สามารถวิเคราะห์กับเครื่องจักรที่ไม่เสถียรได้

### 2.8.6 วิธีวิเคราะห์สัญญาณด้วยการจัดจํารูปแบบ

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการจัดจํารูปแบบโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่างๆ ในการแยกข้อมูลออกจากกันโดยการคำนวณเชิงสถิติ การวิเคราะห์ใช้มากกว่า 2 พารามิเตอร์ที่ต่างกัน คำนวณขอบเขตสภาวะการทำงานของเครื่องจักร หาความเกี่ยวข้องกันทางสถิติในสามารถระบุชนิดความเสียหายที่เกิดขึ้น ทรงพล [32] ศึกษาวิธีวิเคราะห์สัญญาณด้วยการจัดจํารูปแบบกับวิธีการสั่นสะเทือนของระบบเกียร์หลายอัตราทดเกียร์ สามารถตรวจสอบทุกสภาวะของระบบเกียร์ไม่มีภาระงานได้ แต่เมื่อมีภาระงานในระบบเกียร์ไม่สามารถตรวจสอบได้ในบางสภาวะของระบบเกียร์

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติของระบบเกียร์หลายอัตราทดเกียร์ จะสามารถระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างชัดเจนตามจุดประสงค์ของงานวิจัย

### บทที่ 3

#### การตรวจวัดสัญญาณอะคูสติคและการทดลอง

##### 3.1 บทนำ

บทนี้จะทำการแนะนำและอธิบายถึงลักษณะของสัญญาณการอะคูสติค ที่ใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรและตรวจสอบความเสียหายในระบบเกียร์ อธิบายการบันทึกสัญญาณอะคูสติคจากอุปกรณ์ทดลอง ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติ การระบุความเสียหายจากการวัดสัญญาณอะคูสติคจากระบบเกียร์ในเครื่องจักร

##### 3.2 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติค

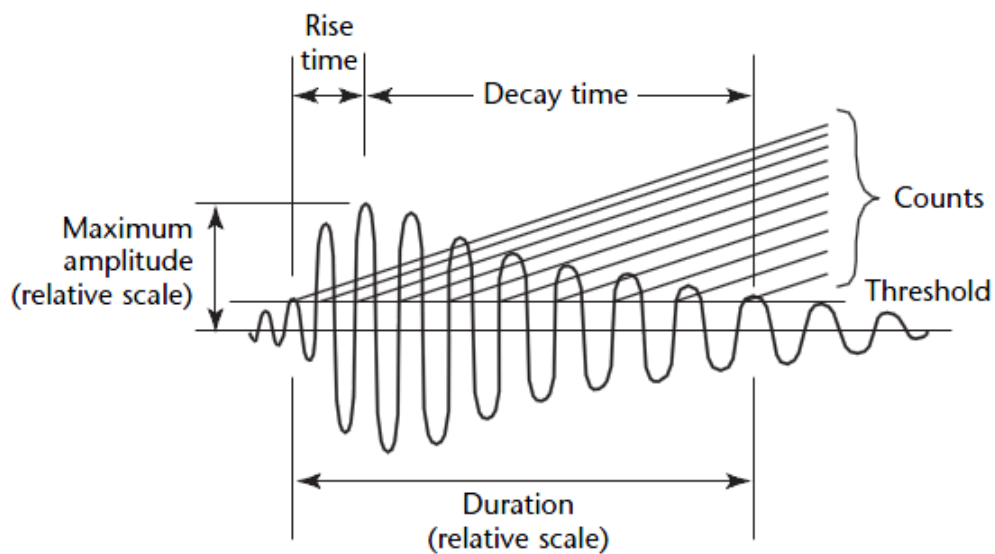
สัญญาณอะคูสติคที่ได้จากหัววัดสัญญาณปกติจะมีค่าต่ำ และใช้การขยายสัญญาณให้มีขนาดสูงขึ้นอยู่ในช่วงแอมพลิจูดระหว่างมิลลิโวลต์ (mV) ถึงโวลต์ (V) ลักษณะสัญญาณอะคูสติคขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆคือ ลักษณะของแหล่งกำเนิด วัสดุตัวกลางในการผ่านสัญญาณจากแหล่งกำเนิดถึงหัววัด ลักษณะของหัววัด ระบบการตรวจจับสัญญาณ โดยทั่วไปรูปคลื่นจะซับซ้อนและต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ สัญญาณอะคูสติคที่วัดได้จะมี 3 แบบคือ 1. Burst emission คือสัญญาณชั่วขณะที่เกิดค่าแอมพลิจูดสูงขึ้นแล้วหายไป จำนวนสัญญาณที่ตรวจวัดได้อาจเกิดจากการกระทบตามรอบการหมุนของเครื่องจักรดังภาพที่ 3-1(a) 2. Continuous emission คือสัญญาณที่เกิดอย่างต่อเนื่องค่าแอมพลิจูดสม่ำเสมอ และเป็นลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องจักรปกติดังภาพที่ 3-1(b) 3. Mixed emission คือสัญญาณที่รวมสัญญาณทั้งสองแบบผสมกันอยู่ ภาพที่ 3-1(c)

วิธีการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคคือการคำนวณผลข้อมูลที่ได้จากการวัดสัญญาณอะคูสติคเพื่อใช้อธิบายลักษณะของสัญญาณหรือสิ่งที่เกิดกับสัญญาณได้ เมื่อสิ่งที่วัดได้นั้นยากต่อการสังเกตการณ์โดยตรงหรือยากต่อการเขียนสมการทำการนายการเคลื่อนที่โดยตรง การประมวลผลสัญญาณมี 3 ขั้นตอนคือ 1. การบันทึกข้อมูลสัญญาณ 2. การคำนวณผลสัญญาณ และ 3. การรายงานผลการวิเคราะห์สัญญาณ การแสดงผลที่นิยมคือสัญญาณอะคูสติคบนโดเมนเวลา หรือโดเมนความถี่



ภาพที่ 3-1 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติก (a) Burst emission (b) Continuous emission  
(c) Mixed emission

สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา อธิบายแหล่งกำเนิดและคุณลักษณะของสัญญาณอะคูสติกทั้งหมด การวิเคราะห์สัญญาณต้องมีค่าจำกัดเริ่มต้น (Threshold) ของสัญญาณเพื่อแยกสัญญาณรบกวน (Noise) ที่รวมมากับสัญญาณให้การวิเคราะห์ชัดเจนสูงขึ้น ลักษณะสัญญาณบนโดเมนเวลาแสดงดังภาพที่ 3-2 มี 5 พารามิเตอร์ที่อธิบายลักษณะของสัญญาณเบื้องต้นคือ



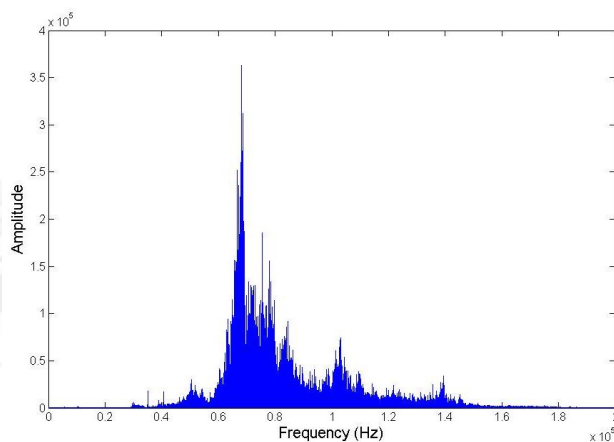
ภาพที่ 3-2 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา [5]

1. Count คือจำนวนสัญญาณอะคูสติกที่สูงมากกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น
2. Amplitude คือค่าสูงสุดของสัญญาณอะคูสติก
3. Rise Time คือระยะเวลาที่สัญญาณมีค่ามากกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นจนถึงสัญญาณมีค่าสูงที่สุด
4. Duration คือระยะเวลาที่สัญญาณมีค่ามากกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นจนถึงสัญญาณมีค่าน้อยกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น
5. Decay Time คือระยะเวลาที่สัญญาณมีค่าสูงที่สุดจนถึงสัญญาณมีค่าน้อยกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น

สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนความถี่ เป็นการคำนวณจากสัญญาณบนโดเมนเวลาผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์ Fast Fourier Transform (FFT) เปลี่ยนเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังสมการที่ (3.1)

$$Y(\omega) = \int_0^t y(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

โดยที่  $Y(\omega)$  คือแอมพลิจูดในแกนความถี่  $y(t)$  คือแอมพลิจูดในแกนเวลา  $t$  คือคาบของสัญญาณ  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุม ความแรงของแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณที่ได้สามารถระบุความผิดปกติของเครื่องจักรได้ การคำนวณ FFT นั้นเป็นการแยกสัญญาณที่เป็นผลรวมของสัญญาณทั้งหมดแล้วมาเขียนความแรงในแกนของความถี่หรือสเปกตรัม ลักษณะสัญญาณบนโดเมนความถี่แสดงดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนความถี่

ผลการแปลงสัญญาณมาเป็นกราฟในแกนของความถี่ การวิเคราะห์จะต้องเปรียบเทียบความถี่กับแอมพลิจูดสัญญาณ และวิเคราะห์ผลช่วงความถี่ต่างๆ เกิดมาจากสภาวะการทำงานของเครื่องจักรที่ปกติหรือมีความเสียหายเกิดขึ้น ผู้ทำการวิเคราะห์ต้องที่มีประสบการณ์ ความรู้ในการวิเคราะห์สัญญาณ จึงสามารถวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ สามารถระบุความเสียหายของเครื่องจักรได้

### 3.3 วิธีวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์

งานวิจัยนี้ใช้วิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกที่รวบรวมการคำนวณสัญญาณ 2 วิธีคือ 1. การคำนวณพารามิเตอร์ของสัญญาณ และ 2. การคำนวณการกระจายตัวตามหลักของเกาส์เซียน มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของระบบเกียร์ การแสดงผลเป็นขอบเขตสภาวะการทำงานของเครื่องจักรที่สภาวะต่างๆ

### 3.3.1 การคำนวณพารามิเตอร์

การคำนวณพารามิเตอร์เป็นการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาให้สามารถที่อธิบายลักษณะของสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้น มีพารามิเตอร์ 8 ชนิดคือ

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยหรือ Root Mean Square (RMS) คือการวัดความเข้มของสัญญาณเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณและใช้วิเคราะห์ความผิดปกติเกิดของเครื่องจักร มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) คำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.2)$$

ค่าพลังงานของสัญญาณ (Signal Energy) คือพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา การวัดค่าพลังงานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการระบุลักษณะของสัญญาณ เมื่อมีแอมพลิจูดต่ำและต่อเนื่อง มีหน่วยเป็นโวลต์กำลังสองวินาที ( $V^2s$ ) คำนวณได้จากสมการ (3.3)

$$Energy = \int_0^t x^2(t) dt \quad (3.3)$$

ค่าเฉลี่ย (Mean) คือการคำนวณค่าเฉลี่ยของระดับความแรงสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) คำนวณได้จากสมการ (3.4)

$$Mean = \bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (3.4)$$

ตัวประกอบยอดคลื่น (Crest factor :CF) คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดหารด้วย ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเป็นตัวบ่งชี้อัตราส่วนสัญญาณ เป็นวิธีวัดความราบเรียบของสัญญาณ ไม่มีหน่วยคำนวณได้จากสมการ (3.5)

$$CF = \frac{Max(|x(t)|)}{RMS} \quad (3.5)$$

ค่าความแปรปรวน (Variance) คือการคำนวณการกระจายตัวของสัญญาณอะคูสติก เป็นค่ากำลังสองของผลต่างระหว่างสัญญาณกับค่าเฉลี่ย ถ้าข้อมูลสัญญาณใกล้เคียงค่าเฉลี่ยมากจะมีค่าน้อย ถ้าข้อมูลสัญญาณไกลค่าเฉลี่ยจะมีค่ามาก และเมื่อข้อมูลสัญญาณมีค่าเท่ากันหมดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ มีหน่วยเป็นโวลต์กำลังสอง ( $V^2$ ) คำนวณได้จากสมการ (3.6)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2}{N} \quad (3.6)$$



ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) คือการคำนวณการกระจายตัวของสัญญาณอะคูสติก มีหน่วยอันเดียวกับกับสัญญาณคือโวลต์ (V) ใช้ในการคำนวณทางสถิติ คำนวณได้จากสมการ (3.7)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.7)$$

ค่าความโด่ง (Kurtosis) คือการคำนวณสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของความสัมพันธ์ของความเบี่ยงเบนที่จุดสูงสุด เมื่อมีความเบี่ยงเบนสัญญาณปกติค่าความโด่งจะมีค่าเป็นประมาณสาม ค่าความโด่งสามารถระบุแรงที่มากกระทบบนเครื่องจักรได้ ไม่มีหน่วยคำนวณได้จากสมการ (3.8)

$$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left( \frac{|x_i| - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \quad (3.8)$$

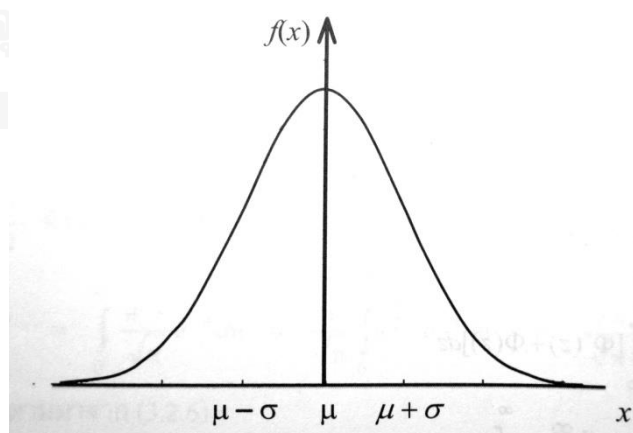
ค่าความเบ้ (Skewness) คือระดับความเอียงตัวของสัญญาณอะคูสติก หรือความไม่เท่ากันของการกระจายตัวของสัญญาณ ไม่มีหน่วยคำนวณได้จากสมการ (3.9)

$$Skewness = \frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^3}{(N-1)(\sigma)^3} \quad (3.9)$$

โดยที่  $x(t)$  และ  $x(i)$  คือแอมพลิจูดในแกนเวลา  $N$  คือจำนวนข้อมูล  $T$  คือคาบของสัญญาณ เมื่อนำพารามิเตอร์มาวิเคราะห์สัญญาณจะอธิบายลักษณะสัญญาณอะคูสติกและอาจใช้วิธีวิเคราะห์แบบอื่นมาร่วมกับพารามิเตอร์ของสัญญาณอธิบายสัญญาณอะคูสติกได้ดีขึ้น

### 3.3.2 การคำนวณการกระจายแบบปกติ

การกระจายแบบปกติ หรือแบบเกาส์เซียน (Gaussian) สามารถอธิบายความน่าจะเป็นของค่าสัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่อง เมื่อค่าสัญญาณอะคูสติกมีแนวโน้มที่มีค่าอยู่ใกล้กับค่าเฉลี่ย กราฟแสดงค่าฟังก์ชันความหนาแน่นจะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบปรกติ [33]

โดยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของการกระจายแบบปกติ คำนวณได้จากสมการ (3.10)

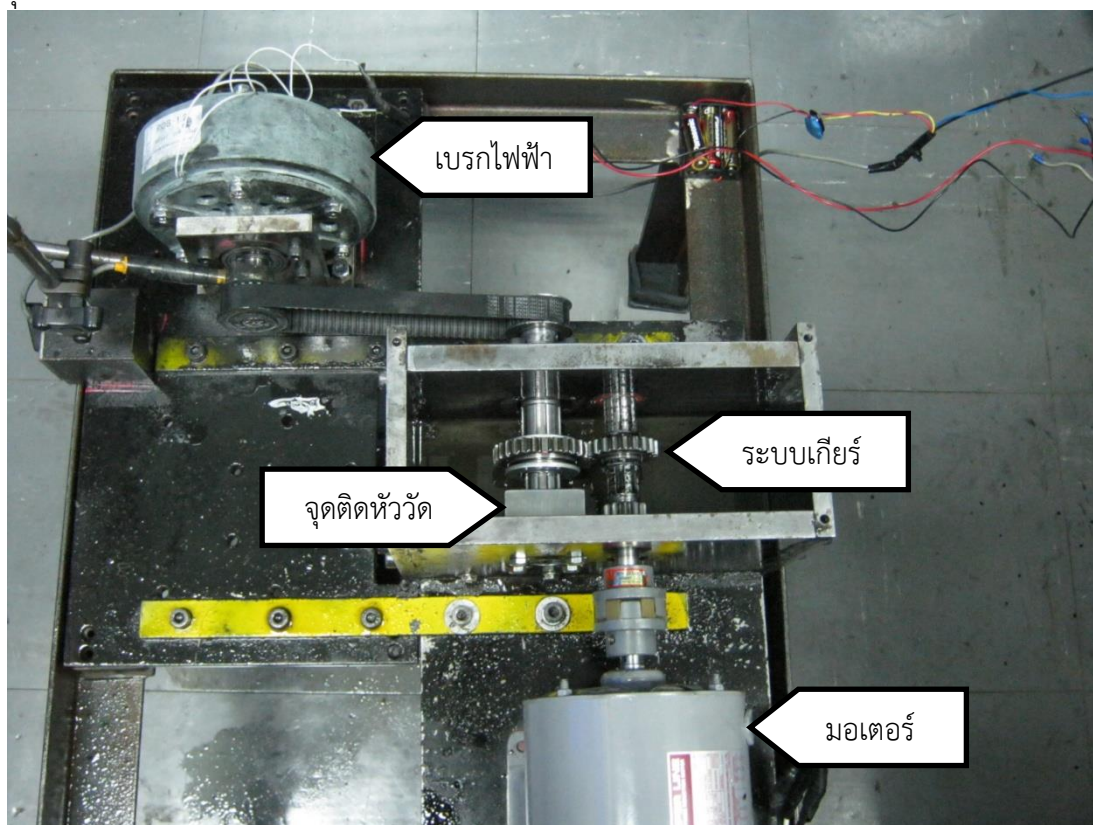
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.10)$$

โดยที่  $x$  คือค่าสัญญาณอะคูสติก  $\mu$  คือค่าเฉลี่ย และ  $\sigma^2$  คือค่าความแปรปรวน การแจกแจงแบบปกติ มีค่า  $\mu = 0$  และ  $\sigma^2 = 1$  จะถูกเรียกว่าการกระจายแบบปกติมาตรฐาน ภายใต้สภาวะต่างๆไปแล้ว ค่าเฉลี่ยจากการสุ่มค่าสัญญาณอะคูสติกถ้าจำนวนการสุ่มมีมากพอ ประมาณได้ว่าเป็นการกระจายแบบปกติ

งานวิจัยนี้คำนวณจากหลักการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนในการสร้างขอบเขตสถานะการทำงานของเกียร์กำหนดให้รัศมีกว้างสองเท่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและจุดศูนย์กลางคือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ ที่ความน่าจะเป็น 95% กระจายตัวของสัญญาณอะคูสติกตามหลักการกระจายแบบปกติ

### 3.4 อุปกรณ์การวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบเกียร์ของรถจักรยานยนต์ขนาด 125 ซีซีแบบเปลี่ยนอัตราทดได้ แหล่งกำเนิดกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า ยึดแกนเพลาชับและเพลาทามด้วยตลับลูกปืนทั้งสองข้าง ชุดเกียร์มีน้ำมันหล่อลื่นทั้งระบบเกียร์ดังภาพที่ 3-5 โดยมีรายละเอียดดังนี้


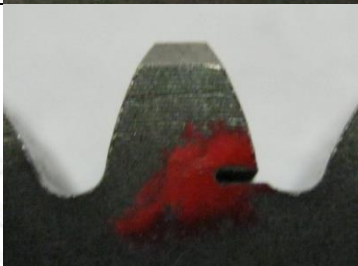






ภาพที่ 3-5 ระบบเกียร์ทดลอง

1. เกียร์ขับเป็นเกียร์ตรงโมดูล 20 ม.ม. ความหนา 10 ม.ม. จำนวน 20 ฟัน
2. เกียร์ตามเป็นเกียร์ตรงโมดูล 20 ม.ม. ความหนา 10 ม.ม. จำนวน 25 และ 28 ฟัน จำลองสภาวะการทำงานทั้งหมด 6 เงื่อนไข
3. ตัวขับใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส กำลังขนาด 0.5 แรงม้า ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็วโดยอินเวอร์เตอร์
4. เครื่องกำเนิดภาระงานแบบเบรกแม่เหล็กไฟฟ้า แรงบิดต่อเนื่องสูงสุด 12 นิวตันเมตร ความเร็วรอบสูงสุด 1800 รอบต่อนาที ควบคุมแรงบิดโดยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
5. น้ำมันหล่อลื่นระบบเกียร์ Grade 15W-40 และอุปกรณ์อื่นเช่น ฐานชุดทดลอง อ่างน้ำมันหล่อลื่น สายพาน และหน้าแปลน

การตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ จะจำลองความเสียหายทั้งหมด 6 เงื่อนไขที่เกียร์ตาม 25 และ 28 ฟันดังตารางที่ 3-1

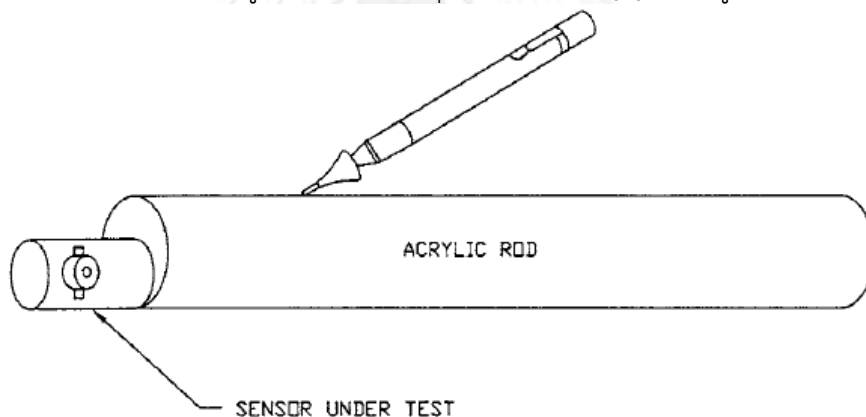
ตารางที่ 3-1 การจำลองความเสียหายของเกียร์

