

การศึกษาความเสียหายของเกียร์ตรงด้วยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกเชิงสถิติ Study of Damage in Spur Gear Using Acoustic Emission Signal Analysis

วีรเดช คุณวิทย์ไพศาล และ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

เบอร์โทรศัพท์ 02-218-6610, 02-218-6611 เบอร์โทรสาร 02-252-2889

E-mail: weeraded@hotmail.com, fmewyc@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์ตรงด้วยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก (Acoustic Emission) เชิงสถิติ อะคูสติกเป็นวิธีตรวจสอบความเสียหายในเนื้อของวัสดุทั้งระดับจุลภาค (Microscopic) และระดับมหภาค (Macroscopic) ที่เกิดจากการทำงานของเครื่องจักรหมุนที่มีเกียร์เป็นส่วนประกอบหลักของระบบส่งกำลัง งานวิจัยนี้ใช้ชุดเกียร์ของรถจักรยานยนต์พร้อมชุดภาระงานจำลองความเสียหาย 6 สภาวะของเกียร์คือ แบบปกติ, เกียร์แตกร้าว 25% 1 ฟัน, เกียร์แตกร้าว 50% 1 ฟัน, เกียร์แตกหัก 50% 1 ฟัน, เกียร์แตกหัก 100% 1 ฟัน, เกียร์แตกหัก 50% 1 ฟันและ 100% 1 ฟันบนเกียร์เดียวกัน การวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกเชิงสถิติใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง 2 พารามิเตอร์ สามารถตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรโดยระบุความเสียหายของเกียร์ได้อย่างชัดเจน

คำหลัก: สัญญาณคลื่นอะคูสติก, การตรวจสอบความเสียหาย, เกียร์ตรง

Abstract

Objective of this research is to study how to use acoustic emission in condition monitoring of spur gear defect diagnosis which was calculated by using the statistical parameter analysis technique. Acoustic emission is defined as defect propagation rate in the microscopic and macroscopic of rotating machinery which has spur gear as the main part of power transmission system. This experiment was set up based on motorcycle spur gear with torque loading in various conditions such as defect free, a 25% crack tooth, a 50% crack tooth, a 50% broken tooth, a 100% broken tooth, one gear has a 50% broken tooth and a 100% broken tooth. Result of this experiment showed that acoustic emission signal analysis with two statistical parameters could be meaningfully used for defect identification.

Keywords: Acoustic emission, Gear defect diagnosis, Spur gear.

1. บทนำ

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมคือการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักร จากการศึกษาการซ่อมบำรุงเครื่องจักรก่อนเกิดความ

เสียหายสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องจักรได้มากกว่า 50% [1-2] ในสาขานิวเคลียร์, สาขาอวกาศ และสาขาปิโตรเคมี ความเสียหายอาจรุนแรงทั้งชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนได้อย่างมหาศาล

AMM-2002

ระบบเกียร์เป็นส่วนสำคัญของเครื่องจักรที่มีโอกาสเกิดความเสียหาย ในปัจจุบันมีหลายวิธีในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักร การตรวจสอบด้วยสัญญาณอะคูสติกเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจสอบสภาวะของเกียร์ที่เกิดความเสียหายได้อย่างรวดเร็วและค่าใช้จ่ายไม่สูง

2. หลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สัญญาณอะคูสติก (Acoustic Emission) เกิดเมื่อวัสดุแตกร้าวหรือมีการเปลี่ยนรูปถาวรจะปล่อยพลังงานความเครียดนั้นออกมาในรูปคลื่นอัลตราสติก ในระดับจุลภาคเมื่อวัสดุมีความเค้นมากกว่าจุดพิคกิ้งที่ทนได้ในเนื้อวัสดุจนกระทั่งจะตอมเกิดการเลื่อนตัวผิดตำแหน่งของผลึกจนเกิดการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกจะปล่อยสัญญาณอะคูสติกออกมา

สัญญาณอะคูสติกในเครื่องจักรเกิดจากคลื่นอัลตราสติกเคลื่อนที่ในเนื้อวัสดุของเครื่องจักร เช่น การหมุนของเกียร์เกิดสัญญาณอะคูสติกจากความแรงในการกระทบกัน, ความล่าในการหมุน, แรงเสียดทาน, ความเสียหายและช่องว่างระหว่างเกียร์ เป็นต้น ข้อดีของวิธีอะคูสติกคือ สัญญาณอะคูสติกเกิดในระดับจุลภาคสามารถตรวจสอบความเสียหายได้รวดเร็วและสัญญาณอะคูสติกเป็นการตรวจคลื่นอัลตราสติกความถี่สูงไม่มีผลกับโครงสร้างของเครื่องจักรที่มีความถี่ธรรมชาติที่ต่ำกว่า 20 kHz [3] วิธีอะคูสติกมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักรสามารถตรวจความเสียหาย เช่น การเยื้องศูนย์ของเพลลา, เกียร์แตกหัก, เกียร์สึกหรอ และเกียร์หลวมจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่มีผลมาจากความเสียหายได้ [4]

