

การศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณการตื่นสะเทียบกับรูปแบบการสีกหรือของเฟืองตรง



นายปรัชญา นวลพลับ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

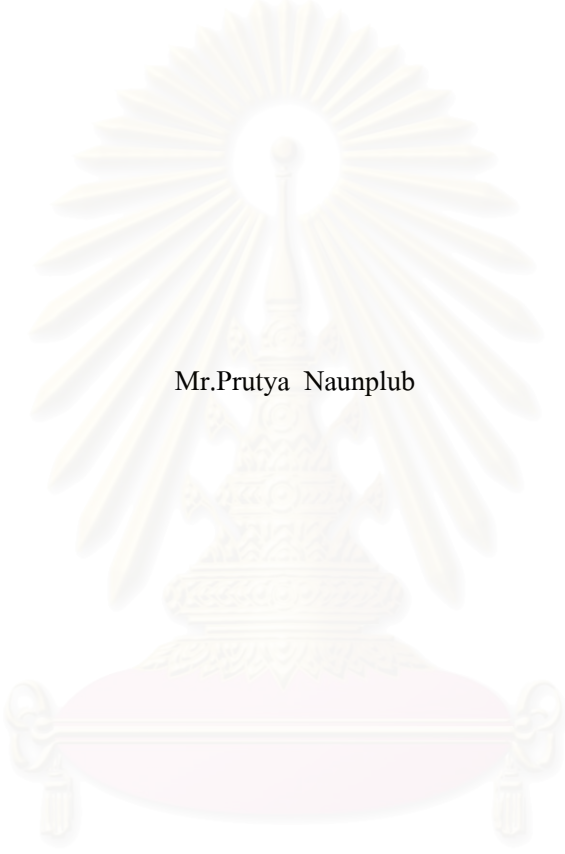
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF VIBRATION SIGNAL BEHAVIOR WITH SPUR GEAR WEAR PATTERN



Mr.Prutya Naunplub

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

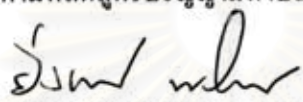
Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

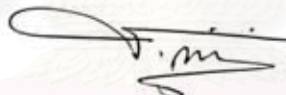
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณการตื่นสะเทือนกับรูปแบบการสีกหรือของเฟืองตรง
โดย นายปรัชญา นवलพลับ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


รักษาการแทนคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ยิ่งยศ เขมะโยธิน)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)


กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรัชญา นวพลภัฏ : การศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณการสั่นสะเทือนกับรูปแบบการสึกหรอของ
เฟืองตรง (STUDY OF VIBRATION SIGNAL BEHAVIOR WITH SPUR GEAR WEAR
PATTERN) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ, 131 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนกับระดับการสึกหรอของ
ฟันเฟือง โดยทำการทดลองให้เฟืองขับของเครื่องเกิดการสึกหรอในหลายๆ สภาพด้วยการปรับความ
เร็วรอบของชุดทดลองและภาระ เก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยกันบนโดเมนความถี่ การเฉลี่ยกันบน
โดเมนเวลาเข้าจังหวะ และติดตามรูปแบบของการสึกหรอด้วยภาพจากกล้องดิจิทัล สัญญาณการสั่นสะ
เทือนที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณบนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนคิวเฟรนซ์

ผลการวิจัยพบว่าการติดตามรูปแบบการสึกหรอของฟันเฟืองสามารถกระทำได้สะดวกมากขึ้นโดย
มีความแม่นยำในระดับ 0.1 มิลลิเมตร สัญญาณบนโดเมนเวลา พารามิเตอร์ Peak และ RMS มีแนวโน้ม
สูงขึ้นตามขนาดของการสึกหรออย่างเห็นได้ชัดในทุกๆ สภาพการทดลอง โดยจะมีค่าแอมพลิจูดของ
สัญญาณเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้
สามารถสังเกตเห็นลักษณะคาบการขบกันของฟันเฟืองได้ชัดเจนขึ้น เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณสเปกตรัม
พบว่าส่วนใหญ่แล้วมีแนวโน้มของสัญญาณไม่ชัดเจนนัก ค่าของแอมพลิจูดมีความแปรปรวนแกว่งตัวขึ้น ๆ
ลง ๆ ไม่สัมพันธ์กับระดับการสึกหรอ ทั้งส่วนของค่าแอมพลิจูด GMF ฮาร์มอนิก และชุดความถี่ข้าง
ผลของสัญญาณเซปต์รัมพบว่าแนวโน้มสัญญาณส่วนใหญ่ มีความแปรปรวนของสัญญาณอยู่มาก ยังไม่
อาจนำมาระบุถึงความสึกหรอที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองได้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2550.....

4770586721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: VIBRATION SIGNAL / TIME DOMAIN / SPECTRAL ANALYSIS / CEPSTRAL ANALYSIS / GEAR WEAR / GMF / FFT / SYNCHRONOUS / TIME AVERAGING / DIGITAL IMAGES / MEASUREMENT.

PRUTYA NAUNPLUB : STUDY OF VIBRATION SIGNAL BEHAVIOR WITH SPUR GEAR WEAR PATTERN. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.CHAIROTE KUNPANITCHAKIT, Ph.D. 131 pp.

This research investigated the relation of vibration signal and gear tooth wear level. Brass pinions were tested at various speeds and applied loads on an experimental test rig. Vibration signal was recorded by using spectrum averaging and synchronous time averaging techniques. Images from digital camera were used to monitor gear wear. Vibration signal was analyzed using time domain, frequency domain and quenfreny domain techniques.

The study shows that wear monitoring of gear teeth can be easily performed with resolution up to 0.1 mm. Peak and RMS parameters from the time domain signal clearly increase as the wear level progress in all conditions. Signal amplitude increases as the gear speed increases. The tooth meshing period can be clearly seen from the synchronous time averaging signal. The trend of spectrum signal is not clearly correlate to the level of gear wear because of the variation of the amplitude of GMF, its harmonics, and peak amplitude of the sideband. Cepstral analysis trends to give more fluctuation of peak gamnitude and it may not correlate well with the gear wear.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Mechanical Engineering.....Student's signature.....
Concentration.....Mechanical Engineering.....Advisor's signature.....
Academic year.....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือทั้งในเรื่องของอุปกรณ์ ถ่ายทอดความรู้ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย และแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ตลอดจนการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับทุนอุดหนุนและ ส่งเสริมวิทยานิพนธ์ และทุนสนับสนุนการวิจัย ตามลำดับ

ขอขอบพระคุณ ครูธงชัย สิงห์สุวรรณ ครูปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ในการซ่อมแซมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง เช่น เครื่อง วิเคราะห์สัญญาณ และอินเวอร์เตอร์

ขอขอบคุณ คุณสุบิน ขันดี คุณพรชัย เสาวรัตน์ชัย และคุณโกวิท โกพล นายช่างเทคนิค ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในด้านการปฏิบัติงาน เป็นอย่างดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณวศิพล บุญเกียรติ นิสิตปริญญาโทประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยี บำรุงรักษาเครื่องจักรกล สำหรับคำแนะนำดี ๆ มากมาย และความช่วยเหลือต่างๆ ที่มอบให้ เช่น การปรับปรุงชุดทดลอง และความช่วยเหลือขณะตั้งแนวแกนชุดทดลอง อีกทั้งความช่วยเหลือ ทางด้านอื่นอีกมากมาย

ขอขอบคุณ คุณวรินทร์ บุญแมน สำหรับการช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุก ๆ คน ทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาอื่น ๆ สำหรับคำแนะนำดี ๆ และกำลังใจที่มี ให้

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และสนับสนุน การศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด อนึ่งประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบเป็นกตัญญูตา บูชาแด่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	3
สมมติฐานการทดลอง.....	7
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	7
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	7
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	8
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2	
ทฤษฎี.....	9
การสั่นสะเทือน (Vibration).....	9
การสั่นสะเทือนของระบบเฟือง.....	10
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณการ สั่นสะเทือนของระบบเฟือง.....	11
การจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition).....	14
ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting Function).....	16
โอเวอร์แลป(Overlap).....	18
การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging).....	19
การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration signal analysis).....	23
การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา.....	23
การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่.....	26
การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนคิวเฟรนซ์.....	31

บทที่ 3	การทดลอง.....	34
	รูปแบบการทดลอง.....	34
	สภาวะการทดลอง.....	34
	อุปกรณ์การทดลอง.....	35
	ขั้นตอนการทดลอง.....	36
	รายละเอียดการวัดสัญญาณการสั้นสะเทือน.....	37
	การวัด โปรไฟล์เฟืองด้วยภาพจากกล้องดิจิทัล.....	39
	ขั้นตอนการวัดขนาด โปรไฟล์เฟืองโดยใช้กล้องดิจิทัล.....	42
	การสอบเทียบความละเอียดของภาพและปรับตั้งระยะโฟกัสของกล้อง.....	44
	ระดับการสึกหรอของฟันเฟือง.....	47
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์สัญญาณการสั้นสะเทือน.....	48
	ลำดับในการทดลองและระยะเวลาที่ใช้ทดลองของเฟืองแต่ละชุด.....	48
	รูปแบบการสึกหรอ.....	49
	กราฟแสดงรูปแบบการสึกหรอโดยเฉลี่ย.....	49
	อภิปรายผลของรูปแบบการสึกหรอ.....	62
	สัญญาณการสั้นสะเทือนจากการทดลอง.....	63
	ภาพสัญญาณการสั้นสะเทือน.....	63
	อภิปรายผลของสัญญาณบน โดเมนเวลา.....	68
	อภิปรายผลของสัญญาณบน โดเมนสเปกตรัม.....	68
	อภิปรายผลของสัญญาณบน โดเมนเซปส์ตรัม.....	68
	การวิเคราะห์สัญญาณการสั้นสะเทือน.....	69
	สัญญาณบน โดเมนเวลา.....	69
	ผลการวิเคราะห์สัญญาณบน โดเมนเวลา.....	83
	สัญญาณสเปกตรัม.....	87
	ผลการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม.....	101
	สัญญาณบนเซปส์ตรัม.....	103
	ผลการวิเคราะห์เซปส์ตรัม.....	116
บทที่ 5	การสรุปผลของวิทยานิพนธ์.....	119
	สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั้นสะเทือน.....	119
	ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป.....	121
	รายการอ้างอิง.....	122

บรรณานุกรม.....124

ภาคผนวก125

 ภาคผนวก ก รูปถ่ายอุปกรณ์ทดลอง.....126

 ภาคผนวก ข ระดับเสียง.....127

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....131



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2-1	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการเคลื่อนโดเมนเวลา เข้าจังหวะ.....	21
ตารางที่ 3-1	รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมน ความถี่สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	37
ตารางที่ 3-2	รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมน ความถี่สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที.....	37
ตารางที่ 3-3	รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมน ความถี่สำหรับความเร็ว 1100 รอบต่อนาที.....	38
ตารางที่ 3-4	รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมนเวลา เข้าจังหวะสำหรับสำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	39
ตารางที่ 3-5	รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมนเวลา เข้าจังหวะสำหรับสำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที.....	39
ตารางที่ 3-6	รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมนเวลา เข้าจังหวะสำหรับสำหรับความเร็ว 1100 รอบต่อนาที.....	39
ตารางที่ 3-7	ความถี่และคิวเฟรนซีที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ.....	40
ตารางที่ 3-8	แสดงผลจากการตัดภาพที่ระยะโฟกัสต่าง ๆ.....	44
ตารางที่ 4-1	เวลาที่ใช้ในการทดลองจนเพื่องมีการสึกหรือถึงระดับกำหนด.....	48
ตารางที่ 4-2	ค่าความถี่ของฮาโมนิกส์ GMF และชุดแถบความถี่ข้าง.....	87

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2-1	เฟืองขบกัน จุดพิตซ์ และส่วนต่าง ๆ ของเฟืองตรง.....	10
รูปที่ 2-2	สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบน โดเมนของเวลา.....	13
รูปที่ 2-3	แผนผังแสดงกระบวนการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT	14
รูปที่ 2-4	การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด.....	15
รูปที่ 2-5	สัญญาณที่มีคาบของสัญญาณบรรจุลงในหน้าต่างของเวลาได้พอดี.....	17
รูปที่ 2-6	การรั่วของสัญญาณเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของหน้าต่างของ เวลา.....	17
รูปที่ 2-7	หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก.....	18
รูปที่ 2-8	การโอเวอร์แล็ปของสัญญาณระดับต่าง ๆ.....	19
รูปที่ 2-9	การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรด้วยวิธีการเคลื่อนบน โดเมนเวลา เข้าจังหวะ.....	20
รูปที่ 2-10	แผนผังแสดงกระบวนการทำงานการเคลื่อนบน โดเมนเวลาเข้าจังหวะ.....	20
รูปที่ 2-11	สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่ได้จากการเคลื่อนบน โดเมนเวลา และสัญญาณที่ได้จากวิธีการเคลื่อนบน โดเมนเวลาเข้าจังหวะ.....	22
รูปที่ 2-12	การเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองบน โดเมนเวลาที่สภาวะ 500 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	24
รูปที่ 2-13	ค่าเคอร์โทซิสสำหรับรูปแบบสัญญาณต่าง ๆ.....	25
รูปที่ 2-14	ผลของสภาพเฟืองที่มีต่อสัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนเวลา.....	26
รูปที่ 2-15	สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	31
รูปที่ 2-16	สัญญาณเซปส์ตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	33
รูปที่ 3-1	ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	36
รูปที่ 3-2	กระบวนการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนบน โดเมนความถี่.....	37
รูปที่ 3-3	กระบวนการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนบน โดเมนเวลาเข้าจังหวะ.....	38
รูปที่ 3-4	การบิดเบือนของภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล Canon PowerShot A620.....	41
รูปที่ 3-5	ภาพของฟันเฟืองที่เกิด perspective ขึ้นที่ปลายฟันเฟือง.....	42
รูปที่ 3-6	การใช้เกจบล็อดในการติดตั้งกล้องให้ขนานกับเฟืองและมีระยะที่ห่างที่คงที่.....	43

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3-7	การตัดภาพขนาดความยาว 1 cm ตามสเกลไม้บรรทัด.....43
รูปที่ 3-8	ภาพพื้นเฟืองที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องขยาย โปรไฟล์.....45
รูปที่ 3-9	กราฟแสดงขนาดที่แตกต่างของภาพด้านขวาของพื้นเฟือง(แกน X)ที่ได้จาก เครื่องขยายโปรไฟล์เทียบกับกล้องดิจิทัล.....45
รูปที่ 3-10	กราฟแสดงขนาดที่แตกต่างของภาพด้านซ้ายของพื้นเฟือง(แกน X) ที่ได้จาก เครื่องขยายโปรไฟล์เทียบกับกล้องดิจิทัล.....46
รูปที่ 3-11	กราฟแสดงขนาดที่แตกต่างของภาพแนวตั้ง(แกน Y) ของพื้นเฟืองที่ได้จาก เครื่องขยายโปรไฟล์เทียบกับกล้องดิจิทัล.....46
รูปที่ 3-12	การคำนวณการสึกหรอที่ปลายฟัน.....47
รูปที่ 4-1	การสึกหรอและการเสียรูปของพื้นเฟืองที่ความเร็ว 500 RPM ชุดที่ 1.....48
รูปที่ 4-2	การสึกหรอ โดยเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....51
รูปที่ 4-3	การสึกหรอ โดยเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....52
รูปที่ 4-4	การสึกหรอ โดยเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM.....53
รูปที่ 4-5	การสึกหรอ โดยเฉลี่ยในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....54
รูปที่ 4-6	การสึกหรอ โดยเฉลี่ยในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....55
รูปที่ 4-7	การสึกหรอ โดยเฉลี่ยในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM.....56
รูปที่ 4-8	ระยะการสึกหรอจากปลายฟันถึงรากพื้นเฟืองในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 500RPM.....57
รูปที่ 4-9	ระยะการสึกหรอจากปลายฟันถึงรากพื้นเฟืองในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 800RPM.....58
รูปที่ 4-10	ระยะการสึกหรอจากปลายฟันถึงรากพื้นเฟืองในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 1100RPM.....59
รูปที่ 4-11	อัตราการสึกหรอเฉลี่ยทุกช่วงของพื้นเทียบกับเวลาที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ชุดที่ 1.....60
รูปที่ 4-12	อัตราการสึกหรอเฉลี่ยทุกช่วงของพื้นเทียบกับเวลาที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ชุดที่ 2.....61
รูปที่ 4-13	สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวตั้ง.....64
รูปที่ 4-14	สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวระดับ.....65

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4-15	สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ในแนวตั้ง.....66
รูปที่ 4-16	สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ในแนวระดับ.....67
รูปที่ 4-17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....71
รูปที่ 4-18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....72
รูปที่ 4-19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM.....73
รูปที่ 4-20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....74
รูปที่ 4-21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....75
รูปที่ 4-22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM.....76
รูปที่ 4-23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....77
รูปที่ 4-24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....78
รูปที่ 4-25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM.....79
รูปที่ 4-26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....80
รูปที่ 4-27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....81
รูปที่ 4-28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....82
รูปที่ 4-29	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging.....89

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4-30	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการ ทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging.....90
รูปที่ 4-31	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการ ทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging.....91
รูปที่ 4-32	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการ ทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging.....92
รูปที่ 4-33	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการ ทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging.....93
รูปที่ 4-34	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการ ทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging.....94
รูปที่ 4-35	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging.....95
รูปที่ 4-36	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging.....96
รูปที่ 4-37	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging.....97
รูปที่ 4-38	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging.....98
รูปที่ 4-39	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging.....99
รูปที่ 4-40	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging.....100
รูปที่ 4-41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 500 RPM.....105
รูปที่ 4-42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 800 RPM.....106

รูป	หน้า	
รูปที่ 4-43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 1100 RPM.....	107
รูปที่ 4-44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 500 RPM.....	108
รูปที่ 4-45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 800 RPM.....	109
รูปที่ 4-46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 1100 RPM.....	110
รูปที่ 4-47	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 3/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 500 RPM.....	111
รูปที่ 4-48	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 3/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 800 RPM.....	112
รูปที่ 4-49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/W กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 500 RPM.....	113
รูปที่ 4-50	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/W กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 800 RPM.....	114
รูปที่ 4-51	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/W กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 1100 RPM.....	115
รูปที่ 4-52	สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 1100 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวดิ่ง.....	117
รูปที่ 4-53	สัญญาณซิงโครนัส ที่สภาวะ 1100 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ในแนวดิ่ง.....	118
รูปที่ ก-1	ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	126
รูปที่ ก-2	ภาพถ่ายการติดตั้งตัวตรวจรู้แบบความเร่งและแทกโคมิเตอร์.....	126
รูปที่ ข-1	ระดับเสียง ที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....	128
รูปที่ ข-2	ระดับเสียง ที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....	129
รูปที่ ข-3	ระดับเสียง ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM.....	130

คำอธิบายสัญลักษณ์

$x(t)$	คือ สัญญาณการสั่นสะเทือน โดยเป็นสัญญาณแบบความเร่ง
X_n	คือ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่ฮาร์โมนิกที่ n
$am_n(t)$	คือ ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
$fm_n(t)$	คือ ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
A_{np}	คือ แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
F_{ns}	คือ แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
f_m, f_r	คือ ความถี่ของฟังก์ชันมอดูเลต
φ_n	คือ มุมเฟสฮาร์โมนิกที่ n ของสัญญาณการสั่นสะเทือน
α_{np}, β_{np}	คือ มุมเฟสฮาร์โมนิกที่ n ของฟังก์ชันมอดูเลต
T	คือ คาบรากฐาน
f_0	คือ คาบถี่รากฐาน
f_s	คือ คาบถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล
N	คือ จำนวนจุดข้อมูล
Δt	คือ ระยะเวลาแต่ละจุดข้อมูล
N_A	คือ จำนวนชุดสัญญาณที่นำมาเฉลี่ยกันบน โดเมนเวลาเข้าจังหวะ
$A(\omega)$	คือ สเปกตรัมของฟูริเยร์ (Fourier Spectrum of $x(t)$)
$A^2(\omega)$	คือ เพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum of $x(t)$)
$\varphi(\omega)$	คือ มุมเฟส (Phase Angle of $x(t)$)
$C(\tau)$	คือ เชปส์ตรัม
GMF	คือ ความถี่การขบกันของคู่เฟือง (Gear Meshing Frequency)
SBP	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับ
SBPL1	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับทางด้านซ้ายของ $1xGMF$
SBPR1	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับทางด้านขวาของ $1xGMF$

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้เจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็วและได้นำเครื่องจักรอัตโนมัติเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเพื่อรองรับกับความต้องการของตลาด เครื่องจักรเหล่านี้จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ระบบการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์(Predictive Maintenance) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการติดตามสภาพการทำงานของเครื่องจักรขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่ ทำให้ทราบถึงสาเหตุและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรได้ทันเวลาที่ สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิต การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์นั้นมีด้วยกันหลายวิธี การเฝ้าตรวจการสั่นสะเทือน(Vibration Monitoring) เป็นวิธีการหลักในการตรวจสอบเครื่องจักรหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเครื่องจักรหมุนมีลักษณะการทำงานเป็นคาบ(Periodic) ซึ่งจะมีลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนเฉพาะตัวตามความเร็วรอบของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องจักร ทำให้การวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายนั้น ๆ ได้โดยง่าย วิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนทำได้หลายวิธีเช่น การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา(Time Domain) การวิเคราะห์สเปกตรัม(Spectrum) และการวิเคราะห์เซปต์ตรัม(Cepstrum) เป็นต้น

เฟือง(Gear) เป็นชิ้นส่วนหนึ่งของเครื่องจักรที่สำคัญ เฟืองทำหน้าที่ส่งกำลังและการหมุนจากเพลานี้ไปสู่อีกเพลานี้ จึงเป็นชิ้นส่วนที่มีโอกาสเสียหายเนื่องมาจากเกิดการกระแทกและเสียดสีระหว่างฟันเฟืองที่เกิดขึ้นตลอดการทำงาน ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเฟืองมีอยู่หลายชนิด ดังนี้[1],[2],[3]

1. Wear คือ ความเสียหายในลักษณะของการสึกหรอที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกไปจากฟันเฟือง ซึ่งเกิดจากหลาย ๆ สาเหตุด้วยกันเช่น การสึกหรอทางกลที่เกิดจากการขาดสารหล่อลื่น การสึกหรอทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยา Oxidation ของสารจำพวกกรดหรือเบส เป็นต้น

2. Scuffing คือ ความเสียหายที่เกิดจากการหลอมละลายของเนื้อวัสดุฟันเฟือง ซึ่งเกิดจากสภาพการทำงานของเฟืองที่อุณหภูมิสูง โดยลักษณะผิวฟันเฟืองจะเห็นถึงการเชื่อมตัว

ออกไปและมีรอยขีดข่วนในทิศทางการลื่นไถลของพื้นเฟือง ลักษณะดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนในบริเวณใกล้ ๆ กับปลายฟัน

3. Plastic deformation คือ ความเสียหายในลักษณะการเสียรูปของพื้นเฟือง ทำให้พื้นเฟืองมีลักษณะรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและไม่สามารถกลับมามีลักษณะเช่นเดิมได้อีก ซึ่งเกิดจากพื้นเฟืองรับภาระมากเกินไปเกินจุด Yield strength ของวัสดุ

4. Contact fatigue คือ ความเสียหายในลักษณะการเกิดรอยแตกร้าวและหลุมร่อนขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสพื้นเฟืองเนื่องจากการรับภาระซ้ำกันเป็นวงรอบ (Cyclic load) เป็นเวลานาน หน้าสัมผัสของพื้นเฟืองจะเกิดความล้า (Fatigue) การแตกหรือบิ่นของเนื้อพื้นเฟืองจะค่อยเป็นค่อยไป เริ่มจากรอยแตกสั้น ๆ เล็ก ๆ และค่อย ๆ ขยายตัวเป็นรอยแตกขนาดใหญ่หรือร้าวจนทั่วพื้นเฟือง ทำให้เกิดการบิ่นของพื้นเฟือง

5. Cracking คือ ความเสียหายในลักษณะรอยแตกร้าวของพื้นเฟืองซึ่งเกิดจากหลาย ๆ สาเหตุ เช่น รอยแตกร้าวที่เกิดจากความเค้นตึงบริเวณผิวเฟืองที่ผ่านการชุบแข็ง วัสดุที่ทำเฟืองมีรอยตำหนิ เป็นต้น รอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเฟืองทำงานและรับภาระทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกไปจากพื้นเฟือง

6. Fracture คือ ความเสียหายในลักษณะการแตกบิ่นของพื้นเฟือง ซึ่งเกิดจากรับแรงเกินกำลังที่พื้นเฟืองสามารถรับได้ หรือเกิดการกระแทกกันของพื้นเฟืองอย่างรุนแรงทำให้เนื้อวัสดุแตกและหลุดออกมาจากพื้นเฟือง

7. Bending fatigue คือ ความเสียหายในลักษณะการเกิดรอยแตกขึ้นบริเวณรากพื้นเฟืองเนื่องมาจากการรับความเค้นดัดซ้ำ ๆ ของพื้นเฟืองทำให้วัสดุเกิดความล้า เมื่อเฟืองทำงานรอยแตกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและส่งผลให้พื้นเฟืองแตกหักได้

จากความเสียหายที่เกิดขึ้นดังกล่าวล้วนก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นทั้งสิ้นเนื่องจากสภาพผิวสัมผัสและความแข็งแรงของซี่พื้นเฟืองเปลี่ยนไป ซึ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปจากเฟืองในสภาพปกติ ถ้าสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเฟืองได้ แล้วจะมีประโยชน์ต่อการคาดคะเนความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ทำให้วางแผนการซ่อมบำรุงได้อย่างทันท่วงที

ความเสียหายของเฟืองส่วนใหญ่ พบว่าเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอ (Wear) และ Scuffing งานวิจัยนี้จะมุ่งประเด็นไปในการสึกหรอ (Wear) ที่เกิดขึ้นจากแรงทางกลเนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะการทดลองได้ไม่ยากนัก

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1. การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัม และ เซปส์ตรัม (A study of vibration analysis of gear-trains by spectrum and cepstrum)[4]

จุดประสงค์ ศึกษาและเปรียบเทียบการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วย สเปกตรัมและเซปส์ตรัม

รูปแบบการศึกษา ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการสั่นสะเทือนจาก ชุดเฟืองตรง โดยแบ่งการศึกษาและวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์สัญญาณจำลองของการ สั่นสะเทือนของชุดเฟือง และการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการวัดชุดทดลองเฟืองที่มีปัญหาการ สึกหรือและชุดเฟืองที่มีปัญหาการเอียงศูนย์ โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากสเปกตรัมและ เซปส์ตรัม ในการทดลองใช้เฟืองขับทำจากทองเหลืองจำนวนฟัน 26 ฟัน เฟืองตามทำจากเหล็ก จำนวนฟัน 38 ฟัน รับภาระ 353 วัตต์โดยการปรับแรงตึงของผ้าเบรกที่ให้แรงเสียดทานแก่เพลลา เฟืองตาม การทดลองชุดทดลองเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรือจะเริ่มทดลองจากเฟืองไม่มีการสึกหรือ จนกระทั่งเฟืองนั้นมีระดับการสึกหรือ 50 เปอร์เซ็นต์จากโปรไฟล์เต็ม ส่วนการทดลองชุดเฟืองที่ มีปัญหาการเอียงศูนย์จะใช้บุช(bush) ที่เจาะรูเอียงศูนย์ไว้เพื่อเปลี่ยนระดับการเอียงศูนย์

ผลการศึกษา

1. ผลจากสัญญาณจำลอง

ในการมอดูเลชันทางแอมพลิจูดทำให้ระดับการมอดูเลชันของเฟืองตัวหนึ่งตัวใดสูงขึ้น ค่า แกมมาของเฟืองตัวนั้นจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่าแกมมาของเฟืองอีกตัวหนึ่งจะมีค่าลดลง ในส่วน ของค่าสเปกตรัมของความถี่การขบกันของเฟือง GMF (Gear Meshing Frequency) ไม่เปลี่ยนแปลง ไปจากเดิม

2. ผลการทดสอบชุดเฟืองที่มีปัญหา

- ผลการทดสอบชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรือ ค่าสัญญาณแอมพลิจูดสูงสุด(Peak) และ แอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส(RMS) บนโดเมนเวลาจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ผลของ สเปกตรัมที่ความถี่การขบกันของเฟือง GMF สังเกตไม่พบการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดมากนัก แต่ผลของเซปส์ตรัมค่าแกมมาของสัญญาณ 1/P (หนึ่งส่วนความเร็วรอบ Pinion) มีขนาดสูงขึ้น ตามระดับการสึกหรือ และมีค่าต่างกับค่าแกมมา 1/G (หนึ่งส่วนความเร็วรอบ Gear) มากขึ้น ตามระยะเวลาหรือระดับการสึกหรือ

- ผลการทดลองจากชุดเฟืองที่มีปัญหาการเอียงศูนย์ ค่าสัญญาณ Peak และ RMS บน โดเมนเวลาไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเอียงศูนย์เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่าสเปกตรัมที่วัดได้ ส่วนในผลของสเปกตรัมค่าแกมมาของสัญญาณ 1/P มีขนาดสูงขึ้นตามระยะเอียงศูนย์ และค่า แกมมา 1/G สังเกตไม่พบการเปลี่ยนแปลง

สรุปผลการทดสอบ การวิเคราะห์โดยเซปส์ตรัมให้ผลการวิเคราะห์ปัญหาได้ดีโดย
เปรียบเทียบค่าสัญญาณเพียงสองค่า ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมให้ผลการวิเคราะห์ที่มี
รูปแบบยังไม่ชัดเจน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง(An analysis of the relationship between vibration signal and gear wear level)[5]

เป็นการศึกษาต่อเนื่องจาก[4] โดยมุ่งสนใจไปที่ชุดเฟืองที่มีการสึกหรอ

จุดประสงค์ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบและค่าพารามิเตอร์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ระดับการสึกหรอต่าง ๆ ของเฟือง เปรียบเทียบผลของภาระและความเร็วรอบ

รูปแบบการศึกษา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟืองซึ่งจำลองรูปแบบการสึกหรอมาจาก[4] โดยตะไบฟันเฟืองให้สึกหรอตามโปรไฟล์ที่ระดับต่าง ๆ 6 ระดับ เริ่มตั้งแต่เฟืองไม่มีการสึกหรอในระดับ 0 จนถึงระดับการสึกหรอที่ปลายฟันมีค่า 77.5 เปอร์เซ็นต์จากโปรไฟล์เต็มทีระดับ 5 และเก็บสัญญาณของเฟืองที่ระดับการสึกหรอต่าง ๆ หลาย ๆ สภาวะ คือ ความเร็วรอบ 500 RPM และ 800 RPM ในแต่ละความเร็วรอบจะปรับระดับภาระเป็น 3 ระดับ คือ ไม่มีภาระ 240วัตต์ และ340วัตต์ โดยการปรับแรงดึงของผ้าเบรคที่ให้แรงเสียดทานแก่เพลลาเฟืองตาม สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาวิเคราะห์จะอยู่ในรูปแบบสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม

ผลการทดสอบ จากการทดสอบพบว่า สัญญาณบนโดเมนเวลาค่า Peak มีค่าสูงขึ้นเด่นชัดเมื่อระดับการสึกหรอเพิ่มขึ้น ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ส่วนค่า Crest Factor ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด ค่าแอมพลิจูดของความถี่ GMF SBP (Sidebands of Pinion) และ SBG(Sidebands of Gear) จากสเปกตรัมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับโดเมนเวลาแต่ยังมีความไม่แน่นอนของรูปแบบสัญญาณ สัญญาณเซปส์ตรัมค่าแอมพลิจูด 1/P จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และค่อย ๆ ลดลงเมื่อผ่านการสึกหรอระดับที่ 2-2.45 เป็นต้นมา ค่า 2/P และ 1/G ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดเมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น

สรุปผลการทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าไม่มีวิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบใดที่ทำให้ผลการวิเคราะห์สัญญาณได้สมบูรณ์แบบ การใช้สัญญาณเซปส์ตรัมวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของเฟืองดูเหมือนว่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัญญาณมีจุดสูงสุดแล้วค่าจึงลดลง ซึ่งอาจใช้จุดนี้เป็นจุดสังเกตของระดับการสึกหรอที่เกินค่าที่ยอมรับได้ และพบว่ารูปแบบของการสึกหรอเปลี่ยนไปจากเริ่มต้นที่ทุก ๆ สภาวะการทดลอง

3. การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของคู่เฟืองตรงที่มีการสึกหรอ(An analysis of vibration signal of a spur gear pair with tooth wear)[1]

เป็นการศึกษาต่อเนื่องจาก[4],[5] โดยมุ่งสนใจไปที่ชุดเฟืองที่มีการสึกหรอ จุดประสงค์ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบการสึกหรอและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสัญญาณการสั่นสะเทือน ที่ระดับการสึกหรอต่าง ๆ ภายใต้อาการทดลอง

รูปแบบการศึกษา ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองตรงที่หลาย ๆ สถานะ โดยใช้วิธีเก็บสัญญาณ 3 วิธีด้วยกัน คือ การเคลื่อนบนโดเมนความถี่ กระบวนการขยายความละเอียดของสเปกตรัม และการเคลื่อนบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ทำการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน บนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม การทดลองชุดเฟืองจะเริ่มทดลองจากเฟืองที่ไม่มีการสึกหรอดำเนินการต่อเนื่องจนกระทั่งเฟืองนั้นมีระดับการสึกหรอ 83 เปอร์เซ็นต์ การทดลองใช้ความเร็วรอบ 500 RPM และ 800 RPM ในแต่ละความเร็วรอบจะปรับระดับภาระเป็น 2 ระดับ คือ 200วัตต์ และ 340วัตต์ โดยการปรับภาระทางไฟฟ้า

ผลการทดสอบ จากสัญญาณที่เก็บได้ทั้ง 3 วิธีพบว่าค่า Peak และ RMS จะมีค่าที่สูงขึ้นในช่วงแรก ๆ และจะลดต่ำลงในช่วงระยะเวลาถัดมา ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้จากการเก็บค่าสัญญาณแบบเคลื่อนบนโดเมนเวลา และกระบวนการขยายความถี่จะมีค่าใกล้เคียงกัน และสูงกว่าค่าสัญญาณที่เก็บได้จากการเคลื่อนบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ค่าแอมพลิจูดของความถี่ GMF SBP SBG จากสเปกตรัม และฮาร์มอนิกต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงเช่นเดียวกับโดเมนเวลา ฮาร์มอนิกที่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของระบบจะมีลักษณะที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเฟืองมีการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น ส่วนเซปส์ตรัม 1/P จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลงในช่วงถัดมา ค่าสัญญาณฮาร์มอนิก 2/P 3/P และ 1/G ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดเมื่อมีการสึกหรอของเฟืองเพิ่มขึ้น

สรุปผลการทดสอบ จากผลการทดลองพบว่าไม่มีวิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบใดที่ให้ผลการวิเคราะห์สัญญาณได้สมบูรณ์แบบ การวิเคราะห์ควรทำการวิเคราะห์สัญญาณทั้ง 3 โดเมนร่วมกัน ซึ่งวิธีเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดจะทำให้เห็นสเปกตรัมรอบ ๆ $1 \times \text{GMF}$ ได้ชัดเจนทำให้สามารถสังเกตค่าแอมพลิจูดของ SBP SBG ได้ดีขึ้น และการเก็บสัญญาณด้วยการเคลื่อนบนโดเมนเวลาจะทำให้สัญญาณรบกวนถูกลดขนาดลง เมื่อทำการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ และเซปส์ตรัม จะทำให้ค่าสัญญาณรบกวนลดต่ำลงด้วย ทำให้เห็นค่าสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ได้เด่นชัดขึ้น

สมมุติฐานการทดลอง

การสีกหรือของฟันเฟืองจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่แตกต่างจากสภาพการสั่นสะเทือนปกติ สัญญาณการสั่นสะเทือนจะแปรเปลี่ยนตามระดับของการสีกหรือของฟันเฟือง วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนกับระดับการสีกหรือของเฟือง โดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณวิธีต่าง ๆ เพื่อให้สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ดีขึ้น

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบและแนวโน้มต่าง ๆ ของสัญญาณการสั่นสะเทือน ตามระดับการสีกหรือที่แตกต่างกันของเฟือง ภายใต้สภาวะการทดลอง
2. เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบของฟันเฟืองที่เกิดการสีกหรือตามระยะเวลา และวัดอัตราการสีกหรือ ภายใต้สภาวะการทดลอง
3. เพื่อประยุกต์ลักษณะรูปแบบและแนวโน้มต่าง ๆ ของสัญญาณการสั่นสะเทือนกับการทำนายระดับการสีกหรือของชุดเฟือง

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีของการตรวจวัดและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟือง
2. ทำการทดลอง และเก็บผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง ที่มีระดับการสีกหรือต่าง ๆ โดยใช้วิธีการเก็บสัญญาณ 2 วิธี คือ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่(Spectrum Averaging) และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ(Synchronous Time Averaging) และวิเคราะห์สัญญาณใน 3 รูปแบบ คือ สัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม
3. วัดระดับการสีกหรือของฟันเฟือง
4. วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณการสั่นสะเทือน เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือน และระดับการสีกหรือต่าง ๆ ของฟันเฟือง
5. วิเคราะห์หาอัตราการสีกหรือของฟันเฟือง
6. เปรียบเทียบความสามารถของสัญญาณลักษณะต่าง ๆ ในการแยกแยะระดับการสีกหรือของฟันเฟือง

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในชุดเฟือง
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดเฟือง
3. ศึกษารูปแบบความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับเฟือง
4. ศึกษาหลักการของกระบวนการจัดสัญญาณ(Signal Processing)
5. ศึกษาหลักการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging) และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ(Synchronous Time Averaging)
6. ศึกษาความสามารถและข้อจำกัดของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ วิธีวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน และการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือน
7. ศึกษาวิธีวัดโปรไฟล์ของฟันเฟืองจากภาพถ่าย
8. ปรับปรุงชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง
9. ทดลองเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง
10. เปรียบเทียบผลจากสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม ที่ได้จากวิธีการเก็บสัญญาณแต่ละวิธี รวมทั้งเปรียบเทียบผลของความเร็วยรอบ
11. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือน และระดับการสึกหรอ
12. อภิปราย และสรุปผลการทดลอง

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงรูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนไปตามระดับการสึกหรอ และสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ ถึงระดับการสึกหรอของฟันเฟืองในเบื้องต้นได้
2. นำไปสู่การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อติดตามสภาพการทำงานของเครื่องจักร ภายใต้ระบบการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎี

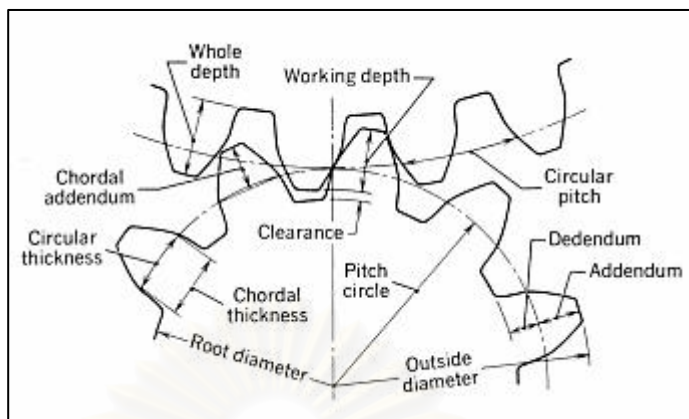
การสั่นสะเทือน (Vibration)

การสั่นสะเทือน คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุ ซึ่งรูปแบบของการเคลื่อนที่อาจจะ เป็นรูปแบบที่แน่นอนหรือเป็นรูปแบบที่ไม่แน่นอนก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบและแรงที่กระทำกับ ระบบนั้น โดยทั่วไปการสั่นสะเทือนเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ แต่มักจะหลีกเลี่ยง ไม่ได้ ในเครื่องจักรการสั่นสะเทือนเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การไม่สมดุลของชิ้นส่วน ของเครื่องจักรที่มีการหมุน การเยื้องศูนย์กลางของชิ้นส่วน การขัดสีของชิ้นส่วน การแตกหักของ ชิ้นส่วน เป็นต้น สาเหตุเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพการ ทำงานของเครื่องจักรลดลง ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรได้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้อง เข้าใจถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนเพื่อที่จะจำกัดการสั่นสะเทือนให้มีค่าน้อยที่สุด การสั่นสะ เทือนสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบด้วยกัน แต่แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้[1],[6]

1. การสั่นสะเทือนแบบอิสระ(Free Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของระบบ ภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบและไม่ได้ถูกกระทำจากแรงภายนอก ระบบจะเกิดการสั่น สะเทือนเท่ากับความถี่ธรรมชาติ(Natural Frequency)ของระบบ เช่น การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของ ลูกตุ้มนาฬิกา เป็นต้น

2. การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้น(Forced Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของ ระบบที่ถูกกระทำด้วยแรงจากภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นไปตามลักษณะของแรงภายนอก และความถี่ที่มากระตุ้น หากความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำนั้นตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ แล้วจะเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์(Resonance) ขึ้น ทำให้ขนาดของความสั่นสะเทือนของระบบมีค่า มากจนอาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้

การสันสะท้อนของระบบเฟือง



รูปที่ 2-1 เฟืองขบกัน จุดพิตช์ และส่วนต่าง ๆ ของเฟืองตรง[7]

การสันสะท้อนของระบบเฟืองเป็นการสันสะท้อนแบบถูกกระตุ้น โดยการกระตุ้นจะมีลักษณะเป็นคาบ ซึ่งถ้าฟันเฟืองคู่ที่ขบกันมีโปรไฟล์เป็นโค้งอินโวลูทที่สมบูรณ์ มีระยะพิตช์คงที่สม่ำเสมอทุกฟัน ไม่มีภาระมากระทำ และหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ จะเกิดการสันสะท้อนที่มีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพัทธ์ของเฟือง และการสันสะท้อนของชุดเฟืองจะมีลักษณะ และความถี่ที่สอดคล้องกับการสันสะท้อนที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต (Static transmission error) หรือด้วยความถี่ GMF ในระบบเฟืองตรงขณะที่ฟันกำลังเคลื่อนขบกัน จะมีฟันที่กำลังเคลื่อนที่เข้ามาขบกัน และฟันที่กำลังเคลื่อนที่ออกจากขบกันอย่างละหนึ่งฟัน โดยเฟืองขับจะเริ่มขบจากรากฟันไปยังปลายฟัน ส่วนเฟืองตามจะขบจากปลายฟันลงมาจากรากฟัน ดังนั้นในแต่ละรอบของสัญญาณการสันสะท้อนบนโดเมนเวลาที่ความถี่ GMF จะเกี่ยวข้องกับโปรไฟล์ที่หน้าสัมผัสของทั้งเฟืองขับและเฟืองตาม ถ้ามีความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่าน (Transmission Error) เกิดขึ้นที่ฟันใดฟันหนึ่งของเฟือง นั่นคือโปรไฟล์หน้าสัมผัสของเฟือง ณ ตำแหน่งนั้นเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะของสัญญาณการสันสะท้อนบนโดเมนเวลาที่รอบการหมุนนั้น ๆ ก็ควรที่จะแตกต่างจากรอบที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่าน และสัญญาณรอบการหมุนนี้จะกลับมาอีกครั้งเมื่อฟันคู่เดิมกลับมาขบกันอีกครั้ง ซึ่งจะเรียกความถี่ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นี้ว่า ความถี่ฮันติงทูธ (Hunting Tooth Frequency)

ในสภาวะการทำงานจริงเฟืองต้องรับภาระขณะเคลื่อนที่ โดยในแต่ละคู่ฟันเฟืองที่มีการขบกันจะเกิดการโก่งตัวขึ้นสืบเนื่องจากภาระ (Tooth Deflection) ที่เปลี่ยนแปลงเป็นคาบเท่ากับการขบกันของเฟือง การขบกันของฟันเฟืองในแต่ละครั้งจะเกิดการเสียดสีกันของฟันเฟืองทำให้เกิดการสึกหรอขึ้นที่ผิวของฟันเฟืองตามโค้งอินโวลูท ทำให้โค้งอินโวลูทเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่งผลให้คาบในการโก่งตัวของฟันเฟืองเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเฟืองสึกหรอมากขึ้น ช่องว่างระหว่างฟันเฟืองคู่ที่ขบ

กัน(Backlash) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ฟันเฟืองมีโอกาสหลุดจากการสัมผัสกันและเกิดการกระแทกได้ง่ายขึ้น ระดับการสั่นสะเทือนจะมีค่าที่สูงขึ้นด้วย โดยทฤษฎีการไถระหว่างฟันจะเกิดที่ทุก ๆ จุดยกเว้นที่จุดพิตช์ (Pitch Point) ดังนั้นที่จุดพิตช์จะเป็นจุดที่ไม่เกิดการสึกหรอ [8] แต่ในทางปฏิบัติจุดพิตช์อาจจะเป็นจุดที่เกิดการสึกหรอน้อยที่สุดบน โพรไฟล์หรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของชุดเฟืองนั้น ๆ

