

# การเปรียบเทียบเทคนิคประมวลสัญญาณ เพื่อตรวจจับความเสียหายในชุดเฟืองเฉียง\*

เศรษฐพงษ์ ฮามคำไพ<sup>1)</sup> สุจินต์ บุรีรัตน์<sup>2)</sup> และ นวภัค เอื้ออันธ์<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> กองบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า, โรงไฟฟ้าพลังน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย  
อำเภออุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น 40250

<sup>2)</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น  
40002

<sup>3)</sup> ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น  
40002

Email : Seattthapong.H@egat.or.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการใช้เทคนิควิธีการประมวลสัญญาณสำหรับตรวจจับความเสียหายภายในชุดเฟืองเฉียงโดยทำการสร้างชุดเฟืองเฉียงเพื่อทำการทดลอง ในระดับความเสียหายสามระดับ และวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตอบสนองในแต่ละระดับ โดยใช้เทคนิควิธีการประมวลสัญญาณสามวิธีการ คือ วิธีการสเปกตรัม, วิธีการเซมส์ปตรัม และวิธีการเวฟเลต เพื่อตรวจจับความเสียหายภายในชุดเฟืองจากการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือน จากนั้นเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งกล่าว ในแต่ละวิธีการ เพื่อแสดงถึงข้อดีและข้อเสีย พบว่าผลการวิเคราะห์ทั้งสามวิธีกรรมมีแนวโน้มเหมือนกัน กล่าวคือที่ระดับความเสียหายของฟันเฟืองเกินกว่า 50 % ความหนาของฟัน จะมีขนาดแอมพลิจูด, แกมมาจุด และแมกนิจูด ลดลง เมื่อวิเคราะห์ลึกลงไปในรายละเอียดพบว่า วิธีการสเปกตรัม ยังเป็นวิธีการที่สะดวกต่อการใช้งานและเป็นที่น่าสนใจแพร่หลาย หากแต่มีข้อจำกัด ก็คือมีความเหมาะสมกับการใช้วิเคราะห์สัญญาณคงตัวที่เท่านั้น นอกจากนี้อุปกรณ์เครื่องมือวัดสัญญาณสั่นสะเทือนในปัจจุบันสามารถวิเคราะห์ออกมาในรูปของสเปกตรัมได้โดยง่าย ส่วนวิธีการเซมส์ปตรัม เป็นการเก็บรายละเอียดของวิธีการสเปกตรัมเพื่อแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น เหมาะสำหรับการวัดที่ความเร็วรอบสูงและภาวะเกิดขึ้นมาก หากแต่เนื่องจากการทดลองนี้มีทอร์คน้อยจึงยากแก่การวิเคราะห์พิจารณา แต่ก็ยังสามารถแสดงถึงแกมมาจุดที่แตกต่างได้ สำหรับวิธีการแปลงเวฟเลตนั้นสามารถใช้ในการวิเคราะห์สภาพการเสียหายของชุดเฟืองในระดับต่างๆ ได้ดี รวมทั้งสามารถบ่งบอกตำแหน่งที่เสียหายของชุดเฟืองเฉียงได้อีกด้วย การที่จะวิเคราะห์เวฟเลตเพื่อบ่งบอกตำแหน่งเสียหายนั้นจะต้องใช้งานร่วมกับวิธีการที่บันทึกเวลาตำแหน่งรอบการวัด เช่น วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเวลาเฉลี่ยเข้าจังหวะ (Time Synchronous average analysis, TSA.) แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความสมบูรณ์ถูกต้องครบถ้วน การใช้การวิเคราะห์ทั้งสามวิธีกรรมรวมกันจะสามารถวิเคราะห์ข้อเสียหายได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

**คำสำคัญ :** เวฟเลต, ความเสียหายของเฟือง, เฟืองเฉียง, เทคนิคการประมวลสัญญาณ

\* รับผิดชอบเมื่อวันที่ 25 กันยายน 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2549

# Comparison of Signal Processing Techniques for Fault Detection in Helical Spur Gears \*

Setthapong Hamcumpai<sup>1)</sup> Sujin Bureerat<sup>2)</sup> and Nawapak Eua-Anant<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Maintenance Section ,North-Eastern Hydro Power Plant , Electricity Generating Authority of Thailand, Ubonratana DAM ,Khon Kaen , 40250 ,Thailand

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering ,Faculty of Engineering , Khon Kaen University , Khon Kaen , 40002 , Thailand

<sup>3)</sup> Department of Computer Engineering ,Faculty of Engineering , Khon Kaen University , Khon Kaen , 40002 , Thailand

Email : Seattapong.H@egat.or.th

## ABSTRACT

The paper presents the use of signal processing techniques for fault detection in helical spur gears. The test rig of helical spur gear mesh is set up. Three levels of gear teeth damage are simulated and vibration response of each damage level is measured. Three signal processing techniques, including spectral, cepstrum and wavelet analyses are used to detect gear fault from vibration signals analysis. The analysis results obtained from the various techniques are compared. The advantages and disadvantages of the techniques are discussed. The experimental result reveals that the amplitude, gamnitude and magnitude from the analysis are decreased at damage level more than 50% thickness. The result suggests that the spectrum technique is suitable to use for stationary signal only. However this technique is still used widely because it is capable with present tools. The cepstrum technique can be used to extend the detail of spectrum technique. It is also suitable for high speed and high load situations. Wavelet analysis in considering the best technique as it can not only detect the fault of gear teeth accurately but also indicate the damage position.