งานวิจัยที่ศึกษาการตรวจสอบความเสียหายของเกียร์ด้วยวิธีอะคูสติก Amani Raad และคณะ [5] ศึกษาการตรวจสอบเกียร์แตกร้าวและรอยแตกร้าวขยายตัว ใช้ระบบเกียร์ตรง 20 ฟันหนึ่งคู่ ติดหัววัดที่ฐานตลับลูกปืน มีแรงกระทำที่เกียร์ให้เกิดความเสียหาย บันทึกสัญญาณทุก 1 ชั่วโมง การวิเคราะห์สัญญาณใช้ค่า Kurtosis หลังเดินเครื่องต่อเนื่องได้สอง

สัปดาห์เกิดการแตกร้าวที่ฟันเกียร์ ค่า Kurtosis จะเพิ่มขึ้นตามขนาดการแตกร้าว ค่าพลังงานจะเพิ่มขึ้นก่อนและหลังเกิดการแตกร้าว สรุปว่าวิธีอะคูสติกสามารถตรวจสอบเกียร์แตกร้าวได้ งานวิจัยของ Sentoku [6] ศึกษาการตรวจสอบรอยหลุมบนผิวเกียร์ใช้ระบบเกียร์ตรงหนึ่งคู่มิภาระงานในระบบ ติดหัววัดที่เกียร์มีอุปกรณ์จับหัววัดให้หมุนตามเกียร์ ใช้ความเร็ว 990 รอบต่อนาที เกียร์มีความเค้นกระทำ 960 Mpa วัดความเค้นด้วย strain gauge ที่ผิวเกียร์ ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของหลุม และสามารถตรวจสอบการขยายตัวของหลุมบนผิวเกียร์จากค่าพลังงาน งานวิจัยของ Toutountzakakis และคณะ [7] ศึกษาอุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นกับสัญญาณอะคูสติก ใช้ระบบเกียร์ตรง 49 และ 65 ฟัน ความเร็ว 745 รอบต่อนาที มีภาระงาน 0, 55 และ 100 นิวตันเมตรสรุปว่าอุณหภูมิและความหนืดน้ำมันในระบบเกียร์มีผลกับสัญญาณอะคูสติกเพราะความหนาแน่นน้ำมันบนผิวเกียร์ทำให้แรงกระทบกันของเกียร์ในขณะหมุนมีการเปลี่ยนแปลงผลการวิเคราะห์ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลง 33 %

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกเชิงสถิติในการตรวจสอบสภาวะของเกียร์ มีจุดประสงค์ในการพัฒนาการตรวจสอบความเสียหายด้วยวิธีอะคูสติกให้สามารถระบุชนิดความเสียหายของเกียร์ได้อย่างชัดเจน

3. การดำเนินการวิจัย

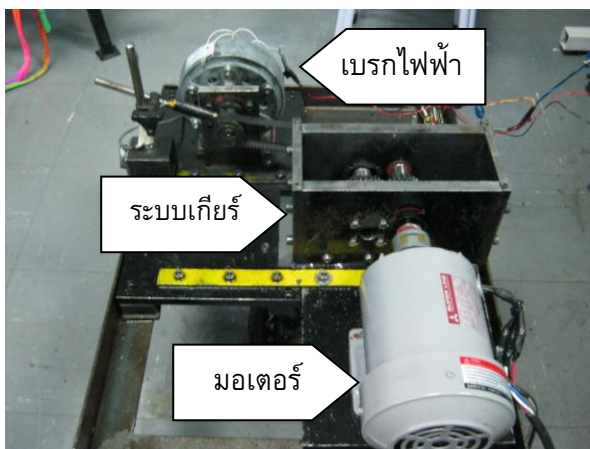
3.1 อุปกรณ์การวิจัย

อุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดเกียร์แบบเปลี่ยนอัตราทดเกียร์ได้ แกนเพลลาขับและเพลลาตามยึดด้วยตลับลูกปืนทั้งสองข้าง ชุดเกียร์มีน้ำมันหล่อลื่นทั้งระบบ เกียร์ดังรูปที่ 1-2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

