

การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงด้วยการวิเคราะห์.

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา

Spur gear fault detection using Time-Domain vibration signal analysis

ทรงพล กลิ่นชะเอม¹ และ วิทยา ยงเจริญ²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10300

โทร 02-218-6612 โทรสาร 02-252-2889

¹E-mail: songpon.mechanical@gmail.com ²E-mail: fmewyc@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน เป็นการตรวจวัดเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลที่เกิดขึ้นในจากการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนที่มีเฟืองเป็นส่วนประกอบหลักของระบบส่งกำลัง การศึกษานี้ชุดเฟืองตรงจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง ชุดเฟืองจะถูกจำลองที่เงื่อนไขต่างๆ เช่น ฟันเฟืองปกติ ฟันเฟืองแตกหัก 50% และฟันเฟืองแตกหัก 100% สัญญาณการสั่นสะเทือนจะตรวจวัดจากหัววัดการสั่นสะเทือนจะติดตั้งอยู่ตามแนวแกนตั้ง แกนนอน และแกนเพลลา พร้อมทั้งสัญญาณวัดรอบที่ตรวจวัดด้วย proximity switch สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกวิเคราะห์ด้วยการใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความโค้ง และค่ารากกำลังสองของสัญญาณ เป็นต้น จากผลการทดลองพบว่า การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียวสามารถทำนายสถานะของเฟืองตรงได้แต่ไม่ชัดเจน การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติสองพารามิเตอร์สามารถทำนายและแยกประเภทสถานะของเฟืองตรงได้ชัดเจนกว่า

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความเสียหาย, เฟืองตรง, การจำแนกกลุ่มสัญญาณ, พารามิเตอร์ทางสถิติ

Abstract

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 and were used to simulate various conditions such as normal, broken tooth 50% and broken tooth 100%. 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. Vibration signals were analysed using the statistical parameter analysis technique. Various statistical parameters were determined such as mean, variance, kurtosis, and root mean square. 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 can be clearly used to predict and identify state of the spur gears.

Keywords: Fault detection, Spur gear, Separated group data, Statistical parameter

1. บทนำ

เฟืองตรงเป็นชิ้นส่วนทางกลที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ปัจจุบันการตรวจสอบสภาวะการทำงานของชุดเฟืองขณะทำงานของเครื่องจักรกลที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตมีความจำเป็นต่อภาคอุตสาหกรรมอย่างมากเพื่อให้ชุดเฟืองในระบบส่งกำลังทำงานได้เต็มความสามารถและเป็นการป้องกันความเสียหายรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นต่อชุดเฟืองและเครื่องจักรกล การทำงานของเฟืองจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกล เช่น การขบกัน การกระทบกระแทกระหว่างเฟืองขับและเฟืองตาม การหมุนของเพลลา การเกิดการแตกหัก การบิ่นของเฟือง เป็นต้น [1-3] งานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้เซนเซอร์ชนิดต่างๆ มาใช้ตรวจวัดสัญญาณจากชุดเฟือง เช่น สัญญาณกระแสไฟฟ้า สัญญาณมุมเพลลาข้อเหวี่ยง สัญญาณการสั่นสะเทือน สัญญาณเสียง สัญญาณอนุสติกอิมิตชัน เป็นต้น งานวิจัยได้ทำการศึกษาการตรวจสอบสภาวะของเฟืองชนิดต่าง ๆ เช่น เฟืองตรง [1-3] เฟืองเฉียง [4-5] และระบบเฟือง [7] การตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลจะใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของมุมเพลลาข้อเหวี่ยง เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับใช้ระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบวัฏจักรการทำงานของเฟือง [6-7] งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเฟืองจะใช้เซนเซอร์ที่กล่าวไว้ก่อนหน้า และเซนเซอร์วัดตำแหน่งของมุมเพลลาข้อเหวี่ยง จึงทำให้สามารถระบุกระบวนการทางกลที่เกิดขึ้นในสัญญาณได้ เช่น การกระทบกระแทกระหว่างเฟืองขับและเฟืองตาม [1-7] การวิเคราะห์สัญญาณโดยทั่วไปมักนิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์หีบโตนเมนต์เวลาด้วยพารามิเตอร์เชิงสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ (Skewness) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่ารากกำลังสอง (Root Mean Square)

