รายการอ้างอิง

1. J.I.Taylor. The Gear Analysis Handbook : A Practical Guide for Solving Vibration Problem in Gear. 1st ed. New York: VCI, 2000.
2. McConnell, K. G. Vibration Testing : Theory and Practice. New York: John Wiley & Sons, 1995.
3. Brüel & Kjær. Technical documentation : Multichannel analysis system type 3550 vol.1 guide tours. , 1993.
4. Wowk, V. Machinery Vibration : Measurement and Analysis. New York: McGraw-Hill, 1991.
5. Collacott, R. A. Vibration Monitoring and Diagnosis : Techniques for Cost-Effective Plant Maintenance. 1st ed. London: George Godwin, 1979.
6. I.G. Detra Rear Axle Gear Tooth Surface Failure Society of Automotive Engineers, INC., January, 1962
7. Dalpiaz, G., Rivola, A., and Rubini, R. Gear Fault Monitoring: Comparison of Vibration Analysis Techniques. Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques. Proceedings of the 3rd International (13-15/10/1998),: 623-637.
8. M.J.Brennan, M.H.Chen and A.G.Reynolds. Use of Vibration Measurements to Detect Local Tooth Defects in Gear. Sound and Vibration (Nov/1997).
9. S.Aatola. and R.Leskinen. Cepstrum Analysis Predicts Gearbox Failure. Noise Control Engineering Journal 34 (March-April 1990) : 53-59.
10. McFadden, P. D. Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of The Meshing Vibration. ASME Journal of Vibration 108 (April 1986) : 165-170.
11. R.A.Thompson and Bjorn Weichbrodt. Gear Diagnostics and Wear Detection. ASME Pudlication. Paper 69-VIBR-10 (1969).
12. สุรศักดิ์ คกมิ. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกร้าวบนเฟือง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

13. กมลวรรณ พงศาพิชญ์. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

14. สมชาย เดโชธรรมสถิต. การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเซปส์ตรัม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

15. Salido, J. M. F. Design of a diagnosis system for rotating machinery using fuzzy pattern matching and genetic algorithms. Master's Thesis, Graduate Program in System's Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1998.

บรรณานุกรม

1. ก่อเกียรติ บุญชูกุศล สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน : การเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.
2. Goldman, S. Spectrum analysis : A practical approach. 2nd ed. New York, NY: M Industrial Press, 1999.
3. Dimarogonas, A. D. and Haddad, S. Vibration for engineers. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
4. J.A.Pennell. Application Factors. B.G.A. State of The Art Survey No. 004, July 1989.
5. Broch, J. T. Mechanical vibration and shock measurements. 2nd ed. Naerum: Brüel & Kjær, 1984.
6. R.B.Randall and J.Hee Cepstrum Analysis Brüel & Kjær Technical Review, No.3, 1981:3-40
7. McFadden, P. D. Detecting the location of a fatigue crack in a gear from the phase of the change in the vibration. Mechanical Systems and Signal Processing 2 (1988) : 403-409.
8. McFadden, P. D. and Smith, J. D. A signal processing technique for detecting local defects in a gear from the signal average of the vibration. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineerings 199 (1985) : 287-292.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การแปลงแบบฟูริเยร์ (Fourier Transform)

ฟูริเยร์ได้เสนอว่าสัญญาณบนโดเมนเวลาใดๆ ที่มีลักษณะเป็นคาบโดยมีคาบเท่ากับ T สามารถเขียนแทนได้ในรูปของอนุกรมของฟังก์ชันโคไซน์และฟังก์ชันไซน์ เรียกอนุกรมนี้ว่า อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) เขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\frac{2\pi nt}{T} + b_n \sin\frac{2\pi nt}{T}\right) \qquad (ก\text{-}1)$$

เรียกสัมประสิทธิ์ a_n และ b_n ว่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ (Fourier Coefficients)

โดยที่

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cdot dt$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cdot \cos(n\omega t)\cdot dt \qquad \text{โดยที่ } \omega = \frac{2\pi}{T} \qquad (ก\text{-}2)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cdot \sin(n\omega t)\cdot dt$$

เรียกความถี่ ω นี้ว่า ความถี่รากฐาน (Fundamental Frequency) พจน์อื่น ๆ ของฟังก์ชัน x(t) ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่นี้เรียกว่า ฮาร์มอนิก (Harmonic) อันดับที่ n เมื่อนำแอมพลิจูดมาแสดงบนโดเมนความถี่จะได้เส้นตรงในแนวดิ่งที่แต่ละความถี่ของฮาร์มอนิก

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์โดยเครื่องวิเคราะห์ทำด้วยวิธีการทางตัวเลข โดยการสุ่มตัวอย่างข้อมูลด้วยจำนวนจุดข้อมูล N จุด ในช่วงคาบเวลา T แล้วแทนที่การอินทิเกรตด้วยการรวมข้อมูล และแทน dt ด้วยระยะห่างระหว่างแต่ละจุดข้อมูล $\Delta t = T/N$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ ก-2 ใหม่ได้ดังนี้

$$a_0 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} x(t_i)$$

$$a_n = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} x(t_i)\cdot \cos\frac{2n\pi t_i}{T} \qquad (ก\text{-}3)$$

$$b_n = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} x(t_i)\cdot \sin\frac{2n\pi t_i}{T}$$

อนุกรมฟูริเยร์สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลได้เนื่องจาก

$$\cos\omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \quad \text{และ} \quad \sin\omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \qquad (ก\text{-}4)$$

เมื่อนำสมการ ก-4 แทนลงในสมการ ก-1 จะสามารถเขียนฟังก์ชัน x(t) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n\left(e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}\right) - jb_n\left(e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}\right)\right] \\ &= \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\left(a_n - jb_n\right)e^{jn\omega t} + \left(a_n + jb_n\right)e^{-jn\omega t}\right] \qquad (ก\text{-}5) \end{aligned}$$

ถ้าให้นิยามสัญลักษณ์ใหม่ดังนี้

$$X_0 = \frac{a_0}{2}\ ,\ X_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n)\ ,\ X_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n) \qquad (ก\text{-}6)$$

โดยที่ $n = 1, 2, 3, \ldots$

เมื่อ X_{-n} เป็นคอนจูเกตเชิงซ้อน (Complex Conjugate) ของ X_n สมการ ก-1 สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n \cdot e^{jn\omega t} \qquad (ก\text{-}7)$$