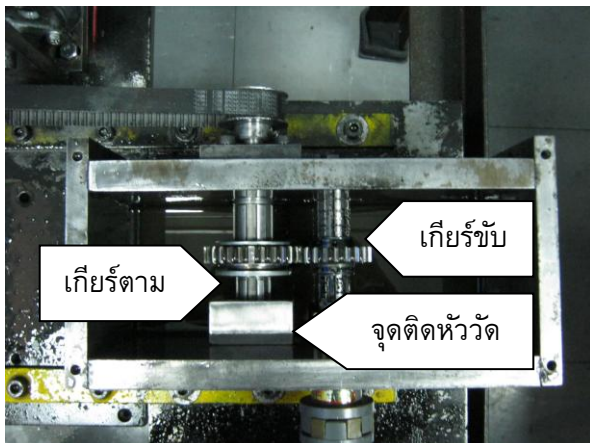
1. เกียร์ขับใช้ 1 ชุดเกียร์ตรงจำนวน 20 ฟัน โมดูล 20 ม.ม. ความหนา 10 ม.ม. มุมกด 20 องศา ทำจากเหล็กชุบแข็ง

AMM-2002

2. เกียร์ตามใช้ 2 ชุดเกียร์ตรงจำนวน 25 และ 28 ฟันโมดูล 20 ม.ม. ความหนา 10 ม.ม. มุมกด 20 องศา ทำจากเหล็กชุบแข็ง
3. ตัวขับใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดครึ่งแอมป์ ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็วโดยอินเวอร์เตอร์
4. เครื่องกำเนิดภาระงานแบบเบรกแม่เหล็กไฟฟ้า ของ Shinko รุ่น POB-1.2A แรงบิดต่อเนื่อง 12 นิวตันเมตร ความเร็วสูงสุด 1800 รอบต่อนาที
5. น้ำมันหล่อลื่นระบบเกียร์ Grade 15W-40



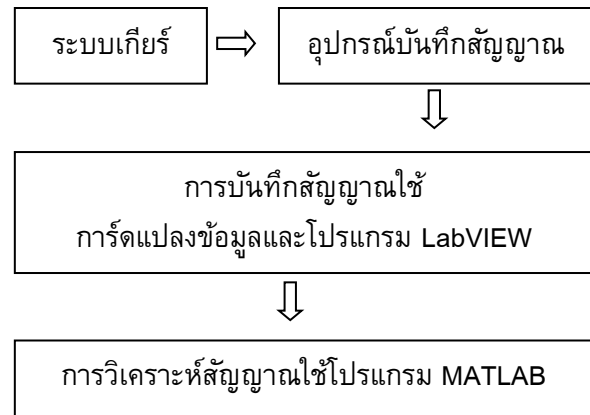
รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับการวิจัย



รูปที่ 2 ระบบเกียร์สำหรับการวิจัย

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณใช้หัววัดอะคูสติก Vallen VS-150-RIC ช่วงความถี่ตอบสนอง 30 ถึง 500 kHz ขยายสัญญาณ 34 dB และบันทึกข้อมูลโดยการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล ด้วยการแปลงข้อมูล Advantech PCI-1714U ความละเอียด 12 บิต การบันทึกสัญญาณอะคูสติกขณะระบบเกียร์หมุนใช้

โปรแกรม LabVIEW ควบคุมการแปลงข้อมูลบันทึกค่า 1 ชุดข้อมูลที่ความถี่สุ่ม 1.5 MHz ระยะเวลา 1 วินาที การวิเคราะห์สัญญาณใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณหลังจากบันทึกสัญญาณเรียบร้อยแล้ว แผนผังการดำเนินงานดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการดำเนินงานข้อมูลสัญญาณอะคูสติก

3.2 วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ความเร็วเพลาชับ 1400 รอบต่อนาที ทดสอบความแรงของสัญญาณอะคูสติกด้วยวิธี Nielsen [8] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอุปกรณ์วิจัย ก่อนเก็บข้อมูลทุกครั้งระบบเกียร์ทำงาน 30 นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและอุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นคงที่ 35 องศาเซลเซียส ทดลองเกียร์ตาม 25 และ 28 ฟันทั้งไม่มีและมีการภาระงาน 1 นิวตันเมตรในระบบ บันทึกสัญญาณอะคูสติกที่ฐานตลับลูกปืนทั้ง 3 แกน คือ แกนตั้ง, แกนนอน และแกนเพลาดังรูปที่ 4 ทั้งหมด 2 กลุ่มคือกลุ่มแรกจำนวน 40 ชุดข้อมูลใช้สร้างขอบเขต กลุ่มที่สองจำนวน 10 ชุดข้อมูลใช้ทดสอบความถูกต้อง การทดลองจำลองเสียหายของเกียร์มีทั้งหมด 6 สภาวะดังรูปที่ 5 คือ