และค่าพลังงานของสัญญาณ [1,9-12] เป็นต้น การใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นเพียงค่าเดียวไม่สามารถใช้ทำนายสภาวะการทำงานของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเฟืองขับและเฟืองตามได้ครบทุกเงื่อนไขได้

การศึกษานี้จะจำลองการตรวจสอบสภาวะของเฟืองตรงด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งสามารถตรวจจับโดยใช้หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) และสัญญาณวัดรอบด้วย Proximity switch เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงตำแหน่งรอบการทำงานของเฟืองตรง เป็นต้น สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณวัดรอบจะถูกบันทึกด้วยโปรแกรม LabVIEW การศึกษานี้จะใช้ชุดเฟืองตรงดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นชุดเฟืองตรงของชุดระบบส่งกำลังของรถจักรยานยนต์สี่จังหวะ 125 cc ของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ชุดเฟืองตรงจะถูกจำลองความเสียหายจากการทำงานที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันดังนี้คือ สภาวะการทำงานปกติ และสภาวะความเสียหายจากการแตกหักของฟันเฟือง 50 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์

2. วิธีการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา

สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทำงานของเฟืองตรงที่บันทึกในรูปของแอมพลิจูดและเวลา สามารถวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับกระบวนการทางกลที่เกิดขึ้นของเฟืองตรง ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่นิยมใช้ [9-12] เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง ค่ารากกำลังสอง เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติดังกล่าวมีสมการการวิเคราะห์ดังนี้

ค่าเฉลี่ย (Mean)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

ค่าความแปรปรวน (Variance)

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

ค่าความเบ้ (Skewness)

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

ค่าความโด่ง (Kurtosis)

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

ค่ารากกำลังสอง (Root Mean Square)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (5)$$

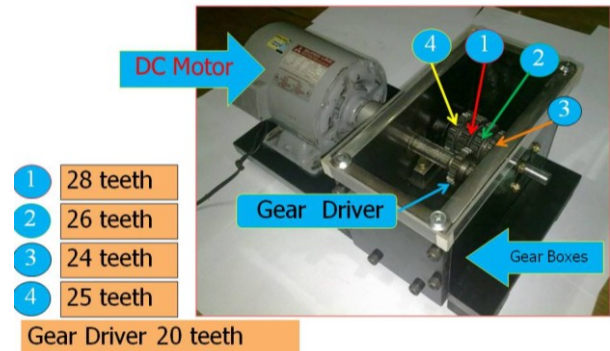
โดยที่ N = จำนวนข้อมูล, x_i = ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือน \bar{x} = ค่าเฉลี่ยของสัญญาณการสั่นสะเทือน σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณการสั่นสะเทือน

3. การทดลอง

การศึกษานี้จะจำลองสภาวะการทำงานของเฟืองที่เงื่อนไขดังต่อไปนี้ ฟันเฟืองปกติ ความเสียหายที่ฟันเฟืองตัวตามแตกหัก 50 เปอร์เซ็นต์ (ดังรูปที่ 2) และความเสียหายที่ฟันเฟืองตัวตามแตกหัก 100 เปอร์เซ็นต์ (ดังรูปที่ 3) สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกบันทึกจากชุดเฟืองดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยเฟืองหมายเลข 1 มี 28 ฟัน เฟืองหมายเลข 2 มี 26 ฟัน และเฟืองหมายเลข 3 มี 24 ฟัน ชุดเฟืองจำลองจะทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ 1440 รอบต่อนาที การจำลองทุกเงื่อนไขจะจำลองแบบไม่มีภาระ

ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นไฟล์แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วย หัววัดการสั่นสะเทือนพร้อมชุด Charge Amplifier หัววัดความเร็วรอบ การ์ดแปลงสัญญาณ, โปรแกรม LabVIEW และคอมพิวเตอร์ ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนทั้งสามตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 5 หัววัดจะติดตั้งตามแนวแกนตั้งและนอนที่จุดรองรับของเพลลา ส่วนแนวแกนเพลลาจะติดตั้งที่ผนังของชุดเฟือง หัววัดจะต่อเชื่อมกับ Charge Amplifier เพื่อใช้ปรับสัญญาณให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณความเร็วรอบจะถูกบันทึกเป็นไฟล์ด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลต่อไปด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 3 แนวแกน สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ เพื่อใช้ทำนาย

สภาวะที่เกิดขึ้นของชุดเฟือง การทดลองนี้จะเก็บบันทึกข้อมูล 80000 จุด ความถี่สุ่ม 16000 Hz



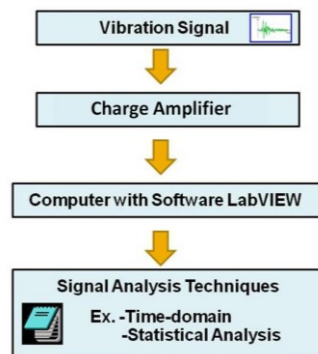
รูปที่ 1 ชุดจำลองเฟืองตรง



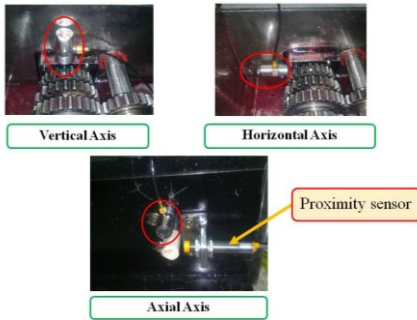
รูปที่ 2 สภาวะความเสียหายเงื่อนไขที่ 2 จำลองความเสียหายที่ฟันเฟืองตัวตามแตกหัก 50%



รูปที่ 3 สภาวะความเสียหายเงื่อนไขที่ 2 จำลองความเสียหายที่ฟันเฟืองตัวตามแตกหัก 100%



รูปที่ 4 แผนผังการเก็บข้อมูลดิบและวิเคราะห์ข้อมูล



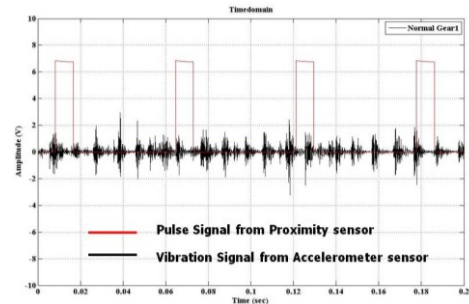
รูปที่ 5 ตำแหน่งติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนและหัววัด
ความเร็วรอบ

