



สัญญาณการสั่นสะเทือนอัตราบิตต่ำ Low-bit Rate Vibration Signals

ทรงศักดิ์ สุวรรณศรี และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต*

Songsak Suwannasri and Kiatfa Tangchaichit*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Correspondent author: kiatfa@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อใช้ในการตรวจสอบสุขภาพของเครื่องจักร งานนี้เป็นส่วนหนึ่งของความพยายามในการลดขนาดไฟล์ข้อมูลบันทึกสัญญาณสั่นสะเทือน วัตถุประสงค์ของงานศึกษาคือหาขอบเขตต่ำสุดของความละเอียดเชิงตัวเลขของข้อมูลที่บันทึกโดยที่สารสนเทศที่เป็นประโยชน์ต่อการตรวจสอบสุขภาพเครื่องจักรในข้อมูลยังไม่สูญเสียไป สัญญาณสั่นสะเทือนที่ใช้ศึกษาเป็นสัญญาณที่วัดจากกล่องเฟืองทด สารสนเทศที่ต้องการคือระดับพลังงานสัมพัทธ์ของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่างๆ ที่ปรากฏในสัญญาณซึ่งจะบ่งบอกถึงอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นกับกล่องเฟืองทด ผลจากการศึกษาบ่งชี้ว่าแม้ลดความละเอียดของข้อมูลลงจากอัตราเริ่มต้น 16 บิต จนต่ำถึง 3 บิต สัญญาณที่ได้ยังคงรักษาสารสนเทศที่เป็นประโยชน์ไว้ได้ดั้งเดิม

Abstract

This research involves the collection of vibration signals for machinery health monitoring. This work is part of an effort to reduce the size of data files for recording vibrations. The purpose of this study was to determine the lowest numerical resolution of each of the data samples to be recorded without losing information which is useful to assess the conditions of the machine on hand. Vibration signals from a faulty gear box were used. Information needed was the relative energy levels of vibration at various frequencies in the signal which indicates abnormalities in the gear box. The results of the study indicated that even lowering the resolution of the data from 16 bits to 3 bits, the useful information in the signal can still be maintained.

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ การเฝ้าตรวจสอบสภาพเครื่องจักร ความละเอียดของสัญญาณสั่นสะเทือน

Keywords: predictive maintenance, condition monitoring, signal resolution

1. บทนำ

ในการวิเคราะห์สภาพเครื่องจักร เป็นที่ยอมรับมานานแล้วว่า ข้อมูลการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเป็นข้อมูลที่ทรงประสิทธิภาพมาก ข้อมูลนี้วัดจากเครื่องจักรขณะทำงานในรูปสัญญาณสั่นสะเทือน ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วจัดเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ที่ผ่านมายังมีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งลดขนาดของข้อมูลลง ตัวอย่างเช่นงานของ Mechefske (1) ที่ได้ศึกษาหาความยาวที่เหมาะสมของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องแบบลูกกลิ้งทรงกลมที่มีรอบการทำงานต่ำถึงปานกลาง ซึ่งได้ข้อสรุปว่าความยาวของสัญญาณสั่นสะเทือนในส่วนที่เทียบแล้วเกินกว่าการหมุน 10 รอบไม่มีความจำเป็น