การสึกหรอทำให้ระดับของการสั่นสะเทือนของระบบเฟืองสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการหลุดจากการสัมผัสกันได้ง่ายขึ้น เมื่อเฟืองหลุดจากการสัมผัสแล้วกลับมาสัมผัสกันใหม่จะเกิดการกระแทกกันเฟืองแต่ละตัวจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ นอกจากสาเหตุจะมาจากความไม่สมบูรณ์ของเฟืองแล้วการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองยังขึ้นกับการติดตั้งระบบที่เฟืองไปขับเคลื่อน มอเตอร์ต้นกำลัง และการติดตั้งเพลาคับ เนื่องจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนไม่สามารถวัดได้โดยตรงที่เฟืองแต่การวัดจะต้องวัดผ่านตลับยึดแบริง(Bearing Housing) ทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้มาจากการสะสมการสั่นสะเทือนของส่วนต่าง ๆ มาที่จุดที่ทำกรวัดได้ ดังนั้นรูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจึงมักจะซับซ้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของระบบเฟือง [9],[10]

สมการการสั่นสะเทือนของระบบเฟืองมีพื้นฐานมาจากสมการการเคลื่อนที่ของระบบเฟืองในขณะที่เฟืองขบกัน ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่รอบแกนหมุนของเพลาคความซับซ้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการโค้งตัวของเฟืองทำให้มีโปรไฟล์เบี่ยงเบนไปจากโค้งอินโวลูท ทำให้การเคลื่อนที่เชิงมุมของเฟืองคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ถูกต้อง มีการพยายามสร้างสมการการเคลื่อนที่เชิงมุมของเฟืองและจัดให้อยู่ในรูปของความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่ ผลเฉลยที่ได้นั้นมีความซับซ้อนอย่างมาก จึงได้มีการจำลองสัญญาณขึ้นมาจากสมการเพื่อเลียนแบบสัญญาณที่ได้จากการทดลองจริงให้มีลักษณะใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของเฟืองมากที่สุด โดยสมการดังกล่าวจะอยู่ภายใต้สมมุติฐานดังนี้

- 1) ชุดเฟืองมีระยะพิตช์เท่ากันทุกฟัน
- 2) มีความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์เบี่ยงเบนไปจาก โค้งอิน โวลูทเท่ากันทุกฟัน
- 3) มีความเร็วรอบที่คงที่
- 4) รับภาระคงที่

กำหนดพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

$x(t)$	สัญญาณการสั่นสะเทือนโดยเป็นสัญญาณแบบความเร่ง
X_n	แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่ฮาร์โมนิกที่ n
$am_n(t)$	ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
$fm_n(t)$	ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่

A_{np}	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
F_{ns}	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
f_m, f_r	ความถี่ของฟังก์ชันมอดูเลต
φ_n	มุมเฟสฮาร์โมนิกที่ n ของสัญญาณการสั่นสะเทือน
α_{np}, β_{np}	มุมเฟสฮาร์โมนิกที่ n ของฟังก์ชันมอดูเลต

สมการการสั่นสะเทือนของเฟืองเมื่อยังไม่มีควมบกพร่องเกิดขึ้นหรือยังไม่ถูกมอดูเลต

$$x(t) = \sum_{n=0}^N X_n \cos[2\pi n f_m t + \varphi_n] \quad (2-1)$$

เมื่อเฟืองเกิดข้อบกพร่องขึ้น เช่น การสึกหรอ หรือเกิดความเสียหายในรูปแบบต่าง ๆ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะถูกนิยามโดยฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ ฟังก์ชันมอดูเลตอาจจะแตกต่างกันไปตาม n เนื่องจากการมอดูเลตมีลักษณะที่เป็นคาบตามความเร็วรอบของเฟือง ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแสดงโดยใช้นุกรมฟูรีเยร์ดังต่อไปนี้

$$am_n(t) = \sum_{p=0}^P A_{np} \cos[2\pi p f_r t + \alpha_{np}] \quad (2-2)$$

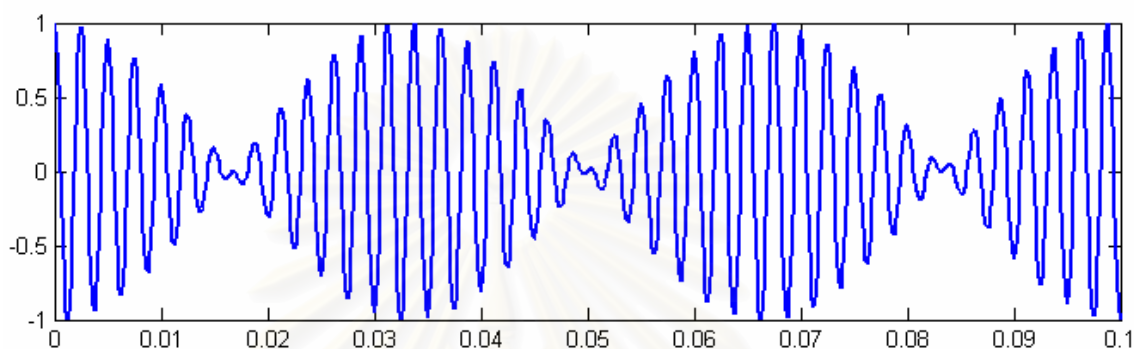
$$fm_n(t) = \sum_{s=0}^S F_{ns} \cos[2\pi s f_r t + \beta_{np}] \quad (2-3)$$

โดยปกติแล้วสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะมีทั้งการมอดูเลตทางแอมพลิจูด และความถี่รวมกันอยู่ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{n=0}^N X_n [1 + am_n(t)] \cos[2\pi n f_m t + \varphi_n + fm_n(t)] \quad (2-4)$$

สัญญาณการสั่นสะเทือน และแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปของโดเมนเวลา ซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่โดยการแปลงแบบฟูรีเยร์ของสัญญาณดังกล่าว และสามารถทำให้อยู่ในรูปของโดเมนคิวเฟรนซีหรือเซปส์ตรัมได้โดยการแปลงกลับแบบฟูรีเยร์ของลอการิทึมของสัญญาณบนโดเมนความถี่

รูปที่ 2-2 แสดงลักษณะของสัญญาณจำลองที่ได้จากสมการการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลา โดยเมื่อสัญญาณการสั่นสะเทือนมีการมอดูเลตขึ้น สัญญาณจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อคลื่นพาหะ(Carrier Frequency) และคลื่นมอดูเลตมีเฟสตรงกันสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกันทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่าลดลง

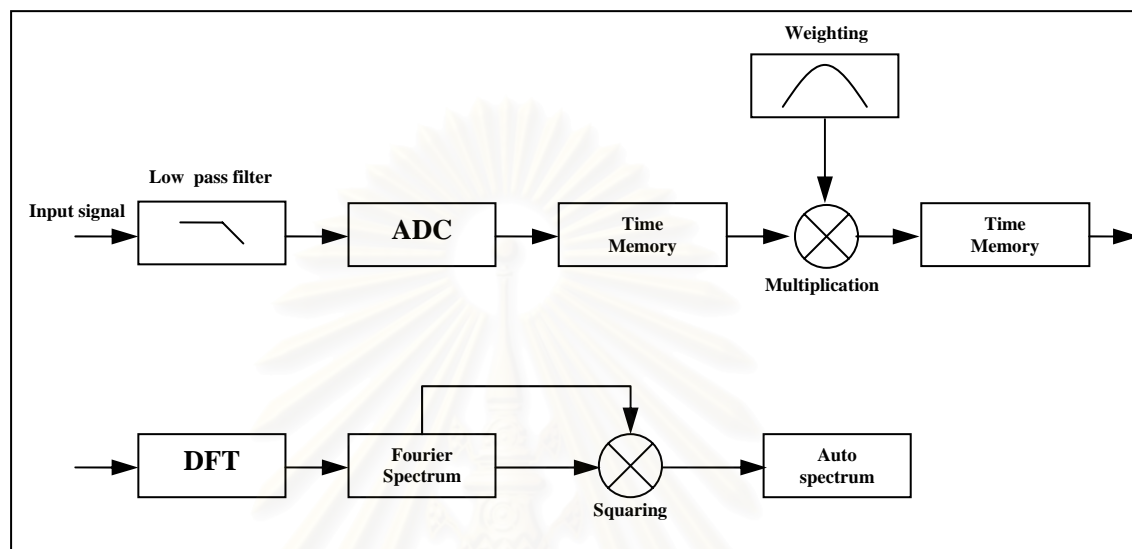


รูปที่ 2-2 สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT (Fast Fourier Transform) โดยทั่วไปแล้วจะมีกระบวนการเก็บสัญญาณและวิเคราะห์สัญญาณดังรูปที่ 2-3

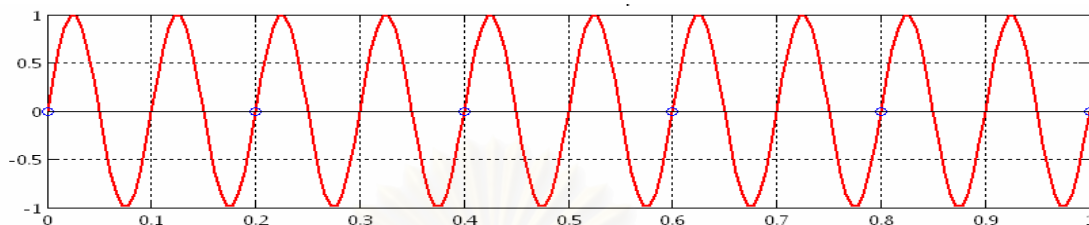


รูปที่ 2-3 แผนผังแสดงกระบวนการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT [11]

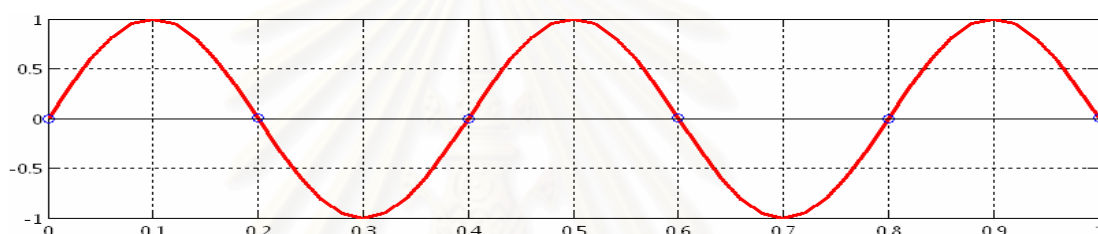
สัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog) ที่รับมาจากตัวตรวจรู้ชนิดวัดความเร่งและเครื่องขยายประจุ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital) ด้วยตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D Converter) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างข้อมูล (Sampling) และการหาขนาดของสัญญาณ (Quantification) ถ้าความถี่ของการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Frequency) ข้อมูลไม่สูงพอ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะแปลความหมายของข้อมูลผิดพลาด

โดยรูปที่ 2-4(ก) แสดงข้อมูลที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่มีลักษณะเป็นสัญญาณของคลื่นไซน์โดยความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าเป็น 0.5 เท่าของความถี่สัญญาณ เมื่อเครื่องวิเคราะห์นำข้อมูลที่เกิดจากการสุ่มไปเขียนกราฟจะให้ผลดังรูปที่ 2-4(ข) ซึ่งให้ค่าของความถี่เป็น 0.25 เท่าของความถี่ข้อมูลหรือในรูปที่ 2-4(ค) ใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าเป็น 0.7 เท่าของความถี่สัญญาณ เมื่อเครื่องวิเคราะห์นำข้อมูลที่เกิดจากการสุ่มไปเขียนกราฟจะให้ผลดังรูปที่ 2-4(ง) ซึ่งให้ค่าของความถี่เป็น 0.3 เท่าของความถี่ข้อมูล ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดการผันกลับ (Aliasing) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลและใช้ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่เรียกว่าตัวกรองต่อต้านการผันกลับ (Anti-aliasing Filter) กรองสัญญาณก่อนที่จะทำการแปลงสัญญาณให้เป็นดิจิทัลเพื่อกรองเอาความถี่ที่สูงกว่าความถี่ตัดออก (Cut-off Frequency) ทิ้งไป โดยปกติแล้วความถี่ในการ

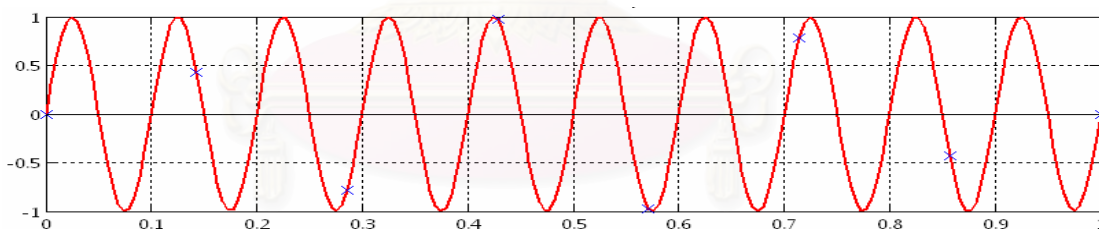
สุ่มตัวอย่างข้อมูลจะต้องมากกว่า 2 เท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณที่พิจารณา เพื่อให้การสุ่มตัวอย่างข้อมูลมากกว่า 2 ครั้งต่อหนึ่งรอบการสั่นซึ่งเรียกหลักการนี้ว่าเกณฑ์ของไนควิสต์ (Nyquist Criterion) โดยความถี่ที่เท่ากับครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency, f_n)



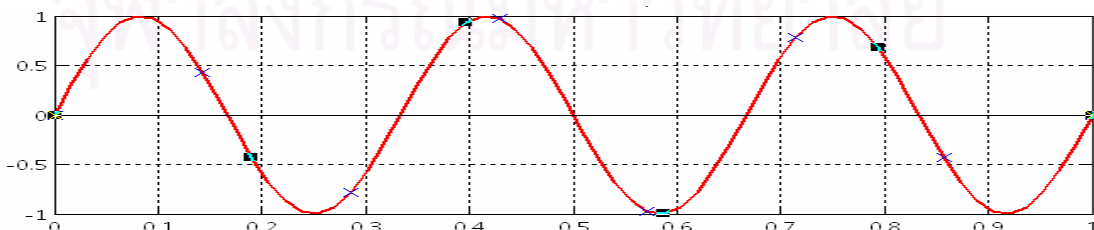
รูปที่ 2-4(ก) ข้อมูลที่ใช้ในการสุ่มโดยมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าเป็น 0.5 เท่าของความถี่สัญญาณ



รูปที่ 2-4(ข) สัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลด้วยความถี่ 0.5 เท่าของความถี่สัญญาณ



รูปที่ 2-4(ค) ข้อมูลที่ใช้ในการสุ่มโดยมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าเป็น 0.7 เท่าของความถี่สัญญาณ



รูปที่ 2-4(ง) สัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลด้วยความถี่ 0.7 เท่าของความถี่สัญญาณ

รูปที่ 2-3 การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด

ตัวกรองสัญญาณมีคุณลักษณะค่อย ๆ ลดลงที่ความถี่เหนือความถี่ตัดออก เช่น 12 dB/Octave ในกรณีเครื่องวิเคราะห์ Brüel & Kjaer รุ่น 2035 จึงมีความเป็นไปได้ที่บางข้อมูลบริเวณความถี่ใกล้ๆ กับขอบเขตด้านบนของช่วงความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์ (Frequency Span) จะถูกปะปนด้วยข้อมูลผันกลับ ดังนั้นเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจึงกำหนดความถี่การสุ่มตัวอย่างข้อมูลเป็น 2.56 เท่า ของความถี่ตัดออกของตัวกรองต่อต้านการผันกลับ (2.56 เท่า ของความถี่สูงสุดที่ต้องการวิเคราะห์)

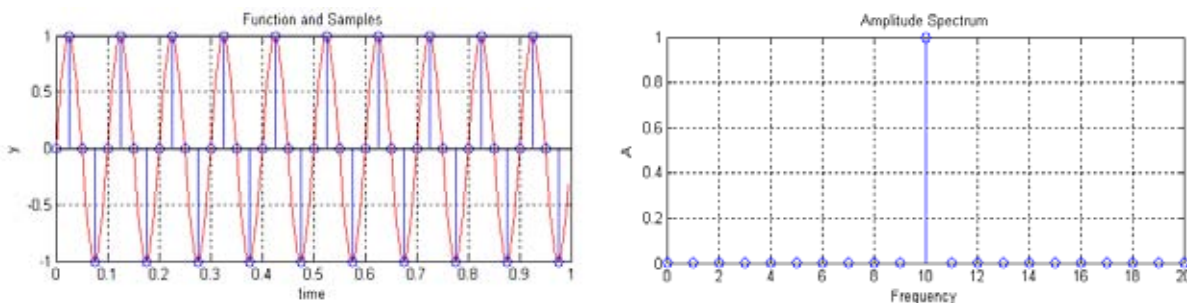
หลังจากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งอยู่ในรูปของเลขฐานสอง เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT ส่วนใหญ่ใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ 12 บิต (12 Bit A/D Converter) ทำให้มีความจำแนกชัด(resolution) เท่ากับ $1/4065$ เท่า หรือมีพิสัยทางพลศาสตร์ (Dynamic Range) เท่ากับ 72 dB จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปเก็บในหน่วยความจำเวลาเพื่อรอการนำไปใช้ต่อไป ถ้าต้องการแสดงสัญญาณบนโดเมนเวลาเครื่องวิเคราะห์จะนำข้อมูลเหล่านี้ออกมาแสดงได้ทันที โดยอาศัยการประมาณภายในช่วง (Interpolation) สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมหรือสัญญาณบน โดเมนความถี่ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปแปลง FFT ต่อไป

ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting Function)

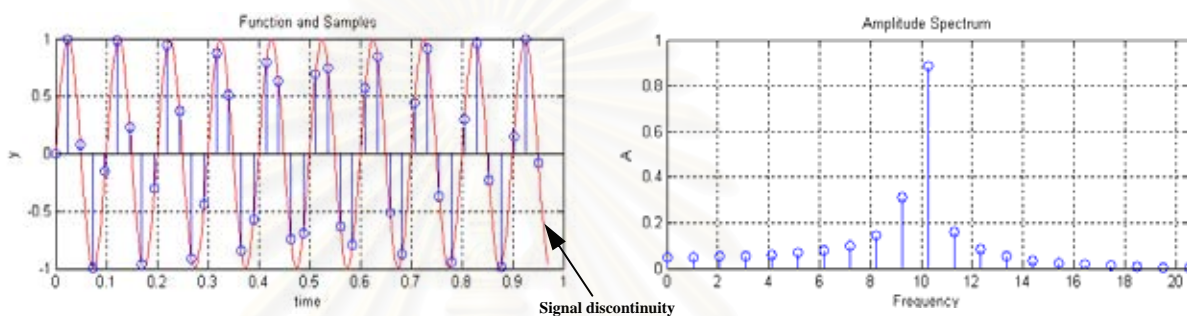
ในการวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT สัญญาณที่นำมาวิเคราะห์จะมีลักษณะเป็นคาบ และมีคาบรากฐาน (Fundamental Period) เท่ากับ T ตามขนาดช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณที่เรียกว่าหน้าต่างเวลา (Time Window) ซึ่งหมายความว่าสัญญาณประกอบขึ้นในรูปองค์ประกอบความถี่ของอนุกรมฟูริเยร์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่รากฐาน (Fundamental Frequency, f_0)

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{N} f_s \quad (2-5)$$

การวิเคราะห์สัญญาณจะทำได้ดี ถ้าสัญญาณมีองค์ประกอบความถี่สูงกว่า f_0 เป็นจำนวนเท่าที่ลงตัว สัญญาณในหน้าต่างเวลาเป็นตัวแทนของสัญญาณจริงทั้งหมด เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะสมมติให้สัญญาณจริงที่ทำการวัดมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ปรากฏในหน้าต่างเวลาเรียงต่อกัน ทั้งในช่วงเวลาก่อนหน้าและภายหลังหน้าต่างเวลา สัญญาณที่ได้มักมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของ f_0 ที่ไม่ลงตัวทำให้ได้สัญญาณที่ไม่เต็มรอบการสั่นเกิดความไม่ต่อเนื่องทั้งขนาดและมุมเฟสที่รอยต่อของหน้าต่างเวลา ทำให้เกิด การรั่วเนื่องจากการกรองสัญญาณ (Filter Leakage) และเมื่อวิเคราะห์สัญญาณจะเกิดยอดสเปกตรัมที่ความถี่อื่นเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของหน้าต่างเวลาเพิ่มเข้ามา ดังรูปที่ 2-5 สัญญาณคลื่นไซน์จะมีคาบของสัญญาณบรรจุลงในหน้าต่างของเวลาได้พอดี ในขณะที่สัญญาณคลื่นไซน์ รูปที่ 2-6 มีความถี่ต่างไปเล็กน้อย



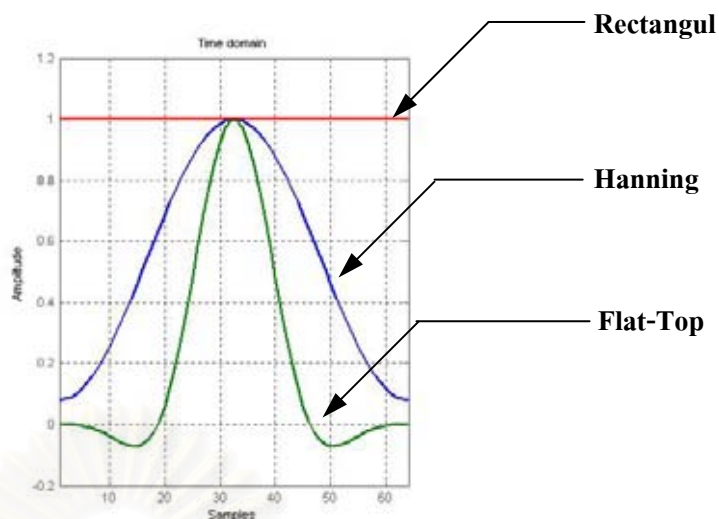
รูปที่ 2-5 สัญญาณที่มีคาบของสัญญาณบรรจุลงในหน้าต่างของเวลาได้พอดี



รูปที่ 2-6 การรั่วของสัญญาณเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของหน้าต่างของเวลา

ปัญหาการรั่วของสัญญาณสามารถแก้ไขได้ โดยเลือกฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมในการเก็บสัญญาณ ชนิดของฟังก์ชันที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณและผลที่ต้องการ ฟังก์ชันที่นิยมใช้มีดังนี้

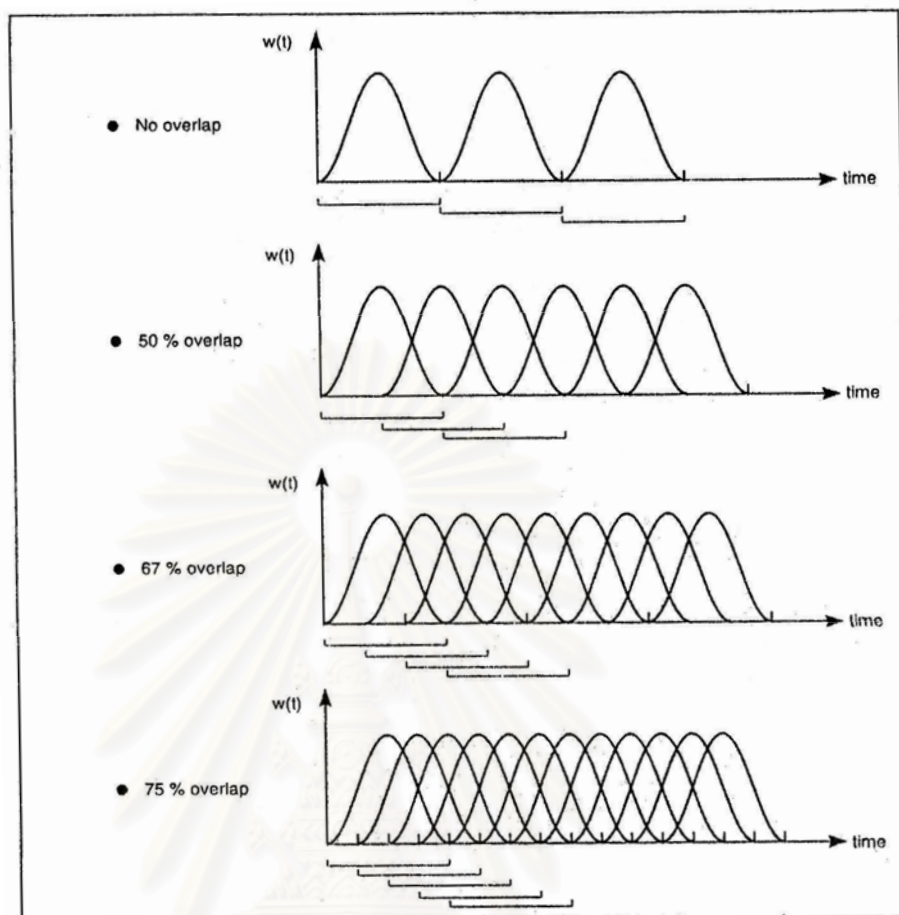
- ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Rectangular Function) เหมาะสำหรับสัญญาณประเภทชั่วคราวเพื่อให้น้ำหนักกับสัญญาณเท่ากันตลอดช่วง มีรูปแบบตามรูปที่ 2-7 ให้ความถี่ที่แม่นยำ
- ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning Function) เหมาะสำหรับสัญญาณที่ต้องการความละเอียด (Resolution) สูง ให้น้ำหนักกับช่วงกลาง ๆ ของระยะเวลาที่วัด มีรูปแบบตามรูปที่ 2-7 ให้ความแม่นยำของความถี่และแอมพลิจูดปานกลาง
- ฟังก์ชันแฟลต-ท็อป (Flat-Top Function) เหมาะสำหรับสัญญาณที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำของขนาดค่าแอมพลิจูด เช่นการวัดสัญญาณเพื่อการสอบเทียบอุปกรณ์วัด (Calibration) มีรูปแบบของหน้าต่างตามรูปที่ 2-7 ให้อะมพลิจูดที่แม่นยำ



รูปที่ 2-7 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก

โอเวอร์แล็ป (Overlap)

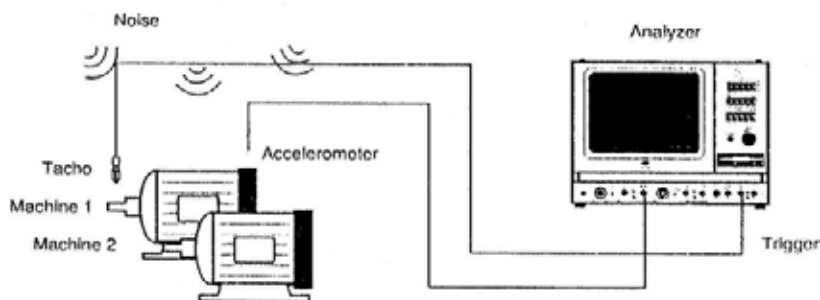
ในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละคาบ จะได้ลักษณะของสัญญาณสุ่มรวมกันซึ่งทำให้ได้สัญญาณที่ไม่เท่ากัน เพื่อเพิ่มความเชื่อถือของสัญญาณที่ได้มานั้นจึงใช้สัญญาณที่วัดได้จากหลาย ๆ ครั้งมาเฉลี่ยกัน โดยใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักมาคูณเข้ากับสัญญาณในการเก็บสัญญาณแต่ละครั้ง ซึ่งฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักส่วนใหญ่จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงต้นและช่วงปลายของสัญญาณทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง การเก็บสัญญาณแบบโอเวอร์แล็ปจึงมีส่วนช่วยในการลดความคลาดเคลื่อนจากการใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ซึ่งจะใช้ข้อมูลร่วมกันบางส่วนระหว่างการวัดสัญญาณครั้งปัจจุบันและการวัดสัญญาณครั้งถัดไป โดยเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์แล็ปมีหลายระดับ เปอร์เซ็น โอเวอร์แล็ปมากแสดงถึงการใช้ข้อมูลร่วมกันมากและลดระยะเวลาในการเก็บสัญญาณมากขึ้น



รูปที่ 2-8 การ โอเวอร์แล็ปของสัญญาณระดับต่าง ๆ [11]

การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)

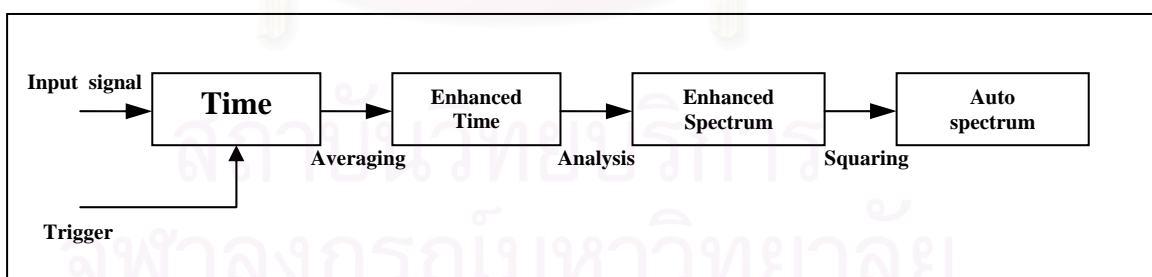
การเฉลี่ยบน โดเมนเวลาเข้าจังหวะเป็นการเก็บสัญญาณอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งนำสัญญาณบน โดเมนเวลาที่ตำแหน่งองศาของการหมุนที่ตรงกันในแต่ละรอบการหมุนของเพลามาหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณองศาการหมุนนั้น ๆ การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะเป็นการเก็บสัญญาณที่ช่วยให้สามารถจัดสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณแบบคาบที่ต้องการวิเคราะห์ สัญญาณรบกวนในที่นี้คือสัญญาณการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ที่มีได้มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่รอบหมุนของเพลาสั่นใจซึ่งอาจหมายถึงความถี่ธรรมชาติ สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลานในเครื่องจักรเดียวกันแต่มีอัตราทดที่ไม่เป็นตัวเลขที่ลงตัวกับเพลาสั่นใจ หรือการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรอื่น ๆ ใกล้เคียงหรือสัญญาณรบกวนที่มาจากเครื่องมือวัด เป็นต้น โดยสัญญาณรบกวนอาจมีลักษณะเป็นคาบหรือแบบสุ่มก็ได้ ทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) มีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถกำจัดได้หมดแต่ก็สามารถลดขนาดของสัญญาณรบกวนลงได้ประมาณ 20-40 dB ขึ้นอยู่กับจำนวนการเฉลี่ยที่เลือกใช้



รูปที่ 2-9 การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ [11]

การเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะเริ่มเก็บข้อมูลเมื่อได้รับสัญญาณพัลส์ ซึ่งเป็นตัวทริกเกอร์ (Trigger) จากภายนอก โดยจะเก็บสัญญาณจนครบรอบคาบหรือหน้าตาการเก็บสัญญาณ เมื่อได้รับสัญญาณพัลส์ครั้งต่อไปก็จะเริ่มเก็บสัญญาณใหม่ที่จุดเริ่มต้นเดิม สัญญาณพัลส์นี้สามารถสร้างขึ้นได้จากแทกโคมิเตอร์ (Tachometer) แบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงอินฟราเรด ซึ่งจะสร้างพัลส์เมื่อการสะท้อนกลับของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป ณ บริเวณร่องลึ้มหรือแผ่นสะท้อนแสงที่อยู่บนเพลลาของเครื่องจักรที่ต้องการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน การเริ่มเก็บสัญญาณแต่ละครั้งจึงสามารถเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการหมุนเดียวกันได้

เมื่อเก็บสัญญาณชุดแรกมาแล้วข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำ จากนั้นเครื่องวิเคราะห์จะรอสัญญาณทริกเกอร์ครั้งต่อไปเพื่อเริ่มเก็บสัญญาณครั้งที่สอง แล้วนำข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ได้มาเฉลี่ยกับข้อมูลชุดแรกแล้วเก็บบันทึกไว้ จากนั้นนำไปแปลงแบบ FFT ต่อไป



รูปที่ 2-10 แผนผังแสดงกระบวนการทำงานการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ[11]

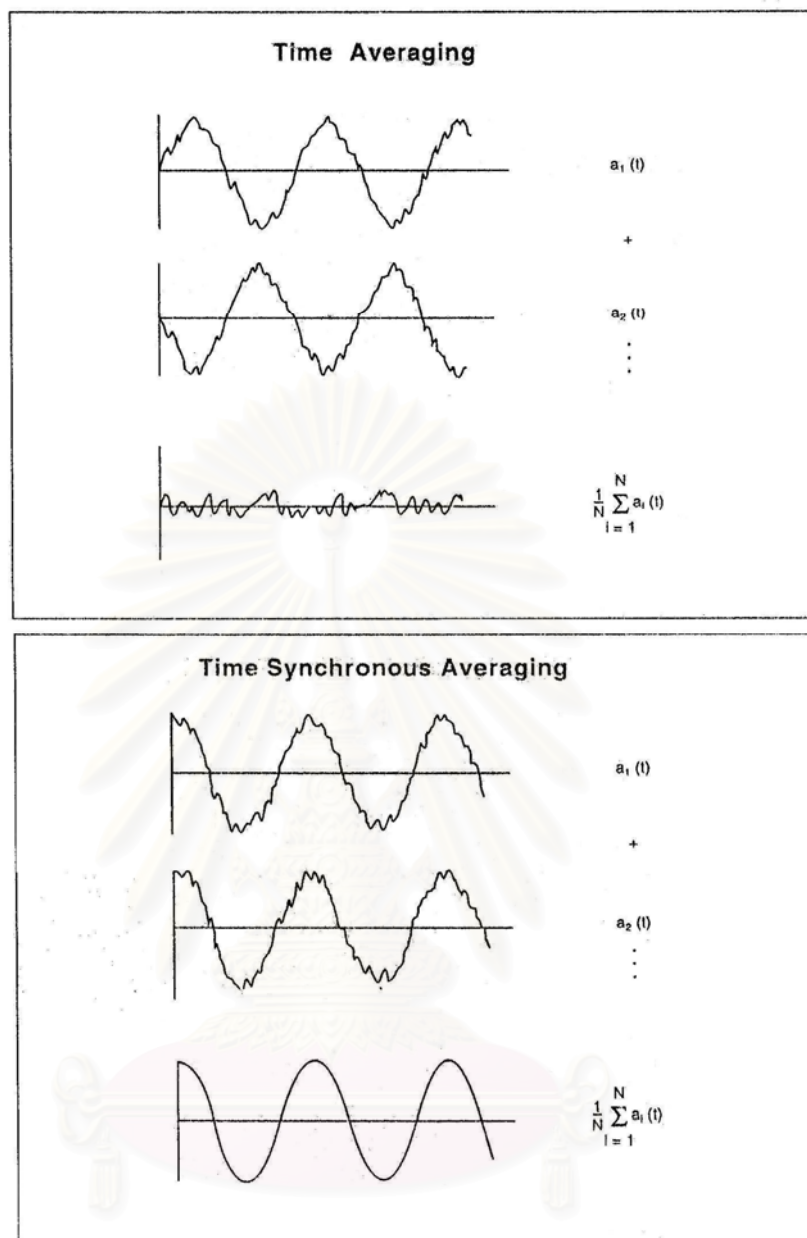
จำนวนชุดสัญญาณที่นำมาเฉลี่ยกันนั้นมีผลต่อความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ถ้าสมมติให้มีจำนวนชุดสัญญาณทั้งหมด N_A ชุดจะทำให้สัญญาณรบกวนบนโดเมนเวลา มีขนาดลดลง $1/\sqrt{N_A}$ เท่า เมื่อเทียบกับสัญญาณบนโดเมนเวลาเพียงชุดเดียว ในขณะที่สัญญาณ

สเปกตรัมซึ่งเป็นแบบอโตสเปกตรัมสัญญาณรบกวนจะมีขนาดลดลง $1/N_A$ เท่า และมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการเปลี่ยนบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

N_A	$10\log_{10}(N_A)$
10	10 dB
100	20 dB
1,000	30 dB
10,000	40 dB
32,767	45 dB

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-11 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ยบน โดเมนเวลา และสัญญาณที่ได้จากวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ [11]

การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมีลักษณะความเป็นตัวกรองความถี่ตรงกับการกรองแบบหวี (Comb Filtering) ที่มีความถี่ศูนย์กลางซ้อนทับกันกับทุก ๆ เส้น จึงไม่ต้องใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักคูณกับข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาก่อนนำมาแปลงแบบ FFT

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration signal analysis)

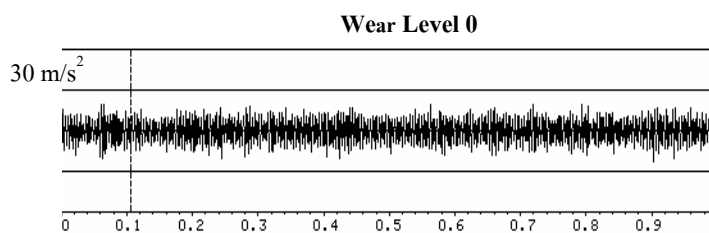
โดยทั่วไปสัญญาณการสั่นสะเทือนจะอยู่บนโดเมนของเวลา ส่วนสัญญาณการสั่นสะเทือนรูปแบบอื่น ๆ ได้จากการแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาด้วยคณิตศาสตร์ ซึ่งมีหลายวิธีการเช่น การแปลงฟูริเยร์ การคำนวณพารามิเตอร์ทางสถิติ การแปลงเวฟเลต(wavelet) เป็นต้น ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถที่จะวิเคราะห์ได้ในหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของการสั่นสะเทือน สัญญาณแต่ละชนิดมีรูปแบบที่แตกต่างกัน พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงแตกต่างกันด้วยการที่จะใช้วิธีการใดในการวิเคราะห์นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์วัด เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ เครื่องจักรที่ต้องการวัด รวมทั้งข้อมูลที่ต้องการได้จากสัญญาณ เนื่องจากการวิเคราะห์แต่ละวิธีมีขีดจำกัด การใช้การวิเคราะห์หลาย ๆ วิธีร่วมกันจึงช่วยให้การวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา

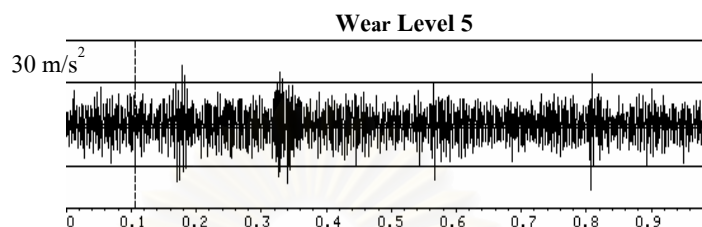
สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาจะแสดงแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนของการกระจัด ความเร็ว หรือความเร่ง ในช่วงเวลาที่ทำการวัดสัญญาณ โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของเวลาจะพิจารณาจากผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) ของระบบที่พิจารณา

ในการเคลื่อนที่ของระบบเฟือง สมการการเคลื่อนที่และผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนจะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก จึงได้มีการจำลองสัญญาณขึ้นจากการทดลองวัดสัญญาณจริง เพื่อให้ได้สมการที่มีลักษณะใกล้เคียงการสั่นสะเทือนจริงของเฟืองมากที่สุด ซึ่งเป็นไปดังสมการที่ 2-4

ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการวัดจะมีความซับซ้อนมาก เนื่องมาจากเกิดการมอดูเลตทั้งแอมพลิจูดมอดูเลชันและมอดูเลชันของความถี่ขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นการยากที่จะวิเคราะห์หาสาเหตุของความบกพร่องที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากไม่สามารถสังเกตเห็นความถี่พื้นฐานและความถี่มอดูเลชันของสัญญาณได้ การวิเคราะห์ที่สามารถทำได้ คือ การพิจารณาขนาดแอมพลิจูดโดยรวมของสัญญาณจากเครื่องวัดสัญญาณและนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณในรูปแบบเดียวกันของชิ้นส่วนดังกล่าวที่มีสภาพสมบูรณ์



(ก) เฟืองในสภาพสมบูรณ์



(ข) เฟืองที่เกิดการสึกหรอ

รูปที่ 2-12 การเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองบน โดเมนเวลา ที่สภาวะ 500 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging [1]

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่ได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนเวลา มีอยู่หลายชนิดด้วยกันเช่น ระดับค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Peak) ระดับค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square , RMS) และ ค่าcrestแฟคเตอร์ (Crest Factor)

1. ค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Peak, X_{max}) คือ ค่าการสั่นสะเทือนที่มีระดับสูงสุดในช่วงเวลาที่ทำการวัดสัญญาณ โดยอาจเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ
2. ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square , RMS) คือ ค่าการสั่นสะเทือนโดยรวมสามารถคำนวณได้จากการนำเอาข้อมูลเวลาในแต่ละจุดมายกกำลังสองแล้วทำการเฉลี่ย และถอดรากที่สอง ดังสมการ

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} X_i^2}{N}} \quad (2-6)$$

3. ค่าcrestแฟคเตอร์ (Crest Factor) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าแอมพลิจูดสูงสุด และ ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส เพื่อทำให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ที่ไร้หน่วย (Normalized) จึงสามารถนำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณชนิดอื่นได้ ถ้าสัญญาณมีค่าcrestแฟคเตอร์สูงกว่าสัญญาณในกรณีที่เครื่องจักรมีสภาวะปกติ แสดงว่าสัญญาณจะมีพัลส์เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด (Shock Pulse) เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากความบกพร่องที่เกิดขึ้นในเครื่องจักร

$$\text{Crest Factor} = \frac{X_{\max}}{\text{RMS}} \quad (2-7)$$

4. ค่าเคอร์โทซิส (Kurtosis, kurt) คือ พารามิเตอร์ทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 ของสัญญาณการสั่นสะเทือน ใช้สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function) ฟังก์ชันชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการกระจายตัวของแอมพลิจูดสัญญาณค่าเคอร์โทซิสหาได้จากสมการ 2-8

$$\text{kurt} = \frac{m_4}{(\sqrt{m_2})^4} \quad (2-8)$$

โดยที่ โมเมนต์อันดับที่ 2, $m_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2$
 โมเมนต์อันดับที่ 4, $m_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^4$

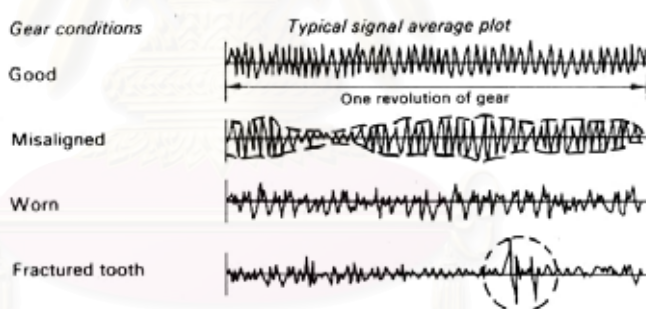
จากสมการจะเห็นได้ว่าโมเมนต์อันดับที่ 2 ก็คือค่าความแปรปรวนของแอมพลิจูดสัญญาณนั่นเอง ในรูปที่ 2-12 คือค่าของเคอร์โทซิสโดยประมาณตามลักษณะของสัญญาณบนโดเมนเวลา

Waveform	Kurtosis coefficient
Square wave	1.0
Sine	1.5
Random	3.0
Random + impulsive	> 3.0

รูปที่ 2-13 ค่าเคอร์โทซิสสำหรับรูปแบบสัญญาณต่าง ๆ [1]

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบน โดเมนเวลาแสดงถึงระดับของการสั่นสะเทือนโดยรวม จึงไม่สะดวกต่อการจำแนกสาเหตุของความเสียหาย ดังนั้นสัญญาณบน โดเมนเวลาจึงถูกใช้วิเคราะห์ แนวโน้มหรือเป็นเพียงตัวบ่งชี้ระดับการสั่นสะเทือนเบื้องต้น โดยเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์หรือเทียบกับระดับการสั่นสะเทือนตามสภาวะมาตรฐาน

นอกจากการวิเคราะห์สัญญาณบน โดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชนิดข้างต้นแล้ว ในบางกรณีการสังเกตลักษณะความเป็นคาบของพัลส์แบบทันทีทันใด หรือการมอดูเลตด้วยความถี่ต่ำก็สามารถช่วยบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการสังเกตลักษณะดังกล่าวในสัญญาณบน โดเมนเวลานั้นทำได้ยากเนื่องจากภาพสัญญาณที่แสดงเป็นสัญญาณชุดสุดท้ายเพียงชุดเดียว สัญญาณรบกวนที่ยังไม่ได้ถูกขจัดออกไปอาจจะบดบังลักษณะดังกล่าวทำให้กว่าจะสามารถตรวจพบพัลส์หรือการมอดูเลตสัญญาณได้ก็ต่อเมื่อความผิดปกติรุนแรงจนถึงขั้นวิกฤตแล้ว ในขณะที่การเปลี่ยนบน โดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้การสังเกตสัญญาณบน โดเมนเวลาทำได้ง่ายขึ้นสามารถทำนายลักษณะของความเสียหายได้ ดังเช่นในรูปที่ 2-14 และยังสามารถระบุตำแหน่งของความเสียหายได้ในกรณีความบกพร่องเฉพาะที่ เช่น ฟันเฟืองแตกร้าว โดยการหาขนาดของมุมที่นับจากตำแหน่งที่คิดแผ่นสะท้อนแสงหรือร่องลึ้มที่สัมพันธ์กับระยะเวลาที่พัลส์แรกเกิดขึ้นนับจากเวลาที่ศูนย์



รูปที่ 2-14 ผลของสภาพเฟืองที่มีต่อสัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนเวลา [1]