4. ผลการทดลอง

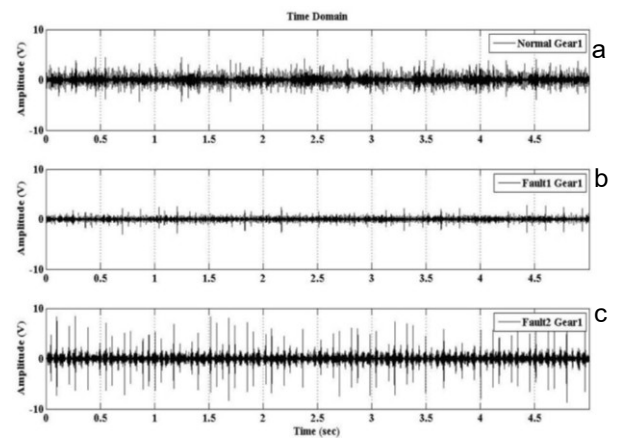
สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากชุดทดลอง
เฟืองตรงเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม
(Random Vibration) ซึ่งจะเกิดจากการขบกันของ
ฟันเฟือง ตัวอย่างสัญญาณวัดรอบและสัญญาณการ
สั่นสะเทือนของชุดเฟืองหมายเลข 1 ที่สภาวะปกติ
ขณะทำงานแบบไม่มีภาระที่ตรวจวัดจากหัววัดการ
สั่นสะเทือนที่ตำแหน่งติดตั้งตามแนวแกนตั้งแสดงดัง
รูปที่ 6 โดยแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณใน
หน่วยโวลต์และแกนนอนเป็นเวลาในหน่วยวินาที
สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีแอมพลิจูดการสั่นไม่สม่ำเสมอ
ในทุกรอบการทำงานของชุดเฟือง การวิเคราะห์
สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากชุดเฟืองมัก
นิยมใช้การวิเคราะห์เทคนิคบนโดเมนความถี่ด้วยการ
วิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งผู้
ตรวจวัดจำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้เรื่องการวิเคราะห์
สัญญาณจึงจะสามารถประเมินสภาพของเฟืองจาก
สัญญาณที่ตรวจวัดได้ การวิเคราะห์สัญญาณด้วย
เทคนิคบนโดเมนเวลา เช่นการวิเคราะห์พารามิเตอร์
ทางสถิติ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์พื้นฐานที่นิยมใช้
วิเคราะห์ข้อมูลแบบสุ่ม และเป็นแนวคิดพื้นฐานของ
การวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural
Network) ด้วย

สัญญาณที่บันทึกจากเฟืองตรงหมายเลข 1 แสดง
ดังรูปที่ 7a-7c โดยที่ a, b และ c แทนด้วย เงื่อนไข
ฟันเฟืองปกติ ฟันเฟืองเสียหาย 50% และ ฟันเฟือง
เสียหาย 100% ผลการวิเคราะห์สัญญาณในรูปที่ 7-9
ด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น

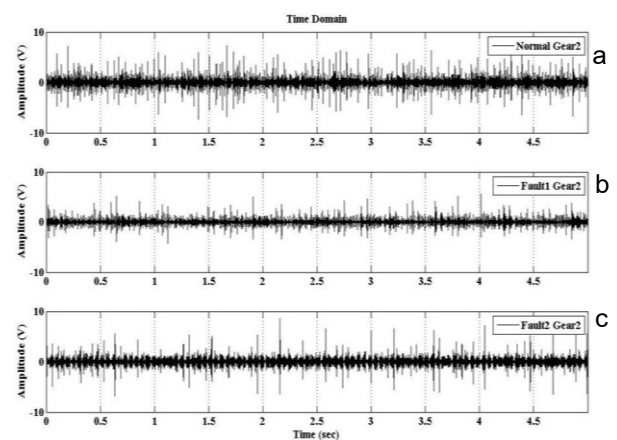
ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง
และค่ารากกำลังสอง ซึ่งพารามิเตอร์ทางสถิติจะถูก
คำนวณจากชุดข้อมูลดิบจำนวน 20 ชุดข้อมูล และนำ
ค่าทางสถิติที่ได้ใช้ทำนายความเสียหายของเฟืองตรง
แสดงดังรูปที่ 10-14 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณ
วัดรอบของชุดเฟืองหมายเลข 1