เงื่อนไข	รายละเอียดความเสียหาย	รูปความเสียหาย
1	สภาวะการทำงานปกติ	
2	เกียร์ตามแตกร้าว 25% ของความหนาฟัน จำนวน 1 ฟัน	
3	เกียร์ตามแตกร้าว 50% ของความหนาฟัน จำนวน 1 ฟัน	
4	เกียร์ตามแตกหัก 50% ของความสูงฟันจำนวน 1 ฟัน	
5	เกียร์ตามแตกหัก 100% ของความสูงฟันจำนวน 1 ฟัน	
6	เกียร์ตามแตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟัน ตำแหน่งตรงกันข้ามกัน	

อุปกรณ์บันทึกข้อมูลสัญญาณอะคูสติกของงานวิจัยนี้ใช้หัววัดสัญญาณอะคูสติก Vallen System GmbH รุ่น VS 150-RIC ช่วงความถี่ตอบสนอง 30 ถึง 500 kHz รับสัญญาณอะคูสติกในหน่วย  $\mu\text{bar}$  แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าในหน่วยโวลต์ มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ประกอบรวมกับหัววัดขยายสัญญาณที่ 34 dB (รายละเอียดภาคผนวก ก.) และ Tachometer วัดความเร็วรอบของเพลลาตาม บันทึกข้อมูลสัญญาณทั้งสองพร้อมกัน การแปลงสัญญาณความเร็วรอบและอะคูสติกจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล ด้วยการรับสัญญาณ Advantech PCI-1714U ความถี่สุ่มสูงสุด 30 MHz ความละเอียด 12 บิต (รายละเอียดภาคผนวก ข.) โปรแกรมการบันทึกสัญญาณสร้างจากโปรแกรม Labview โดยผู้วิจัย

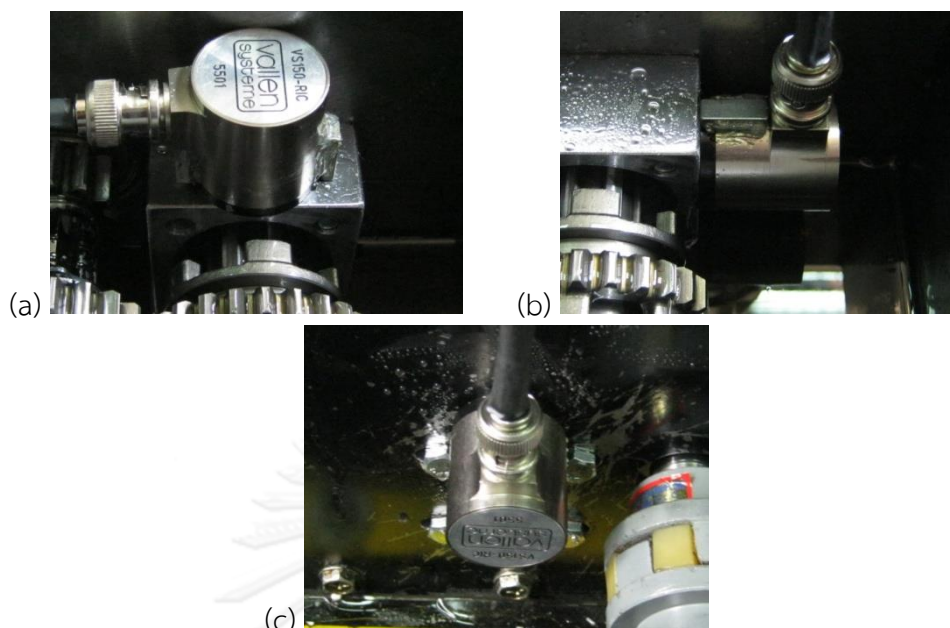
### 3.5 วิธีและขั้นตอนการวิจัย

ก่อนเริ่มทำการวิจัยจะทดสอบความแรงของสัญญาณอะคูสติกทุกครั้งด้วยวิธี Nielsen [34] ตามมาตรฐาน American Standard for Testing and Material (ASTM) E976-05 ดังภาพที่ 3-6 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกจากการหักเหได้นิสอกด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตรความยาว 3 มิลลิเมตร ความแข็ง 2H ห่างจากหัววัดสัญญาณอะคูสติก 10 เซนติเมตรที่ฐานตลับลูกปืน เพราะการหักเหได้นิสอกดช่วงความถี่ของสัญญาณกว้าง ความแรงสัญญาณอะคูสติกจะคงที่ และเป็นวิธีที่เหมาะสมในการตรวจความถูกต้องการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอะคูสติก



ภาพที่ 3-6 ทดสอบความแรงของสัญญาณอะคูสติกด้วยวิธี Nielsen [34]

การบันทึกสัญญาณอะคูสติกในการทดลองนี้ใช้ความถี่สุ่ม 1.5 MHz ระยะเวลา 1 วินาทีต่อ 1 ชุดข้อมูล เดินเครื่องระบบเกียร์ความเร็ว 1400 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น 35 องศาเซลเซียส ก่อนบันทึกสัญญาณจากระบบเกียร์ตามที่ใช้ทดลองคือ 25 และ 28 ฟันมีสภาวะความเสียหายทั้งหมด 6 เงื่อนไขคือ สภาวะปกติ แตกร้าว และแตกหักดังตารางที่ 3-1 หัววัดสัญญาณอะคูสติกติดตั้งที่ฐานตลับลูกปืนเพลลาขับทั้ง 3 แกนคือแกนตั้ง, แกนนอน และแกนเพลลา ภาพที่ 3-7



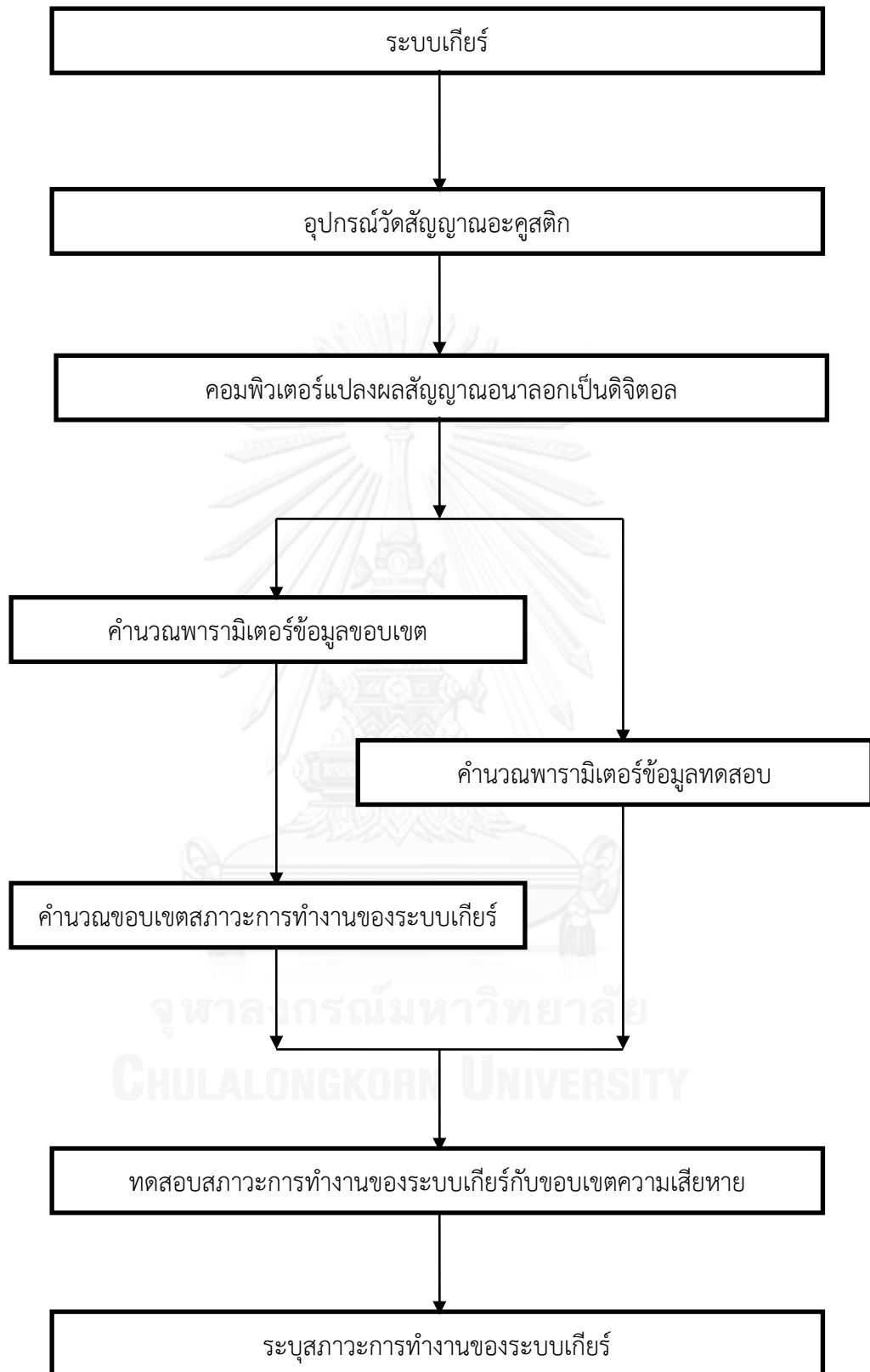
ภาพที่ 3-7 ตำแหน่งหัววัดสัญญาณอะคูสติคที่ฐานตลับลูกปืน

(a) แกนตั้ง (b) แกนนอน (c) แกนเพลลา

บันทึกสัญญาณทั้งระบบเกียร์ไม่มีภาระงาน และมีภาระงาน 1 นิวตันเมตร ทุกเงื่อนไขบันทึกสัญญาณจำนวน 40 ชุดข้อมูลเพื่อใช้สร้างขอบเขต ทำการทดสอบอีกครั้งตามขั้นตอนเดิมบันทึกสัญญาณจำนวน 10 ชุดข้อมูลเพื่อใช้ทดสอบความแม่นยำ นำข้อมูลมาวิเคราะห์สัญญาณด้วยโปรแกรม Labview และ Matlab

### 3.6 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติค

ข้อมูลสัญญาณอะคูสติคที่ได้จากระบบเกียร์ทุกเงื่อนไขบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม Labview และขั้นตอนการวิเคราะห์พัฒนาจากโปรแกรม Matlab คือ คำนวณพารามิเตอร์สัญญาณอะคูสติคด้วยค่าพลังงานของสัญญาณ ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าเฉลี่ย ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าตัวประกอบยอดคลื่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความโด่ง ของสภาวะทั้งหมด ใช้ 40 ชุดข้อมูลกลุ่มแรกคำนวณขอบเขตสภาวะการทำงานของเครื่องจักรระหว่างความสัมพันธ์กันของ 2 พารามิเตอร์เส้นขอบเขตมีรัศมีเท่ากับสองเท่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ ทดสอบความถูกต้องของขอบเขตใช้ 10 ชุดข้อมูลกลุ่มที่สองในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรว่าขอบเขตสภาวะการทำงานของเครื่องจักร สามารถตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้ตามจุดประสงค์ของงานวิจัยดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 แผนผังการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

#### 4.1 บทนำ

บทนี้แสดงผลการทดสอบ และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของระบบเกียร์ทั้ง 6 เงื่อนไข คือ 1.สภาวะการทำงานปกติ 2.เกียร์ตามแตกร้าว 25% ของความหนาฟัน 3.เกียร์ตามแตกร้าว 50% ของความหนาฟัน 4.เกียร์ตามแตกหัก 50% ของความสูงฟัน 5.เกียร์ตามแตกหัก 100% ของความสูงฟัน 6.เกียร์ตามแตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟันตำแหน่งตรงกันข้ามกัน แสดงผลการวิเคราะห์ความเสียหายของระบบเกียร์บนโดเมนเวลา ผลการคำนวณสัญญาณอะคูสติกด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าพลังงาน ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าตัวประกอบยอดคลื่น ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้และค่าความโด่ง แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติ กำหนดขอบเขตที่ความน่าจะเป็น 95% กระจายตัวของสัญญาณอะคูสติก

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกของเกียร์ตรงบนโดเมนเวลา

สัญญาณอะคูสติกที่ได้จากระบบเกียร์ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที ใช้เกียร์ตาม 25 ฟัน ดังภาพที่ 4-1 และ 4-2 ใช้เกียร์ตาม 28 ฟัน ดังภาพที่ 4-3 และ 4-4 เมื่อใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณที่พัฒนาจากโปรแกรม Labview จะแสดงผลแบบวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา แกนตั้งคือแอมพลิจูดในหน่วยโวลต์ และแกนนอนคือเวลาในหน่วยวินาที สัญญาณจากหัววัดที่ติดบนฐานตลับลูกปืนเพลลาขับใน 3 แกนคือ แกนตั้ง แกนนอน และแกนเพลลา สัญญาณอะคูสติกที่นำมาแสดงผลคือ แกนเพลลาเพราะมีความแรงของสัญญาณดีที่สุดใน 3 แกน ลักษณะสัญญาณเป็นแบบ Burst และ Continuous มารวมกัน สภาวะการทำงานทั้ง 6 เงื่อนไขไม่มีผลของสัญญาณดังนี้

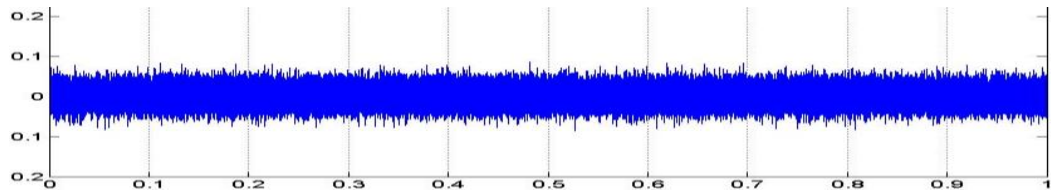
เงื่อนไขที่ 1 สภาวะปกติเกียร์ตาม 25 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาดังภาพที่ 4-1(a) มีแอมพลิจูดที่ไม่เท่ากันตลอดช่วงสัญญาณ เพราะการหมุนของระบบเกียร์เกิดสัญญาณที่จังหวะเกียร์เข้าหากันและเกียร์ออกจากกันเกิดความแรงสัญญาณไม่เท่ากัน

เงื่อนไขที่ 2 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกร้าว 25% ของความหนาฟันไม่มีภาระงานในระบบ ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาดังภาพที่ 4-1(b) มีลักษณะสัญญาณคล้ายสภาวะปกติ แต่มีแอมพลิจูดสูงกว่าเล็กน้อย อาจเกิดจากการขบกันของฟันเกียร์ที่แตกร้าวทำให้เกิดสัญญาณที่สูงขึ้น

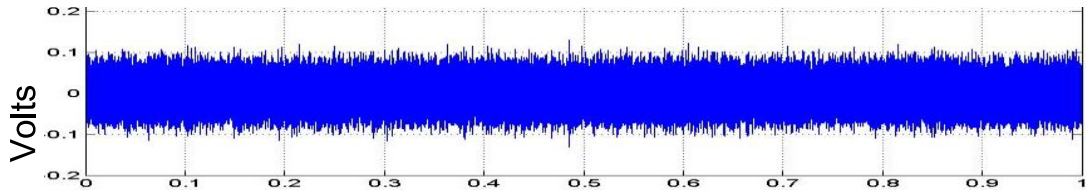
เงื่อนไขที่ 3 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกร้าว 50% ของความหนาฟันไม่มีภาระงานในระบบ ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาดังภาพที่ 4-1(c) มีลักษณะสัญญาณเหมือนสภาวะแตกร้าว 25% ของความหนาฟัน วิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาระบุสภาวะปกติและความเสียหายแบบความแตกร้าว 25% กับ 50% ทำได้ยาก



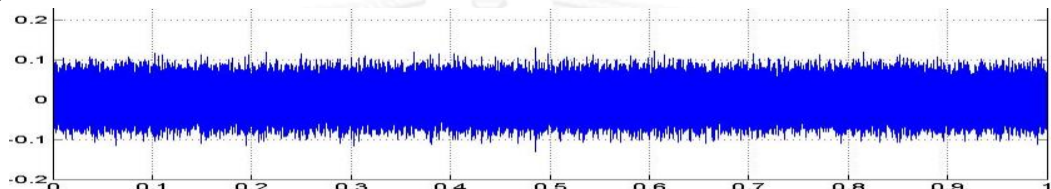
a) เส้นใยที่ 1 สภาวะปกติเกียร์ตาม 25 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ



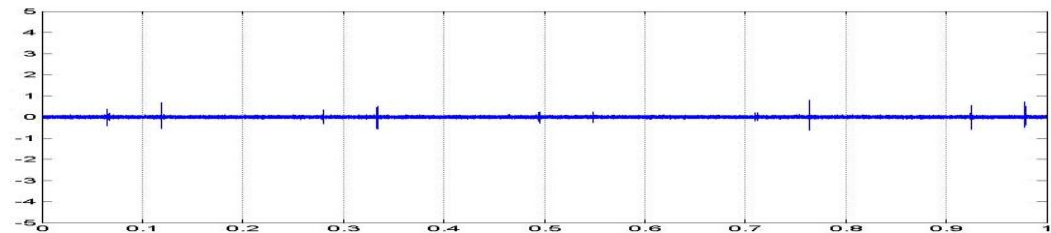
b) เส้นใยที่ 2 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกร้าว 25% ของความหนาฟันไม่มีภาระงาน



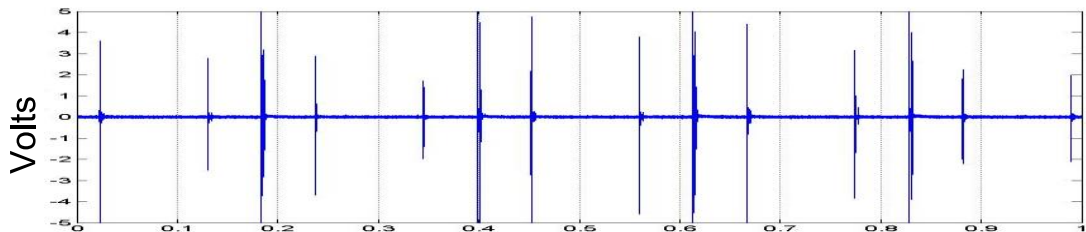
c) เส้นใยที่ 3 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกร้าว 50% ของความหนาฟันไม่มีภาระงาน



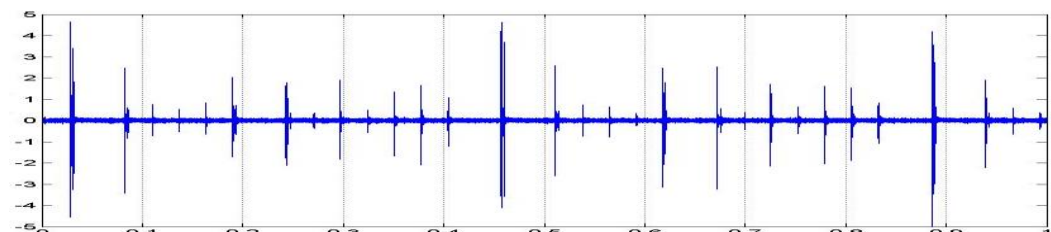
d) เส้นใยที่ 4 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 50% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ



e) เส้นใยที่ 5 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 100% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ



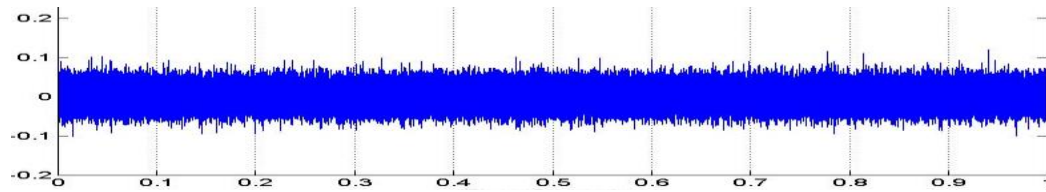
f) เส้นใยที่ 6 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ



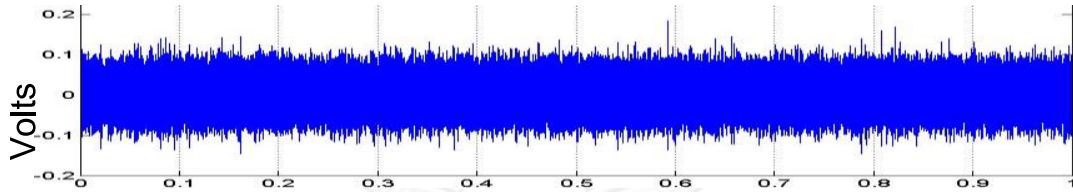
Time (second)

ภาพที่ 4-1 สัญญาณอะคูสติคบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 25 ฟันที่ไม่มีภาระงานในระบบ

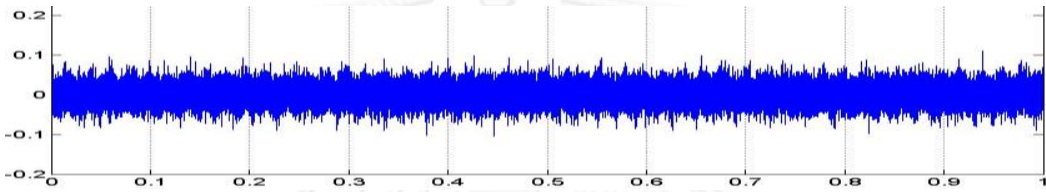
a) เงื่อนไขที่ 1 สภาวะปกติเกียร์ตาม 25 ฟันมีภาระงานในระบบ



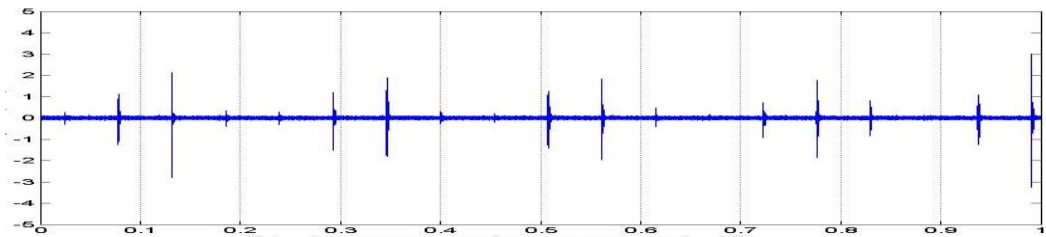
b) เงื่อนไขที่ 2 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกร้าว 25% ของความหนาฟันมีภาระงาน