การบีบอัดข้อมูลเป็นอีกประเด็นที่นักวิจัยให้ความสนใจมาก แม้ไม่อยู่ในวงกว้างอย่างสัญญาณภาพและสัญญาณเสียง สัญญาณการสั่นสะเทือนก็ถูกนำมาศึกษาในเชิงของการบีบอัดเช่นกัน งานของ Staszewski (2) ซึ่งได้ศึกษาการบีบอัดสเปกตรัมของสัญญาณสั่นสะเทือนของเฟืองที่มีความผิดปกติเฉพาะที่เป็นตัวอย่างหนึ่ง Staszewski ได้ใช้การแปลงเชิงเส้นแบบเวฟเลตแปลงสัญญาณจากโดเมนความถี่ไปในโดเมนเวฟเลตก่อน จากนั้นสัมประสิทธิ์เวฟเลตที่ได้จากการแปลงทั้งหมดถูกคัดเลือกมาเพียงบางส่วนโดยใช้สองมาตรการเพื่อการเปรียบเทียบ มาตรการแรกคือจินตนิคัลลอริทึม ส่วนมาตรการที่สองคัดเลือกจากสัมประสิทธิ์กลุ่มที่มีค่าสูงสุดในขั้นสุดท้าย Staszewski ได้แปลงสัญญาณกลับจากโดเมนเวฟเลตสู่โดเมนความถี่โดยการสร้างสเปกตรัมจากสัมประสิทธิ์เฉพาะที่คัดไว้ทั้งสองมาตรการ Staszewski สรุปว่า สเปกตรัมที่สร้างกลับจากการคัดเลือกด้วยวิธีจินตนิคัลลอริทึมสามารถแทนสเปกตรัมเดิมได้ดีกว่าโดยเฉพาะในส่วนของสเปกตรัมที่มีไซด์แบนด์ซึ่งเป็นส่วนที่บ่งชี้ถึงการผิดปกติแบบเฉพาะที่ของเฟือง

การลดความละเอียดของตัวเลขบนสัญญาณสั่นสะเทือนโดยการลดอัตราบิต เป็นอีกหนทางตรงที่จะทำให้ขนาดข้อมูลลดลง Junker และคณะ (3) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับระบบจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของมนุษย์

จากสัญญาณสั่นสะเทือนที่วัดจากสะโพกและเข่า ได้ยกประเด็นนี้ขึ้นมาศึกษาและพบว่าระบบยังคงสามารถจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ได้ดีแม้อัตราบิตของสัญญาณที่ใช้ ถูกลดจากที่เคยใช้ 16 บิตลงเป็น 2 บิต

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดขนาดของข้อมูลสัญญาณสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับงานของ Mechefske และของ Stazewski แต่อาศัยแนวคิดของ Junker และคณะ

2. วิธีวิจัย

สัญญาณสั่นสะเทือนที่ใช้มาจากกล่องเฟืองทดสอบขึ้นที่มีความบกพร่องที่ฟันของเฟืองตัวเล็กบนเพลารับกำลังเข้าซึ่งมีจำนวนฟันเป็น 34 ฟัน สัญญาณนี้บันทึกขณะความเร็วรอบของเพลารับกำลังเข้ามีค่าคงที่เป็น 1,460 รอบต่อนาที หรือ 24.3 รอบต่อวินาที ความละเอียดของค่าที่บันทึกเป็น 16 บิต โดยความถี่การบันทึกค่าเป็น 6,400 ครั้งต่อวินาที ความยาวทั้งสิ้นของสัญญาณ 32,768 จุด (ความยาวนี้เทียบเท่ากับการหมุนของเพลารับกำลังเข้า 124.6 รอบ หรืออีกนัยหนึ่งคือมีสัญญาณ 263 จุดต่อรอบการหมุนของเพลารับ)

อัตราทรวมของกล่องเฟืองคือ 3.69 ส่งผลให้เพลาส่งกำลังออกหมุนด้วยอัตรา 6.58 รอบต่อวินาที ส่วนเฟืองที่เพลาส่งกำลังออกมี 52 ฟัน ความถี่ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับอาการผิดปกติของเฟืองในกล่องได้แก่ความถี่ของการขบของฟันเฟืองในขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สองซึ่งมีค่า 826 และ 342 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

2.1 ลดความละเอียดของสัญญาณ

ในขั้นแรกสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สร้างเป็นสัญญาณใหม่อีก 4 สัญญาณ โดยมีความยาวเท่าสัญญาณเดิม แต่ความละเอียดถูกลดให้ต่ำลงเป็น 4, 3, 2 และ 1 บิต ตามลำดับ รายละเอียดในการสร้างสัญญาณใหม่เป็นดังต่อไปนี้