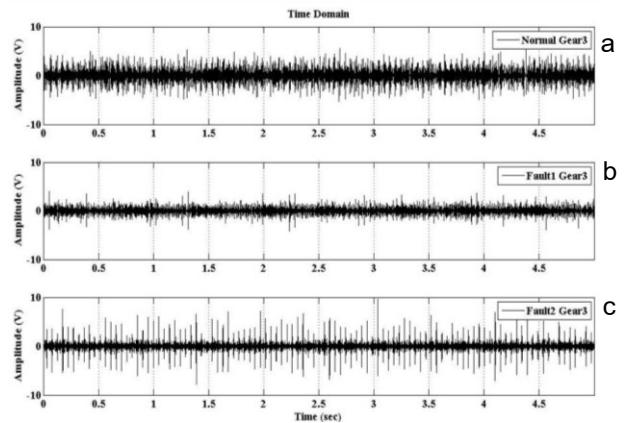
รูปที่ 7 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟือง
หมายเลข 1 ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ



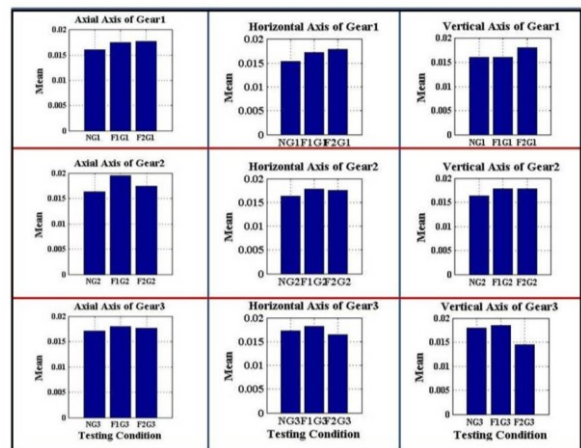
รูปที่ 8 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟือง
หมายเลข 2 ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ

แกนตั้งใช้แสดงค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ แกนนอน แทนด้วยเงื่อนไขการจำลองคือ NG1 F1G1 F2G1 แทนด้วยการจำลองการทำงานของชุดเฟืองที่สภาวะปกติ ฟันเฟืองเสียหาย 50% และ ฟันเฟืองเสียหาย 100% ของฟันเฟืองหมายเลข 1 ตามลำดับ ส่วน NG2 F1G2 F2G2 แทนด้วยเงื่อนไขการจำลองทั้งสามกรณีของเฟืองหมายเลข 2 และ NG3 F1G3 F2G3 แทนด้วยเงื่อนไขการจำลองทั้งสามกรณีของเฟืองหมายเลข 3 ในกราฟแท่งแถว 1-3 ของแต่ละรูปแสดงถึงค่าสถิติของสัญญาณของเฟืองตรงหมายเลข 1-3 และหลัก 1-3 ของแต่ละรูปแสดงถึงค่าทางสถิติของสัญญาณที่บันทึกจากหัววัดการสั่นสะเทือนที่ติดตั้งตามแนวแกน, แกนนอน และแกนตั้งตามลำดับ จากรูปที่ 7-9 พบว่าค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความโด่งและค่ารากกำลังสอง ของสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเสียหายของฟันเฟืองที่เพิ่มขึ้น