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนความถี่

สัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนความถี่ ในแกนตั้งจะแสดงแอมพลิจูดของการกระจัด ความเร็ว หรือ ความเร่ง และแกนนอนจะเป็นความถี่ของการสั่นสะเทือน โดยจะเรียกสัญญาณบน โดเมนความถี่ว่าสเปกตรัม ในทางคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนของความถี่ได้มาจากการแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนเวลาแบบฟูริเยร์ (Fourier Transform) ซึ่งมีหลักการว่าสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบ (Periodic Signal) ทุกชนิดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลบวกของคลื่นไซน์ (Sine Wave) ได้โดยที่คลื่นไซน์แต่ละคลื่นนั้นมีแอมพลิจูดและความถี่ต่าง ๆ กัน รูปแบบสมการดังต่อไปนี้

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (2-9)$$

เรียกสัมประสิทธิ์ a_n และ b_n ว่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ (Fourier Coefficients)

โดยที่

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

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

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

(2-10)

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

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์โดยเครื่องวิเคราะห์ทำได้ด้วยวิธีการทางตัวเลข จากจุดข้อมูล N จุด ในช่วงคาบเวลา T แทนที่การอินทิเกรตด้วยการรวมข้อมูล และแทน dt ด้วยระยะเวลาระหว่างแต่ละจุดข้อมูล $\Delta t = T/N$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ 2-10 ใหม่ได้ดังนี้

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

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \cos \frac{2n\pi t_i}{T}$$

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

(2-11)

อนุกรมฟูรีเยร์สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลได้เนื่องจาก

$$\cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \quad \text{และ} \quad \sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$

(2-12)

เมื่อนำสมการ 2-12 แทนลงในสมการ 2-9 จะสามารถเขียนฟังก์ชัน $x(t)$ ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n (e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}) - jb_n (e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}) \right] \\ &= \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[(a_n - jb_n) e^{jn\omega t} + (a_n + jb_n) e^{-jn\omega t} \right] \end{aligned} \quad (2-13)$$

ถ้าให้นิยามสัญลักษณ์ใหม่ดังนี้

$$X_0 = \frac{a_0}{2}, \quad X_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n), \quad X_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n) \quad (2-14)$$

โดยที่

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

เมื่อ X_{-n} เป็นคอนจูเกตเชิงซ้อน (Complex Conjugate) ของ X_n สมการ 2-9 สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n e^{jn\omega t} \quad (2-15)$$

เรียก X_n ว่า สเปกตรัมของฟูริเยร์ (Fourier Spectrum) และสามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการ 2-10 และ 2-14 ดังนี้

$$\begin{aligned} X_n &= \frac{1}{2}(a_n - jb_n) = \frac{1}{T} \left[\int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt - j \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \right] \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t) [\cos(n\omega t) - j \sin(n\omega t)] dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jn\omega t} dt \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2-16)$$

สมการ 2-15 และ 2-16 สามารถนำไปใช้กับสัญญาณแบบคาบได้ ยังสามารถขยายผลการใช้สมการ 2-15 และ 2-16 ไปยังกรณีทั่วๆ ไปได้ โดยให้ $T \rightarrow \infty$ ซึ่งจะทำให้ระยะห่าง $1/T$ ระหว่างแต่ละ

ฮาร์มอนิกเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจะได้สเปกตรัม X กลายเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีความถี่ $f = \omega/2\pi$ ซึ่งจะทำให้สมการ 2-15 และ 2-16 กลายเป็น

$$X^*(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-17)$$

$$x^*(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X^*(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (2-18)$$

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

เครื่องหมายดอกจันในสมการ 2-17 และ 2-18 สามารถละทิ้งได้ เรียกสมการ 2-17 นี้ว่า การแปลงไปข้างหน้าแบบฟูริเยร์ (Forward Fourier Transform) ในขณะที่เรียกสมการ 2-18 ว่าการแปลงกลับแบบฟูริเยร์ (Inverse Fourier Transform) จะเห็นได้ว่าทั้งสองสมการเกือบจะสมมาตรกัน แตกต่างเพียงเครื่องหมายของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลเท่านั้น สิ่งที่สำคัญสำหรับความเป็นสมมาตรก็คือเมื่อแปลงสัญญาณในทิศทางหนึ่งจะถูกแปลงด้วยอีกทิศทางหนึ่งเสมอ

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

สมการที่ 2-17 และ 2-18 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่สุ่มตัวอย่างทุก ๆ ช่วงเวลา Δt หรือมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล $f_s = 1/\Delta t$ ได้ดังในสมการที่ 2-19 และ 2-20

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t_n) e^{-j2\pi ft_n} \quad (2-19)$$

$$x(t_n) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} X(f) e^{j2\pi ft_n} df \quad (2-20)$$

เมื่อ $t_n = n \Delta t$ คือ เวลาขณะที่ยุ่มตัวอย่างข้อมูลครั้งที่ n

ถ้าในอนุกรมเวลามีการตัดค่าให้เหลือพจน์น้อยลงและทำให้เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง ฟังก์ชันความถี่จะถูกตัดพจน์ให้เหลือลงด้วยเช่นกัน ทำให้ได้ฟังก์ชันการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform, DFT) ดังสมการต่อไปนี้

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j(2\pi kn/N)} \quad (2-21)$$

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j(2\pi kn/N)} \quad (2-22)$$

ฟังก์ชัน DFT ในสมการที่ 2-21 และ 2-22 ฟังก์ชัน DFT นี้เหมาะที่จะนำไปใช้กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบดิจิทัล เนื่องจากการหาค่าสเปกตรัมของฟูรีเยร์ X_n ทั้ง N จุดจากข้อมูลที่วัดมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลา N จุด จะต้องมีการคูณเชิงซ้อนถึง N^2 ครั้ง จึงมีการเสนอการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform , FFT) ซึ่งจะให้ผลเหมือนกันกับสมการที่ 2-21 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

ในการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือน จะใช้สเปกตรัมเป็นพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ ซึ่งนิยามได้หลายรูปแบบโดยแบบที่นำมาวิเคราะห์เป็นแบบพาวเวอร์สเปกตรัม ซึ่งนิยามโดยให้อินทิกรัลของฟูรีเยร์หรือการแปลงแบบฟูรีเยร์ $X(\omega)$ ของสัญญาณโดเมนเวลา $x(t)$ อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ดังนี้

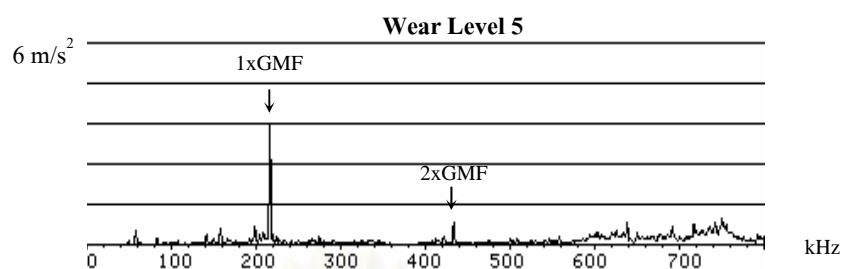
$$X(\omega) = R(\omega) + jS(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (2-23)$$

- โดย $A(\omega)$ คือ สเปกตรัมของฟูรีเยร์ (Fourier Spectrum of $x(t)$)
 $A^2(\omega)$ คือ พาวเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum of $x(t)$)
 $\varphi(\omega)$ คือ มุมเฟส (Phase Angle of $x(t)$)
 $x(\omega)$ หาได้จากสมการ (2-9) ซึ่งเป็นสมการการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) จากสัญญาณโดเมนเวลา ($x(t)$)

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณจะวิเคราะห์ว่าความถี่ของสัญญาณประกอบไปด้วยสัญญาณฮาร์มอนิกหรือสัญญาณรูปไซน์ความถี่ใดบ้าง และแต่ละความถี่มีขนาดแอมพลิจูดเท่าใด

ข้อได้เปรียบของการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ คือ สามารถแยกแยะการสั่นสะเทือนที่เกิดจากความบกพร่องของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่แตกต่างกันเนื่องจากความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่หมุนนั้นจะสร้างความถี่เฉพาะตัว ในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเฟืองจะทำให้สามารถสังเกตเห็นความถี่ GMF ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นแถบความถี่

ข้างซึ่งเกิดจากการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ โดยแถบความถี่ข้างจะอยู่ห่างจากความถี่ GMF เท่ากับจำนวนเท่าของความถี่รอบของแต่ละเฟือง



รูปที่ 2-15 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging [1]

จากรูปจะสังเกตเห็นความถี่ GMF และฮาร์มอนิกอย่างชัดเจน แต่สัญญาณจริงในเครื่องจักรจะสังเกตเห็นแถบความถี่ข้างได้ยากเนื่องจากเกิดการมอดูเลตของหลาย ๆ สัญญาณทำให้มีหลายแถบความถี่ข้างรอบ ๆ ความถี่ GMF

การวิเคราะห์แถบความถี่ข้างจะมีประโยชน์มากในการระบุตำแหน่งของเฟืองที่เกิดความบกพร่องภายในชุดเฟือง เนื่องจากภายในชุดเฟืองจะมีเฟืองอยู่หลายตัวที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์จะทำได้โดยสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ความเร็วรอบเฟืองนั้น ๆ ซึ่งจะทำให้ทราบเบื้องต้นได้ว่าความเสียหายมาจากเฟืองตัวใด

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนคิวเฟรนซี

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนคิวเฟรนซีจะมีแกนตั้งแสดงถึงแอมพลิจูดหรือแอมพลิจูดความเป็นคาบของสัญญาณบนโดเมนความถี่ และมีแกนนอนแสดงคิวเฟรนซีหรือเวลา นิยมเรียกสัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซีว่า เชปส์ตรัม ซึ่งในทางคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนคิวเฟรนซีเกิดจากการแปลงกลับแบบฟูริเยร์ (Inverse Fourier Transform) ของลอการิทึมของสัญญาณบนโดเมนความถี่

เชปส์ตรัมเป็นการวิเคราะห์ความถี่ของสเปกตรัม (Frequency Analysis of Spectrum) เพื่อตรวจจับสภาวะเป็นคาบในสเปกตรัม เช่น ชุดฮาร์มอนิก (Harmonics Family) ชุดแถบความถี่ข้าง (Sidebands Family) หรือจากผลของเสียงสะท้อน (Echoes) เป็นต้น ซึ่งเชปส์ตรัมนี้จะมีอยู่หลายรูปแบบ

เชปส์ตรัมถูกนำมาใช้ในครั้งแรก เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เสียงสะท้อน และช่วยหาความลึกไฮโปเซนเตอร์ (Hypocenter) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหว เชปส์ตรัมแบบแรกนี้ถูกนิยามไว้ดังนี้

$$C(\tau) = \left| F \left\{ \log F_{XX}(f) \right\} \right|^2 \quad (2-24)$$

เซปส์ตรัมที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเฝ้าตรวจและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลคือ เพาเวอร์เซปส์ตรัม ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$C(\tau) = F^{-1} \left\{ \log F_{XX}(f) \right\} \quad (2-25)$$

$F_{XX}(f)$ เป็นเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเวลา

คำว่า “เซปส์ตรัม” (Cepstrum) มาจากการสลับที่คำว่า สเปกตรัม(Spectrum) ในภาษาอังกฤษ เหตุผลในการใช้ลักษณะการสลับตัวอักษรก็เนื่องจากว่า เซปส์ตรัมเป็นสเปกตรัมของสเปกตรัมนั่นเอง เซปส์ตรัมใช้ประโยชน์ได้คล้ายกับอโตคออรัลเลชันฟังก์ชัน(Autocorrelation Function) ดังนั้นเซปส์ตรัมจะแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ระยะเวลาเหลื่อมต่างกันเช่นเดียวกับอโตคออรัลเลชัน แต่ลักษณะสำคัญที่แตกต่างจากอโตคออรัลเลชันก็คือการแปลงจากลอการิทึมของสเปกตรัมนั่นเอง

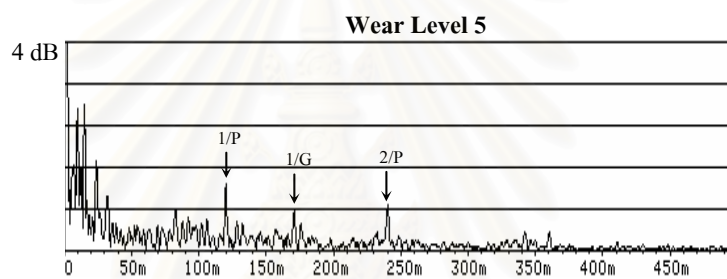
คำศัพท์เทคนิคต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเซปส์ตรัมมีดังนี้

เซปส์ตรัม (Cepstrum)	มาจากคำว่า	สเปกตรัม (Spectrum)
ควิเฟรนซี (Quefrensy)	มาจากคำว่า	ความถี่ (Frequency)
ราฮ์มอนิก (Rahmonics)	มาจากคำว่า	ฮาร์มอนิก (Harmonic)
แกมมิจูด (Gamnitude)	มาจากคำว่า	แมกนิจูด (Magnitude) หรือ แอมพลิจูด (Amplitude)
แซฟ (Saphe)	มาจากคำว่า	เฟส (Phase)
ลิฟเตอร์ (Lifter)	มาจากคำว่า	ฟิลเตอร์ (Filter)
ชอร์ต พาส ลิฟเตอร์ (Short Pass Lifter)	มาจากคำว่า	ตัวกรองความถี่สูง (Low Pass Filter)
ลอง พาส ลิฟเตอร์ (Long Pass Lifter)	มาจากคำว่า	ตัวกรองความถี่ต่ำ (High Pass Filter)

ควิเฟรนซีเป็นหน่วยของเวลา(sec) และในทางทฤษฎีควิเฟรนซีมีความหมายเช่นเดียวกับช่วง

เวลาประวิง (Delay Time) τ ของอโตคอร์รีเลชัน คำว่า“คิวเฟรนซีสูง”(High Quefrensy) หมายถึงมีการสั้นขึ้นลงอย่างรวดเร็วในสัญญาณสเปกตรัมหรือมีระยะห่างของความถี่น้อย(Small Frequency Space) และคำว่า“คิวเฟรนซีต่ำ”หมายถึงการสั้นขึ้นลงที่ช้าหรือมีระยะห่างของความถี่มากในสเปกตรัม

ในการวิเคราะห์บนโดเมนคิวเฟรนซีหรือการวิเคราะห์เซปส์ตรัม จะการวิเคราะห์ความถี่สถานะความเป็นคาบของสัญญาณบนโดเมนความถี่ ได้แก่ กลุ่มของฮาร์โมนิก และ แถบความถี่ข้างที่ห่างเท่า ๆ กัน ทำให้สามารถวิเคราะห์ความเป็นคาบของแถบความถี่ข้างและสามารถสังเกตแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างได้โดยการวิเคราะห์แอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างหรือแอมพลิจูดของยอด $1/P$ ของเฟืองขับ และ $1/G$ ของเฟืองตามได้ง่ายขึ้นเมื่อสัญญาณอยู่ในรูปของเซปส์ตรัม ดังนั้นการวิเคราะห์แบบเซปส์ตรัมจึงเป็นการช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัมที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถบอกตำแหน่งของเฟืองที่เสียหายภายในชุดเฟืองได้สะดวกกว่าการวิเคราะห์แถบความถี่ข้างในสเปกตรัมโดยตรง



รูปที่ 2-16 สัญญาณเซปส์ตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum

Averaging [1]

จากรูปสามารถเห็นยอดของแถบความถี่ข้างในสเปกตรัม ซึ่งในยอดที่เป็นของแถบความถี่ข้างเกิดมาจากความบกพร่องของเฟือง ซึ่งในตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นเฉพาะยอดที่เป็นคิวเฟรนซีของเฟืองขับเด่นชัดกว่าเฟืองตาม นั้นย่อมแสดงว่าความบกพร่องเกิดขึ้นเฉพาะที่เฟืองขับ

บทที่ 3

การทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยเพื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนบนแบร์ริงเฟืองขับของชุดทดลองที่ระดับการสึกหรอและความเร็วรอบต่าง ๆ โดยตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนควบคู่ไปกับการตรวจวัดรูปแบบของการสึกหรอของฟันเฟือง เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนและรูปแบบการสึกหรอ ที่ระดับการสึกหรอต่าง ๆ

รูปแบบการทดลอง

สิ่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองมาจากข้อบกพร่องจากหลาย ๆ สาเหตุรวมกันในการศึกษาและวิจัยสัญญาณการสั่นสะเทือนจำเป็นจะต้องควบคุมความผิดพลาดต่าง ๆ ให้เหลือน้อยที่สุด ในส่วนของเฟืองการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะเก็บสัญญาณในทุก ๆ 120 นาที จนกระทั่งมีการสึกหรอที่ปลายฟันเฟืองเป็นไปตามกำหนด ซึ่งจะทำการถ่ายภาพฟันเฟืองเป็นจำนวน 13 ฟัน เพื่อติดตามแนวโน้มการสึกหรอของฟันเฟืองควบคู่ด้วย

สภาวะการทดลอง

เฟืองขับ	: ทำจากทองเหลือง ϕ พิตช์ 104 มม. โมดูล 4 มม. 26 ซี่
เฟืองตาม	: ทำจากเหล็ก ϕ พิตช์ 148 มม. โมดูล 4 มม. 37 ซี่
ความเร็วรอบเฟืองขับ	: 500, 800 และ 1100 รอบต่อนาที
ภาระ (Load)	: 340 วัตต์ ปรับภาระโดยการเปลี่ยนความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขดลวดของเครื่องปั่นไฟรถยนต์ (Alternator)

เพื่อให้การสึกหรอเป็นไปอย่างรวดเร็วการทดลองนี้จึงไม่ใช้สารหล่อลื่น

จากสภาวะการทดลองจะแบ่งการทดลองออกเป็น 6 ชุดประกอบด้วย

1. ภาระที่เกิดจากการส่งกำลัง 340 วัตต์ ความเร็วของเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที ชุดที่ 1
2. ภาระที่เกิดจากการส่งกำลัง 340 วัตต์ ความเร็วของเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที ชุดที่ 2
3. ภาระที่เกิดจากการส่งกำลัง 340 วัตต์ ความเร็วของเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที ชุดที่ 1
4. ภาระที่เกิดจากการส่งกำลัง 340 วัตต์ ความเร็วของเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที ชุดที่ 2
5. ภาระที่เกิดจากการส่งกำลัง 340 วัตต์ ความเร็วของเฟืองขับ 1100 รอบต่อนาที ชุดที่ 1
6. ภาระที่เกิดจากการส่งกำลัง 340 วัตต์ ความเร็วของเฟืองขับ 1100 รอบต่อนาที ชุดที่ 2

โดยในแต่ละชุดการทดลองจะเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเก็บ 2 วิธีดังนี้

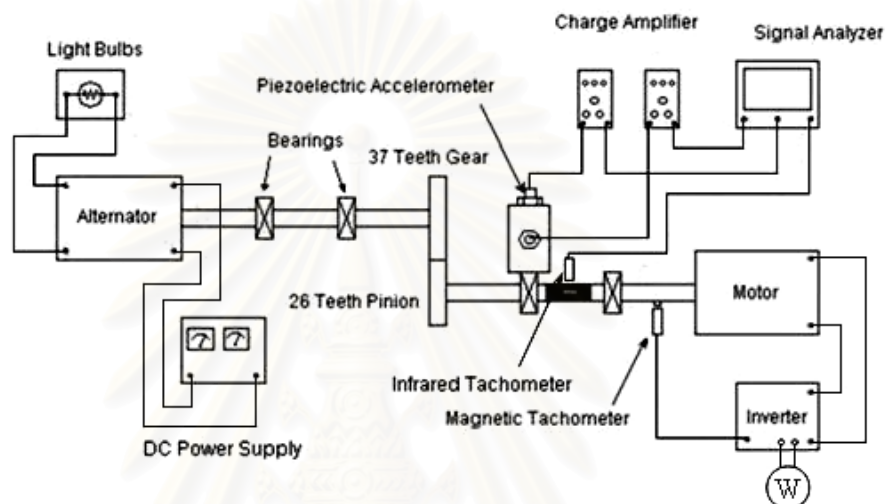
1. การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging)
2. การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)

การทดลองในแต่ละชุด จะวัดสัญญาณที่ตำแหน่งเบร็งของเฟืองขับ ในแนวนอน (Horizontal axis) และแนวตั้ง (Vertical axis)

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดเฟืองตรงมีฟันเป็น ไค้งอิน โวลูท
2. ชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบด้วย
 - 2.1 มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.5 แรงม้า
 - 2.2 อินเวอร์เตอร์สำหรับปรับความเร็วมอเตอร์
 - 2.3 แทกโคมิเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Tachometer) เพลลา ϕ 20 มม.
 - 2.4 บอลล์เบร็ง และเฮาส์ซิ่ง 4 ชุด
 - 2.5 แท่นชุดทดลอง
 - 2.6 ชุดลือสายพานและสายพาน
 - 2.7 เครื่องปั่นไฟรถยนต์ขนาด 12 โวลต์จ่ายกระแสไฟสูงสุด 30 แอมแปร์
 - 2.8 ภาะทางไฟฟ้า (ชุดหลอดไฟ)
 - 2.9 เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้ (DC Power Supply)
3. ตัวตรวจรู้ชนิดวัดความเร่งแบบพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Accelerometer)
4. เครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier)
5. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer)
6. ชุดแทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรด (Infrared Tachometer)
7. มัลติมิเตอร์ (Multimeter) ยี่ห้อ Pro'sKit รุ่น 3PK-8200C
8. วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น 3286
9. เครื่องขยายโปรไฟล์ ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น PJ-300
10. กล้องถ่ายรูปแบบดิจิทัล ยี่ห้อ CANON รุ่น PowerShot A620
11. เครื่องวัดระดับเสียง ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DS-40
12. เกจบล็อก (Gauge Block) ยี่ห้อ MITUTOYO
13. แท่นวางกล้อง

รูปที่ 3-1 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณซึ่งทั้งหมดเป็นของบริษัท Brüel & Kjaer ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ รุ่น 2035 เครื่องขยายประจุ รุ่น 2635 และตัวตรวจรูชนิดวัดสัญญาณความเร่ง รุ่น 4371 และ รุ่น 4444 ส่วนแทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรดเป็นชุดวงจรสำเร็จรูปที่ประยุกต์ติดตั้งเพิ่มเข้ามาเพื่อสร้างสัญญาณทริกเกอร์สำหรับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ



รูปที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

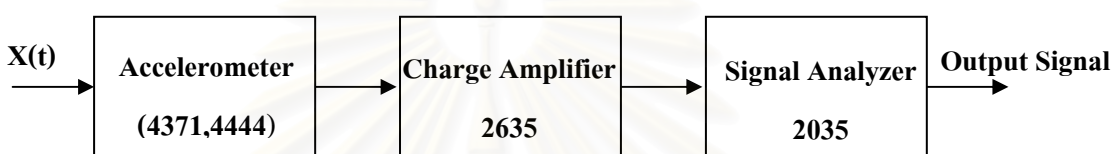
ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งชุดเฟืองเข้ากับชุดทดลอง
2. สอบเทียบ (Calibrate) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ตัวตรวจรูชนิดวัดความเร่ง, ชุดแทกโคมิเตอร์ เป็นต้น
3. ตรวจสอบความมั่นคงของจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ
4. เริ่มเดินมอเตอร์
5. ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ และปรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้าในเครื่องปั่นไฟรถยนต์
6. หลังจากความเร็ว และภาระที่วัดได้คงที่ เริ่มเก็บข้อมูลจริงโดยเก็บสัญญาณ 5 ครั้งในแต่ละวิธีการเก็บสัญญาณ
7. เก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือน ระดับเสียง และหยุดเดินเครื่องทุก ๆ 120 นาที
8. ตรวจสอบการสึกหรอของฟันเฟืองโดยการถ่ายรูปด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล
9. ทำการทดลองจนกระทั่งฟันเฟืองฟันใดฟันหนึ่งมีการสึกหรอถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หรือฟันเฟืองเสียรูป (Deformation) ไป 7 ฟัน

รายละเอียดการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน

1. การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเปลี่ยนโดเมนความถี่

การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 20 ชุดสัญญาณ การเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน 75% ใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ 0.7 Hz ส่วนตัวกรองความถี่สูงใช้ตามพิสัยของโดเมนความถี่ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ คือ 800Hz สำหรับความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที 1.6kHz สำหรับความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที และ 2.4kHz สำหรับความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที รายละเอียดของโดเมนต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3-1, 3-2 และ 3-3 สัญญาณบนโดเมนเวลาแสดงผลเฉพาะชุดสัญญาณสุดท้ายเท่านั้น



รูปที่ 3-2 กระบวนการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเปลี่ยนโดเมนความถี่

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเปลี่ยนโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	1sec	488 μ sec	2048 lines
สเปกตรัม	800 Hz	1 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม	500 msec	488 μ sec	1024 lines

ตารางที่ 3-2 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเปลี่ยนโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที

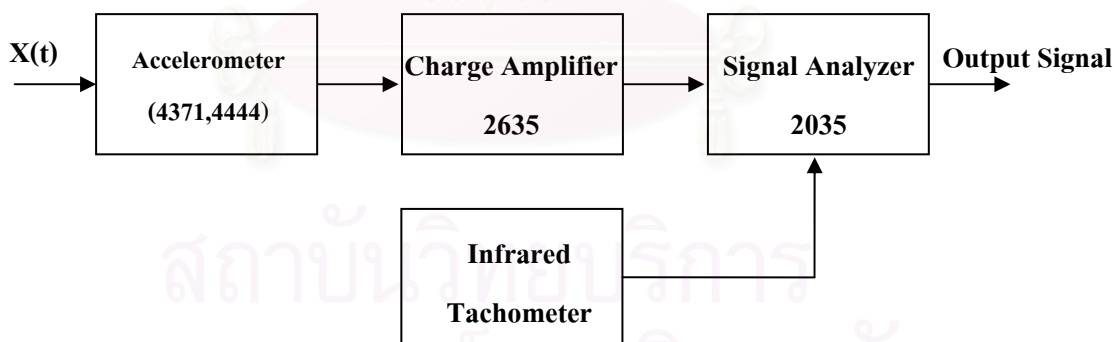
ชนิดของสัญญาณที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	0.5 sec	244 μ sec	2048 lines
สเปกตรัม	1600 Hz	2 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม	250 msec	244 μ sec	1024 lines

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมน
ความถี่สำหรับความเร็ว 1100 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	0.25 sec	122 μ sec	2048 lines
สเปกตรัม	3200 Hz	4 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม	125 msec	122 μ sec	1024 lines

2. การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

ในการเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้จะใช้สัญญาณจากทรiggerภายนอกซึ่งได้จากแทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรดและส่งสัญญาณผ่านไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะเริ่มเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อมีสัญญาณมาจากแทกโคมิเตอร์ การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 100 ชุดสัญญาณ ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูงเช่นเดียวกับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมนความถี่ การเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้ไม่ต้องใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเนื่องจากการเคลื่อนบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมีลักษณะความเป็นตัวกรองความถี่อยู่แล้ว รายละเอียดของโดเมนต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3-4, 3-5 และ 3-6



รูปที่ 3-3 กระบวนการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

ตารางที่ 3-4 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมนเวลา
เข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	1sec	488 μ sec	2048 lines
สเปกตรัม	800 Hz	1 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม	1000 msec	488 μ sec	2048 lines

ตารางที่ 3-5 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมนเวลา
เข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	0.5 sec	244 μ sec	2048 lines
สเปกตรัม	1600 Hz	2 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม	500 msec	244 μ sec	2048 lines

ตารางที่ 3-6 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมนเวลา
เข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 1100 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	0.25 sec	122 μ sec	2048 lines
สเปกตรัม	3200 Hz	4 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม	250 msec	122 μ sec	2048 lines

พารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้วิเคราะห์มีดังนี้

1) สัญญาณบนโดเมนเวลา

- RMS คือ ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส
- Peak คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณในช่วงระยะเวลาที่เก็บสัญญาณ
- Crest Factor คือ อัตราส่วนระหว่างค่า Peak ต่อค่า RMS
- Kurtosis คือ ค่าทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของการกระจายตัวของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

2) สัญญาณสเปกตรัม

- แอมพลิจูดของ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่มีความถี่การขบกันของชุดเฟือง ฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ของความถี่การขบกันของชุดเฟืองตามลำดับ
- แอมพลิจูดของ 1xSBPL1 คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นชุดแถบความถี่ข้างรอบๆ 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF ออกไปด้านซ้ายเท่ากับความถี่ของเฟืองขับ ฮาร์โมนิกที่ 1
- แอมพลิจูดของ 1xSBPR1 และ 2xSBPR1 คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นชุดแถบความถี่ข้างรอบๆ 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF ออกไปด้านขวาเท่ากับความถี่ของเฟืองขับ ฮาร์โมนิกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

3) สัญญาณเซปส์ตรัม

- แกมนิจูดของ 1/P 2/P และ 3/P คือ ค่าแกมนิจูดของยอดสัญญาณเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองขับ) ฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
- แกมนิจูดของ 1/W คือ ค่าแกมนิจูดของยอดสัญญาณเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองตาม)

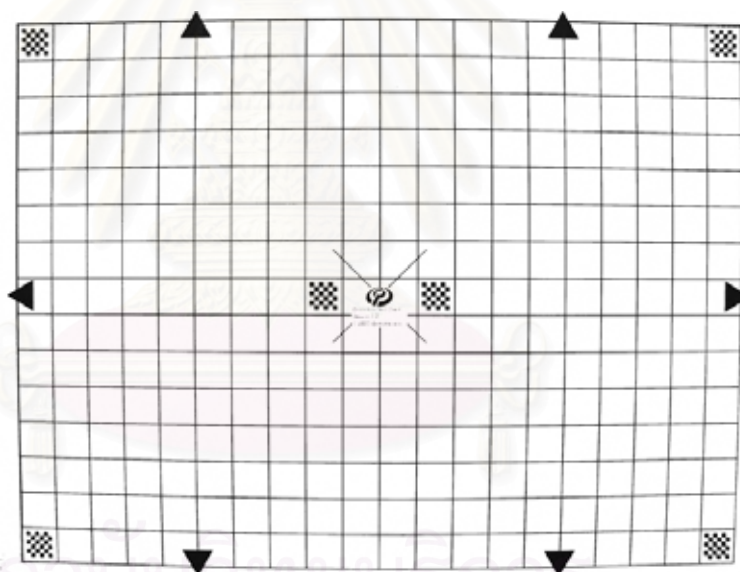
ข้อมูลความถี่ต่างๆรวมทั้งควิเฟรนซีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณแสดงไว้ในตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ความถี่และควิเฟรนซีที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ

Speed (RPM)	Frequency(Hz)					Quefrequency(ms)			
	Pinion	Wheel	1xGMF	2xGMF	3xGMF	1/P	2/P	3/P	1/W
500	8.33	5.86	216.67	433.33	650.00	120.00	240.00	360.00	170.77
800	13.33	9.37	346.67	693.33	1040.00	75.00	150.00	225.00	106.73
1100	18.33	12.88	476.67	953.33	1430.00	54.55	109.09	163.64	77.62

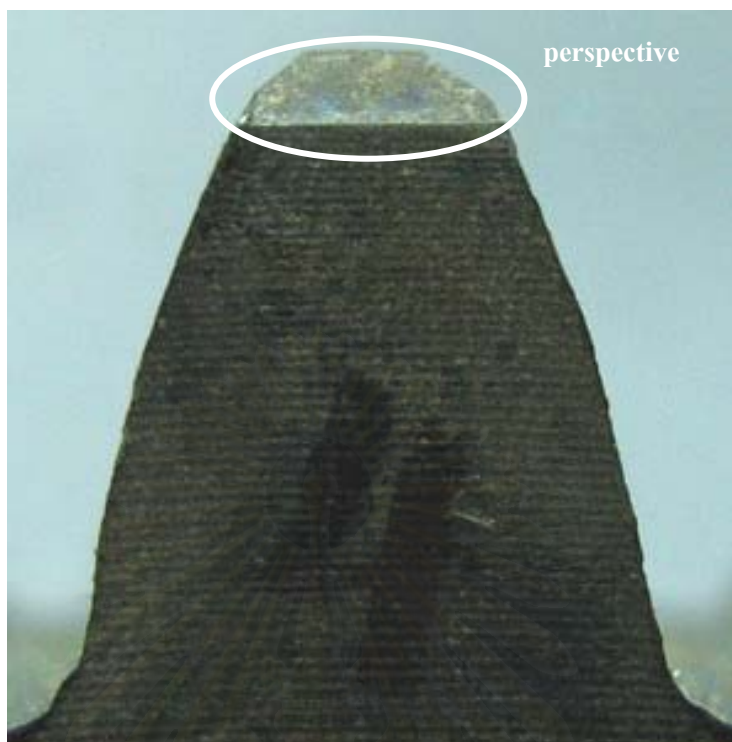
การวัดโปรไฟล์เฟืองด้วยภาพจากกล้องดิจิทัล

จากการทดลองของเจษฎา[1] การวัดโปรไฟล์ที่สึกหรอของเฟืองจะใช้เครื่องขยายโปรไฟล์ในการวัดซึ่งวิธีดังกล่าวจะต้องถอดเฟืองออกจากเพลานำมาวัดโปรไฟล์ ทำให้การควบคุมสถานะในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนให้คงเดิมเป็นไปได้ยาก การวัดโดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลเป็นวิธีที่สามารถถ่ายภาพของฟันเฟืองและนำมาขยายเพื่อวัดโปรไฟล์ของฟันเฟืองได้โดยไม่ต้องถอดชุดเฟืองออกจากเพลา ทำให้สามารถควบคุมสถานะการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลนั้นยังมีข้อจำกัด ทั้งที่เกิดจากกล้องดิจิทัลเองและจากลักษณะของวัตถุที่ถ่าย ปัญหาที่เกิดจากกล้องก็คือปัญหาการบิดเบือนของภาพ (Distortion) ที่เกิดจากเลนส์ของกล้องซึ่งประกอบด้วยเลนส์หลายชิ้น เพื่อให้มีการหักเหของแสง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดภาพที่บิดเบือนในลักษณะของเส้นโค้งบวมออกและบิดเบี้ยวมากที่สุดบริเวณขอบรูป [12] ดังเช่นรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 การบิดเบือนของภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล Canon PowerShot A620[13]

ปัญหาอีกประเภทที่เกิดจากวัตถุคือปัญหาที่เกิดจากมิติของวัตถุที่อยู่คนละระนาบ ซึ่งจะให้เห็นขนาดและมุมของภาพผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง เรียกว่าทัศนมิติ (Perspective) [12] ซึ่งฟันเฟืองจะมีปัญหาในลักษณะนี้เช่นกันเนื่องจากปลายฟันเฟืองจะถูกกลมคมทำให้เกิดเป็นภาพ 2 ระนาบ โดยภาพระนาบที่ถูกกลมคมจะมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริง ดังเช่นในรูปที่ 3-5



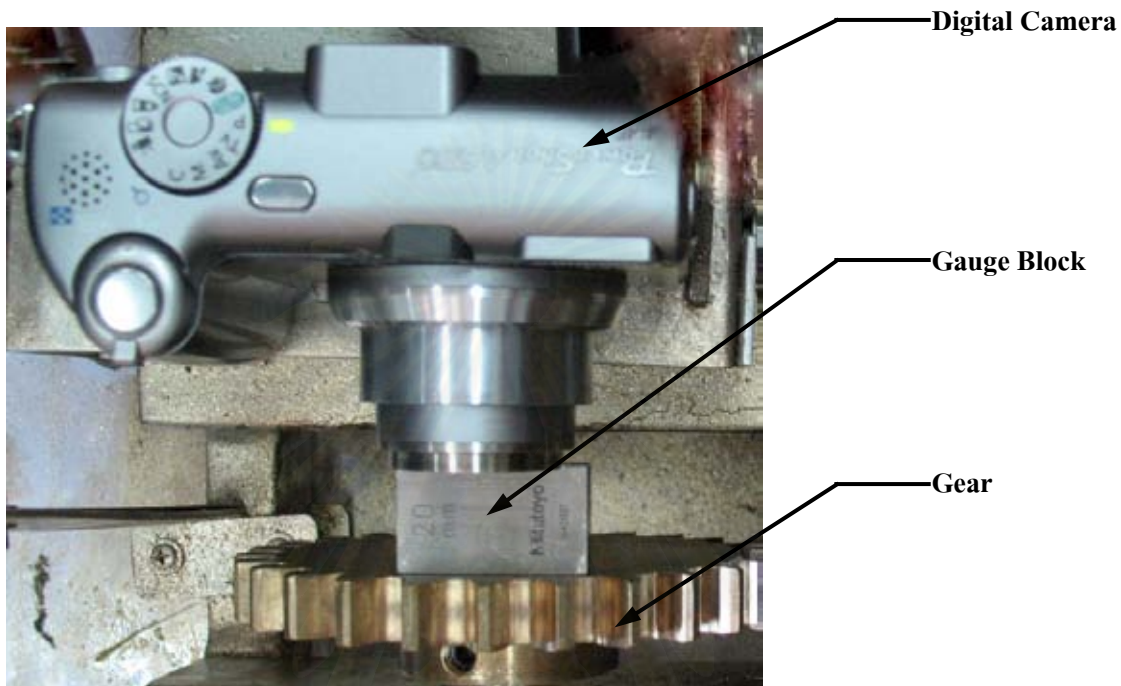
รูปที่ 3-5 ภาพของพื้นเฟืองที่เกิด perspective ขึ้นที่ปลายพื้นเฟือง

ขั้นตอนการวัดขนาดโปรไฟล์พื้นเฟืองโดยใช้กล้องดิจิทัล

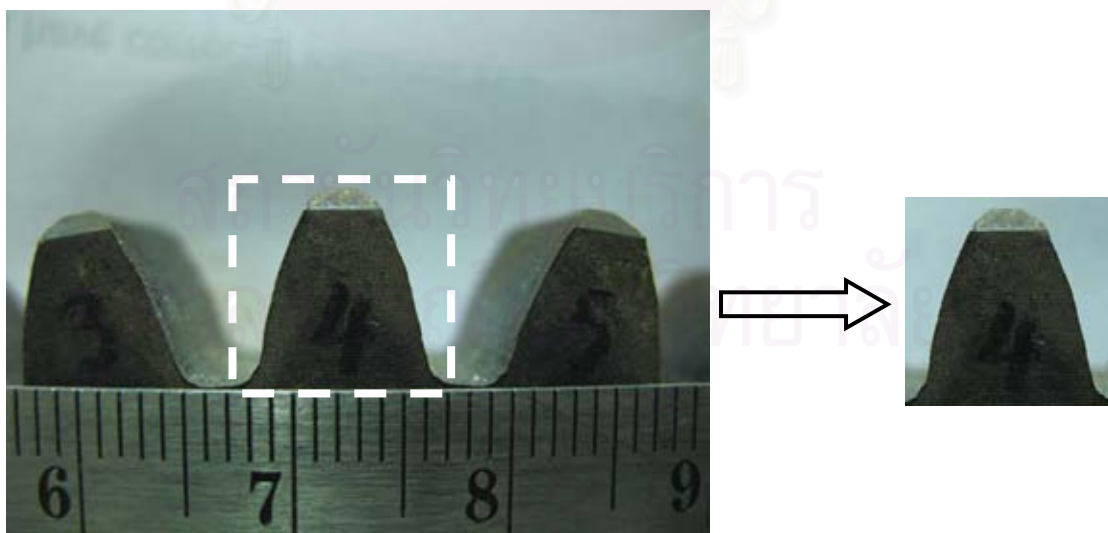
ขั้นตอนในการถ่ายรูปของพื้นเฟืองเพื่อวัดโปรไฟล์ของพื้นเฟืองให้ได้อัตราส่วนขยายที่มีความชัดเจนและแน่นอนนั้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งกล้องให้ขนานกับเฟืองและให้ระยะห่างระหว่างกล้องกับเฟืองคงที่โดยใช้เกจบล็อก (Gauge Block) ทาบไว้กับหน้าเลนส์กล้องและพื้นเฟืองดังรูปที่ 3-6
2. ปรับกล้องให้เลนส์กล้องตรงกับพื้นเฟืองซึ่งที่ต้องการถ่าย ให้พื้นเฟืองที่ต้องการถ่ายอยู่ตรงกลางภาพ เพื่อแก้ไขปัญหาภาพบิดเบือน (Distortion)
3. ติดตั้งไม้บรรทัดที่มีสเกลแน่นอนบริเวณรากพื้นเฟือง เพื่อนำไปสอบเทียบ (Calibration) ในการขยายภาพต่อไป
4. การขยายรูปด้วยฟังก์ชันที่มีอยู่ในกล้องดิจิทัลจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง
5. ปรับความละเอียด (Resolution) ของกล้องให้สูงในการทดลองใช้ขนาด 3072x2304 pixels และใช้ฟังก์ชันถ่ายใกล้ (Macro) ที่มีอยู่ในกล้อง
6. เมื่อได้ภาพถ่ายของพื้นเฟืองแล้วตัดเฉพาะพื้นเฟืองที่ต้องการวัดโปรไฟล์โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS ตัดภาพให้ pixels มีจำนวนเท่ากับความยาว 1 cm จากสเกลของไม้บรรทัดที่ติดตั้งไว้ดังรูปที่ 3-7

7. ทำการขยายภาพโดยการปรับความละเอียด (Resolution) ให้ได้ภาพขนาด 20x20 cm แล้วพิมพ์ภาพเพื่อวัดขนาดโปรไฟล์ของฟันเฟือง และสอบเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์



รูปที่ 3-6 การใช้เกจบล็อกในการติดตั้งกล้องให้ขนานกับเฟืองและมีระยะที่ห่างที่คงที่



รูปที่ 3-7 การตัดภาพขนาดความยาว 1 cm ตามสเกลไม้บรรทัด

การสอบเทียบความละเอียดของภาพและปรับตั้งระยะโฟกัสของกล้อง

ภาพพื้นเฟืองที่ได้จากการตัดโดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS ตามสเกลของไม้บรรทัดในภาพ และปรับ Resolution ให้ได้ภาพขนาด 20x20 cm ปกติแล้วยังไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดโปรไฟล์ได้ เนื่องจากปัญหาการบิดเบือนที่เกิดขึ้นกับไม้บรรทัดทำให้เส้นสเกลของไม้บรรทัดผิดเพี้ยนไปจึงต้องสอบเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์ที่มีอัตราขยาย 20 เท่าอีกครั้งหนึ่ง กรณีภาพจากกล้องมีขนาดเล็กกว่าให้ปรับ pixels น้อยลง ในทางกลับกันกรณีภาพมีขนาดใหญ่กว่าให้ปรับ pixels มากขึ้นจนกว่าจะได้ภาพที่มีขนาดเท่ากัน เมื่อได้ขนาด pixels ที่แน่นอนแล้วจึงใช้ขนาด pixel นั้นในการตัดภาพครั้งถัดไปโดยไม่ต้องสอบเทียบอีก

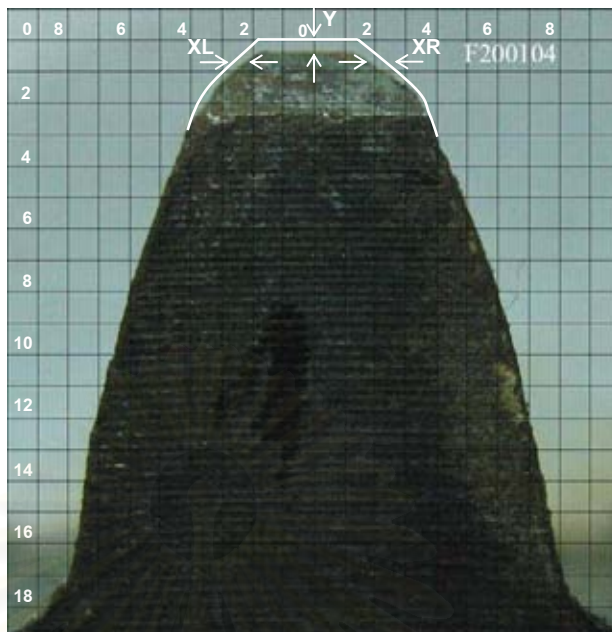
การใช้ระยะโฟกัสที่เหมาะสมสามารถแก้ปัญหาอันเกิดจากมิติของวัตถุได้ในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถทำให้ปัญหานี้หมดไปเพียงแต่ทำให้ได้ภาพที่มีความผิดเพี้ยนน้อยลง โดยพื้นเฟืองจะมีปัญหาที่บริเวณปลายพื้นเฟืองที่ถูกกลมคมจะทำให้เห็นภาพที่ลึกลงไป ซึ่งทดลองใช้เกจบล็อกปรับระยะโฟกัสและความตั้งฉากของกล้องและพื้นเฟืองโดยปรับระยะโฟกัส 3 ระยะ คือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร จากนั้นจึงตัดภาพและขยายภาพตามวิธีที่ได้กล่าวมา แล้วเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์

จากการถ่ายภาพโดยเปลี่ยนแปลงระยะโฟกัส 3 ระยะโดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS ตัดภาพตามสเกลของไม้บรรทัดและสอบเทียบกับเครื่องขยายโปรไฟล์จะได้ขนาด pixels และความละเอียดดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 แสดงผลจากการตัดภาพที่ระยะโฟกัสต่าง ๆ

Focus (mm)	Pixels	Resolution (Pixel/cm)
20	930x930	46.5
25	814x814	40.7
30	725x725	36.25

จากการขยายภาพจากกล้องดิจิทัลและขยายขึ้น 20 เท่า เพื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์ซึ่งมีอัตราขยาย 20 เท่าเช่นกัน พบความแตกต่างของขนาดภาพในส่วนปลายของพื้นเนื่องจากเป็นลักษณะของภาพทัศนมิติ โดยจะได้ภาพที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของเครื่องขยายโปรไฟล์เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 ภาพพื้นเฟืองที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์