**Keywords** : Wavelet ,Gear Fault ,Helical Spur Gaers , Signal processing techniques.

---

\* Original manucrypt submitted: September 25, 2005 and Final manucrypt received: November 2, 2006

## บทนำ

วิธีการตรวจสอบวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักรกลมีหลายวิธีการเพื่อบ่งบอกถึงสภาพการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องจักร อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพของเครื่องจักร เช่น การตรวจวัดอุณหภูมิ , ความดัน , สภาพสารหล่อลื่นและการวัดค่าการสั่นสะเทือน ซึ่งวิธีการวัดค่าการสั่นสะเทือนจะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร เนื่องจากวิธีการนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำสูง ดังนั้นในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร เมื่อทราบถึงค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของระบบเฟืองส่งกำลัง จึงเป็นตัวแปรบ่งชี้แนวโน้มการชำรุดเสียหายเสื่อมสภาพของเครื่องจักรและยังสามารถกำหนดช่วงเวลาในการตรวจสอบซ่อมบำรุงที่เหมาะสมได้ (Jing Lin , Ming J. Zuo, Ken R. Fyfe,2004) การวัดค่าการสั่นสะเทือนส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะกระทำโดยใช้หัวตรวจวัดทรานส์ดิวเซอร์ (Transducer) อ่านค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน แล้วเก็บข้อมูลในรูปของโดเมนเวลา (Time Domain) จากนั้นทำการแปลงรูปของโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยผ่านขบวนการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งโดยส่วนมากนิยมใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ซึ่งโดเมนความถี่นี้จะบ่งบอกถึงอาการผิดปกติต่างๆ ของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นบนความถี่ที่แตกต่างกัน หากแต่วิธีการแปลงฟูเรียร์นั้นมีความเหมาะสมกับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เป็นสัญญาณคงตัว (Stationary Signal) เท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในความสามารถเปลี่ยนความละเอียด (Resolution) และในสภาพความเป็นจริงสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นสัญญาณไม่คงตัว (Non – Stationary Signal) หรือ สัญญาณคงตัวเป็นช่วง (Quasi - Stationary Signal) ทำให้การแปลงฟูเรียร์ไม่เหมาะสมนัก การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น (Short-Time Fourier Transform) ในระดับความละเอียดของการวิเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ ดังนั้น การตรวจวิเคราะห์สภาพเครื่องจักรกล จากการวัดค่าสั่นสะเทือนโดยใช้การแปลงเวฟเลตจึงน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ในรูปแบบต่างๆ

การศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟืองพบว่าผลของสัญญาณโดเมนเวลา ค่า Peak ของสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระดับการสึกหรอของฟันเฟืองเพิ่มขึ้น ผลของสัญญาณสเปกตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ 1GMF 2GMF และ 3GMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสึกหรอเพิ่มขึ้น ผลของสัญญาณเชปส์ตรัม ค่าแกมมาจุดที่ความเร็วรอบ (1/P) มีค่าสูงขึ้น จนถึงเมื่อระดับการสึกหรอประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของความหนาฟันเฟือง จากนั้นค่าแกมมาจุดจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อค่าการสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงค่าการสึกหรอสูงสุดที่ทดลอง (กมลวรรณ พงศาพิชญ์ , 2544)

การศึกษาวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเชปส์ตรัม โดยทำการทดลองวิเคราะห์สัญญาณจากชุดทดลองซึ่งจำลองให้ชุดเฟืองมีการสึกหรอของซี่ฟันเฟืองและมีการเยื้องศูนย์ของเฟืองในระดับต่างๆกัน พบว่าเมื่อการสั่นสะเทือนมีระดับสูงขึ้น สเปกตรัมจะมีแถบความถี่ข้างที่สูงขึ้นพร้อมกับมีสัญญาณแถบความถี่กว้าง และมีซบฮาร์โมนิกของ GMF เพิ่มขึ้น (สมชาย เตโชธรรมสถิต ,2540)

การศึกษาเกี่ยวกับปฏิบัติการ เพื่อตรวจสอบความผิดปกติภายในชุดเฟือง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อให้ทราบถึงเทคนิควิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการตรวจจับและวินิจฉัยรอยแตกร้าว (Crack) ภายในชุดเฟืองที่มีสาเหตุมาจากการล้าตัว (Fatigue) ของฟันเฟือง พบว่าวิธีการแปลงเวฟเลต ดูเหมือนว่า จะเป็นวิธีการที่สามารถตรวจหาข้อบกพร่องรอยแตกร้าวได้ดี (G. Dalpiaz, A. Rivola and R. Rubini ,2000)

การแปลงเวฟเลตโอโทกอนอล(Orthogonal wavelet transform) เพื่อตรวจหาการเกิดความผิดปกติช่วงเริ่มต้น (Transience) บนชุดเฟืองที่เริ่มจะชำรุด โดยพิจารณาจากสัญญาณสั่นสะเทือนบนฝาครอบชุดเฟือง เวฟเลตโอโทกอนอลเป็นขบวนการวิธีการที่รวดเร็วและกระจายสัญญาณไปบนอนุกรมเวฟเลตได้จำนวนต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงแบบนอนเวฟเลตโอโทกอนอล (Non-orthogonal wavelet transform) สำหรับชุดข้อมูลเดียวกัน จะยังไม่เพียงพอสำหรับในระบบ 3 มิติ เนื่องจากจำกัดด้วยสเกล (W. J. Wang and P. D. McFadden ,1995)

การตรวจวินิจฉัยข้อบกพร่องของเฟืองด้วยวิธีการใหม่ ด้วยวิธีการเวฟเลตต่อเนื่อง (Continuous wavelet transform ) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถให้รายละเอียดของสเกลมากกว่าวิธีการเวฟเลตอโทกอนอล ซึ่งสามารถแยกข้อมูลข้อบกพร่องเสียหายทางกลของเฟืองได้ดี (H. Zheng, Z. Li and X. Chen ,2002)

สำหรับบทความนี้ เป็นปฏิบัติการเพื่อศึกษาวิธีการตรวจสอบความผิดปกติภายในชุดเฟือง โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และเพื่อให้ทราบถึงเทคนิควิธีการประมวลสัญญาณในการตรวจจับข้อบกพร่องเสียหายภายในชุดเฟืองที่มีสาเหตุการชำรุดมาจากการแตกบิ่น (Crushing) ของฟันเฟืองเฉียง ในการประเมินความไวของเทคนิควิธีการจะพิจารณาจากความรุนแรงของข้อบกพร่องความเสียหายตามแนวเส้นสัมผัส (Contact Line) ของฟันเฟือง ที่แตกต่างกันสามระดับ ห่างกันช่วงละ 3 มิลลิเมตรและความหนาเสียหายไปเป็น 20 ,30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของฟันเฟืองตามลำดับ และจากผลการทดลองจะเห็นว่าสัญญาณสเปกตรัมที่ได้ในระดับความเสียหายต่างๆ จะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามระดับความเสียหายและลดลงเมื่อเกิดเสียหายสูงสุด (เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาฟันเฟือง) และวิธีการเซปส์ตรัมจะสามารถวิเคราะห์ข้อบกพร่องของชุดเฟือง โดยจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามระดับความเสียหายและลดลงเมื่อเสียหายสูงสุดได้ชัดเจน และสามารถประมาณระยะห่างของแถบความถี่ข้างเคียงบนช่วงความกว้างของความถี่ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะใช้ตรวจวินิจฉัยข้อบกพร่องของชุดเฟือง ส่วนใหญ่เทคนิควิธีการสมัยใหม่ในการวินิจฉัยชุดเฟืองจะใช้พื้นฐานจากการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือนที่วัดได้จากฝาครอบของชุดเฟือง ซึ่งสามารถแสดงถึงชนิดการเสียหายรวมถึงการเติบโตของข้อบกพร่องเพื่อสามารถกะประมาณเวลาที่จะวางแผนทำการบำรุงรักษา ต่อไป

## ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณสั่นสะเทือน ของเฟืองเฉียง

### 2.1 สมการการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองเฉียง

ดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่า ความยาวหน้าสัมผัสของเฟืองเฉียงที่ขบกันแต่ละคู่ ซึ่งจะเริ่มขบกันตั้งแต่จุด S ไปตามแนวเส้นจนถึงจุด E ในการจำลองการสั่นสะเทือนของฟันเฟืองเฉียงที่ส่งถ่ายกำลังนั้น จะต้องพิจารณาจากเส้นส่งถ่ายแรงจากเฟืองตัวขับไปยังเฟืองตัวตาม และสามารถพิจารณาระบบเป็น

แบบหนึ่งดีกรีอิสระ (Single degree of freedom) โดยแสดงฟันเฟืองเป็นรูปเสมือนสปริง และตัวเฟืองเป็นมวล ตามรูปที่ 2 และในการขบกันของฟันเฟืองแต่ละคู่จะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันไประหว่างเฟืองขับและเฟืองตาม จึงสามารถพิจารณาระบบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเสียรูปยืดหยุ่น (Elastic deformation) ของฟันเฟืองแต่ละคู่ แสดงได้ ดังสมการดังนี้

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + K(t, \delta)\delta = W + F(t, \delta) \quad (1)$$

ซึ่งค่า  $W$  สามารถหาได้จากสมการที่ (4) และค่า  $K(t, \delta)$  สามารถหาได้จากสมการที่ (6) ค่า  $K_b(x, \xi)$  (K. Umezawa.,1972) และค่า  $K_c(x, \xi)$  (K. Umezawa , and T. SuZuki. 1973)

$$\int K_b(x, \xi, Y)P(\xi)d\xi + \int K_c(x, \xi, Y)P(\xi)d\xi = \delta_0 - e(x, Y) \quad (2)$$

$$W_j = \int P(\xi)d\xi \quad (3)$$

$$W = \sum_{j=1}^n W_j \quad (4)$$

$$K_j = \frac{dW_j}{d\delta} \quad (5)$$

$$K(t, \delta) = \sum_{j=1}^n K_j \quad (6)$$

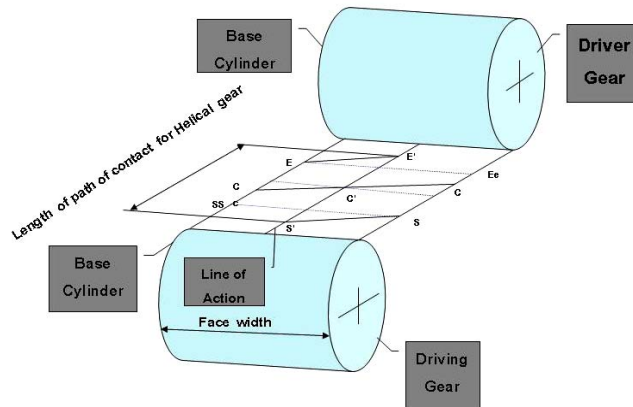
โดยที่	$\delta$	คือ ระยะขจัดตามแนวแรง
	$M$	คือ มวลความเฉื่อยของเฟือง
	$D$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง
	$K(t, \delta)$	คือ ค่าความกระต้างของระบบเฟือง (Mesh stiffness)
	$K_b(x, \xi)$	คือ ค่าฟังก์ชันการแอนตัวของฟันเฟือง
	$K_c(x, \xi)$	คือ ค่าฟังก์ชันการเปลี่ยนรูปร่างตามแนวสัมผัส
	$P(\xi)$	คือ การกระจายของแรงตามแนวสัมผัส
	$W_j$	คือ ระยะแอนของฟันเฟือง
	$W$	คือ ภาระสถิตที่เฟืองส่งถ่ายกำลัง
	$F(t, \delta)$	คือ แรงที่เกิดจากการเสียรูปของฟันเฟือง (Exciting force caused by profile modification or errors), $e(t, \delta)$

## 2.2 ความถี่ GMF

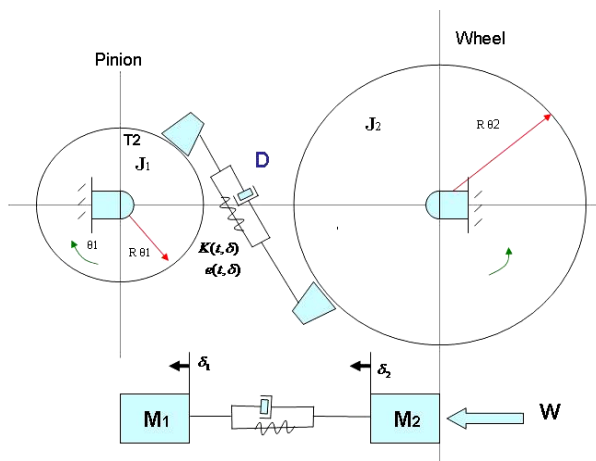
ความถี่ GMF (Gear Meshing Frequency) คือ ความถี่ที่ฟันเฟืองขบกัน นับว่าเป็นความถี่พื้นฐานของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองคำนวณได้ตามสมการ (7)

$$GMF = N_1 \times \frac{RPM_1}{60} = N_2 \times \frac{RPM_2}{60} \quad (7)$$

โดยที่  $N_1$  คือ จำนวนฟันเฟืองขับ และ  $N_2$  คือ จำนวนฟันเฟืองตาม  
 $RPM_1$  คือ ความเร็วรอบเฟืองขับ และ  $RPM_2$  คือ ความเร็วรอบเฟืองตาม  
 สัญญาณการสัมผัสจะแสดงอยู่บนโดเมนเวลามีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลา  
 มีอีกแนวทางหนึ่งซึ่งสัญญาณการสัมผัสถูกแสดงบนโดเมนความถี่ โดยมีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและ  
 แกนนอนเป็นความถี่ ฟูเรียร์พบว่าสัญญาณเป็นคาบ (Periodic signal) ที่ซับซ้อนทุกชนิด สามารถที่จะ  
 แยกออกเป็นอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ในรูปของคลื่นไซน์ได้ โดยคลื่นไซน์แต่ละคลื่นมีแอมพลิจูด  
 และความถี่ต่างกัน