เรียก X_n ว่า สเปกตรัมของฟูริเยร์ (Fourier Spectrum) และสามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการ ก-2 และ ก-6 ดังนี้

$$\begin{aligned} X_n &= \frac{1}{2}(a_n - jb_n) = \frac{1}{T}\left[\int_0^T x(t)\cdot\cos(n\omega t)\cdot dt - j\int_0^T x(t)\cdot\sin(n\omega t)\cdot dt\right] \\ &= \frac{1}{T}\int_0^T x(t)\cdot[\cos(n\omega t) - j\sin(n\omega t)]\cdot dt \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{T}\int_{0}^{T} x(t)\cdot e^{-jn\omega t}dt \quad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (ก\text{-}8)$$

สมการ ก-7 และ ก-8 สามารถนำไปใช้กับสัญญาณแบบคาบได้ แต่ก็ยังสามารถขยายผลการใช้สมการ ก-7 และ ก-8 ไปยังกรณีทั่วๆ ไปได้ โดยให้ $T\rightarrow\infty$ ซึ่งจะทำให้ระยะห่าง 1/T ระหว่างแต่ละฮาร์มอนิกเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจะได้สเปกตรัม X กลายเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีความถี่ $f = \omega/2\pi$ ซึ่งจะทำให้สมการ ก-8 และ ก-7 กลายเป็น

$$X^*(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t)\cdot e^{-j2\pi ft}dt \qquad (ก\text{-}9)$$

$$x^*(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X^*(f)\cdot e^{j2\pi ft}df \qquad (ก\text{-}10)$$

โดยที่ $X^*(f) = \lim_{T\rightarrow\infty} T\cdot X_n$ และ $x^*(t) = \lim_{T\rightarrow\infty} \frac{1}{T}x(t)$

เครื่องหมายดอกจันทร์ในสมการ ก-9 และ ก-10 สามารถละทิ้งได้ เรียกสมการ ก-9 นี้ว่า การแปลงไปข้างหน้าแบบฟูริเยร์ (Forward Fourier Transform) ในขณะที่เรียกสมการ ก-10 ว่าการแปลงกลับแบบฟูริเยร์ (Inverse Fourier Transform) จะเห็นได้ว่าทั้งสองสมการเกือบจะสมมาตรกัน แตกต่างเพียงเครื่องหมายของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลเท่านั้น สิ่งที่สำคัญสำหรับความเป็นสมมาตรก็คือเมื่อแปลงสัญญาณในทิศทางหนึ่งจะถูกแปลงด้วยอีกทิศทางหนึ่งเสมอ การแปลงฟูริเยร์แบบอินทิกรัลดังสมการที่ ก-9 และ ก-10

การแปลงฟูริเยร์แบบอินทิกรัลจะต้องเก็บสัญญาณในช่วงอนันต์ ซึ่งการใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลขไม่มีทางทำได้จึงแทนช่วงระยะเวลาอนันต์ด้วยช่วงเวลา (-T/2 , T/2) โดยสมมติให้ฟังก์ชันมีลักษณะซ้ำเดิมในช่วงเวลาที่อยู่นอกช่วงคาบเวลานี้ทั้ง 2 ด้าน สัญญาณบนโดเมนเวลาสามารถแสดงได้ด้วยอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน การแปลงแบบฟูริเยร์ของฟังก์ชันนี้ทำให้ได้สเปกตรัมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Frequency Spectrum) ที่มีจำนวนฮาร์มอนิกของความถี่ f ไม่จำกัดจำนวน

สมการที่ ก-9 และ ก-10 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่สุ่มตัวอย่างทุก ๆ ช่วงเวลา Δt หรือมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล $f_s = 1/\Delta t$ ได้ดังในสมการที่ ก-11 และ ก-12

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t_n)\cdot e^{-j2\pi ft_n} \qquad (ก\text{-}11)$$

$$x(t_n) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} X(f) \cdot e^{j2\pi f t_n} df \qquad (ก\text{-}12)$$

เมื่อ $t_n = n \cdot \Delta t$ คือ เวลา ณ การสุ่มตัวอย่างข้อมูลครั้งที่ n

ถ้าในอนุกรมเวลามีการตัดให้เหลือพจน์น้อยลงและทำให้เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง ฟังก์ชันความถี่จะถูกตัดพจน์ให้น้อยลงด้วยเช่นกัน ทำให้ได้ฟังก์ชันการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform , DFT) ดังสมการต่อไปนี้

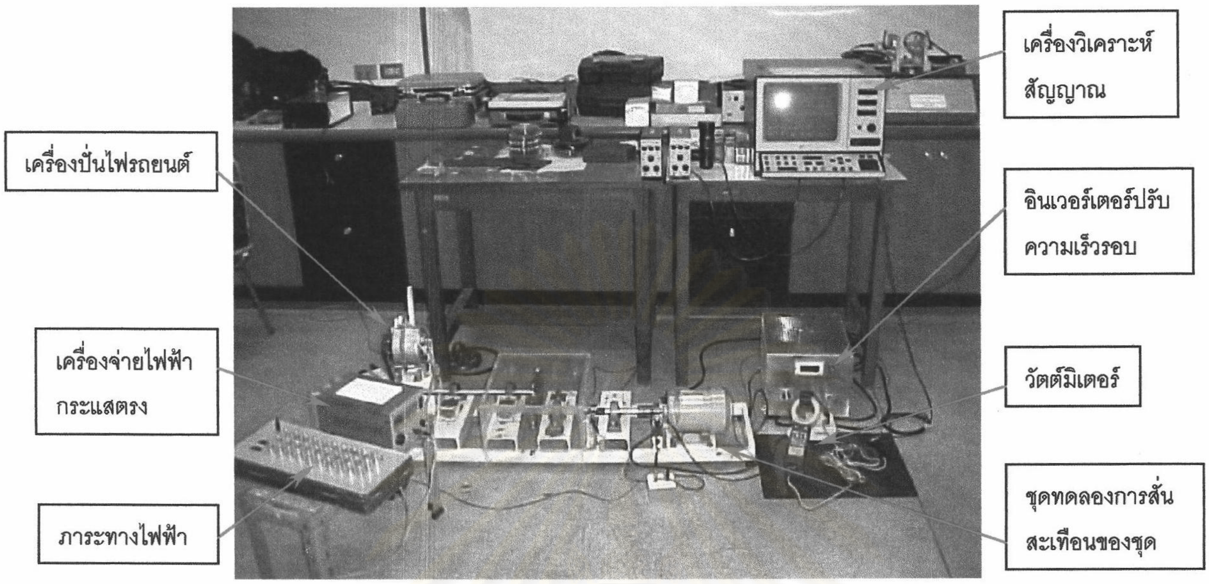
$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j(2\pi kn/N)} \qquad (ก\text{-}13)$$

