

การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการ
สั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา

นายทรงพล กลิ่นชะเอม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

FAULT DETECTION OF SPUR GEAR USING STATISTICAL ANALYSIS OF TIME-
DOMAIN VIBRATION SIGNAL

Mr. SONGPON KLINCHAEAM

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยวิธีการ
วิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมน
เวลา

โดย

นายทรงพล กลิ่นชะเอม

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพินิจกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติมา จินตนาวัน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

ทรงพล กลิ่นชะเอม : การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา. (Fault Detection of Spur Gear Using Statistical Analysis of Time-Domain Vibration Signal) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ, 108 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิค การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือน เป็นการตรวจวัดเกี่ยวกับกระบวนการทางกลที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนที่มีเฟืองเป็นส่วนประกอบหลักของระบบส่งกำลัง การศึกษาที่ชุดเฟืองตรงจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส 1.25 แรงม้า พร้อมชุดภาระขนาด 1.56 นิวตันเมตร ชุดเฟืองตรงของรถจักรยานยนต์ขนาด ค 125 ซีซีจะถูกจำลองที่เงื่อนไขต่างๆทั้งหมด 3 เฟือง โดยเฟืองที่หนึ่ง 28 ฟัน, เฟืองที่สอง 26 ฟันและฟันที่สาม 24 ฟัน โดยจำลองในเงื่อนไขดังนี้คือ ฟันเฟืองปกติ , ฟันเฟืองแตกหัก 50% 1 ฟัน, ฟันเฟืองแตกหัก 100% 1 ฟัน, และฟันเฟืองแตกหัก 50% 1 ฟันและ100% 1 ฟันบนเฟืองเดียวกัน สัญญาณการสั่นสะเทือนจะตรวจวัดจากหัววัดการสั่นสะเทือน ซึ่งติดตั้งอยู่ตามแนวแกนตั้ง แกนนอน และแกนเพลลา พร้อมทั้งสัญญาณวัดรอบที่ตรวจวัดด้วย proximity switch สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ จากผลการทดลองพบว่า การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้งจะให้ค่าที่ดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ และการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติเพียงค่าเดียวสามารถทำนายสถานะของเฟืองตรงได้แต่ไม่ชัดเจน แต่การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยการแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ระหว่างค่าความโด่งและค่าพลังงานของสัญญาณสามารถทำนายและแยกสถานะของเฟืองตรงได้ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษา โดยการสร้างขอบเขตการตัดสินใจของการแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติด้วยความเชื่อมั่น 95 % ด้วยข้อมูลอ้างอิง 50 ชุดสามารถวิเคราะห์แบ่งแยกเงื่อนไขความเสียหายได้อย่างชัดเจนในกรณีที่ไม่มีภาวะ และแบ่งแยกได้บางเงื่อนไขในกรณีที่มีภาวะ นอกจากนี้ผลจากการทดสอบขอบเขตการตัดสินใจ ตามเงื่อนไขทั้งหมดด้วยข้อมูล 15 ชุดพบว่า มีค่าความถูกต้องแม่นยำที่ 86.67% และมีค่าความผิดพลาดที่ 13.33%

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554.....

5370641421: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS :FAULT DETECTION / VIBRATION SIGNAL / SPUR GEAR / STATISTICAL PARAMTER

SONGPON KLINCHAEAM : FAULT DETECTION OF SPUR GEAR USING STATISTICAL ANALYSIS OF TIME-DOMAIN VIBRATION SIGNAL. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.WITHAYA YONGCHAREON, Ph.D., 108 pp.

This research is concerned with the study of condition monitoring techniques. Spur gear fault detection has been studied using vibration signal. The vibration signal can be used to describe the mechanical operations of the rotating machinery which has spur gears as the main part of the power transmission systems. In this study, spur gears were driven by an AC motor, 3 phases, 1.25 HP with load 1.56 Nm using drum break. The spur gear of motorcycle with capacity 125 CC. were used to simulate various conditions such as normal, broken tooth 50% 1 tooth, broken tooth 100% 1 tooth and to combine broken tooth 50% 1 tooth and 100% 1 tooth on the one gear. Vibration signals were recorded from accelerometers attached on the three main axes of motion such as vertical, horizontal and axial axes and revolution signal was recorded from the proximity switch. The vibration signals were analyzed using the statistical parameter analysis technique and the vertical axis was the best result in this work. The various statistical parameters were determined. From the results, the vibration signal analysis with single statistical parameter is unclear to predict state of the spur gears. The use of two statistical parameters between signal energy and kurtosis can be clearly used to separate in case without load and can be to separate some cases with load. The boundary decision of statistical parameter with the 95 % certainty from 50 referenced dataset detected the testing condition by 86.67% accuracy and had the error 13.33% using 15 testing dataset.

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

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

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี บุคคลแรกข้าพเจ้าต้องขอกราบ
ขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ สำหรับโอกาสที่ข้าพเจ้าได้รับ และได้รับการ
สนับสนุนการทำงานวิจัยในสาขาที่ข้าพเจ้าสนใจศึกษา รวมทั้งสนับสนุนด้านทุนการศึกษาระหว่าง
ศึกษาในการดำรงตำแหน่งเลขานุการ นายกสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย ขอขอบพระคุณสำหรับ
คำแนะนำ คำสั่งสอน และคำถามที่ทำให้ข้าพเจ้ากระตือรือร้นในการค้นหาคำตอบ เพื่อตอบปัญหา
จากท่านอาจารย์

บุคคลที่สองข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร .พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ บุคคลที่มี
ความสำคัญ ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจของข้าพเจ้า และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ดีสำหรับข้าพเจ้า ผู้ซึ่ง
อยู่เบื้องหลังความสำเร็จทุกอย่าง ตั้งแต่สมัยเรียนระดับปริ ญาบัณฑิต จนกระทั่งตลอดชีวิต
การทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

สุดท้ายขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับ
ทุนอุดหนุนเฉพาะค่าเล่าเรียนตลอดการศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ปรัชศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล.....	8
2.2.1 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน.....	8
2.2.2 การตรวจสอบความเสียหายของเฟือง.....	14
2.3 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณ.....	31
2.3.1 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบดิเทอร์มินิสติก	32
2.3.2 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา.....	33
2.3.3 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่	35
2.3.4 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการจดจำรูปแบบ.....	36
2.4 สรุป.....	37
บทที่ 3 การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและการทดลอง	39
3.1 บทนำ	39
3.2 สัญญาณการสั่นสะเทือน.....	39
3.2.1 ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือน	39

บทที่	หน้า
3.2.2 ประเภทของสัญญาณ.....	40
3.3 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ.....	42
3.3.1 โมเมนต์ความน่าจะเป็น	42
3.3.2 การกระจายปกติ	44
3.4 การเก็บบันทึกข้อมูล.....	45
3.4.1 ชุดทดลอง.....	48
3.4.2 การจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพื้นเฟือง	49
3.5 สรุป.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 บทนำ	52
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงบนโดเมนเวลา.....	52
4.3 การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ.....	60
4.4 การสร้างขอบเขตการตัดลินใจด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ	67
4.5 การทดสอบขอบเขตการตัดลินใจ.....	74
4.6 สรุปการทดลอง.....	84
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุป.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก.คุณสมบัติของหัววัดการนสะเทือน.....	93
ภาคผนวก ข.โปรแกรม LabVIEW.....	95
ภาคผนวก ค.แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล.....	97
ภาคผนวก ง.ผลการวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ (เพิ่มเติม)	98
ภาคผนวก จ.ผลการวิเคราะห์ขอบเขตความเสียหายร่วมกันทั้ง 3 เฟือง (เพิ่มเติม)	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	108

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 วิธีการตรวจสอบเครื่องจักรกลหมุน [1,3].....	9
2-2 ผลของการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและความถี่ของสัญญาณจำลองการกระแทกของ ตลับลูกปืน [23]	10
2-3 สัญญาณการสั่นสะเทือนทางกลประเภทต่าง ๆ	11
2-4 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพล่าข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์.....	12
แก๊สไซลีน 1 สูบสี่จังหวะของเหตุการณ์ของ Valve timing [6]	12
2-5 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพล่าข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ [7]	13
2-6 สัญญาณความดันของโรตารีคอมเพรสเซอร์ขนาด 24000 BTU ที่ความเร็วรอบการทำงาน 3 ระดับ, (เส้นจุด) 4860 rpm, (เส้นขีด) 6000 rpm, (เส้นทึบ) 7200 rpm. [10].....	14
2-7 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรงปกติ หมายเลข 1	16
2-8 ชุดทดลองของ Combet และคณะ [11]	17
2-9 สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงที่เฉลี่ยแล้ว ในสภาวะผิวเฟืองเสียหาย 10% [11]	17
2-10 ตัวอย่างชุดทดลองของ ANDRADE [12]	18
2-11 ตัวอย่างการจำลองความเสียหายแบบ Crack เพื่อทำการทดลองของ.....	19
ANDRADE [5]	19
2-12 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะปกติ [5].....	20
2-13 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะผิดปกติ.....	20
เนื่องจากการ Crack [5].....	20
2-14 ผลการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติในเงื่อนไขต่าง [5].....	21
2-15 (a) ชุดทดลองของเฟืองตรงและตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ (b) ชุดเฟืองที่ใช้ทดสอบ [12].....	22
2-16 ผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ (a) ไฟล์ที่ 10: รับภาระ 100% ของเฟือง หมายเลข 5 ในสภาวะปกติ (b) ไฟล์ที่ 50: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 5 ในสภาวะปกติ (c) ไฟล์ที่ 80: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 5 ในสภาวะปกติ [15].....	23
2-17 ผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ (a) ไฟล์ที่ 20: รับภาระ 100% ของเฟือง หมายเลข 7 ในสภาวะปกติ (b) ไฟล์ที่ 60: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 7 ในสภาวะปกติ (c) ไฟล์ที่ 140: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 7 ในสภาวะปกติ [15]	24
2-18 (a) สภาวะปกติรับแรงบิด 62.28 Nm, (b) สภาวะปกติรับแรงบิด 31.31 Nm,	27
(c) สภาวะปกติรับแรงบิด 184.46 Nm, (d) สภาวะฟันเฟืองร้าวรับแรงบิด 123.77 Nm,	27

ภาพที่	หน้า
(e) สภาวะพื้นเฟืองแตกรับแรงบิด 123.77 Nm, (f) สภาวะพื้นเฟืองหักรับแรงบิด 184.46 Nm.....	27
2-19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ WPC 30 ข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงกับค่า ความแตกต่างของ Daubechies order	28
2-20 สัญญาณบนโดเมนเวลา: (a) สภาวะปกติ, (b) สภาวะเสียหายเล็กน้อย และ (c) สภาวะ เสียหายรุนแรง. [26]	29
2-21 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ PCA [26]	30
2-22 ผลของแบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	32
2-23 ผลของแบบจำลองการเคลื่อนของสมการการเคลื่อนของเฟือง [10]	33
2-24 กราฟการกระจายตัวแบบปกติ [30].....	34
2-25 กราฟการกระจายตัวแบบปกติแบบอันดับที่สอง [30]	35
3-1 ลักษณะสัญญาณโดเมนเวลาโดยทั่วไปที่ได้จากเซนเซอร์ที่ส่งค่าออกมา	40
3-2 ลักษณะสัญญาณ Discrete โดยที่มี Δ คือ วินาที	40
3-3 ประเภทของสัญญาณ [1].....	40
3-4 ระบบการเคลื่อนที่ของ มวล-สปริง [3]	41
3-5 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน	45
3-6 ชุดเฟืองสำหรับทดลอง.....	46
3-7 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือน และ Proximity เซนเซอร์.....	47
3-8 แผนผังการดำเนินงานเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	47
3-9 ชุดทดลองพร้อมกับชุดภาระการทำงาน 1.56 Nm.....	48
3-10 เงื่อนไขการจำลองสภาวะความเสียหาย.....	49
4-1 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาในแนวแกนตั้งของเฟืองตรงหมายเลข 1 ที่รับภาระ และไม่รับภาระการทำงาน	54
4-2 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาในแนวแกนตั้งของเฟืองตรงหมายเลข 2 ที่รับภาระ และไม่รับภาระการทำงาน	58
4-3 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาในแนวแกนตั้งของเฟืองตรง หมายเลข 3 ที่รับภาระ และไม่รับภาระการทำงาน	59
4-4 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	62
4-5 ค่าเฉลี่ยของค่าความแปรปรวนของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	62
4-6 ค่าเฉลี่ยของค่าความเบ้ของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	64
4-7 ค่าเฉลี่ยของค่าความโด่งของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	64

ภาพที่	หน้า
4-8 ค่าเฉลี่ยของค่า RMS ของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	65
4-9 ค่าเฉลี่ยของค่า Crest Factor ของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	65
4-10 ค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน.....	66
4-11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 1.....	68
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	68
4-12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 1.....	69
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	69
4-13 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 1.....	69
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	69
4-14 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 1.....	70
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	70
4-15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 2.....	70
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	70
4-16 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 2.....	71
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	71
4-17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 2.....	71
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	71
ภาพที่ 4-18 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 2.....	72
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	72
4-19 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 3.....	72
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	72
4-20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 3.....	73
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	73
4-21 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 3.....	73
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	73
4-22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 3.....	74
(A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	74
4-23 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ย.....	75
ของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	75
4-24 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าความแปรปรวน.....	76

ภาพที่	หน้า
ของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	76
4-25 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่ารอกกำลังสอง	76
ของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	76
4-26 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณ	77
ของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	77
4-27 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ย	78
ของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	78
4-28 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าความแปรปรวน.....	78
ของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	78
4-29 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่ารอกกำลังสอง	79
ของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	79
4-30 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณ	79
ของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	79
4-31 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ย	80
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	80
4-32 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าความแปรปรวน.....	80
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	80
4-33 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่ารอกกำลังสอง	81
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	81
4-34 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณ	81
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ.....	81
4-35 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณ.....	83
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบไม่มีภาวะ	83
4-36 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณ.....	83
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบมีภาวะ	83
ก-1 คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือน	93
ก-2 คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือน.....	94
ข-1 Block diagram ของโปรแกรม LabVIEW [29].....	95
ข-2 Front panel ของโปรแกรม LabVIEW [29]	96

ภาพที่	หน้า
ค-1 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล	97
ง-1 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 1	98
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	98
ง-2 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 1	98
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	98
ง-3 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 1	99
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	99
ง-4 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 1	99
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	99
ภาพที่ ง-5 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 2	100
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	100
ง-6 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 2	100
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	100
ง-7 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 2	101
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	101
ง-8 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 2	101
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	101
ง-9 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 3	102
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	102
ง-10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโค้งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 3	102
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	102
ง-11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองเฟืองหมายเลข 3	103
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	103
ง-12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 3	103
(A)ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต	103
จ-1 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ย	104
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบไม่รับภาระ	104
จ-2 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ย	105
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบรับภาระ	105

ภาพที่	หน้า
จ-3 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวน.....	105
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองกันแบบไม่รับภาระ	105
จ-4 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวน.....	106
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบรับภาระ	106
จ-5 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่ารอกกำลังสอง	106
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบไม่รับภาระ.....	106
จ-6 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณ.....	107
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบรับภาระ	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การตรวจสอบสภาพ การทำงานของเครื่องจักรกลหมุน เป็นงาน หนึ่ง ที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อระบบการบำรุงรักษา แบบพยากรณ์ หรือคาดการณ์ ความเสียหายของเครื่องจักรกล และการบำรุงรักษาตามการเสื่อมสภาพของเครื่องจักร กล เนื่องจากทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รู้ล่วงหน้าถึงสถานะที่เกิดขึ้นของเครื่องจักรกลแต่ละเครื่องว่ามีสภาพการทำงานเป็นอย่างไร ทำให้พิจารณาได้ว่าจะ วางแผนดำเนินการ ซ่อมบำรุงรักษา เครื่องจักรกลนั้นๆ ได้ อย่างเป็นบ้าง เช่น ถ้าเครื่องจักร กลยังมีสภาพ ที่ดีก็จะสามารถใช้งานได้ต่อไป โดยไม่ต้องหยุดซ่อมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนตามแผนงาน ทำให้สามารถใช้งานเครื่องจักรและอุปกรณ์ได้อย่างคุ้มค่า มีอายุการทำงานมากขึ้น ผลผลิตมากขึ้น ลดค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุง ได้มากขึ้น แต่ถ้าเครื่องจักร กลเริ่มมีอาการที่บ่งบอกถึง อาการของการเสื่อมสภาพ ก็จะต้องวิเคราะห์หาสาเหตุความผิดปกติที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากสามารถป้องกันการเกิด ความเสียหายที่รุนแรง ที่จะส่งผลกระทบต่อการผลิต หรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรกลชนิดอื่นๆ ที่ทำงานสอดคล้องและต่อเนื่องกัน โดยการบำรุงรักษาให้เครื่องจักรสามารถพร้อมใช้งานอยู่เสมอ นั้นย่อมจะมีผลดี เพราะหากความเสียหายเกิดขึ้นกับเครื่องจักรกล แล้ว จะส่งผลกระทบต่อกา ผลิตทั้งกระบวนการและอาจจะส่งผลกระทบต่อองค์กรโดยตรง วิธีการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลหรือการรักษาสถานะการทำงานของเครื่องจักรกล จึงเป็นปัจจัยหลักของภาคอุตสาหกรรมเลยทีเดียว

โดยช่วงเวลากว่าทศวรรษ ที่ผ่านมา การบำรุงรักษาแบบการทำนายหรือการคาดการณ์ความเสียหายของเครื่องจักร (Predictive Maintenance) ได้เข้ามามีบทบาทในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลมากขึ้น เพื่อเป็นการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เมื่อเครื่องจักรเสียหายหนัก (Brake Down) รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่ตามมาหากเกิดความเสียหายนั้นขึ้น อีกมหาศาล โดยเทคนิคดังกล่าวคือการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรกล (Condition Monitoring) อยู่ตลอดเวลาโดยการใช้เครื่องมือ วัดและเทคนิควิธีการที่ทันสมัยเข้ามาช่วยในการตรวจสอบ สถานะการทำงานของเครื่องจักรกล ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีดังนี้ [1-3]

การตรวจสอบการสั่นสะเทือน (Vibration monitoring): ใช้ในการตรวจสอบเครื่องจักรกลที่มีลักษณะการเคลื่อนที่หรือทำงานแบบหมุน

การส่งผ่านของเสียง (Acoustic emission): ใช้ในการตรวจสอบสภาวะของเครื่องจักร , ระบุตำแหน่งของปัญหา และตรวจสอบการแตกในโครงสร้าง และท่อภายในหรือภายนอกอาคาร

การวิเคราะห์น้ำมัน (Oil analysis): การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องจักร กล น้ำมันหล่อลื่นจะมีการเปลี่ยนสีของน้ำมันหล่อลื่นที่เกิดจากการเสียดสีของชิ้นส่วนทางกลระ จึงทำให้ทราบถึงอายุและระยะเวลาในการทำงานได้ และสามารถบ่งบอกถึง สภาวะการทำงานของ ชุด แบริ่งและชุดเฟืองได้

การวิเคราะห์ด้วยอนุภาค (Particle analysis): ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่สึกหรอซึ่งได้แก่ เครื่องจักรกลที่เป็นลูกสูบ ชุดเฟืองหรือระบบไฮดรอลิก ซึ่งวิธีการนี้จะทำการวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนที่เป็นอนุภาคเล็กๆ ที่เกิดจากการเสียดสีของชิ้นส่วนทางกล เพื่อตรวจสอบประกอบภายในของชิ้นส่วนที่สึกหรอ การเลือกวิธีในการตรวจสอบศึกษาจากข้อมูลที่เกิดการเสื่อมลงของชิ้นส่วนนั้น จะกระทำไปพร้อมๆกับวิธีการวิเคราะห์น้ำมันได้เช่นเดียวกัน

การตรวจสอบสภาวะการกัดกร่อน (Corrosion monitoring): ใช้วิธีการอัลตราซาวด์วัด ความหนาของท่อ, หรือโครงสร้างของแท่นชุดเจาะน้ำมัน และอุปกรณ์ต่างในขบวนการผลิตสำรวจ ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและเคมีภัณฑ์ได้ ซึ่งปัจจุบันวิธีการนี้ยังคงใช้ในการวิเคราะห์ความหนาของ คราบตะกอนภายในท่อที่ก่อให้เกิดความดันตกค่อมและการอุดตันของท่อเกิดขึ้นได้ด้วยเช่นกัน

เทอร์โมกราฟี (Thermography): เทอร์โมกราฟีใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบอุณหภูมิ และอุปกรณ์ทางกลที่มีตำแหน่งต่างๆของเครื่องจักรกลในเครื่องปั่นไฟ, หม้อต้มน้ำ (Boiler), การเยื้อง ศูนย์ (misalignment) กันของคัลป์ปิ้ง และตำแหน่งอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบการเสียหาย ในเซลล์ของโครงสร้าง แบบคาร์บอนไฟเบอร์ของเครื่องบินได้ด้วย ซึ่งวิธีการนี้จะใช้เครื่องมือและ เทคโนโลยีในการวัดที่มีราคาค่อนข้างสูง

จาก เทคนิคการตรวจสอบของ แต่ละ วิธีการของการตรวจสอบสภาวะการทำงาน ของ เครื่องจักรกลที่กล่าวมาข้างต้นจะนำไปสู่การวางแผนงานในการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกลนั้นๆ ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานได้อย่างเหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจศึกษาวิจัยและได้ตระหนักถึงความสำคัญในการตรวจสอบสภาวะการทำงาน ของเครื่องจักรกล เป็นอย่างมาก จึงได้นำเสนอวิธีการในการตรวจสอบสภาวะการทำงาน ของเครื่องจักรกลด้วยวิธีการการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา เหตุผล เนื่องมาจากการสั่นสะเทือนเป็นวิธีการที่นิยมอย่างมากใน แวดวงอุตสาหกรรม และเป็นวิธีการ

ตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลที่มีการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องและแบบหมุนได้ดีมาก [1-3] อีกทั้งเป็นวิธีการที่น่าสนใจที่จะศึกษา เนื่องจากในอุตสาหกรรมของต่างประเทศที่พัฒนาแล้ว ได้ให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับงานทางด้าน การตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกล หมุนนี้ เพราะมีส่วนช่วยในการลดต้นทุนจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนคงที่ [1] และมีผลงานวิจัยและบทความทางวิชาการอย่างต่อเนื่องที่ตีพิมพ์ ผลของการศึกษาที่ผ่านมา สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของ เครื่องจักรกลแบบ Real-time ได้ในปัจจุบัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่จาก หลักการแปลงฟูริเยร์ นอกจากนี้ยัง มีการนำเสนอ เทคโนโลยีใน การวิเคราะห์สัญญาณการ สั่นสะเทือนใน หลากหลายรูปแบบและหลากหลายวิธีการให้เลือกใช้ ในทางตรงกันข้ามประเทศไทย ยังไม่ค่อยมีผู้เชี่ยวชาญและนักวิจัยที่ให้ความสนใจในการศึกษาเรื่องของการตรวจสอบสภาวะ การทำงานของเครื่องจักรกลหมุนอย่างแพร่หลายมากนัก (ข้อมูลจาก: สถาบันเทคโนโลยีไทย-เยอรมัน, ปี2009) เนื่องจากในทุกภาคส่วนนิยมใช้เครื่องมือสำเร็จรูป โปรแกรมสำเร็จรูปมากกว่าที่จะ พัฒนาเทคนิควิธีการวิเคราะห์ในส่วนของโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณเอง ทั้งนี้ต้องตระหนัก ว่า เทคโนโลยีในด้านการสร้างอุปกรณ์ รับรู้หรือฮาร์ดแวร์อื่นๆ อาจจะไม่ สามารถที่จะสร้างขึ้น มา แข่งขันกับประเทศที่พัฒนาได้ แต่สามารถพัฒนาซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมการวิเคราะห์ สัญญาณขึ้น ได้ เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุน โดยไม่ต้องพึ่ง ซอฟต์แวร์จากต่างประเทศที่มีราคาสูงมากเป็นหลักล้าน

งานวิจัยนี้ได้ทำ การศึกษาโดยตระ หนักถึงเรื่องต้นทุนในการ เลือกใช้เครื่องมือวัด และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสำหรับการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงเป็น สำคัญ การนำเสนอผลการทดลองและศึกษาของงานวิจัยนี้ใจความหลัก คือนำเสนอวิธีการ วิเคราะห์สัญญาณ การสั่นสะเทือนจาก ความเสียหาย ของเฟืองตรง ด้วยเทคนิค วิธีการวิเคราะห์ สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา โดยใช้หลักการพื้นฐานของวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ในการนำเสนอวิธีตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยวิธีการ วิเคราะห์พารามิเตอร์ เชิงสถิติ ของสัญญาณการสั่นสะเทือน เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเฟืองตรงที่ถูกจำลอง ความเสียหายโดยการทำให้เกิดการแตกหักขึ้นของฟันเฟืองที่ตัวตาม ซึ่งทำการจำลองความเสียหายดังนี้ คือ สภาวะการทำงานปกติ สภาวะการทำงานที่ ฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวิธีดังกล่าวว่าสามารถแยกกลุ่ม ความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ครบหรือไม่

ผลการทดลองพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถ แยกกลุ่มความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างชัดเจน จาก การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยวิธีการวิเคราะห์ สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติโดยใช้มากกว่า 1 พารามิเตอร์ของความสัมพันธ์ของสัญญาณได้ชัดเจน และสามารถนำองค์ความรู้ทั้งหมดที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงได้ เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลามีข้อดีคือ ไม่ต้องให้ความสำคัญกับสัญญาณบนโดเมนความถี่สักซึ่งมากนัก ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบสุ่ม (Random signal) อีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพโดยอาศัยความสัมพันธ์ ของข้อมูลเชิงสถิติเป็นตัวแปรในการวัดผลที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกล โดยธรรมชาติและสามารถเข้าใจได้ง่าย หาก ผู้ที่ไม่มีความรู้เรื่องสัญญาณการสั่นสะเทือน มาวิเคราะห์ข้อมูลก็ จะสามารถอ่านข้อมูลที่วิเคราะห์ ได้ อีกทั้งยังสามารถแยกกลุ่มข้อมูล ระหว่างลักษณะใดปกติ กับ ลักษณะใดผิดปกติ เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ วิเคราะห์ได้ดี และง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโด เมนความถี่ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา-ความถี่ และการแปลงเวฟเลต เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1-2-1 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย(Mean) ค่าความแปรปรวน(Variance) ค่าความโด่ง(Kurtosis) ค่าความเบ้(Skewness) ค่ารากกำลังสอง(RMS) ค่า Crest Factor และค่าพลังงานสัญญาณ (signal energy) รวมถึงความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์

1-2-2 สามารถแยกกลุ่มข้อมูลความสัมพันธ์ด้วยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ของเฟืองตรงได้ และสร้างแนวทางการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1-3-1 ศึกษาลักษณะพื้นฐานของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงโดยที่ไม่มีและไม่มีภาระการทำงาน และความเร็วรอบการทำงานคงที่ ที่ 1440 รอบต่อนาที

1-3-2 สร้างโปรแกรมการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ สัญญาณด้วยโปรแกรม MATLAB และ LabVIEW

1-3-3 จำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฟันเฟืองที่ตัวตาม เพื่อใช้ในการตรวจสอบสัญญาณความเสียหายของฟันเฟืองตรง โดยมีการจำลองความเสียหายดังนี้

เงื่อนไขที่1 จำลองสภาวะการทำงานปกติ

เงื่อนไขที่2 จำลองความเสียหายที่พื้นเฟืองตัวตามแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์จำนวน 1 พื้นใน 1 เฟือง

เงื่อนไขที่3 จำลองความเสียหายที่พื้นเฟืองตัวตามแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์จำนวน 1 พื้นใน 1 เฟือง

เงื่อนไขที่4 จำลองความเสียหายที่พื้นเฟืองตัวตามแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์จำนวน 1 พื้นและ 100 เปอร์เซ็นต์จำนวน 1 พื้นบนเฟืองเดียวกันใน 1 เฟืองโดยอยู่ตำแหน่งตรงข้ามกัน

1-3-4 วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ และแยกกลุ่มข้อมูลความเสียหายด้วยวิธีการ วิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวิธีดังกล่าวว่าสามารถแยกกลุ่มความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ครบหรือไม่ ซึ่งความเสียหายดังกล่าวอาจจะไม่สามารถเอาไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้อย่างเหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำเสนอผล งานวิจัยที่มีคุณภาพ ที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งในงานวิจัยนี้คือเฟืองตรงได้ดี และแสดงให้เห็นถึงวิธีการในการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาโดยการแยกกลุ่มความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน และสามารถเผยแพร่ผลงานทางวิชาการในระดับชาติได้

สามารถทราบถึงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาได้ เป็นอย่างดี และสามารถสร้างแนวทางในการศึกษาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนขอเฟืองตรง ด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเฟืองตรงได้

1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเฟืองด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา ของการนำเสนอผลงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งส่วนการทำวิทยานิพนธ์ไว้ทั้งหมด 5 บทดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงบทนำของเรื่องความสำคัญของการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล และภาพรวมของงานวิจัยนี้ โดยระบุวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัยในการทำงานวิจัยไว้ในบทนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้รวบรวมผลงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ ซึ่งจะเป็นผลงานวิจัยทางด้านวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิด ความ

เสียหายขึ้นกับเครื่องจักรกลหมุน เช่น เฟืองตรง แบริ่ง คอมเพรสเซอร์ และเครื่องยนต์เป็นต้น อีกทั้งได้นำเสนอหลักการวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่างๆ ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันและอดีต ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้สรุปแนวทางการทำงานวิจัยและองค์ความรู้ที่รวบรวมจากการศึกษาค้นคว้าจนก่อให้เกิดแนวความคิดในการศึกษาวิจัย

บทที่ 3 จะกล่าวถึง วิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และได้กล่าวถึงการเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลอง การติดตั้งเซนเซอร์ และโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลรวมทั้งการจำลองความเสียหาย เพื่อใช้ในการศึกษาตรวจสอบความเสียหายของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติของชุดทดลอง

บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลของการทดลองที่ได้จากการศึกษา ค้นคว้าของงานวิจัย ทั้งผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์ เริงสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่าความเบ้ ค่ารากกำลังสอง ค่า Crest Factor ค่าพลังงานสัญญาณ รวมถึงค่าความแปรผันร่วมกันของ 2 พารามิเตอร์ จากการทดลองและการเลือกพารามิเตอร์เชิงสถิติในการวิเคราะห์สัญญาณ วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติจากการสร้างขอบเขตความเชื่อมั่น และวิธีการวิเคราะห์ความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ พร้อมทั้งสรุปผลการทดลองทั้งหมด

บทที่ 5 จะกล่าวถึงบทสรุปของการ ศึกษา ค้นคว้า วิจัยของวิทยานิพนธ์โดยสรุปที่นำเสนอในงานวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในการทำงานวิจัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โดยทั่วไปการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน โดยการใช้วิธีการวัดค่าด้วยเซนเซอร์อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อใช้ในการ ตรวจสอบ สภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน เพื่อยืนยันถึงสภาวะการทำงานที่ปกติและยังคงดำเนินต่อไปได้ ปริมาณการวัดจากเซนเซอร์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นการวัดสัญญาณเสียง การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน การวัด สัญญาณความดัน และการวัดค่าอุณหภูมิของการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน ปริมาณเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนได้ แต่โดยส่วนมากที่นิยมจะใช้วิธีการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน เนื่องจากมีความสอดคล้องกับลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลที่มีการเคลื่อนเป็นคาบเวลาและสามารถนำสัญญาณที่ได้มาผ่านกระบวนการการแปลงสัญญาณ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในขั้นตอนต่อไปของกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำสัญญาณการสั่นสะเทือนในการตรวจหาความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนและทฤษฎีในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน เช่น วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณโดยจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) และจะทำการสรุปโดยรวมมององค์ความรู้ที่ได้มีการศึกษา เพื่อที่จะนำวิธีการที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ ซึ่งจะได้นำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและทดลองที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

ในบทนี้ส่วนที่หนึ่งจะกล่าวถึง งานวิจัยในส่วนของการตรวจสอบสภาวะความเสียหายโดยการจำลองความเสียหายให้เกิดขึ้น เช่น การจำลองให้ระบบทำงานผิดไปจากเดิม การจำลองความเสียหายโดยการเปลี่ยนแปลงภาระน้ำหนัก การจำลองความเสียหาย เช่น การบิ่น การแตกและหัก ที่ต่างไปจากเดิม แต่สอดคล้อง กับสภาวะที่เกิดขึ้นจริง ส่วนที่สองจะกล่าวถึงเทคนิควิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุนที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยอื่นที่ได้ศึกษามาแล้ว และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการสรุปวิธีการ ของงานวิจัยศึกษาที่ผ่านมา เพื่อนำมาเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการระบุเป้าหมายและทิศทางของวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

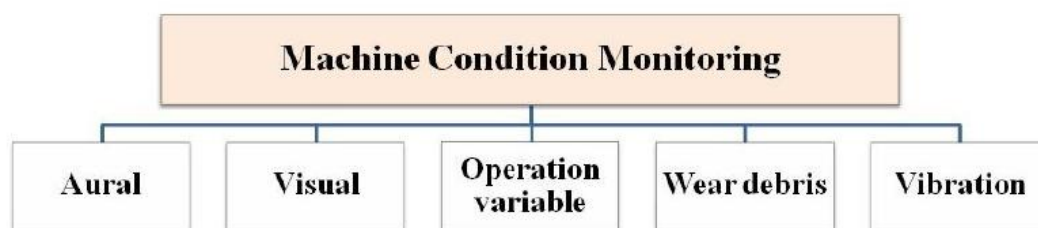
2.2 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาเรื่องการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ส่วนที่หนึ่งจะนำเสนอการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนชนิดต่างๆ ซึ่ง มีการเคลื่อนที่และทำงานเป็นคาบเวลาด้วยเช่นกัน เช่น ตลับลูกปืน คอมเพรสเซอร์ เครื่องยนต์ เป็นต้น ส่วนที่สองจะนำเสนอการตรวจสอบความเสียหายของชุดระบบส่งกำลังที่มีเฟืองแบบต่างๆเป็นส่วนประกอบ โดยการใช้เทคนิคการ วิเคราะห์สัญญาณ ในการตรวจสอบที่แตกต่างกันไป ทั้ง วิธีการวิเคราะห์สัญญาณในการตรวจสอบและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหาย

2.2.1 การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน

การตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนทุกชนิดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการศึกษาถึงสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลที่ปกติและผิดปกติ มีพารามิเตอร์ใดบ้างที่มีความสามารถในการอธิบาย ถึงพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนได้ หรือมีเครื่องมือวัดชนิดใดบ้างที่ใช้วัดปริมาณความเสียหายและความผิดปกติที่เกิดขึ้นของเครื่องจักรกลหมุนที่ศึกษาอยู่นั้น การตรวจสอบความเสียหายเป็นหนึ่งงานหลักของวิศวกร รมมเครื่องกลที่ดูแลในส่วนของ การซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกล แบบที่สามารถทำนายความเสียหาย (Preventive Maintenance) หรือคาดการณ์ความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนได้ล่วงหน้า ซึ่งการอาศัยประสบการณ์ทำงานเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การตรวจสอบความเสียหายแบบคาดการณ์ล่วงหน้าประสบความสำเร็จในการทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้น แต่สิ่งที่สำคัญมากกว่านั้นก็คือ ระบบที่จะนำมาใช้เป็น เครื่องมือวัดความเสียหายที่เกิดขึ้น และสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ระบบที่กล่าวถึงนั้นก็คือ โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่เข้าใจง่ายๆไม่ซับซ้อน แต่สามารถแยกแยะได้ว่า ข้อมูลชุดใดปกติ และข้อมูลชุดใดเสียหายนั่นเอง โดยทั่วไปการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนของวิศวกรเครื่องกลที่ดูแลในส่วนของการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ในประเทศไทยนั้น นิยมนำโปรแกรมสำเร็จรูปมา ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกล ซึ่งไม่ค่อยมีการพัฒนา ซอฟต์แวร์เพื่อ ใช้ตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลเฉพาะงานขึ้นเองมากนัก ผู้ผลิตโปรแกรมการ วิเคราะห์การทำงานสำเร็จรูปได้ทำการศึกษาและวิจัยกันมานานหลายสิบปีจึงได้มีศักยภาพและ เทคโนโลยีที่ดีกว่า ประกอบกับมีความน่าเชื่อถือทางด้านผลิตภัณฑ์ในการใช้ตรวจสอบ

การตรวจสอบเครื่องจักรกลหมุนโดยทั่วไปที่มีการตรวจสอบกันส่วนใหญ่ก็จะมีวิธีการตรวจสอบขั้นพื้นฐานที่กระทำกัน ดังแผนภาพที่แสดงในภาพที่ 2-1



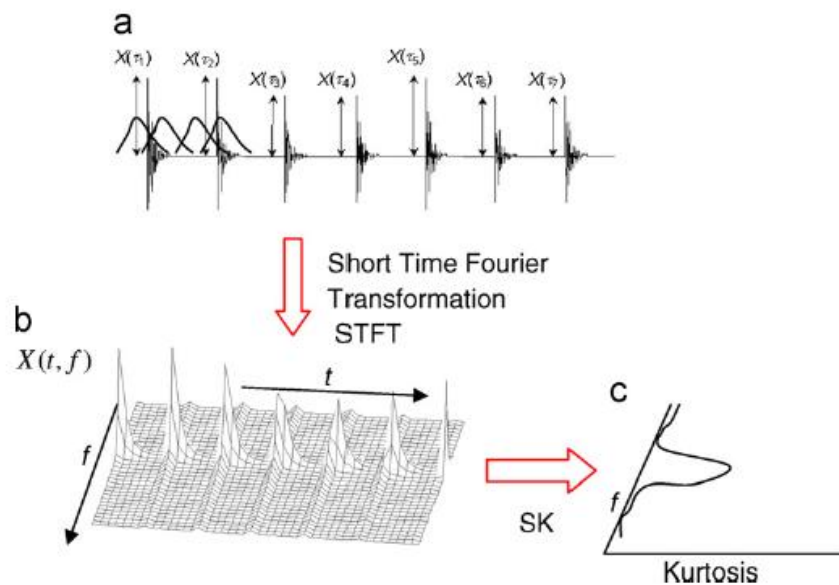
ภาพที่ 2-1 วิธีการตรวจสอบเครื่องจักรกลหมุน [1,3]

การฟังเสียง การทำงานของเครื่องจักรกลเป็นวิธีการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือตรวจสอบความเสียหายในเบื้องต้นได้ดี และปัจจุบันก็ยังใช้อยู่ซึ่งเป็นการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก อาศัยประสบการณ์ทำงานกับเครื่องจักรกลเป็นเวลานาน มากเท่านั้น การมองและสังเกตคือการตรวจสอบด้วยสายตา ก็เป็นอีกวิธีการที่ช่วยร่วมกับการฟังเสียงที่จะต้องดำเนินงานควบคู่กันไป ซึ่งตาดูหูจะต้องฟังเสียง วิธีการดังกล่าวนี้กระทำอยู่บนพื้นฐานของการใช้ประสาทสัมผัสทั้ง 5 อีกวิธีการหนึ่งหากเป็นเครื่องจักรกลหมุนจะต้องมีการใส่หรืออัดสาร หล่อลื่น เนื้อสารของสารหล่อลื่นสามารถนำมาวิเคราะห์ได้เช่นกัน เช่น วิเคราะห์หาอนุภาคของชิ้นส่วนของเพลลาจากการเสียดสีกันระหว่างชิ้นงาน และการวิเคราะห์สีของสารหล่อลื่น เป็นต้น [1]

การตรวจสอบความเสียหายของ เครื่องจักรกลหมุนแรกเริ่มได้ มีการตรวจสอบความเสียหายจากตลับลูกปืนของเพลลาและอุปกรณ์ต่างๆที่มีการหมุน เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรงที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องกลหมุนและส่งผลต่อการทำงานของชิ้นส่วนทางอื่นๆ เช่น ความเสียหายเนื่องจากเม็ดลูกปืนความเสียหาย เช่น ความเสียหาย เนื่องจากการเยื้อง ศูนย์ของเพลลา ความเสียหายเนื่องจากความไม่สมดุล ความเสียหายของคอมเพรสเซอร์ ความเสียหายของระยะเวลาวัลวเครื่องยนต์สี่จังหวะ และความเสียหายของชุดส่งกำลัง เป็นต้น

งานวิจัยของ Randall และ Antoni [2-5] ได้อธิบายไว้อย่างละเอียดมาก เกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน ซึ่งถือได้ว่าเป็น ตัวอย่างวิจัยที่ดีมากและสามารถนำมาต่อยอดได้ดีหากนำวิธีการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ การ วิเคราะห์สัญญาณที่กล่าวไว้ในบทความประกอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ บนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนเวลา- ความถี่ ซึ่งเป็นที่ยอมรับในแวดวงของการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนแสดงดัง ภาพที่ 2-2 ซึ่งเป็นการจำลองสัญญาณการสั่นสะเทือนของความเสียหายของตลับลูกปืน โดยจะนำเสนอเทคนิคจากการประมวลผลสัญญาณ ด้วยการตรวจหาสัญญาณการกระแทกที่เกิดขึ้น โดย วิธีการ วิเคราะห์

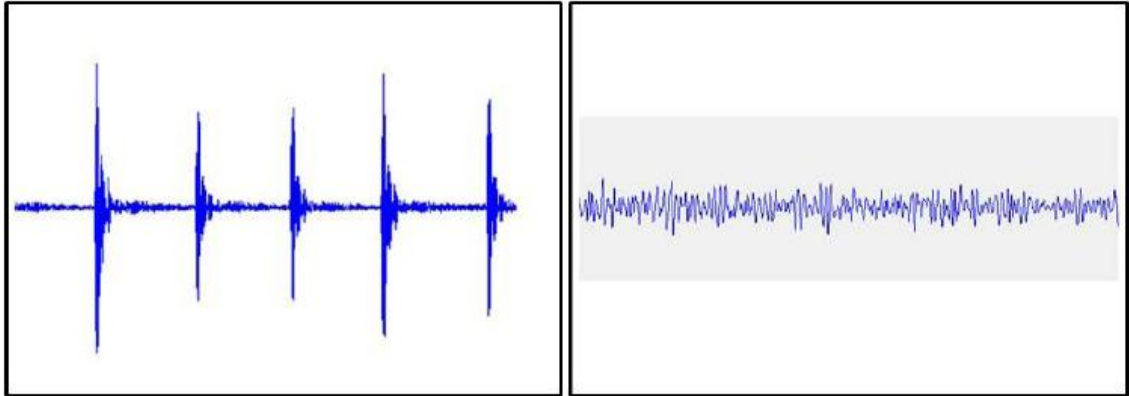
สัญญาณบน โดเมนเวลา-ความถี่ พร้อมกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติเปรียบเทียบ งานวิจัยนี้ได้ใช้ Spectrum Kurtosis ในการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการวิเคราะห์อีกวิธีหนึ่ง ที่จะสามารถวิเคราะห์ความเสียหาย เนื่องจากการเกิดการกระแทกในตลับลูกปืนได้ งานวิจัยนี้ให้ความสนใจศึกษาค้นคว้าในเรื่องการประมวลผลข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา บนโดเมนความถี่ และบนโดเมนเวลา- ความถี่ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าวจะ ต้องทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา เป็นโดเมนความถี่ ปัญหาที่งานวิจัยนี้นำเสนอคือ ช่วงการกรองสัญญาณที่เหมาะสม และข้อผิดพลาดจากการ แปลงจากเวลาเป็นความถี่ที่มีสัญญาณรบกวนมากๆ จากเครื่องจักรกลที่มีชิ้นส่วนทางกลที่ซับซ้อน



ภาพที่ 2-2 ผลของการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและความถี่ของสัญญาณจำลองการกระแทกของตลับลูกปืน [23]