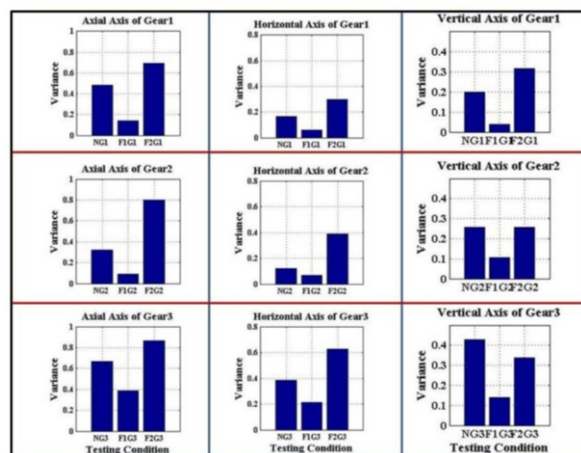
แต่การใช้ค่าพารามิเตอร์เพียงค่าเดียว เพื่อทำนายสภาพของฟันเฟืองจะแยกความแตกต่างไม่ชัดเจน ดังนั้นการใช้การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่าจะทำให้แยกความแตกต่างของข้อมูลได้ชัดเจนและสามารถทำนายสภาพของฟันเฟืองได้ง่ายขึ้น การเปรียบเทียบค่าทางสถิติของเฟืองทั้งสามตัวที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ เช่นระหว่างค่าเฉลี่ยและค่ารากกำลังสองแสดงดังรูปที่ 15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความแปรปรวนและค่ารากกำลังสองแสดงดังรูปที่ 16 และการเปรียบเทียบระหว่างค่าความโด่งและค่ารากกำลังสองแสดงดังรูปที่ 17 จากรูปที่ 15-17 พบว่าการใช้การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ 2 ค่าสามารถแยกเงื่อนไขการจำลองความเสียหายของแต่ละฟันเฟืองออกเป็น 3 กลุ่มได้อย่างชัดเจน ซึ่งกลุ่มที่ปรากฏจากซ้ายและขวาแทนด้วยการจำลองเฟืองที่เงื่อนไขฟันเฟืองปกติ ฟันเฟืองเสียหาย 50% และ ฟันเฟืองเสียหาย 100% ตามลำดับ การใช้เทคนิคการทำนายสภาพของเฟืองตรงผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ในด้านการวิเคราะห์สัญญาณ เช่น การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่



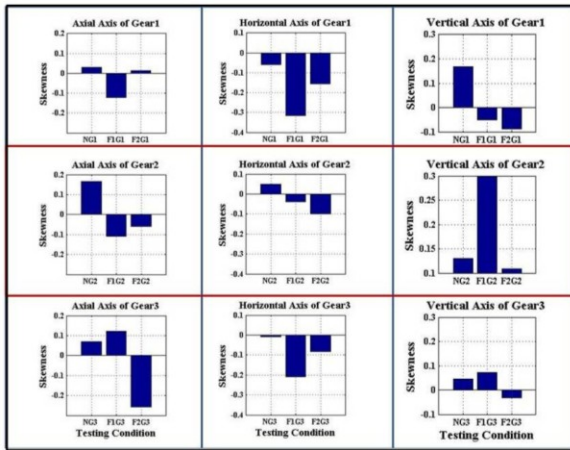
รูปที่ 9 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองหมายเลข 2 ที่เงื่อนไขการจำลองต่างๆ



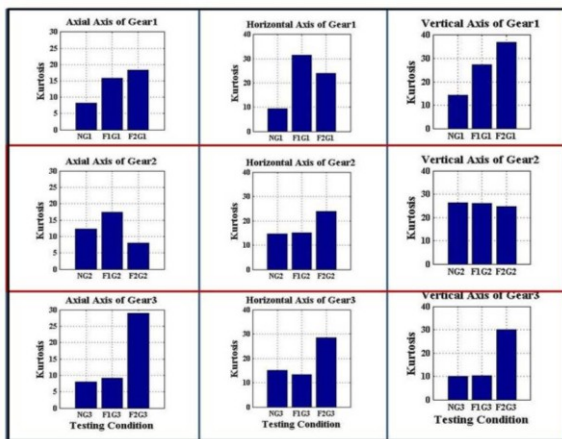
รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดต่าง ๆ



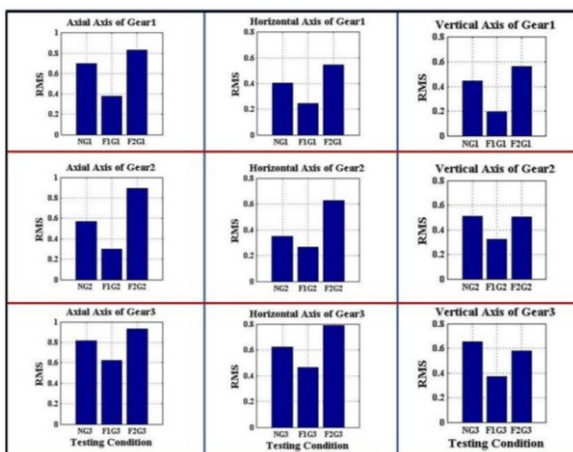
รูปที่ 11 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดต่าง ๆ