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j(2\pi kn/N)} \qquad (ก\text{-}14)$$

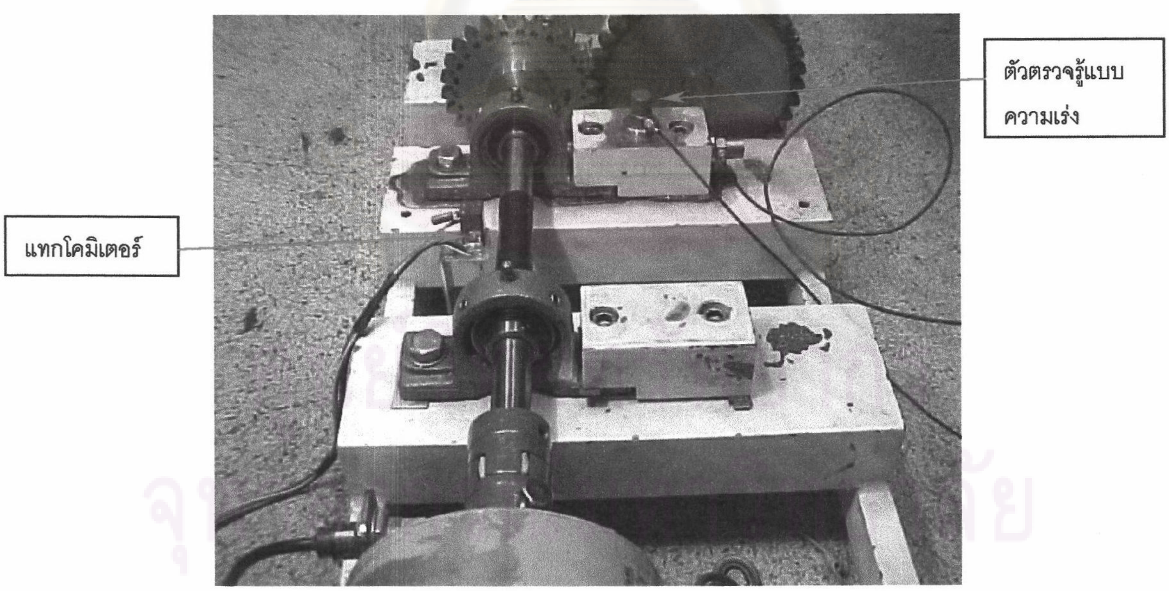
ฟังก์ชัน DFT ในสมการที่ ก-13 และ ก-14 ฟังก์ชัน DFT นี้เหมาะที่จะนำไปใช้กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบดิจิตอล เนื่องจากการหาค่าสเปกตรัมของฟูริเยร์ X_n ทั้ง N จุดจากตัวอย่างข้อมูลที่สุ่มมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลา N จุด จะต้องมีการคูณเชิงซ้อนถึง N^2 ครั้ง จึงมีการเสนอการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform , FFT) ซึ่งจะให้ผลเหมือนกันกับสมการที่ ก-13 แต่จะทำการคูณเชิงซ้อนเพียง $N \cdot \log_2 N$ ครั้ง เช่น กรณีมีจำนวนจุดข้อมูลเวลา N=1,024 จุด ถ้าใช้การแปลงแบบ DFT จะต้องทำการคูณเชิงซ้อน 1,048,576 ครั้ง ในขณะที่การแปลงแบบ FFT จะเหลือเพียง 10,240 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแปลงแบบ FFT สามารถทำได้เร็วกว่า DFT มากกว่า 100 เท่าตัว

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ ข-1 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

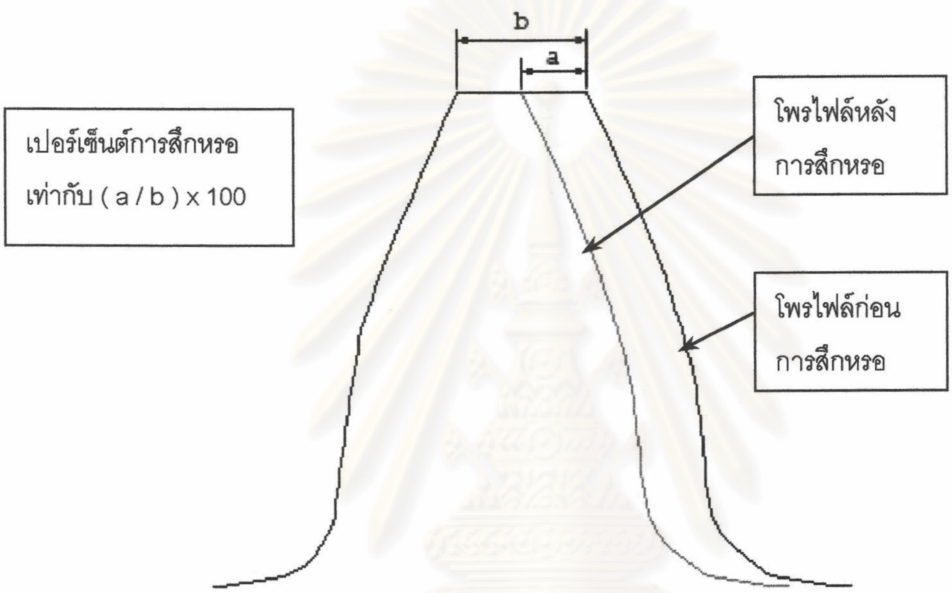


รูปที่ ข-2 ภาพถ่ายการติดตั้งตัวตรวจรู้แบบความเร่งและแทกโคมิเตอร์

ภาคผนวก ค

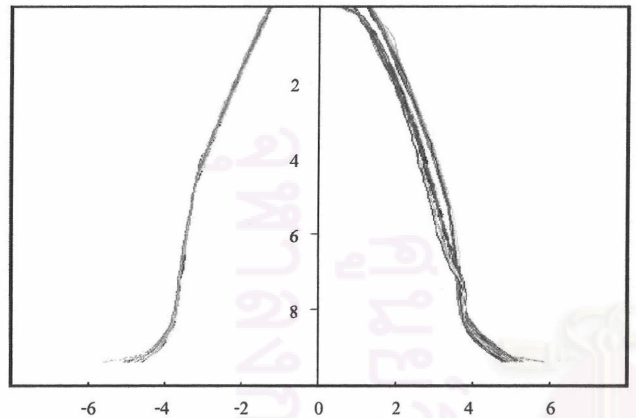
การสึกหรอของฟันเฟือง

การคำนวณระยะสึกหรอที่ปลายฟันคำนวณจากระยะปลายฟันที่สึกหรอต่อระยะที่ปลายฟันปกติ แสดงดังรูปที่ ค-1