รูปที่ 1. แสดงเส้นสัมผัสการขบของเฟืองเฉียง



รูปที่ 2. แสดงฟันเฟืองเป็นรูปเสมือนสปริง และตัวเฟืองเป็นมวล

### 2.3 การแปลงแบบฟูเรียร์

สำหรับการสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้นจะสังเกตเห็นว่าแรงที่มากกระตุ้นจะอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก แต่ในความเป็นจริงแรงที่มากกระตุ้นเกิดมาจากหลายสาเหตุต่าง ๆ กัน และรูปแบบของแรงอาจไม่ใช่แบบฮาร์มอนิก แต่อาจเป็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบ (Periodic Motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่มีรูปแบบเหมือนกันในแต่ละคาบ แต่ไม่ใช่รูปของคลื่นไซน์

รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบนี้ จะสามารถแยกเขียนออกมาเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ กันได้ โดยการใช้วิธีของฟูเรียร์ ถ้าให้  $f(t)$  เป็นการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบ ที่มีคาบเท่ากับ  $\tau$  จะสามารถเขียน  $f(t)$  เป็นสมการฟูเรียร์ ได้ดังนี้

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-j\omega t} dt \quad : \quad f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

โดยที่  $e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t)$

### 2.4 วิธีเซปส์ตรัม

เซปส์ตรัม (Cepstrum) เป็นการวิเคราะห์ความถี่ของการวิเคราะห์ความถี่ (Frequency analysis) หรือสเปกตรัม (Spectrum) อีกชั้นหนึ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจจับภาวะเป็นคาบในสเปกตรัม เช่น ชุดฮาร์มอนิก (Harmonics family) ชุดแถบความถี่ข้าง (Sidebands family) หรือจากผลของการเกิดเสียงสะท้อน (Echoes) เป็นต้น เซปส์ตรัมมีหลายรูปแบบหากแต่หลักการสำคัญจะมีลักษณะคล้ายๆกัน ก็คือเป็นสเปกตรัมของสเปกตรัมเชิงลอการิทึม (A spectrum of a logarithmic spectrum) เซปส์ตรัมเป็นเทคนิควิธีการประมวลผลสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear)

ได้มีการแนะนำวิธีการเซปส์ตรัมมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ.1963 เพื่อช่วยวิเคราะห์เสียงสะท้อน และช่วยหาความลึกของไฮโปเซนเตอร์ (Hypocenter) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหว เซปส์ตรัมแบบแรกนี้ถูกนิยามและได้พัฒนาจนกระทั่งต่อมาได้มีการนิยามเซปส์ตรัมอีกแบบหนึ่ง โดยใช้ชื่อว่า เพาเวอร์เซปส์ตรัม (Power Cepstrum) (B.P.Bogert ,et al .,1963)

$$C(\tau) = F^{-1} \{ \log F_{xx}(f) \} \quad (9)$$

คำว่า เซปส์ตรัม มาจากการสลับที่อักษรภาษาอังกฤษของคำว่า สเปกตรัม เหตุผลในการใช้ลักษณะการสลับอักษรก็เพราะว่า เซปส์ตรัมของสเปกตรัม นั่นเอง (กมลวรรณ พงศาพิชญ์ ,2544)

### 2.5 วิธีการเวฟเลต

การแปลงเวฟเลตเป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณ ซึ่งมีประโยชน์ในงานทางด้านประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ทฤษฎีเวฟเลตนำมาประยุกต์ใช้ในหลายงานทางวิทยาศาสตร์ เช่น การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ งานด้านวิศวกรรม งานด้านการแพทย์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณ  $f(t)$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (10)$$

ผลการแปลงฟูเรียร์  $F(\omega)$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ สัญญาณต้นแบบ  $f(t)$  สามารถสร้างได้จากผลรวมของผลคูณของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์กับฟังก์ชันคลื่นที่มีความถี่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์นั้น ในส่วนของการแปลงเวฟเลตต่อเนื่อง มีความซับซ้อนขึ้นมาอีกซึ่งเขียนได้ดังนี้

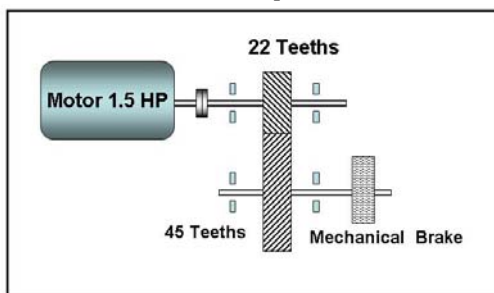
$$C(\text{scale}, \text{position}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(\text{scale}, \text{position}, t) dt \quad (11)$$

เมื่อ  $\psi$  คือฟังก์ชันเวฟเลต และ  $C$  คือค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลต สัญญาณต้นแบบสามารถสร้างได้จากผลรวมของผลคูณสัมประสิทธิ์เวฟเลตกับค่าฟังก์ชันเวฟเลต ณ ค่าสเกล (Scale) และค่าการเลื่อน (Shift) ที่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ รายละเอียดสามารถพิจารณาจาก เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 12

## การทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยเฟืองเดี่ยว 1 คู่ (เฟืองขับ 22 ฟันและเฟืองตาม 45 ฟัน) ประกอบเป็นชุดเฟืองขับ (Gear Box) ส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า (Single Phase Induction Motor) ขนาด ½ แรงม้า 1450 รอบต่อนาที โดยมีหม้อแปลงควบคุมความดันไฟฟ้าให้คงที่ 220 โวลต์ (Volt.) เพื่อส่งกำลังจากเพลลาขับ ผ่าน เฟืองขับ และเฟืองตาม ถึงเพลลาส่งกำลัง ซึ่งประกอบอยู่กับกลไกระบบเบรก (Mechanical Brake) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงชุดเฟืองเดี่ยวที่ทดลอง และเครื่องมือวัด