วิธีการลดอัตราบิตที่ใช้ในงานนี้ เป็นการประยุกต์หลักการเป็นสเกลาร์ ควอนไทเซชัน ที่เสนอไว้โดย Max (4) กล่าวโดยละเอียดดังนี้ สัญญาณ 16 บิตความยาว n จุด $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ ที่มี x_i เป็นจำนวนจริงและแทนระดับสัญญาณจุดที่ i อาจแปลง

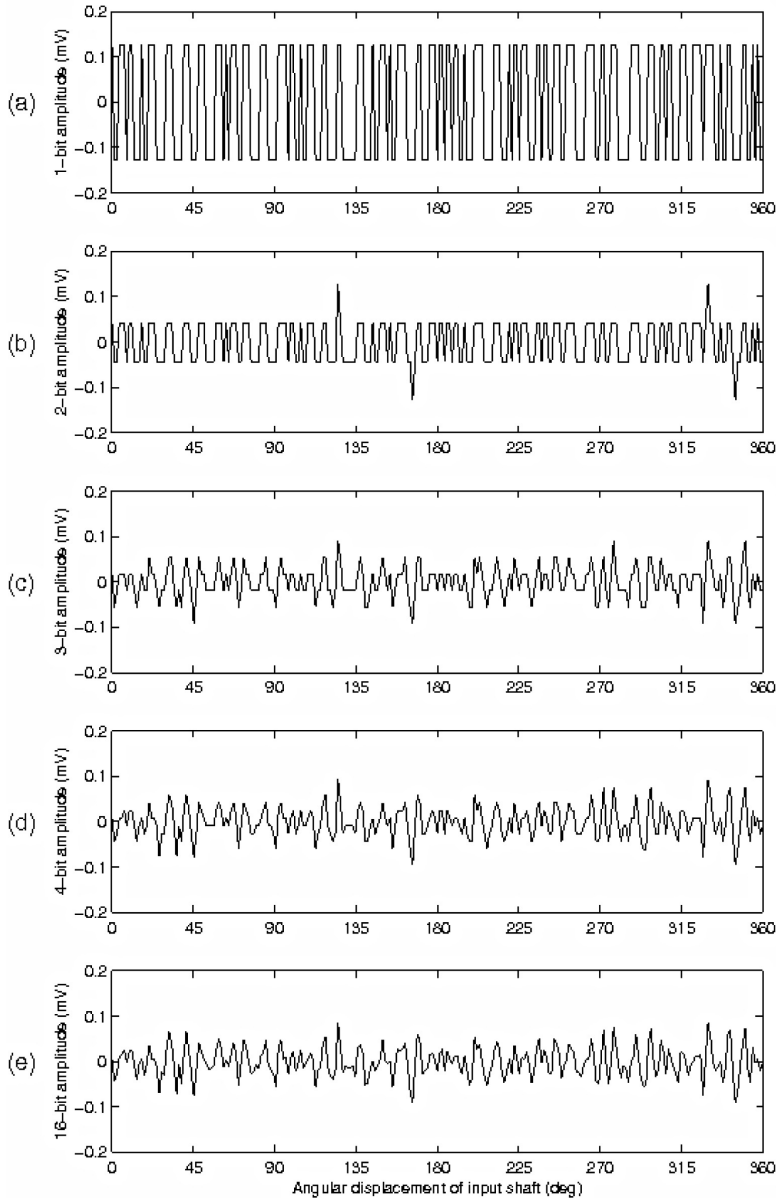
เป็นสัญญาณจำนวนเต็ม $\mathbf{I} = [I_1, I_2, I_3, \dots, I_n]$ ได้โดยที่ $I_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(2^{16} - 1)$ มีค่าลงตัวในช่วง $0 \leq I_i \leq 2^{16}$ ส่วน x_{\min} และ x_{\max} เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของ x

หากต้องการลดความละเอียดของสัญญาณลงเป็น m บิต $6 < m \leq 16$ สัญญาณใหม่ในรูปจำนวนเต็มจะได้ค่าใหม่เป็น $\hat{I}_i = \text{round} \left[\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(2^m - 1) \right]$