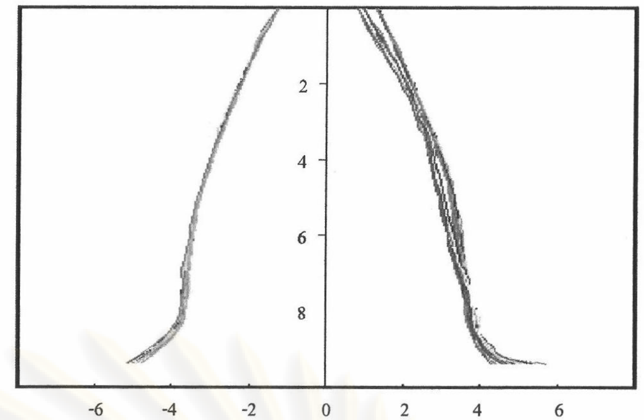


รูปที่ ค-1 การคำนวณการสึกหรอที่ปลายฟัน

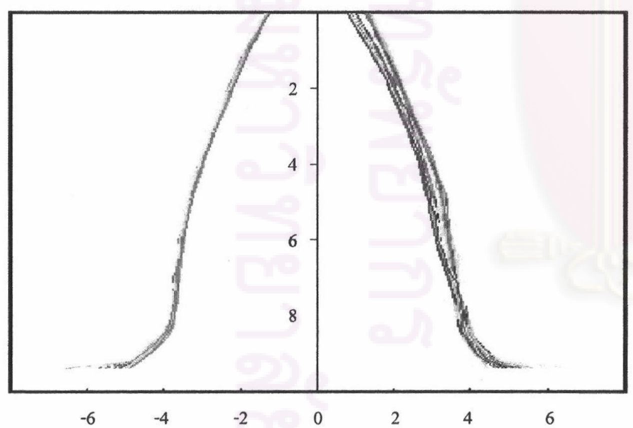
การกระจายตัวของการสึกหรอในแต่ละฟันของเฟืองขับเมื่อฟันเฟืองมีการสึกหรอจะมากขึ้นตามระดับสึกหรอโดยการกระจายตัวของโพรไฟล์แสดงดังรูปที่ ค-2 ซึ่งพล๊อตระหว่างฟันเฟืองที่ไม่มีการสึกหรอกับฟันเฟืองที่มีการสึกหรอไปแล้วที่ระดับต่างๆ ทั้ง 26 ฟัน



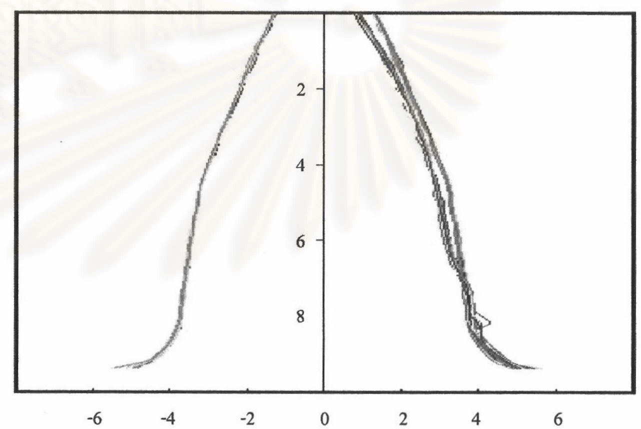
การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W



การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W

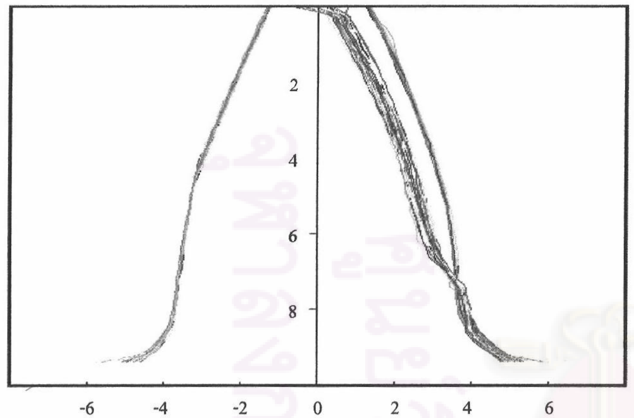


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 200 W

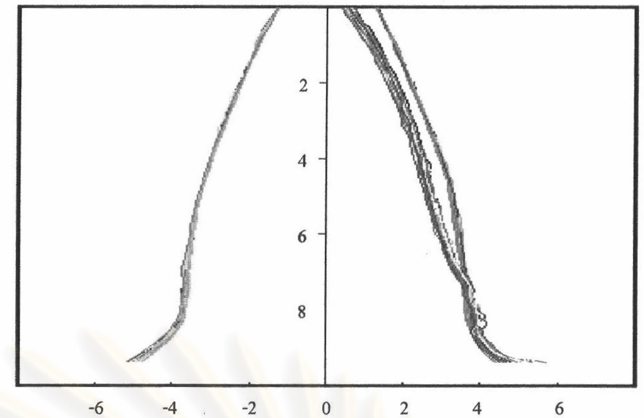


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W

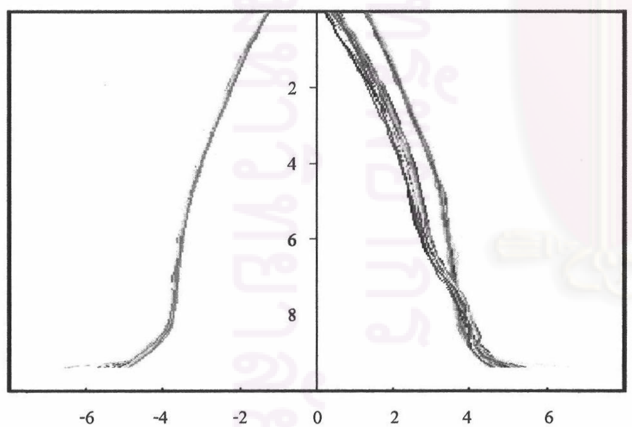
รูปที่ ค-2 ระดับสึกหรอที่ 1 (mm)