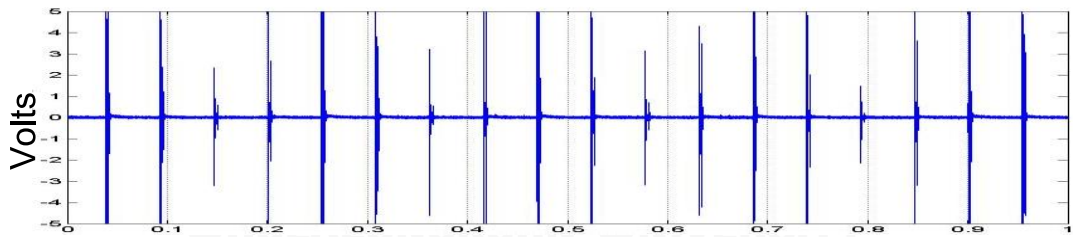
c) เงื่อนไขที่ 3 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกร้าว 50% ของความหนาฟันมีภาระงาน



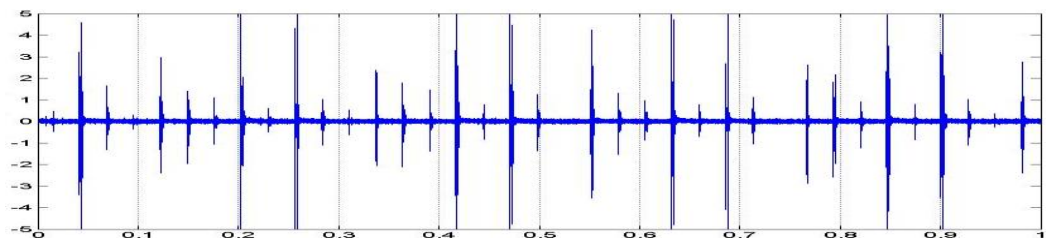
d) เงื่อนไขที่ 4 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 50% ของความสูงฟันมีภาระงานในระบบ



e) เงื่อนไขที่ 5 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 100% ของความสูงฟันมีภาระงานในระบบ



f) เงื่อนไขที่ 6 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟันมีภาระงานในระบบ



Time (second)

ภาพที่ 4-2 สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 25 ฟันที่มีภาระงานในระบบ

เงื่อนไขที่ 4 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 50% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาดังภาพที่ 4-1(d) มีลักษณะสัญญาณต่างกับสภาวะปกติและแตกร้า จะมีสัญญาณแบบ Burst เกิดระหว่างช่วงสัญญาณ มีแอมพลิจูดสูงขึ้นและหายไปเป็นจังหวะตามรอบการหมุน แต่ขนาดของแอมพลิจูดและช่วงเวลาเกิดสัญญาณ Burst ไม่สม่ำเสมอ เกิดจากการกระทบกันของเกียร์ที่แตกหัก

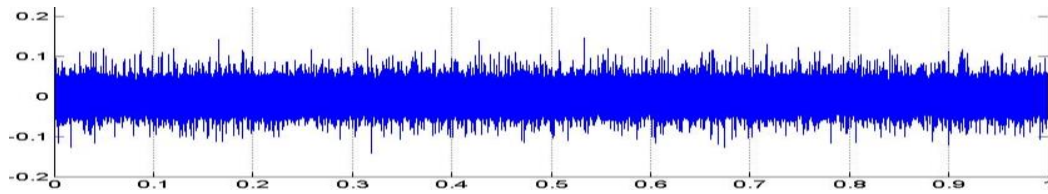
เงื่อนไขที่ 5 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 100% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาดังภาพที่ 4-1(e) มีลักษณะสัญญาณคล้ายสภาวะฟันแตกหัก 50% ของความสูงฟันมีแอมพลิจูดมากกว่าอย่างชัดเจน จังหวะสัญญาณแบบ Burst เกิดขึ้นเป็นจังหวะมากกว่าอย่างชัดเจน แต่ไม่สม่ำเสมอตลอดช่วงสัญญาณ

เงื่อนไขที่ 6 เกียร์ตาม 25 ฟันแตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟัน ตำแหน่งตรงกันข้ามกันไม่มีภาระงานในระบบ ลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาดังภาพที่ 4-1(f) สัญญาณแบบ Burst เกิดระหว่างช่วงสัญญาณ มีแอมพลิจูดผสมกันระหว่างแตกหัก 50% และ 100% มีแอมพลิจูดน้อยกว่าสภาวะแตกหัก 100% จังหวะเกิดสัญญาณ Burst ที่ไม่สม่ำเสมอตลอดช่วงสัญญาณ

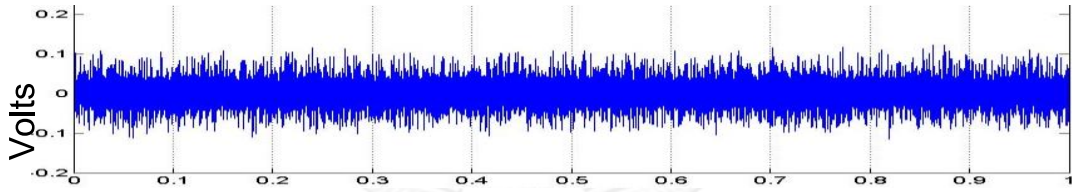
ลักษณะสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตาม 25 ฟันมีภาระงานในระบบสภาวะปกติและเกียร์แตกร้า ดังภาพที่ 4-2(a) ถึง 4-2(c) คล้ายกับสัญญาณของเกียร์ตาม 25 ฟันไม่มีภาระงานแต่มีแอมพลิจูดสูงกว่าเล็กน้อย อาจเกิดจากการขบกันของฟันเกียร์มีแรงกระทบกันสูงขึ้น การวิเคราะห์สภาวะปกติกับสภาวะแตกร้าออกจากกันมีความซับซ้อน สภาวะเกียร์แตกหัก 50% ดังภาพที่ 4-2(d) มีสัญญาณแบบ Burst เกิดตามรอบการหมุนของเครื่องจักร มีแอมพลิจูดแต่ละรอบไม่เท่ากันแต่สูงกว่าไม่มีภาระงาน สภาวะเกียร์แตกหัก 100% ดังภาพที่ 4-2(e) มีลักษณะสัญญาณคล้ายแบบแตกหัก 50% มีแอมพลิจูดสูงกว่าและแต่ละรอบการเกิดมีความสม่ำเสมอมากกว่า สภาวะเกียร์แตกหัก 50% และ 100% ดังภาพที่ 4-2(f) ลักษณะสัญญาณเป็นการรวมกันของสัญญาณแตกหัก 50% และสัญญาณแตกหัก 100% แต่ช่วงการเกิดสัญญาณแบบ Burst ต่างกันครึ่งรอบการหมุนของเครื่องจักร มีแอมพลิจูดสูงกว่าและจังหวะที่สม่ำเสมอกว่าระบบที่ไม่มีภาระงานในระบบ

ลักษณะสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกียร์ตาม 28 ฟันทั้งไม่มีและมีการะงานในระบบแกนตั้งคือแอมพลิจูดและแกนนอนคือเวลา ที่สภาวะปกติดังภาพที่ 4-3(a) และ 4-4(a) สภาวะเกียร์แตกร้า 50% ดังภาพที่ 4-3(b) และ 4-4(b) และ สภาวะเกียร์แตกร้า 100% ดังภาพที่ 4-3(c) และ 4-4(c) สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายสัญญาณของเกียร์ 25 ฟัน มีแอมพลิจูดต่ำกว่าเล็กน้อย อาจเกิดจากเกียร์ตาม 28 ฟันมีความเร็วรอบต่ำกว่าเกียร์ตาม 25 ฟัน ระบบที่มีการะงานมีแอมพลิจูดสูงกว่าระบบที่ไม่มีภาระงานเหมือนสัญญาณของเกียร์ 25 ฟัน สภาวะเกียร์แตกหัก 50% ดังภาพที่ 4-3(d) และ 4-4(d) มีสัญญาณแบบ Burst เกิดตามรอบการหมุนของเครื่องจักรอย่างเป็นจังหวะ แอมพลิจูดต่ำกว่าสัญญาณของเกียร์ 25 ฟัน สัญญาณในระบบที่มีการะงานจะมีความคงที่กว่าระบบที่ไม่มีภาระงาน สภาวะเกียร์แตกหัก 100% ดังภาพที่ 4-3(e) และ 4-4(e) สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายสัญญาณแตกหัก 50% แต่มีแอมพลิจูดสูงกว่า สภาวะเกียร์แตกหัก 50% และ 100% ดังภาพที่ 4-3(f) และ 4-4(f) เป็นการรวมกันของสัญญาณแตกหักของสองเงื่อนไข ช่วงการเกิดสัญญาณแบบ Burst ต่างกันครึ่งรอบการหมุนของเครื่องจักร เหมือนสัญญาณของเกียร์ 25 ฟัน

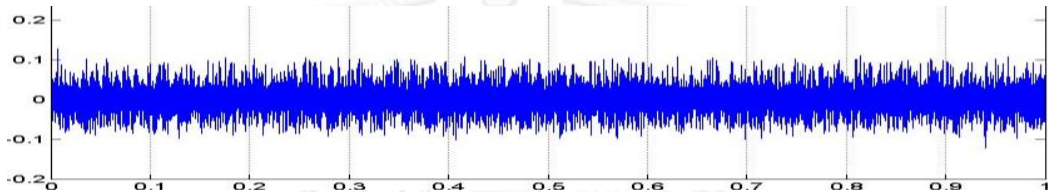
a) เงื่อนไขที่ 1 สภาวะปกติเกียร์ตาม 28 ฟันไม่มีภาระงานในระบบ



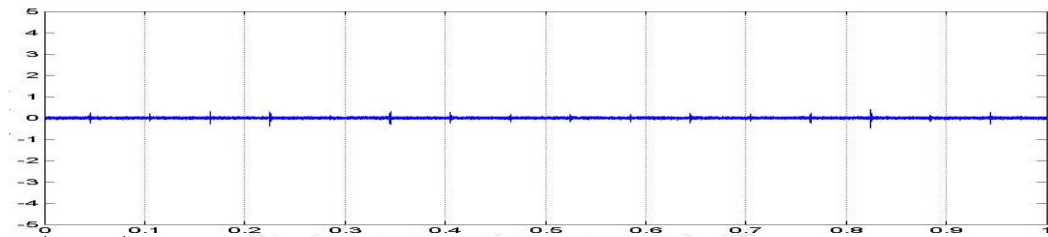
b) เงื่อนไขที่ 2 เกียร์ตาม 28 ฟันแตกร้าว 25% ของความหนาฟันไม่มีภาระงาน



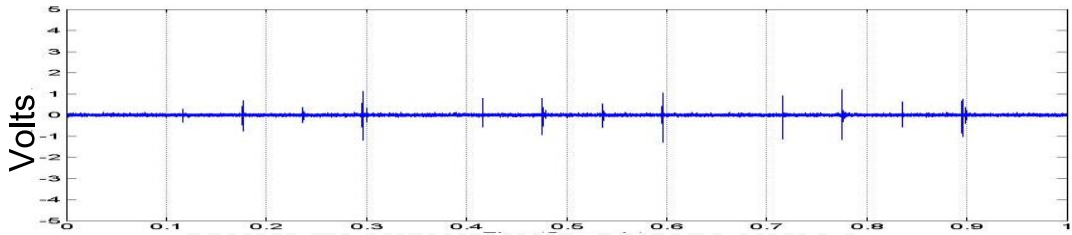
c) เงื่อนไขที่ 3 เกียร์ตาม 28 ฟันแตกร้าว 50% ของความหนาฟันไม่มีภาระงาน



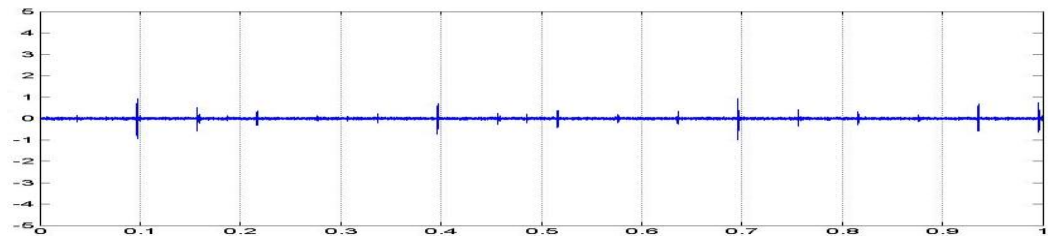
d) เงื่อนไขที่ 4 เกียร์ตาม 28 ฟันแตกหัก 50% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ



e) เงื่อนไขที่ 5 เกียร์ตาม 28 ฟันแตกหัก 100% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ

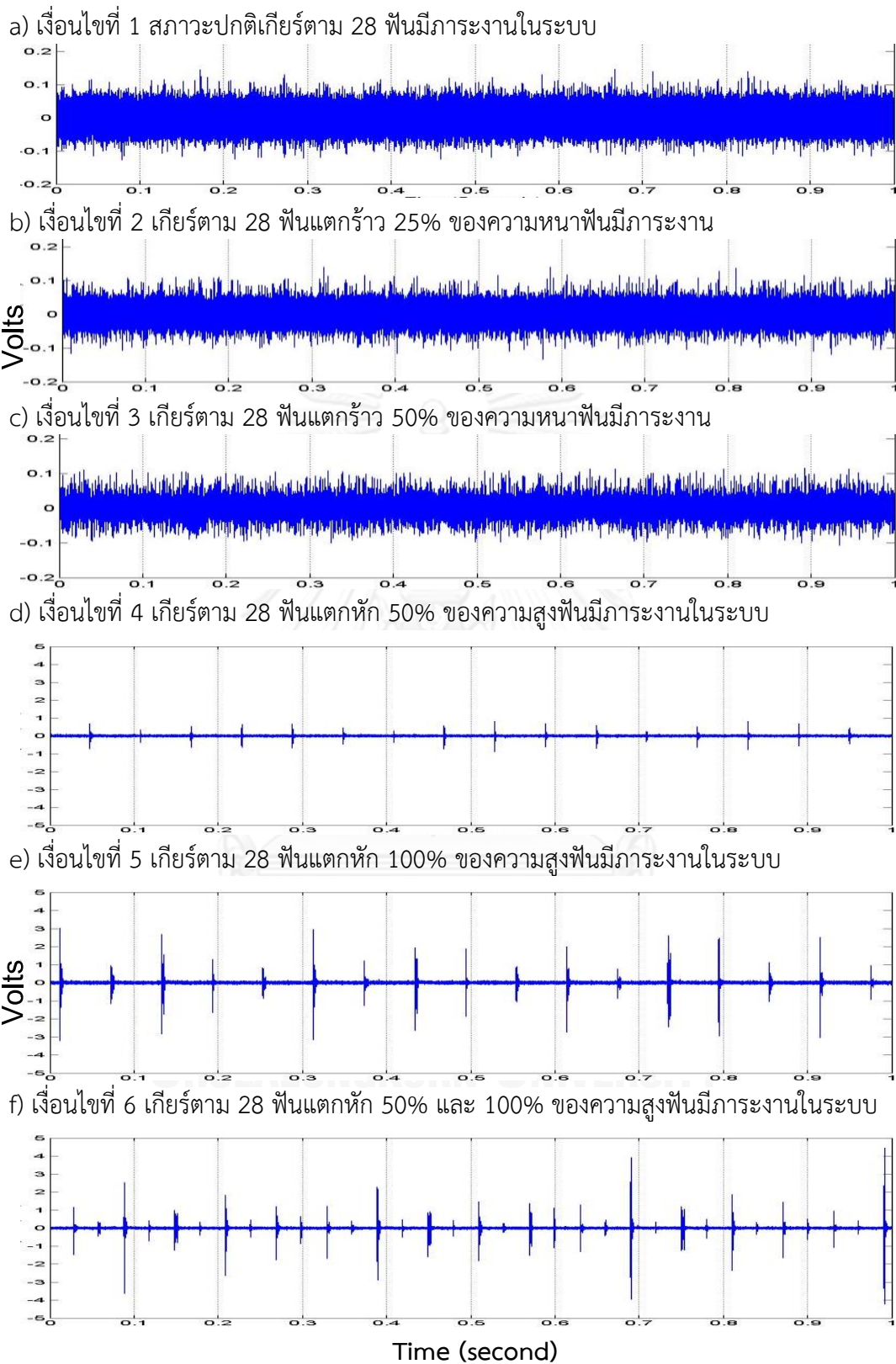


f) เงื่อนไขที่ 6 เกียร์ตาม 28 ฟันแตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟันไม่มีภาระงานในระบบ



Time (second)

ภาพที่ 4-3 สัญญาณอะคูสติคบนโดเมนเวลาของเกียร์ตรง 28 ฟันที่ไม่มีภาระงานในระบบ



ภาพที่ 4-4 สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลาของเกือตรง 28 ฟันที่มีภาระงานในระบบ

วิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคบนโดเมนเวลาของเครื่องจักรแต่ละเงื่อนไขการทำงาน มีความซับซ้อนในการใช้ตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักร ผู้ทำการวิเคราะห์ต้องมีความชำนาญจึงระบุความเสียหายได้อย่างถูกต้อง ความเสียหายแบบแตกร้าวและสภาวะปกติจะมีลักษณะสัญญาณคล้ายกัน มีแอมพลิจูดต่างกันตามเงื่อนไขการทำงานและภาระงานในระบบ การระบุความเสียหายของเครื่องจักรบนโดเมนเวลาเป็นไปได้ยาก ความเสียหายแบบแตกหักจะมีลักษณะสัญญาณแตกต่างกันทั้ง 3 เงื่อนไข การระบุความเสียหายด้วยวิธีนี้สามารถระบุได้จากแอมพลิจูดของสัญญาณความเสียหายแตกหัก 50% ต่ำกว่าความเสียหายแตกหัก 100% และจำนวนการเกิดสัญญาณแบบ Burst ของเกียร์ 25 และ 28 ฟันเป็นไปตามรอบการหมุนของเกียร์

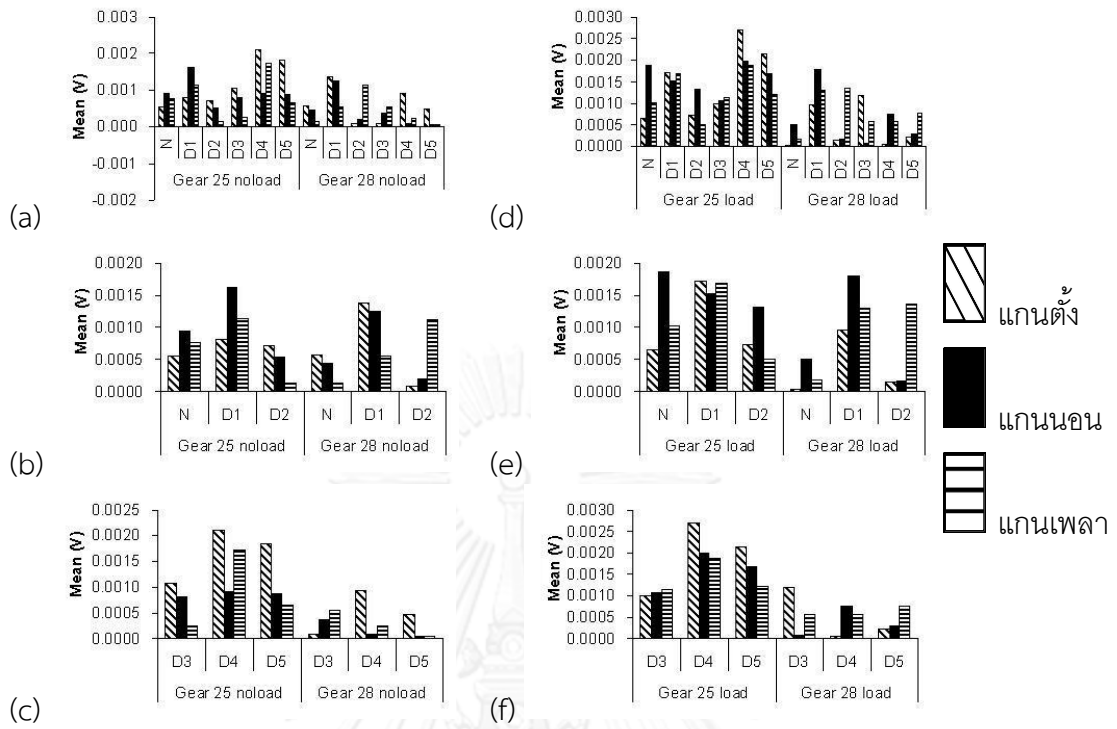
#### 4.3 ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคด้วยพารามิเตอร์

วิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคด้วยพารามิเตอร์เป็นการแปลงสัญญาณอะคูสติคบนโดเมนเวลาแปลงผลด้วยโปรแกรม Matlab จากข้อมูลสัญญาณอะคูสติคของระบบเกียร์ตาม 25 และ 28 ฟัน ที่ไม่มีภาระงานและมีภาระงาน ของระบบเกียร์ทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 มาคำนวณพารามิเตอร์สัญญาณอะคูสติคด้วยค่าพลังงานของสัญญาณ ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าเฉลี่ย ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าตัวประกอบยอดคลื่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความโด่ง คำนวณจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.9) ใช้ 40 ชุดข้อมูล ดังภาพที่ 4-5 ถึง 4-11 ในการติดหัววัดสัญญาณ 3 แกนที่ฐานตลับลูกปืนเพลลาขับคือ แกนตั้ง, แกนนอน และแกนเพลลา แสดงผลแบบแผนภูมิแท่งทุกสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ ให้แกนตั้งคือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์นั้น และแกนนอนคือเงื่อนไขสภาวะการทำงานใช้สัญลักษณ์คือ Nเป็นสภาวะการทำงานปกติ D1เป็นเกียร์แตกร้าว 25% ของความหนาฟันเกียร์ D2 เป็นเกียร์แตกร้าว 50% ของความหนาฟันเกียร์ D3เป็นเกียร์แตกหัก 50% ของความสูงฟันเกียร์ D4 เป็นเกียร์แตกหัก 100% ของความสูงฟันเกียร์ D5เป็นเกียร์แตกหัก 50%และ100% ของความสูงฟันเกียร์ตำแหน่งตรงกันข้ามกัน แบ่งเป็นส่วนของเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของพารามิเตอร์เพื่อระบุลักษณะของสัญญาณอะคูสติคที่เกิดขึ้น

ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติค ไม่มีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-5(a) ถึง 4-5(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-5(d) ถึง 4-5(f) ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไม่มีผลกับความเสียหายของเกียร์ แต่มีผลกับแรงกระทำในระบบเกียร์ทำให้ค่าเฉลี่ยสูงขึ้น

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณอะคูสติค ไม่มีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-6(a) ถึง 4-6(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-6(d) ถึง 4-6(f) ค่าความแปรปรวนของสัญญาณจะมีค่าสูงสุดที่เกียร์แตกหัก 100% รองมาที่แตกหัก 50%และ100%ในเกียร์เดียว ที่สภาวะอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน ระบบเกียร์ที่มีแรงกระทำมีค่าแปรปรวนสูงขึ้น

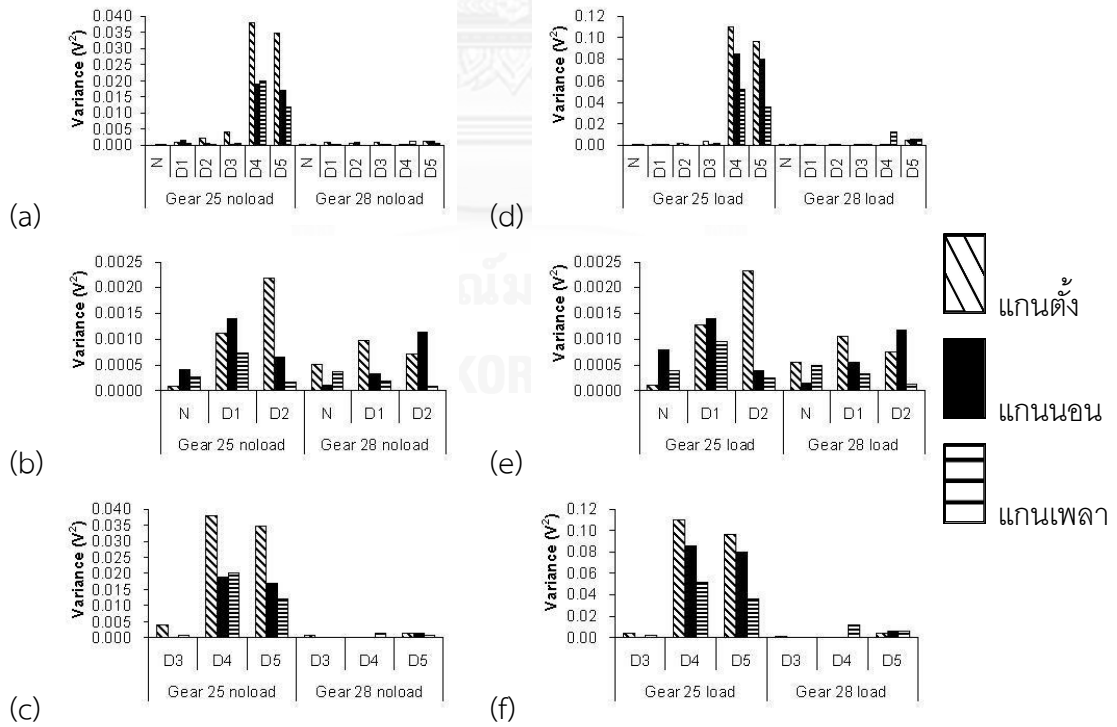
ค่าความโด่งของสัญญาณอะคูสติค ไม่มีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-7(a) ถึง 4-7(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-7(d) ถึง 4-7(f) ค่าความโด่งของสัญญาณจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มสภาวะปกติกับเกียร์แตกร้าวค่าความโด่งใกล้เคียงกัน และกลุ่มเกียร์แตกหักค่าความโด่งเป็นไปตามความเสียหาย ตำแหน่งแกนเพลลาที่มีความชัดเจนสุด ระบบเกียร์ที่มีแรงกระทำมีค่าความโด่งสูงขึ้น



ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

มีภาระงานในระบบเกียร์

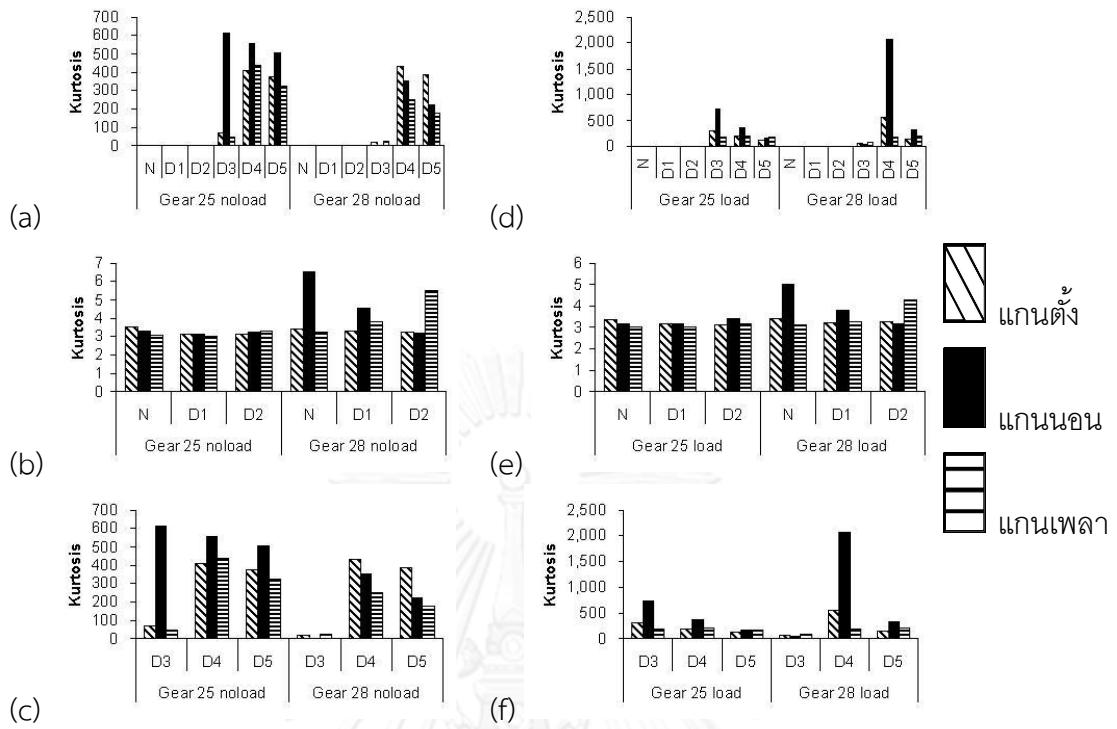
ภาพที่ 4-5 แผนภูมิแท่งค่าเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติก



ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

มีภาระงานในระบบเกียร์

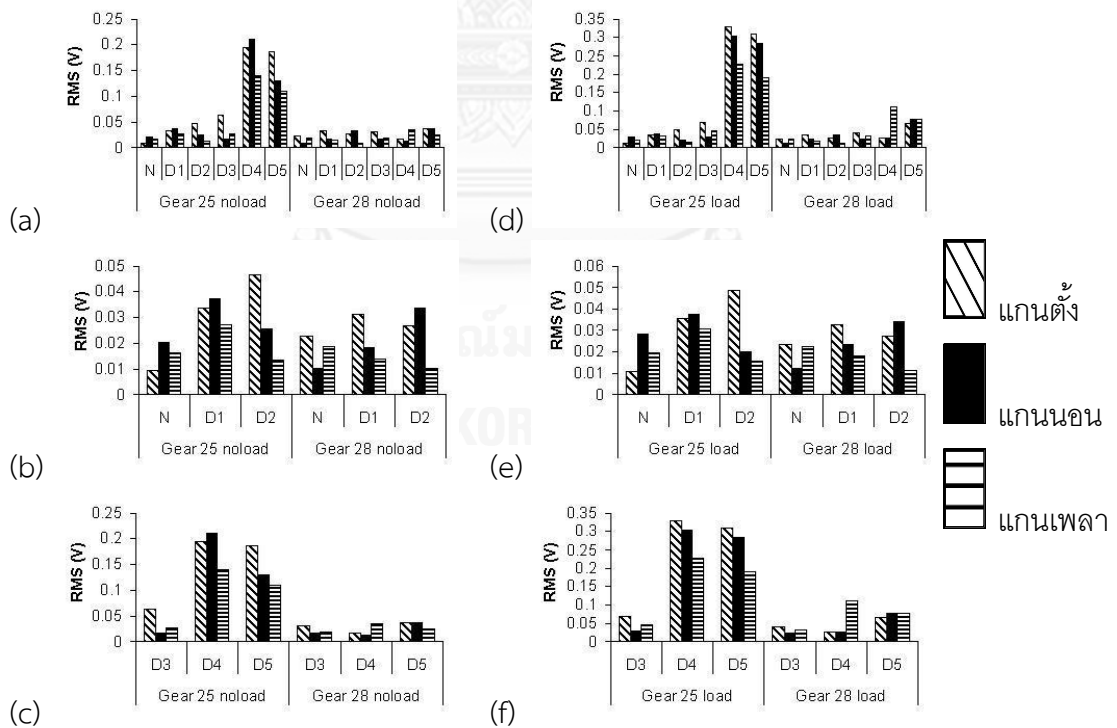
ภาพที่ 4-6 แผนภูมิแท่งค่าความแปรปรวนของสัญญาณอะคูสติก



ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

มีภาระงานในระบบเกียร์

ภาพที่ 4-7 แผนภูมิแท่งค่าความโค้งของสัญญาณอะคูสติก

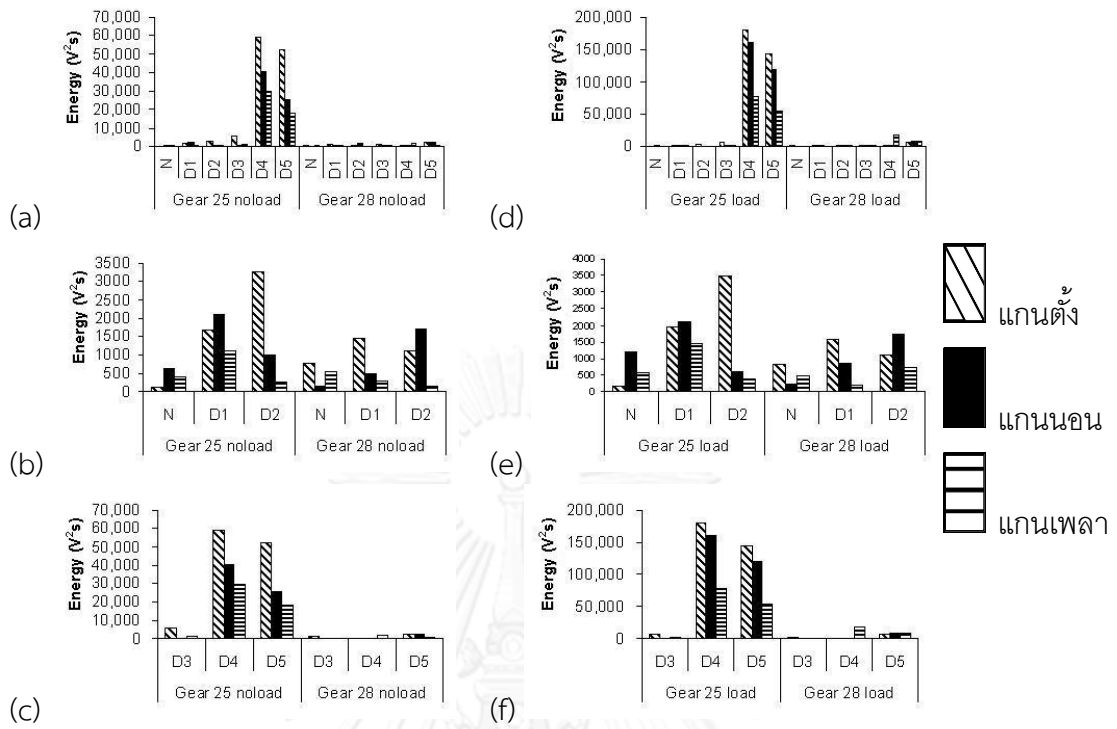


ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

มีภาระงานในระบบเกียร์

ภาพที่ 4-8 แผนภูมิแท่งค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติก

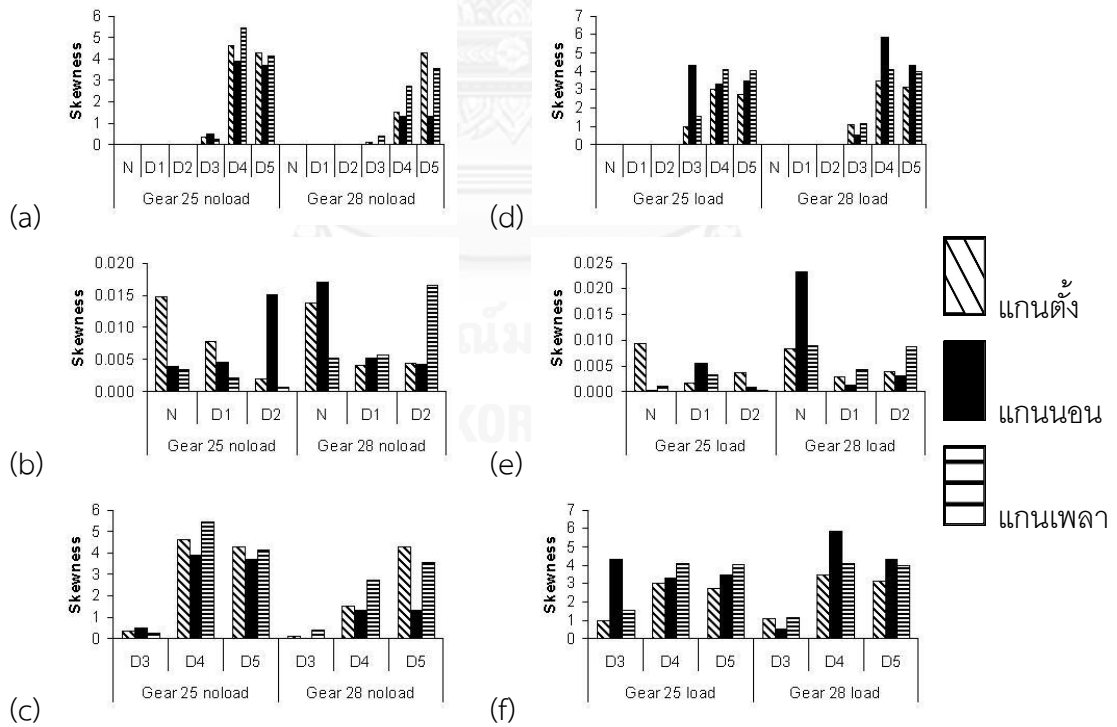




ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

มีภาระงานในระบบเกียร์

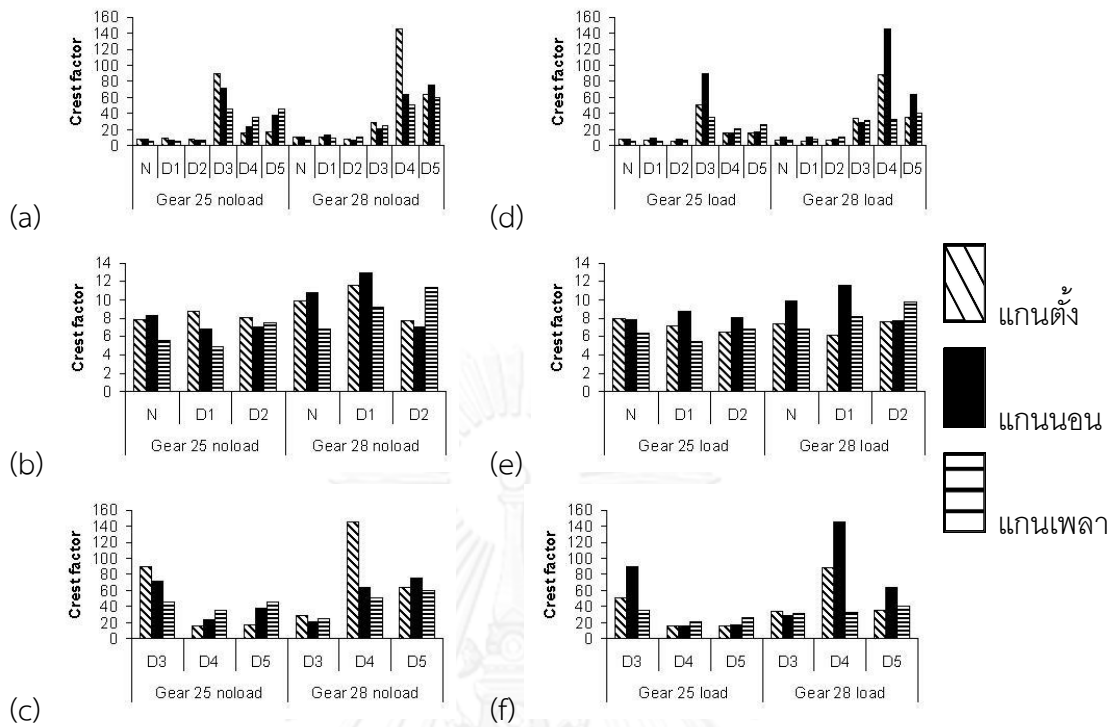
ภาพที่ 4-9 แผนภูมิแท่งค่าพลังงานของสัญญาณอะคูสติก



ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

มีภาระงานในระบบเกียร์

ภาพที่ 4-10 แผนภูมิแท่งค่าความเบ้ของสัญญาณอะคูสติก



#### ไม่มีภาระงานในระบบเกียร์

ภาพที่ 4-11 แผนภูมิแท่งค่าตัวประกอบยอดคลื่นของสัญญาณอะคูสติก

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติก ไม่มีภาระงานในระบบ ดังภาพที่ 4-8(a) ถึง 4-8(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-8(d) ถึง 4-8(f) ผลการคำนวณแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มภาวะปกติกับเกียร์แตกร้าว และกลุ่มเกียร์แตกหัก ตำแหน่งแกนเพลามีความชัดเจนสุด เหมือนค่าความโด่ง เมื่อระบบเกียร์ที่มีแรงกระทำค่ารากกำลังสองเฉลี่ยสูงขึ้น

ค่าพลังงานของสัญญาณอะคูสติก ไม่มีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-9(a) ถึง 4-9(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-9(d) ถึง 4-9(f) ค่าพลังงานของสัญญาณจะมีค่าสูงสุดที่เกียร์แตกหัก 100% รองมาที่แตกหัก 50% และ 100% ในเกียร์เดียว ที่สภาวะอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน ระบบเกียร์ที่มีแรงกระทำมีค่าพลังงานสูงขึ้น ลักษณะสัญญาณคล้ายค่าความแปรปรวน

ค่าความเบ้ของสัญญาณอะคูสติก ไม่มีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-10(a) ถึง 4-10(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-10(d) ถึง 4-10(f) ค่าความเบ้ของสัญญาณแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มภาวะปกติกับเกียร์แตกร้าว และกลุ่มเกียร์แตกหัก อย่างชัดเจนเหมือนค่าความโด่ง

ค่าตัวประกอบยอดคลื่นของสัญญาณอะคูสติก ไม่มีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-11(a) ถึง 4-11(c) และมีภาระงานในระบบดังภาพที่ 4-11(d) ถึง 4-11(f) ค่าความเบ้ของสัญญาณแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มภาวะปกติกับเกียร์แตกร้าว และกลุ่มเกียร์แตกหัก แต่ไม่ชัดเจนเหมือนค่าความโด่ง

วิธีวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ สามารถตรวจสอบความเสียหายของระบบเกียร์ได้แต่ไม่ชัดเจน การคำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าตัวประกอบยอดคลื่น ค่าความเบ้ ค่าพลังงานและค่าความโด่งมีความสัมพันธ์กับความเสียหาย แต่การวิเคราะห์ด้วย 1 พารามิเตอร์ไม่สามารถระบุความเสียหายได้ทุกเงื่อนไข

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์

วิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ของ 2 พารามิเตอร์ แปลงสัญญาณด้วยโปรแกรม Matlab ในการสร้างขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์ เพื่อระบุความเสียหายของเกียร์ ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์งานวิจัยนี้เลือกใช้สัญญาณจากแกนเพลาส่งสร้างขอบเขตเพราะค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์แต่ละสภาวะการทำงานของเกียร์มากกว่าแกนนอนและแกนตั้ง การวิเคราะห์สัญญาณระหว่างค่าความโด่ง ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าความเบ้ ค่าตัวประกอบยอดคลื่นและค่าพลังงาน พร้อมกัน 2 พารามิเตอร์ ใช้ 40 ชุดข้อมูลในการสร้างเส้นขอบเขต กำหนดให้รัศมีกว้างสองเท่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและจุดศูนย์กลางคือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์

ผลการวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟันทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 แสดงผลให้แกนนอนคือค่าความโด่งและแกนตั้งคือค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ไม่มีภาระงาน แสดงผลดังภาพที่ 4-12 ผลขอบเขตสภาวะการทำงานของเครื่องจักรแบ่งเป็น 6 ขอบเขตอย่างชัดเจน มีสองกลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1 สภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-13(a) ดังนี้

ขอบเขตที่ 1 สภาวะการทำงานปกติ (Normal)

ขอบเขตที่ 2 เกียร์แตกร้าว 25% ของความหนาฟันเกียร์ (Crack 25)