การประกอบติดตั้งชุดเฟืองจะต้องตรวจสอบว่าเฟืองขบกันเต็มหน้ามีการตั้งศูนย์เพลลาระหว่างมอเตอร์และชุดเฟือง ค่าเยื้องศูนย์แตกต่างกันไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเดินเครื่องและวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์โดยแอมป์มิเตอร์ ขณะไม่มีภาระ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบเพลลาขับ จากนั้นปรับสลักเกลียว เพื่อเพิ่มภาระที่เพลลาส่งกำลังผ่านเฟืองตามจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าขณะมีภาระ สำหรับการวัดและบันทึกจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ วัดสัญญาณสั่นสะเทือนบนชุดเฟืองโดยสภาพพื้นเฟืองสมบูรณ์ดีและสภาพพื้นเฟืองเสียหายที่เป็นลักษณะการ



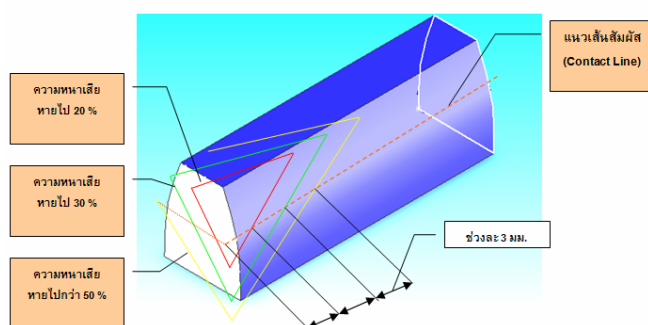
เสียหายแบบการบิ่น (Crushing) และเกิดขึ้นที่ฟันเฟืองตามแนวเส้นสัมผัส (Contact Line) ของฟันเฟือง มีแตกต่างกันสามระดับห่างช่วงละ 3 มิลลิเมตร และเสียหายไป 20 ,30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาฟันเฟือง การจำลองความเสียหายลักษณะนี้ เนื่องจากว่าเฟืองเฉียงมีการใช้งานอย่างกว้างขวางและเฟืองเฉียงจะส่งผ่านแรงต่อเนื่องเป็นจุดตามแนวเส้นสัมผัสซึ่งเป็นคุณสมบัติข้อดีของเฟืองเฉียงที่ใช้ช่วยลดการสั่นสะเทือนของระบบส่งกำลัง การส่งผ่านแรงเป็นจุดนี้จะทำให้เกิดการแตกบิ่นได้ง่าย เมื่อเริ่มแตกบิ่นเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจขยายวงกว้างขึ้น จากผิวที่ซบเซ็ง และจะเป็นการยากที่จะตรวจจับความเสียหายช่วงเริ่มต้น วัตถุประสงค์สันสะท้อนออกมาในรูปโดเมนเวลา และนำข้อมูลโดเมนเวลามาวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ ,เซปัสตรัม และเวฟเลต อีกครั้งหนึ่ง

### 3.2 การวัดข้อมูล

วัดข้อมูลโดยใช้เครื่อง OLTALION 1.5 Lite (PONTFCHNIK รุ่น System2) ดังรูปที่ 3 วัดบนชุดเฟือง ซึ่งวัดข้อมูลของความเร่งโดยตัวตรวจจับความเร่งบนโดเมนเวลา จำนวน 1024 จุดตามแนวรัศมีและตามแนวแกนเพลลาและใช้ช่วงการวัด (Sampling Interval) เท่ากับ 0.05 มิลลิวินาที ดังนั้น อัตราการวัด (Sampling Rate,Fs) เท่ากับ 20,000 ครั้งต่อวินาที และคาบของการวัดเท่ากับ 51.2 มิลลิวินาที สำหรับ 1GMF เท่ากับ 531.67 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นการเพียงพอในการเก็บข้อมูลมากกว่า 2GMF และ 3GMF โดยมีความถี่ 0 – 10000 เฮิร์ตซ์ จากข้อมูลการวัดและควบคุมซึ่งจะมีภาระเฉลี่ยอยู่ที่ 272.8 วัตต์. โดยการทดลองจะควบคุมความต่างศักย์ของระบบคงที่ 220 โวลต์ และปรับกลไกระบบเบรกให้กระแสดังมากที่สุด

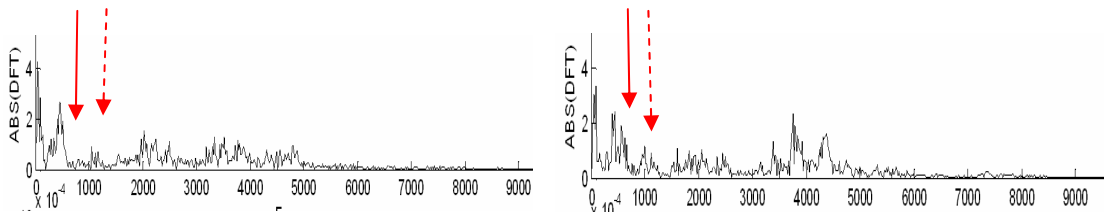
### ผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือไม่มีการเสียหายและมีความเสียหาย ตามแนวเส้นสัมผัสของฟันเฟืองที่แตกต่างกันสามระดับห่างช่วงละ 3 มิลลิเมตร ความหนาเสียหายไป 20 ,30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของฟันเฟือง โดยมีค่าความไม่แน่นอน(Uncertainty)ความเร็วรอบ เท่ากับ  $\pm 0.725$  และเมื่อได้ข้อมูลรายละเอียดเบื้องต้นจึงนำมาคำนวณหา 1GMF ,2GMF ,3GMF สำหรับสเปคตรัม และ 1/P ,2/P ของเซปัสตรัม



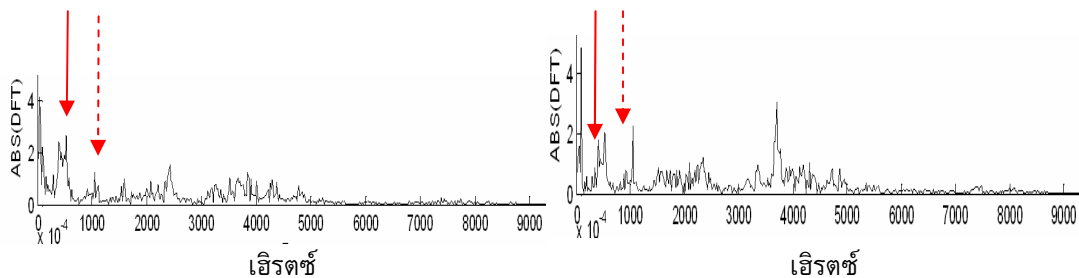
รูปที่ 4 แสดงการเสียหายของฟันเฟือง

นำข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ไม่เสียหายและเกิดการเสียหายที่ระดับต่างๆ ของโดเมนความถี่มาเขียนกราฟและคำนวณหาสเปกตรัมตามรูปแสดงที่ 5 ดังต่อไปนี้