แบบปกติ (N) คือเกียร์ไม่มีความเสียหาย

ความเสียหายแบบที่ 1 (D1) คือเกียร์แตกร้าว 25% ของความหนาฟัน

ความเสียหายแบบที่ 2 (D2) คือเกียร์แตกร้าว 50% ของความหนาฟัน

ความเสียหายแบบที่ 3 (D3) คือเกียร์แตกหัก 50% ของความสูงฟัน

AMM-2002

ความเสียหายแบบที่ 4 (D4) คือเกียร์แตกหัก 100%
ของความสูงฟัน

ความเสียหายแบบที่ 5 (D5) คือเกียร์แตกหัก 50%
และ 100% ของความสูงฟัน ตำแหน่งตรงกันข้ามกัน



(ก)

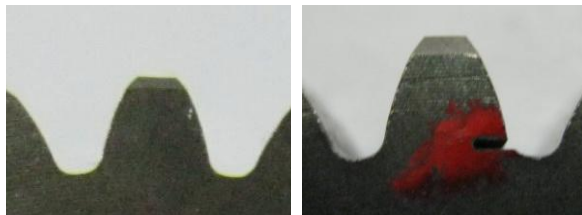
(ข)



(ค)

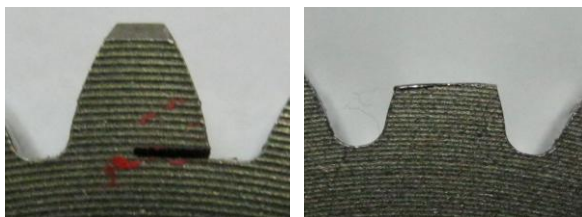
รูปที่ 4 จุดติดหัวดอะคูสติคที่ฐานตลับลูกปืน

(ก).แกนตั้ง, (ข).แกนนอน, (ค).แกนเพลลา



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

(ฉ)

รูปที่ 5 จำลองความเสียหายเกียร์ (ก).เกียร์ปกติ,
(ข).เกียร์แตกร้าว 25%, (ค).เกียร์แตกร้าว 50%,
(ง).เกียร์แตกหัก 50%, (จ).เกียร์แตกหัก 100%,
(ฉ).เกียร์แตกหัก 50% และ 100%

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้วิเคราะห์สัญญาณอะคูสติคเชิงสถิติด้วย
พารามิเตอร์คือ Energy, Root Mean Square (RMS),
Mean และ Kurtosis ในการตรวจสอบสถานะของเกียร์
คำนวณจากสมการ (1)–(4)

$$Energy = \int_0^t x^2(t) dt \quad (1)$$

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

$$Mean = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (3)$$

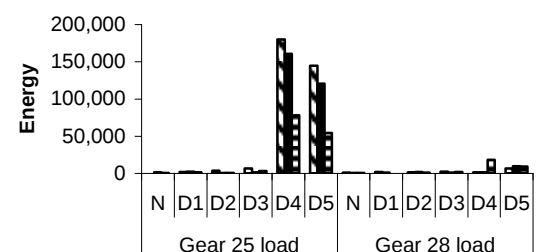
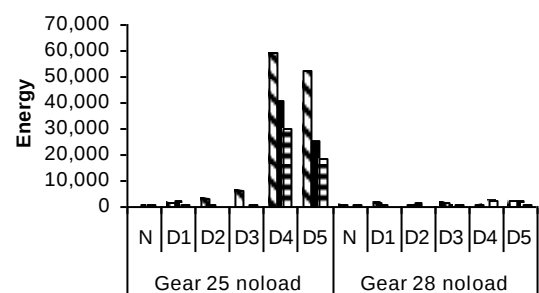
$$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{|x_i| - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \quad (4)$$