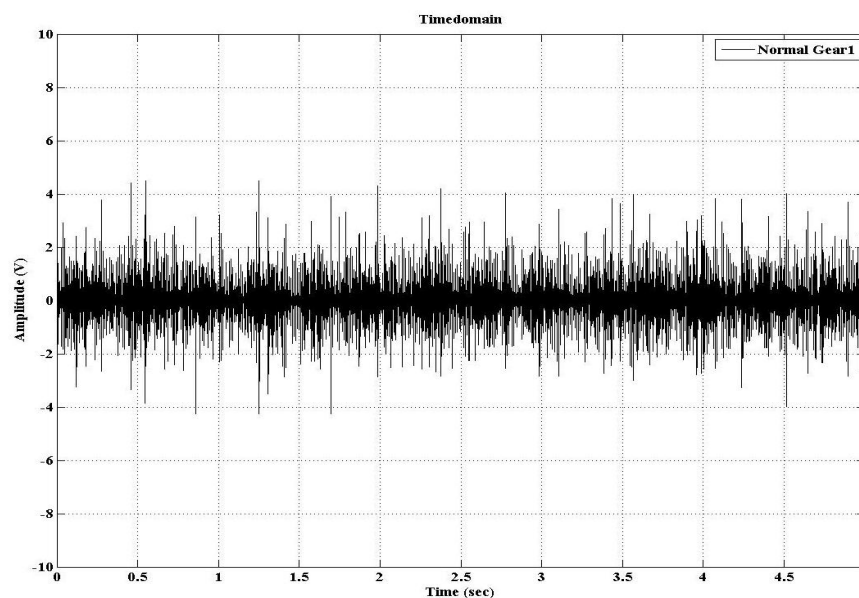
สัญญาณการสั่นสะเทือนทางกล คือสัญญาณของการเคลื่อนที่ของวัตถุที่วัดได้ โดยใช้หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) ซึ่งมีระบบแบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ Spring และ Damp ทำให้สัญญาณที่วัดได้นั้น มีลักษณะดัง ภาพที่ 2-3(a) - 2-3(c) สัญญาณการสั่นสะเทือนมีลักษณะทางกลอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เรียกว่า Burst signal หรือ Transient signal ดังภาพที่ 2-3(a) คือ สัญญาณเกิดขึ้นแล้วค่อย ๆ หายไปซึ่งอาจบ่งบอกถึงการกระแทก หรือการกระทบกันของชิ้นส่วนทางกล สัญญาณลักษณะนี้จะมี แอมพลิจูดที่สูงและ แบบที่ 2 เป็นแบบ Continuous Type ภาพที่ 2-3(b) คือ สัญญาณเกิดอย่างต่อเนื่องบ่งบอกและอธิบายถึงพฤติกรรมที่เกิดจากการไหลของของไหล ความถี่สูงหรือชิ้นส่วนทางกลที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีแอม

พลิจูดการสั่นสะเทือนต่ำแต่ต่อเนื่อง [1] ส่วนภาพที่ 2-3 (c) คือรูปของลักษณะสัญญาณเนื่องจากการทำงานของเฟืองที่วัดจริง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีสัญญาณทั้งสองแบบผสมอยู่



(a) Burst Type or Transient Type

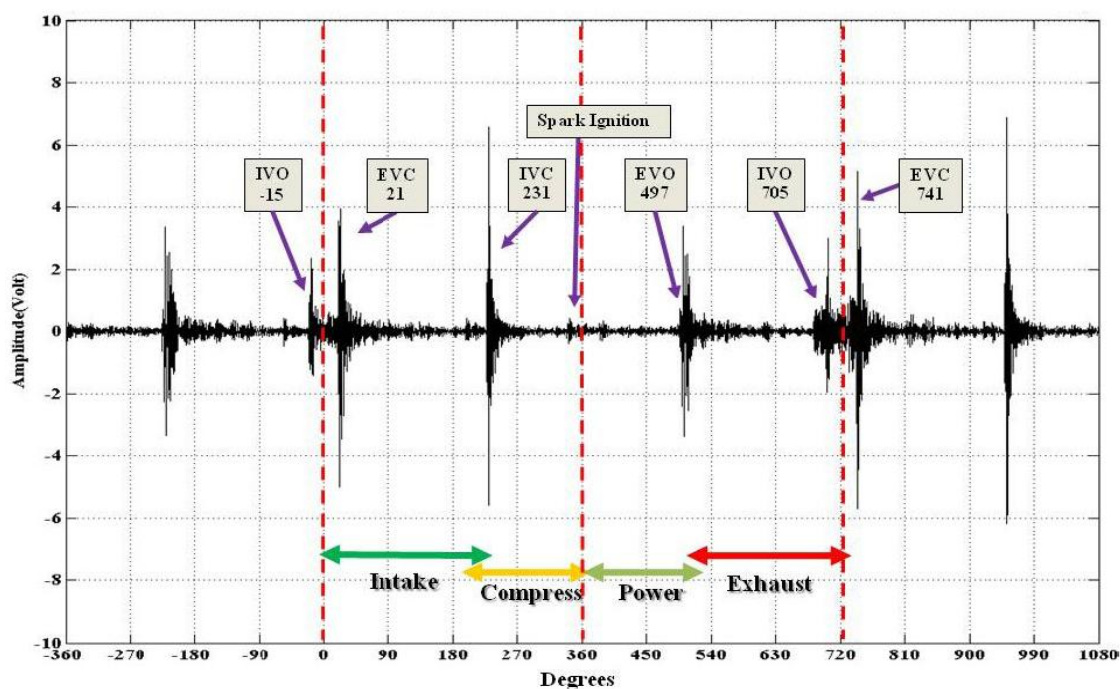
(b) Continuous Type



(c) Raw vibration signal acquired from a running gear

ภาพที่ 2-3 สัญญาณการสั่นสะเทือนทางกลประเภทต่าง ๆ

ทรงพล และ พรชัย [6] ได้ทำการศึกษาลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของระยะ Clearance ของวาล์วไอดี ไอเสียของเครื่องยนต์สี่จังหวะ ได้นำเสนอผลงานวิจัยในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งช่วยชี้ให้เห็นถึงการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์บนโดเมนเวลา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของระยะ Clearance ของวาล์วเครื่องยนต์สี่จังหวะได้เป็นอย่างดี และผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 2-4

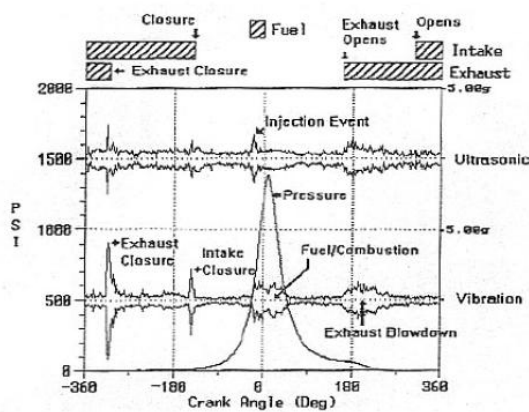


ภาพที่ 2-4 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์
แก๊สโซลีน 1 สูบสี่จังหวะของเหตุการณ์ของ Valve timing [6]

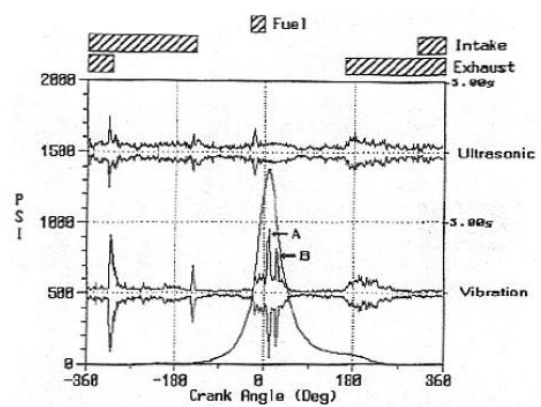
จากผลการทดลองที่ได้สามารถบ่งบอกถึงลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระทบกันระหว่างชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล 2 ชิ้นส่วน เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนกับการทำงานของวาล์วไอดีและไอดีเสีย ของเครื่องยนต์ จะพบว่า เหตุการณ์ที่แอมพลิจูดสูงๆ ที่เป็นลักษณะของ Burst signals คือเหตุการณ์การเปิดปิดของวาล์วไอดี และวาล์วไอดีเสีย และสัญญาณที่มีแอมพลิจูดใกล้เคียงกันและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องคาดว่า เป็นกระบวนการไหลของของไหลจากการเผาไหม้และสันดาปภายในของเครื่องยนต์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนทางกลที่ได้กล่าวไว้เมื่อตอนต้น นอกจากนี้งานวิจัยยังสามารถแยกกลุ่มสัญญาณความเสียหายจากการทำจำลองความเสียหายที่ระยะ clearance ของวาล์วไอดีและไอดีเสีย ด้วยวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ เช่น ค่าพลังงานสัญญาณ เป็นต้น

นอกจากการศึกษาคู่มือ ตรวจสอบความเสียหายเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 1 สูบสี่จังหวะแล้ว การตรวจสอบความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซลก็ได้ถูกนำเสนอค่อนข้างมากเช่นกัน เนื่องจากเป็นเครื่องจักรกลทางด้านการเกษตรและคมนาคม ซึ่ง งานวิจัยของ Long และ Boutin [7] ถือได้ว่าเป็นตัวอย่างของวิธีการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลได้เป็นอย่างดี และนำงานวิจัยนี้ไปอ้างอิง สัญญาณที่แสดงดัง ภาพที่ 2-5 แสดงถึงการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ บันทึกได้พร้อมกับสัญญาณอัลตราโซนิก และทำการเปรียบเทียบ

สัญญาณกับเหตุการณ์บนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยงของการเคลื่อนที่ของลูกสูบ อีกทั้งยังเก็บบันทึกสัญญาณความดันภายในการกระบอกสูบด้วย โดยที่สัญญาณปกติแสดงดัง ภาพที่ 2-5(a) และสัญญาณความเสียหายจากการเสียดสีของลูกสูบที่เกิดขึ้นแสดงดัง ภาพที่ 2-5(b) นอกจากผลการทดลองจากการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลดังกล่าวแล้ว ยังมีการตรวจสอบการกระพือของวาล์วไอดีและไอดีด้วย [7-8]



(a) สภาวะปกติ

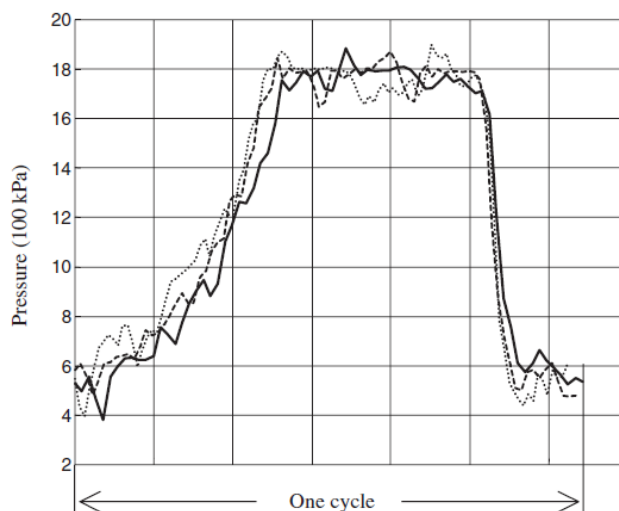


(b) สภาวะที่กระบอกสูบ A และ B ถูกเสียดสี

ภาพที่ 2-5 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ [7]

คอมเพรสเซอร์อัดอากาศ เป็นเครื่องจักรกลหมุนอีกประเภทหนึ่งที่มีการศึกษาในเรื่องการตรวจสอบความเสียหายอยู่พอสมควร เนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่มีความสำคัญอีกชนิดหนึ่ง การตรวจสอบความเสียหายของคอมเพรสเซอร์อัดอากาศแบบลูกสูบ J. D. Gill [9] ได้นำเสนอถึงการ เปรียบเทียบสัญญาณบนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยง และการตรวจสอบการรั่วของวาล์วด้านดูดและด้านส่งของคอมเพรสเซอร์ได้เป็นอย่างดี โดยภาพรวมการตรวจสอบความเสียหายของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ นั้นผู้วิจัยได้มีการประยุกต์วิธีการตรวจสอบ ไปใช้ตรวจสอบสภาวะของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบด้วย ซึ่งสามารถศึกษาค้นคว้าถึงเทคนิควิธีการของผู้วิจัยนี้ได้จากงานวิจัยอื่นอีกมากมายเกี่ยวกับการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องยนต์

การตรวจสอบความเสียหายของโรตารีคอมเพรสเซอร์ ได้มีการศึกษาการตรวจสอบความเสียหายโดยใช้วิธีการวัดสัญญาณความดันที่ออกจาก คอมเพรสเซอร์ที่ตำแหน่งของวาล์วด้านส่งโดย Ferraris [10] ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 2-6 ซึ่งวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโรเตอร์และแสดงเป็นกราฟ orbit เพื่อวิเคราะห์ระยะ clearance การหมุนของโรเตอร์โดยใช้ LVDT เซนเซอร์



ภาพที่ 2-6 สัญญาณความดันของโรตารีคอมเพรสเซอร์ขนาด 24000 BTU ที่ความเร็วรอบการทำงาน 3 ระดับ, (เส้นจุด) 4860 rpm, (เส้นขีด) 6000 rpm, (เส้นทึบ) 7200 rpm. [10]

ในส่วนนี้ได้อธิบายและนำเสนอผลงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาวิธีการในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนชนิดอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องจะมีการตรวจสอบ สภาพให้พร้อมใช้งาน เช่น ตลับลูกปืน (Bearing) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) และเครื่องยนต์ (Engines) เป็นต้น ซึ่งที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนถือว่าเป็นวิธีการที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรม และเป็นวิธีการที่ให้คำตอบถึงพฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้นของสัญญาณ หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุที่วัดได้เป็นอย่างดี ในส่วนต่อไป จะได้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่น สะเทือน และการตรวจสอบสถานะความเสียหายของเฟืองตรงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

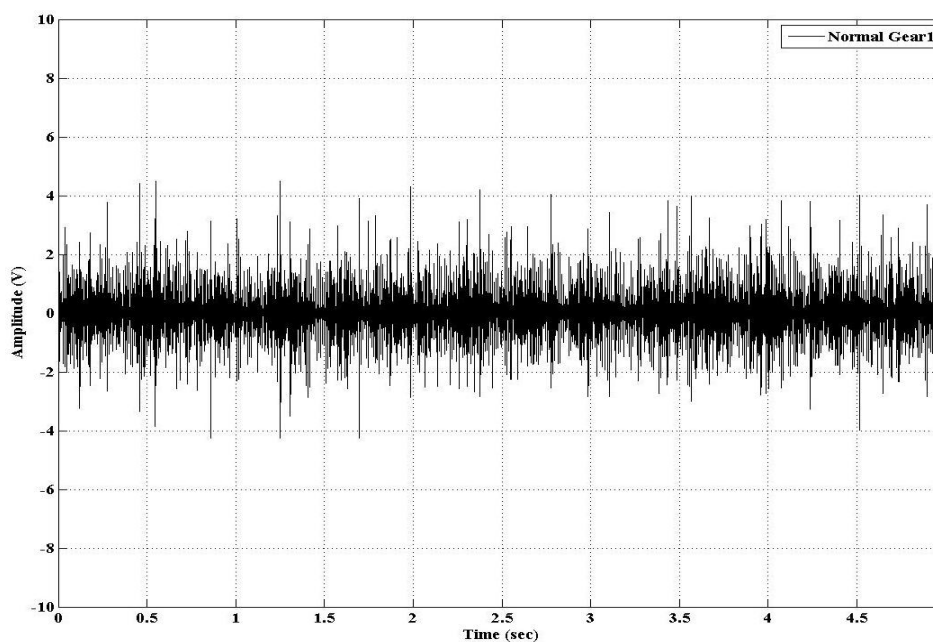
2.2.2 การตรวจสอบความเสียหายของเฟือง

การตรวจสอบความเสียหาย ของระบบเฟืองได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยมาในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา โดยวิธีการเริ่มต้นแบบดั้งเดิม ก็คือ การตรวจสอบโดยใช้ระบบประสาทสัมผัส ของคน เช่น การสัมผัสการสั่นของพื้นผิวของเครื่องจักร การฟังเสียงการทำงานของ เครื่องจักร การดมกลิ่นจากการไหม้ของชิ้นส่วนจา กการเสียดสีของชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล [1] เพื่อใช้ในการตัดสินใจถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด แต่วิธีการดังกล่าวว่าจะตรวจวัดได้ความเสียหายที่รุนแรงได้เกิดขึ้นเสียแล้ว และเป็นสิ่งที่ทำได้ยากขึ้นอีกเมื่อชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลมีมากขึ้นส่วนขึ้น และมีความซับซ้อนในการเชื่อมต่อกันของแต่ละชิ้นส่วน การที่จะใช้ความชำนาญของ

การทำงานอยู่กับเครื่องจักรกลเป็นเวลานาน นับสิบปีก็อาจมีความผิดปกติเกิดขึ้นได้เสมอ สัญญาณการสั่นสะเทือนได้ถูกนำมาใช้ ในการตรวจวัดเครื่องจักรกลที่มีการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบเวลา โดยใช้เซนเซอร์ที่ผลิตจากวัสดุควอตซ์ทำเป็นหัววัด การสั่นสะเทือน (Accelerometer) การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยเซนเซอร์ เป็นเพียงค่าทางไฟฟ้า ที่มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมทางกลที่ได้จากเซนเซอร์ แต่เหนือสิ่งอื่นใดคือวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ถูกบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลดิบจากการวัดเทียบกับพฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้น

การตรวจสอบความเสียหายของชุดเฟืองได้มีการศึกษาวิจัย โดยการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่หลากหลายวิธี เพื่อหาความเหมาะสมที่จะนำวิธีการวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้กับระบบการทำงานของตนเอง ในปัจจุบันการวิเคราะห์ความเสียหายของระบบเฟืองจากสัญญาณการสั่นสะเทือนมีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time Domain) วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา-ความถี่ (Time-Frequency Domain) วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ (Statistical Analysis) วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยวิธีโครงข่ายความสัมพันธ์ จากการแยกกลุ่มความสัมพันธ์เพื่อจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition and Neural Network) [1]

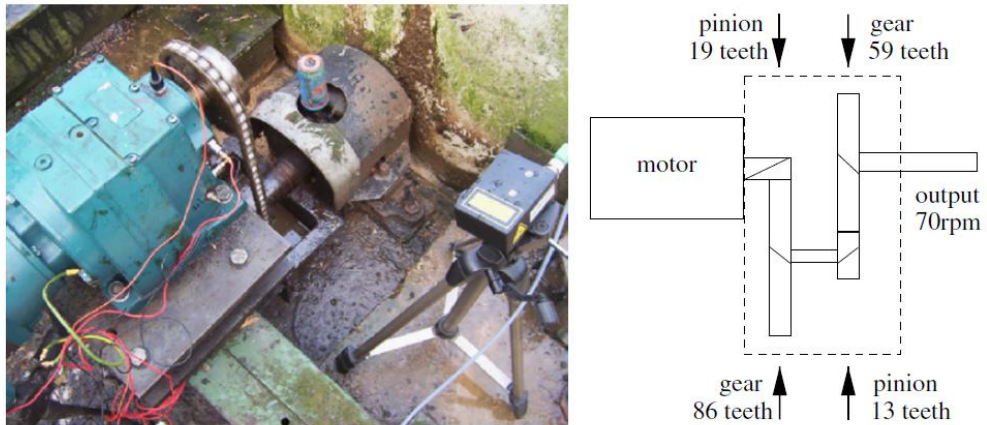
การทำงานของเฟืองตรงเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องตามความเร็วรอบของตัวขับ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้ดังภาพที่ 2-7 ได้จากการเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลองของงานวิจัยนี้ ซึ่งไม่มีภาระการทำงานเดินเครื่องชุดทดลองแบบไม่ใส่ภาระ สัญญาณที่ได้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการทำงานของเฟืองตรงได้ จากลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนเช่น การกระทบกระเทือนของฟันเฟือง การแตกหักของฟันเฟือง การบิ่นของฟันเฟือง และการแตกร้าวของฟันเฟือง หากเกิดความเสียหายขึ้นกับฟันเฟือง จะทำให้สัญญาณที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และรูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแตกต่างจากสัญญาณในสภาวะการทำงานที่ปกติ เป็นต้น



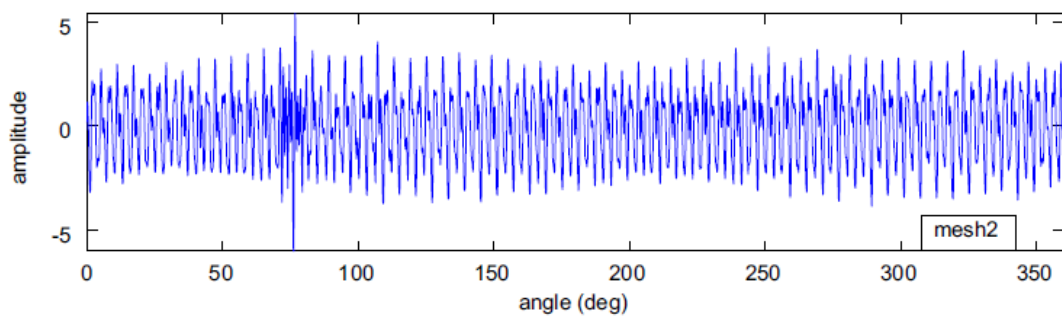
ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรงปกติ หมายเลข 1

งานวิจัยของ Combet และคณะ [11-13] ได้เสนอวิธีการตรวจสอบความเสียหาย ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา ซึ่งวิธีการวิเคราะห์สัญญาณจะทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณต่อรอบการทำงานของเฟืองตรง โดย สัญญาณการสั่นสะเทือนแต่ละรอบการทำงานสามารถหาได้โดยใช้สัญญาณความเร็วรอบของเพลลา และแสดงเทียบกับมุมเพลลาข้อเหวี่ยง (Crank angle) ซึ่งทำให้สามารถนำมาอธิบาย การทำงานของเฟืองตรงต่อหนึ่งรอบการทำงาน โดยที่ชุดทดลองของการศึกษาแสดงได้ดัง ภาพที่ 2-8 และผลเฉลี่ยของสัญญาณต่อรอบของเฟืองตรงที่มีผิวเสียหาย 10% แสดงดังภาพที่ 2-9 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่บันทึกมากกว่า 800 รอบการทำงาน

การเก็บข้อมูลของการศึกษา นี้จะวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากหัววัดที่ ติดตั้งที่ ตำแหน่งตัวเรือนแบริ่ง (Bearing Housing) ของชุดเฟืองขับ และสัญญาณความเร็วรอบการทำงานของชุดทดลอง จะวัดโดยใช้ Tachometer เงื่อนไขการทดลองของการศึกษานี้ ได้จำลองความเสียหายของฟันเฟืองโดยทำให้หน้าสัมผัสของเฟืองเสียหายแบบ pitting และ scoring ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จากผิวสัมผัสเดิม ในสภาวะปกติ และทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่ 70 rpm โดยสัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกพร้อมกัน



ภาพที่ 2-8 ชุดทดลองของ Combet และคณะ [11]



ภาพที่ 2-9 สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงที่เฉลี่ยแล้ว ในสภาวะผิวเฟืองเสียหาย 10%

[11]

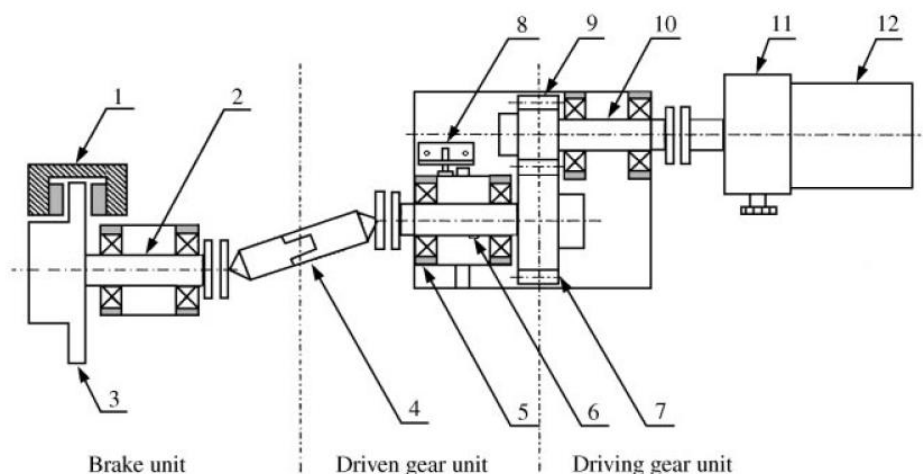
จากผลการทดลองสรุปว่าวิธีการเฉลี่ยค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละรอบการทำงานของเฟืองตรง (Time Synchronize Average) สามารถเห็นความผิดปกติของลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ หากความเสียหายที่หน้าสัมผัสฟันเฟืองเกิดขึ้นมากพอ ซึ่งผลของสัญญาณที่ได้จะปรากฏลักษณะสัญญาณแปลกปลอม ดังภาพที่ 2-9 ในบริเวณที่ตำแหน่งองศาที่ 70-80 ของเฟืองตรง

นอกจากนี้ STANDER และ HEYNS [14] ได้ทำการศึกษาวิธีการเฉลี่ยค่าสัญญาณบนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยงเช่นเดียวกัน โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดสมการที่ใช้วิเคราะห์ที่เรียกว่า a normalised relative difference value (NRDV) ซึ่งเป็นวิธีการประมวลผลสัญญาณจากค่าความสัมพันธ์ที่ต่างกันเท่านั้น ผลของค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับงาน COMBET [11] แต่มีความชัดเจนมากขึ้นและสัญญาณรบกวนก็จะลดทอนลงได้

ด้วย การวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Time Synchronize Average เป็นวิธีการที่เข้าใจได้ง่าย เพราะพิจารณาจาก noise ผิดปกติของสัญญาณที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการทำงานของเฟืองที่ทำงานการตรวจวัดสัญญาณ วิธีการทำไม่ซับซ้อนมากนัก แต่ผลของการทดลองจะวิเคราะห์ลำบากหากมีสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามาสูงและขึ้นส่วนของชุดเฟืองซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยของ ANDRADE และคณะ [12] ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยถึงการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเฟืองตรงจากการแตกร้าวและแตกหักของฟันเฟือง เนื่องจากความล้มเหลวในการทำงานโดยการเพิ่มภาระ การทำงานจากแรงบิด จึงทำให้ชุดเฟืองตรงมีความเสียหายเกิดขึ้น สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา จะถูกวิเคราะห์โดยการหาค่า พารามิเตอร์เชิงสถิติ ชุดทดลองดังภาพที่ 2-10 เป็นการทดลองภายใต้ภาระการทำงานที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ แต่ในการทดลองจริงใช้ภาระการทำงานคงที่ที่ 20 Nm งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองความเสียหายให้เกิดขึ้นที่ฟันเฟืองทั้งหมด 7 เ็นอนไซดังนี้ เฟืองใหม่ยังไม่ได้ใช้งาน (NB) เฟืองตรงที่ใช้งานแต่สภาพปกติ หมายเลข 1 (NO1) เฟืองตรงที่ใช้งานแต่สภาพปกติหมายเลข 2 (NO2) และการทำการจำลองการแตกร้าว(Crack) ของเฟืองตรง 3 รูปแบบแสดงดังภาพที่ 2-11

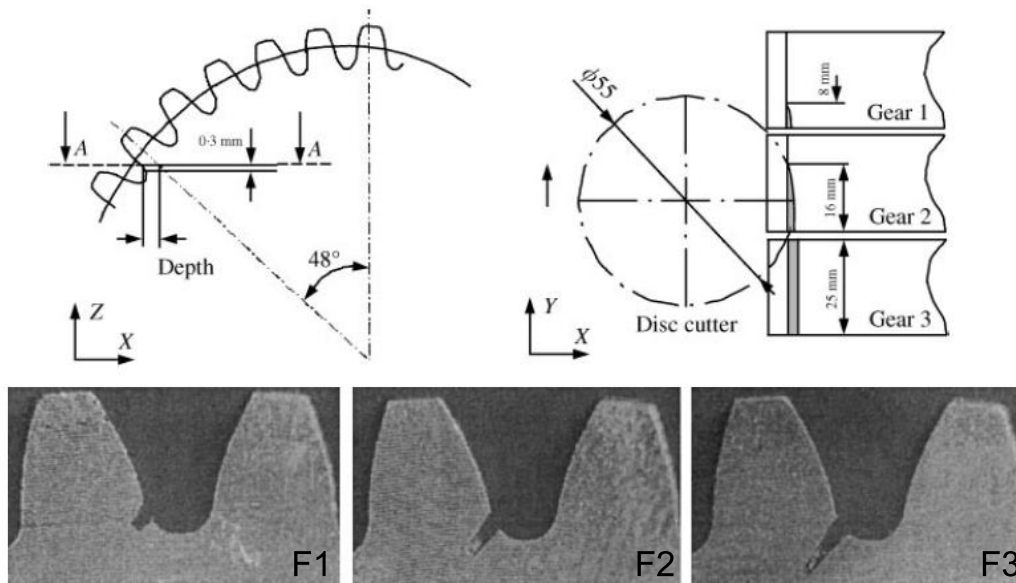
สัญญาณการสั่นสะเทือนถูกเก็บ บันทึกลงเป็นข้อมูลดิบจำนวน 48 ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลละ 4800 จุด ความถี่สุ่ม 12000 Hz โดยที่เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer sensor) ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งหมายเลข 7 บริเวณเฟืองตามของชุดทดลองดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ตัวอย่างชุดทดลองของ ANDRADE [12]

จากรูปด้านบน 1. Brake calliper; 2. Brake shaft; 3. Brake disc; 4. Universal joint; 5. Movable base plate; 6. Output shaft; 7. Driven gear; 8. Spacer block; 9. Driving gear; 10. Input shaft; 11. Kopp variator; and 12. AC motor.

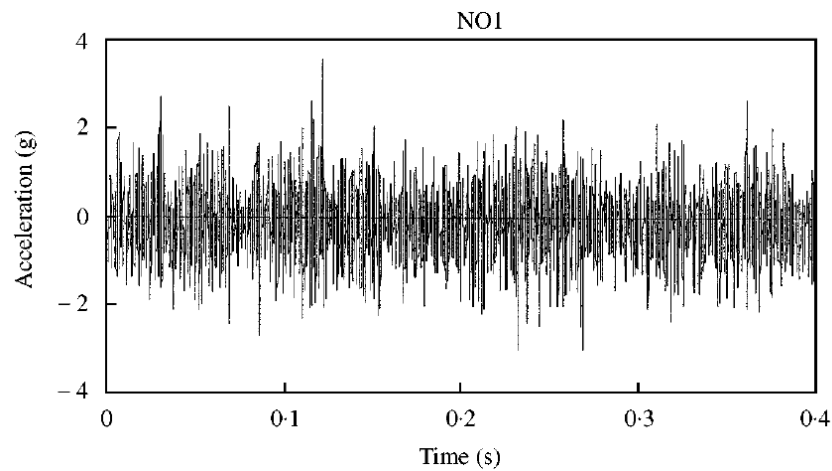
การทดลองของ ANDRADE นั้นทำให้ทราบถึงรูปแบบและลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือน เพื่อใช้ในการประกอบการอธิบายลักษณะทางกายภาพของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรง สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะปกติแสดงดังภาพที่ 2-12 โดยที่แกนนอนเป็นเวลาและแกนตั้งเป็นค่า แอมพลิจูดของ ความเร่งที่ได้จากการแปลงข้อมูลสัญญาณมาแล้วจากค่า แอมพลิจูด ที่มีหน่วย เป็นความต่างศักย์ และเทียบกับระดับค่าการตอบสนองของเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน



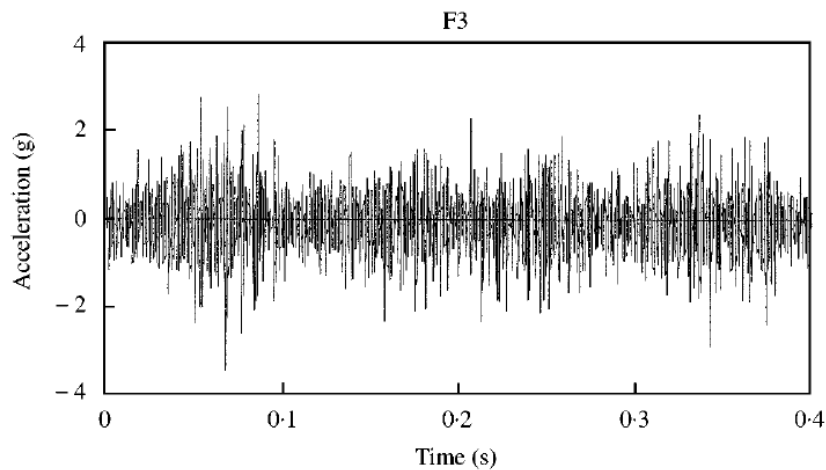
Cut geometry and illustration of crack angle

Gears	Depth (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Angle (deg)
F1	0.8	8	0.3	40
F2	1.6	16	0.3	40
F3	2.4	25	0.3	40

ภาพที่ 2-11 ตัวอย่างการจำลองความเสียหายแบบ Crack เพื่อทำการทดลองของ ANDRADE [5]



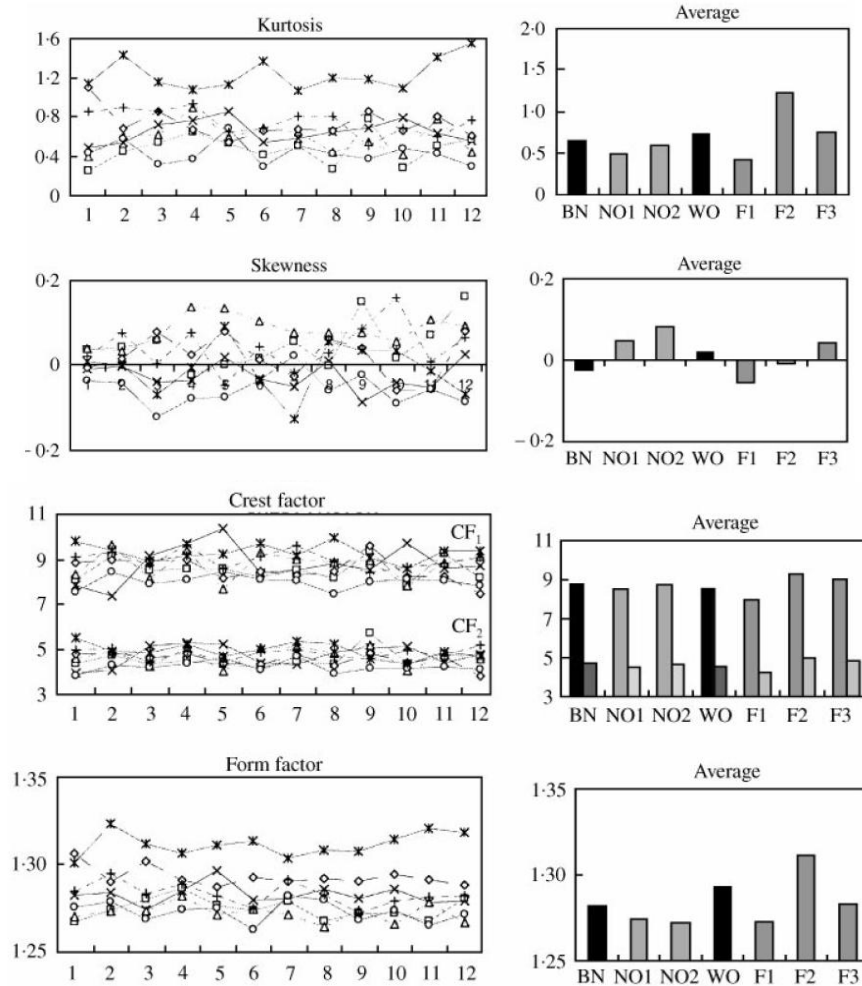
ภาพที่ 2-12 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะปกติ [5]



ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะผิดปกติ
เนื่องจากการ Crack [5]

เซนเซอร์ถูกติดตั้งในตำแหน่งแกนตั้งของ Bearing Housing ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะปกติ แสดงดัง ภาพที่ 2.12 และตัวอย่าง สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงในสภาวะ ผิดปกติเนื่องจากการ Crack (F3) แสดงดังภาพที่ 2.13 เมื่อเฟืองมีความเสียหายเกิดขึ้นจะทำให้ลักษณะของสัญญาณบางเหตุการณ์เปลี่ยนแปลงไป จากเดิมการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาของ งานวิจัยนี้ จะทำให้ทราบลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงที่เกิดขึ้น และสามารถวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนโดยพิจารณาจาก ค่าแอมพลิจูด ของสัญญาณ และพารามิเตอร์เชิงสถิติในการการแบ่งแยกความเสียหายที่เกิดขึ้น ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา และทำการเฉลี่ยทุกชุดข้อมูลแล้ว ใช้แผนภูมิแท่ง

แสดงในคอลัมน์ที่ 2 ได้แก่ kurtosis, skewness, crest factor และ form factor เป็นต้นดังแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ผลการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติในเงื่อนไขต่าง [5]

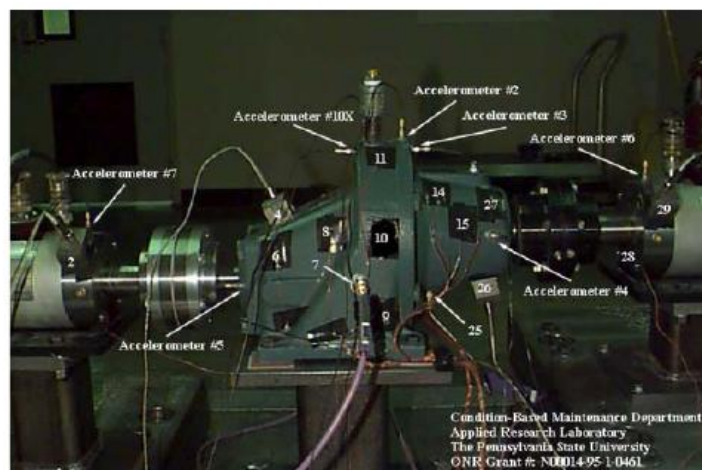
$BN(-\times-), NO1(-\square-), NO2(-\triangle-), WO(-\diamond-), F1(-\circ-), F2(-\times-), F3(-\text{---})$

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถแยกด้วยวิธีการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาได้ และทำการวิเคราะห์ได้ค่อนข้างสะดวก แต่การใช้พารามิเตอร์เชิงสถิติเพียงค่าเดียวยังไม่สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมได้ในทุกเงื่อนไขความเสียหายที่ทดลอง เนื่องจาก ยังมีบางพารามิเตอร์ที่มีช่วงของค่าเชิงสถิติที่คาบเกี่ยวกัน บริเวณไขการทดลองอื่น เช่น ค่า skewness, ค่า crest factor และค่า form factor เป็นต้น ในบางเงื่อนไขการทดลองที่แสดงดัง ภาพที่ 2-14 ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงความสะดวกในการปรับปรุงพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงสถิติได้เป็นอย่างดี เพื่อที่จะนำไป ขยายผลต่อไป

บางส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ ข้อดีของงานวิจัยนี้ คือทำความเข้าใจง่าย วิธีการในการประมวลผลไม่ซับซ้อนมากนัก และสามารถแบ่งแยกความเสียหายที่เกิดขึ้นได้เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิแท่ง

นอกจากวิธีการ วิเคราะห์สัญญาณบน โดเมนเวลาแล้วยังมีวิธีการ วิเคราะห์สัญญาณบน โดเมนความถี่ที่ให้คำตอบที่ ถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยการพิจารณาจากความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนประเภทต่างๆ วิธีการนี้จะใช้ได้ดีหากผู้ปฏิบัติงานรู้เรื่อง และชำนาญการวิเคราะห์สเปกตรัมที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลนั้น ๆ เป็นอย่างดีและถูกต้อง

งานวิจัยของ Zhan [15] ได้แสดงการวิเคราะห์ความเสียหายของเฟืองตรงจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่โดยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นดัง ภาพที่ 2-15 โดยจะทำการจำลองความเสียหาย แบบเพิ่มภาระการทำงานมากขึ้นระหว่างการทดลอง ทั้งหมด 3 เงื่อนไข ดังนี้ ภาระ 100% ของสภาวะปกติ ภาระ 200% ของสภาวะปกติ และ ภาระ 300 % ของสภาวะปกติ ตามลำดับ



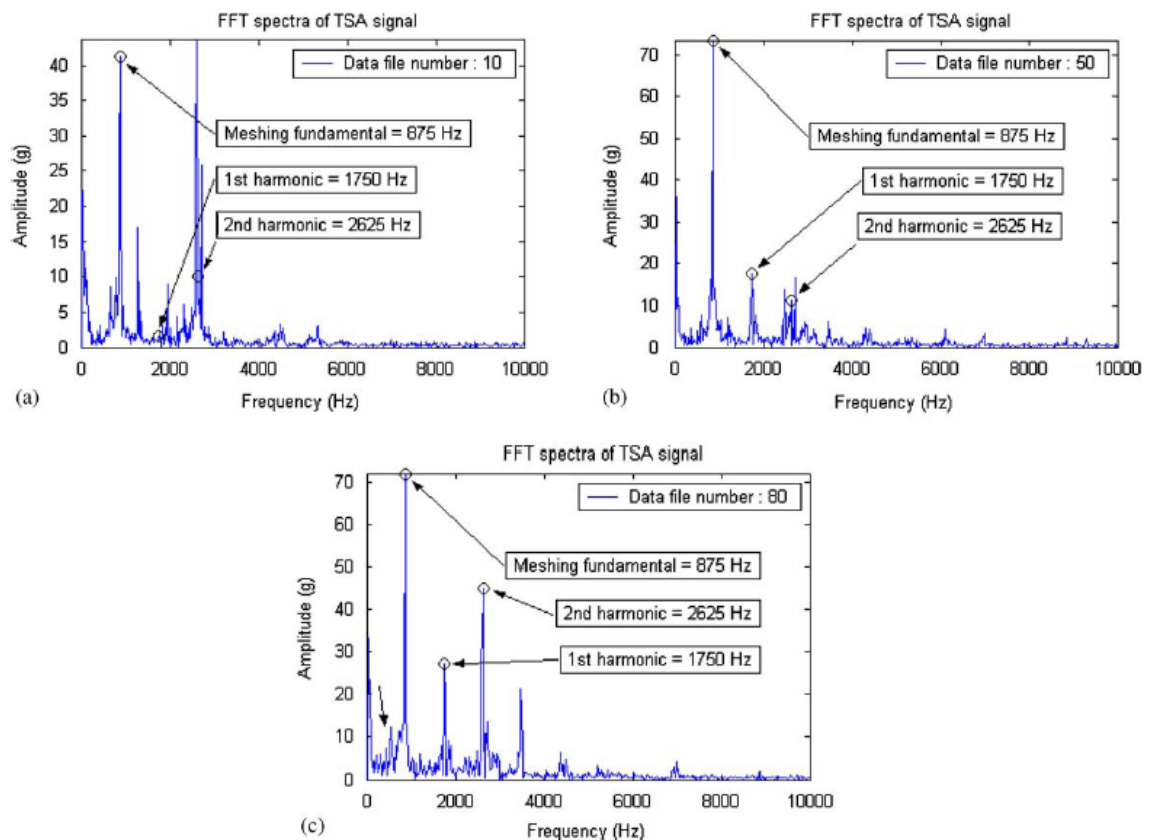
Gearbox specifications for test-runs #9, #7, #5 and #14^a

Gearbox ID#	DS3S0150+09, 07, 05
Make	Dodge APG
Model	R86001
Rated input speed	1750 rpm
Maximum rated output torque	528 in lb
Maximum rated input hp	10.0
Gear ratio	1.533
Contact ratio	2.388
Gear mesh frequency of driven gear (Hz)	875
Gear mesh frequency of pinion gear (Hz)	875

ภาพที่ 2-15 (a) ชุดทดลองของเฟืองตรงและตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ (b) ชุดเฟืองที่ใช้ทดสอบ [12]