ก. ชุดเฟืองที่ไม่มีการเสียหาย

ข. ชุดเฟืองที่มีการเสียหาย ระดับที่ 1



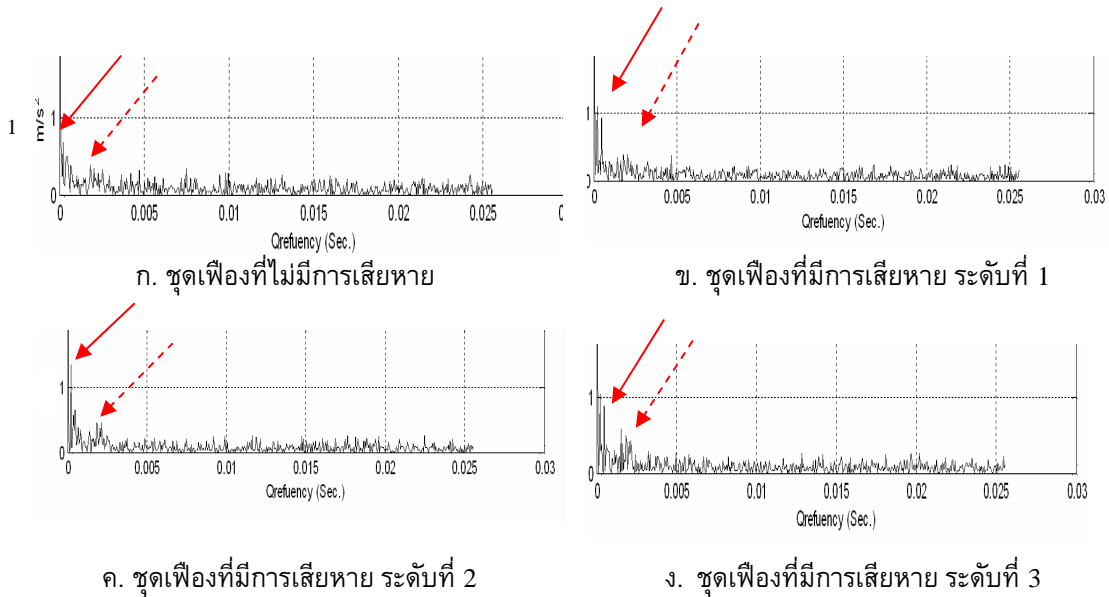
ค. ชุดเฟืองที่มีการเสียหาย ระดับที่ 2

ง. ชุดเฟืองที่มีการเสียหาย ระดับที่ 3

รูปที่ 5 แสดงสเปกตรัมที่คำนวณจากสัญญาณที่สภาวะการณต่างๆ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า รูปที่ 5 ซึ่งเป็นรูปบนโดเมนความถี่หรือสเปกตรัม เมื่อพิจารณา รูปที่ 5 ก. ที่ประมาณ 1GMF ตามลูกศรเส้นทึบและ 2GMF ตามลูกศรเส้นประ เมื่อพิจารณาที่ 1GMF จะมีแอมพลิจูดที่ต่ำ  $0.3 \mu\text{ms}^{-2}$  เนื่องจากไม่มีความเสียหาย ในขณะที่เมื่อความเสียหายของฟันเฟืองในระดับที่ 1 และ 2 จะมีแอมพลิจูด  $2.5 \mu\text{ms}^{-2}$  และ  $3 \mu\text{ms}^{-2}$  สูงขึ้นตามระดับความเสียหายที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 5 ข และ ค. ตามลำดับ ทั้งยังเกิดขึ้นบริเวณแถบความถี่ข้างเนื่องจากการจำลอง การชำรุดของฟันเฟืองเพียงเฟืองชุดเดียว ในขณะที่ระดับ 3 ความเสียหายประมาณเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาฟันเฟืองดังรูปที่ 5 ง. จะมีค่าแอมพลิจูดลดลงที่ 1GMF คือ  $2 \mu\text{ms}^{-2}$  ซึ่งอธิบายได้ว่าเนื่องจากผิวสัมผัสของฟันเฟืองเมื่อมีระยะห่างมากขึ้น (กมลวรรณ พงศาพิชญ์, 2544) จนถึงค่าหนึ่งจะเกิดช่องว่างระยะฟันผิวสัมผัสจึงไม่สัมผัสกัน และทำให้แอมพลิจูดลดลง หากแต่ที่ 2GMF จะมีค่าแอมพลิจูดสูงขึ้น

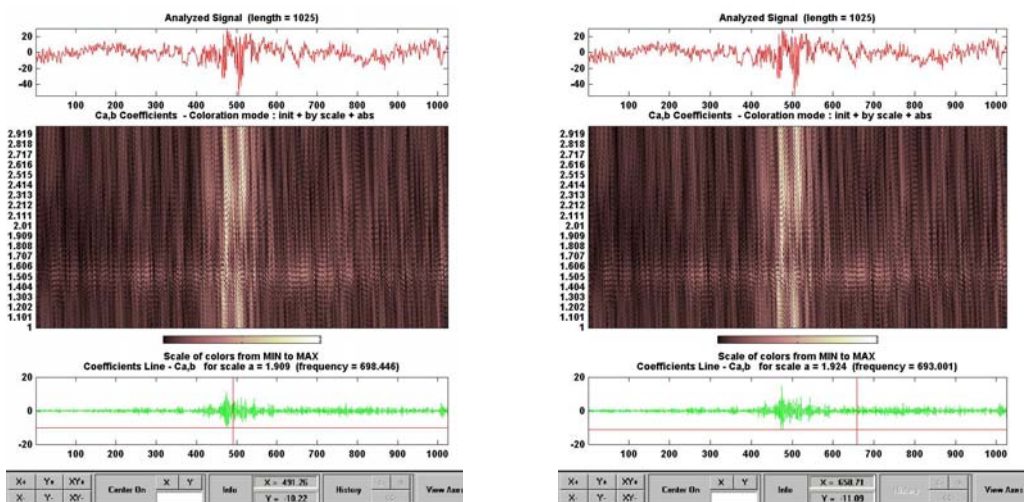
นำข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ไม่เสียหายและเกิดการเสียหายระดับต่างๆ บนของ “คิวเฟรนซ์” มีหน่วยเป็นเวลา วินาที (Second) หรือส่วนกลับของความถี่ (1/Hz) มาเขียนกราฟในรูป และคำนวณเซปัสตรัมตามรูปแสดงที่ 6 ดังต่อไปนี้

