

# การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอของซีฟัน

## Vibration Analysis of Worn Gears

ก่อเกียรติ บุญชูกุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยี  
การบำรุงรักษาเครื่องจักรกล  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ 10330

สมชาย เดโชธรรมสถิต  
ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุง  
บริษัท นูบูน จำกัด  
สมุทรปราการ  
10540

ปัญหาการสึกหรอในชุดเฟืองทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านลดลง ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรง ตลอดจนเกิดการแตกร้าวของฟันเฟือง ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบการทำงานโดยรวมที่รุนแรงได้ การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนถูกศึกษาเพื่อใช้ตรวจสอบการสึกหรอของชุดเฟือง

จากผลการทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่จำลองให้เฟืองมีระดับการสึกหรอของซีฟันต่างๆ กันในสภาวะที่มีภาระคงที่ เมื่อเฟืองมีการสึกหรอมากขึ้น ระดับการสั่นสะเทือนจะสูงขึ้น สเปกตรัมมีความถี่ข้างรอบๆ ความถี่การขบของฟันเฟืองและฮาร์โมนิกสูงขึ้น แต่มีแนวโน้มไม่ชัดเจน และมีแถบความถี่กว้างในช่วงความถี่สูงและมีซัพฮาร์โมนิกของ GMF ด้วย การวิเคราะห์เซปสตรัมพบว่าแกมมิตูดของยอดเซปสตรัมเพิ่มสูงขึ้นสำหรับเฟืองที่สึกหรอมากขึ้นเมื่อเทียบกับยอดเซปสตรัมของเฟืองที่ไม่สึกหรอซึ่งมีแนวโน้มลดลง

The wear problem of gear trains causes a reduction of transmission efficiency. It leads to high vibration as well as tooth damage. Gear wear was experimentally studied by vibration analysis.

Experiments were conducted with the simulated gear trains under constant load. As wear increased the vibration level also increased. Spectrum peaks of sidebands around the GMF and its harmonics shown an nondefinite increasing trend. A broadband spectrum at high frequency and subharmonics of GMF were also found. Cepstrum shown an increasing trend of gamnitude of the worn gear over the gamnitude of the normal gear which had a decreasing trend.

### 1. บทนำ

ตามปกติแล้ว เมื่อชุดเฟืองถูกใช้งานไประยะหนึ่ง ฟันเฟืองจะเกิดการสึกหรอขึ้น ปัญหาการสึกหรอในชุดเฟืองทำให้เครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนมากขึ้น และถ้ายังคงใช้งานต่อไปจนเฟืองแตกร้าวแล้ว ก็อาจสร้างความเสียหายให้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอื่นได้ ดังนั้นการตรวจสอบระดับการสึกหรอของชุดเฟืองที่ใช้งานจึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการบำรุงรักษาและการป้องกันปัญหาหยาบแรงที่อาจเกิดขึ้นได้

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการตรวจสอบสภาพการทำงานของชุดเฟือง เมื่อฟันเฟืองสึกหรอ รูปแบบสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้โดยอาจมีความสัมพันธ์กับระดับการสึกหรอ ดังนั้นการ

ทดลองถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่อยู่ในสภาพดีกับชุดเฟืองที่สึกหรอ

### 2. การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองกับปัญหาการสึกหรอ

การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองมีสาเหตุมาจากการกระตุ้นของความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต (the static transmission error) ซึ่งทำให้เกิดความไม่คงที่ในการเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพันธ์ระหว่างเฟืองคู่ที่ขบกัน ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากการโค้งตัวของฟันขณะรับภาระ และเกิดจากการเบี่ยงเบนของโปรไฟล์จากเส้นโค้งอินโวลูทที่สมบูรณ์แบบ โปรไฟล์อาจจะเบี่ยงเบนไปเพราะความคลาดเคลื่อนจากการผลิต การติดตั้ง หรือการสึกหรอของซีฟัน [1] ในทางทฤษฎีนั้นอาจจะวิเคราะห์ถึงปัญหาการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องของชุดเฟืองได้ด้วยการตรวจวัดสัญญาณการสั่น

สะเทือนที่พื้นผิวบริเวณที่ชุดเฟืองทำงานอยู่ ลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนความถี่จะประกอบไปด้วย ชุดฮาร์มอนิกของความถี่การขบของฟันเฟือง และชุดฮาร์มอนิกของความเร็วรอบของเฟืองแต่ละตัวโดยปรากฏเด่นชัดเป็นแถบความถี่ข้างรอบความถี่การขบของฟันเฟืองและฮาร์มอนิก [2]