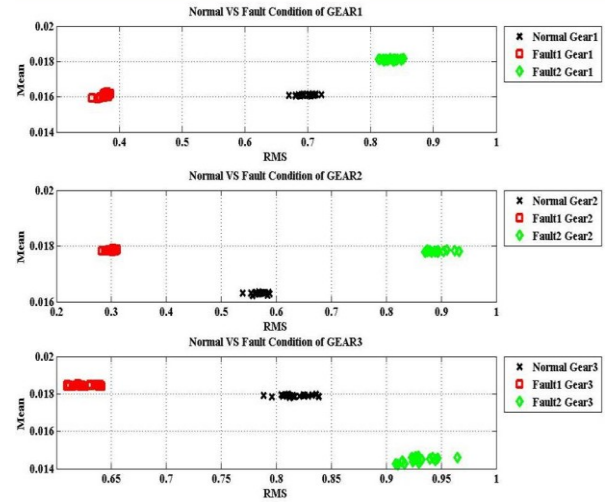
รูปที่ 12 ค่าความเบ้ของสัญญาณของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดต่าง ๆ



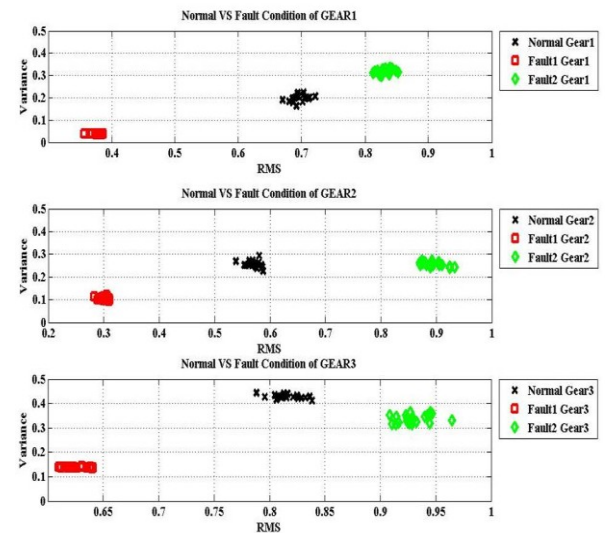
รูปที่ 13 ค่าความโค้งของสัญญาณของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดต่าง ๆ



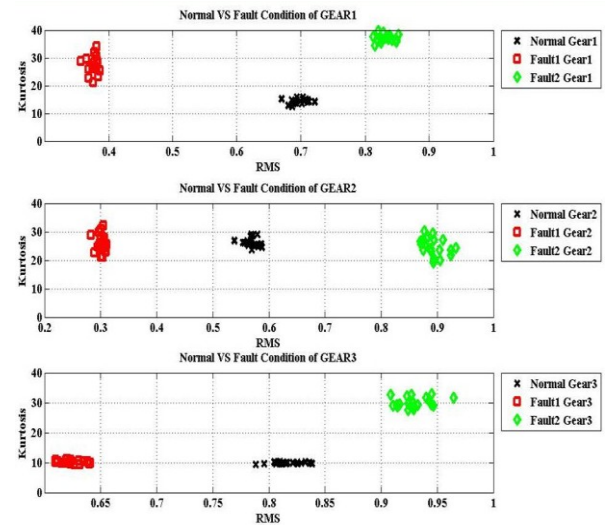
รูปที่ 14 ค่ารากกำลังสองของสัญญาณของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดต่าง ๆ