การศึกษานี้ ได้ทำการทดลองแบบ บันทึกรหัสข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยแต่ละชุดข้อมูล จะบันทึกทีละ 200000 จุด ด้วยความถี่สุ่ม 20000 Hz และชุดเฟืองตรงที่ใช้ทดลองมีทั้งหมด 2 ชุด คือ ชุดเฟืองหมายเลข 5 และชุดเฟืองหมายเลข 7

สัญญาณการสั่นสะเทือน ที่บันทึกได้จะถูกแปลงให้อยู่บนโดเมนความถี่เพื่อ ใช้วิเคราะห์ความถี่ ของ Mesh gear ที่เกิดขึ้น ในสภาวะปกติ และสภาวะของเฟือง ที่มีการเปลี่ยนแปลง การรับภาระไม่คงที่ กราฟความถี่ของ สัญญาณที่รับภาระการทำงาน 100 % ของเฟืองหมายเลข 5 แสดงดังรูป 2-16(a) พบว่าความถี่ Mesh gear จะปรากฏเด่นชัด ตามด้วย ความถี่ของฮาร์โมนิคของ Mesh gear อันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า แอมพลิจูดสัญญาณไม่คงที่

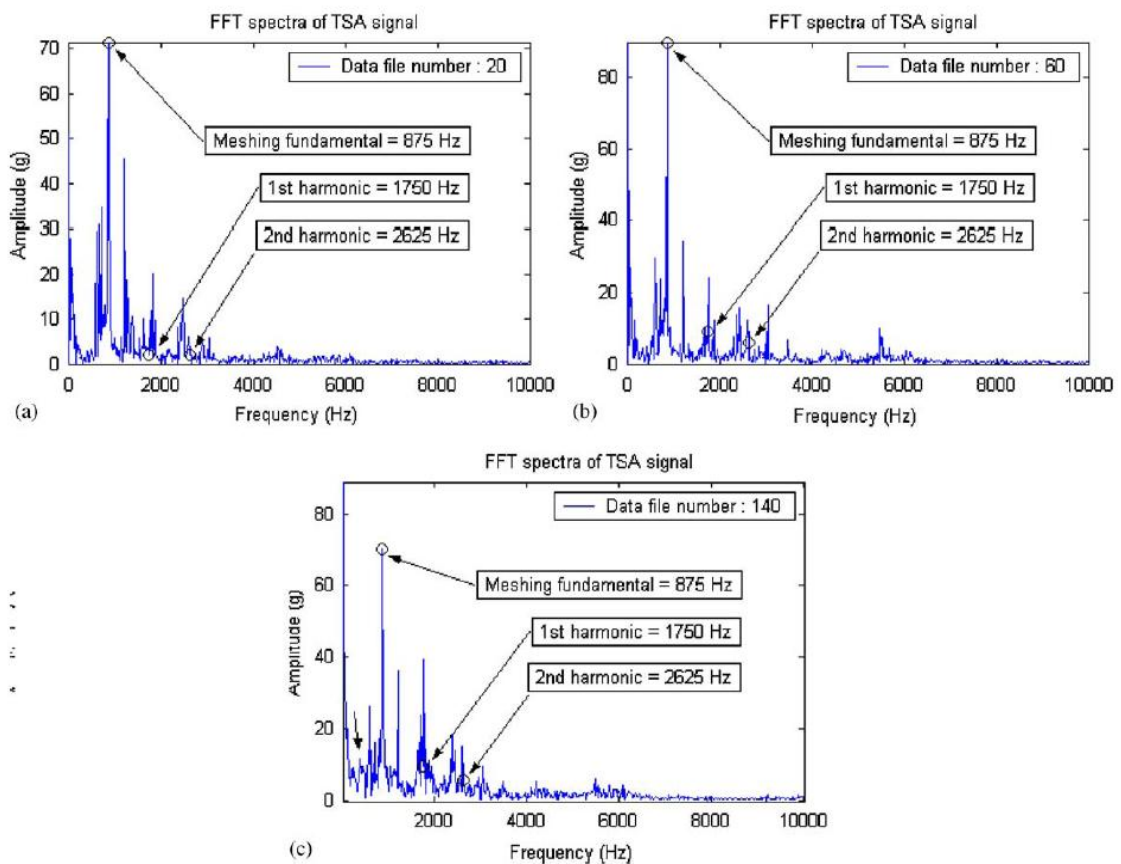


ภาพที่ 2-16 ผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ (a) ไฟล์ที่ 10: รับภาระ 100% ของเฟืองหมายเลข 5 ในสภาวะปกติ (b) ไฟล์ที่ 50: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 5 ในสภาวะปกติ (c) ไฟล์ที่ 80: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 5 ในสภาวะปกติ [15]

จากผลการทดลองดังภาพที่ 2-16 (a-c) สิ่งที่พบคือ เมื่อเฟืองรับภาระในสภาวะปกติ จะพบว่าความถี่ Mesh gear จะมีแอมพลิจูดอยู่ในระดับหนึ่ง แต่เมื่อได้รับแรงอย่าง

กะทันหันแอมพลิจูดของความถี่ Mesh gear จะสูงขึ้น และเมื่อได้รับภาระการทำงานมากขึ้น จะทำให้ความถี่ฮาร์โมนิคของ Mesh gear อันดับที่ 1 และที่ 2 เพิ่มสูงขึ้น ในกรณีจะสังเกตเห็นได้ว่าความถี่ฮาร์โมนิคของ Mesh gear อันดับที่ 2 จะสูงขึ้นเมื่อรับภาระมาก ๆ คือ 300% ของสภาวะปกติดังภาพที่ 2-16(c)

จากผลการทดลองดัง ภาพที่ 2-17(a-c) ผลการทดลองมีลักษณะสเปกตรัมสัญญาณ ที่สอดคล้องกันกับสัญญาณโดเมนความถี่ที่กล่าวก่อนในภาพที่ 2-16 คือฮาร์โมนิคของ Mesh gear สูงขึ้นเมื่อได้รับภาระการทำงานเพิ่มขึ้นอย่าง กะทันหัน ตลอดช่วงที่ทำการเก็บสัญญาณการทำงานของเฟืองหมายเลข 7



ภาพที่ 2-17 ผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ (a) ไฟล์ที่ 20: รับภาระ 100% ของเฟืองหมายเลข 7 ในสภาวะปกติ (b) ไฟล์ที่ 60: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 7 ในสภาวะปกติ (c) ไฟล์ที่ 140: รับภาระ 200% ของเฟืองหมายเลข 7 ในสภาวะปกติ [15]

สัญญาณโดเมนเวลาของเฟืองตรงที่สภาวะปกติ ภายใต้การทำงานแบบรับภาระ เพื่อที่จะนำมาใช้วิเคราะห์หาค่าความถี่ Mesh gear แสดงดังภาพที่ 2.17 (a) โดยแกนนอนคือความถี่

และแกนตั้งเป็น แอมพลิจูด วิธีการนี้เป็นที่นิยมอย่างมากในการวิเคราะห์ความถี่เบื้องต้นของการทำงาน of เครื่องจักรกลหมุนทุกชนิด [1] รวมทั้งระบบของเฟืองด้วย ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่อาจจะใช้ในการวิเคราะห์ระบบทางกล ที่มีชิ้นส่วนทางกล ชับซ้อนน้อย ๆ ได้ แต่หากเป็นระบบที่มีชิ้นส่วนทางกลและมีการเชื่อมติดกันของชิ้นส่วนอื่นจะทำให้สเปกตรัมหรือแอมพลิจูดของโดเมนความถี่มีมากขึ้น ด้วย ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ทำได้ยากขึ้น จากผลการทดลองของการศึกษานี้มีข้อดีคือ สามารถมองเห็นความถี่ของ Mesh gear และฮาร์โมนิคของสัญญาณได้ชัดเจนในบางกลุ่มที่เกิดขึ้นที่ ทำให้สามารถรู้ถึงความถี่ของเฟืองตรง และการเคลื่อน ที่ของชุดทดลองทั้งหมด ข้อเสียคือ ไม่สามารถอธิบายทุกรายละเอียดของสเปกตรัมความถี่ ที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด แอมพลิจูดของความถี่ยุ่งยากไม่สม่ำเสมอ ดังสัญญาณตัวอย่างที่กล่าวข้างต้น เช่นกลุ่มความถี่สูงบริเวณที่ 6000 Hz ในภาพที่ 2-17(b-c)

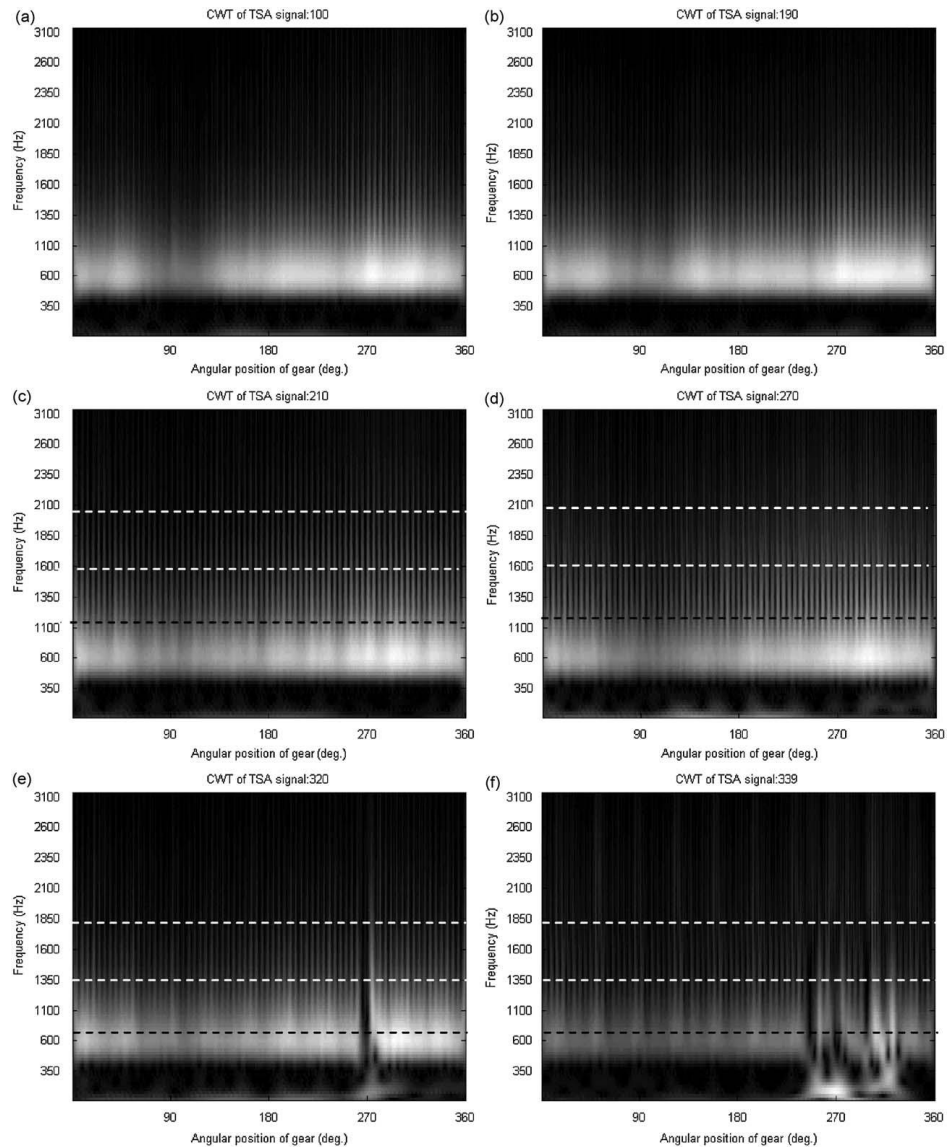
การวิเคราะห์สัญญาณ บนโดเมนเวลา- ความถี่ใช้วิธีการแปลงสัญญาณ เช่น STFT (Short Time Fourier transforms) and Wavelet Transforms [16-21] เป็นต้น วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณขั้นสูง วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการวิเคราะห์บนโดเมนเวลา-ความถี่ (Time-Frequency Analysis) ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงสิบปีที่ผ่านมา และถือว่าเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่ สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีหลายช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนอีกวิธีหนึ่ง แต่วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา-ความถี่ไม่ได้หมายความว่า จะเป็นวิธีการที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับเครื่องจักรกลหมุน ในความเป็นจริงแล้ว การแปลงเวฟเลตเหมาะสำหรับสัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ (non-periodic) มีสัญญาณรบกวนสูง และเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Intermittent signal) หรือมีลักษณะเป็นสัญญาณชั่วคราว (Transient Signal) เนื่องจากการแปลงเวฟเลตสามารถตรวจสอบสัญญาณทั้งใน โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ไปพร้อมๆกัน ด้วยความสามารถที่เหนือกว่าการแปลงฟูริเยร์แบบช่วงสั้น (Short Time Fourier Transforms: STFT) ทำให้การแปลงเวฟเลตถูกใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การตรวจสอบความเสียหายของตลับลูกปืน และเฟือง เป็นต้น

โดยหลักทางคณิตศาสตร์แล้วการแปลงเวฟเลตคือการคอนโวลูชัน (Convolution) ระหว่างเวฟเลตลูก (Daughter or Son wavelet) เช่น Morlet wavelet, Gabor wavelet, Daubechies wavelet, Harr Wavelet, Coiflet wavelet และ Mexican Wavelet เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับว่าวิธีการใดเหมาะสมกับเครื่องจักรกลหมุนประเภทใดหรือ ความต้องการวิเคราะห์ด้วยวิธีการใด

งานวิจัยของ Wang และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาวิจัยในลักษณะที่คล้ายกับ Zhan [15] และ Belsak [20] แต่ทั้งสองงานวิจัยแตกต่างกันตรงที่ งานวิจัยแรกได้ปรับเปลี่ยนภาระการทำงานระหว่างการทำงานจากระบบเฟืองตรงที่ รับภาระการทำงาน จนกระทั่งเฟืองหัก ด้วยการเพิ่มแรงบิดเข้าไปเข้ามาอย่างรวดเร็ว เพื่อที่จะได้เห็น ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง หรือ CWT (Continuous wavelet transform) ของสัญญาณเฉลี่ยในแต่ละรอบที่ผ่านขึ้น ตอนการคำนวณ Time synchronously averaged [19] เสียก่อนที่จะทำการแปลงเวฟเลต โดยสัญญาณจะ บันทึกครั้ง ละ 200000 จุดต่อ 1 ชุดข้อมูล ด้วยความถี่สุ่มที่ 20000 Hz ผลการแปลงเวฟเลต แสดงดังภาพที่ 2-18 (a) สภาวะปกติรับแรงบิด 62.28 Nm, (b) สภาวะปกติรับแรงบิด 31.31 Nm, (c) สภาวะปกติรับแรงบิด 184.46 Nm, (d) สภาวะเฟืองรับแรงบิด 123.77 Nm, (e) สภาวะเฟืองแตกรับแรงบิด 123.77 Nm และ (f) สภาวะเฟืองหักรับแรงบิด 184.46 Nm จากผลการทดลองดังภาพที่ 2-18 การวิเคราะห์เวฟเลตของสัญญาณการสั่นสะเทือน จะถูกพล็อตอยู่บนโดเมนมุมเพลลาในแกนนอน และแกนตั้งคือ ค่าความถี่ที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการทำงาน

ผลของการแปลงเวฟเลตของสัญญาณที่สภาวะปกติดัง ภาพที่ 2-18 (a-b) มีช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นประมาณ 613 Hz ซึ่งเป็นความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1 ของ Mesh gear ส่วนผลการแปลงเวฟเลตของสัญญาณที่สภาวะรับภาระเพิ่มจากเดิมรับอยู่ 100% เพิ่มเป็น 300% และลดลงมาเป็น 200% แสดงดังภาพที่ 2.18(c-d) ตามลำดับ ผลจากการทดลองจะพบช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่เป็นค่าเฉลี่ยของความถี่ที่เกิดขึ้น มีค่าประมาณ 1226 Hz(เส้นปะด้านล่าง) ซึ่งความถี่ Mesh gear ฮาร์โมนิกที่ 2 ส่วนช่วงที่สองจะเป็นค่าเฉลี่ยของความถี่ที่เกิดสูงสุดในช่วงที่พิจารณา(เส้นปะด้านบน) และเส้นปะตรงกลางเป็นค่ากลางระหว่างค่าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้น และส่วนผลของสัญญาณที่ได้รับภาระเพิ่มจากเดิมรับอยู่ 100% เพิ่มเป็น 200% และเพิ่มขึ้นอีกเป็น 300% แสดงดังภาพที่ 2.18(e-f) ตามลำดับ ผลจากการทดลองจะพบช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด 2 ช่วงเช่นกัน คือ ช่วงแรกที่เป็นค่าเฉลี่ยของความถี่ที่เกิดขึ้น มีค่าประมาณ 613 Hz(เส้นปะด้านล่าง) ซึ่งความถี่ Mesh gear ฮาร์โมนิกที่ 1 ส่วนช่วงที่สองจะเป็นค่าเฉลี่ยของความถี่ที่เกิดสูงสุดในช่วงที่พิจารณา(เส้นปะด้านบน) แต่ช่วงที่สังเกตเห็นถึงความเสียหายของเฟืองบริเวณ 270 และ 315 องศา จะเป็นช่วงที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการ crack ของเฟืองที่ใช้ทำการทดลองมีแอมพลิจูดของความถี่เปลี่ยนไปอย่างชัดเจน ผลของการวิจัยที่ได้มีความซับซ้อนมากพอควรในเรื่องของการวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้ วิธีการแปลงเวฟเลตอาจจะสามารถวิเคราะห์ช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างละเอียด แต่การตีความจากผลที่ได้ก็ยากเช่นกัน หากผู้ปฏิบัติงานที่ไม่มีเข้าใจ

อย่างลึกซึ้งในเรื่องการแปลงเวฟเลต ก็อาจจะไม่สามารถอ่านความหมายของกราฟได้ และไม่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้นได้ละเอียดดังเช่นผลที่แสดงมา

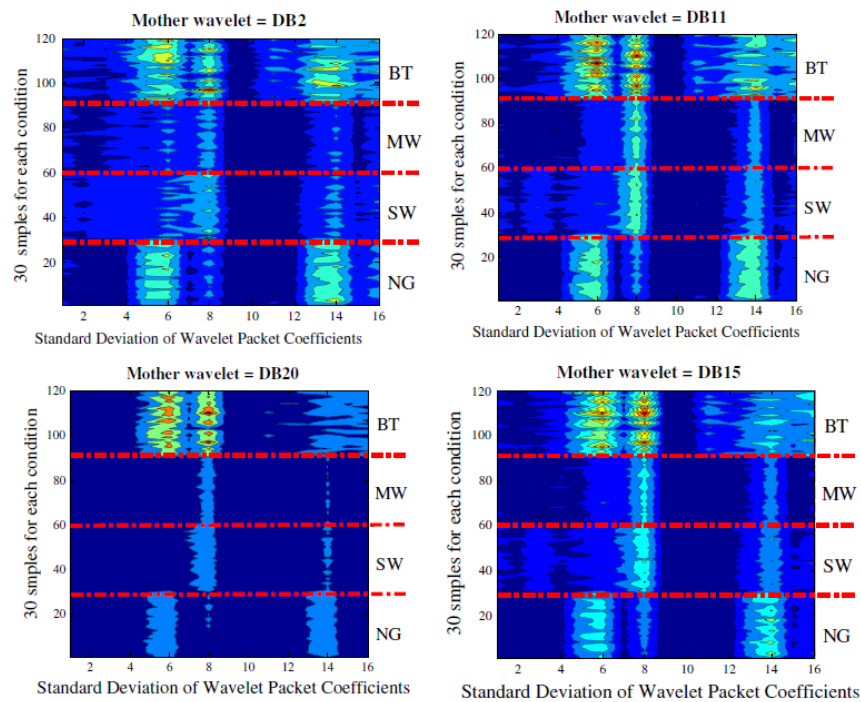


ภาพที่ 2-18 (a) สภาวะปกติรับแรงบิด 62.28 Nm, (b) สภาวะปกติรับแรงบิด 31.31 Nm, (c) สภาวะปกติรับแรงบิด 184.46 Nm, (d) สภาวะฟันเฟืองร้าวรับแรงบิด 123.77 Nm, (e) สภาวะฟันเฟืองแตกรับแรงบิด 123.77 Nm, (f) สภาวะฟันเฟืองหักรับแรงบิด 184.46 Nm

วิธีการวิเคราะห์สัญญาณโดเมนเวลาและโดเมนความถี่หรือการวิเคราะห์ การแปลงเวฟเลต สิ่งที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งคือพารามิเตอร์ที่ นำมาใช้ในการตัดสินใจว่าอยู่ในสภาวะที่เสียหายหรือผิดปกติ โดยทั่วไปพารามิเตอร์ ที่ง่ายและสะดวกต่อการ นำมาใช้ในการตัดสินใจถึงความเสียหายที่เกิดขึ้น ก็คือพารามิเตอร์ เิงสถิติ ตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่า

ความแปรปรวน ค่าความถี่ ค่าความเบ้ และค่ารากกำลังสอง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณหรือข้อมูลบนโดเมนเวลา พารามิเตอร์ดังกล่าว นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตอบคำถามถึงระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ว่ามากหรือน้อยเพียงใด และสามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลความเสียหายได้ชัดเจนหรือไม่ เป็นต้น

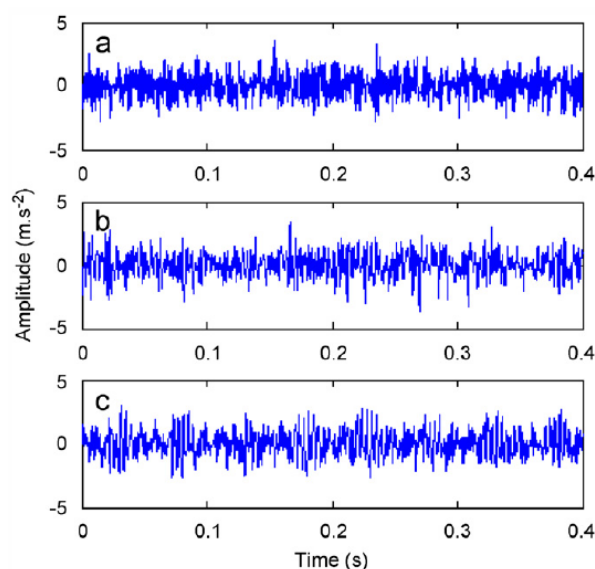
งานวิจัยของ Rafiee และคณะ [18] ได้ทำการเสนอผลกา ารวิจัยการทดลองเกี่ยวกับ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของ ฟันเฟือง คือ นำวิธีการ แปลงเวฟเลตและพารามิเตอร์เชิงสถิติ มาใช้ร่วมกัน งานวิจัย นี้ใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นพารามิเตอร์ในการทำนายความเสียหายที่เกิดจากการจำลองความเสียหายและทำให้ได้กลุ่มของข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน วิธีการนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วย coefficient wavelet เพียงอย่างเดียวพบว่า สามารถวิเคราะห์และอธิบายได้ง่ายขึ้นจากการแยกกลุ่มความเสียหายด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติที่ใช้ เงื่อนไขการทดลองของการศึกษานี้ ประกอบด้วย normal gearbox (NG), slight-worn (SW), medium-worn (MW) และ broken-tooth (BT) ผลการวิเคราะห์การแปลงเวฟเลตด้วย Daubechies wavelet แสดงดังภาพที่ 2-19 ซึ่งผลที่ได้ก็จะสามารถอ่านตีความและแยกกลุ่มความเสียหายได้ชัดเจนขึ้น หากนำเอาพารามิเตอร์ เชิงสถิติเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้น จะสามารถแยกกลุ่มความสัมพันธ์เพื่อใช้ตอบคำถามได้ดียิ่งขึ้น



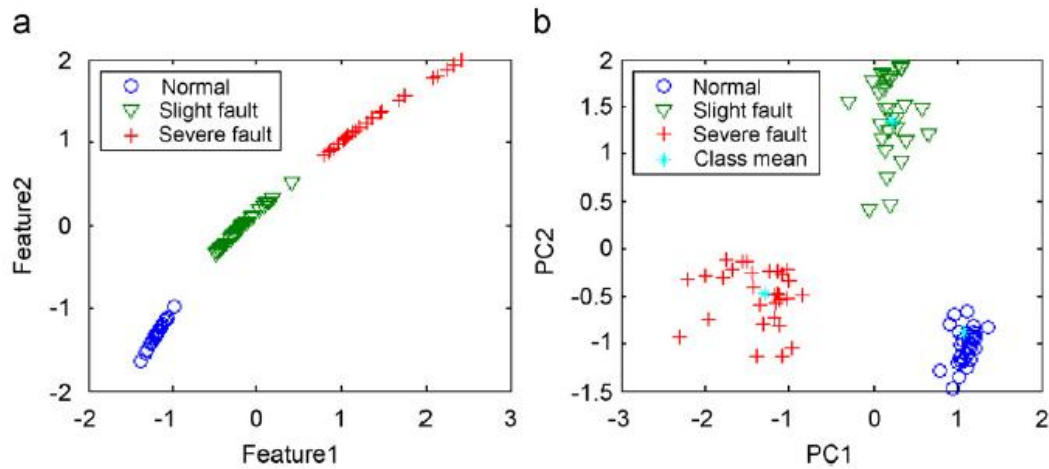
ภาพที่ 2-19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ WPC 30 ข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงกับค่าความแตกต่างของ Daubechies order

การวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิง "สถิติ" คือวิธีการหนึ่งที่สำคัญถึง ความสัมพันธ์ของ สัญญาณการสั่นสะเทือน ที่ตรวจวัด จากเซ็นเซอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์กับสภาพ หรือสภาวะการทำงาน ของเครื่องจักรกล การตรวจสอบสภาวะการทำงาน ของชุดเฟือง สามารถนำความสัมพันธ์ของข้อมูลการสั่นสะเทือนโดยอาศัยพารามิเตอร์ เชิงสถิติเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง สภาวะปกติกับสภาวะความเสียหายของสัญญาณการสั่นสะเทือน วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลนี้ได้ถูกเลือกขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงาน ของเครื่องจักรกลหมุนและเฟือง เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลไม่จำเป็นต้อง ใช้เทคนิคการแปลงฟูริเยร์หรือการวิเคราะห์สเปกตรัม วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติจะวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของข้อมูลเชิงสถิติที่สอดคล้องกัน เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง และความรากลกำลังสอง เป็นต้น การนำค่า พารามิเตอร์เชิงสถิติ หรือกระบวนการวิเคราะห์เชิงสถิติ มาคำนวณร่วมกับวิธีการหนึ่งที่เรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ถือว่าเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมมาก และ ได้รับความยอมรับในวงกว้างในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ [22-26]

งานวิจัยของ He และคณะ [26] เป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่น่าสนใจ การศึกษานี้ได้ทำการจำลองของเฟืองดังนี้ (a) สัญญาณในสภาวะปกติ (b) สัญญาณที่มีความเสียหายเล็กน้อย และ (c) สัญญาณที่มีความเสียหายรุนแรง ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 สัญญาณบนโดเมนเวลา: (a) สภาวะปกติ, (b) สภาวะเสียหายเล็กน้อย และ (c) สภาวะเสียหายรุนแรง. [26]



ภาพที่ 2-21 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ PCA [26]

งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยวิธี PCA ดังภาพที่ 2-21 อาจกล่าวได้ว่าสัญญาณที่มีแหล่งที่มาจากสาเหตุเดียว ก็จะสามารถเกาะกลุ่มใกล้เคียงกัน ส่วนกลุ่มข้อมูลที่มีแหล่งที่มาไม่เหมือนกันจะเกาะกลุ่มกันได้ ต่างกลุ่มกันด้วยหลัก การแยกข้อมูลแบบ Artificial Neural Network (ANN) ผลของงานวิจัยของ Saravanan [21,25] และ Samanta [22-23] และคณะ เป็นงานวิจัยหนึ่งซึ่งช่วยในการยืนยันคำตอบของ งานวิจัยของ He [26] งานวิจัยเหล่านี้มีการนำพารามิเตอร์ เริงสถิติ มาประยุกต์ใช้ เป็นตัวแปร เพื่อ การตัดสินใจ ความสัมพันธ์ของข้อมูลสัญญาณ การสั่นสะเทือนของเฟืองตรง และเฟืองเฉียง คือการนำ พารามิเตอร์ เริงสถิติ ที่หาความสัมพันธ์กันได้แล้ว มาพล็อตร่วมกัน เพื่อบ่งบอกถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือนในสภาวะที่เฟืองตรงรับภาระน้ำ หนักที่เปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์ที่ใช้ของงานวิจัยคือ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน ค่าความโด่ง และค่าต่ำสุดของแอมพลิจูด โดยที่นำค่าความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เริงสถิติที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบหรือหาความสัมพันธ์ ที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 หรือ 3 พารามิเตอร์ เป็นต้น วิธีการ Principal Component Analysis (PCA) เป็นส่วนหนึ่งในขั้นตอนของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) คือ การเซตพารามิเตอร์เริงสถิติที่ต้องการใช้วิเคราะห์ จากนั้นตัวแปรการตัดสินใจเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มความสัมพันธ์ ของข้อมูลที่ศึกษา เพื่อจำแนกกลุ่มข้อมูลความเสียหายออกจากกลุ่มข้อมูลในสภาวะปกติของเฟือง ตรงแสดงดัง ภาพที่ 2-21 นอกจากนี้งานวิจัย B. Samanta [22-23] ได้นำเสนอแนวทางการทำงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการการหาตัวแปรในการตัดสินใจ เพื่อการตรวจสอบ บสภาวะการทำงานของเฟืองตรง โดยใช้เมตริกซ์ความสัมพันธ์ ร่วมกัน (Covariance Matrix) ในการแบ่งกลุ่มความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วย

พารามิเตอร์เชิงสถิติที่ตั้งที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง และค่าความรากลกำลังสอง ค่า crest factor เป็นต้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติจะทำการประมวลผลของสัญญาณบนโดเมนเวลาได้ และสามารถกระทำบนโดเมนความถี่ได้เช่นกัน จากนั้นเลือกพารามิเตอร์เชิงสถิติที่สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลนั้นๆ ให้เหมาะสม ที่ถูกเลือกเป็นพารามิเตอร์ในกา รตัดสินใจ ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถแบ่งองค์ประกอบความสัมพันธ์ข้อมูลเชิงสถิติได้เป็นอย่างดี และสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายกว่า พร้อมทั้งเห็นภาพการแยกออกจากกันของข้อมูลอย่างชัดเจน โดยใช้สัญญาณที่บันทึกได้บนโดเมนเวลามาวิเคราะห์เพียงอย่างเดียว ก่อนนำเข้ากระบวนการวิเคราะห์ของ Neural Network ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนมากกว่าการแปลงเวฟเลตมาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้สามารถสรุปแนวทางการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงที่มีการนำเสนอมานี้ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา บนโดเมนความถี่ และวิธีการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่ง สามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา ด้วยหลักการวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อ การค้นหาตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจและแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลของความสัมพันธ์ออกจากกัน งานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ จาก การแปรผันร่วมกัน ของพารามิเตอร์เชิงสถิติของ ข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนระหว่างความเสียหายที่ถูกจำลองขึ้นกับสภาวะการทำงานในสภาวะปกติ ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาโดยใช้พารามิเตอร์เชิงสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความโด่ง ค่าความเบ้ และค่ารากลกำลังสอง ค่า crest factor และค่าพลังงานของสัญญาณ เป็นต้น

2.3 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการแยกข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนจากสภาวะปกติออกจากสภาวะที่ ผิดปกติของเครื่องจักรกล หมุน วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนมีหลายวิธีซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงจะ แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของแต่ละวิธีการ ของการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟือง ตรง ชุดเฟืองถือว่าเป็นส่วนสำคัญของเครื่องจักรกล เนื่องจากชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถให้กำลังและลดกำลังจากการขับเคลื่อนของชิ้นส่วนที่มีการหมุนได้ การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองถือว่าเป็นสิ่งสำคัญยิ่งไม่น้อยไปกว่าเครื่องจักรกลประเภทอื่น ๆ วิธีตรวจสอบเบื้องต้นสำหรับ การตรวจสอบการทำงานของเฟืองสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ประสาทสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานที่เครื่องจักร ซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ ปฏิบัติงาน แต่วิธีการที่ทันสมัยกว่านั้นคือใช้ระบบการตรวจสอบ

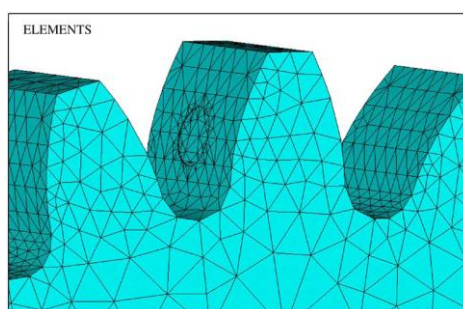
จากคอมพิวเตอร์ทำงานแทนคน เนื่องจากระบบจะสามารถทำงานได้ถูกต้องแม่นยำกว่า งานวิจัยในส่วนนี้ยังทำการศึกษาและพัฒนาระบบที่จะสามารถให้คำตอบที่ให้พิจารณาคำตอบที่ถูกต้องได้ง่ายขึ้นกว่าการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ และสามารถตัดสินใจแทนการวิเคราะห์ด้วยประสาทสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงได้

งานวิจัยนี้ได้ ใช้วิธีการตรวจสอบความเสียหายด้วยวิธีการวิเคราะห์ พารามิเตอร์เชิงสถิติ ของสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งสัญญาณที่ได้จะต้องผ่านขั้นตอนแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ด้วยการเก็บข้อมูลแล้ว นำข้อมูลที่อยู่ในรูปข้อมูลดิบมาประมวลผล ด้วยวิธีการประมวลผลสัญญาณแบบสัญญาณสุ่ม (Random Signal) เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้ความแตกต่างของสัญญาณ หรือแยกกลุ่มของข้อมูลเชิงสถิติของสัญญาณ ซึ่งสามารถใช้อธิบายถึงกลไกที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนทางกลที่สนใจศึกษา ได้ ดังนั้นจึงจะขอกล่าวให้เห็นถึงภาพรวมของแต่ละวิธีการในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองได้ดังนี้

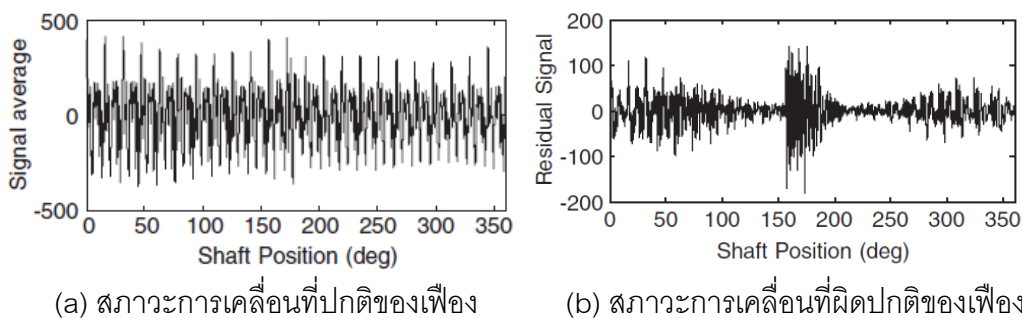
2.3.1 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบดิเทอร์มินิสติก (Deterministics Method)

ดิเทอร์มินิสติก เป็นวิธีการ ประยุกต์ใช้เทคนิค ทางคณิตศาสตร์ เพื่อเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำงานการเคลื่อนที่และพฤติกรรมของการเคลื่อนที่จากวิธีการ Simulation และวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พร้อมกับเปรียบเทียบผลที่ได้จากการ Simulation เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ออกแบบและปรับปรุงใหม่ ให้สอดคล้องกับทางทฤษฎีที่ควรจะเป็นและถูกต้องที่สุด ซึ่งวิธีการเหล่านี้ที่ใช้กัน เช่น Finite Element Analysis และ Modal Analysis Testing เป็นต้น

Jia [27] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายของเฟืองตรง ซึ่งการเขียนแบบจำลองและทำการศึกษา นี้ใช้เวลานานมากกว่า ก่อนจะได้ผลการ simulation ของสัญญาณการสั่นสะเทือนออกมาแสดงดังภาพที่ 2-23



ภาพที่ 2-22 ผลของแบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 2-23 ผลของแบบจำลองการเคลื่อนของสมการการเคลื่อนของเฟือง [10]

ผลจากวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียล มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาในการทำงาน และหากมีชิ้นส่วนทางกลที่มีความซับซ้อนมากๆ จะเป็นเรื่องที่มีความยากลำบากมากที่จะต้องสร้าง สมการการเคลื่อนที่ของทุกชิ้นส่วนทางพลศาสตร์ ถึง จะทราบคำตอบที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีการนำวิธีการนี้ไปใช้กับงานลักษณะที่ทำการวิเคราะห์ Mode Shape หรือ Modal Analysis อีกเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นงานที่วิเคราะห์โครงสร้างที่มีการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำๆ จำนวน Mode การสั่นน้อยๆ เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) ในการวิเคราะห์สัญญาณ การสั่นสะเทือน ได้ไม่ถี่นัก และไม่เหมาะสม

2.3.2 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time Domain Analysis)

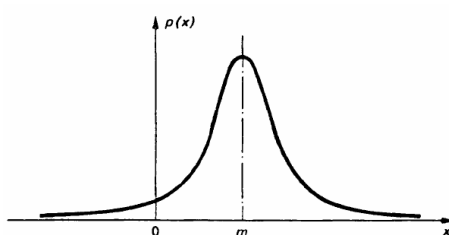
ลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนทางกลที่เกิดขึ้นได้กล่าวไว้แล้วในส่วนที่ 2.2.1 แสดงดังภาพที่ 2-7 สัญญาณบนโดเมนเวลาของเฟือง โดยส่วนใหญ่ลักษณะของสัญญาณโดเมนเวลาจะมีลักษณะของสัญญาณแบบชั่ว ขณะและสัญญาณแบบต่อเนื่อง เกิดขึ้น พร้อมๆกันในรูปแบบของสัญญาณจากเครื่องจักรกลหมุนโดยทั่วไป สัญญาณบนโดเมนเวลาที่มีแอมพลิจูดสูงๆ สามารถวิเคราะห์สัญญาณ โดยการกำหนดระดับของ Threshold เป็นระดับอ้างอิง ในการยอมรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น เช่น หากสัญญาณเกินค่าที่กำหนดอาจจะสามารถแสดงเป็นตัวแปรที่กำหนดระดับความเสียหายได้ และโดยทั่วไปการนำพารามิเตอร์ทางสถิติมาใช้ก็จะช่วยในเรื่องการแบ่งแยกความสัมพันธ์ข้อมูลที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.3.1

ในส่วนที่ 2.2.2 ได้กล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย พร้อมทั้งอธิบายแต่ละวิธีการถึงความยากง่ายของการวิเคราะห์ผล ในงานวิจัยนี้ได้นำประเด็นวิจัยต่อยอดองค์ความรู้จากงานวิจัยของ ANDRADE [5] บางส่วนที่ได้แสดงผลของการตรวจสอบความเสียหายของเฟือง ตรงด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา โดยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ของสัญญาณ ซึ่งงานวิจัยของ ANDRADE ได้เลือกใช้วิเคราะห์ความเสียหายครวละ 1 พารามิเตอร์และแสดงเป็นแผนภูมิแท่ง โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่ skewness kurtosis crest factor และ form factor ผลของค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนจะแยกได้ระหว่างค่าเชิงสถิติในกรณีปกติกับค่าเชิงสถิติในกรณีเกิดความเสียหายเท่านั้น แต่ไม่สามารถแยกกลุ่มความเสียหายที่เกิดขึ้นได้

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาถึงวิธีการวิเคราะห์ สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วย พารามิเตอร์เชิงสถิติที่การแปรผันร่วมกัน โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาจะมีทั้งหมด 7 พารามิเตอร์ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง ค่า crest factor และค่าพลังงานสัญญาณ เพื่อแยกกลุ่มข้อมูลที่มีความเสียหายออกจากกัน โดยสิ่งที่คาดหวังไว้คือ ความเสียหายในเงื่อนไขเดียวกันจะต้องอยู่ร่วมกลุ่มเดียวกันจากค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติที่มีความแปรผันร่วมกัน เพื่อที่จะนำมาใช้ในการแยกกลุ่มข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้น จากหลักการการกระจายของข้อมูลเชิงสถิติในรูปแบบการกระจายตัวปกติ (Normal distribution) ดังภาพที่ 2-24 เมื่อนำเสนอข้อมูลที่มีการแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติจะสามารถสร้างขอบเขตการกระจายตัวในแนวแกนตั้ง และแนวแกนนอนได้จากหลักการดังกล่าว

การวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติจะให้ผลที่เข้าใจง่ายกว่าวิธีการอื่น เนื่องจากสามารถทำให้เห็น ลักษณะ ของกลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันหรือ มีการแปรผันร่วมกันอย่างชัดเจน ขั้นตอนการในการประมวลสัญญาณเร็วขึ้น เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาไม่จำเป็นต้องกรองความถี่ที่ไม่ต้องการทิ้ง และไม่จำเป็นต้องแปลงสัญญาณโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ก่อนถึงจะวิเคราะห์ สัญญาณได้ แต่สามารถวิเคราะห์ สัญญาณได้ในลักษณะของการวิเคราะห์สัญญาณแบบสุ่ม ด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือน



ภาพที่ 2-24 กราฟการกระจายตัวแบบปกติ [28]

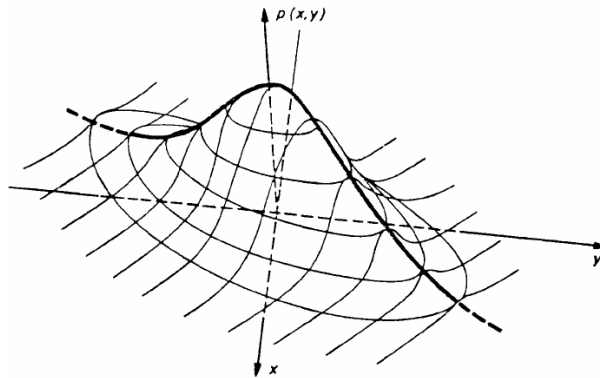
โดยที่ m และ σ เป็นค่าคงที่ใด และ x คือข้อมูลสุ่ม

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/2\sigma^2} \quad (2.1)$$

ถ้า $m=0$ และ $\sigma^2=1$, กลุ่มตัวอย่างข้อมูลที่มีการกระจายตัวตามหลัก การกระจายตัวแบบ Gaussian แสดงดังรูป 2-24 ซึ่งจะถูกรเรียกว่า การกระจายตัวปกติ (standard normal distribution) และหากข้อมูลที่น่าสนใจการกระจายตัวของพารามิเตอร์เชิงสถิติร่วมกัน 2 พารามิเตอร์ หรือที่เรียก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นร่วมกัน (joint probability density function), $p(x,y)$, จะสามารถเขียนสมการที่ 2.1 ได้เป็นดังนี้

$$p(x, y) = \left(\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma_x^2} \right) \left(\frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2\sigma_y^2} \right) = p(x) \cdot p(y) \quad (2.2)$$

และรูปการกระจายตัวร่วมกันจะเป็นดังภาพที่ 2-25 โดยที่ m_x, m_y และ σ_x, σ_y เป็นค่าคงที่ใด และ x, y คือข้อมูลสุ่ม จากภาพที่ 2-25 การกระจายร่วมกันของข้อมูลสุ่มด้วยวิธีการวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติจะได้เส้นรอบรูปเป็นวงรี [28]



ภาพที่ 2-25 กราฟการกระจายตัวแบบปกติแบบอันดับที่สอง [28]

จากหลักการข้างต้นจึงคาดว่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานวิจัยนี้ ที่ศึกษาถึงวิธีการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาได้

2.3.3 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain Analysis)

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่จะกระทำกับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาคงที่ ซึ่งจะง่ายต่อการวิเคราะห์หองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณที่มีเพียงค่าเดียว แต่ถ้าหากสัญญาณเป็นคาบเวลา แต่ความถี่ที่เกิดขึ้นมีหลายองค์ประกอบความถี่ก็จะไม่่ง่ายที่วิเคราะห์หรือแยกความถี่หลักที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ทั่วไปมักนิยมใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT: Fast Fourier Transforms)