โดยที่ $\text{round} [\]$ แทนการปัดเข้าหาจำนวนเต็มที่มีค่าใกล้เคียงที่สุด ซึ่งจำนวนเต็ม ที่ได้สามารถนำไปคำนวณเป็นสัญญาณจำนวนจริงสร้างกลับที่มีอัตรา m บิต จาก

$$\hat{x}_i = \frac{\hat{I}_i}{2^m - 1}(x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}$$

สัญญาณที่ได้ในขั้นตอนนี้มีลักษณะดังรูปที่ 1

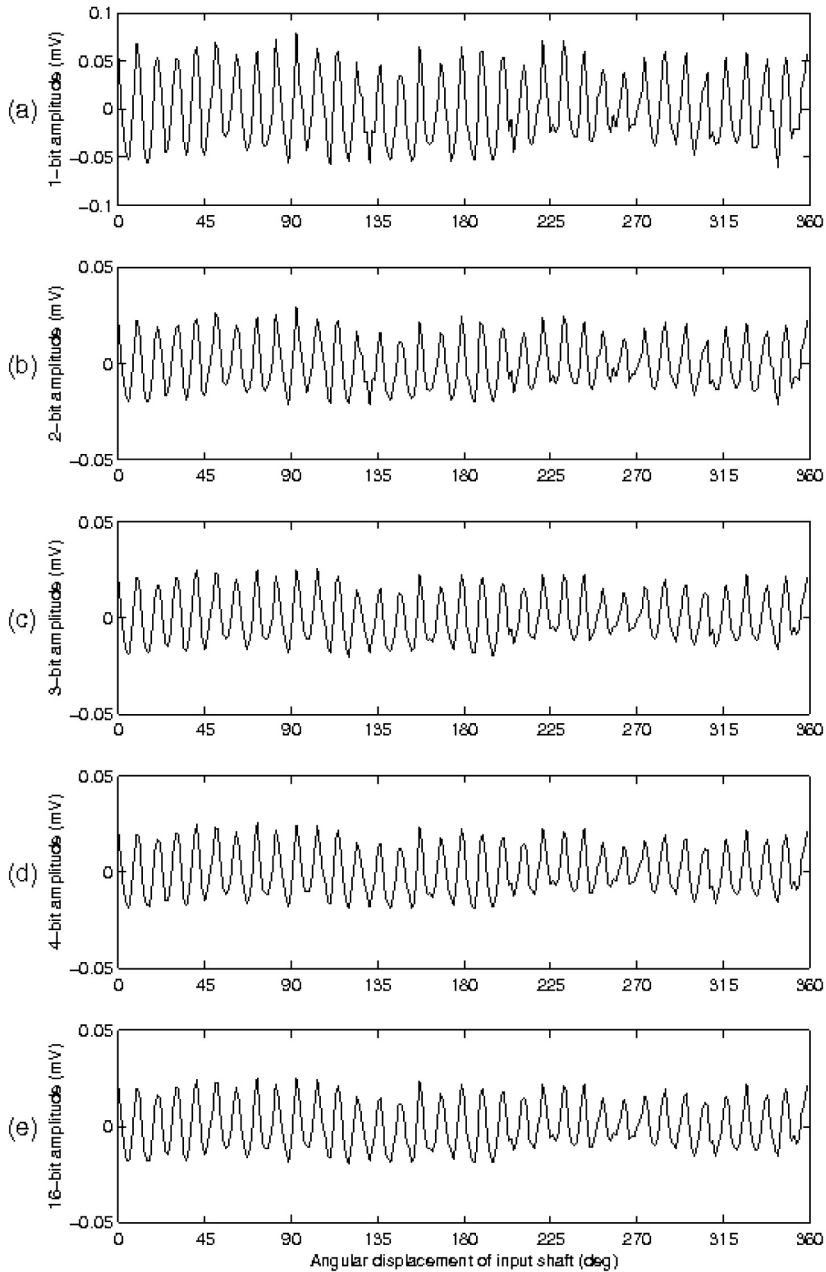


รูปที่ 1. ลักษณะของสัญญาณสั้นสะเทือนที่ลดความละเอียดลง (a-d) เปรียบเทียบกับสัญญาณเดิมความละเอียด 16 บิต (e) ทั้งหมดแสดงให้เห็นเพียง 1 รอบของการหมุนของเฟลา