ขณะที่ชุดเฟืองกำลังทำงาน จะเกิดการไถลกันระหว่างผิวสัมผัสของฟัน อันเป็นสาเหตุของการสึกหรอของซี่ฟัน การสึกหรอทำให้โปรไฟล์ของฟันเปลี่ยนไปและทำให้ความแข็งแรงของฟันน้อยลงด้วย ปัญหาที่ตามมาคือ ความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์สูงขึ้น และการโก่งตัวของฟันมากขึ้น การสึกหรอในชุดเฟืองจึงเป็นสาเหตุให้ระดับการสั่นสะเทือนสูงขึ้น สัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกมอดูเลตจากปัญหาการสึกหรอรุนแรงขึ้น และเกิดการหลุดจากการสัมผัสได้ง่ายขึ้น ถ้าปัญหาการหลุดจากการสัมผัสรุนแรงจะเกิดปรากฏการณ์ชั่วคราว (transient phenomena) เนื่องจากการกระแทกกันระหว่างฟันเฟือง

### 3. สเปกตรัมและเซปส์ตรัม

สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแสดงได้สามรูปแบบ คือ แสดงบนโดเมนเวลา โดเมนความถี่และโดเมนคิวเฟรนซี (quefreny) สัญญาณบนโดเมนความถี่เรียกว่าสเปกตรัม (spectrum) สัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซีเรียกว่าเซปส์ตรัม (cepstrum) [3]

การวิเคราะห์สเปกตรัมเป็นการวิเคราะห์ลักษณะเป็นคาบ (periodic) ของสัญญาณบนโดเมนเวลาโดยอาศัยหลักการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ส่วนการวิเคราะห์เซปส์ตรัมเป็นการวิเคราะห์ลักษณะเป็นคาบของสัญญาณบนโดเมนความถี่ หรืออาจเรียกเซปส์ตรัมว่าเป็นสเปกตรัมของสเปกตรัม

สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบด้วยสัญญาณหลายความถี่มารวมกัน ลักษณะสัญญาณบนโดเมนเวลาจึงดูซับซ้อนและสังเกตลักษณะเป็นคาบได้ยาก สัญญาณบนโดเมนความถี่หรือสเปกตรัมแสดงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแต่ละความถี่ สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบด้วย

- ความถี่การขบของฟันเฟืองหรือ GMF (gear mesh frequency) และฮาร์มอนิก เกิดจากการกระทบกันของซี่ฟันเฟือง  $GMF = (\text{จำนวนฟันเฟือง}) \times (\text{ความเร็วรอบเฟือง})$
- แถบความถี่ข้าง (sideband) รอบความถี่ GMF และฮาร์มอนิก โดยมีระยะห่างความถี่เท่ากับความเร็วรอบ (RPM) ของเฟืองที่มีปัญหาความคลาดเคลื่อนโปรไฟล์

สัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซีหรือเซปส์ตรัมจะแสดงลักษณะเป็นคาบของยอดสัญญาณความถี่ต่าง ๆ ในโดเมนความถี่ แถบความถี่ข้างที่มีระยะห่างความถี่เท่ากับ RPM จะแสดงเป็นยอดสัญญาณ 1/RPM บนโดเมนคิวเฟรนซี

แถบความถี่ข้างประกอบด้วยหลายยอดสัญญาณ และตามปกติแล้วความถี่ข้างจะมีขนาดแอมพลิจูดต่ำ และเนื่องจากสัญญาณอาจมี

แถบความถี่ข้างมากกว่าหนึ่งชุดซึ่งแต่ละชุดจะมีระยะห่างความถี่ต่างกััน ดังนั้นการวิเคราะห์แถบความถี่ข้างบนโดเมนความถี่จึงอาจยุ่งยากและเสียเวลามาก การวิเคราะห์แถบความถี่ข้างด้วยการอ่านค่ายอดสัญญาณ 1/RPM ในโดเมนคิวเฟรนซีจึงสะดวกและรวดเร็วกว่า

เมื่อฟันของเฟืองใดมีปัญหาการสึกหรอ ความคลาดเคลื่อนโปรไฟล์ของเฟืองนั้นจะสูงขึ้น การมอดูเลตสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยความคลาดเคลื่อนโปรไฟล์จะรุนแรงขึ้น จึงทำให้แถบความถี่ข้างซึ่งมีระยะห่างความถี่เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองที่สึกหรอนั้นมีระดับแอมพลิจูดสูงขึ้น ค่ายอดสัญญาณ 1/RPM ในโดเมนคิวเฟรนซีเป็นตัวแทนของแถบความถี่ข้าง ดังนั้นค่ายอดสัญญาณ 1/RPM จึงสัมพันธ์กับปัญหาการสึกหรอ