รูปที่ 15 กราฟค่าเฉลี่ยเทียบกับค่ารากกำลังสองของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดในแนวแกนตั้ง



รูปที่ 16 กราฟค่าความแปรปรวนเทียบกับค่ารากกำลังสองของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดในแนวแกนตั้ง



รูปที่ 17 กราฟค่าความโค้งเทียบกับค่ารากกำลังสองของแต่ละเฟืองที่ตำแหน่งวัดในแนวตั้ง

5. สรุป

การจำลองการตรวจสอบความเสียหายของเฟืองตรงด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เงื่อนไขการทำงานในสภาวะปกติ เงื่อนไขความเสียหายจากการแตกหักของฟันเฟือง 50 % และ 100 % ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพียงค่าเดียว เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่าความโด่งและค่ารากกำลังสองสามารถใช้ทำนายสภาพของฟันเฟืองได้แต่ไม่อาจแยกประเภทความเสียหายได้ชัดเจนได้ทุกกรณี แต่การเปรียบเทียบด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ค่า เช่น ระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่ารากกำลังสอง ระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่ารากกำลังสอง และระหว่างค่าความโด่งกับค่ารากกำลังสอง สามารถทำนายสภาพของฟันเฟืองได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกของการตรวจสอบชุดเฟืองตรงของเครื่องจักรกลที่สำคัญในอุตสาหกรรม พารามิเตอร์ทางสถิติสามารถแยกกลุ่มของความเสียหายของเฟืองตรงได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่ายต่อผู้ใช้งาน ทั้งนี้งานต่อไปจะนำเทคนิคของการศึกษานี้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบเฟืองตรงเพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกในอุตสาหกรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนเฉพาะค่าเล่าเรียนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณ นายสุพจน์ บุรณะศีล นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยพัฒนาชุดทดลองและเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

[1] F. A. Andrade, I. Esat and M. N. M. Badi. 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*. Volume 5, 909-919.

[2] F. Bonnardot, M. El Badaoui, R.B. Randall, J. Danie` re, F. Guillet. 2005. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation). *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume19. 766-785.

[3] P.D. McFadden. 1986. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*. Volume108.165-170.

[4] C.J. Stander, P.S. Heyns. 2006. Transmission path phase compensation for gear monitoring under fluctuating load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 20. 1511-1522.

[5] F. Combet, P. Jaussaud, N. Martin. 2005. Estimation of slight speed gaps between signals via the scale transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume19. 239-257.

[6] J. Antoni, F. Bonnardot, A. Raad, M. El Badaoui. 2004. Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 18. 1285-1314.

[7] K.R. Fyfe, D.S. Munck, Analysis of computed order tracking. 1997. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 11(2). 187-205.

[8] P.D. McFadden. 1989. Interpolation techniques for time domain averaging of gear vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 3(1). 87-97.

[9] Klinchaeam S., and Nivesrangsana P. , 2008., *Condition monitoring of Compressors using principal component analysis method*, the 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, ME-Nett, Bangkok, 2008,

[10] Klinchaeam S., and Nivesrangsana P., 2010., *Condition monitoring of petrol engine using vibration signals - Time Domain Analysis* , Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 32 No. 6 Nev-Dec 2010.

[11] Suddoung K. and Nivesrangsana P., *Condition Monitoring of a Two-Stage reciprocating Compressor using Vibration Signals*, the 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, ME-Nett, Bangkok, 2009, 4-7 November, 2009, Chiang-Mai, Thailand.

[12] Nivesrangsana P., and ChaiChana C., *Condition Monitoring of Force Draught Fan using Vibration Signals*, the 24th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, ME-Nett, Bangkok, 2010, 20-22 October, 2010 Ubonratchathani, Thailand

[13]. M. H. Cyril and A. G. Piersol. *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 5th edition. 2002. New York. USA. McGRAW Hill.