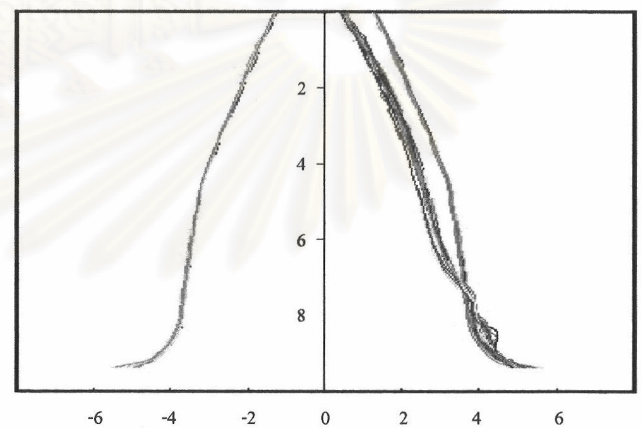
การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W



การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W

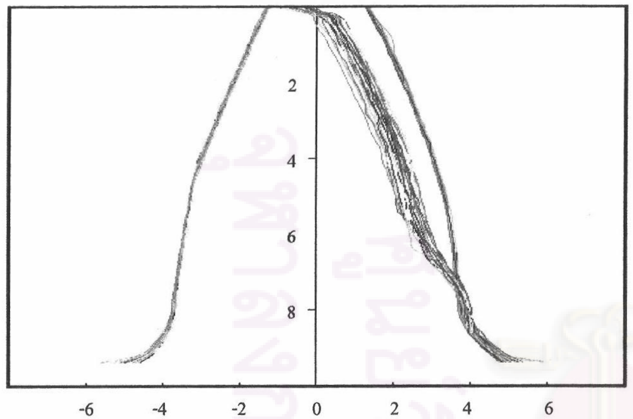


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 200 W

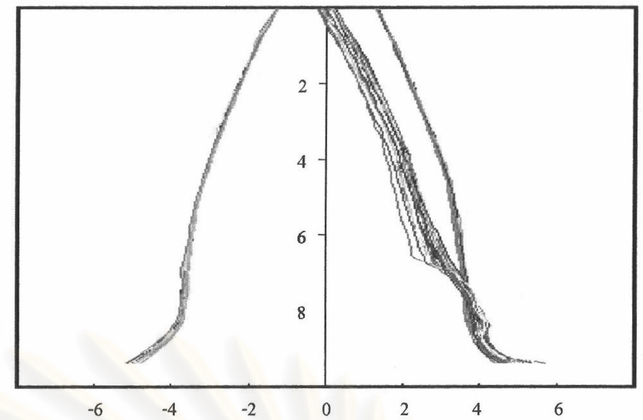


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W

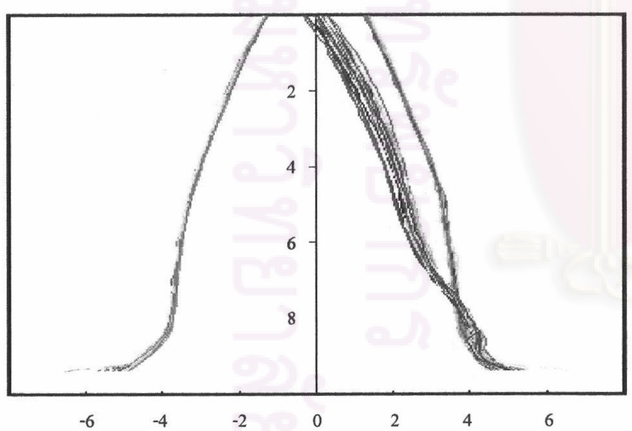
รูปที่ ค-3 ระดับสึกหรอที่ 2 (mm)



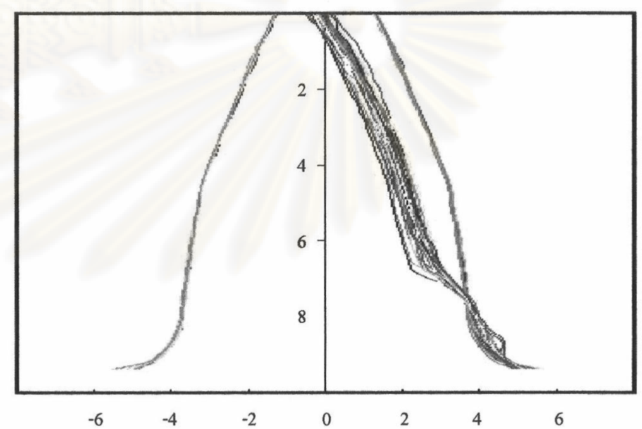
การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W



การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W

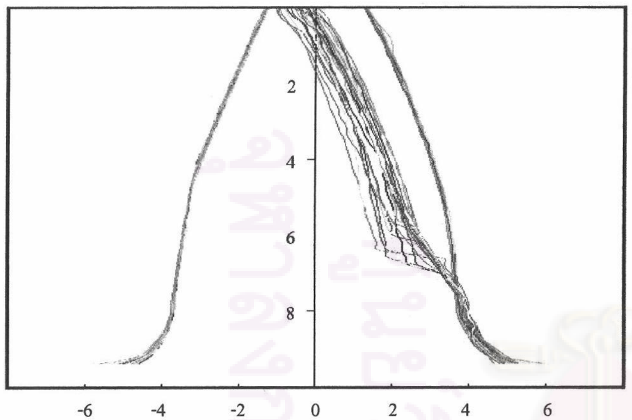


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 200 W

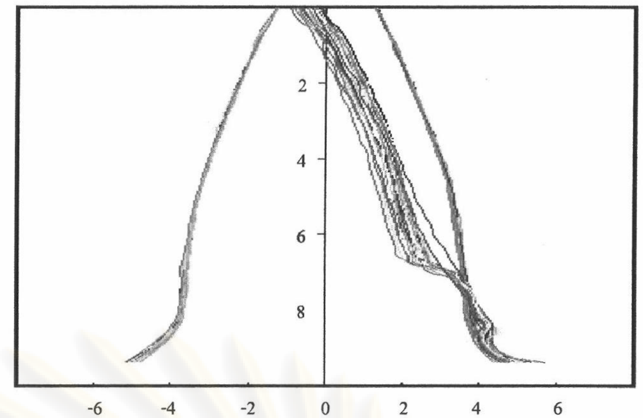


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W

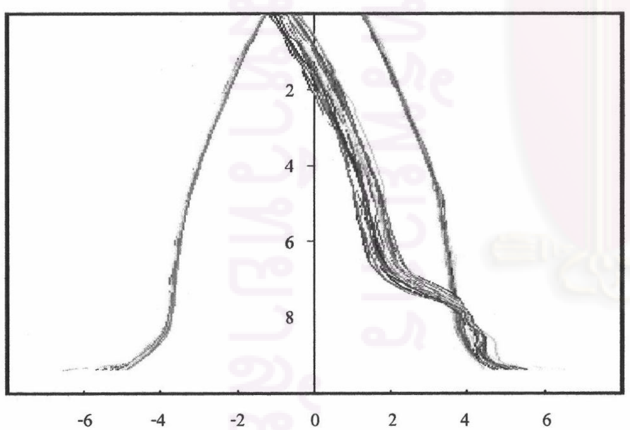
รูปที่ ค-4 ระดับสึกหรอที่ 3 (mm)