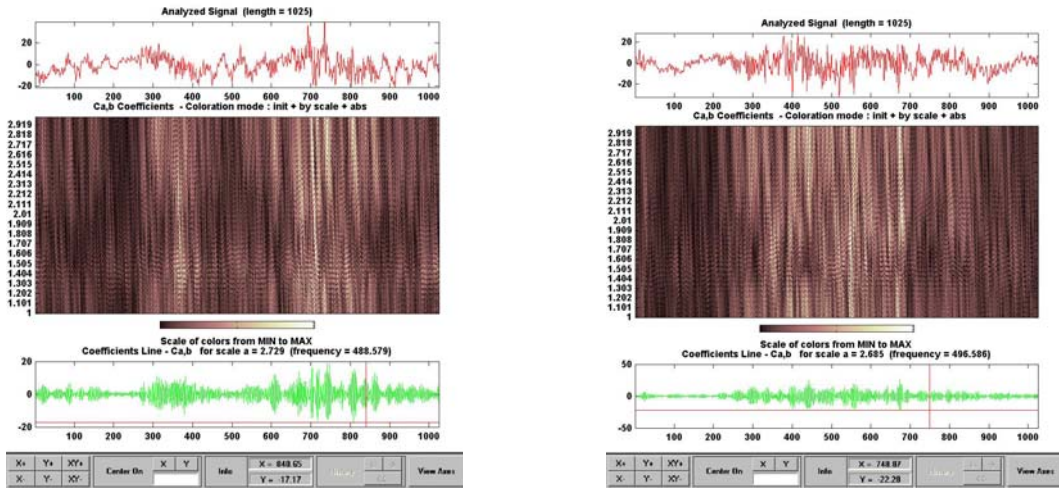


รูปที่ 6 แสดงแกมมิจุดของเซปัสตรีมที่คำนวณจากสัญญาณที่สภาคการณ์ต่างๆ

ในขณะที่ รูปที่ 6 ซึ่งเป็นเซปัสตรีมสามารถแสดงแกมมิจุด สังเกตเห็นได้เช่นกันที่บริเวณ 1/2GMF หรือ 0.001 วินาที และ 1/GMF หรือ 0.002 วินาที ซึ่งจะมีค่าแกมมิจุดที่สูงขึ้นตามความเสียหายคือ ที่ 1/2GMF มีค่าแกมมิจุด 0.6, 1.1, 1.3, 1.0 dB. และที่ 1/GMF มีค่าแกมมิจุด 0.3, 0.3, 0.5, 0.5 dB. หากแต่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างยากเนื่องจากภาวะและทอร์กที่ใช้ส่งผ่านค่อนข้างน้อย

นำข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ไม่เสียหายและเกิดการเสียหายระดับต่างๆ มาพิจารณาในรูปการแปลงเวฟเลตต่อเนื่อง ที่ 1GMF คาบ 0.05 มิลลิวินาที โดยเลือกใช้ Wavelet Family แบบ Daubechies 20 (db 20) (Michel Misiti, et al. 2002.) ตามรูปแสดงที่ 7 ดังต่อไปนี้





ค. ชุดเฟื่องที่มีการเสียหาย ระดับที่ 2  
รูปที่ 7 แสดงแมคนิจูดของเวฟเลตที่คำนวณจากสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ

ง. ชุดเฟื่องที่มีการเสียหาย ระดับที่ 3

การแปลงเวฟเลตนั้น สามารถแบ่งสเกลได้โดยง่ายซึ่งเป็นการแบ่งชั้นความถี่ที่สนใจออกเป็นสเกลต่าง ๆ สำหรับรูปที่ 7 ก. เป็นการทดลองชุดเฟื่องที่ไม่มีความเสียหายสามารถอธิบายได้ว่าที่สเกลระดับต่ำประมาณ 1.909 ซึ่งมีความถี่ประมาณ 698.45 เฮิร์ตซ์ ที่แถบความถี่ข้างใกล้ 1GMF และที่ช่วง Samples ที่ 470 และ 480 นั้น ลักษณะแถบสีขาวมีความสว่างชัดเจนบ่งบอกถึงค่าแมคนิจูดของความถี่มีค่าสูงระดับหนึ่งคือ 11.16 ซึ่งเป็นผลจากความถี่ปกติของชุดเฟื่องที่จะเกิดขึ้นที่ 1GMF สำหรับรูปที่ 7 ข. ซึ่งเป็นการทดลองชุดเฟื่องที่มีความเสียหายระดับที่ 1 สามารถอธิบายได้ว่าที่สเกลระดับต่ำประมาณ 1.909 ซึ่งมีความถี่ประมาณ 693.00 เฮิร์ตซ์ ที่แถบความถี่ข้างใกล้ 1GMF และที่ช่วง Samples ที่ 470 และ 480 เช่นกัน ลักษณะแถบสีขาวมีความสว่างชัดเจนบ่งบอกถึงค่าแมคนิจูดของความถี่มีค่าสูงขึ้นคือ 14.40 ซึ่งเป็นผลจากความถี่ปกติของชุดเฟื่องที่จะเกิดขึ้นที่ 1GMF เพิ่มมากขึ้น ลักษณะเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 7 ข. จนถึงรูปที่ 7 ง. ที่ 1GMF เมื่อระดับการเสียหายของชุดเฟื่องสูงขึ้น ค่าสัมบูรณ์แมคนิจูดเวฟเลตก็จะสูงขึ้นเท่ากับ 17.17 ,18.35 ตามลำดับความเสียหายไปด้วย ในกรณีที่ไม่สามารถพิจารณาที่จุดสเกลเดิมนั้นเนื่องจากว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่บริเวณนี้จะสูงมากขึ้นกว่าบริเวณอื่นๆ ที่ใกล้เคียง ซึ่งเป็นตรงตามทฤษฎีในการพิจารณาความเสียหายของฟันเฟื่องที่ต้องพิจารณาแถบความถี่ข้างที่ใกล้เคียงด้วย ส่วนหนึ่งเป็นผลจากการวัดความเร็วที่ไม่สามารถจับความเร็วที่แน่นอนได้เนื่องจากจำกัดด้วยเครื่องมือวัด ผลแสดงสเกลที่บ่งบอกถึงระยะเวลาตำแหน่งที่เสียหายสามารถบอกได้ชัดเจนว่าวิธีการแปลงเวฟเลตนี้สามารถบอกตำแหน่งการเสียหายได้ หากมีการบันทึกช่วงเวลาโดยการจับสัญญาณพัลส์ (Pulse) หรือใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเวลาเฉลี่ยเข้าจังหวะ (Time Synchronous average analysis, TSA.) เมื่อระดับการเสียหายเพิ่มระดับมากขึ้น การแปลงเวฟเลตจะสามารถมองเห็นแมคนิจูดของสัมประสิทธิ์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อ GMF สูงขึ้นแมคนิจูดโดยเฉลี่ยจะลดลง ที่ระดับความเสียหายเดียวกัน