เมื่อ $x(t)$ และ $x(i)$ คือ แอมพลิจูดในแกนเวลา

N คือ จำนวนข้อมูล

T คือ คาบของสัญญาณ

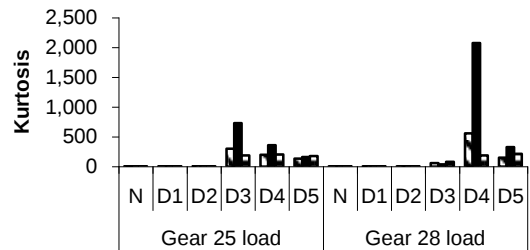
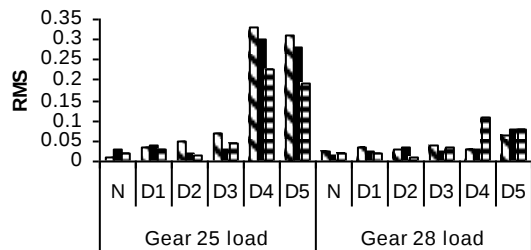
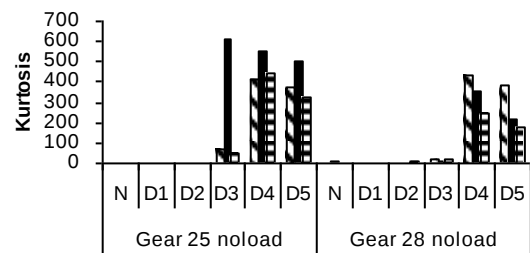
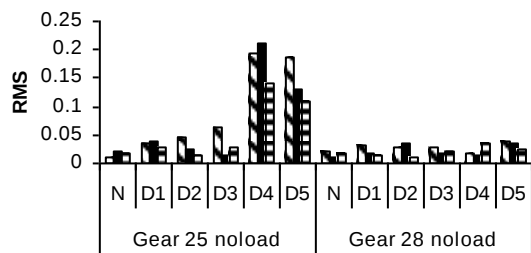
การวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์คำนวณ
จาก 1 ชุดข้อมูลในแกนตั้ง, แกนนอน และแกนเพลลา
ทั้งหมด 40 ชุดข้อมูลกลุ่มแรก ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย
ของพารามิเตอร์แต่ละสถานะของเกียร์ แสดงผลแบบ
แผนภูมิแท่ง ดังรูปที่ 6-9



■ แกนตั้ง ■ แกนนอน ■ แกนเพลลา

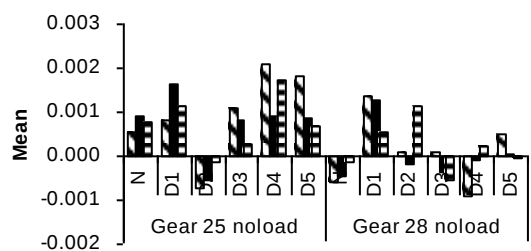
รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยของ Energy สัญญาณทั้ง 3 แกน

AMM-2002

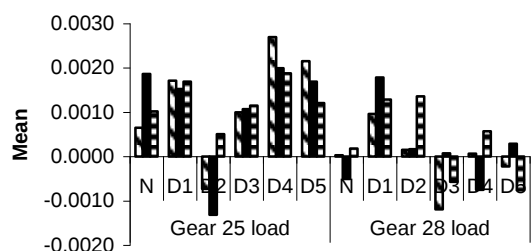


รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยของ RMS สัญญาณทั้ง 3 แกน

รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของ Kurtosis สัญญาณทั้ง 3 แกน



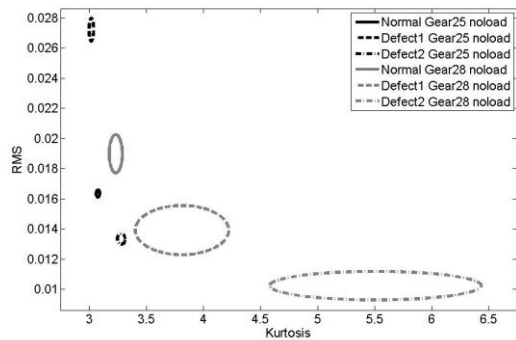
จากแผนภูมิแท่งค่าพารามิเตอร์แต่ละสภาวะของเกียร์ ค่าMean ไม่มีความสัมพันธ์กับความเสียหาย ค่าEnergy, RMS และKurtosis มีความสัมพันธ์กับความเสียหายแต่ไม่สามารถระบุความเสียหายของเกียร์ได้ชัดเจนด้วย 1 พารามิเตอร์จากทั้ง 3 แกน ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์งานวิจัยนี้เลือกใช้สัญญาณจากแกนเฟลาสร้างขอบเขตเพราะค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์แต่ละสภาวะของเกียร์มากกว่าแกนอื่นและแกนตั้ง