2.2 ทำการเฉลี่ยบนโดเมนเวลา

เพื่อเป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนทั้งที่อยู่ในสัญญาณดั้งเดิมและที่เกิดจากการลดความละเอียดในขั้นต่อมาแต่ละสัญญาณ(ทั้งดั้งเดิมและที่สร้างขึ้นใหม่) ซึ่งล้วนแต่มีความยาวเป็น 124.6 รอบของการหมุนของ

เฟลาจะถูกนำมาเฉลี่ยกับตัวเองให้เหลือความยาว 1 รอบเท่านั้นตามด้วยวิธีเฉลี่ยแบบเข้าจังหวะบนโดเมนเวลา (Time-domain synchronous averaging) ตามรายละเอียดใน (5) ลักษณะของสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 2

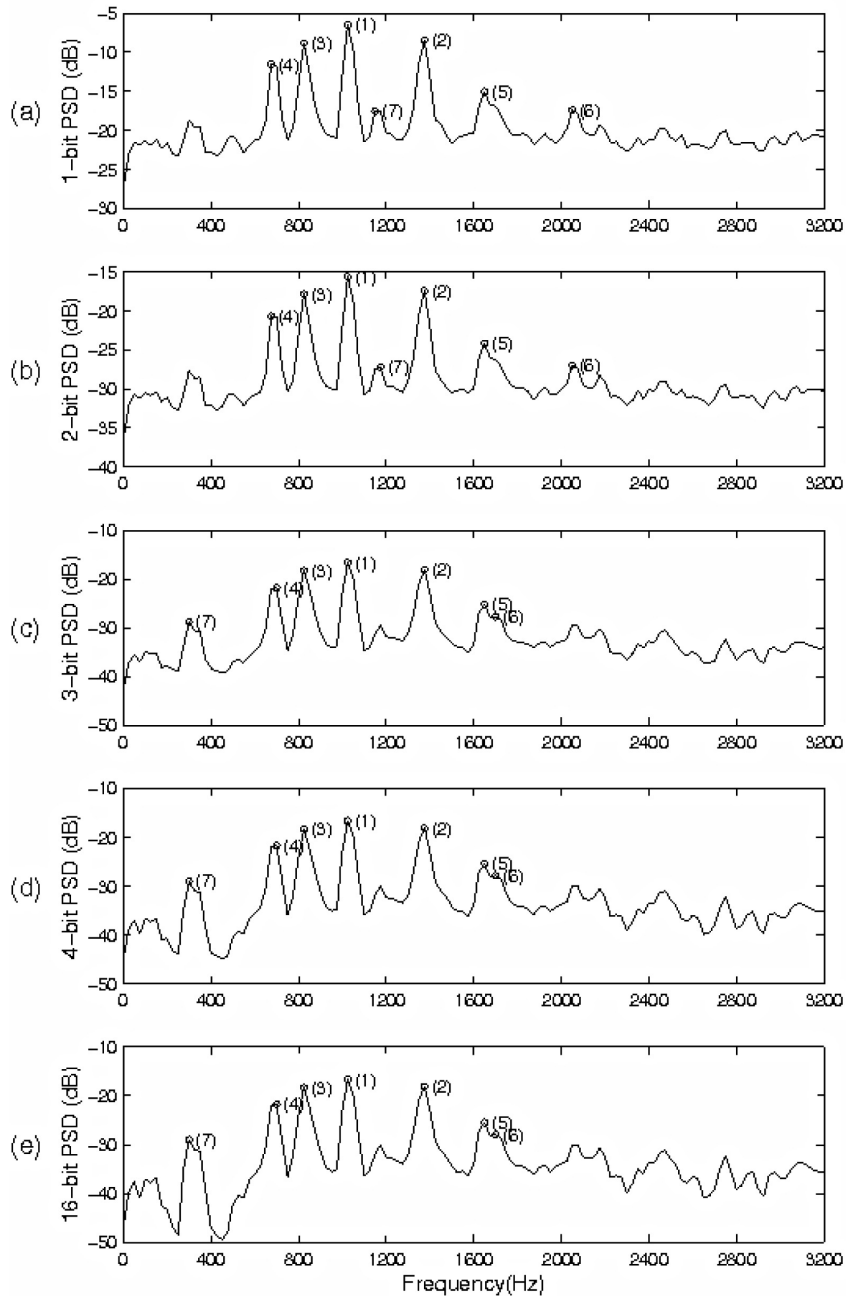


รูปที่ 2. ลักษณะของสัญญาณหลังจากเฉลี่ยแบบเข้าจังหวะบนโดเมนเวลาให้เหลือความยาวเทียบเท่า 1 รอบการหมุนของเฟลา

2.3 วิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นของแถบพลังงาน

ขั้นต่อมาเป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะที่สอดคล้องอาการบกรบร่งของเฟืองที่มีอยู่ในแต่ละสัญญาณ ใน

ขั้นตอนนี้สัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 2.1 ทุกสัญญาณจะถูกวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นของแถบพลังงาน (Power spectrum density) ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 3