วิธีการวิเคราะห์ความเสียหายยังสามารถวิเคราะห์ความเสียหายบนโดเมนเวลา-ความถี่ได้ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถใช้หลักการแปลงสัญญาณช่วงสั้นของเวลา (STFT: Short Time Fourier Transforms) วิธีการดังกล่าวก็มีความสำคัญและนำไปใช้เป็นจำนวนมาก และวิธีการแปลงเวฟเลตหรือการวิเคราะห์เวฟเลตในรูปแบบต่างๆ ของเวฟเลตถูก ซึ่งวิธีการผู้ที่ไม่มีความรู้ความชำนาญทางด้านนี้จะไม่ค่อยเข้าใจความหมายที่เกิดขึ้นได้ว่ามีความหมายอย่างไร อีกทั้งยังเป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนหลายขั้นตอนมาก และยากต่อการทำความเข้าใจอีกด้วย

การศึกษาของงานวิจัย นี้ไม่ได้นำเสนอถึงวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่อย่างลึกซึ้งมากนัก เนื่องจากไม่ใช่ประเด็นสำคัญที่ต้องการนำเสนอ ของการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่บนหลักการของฟูริเยร์จะเป็นที่นิยมก็ตาม แต่ไม่ได้หมายความว่าจะให้คำตอบได้ดีที่สุด และใช้เวลาในการวิเคราะห์สะดวกรวดเร็วที่สุด

2.3.4 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition Method)

หลักการอื่น ๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนและเฟือง อย่างที่กล่าวไปเมื่อตอนต้นว่าสัญญาณที่วัดได้มีความซับซ้อนและมีเหตุการณ์เกิดขึ้นมากมายทั้ง Burst signals และ Continuous signals วิธีการที่ได้กล่าวไปสามารถนำมาตรวจสอบสภาวะการทำงานของเฟืองได้ทั้งสิ้น แต่มีวิธีการใดบ้างที่จะสามารถแยกได้ว่า สัญญาณที่เกิด คือสัญญาณความเสียหายจากชิ้นส่วนใดส่วนหนึ่งของเครื่องจักรกลที่สนใจ ซึ่งมีวิธีการหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยม และได้รับการยอมรับมากในปัจจุบันนี้คือ การวิเคราะห์รูปแบบความสัมพันธ์ของข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยอาศัยพารามิเตอร์เชิงสถิติ เป็นตัวแปรในการแยกกลุ่มข้อมูลออกจากกัน โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติ เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบนี้เรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีหลายวิธีการย่อยลงไปอีกในการสร้างโครงข่ายการตัดสินใจ ปัญหาของตัวแปรที่ใช้ในการแบ่งแยกความแตกต่างของกลุ่มความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงสถิติ [29]

วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition techniques) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนได้ทุกประเภท และใช้กับ เฟือง ประเภทต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เพื่อใช้ในการแยกความสัมพันธ์ข้อมูลสัญญาณความเสียหายออกจากสัญญาณการสั่นสะเทือนในสภาวะการทำงานที่ปกติ โครงข่าย

ประสาทเทียมเป็นระบบการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลที่งานวิจัยส่วนใหญ่ต้องการใช้แยกสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณความเสียหาย เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องจักร กลส่วนใดที่เกิดความขัดข้องหรือมีความผิดปกติเกิดขึ้น ซึ่งจะใช้ พารามิเตอร์ เชิงสถิติ มาเป็นตัว บ่งชี้วัดการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่าง ของสัญญาณที่ผิดปกติ นอกจากวิธีการทาง PCA ยังมีวิธีการอื่น เช่น Fuzzy Logic[29] และ ICA (Independent Component Analysis) [29] ที่ได้รับความสนใจ ในการนำมาประยุกต์ใช้กับลักษณะงานในการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกล จากวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม

แต่วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมเป็นวิธีการที่อาศัยฐานข้อมูลขนาดใหญ่ และ ขั้นตอนการสังเคราะห์หรือวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสร้างออกาทิมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ ซับซ้อนสูงมากจึงไม่เหมาะสำหรับการศึกษา วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาวิธีการที่สะดวกและ รวดเร็วที่สุด ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรง ที่จะสามารถช่วยลดต้นทุนอื่น ที่ช่วยลดเวลาการเก็บข้อมูลและประมวลผลสัญญาณที่ซับซ้อนลง ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณ เชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้แสดง ถึงลักษณะงาน การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงและ เครื่องจักรกลหมุน รวมทั้ง เทคนิควิธีการ วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน บนโดเมนเวลา ด้วย พารามิเตอร์เชิงสถิติ และ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นแล้ว ว่าความต้อง ทราบถึงสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล หมุนอยู่ตลอดเวลาและ ความต้อง การทราบถึงอาการของความเสียหายที่ทันเวลาเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานของเครื่องจักรกล และ กระบวนการทำงานที่ส่งผลต่อเครื่องจักรกลตัวอื่นๆ

การประยุกต์ใช้ วิธีการที่เหมาะสม ในการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดจากหัววัดการสั่นสะเทือน ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงที่ขบกัน และส่งผ่านมายังหัววัดการสั่นสะเทือนใน รูปแบบสัญญาณ บนโดเมนเวลา และสามารถ วิเคราะห์ สัญญาณที่วัดได้ เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น กับเฟืองตรงได้ นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณ การสั่นสะเทือน เชิงสถิติ บน โดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ ซึ่งจะใช้ในการแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ของความเสียหาย จากเงื่อนไขการทดลอง สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากชุด ทดลอง โดยการ จำลองการทำงานทั้งแบบปกติและความเสียหาย ของเฟืองตรงจะถูกวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เชิง

สถิติ ในการแยกกลุ่มข้อมูลที่เกิดความเสียหายจากสัญญาณในสภาวะการทำงานปกติ พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความโด่ง ค่าความเบ้ และค่ารากกำลังสอง ค่า Crest factor และค่าพลังงานของสัญญาณ เป็นต้น

งานวิจัยนี้คาดว่ากรวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติบนโดเมนเวลาจะสามารถแบ่งแยกสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ตามวัตถุประสงค์ และสามารถสร้างขอบเขตของข้อมูล ที่ได้จากการวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3

การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและการทดลอง

3.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมาได้นำเสนอถึงเทคนิควิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานด้านการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนและการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ส่วนแรกของบทนี้จะทำการแนะนำและอธิบายถึงประเภทของสัญญาณการสั่นสะเทือน ส่วนต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลอง วิธีการทดลอง และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติมากกว่า 1 พารามิเตอร์ของสัญญาณการสั่นสะเทือน และวิธีการทำนายความเสียหายที่วัดได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดทดลอง

3.2 สัญญาณการสั่นสะเทือน

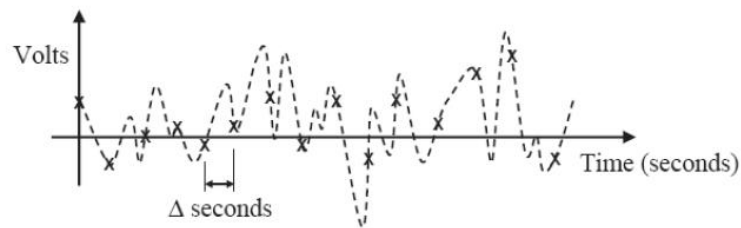
3.2.1 ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือน

โดยทั่วไปการวัดค่าสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ด้วย Oscilloscope ค่าสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ใช้วัดปริมาณทางฟิสิกส์นั้นๆ จะแสดงผลดังภาพที่ 3-1 ค่าการตอบสนองที่แปรผันตามเวลาการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่เกิดขึ้น และลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous Signal)

ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ตรวจวัดได้ จะเป็นแบบ Discrete ที่ได้จากการสุ่มข้อมูลจากขั้นตอนการเก็บข้อมูล สัญญาณการสั่นสะเทือน ที่ตรวจวัดได้จากหัววัดการสั่นสะเทือน จะมีลักษณะเป็นแบบ Discrete โดยที่มีจำนวนข้อมูลเกิดขึ้นจากการสุ่มเก็บข้อมูล (Sampling Data) ซึ่งจำนวนข้อมูลและเวลาจะต้องสอดคล้องกัน แสดงดังภาพที่ 3-2 ลักษณะของสัญญาณที่สุ่มวัดได้ที่เวลา Δ ไต ๆ โดยที่เครื่องหมาย x แทนด้วยข้อมูลและ Δ คือ ช่วงเวลาสุ่มในหน่วยวินาที สัญญาณที่วัดได้จะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง หรือสามารถอธิบายตามด้วยสมการ $x(t)$ หรือ $y(t)$ ก็ได้ซึ่ง $t = 0, 1, 3, \dots, \infty$ หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของ Discrete signal ได้เป็น $x(n\Delta)$, $x(n)$ โดยที่ $n = 0, 1, 3, \dots, \infty$



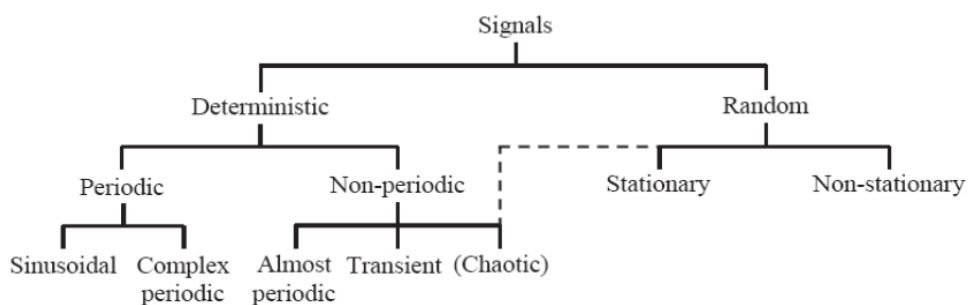
ภาพที่ 3-1 ลักษณะสัญญาณโดเมนเวลาโดยทั่วไปที่ได้จากเซนเซอร์ที่ส่งค่าออกมา



ภาพที่ 3-2 ลักษณะสัญญาณ Discrete โดยที่มี Δ คือ วินาที

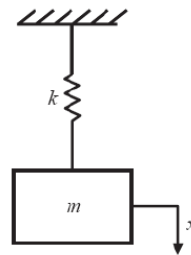
3.2.2 ประเภทของสัญญาณ (Classifications of Signal)

สัญญาณ บนโดเมนเวลาสามารถแบ่งแยกประเภทและลักษณะที่เกิดขึ้นได้ดังภาพที่ 3-3 ความแตกต่างพื้นฐานของสัญญาณบนโดเมนเวลาไม่ว่าจะเป็น Deterministic หรือ Random signals วิธีที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณนั้น จึงจะต้องเลือกใช้ให้ถูกต้อง กับประเภทของสัญญาณการสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นด้วย มิฉะนั้นจะเกิดความผิดพลาดในการพิจารณาและวิเคราะห์ประเภทของสัญญาณ โดยทั่วไปสัญญาณที่สามารถตรวจวัดได้ จากห้วงการสั้นสะเทือน จะมีรูปแบบที่ผสมกันระหว่าง Burst และ Continuous signals ซึ่งจะเป็นงานที่ง่ายขึ้นหากรู้ถึงประเภทของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ และทำให้ง่ายต่อการตัดสัญญาณที่ไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ออกไปได้ด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 3-3 ประเภทของสัญญาณ [1]

งานวิจัยนี้จะเริ่มต้นพิจารณาที่สัญญาณแบบสุ่ม (Random Signals) และสามารถแยกการพิจารณาระหว่างสัญญาณ Deterministic หรือ Non-Deterministic (Random) สัญญาณที่มีพฤติกรรมที่สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องถึงการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นด้วยสมการการเคลื่อนที่หรือสมการจำลองทางคณิตศาสตร์ สัญญาณนี้เรียกว่า Deterministic signal ระบบที่สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ ยกตัวอย่างเช่นระบบ อย่างง่ายของมวลกับสปริงดังแสดงดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ระบบการเคลื่อนที่ของ มวล-สปริง [3]

การเคลื่อนที่ของระบบ ดังภาพที่ 3-4 มีสมการดังนี้ $m\ddot{x} + kx = 0$ โดยที่ x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของระบบ (หน่วยเมตร) และ \ddot{x} คือ ความเร่ง (หน่วยเมตร/วินาที²) ถ้ามวลมีการเคลื่อนที่ขึ้นจากตำแหน่งอ้างอิงที่ $x(t) = A$ เมื่อ $t = 0$. ดังนั้นจากสมการการเคลื่อนที่ของระบบดังภาพที่ 3-4 ระยะทางการเคลื่อนที่ของมวลติดสปริงสามารถทำนายได้ด้วยสมการดังนี้

$$x(t) = A \cos(\omega_n t)$$

$$x(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad ; t \geq 0 \quad (3.1)$$

ในกรณีนี้ ระยะการเคลื่อนที่ของระบบดัง ภาพที่ 3-4 สามารถรู้ได้ทุกเวลาการเคลื่อนที่ที่เป็นคาบเวลา

Non-Deterministic signals คือ สัญญาณที่ไม่สามารถทำนายการเคลื่อนที่ได้ด้วยสมการการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของรถยนต์บนพื้นผิวถนน สัญญาณเสียงที่เข้ามาในห้องโดยสาร อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายนอก และอีกมากมาย ซึ่งลักษณะสัญญาณบนโดเมนเวลาแบบนี้จะเกิดแบบสุ่ม (Random Signal) วิธีการที่จะนำมาวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาดังกล่าวเหล่านี้เรียกว่า Time Domain Analysis โดยนำหลักการวิเคราะห์ด้วยพหุนามเชิงสถิติ ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป สัญญาณที่แบ่งประเภทไว้เป็นกลุ่มๆ นั้น ไม่ว่าจะเป็น Deterministic หรือ Random Signals การที่จะเลือกวิเคราะห์แบบใด ให้พิจารณาจากเหตุการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นเสียก่อน เพื่อความเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของการประมวลผลทางสัญญาณ (Signal Processing) คือการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์หรือสิ่งที่เกิดขึ้นได้ เมื่อสิ่งที่วัดได้นั้นยากต่อการสังเกตการณ์โดยตรงหรือยากต่อการเขียนสมการทำนายการเคลื่อนที่โดยตรง การประมวลผลสัญญาณมี 3 ขั้นตอนคือ (1.) การเก็บข้อมูลสัญญาณ (2.) การประมวลผลสัญญาณ และ (3.) การรายงานของผลของการประมวลผลสัญญาณ

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้จากหัววัดการสั่นสะเทือนของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งมีแบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่แบบ Spring และ Damp จะทำให้สัญญาณที่วัดได้นั้น มีลักษณะทางกลอยู่ 2 แบบแสดงดังภาพที่ 2-9(a) ถึง 2-9(c) คือ แบบที่ 1 เรียกว่า Burst signal หรือ Transient signal แสดงดังภาพที่ 2-9(a) คือ สัญญาณเกิดขึ้นแล้วหายไปบ่งบอกถึงการกระทบและกระทบกันของชิ้นส่วนทางกล ซึ่งสัญญาณลักษณะนี้จะมี แอมพลิจูด ที่สูงและแบบที่ 2 เป็นแบบ Continuous Type แสดงดังภาพที่ 2-9(b) คือสัญญาณเกิดอย่างต่อเนื่องบ่งบอกและอธิบายถึงพฤติกรรมที่เกิดจากการไหลของของไหลหรือชิ้นส่วน ที่ก่อให้เกิด ความถี่สูงต่อเนื่อง ซึ่งจะมี แอมพลิจูด การสั่นสะเทือนต่ำแต่ต่อเนื่อง และรูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากการทำงานของเฟืองจริงดัง ภาพที่ 2-9(c) จะเห็นว่าสัญญาณ การสั่นสะเทือนประกอบไปด้วยสัญญาณทั้งสองแบบผสมกันอยู่

3.3 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ (Statistical parameter analysis)

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่จะนำมาใช้ในวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรง จะอธิบายไว้ในหัวข้อนี้ โดยอาศัยองค์ความรู้จากการศึกษาที่ผ่านมา ของบทที่ 2 และรวบรวมเทคนิควิธีการวิเคราะห์สัญญาณ ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่คาดว่าจะน่าจะเป็นประโยชน์ เพื่อที่จะได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเฟืองตรง และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่นำเสนอของงาน วิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ

3.3.1 โมเมนต์ความน่าจะเป็น (Probability Density Moment)

โมเมนต์ความน่าจะเป็น คือ การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ เชิงสถิติ เพียงพารามิเตอร์เดียวที่ใช้ในการระบุหรือบ่งบอกความสัมพันธ์ของข้อมูล ที่สนใจ พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น ซึ่งสมการที่ใช้วิเคราะห์ แสดงดังสมการที่ (3.1)-(3.11)

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากการตรวจสอบสภาวะการทำงานของความเสียหายของเฟืองนั้น เราสามารถหาค่าพลังงานของสัญญาณได้จากสมการ

$$E = \int_0^t x^2(t) dt \quad (3.1)$$

โดยที่ $x(t)$ คือ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีแอมพลิจูดเป็นโวลต์, t คือ เวลาในหน่วยวินาที และ E คือค่าพลังงานของสัญญาณการสั่นสะเทือนในหน่วยโวลต์กำลังสองวินาที ($V^2 \cdot s$) สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแปลงให้อยู่บนโดเมนมุมเฟลาข้อเหวี่ยงได้โดยใช้สมการที่ 3.2 จะได้องค์ประกอบของพลังงานการสั่นสะเทือน

$$E = \int_a^b x^2(\theta) d\theta \quad (3.2)$$

โดยที่ $x(\theta)$ คือแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนองศา และ θ คือตำแหน่งองศาบนเฟลา และ b คือ ตำแหน่งของมุมเฟลาของการเคลื่อนที่

นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่นิยมใช้มากอีกหนึ่งพารามิเตอร์ก็คือ ค่ารากกำลังสอง หรือ Root Mean Square (RMS) ของสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.3

$$X_{RMS} = RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.3)$$

โดยที่ N คือจำนวนจุดข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือน

นอกจากพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นแล้วงานวิจัยนี้ได้นำเสนอพารามิเตอร์เชิงสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา การคำนวณค่าเชิงสถิติคือ การวิเคราะห์โมเมนต์ของข้อมูลที่เกิดขึ้นจากสัญญาณการสั่นสะเทือน เช่น

ค่าเฉลี่ย (Mean)

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

ค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Amplitude)

$$X_{Max} = Peak = Max(|x(t)|) \quad (3.5)$$

ค่าแอมพลิจูดสูงสุดถึงต่ำสุด (Peak-Peak)

$$Vpp = Max(x(t)) - Min(x(t)) \quad (3.6)$$

ค่าความแปรปรวน (Variance)

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

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (|x_i| - \bar{x})^2} \quad (3.8)$$

ค่าความเบ้ (Skewness)

$$Skewness = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{|x_i| - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (3.9)$$

ค่าความโด่ง (Kurtosis)

$$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{|x_i| - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad (3.10)$$

Crest Factor

$$Crest\ Factor = \frac{X_{MAX}}{X_{RMS}} \quad (3.11)$$

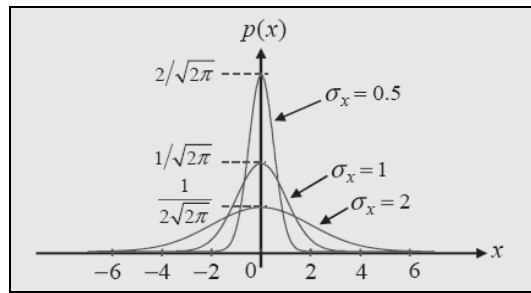
โดยที่ N คือจำนวนข้อมูลใน 1 สัญญาณที่วิเคราะห์, x_i คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่เวลาใดๆ, \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณ 1 ชุด ทั้งนี้เมื่อได้พารามิเตอร์เชิงสถิติที่ต้องการแล้ว จะสามารถพล็อตความสัมพันธ์ข้อมูลและพิจารณาแนวโน้มของข้อมูลหรือกลุ่มของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันได้ชัดเจนขึ้นโดยใช้กฎของ Gaussian

3.3.2 การกระจายปกติ (Normal Distribution)

การกระจายปกติเป็นรูปแบบที่สำคัญ เชิงสถิติ เนื่องจากกระบวนการทำงานที่มีการกระจายปกติตามแบบหลักการของเกาส์เซียน (Gaussian) จะสามารถคาดการณ์ความเป็นไปได้ของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันได้ ถ้า X คือตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นจะสามารถอธิบายได้โดยใช้ 2 พารามิเตอร์คือ ค่าเฉลี่ย (μ_x) ค่าความแปรปรวน (σ_x^2) หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_x) และค่า probability density function (PDF, $p(x)$) ของการกระจายแบบ Gaussian สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.13)

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu_x)^2 / 2\sigma_x^2} \quad (3.12)$$

ถ้า $\mu_x = 0$ และ $\sigma_x^2 = 1$, ซึ่งจะถูกระบุว่า การกระจายตัวปกติ (standard normal distribution) สำหรับ $\mu_x = 0$, กลุ่มตัวอย่างข้อมูลที่มีการกระจายตัวตามหลักการกระจายตัวแบบ Gaussian แสดงดังภาพที่



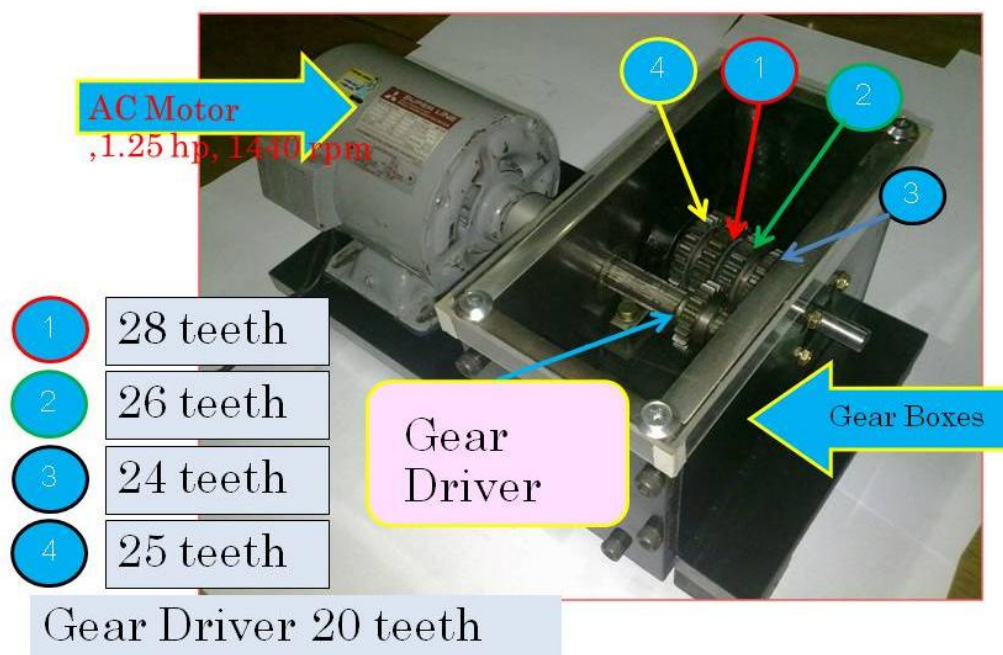
ภาพที่ 3-5 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการกระจายตัวของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ของข้อมูลที่มีการแปรผันกัน เพื่อนำไปเปรียบเทียบ และสร้างขอบเขตความสัมพันธ์ของข้อมูล ที่เกิดขึ้นจากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของการกระจายตัวของข้อมูลที่วัดได้ในแต่ละเงื่อนไข โดยอาศัยหลักการการกระจายตัวของข้อมูล แบบเกาส์เซียน ที่มีความสัมพันธ์กัน ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

3.4 การเก็บบันทึกข้อมูล

วิธีการตรวจวัด สัญญาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง จากชุดทดลองดัง ภาพที่ 3-6 กระทำโดยการติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือน ที่ตำแหน่งแกนตั้ง แกนนอน และตามแนวแกนเพลลาของชุดเฟืองตามบริเวณตัวเรือน แบร์ริง เพื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ส่วนการวัดความเร็วรอบ จะใช้ Proximity sensor เพื่อวัดรอบที่ตำแหน่งเพลลาของเฟืองตัวตาม ตำแหน่งของเซนเซอร์ทั้งสองแสดงดังภาพที่ 3-7

แผนผังการบันทึกสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณความเร็วรอบของการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-8 หัววัดการสั่นสะเทือนที่ใช้คือ Bruel & Kjaer accelerometer: Model 4371 (รายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ก.) ซึ่งจะต้องใช้ควบคู่ไปกับ charge amplifier ในการขยายสัญญาณหรือเพิ่มค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ตามความเหมาะสมที่ต้องการ สัญญาณทั้งสองจะถูกบันทึกในเวลาเดียวกัน โดยผ่านการแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ด้วยการวัดแปลงข้อมูลของ National Instrument (NI) DAQ Card 6024E, ความละเอียด 12 บิต ข้อมูลสุ่ม 80000 จุด, ความถี่สุ่ม 16000 Samples/s



ภาพที่ 3-6 ชุดเฟืองสำหรับทดลอง

สัญญาณที่บันทึกไว้จะนำมาประมวลผล ทุกๆ 100 รอบการทำงานตลอด ซึ่งรวมกันแล้วจะมี 5000 รอบการทำงานต่อ 1 เงื่อนไขการจำลองความเสียหาย จากการศึกษาทดลองโดยการจำลองความเสียหายให้เกิดขึ้นกับเฟืองตรงที่จะกระทำการศึกษาทั้งหมด 4 เงื่อนไขได้แก่ เงื่อนไขที่ 1 การจำลองสภาวะปกติ เงื่อนไขที่ 2 สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 50% ของความสูงของฟันเฟืองจำนวน 1 ฟัน เงื่อนไขที่ 3 สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 100% ของฟันเฟืองของความสูงของฟันเฟืองจำนวน 1 ฟัน เงื่อนไขที่ 4 สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 50% จำนวน 1 ฟันและ 100% จำนวน 1 ฟัน ของของความสูงของฟันเฟืองบนเฟืองเดียวกัน และความเสียหายอยู่ตำแหน่งตรงข้ามกัน ตามลำดับ เฟืองที่ใช้จำลองความเสียหายจะถูกจำลองทั้งหมด 3 เฟือง ที่แสดงดังภาพที่ 3-6 ดังนี้

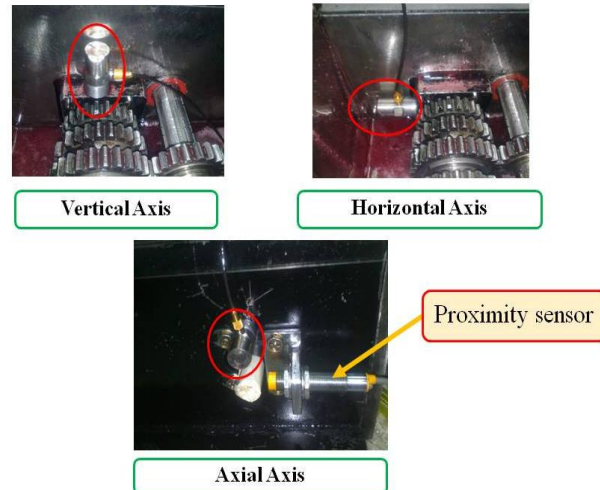
เฟืองหมายเลข 1 (Gear 1) มีจำนวน 28 ฟัน

เฟืองหมายเลข 2 (Gear 2) มีจำนวน 26 ฟัน

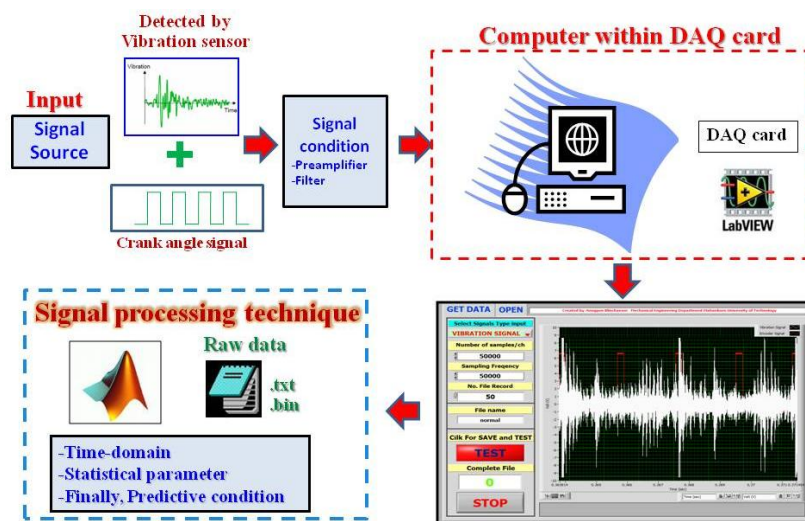
เฟืองหมายเลข 3 (Gear 3) มีจำนวน 24 ฟัน

การจำลองความเสียหายจะทำที่ละเงื่อนไขของเฟืองตรงแต่ละเฟือง ด้วย ความเร็วรอบคงที่ 1440 rpm และปรับความเร็วรอบด้วยชุดควบคุมจาก inverter ทั้งแบบไม่มีภาระและแบบมีภาระ โดยแบบมีภาระจะใช้ชุดเบรกดุมที่ถูกถ่วงน้ำหนักแสดงดังภาพที่ 3-9 เพื่อใช้เป็นภาระต้านการเคลื่อนที่ของเพลลาที่ถูกขับด้วยเฟืองตัวตาม จากนั้นจะทำการเก็บสัญญาณการ

สันสะท้อนของแต่ละเงื่อนไข 80 เซตข้อมูลของแต่ละเฟืองทั้งหมด 4 เฟืองไข ซึ่งจะได้ข้อมูล 320 เซตข้อมูลต่อ 1 เฟืองใน 4 เฟืองไข



ภาพที่ 3-7 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสันสะท้อน และ Proximity เซนเซอร์



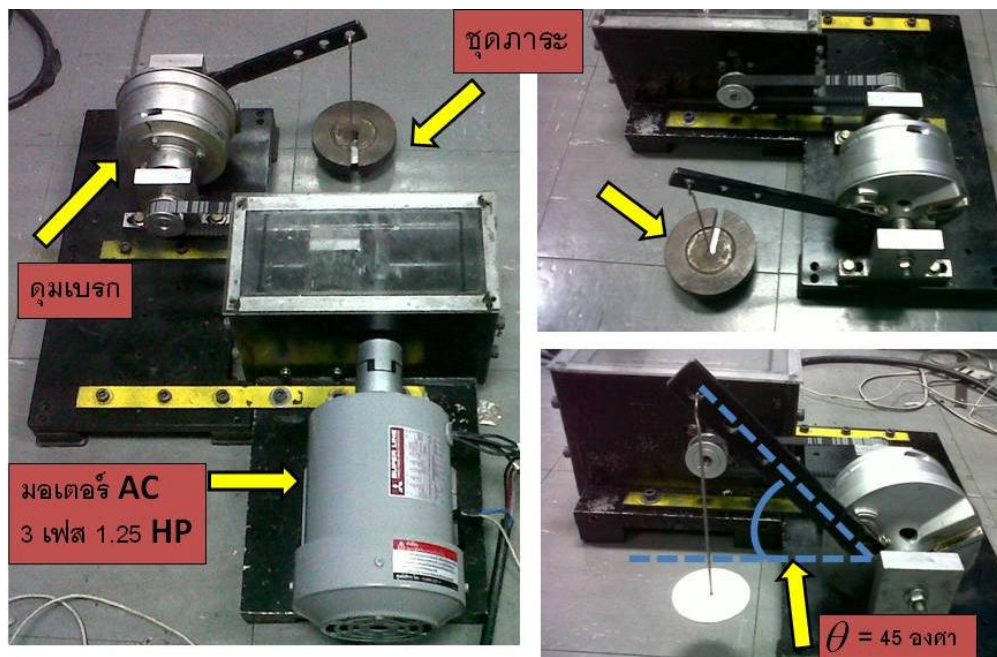
ภาพที่ 3-8 แผนผังการดำเนินงานเก็บข้อมูลสัญญาณการสันสะท้อน

โปรแกรมที่ใช้เก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณการสันสะท้อนซึ่งพัฒนาขึ้นด้วยตัวผู้วิจัย เขียนโดยใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลดิบจากการทดลองในรูปของไฟล์ .txt หรือ .bin จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB ในการช่วยประมวลผลสัญญาณเนื่องจากมีวิธีการเขียนโปรแกรมและสามารถแก้ไขได้อย่างยืดหยุ่น เนื่องจากงานวิจัยนี้ยังไม่ได้สร้างโปรแกรมให้เป็นแบบ Real Time ฉะนั้นการประมวลผลสัญญาณจะใช้โปรแกรม MATLAB โดยมีระเบียบวิธีการคำนวณ แสดงดังแผนผังภาคผนวก ค

3.4.1 ชุดทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบโดยไม่มีภาระการทำงานและมีภาระการทำงาน

1. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 1.25 HP ความเร็วเฉลี่ยที่ 1440 รอบ/นาที สามารถปรับความเร็วด้วย Inverter
2. เฟืองขับ เป็นเฟืองตรงขนาด 20 ฟัน โมดูล = 2 mm และความหนา 10 mm
3. ชุดเฟืองตัวตาม จำนวน 4 ตัว เพื่อจำลองความเสียหาย 3 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - (3.1) เฟืองตรง ขนาด 28 ฟัน โมดูล = 2 mm และความหนา 10 mm (No.1)
 - (3.2) เฟืองตรง ขนาด 26 ฟัน โมดูล = 2 mm และความหนา 10 mm (No.2)
 - (3.3) เฟืองตรง ขนาด 24 ฟัน โมดูล = 2 mm และความหนา 10 mm (No.3)
 - (3.4) เฟืองตรง ขนาด 25 ฟัน โมดูล = 2 mm และความหนา 10 mm (No.4)
4. เฟลาขับ 5. เฟลาตาม 6. Coupling 7. Bearing 8. ฐานชุดทดลอง
9. ยางรองฐานชุดทดลอง 10. อ่างน้ำมันเครื่อง 11. ฝาครอบชุดทดลอง



ภาพที่ 3-9 ชุดทดลองพร้อมับชุดภาระการทำงาน 1.56 Nm

3.4.2 การจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฟันเฟือง

การตรวจสอบสภาวะการทำงานของชุดเฟือง จะทำการจำลอง ความเสียหายให้กับฟันเฟืองตัวตาม ซึ่งจะมีชุดจำลองความเสียหายทั้งหมด 3 ชุดไว้สำหรับทำการทดลองโดยทำให้เกิดความเสียหายในระดับที่ต่างกัน การจำลองสภาวะความเสียหายของเฟืองสรุปได้ดังนี้

3.4.2.1 การจำลองความเสียหายโดยไม่มีภาระการทำงาน

รูป	สภาวะการทำจำลองความเสียหาย
	(ก) สภาวะที่เป็นปกติ
	(ข) สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 50% ของความสูงของฟันเฟืองจำนวน 1 ฟัน
	(ค) สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 100% ของฟันเฟืองของความสูงของฟันเฟืองจำนวน 1 ฟัน
	(ง) สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 50% จำนวน 1 ฟันและ 100% จำนวน 1 ฟัน ของความสูงของฟันเฟืองบนเฟืองเดียวกัน และ ความเสียหาย อยู่ตำแหน่งตรงข้ามกันประมาณ 180 องศา

ภาพที่ 3-10 เงื่อนไขการจำลองสภาวะความเสียหาย

3.4.2.2 การจำลองความเสียหายโดยมีภาระการทำงานที่ 1.56 นิวตันเมตร ด้านการหมุนของเพลาดำตาม แสดงดัง ภาพที่ 3-9 ทำการทดลองทุกเงื่อนไข ตามหัวข้อ 3.3.1 โดยการถ่วงน้ำหนักขนาด 750 กรัมไว้ที่ปลายคานทำมุม 45 องศากับเพลานในแนวแกนนอน น้ำหนักจะตกลงทำให้ชุดดรัมเบรก (Drum Break) จับติดเพลาทำให้เกิดโมเมนต์ด้านการหมุนของเพลาของเฟืองตัวตาม ด้วยขนาดโดยประมาณ 1.56 นิวตันเมตรคงที่ตลอดการหมุนของเพลาของเฟืองตัวตาม

3.5 สรุป

บทนี้มุ่งเน้นถึงวิธีการที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งได้อธิบายประเภทของสัญญาณบนโดเมนเวลา และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ และวิธีการแยกความสัมพันธ์ของข้อมูล ตลอดจนได้อธิบายถึงการศึกษาดทดลองโดยการจำลองความเสียหายให้เกิดขึ้นกับเฟืองตรงที่จะกระทำการศึกษาทั้งหมด 4 เงื่อนไขได้แก่

เงื่อนไขที่ 1 การจำลองสภาวะปกติ

เงื่อนไขที่ 2 สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 50% ของความสูงของฟันเฟืองจำนวน 1 ฟัน

เงื่อนไขที่ 3 สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 100% ของฟันเฟืองของความสูงของฟันเฟืองจำนวน 1 ฟัน

เงื่อนไขที่ 4 สภาวะความเสียหายแบบฟันเฟืองแตกหัก 50% จำนวน 1 ฟันและ 100% จำนวน 1 ฟัน ของความสูงของฟันเฟืองบนเฟืองเดียวกัน และความเสียหายอยู่ตำแหน่งตรงข้ามกัน ตามลำดับ เฟืองที่ใช้จำลองความเสียหายจะถูกจำลองทั้งหมด 3 เฟือง ที่แสดงดังภาพที่ 3-6 ดังนี้

เฟืองหมายเลข 1 (Gear 1) มีจำนวน 28 ฟัน

เฟืองหมายเลข 2 (Gear 2) มีจำนวน 26 ฟัน

เฟืองหมายเลข 3 (Gear 3) มีจำนวน 24 ฟัน

การจำลองความเสียหายจะทำที่ละเงื่อนไขของเฟืองตรงแต่ละเฟือง ด้วยการความเร็วรอบคงที่ 1440 rpm และปรับความเร็วรอบด้วยชุดควบคุมจาก inverter ทั้งแบบไม่มีภาระและแบบมีภาระ โดยแบบมีภาระจะใช้ชุดเบรกดรัมที่ถูกถ่วงน้ำหนักแสดงดังภาพที่ 3-9 เพื่อใช้เป็นภาระด้านการเคลื่อนที่ของเพลาที่ถูกขับด้วยเฟืองตัวตาม จากนั้นจะทำการเก็บสัญญาณการ

สันสะท้อนของแต่ละเงื่อนไข 80 ไฟล์ของแต่ละเฟืองทั้งหมด 4 เงื่อนไข ซึ่งจะได้ข้อมูล 320 ไฟล์ต่อ 1 เฟืองใน 4 เงื่อนไข

นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงวิธีการสร้างโปรแกรมในการเก็บข้อมูลและวิธีการประยุกต์ใช้ระบบ สมการทางคณิตศาสตร์ในการประมวลผลสัญญาณการสันสะท้อน เพื่อที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเฟืองตรงได้ตั้งวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

การนำเสนอการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าของงานวิจัยนี้ จะนำเสนอวิธีการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งไว้ที่ชุดทดลองที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลอง และผลการวิเคราะห์ ความเสียหายที่เกิดขึ้น จากการจำลองความเสียหายทั้ง 4 เงื่อนไข ได้แก่ เงื่อนไขที่ 1 การจำลอง สภาวะปกติ เงื่อนไขที่ 2 การแตกหักของฟันเฟือง 50 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน เงื่อนไขที่ 3 การแตกหักของ ฟันเฟือง 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน และเงื่อนไขที่ 4 การแตกหักของฟันเฟือง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างละ 1 ฟันบนเฟืองเดียวกัน และตรงข้ามกัน การประมวลผลสัญญาณความเสียหายของ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้ จะใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์ เิง สถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าความแปรปรวน (Variance) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่าความเบ้ (Skewness) ค่ารากกำลังสอง (RMS) ค่า Crest Factor และ ค่าพลังงานสัญญาณ (Signal Energy) พารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ได้แต่ไม่ชัดเจนทุกกรณี ส่วนวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วย พารามิเตอร์ เิงสถิติ พร้อมกัน 2 พารามิเตอร์ ทุกเงื่อนไขการทดลอง ที่ได้ศึกษา พร้อมทั้ง สร้างขอบเขตการแปรผันร่วม ของพารามิเตอร์เชิงสถิติที่ได้จากข้อมูลอ้างอิงก่อน ทำให้สามารถทำนายความเสียหายของเฟืองที่ เงื่อนไขการทดสอบต่าง ๆ ได้ด้วยค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

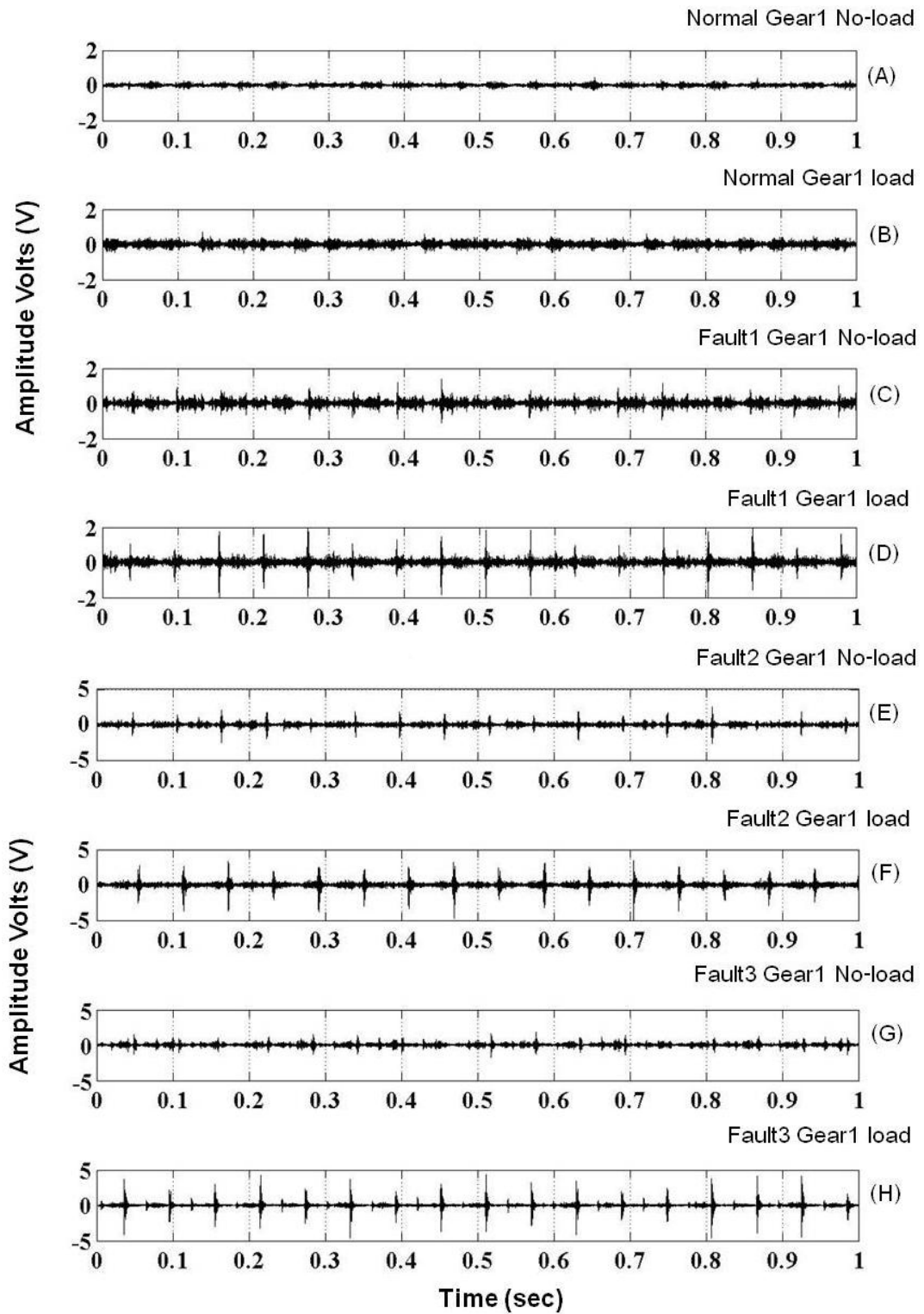
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงบนโดเมนเวลา

ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกขณะเฟืองตรงทำงานแสดงดังภาพ ที่ 4-1 ถึง ภาพที่ 4-3 ซึ่งเป็นสัญญาณการทำงานของเฟืองที่ขบกันที่เงื่อนไขต่าง ๆ ภายใต้มอเตอร์ไม่มีภาระกระทำ สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนประเภทสัญญาณสุ่ม (Random Signals) แบบไม่คงที่ (non-stationary) เพราะฉะนั้นจะ เป็นการยุ่งยาก กว่า หาก วิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ จึงเป็นเหตุผล หนึ่งที่เลือกใช้ วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบน โดเมนเวลา ด้วย วิธีการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ เิงสถิติจะให้คำตอบที่ดีกว่า และก่อให้เกิดความ เข้าใจในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่ายกว่า

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรงหมายเลข 1 (Gear 1) ซึ่งมีจำนวนฟันเฟือง 28 ฟัน แสดงดังภาพที่ 4-1 สัญญาณการสั่นสะเทือน ของเฟืองที่ถูกจำลองให้อยู่ในสภาวะการทำงานปกติ แบบไม่มีภาระการทำงาน (normal condition without load) ของระบบเฟืองขับของรถจักรยานยนต์ขนาด 125 ซีซี ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 1.25 แรงม้า (HP), 3 เฟส, ด้วยความเร็วรอบคงที่ 1440 รอบต่อนาที (rpm) แสดงดังภาพที่ 4-1 โดยแกนนอนเป็นเวลา ในหน่วยวินาที และแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดหน่วยเป็นโวลต์ (volt) รูปแบบสัญญาณที่เกิดขึ้นมีแอมพลิจูดเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการทำงานของเฟืองตรงที่เกิดจากการขบกันของเฟืองตรงแต่ละฟัน โดยแท้จริงแล้วไม่ได้ขบกันด้วยแรงที่กระทำระหว่างกันอย่างสม่ำเสมอตลอดการหมุนในแต่ละรอบการทำงาน สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการจำลองสภาวะการทำงานในสภาวะที่ปกติ นี้ จะถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงและเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ ต่อไป

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรงหมายเลข 1 มีจำนวนฟันเฟือง 28 ฟัน ที่สภาวะปกติภายใต้ภาระด้วยการใส่โมเมนต์ด้านการหมุนของเพลลา ขนาด 1.56 นิวตันเมตร (Nm) แสดงดังภาพที่ 4-1(B) สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดจากแนวแกนตั้งบริเวณตัวเรือนของเบร้งมีลักษณะของสัญญาณที่วัดได้คล้ายคลึงกันกับสัญญาณที่ไม่ได้รับภาระการทำงาน แต่แตกต่างที่แอมพลิจูดของสัญญาณที่เกิดขึ้นมีค่ายอดคลื่น สูงสุดถึงสูงสุด (Vp-p) มีความสม่ำเสมอมากกว่า เล็กน้อยและแอมพลิจูดสูงกว่าด้วย ส่วนเหตุการณ์ของการขบกันของฟันเฟืองตรงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งรอบการทำงานของเฟืองก็ไม่สม่ำเสมอเหมือนดังกรณีที่ไม่มีการทำงาน

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรงหมายเลข 1 มีจำนวนฟันเฟือง 28 ฟัน ที่ถูกจำลองความเสียหายตามเงื่อนไขที่ 2 (fault 1) การจำลองความเสียหายในสภาวะการแตกหักของฟันเฟืองขนาด 50 เปอร์เซ็นต์จากความสูงของฟันเฟืองโดยที่ไม่มีภาระการทำงานแสดงดังภาพที่ 4-1(C) เมื่อเฟืองเกิดความเสียหายขึ้นจะสามารถสังเกตได้ว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนแตกต่างจากกรณีเงื่อนไขปกติได้อย่างชัดเจน โดยดูจากค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าค่าในสภาวะปกติ และการเกิดสัญญาณที่เป็นลักษณะแบบชั่วขณะ (Transients signal or burst signal) สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าเป็นผลที่เกิดจากการกระทบกระแทกของฟันเฟืองตรงที่แตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเหตุการณ์ที่มีแอมพลิจูดสูงจะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ ของแต่ละรอบการทำงานของเฟือง แต่ขนาดแอมพลิจูดและตำแหน่งจะไม่คงที่ สาเหตุที่เกิดขึ้น คาดว่าการเคลื่อนที่แบบหมุนคงทำให้การขบกันของเฟืองไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเฟืองอาจมีระยะคลอน (backlash) มากเกินไป



ภาพที่ 4-1 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาในแนวแกนตั้งของเฟืองตรงหมายเลข 1 ที่
รับภาระและไม่รับภาระการทำงาน

สัญญาณการสั้นสะเทือนจากการจำลอง ความเสียหายให้พื้นเฟืองแตกหัก 50 เฟอร์เซ็นต์และรับภาระการทำงานแสดงดัง ภาพที่ 4-1 (D) พบว่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะเกิดเหตุการณ์ชั่วขณะเกิดขึ้นเป็นช่วงๆ ของแต่ละรอบการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการขบกันของเฟืองที่แตกหักภายใต้ภาระกระทำ และแอมพลิจูดของสัญญาณจะมีค่ามากกว่าเงื่อนไขพื้นเฟืองแตกหัก 50 เฟอร์เซ็นต์แบบไม่รับภาระ

สัญญาณการจำลองความเสียหายตามเงื่อนไขที่ 3 (fault 2) เมื่อพื้นเฟืองแตกหัก 100 เฟอร์เซ็นต์ และไม่มีภาระการทำงานแสดงดังภาพที่ 4-1(E) การจำลองเงื่อนไขนี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นถือเป็นความเสียหายที่รุนแรงที่สุด และสัญญาณที่ตรวจวัดได้มีแอมพลิจูดที่สูงที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ทำการบันทึกผลการทดลองอยู่นั้น เสียงที่เกิดจากความเสียหายในเงื่อนไขนี้มีความรุนแรงมากเป็นจังหวะๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ปรากฏของสัญญาณการสั้นสะเทือน แต่เหตุการณ์ที่เกิดจากพื้นเฟืองเสียหายปรากฏในสัญญาณไม่สม่ำเสมอ

สัญญาณที่เกิดจากการจำลองความเสียหายตามเงื่อนไขที่ 3 (fault 2) เมื่อพื้นเฟืองแตกหัก 100 เฟอร์เซ็นต์ ภายใต้ภาระการทำงาน แสดงดัง ภาพที่ 4.1(F) สัญญาณการสั้นสะเทือนที่ตรวจวัดได้มีแอมพลิจูดการสั้นสะเทือนที่สูงกว่าผลของสัญญาณภาพที่ 4-1 (E) อย่างเห็นได้ชัดเจน แต่รูปแบบ ของสัญญาณการกระแทก หรือสัญญาณชั่วขณะ (Transient Signal) ค่อนข้างที่จะ มีระดับแอมพลิจูดที่สูงใกล้เคียงกัน กว่ากรณีที่ไม่มีภาระการทำงาน แต่เหตุการณ์ที่ปรากฏเกิดไม่สม่ำเสมอตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บข้อมูล

สัญญาณการสั้นสะเทือนที่ เกิดจากการจำลองความเสียหายตามเงื่อนไขที่ 4 (fault 3) เนื่องจากพื้นเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เฟอร์เซ็นต์ โดยเกิดพร้อมกันบนเฟืองเดียวกันโดยไม่มีภาระการทำงานแสดงดังภาพที่ 4.1(G) สัญญาณการสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะสังเกตเห็นได้ถึงเหตุการณ์ที่เกิดจากการขบกันของเฟืองที่เสียหาย แต่ขนาดของแอมพลิจูดและเหตุการณ์ที่ ปรากฏจะไม่สม่ำเสมอ เมื่อเงื่อนไขการจำลองพื้นเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เฟอร์เซ็นต์พร้อมกันภายใต้การภาระการทำงานแสดงดังภาพที่ 4.1 (H) สัญญาณที่บันทึกได้จะพบเห็นเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์ที่เกิดจากการขบกันของเฟืองที่ชำรุดเสียหายอย่างชัดเจนโดยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมีระยะห่างที่เท่าๆ กัน ซึ่งคาดว่าเฟืองที่แตกหักมีตำแหน่งห่างกันประมาณ 180 องศา

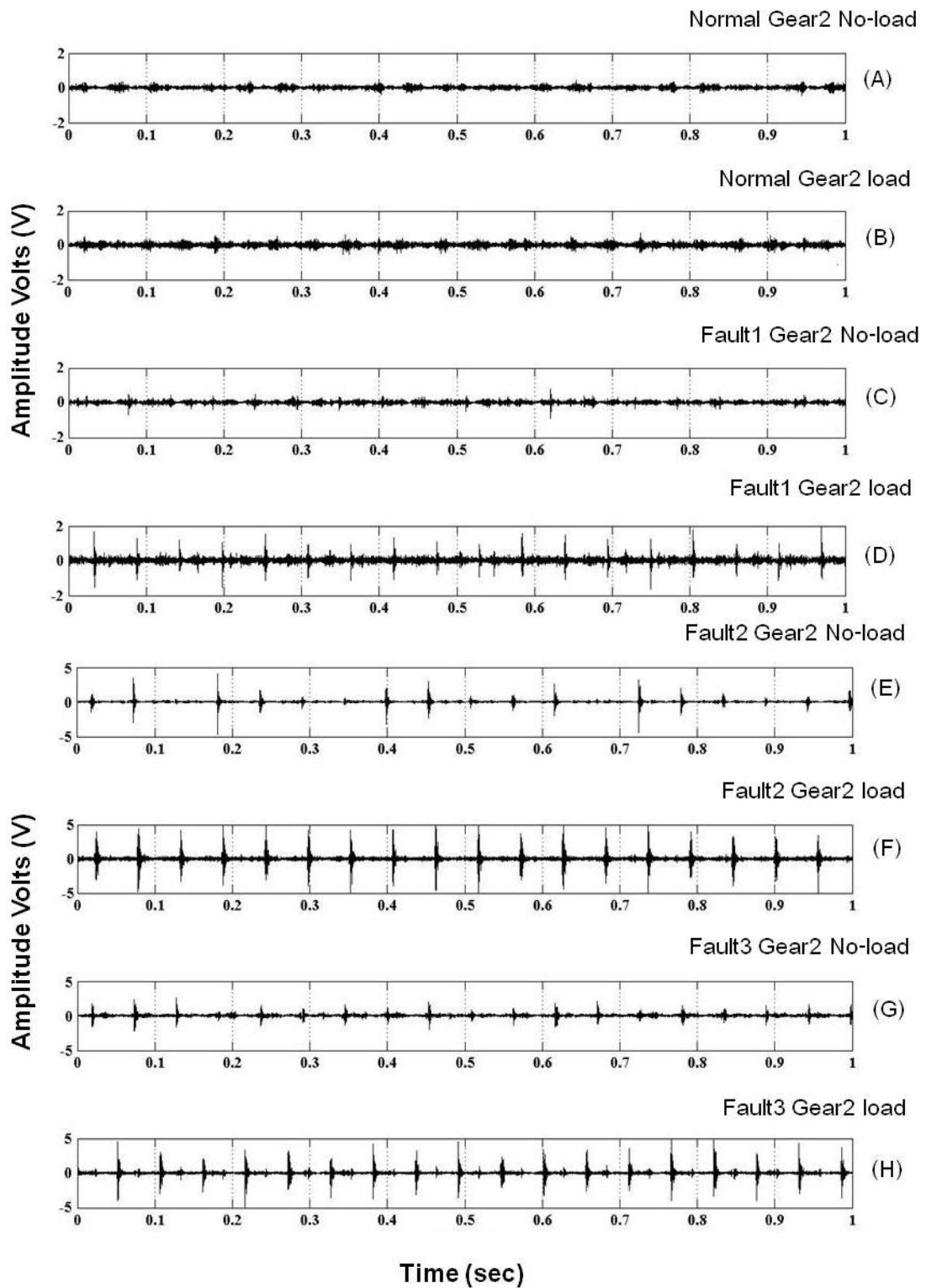
จากผลของสัญญาณการสั้นสะเทือนที่ได้ศึกษาจากสัญญาณการสั้นสะเทือนของเฟืองหมายเลข 1 จำนวนเฟือง 28 ฟัน สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความเสียหายของสัญญาณการสั้นสะเทือนบนโดเมนเวลาของเฟืองตรงหมายเลข 2 จำนวนเฟือง 26 ฟันที่ถูกทำการจำลองความเสียหาย ตามเงื่อนไขการทดลองทั้ง 4 เงื่อนไขที่กล่าวไว้แล้ว

สัญญาณการสันสะเทือนบนโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นของเฟืองตรงหมายเลข 2 แสดงดังภาพที่ 4-2 สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะมีลักษณะเป็นไปตามสัญญาณการสันสะเทือนของเฟืองตรงหมายเลข 1 โดยแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณและแกนนอนเป็นเวลาในหน่วยวินาที สัญญาณการสันสะเทือนที่สภาวะการทำงานปกติของเฟืองหมายเลข 2 โดยไม่มีภาระและรับภาระแสดงดังรูป 4-2(A) และ 4-2(B) ตามลำดับ สัญญาณของกรณี ที่เฟืองรับภาระจะมีแอมพลิจูดสูงกว่า และแอมพลิจูดจะค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ สัญญาณการสันสะเทือนของเฟืองหมายเลข 2 ที่ฟันเฟืองแตกหักเสียหาย 50 เปอร์เซ็นต์แบบไม่รับภาระและรับภาระแสดงดังภาพที่ 4-2(C) และ 4-2(D) ตามลำดับ สัญญาณการสันสะเทือนจะปรากฏสัญญาณที่เกิดจากการขบกันของเฟืองที่แตกหักปะปนกับสัญญาณแบบต่อเนื่อง และแอมพลิจูดจะสูงขึ้นและชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเฟืองรับภาระ สัญญาณการสันสะเทือนของเฟืองหมายเลข 2 ที่ฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์แบบไม่รับภาระและรับภาระแสดงดังภาพที่ 4-2(E) และ 4-2(F) ตามลำดับ สัญญาณการสันสะเทือนจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเงื่อนไขเฟืองเสียหาย 50 เปอร์เซ็นต์แต่แอมพลิจูดจะมากกว่าทั้งกรณี ที่เฟืองไม่รับและรับภาระ สัญญาณการสันสะเทือนของเฟืองหมายเลข 2 ที่ฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์พร้อมกันโดยไม่รับภาระและรับภาระแสดงดัง ภาพที่ 4-2(G) และ 4-2(H) ตามลำดับ สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะมีเหตุการณ์การขบกันของเฟืองที่แตกหักทั้งสองกรณี และจะเกิดห่างกันประมาณ 180 องศา และสัญญาณจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นและชัดเจนขึ้นเมื่อเฟืองหักที่ขบกันภายใต้ภาระการทำงาน

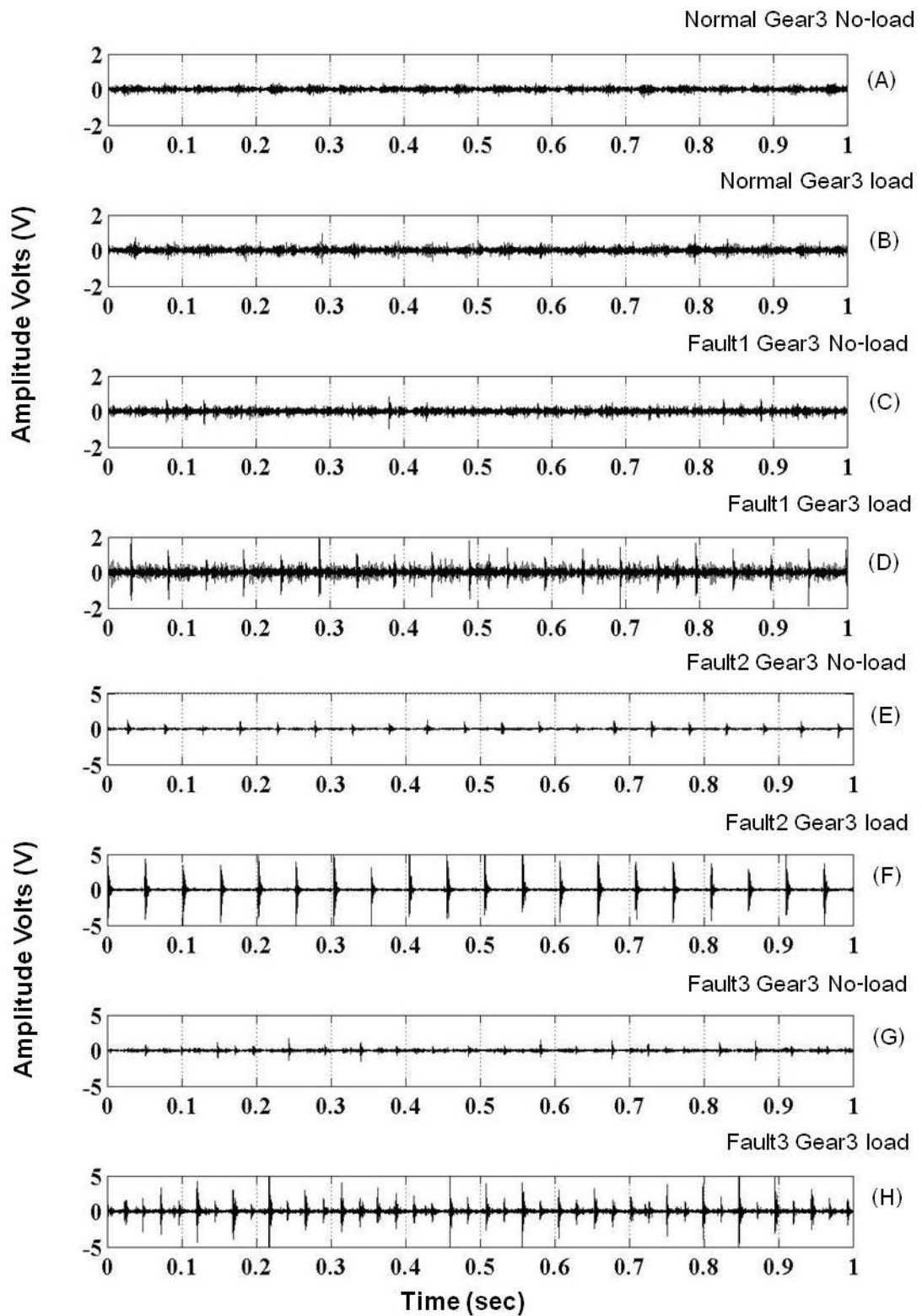
สัญญาณการสันสะเทือนที่บันทึกได้จากการจำลองของฟันเฟืองหมายเลข 3 (Gear 3) ที่มีจำนวนฟันเฟือง 24 ฟัน แสดงดังภาพที่ 4-3 (A-H) โดยแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดมีหน่วยเป็นโวลต์และแกนนอนเป็นเวลาในหน่วยวินาที ซึ่งได้จากการจำลองความเสียหายให้เกิดขึ้นทั้งหมด 4 เงื่อนไขเช่นเดียวกับเฟืองหมายเลข 1 และ 2 สัญญาณการสันสะเทือนของเงื่อนไขเฟืองหมายเลข 3 ทำงานปกติแบบไม่รับภาระและรับภาระแสดงดัง ภาพที่ 4-3(A) และ 4-3(B) ตามลำดับ ส่วนสัญญาณการสันสะเทือนของเงื่อนไขเฟืองหมายเลข 3 แตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์แบบไม่รับภาระและรับภาระแสดงดัง ภาพที่ 4-3(C) และ 4-3(D) ตามลำดับ สัญญาณการสันสะเทือนของเฟืองหมายเลข 3 ที่ฟันเฟืองเสียหาย 100 เปอร์เซ็นต์แบบไม่รับภาระและรับภาระแสดงดังภาพที่ 4.3(E) และ 4-3(F) ตามลำดับ และสัญญาณการสันสะเทือนของเฟืองหมายเลข 3 ที่ฟันเฟืองเสียหาย 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์พร้อมกันแบบไม่มีภาระและรับภาระแสดงดัง ภาพที่ 4.3(G) และ 4-3(H) ตามลำดับ สัญญาณที่บันทึกได้จากทุกกรณีจะมีแนวโน้มของสัญญาณและลักษณะของสัญญาณเช่นเดียวกับที่ปรากฏในเฟืองหมายเลข 1 และ 2 และสัญญาณจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นและ

ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเฟืองทำงานภายใต้ภาระ การกระทบกันของฟันเฟืองช่วงที่เกิดความเสียหาย จะให้สัญญาณค่อนข้างชัดเจน เหตุการณ์นี้เป็นความเสียหายที่รุนแรงมาก และเมื่อเฟืองทำงานภายใต้ภาระการทำงานยิ่งส่งผลร้ายแรงต่อฟันเฟืองอย่างเห็นได้ชัดเจน เพราะหลังจากการทดลองเรียบร้อยแล้วจะสามารถสังเกตเห็นร่องรอยของความเสียหายจากการขบกันของฟันเฟืองที่เฟืองตัวตามอย่างชัดเจน ความเสียหายที่ทำการจำ ลองเป็นเพียงความเสียหายที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการที่จะใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเฟืองตรง ซึ่งในความเป็นจริงอาจจะขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของภาระงานที่ดำเนินงานอยู่ขณะนั้น

จากผลทดลองดังภาพที่ 4-1 ถึง 4-3 เป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นของแต่ละเฟือง เป็นประเภทสัญญาณแบบสุ่ม (Random signal) โดยจำนวนเหตุการณ์การขบกันของเฟืองที่เสียหายจะปรากฏมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนฟันของเฟือง จากผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้จากแต่ละเฟืองสามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงและรูปแบบที่เกิดขึ้นซึ่ง สอดคล้องกับเงื่อนไขการจำลองความเสียหาย หัวข้อต่อไปจะเป็นการประยุกต์เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงสถิติ เพื่อใช้ในการจำแนกสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากชุดจำลองออกเป็นกลุ่มตามเงื่อนไขการจำลองความเสียหายของเฟือง



ภาพที่ 4-2 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาในแนวแกนตั้งของเฟืองตรงหมายเลข 2 ที่รับภาระและไม่รับภาระการทำงาน



ภาพที่ 4-3 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาในแนวแกนตั้งของเฟืองตรงหมายเลข 3 ที่รับภาระและไม่รับภาระการทำงาน

4.3 การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ

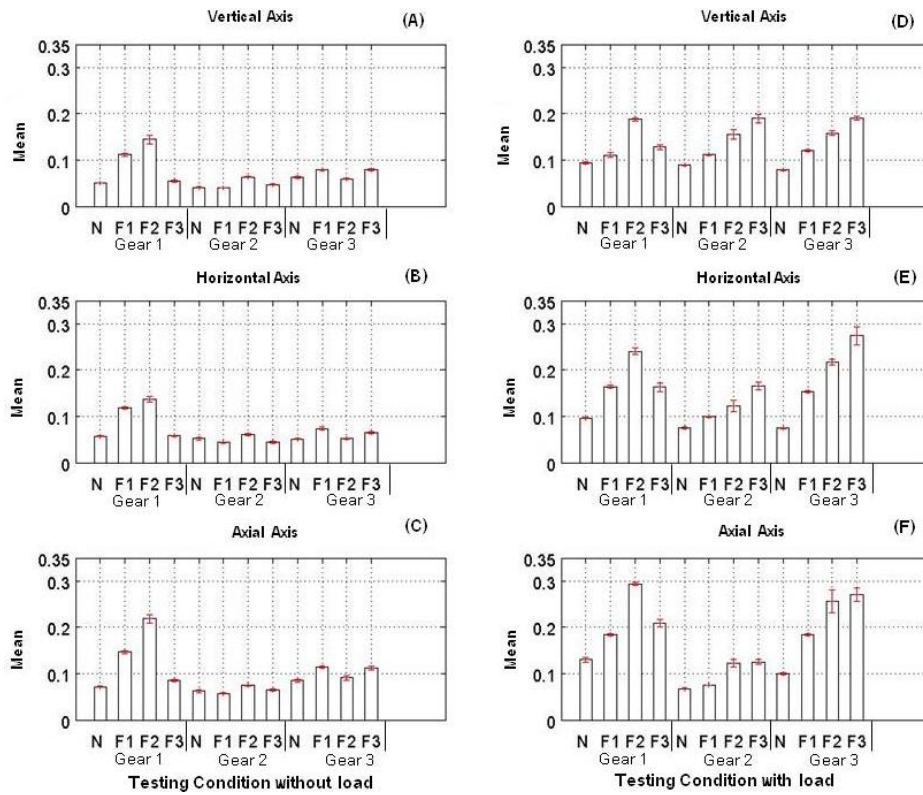
วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยตัวแปรเชิงสถิติ เป็นวิธีการคำนวณค่าเชิงสถิติ เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ของสัญญาณการสั่นสะเทือน ที่เกิดขึ้น และพิจารณาถึงความสอดคล้องและความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะปกติและสภาวะความเสียหายของเฟืองตรง ซึ่งทำงานภายใต้เงื่อนไข การจำลองความเสียหายของเฟืองตรงต่าง ๆ พารามิเตอร์เชิงสถิติที่พิจารณาจะใช้วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นสัญญาณ แบบสุ่ม (Random signal) ดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 3 ดังนั้นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติมีวิธีการ วิเคราะห์ที่มีขั้นตอนดังนี้ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ เชิงสถิติ สัญญาณ การสั่นสะเทือน บนโดเมนเวลา ดังภาพที่ 4.1-4.3 จะถูกนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติ ต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าความแปรปรวน (Variance) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่าความเบ้ (Skewness) ค่ารากกำลังสอง (RMS) ค่า Crest Factor (CF) และค่าพลังงานสัญญาณ เป็นต้น แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4-4 ถึง 4-10 โดยสัญลักษณ์ที่แสดงในรูปมีความหมายดังนี้ เงื่อนไขที่ 1 (N: Normal): ในสภาวะปกติ, เงื่อนไขที่ 2 (F1: Fault 1): ในการจำลองความเสียหายให้ฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน, เงื่อนไขที่ 3 (F2: Fault 2): ในการจำลองความเสียหายให้ฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟันและ เงื่อนไขที่ 4 (F3: Fault 3): ในการจำลองความเสียหายให้ฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์อย่างละ 1 ฟัน ที่เกิดขึ้นบนเฟืองเดียวกัน และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาผลการทดลองใน ภาพที่ 4-4 ถึงภาพที่ 4-10 จึงได้แบ่งผลจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนออกเป็นการวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลเชิงสถิติทุกพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.1)–(3.11) นอกจากนี้ผลการคำนวณสามารถแบ่งออกเป็น การคำนวณแต่ละแนวแกนที่ติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือน และการคำนวณแต่ละพารามิเตอร์ของทุกเงื่อนไขการจำลองความเสียหาย

ผลการคำนวณทำให้สามารถเห็นภาพรวมทั้งหมดของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดความเสียหายขึ้น ได้ชัดเจน ผลการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ เชิงสถิติที่แสดงดังภาพที่ 4-4 ถึงภาพที่ 4-10 นี้ถูกคำนวณจากจำนวน 50 เซตข้อมูลต่อแต่ละเงื่อนไขของการจำลองของเฟือง ผลที่ได้นี้จะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบของข้อมูลทุกเงื่อนไขการจำลองความเสียหายของแต่ละเฟืองที่ศึกษา

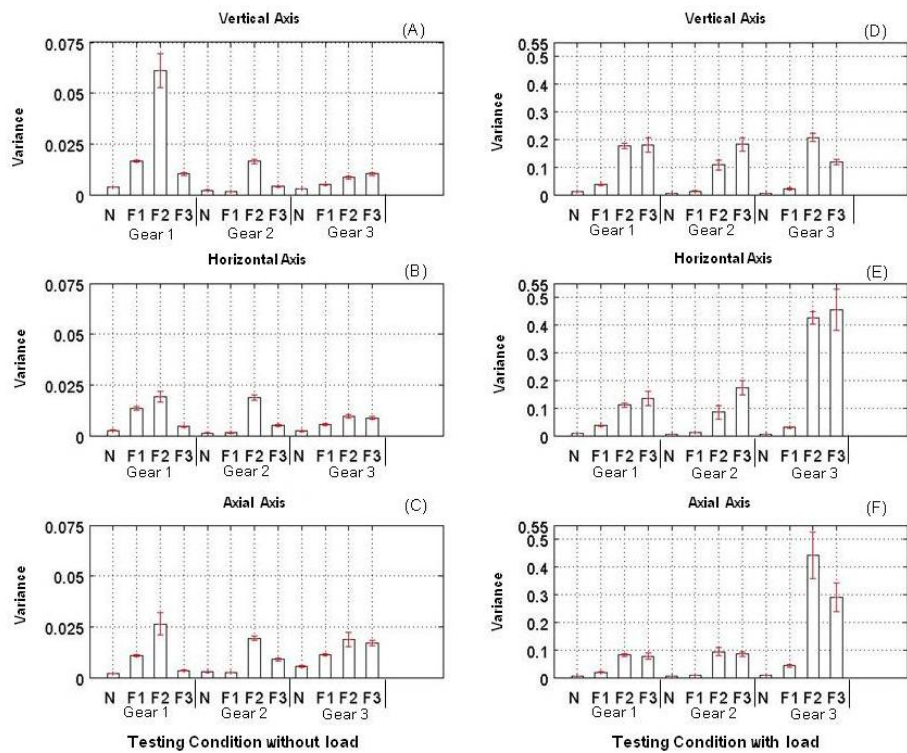
ผลจากการคำนวณหาค่าโมเมนต์ที่ 1 หรือค่าเฉลี่ยของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงแสดง ดังภาพที่ 4-4 เป็นแผนภูมิแท่ง แกนตั้งคือค่าเฉลี่ย ของค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือน ที่ยอดแผนภูมิแท่งแถบสีแดง แสดงถึงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ

ค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น แกนนอนคือเงื่อนไขของการจำลองของแต่ละเฟืองตรง โดยแบ่งเป็นการนำเสนอแบบเมทริกซ์รูปภาพแบบ 3×3 ผลจากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเฟืองตรงของทุกเงื่อนไขการจำลองแบบไม่มีภาระและมีภาระการทำงานแสดงดังภาพที่ 4-4(A-C) และ 4-4(D-F) ตามลำดับ โดยแต่ละแถวจะเป็นผลการคำนวณของแต่ละแนวแกน เช่น แนวแกนตั้ง แนวแกนนอน และแนวแกนเพลลา ตามลำดับ จากแผนภูมิแท่ง เมื่อเฟืองเกิดความเสียหายจะทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาข้อมูลจากการทดลองแล้ว สิ่งที่พบคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเงื่อนไข 4 (F3) ค่าเฉลี่ยของสัญญาณของแต่ละเฟืองจึงไม่สูงตามในคอลัมน์ที่หนึ่ง เนื่องจากไม่มีภาระการทำงาน แต่เมื่อพิจารณาคอลัมน์ที่สองที่มีภาระการทำงานปรากฏว่าค่าที่คำนวณออกมาได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ค่าเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความรุนแรงของความเสียหายเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่เกิดการแตกหักของฟันเฟือง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (F3) พร้อมกันและรับภาระการทำงานพบว่าบางกรณีจะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่เฟืองเสียหาย 100 เปอร์เซ็นต์ (F2)

ผลการคำนวณหาค่าโมเมนต์ที่ 2 หรือ ค่าแปรปรวนของสัญญาณการสั่นสะเทือนจากข้อมูลทั้งหมด 50 เซตข้อมูลแสดงดังภาพที่ 4-5 โดยแกนตั้งคือค่าเฉลี่ยของค่าแปรปรวนของสัญญาณและแกนนอนคือเงื่อนไขการจำลองของแต่ละเฟืองตรง ค่าความแปรปรวนของแต่ละเฟืองที่ทุกเงื่อนไขการจำลองแบบไม่มีภาระและมีภาระการทำงานแสดงดังภาพที่ 4-5(A-C) และภาพที่ 4-5 (D-F) ตามลำดับ โดยแต่ละแถวจะแสดงผลการวิเคราะห์ของแต่ละแนวแกน เช่น แนวแกนตั้ง แนวแกนนอน แนวแกนเพลลา เป็นต้น ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าเฉลี่ย โดยส่วนใหญ่ของค่าความแปรปรวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความรุนแรงของความเสียหายเพิ่มขึ้น ยกเว้นเงื่อนไขความเสียหายของเฟืองที่เกิดพร้อมกัน (F3) ที่จะมีค่ามากกว่าเมื่อเฟืองรับภาระ



ภาพที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน



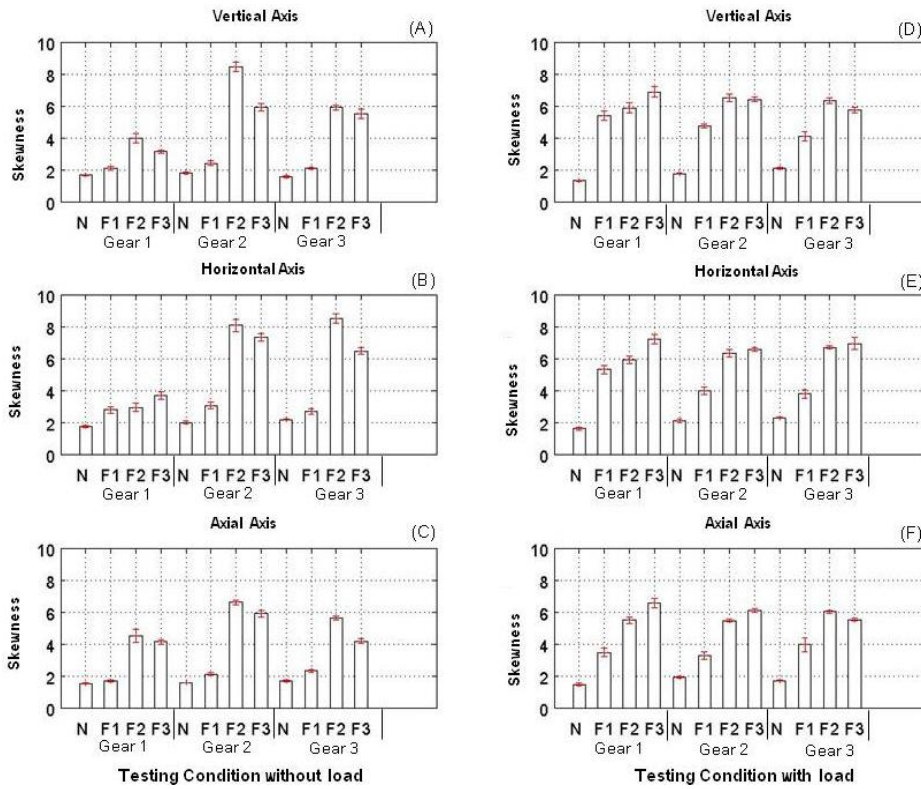
ภาพที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยของค่าความแปรปรวนของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน

ผลการคำนวณหาค่าโมเมนต์ที่ 3 หรือค่าความเบ้ที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดัง ภาพที่ 4-6 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่า ความเบ้ที่ได้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที สอดคล้องกับความเสียหายเช่นเดียว แต่กรณีการทดลองที่ไม่มีภาระการทำงานค่าที่ได้มีความ สม่่าเสมอของสัญญาณการสั่นสะเทือนจึงทำให้ค่าความเบ้แตกต่างกันไม่มากนักดัง ภาพที่ 4-6(A-C) แต่เมื่อเพื่อรับภาระค่าความเบ้จะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของความเสียหายที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4-6(D-F)

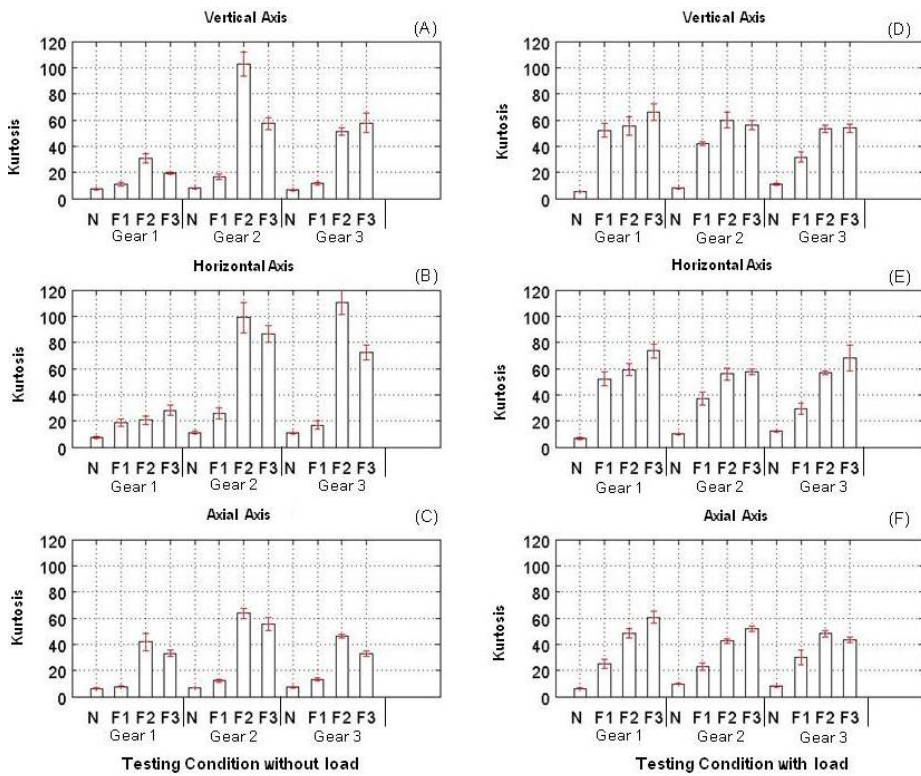
ผลของค่าโมเมนต์ลำดับ 4 หรือค่าความโด่งแสดงดัง ภาพที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยของ ค่า ความโด่งนี้ จะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของความเสียหายของเฟือง โดยจะชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเฟือง ทำงานภายใต้ภาระ แต่เงื่อนไขที่เฟืองเสียหายพร้อมกัน (F3) จะเหมือนกับผลการวิเคราะห์ที่ผ่าน มาที่อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าเงื่อนไขของเฟืองที่หัก 100 เปอร์เซ็นต์

ผลของค่ารากกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ได้ถูกนำมาใช้ในการ วิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของงานวิจัยนี้ ซึ่งโดยทั่วไปการตรวจสอบความเสียหายของ เครื่องจักรกลหมุนนิยมใช้ค่านี้เนื่องจากในอดีตอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลยังไม่สามารถเก็บข้อมูล ดิบของสัญญาณที่ความเร็วสูง ๆ ได้จึงนิยมทำวงจรรหาค่า RMS ขึ้นเพื่อลดจำนวนข้อมูลที่บันทึกให้ น้อยลงและเพียงพอต่อการวิเคราะห์ปัญหาที่ศึกษา เมื่อพิจารณาแผนภูมิแท่งใน ทุกเงื่อนไขที่ไม่มี ภาระการทำงานดัง ภาพที่ 4-8 (A-C) ผลที่ได้ยังไม่ชัดเจนนักเนื่องจากบางเงื่อนไขมีค่า RMS ที่ ใกล้เคียงกันมากจึงไม่สามารถแยกความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ เมื่อพิจารณาเฟืองที่รับภาระพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่า RMS ที่ได้มีความแตกต่างอย่างชัดเจนดังรูป 4-8(D-F) และแนวโน้มของข้อมูล เป็นไปตามผลของค่าเฉลี่ยและค่าแปรปรวน เป็นต้น

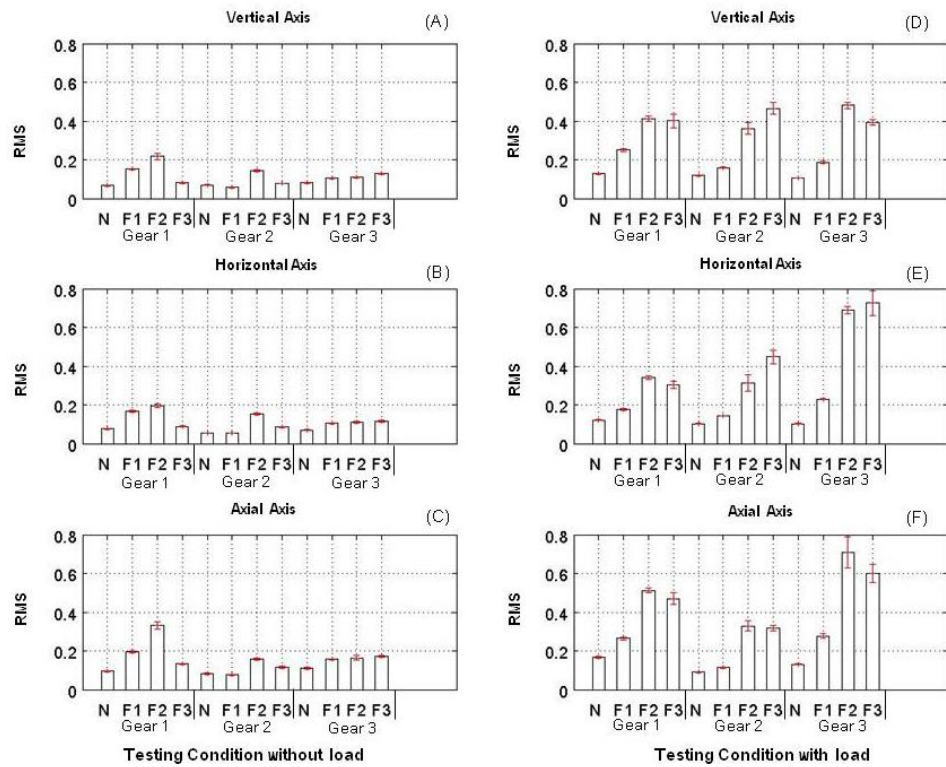
ค่า Crest Factor คืออัตราส่วนระหว่างค่าแอมพลิจูดสูงสุดและค่า RMS ของ สัญญาณ ผลการวิเคราะห์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4-9 พบว่าค่าเฉลี่ยของค่า Crest Factor สามารถบอกแนวโน้มของข้อมูลที่เกิดขึ้นได้ แต่ยังไม่ชัดเจนเนื่องจากค่าที่ได้ของแต่ละเงื่อนไขยังไม่ แตกต่างกันอย่างชัดเจน หากเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ก่อนหน้าของพารามิเตอร์อื่นพบว่า ค่า kurtosis หรือ ค่า RMS จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่า ผลของค่าพลังงานของสัญญาณ (Energy signal) ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณของแต่ละเงื่อนไขที่จำลองแสดงดัง ภาพที่ 4-10 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่นิยมใช้อธิบายพฤติกรรมทางกลหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ดี ของสัญญาณบนโดเมนเวลา



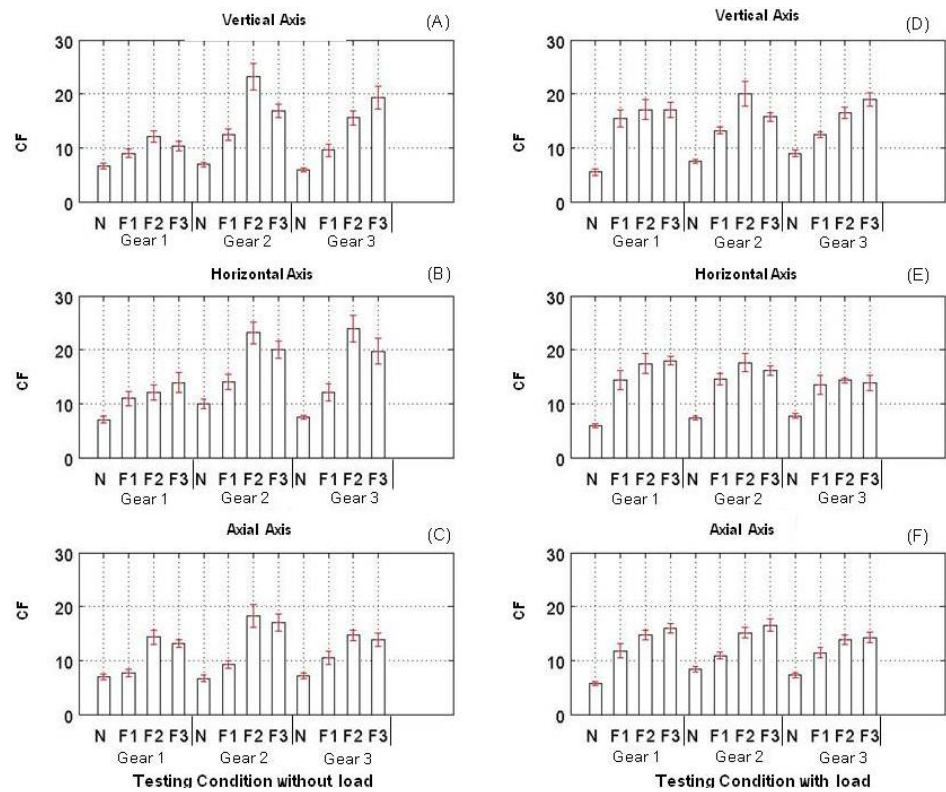
ภาพที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยของค่าความเบ้ของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน



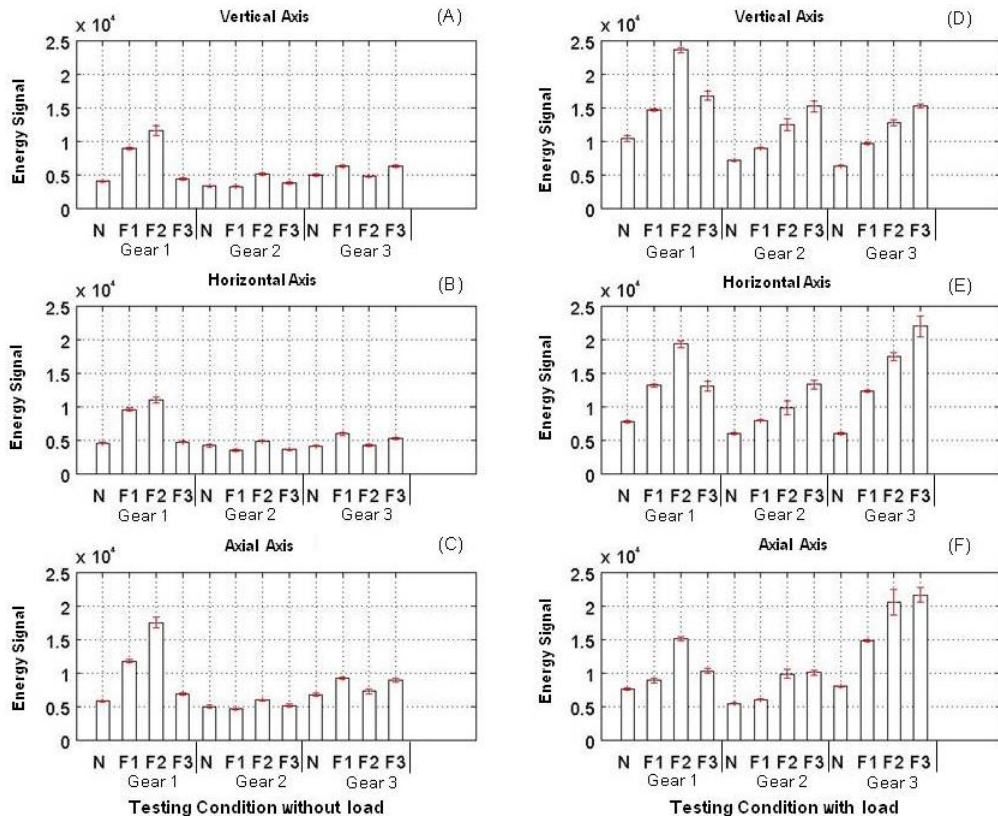
ภาพที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยของค่าความโด่งของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน



ภาพที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยของค่า RMS ของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน



ภาพที่ 4-9 ค่าเฉลี่ยของค่า Crest Factor ของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน



ภาพที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานของสัญญาณโดเมนเวลาทั้ง 3 แนวแกน

จากแผนภูมิแท่งของพารามิเตอร์เชิงสถิติแต่ละตัวที่เงื่อนไขการจำลองต่าง ๆ ดังที่แสดงข้างต้น การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรง ด้วยแต่ละพารามิเตอร์ที่พิจารณาข้างต้น อาจจะแยกความเสียหายที่จำลองขึ้นกับเฟืองตรงในสภาวะปกติได้ไม่ชัดเจนมากนัก เนื่องจากค่าของพารามิเตอร์บางตัวยังใช้อธิบายได้ไม่ชัดเจน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลไม่สัมพันธ์กัน ตัวอย่างเช่น ค่า Crest factor และค่าความเบ้พบว่าบางเงื่อนไขการจำลองจะมีข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันแยกไม่ออก เป็นต้น หากวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เดียวจะทำให้ การพิจารณาแนวโน้มของข้อมูลที่เกิดขึ้นทั้งหมดไม่ชัดเจน ซึ่งอาจทำให้การทำนายความเสียหายของเฟืองด้วยข้อมูลที่วิเคราะห์ ได้เกิดความ ผิดพลาด ข้อมูลของผลการทดลองใน ตอนต้นสามารถใช้เลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อใช้วิเคราะห์สัญญาณการทำงานของเฟือง ตรงได้ จากผลที่ได้นำเสนอไปทั้งหมดพบว่าการใช้สัญญาณที่บันทึกจากหัววัดที่ตำแหน่ง แนวแกนทั้งสาม (แกนนอน แกนตั้ง และแกนเพลลา) คาดว่าน่าจะสามารถใช้ทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นของเฟืองตรงได้ ทั้งหมด เพียงแต่จะต้องเลือก เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ที่ชัดเจนที่สุด งานวิจัยนี้ได้เลือกผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดลองในแนวแกนตั้ง (Vertical axis) เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองอื่นๆ ด้วย

4.4 การสร้างขอบเขตการตัดสินใจด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยการหาความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติเพื่อใช้แยกกลุ่มความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากความเสียหายของเฟือง ตรงของการศึกษานี้ จะใช้ค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง และค่าพลังงานสัญญาณเป็นต้น ทั้งนี้ได้ทดลองทำการทดลองจับคู่จนครบทุกคู่แล้ว วจในการวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติของ 2 พารามิเตอร์พบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถให้ผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากหัววัดตามแนวแกนตั้ง (Vertical axis) ได้ดีกว่าแกนนอนและแนวแกนเพลลา เนื่องจากสัญญาณที่บันทึกได้มีแอมพลิจูดค่อนข้างสูง และผลของการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติที่วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้าให้แนวโน้ม และความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ และการสร้างขอบเขต ข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการคำนวณค่าการแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติของ 2 พารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการกำหนดขอบเขตของข้อมูลที่คำนวณได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือน ของทุกเงื่อนไขที่ศึกษา การวิเคราะห์ส่วนนี้จะใช้ข้อมูลชุดที่วิเคราะห์ไว้ดัง ภาพที่ 4-4 ถึง 4-10 และขอบเขตที่กำหนดได้นี้ จะถูกทดสอบด้วยกับสัญญาณการสั่นสะเทือนอีกชุดที่บันทึกจากการจำลองเพื่อ ตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตที่กำหนดผลการวิเคราะห์ตัวแปรร่วมของเฟืองหมายเลข 1 ที่ทุกเงื่อนไขการจำลองภายใต้ไม่มีภาระและมีภาระการทำงาน แสดงดังภาพที่ 4-11 ถึง 4-14 โดยที่แกนนอนเป็นค่าความโด่ง และแกนตั้งเป็นค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่า RMS และค่าพลังงานของสัญญาณตามลำดับ ผลการวิเคราะห์เลือกค่าความโด่งเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นดังกล่าวเนื่องจากผลการวิเคราะห์ร่วมให้แนวโน้มของข้อมูลที่ตี ภายหลังจากการวิเคราะห์ความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติทั้งหมด 7 พารามิเตอร์ที่แสดงดังภาพที่ 4-4 ถึง 4-10 ซึ่งจะได้ผลของการแปรผันร่วมกันจำนวนมาก แต่จะเลือกพารามิเตอร์ที่สามารถแสดงผลของกลุ่มข้อมูลที่แยกออกจากกันได้ดีที่สุด และพบว่าผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ของทุกพารามิเตอร์รวมทุกเงื่อนไขของเฟืองทำงานภายใต้ไม่มีภาระและมีภาระดังภาพที่ 4-11 ถึง 4-14 สามารถแยกข้อมูลออกเป็น 4 กลุ่มได้ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ 5 พารามิเตอร์ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง และค่าพลังงานสัญญาณ ดังนี้

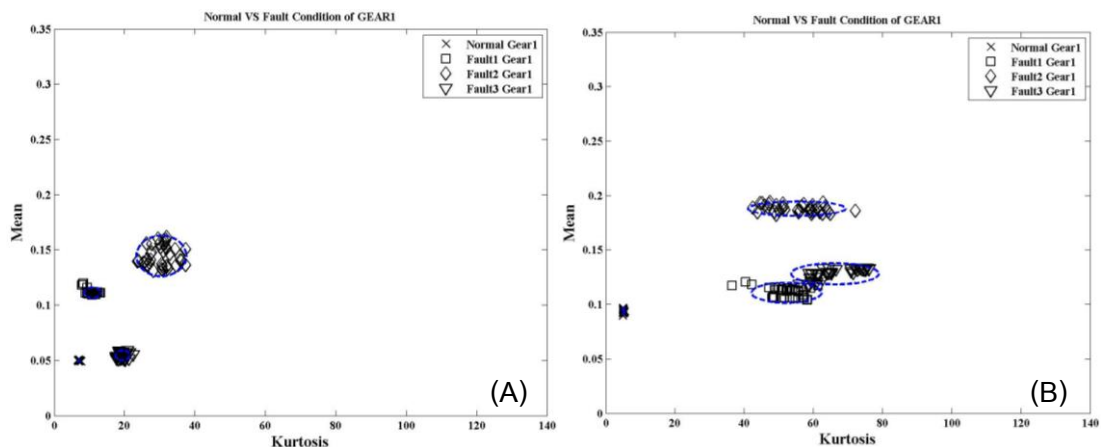
กลุ่มที่ 1 คือ สภาวะการทำงานปกติ (normal)

กลุ่มที่ 2 คือ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ (Fault 1)

กลุ่มที่ 3 คือ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 2)

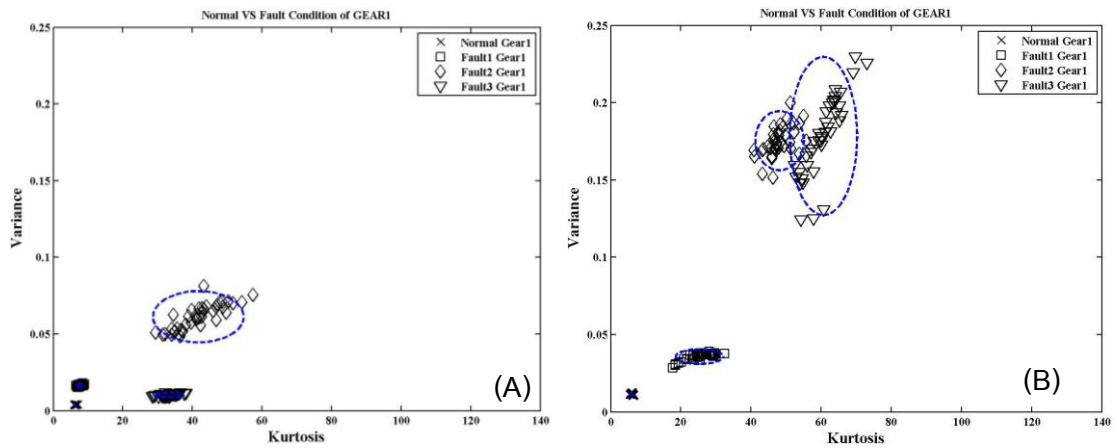
กลุ่มที่ 4 คือ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 3)

ส่วนขอบเขตที่เป็นเส้นประวงรีของแต่ละกลุ่มที่แสดงในแต่ละรูปคำนวณจากการกระจายตัวของพารามิเตอร์ที่พิจารณาใน แนวแกนนอน และแนวแกนตั้งของข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm 2\sigma$ โดยที่ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มข้อมูลที่พิจารณา ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์แบบ 2 พารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในขอบ เขตวงรีที่กำหนด มีบางส่วนที่อยู่นอกขอบเขตที่กำหนด ซึ่งคาดว่าอาจจะเกิดจากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้อาจมีรูปแบบที่เพี้ยนไปหรือแอมพลิจูดของสัญญาณสูงกว่าปกติเนื่องจากการสั่นที่ผิดปกติเกิดขึ้นหรือแรงกระทำจากภายนอกที่อยู่นอกเหนือการควบคุม ผลการวิเคราะห์ องค์กรณีที่เฟืองไม่รับภาระจะแยกออกเป็น 4 กลุ่มแต่ค่าพารามิเตอร์จะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่เฟืองรับภาระ และบางกรณีข้อมูลอาจจะซ้อนกันเช่นกรณีของค่าความโด่งเทียบกับค่าเฉลี่ยและค่าแปรปรวนของเงื่อนไขเฟืองที่รับภาระดัง ภาพที่ 4-11 และ 4-12 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ ติ 2 พารามิเตอร์ร่วมกัน ของเฟืองหมายเลข 2 (Gear 2) ทุกเงื่อนไขการทดลองภายใต้ไม่มีภาระและมีภาระแสดงดังภาพที่ 4-15 ถึง 4-18 ระหว่างค่าความโด่งเทียบกับ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่า RMS และพลังงานของสัญญาณ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลของเฟืองหมายเลข 1 ที่กลุ่มข้อมูลแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มอย่างชัดเจน และไม่ซ้อนกัน เมื่อกำหนดขอบเขตของข้อมูลด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ที่พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะมีข้อมูลบางตัวเลยขอบเขตที่กำหนดเช่นที่เกิดบนผลการวิเคราะห์ของเฟืองหมายเลข 1 ผลการวิเคราะห์ของเงื่อนไขที่ไม่รับภาระที่การจำลองต่าง ๆ จะมีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขที่รับภาระการทำงานอย่างชัดเจน ยกเว้นในเงื่อนไขของค่าความโด่งเทียบกับค่าแปรปรวนซึ่งจะมีค่าต่ำกว่า



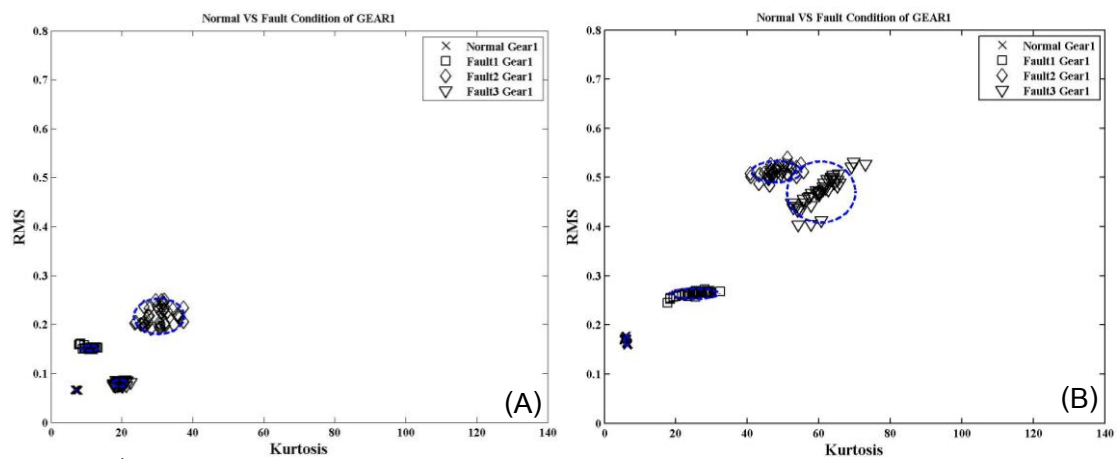
ภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 1

(A)ไม่มีภาระ, (B) มีภาระ



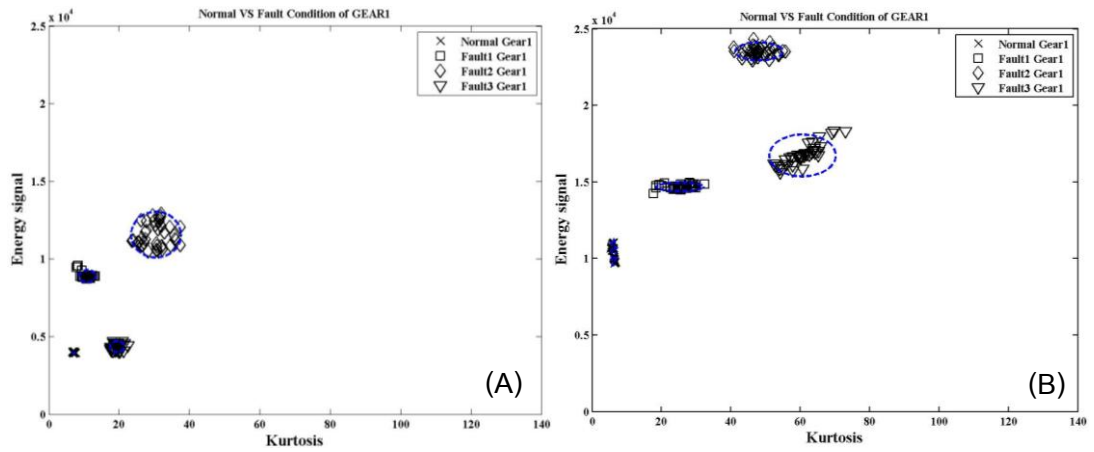
ภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 1

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



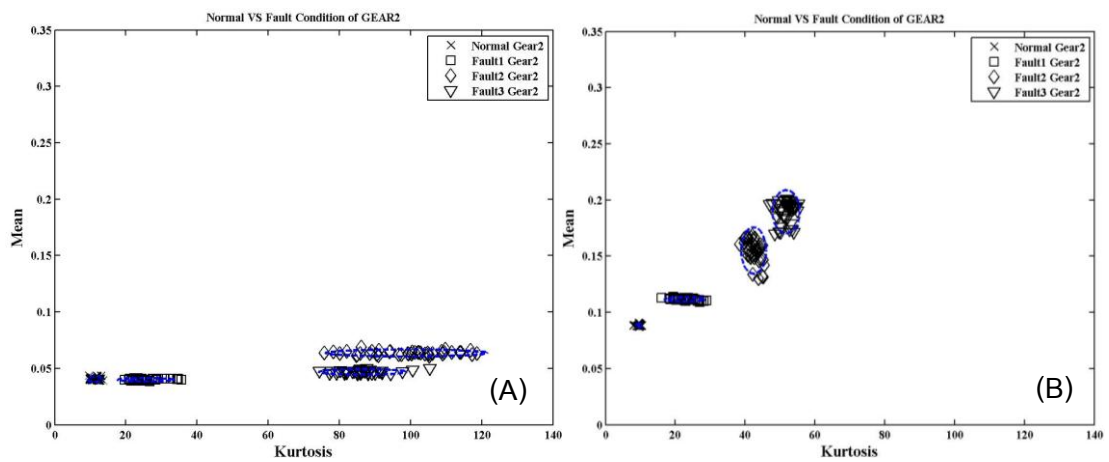
ภาพที่ 4-13 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 1

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



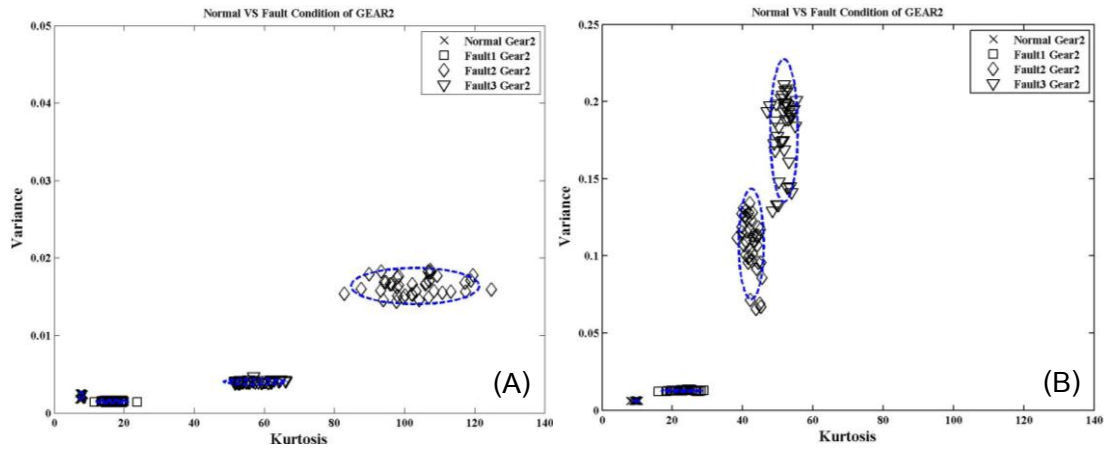
ภาพที่ 4-14 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 1

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



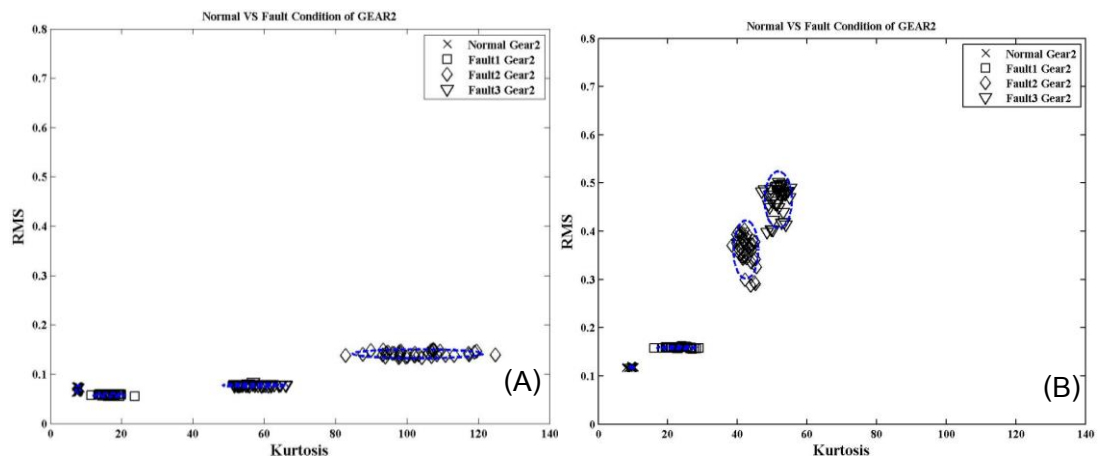
ภาพที่ 4-15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 2

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



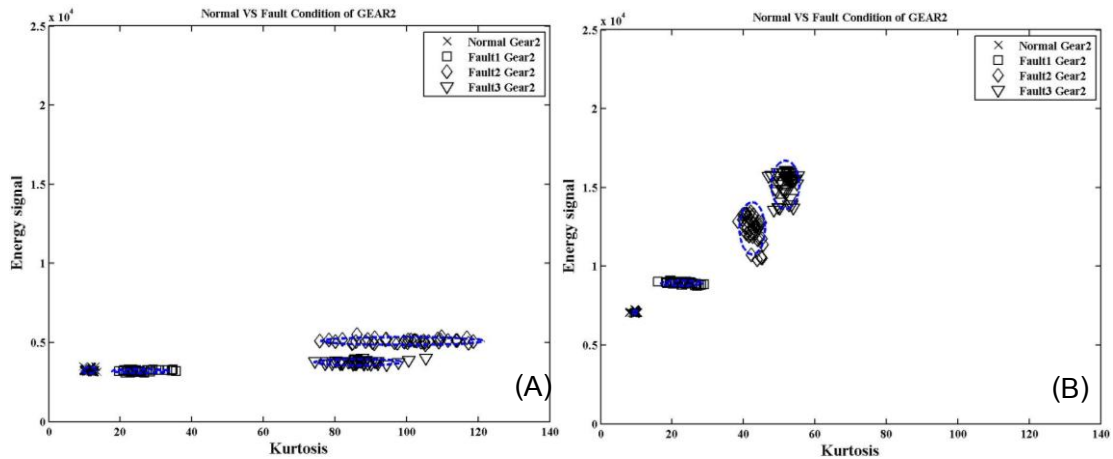
ภาพที่ 4-16 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 2

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



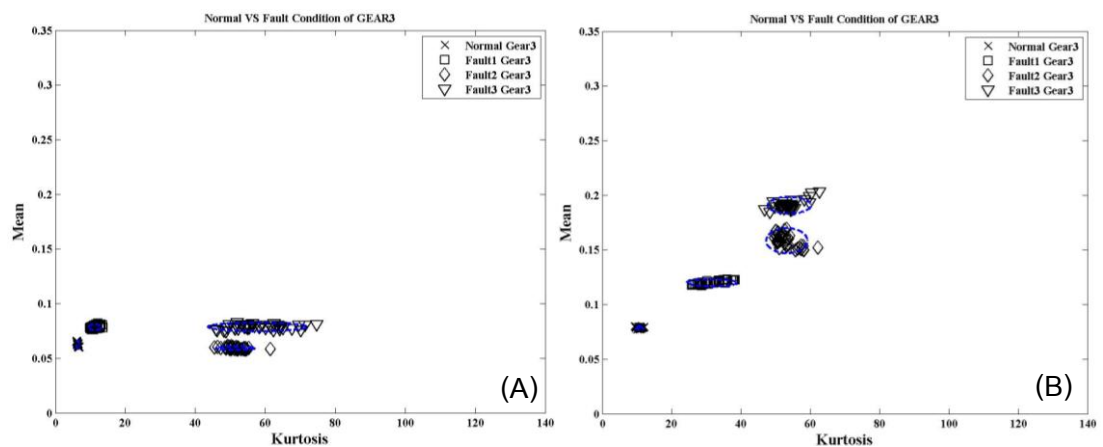
ภาพที่ 4-17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 2

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

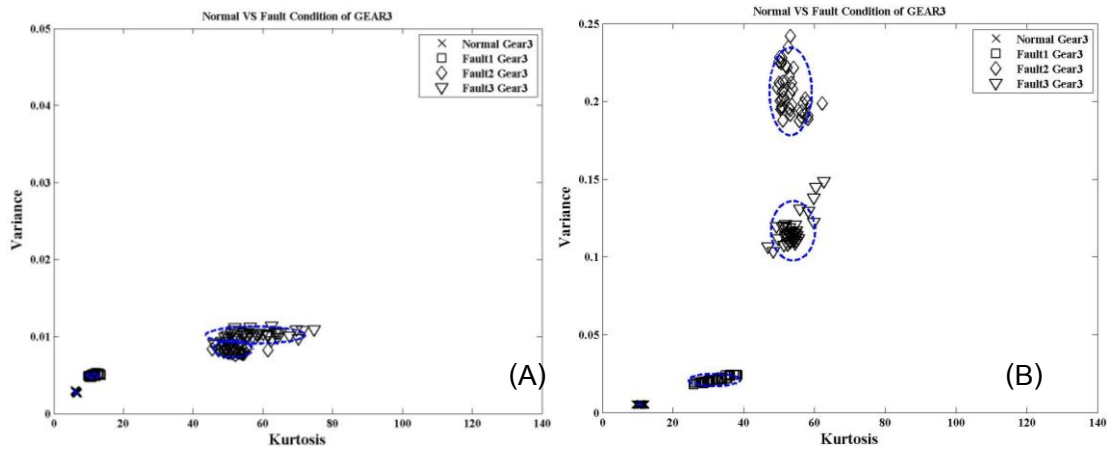


ภาพที่ 4-18 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 2
(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

ผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ของเฟืองตรงหมายเลข 3 (Gear 3) จำนวนฟันเฟือง 24 ฟันทุกเงื่อนไขการจำลองแบบไม่มีภาวะและมีภาวะการทำงานด้วย ด้วยการวิเคราะห์ พารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์แสดงดัง ภาพที่ 4-19 ถึง 4-22 ซึ่งเป็นผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่า RMS และค่าพลังงานของสัญญาณตามลำดับ ข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยวิธีวิธีการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามเงื่อนไขการจำลองได้ชัดเจน และข้อมูลของเงื่อนไขการจำลองภายใต้ภาวะการทำงานส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่าแบบไม่มีภาวะ ยกเว้นกรณีของค่าแปรปรวนของเฟืองภายใต้ภาวะจะมี ค่าบางส่วนซ้อนทับกัน ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจจับได้มีแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอ เนื่องจากความเสียหายคล้ายกัน

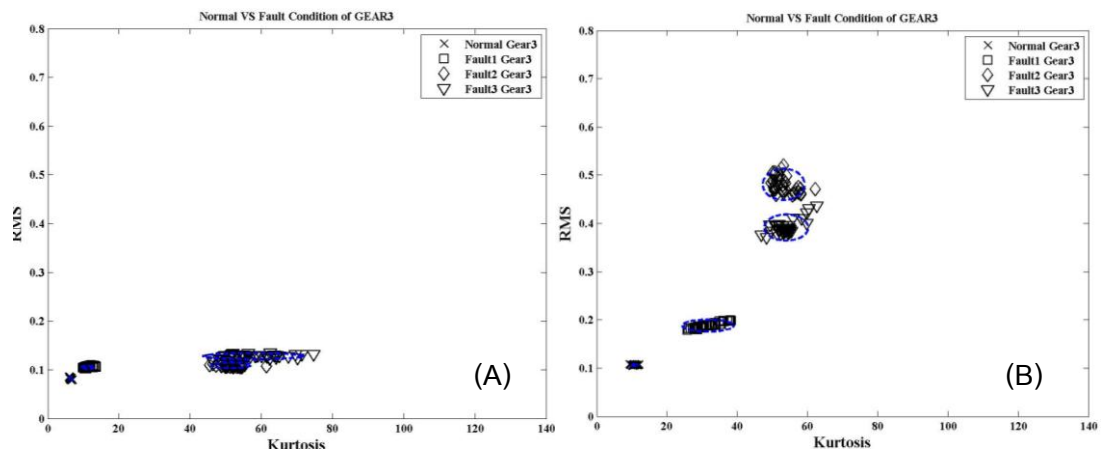


ภาพที่ 4-19 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 3
(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



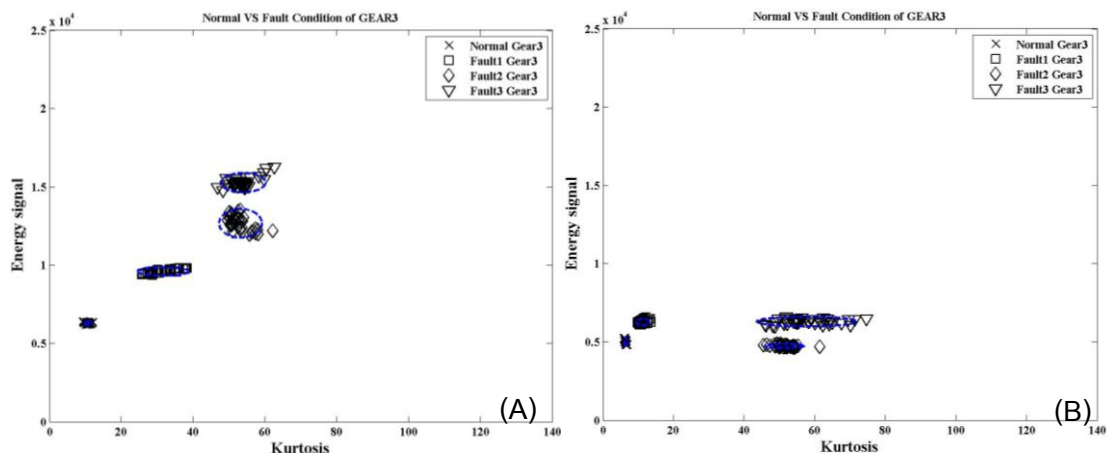
ภาพที่ 4-20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 3

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



ภาพที่ 4-21 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 3

(A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



ภาพที่ 4-22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 3 (A)ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

ผลการวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ร่วมกันสามารถใช้ทำนายความเสียหายของแต่ละเฟืองทุกเงื่อนไขการจำลองได้ โดยจะเห็นกลุ่มข้อมูลของแต่ละเงื่อนไขอย่างชัดเจน นอกจากนี้การสร้างขอบเขตของแต่ละกลุ่มข้อมูลโดยการพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลด้วยความเชื่อมั่น 95% ทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของข้อมูลเชิงสถิติได้ดีขึ้น และสามารถใช้ขอบเขตนี้สำหรับทำนายสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชุดเฟืองได้ การสร้างขอบเขตนี้สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการจำลอง 50 เซตข้อมูลซึ่งอาจเรียกว่าเป็นข้อมูลที่ใช้สอน เพื่อใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการตัดสินใจหรือการทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองที่พล็อตร่วมกันของข้อมูลทดสอบระหว่างไม่มีภาวะและรับภาวะจะแสดงเพิ่มเติมที่ภาคผนวก . การทดสอบขอบเขตของการตัดสินใจจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.5 การทดสอบขอบเขตการตัดสินใจ

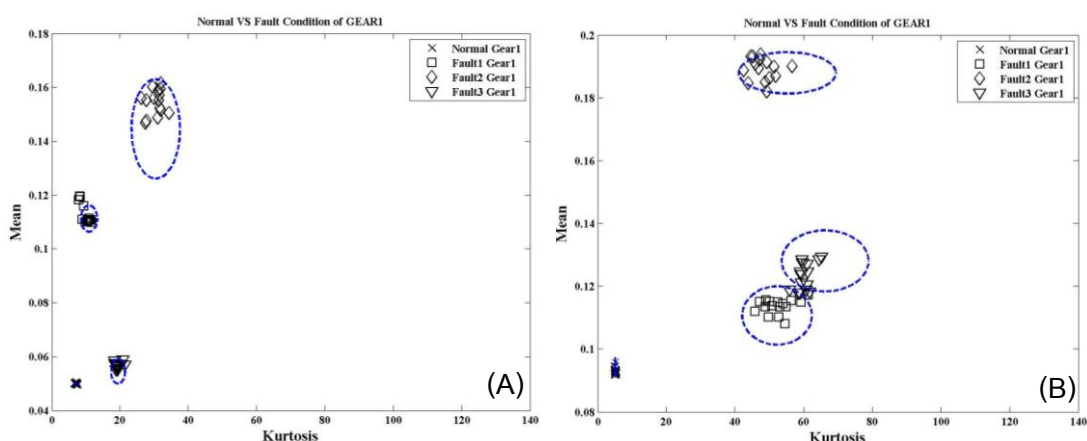
ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ สามารถใช้สร้างเป็นขอบเขตของข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรผันร่วมกัน ด้วยค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4-11 ถึง 4-22 ทำให้ใช้ทำนายความเสียหายทั้ง 4 เงื่อนไขของทั้ง 3 เฟืองได้

การทดสอบขอบเขตที่สร้างไว้จะใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองตรงที่บันทึกจากชุดจำลอง จำนวน 15 เซตข้อมูล เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตที่กำหนด หากความเสียหายเนื่องจากสาเหตุหรือลักษณะความเสียหายที่ อยู่ในรูปแบบที่กำหนด ค่าพารามิเตอร์

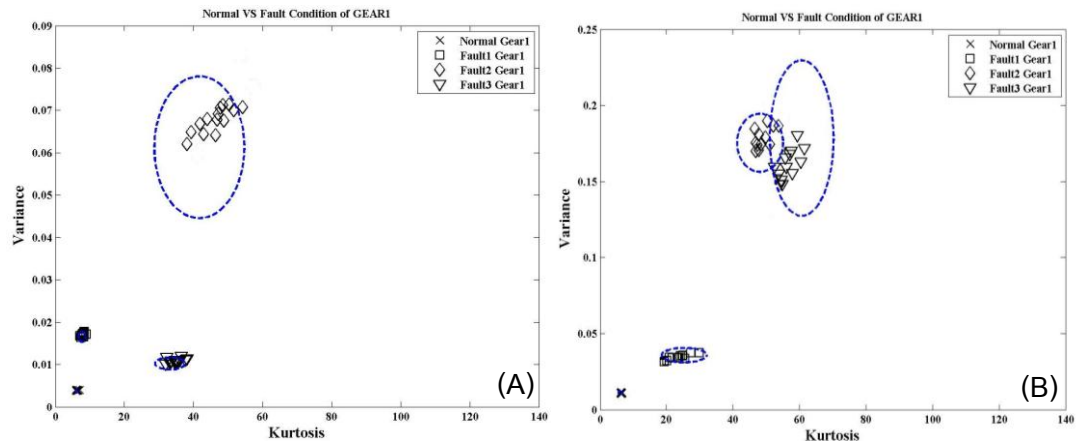
เชิงสถิติที่พิจารณาต้องมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขความเสียหายนั้น ๆ โดยมีระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95 เปอร์เซ็นต์

ผลที่ได้จากการทดสอบขอบเขตความเสียหายของเฟืองตรงหมายเลข 1 (Gear 1) ด้วยค่าความโด่งเทียบกับค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่า RMS และค่าพลังงานของสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 4-23 ถึง 4-26 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นผลการทดสอบตามเงื่อนไขการจำลองความเสียหายทั้ง 4 เงื่อนไข แบบไม่มีภาระ หรือมีภาระการทำงาน ได้แก่ สภาวะการทำงานปกติ (normal) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน (Fault 1) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน (Fault 2) และความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 3) อย่างละ 1 ฟัน บนเฟืองเดียวกันและตรงข้ามกัน นอกจากนี้ได้แสดงผลการพล็อตพร้อมกันแสดงผลเพิ่มเติมของแต่ละเฟืองไว้ที่ ภาคผนวก ง.