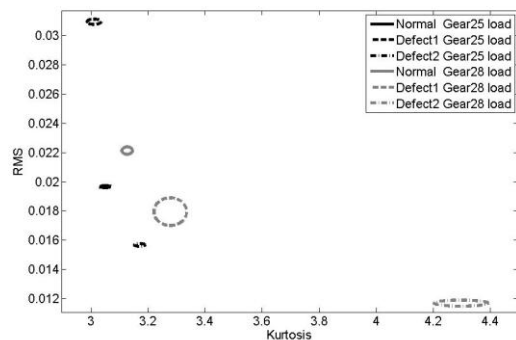
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยของ Mean สัญญาณทั้ง 3 แกน

การวิเคราะห์สัญญาณเชิงสถิติคำนวณจากหลักการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian) [9] ในการสร้างขอบเขตสภาวะของเกียร์กำหนดให้รัศมีกว้างสองเท่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและจุดศูนย์กลางคือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ ที่ความน่าจะเป็น 95% การกระจายตัวของข้อมูล ผลการทดลองสร้างขอบเขตร่วมกัน 2 พารามิเตอร์จาก Energy, RMS, Mean และKurtosis ทุกคู่พบว่าขอบเขตระหว่างค่าKurtosis กับค่าRMS สามารถระบุความเสียหายของเกียร์ได้ชัดเจนที่สุด ขอบเขตแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแบบปกติกับความเสียหายแต่กร้าว ดังรูปที่ 10-11 และกลุ่มความเสียหายแบบแตกหัก ดังรูปที่ 12-13

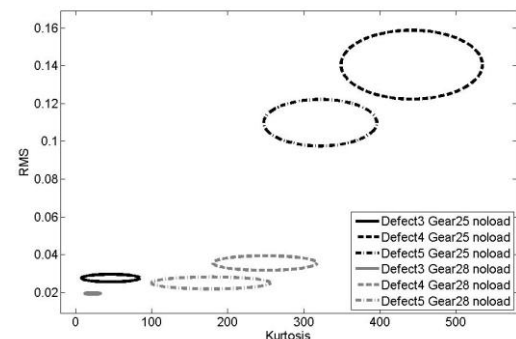
AMM-2002



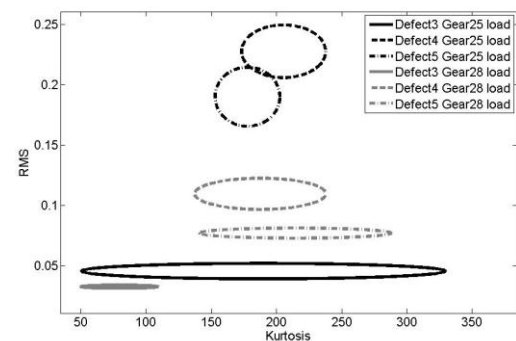
รูปที่ 10 ขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 และ 28 พันแบบปกติกับความเสียหายแตกร้าไม่มีภาระงาน



รูปที่ 11 ขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 และ 28 พันแบบปกติกับความเสียหายแตกร้ามีภาระงาน



รูปที่ 12 ขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 และ 28 พันความเสียหายแบบแตกหักไม่มีภาระงาน

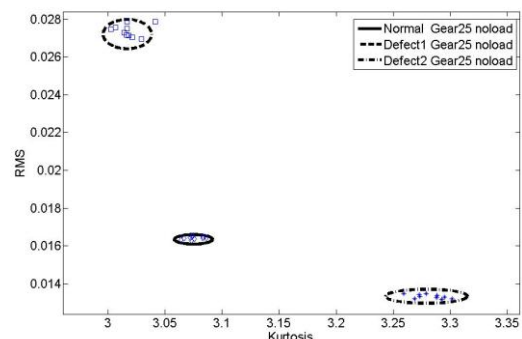


รูปที่ 13 ขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 และ 28 พันความเสียหายแบบแตกหักมีภาระงาน

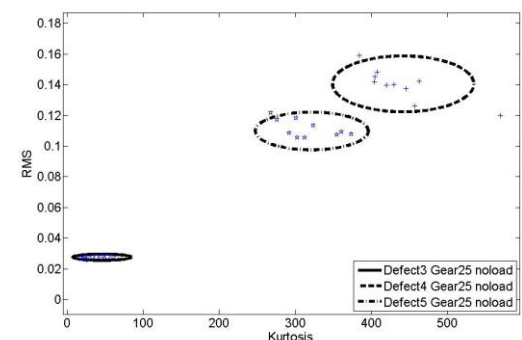
การทดสอบความถูกต้องขอบเขตสถานะของเกียร์ระหว่างค่าKurtosis กับ ค่าRMS ใช้สัญญาณ 10 ชุด ข้อมูลกลุ่มที่สอง ความถูกต้องขอบเขตคือชุดข้อมูลทดสอบต้องอยู่ในขอบเขตสถานะของเกียร์เดียวกัน ผลการทดสอบความถูกต้องขอบเขตแต่ละสถานะของเกียร์ สรุปผลดังตารางที่ 1 และดังรูปที่ 14-21