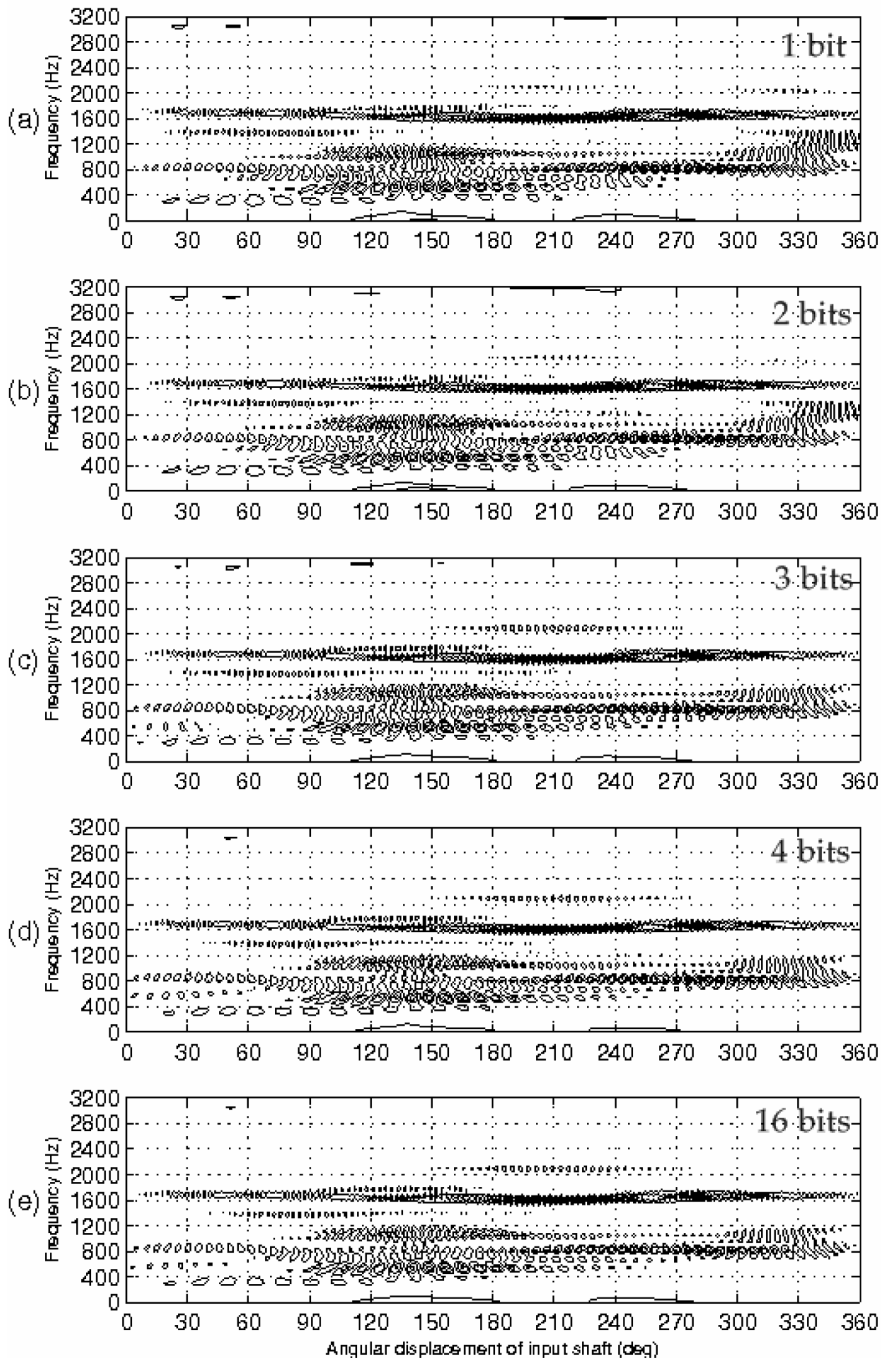


รูปที่ 3. แสดงแถบความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด 7 อันดับแรก ของสัญญาณที่ลดความละเอียดลง (a-d) เปรียบเทียบกับของสัญญาณเดิม (e)

2.4 วิเคราะห์การกระจายของความถี่

การวิเคราะห์การกระจายของความถี่ที่เกิดขึ้น
 ที่ในขณะหรือที่ตำแหน่งต่างๆ บนการหมุนของเพลานี้
 เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้ดำเนินการกับทุกสัญญาณจากนั้น

ตอนที่ 2.2 ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบว่าสัญญาณทั้งหมดแสดง
 ตำแหน่งที่ส่ออาการบกพร่องของเฟืองได้สอดคล้องกัน
 หรือไม่ เพียงใด รูปที่ 4 เป็นผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้



รูปที่ 4. การกระจายของความถี่ของแต่ละสัญญาณตลอดช่วง 1 รอบของการหมุนของเพลานี้

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการดำเนินการดังกล่าวข้างบนอาจพิจารณาผลเป็นสองประเด็นดังนี้

ประเด็นแรก ก่อนการเฉลี่ยแบบเข้าจังหวะ (รูปที่ 1) สัญญาณที่ถูกลดความละเอียดลงมากเท่าใดจะยังมีความคิดเพี้ยนและแตกต่างไปจากสัญญาณเดิมมากเท่านั้น แต่หลังจากทำการเฉลี่ย (รูปที่ 2) ความแตกต่างดังกล่าวก็ลดลงจนยากที่จะสังเกต นับเป็นผลได้จากการเฉลี่ยสัญญาณที่มีความยาวมากๆ ให้สั้นลง