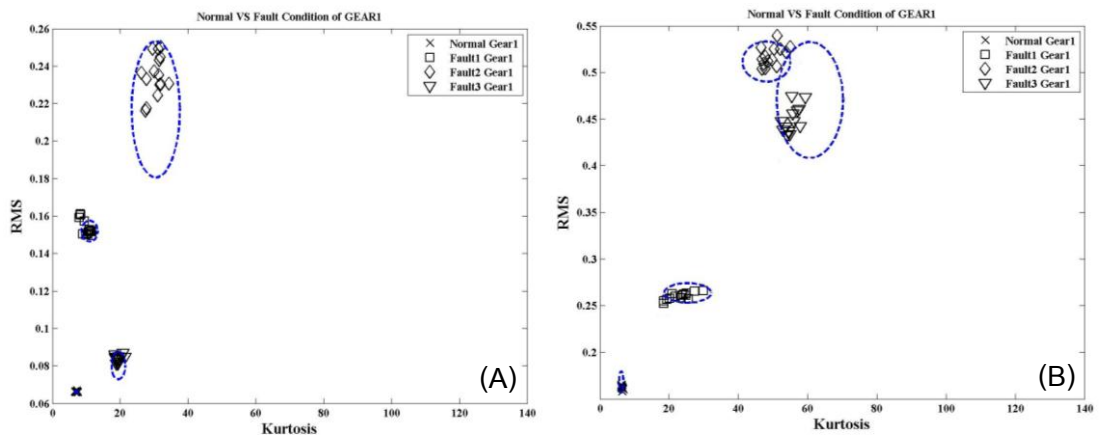
ผลการทดสอบขอบเขตของพารามิเตอร์ที่พิจารณาของเฟืองหมายเลข 1 ภายใต้มันไม่มีภาระและมีภาระการทำงานดัง ภาพที่ 4-23 ถึง 4-26 พบว่า สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยจำนวนข้อมูลทดสอบทั้งหมดของแต่ละเงื่อนไขการจำลองมีค่าเท่ากับ 15 ข้อมูล ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ข้อมูลไม่อยู่ในขอบเขตทุกพารามิเตอร์ที่พิจารณามีอยู่ 2 จุด ซึ่งความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 13.33% ของข้อมูลทดสอบหรือความถูกต้องของการทำนายประมาณ 86.67% นอกจากนี้บางพารามิเตอร์มีขอบเขตที่กำหนดของแต่ละเงื่อนไขอาจมีการทับซ้อนกันซึ่งอาจทำให้การทำนายผิดพลาดขึ้นได้ดังภาพที่ 4-23 ถึง 4-25 แต่จากการทดสอบขอบเขตยังไม่พบข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตซ้อนทับกัน



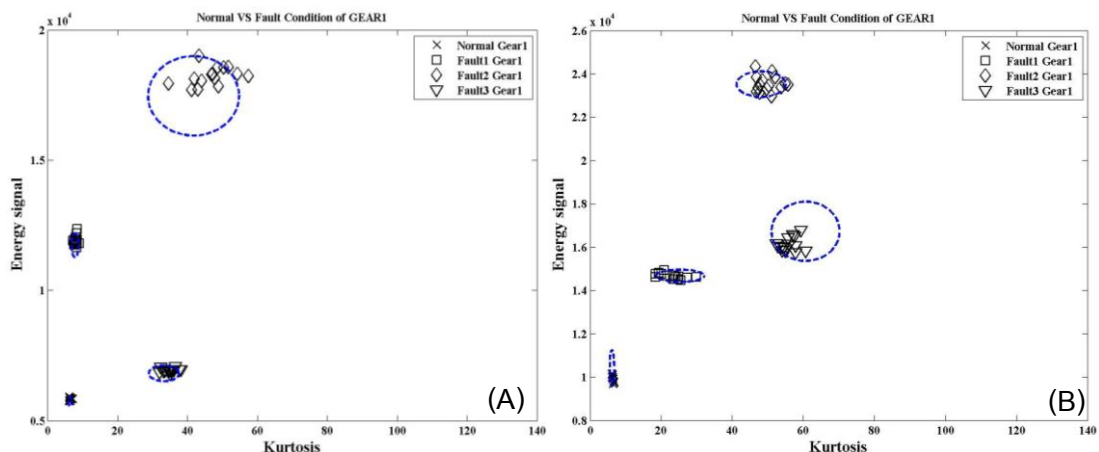
ภาพที่ 4-23 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาระ, (B) มีภาระ



ภาพที่ 4-24 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าความแปรปรวน
ของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



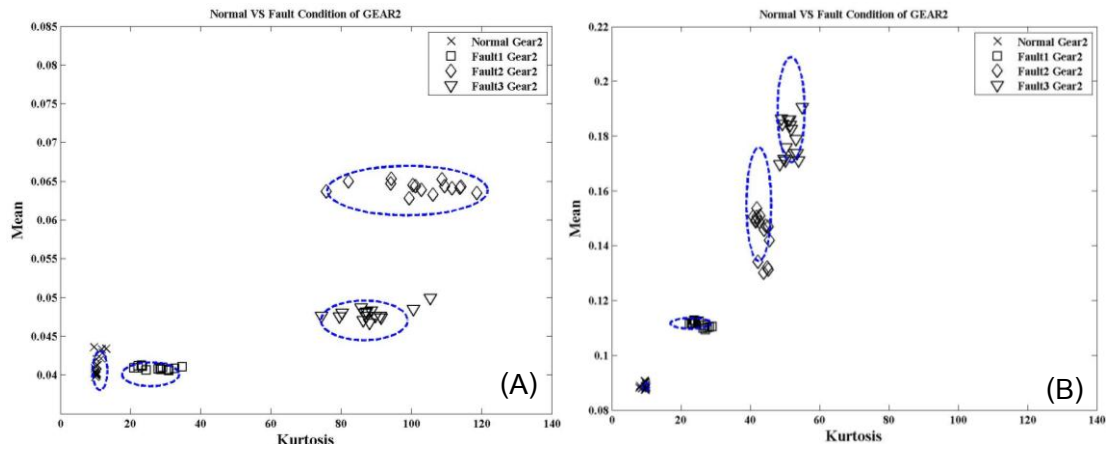
ภาพที่ 4-25 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสอง
ของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



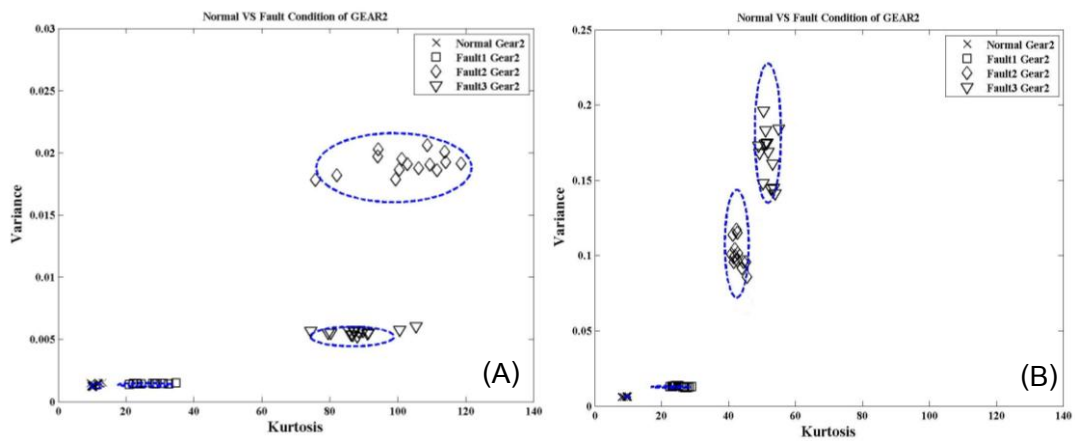
ภาพที่ 4-26 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 1 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

ผลที่ได้จากการทดสอบขอบเขตความเสียหายของเฟืองตรงหมายเลข 2 (Gear 2) ด้วยค่าความโด่งเทียบกับค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่า RMS และค่าพลังงานของสัญญาณแสดงดังภาพที่ 4-27 ถึง 4-30 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นผลการทดสอบตามเงื่อนไขการจำลองความเสียหายทั้ง 4 เงื่อนไขแบบไม่มีภาวะและมีภาวะการทำงานได้แก่ สภาวะการทำงานปกติ (normal) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ (Fault 1) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 2) และความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 3)

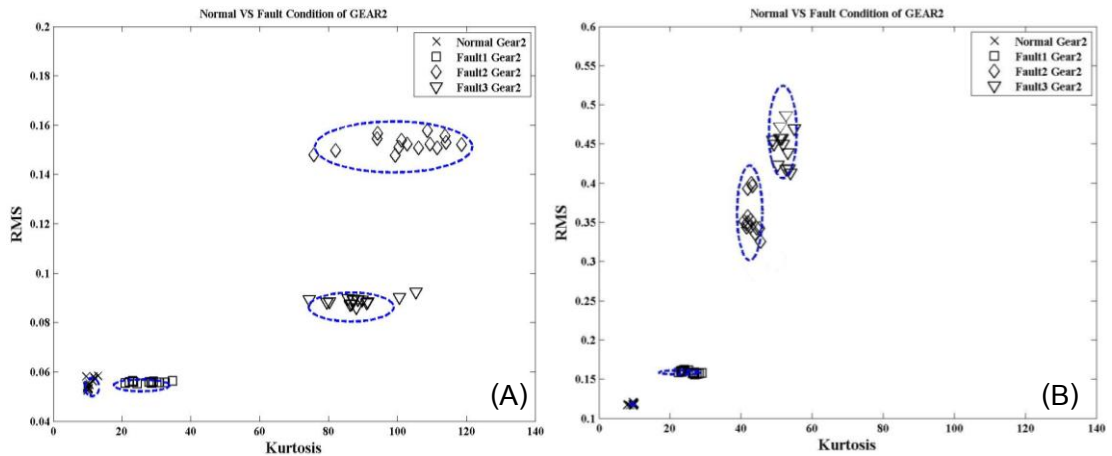
ผลการทดสอบขอบเขตของพารามิเตอร์ที่พิจารณาของเฟืองหมายเลข 2 ภายใต้มไม่มีภาวะและมีภาวะการทำงาน ที่เงื่อนไขต่าง ๆ พบว่า ขอบเขตที่ทดสอบของแต่ละเงื่อนไขไม่มีส่วนซ้ำซ้อนกัน และ ค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติที่พิจารณาจากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ข้อมูลไม่อยู่ในขอบเขตทุกพารามิเตอร์ที่พิจารณาดังภาพที่ 4-27 ถึง 4-30 มีอยู่ 2 จุดซึ่งความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 13.33% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด (=15 ข้อมูล) หรือความถูกต้องของการทำนายประมาณ 86.67%



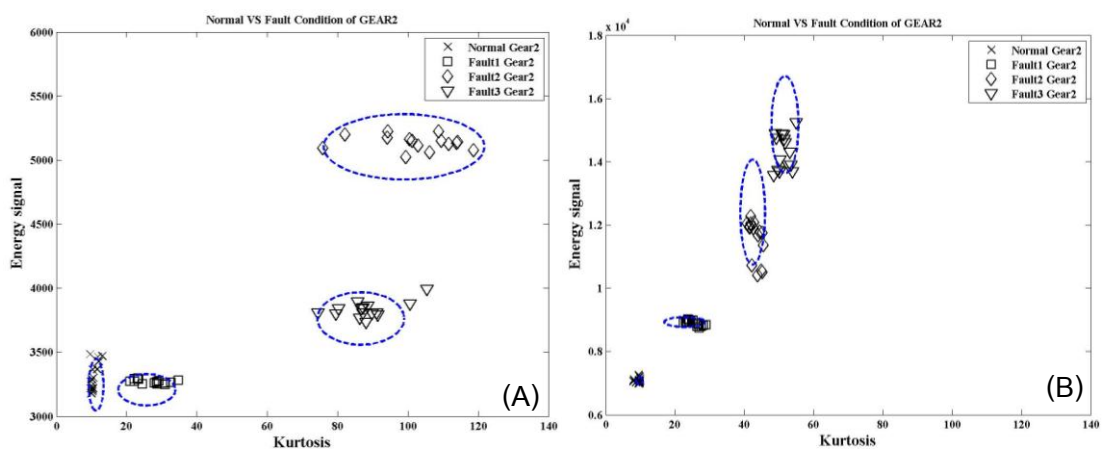
ภาพที่ 4-27 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ย
ของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



ภาพที่ 4-28 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าความแปรปรวน
ของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

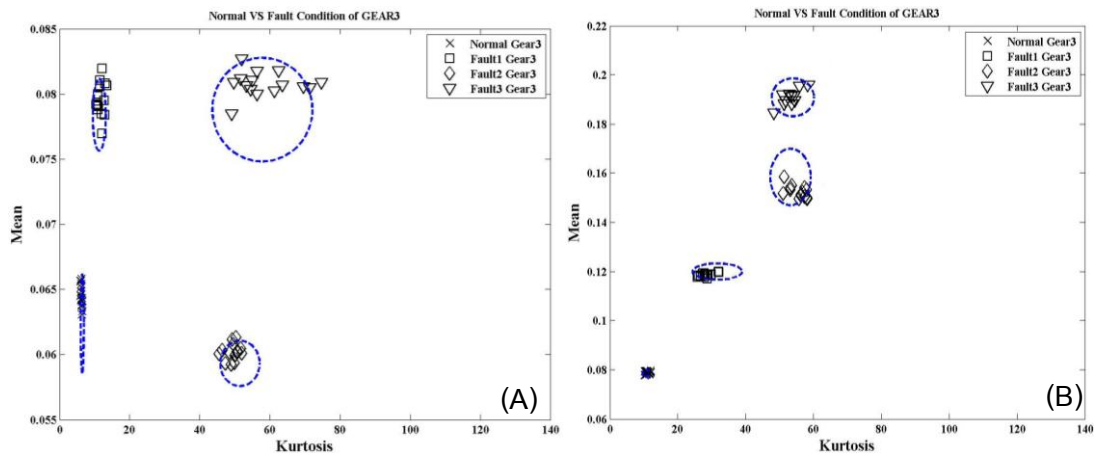


ภาพที่ 4-29 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

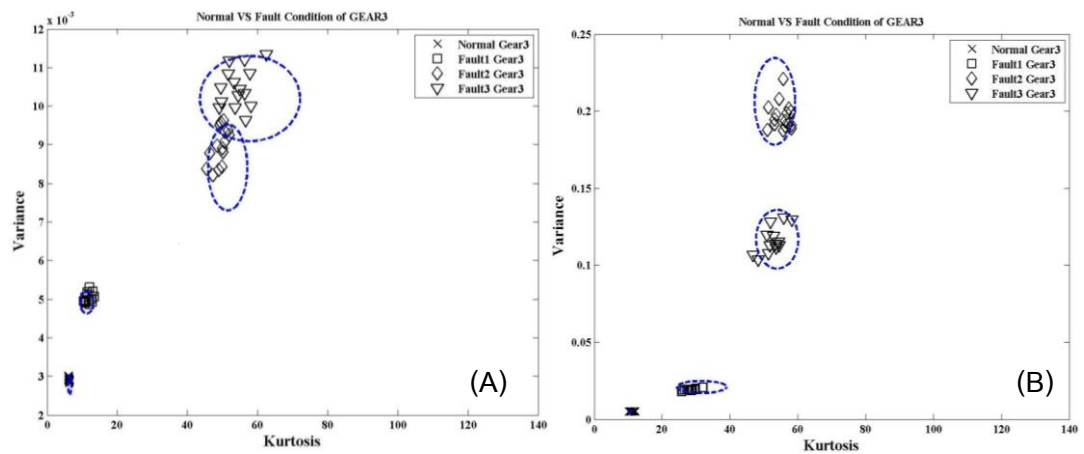


ภาพที่ 4-30 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 2 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

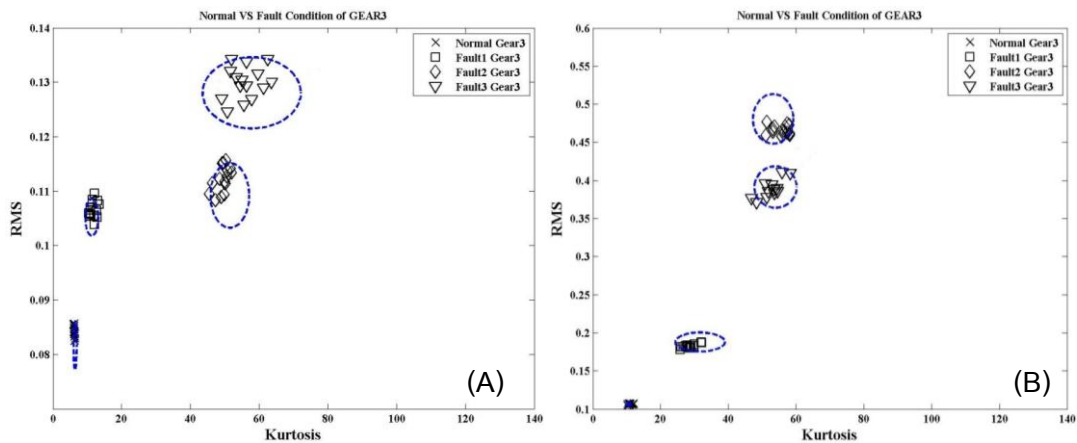
ผลที่ได้จากการทดสอบขอบเขตความเสียหายของเฟืองตรงหมายเลข 3 (Gear 3) ด้วยค่าความโด่งเทียบกับค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่า RMS และค่าพลังงานของสัญญาณแสดงดังภาพที่ 4-31 ถึง 4-34 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นผลการทดสอบตามเงื่อนไขการจำลองความเสียหายทั้ง 4 เงื่อนไขแบบไม่มีภาวะและมีภาวะการทำงานได้แก่ สภาวะกา รทำงานปกติ (normal) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ (Fault 1) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 2) และความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 3)



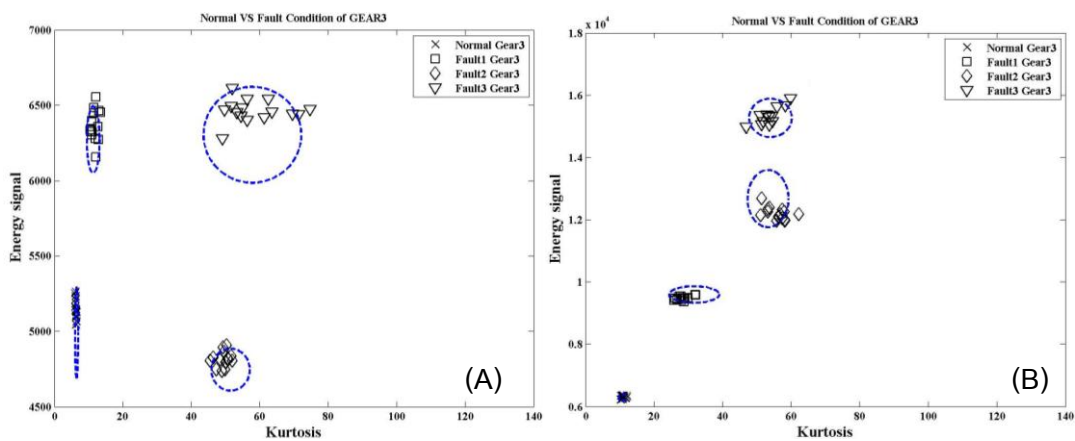
ภาพที่ 4-31 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ย
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



ภาพที่ 4-32 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าความแปรปรวน
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



ภาพที่ 4-33 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสอง
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ



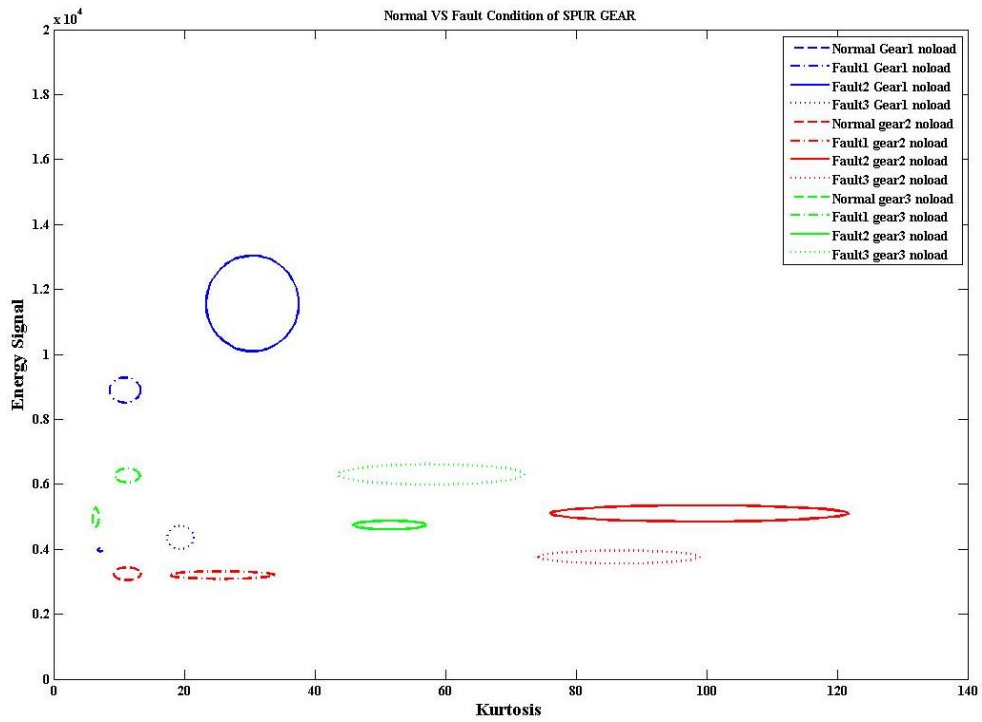
ภาพที่ 4-34 ทดสอบขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณ
ของเฟืองหมายเลข 3 (A) ไม่มีภาวะ, (B) มีภาวะ

ผลการทดสอบขอบเขตของพารามิเตอร์ที่พิจารณาของเฟืองหมายเลข 3 ภายใต้นี้
ไม่มีภาวะและมีภาวะการทำงานที่เ็น ोनไซต่าง ๆ พบว่าค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติที่พิจารณาจาก
สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด แม้ว่าขอบเขตที่ทดสอบจะ
มีส่วนซ้ำซ้อนกันบางกรณี แต่การทดสอบนี้ไม่พบข้อมูลที่เกิดกรณีดังกล่าว ความคลาดเคลื่อนที่
เกิดขึ้นที่ข้อมูลไม่อยู่ในขอบเขตทุกพารามิเตอร์ที่พิจารณาดังภาพที่ 4-31 ถึง 4-34 มีอยู่ 2 จุดซึ่ง
ความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 13.33% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด (=15 ข้อมูล) หรือความถูกต้องของ
การทำนายประมาณ 86.67% นอกจากนี้ได้แสดงผลการพล็อตร่วมกันแสดงดังเพิ่มเติมของแต่ละ
เฟืองไว้ที่ ภาคผนวก ง.

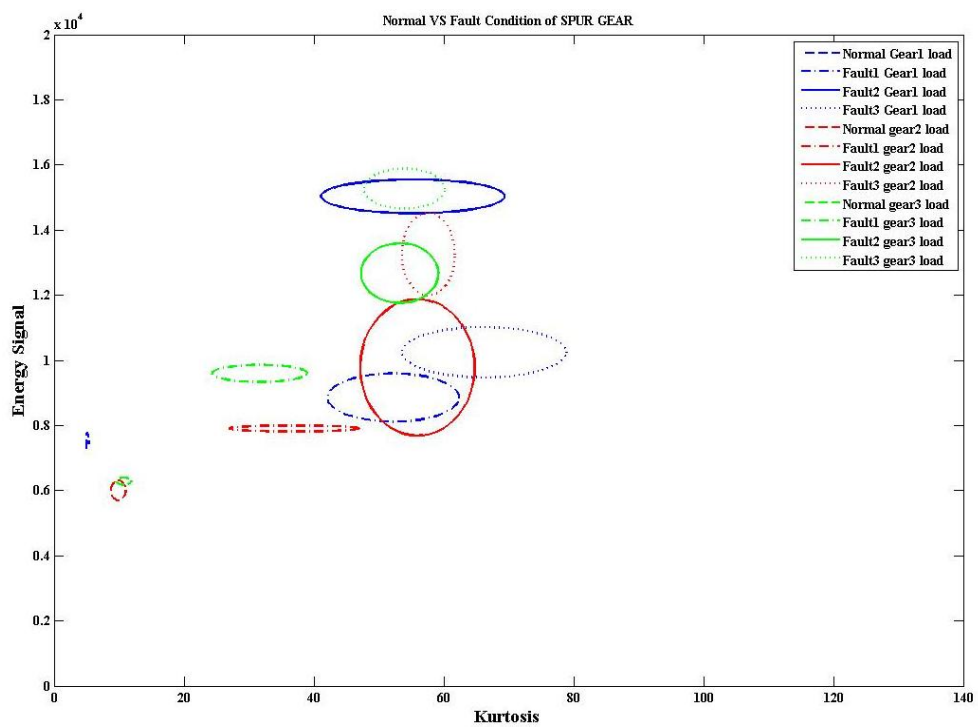
การทดสอบความถูกต้องของขอบเขตที่กำหนดของแต่ละเฟืองที่ทุกเงื่อนไขการจำลองภายใต้ไม่มีภาระและมีภาระการทำงานพบว่า ขอบเขตที่กำหนดขึ้นสามารถใช้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินความเสียหายของแต่ละเฟืองได้ด้วยระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทำนายจากข้อมูลทดสอบทั้งหมดมีอยู่ 2 ข้อมูล เมื่อพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 13.33% การทดสอบนี้อาจสรุปได้ว่าความถูกต้องของการทำนายความเสียหายของเฟืองมีค่าเท่ากับ 86.67%

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ จะทำได้ดีต่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่เฟือง โดยทำการวิเคราะห์แยกกันของเฟืองตรงที่เฟืองจะสามารถวิเคราะห์ความเสียหายได้ดี และสามารถแบ่งแยกข้อมูลได้ 4 กลุ่มของความเสียหาย ได้อย่างชัดเจนจากผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-23 ถึงภาพที่ 4-34

แต่เมื่อนำขอบเขตความเสียหายที่วิเคราะห์ได้ ใช้วิเคราะห์ความเสียหายเฟืองตรงร่วมกันกับทุกเฟือง ผลที่ได้จะสามารถวิเคราะห์ได้ในทุกเงื่อนไข กรณีที่ไม่มีภาระการทำงาน แสดงดังภาพที่ 4-35 และจะสามารถวิเคราะห์ความเสียหายได้บางเงื่อนไข ในกรณีที่มีภาระการทำงาน ดังแสดงดังภาพที่ 4-36 แสดงผลของค่าที่ได้จากความแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความถี่และความถี่สัญญาณที่แสดงการวิเคราะห์ร่วมกันของความเสียหายของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองที่ถูกทดลองในทุกเงื่อนไข ซึ่งคาดว่าเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ ความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ ที่ให้ผลการทดลองสอดคล้องกัน ที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษานี้ ภายใต้ขอบเขตความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ความแปรผันร่วมกันกับพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงเพิ่มเติมดัง ภาคผนวก จ.



ภาพที่ 4-35 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณ
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบไม่มีภาระ



ภาพที่ 4-36 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณ
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบมีภาระ

4.6 สรุปการทดลอง

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ของเฟืองตรง ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ บนโดเมนเวลา เพื่อทำนาย ความเสียหายเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองได้ทำการศึกษาที่เงื่อนไขในการจำลองความเสียหายดังต่อไปนี้ สภาวะการทำงานปกติ (normal) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน (Fault 1) ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน (Fault 2) และความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟันและ 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ฟัน บนเฟืองเดียว (Fault 3) ชุดเฟืองจำลองยังสามารถทดสอบภายใต้เงื่อนไขไม่มีภาวะและมีภาวะที่กระทำโดยการใส่โมเมนต์ด้านการเคลื่อนของเพลลาของเฟืองตัวตามขนาด 1.56 นิวตันเมตร (Nm) และหัววัดการสั่นสะเทือนจะติดตั้งในแนวแกนตั้ง ในแนวแกนนอน และในแนวแกน การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์ เชิงสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง ค่า crest factor และค่าพลังงานสัญญาณ (energy signal) พบว่าแนวแกนตั้ง ให้ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณา เป็นที่น่าพอใจกว่า แนวแกนอื่นๆ และการศึกษาจะใช้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ ในแนวแกนตั้ง เพื่อวิเคราะห์ความแปรผันร่วมของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์

การวิเคราะห์ความแปรผันร่วมกันของการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์จากการที่ทดลองกับทุกพารามิเตอร์แล้วพบว่า ค่าเชิงสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรผันร่วมกันได้ดี ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง และค่าพลังงานงานสัญญาณ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกใช้ในการสร้างขอบเขตการตัดสินใจ จากค่าการกระจายของความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์ 2 พารามิเตอร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (หรือ $\pm 2\sigma$) กลุ่มความสัมพันธ์ร่วมกันประกอบไปด้วย 4 กลุ่มหลัก นั่นคือ กลุ่มที่ 1 คือ สภาวะการทำงานปกติ (normal) กลุ่มที่ 2 คือ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ (Fault 1) กลุ่มที่ 3 คือ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 2) และกลุ่มที่ 4 คือ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (Fault 3) โดยขอบเขตของข้อมูล การตัดสินใจนั้น จะถูกใช้เป็นขอบเขตอ้างอิง เพื่อตรวจสอบความเสียหายของระบบเฟืองตรงที่จำลอง การทดสอบความถูกต้องของขอบเขตอ้างอิงมีการทำนายผิดพลาดไป 2 ข้อมูลเทียบกับข้อมูลทดสอบทั้งหมด 15 ข้อมูล ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 13.33% หรือข้อมูลทดสอบทำนายได้ความถูกต้องแม่นยำที่ 86.67% ซึ่งผลการทำนายนี้มีความแม่นยำค่อนข้างดี แต่จะต้องแยกใช้วิเคราะห์ความเสียหายคร่าวๆเฟือง เนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ได้ไม่แม่นนัก หากวิเคราะห์ร่วมกันหลายเฟืองในคราวเดียว

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิควิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองตรงด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงสถิติและวิธีแยกกลุ่มความเสียหายของเฟืองด้วยวิธีแปรผันร่วมของพารามิเตอร์เชิงสถิติที่คำนวณจากสัญญาณการสั่นสะเทือน ชุดจำลองเฟืองที่ศึกษาประกอบด้วย ชุดเฟือง ตรงของรถจักรยานยนต์ขนาด 125 ซีซี โดยเฟืองขับมี 20 ฟัน และเฟืองตามที่ใช้จำลองความเสียหายมีจำนวนฟันเท่ากับ 28, 26, และ 24 ฟัน ซึ่งแทนด้วยเฟืองหมายเลข 1, 2 และ 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ชุดจำลองยังสามารถใช้ทดสอบเฟืองภายใต้การรับภาระโดยใช้ชุดเบรกคัม ของรถจักรยานยนต์โดยการศึกษานี้จะใส่ภาระ ด้วยการใส่โมเมนต์ด้านการหมุนของเพลลาของเฟืองตัวตามเท่ากับ 1.56 Nm เงื่อนไขของการจำลองความเสียหายประกอบด้วย สภาวะการทำงานปกติ ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50% 1 ฟัน ความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 100% 1 ฟัน และความเสียหายของฟันเฟืองแตกหัก 50% 1 ฟัน และ 100% 1 ฟันพร้อมกัน บนเฟืองเดียวกันตำแหน่งตรงข้ามกันภายใต้การทำงานมีภาระหรือไม่มีภาระ และห้วงวัดการสั่นสะเทือนที่ใช้ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจะติดตั้งตามแนวแกนตั้ง แนวแกนนอน และแนวแกนของเพลลา

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง ค่ารา กกำลังสอง ค่า Crest factor และค่าพลังงานสัญญาณ คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของ สัญญาณการสั่นสะเทือน การคำนวณค่าของแต่ละพารามิเตอร์จะคำนวณมาจากสัญญาณทั้งหมด 50 ไฟล์ โดยแต่ละไฟล์เฟืองจะหมุน 100 รอบ ผลการวิเคราะห์ ค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณา จากทั้งสามแกนของแต่ละเฟืองมีแนวโน้มของคำตอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ผลของสัญญาณจากแนวแกนตั้งจะให้คำตอบที่ดีที่สุดของการศึกษา นี้ ค่าแต่ละพารามิเตอร์ สามารถใช้ทำนายความเสียหายของทั้งสามเฟืองได้แต่ไม่ทุกกรณี โดยค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของความเสียหาย ยกเว้นเงื่อนไขของเฟืองที่ฟันเสียหาย 50% และ 100% พร้อมกันภายใต้การทำงานไม่มีภาระและมีภาระ ที่ ผลวิเคราะห์ไม่แน่นอน ค่าการแปรผันของพารามิเตอร์ เชิงสถิติ แต่ละตัวจะมีค่า บางช่วงที่คาบเกี่ยวกันทำให้วิเคราะห์ได้ยาก หากใช้ค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติเพียงค่าเดียว เพื่อทำนายความเสียหายของแต่ละเฟืองเงื่อนไข เพราะไม่มีพารามิเตอร์ใดที่สามารถใช้ได้ชัดเจนด้วยการวิเคราะห์เพียงค่าเดียว

การวิเคราะห์ความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ของการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ ค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติที่พิจารณา ทั้งหมดที่ศึกษาทุกพารามิเตอร์พบว่า การวิเคราะห์ความแปรผันร่วมระหว่างค่าความโค้ง เทียบกับ ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่า รากกำลังสอง และค่าพลังงานของสัญญาณ จะให้ผลของค่าตอบที่ดี ที่สุด และการวิเคราะห์ความแปรผันร่วมระหว่างค่าความโค้งเทียบกับค่าพลังงานของสัญญาณ จะให้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มอย่างชัดเจนที่ดีที่สุด หากใช้วิเคราะห์ เพียงตรงตามเงื่อนไขการจำลองภายใต้การทำงานไม่มีภาระของทุกเฟืองที่ทดสอบ

เมื่อแสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ ร่วมกันทั้ง 3 เฟือง ผลการวิเคราะห์ความแปรผันร่วมระหว่างค่าความโค้งเทียบกับค่าพลังงานของสัญญาณ ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณภายใต้การทำงาน แบบรับภาระสามารถวิเคราะห์กลุ่มข้อมูลความเสียหายได้เป็นบางกรณีของทุกเฟืองที่ทดสอบ และจะแยกได้ชัดเจนที่สุดคือ กรณีที่ไม่มีภาระการทำงาน

การสร้างขอบเขตการตัดสินใจ ด้วยค่าการกระจายของความแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์ เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือ $\pm 2\sigma$ จะสามารถกำหนดขอบเขตการกระจายตัวเป็นรูปวงรีของพารามิเตอร์ได้ ซึ่งขอบเขตที่กำหนดได้นี้ในบางกรณีอาจมีบางส่วนซ้อนทับกัน เช่น ค่าความโค้งกับค่าแปรปรวน ขอบเขตที่กำหนดได้นี้จะใช้เพื่อทำนายความเสียหายของเฟืองจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ข้อมูลที่ใช้กำหนดขอบเขตนี้จะใช้ข้อมูลที่วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติจำนวน 50 ไฟล์ ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตที่กำหนดเพื่อใช้ทำนายความเสียหายของเฟือง จะทำโดยใช้ชุดข้อมูลอีกชุดที่มีจำนวนข้อมูลประมาณ 20 % ของข้อมูลที่ใช้กำหนดขอบเขต จากการทดสอบขอบเขตการตัดสินใจ

ความเสียหายของชุด เฟืองตรง ของงานวิจัยนี้ ความผิดพลาดที่ ข้อมูลอยู่นอกขอบเขตที่กำหนดประมาณ 13.33% หรือค่าความถูกต้องแม่นยำ ของการทำนายอยู่ที่ 86.67% ของวิธีการแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติที่ศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ ผลการทดลองที่ได้ยังมีบางพารามิเตอร์ที่ยังแยกไม่ขาดออกจากกันอย่างสิ้นเชิง ยังมีบางส่วนของข้อมูลที่ยังคาบเกี่ยวกัน หากข้อมูลไม่คาบเกี่ยวกันจะทำให้การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

ในส่วนของการเก็บข้อมูลสัญญาณการสิ้นสะท้อน ควรเก็บข้อมูลให้ได้จำนวนมาก เท่าที่ความสามารถของการวัดเก็บข้อมูล เพราะจะสามารถเก็บละเอียดของสัญญาณการสิ้นสะท้อนได้มาก

ในส่วนของการทดสอบขอบเขตความเสียหาย ไม่ควรใช้จำนวนข้อมูลมากกว่าจำนวนเซตข้อมูลที่ใช้อ้างอิง หรือข้อมูลที่ใช้ในการสร้างขอบเขต

ภาระการ ทำงาน ที่ใช้ควรจะเป็นภาระที่มีความสม่ำเสมอตลอดการทดลอง เพราะจากผลการทดลองที่ได้ คาดว่าภาระที่ใช้จะมีผลที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่ตรวจวัดได้เช่นกัน

รายการอ้างอิง

- [1] De Silva, C. W. The Vibration Monitoring Testing and Instrument. 1st Edition. New York USA. CRC Press. 2007.
- [2] Randall, R.B. and Antoni, J. 2011. Rolling element bearing diagnostics-A tutorial. Mechanical Systems and Signal Processing. 25 : 485–520.
- [3] Antoni, J. and Randall, R.B. 2004. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part I evaluation of adaptive algorithms. Mechanical Systems and Signal Processing. 18 : 89–101.
- [4] Antoni, J. and Randall, R.B. 2004. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part II -a novel frequency-domain algorithm. Mechanical Systems and Signal Processing. 18 : 103–117.
- [5] Long, B.R. and Boutin, K.D. 1996. Enhancing the process of diesel engine condition monitoring. Proc. of the 18th Annual Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Fairborn. 20-23 October 1996. USA. 27(1): 61-68.
- [6] Klinchaeam, S. and Nivesrangsarn, P. 2010. Condition monitoring of petrol engine using vibration signals - Time Domain Analysis. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 32,6 (Nov-Dec 2010).
- [7] Gill, J.D., Reuben, R.L. and Steel, J.A. 2000. A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission. Proceedings of the 24th European Conference on Acoustic Emission Testing, EWGAE. France. 24: 281-286.
- [8] Gu, F., Li, W., Ball, A.D. and Leung, A.Y.T. The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, part 1: acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals. SAE 2000 World Congress Noise & Vibration. Detroit. USA. 6-9 March 2000. SAE Paper 2000-01-0730: 51-57.
- [9] Gill, J.D., Douglas, R.M., Neo, Y.S. Reuben, R.L. and Steel, J.A. 2000. Examination of plate valve behavior in a small reciprocating compressor using acoustic emission. Proceeding of the 24th European Conference on Acoustic Emission.

EWGAE, France. 24: 133-138.

- [10] Ferraris, G., Andrianoely, M.A., Berlioz, A., and Dufour, R. 2006. Influence of cylinder pressure on the balancing of a rotary compressor. Journal of Sound and Vibration, 292 : 899–910.
- [11] Combet, F., and Gelman, L. 2007. An automated methodology for performing time synchronous averaging of a gearbox signal. Mechanical Systems and Signal Processing. 21 : 2590–2606.
- [12] Andrade, F.A., Esat, I. and And Badi, M.N.M. 2001. A New Approach To Time-Domain Vibration Condition Monitoring: Gear Tooth Fatigue Crack Detection And Identification By The Kolmogorov-Smirnov Test. Journal of Sound and vibration. 240(5) : 909-919.
- [13] Combet, F., Jaussaud, P. and Martin, N. 2005. Estimation of slight speed gaps between signals via the scale transform. Mechanical Systems and Signal Processing. 19 : 239–257.
- [14] Stander, C.J., and Heyns, P.S. 2006. Transmission path phase compensation for gear monitoring under fluctuating load conditions. Mechanical Systems and Signal Processing. 20 : 1511-1522.
- [15] Zhan, Y., Makis, V., and Jardine, A.K.S. 2006. Adaptive state detection of gearboxes under varying load conditions based on parametric modeling, Mechanical Systems and Signal Processing. 20 : 188–221.
- [16] Saravanan, N., and Ramachandran, K.I. 2009. A case study on classification of features by fast single-shot multiclass PSVM using Morlet wavelet for fault diagnosis of spur bevel gear box. Expert Systems with Applications. 36 : 10854–10862.
- [17] Saravanan, N., Kumar Siddabattuni, V.N.S., and Ramachandran, K.I. 2008. A comparative study on classification of features by SVM and PSVM extracted using Morlet wavelet for fault diagnosis of spur bevel gear box. Expert Systems with Applications. 35 : 1351–1366.
- [18] Rafiee, J., Tse, P.W., Harifi, A., Sadeghi, M.H. 2009. A novel technique for selecting

- mother wavelet function using an intelligent fault diagnosis system. Expert Systems with Applications. 36 : 4862–4875.
- [19] Wang, X., Makis, V., and Yang, M. 2010. A wavelet approach to fault diagnosis of a gearbox under varying load conditions. Journal of Sound and Vibration. 329 : 1570–1585.
- [20] Belsak, A. and Flasker, J. 2009. Wavelet analysis for gear crack identification. Engineering Failure Analysis. 16 : 1983–1990.
- [21] Saravanan, N., and Ramachandran, K.I. 2010. Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural network (ANN). Expert Systems with Applications. 37 : 4168–4181.
- [22] Samanta, B. 2003. Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. Mechanical Systems and Signal Processing. 18 : 625–644.
- [23] Samanta, B. 2004. Artificial neural networks and genetic algorithms for gear fault detection. Mechanical Systems and Signal Processing. 18 : 1273–1282.
- [24] Rafiee, J., Arvani, F., Harifi, A., and M.H. Sadeghi. 2007. Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network. Mechanical Systems and Signal Processing. 21 : 1746–1754.
- [25] Saravanan, N., Kumar Siddabattuni, V.N.S. and Ramachandran, K.I. 2010. Fault diagnosis of spur bevel gear box using artificial neural network (ANN), and proximal support vector machine (PSVM). Applied Soft Computing. 10 : 344–360.
- [26] He, Q., Yan, R., Kong, F., and Xu, R. 2009. Machine condition monitoring using principal component representations, Mechanical System and signal processing. 23 : 446-466.
- [27] Jia, S. and Howard, I. 2006. Comparison of localised spalling and crack damage from dynamic modelling of spur gear vibrations. Mechanical Systems and Signal Processing. 20 : 332–349.

- [28] Newland, D.E. An introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis. New York. USA. John Wiley & Sons. 1993.
- [29] Hu, Y. H. and Hwang, N.J. Handbook Of Neural Network Signal Processing. USA. CRC Press LLC. 2002.
- [30] Songpon Klinchaeam. 2010. Condition monitoring of a small four strokes petrol engine using vibration signal analysis. Master's Thesis, International college. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือน



PRODUCT DATA

Piezoelectric Accelerometer
Charge Accelerometer — Type 4371, 4371 S and 4371 V

FEATURES

- General purpose
- High sensitivity
- High frequency
- Vibration testing



Description

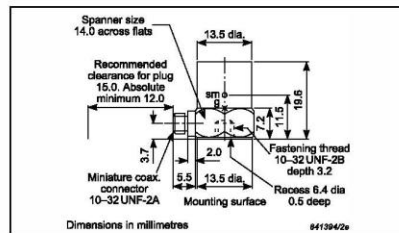
Type 4371 is a piezoelectric, DeltaShear®, Unigain® accelerometer with side connector. Type 4371 features 10–32 UNF receptacle for output connection and can be mounted on the object by means of a 10–32 UNF threaded steel stud.

Calibration

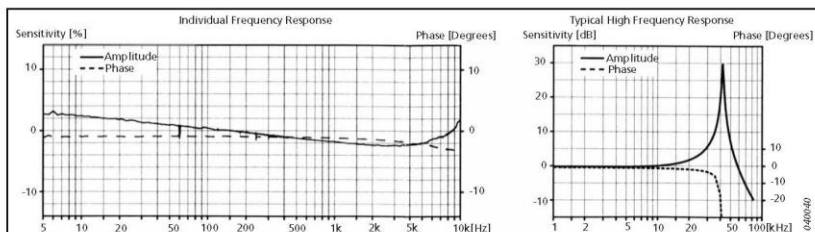
The sensitivity given in the calibration chart has been measured at 159.2 Hz and an acceleration of 10 g. For 99.9% confidence level, the accuracy of the factory calibration is ±2%.

Characteristics

This piezoelectric accelerometer may be treated as a charge source. Its sensitivity is expressed in terms of charge per unit acceleration (pC/g).



The DeltaShear design involves three piezoelectric elements and three masses arranged in a triangular configuration around a triangular centre post. The ring prestresses the piezoelectric elements to give a high degree of linearity. The charge is collected between the housing and the clamping ring. The piezoelectric element used is a PZ 23 lead zirconate titanate element. The housing material is titanium.



ภาพที่ ก-1 คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือน

Specifications – Charge Accelerometer Type 4371, 4371 S and 4371 V

	Units	4371/4371 S	4371 V
Dynamic Characteristics			
Charge Sensitivity (@ 159.2 Hz)	pC/g	9.8 ± 2%	9.8 ± 15%
Frequency Response		See typical Amplitude Response	
Mounted Resonance Frequency	kHz	42	
Amplitude Response ±10% [1]	Hz	0.1 to 12600	
Transverse Sensitivity	%	<4	
Transverse Resonance Frequency	kHz	15	
Electrical Characteristics			
Min. Leakage Resistance @ 20°C	GΩ	≥20	
Capacitance	pF	1200	
Grounding		Signal ground connected to case	
Environmental Characteristics			
Temperature Range	°C (°F)	-55 to 250 (-67 to 482)	
Humidity		Welded, sealed	
Max. Operational Sinusoidal Vibration (peak)	g pk	6000	
Max. Operational Shock (± peak)	g pk	20000	
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain	0.002	
Thermal Transient Sensitivity	Equiv. g/°C (g/°F)	0.004 (0.022)	
Magnetic Sensitivity (50 Hz–0.03 Tesla)	g/T	0.4	
Physical Characteristics			
Dimensions		See outline drawing	
Weight	gram (oz.)	11 (0.39)	
Case Material		Titanium	
Connector		10–32 UNF	
Mounting		10–32 UNF × 3.2 mm threaded hole	

[1] Low-end response of the transducer is a function of its associated electronics

Ordering Information

Type 4371 includes the following

accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- AO 0038: Low noise cable fitted with 10–32 connectors, 1.2 m
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm

Type 4371 S includes the following

accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- AO 0038: Low noise cable fitted with 10–32 connectors, 1.2 m
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- UA 0078: Accessory box including:
 - Cementing stud, 10–32 UNF
 - EP610 input adaptor, TNC to 10–32 UNF microdot
 - Mounting magnet, 10–32 UNF thread

– Case of beeswax

- Insulating disk
- Insulating stud
- Steel stud 10–32 UNF × 1/8"
- Tools

Type 4371 V includes the following

accessories:

- Carrying box
 - Calibration chart
 - 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- OPTIONAL ACCESSORIES**
- AO 0038: 260°C Teflon® low-noise cable, 10–32 UNF, length 1.2 m (4 ft)
 - AO 0122: 250°C, reinforced super low noise cable, 10–32, 3 m (10 ft)
 - AO 0231: 260°C Teflon low-noise cable, 10–32 UNF/TNC, length 3 m (10 ft)
 - AO 1382: Teflon low noise cable, double screened 10–32, 1.2 m (4 ft)

- DB0544: 10–32 UNF Round tip
- JJ0207: 2-pin TNC/10–32 UNF plug adaptor
- JP 0162: 10–32 UNF to TNC connector adaptor
- QA 0013: Hexagonal key for 10–32 UNF studs
- QA 0029: Tap for 10–32 UNF thread
- UA 0559: Mechanical filter for Accelerometer
- UA 0642: Mounting magnet and 2 insulating discs
- UA 0866: Cement stud 10–32 UNF 0.14 mm (set of 25)
- YG 0150: Steel stud 10–32/10–32 with flange
- YJ 0216: Beeswax for mounting
- YP 0080: Probe with sharp tip
- YP 0150: 10–32 UNF insulated stud. Length 12.7 mm
- YQ 2960: 0–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- YQ 2962: 0–32 UNF threaded steel stud. Length 7.62 mm

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

HEADQUARTERS: DK-2950 Nærum · Denmark · Telephone: +45 4580 0500 · Fax: +45 4580 1405
www.bksv.com · info@bksv.com

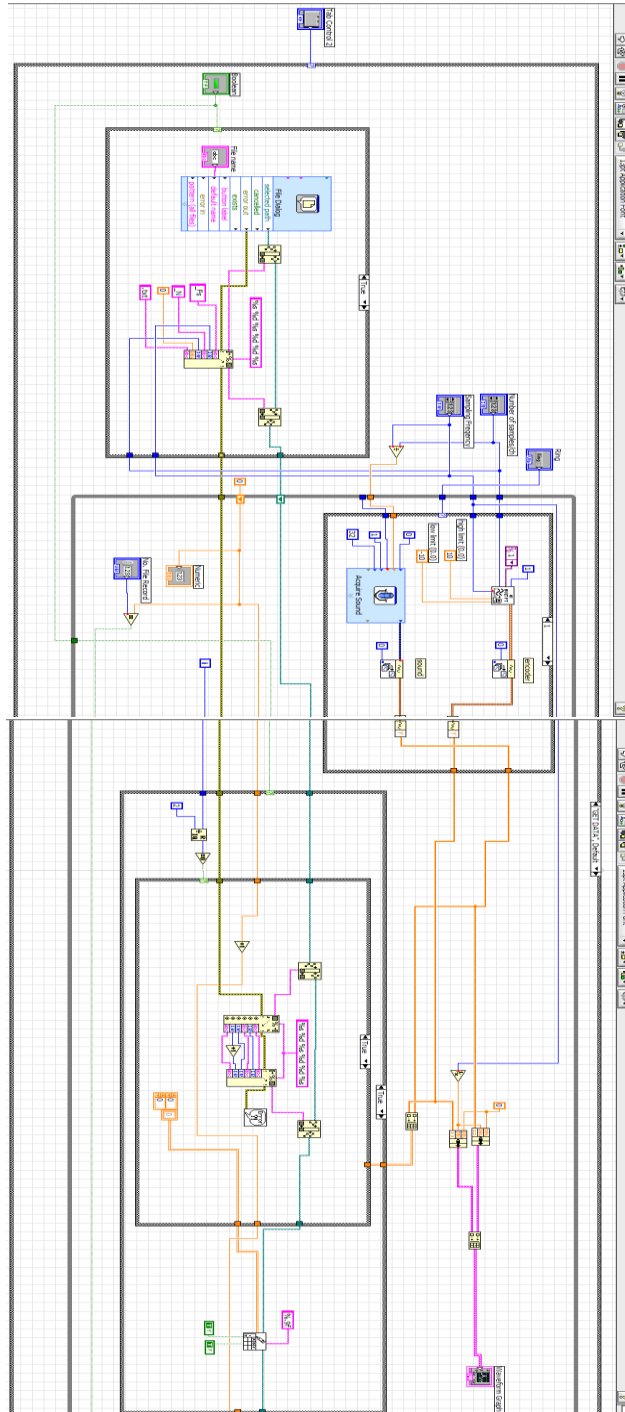
Australia (+61) 2 9899-8888 · Austria (+43) 1 885 74 00 · Brazil (+55) 11 5188-8166 · Canada (+1) 514 695-8225
China (+86) 10 686 29806 · Czech Republic (+420) 2 6702 1100 · Finland (+358) 9-521 300 · France (+33) 1 69 90 71 00
Germany (+49) 421 17 87 0 · Hong Kong (+852) 2548 7466 · Hungary (+36) 1 215 83 05 · Ireland (+353) 1 807 4083
Italy (+39) 02 57 88061 · Japan (+81) 3 57 15 16 12 · Korea (+82) 2 3473 0605 · Netherlands (+31) 318 55 9290
Norway (+47) 66 77 11 55 · Poland (+48) 22 816 75 59 · Portugal (+351) 21 47 11 455 · Singapore (+65) 377 4512
Slovak Republic (+421) 25 443 0701 · Spain (+34) 91 659 0820 · Sweden (+46) 8 449 9800
Switzerland (+41) 44 880 7035 · Taiwan (+886) 2 2502 7255 · United Kingdom (+44) 14 38 739 000
USA (+1) 800 532 2040 · Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær 

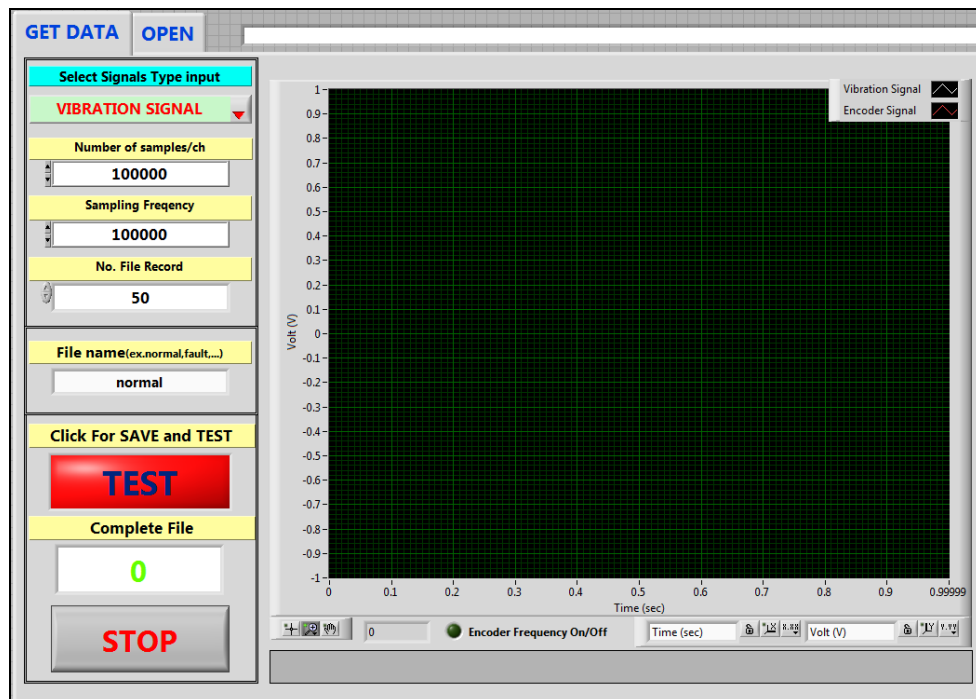
ภาพที่ ก-2 คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือน

ภาคผนวก ข.