ตารางที่ 1 จำนวนชุดข้อมูลทดสอบที่อยู่ในขอบเขตสถานะเกียร์เดียวกันใช้ 10 ชุดข้อมูลแต่ละสถานะเกียร์

สภาวะ	เกียร์ 25 พันไม่มี ภาระงาน	เกียร์ 25 พัน มี ภาระงาน	เกียร์ 28 พัน ไม่มี ภาระงาน	เกียร์ 28 พัน มี ภาระงาน
N	10	9	10	10
D1	9	9	10	10
D2	10	10	10	10
D3	10	10	8	9
D4	8	9	8	7
D5	9	10	9	10

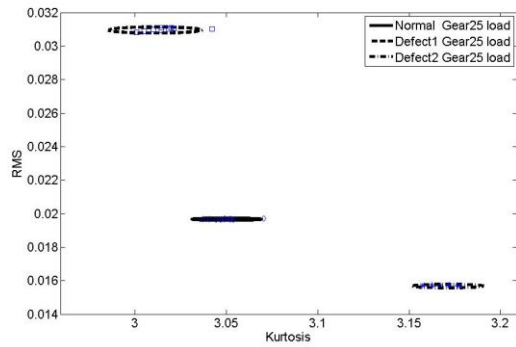


รูปที่ 14 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 พันแบบปกติกับความเสียหายแตกร้าไม่มีภาระงาน

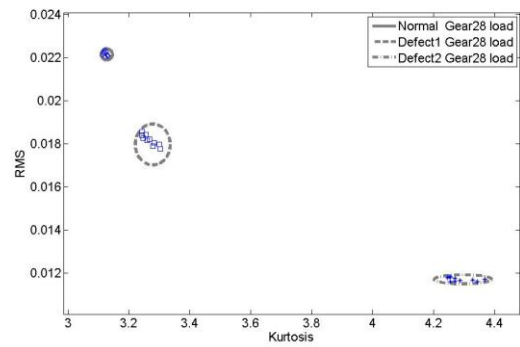


รูปที่ 15 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 พันความเสียหายแบบแตกหักไม่มีภาระงาน

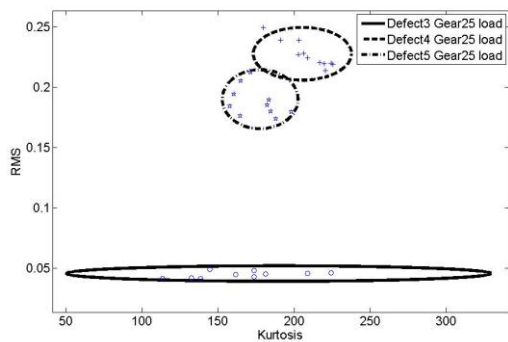
AMM-2002



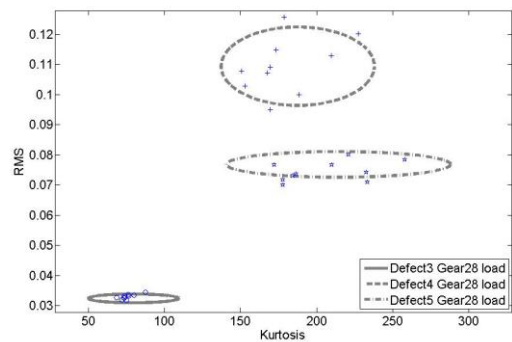
รูปที่ 16 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 ฟัน
แบบปกติกับความเสียหายแตกร้าวมี่ภาระงาน



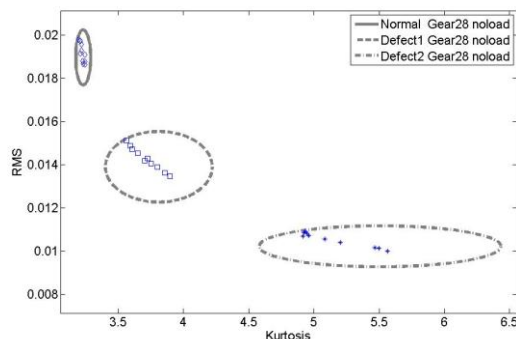
รูปที่ 20 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 28 ฟัน
แบบปกติกับความเสียหายแตกร้าวมี่ภาระงาน