ตารางที่ 1. ผลความถูกต้องของการระบุแถบความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด 7 อันดับแรกเทียบกับสัญญาณดั้งเดิม

สัญญาณ	แถบความหนาแน่นของพลังงาน						
	1	2	3	4	5	6	7
16 bits							
4 bits	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3 bits	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 bits	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
1 bit	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

กรณีที่สอง เมื่อพิจารณาจากการกระจายของความถี่ซึ่งได้ผลตามรูปที่ 4 ทุกสัญญาณล้วนแสดงลักษณะสำคัญได้เช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างลักษณะแรก เช่น ที่ความถี่ 826 และ 1652 เฮิรตซ์ (เทียบเป็นหนึ่งและสองเท่าของความถี่ของการขบของฟันเพียงในการทดขั้นที่หนึ่ง) ซึ่งเป็นความถี่ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติของเฟืองตัวเล็กบนเพลารับกำลังเข้า ที่ความถี่ทั้งสองนี้มีค่าเหนือกว่าพลังงานของการสั่นที่ความถี่อื่นตลอดเวลา ลักษณะที่สอง ทุกสัญญาณแสดงให้เห็นเช่นเดียวกันว่า พลังงานการสั่นมีการกระจายออกอย่างชัดเจนจากความถี่การขบของฟันของเฟืองไปยังความถี่ข้างเคียงเมื่อเพลามุมถึงตำแหน่ง 138° และ 318° ซึ่งอยู่ห่างกันครึ่งรอบพอดี