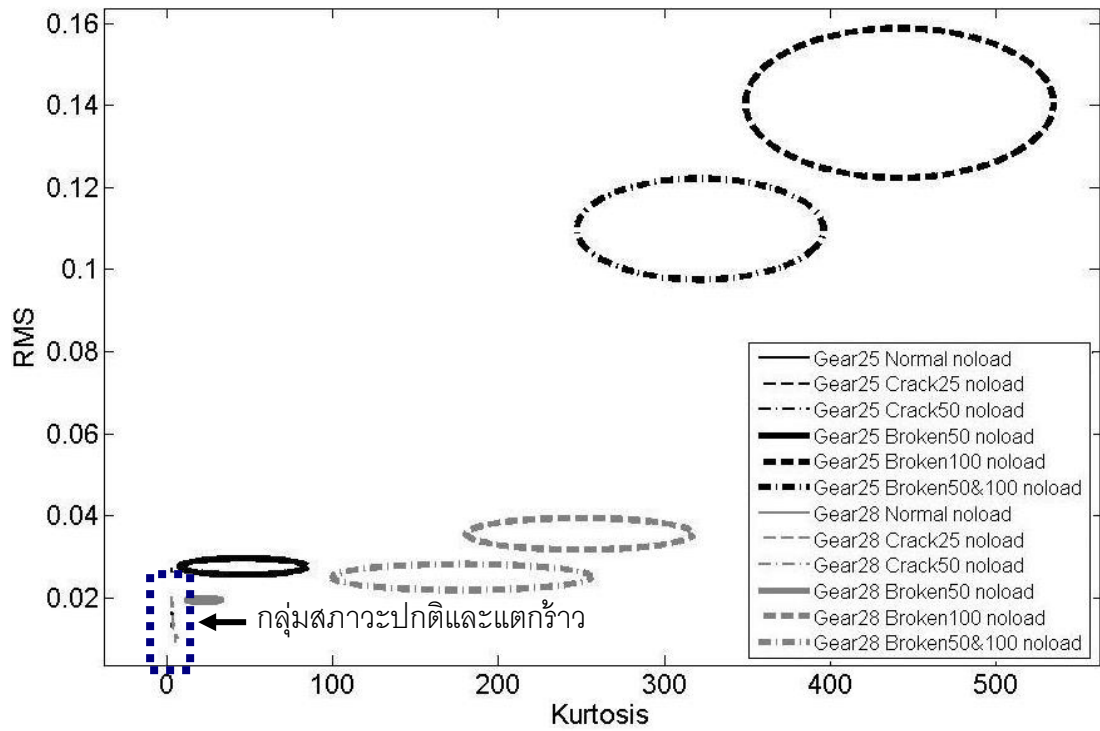
ขอบเขตที่ 3 เกียร์แตกร้าว 50% ของความหนาฟันเกียร์ (Crack 50)

กลุ่มที่ 2 ความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-13(b) ดังนี้

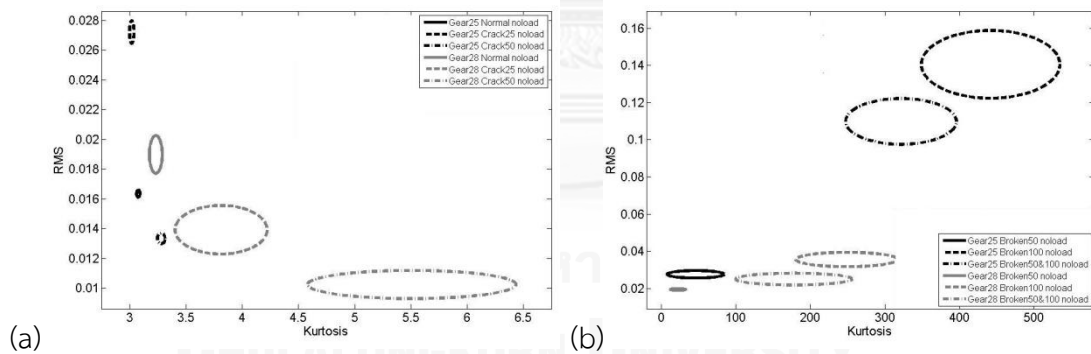
ขอบเขตที่ 4 เกียร์แตกหัก 50% ของความสูงฟันเกียร์ (Broken 50)

ขอบเขตที่ 5 เกียร์แตกหัก 100% ของความสูงฟันเกียร์ (Broken 100)

ขอบเขตที่ 6 เกียร์แตกหัก 50% และ 100% ของความสูงฟันเกียร์ตำแหน่งตรงข้าม (Broken 50 & 100)

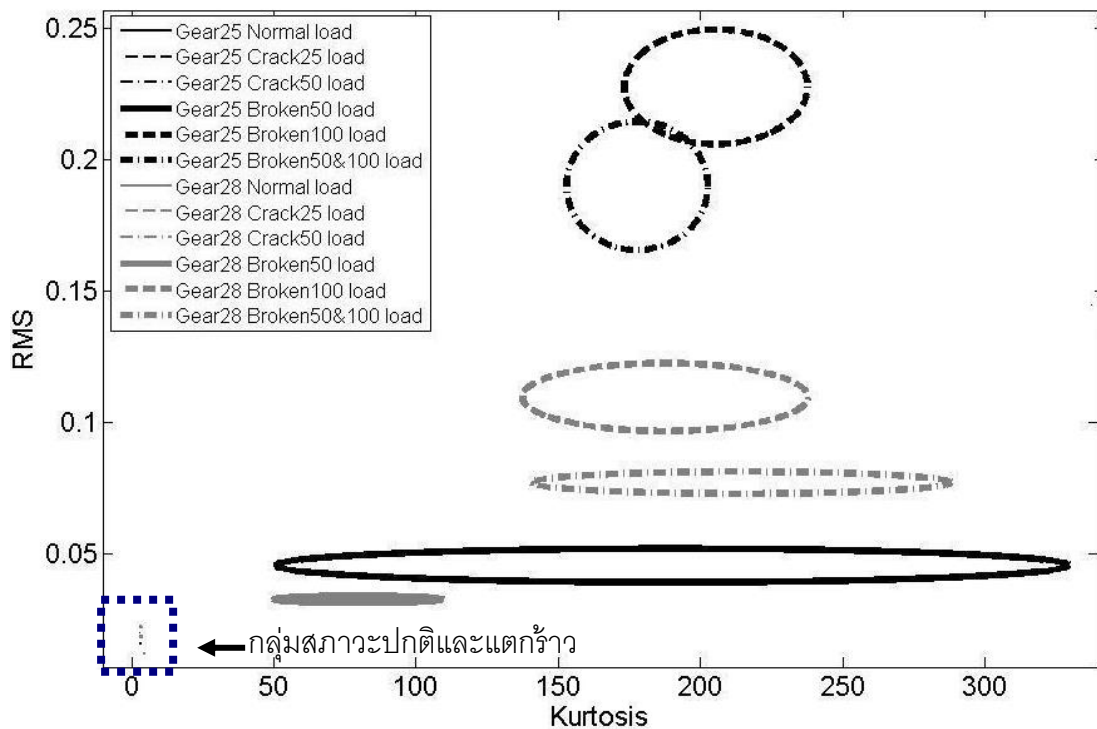


ภาพที่ 4-12 ขอบเขตค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบทุกเงื่อนไข

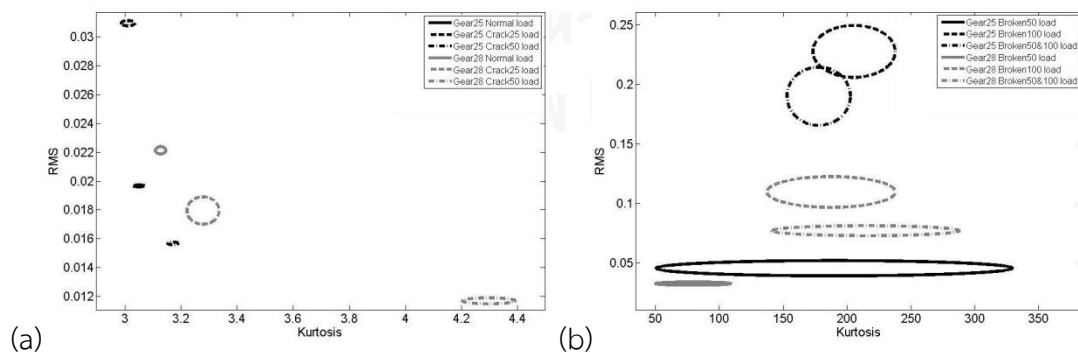


ภาพที่ 4-13 ขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

ระบบเกียร์มีภาระงาน แสดงผลดังภาพที่ 4-14 ขอบเขตสภาวะการทำงานของเครื่องจักร แบ่งเป็น 6 ขอบเขตอย่างชัดเจนเหมือนไม่มีภาระงาน มีสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าวดังภาพที่ 4-15(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-15(b) มีขอบเขตร่วมกันเล็กน้อยที่เกียร์ 25 ฟันเกียร์แตกหัก 100% กับเกียร์ 25 ฟันแตกหัก 50% และ 100% ในเกียร์เดียวกัน

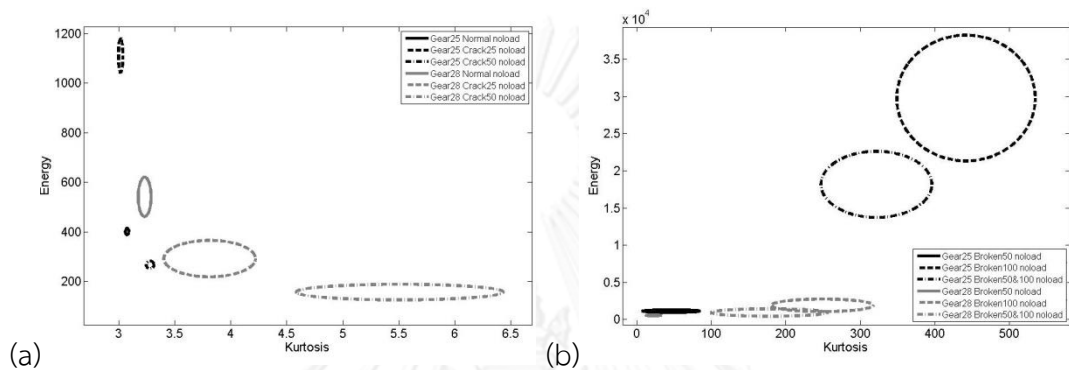


ภาพที่ 4-14 ขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบทุกเงื่อนไข

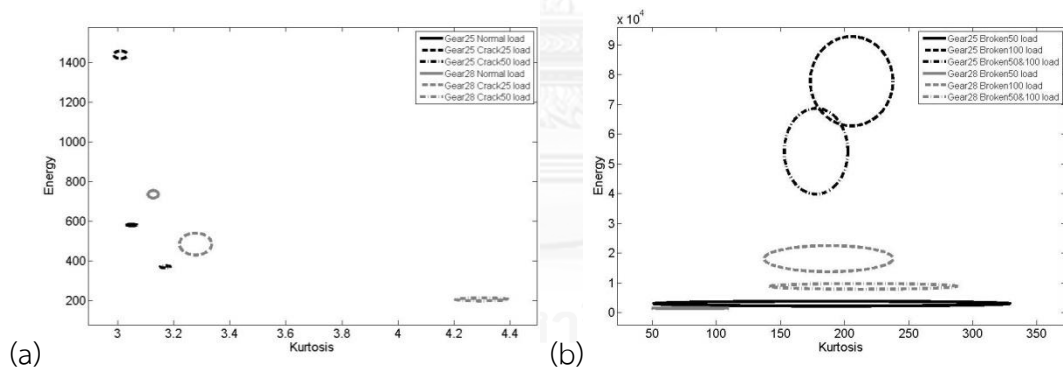


ภาพที่ 4-15 ขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าวดังภาพที่ 4-15(a) (b) สภาวะแตกหัก

ผลการวิเคราะห์ขอบเขตสถานะการทำงานของระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน แสดงผลให้แกนนอนคือค่าความโด่งและแกนตั้งคือค่าพลังงาน ระบบเกียร์ไม่มีภาระงานมีสองกลุ่มเหมือนคารากำลังสอง คือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-16(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-16 (b) ระบบเกียร์มีภาระงานมีสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-17(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหักดังภาพที่ 4-17(b) มีขอบเขตร่วมกันที่เกียร์ 25 ฟันเกียร์แตกหัก 100% กับเกียร์ 25 ฟันแตกหัก 50% และ 100% ในเกียร์เดียวกัน

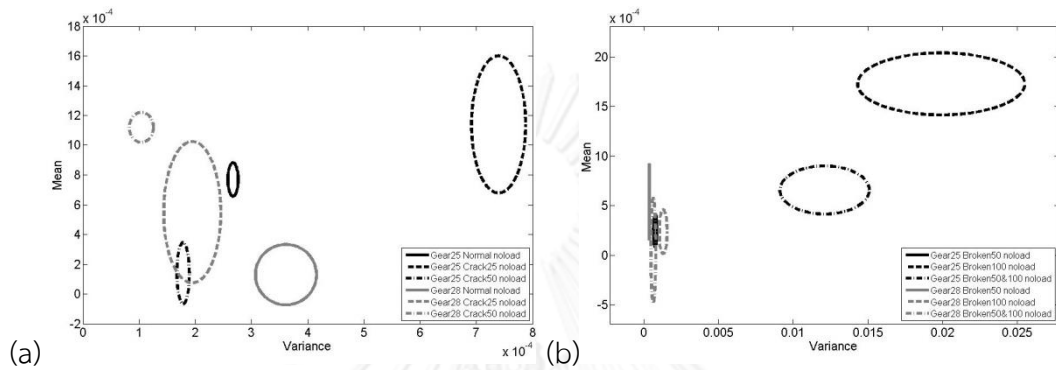


ภาพที่ 4-16 ขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

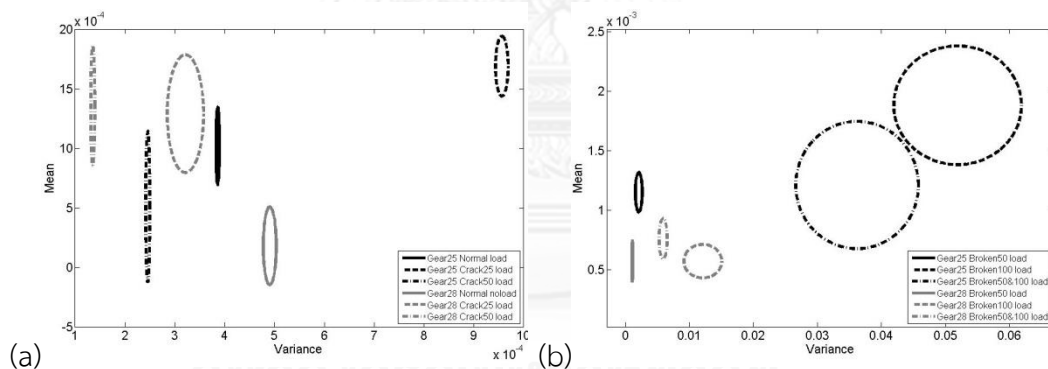


ภาพที่ 4-17 ขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

ผลการวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน แสดงผลให้แกนนอนคือค่าความแปรปรวนและแกนตั้งคือค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ไม่มีภาระงานมีสองกลุ่มเหมือนค่ารากกำลังสอง คือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-18(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-18(b) มีขอบเขตซ้อนทับกันที่เกียร์ 25 และ 28 ฟัน ระบบเกียร์มีภาระงานมีสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-19(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-19(b) ไม่มีขอบเขตทับซ้อนกัน

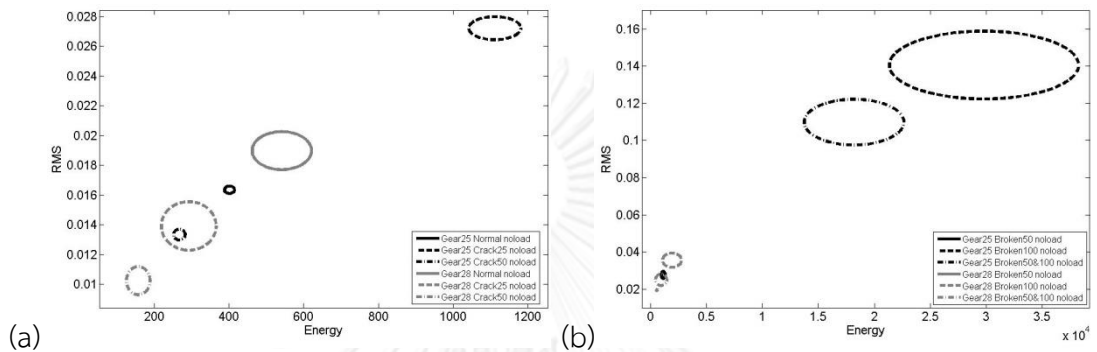


ภาพที่ 4-18 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

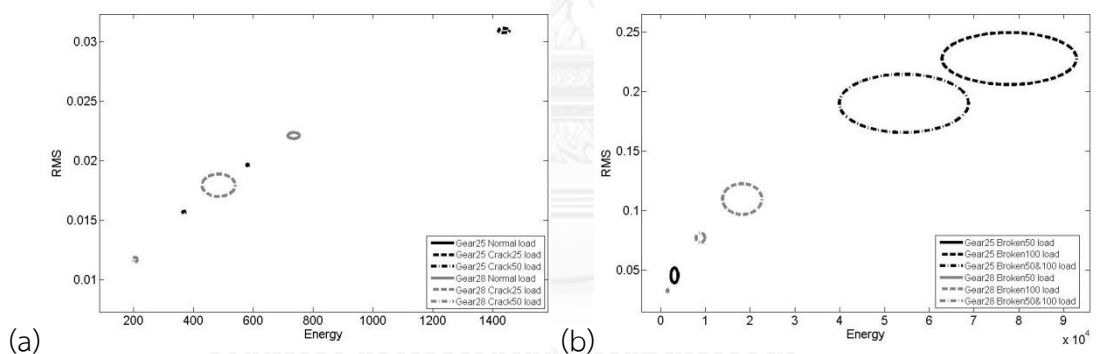


ภาพที่ 4-19 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

ผลการวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน แสดงผลให้แกนนอนคือค่าพลังงานและแกนตั้งคือค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ไม่มีภาระงานมีสองกลุ่มเหมือนค่ารกกกำลังสอง คือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-20(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-20(b) ระบบเกียร์มีภาระงานมีสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-21(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-21(b)



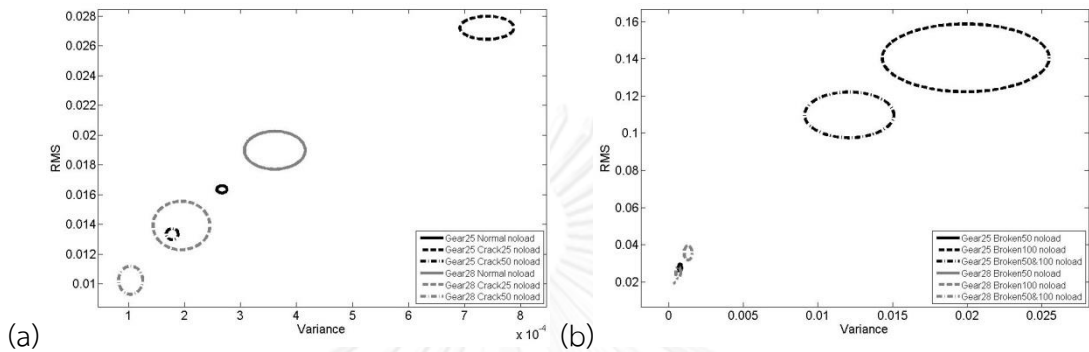
ภาพที่ 4-20 ขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



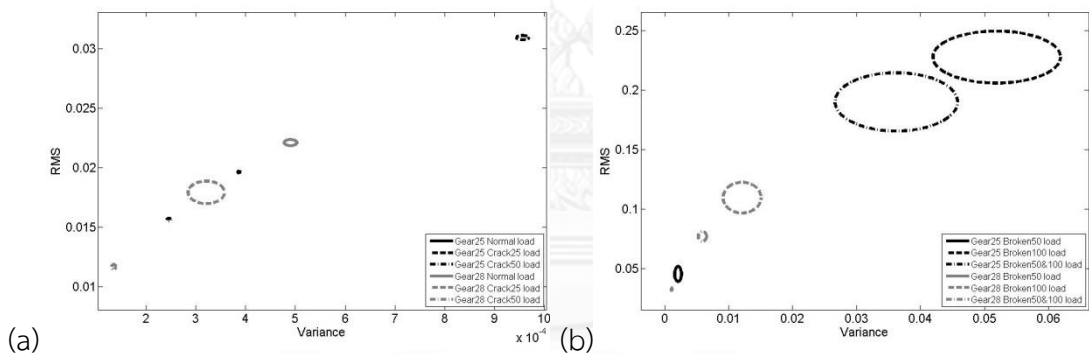
ภาพที่ 4-21 ขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารกกกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ผลการวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน แสดงผลให้แกนนอนคือค่าความแปรปรวนและแกนตั้งคือค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ไม่มีภาระงานมีสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-22(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-22(b) ระบบเกียร์มีภาระงานมีสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งสภาวะปกติและความเสียหายแบบแตกร้าว ดังภาพที่ 4-23(a) กลุ่มที่สองความเสียหายแบบแตกหัก ดังภาพที่ 4-23(b)



ภาพที่ 4-22 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-23 ขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

ผลการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกใช้ความสัมพันธ์ของ 2 พารามิเตอร์ระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสอง และค่าความโด่งกับค่าพลังงาน สามารถระบุสภาวะการทำงานของเกียร์ได้ชัดเจน สร้างขอบเขตจาก 40 ชุดข้อมูลที่มีความน่าจะเป็น 95% กระจายตัวของสัญญาณอะคูสติกตามหลักการกระจายแบบเกาส์เซียน

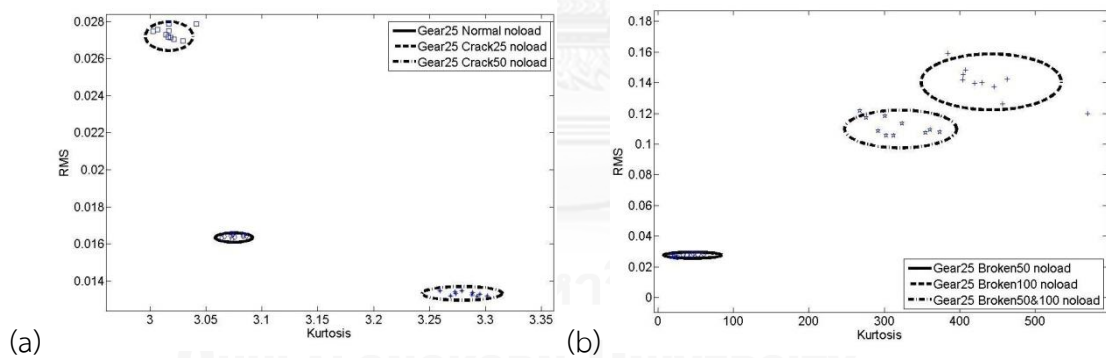
#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์

วิธีวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะการทำงานของระบบเกียร์ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์ ความถูกต้องของขอบเขตคือชุดข้อมูลทดสอบต้องอยู่ในขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์เดียวกัน

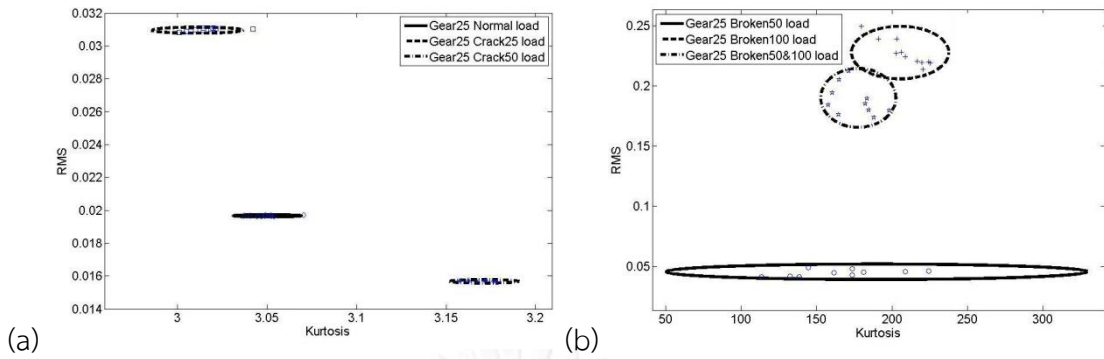
ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟันทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 ระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย แสดงผลดังภาพที่ 4-24 และ 4-25 และระบบเกียร์ 28 ฟัน แสดงผลดังภาพที่ 4-26 และ 4-27 ทุกเงื่อนไขใช้ 10 ชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบความถูกต้องดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

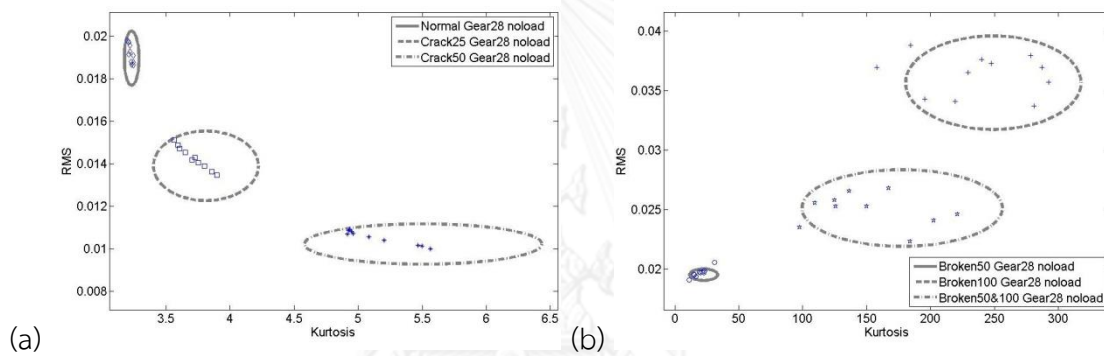
สภาวะของเกียร์	เกียร์ 25 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 25 ฟัน มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน มีภาระงาน
เกียร์ปกติ	10	9	10	10
เกียร์แตกร้าว 25%	9	9	10	10
เกียร์แตกร้าว 50%	10	10	10	10
เกียร์แตกหัก 50%	10	10	8	9
เกียร์แตกหัก 100%	8	9	8	7
เกียร์แตกหัก 50และ100%	9	10	9	10



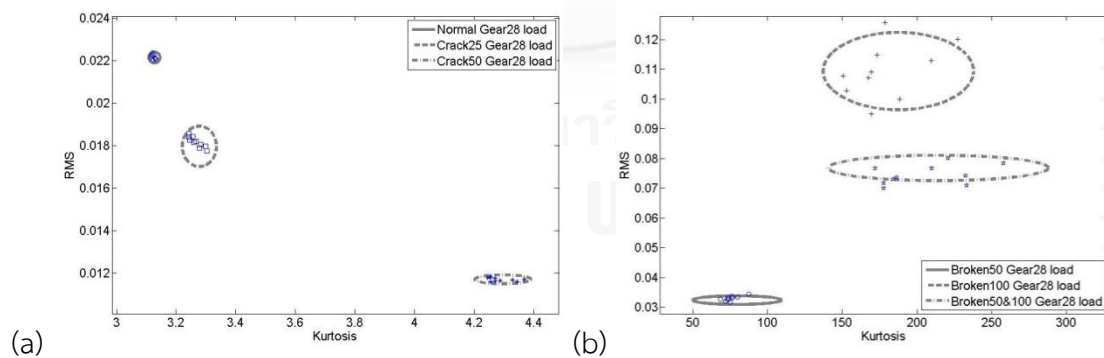
ภาพที่ 4-24 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-25 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-26 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

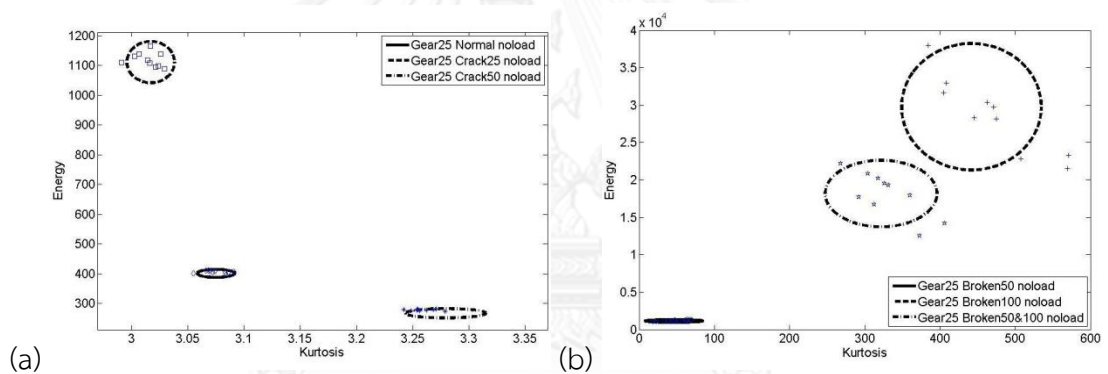


ภาพที่ 4-27 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

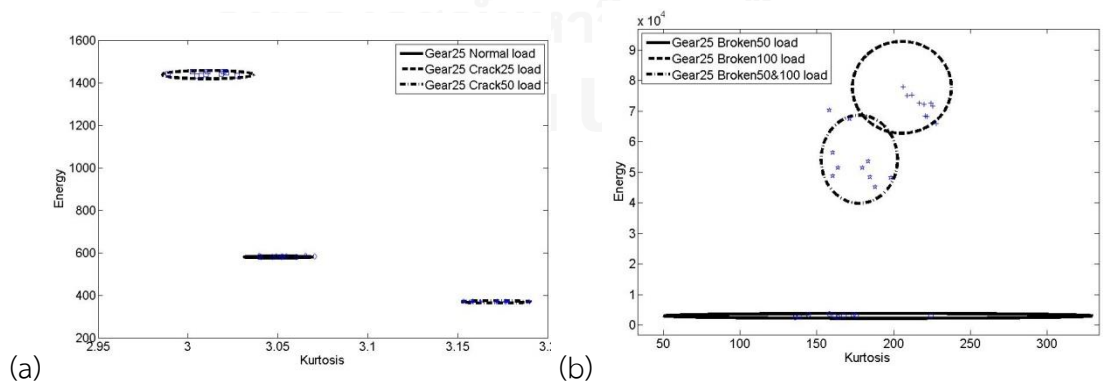
ผลการทดสอบขอบเขตระหว่างระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟัน ทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 113 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 94.2% ระบบเกียร์ 28 ฟันทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 111 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 92.5%

ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟันทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 ระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน แสดงผลดังภาพที่ 4-28 และ 4-29 และระบบเกียร์ 28 ฟันแสดงผลดังภาพที่ 4-30 และ 4-31 ทุกเงื่อนไขใช้ 10 ชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบความถูกต้องดังตารางที่ 4-2 ตารางที่ 4-2 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน

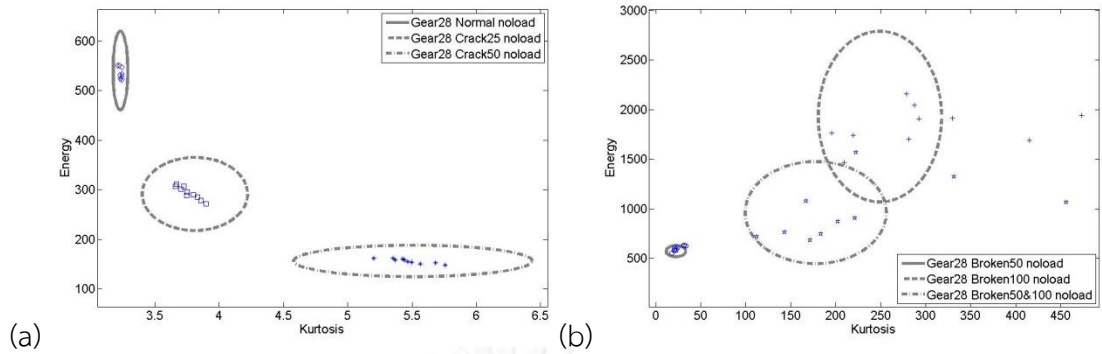
สภาวะของเกียร์	เกียร์ 25 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 25 ฟัน มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน มีภาระงาน
เกียร์ปกติ	8	8	10	10
เกียร์แตกร้าว 25%	9	10	10	10
เกียร์แตกร้าว 50%	7	10	10	10
เกียร์แตกหัก 50%	9	10	7	8
เกียร์แตกหัก 100%	6	9	7	8
เกียร์แตกหัก 50และ100%	7	9	7	2



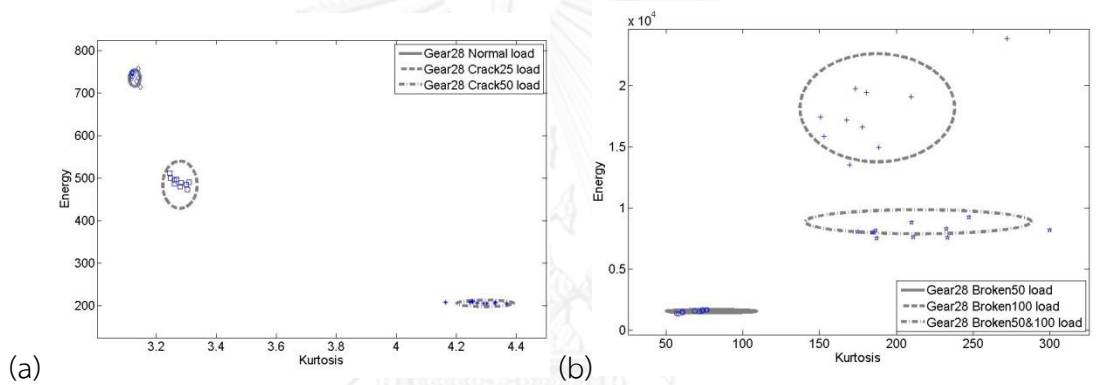
ภาพที่ 4-28 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-29 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-30 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 28 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

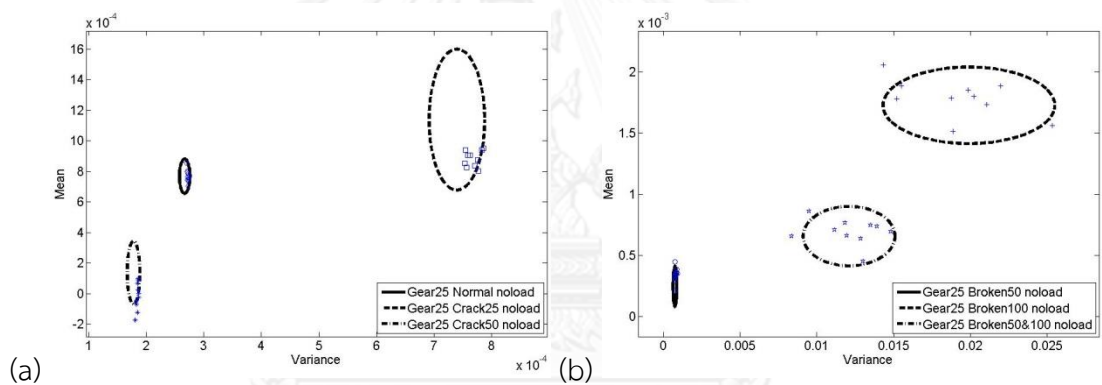


ภาพที่ 4-31 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ระบบเกียร์ 28 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

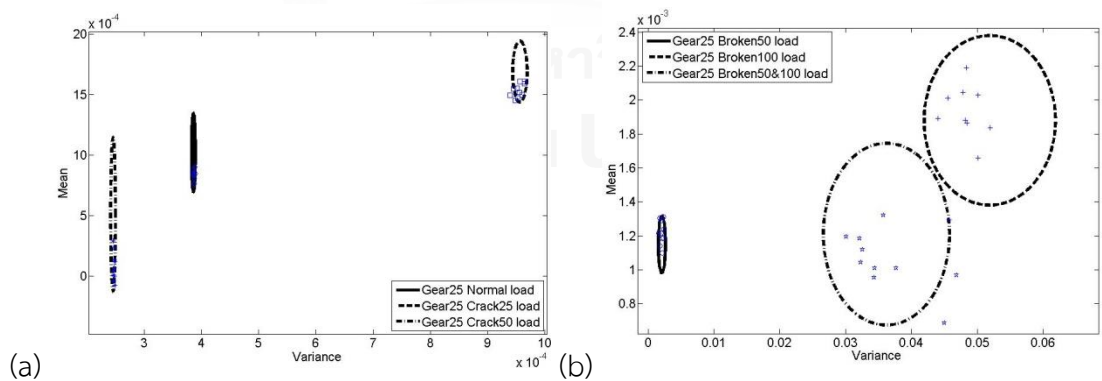
ผลการทดสอบขอบเขตระหว่างระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงาน ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟัน ทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 102 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 85% ระบบเกียร์ 28 ฟันทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 99 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 82.5%

ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟันทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 ระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย แสดงผลดังภาพที่ 4-32 และ 4-33 และระบบเกียร์ 28 ฟันแสดงผลดังภาพที่ 4-34 และ 4-35 ทุกเงื่อนไขใช้ 10 ชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบความถูกต้องดังตารางที่ 4-3 ตารางที่ 4-3 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย

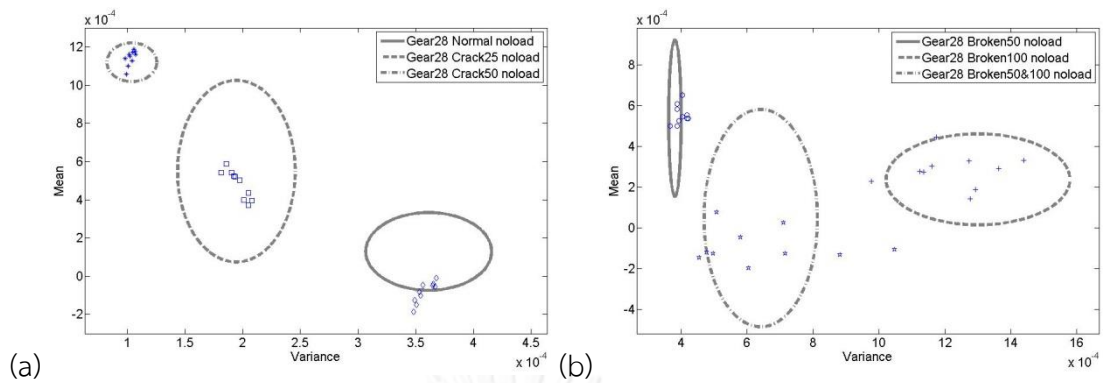
สภาวะของเกียร์	เกียร์ 25 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 25 ฟัน มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน มีภาระงาน
เกียร์ปกติ	10	9	5	8
เกียร์แตกร้าว 25%	8	7	10	10
เกียร์แตกร้าว 50%	6	9	10	10
เกียร์แตกหัก 50%	7	9	5	7
เกียร์แตกหัก 100%	8	9	8	6
เกียร์แตกหัก 50และ100%	8	8	7	7



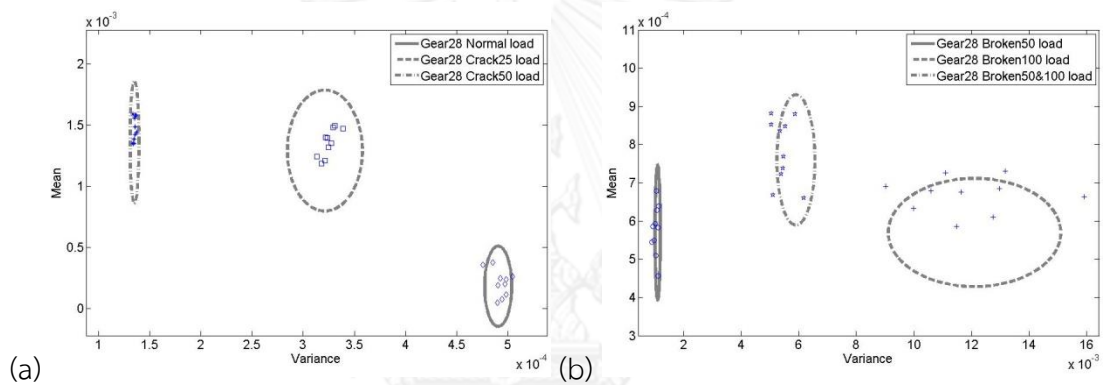
ภาพที่ 4-32 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-33 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-34 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



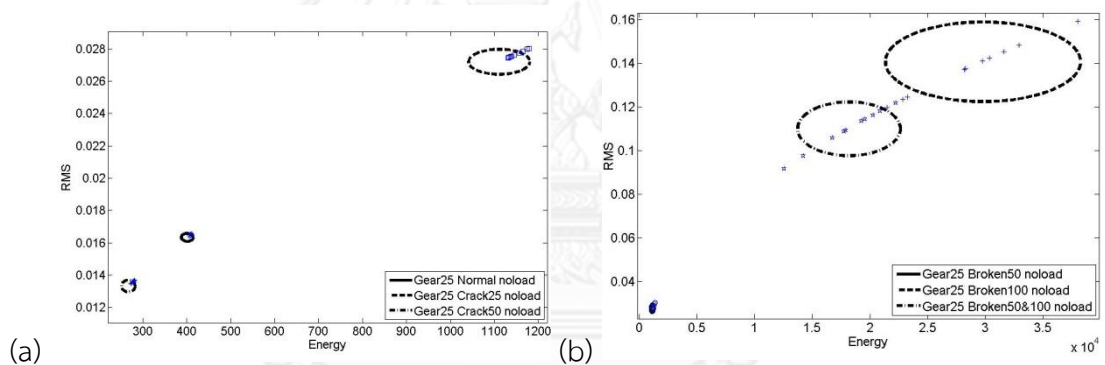
ภาพที่ 4-35 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

ผลการทดสอบขอบเขตระหว่างระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าเฉลี่ย ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟัน ทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 98 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 81.7% ระบบเกียร์ 28 ฟันทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 93 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 77.5%

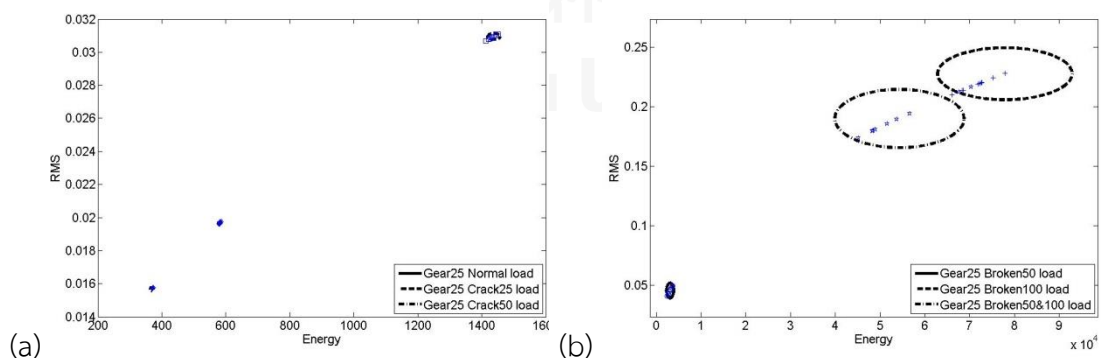
ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟันทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 ระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย แสดงผลดังภาพที่ 4-36 และ 4-37 และระบบเกียร์ 28 ฟัน แสดงผลดังภาพที่ 4-38 และ 4-39 ทุกเงื่อนไขใช้ 10 ชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบความถูกต้องดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

สถานะของเกียร์	เกียร์ 25 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 25 ฟัน มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน มีภาระงาน
เกียร์ปกติ	7	8	10	8
เกียร์แตกร้าว 25%	6	8	10	10
เกียร์แตกร้าว 50%	5	10	10	10
เกียร์แตกหัก 50%	8	10	6	6
เกียร์แตกหัก 100%	6	9	8	9
เกียร์แตกหัก 50และ100%	7	8	6	3