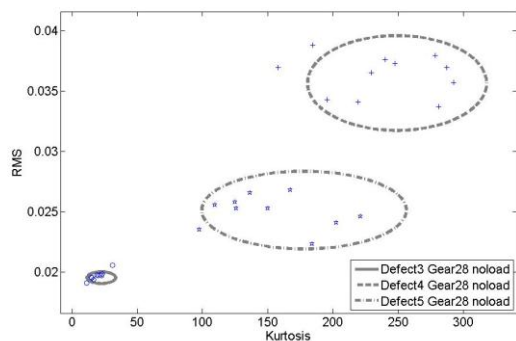
รูปที่ 17 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 25 ฟัน
ความเสียหายแบบแตกหักมีภาระงาน



รูปที่ 21 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 28 ฟัน
ความเสียหายแบบแตกหักมีภาระงาน



รูปที่ 18 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 28 ฟัน
แบบปกติกับความเสียหายแตกร้าวมี่ภาระงาน



รูปที่ 19 ทดสอบขอบเขตสถานะของเกียร์ 28 ฟัน
ความเสียหายแบบแตกหักไม่มีภาระงาน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สรุปว่าการสร้างขอบเขตสถานะของเกียร์โดยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกเชิงสถิติใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง 2 พารามิเตอร์ กำหนดขอบเขตให้เส้นรัศมีกว้างสองเท่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและจุดศูนย์กลางคือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ระหว่างค่า Kurtosis กับค่า RMS ขอบเขตนี้สามารถระบุความเสียหายของเกียร์ได้อย่างชัดเจน ผลการทดสอบความถูกต้องขอบเขตใช้สัญญาณทั้งหมด 240 ชุดข้อมูล มีจำนวน 221 ชุดข้อมูลอยู่ในขอบเขตสถานะของเกียร์เดียวกัน หรือคำนวณเป็นความถูกต้องในการตรวจสอบ 92%

การวิเคราะห์สัญญาณครั้งละหนึ่งเกียร์ดีกว่าการวิเคราะห์ครั้งละหลายเกียร์ในคราวเดียว เพราะจะไม่มีพื้นที่ของขอบเขตซ้อนทับกันทำให้ระบุความเสียหายได้ถูกต้อง สัญญาณอะคูสติกที่ใช้ต้องบันทึกเมื่อระบบเกียร์อยู่ในภาวะคงตัวของการทำงาน เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าคงที่

AMM-2002

การวิเคราะห์สัญญาณชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้าง
ขอบเขตควรรู้จำนวนมากเพราะจะครอบคลุมการ
กระจายตัวของสัญญาณได้มากตามหลักเกาส์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนอุปกรณ์และข้อมูล
จากคุณทรงพล กลิ่นชะเอม และบริษัท ไทยเอ็นดีที
จำกัด (มหาชน)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ronnie K.Miller, Eric v.K.Hill, Patric O. Moore
(2005) *Acoustic emission testing Third Edition,*
Nondestructive testing handbook volume 6,
American Society for Nondestructive testing
- [2] ชาโตะ ฟุอิจิ (2543). การทดสอบแบบไม่ทำลาย,
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [3] Tandon N, Mata S.(1999). Detection of defects
in gear by acoustic emission measurements,
Journal of Acoustic Emission, Vol.17, pp.23-27
- [4] Siores E, Negro E.(1997).Condition monitoring
of a gear box using acoustic emission testing,
Mater Evaluation, Vol.55, pp.183 – 187
- [5] Amani Raad, Fan Zhang, Bob Randall.
(2003).On the comparison of the use of AE and
vibration analysis for early gear fault detection,
The Eight Western Pacific Acoustics Conference,
Melbourne, Australia.
- [6] H. Sentoku. (1998). AE in Tooth Surface
Failure Process of Spur Gears, *Journal of*
Acoustic Emission, Vol.16, pp.19-24
- [7] Toutountzakis T., Tan C.K., Mba D. (2004).
Application of acoustic emission to seeded gear
fault detection, *NDT&E Internation* Vo.37, pp1-10
- [8] American Society for Testing and Materials.
(2009). ASTM E976-05 Standard guide for
determining the reproducibility of acoustic

emission sensor response, *Annual Book of ASTM*

Standard, Volume3.03, 2009

[9] ชนะ ปรีชา (2552). สถิติเชิงคณิตศาสตร์ 1,
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.