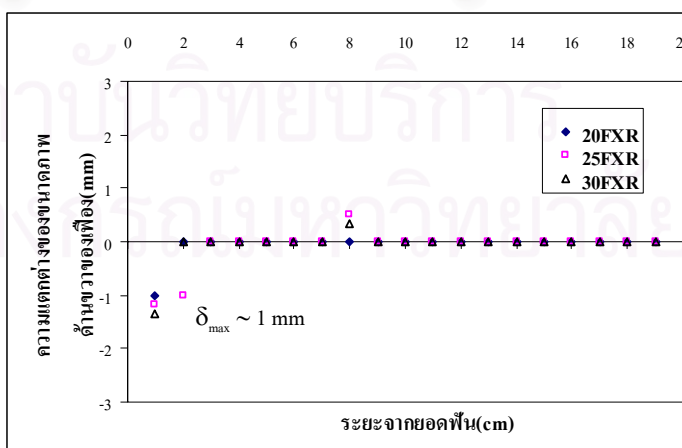
เมื่อวัดขนาดโดยเทียบจากแกน X ด้านซ้ายและขวา และเทียบจากแกน Y จะเขียนกราฟของขนาดที่แตกต่างระหว่างภาพจากกล้องดิจิทัลและภาพจากเครื่องขยายโปรไฟล์ได้ดังรูปที่ 3-9, 3-10 และ 3-11

โดย FXR คือ ขนาดที่แตกต่างของภาพด้านขวาของพื้นเฟือง(แกน X)

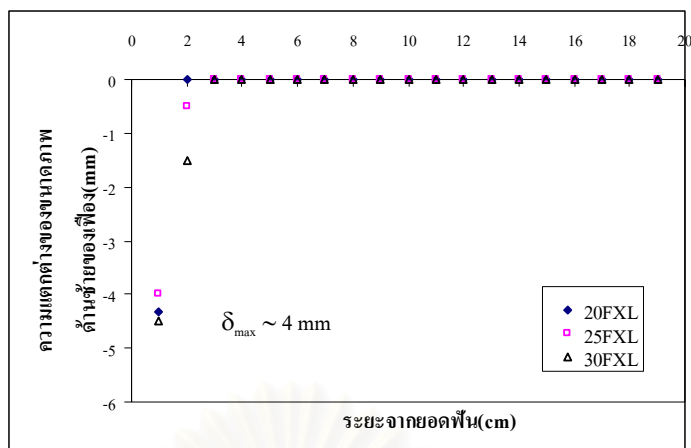
FXL คือ ขนาดที่แตกต่างของภาพด้านซ้ายของพื้นเฟือง(แกน X)

FY คือ ขนาดที่แตกต่างของภาพแนวตั้ง(แกน Y)

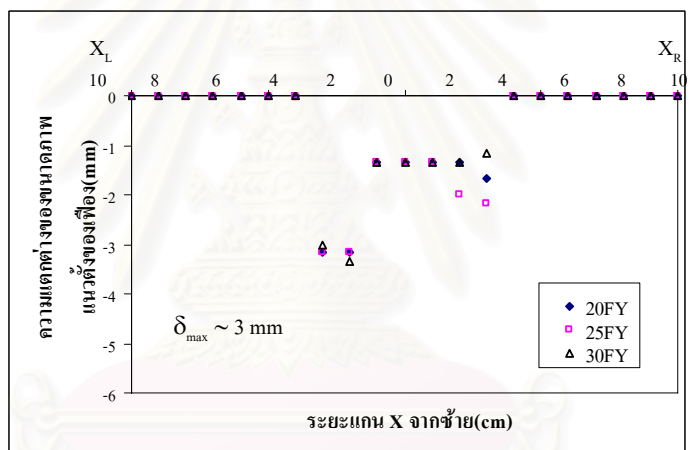
และมีระยะโฟกัส 20, 25, และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3-9 กราฟแสดงขนาดที่แตกต่างของภาพด้านขวาของพื้นเฟือง(แกน X) ที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์เทียบกับกล้องดิจิทัล



รูปที่ 3-10 กราฟแสดงขนาดที่แตกต่างของภาพด้านซ้ายของฟีนเฟือง(แกน X) ที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์เทียบกับกล้องดิจิทัล



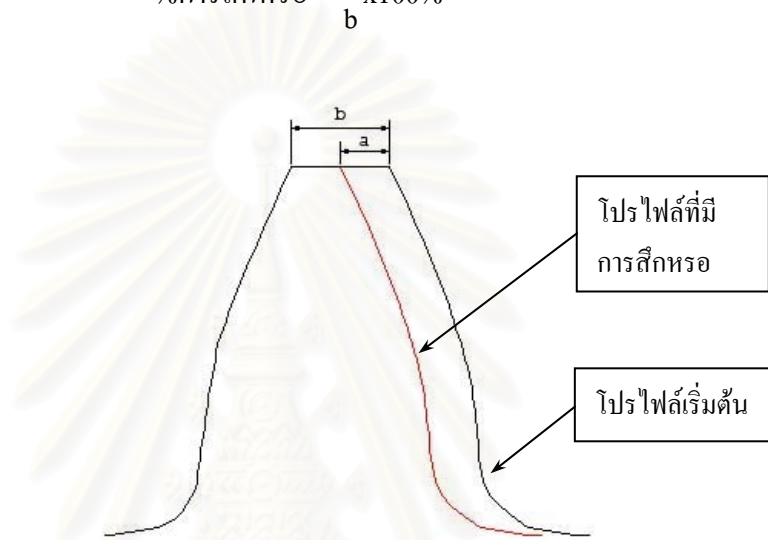
รูปที่ 3-11 กราฟแสดงขนาดที่แตกต่างของภาพแนวตั้ง(แกน Y) ของฟีนเฟืองที่ได้จากเครื่องขยายโปรไฟล์เทียบกับกล้องดิจิทัล

จากกราฟที่ได้พบว่าความผิดเพี้ยนของภาพในแต่ละความยาวโฟกัสไม่แตกต่างกันนัก บริเวณที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือบริเวณปลายฟีน ระยะโฟกัสที่ 20 mm จะมีค่าที่ดีกว่าตำแหน่งอื่น เมื่อเปรียบเทียบจากระยะที่แตกต่างจากเครื่องขยายโปรไฟล์มีค่าสูงสุดประมาณ 4 mm หรือเปรียบเทียบเป็นขนาดฟีนเฟืองจริงจะมีค่าผิดพลาดน้อยมากไม่เกิน 0.1 mm ซึ่งสามารถนำมาติดตามการสึกหรอของเฟืองได้เป็นอย่างดี

ระดับการสีกรของฟืนเฟือง

ระดับการสีกรวัดจากขนาดของปลายฟืนที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวัดจากภาพถ่ายเฉลี่ยกันจำนวน 13 ฟืนซึ่งคำนวณระยะสีกรที่ปลายฟืนจากระยะปลายฟืนที่สีกรต่อระยะที่ปลายฟืนปกติแสดงดังรูปที่ 3-12

$$\% \text{การสีกร} = \frac{a}{b} \times 100\% \quad (3-1)$$



รูปที่ 3-12 การคำนวณการสีกรที่ปลายฟืน [1]

โดยแบ่งการสีกรเป็น 6 ระดับ โดยอ้างอิงจาก [4] คือ ระดับ 0-5 มีการสีกรดังนี้

ระดับสีกรที่ 0	มีการสีกรที่ปลายฟืนประมาณ	0.0 %
ระดับสีกรที่ 1	มีการสีกรที่ปลายฟืนประมาณ	16.6 %
ระดับสีกรที่ 2	มีการสีกรที่ปลายฟืนประมาณ	33.2 %
ระดับสีกรที่ 3	มีการสีกรที่ปลายฟืนประมาณ	49.8 %
ระดับสีกรที่ 4	มีการสีกรที่ปลายฟืนประมาณ	66.4 %
ระดับสีกรที่ 5	มีการสีกรที่ปลายฟืนประมาณ	83.0 %

การทดลองจะเริ่มเดินเครื่องชุดทดลองตั้งแต่ฟืนของเฟืองขับยังไม่มีการสีกรไปจนพบการสีกรที่ปลายของฟืนเฟืองขับประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ หรือทดลองไปจนพบว่าไม่มีฟืนของเฟืองขับฟันใดฟันหนึ่งมีการสีกรที่ปลายถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หรือฟืนเฟืองเสียรูปจนไม่สามารถวัดได้ 7 ฟัน จาก 13 ฟัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

ในบทนี้จะแสดงถึงรูปแบบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงจากสภาวะการทดลองต่าง ๆ โดยทำการเดินเครื่องชุดทดลองและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนทุก ๆ 120 นาที และวัดเสียง แล้วหยุดเดินเครื่องชุดทดลองเพื่อทำการถ่ายรูปของฟันเฟืองจำนวน 13 ฟัน สังเกตและวัดระดับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับฟันเฟืองเพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับสัญญาณการสั่นสะเทือนและระบุว่าการสั่นสะเทือนของฟันเฟืองยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ รวบรวมผลการทดลองแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในระดับของการสั่นสะเทือนต่าง ๆ กัน เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ตามความรุนแรงของระดับการสั่นสะเทือนรวมทั้งผลของความเร็วยรอบหมุนและทิศทาง การวัดสัญญาณที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบสัญญาณใช้วิธีเก็บสัญญาณแตกต่างกัน 2 วิธีคือ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

ลำดับในการทดลองและระยะเวลาที่ใช้ทดลองของเฟืองแต่ละชุด

การทดลองเริ่มจากการทดลองสภาวะ 500 RPM ชุดที่ 1, 800 RPM ชุดที่ 1, 1100 RPM ชุดที่ 1, 500 RPM ชุดที่ 2, 800 RPM ชุดที่ 2, และ 1100 RPM ชุดที่ 2 ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจนเฟืองมีการสั่นสะเทือนถึงค่าที่กำหนดที่ระดับการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของชุดเฟืองทั้ง 6 ชุด แสดงไว้ในตารางที่ 4-1

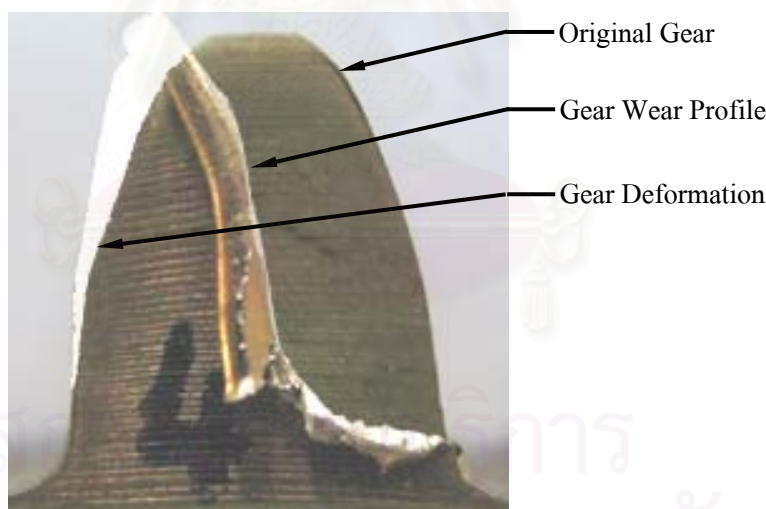
ตารางที่ 4-1 เวลาที่ใช้ในการทดลองจนเฟืองมีการสั่นสะเทือนถึงระดับที่กำหนด

สภาวะทดลอง	เวลา (นาที)				
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 4	ระดับที่ 5
1. 500 RPM ชุดที่ 1	1,080	2,160	3,120	3,720	-
2. 500 RPM ชุดที่ 2	1,440	3,960	6,120	-	-
3. 800 RPM ชุดที่ 1	720	1,560	2,640	-	-
4. 800 RPM ชุดที่ 2	960	1,440	2,760	-	-
5. 1100 RPM ชุดที่ 1	600	1,560	-	-	-
6. 1100 RPM ชุดที่ 2	600	1,440	-	-	-

การทดลองในชุดที่ 2 ของแต่ละความเร็วรอบระยะเวลาในการทดลองจนถึงการสึกหรอของเฟืองขั้นสุดท้ายนานมากกว่าการทดลองในชุดที่ 1 เนื่องจากเฟืองเหล็กที่เป็นเฟืองตามมีผิวสัมผัสที่เรียบขึ้น ทำให้ระยะเวลาของการทดลองจนเกิดการสึกหรอและเสียรูปของฟันเฟืองขับเคลื่อนเฟืองใช้เวลา นานขึ้น แต่โปรไฟล์โดยรวมของฟันเฟืองเหล็กยังคงรูปทรงเดิม ในการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบ 500 RPM ชุดที่ 2 พบว่าใช้เวลาในการทดลองค่อนข้างมากเนื่องจากระหว่างการทดลองมอเตอร์ เสื่อมสภาพจึงส่งกำลังขับไม่เต็มประสิทธิภาพทำให้ใช้เวลาในการทดลองนาน และอาจมีสัญญาณการ สั่นสะเทือนที่ผิดปกติขึ้นไป หลังการทดลองชุดนี้ได้เปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ก่อนเริ่มการทดลองลำดับที่ 5 และ 6 ต่อไป

รูปแบบการสึกหรอ

จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ มักจะพบการเสียรูปที่ปลายฟันเฟืองก่อนการสึก หรอของปลายฟันเฟืองครบ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือพบการสึกหรอไปจนพบการสึกหรอโดยเฉลี่ยประ มານ 83 เปอร์เซ็นต์ โดยในการทดลองจะพบการสึกหรอที่ปลายฟันอยู่ประมาณระดับสึกหรอที่ 2 ถึง ระดับ 4 ลักษณะของเฟืองที่สึกหรอและการเสียรูปเทียบกับฟันเฟืองก่อนทดลองแสดงดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 การสึกหรอและการเสียรูปของฟันเฟืองที่ความเร็ว 500 RPM ชุดที่ 1

กราฟแสดงรูปแบบการสึกหรอโดยเฉลี่ย

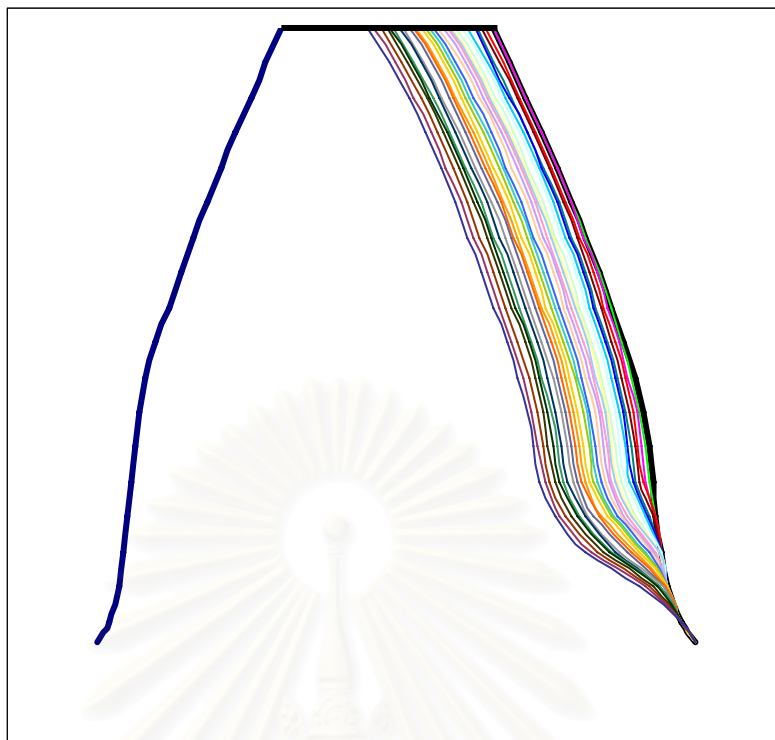
กราฟแสดงการสึกหรอโดยเฉลี่ยประกอบไปด้วยการสึกหรอโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ ต่อเนื่อง ตามระยะเวลาการทดลอง การสึกหรอโดยเฉลี่ยในแต่ละระดับ ลักษณะการสึกหรอในแต่ละระดับ และ อัตราการสึกหรอ ในแต่ละรูปประกอบด้วย 2 รูปย่อยตามชุดการทดลองและความเร็วรอบ โดยเปรียบเทียบการสึกหรอของเฟืองชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง ตามลำดับดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาโดยเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ
 - รูปที่ 4-2 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-3 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-4 : ความเร็วรอบ 1100 RPM

- 2) การศึกษาโดยเฉลี่ยในแต่ละระดับ
 - รูปที่ 4-5 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-6 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-7 : ความเร็วรอบ 1100 RPM

- 3) ระยะเวลาการสึกหรอจากปลายฟันถึงรากฟันเฟืองในแต่ละระดับ
 - รูปที่ 4-8 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-9 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-10 : ความเร็วรอบ 1100 RPM

- 4) อัตราการศึกษาโดยเฉลี่ยทุกช่วงของฟันเทียบกับระยะเวลาที่ความเร็วรอบต่าง ๆ
 - รูปที่ 4-11 : ชุดที่ 1
 - รูปที่ 4-12 : ชุดที่ 2

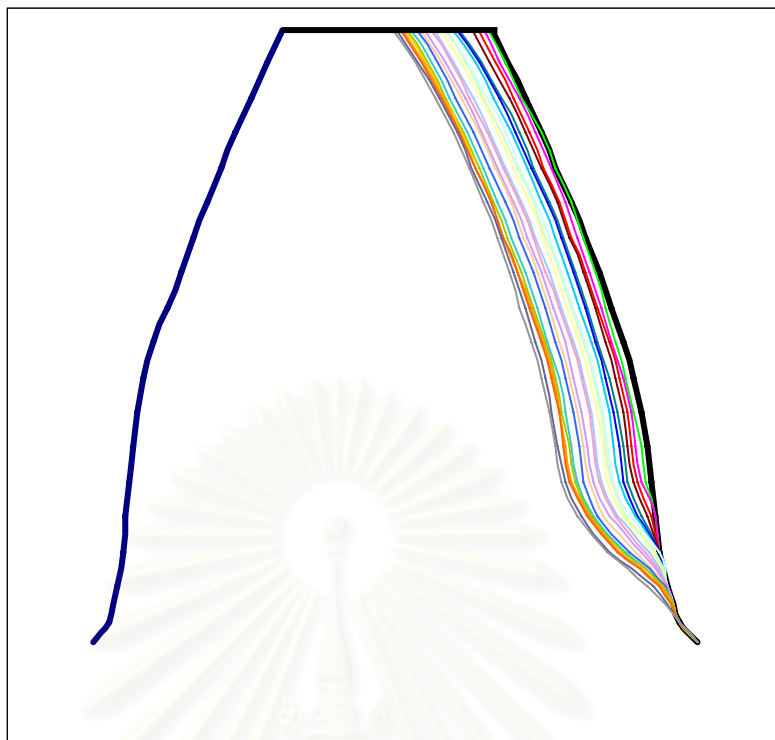


ชุดที่ 1



ชุดที่ 2

รูปที่ 4-2 การสีกหระอโดยเจลลี่ ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 500 RPM

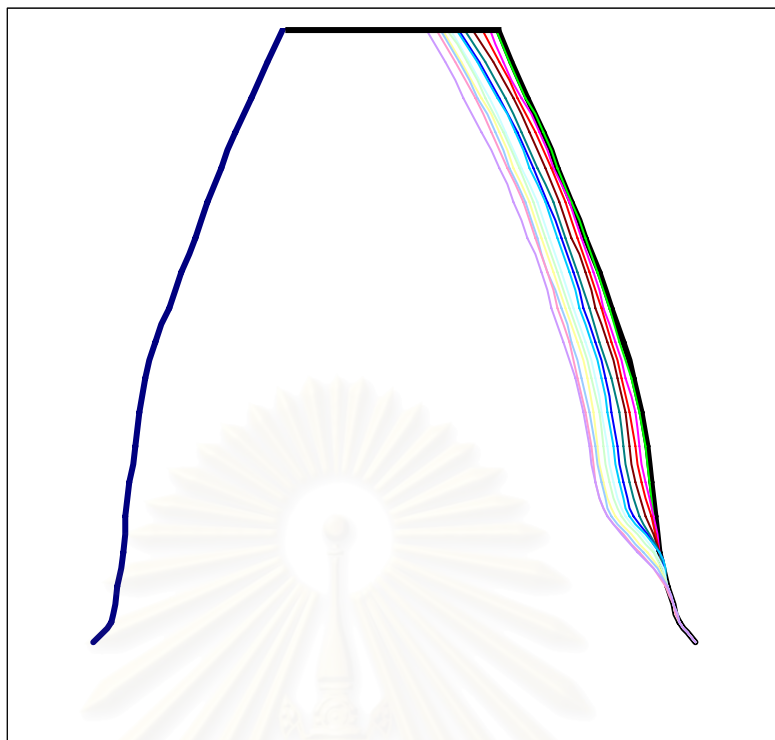


ชุดที่ 1



ชุดที่ 2

รูปที่ 4-3 การสึกหรอโดยเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 800 RPM

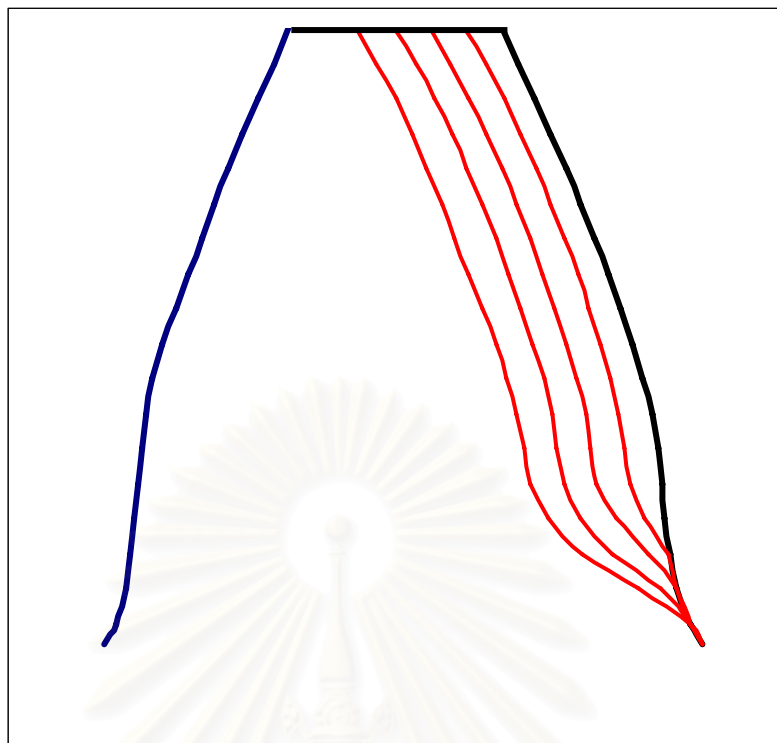


ชุดที่ 1

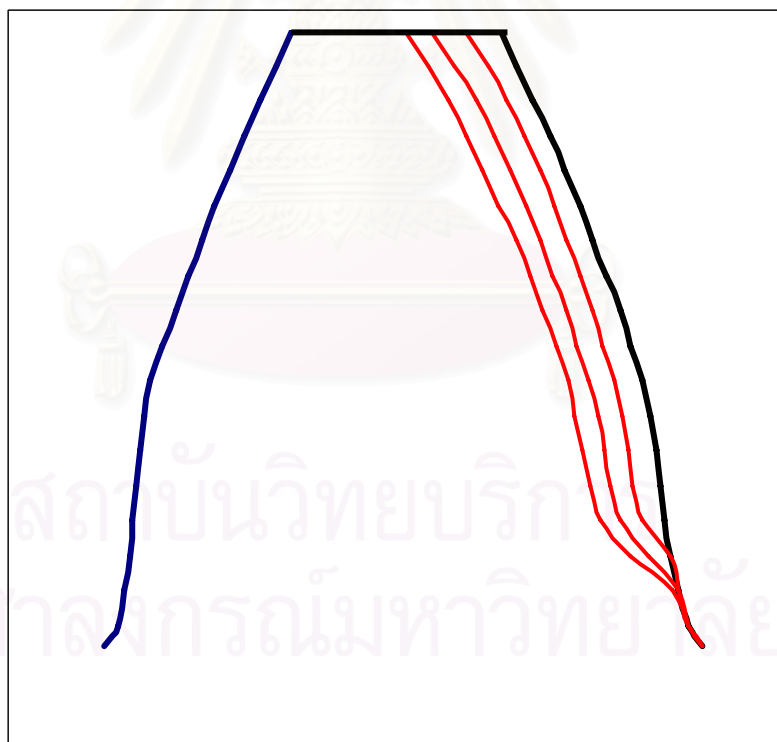


ชุดที่ 2

รูปที่ 4-4 การสีกหระโดยเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM

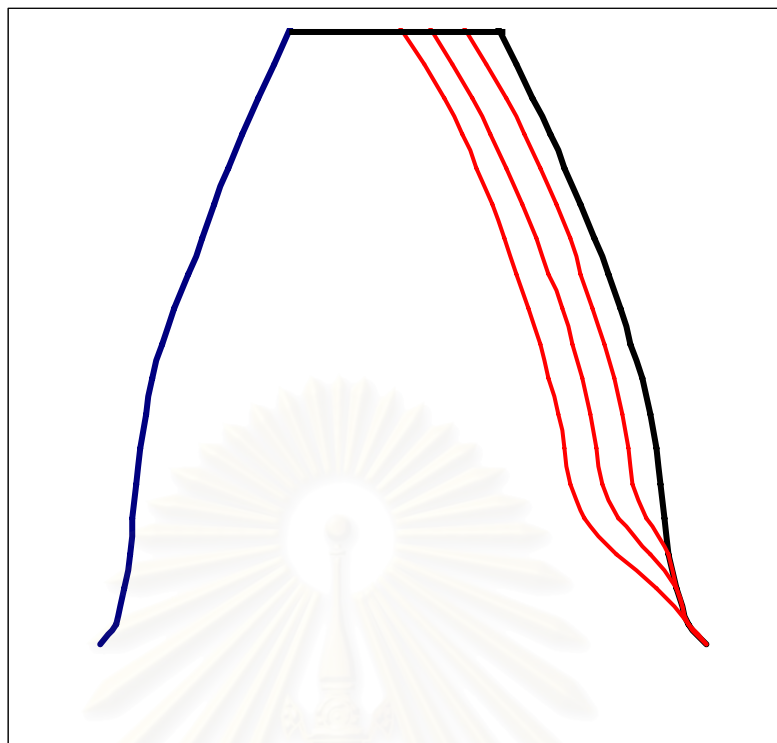


ชุดที่ 1

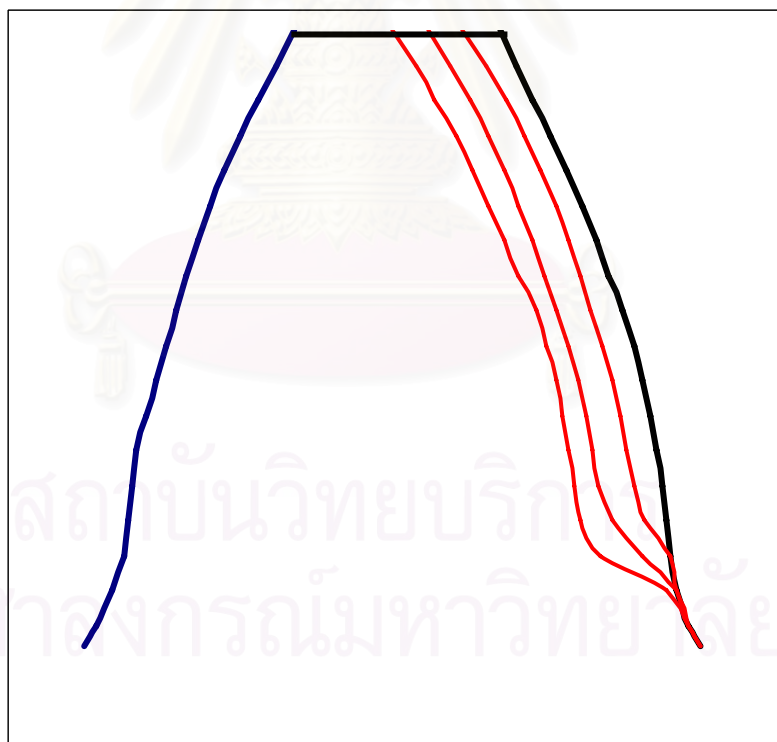


ชุดที่ 2

รูปที่ 4-5 การสึกหรอโดยเฉื่อยในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 500 RPM

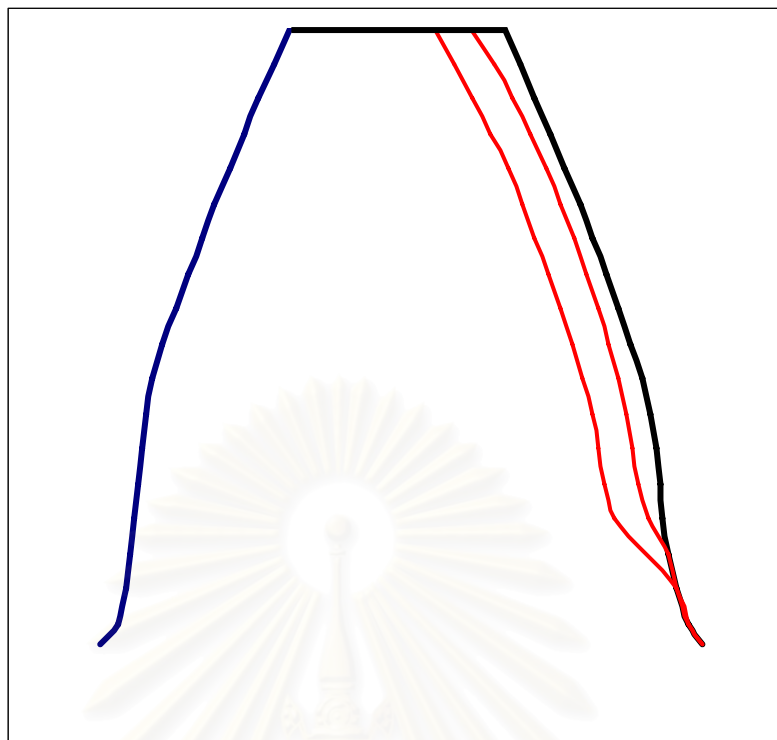


ชุดที่ 1

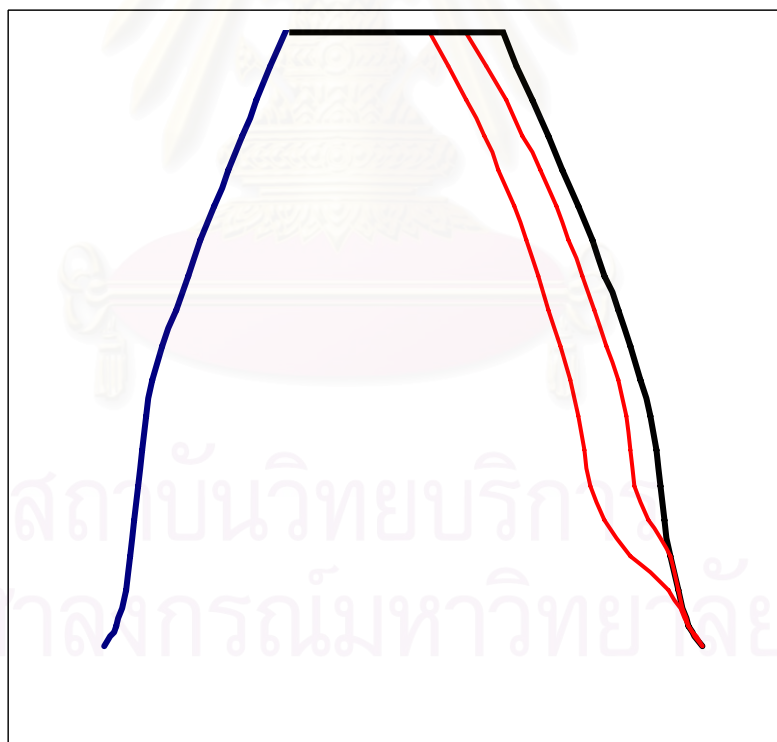


ชุดที่ 2

รูปที่ 4-6 การสึกหรอโดยเฉื่อยในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 800 RPM

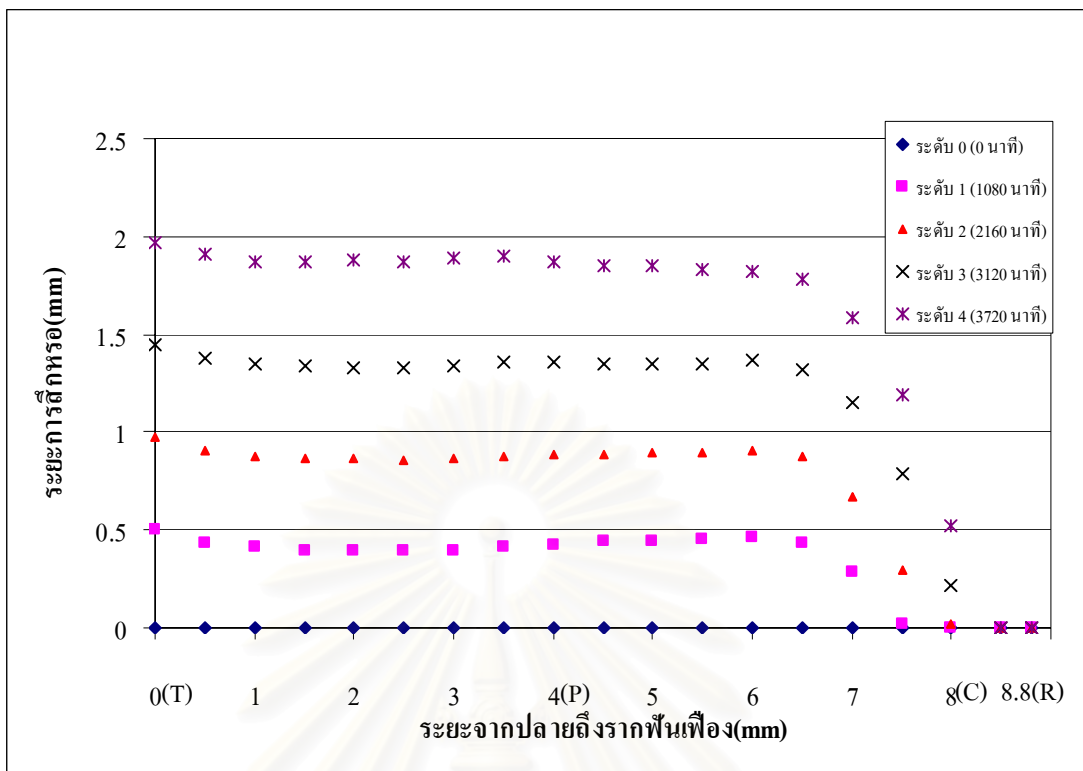


จุดที่ 1

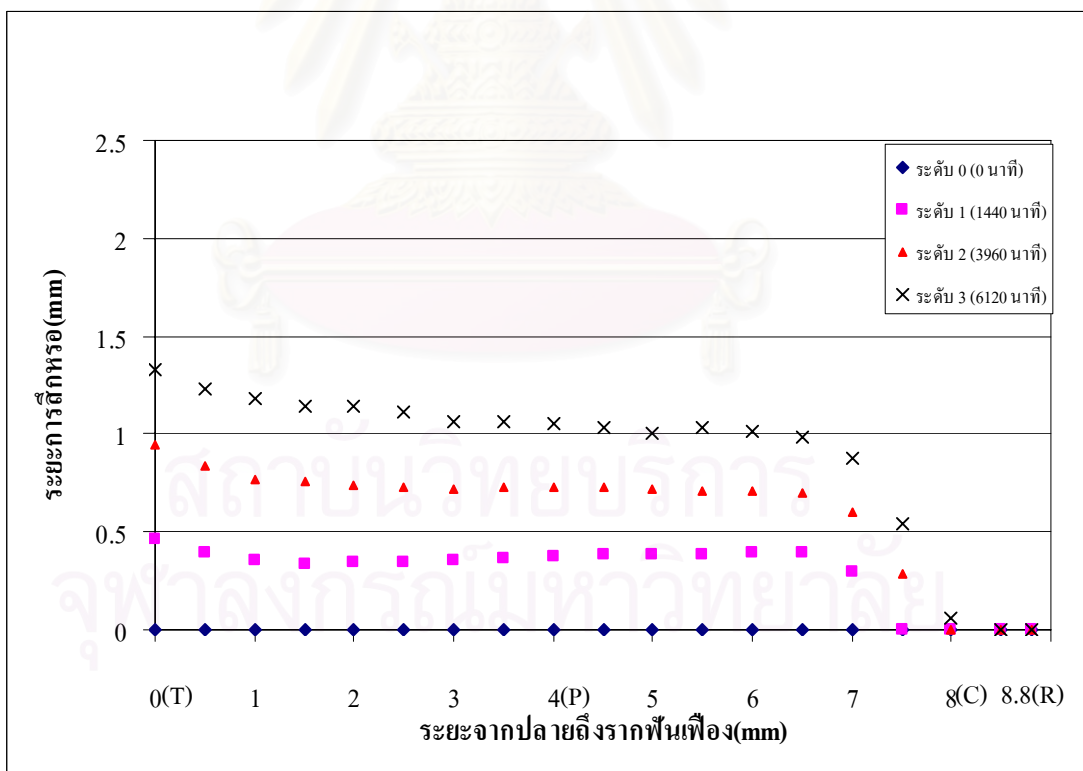


จุดที่ 2

รูปที่ 4-7 การสีกหรือโดยเฉลี่ยในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM

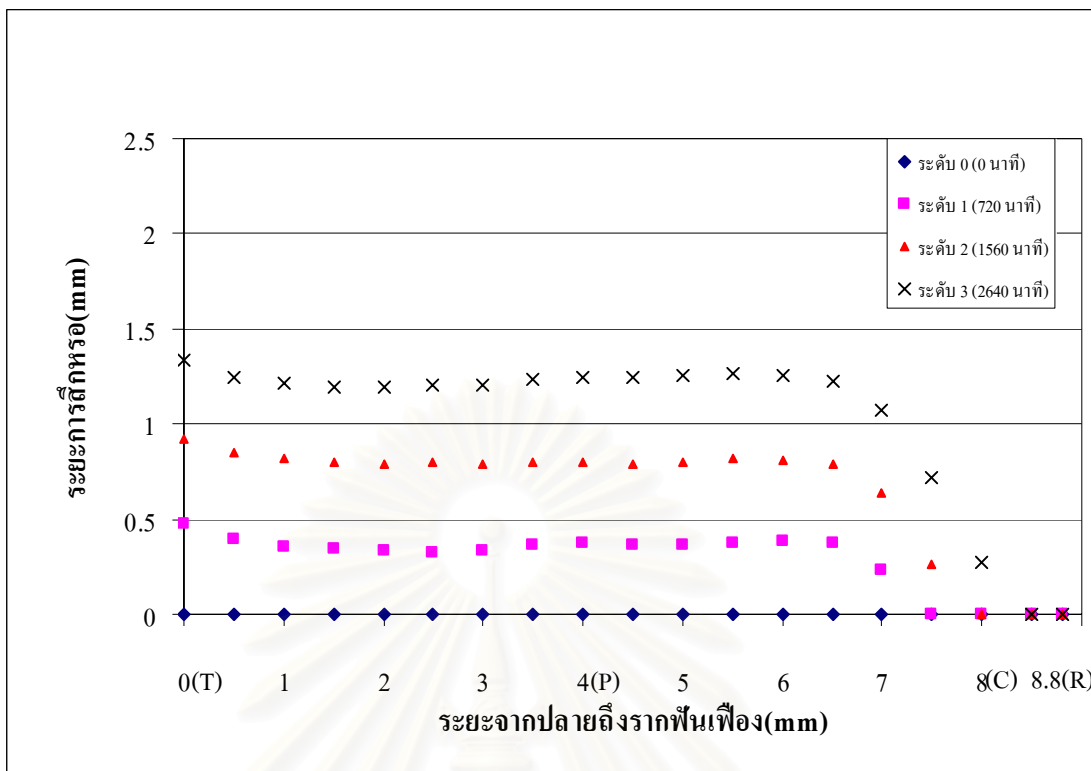


ชุดที่ 1

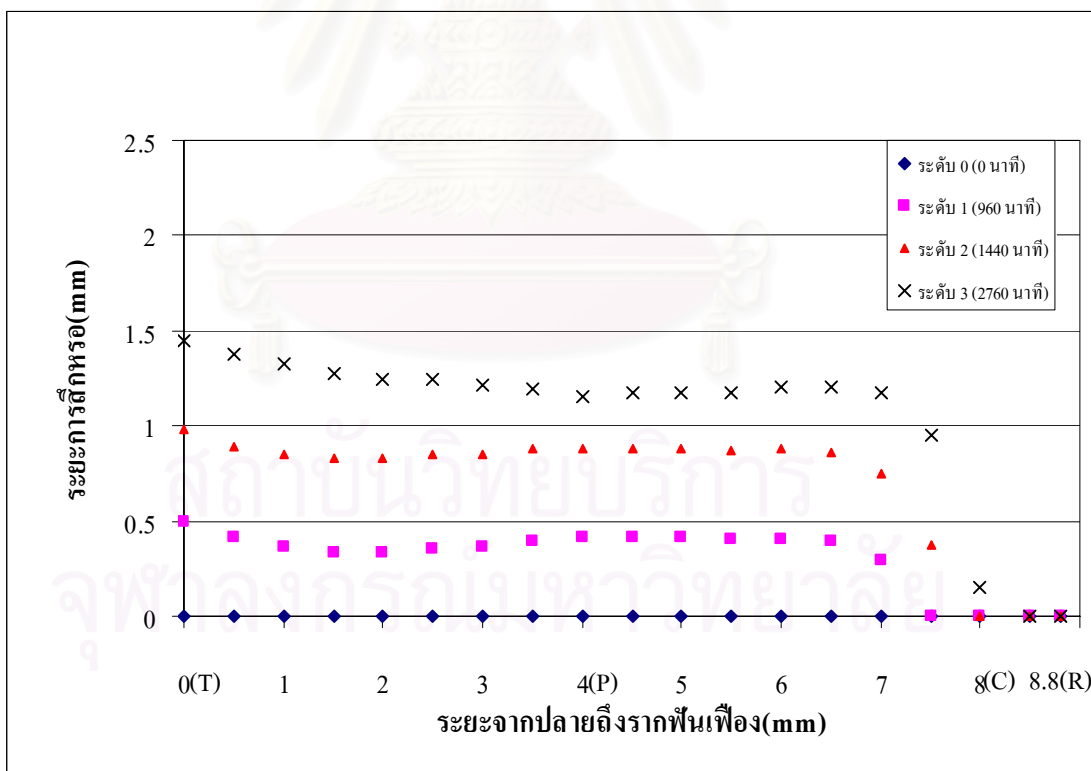


ชุดที่ 2

รูปที่ 4-8 ระยะการสึกหรอจากปลายฟืนถึงรากฟืนเพียงในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 500RPM

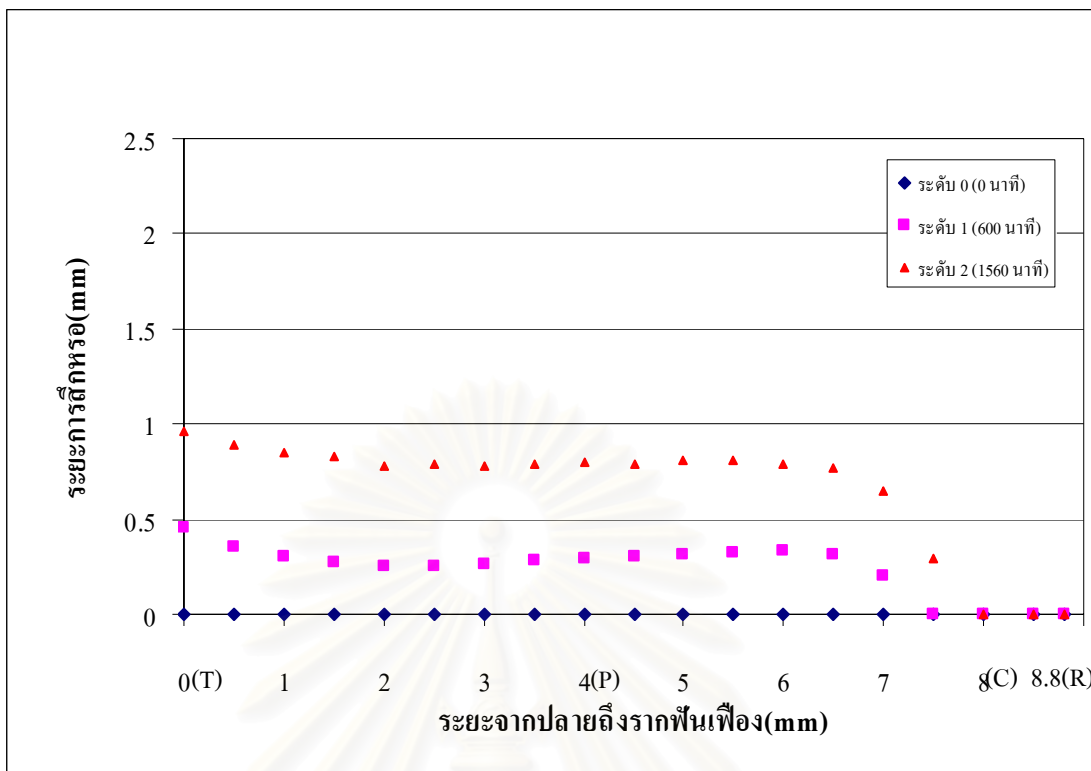


ชุดที่ 1

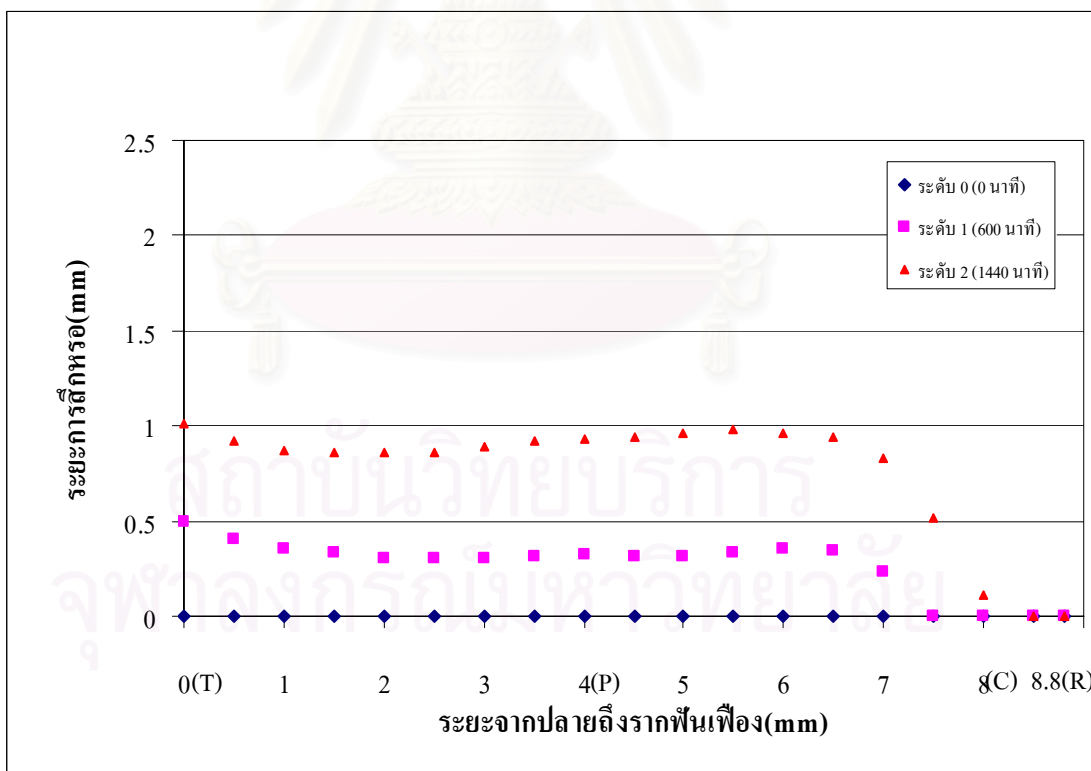


ชุดที่ 2

รูปที่ 4-9 ระยะการสึกหรอจากปลายฟันถึงรากฟันเฟืองในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 800RPM