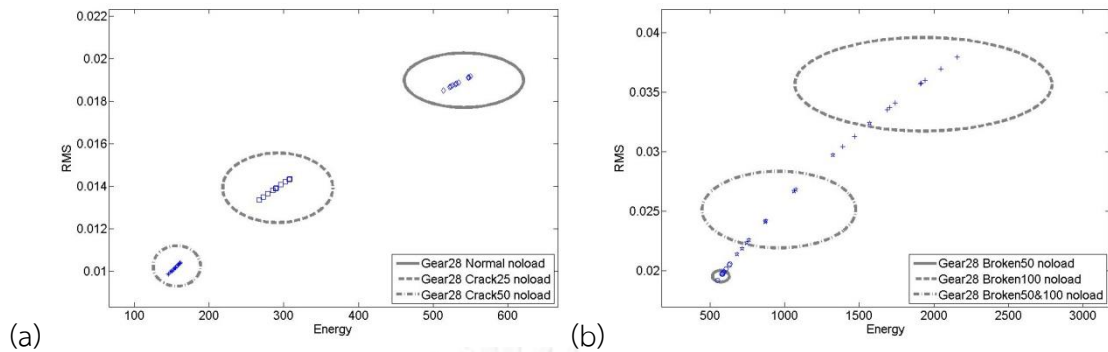


ภาพที่ 4-36 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สถานะปกติและแตกร้าว (b) สถานะแตกหัก

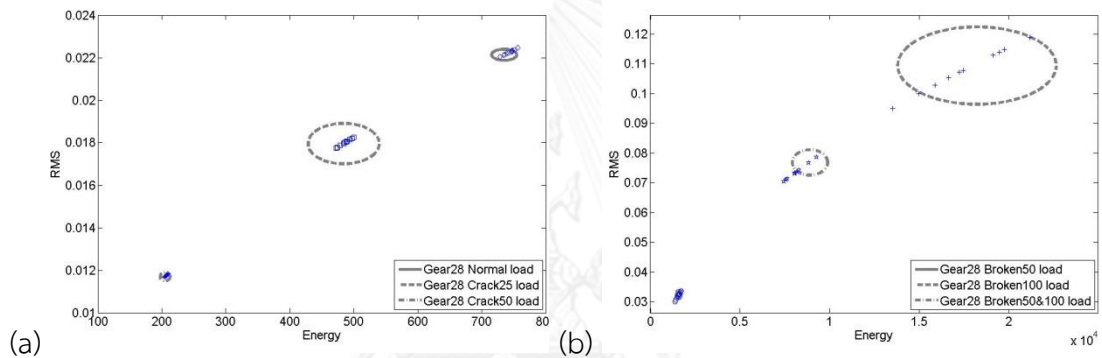


ภาพที่ 4-37 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 25 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สถานะปกติและแตกร้าว (b) สถานะแตกหัก





ภาพที่ 4-38 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก



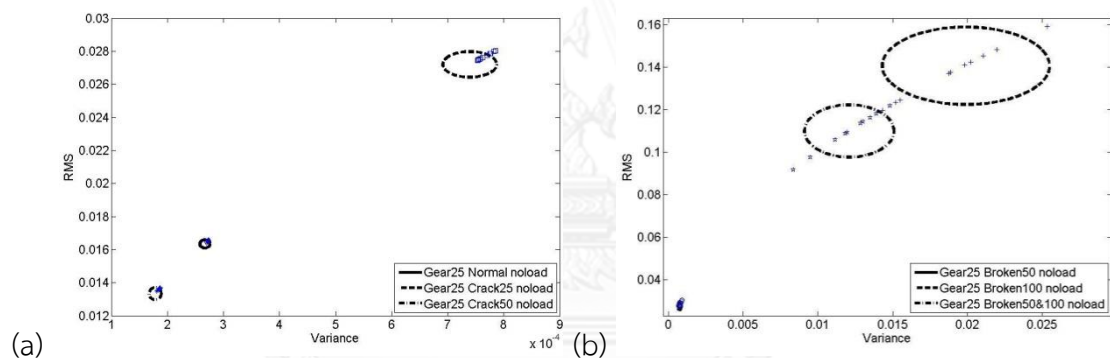
ภาพที่ 4-39 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าพลังงานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ระบบเกียร์ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้าว (b) สภาวะแตกหัก

ผลการทดสอบขอบเขตระหว่างระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงาน ความถูกต้องของระบบ เกียร์ 25 ฟัน ทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 92 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 76.7% ระบบเกียร์ 28 ฟันทุกเงื่อนไข ทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 96 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 80%

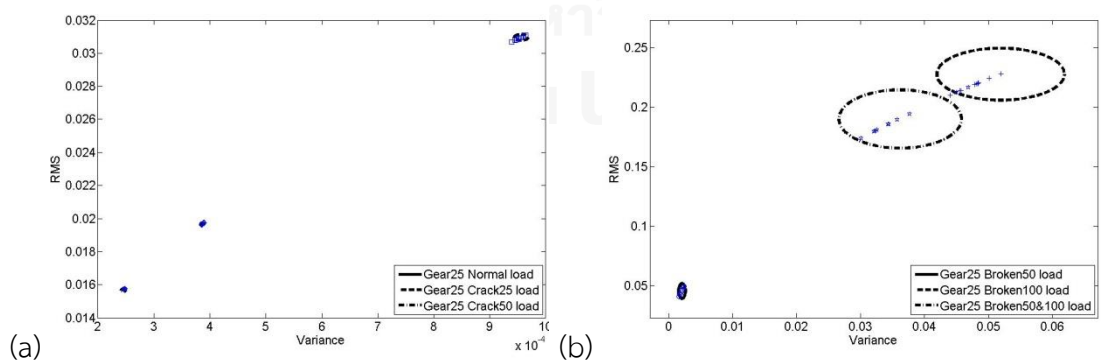
ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟันทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 3-1 ระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย แสดงผลดังภาพที่ 4-40 และ 4-41 และระบบเกียร์ 28 ฟันแสดงผลดังภาพที่ 4-42 และ 4-43 ทุกเงื่อนไขใช้ 10 ชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบความถูกต้องดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 จำนวนข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

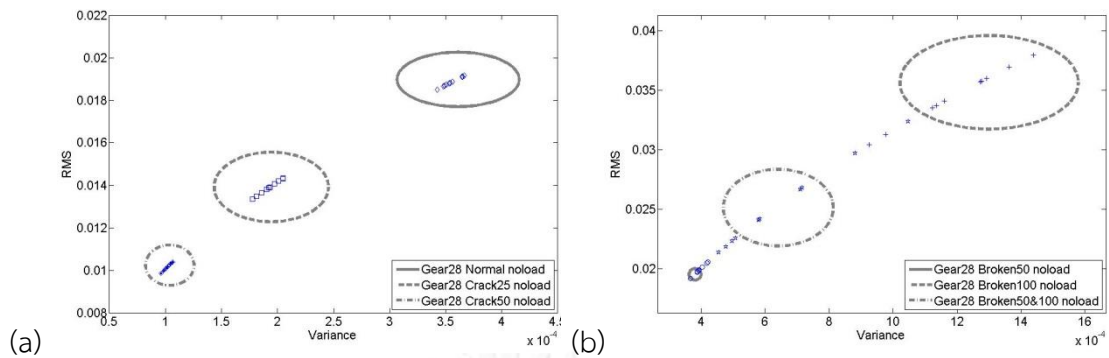
สถานะของเกียร์	เกียร์ 25 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 25 ฟัน มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงาน	เกียร์ 28 ฟัน มีภาระงาน
เกียร์ปกติ	7	8	10	8
เกียร์แตกร้าว 25%	6	8	10	10
เกียร์แตกร้าว 50%	5	9	10	10
เกียร์แตกหัก 50%	8	9	5	7
เกียร์แตกหัก 100%	6	9	8	9
เกียร์แตกหัก 50และ100%	7	8	4	4



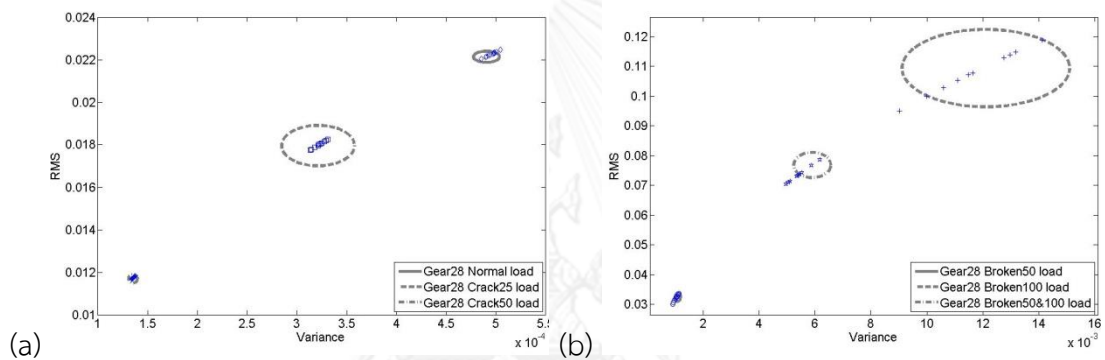
ภาพที่ 4-40 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 ฟัน  
ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สถานะปกติและแตกร้าว (b) สถานะแตกหัก



ภาพที่ 4-41 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับรากกำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 25 ฟัน  
มีภาระงานในระบบ (a) สถานะปกติและแตกร้าว (b) สถานะแตกหัก



ภาพที่ 4-42 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับราคากำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 28 ฟัน ไม่มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้า (b) สภาวะแตกหัก



ภาพที่ 4-43 ทดสอบขอบเขตระหว่างค่าความแปรปรวนกับราคากำลังสองเฉลี่ยระบบเกียร์ 28 ฟัน มีภาระงานในระบบ (a) สภาวะปกติและแตกร้า (b) สภาวะแตกหัก

ผลการทดสอบขอบเขตระหว่างระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าราคากำลังสองเฉลี่ย ความถูกต้องของระบบเกียร์ 25 ฟัน ทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 90 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 75% ระบบเกียร์ 28 ฟัน ทุกเงื่อนไขทั้งหมดใช้สัญญาณ 120 ชุดข้อมูล อยู่ในขอบเขตทั้งหมด 95 ชุดข้อมูล คิดเป็นระบุสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างถูกต้อง 79.2%

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักร ใช้ระบบเกียร์ตรงรถจักรยานยนต์มีภาระงานแบบเบรกแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพลตามขนาด 1 นิวตันเมตร เกียร์ขับ 20 ฟัน และเกียร์ตาม 25 กับ 28 ฟันมี 6 เงื่อนไขคือ 1.สภาวะการทำงานปกติ 2.เกียร์แตกช้า 25% ของความหนาฟันเกียร์ 3.เกียร์แตกช้า 50% ของความหนาฟันเกียร์ 4.เกียร์แตกหัก 50% ของความสูงฟันเกียร์ 5.เกียร์แตกหัก 100% ของความสูงฟันเกียร์ 6.เกียร์แตกหัก 50%และ100% ของความสูงฟันเกียร์ตำแหน่งตรงกันข้ามกันหัววัดสัญญาณอะคูสติกดติดตั้งฐานตั้ลบลูกปืนเพลาชับในแกนตั้ง แกนนอน และแกนเพล

การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติบนโดเมนเวลา สามารถตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้ แต่สภาวะปกติกับเกียร์แตกช้า มีลักษณะสัญญาณคล้ายกันทำให้ไม่สามารถระบุความเสียหายได้ทุกเงื่อนไข การวิเคราะห์พารามิเตอร์สัญญาณอะคูสติด้วยค่าพลังงาน ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าเฉลี่ย ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าตัวประกอบยอดคลื่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความโด่ง จาก 40 ชุดข้อมูลทุกเงื่อนไขทั้ง 3 แกนมีค่าคล้ายกัน โดยค่าพารามิเตอร์จากแกนเพลามีค่าความแตกต่างมากที่สุด ค่าพารามิเตอร์แปรผันตามความเสียหายของเกียร์และภาระงานในระบบ แต่ไม่สามารถใช้หนึ่งพารามิเตอร์ระบุสภาวะการทำงานของเกียร์ได้ถูกต้องทุกเงื่อนไข

การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติ สร้างกำหนดให้รัศมีกว้างสองเท่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและจุดศูนย์กลางคือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ ระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ขอบเขตจะเป็นรูปวงรีสามารถระบุสภาวะการทำงานของเกียร์ได้ทุกกรณีเงื่อนไข ขอบเขตแยกกันอย่างชัดเจนทั้งระบบเกียร์ 25 และ 28 ฟัน ทั้งมีและไม่มีภาระงานระบบ เมื่อทดสอบความถูกต้องของขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองมีความถูกต้องดีที่สุดในระบบเกียร์ 25 ฟันข้อมูลอยู่ในขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์เดียวกันที่ 94.2% ระบบเกียร์ 28 ฟันข้อมูลอยู่ในขอบเขตสภาวะการทำงานของเกียร์เดียวกันที่92.5%

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติหนึ่งเกียร์จะดีกว่าการวิเคราะห์หลายเกียร์ในครั้งเดียวกัน สัญญาณอะคูสติต้องบันทึกเมื่อระบบเกียร์อยู่ในภาวะคงตัวของการทำงาน เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าคงที่

การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกระหว่างความสัมพันธ์ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิตินำไปใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรคือ สร้างขอบเขตระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยที่สภาวะการทำงานปกติ เมื่อสัญญาณที่ตรวจสอบออกนอกขอบเขตแสดงว่าระบบเริ่มเกิดความเสียหายขึ้น

## รายการอ้างอิง

1. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ, การตรวจสอบด้วยคลื่นอะคูสติก. วารสารเทคนิค, 2537(115): p. 7.
2. Kishinouye F, *An Experiment on the Progression of Fracture*. Journal of the Acoustic Emission, 1990. 9(3): p. 4.
3. Williams R.V., *Acoustic emission Hilger*. 1980, Bristol.
4. ชาโตะ ฟุอิจิ, การทดสอบแบบไม่ทำลาย. 2543: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
5. Ronnie K., Miller Eric v.K.Hill, and Patric O. Moore, *Acoustic emission testing Third Edition*. Vol. 6. 2005: American Society for Nondestructive testing.
6. Wheatner J., Houser D., and Blazakis C., *Gear tooth bending fatigue crack detection by acoustic emission and tooth compliance*. ASME, 1993.
7. R.W.Bueneke, M.B. Slane, and C.R. Dunham, *Gear Single Tooth Bending Fatigue Test*. SAE Technical Paper, 1982.
8. Singh A, Houser DR, and Vijayakar S, *Detecting gear tooth breakage using acoustic emission: a feasibility and sensor placement study*. Journal Mechanical Design, 1999(121): p. 7.
9. E.Siores and E.Negro, *Condition Monitoring of Gear Box using Acoustic Emission Testing*. Material Evaluation 1997(55): p. 5.
10. Amani RAAD, Fan ZHANG, and Bob RANDALL, *On the comparison of the use of AE and vibration analysis for early gear fault detection*. The Eight Western Pacific Acoustics Conference, 2003.
11. H.Sentoku, *AE in Tooth Surface Failure Process of Spur Gears*. Journal of Acoustic Emission, 1998(16): p. 6.
12. Badi M.N.M., Engin S.N., and Schonfeld D., *Fault classification of a model driveline using time domain data*. COMADEM, 1996: p. 8.
13. Tandon N and Mata S, *Detection of Defects in Gears by Acoustic Emission Measurements*. Journal of Acoustic Emission 1999(17): p. 5.
14. Toutountzakis T., Tan C.K., and Mba D., *Application of Acoustic Emission to Seeded Gear Fault Detection*. NDT and E International 2005(17): p. 10.
15. Tan C.K. and Mba D., *Identification of the Acoustic Emission Source during a Comparative Study on Diagnosis of a Spur Gearbox*. Tribology International, 2005(38): p. 12.
16. Tan C.K. and Mba D., *A Correlation between Acoustic Emission and Asperity Contact of Spur Gears Under Partial Elastohydrodynamic Lubrication*. International Journal of COMADEM 2006: p. 6.

17. Tan CK, Irving P, and Mba D., *A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears*. Mechanical Systems and signal Processing, 2007(21): p. 26.
18. Raja Hamzah R.I. and Mba D., *The Influence of Operating Condition on Acoustic Emission (AE) Generation during Meshing of Helical and Spur Gear*. Tribology International, 2009(42): p. 12.
19. Raja Hamzah R.I. and Mba D., *Acoustic Emission and Specific Film Thickness ( $\lambda$ ) for Spur Gears*. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2008(50): p. 3.
20. Elforjani M. and Mba D., *Detecting Natural Crack Initiation and Growth in Slow Speed Shafts with the Acoustic Emission Technology*. Engineering Failure Analysis, 2009(16): p. 9.
21. Dyer D. and Stewart R.M., *Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis*. Journal of Mechanical Design, 1978: p. 7.
22. Tandon N. and Choudhury A., *Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearing* Tribology International 1999(32): p. 12.
23. Smith S., *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists* 2002: Elsevier Newnes
24. Peng Z., Kessissoglou N.J., and Cox M., *A Study of the Effect of Contaminant Particles in Lubricants using Wear Debris and Vibration Condition Monitoring Techniques*. Wear, 2005(258): p. 12.
25. Meng Q. and Qu L., *Rotating Machinery Fault Diagnosis using Wigner Distribution*. Mechanical Systems and Signal Processing 1991(5): p. 12.
26. La Cour-Harbo A, *Ripples in mathematics: the discrete wavelet transform*. 2001: Springer.
27. McInerny S.A. and Dai Y., *Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection*. Education, IEEE Transaction on, 2003(46): p. 8.
28. McFadden P.D., *Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of The Meshing Vibration*. Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, 1986(108): p. 6.
29. Rangarao K.V., Mallik R.K., and Knovel., *Digital signal processing electronic resource :a practitioner's approach*. 2005, John Wiley.
30. Randall R.B., *Applications of Spectral Kurtosis in Machine Diagnostics and Prognostics*. Key Engineering Materials 2005(293-294): p. 10.

31. Dwyer R.F., *A Technique for Improving Detection and Estimation of Signals Contaminated by Under Ice Noise*. Journal of the Acoustical Society of America, 1983(74): p. 7.
32. ทรงพล กลิ่นชะเอม, การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา, in ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
33. ชนะ ปรีชา, สถิติเชิงคณิตศาสตร์ 1. 2552: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
34. American Society for Testing and Materials, *ASTM E976-05 Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response*. Vol. 3.03. 2009: Annual Book of ASTM Standard



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ภาคผนวก ก.

## คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณอะคูสติก

Vallen - Systeme GmbH

The Acoustic Emission Company



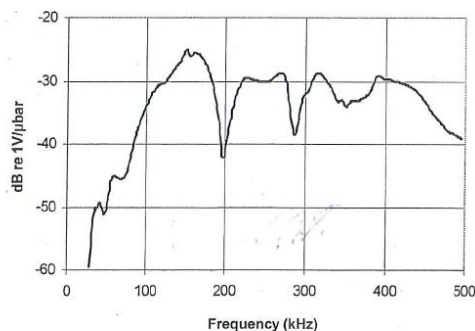
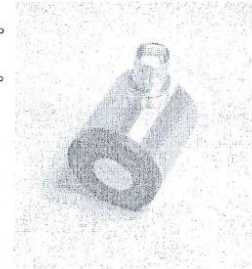
## VS150-RIC and VS150-RI

**High sensitivity AE sensors with integrated preamplifier:****compact • robust • low noise • pulse-through**

The VS150-RIC and VS150-RI are combinations of our AE sensor VS150-M and preamplifier AEP4. The design is very compact and robust and presents the advantages of the two components in a single housing. The integration of sensor and preamplifier prevents EMI from affecting the signal. It has a strong BNC connector, allowing the use of rugged cable - well suited for field testing. Both models have very low noise and a high dynamic range from 23 dB to 100 dB. The VS150-RIC additionally incorporates a bypass for calibration pulses.

These integrated sensors are optimized for performing field tests on pressure vessels, piping systems and other structures and are able to drive long cables (up to 150m).

Frequency response:	See response curve below
Gain of integr. preamp:	VS150-RIC: 34 dB into 50 Ohm, $U_{max}$ 10V <sub>PP</sub> optimized for AMS3/AMSY4
	VS150-RI: 40 dB into 50 Ohm, $U_{max}$ 18V <sub>PP</sub> comparable with R15I
Frequency range:	80kHz to 500kHz
Power supply:	+28V <sub>DC</sub> , 21mA (no signal) 55mA (10V <sub>PP</sub> into 50 Ohm)
Noise:	23dB <sub>AE</sub> (once per 5s) referred to input
Temperature range:	-40°C to +85°C
Pulse through capability (VS150-RIC):	Suited for AMS3 and AMSY4, up to 400V <sub>PP</sub>



Dimensions:	Diameter 28,7mm (1,13"), height 31,3mm (1,23"), (BNC connector not considered), weight: 60 grams (2,1oz.)
Aperture:	12,7mm (0,5")
Grounding:	Case-isolated, with integral ceramic wear plate for electrical isolation
Case material:	Aluminum

Specifications are subject to change as  
product developments are made.

Think AE - think Vallen ! user friendly, reliable, up to date

Vallen-Systeme GmbH  
Schöfflauer Weg 26  
D-82057 Icking (Munich), Germany

Tel: +49 8178 9674-400  
Fax: +49 8178 9674-444

vsi1906  
email: info@vallen.de  
http://www.vallen.de

ภาพที่ ก-1 คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณอะคูสติก

## ภาคผนวก ข.

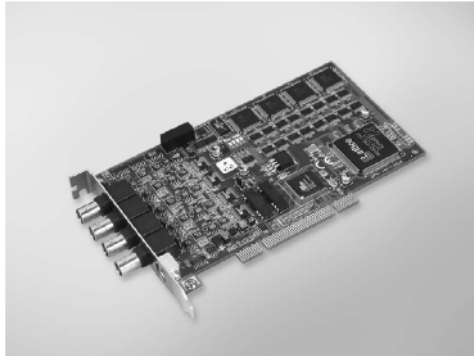
## คุณสมบัติของการ์ดรับสัญญาณอะนาล็อก

# PCI-1714U

# PCI-1714UL

**30 MS/s, 12-bit, Simultaneous  
4-ch Analog Input Universal PCI Card**

**10 MS/s, 12-bit, Simultaneous  
4-ch Analog Input Universal PCI Card**



FCC CE

## Features

- 4 single-ended analog input channels
- 12-bit A/D converter, with up to 30 MHz sampling rate
- Programmable gain
- Onboard FIFO memory (PCI-1714U: 32,768 samples; PCI-1714UL: 8,192 samples, each channel)
- 4 A/D converters simultaneously sampling
- Multiple A/D triggering modes
- Programmable pacer/counter
- BoardID™ switch
- Universal PCI Bus (supports 3.3 V or 5 V PCI bus signals)

## Introduction

PCI-1714U and PCI-1714UL are advanced high-performance data acquisition cards based on the PCI bus. With a large FIFO of 32,768 for each channel, the maximum sampling rate of PCI-1714U can get up to 30 MS/s, on each channel, with an emphasis on continuous, non-stop, high-speed, streaming data of samples to host memory. The low-cost PCI-1714UL offers 10 MS/s on each channel at a stable rate, and has also been equipped with a universal PCI interface.