ที่สเกลสูงนั้น อาจสรุปได้ว่าเป็นผลกระทบจากการเสียสมดุลของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นหรือการเยื้องศูนย์ของเพลลา หรือการหลุดหลวมที่จะเกิดขึ้นที่บริเวณความถี่ต่ำๆ ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมว่า Synchronous ที่จะแสดงผลที่ nCPM หรือ Sub- Synchronous แสดงผลที่ nCPM โดยที่  $n < 1$

### สรุปผลการทดลอง

วิธีการประมวลสัญญาณสันสะเทือนที่ได้จากการวัดสัญญาณจากฝาคอบชุดเฟืองภายนอกสำหรับตรวจจับความเสียหายชุดเฟืองเฉียงภายใน เทคนิควิธีการประมวลสัญญาณสามวิธีการ คือ วิธีการสเปกตรัม ,วิธีการเซมส์ปตรัม และวิธีการแปลงเวฟเลตนั้น สำหรับวิธีการสเปกตรัมยังเป็นที่สะดวกต่อการใช้งานและเป็นที่น่าสนใจหลาย หากแต่มีข้อจำกัดที่เหมาะสมกับการใช้กับสัญญาณคงตัวที่เกิดขึ้นและวิธีการเซมส์ปตรัม เป็นการเก็บรายละเอียดของวิธีการสเปกตรัมเพื่อแสดงให้เห็นยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งสองวิธีการก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งข้อชำรุดของฟันเฟืองได้ชัดเจน แต่สำหรับวิธีการเวฟเลตนั้น เนื่องจากสัญญาณการชำรุดของฟันเฟืองเฉียงเป็นลักษณะสัญญาณไม่คงตัว การใช้วิธีการแปลงเวฟเลตเพื่อตรวจวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนนั้นสามารถใช้วิเคราะห์ได้ดี พิจารณาช่วงสเกลได้ตามต้องการ โดยเฉพาะหากใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเวลาเฉลี่ยเข้าจังหวะ จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการอธิบายถึงตำแหน่งการชำรุดของฟันเฟืองเฉียงได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ร่วมกันทั้งสามวิธีการก็จะยิ่งทำให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- กมลวรรณ พงศาพิชญ์. 2544. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสันสะเทือนและระดับการสึกหรอของวิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร.
- สมชาย เตโชธรรมสถิต. 2540. การศึกษาการวิเคราะห์การสันสะเทือนของชุดเฟืองด้วยเซปส์ตรัมและสเปกตรัม วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร.
- เศรษฐพงษ์ ฮามคำไพ, สุจินต์ บุรีรัตน์. 2549. การเปรียบเทียบเทคนิคประมวลสัญญาณ เพื่อตรวจจับความเสียหายในชุดเฟืองเฉียง การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 25-26 มกราคม 2549
- A. Djebala, *et al.* 2006. **Detecting mechanical failures inducing periodical shocks by wavelet multiresolution analysis. Application to rolling bearings faults diagnosis** ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2006. Nr.2(58)
- B. P. Bogert, M. J. R. Healy, and J. W. Tukey. 1963 **The Quefrency Alanysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudoautocovariance, Cross-Cepstrum, and Saphe Cracking**, Poceedings of the Symposium on Time Series Analysis ,John Wiley and Sons, NY, p.209-243.

- Erik Olsson, Peter Funk, Ning Xiong.2004. **Fault Diagnosis in Industry Using Sensor Readings and Case-Based Reasoning** Journal of Intelligent & Fuzzy System Vol. 15 P.41-46
- G. Dalpiaz, A. Rivola and R. Rubini.2000 **Effectiveness and Sensitivity of Vibration Processing Techniques for Local Fault Detection in Gears.** Mechanical Systems and Signal Processing 14(3), 387-412
- H. Zheng, Z. Li and X. Chen.2002. **Gear Fault Diagnosis Based on Continuous Wavelet Transform** Mechanical Systems and Signal Processing 16(2-3), 447-457
- Jing Lin , Ming J. Zuo, Ken R. Fyfe .2004. **Mechanical Fault Detection Based on the Wavelet De-Noising Technique** Transactions of the ASME Vol. 126,
- K. Umezawa. 1972. **Deflection and Moment due to a concentrated Load on a Lack-Shaped Cantilever Plate with Finite Width for Gear** *Bull. JSME, Vol.15, pp.116 , No.79 ,.*
- K. Umezawa , and T. SuZuki. 1973. **Deflection due to a contact between Gear teeth with Finite Width** *Bull. JSME, Vol.16, pp.1085 , No.97 ,*
- Michel Misiti, et al. 2002. **Wavelet Toolbox User s Guide.** U.S.A : The MathWorks, Inc. ; 2002
- P. D. McFadden. 2000. **Detection of Gear Faults by Decomposition of Matched Differences of Vibration Signals** Mechanical Systems and Signal Processing 14(5), 805-817
- Q .Wilson. Wang, Fathyismail , M. Farid Golnaraghi. 2001. **Assessment of Gear damage Monitoring Techniques using Vibration Measurement** Mechanical Systems and Signal Processing 15(5), 905-922
- R.B RANDALL., HEE J. 1981 **Cepstrum analysis.** *Brel & Kjr Technical Review,* No. 3, 3-40. 7.
- W. J. WANG and P. D. McFadden.1995 **Application of Orthogonal Wavelets to Early Gear Damage Detection** *Mechanical Systems and Signal Processing* 9(5) p.497-507.