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงความแตกต่างของการกระจายความถี่อย่างถี่ถ้วนจะเห็นว่า ทุกสัญญาณให้แผนภาพการกระจายความถี่ทดแทนกันได้หมด

ประเด็นที่สองกล่าวเป็นสองกรณีดังนี้ กรณีแรก ผลการเปรียบเทียบโดยใช้แถบความหนาแน่นของพลังงานที่มีค่าสูงที่สุด 7 ความถี่แรกดังในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ถูกลดความละเอียดจนต่ำถึง 3 บิตยังคงรักษาอันดับของแถบพลังงานที่มีความถี่ทั้ง 7 ค่าไว้ได้ครบถ้วนเช่นกับสัญญาณเดิมที่มีความละเอียด 16 บิตทุกประการ แต่สัญญาณที่ถูกลดความละเอียดลงไปมากกว่านั้น (2 และ 1 บิต) จะไม่สามารถรักษาอันดับของแถบพลังงานที่ 6 และ 7 ไว้ได้ ดังในตารางที่ 1

4. สรุป

การศึกษาผลของการลดความละเอียดของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้สำหรับวิเคราะห์อาการผิดปกติของกล่องเฟืองทดครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า สำหรับสัญญาณที่ยาว 32,768 จุดหรือมากกว่า ความละเอียดเชิงตัวเลขของการบันทึกสัญญาณที่มักเลือกใช้อย่างน้อย 12 บิตตามศักยภาพของอุปกรณ์เก็บข้อมูลเป็นค่าที่สูงเกินความจำเป็น โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับประโยชน์ที่จะได้ ในกรณีของสัญญาณสำหรับวิเคราะห์ความผิดปกติของเฟืองจากการศึกษานี้ การลดความละเอียดลงจาก 16 บิตลงจนต่ำถึง 3 บิตไม่ทำให้สัญญาณสูญเสียคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์อาการผิดปกติของเฟืองไป การลดความละเอียดลงมากกว่านั้นทำให้สัญญาณสูญเสียคุณลักษณะพึงประสงค์ไปบ้าง แต่ก็เป็นส่วนที่มีความสำคัญน้อย หากสัญญาณที่บันทึกไว้

มีความยาวเท่ากับหรือมากกว่า 32,768 จุด และก่อนการวิเคราะห์เราได้ทำการเฉลี่ยสัญญาณแบบเข้าจังหวะบนโดเมนเวลาร่วมด้วย เราก็จะสามารถเลือกความละเอียดเชิงตัวเลขของสัญญาณต่ำถึง 2 หรือ 1 ได้อย่างมั่นใจว่าสัญญาณจะยังรักษาคุณสมบัติที่พึงประสงค์ไว้ได้ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณสมาชิกร่วมหน่วยงานทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำทั้งในการบันทึกข้อมูล การสันสะเทือนและการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณสันสะเทือน

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Mechefske CK. Machine Condition Monitoring: Part 1 – Optimum Vibration Signal Lengths. *British Journal of NDT*. 1993; 35(9): 503-7.
- (2) Staszewski WJ. Vibration Data Compression with Optimal Wavelet Coefficients. *Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Conference Publication*. 1997; 446: 186-90.
- (3) Junker H, Lukowicz P, Troster G. Sampling Frequency, Signal Resolution and the Accuracy of Wearable Context Recognition Systems. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Wearable Computers (ISWC'04)*; Oct 31-Nov 3; Shanghai, China; 2004. p. 176-7.
- (4) Max J. (1960). Quantizing for Minimum Distortion. *IRE Transaction in Information Theory*. 1960; T. IT-6: 7-12.
- (5) Mobley RK. *Root cause failure analysis*. Woburn: Butterworth-Heinemann; 1999.