โปรแกรม LabVIEW



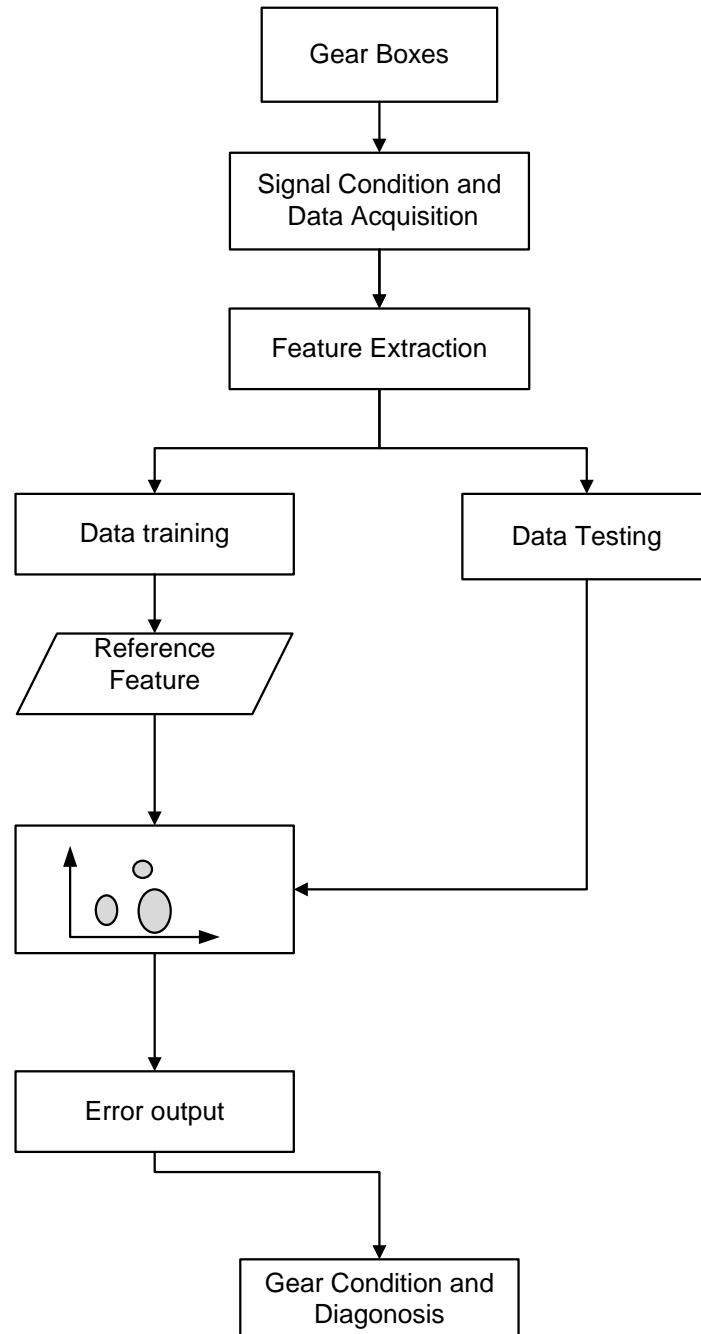
ภาพที่ ข-1 Block diagram ของโปรแกรม LabVIEW [30].



ภาพที่ ข-2 Front panel ของโปรแกรม LabVIEW [30]

ภาคผนวก ค.

แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

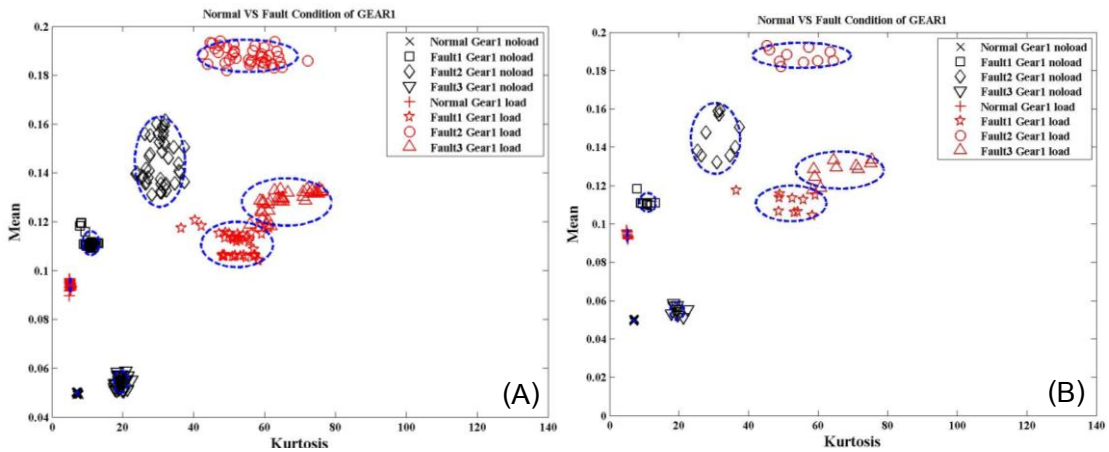


ภาพที่ ค-1 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

ภาคผนวก ง.

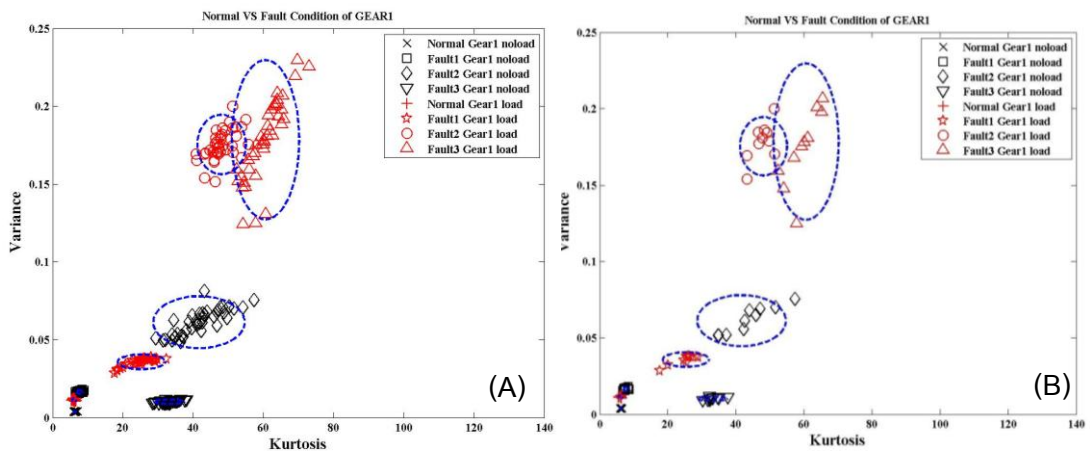
ผลการวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติ (เพิ่มเติม)

ผลการทดลองเพิ่มเติมจาก การวิเคราะห์การแปรผันร่วมกันของพารามิเตอร์เชิงสถิติด้วยการสร้างขอบเขตข้อมูลของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองของสัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงสถิติ 2 พารามิเตอร์ที่มีการแปรผันร่วมกัน เพื่อใช้ในการทดสอบข้อมูลความเสียหายของเฟืองตรง ทั้ง 3 เฟือง พารามิเตอร์เชิงสถิติที่มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง และค่าพลังงานสัญญาณ เฟืองหมายเลข 1 จำนวนฟันเฟือง 24 ฟัน



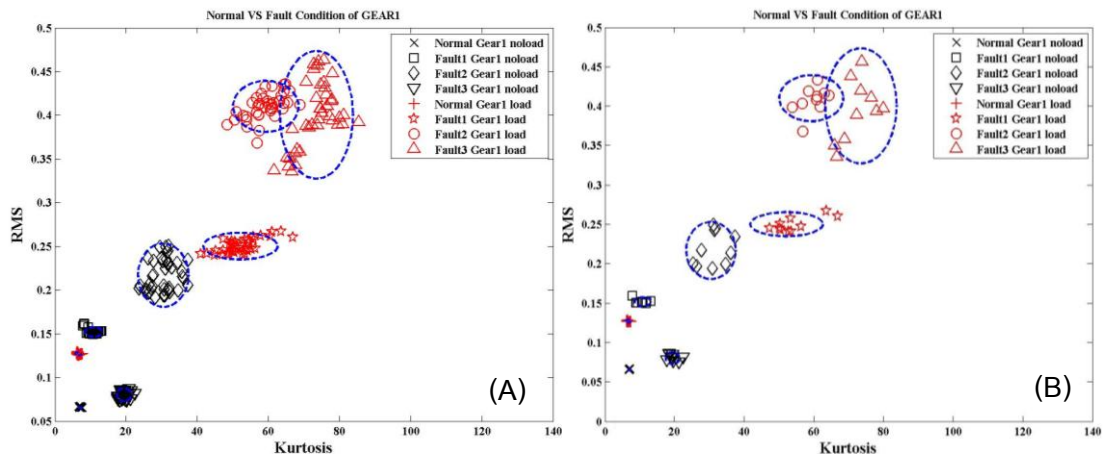
ภาพที่ ง-1 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 1

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



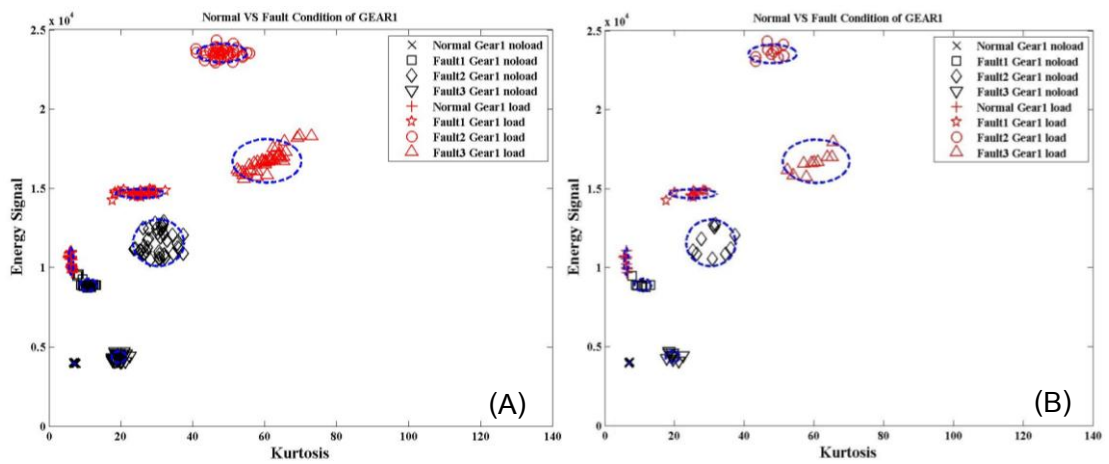
ภาพที่ ง-2 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 1

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



ภาพที่ ง-3 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 1

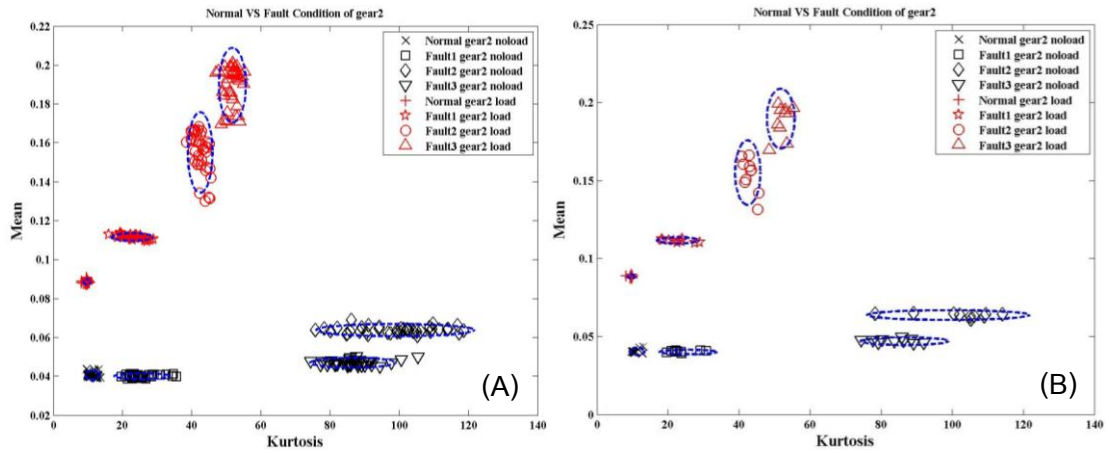
(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



ภาพที่ ง-4 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 1

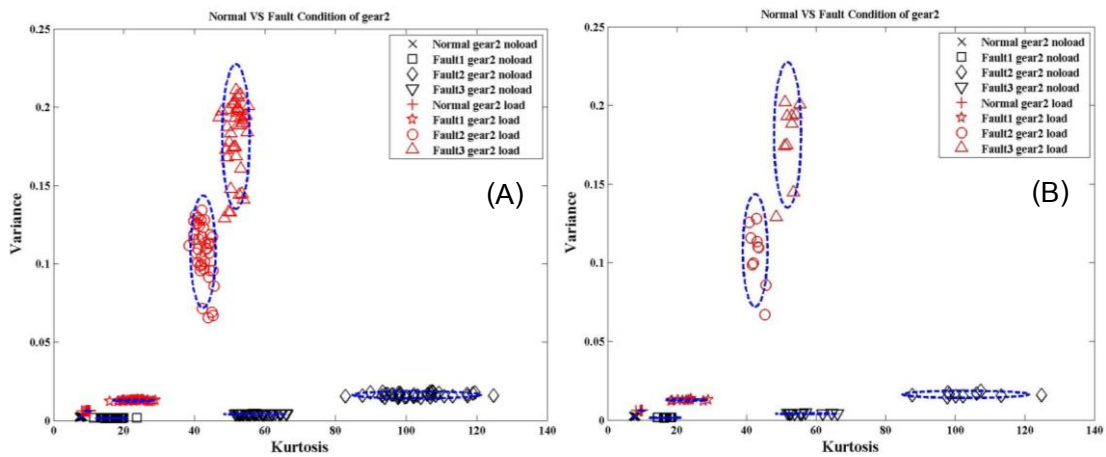
(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต

เฟืองหมายเลข 2 จำนวนฟันเฟือง 26 ฟัน



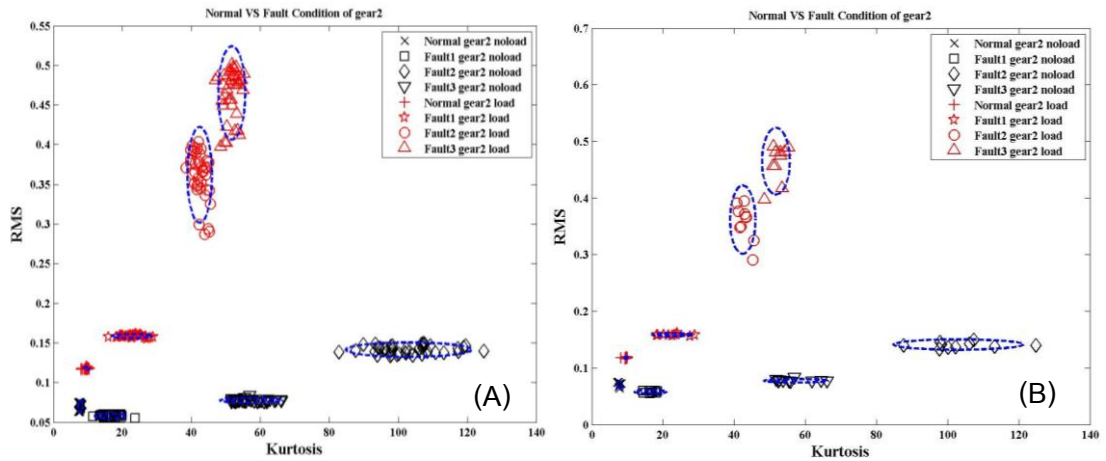
ภาพที่ ง-5 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 2

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต

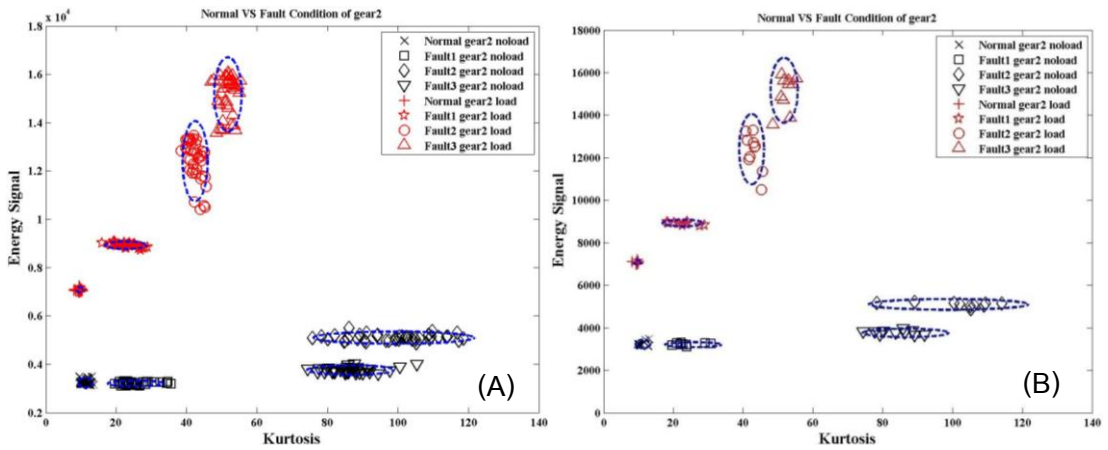


ภาพที่ ง-6 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 2

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต

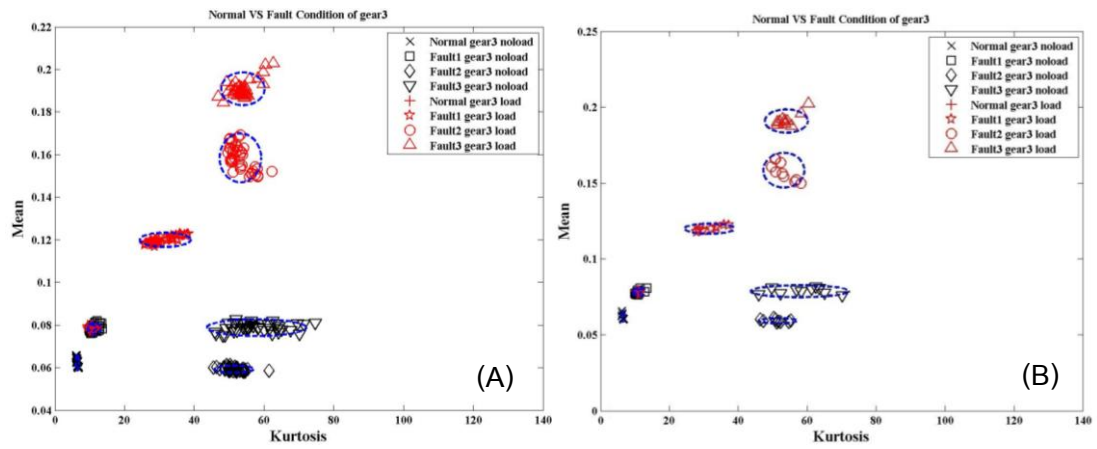


ภาพที่ ง-7 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่ารากกำลังสองของเฟืองหมายเลข 2
 (A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



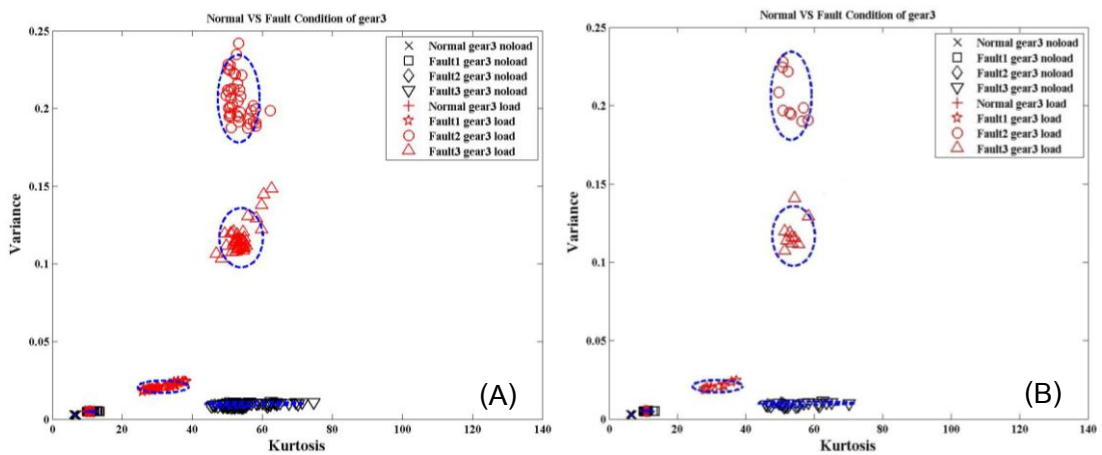
ภาพที่ ง-8 การแปรผันร่วมกันระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 2
 (A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต

เฟืองหมายเลข 3 จำนวนฟันเฟือง 24 ฟัน



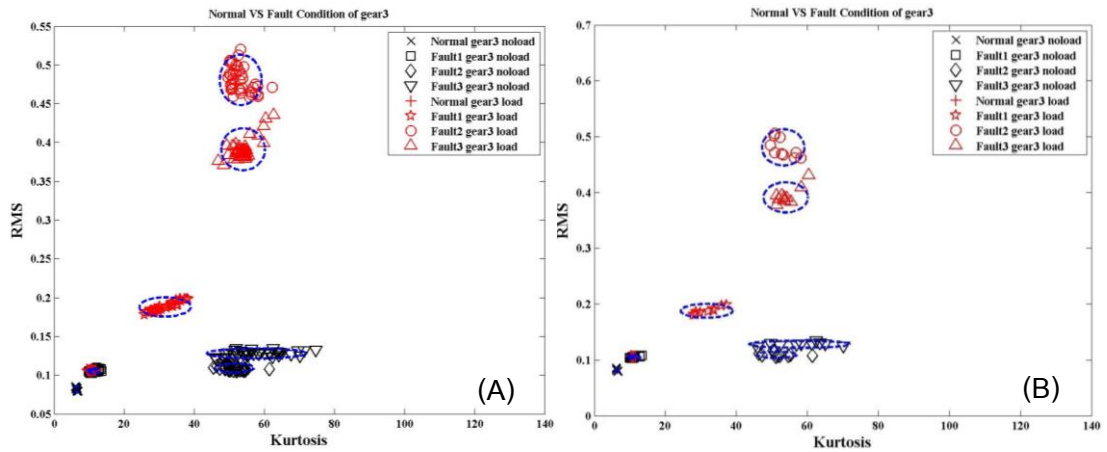
ภาพที่ ง-9 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองหมายเลข 3

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



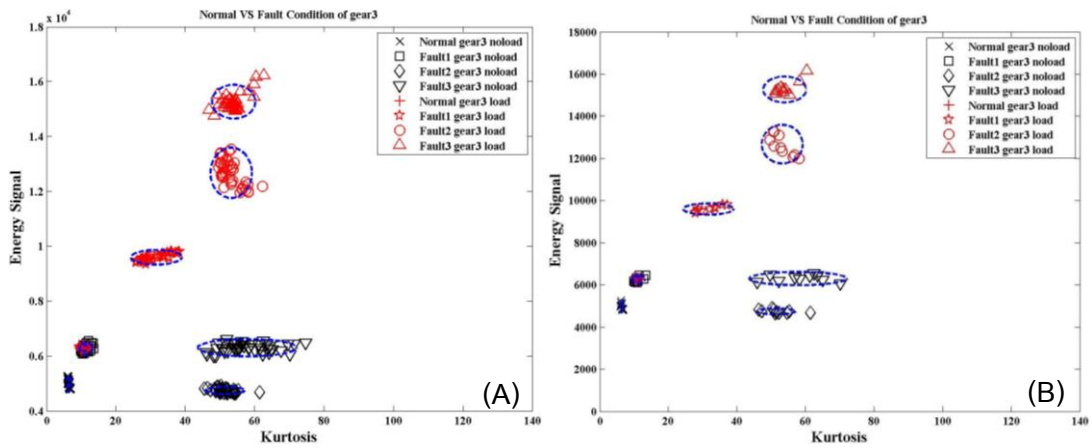
ภาพที่ ง-10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวนของเฟืองหมายเลข 3

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



ภาพที่ ง-11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสองเฟืองหมายเลข 3

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต



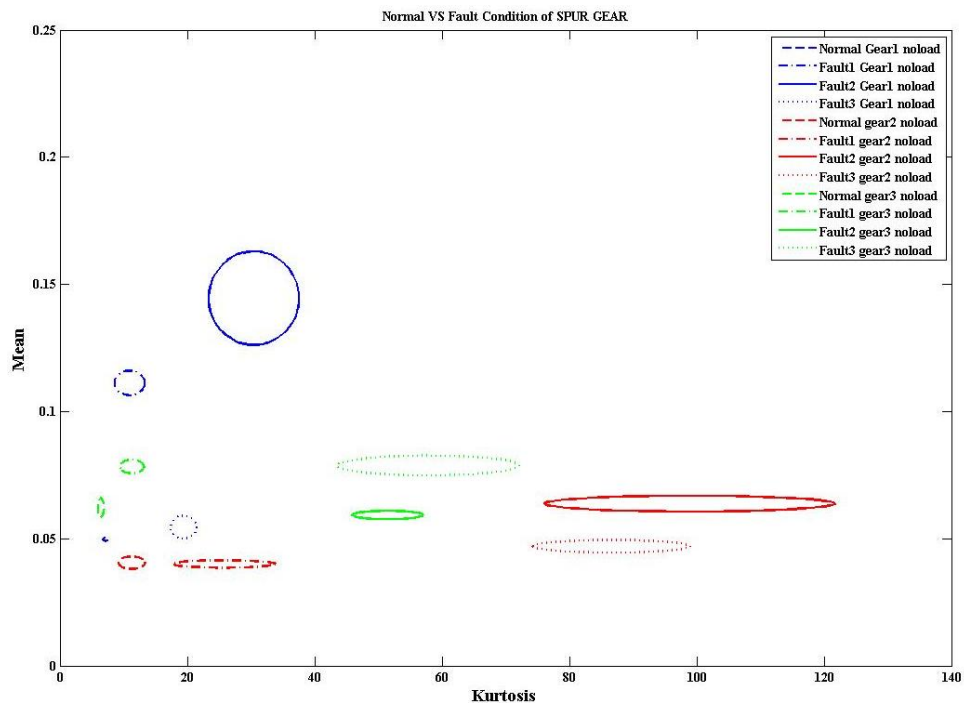
ภาพที่ ง-12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งกับค่าพลังงานสัญญาณของเฟืองหมายเลข 3

(A) ข้อมูลฝึกสอน, (B) ข้อมูลทดสอบขอบเขต

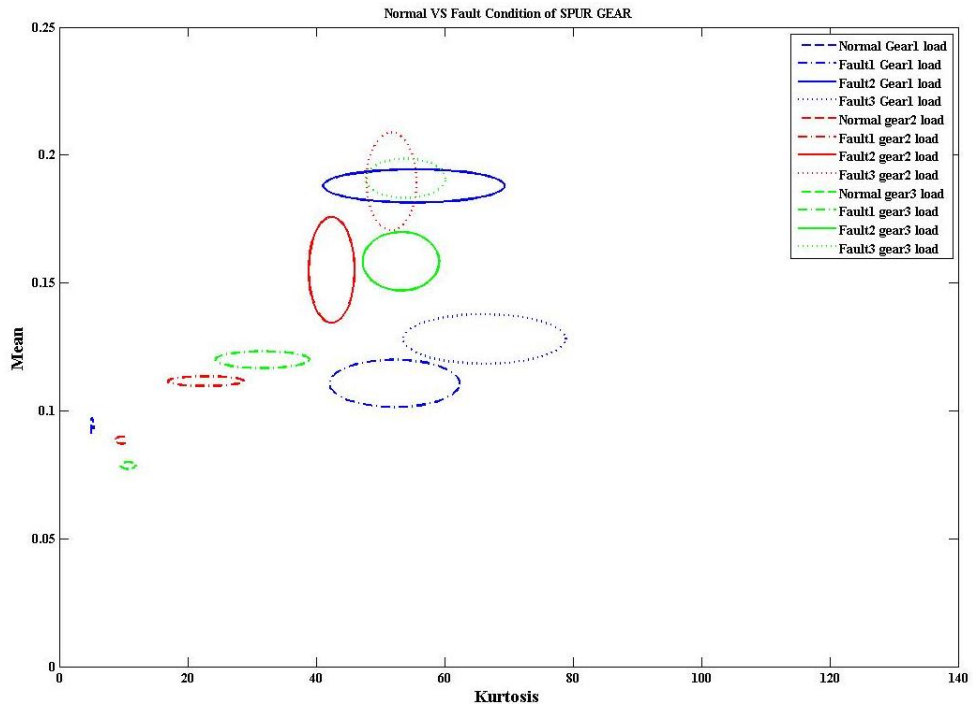
ภาคผนวก จ.

ผลการวิเคราะห์ขอบเขตความเสียหายร่วมกันทั้ง 3 เฟือง (เพิ่มเติม)

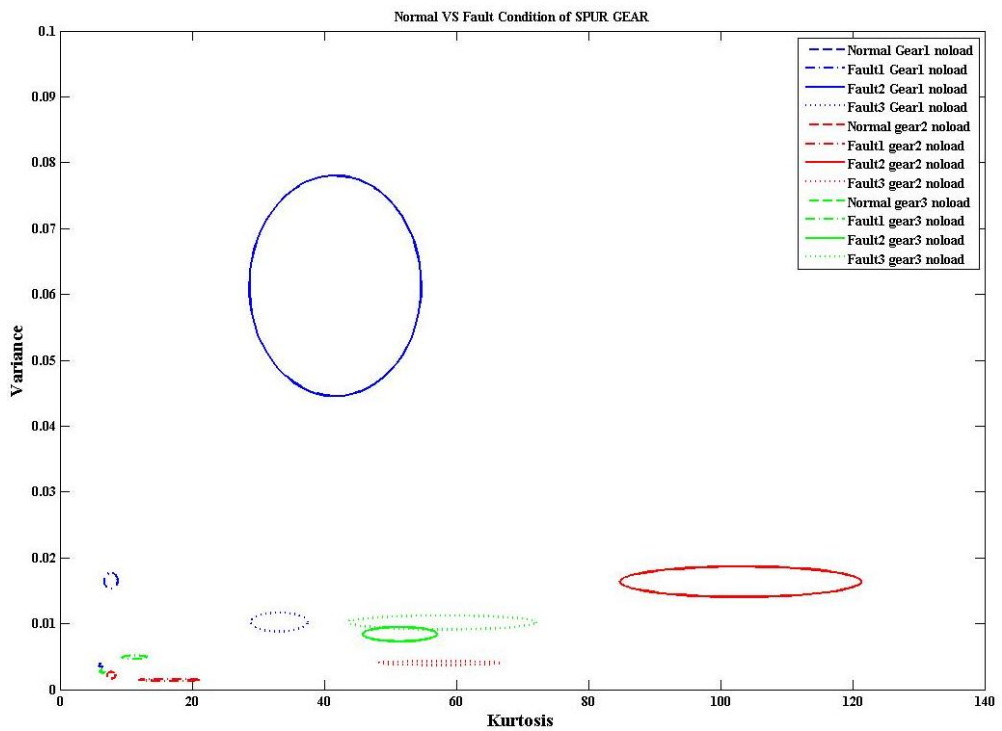
ผลการวิเคราะห์ขอบเขตความเสียหายร่วมกันทั้ง 3 เฟืองด้วยพารามิเตอร์ที่มีการแปรผันร่วมกันทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันของสัญญาณแนวแกนตั้ง ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง และค่าพลังงานสัญญาณ



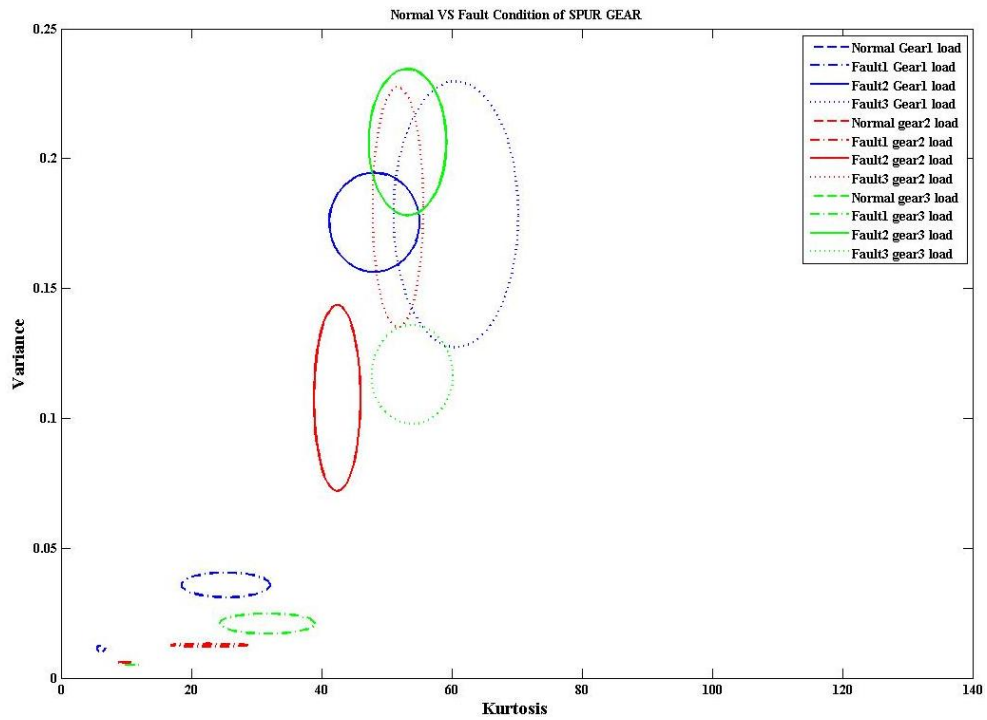
ภาพที่ จ-1 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าเฉลี่ยของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบไม่รับภาระ



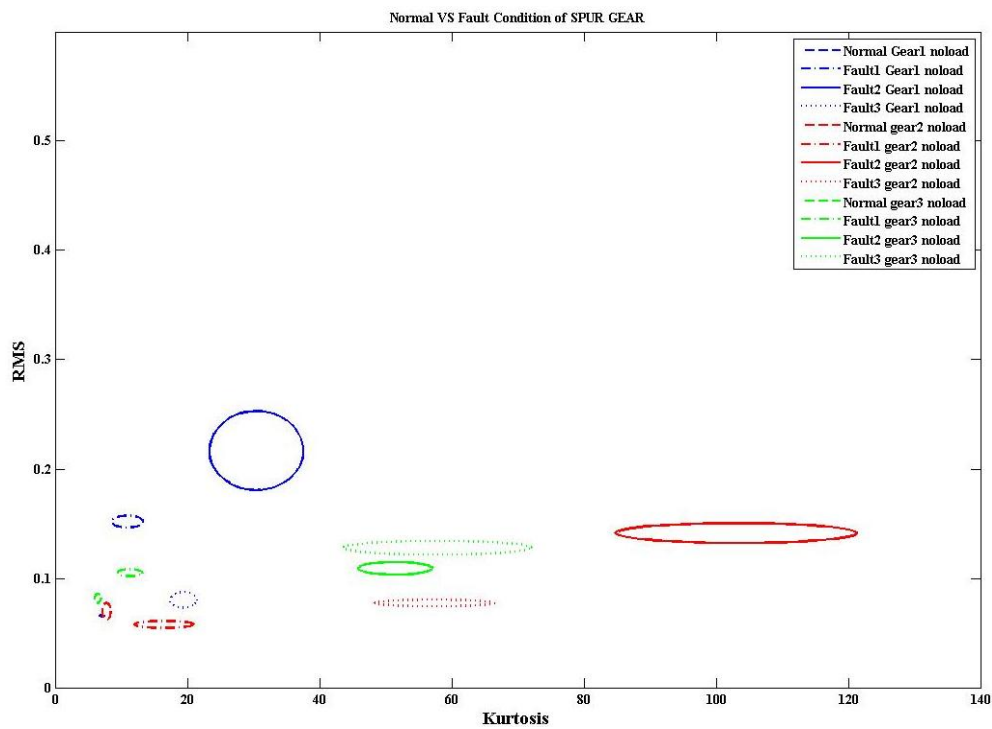
ภาพที่ จ-2 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าเฉลี่ย
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบรับภาระ



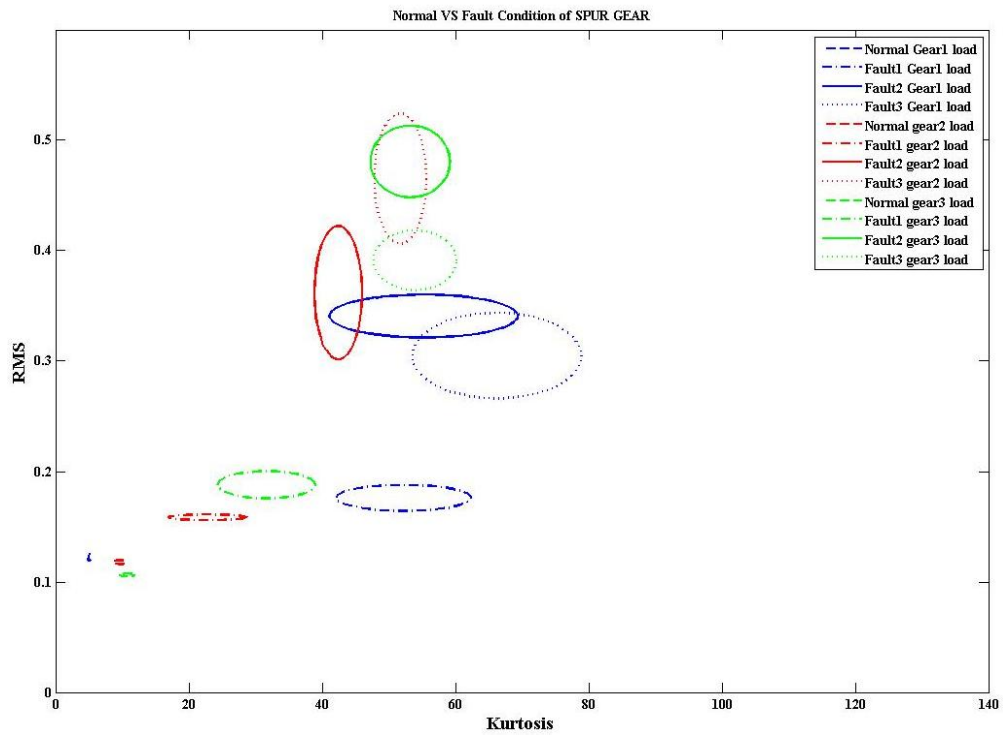
ภาพที่ จ-3 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าแปรปรวน
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองกันแบบไม่รับภาระ



ภาพที่ ๑-4 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่าแปรปรวน
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบรับภาระ



ภาพที่ ๑-5 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสอง
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบไม่รับภาระ



ภาพที่ ๑-6 ขอบเขตการตัดสินใจระหว่างค่าความโค้งกับค่าพลังงานสัญญาณ
ของเฟืองตรงทั้ง 3 เฟืองแบบรับภาระ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ-สกุล:** นายทองพล กลิ่นชะเอม
- วัน-เดือน-ปีเกิด:** 16 กรกฎาคม 2527
- สำเร็จศึกษาในระดับบัณฑิต:**
- 2546-2550: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
 - 2550-2553: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม นานาชาติ)
สาขาวิศวกรรมยานยนต์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 - 2553-2554: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ทุนการศึกษา:**
- 2550-2553: ทุนการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในหลักสูตร
วิศวกรรมยานยนต์จาก Thailand Advanced Institute of
Science and Technology (TAIST), Technology
Development Agency (NSTDA) และ Tokyo Institute of
Technology (Japan)
 - 2553-2554: ทุนการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในหลักสูตร
วิศวกรรมเครื่องกล ทุนอุดหนุน เฉพาะ ค่าเล่าเรียนจากบัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งานวิจัยที่สนใจ:**
- Vibration Monitoring of Rotating Machinery
- E-mail:** songpon.mechanical@gmail.com