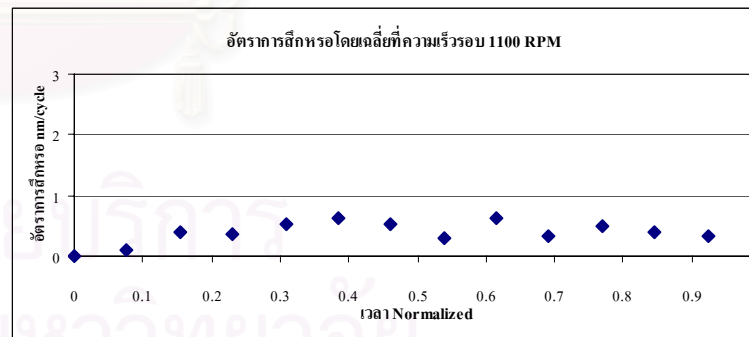
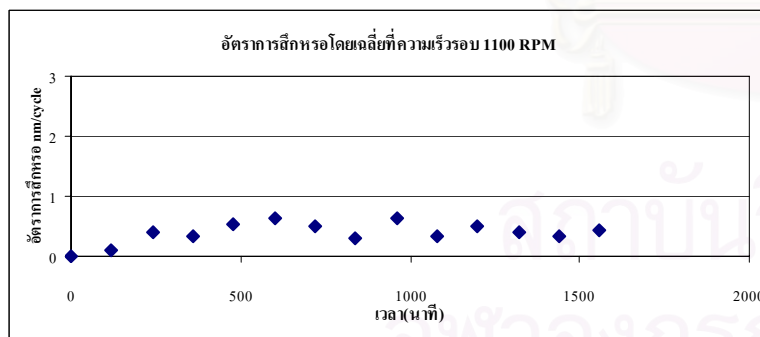
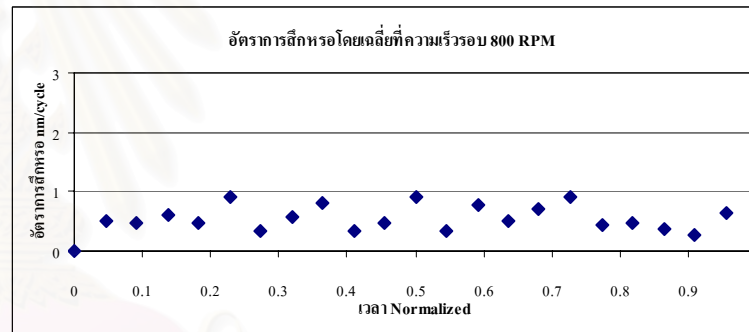
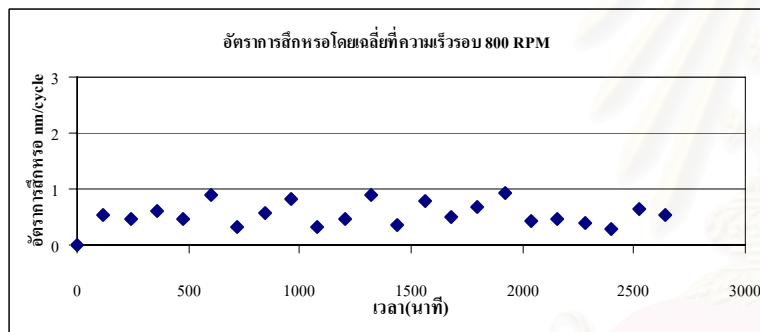
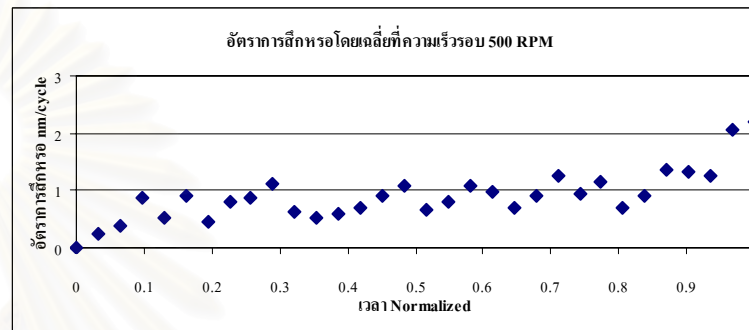
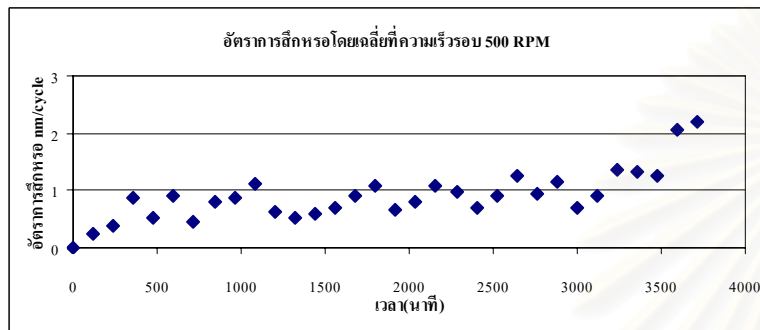


ชุดที่ 1



ชุดที่ 2

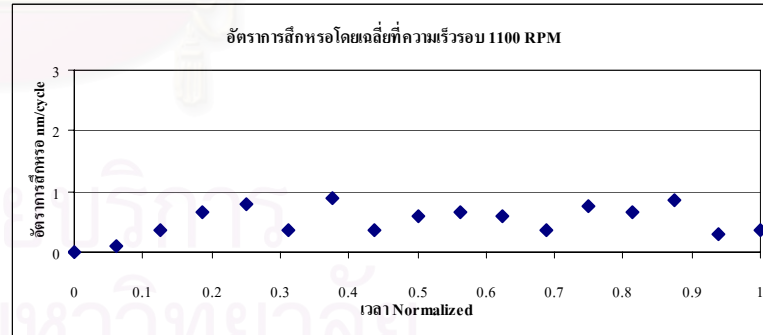
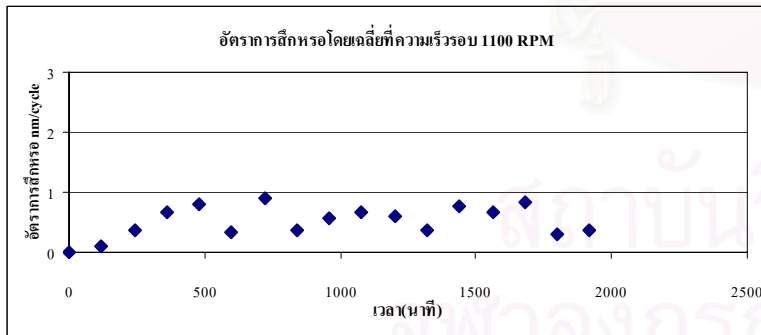
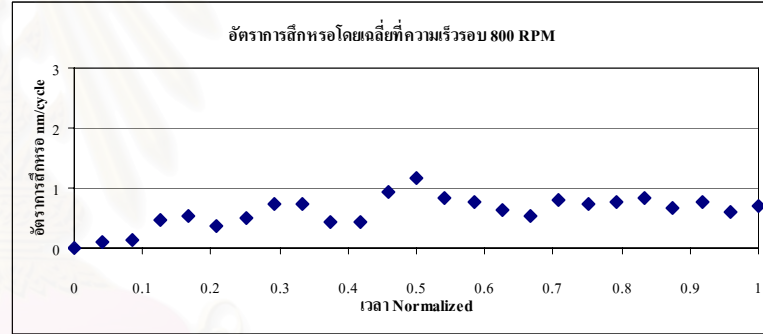
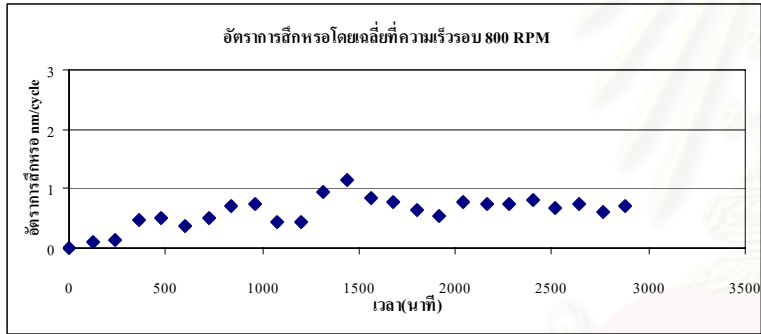
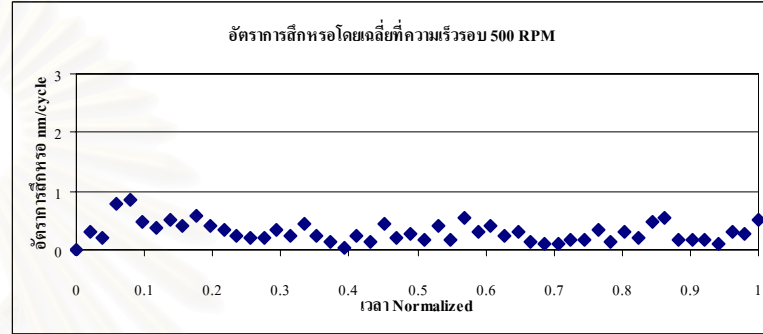
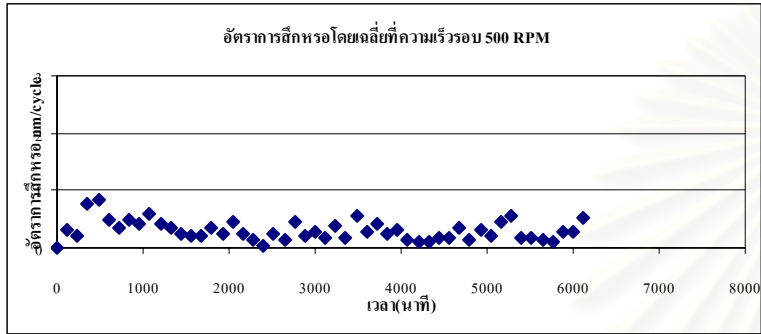
รูปที่ 4-10 ระยะการสึกหรอจากปลายฟืนถึงรากฟืนเฟืองในแต่ละระดับ ที่ความเร็วรอบ 1100RPM



เวลาที่ใช้ในการทดลอง

เวลา Normalized

รูปที่ 4-11 อัตราการสีกหรือเฉลี่ยทุกช่วงของฟันเทียบกับเวลาที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ชุดที่ 1



เวลาที่ใช้ในการทดลอง

เวลา Normalized

รูปที่ 4-12 อัตราการสั่นไหวเฉลี่ยทุกช่วงของฟันเทียบกับเวลาที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ชุดที่ 2

อภิปรายผลของรูปแบบการสึกหรอ

จากรูปที่ 4-2 ถึง 4-4 จะเห็นได้ว่าการสึกหรอของฟันเฟืองที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันและค่อนข้างจะสม่ำเสมอในทุก ๆ สถานะการทดลอง และเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4-5 ถึง 4-7 ที่แสดงถึงการสึกหรอโดยเฉลี่ยที่ระดับการสึกหรอต่าง ๆ เมื่อพิจารณาระยะการสึกหรอจากปลายฟันถึงรากฟันเฟืองในแต่ละระดับการสึกหรอของแต่ละสถานะการทดลองในรูปที่ 4-8 ถึง 4-10 พบว่ามีพฤติกรรมคล้าย ๆ กัน กล่าวคือบริเวณปลายฟันเฟืองจะมีขนาดของการสึกหรอมากที่สุด ในช่วงตำแหน่งต่อมาจนถึงพิตซ์ (4 mm) จะมีการสึกหรอที่ลดลงเล็กน้อย และในช่วงตำแหน่งต่ำลงมาจะมีการสึกหรอที่กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยรวมอาจถือได้ว่าการสึกหรอสม่ำเสมอตลอดช่วงของการสัมผัสของฟันเพราะมีความเร็วสัมผัสของฟันเท่า ๆ กัน ช่วงตำแหน่งที่เป็นตำแหน่งแรกที่เฟืองขับและเฟืองตามขบกัน (8 mm) จะมีการสึกหรอน้อยกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากเป็นจุดแรกของการสัมผัสกันของฟันเฟืองขับกับปลายฟันเฟืองตาม และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการสึกหรอในแต่ละสถานะทุก ๆ 120 นาที โดยหาอัตราการสึกหรอเฉลี่ยจากระยะที่สึกหรอในแต่ละช่วงจากปลายฟันถึงรากฟันเฟืองทุก ๆ 120 นาทีต่อจำนวนรอบของมอเตอร์ที่หมุนใน 120 นาที ของแต่ละสถานะ(ความเร็วรอบ x 120) ดังรูปที่ 4-11 และ 4-12 จะเห็นได้ว่าอัตราการสึกหรอมีค่าในช่วงแคบ ๆ คือ 0.25 – 0.75 นาโนเมตรต่อรอบ โดยรวมแล้วแนวโน้มของอัตราการสึกหรอของการทดลองแต่ละชุดค่อนข้าง อัตราการสึกหรอที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ในการทดลองแต่ละชุดแนวโน้มมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงที่ไม่เหมือนกันทั้งนี้เนื่องจากเฟืองตาม(เฟืองเหล็ก) ที่ใช้ในการทดลองเกิดการสึกหรอมีผิวสัมผัสที่เรียบขึ้นและอาจมีไค้งอินโวลูทที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมบ้าง ทำให้การสัมผัสและเสียดสีระหว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของผิวไค้งอินโวลูทของเฟืองขับและเฟืองตามในแต่ละช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้แนวโน้มของอัตราการสึกหรอของการทดลองแต่ละชุดแตกต่างกันและใช้เวลาในการทดลองนานขึ้น

สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทดลอง

การเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนจากทั้ง 2 วิธี ได้แก่ วิธีเฉลี่ยกันบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging) และวิธีเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาแบบเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging) สัญญาณที่ได้มีความแตกต่างกันทั้งขนาดแอมพลิจูดโดยรวมและความละเอียดในสัญญาณบนโดเมนเวลาสเปกตรัม และเซปต์สตรัม ซึ่งก็มีจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไป การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนกับระดับการสึกหรอของฟันเพื่อนำจุดเด่นในแต่ละวิธีการเก็บสัญญาณมาช่วยวิเคราะห์เพื่อให้แนวโน้มที่ได้มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากที่สุด

สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการเก็บสัญญาณโดยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ เกิดจากการเฉลี่ยกันของสัญญาณจำนวน 20 และ 100 ชุดสัญญาณตามลำดับต่อเนื่องกัน การเก็บสัญญาณแต่ละวิธีจะเก็บสัญญาณ 5 ครั้งนำมาเฉลี่ยกัน ใช้เวลาในการเก็บสัญญาณแต่ละสภาวะทดลองเฉลี่ยประมาณ 15-30 นาที ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการทดลองทั้งหมด จึงอาจประมาณได้ว่าไม่มีการสึกหรอเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บสัญญาณ

ในการเก็บสัญญาณทั้ง 2 ทิศทาง คือ แนวตั้งและแนวระดับ สัญญาณที่ได้มีขนาดที่แตกต่างกัน โดยสัญญาณแนวตั้งซึ่งมีทิศตามแนวแรงที่กระทำกับฟันเพื่อนำค่ามากกว่า และเห็นสัญญาณได้ชัดเจนกว่าสัญญาณในแนวระดับ

การแสดงผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแสดงเฉพาะสภาวะความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เนื่องจากสามารถเห็นภาพของสัญญาณต่าง ๆ ได้ชัดเจนกว่าสภาวะการทดลองอื่น และแสดงสัญญาณเฉพาะตั้งแต่เริ่มการทดลองและสัญญาณที่ระดับการสึกหรอสุดท้ายก่อนหยุดการทดลองเท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณในช่วงเริ่มต้นและช่วงที่ชุดเฟืองมีความเสียหายเกิดขึ้น

ภาพสัญญาณการสั่นสะเทือน

ภาพสัญญาณการสั่นสะเทือนประกอบไปด้วย สัญญาณบนโดเมนเวลา สัญญาณสเปกตรัม และสัญญาณเซปต์สตรัม รูปสัญญาณเรียงตามลำดับการเก็บสัญญาณดังต่อไปนี้

- 1) สัญญาณที่ความเร็ว 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging

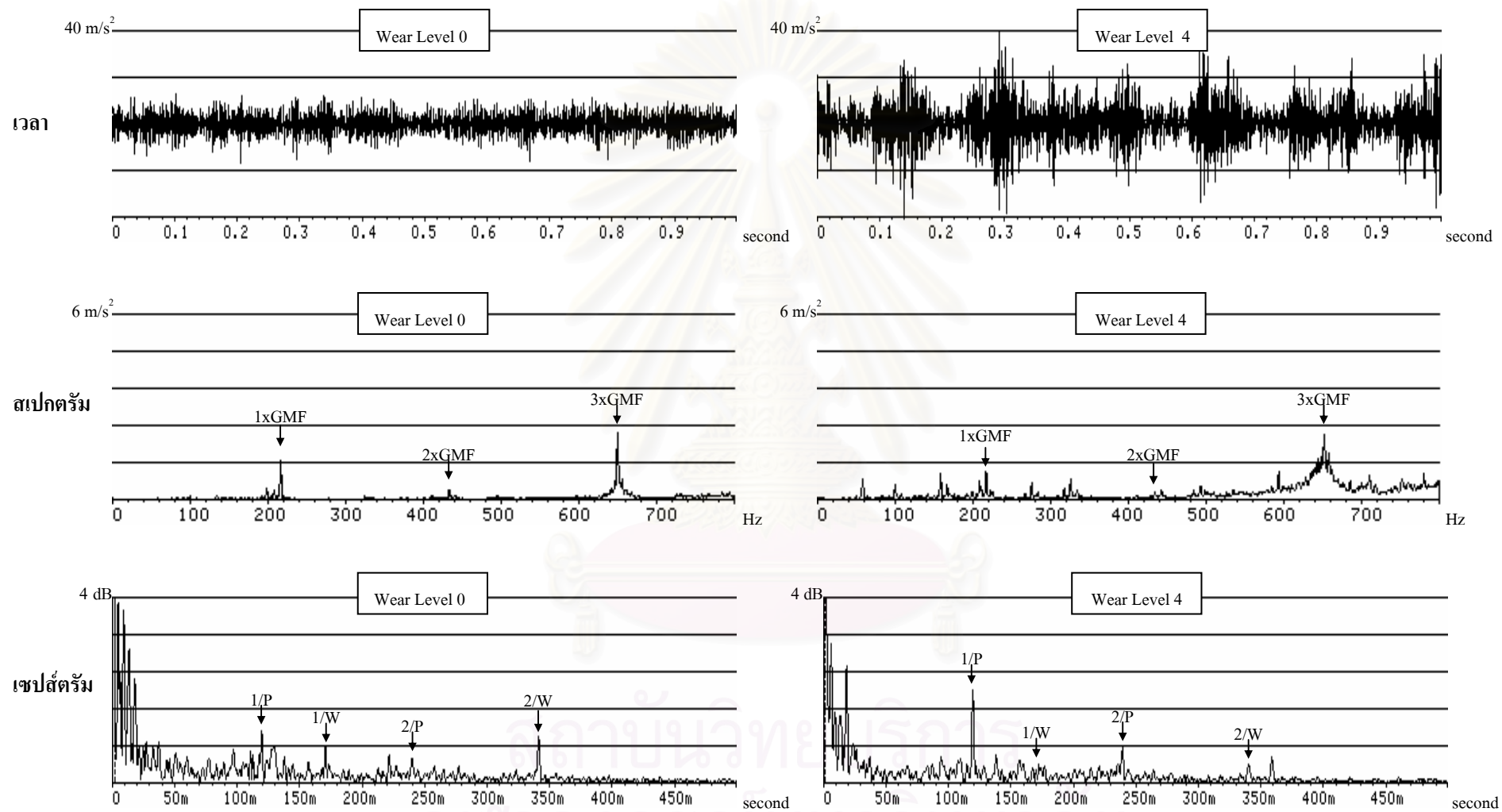
รูปที่ 4-13 : เก็บสัญญาณในแนวตั้ง

รูปที่ 4-14 : เก็บสัญญาณในแนวนอน

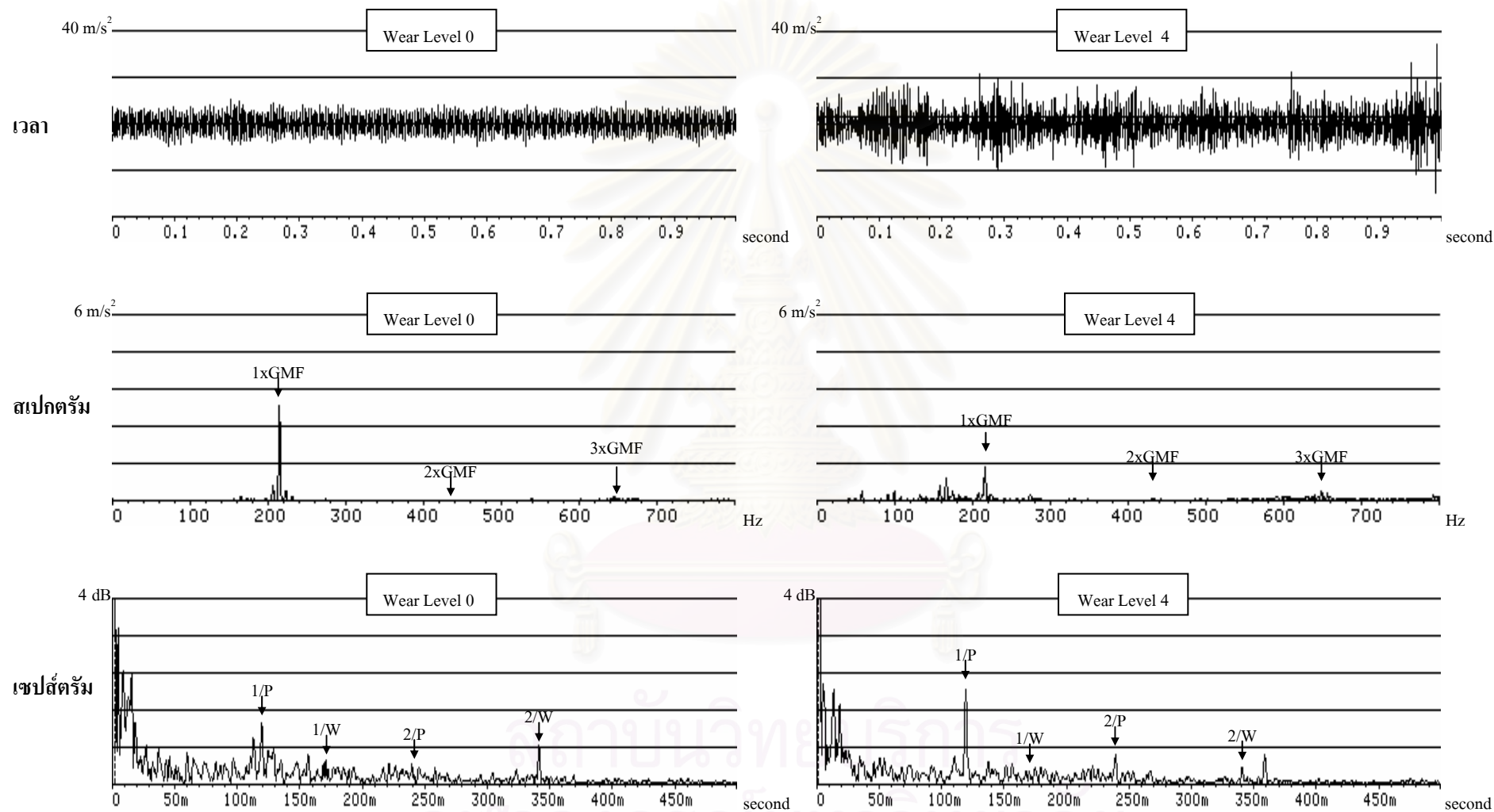
- 2) สัญญาณที่ความเร็ว 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging

รูปที่ 4-15 : เก็บสัญญาณในแนวตั้ง

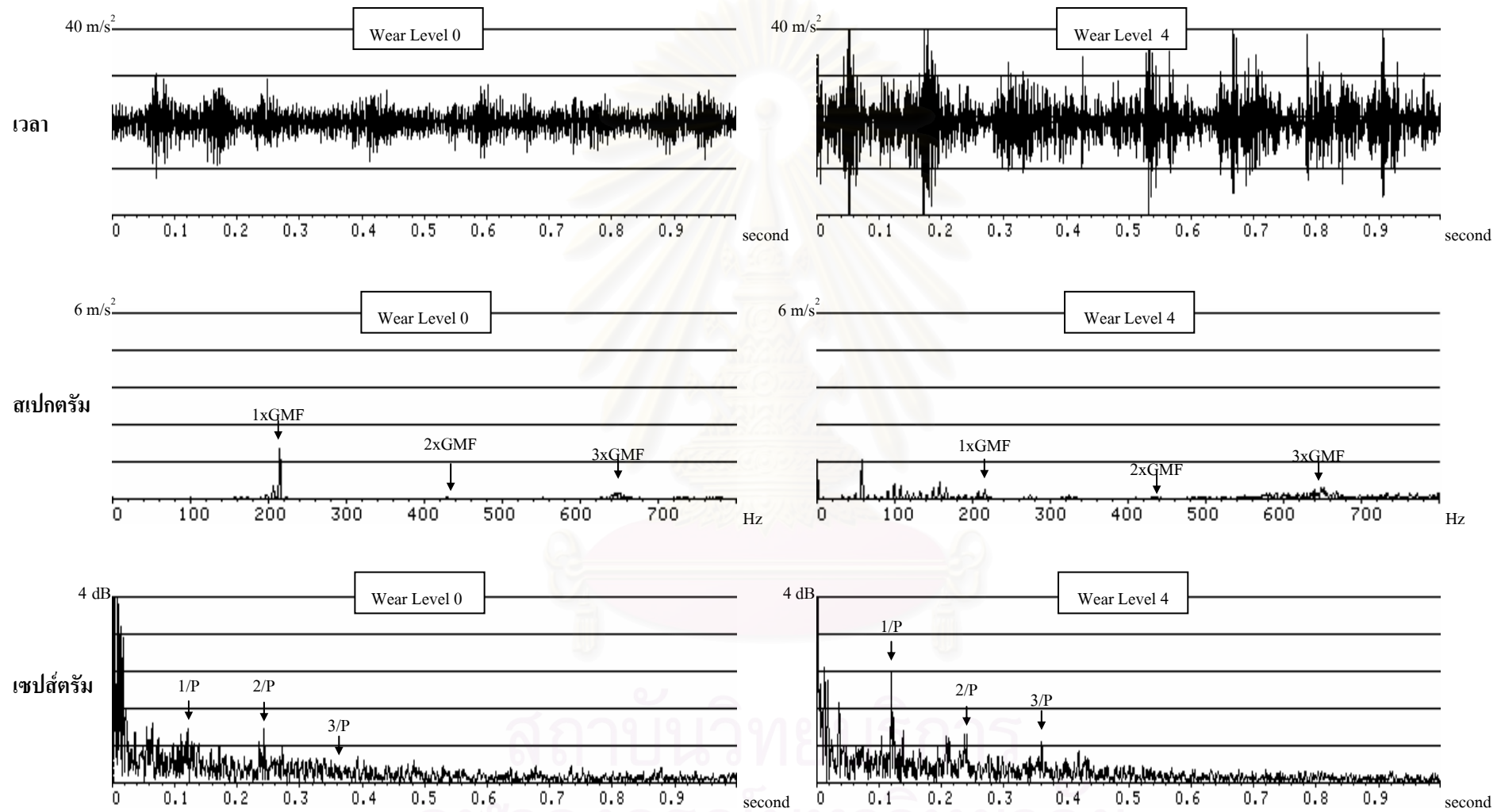
รูปที่ 4-16 : เก็บสัญญาณในแนวนอน



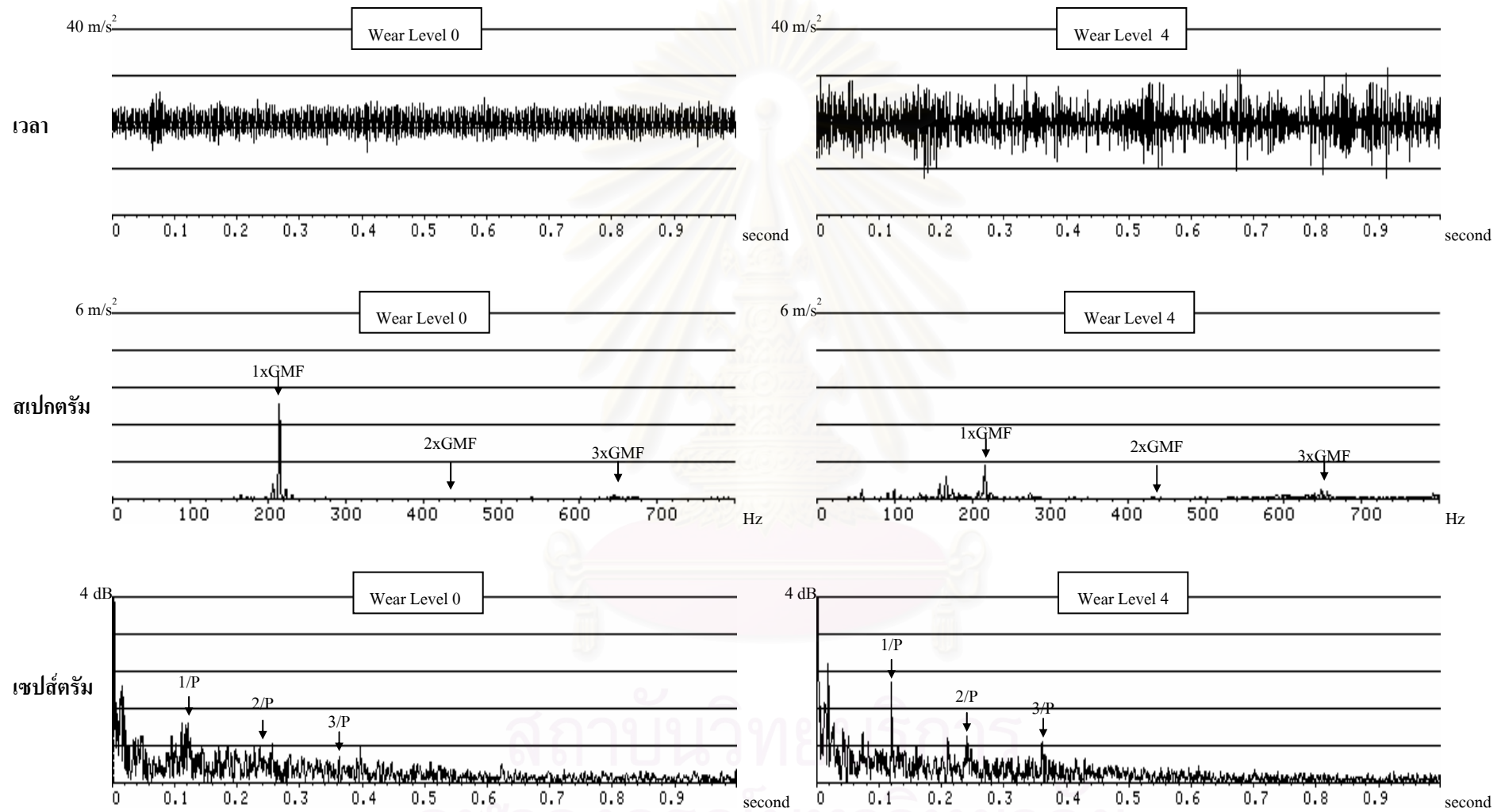
รูปที่ 4-13 สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวดิ่ง



รูปที่ 4-14 สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวระดับ



รูปที่ 4-15 สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ในแนวตั้ง



รูปที่ 4-16 สัญญาณที่สภาวะ 500 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ในแนวระดับ

อภิปรายผลของสัญญาณบนโดเมนเวลา

จากรูปที่ 4-13 ถึง 4-16 โดยรวมจะพบว่าสัญญาณบนโดเมนเวลาในแนวตั้งจะมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าสัญญาณในแนวระดับ ทุกวิธีการเก็บสัญญาณและทุกสภาวะความเร็วรอบที่ใช้ทดลองอย่างชัดเจน สัญญาณที่ได้จากการเก็บสัญญาณโดยวิธี Synchronous Time Averaging สามารถสังเกตเห็นการมอดูเลตของสัญญาณได้ง่ายกว่าการเก็บสัญญาณโดยวิธี Spectrum Averaging เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการเก็บสัญญาณโดยวิธี Synchronous Time Averaging เป็นตัวแทนของสัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ยกันของสัญญาณบนโดเมนเวลาจำนวน 100 ชุด ซึ่งสามารถลดสัญญาณรบกวนได้เป็นอันมาก ในขณะที่สัญญาณที่ได้จากการเก็บสัญญาณโดยวิธี Spectrum Averaging คือสัญญาณบนโดเมนเวลาเพียงชุดเดียว โดยจากรูปสัญญาณความถี่ต่ำที่มอดูเลตมีคาบประมาณเท่ากับคาบของความเร็วยรอบหมุนของเฟืองขับ

อภิปรายผลของสัญญาณสเปกตรัม

จากรูปที่ 4-13 ถึง 4-16 สัญญาณที่เก็บโดยวิธี Synchronous Time Averaging จะให้แอมพลิจูดที่ต่ำกว่าสัญญาณที่เก็บโดยวิธี Spectrum Averaging และมียอดสเปกตรัมที่ชัดเจนกว่าสัญญาณที่ได้จากการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เนื่องจากสามารถลดสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างมาก และสัญญาณสเปกตรัมโดยรวมจะปรากฏยอดสเปกตรัมที่เด่นชัดที่ความถี่ $1 \times \text{GMF}$ และ $3 \times \text{GMF}$ แต่การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของยังไม่ชัดเจนตามระดับการสึกหรอ เช่นเดียวกับยอดสเปกตรัมของแถบความถี่ข้างที่ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนและแทบจะไม่พบยอดความถี่ข้างเลยทั้งการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging สัญญาณสเปกตรัมในแนวตั้งโดยรวมมีค่ามากกว่าระดับสัญญาณในแนวระดับที่ทุก ๆ สภาวะ แต่ในสภาวะ 500 RPM ช่วงระดับการสึกหรอต้น ๆ ยอดสเปกตรัมความถี่ $1 \times \text{GMF}$ มีแอมพลิจูดสัญญาณในแนวตั้งน้อยกว่าในแนวระดับ

อภิปรายผลของสัญญาณเซปส์ตรัม

จากรูปที่ 4-13 ถึง 4-16 พบว่าสัญญาณที่เก็บโดยวิธีการเก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging จะมียอดเซปส์ตรัมที่เด่นชัดกว่าการเก็บสัญญาณโดยวิธี Spectrum Averaging โดยรวมที่สภาวะ 500 RPM และ 800 RPM สัญญาณในแนวตั้งจะมีค่าสูงกว่าสัญญาณในแนวระดับ แต่ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM สัญญาณในแนวตั้งและแนวระดับมีค่าใกล้เคียงกัน แกมมาของเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีต่าง ๆ มิได้เปลี่ยนแปลงตามระดับสึกหรอ ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM และ 800 RPM สัญญาณที่ได้จากวิธีการเก็บสัญญาณจะพบยอดของเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี $1/P$ ได้ชัดเจนกว่าควิเฟรนซีอื่น ๆ แต่แกมมาของเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีดังกล่าวมิได้เปลี่ยนแปลงตามระดับสึกหรอเช่นเดียวกัน ส่วนที่สภาวะ 1100 RPM ไม่พบควิเฟรนซีที่ชัดเจนในทุกุระดับการสึกหรอ

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณการสั่นสะเทือนกับรูปแบบการสั่นหรือของเฟืองตรงเพื่อใช้ระบุว่าการสั่นหรือของฟันเฟืองยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ ดำเนินการโดยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีระดับของการสั่นหรือต่าง ๆ กัน เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ตามความรุนแรงของปัญหาการสั่นหรือ ความเร็วรอบหมุน และทิศทางการวัดสัญญาณที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนกระทำทั้งหมดบนโดเมนเวลา และโดเมนความถี่

สัญญาณบนโดเมนเวลา

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณคือ

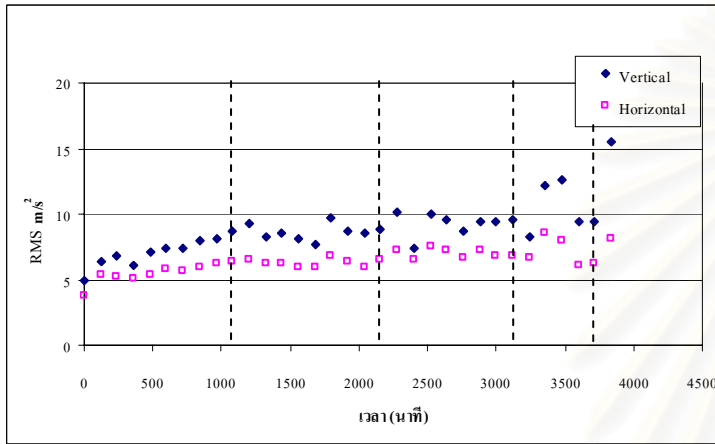
- RMS คือ ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส
- Peak คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณในช่วงระยะเวลาที่เก็บสัญญาณ
- Crest factor คือ อัตราส่วนระหว่างค่า Peak ต่อค่า RMS
- Kurtosis คือ ค่าทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของการกระจายตัวของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

ค่าพารามิเตอร์ได้จากค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์แต่ละตัวโดยการเก็บสัญญาณ 5 ครั้ง ทุก ๆ 120 นาที และใช้การเพิ่มขึ้นของเวลาแทนการสั่นหรือที่เพิ่มขึ้น กราฟแกนตั้งแสดงขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณบนโดเมนเวลาส่วนแกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ไปในการทดลอง ระดับสั่นหรือจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ไปในการทดลอง เส้นประที่ลากตั้งฉากกับแกนนอนแสดงระดับสั่นหรือต่างๆ ของเฟือง ในกราฟหนึ่ง ๆ แสดงแอมพลิจูดเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณที่เก็บในแนวตั้งและสัญญาณที่เก็บในแนวระดับ

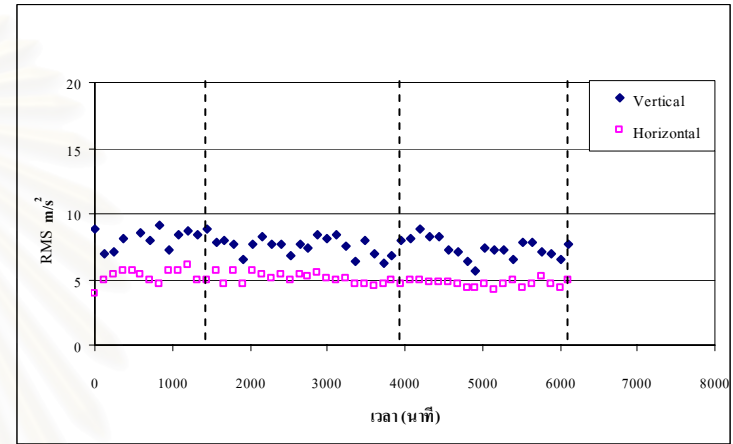
หมายเหตุ ระหว่างการทดลองได้วัดระดับเสียงของการขบกันของฟันเฟืองในช่วงเวลาเดียวกับที่วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณบนโดเมนเวลาและเวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละรูปประกอบด้วย 4 รูปย่อยตามวิธีการเก็บสัญญาณ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging ชุดเฟืองที่ 1 และ 2 ในแต่ละสถานะ แต่ละรูปย่อยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่วัดในแนวระดับ (Horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับดังต่อไปนี้

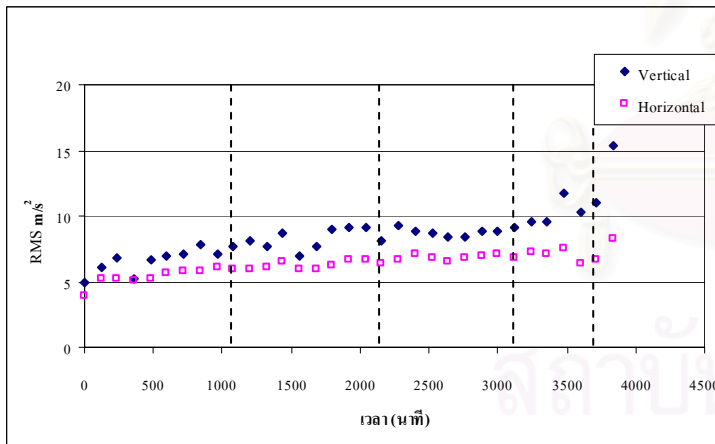
- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS และเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-17 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-18 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-19 : ความเร็วรอบ 1100 RPM
- 2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak และเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-20 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-21 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-22 : ความเร็วรอบ 1100 RPM
- 3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor และเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-23 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-24 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-25 : ความเร็วรอบ 1100 RPM
- 4) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis และเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-26 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-27 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-28 : ความเร็วรอบ 1100 RPM



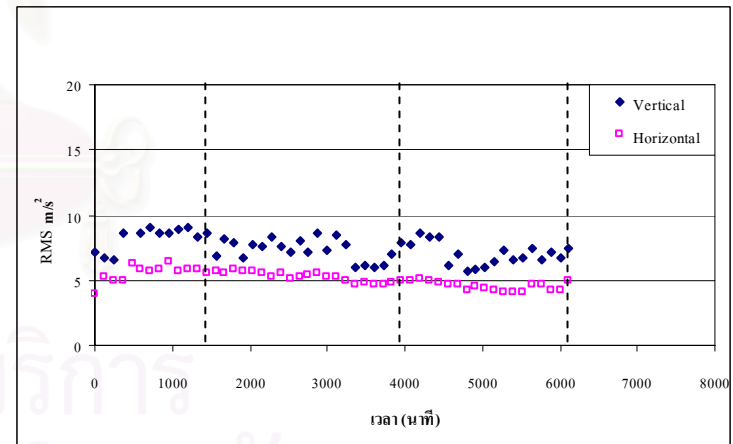
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