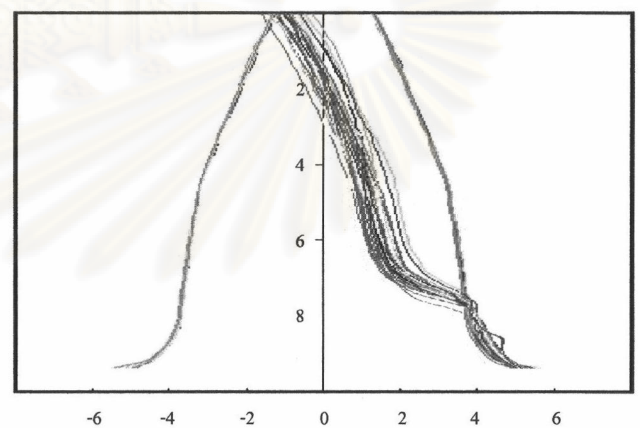
การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W



การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W

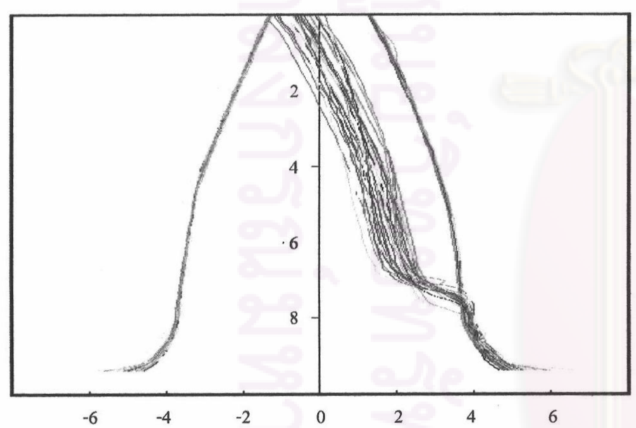


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 200 W

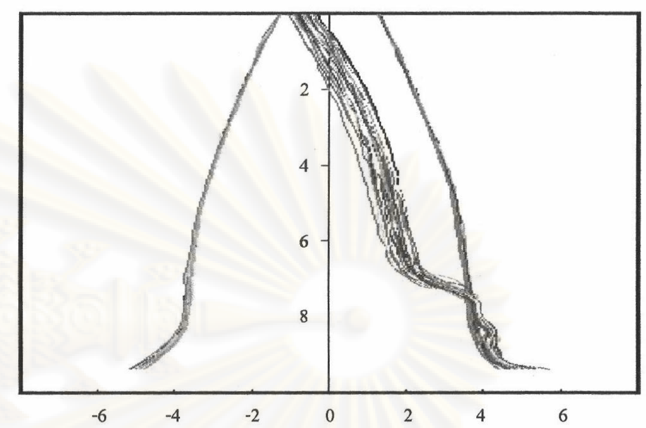


การทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W

รูปที่ ค-5 ระดับสึกหรอที่ 4 (mm)



การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W



การทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W

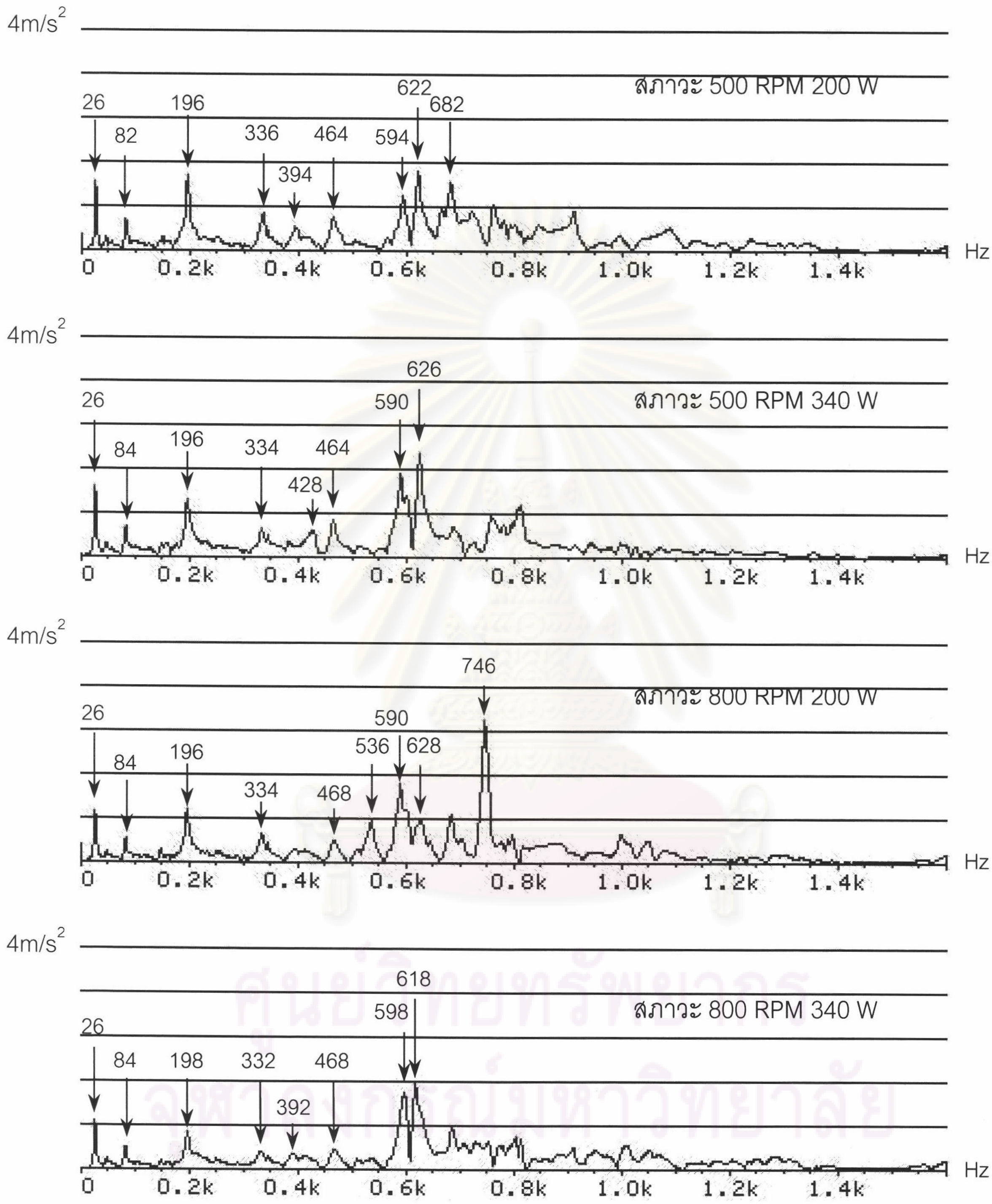
รูปที่ ค-6 ระดับสึกหรอที่ 5 (mm)