## 4. การทดลองและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน [4]

### 4.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองประกอบด้วย ชุดเฟือง มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า คัปปลิง (coupling) เฟลาขับ เฟลาตาม แบร์ริงลูกปืน 4 ตำแหน่ง ชุดเบรก (brake) ที่สามารถปรับแรงดึงได้ พัดลมระบายความร้อนที่ชุดเบรก ฐานของชุดทดลอง อินเวอร์เตอร์ (inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ และมีมอเตอร์วัดกระแสไฟ ระหว่างฐานของชุดทดลองกับพื้นได้เสริมยางแผ่นที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตรเพื่อให้ฐานสัมผัสกับพื้นตลอดเวลา เฟืองขับ (pinion) ทำด้วยทองเหลืองมี 26 ฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทช์ 91 มิลลิเมตร และมีความหนา 12 มิลลิเมตร ส่วนเฟืองตาม (gear) ทำจากเหล็กกล้ามี 38 ฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทช์ 133 มิลลิเมตร และมีความหนา 13 มิลลิเมตร เฟืองทั้งสองเป็นเฟืองตรง โมดูล 3.5 มิลลิเมตร แผนภาพของชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 1

อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนประกอบด้วย ตัวตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) รุ่น 4371 ซึ่งถูกจับยึดกับตำแหน่งวัดด้วยแม่เหล็ก เครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier) รุ่น 2635 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) รุ่น 2035 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณทุกอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Bruel&Kjaer ผังการต่ออุปกรณ์วัดสัญญาณแสดงในรูปที่ 2

### 4.2 การทดลอง

ชุดเฟืองทำงานด้วยการขับของมอเตอร์และรับภาระจากชุดเบรก เฟืองขับหมุนด้วยความเร็วรอบ 510-513 รอบต่อนาทีโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นระหว่างฟันเฟือง ป้อนกระแสไฟฟ้าสลับขนาดคงที่ 220 โวลต์ 1.8 แอมแปร์ให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง ขณะทำการทดลอง ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และขนาดของกระแสไฟที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ ด้วยการปรับแรงดึงของเบรกและปรับการจ่ายไฟของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณการสั่นสะเทือนถูกตรวจวัดเป็นช่วงๆ ห่างกันประมาณ 30-120 นาที ตำแหน่งที่ตรวจวัดคือแบร์ริงตัวที่ 1 2 และ 3 ในทิศแนวตั้งและแนวนอน การทดลองใช้ชุดเฟือง 2 ชุด แต่ละชุดทำงานจนฟันของเฟืองขับสึกหรอไปแล้วราว

50 เปอร์เซ็นต์<sup>1</sup> หลังจากติดตั้งชุดเฟืองเข้ากับชุดทดลองแล้ว เฟืองขับ และเฟืองตามของเฟืองชุด 1 มีระยะเยื้องเท่ากับ 0.10 และ 0.05 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับเฟืองขับและเฟืองตามของชุดเฟือง 2 มีระยะเยื้อง 0.06 และ 0.04 มิลลิเมตร ตามลำดับ

#### 4.3 การวิเคราะห์สัญญาณ

สัญญาณที่ตรวจวัดได้ถูกเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ 100 ครั้ง การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งนาน 1 วินาทีและการเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน (overlap) มากที่สุด การเฉลี่ย 100 ครั้งใช้เวลาประมาณ 10 วินาที แล้วนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์สเปกตรัมและเซปส์ตรัม การวิเคราะห์สเปกตรัมมีพิสัยของโดเมนความถี่ 800 Hz ความละเอียด (resolution) 1 Hz และใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฮานนิง (Hanning) ส่วนการวิเคราะห์เซปส์ตรัมมีพิสัยของโดเมนคิวเฟรนซี 0.5 วินาที ความละเอียด 488 ไมโครวินาที และใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฮานนิง

เนื่องจากมีข้อมูลปรากฏในสเปกตรัมและเซปส์ตรัมจำนวนมาก จึงทำการวิเคราะห์เฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ค่าสัญญาณต่างๆ ที่วิเคราะห์บนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนคิวเฟรนซี มีดังนี้

##### (1) โดเมนเวลา

- Peak คือยอดสูงสุด (peak) ของสัญญาณ
- RMS คือรากที่สองของค่ากำลังสองเฉลี่ย (root mean square) ของสัญญาณ