## Specifications

### Analog Input

- **Channels** 4 single-ended
- **Resolution** 12 bits
- **Max. Sampling Rate** PCI-1714U: 30 MS/s per channel  
PCI-1714UL: 10 MS/s per channel
- **FIFO Size** PCI-1714U: 30 MS/s 32,768 samples each channel  
PCI-1714UL: 8,192 samples each channel
- **Overvoltage Protection** 30 Vp-p
- **Input Impedance** 50  $\Omega$ /1 M $\Omega$ /HI Z jumper selectable/100 pF
- **Sampling Modes** Software polling, pacer
- **Trigger Modes** Post-trigger, pre-trigger, delay-trigger, about-trigger
- **Input Range (V, software programmable) & Absolute Accuracy**

Bipolar	$\pm 5$	$\pm 2.5$	$\pm 1$	$\pm 0.5$
Absolute Accuracy (% of FSR)*	0.1	0.2	0.2	0.4

\*  $\pm 1$  LSB is added as the derivative for absolute accuracy

### General

- **Bus Type** Universal PCI V2.2
- **I/O Connectors** 4 x BNC connector (for AI)  
1 x PS/2 connector (for Ext. clock and trigger)
- **Dimensions (L x H)** 175 x 100 mm (6.9" x 3.9")
- **Power Consumption** Typical: 5 V @ 850 mA; 12 V @ 600 mA  
Max.: 5 V @ 1 A; 12 V @ 700mA
- **Operating Temperature** 0 ~ 60°C (32 ~ 140°F)
- **Storage Temperature** -20 ~ 85°C (-4 ~ 185°F)
- **Storage Humidity** 5 ~ 95% RH, non-condensing (refer to IEC 68-2-3)

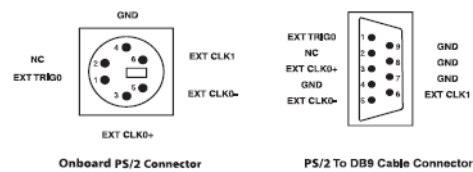
## Ordering Information

- **PCI-1714U** 30 MS/s, 12-bit, Simultaneous 4-ch AI PCI Card
- **PCI-1714UL** 10 MS/s, 12-bit, Simultaneous 4-ch AI PCI Card

### Accessories

- **ADAM-3909** DB9 DIN-rail Wiring Board
- **PCL-1010B-1** BNC to BNC Wiring Cable, 1 m
- **PCL-10901-1** DB9 to PS/2 Cable, 1 m
- **PCL-10901-3** DB9 to PS/2 Cable, 3 m

## Pin Assignments



ADVANTECH

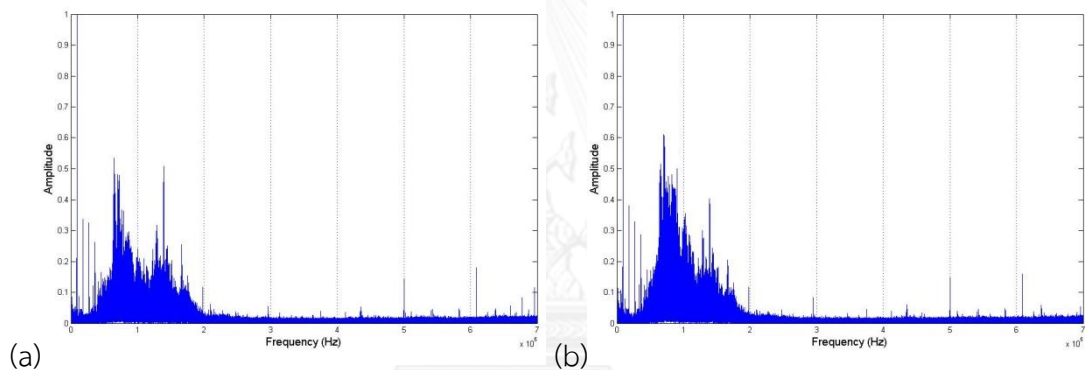
Data Acquisition Boards

ภาพที่ ข-1 คุณสมบัติของการ์ดรับสัญญาณอะนาล็อก

## ภาคผนวก ค.

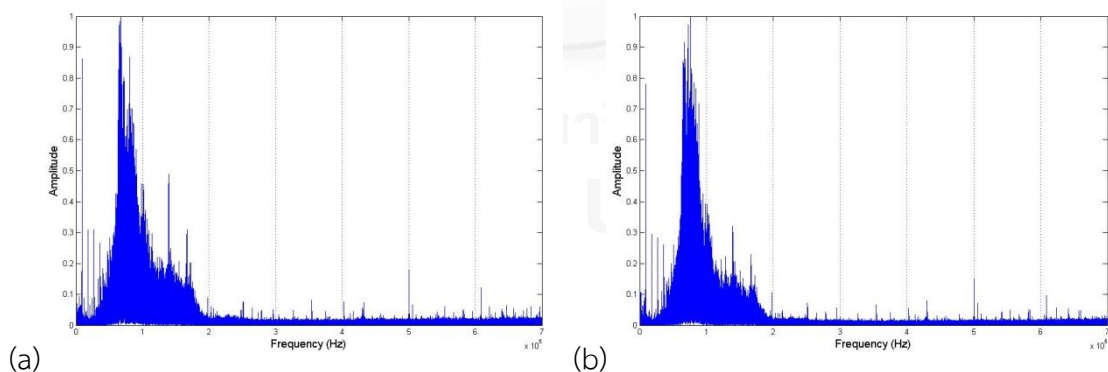
## สัญญาณอะคูสติกของเกียร์ตรงบนโดเมนความถี่

วิธีวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกบนโดเมนความถี่เป็นการแปลงสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนเวลา แปลงผลด้วยโปรแกรม Matlab ที่พัฒนาขึ้นจากสมการที่ (3.1) แสดงผลแบบแแกนตั้งคือแอมพลิจูดในหน่วยโวลต์กำลังสองต่อเฮิรตซ์ ( $V^2/Hz$ ) และแกนนอนคือความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) สภาวะปกติเกียร์ตาม 25 ฟันลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนความถี่ ดังภาพที่ ค-1 ระบบเกียร์มีช่วงความถี่ตอบสนองที่ 50 ถึง 250 kHz สภาวะปกติเกียร์ตาม 28 ฟันลักษณะของสัญญาณอะคูสติกบนโดเมนความถี่ ดังภาพที่ ค-2 ระบบเกียร์มีช่วงความถี่ตอบสนองที่ 50 ถึง 250 kHz เหมือนระบบเกียร์ 25 ฟัน ความถี่ตอบสนองของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลสัญญาณอะคูสติกกับระบบเกียร์อยู่ในช่วงเดียวกัน จึงสามารถตรวจสอบได้ แต่การระบุความเสียหายของเกียร์ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่เฉพาะตามเงื่อนไขความเสียหาย ดังภาพที่ ค-3 ถึง ค-12



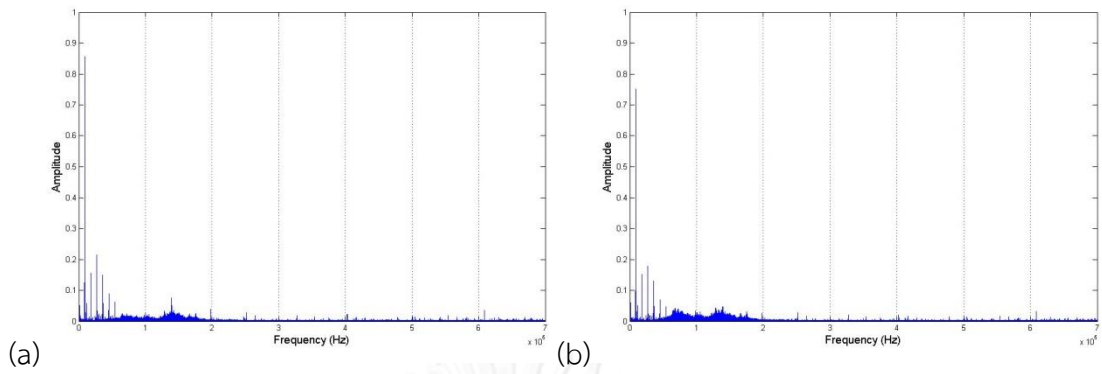
ภาพที่ ค-1 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่สภาวะปกติ

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



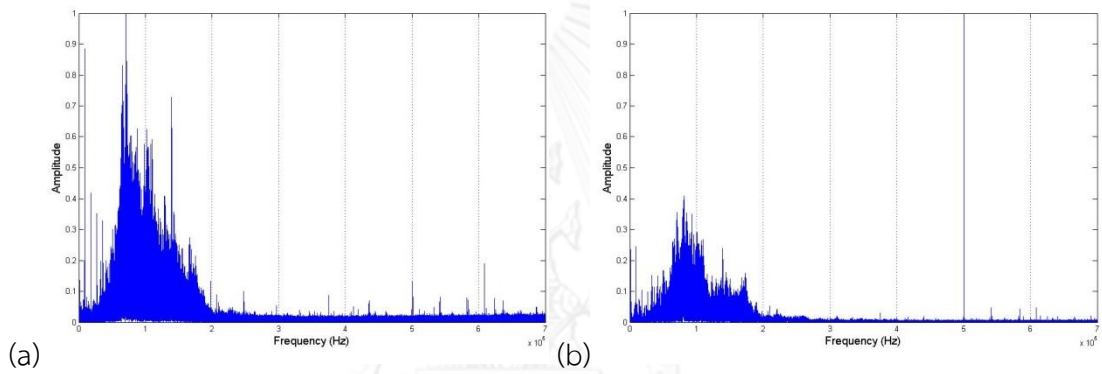
ภาพที่ ค-2 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกกว่า 25%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



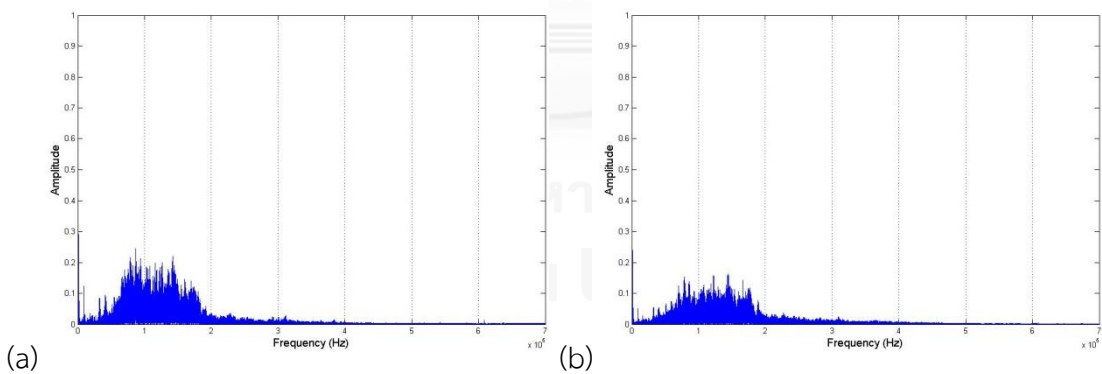
ภาพที่ ค-3 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 50%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



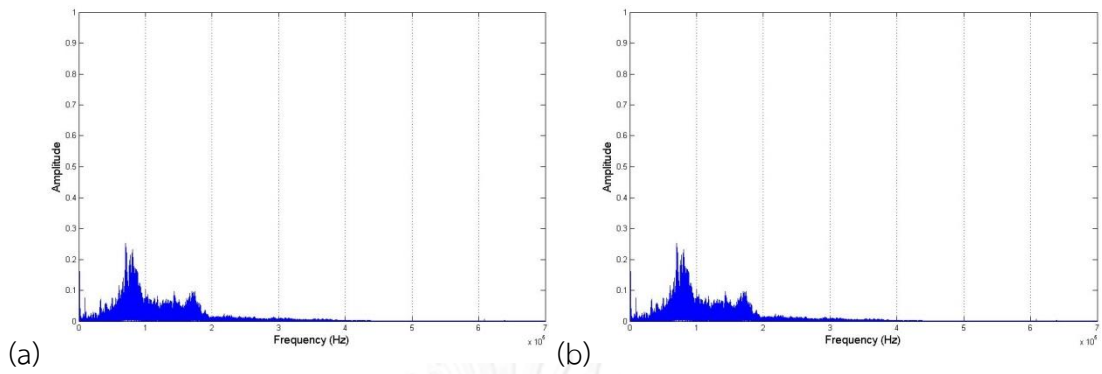
ภาพที่ ค-4 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ

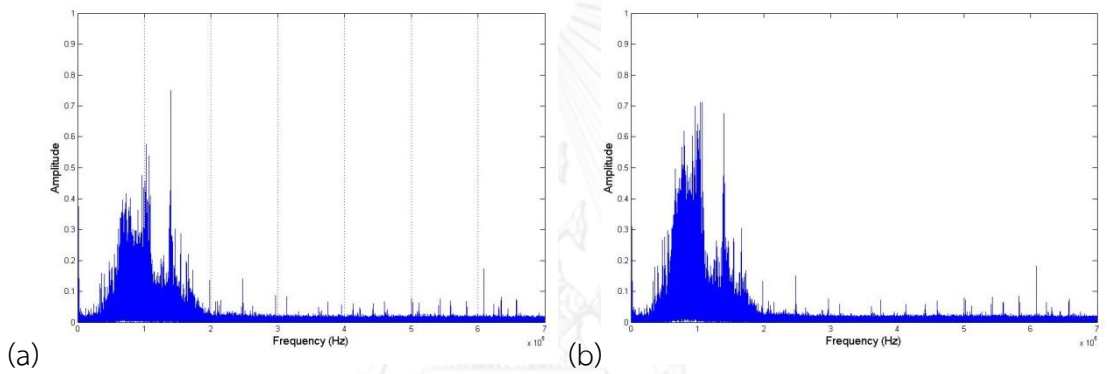


ภาพที่ ค-5 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกหัก 100%

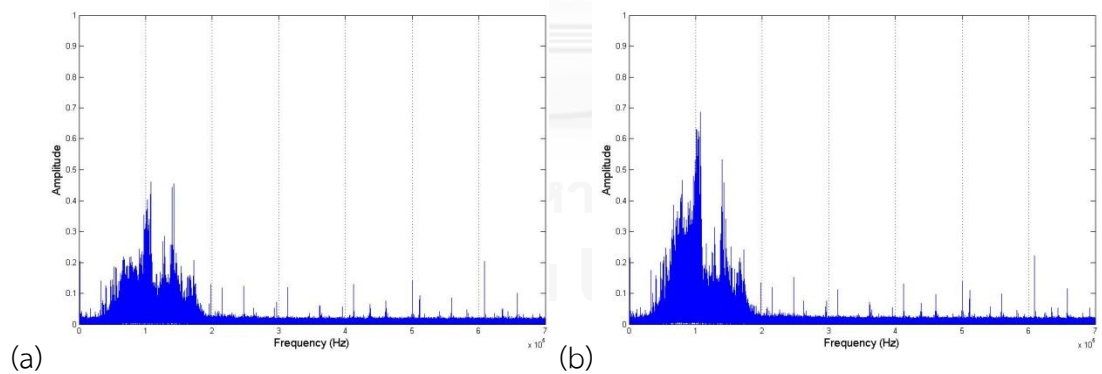
(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



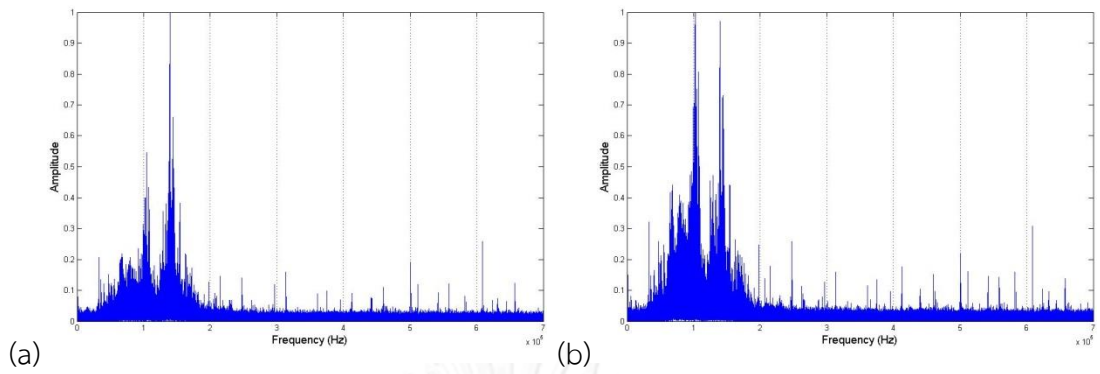
ภาพที่ ค-6 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 25 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50% และ 100%  
(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



ภาพที่ ค-7 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่สภาวะปกติ  
(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ

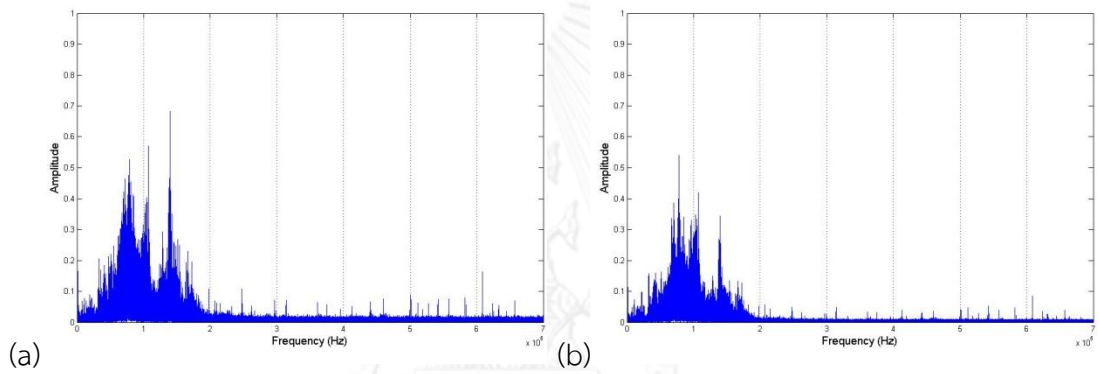


ภาพที่ ค-8 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 25%  
(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



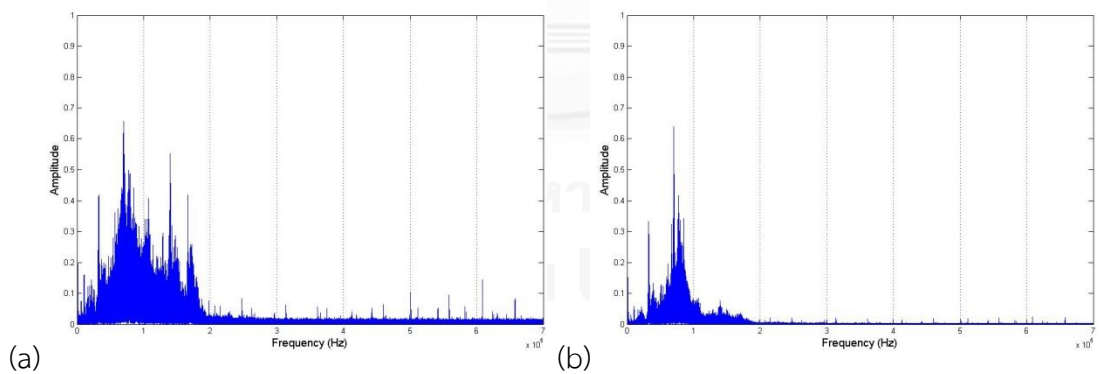
ภาพที่ ค-9 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกร้าว 50%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



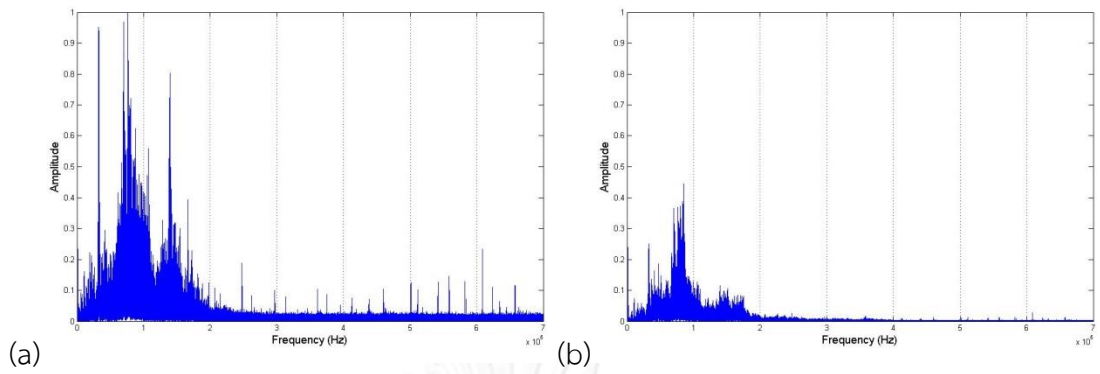
ภาพที่ ค-10 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



ภาพที่ ค-11 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกหัก 100%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงานในระบบ



ภาพที่ ค-12 สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเกียร์ 28 ฟันที่เกียร์แตกหัก 50% และ 100%

(a) ไม่มีภาระงานในระบบ (b) มีภาระงาน

## ภาคผนวก จ.

## การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

การประชุมวิชาการ

วีรเดช คุณวิทย์ไพศาล และ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ, การศึกษาความเสียหายของเกียร์ตรงด้วยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกเชิงสถิติ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 2013

การตีพิมพ์

Withaya Yongchareon and Weeraded Khunvitayapaisal, Study of Damage in Spur Gear Using Acoustic Emission Signal Analysis, Research and development journal of the engineering institute of Thailand, 2014



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีรเดช คุณวิทย์ไพศาล เกิดเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2523 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง จังหวัดกรุงเทพฯ ได้เข้าศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2541 ได้เข้าศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 ติดต่อ weeraded@hotmail.com



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**