ภาคผนวก ง

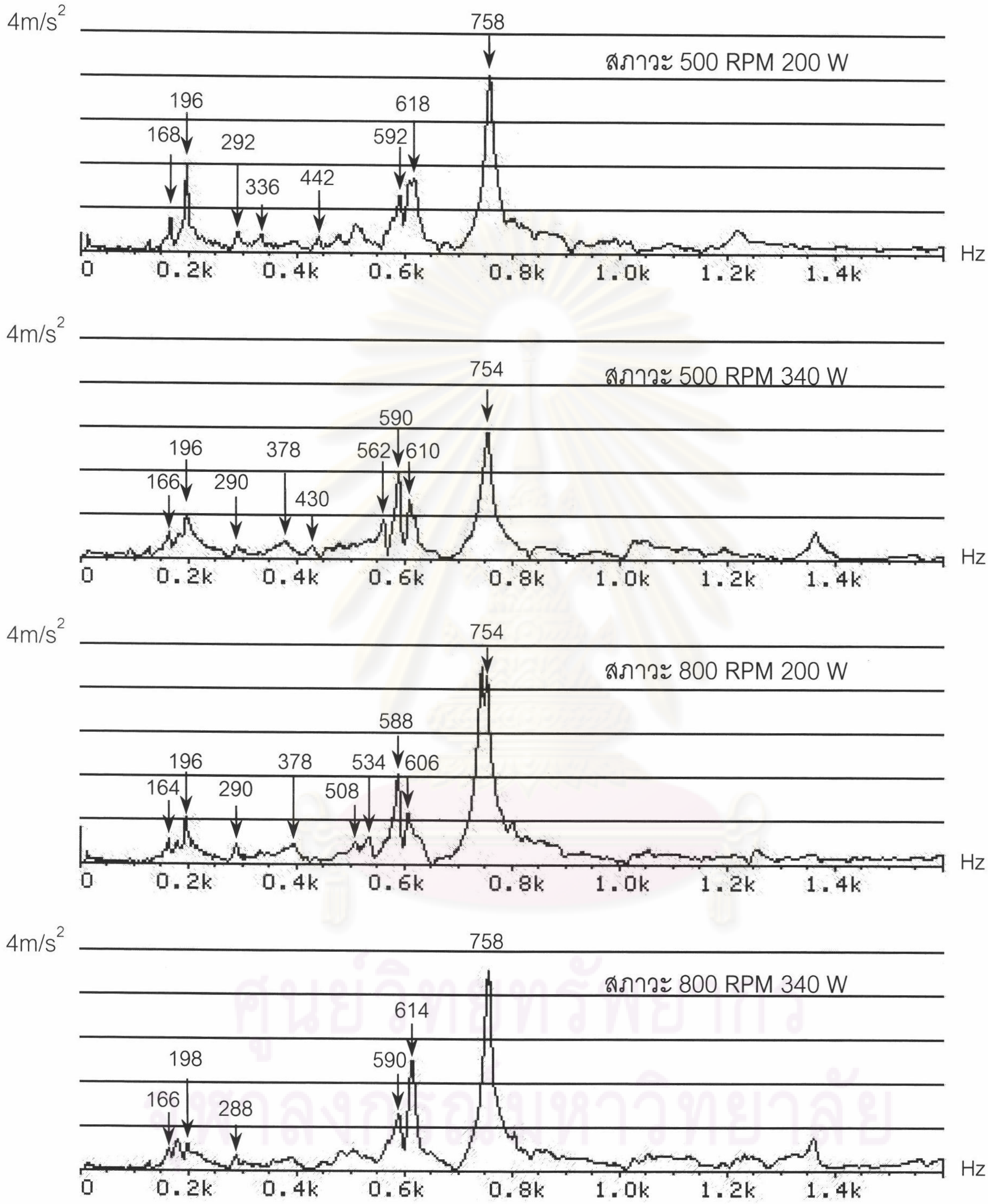
ความถี่ธรรมชาติ

ความถี่ธรรมชาติของชุดทดสอบใช้เป็นข้อมูลช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ แสดงในรูปที่ ง-1,ง-2 วัดเมื่อติดตั้งเฟืองเข้าไปในชุดทดสอบก่อนเริ่มทดลอง วิธีเก็บสัญญาณทำโดยใช้ท่อนไม้ทุบลงไปบนแท่นของชุดทดสอบเพื่อเป็นการกระตุ้นการสั่นสะเทือนของชุดทดสอบในทุกความถี่

การเก็บสัญญาณจะเก็บทันทีที่ท่อนไม้กระทบกับแท่นของชุดทดสอบ การเก็บสัญญาณเก็บ 1 ชุดสัญญาณไม่มีการเฉลี่ย ใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำที่ 0.7 Hz ตัวกรองความถี่สูงใช้ตามพิสัยของโดเมนความถี่คือ 800 Hz สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที และ 1.6 kHz สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที ส่วนค่าแอมพลิจูดสูงสุดคือ $4 m/s^2$