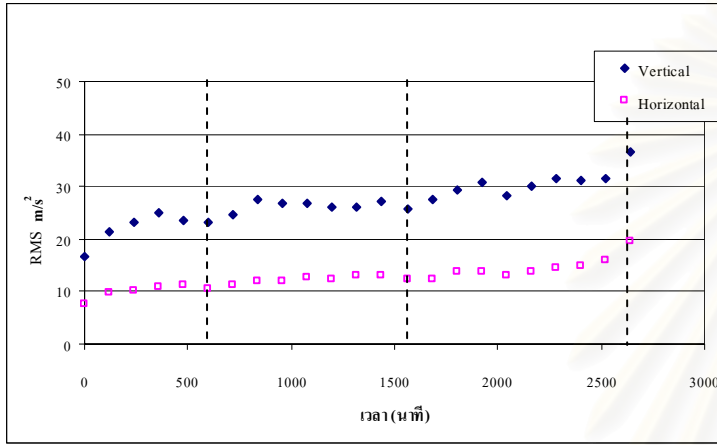


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

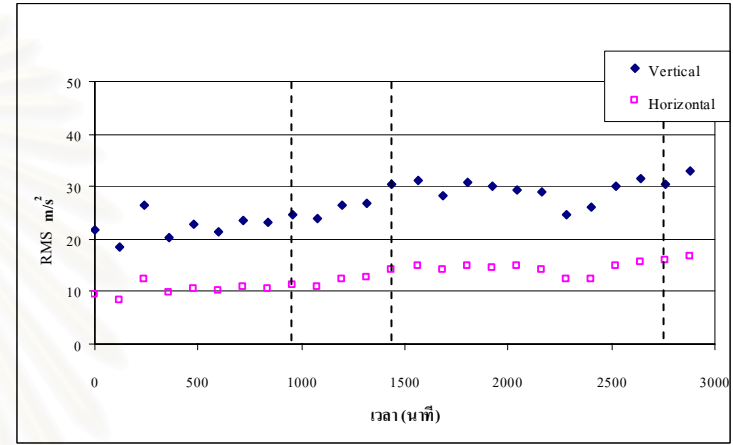


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

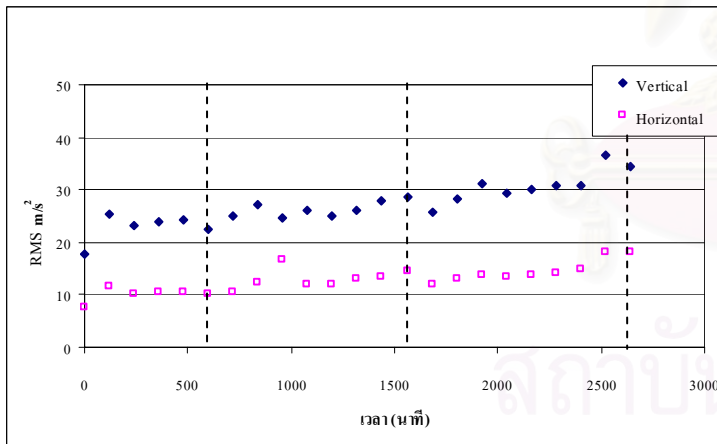
รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



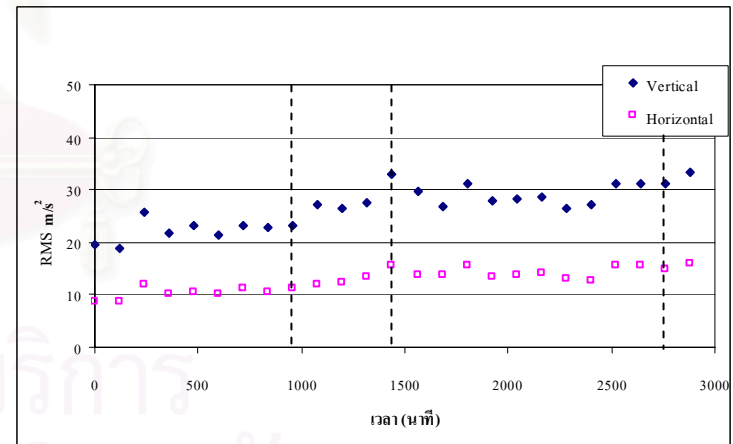
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

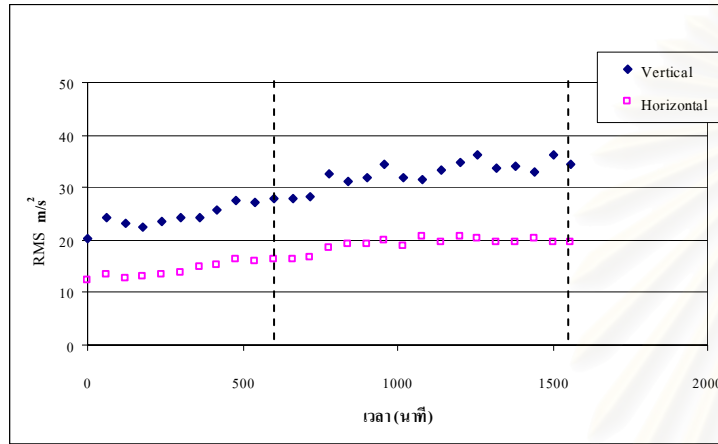


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

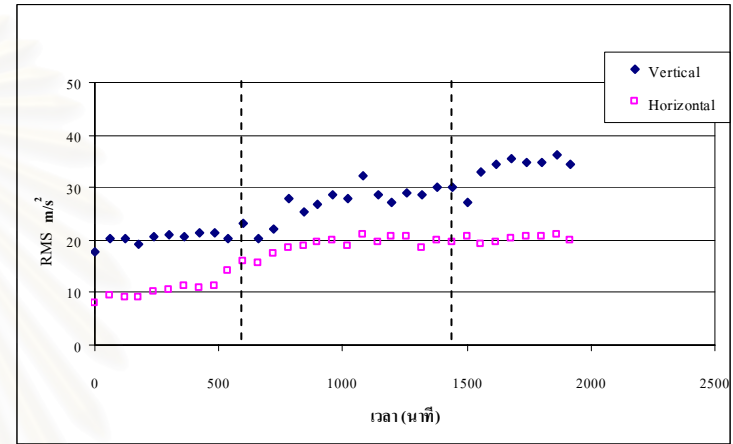


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

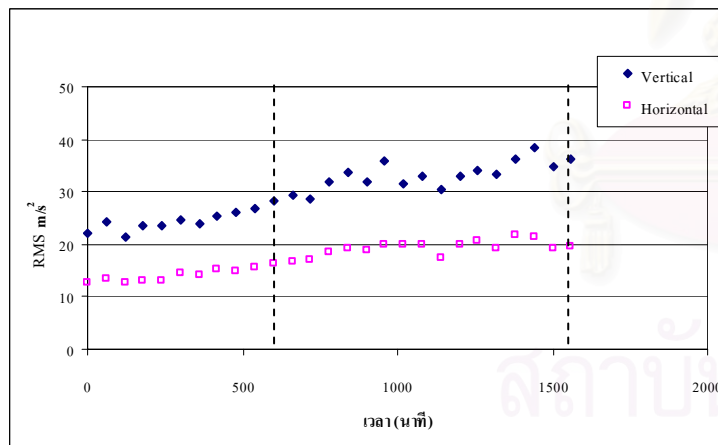
รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



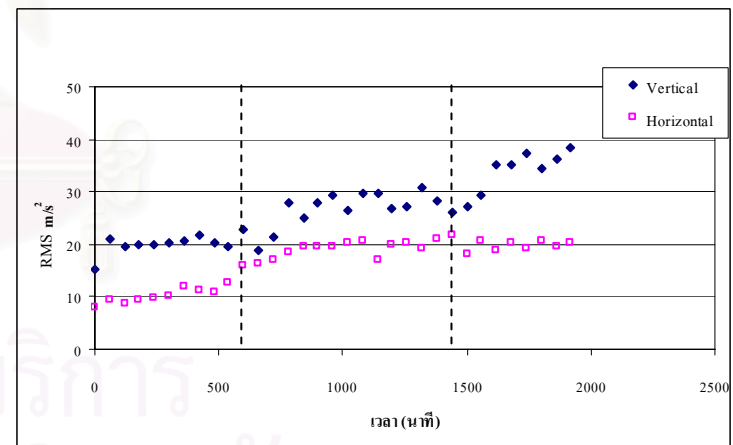
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 2

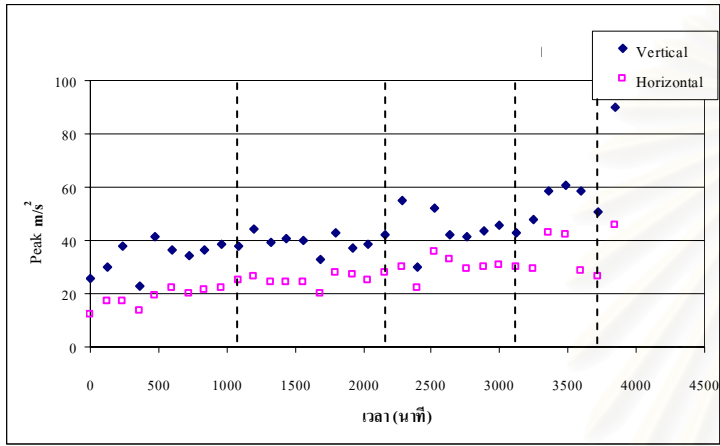


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 1

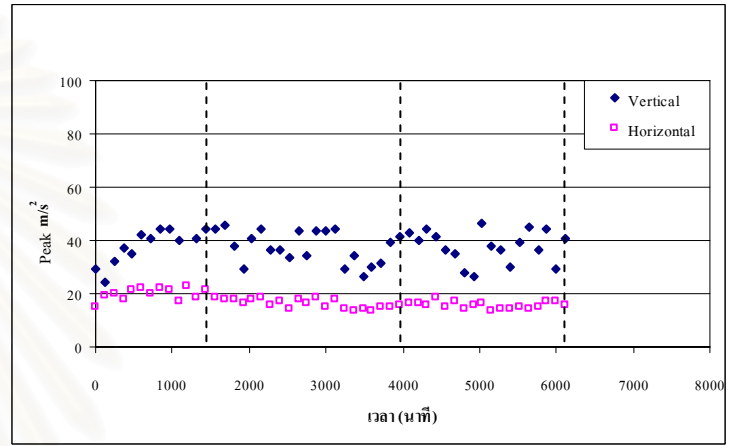


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 2

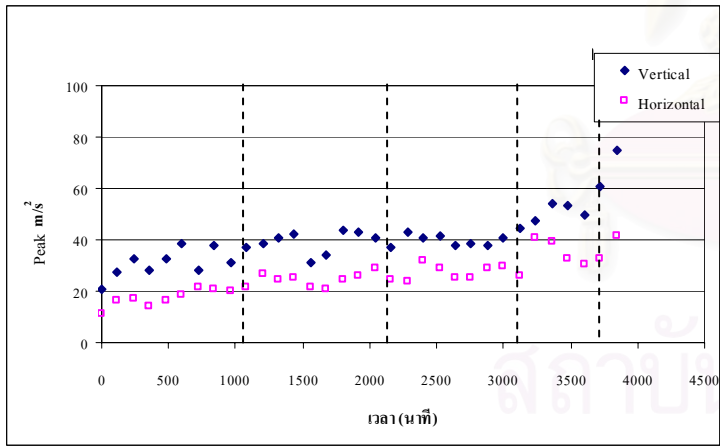
รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM



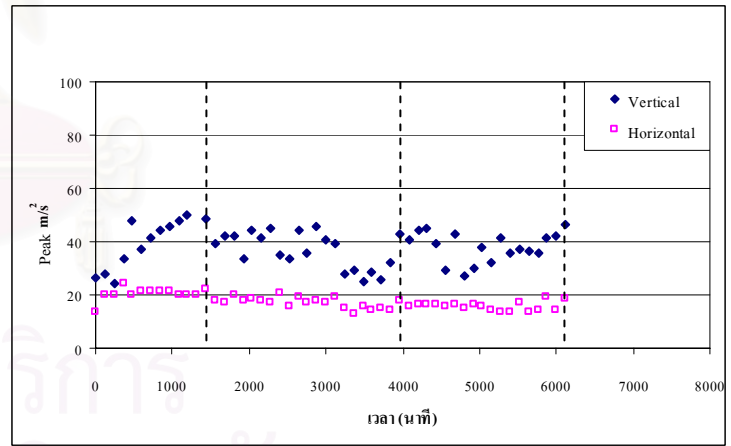
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

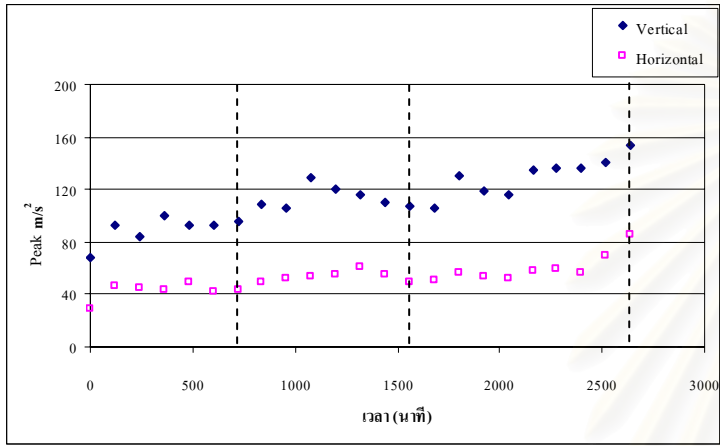


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

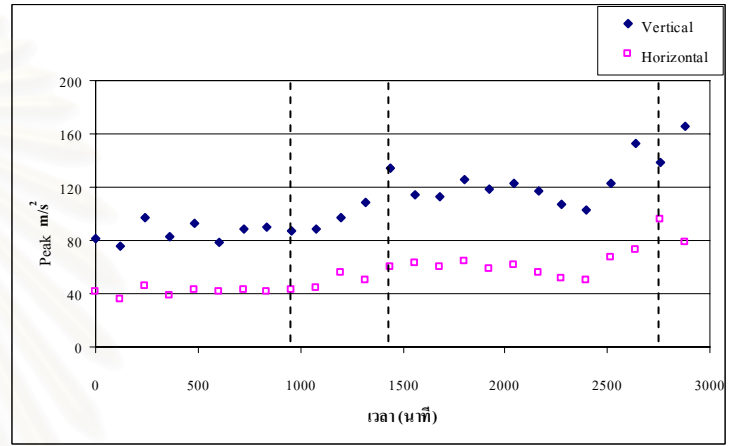


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

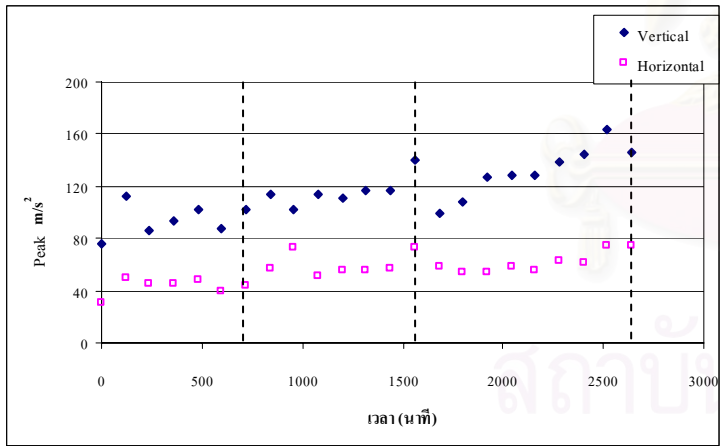
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



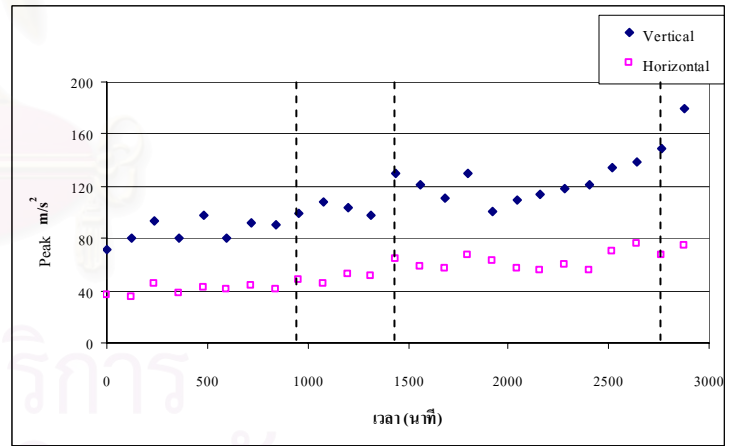
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

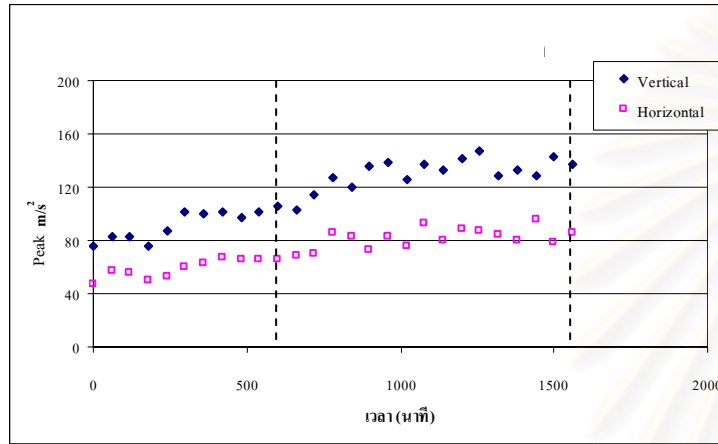


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

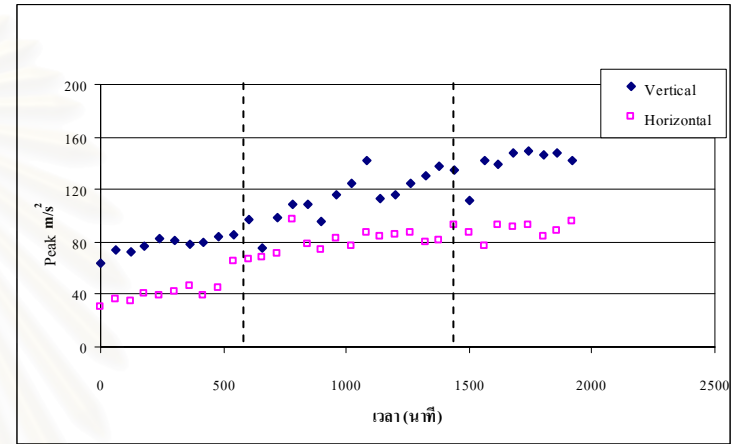


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

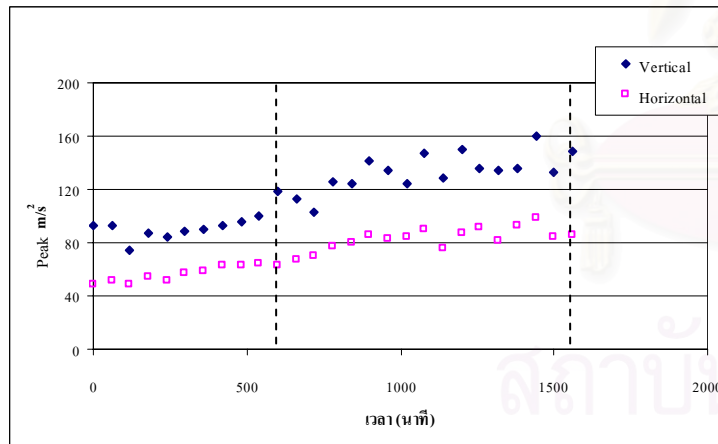
รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



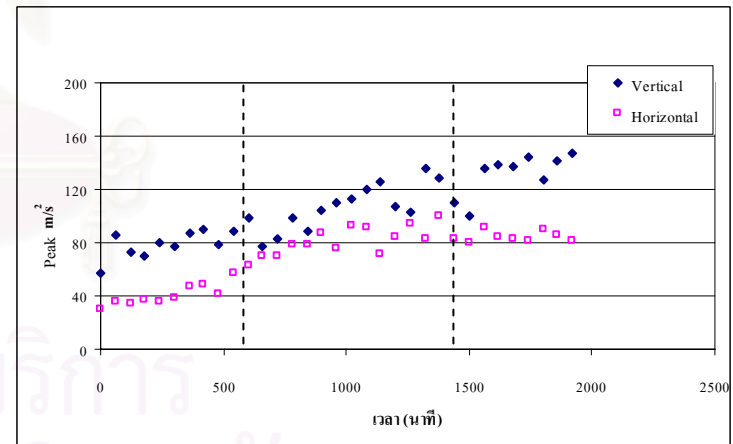
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 2

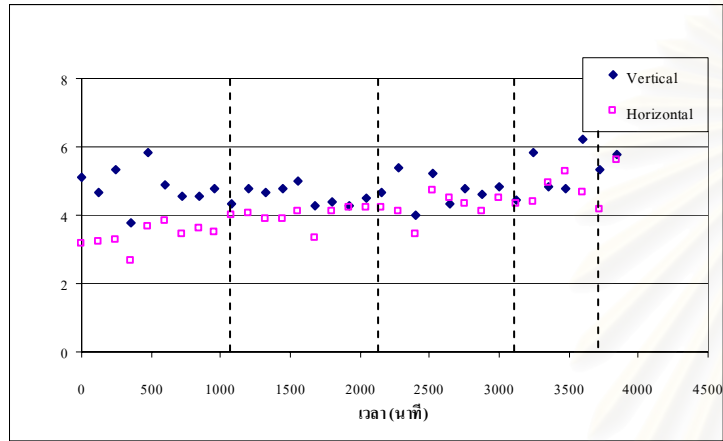


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 1

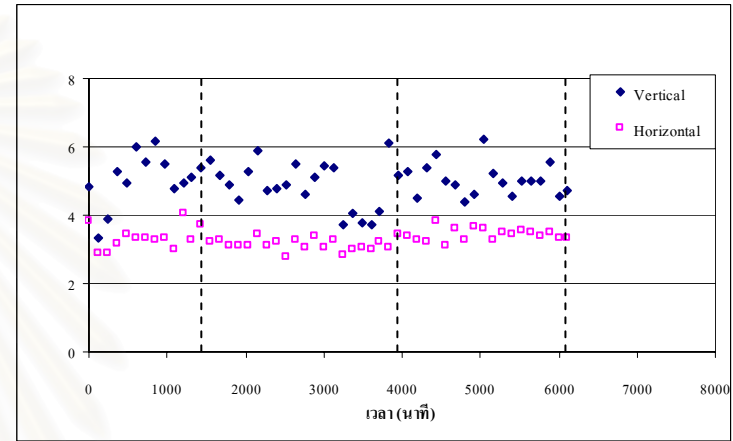


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 2

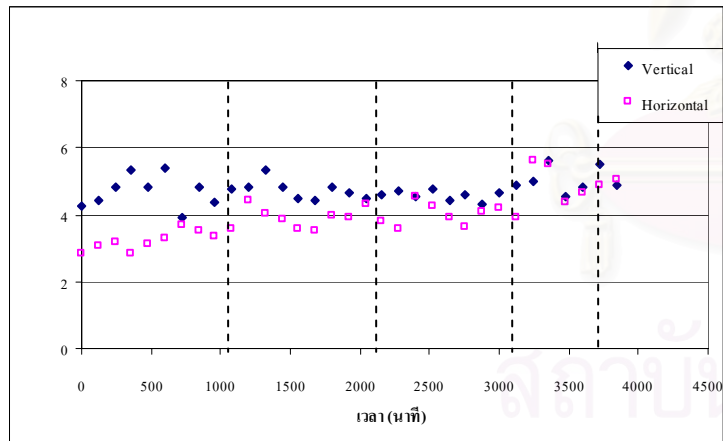
รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM



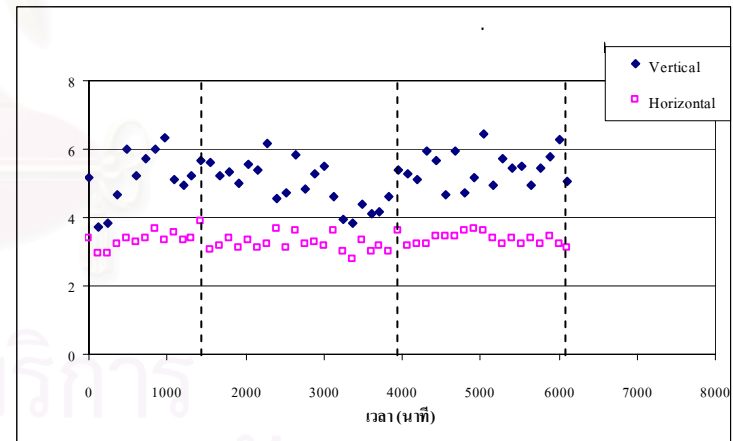
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

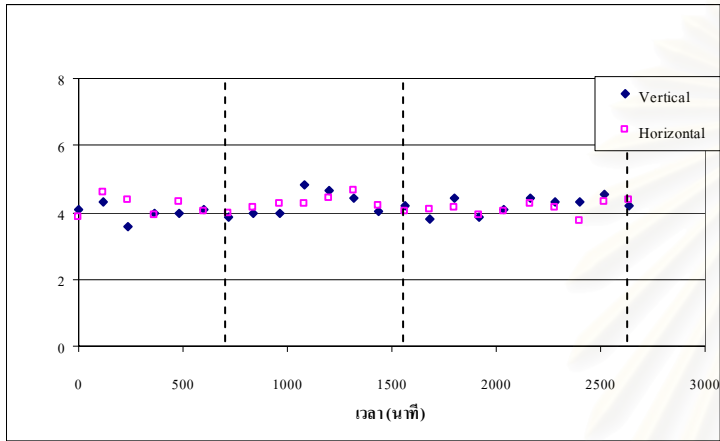


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

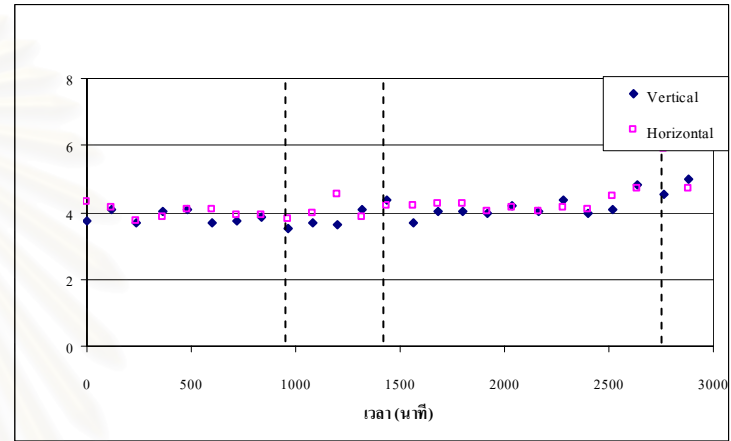


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

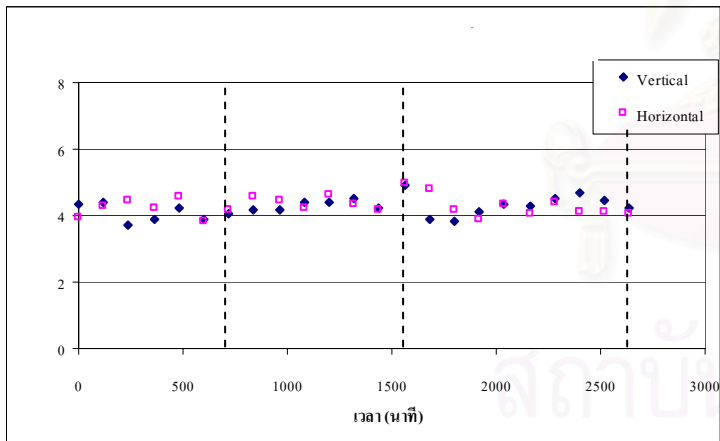
รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



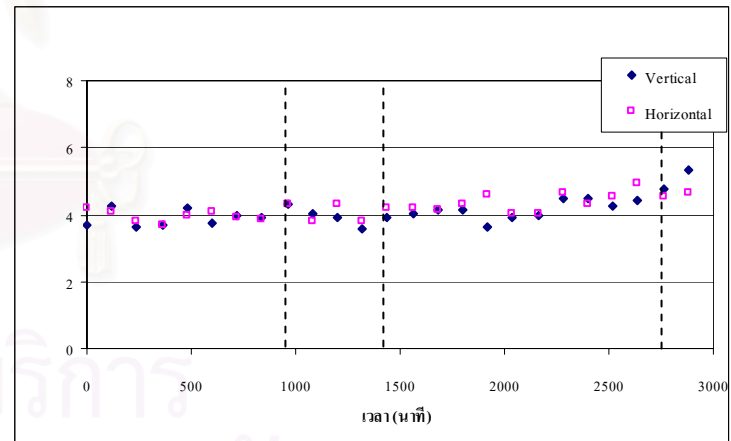
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

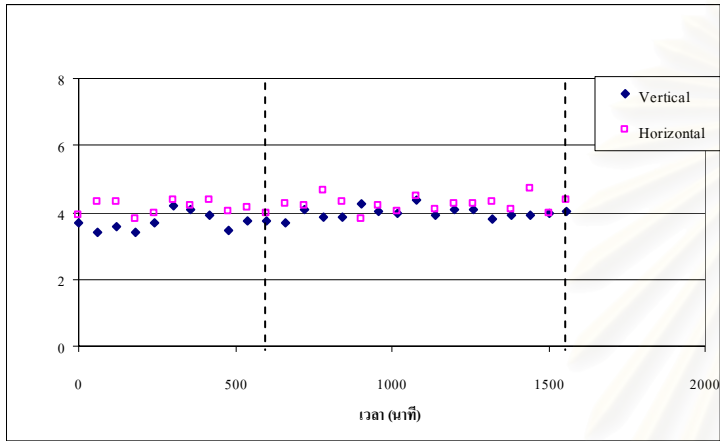


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

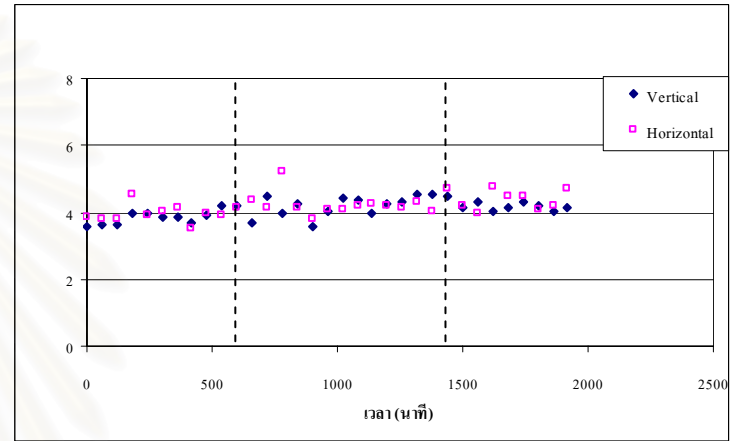


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

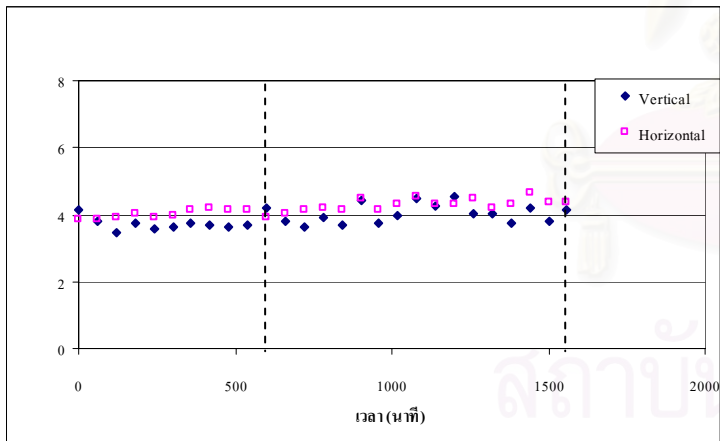
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



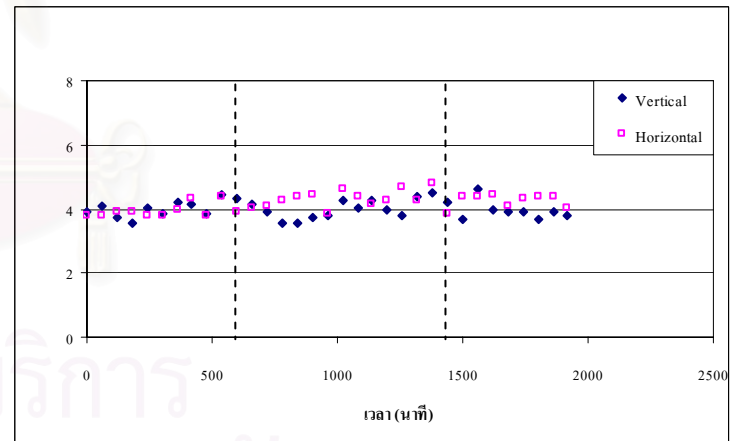
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

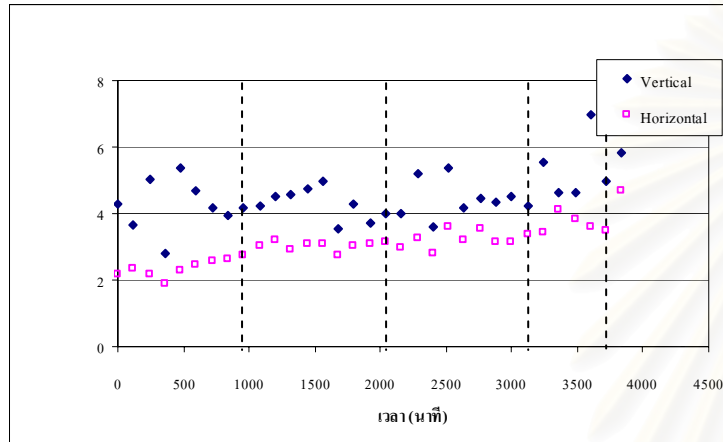


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

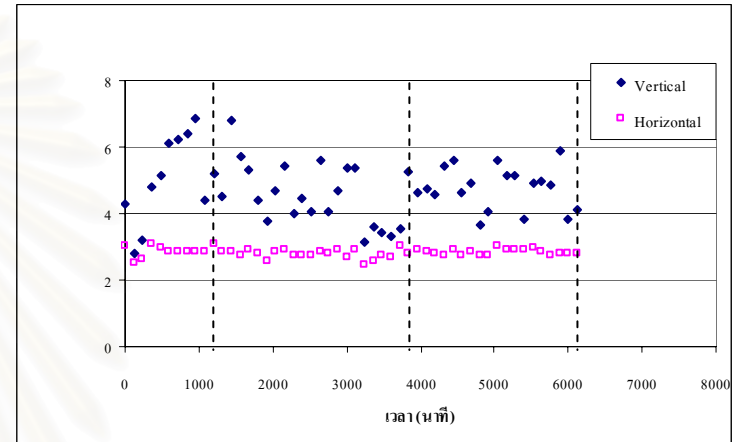


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

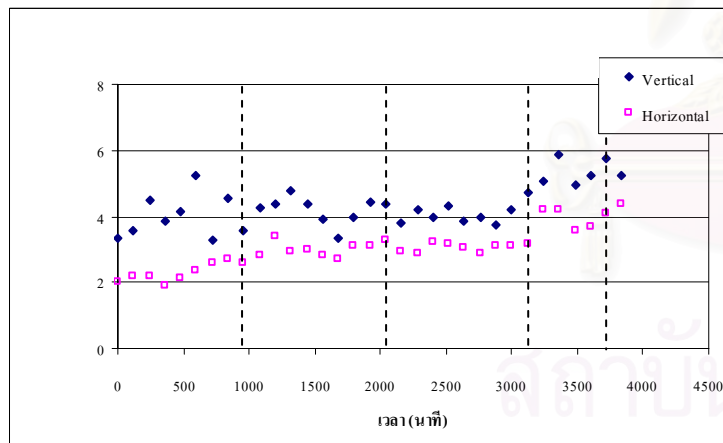
รูปที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM



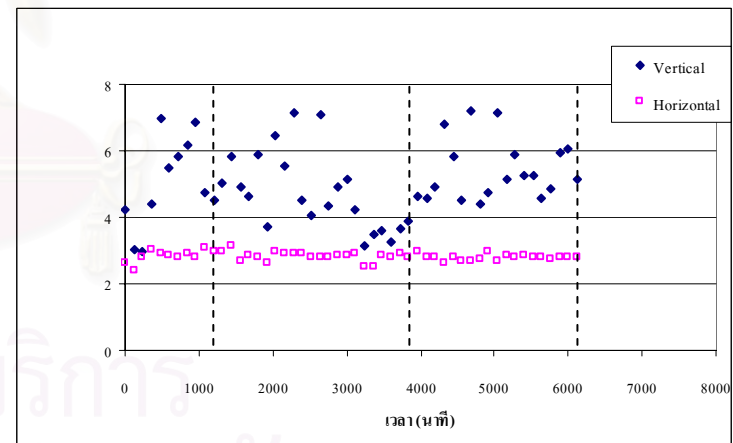
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

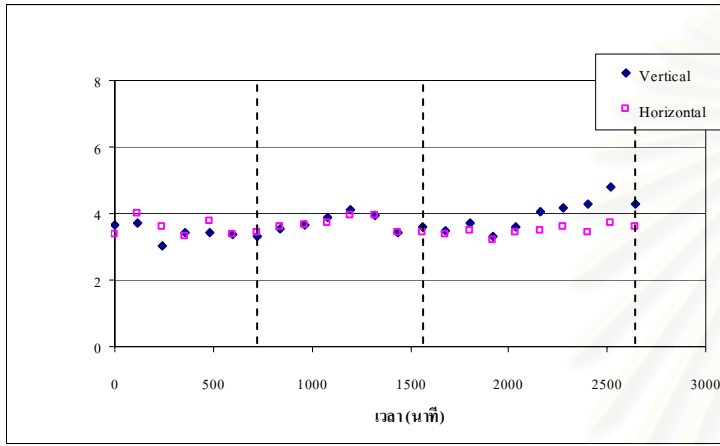


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

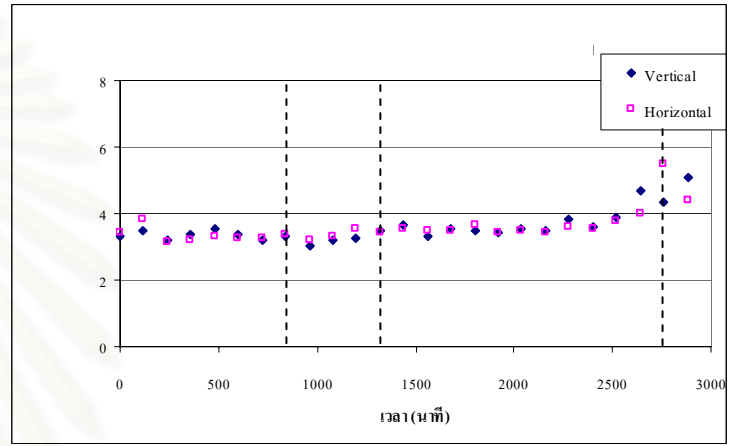


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

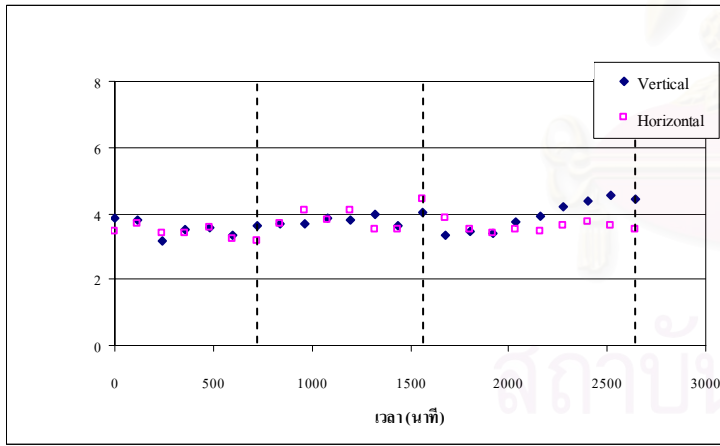
รูปที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



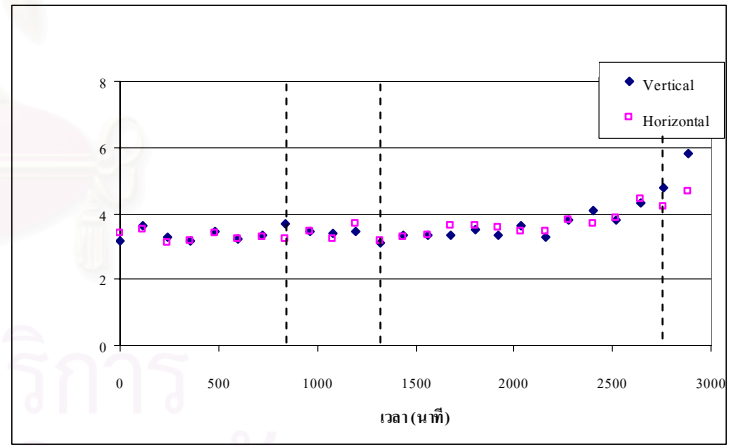
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงชุดที่ 2

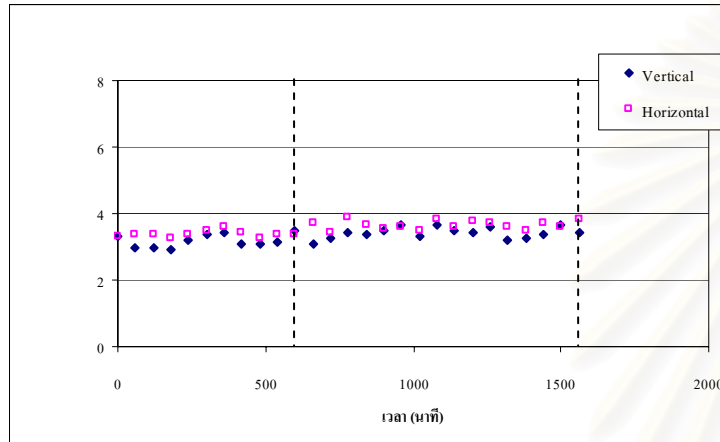


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 1

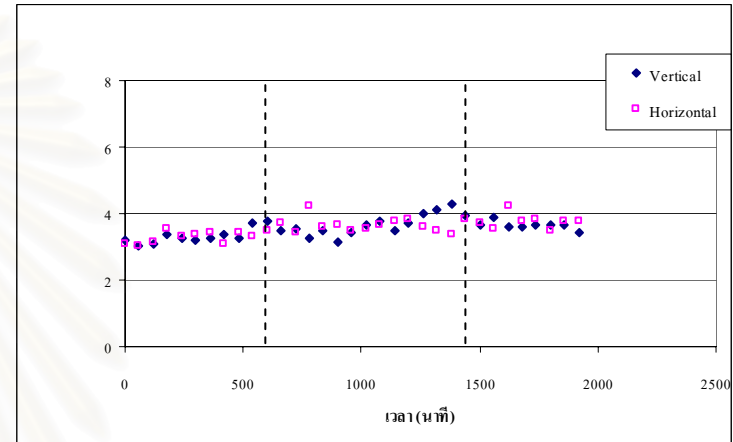


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงชุดที่ 2

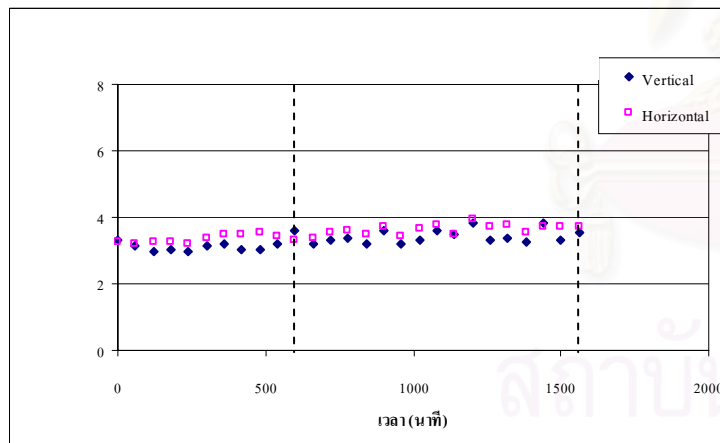
รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



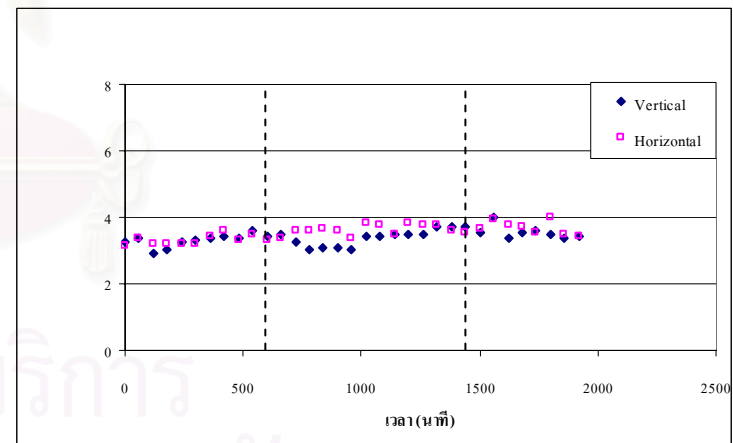
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 2



เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 2

รูปที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM

ผลการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา

ผลการวิเคราะห์ค่า RMS และ Peak

ค่า RMS และ Peak จะแยกพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป็น 3 กรณี ตามระดับสีกหรือ วิธีการเก็บสัญญาณ และความเร็วรอบมอเตอร์

1. แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า RMS และ Peak เมื่อระดับสีกหรือเปลี่ยน

ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ที่สภาวะ 500 RPM จากรูปที่ 4-17, 4-20 จะเห็นว่าวิธีการเก็บสัญญาณทั้ง 2 แบบ คือแบบ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging แสดงแนวโน้มแอมพลิจูดของ RMS และ Peak โดยรวมคล้ายคลึงกัน คือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีกหรือสูงขึ้นในชุดการทดลองที่ 1 ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ ในช่วงเริ่มต้นค่า RMS แนวตั้งมีค่าประมาณ 5 m/s^2 เพิ่มขึ้นประมาณ 10 m/s^2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนค่า Peak มีค่าประมาณ 20 m/s^2 ในช่วงเริ่มต้น เพิ่มขึ้นประมาณ 50 m/s^2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในชุดการทดลองที่ 2*
- 2) ที่สภาวะ 800 RPM จากรูปที่ 4-18, 4-21 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มแอมพลิจูดของ RMS และ Peak โดยรวมจากวิธีการเก็บสัญญาณทั้ง 2 แบบ คือแบบ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging คล้ายคลึงกัน คือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีกหรือสูงขึ้น ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ ในช่วงเริ่มต้นค่า RMS แนวตั้งมีค่าประมาณ 20 m/s^2 เพิ่มขึ้นประมาณ 30 m/s^2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนค่า Peak มีค่าประมาณ 70 m/s^2 ในช่วงเริ่มต้น เพิ่มขึ้นประมาณ 150 m/s^2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยมีลักษณะและแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งชุดการทดลองที่ 1 และ 2
- 3) ที่สภาวะ 1100 RPM จากรูปที่ 4-19, 4-22 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มแอมพลิจูดของ RMS และ Peak โดยรวมจากวิธีการเก็บสัญญาณทั้ง 2 แบบ คือแบบ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging คล้ายคลึงกัน คือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีกหรือสูงขึ้น ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ ในช่วงเริ่มต้นค่า RMS แนวตั้งมีค่าประมาณ 20 m/s^2 เพิ่มขึ้นประมาณ 35 m/s^2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนค่า Peak มีค่าประมาณ 70 m/s^2 ในช่วงเริ่มต้น เพิ่มขึ้นประมาณ 150 m/s^2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยมีลักษณะและแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งชุดการทดลองที่ 1 และ 2

*หมายเหตุ ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM ชุดที่ 2 มอเตอร์เสื่อมสภาพทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่าที่ผิดเพี้ยนไป

2. ผลของการเก็บสัญญาณด้วยวิธีที่ต่างกัน

ค่าแอมพลิจูดของ RMS และ Peak ที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการทั้งสองวิธีมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่การเก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging จะให้ค่า RMS และ Peak ที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากค่า RMS และ Peak จากวิธีดังกล่าวมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลาเพียงชุดเดียว ในขณะที่ ค่า RMS และ Peak จากวิธี Synchronous Time Averaging มาจากค่าเฉลี่ยของสัญญาณบนโดเมนเวลาจำนวน 100 ชุด ที่จังหวะตรงกันทำให้สัญญาณรบกวนต่าง ๆ ลดลง โดยจะมีลักษณะเช่นนี้ทั้ง 3 สถานะการทดลอง

3. การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยน

ขนาดแอมพลิจูดของ RMS และ Peak จะมีค่าที่สูงขึ้นตามความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งในกรณีของการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging

จากการทดลองพบว่าเสียงที่เกิดขึ้นมีการแปรเปลี่ยนไปเมื่อเพียงเกิดการสีกหรือเพิ่มมากขึ้น เมื่อวัดระดับเสียงพร้อมกันกับการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน พบว่าแนวโน้มของระดับเสียงมีลักษณะคล้าย ๆ กับแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของเวลาคือมีระดับของเสียงเพิ่มสูงขึ้นตามระดับการสีกหรือเช่นเดียวกับค่า RMS และ Peak ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ผลและการวิเคราะห์ค่า Crest Factor

ค่า Crest Factor เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงการปรากฏพัลส์ชั่วขณะในสัญญาณบนโดเมนเวลา พิจารณาเป็น 3 กรณีตามสถานะการทดลองดังนี้

1. ที่สภาวะ 500 RPM จากรูป 4-23 แนวโน้มของแอมพลิจูดของ Crest Factor ในแนวระดับค่อนข้างคงที่มีแนวโน้มปรับขึ้นเล็กน้อย ในแนวตั้งมีค่าสูงกว่าแนวระดับและมีแนวโน้มคล้ายกับแนวระดับ ทั้ง 2 วิธีการเก็บสัญญาณ
2. ที่สภาวะ 800 RPM จากรูป 4-24 แนวโน้มของแอมพลิจูดของ Crest Factor ค่อนข้างคงที่ซึ่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด ในทั้ง 2 วิธีการเก็บสัญญาณและทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ โดยมีความแปรปรวนค่าขึ้นลง
3. ที่สภาวะ 1100 RPM จากรูป 4-25 แนวโน้มของแอมพลิจูดของ Crest Factor ค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับสภาวะ 800 RPM และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ผลและการวิเคราะห์ค่า Kurtosis

ค่า Kurtosis เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 ใช้สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น สามารถบ่งบอกถึงการปรากฏพัลส์ชั่วขณะในสัญญาณบนโดเมนเวลา แยกพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทดลองทั้ง 3 ดังนี้

1. ที่สภาวะ 500 RPM จากรูป 4-26 จะเห็นว่าที่สภาวะนี้แนวโน้มโดยรวมของสัญญาณจะใกล้เคียงกันในทุก 2 วิธีการเก็บสัญญาณ กล่าวคือสัญญาณในแนวตั้งกราฟที่ได้มีลักษณะแกว่งตัวขึ้น ๆ ลง ๆ ส่วนในแนวระดับกราฟมีลักษณะค่อนข้างคงที่และสม่ำเสมอ ซึ่งจะสังเกตเห็นสัญญาณพัลส์ชั่วขณะได้ที่สัญญาณบนโดเมนเวลาในแนวตั้ง
2. ที่สภาวะ 800 RPM จากรูป 4-27 จะเห็นแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ระดับการสีกหรือสูง ๆ ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging ทั้งสัญญาณในแนวตั้งและสัญญาณในแนวระดับ โดยสามารถเห็นสัญญาณพัลส์ชั่วขณะที่การสีกหรือสูง ๆ
3. สภาวะ 1100 RPM จากรูปที่ 4-28 แนวโน้มของกราฟค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ทั้งการเก็บสัญญาณโดยวิธี Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging ในแนวตั้งและแนวระดับ

การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณบนโดเมนเวลาสำหรับกรณีการสีกหรือบนพื้นเพื่อนั้น การเลือกพิจารณาแนวโน้มของค่า Peak และค่า RMS มีความเหมาะสมมากกว่าการวิเคราะห์ค่า Crest Factor หรือ Kurtosis เนื่องจากค่า Crest Factor และ Kurtosis เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณในลักษณะที่เป็นพัลส์ชั่วขณะซึ่งเหมาะกับการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นเพื่อนใดพื้นเพื่อนหนึ่งมากกว่า แต่ในกรณีของการสีกหรือบนพื้นเพื่อนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอในทุก ๆ พื้น ดังนั้นสัญญาณบนโดเมนเวลาจึงไม่ปรากฏลักษณะความเป็นพัลส์ในขณะใดขณะหนึ่งซ้ำกัน การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะเป็นในรูปแบบของการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดโดยรวมมากกว่า

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการเก็บสัญญาณจะเห็นว่าวิธีการเก็บสัญญาณทั้ง 2 แบบจะให้แนวโน้มของแอมพลิจูดเหมือนกัน แต่วิธี Spectrum Averaging จะให้ค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าวิธี Synchronous Time Averaging เล็กน้อย เนื่องจากการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging พารามิเตอร์ต่าง ๆ คำนวณจากชุดของสัญญาณเพียงชุดเดียว ขณะที่สัญญาณบนโดเมนเวลาที่จากวิธีการเก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เกิดจากการเฉลี่ยกันของสัญญาณบนโดเมนเวลาจำนวน 100 ชุด ซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนจากความถี่อื่น ๆ ลงได้ ทำให้สามารถสังเกตความเป็นคาบและการขบกันของพื้นเพื่อนได้ แต่วิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียอยู่บ้างซึ่งเป็นการผิดพลาดในระหว่างการเก็บสัญญาณเนื่อง

จากต้องเก็บสัญญาณถึง 100 ชุด นำมาเฉลี่ยกันจึงใช้เวลาในการเก็บค่อนข้างมาก ซึ่งความผิดพลาดจะเกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ในระหว่างที่ทำการเก็บสัญญาณและประมวลผลข้อมูล ดังนั้นแนวโน้มและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากวิธีการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging มีข้อได้เปรียบที่เก็บสัญญาณได้รวดเร็วกว่า แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือสัญญาณรบกวนมีมากจึงไม่สามารถสังเกตความเป็นคาบและการขบกันของซี่ฟันได้

แนวโน้มสัญญาณของ Peak และ RMS ปรากฏมีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดของการสึกหรออย่างชัดเจนในทุก ๆ สภาวะ เมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นช่องว่างระหว่างฟันที่ขบกัน (Backlash) ก็มากขึ้นด้วย ทำให้ฟันเฟืองมีโอกาสที่จะหลุดจากการขบกันได้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีการกระแทกกันของฟันเฟืองมากขึ้นทำให้สัญญาณของ Peak และ RMS มีแอมพลิจูดสูงขึ้นเมื่อการสึกหรอมากขึ้น เมื่อกำหนดภาระให้คงที่เฟืองที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูงกว่าจะมีการส่งผ่านของแรงที่ฟันเฟืองน้อยลงทำให้ฟันเฟืองมีโอกาสที่จะหลุดจากการขบกันในขณะส่งผ่านการเคลื่อนที่ได้มากกว่าเฟืองที่มีความเร็วรอบต่ำ ประกอบกับเมื่อเฟืองหมุนด้วยความเร็วรอบสูงขึ้นแรงพลวัต(Dynamic Force) ที่เกิดจากการกระทบกันของฟันเฟืองจะมีค่าสูงเพิ่มสูงขึ้นด้วย[14] ทำให้แนวโน้มของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับของความเร็วรอบ ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาจึงสามารถนำมาวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของฟันเฟืองได้เป็นอย่างดี

สัญญาณสเปกตรัม

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คือ

- 1) แอมพลิจูดของ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่ความถี่การขบกันของชุดเฟือง ฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ของความถี่การขบกันของชุดเฟืองตามลำดับ
- 2) แอมพลิจูดของ 1xSBPL1 คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นชุดแถบความถี่ข้างรอบๆ 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF ออกไปด้านซ้ายเท่ากับความถี่ของเฟืองขับ ฮาร์โมนิกที่ 1 ส่วนแอมพลิจูดของ 2xSBPL1 มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนและมีแอมพลิจูดต่ำจึงไม่นำพารามิเตอร์นี้มาวิเคราะห์
- 3) แอมพลิจูดของ 1xSBPR1 และ 2xSBPR1 คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นชุดแถบความถี่ข้างรอบๆ 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF ออกไปด้านขวาเท่ากับความถี่ของเฟืองขับ ฮาร์โมนิกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 ค่าความถี่ของฮาโมนิกส์ GMF และชุดแถบความถี่ข้าง

Motor Speed (rpm)	Pinion Speed (Hz)	Gear Speed (Hz)	1xGMF (Hz)	2xGMF (Hz)	3xGMF (Hz)	1 SBPL1 (Hz)	1 SBPR1 (Hz)	2 SBPR1 (Hz)
500	8.33	5.86	216.67	433.34	650.01	208.34	225.00	233.33
800	13.33	9.37	346.67	693.34	1040.01	333.34	360.00	373.33
1100	18.33	12.88	476.67	953.33	1430.00	458.33	495.00	513.33

เนื่องจากความละเอียดของสัญญาณสเปกตรัมมีค่า 1 Hz, 2 Hz, และ 4 Hz สำหรับการวัดที่สภาวะความเร็ว 500, 800, และ 1100 รอบต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่ความถี่ของพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ไม่ตรงกับเส้นสเปกตรัม อีกทั้งความเร็วของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ ± 1 รอบต่อนาที แอมพลิจูดของแต่ละพารามิเตอร์จึงเลือกมาจากค่าสูงสุดของ 2-3 เส้นสเปกตรัมที่อยู่รอบ ๆ ความถี่ของแต่ละพารามิเตอร์ที่กล่าวถึงในข้างต้นและใช้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ได้จากการเก็บสัญญาณ 5 ครั้ง ในแต่ละจุดทุก ๆ 120 นาที ในการเขียนกราฟ โดยใช้การเพิ่มขึ้นของเวลาแทนการสีกหรือที่เพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณสเปกตรัมและเวลาที่ใช้ในการทดลอง ในแต่ละรูปประกอบด้วย 6 รูปย่อย ตามแอมพลิจูดของ GMF ความถี่ข้าง และชุดเฟืองที่ 1 และ 2 ในแต่ละสถานะ แต่ละรูปย่อยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่วัดในแนวระดับ (Horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับดังต่อไปนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4-29 : ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging

รูปที่ 4-30 : ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging

รูปที่ 4-31 : ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging

รูปที่ 4-32 : ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging

รูปที่ 4-33 : ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging

รูปที่ 4-34 : ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging

2) ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4-35 : ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging

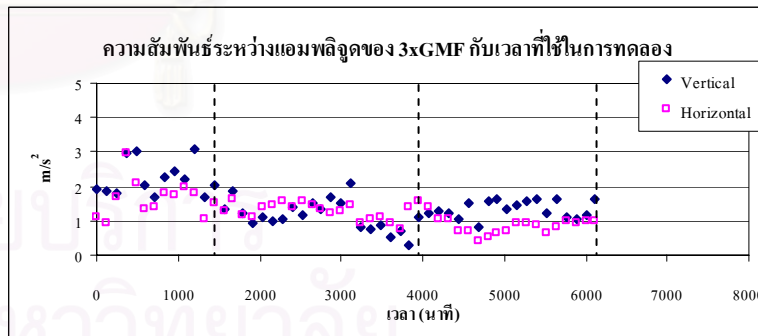
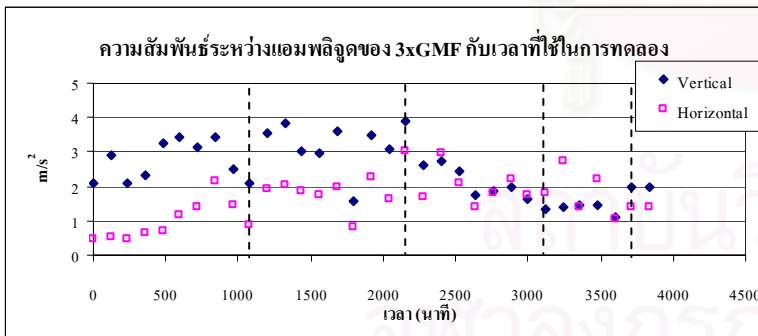
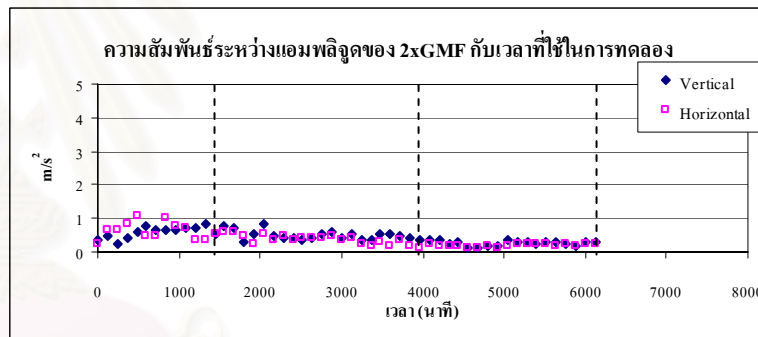
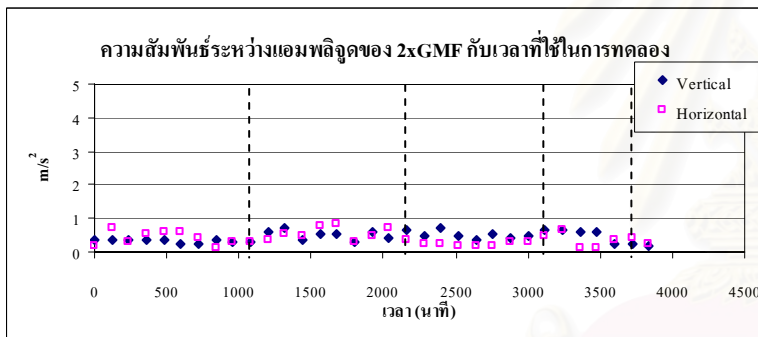
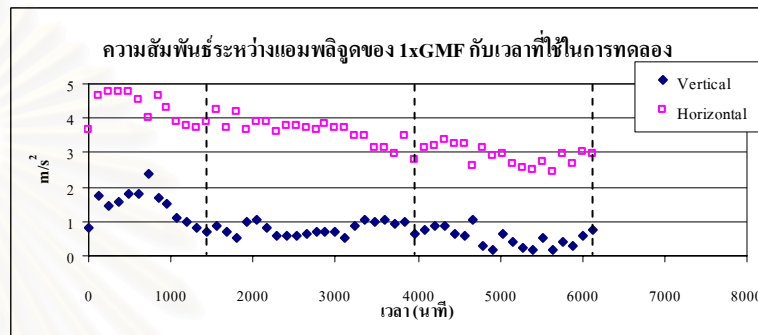
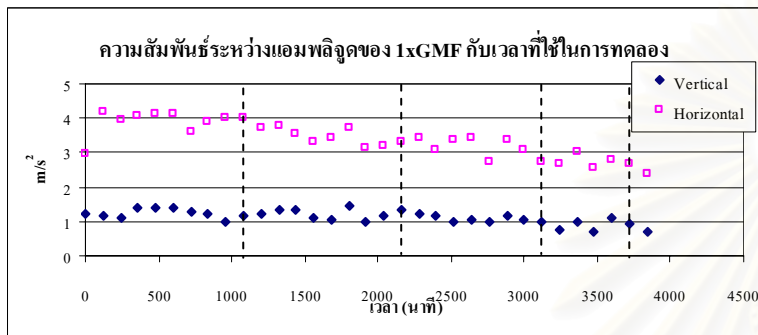
รูปที่ 4-36 : ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging

รูปที่ 4-37 : ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging

รูปที่ 4-38 : ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging

รูปที่ 4-39 : ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging

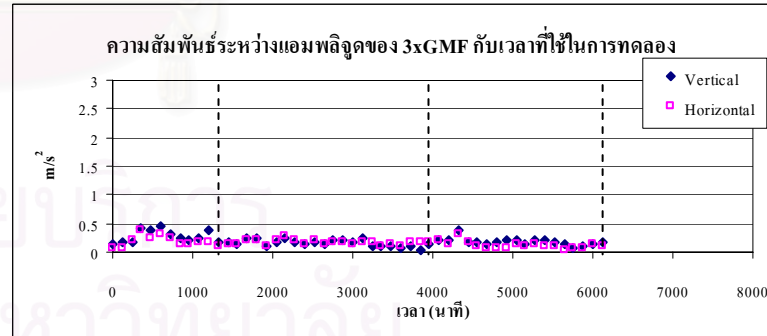
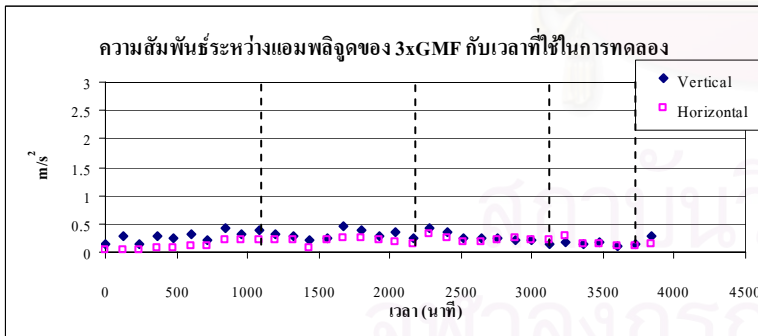
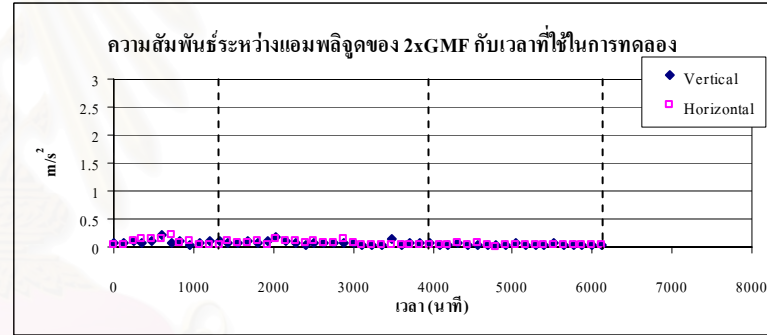
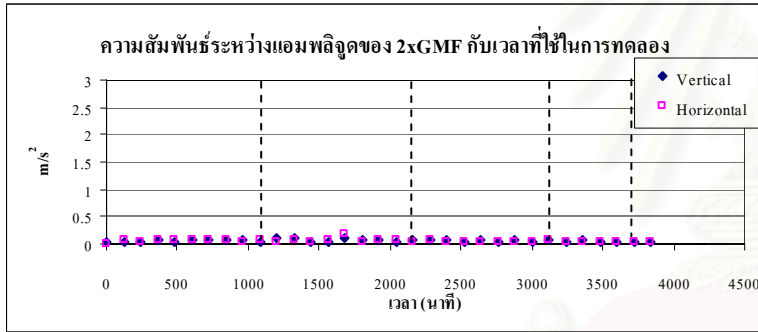
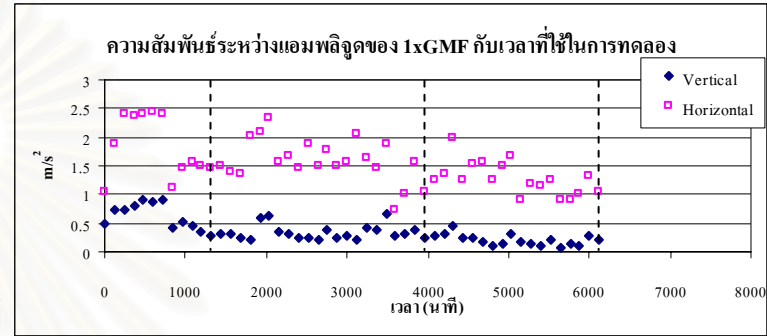
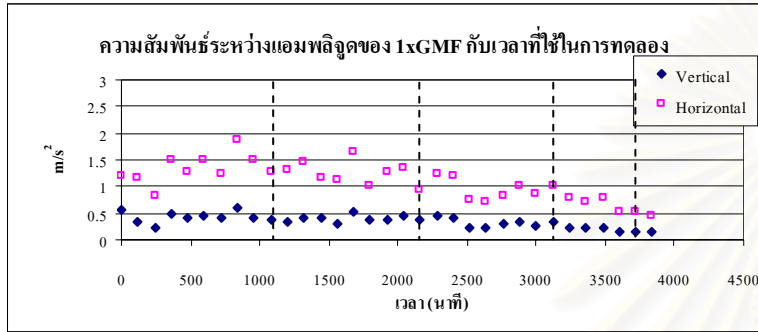
รูปที่ 4-40 : ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

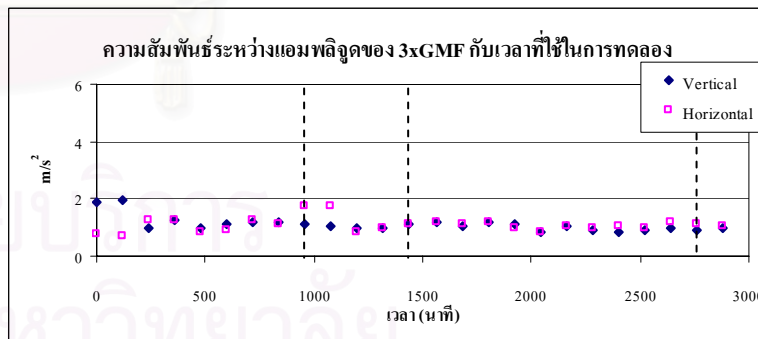
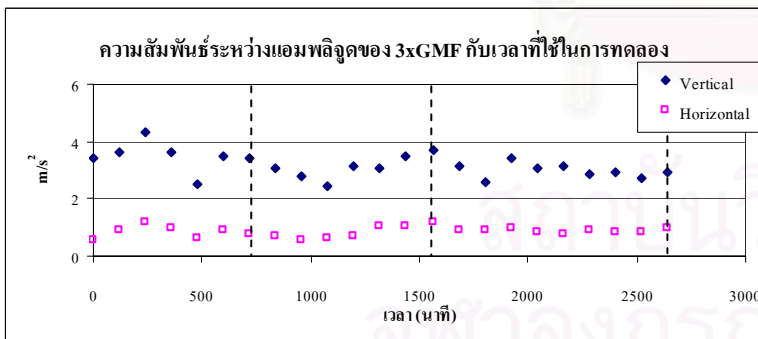
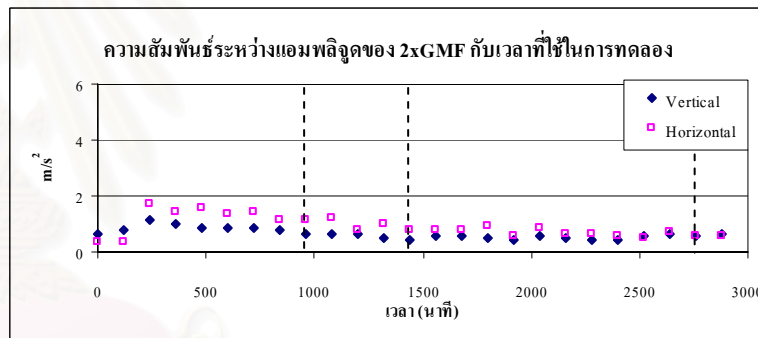
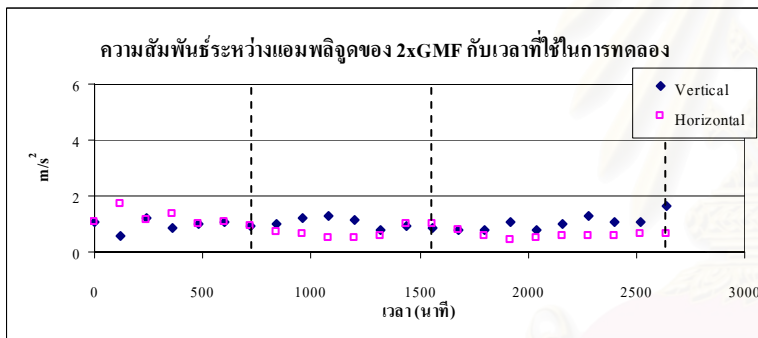
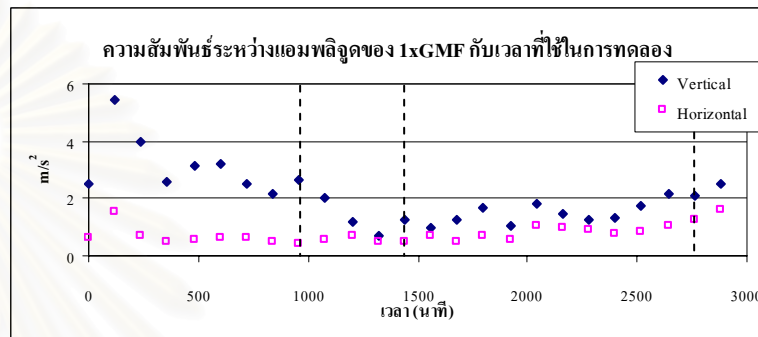
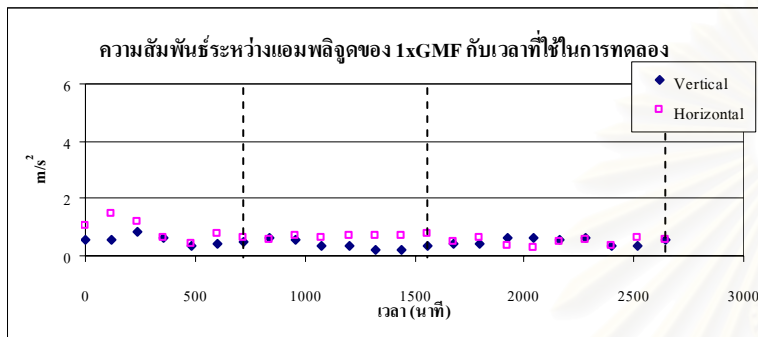
รูปที่ 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging



เฟื่องชุดที่ 1

เฟื่องชุดที่ 2

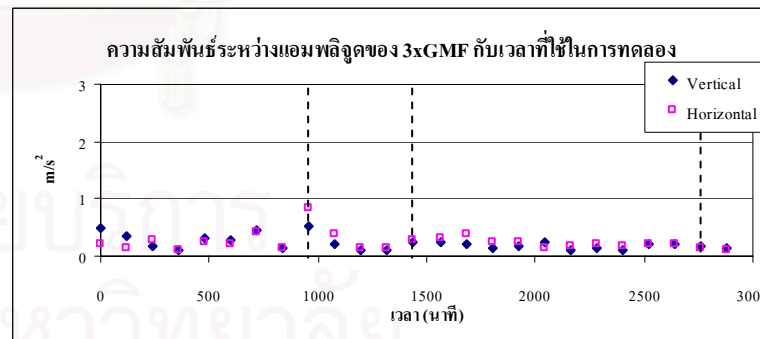
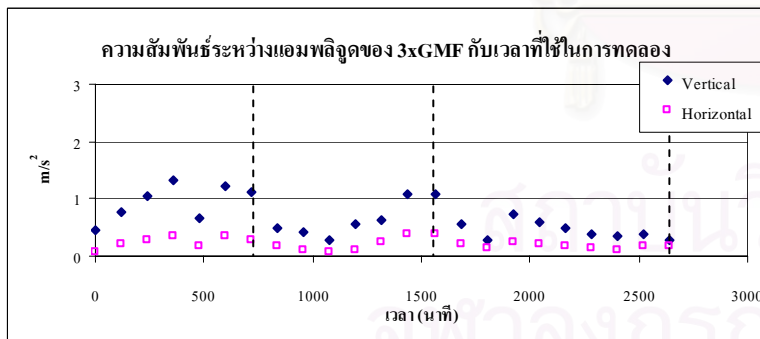
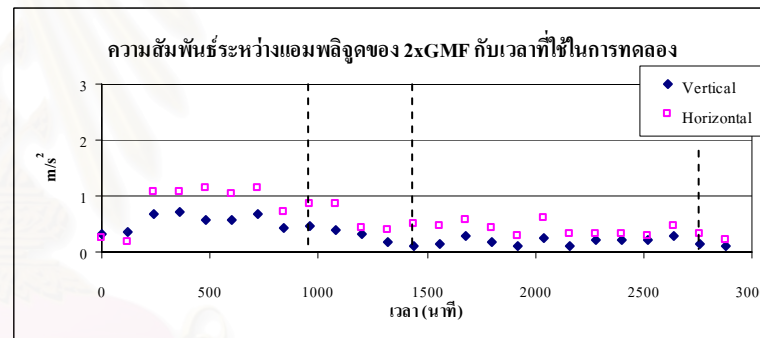
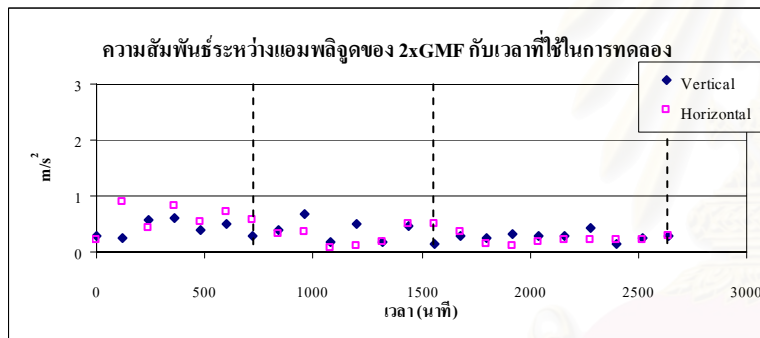
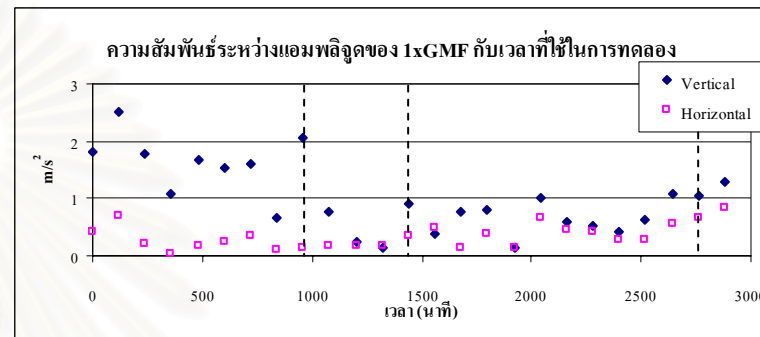
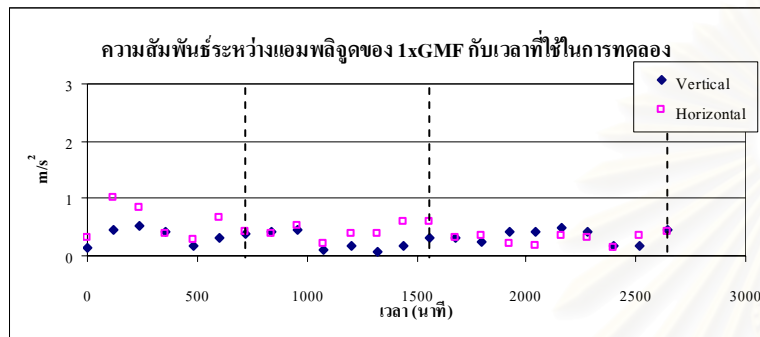
รูปที่ 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

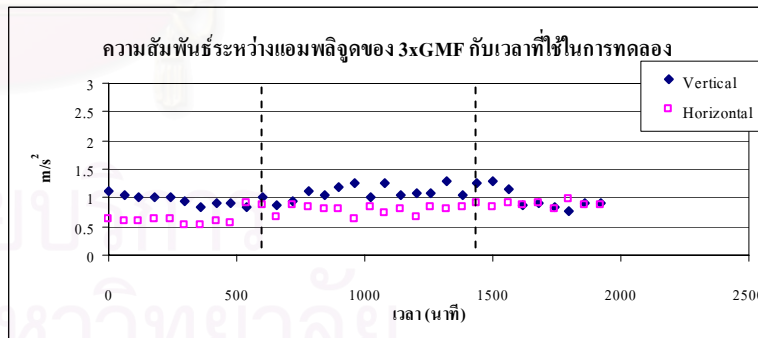
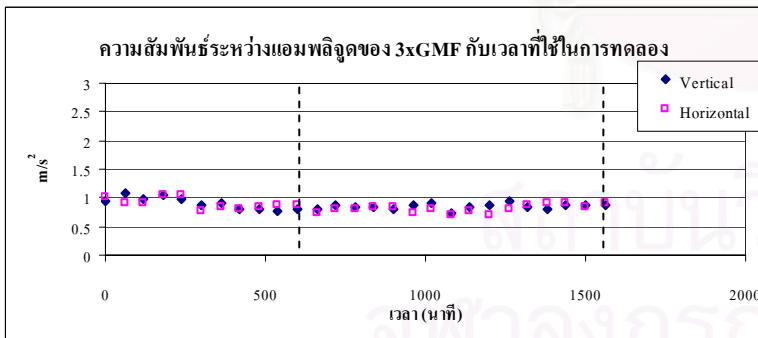
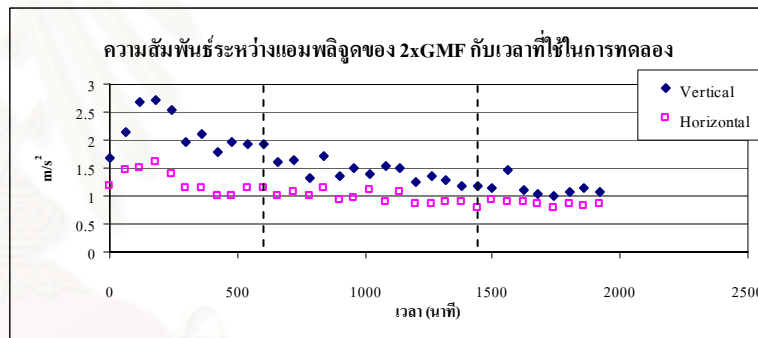
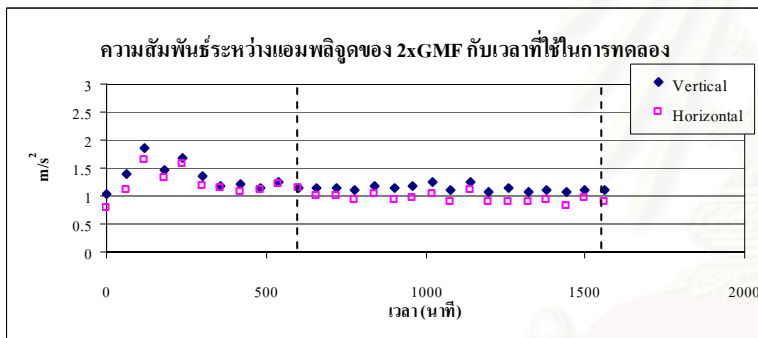
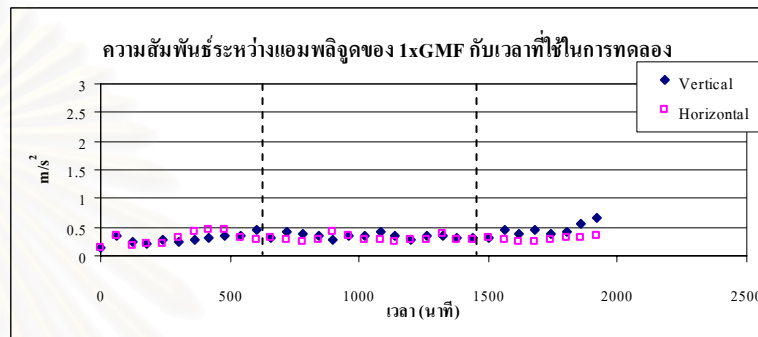
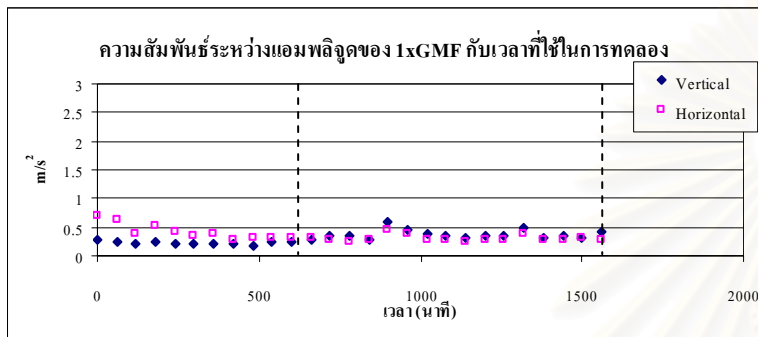
รูปที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

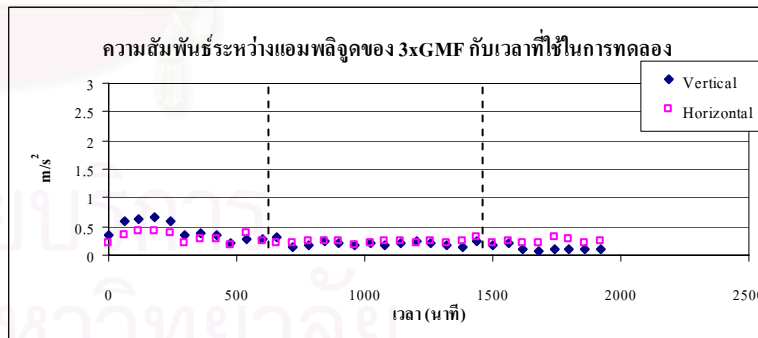
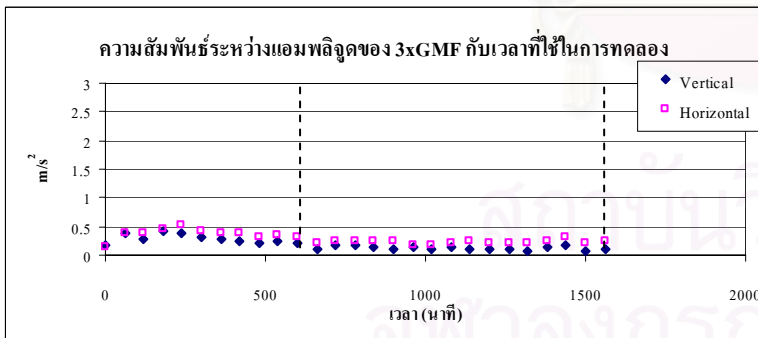
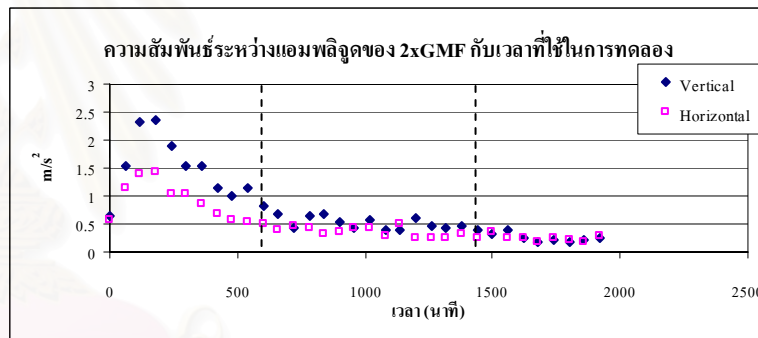
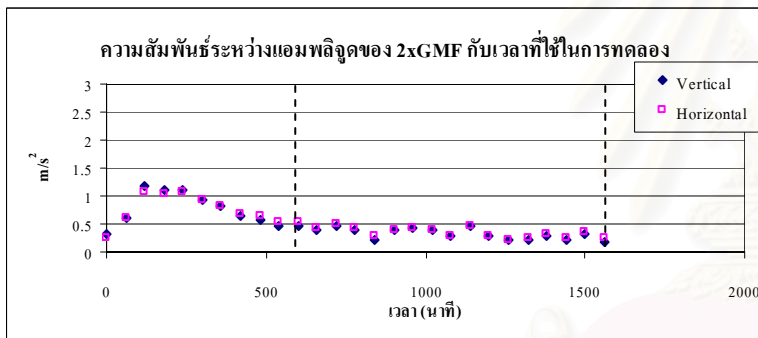
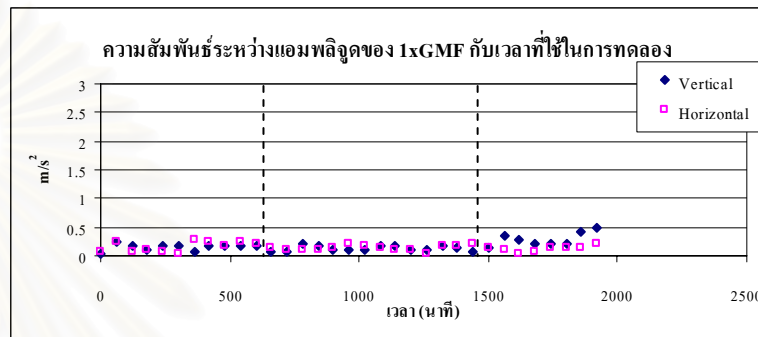
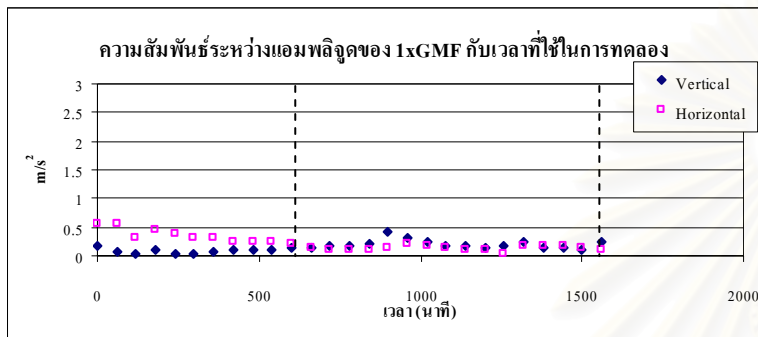
รูปที่ 4-32 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