##### (2) โดเมนความถี่

- P คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับ ความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับซึ่งเท่ากับ 8.5 Hz
- G คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับ ความเร็วรอบหมุนของเฟืองตามซึ่งเท่ากับ 5.8 Hz
- 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่การขบของฟันเฟือง ฮาร์โมนิกอันดับที่สองและอันดับที่สามของความถี่การขบของฟันเฟือง ตามลำดับ หรือที่ความถี่ 221-222 Hz 442-444 Hz และ 663-666 Hz ตามลำดับ ขึ้นกับความเร็วยรอบของเพลลาขับที่ตรวจวัดได้จริง
- SBD-P คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองขับ
- SBD-G คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองตาม

##### (3) โดเมนคิวเฟรนซี

- 1/P คือ ค่าแกมมาของยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซีเท่ากับ  $1/(ความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับ)$  ซึ่งเท่ากับ 117.0-117.6 มิลลิวินาที ขึ้นกับความเร็วยรอบของเพลลาขับที่ตรวจวัดได้จริง

- 1/G คือ ค่าแกมมาของยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซีเท่ากับ  $1/(ความเร็วรอบหมุนของเฟืองตาม)$  ซึ่งเท่ากับ 170.9-172.0 มิลลิวินาที ขึ้นกับความเร็วยรอบของเพลลาขับที่ตรวจวัดได้จริง

#### 5. ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งเป็นสองชุดคือ ผลการทดลองของชุดเฟือง 1 และผลการทดลองของชุดเฟือง 2 ผลการทดลองแต่ละชุดประกอบด้วยสองส่วนคือ ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน และลักษณะสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือน ก่อนและหลังทำการทดลองได้ฉายโปรไฟล์ของฟันเฟืองทั้งเฟืองขับและเฟืองตามด้วยเครื่องฉายโปรไฟล์ (profile projector) ซึ่งมีอัตราขยาย 20 เท่าเพื่อตรวจดูการสึกหรอของฟันเฟือง

ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณแสดงด้วยกราฟซึ่งมีแกนตั้งเป็นค่าสัญญาณบนสเกลลอการิทึมและแกนนอนเป็นระยะเวลาทำงานของชุดเฟือง กราฟแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณเมื่อระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณแต่ละจุดในกราฟได้จากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้หนึ่งสัญญาณ โดยแต่ละสัญญาณตรวจวัดห่างกันประมาณ 30-120 นาที การเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณใช้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดครั้งแรกเป็นค่าสัญญาณอ้างอิง การตรวจวัดสัญญาณครั้งแรกกระทำหลังจากที่ชุดเฟืองทำงานไปแล้วราวครึ่งชั่วโมง สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ครั้งแรกถือว่าเป็นการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในสภาพปกติได้ การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณบนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ 6 dB เทียบได้กับ 2 เท่า และให้การเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด (sudden change) คือการเปลี่ยนแปลงที่ค่าสัญญาณสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณในช่วงอื่นๆ ของกราฟ

เนื่องจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณที่ตรวจวัดจากแบร์ริง 1 แบร์ริง 2 และแบร์ริง 3 มีลักษณะสอดคล้องกัน ผลการทดลองจึงแสดงเฉพาะผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณ และลักษณะสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดจากแบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง

รูปที่ 3 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณของชุดเฟือง 1 และชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงานซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง รูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง และรูปที่ 5 แสดงสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง สัญญาณในรูปที่ 4 และ 5 ดังกล่าวแสดงตัวอย่างสัญญาณเป็นช่วงๆ มีระยะเวลาทำงานห่างกันประมาณ 300-500 นาที

#### 6. อภิปรายผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง ชุดเฟืองทั้งสองชุดทำงานไปแล้วราว 2250 นาที จากผลการฉายโปรไฟล์ของฟันเฟืองด้วยเครื่องฉายโปรไฟล์ที่มีอัตราขยาย 20 เท่า พบว่า ซี่ฟันของเฟืองขับของชุดเฟือง 1 สึกหรอไปแล้วประมาณ 43% ซี่ฟันของชุดเฟือง 2 สึกหรอไปแล้วประมาณ 48% แต่สำหรับซี่ฟันของเฟืองตามของชุดเฟืองทั้งสองชุด ไม่พบว่า

<sup>1</sup> เปอร์เซ็นต์การสึกหรอคิดจากระยะสันฟันตามส่วนโค้งแอดเดนดัมที่หายไปต่อระยะสันฟันปกติ