รูปที่ ง-1 สัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่วัดในแนวดิ่ง

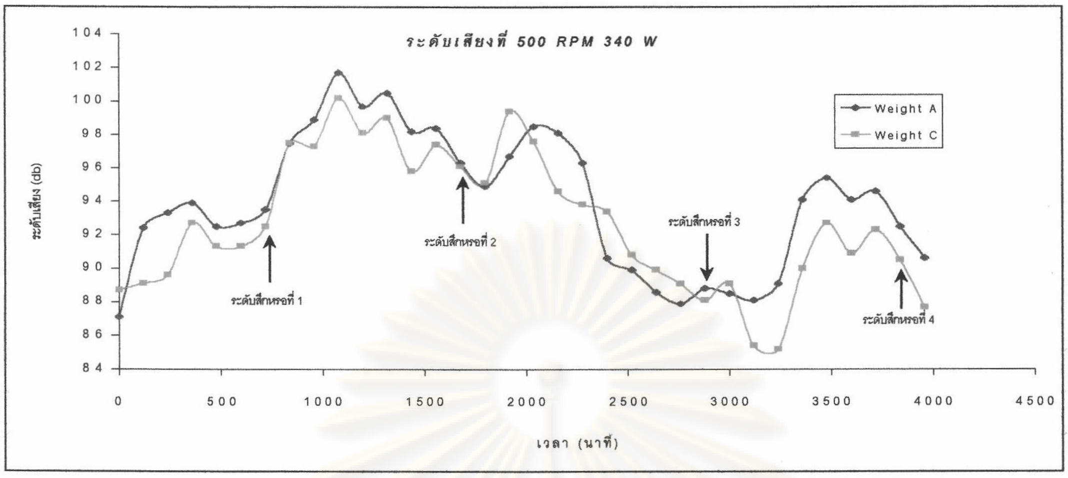


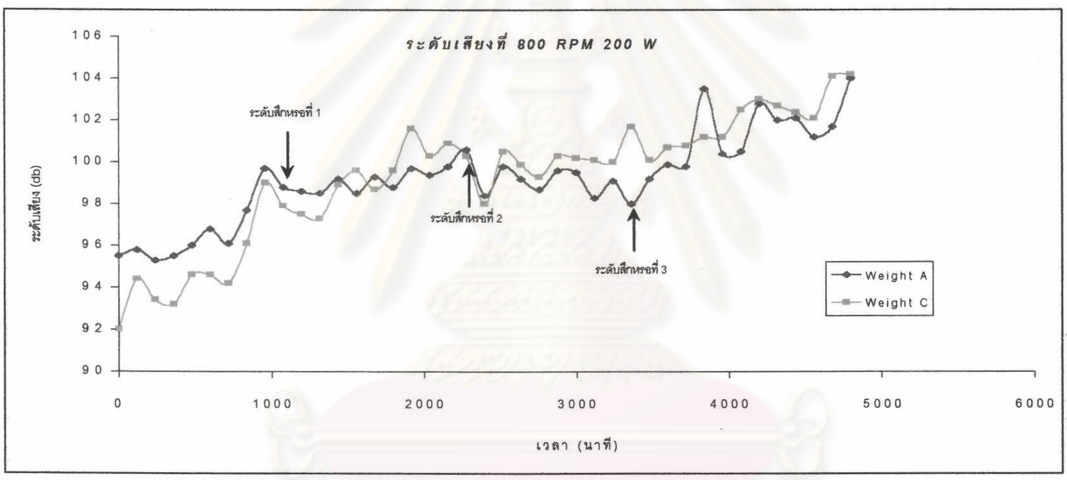
รูปที่ ง-2 สัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่วัดในแนวระดับ

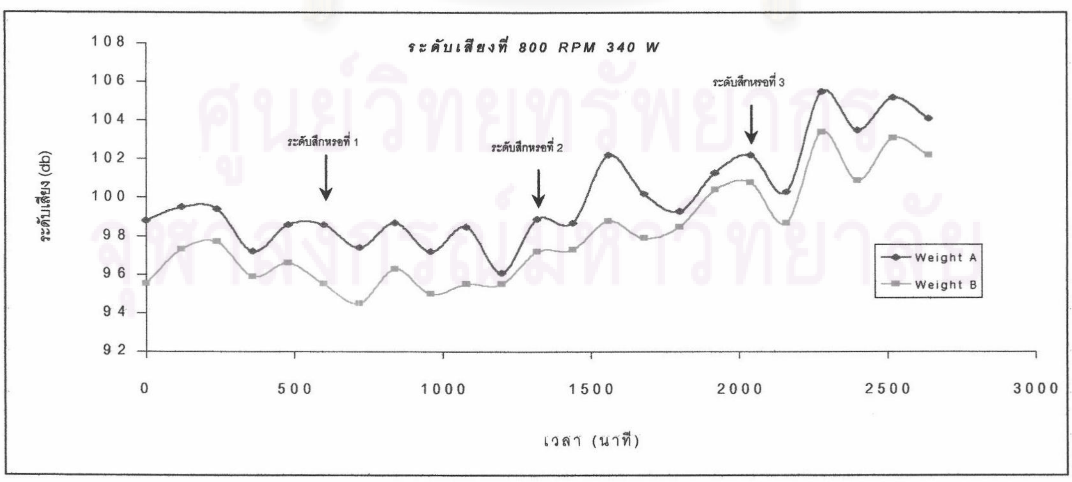
ภาคผนวก จ

ระดับเสียง

จากการสังเกตในระหว่างทำทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W พบว่าเสียงที่เกิดขึ้นจากการทดลองมีการแปรเปลี่ยนไปเมื่อเฟืองเกิดการสึกหรอ ดังนั้นการวัดระดับเสียงไปด้วยกันกับสัญญาณการสั่นสะเทือนในระหว่างทำการทดลองจึงน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณ การวิจัยจึงจัดซื้อเครื่องวัดระดับเสียงยี่ห้อ DIGICON รุ่น DS-40 เพื่อทำการวัดระดับเสียงไปด้วยกันในการทดลองที่สภาวะอื่นๆ โดยระดับเสียงที่เกิดจากการทดลองจากทั้ง 3 สภาวะ แสดงไว้ดังรูปที่ จ-1 โดยทำการวัดระดับเสียงทุกครั้งหลังจากการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนก่อนที่จะหยุดเดินเครื่องชุดทดลองเพื่อถ่ายภาพการสึกหรอการสึกหรอของฟันเฟือง ทำการวัดโดยนำไมโครโฟนไปไว้บริเวณใกล้กับจุดที่เฟืองขบกัน วัดโดยใช้วงจร Weighting ทั้งแบบ A และ C ซึ่งแนวโน้มของระดับเสียงมีลักษณะคล้ายๆ กับแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของเวลา







รูปที่ จ-1 ระดับเสียงที่วัดขณะทำการทดลอง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายเจษฎา เตชัสหงส์

เกิดวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนเทพศิรินทร์ ในระหว่างปีการศึกษา 2533 - 2538
- สำเร็จการศึกษาในระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2542
- เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิศวกรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543