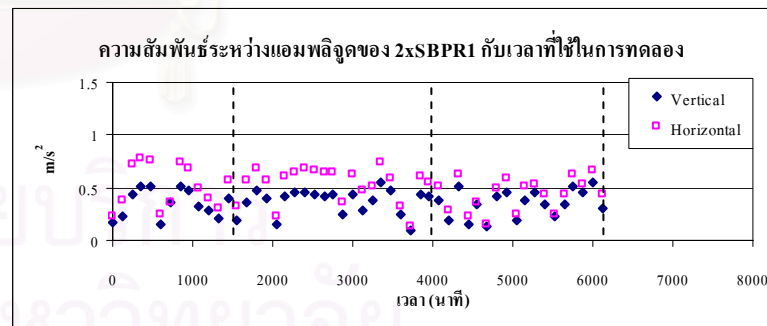
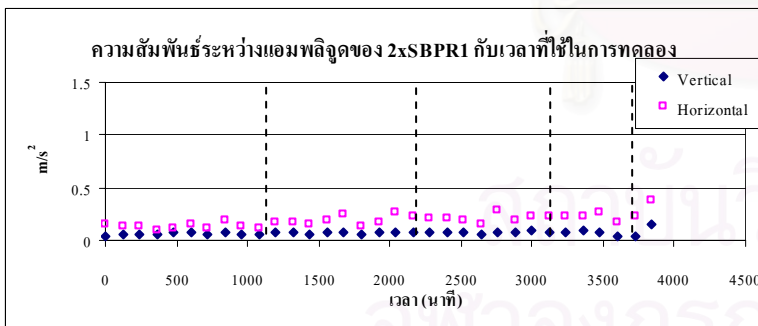
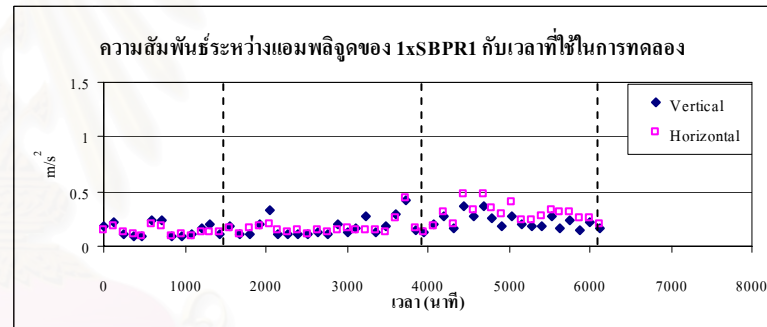
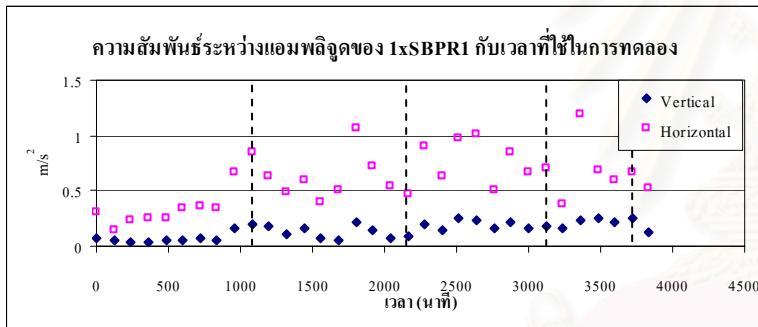
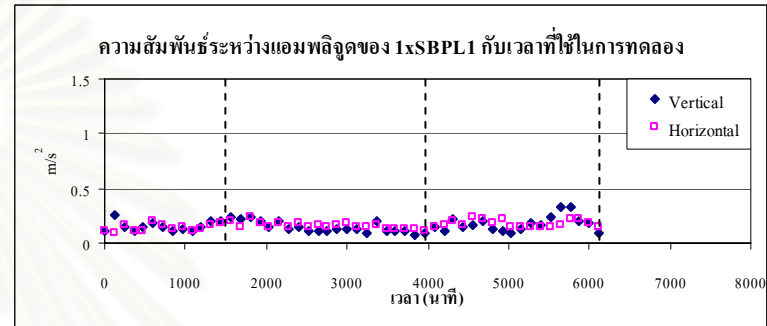
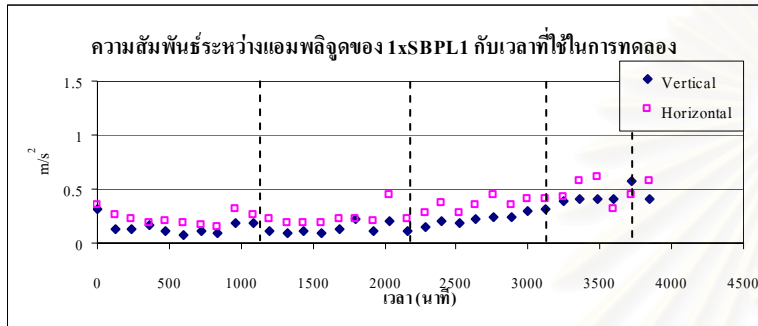
รูปที่ 4-33 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

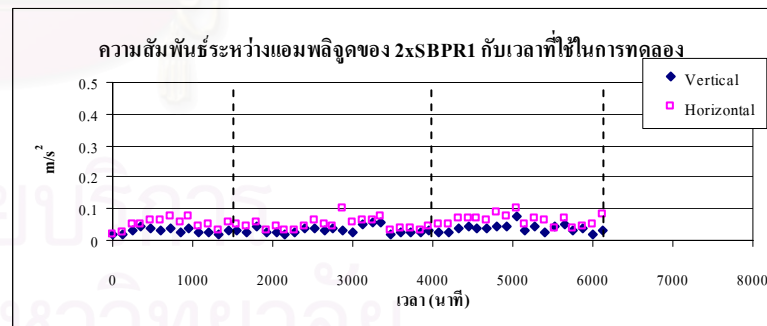
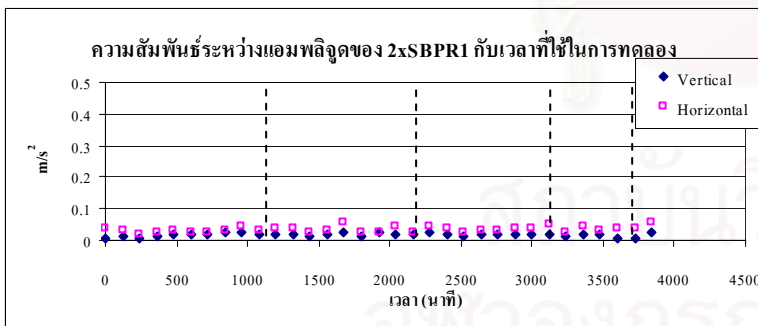
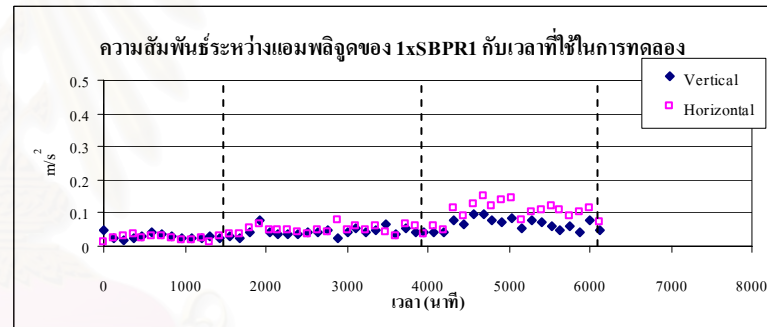
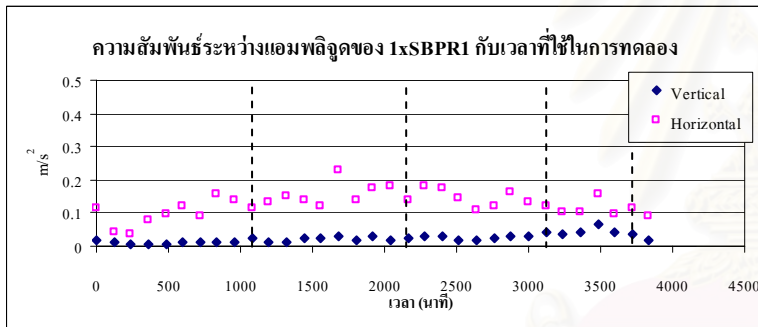
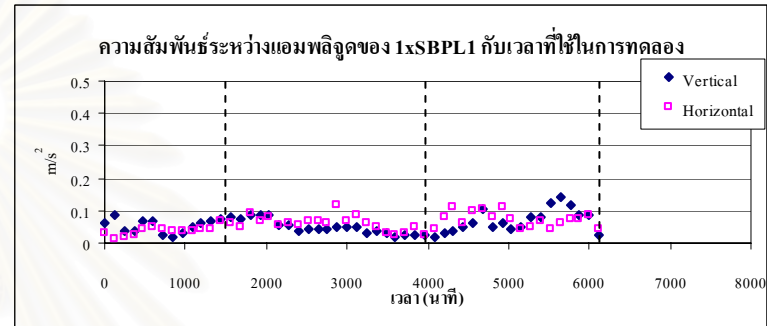
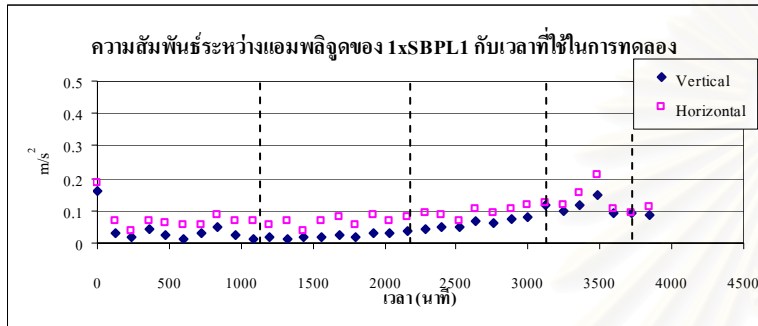
รูปที่ 4-34 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของฮาร์มอนิก GMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

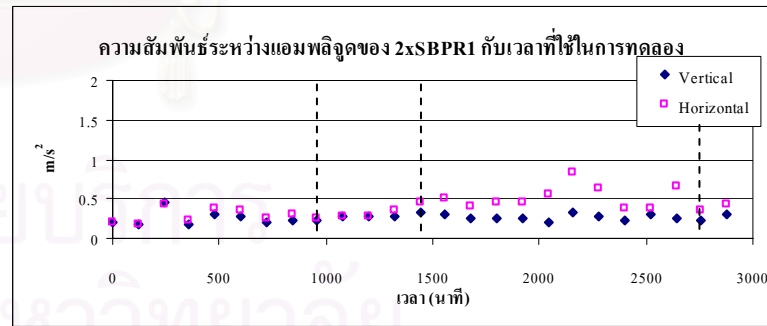
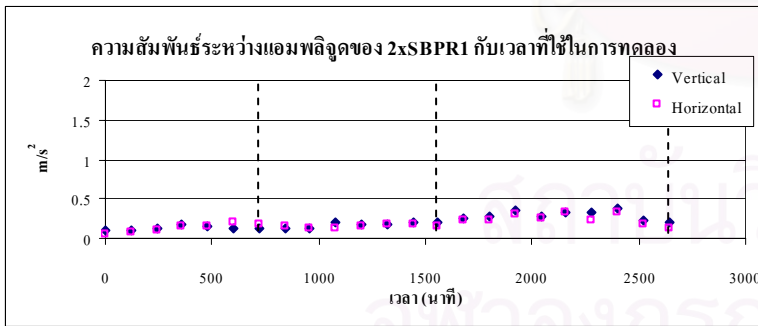
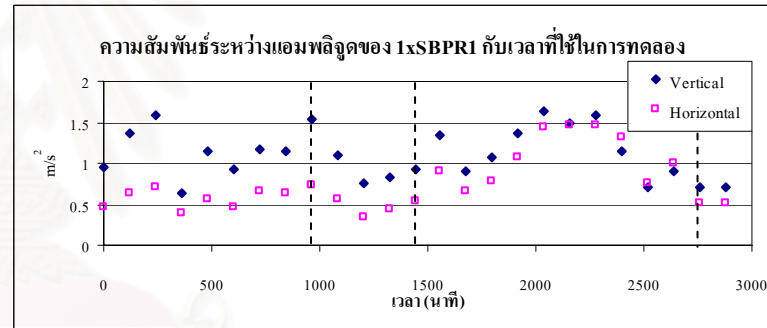
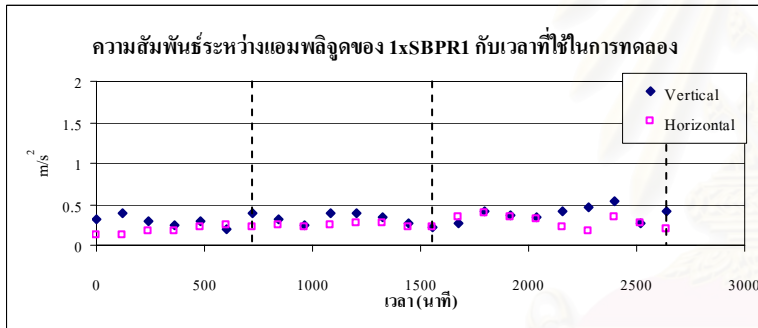
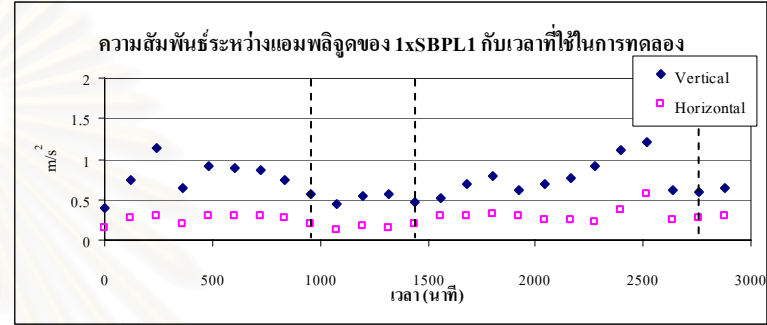
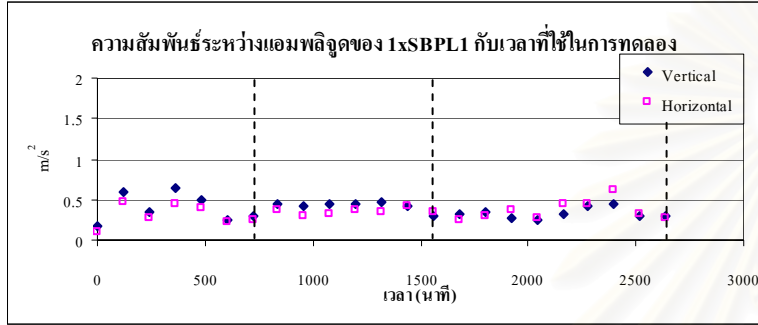
รูปที่ 4-35 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging



เฟื่องชุดที่ 1

เฟื่องชุดที่ 2

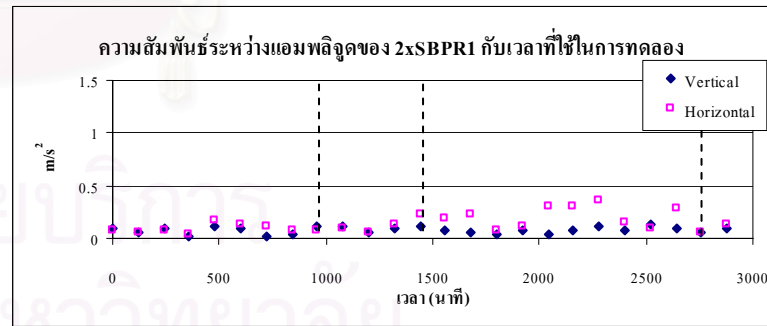
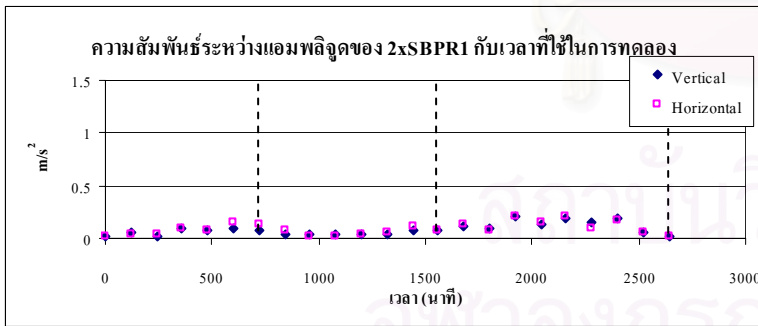
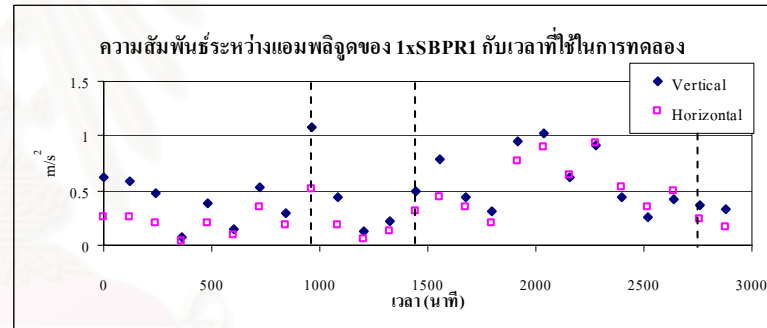
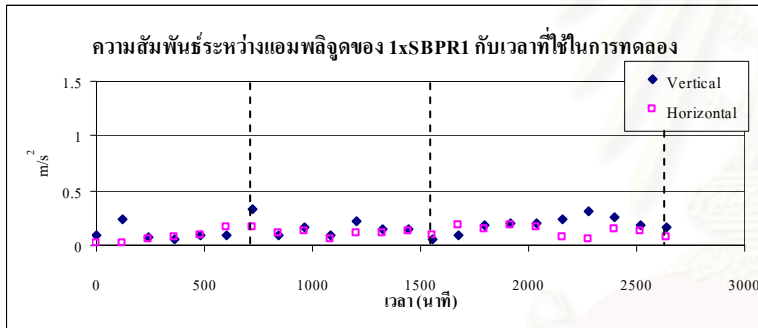
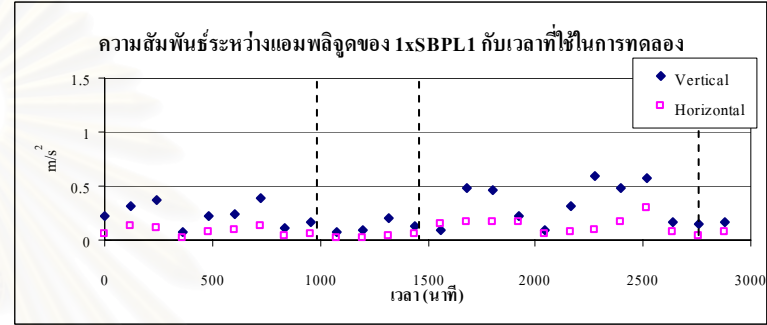
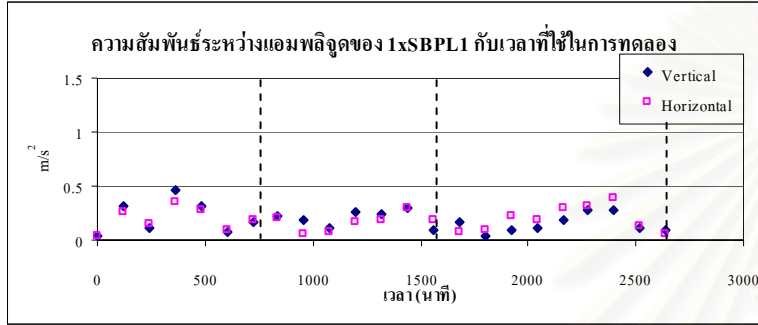
รูปที่ 4-36 ความสัมพัทธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

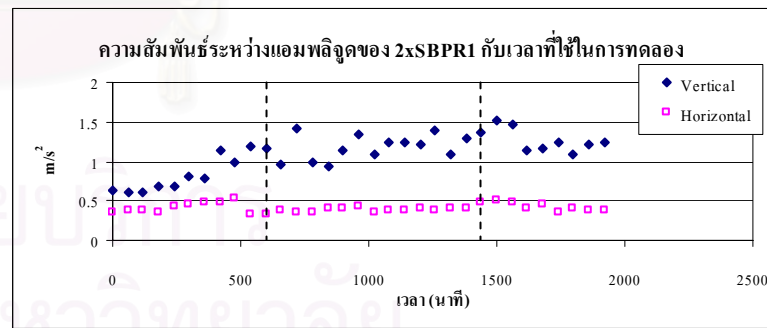
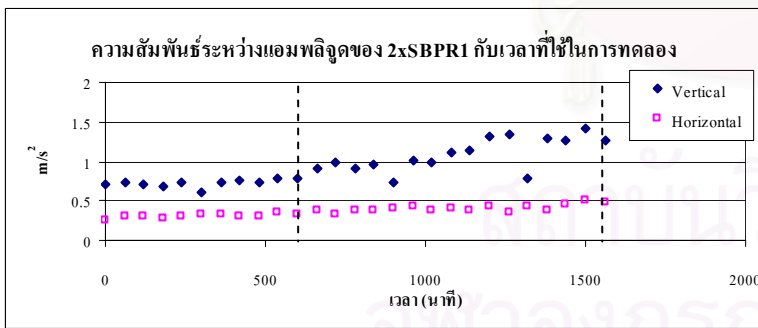
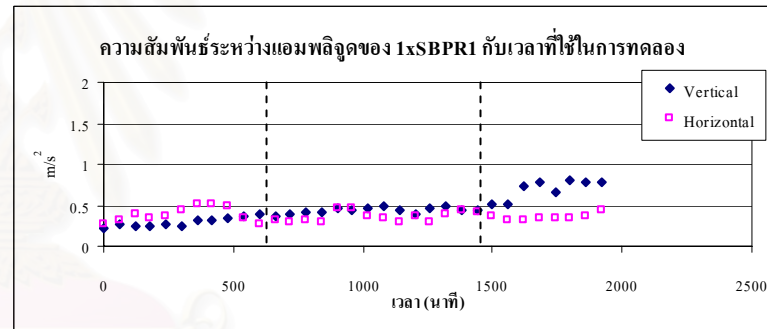
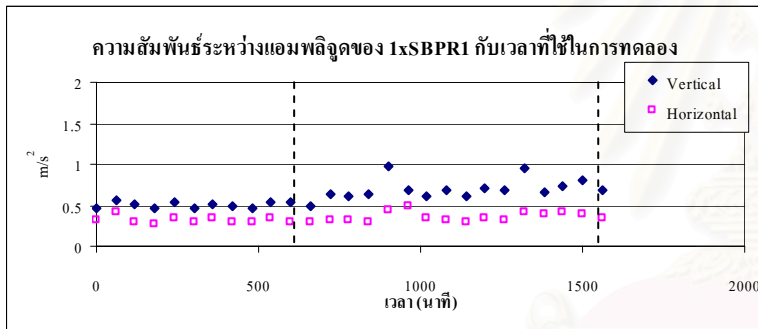
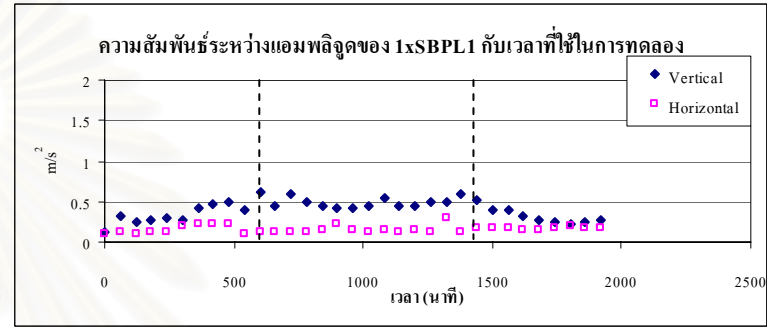
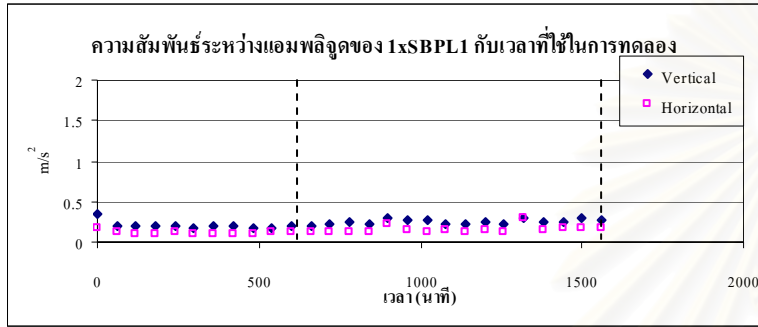
รูปที่ 4-37 ความสัมพัทธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging



เฟื่องชุดที่ 1

เฟื่องชุดที่ 2

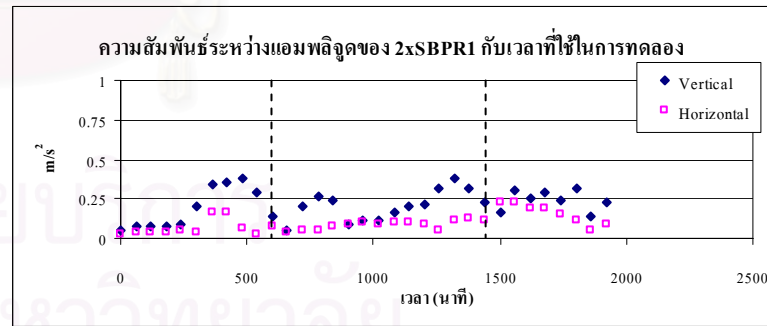
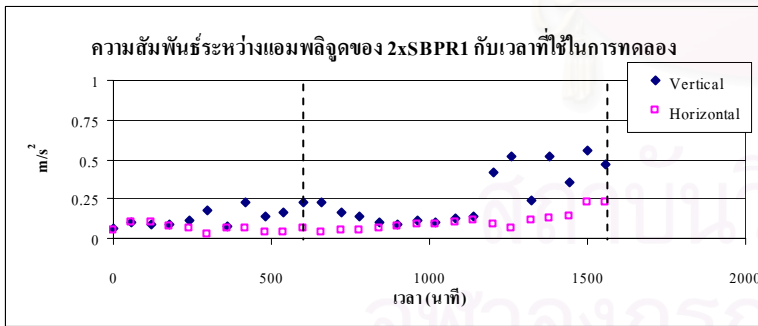
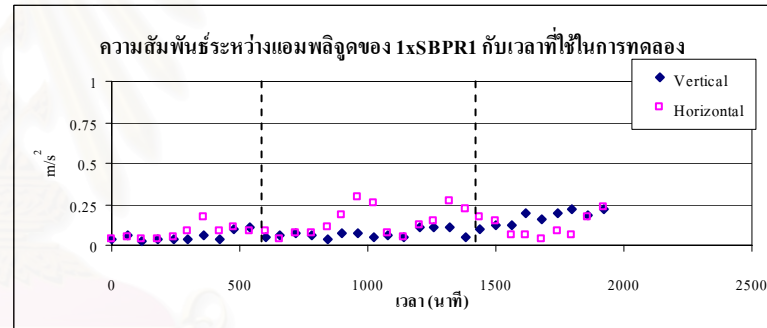
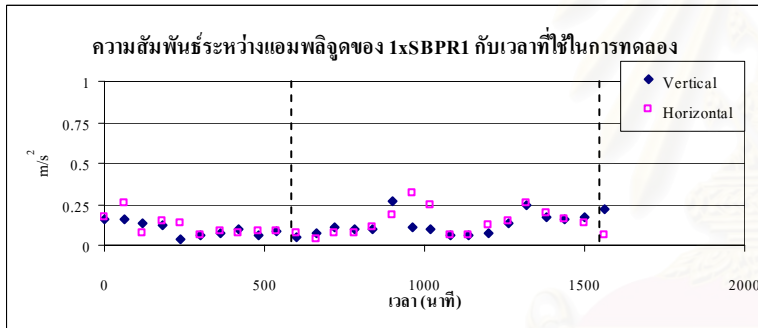
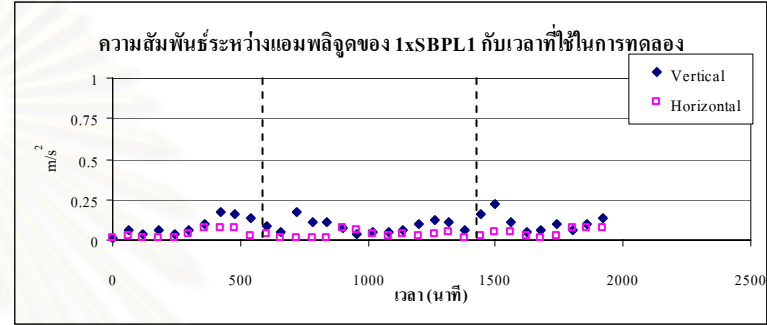
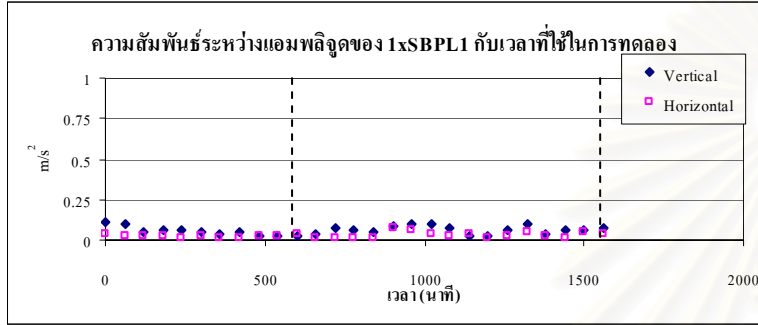
รูปที่ 4-38 ความสัมพัทธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

รูปที่ 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging



เฟืองชุดที่ 1

เฟืองชุดที่ 2

รูปที่ 4-40 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความถี่ข้างกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging

ผลการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม

ผลและการวิเคราะห์ค่า GMF

จากการทดลองความถี่สัญญาณ GMF 3 ความถี่ คือ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF โดยเก็บสัญญาณใน 2 วิธี คือ Spectrum Averaging และ Synchronous Time Averaging ดังแสดงในรูปที่ 4-29 ถึง 4-34

ผลและการวิเคราะห์ค่า 1xGMF

1. แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า 1xGMF เมื่อระดับสีกหรือเปลี่ยนค่า 1xGMF มีการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
 - 1) การทดลองที่สภาวะ 500 RPM แนวโน้มของแอมพลิจูดของ 1xGMF ก่อนข้างสม้าเสมอและลดลงเล็กน้อยเมื่อการสีกหรือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะและแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งแนวตั้ง แนวระดับ และทั้ง 2 ชุดการทดลอง
 - 2) การทดลองที่สภาวะ 800 RPM แนวโน้มของแอมพลิจูดของ 1xGMF ในชุดการทดลองที่ 1 ก่อนข้างสม้าเสมอและลดลงเล็กน้อยเมื่อการสีกหรือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะและแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งแนวตั้งและแนวระดับ ในชุดการทดลองที่ 2 แอมพลิจูดแนวตั้งช่วงแรกของการทดลองมีค่าที่สูงแต่จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับการสีกหรือเพิ่มมากขึ้นจนพินเพื่อมีระดับการสีกหรือที่ 2 แอมพลิจูดของสัญญาณมีแนวโน้มที่สม้าเสมอและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงระดับการสีกหรือที่ 3 ส่วนแอมพลิจูดในแนวระดับก่อนข้างสม้าเสมอตลอดระยะเวลาการทดลอง
 - 3) การทดลองที่สภาวะ 1100 RPM ที่สภาวะนี้แนวโน้มของแอมพลิจูดของ 1xGMF ในการทดลองทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีความแปรปรวนและแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนทั้งแนวตั้งและแนวระดับ
2. ผลจากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีที่ต่างกัน

การเก็บสัญญาณของทั้ง 2 วิธี ให้ลักษณะแนวโน้มคล้ายกัน ส่วนขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณที่เก็บจากวิธี Spectrum Averaging มีค่าที่มากกว่าสัญญาณที่ได้มาจากการเก็บสัญญาณ โดยวิธี Synchronous Time Averaging อยู่ 2-3 เท่า
3. ผลจากการทดลองที่ความเร็วรอบที่แตกต่างกัน

การทดลองที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 RPM ให้แนวโน้มที่ดีกว่าการทดลองที่ความเร็วรอบอื่น คือการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM ให้แนวโน้มที่ลดลงตั้งแต่เริ่มทดลองจนถึงที่ระดับสีกหรือสุดท้าย ในขณะที่การทดลองที่ความเร็วอื่นจะให้แนวโน้มของสัญญาณที่ไม่ชัดเจนนัก

ผลและการวิเคราะห์ค่า 2xGMF และ 3xGMF

แอมพลิจูดของค่า 2xGMF โดยรวมมีแนวโน้มที่แปรปรวนแกว่งตัวขึ้น ๆ ลง ๆ และไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่ในการทดลองที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1100 RPM มีแนวโน้มของสัญญาณที่ชัดเจนกว่าการทดลองที่ความเร็วรอบมอเตอร์อื่น กล่าวคือในระยะแรกของการทดลองแอมพลิจูดของสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อทดลองไปได้ 360 นาที และลดลงต่อเนื่องจนถึงระดับการสึกหรอสุดท้าย ส่วนแอมพลิจูดค่า 3xGMF โดยรวมมีแนวโน้มที่แปรปรวนมากและไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในทุก ๆ สถานะการทดลอง สาเหตุของความไม่ชัดเจนของสัญญาณที่เกิดขึ้นอาจจะมาจากการที่ระดับการสึกหรอของแต่ละฟันไม่เท่ากันทำให้จังหวะและช่วงเวลาในการขบกันเปลี่ยนไปมาไม่แน่นอน ความเป็นคาบของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ GMF มากบ้างน้อยบ้าง การใช้พารามิเตอร์แอมพลิจูดของ GMF เป็นเกณฑ์ในการบ่งบอกระดับการสึกหรอของเฟืองอาจไม่ชัดเจน

ผลและการวิเคราะห์แถบความถี่ข้าง 1xSBPL1, 1xSBPR1, และ 2xSBPR1

พิจารณาแนวโน้มแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างเมื่อเวลาผ่านไป โดยรวมแนวโน้มของสัญญาณค่อนข้างแปรปรวนขึ้น ๆ ลง ๆ ซึ่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เด่นชัด เช่นเดียวกับแอมพลิจูดของค่า 2xGMF และ 3xGMF

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่สำหรับกรณีการสึกหรอบนฟันเฟืองนั้นพารามิเตอร์ในการพิจารณาส่วนใหญ่มีแนวโน้มของสัญญาณไม่ชัดเจนนัก ค่าของแอมพลิจูดมีความแปรปรวนขึ้น ๆ ลง ๆ เมื่อพิจารณาถึงวิธีการเก็บสัญญาณจะเห็นว่าการเก็บสัญญาณทั้ง 2 พบว่าการเก็บสัญญาณโดยวิธี Synchronous Time Averaging มีความความแปรปรวนสัญญาณมากกว่าวิธีการเก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากที่วิธีการดังกล่าวใช้เวลาในการเก็บสัญญาณค่อนข้างนานกว่าอยู่มากจึงอาจเกิดความผิดพลาดจากการเก็บสัญญาณเนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สม่ำเสมอในขณะที่ทำการเก็บสัญญาณ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวสามารถลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่าง ๆ อันไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้สามารถสังเกตยอดสเปกตรัมของ GMF และฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในสัญญาณบนโดเมนความถี่ได้ชัดเจนกว่า

แนวโน้มสัญญาณบนโดเมนความถี่ มีความแปรปรวนไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้เด่นชัดเมื่อระดับการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ สถานะการทดลอง ทำให้ยากที่จะระบุถึงระดับการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนฟันเฟือง

สัญญาณเซปต์ดรัม

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ คือ

- 1) แกมมนิจูดของ 1/P 2/P และ 3/P คือ ค่าแกมมนิจูดของยอดสัญญาณเซปต์ดรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองขับ) และ รัศมีมอดที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยแกมมนิจูด 3/P จะวิเคราะห์ที่สถานะความเร็วรอบ 500 RPM และ 800 RPM เท่านั้นเนื่องจากที่ความเร็วรอบ 1100 RPM แกมมนิจูด 3/P จะอยู่นอกช่วงการเก็บสัญญาณ
- 2) แกมมนิจูดของ 1/W คือ ค่าแกมมนิจูดของยอดสัญญาณเซปต์ดรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองตาม)

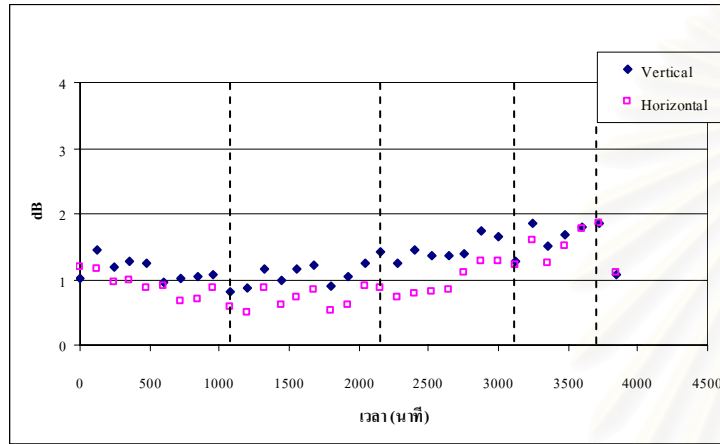
ควิเฟรนซีของพารามิเตอร์แต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-7 และเนื่องจากความละเอียดของการเก็บสัญญาณเซปต์ดรัมค่อนข้างมาก คือ 2,048 จุด ในการเก็บสัญญาณแต่ละครั้ง ประกอบกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละตัวอยู่ห่างกัน จึงไม่พบปัญหาในการเลือกควิเฟรนซีของพารามิเตอร์ โดยการเลือกควิเฟรนซีจะใช้ค่าแกมมนิจูดที่สูงที่สุด 5 จุดของข้อมูลรอบ ๆ ควิเฟรนซีของแต่ละพารามิเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์แต่ละตัวและเวลาที่ใช้ในการทดลอง ใช้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ได้จากการเก็บสัญญาณ 5 ครั้ง ในแต่ละจุดทุก ๆ 120 นาที โดยพิจารณาว่าการเพิ่มขึ้นของเวลาแทนการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชนิด

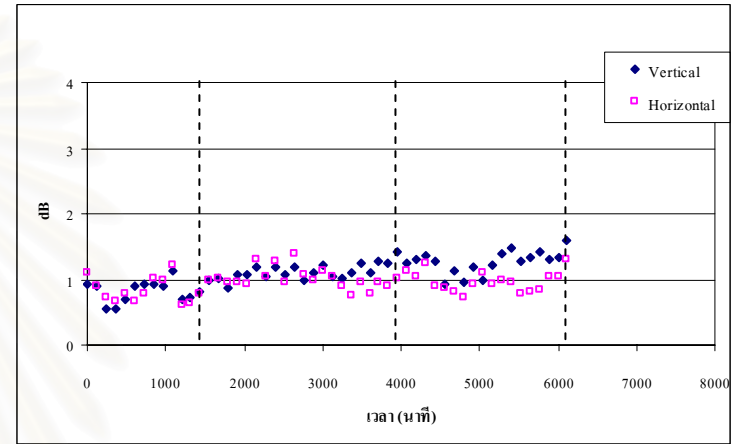
ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละรูปประกอบด้วย 4 รูปย่อย ตามวิธีการเก็บสัญญาณและชุดทดลอง แต่ละรูปย่อยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่วัดในแนวระดับ (Horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับดังต่อไปนี้

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/P$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-41 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-42 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-43 : ความเร็วรอบ 1100 RPM
- 2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $2/P$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-44 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-45 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-46 : ความเร็วรอบ 1100 RPM
- 3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $3/P$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-47 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-48 : ความเร็วรอบ 800 RPM
- 4) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/W$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลอง
 - รูปที่ 4-49 : ความเร็วรอบ 500 RPM
 - รูปที่ 4-50 : ความเร็วรอบ 800 RPM
 - รูปที่ 4-51 : ความเร็วรอบ 1100 RPM

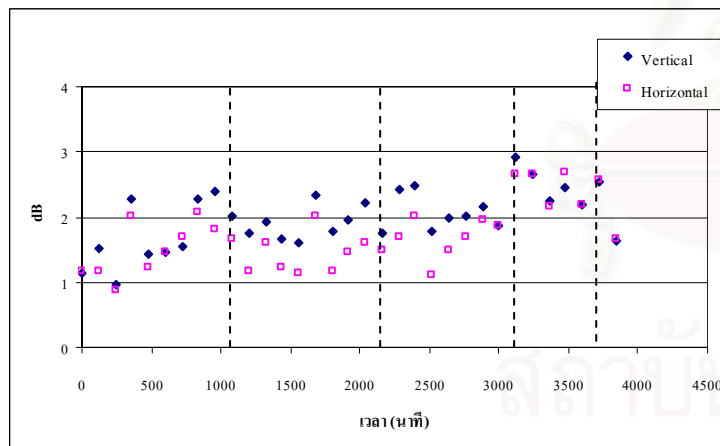
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



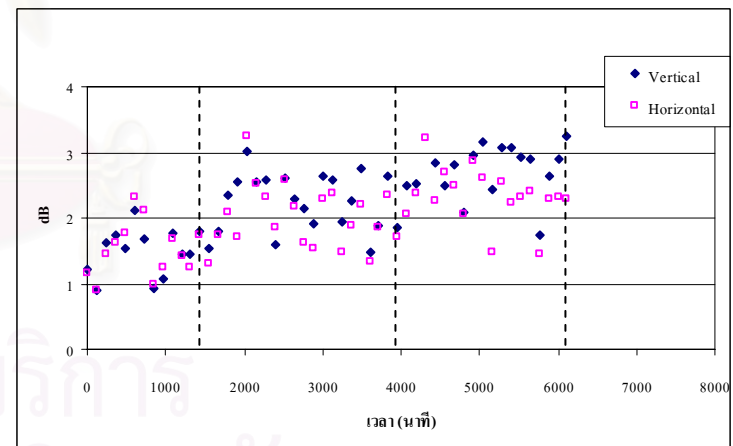
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

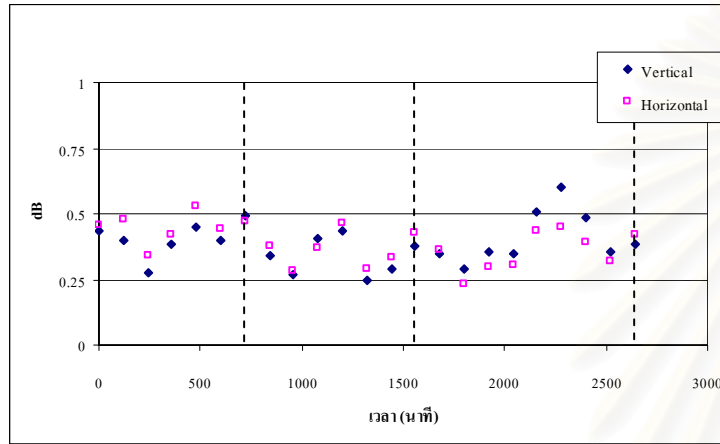


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

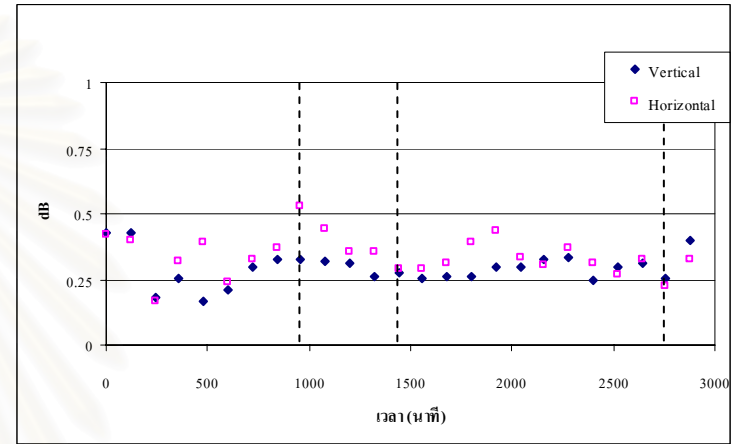


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

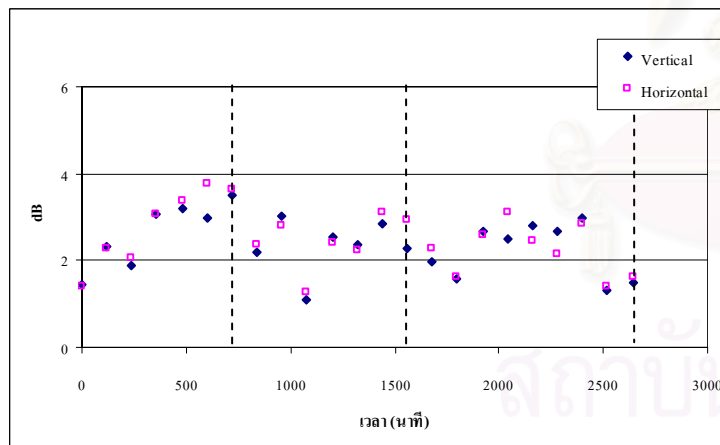
รูปที่ 4-41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/P$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



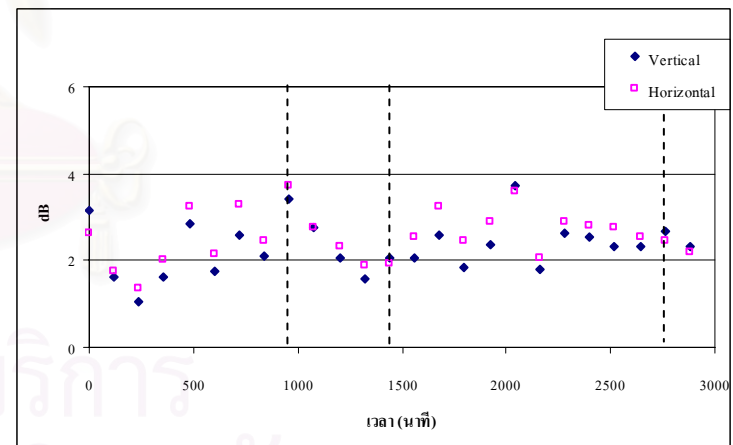
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

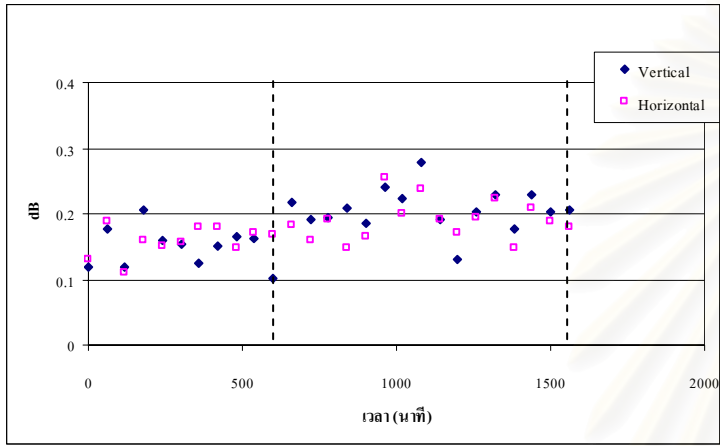


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

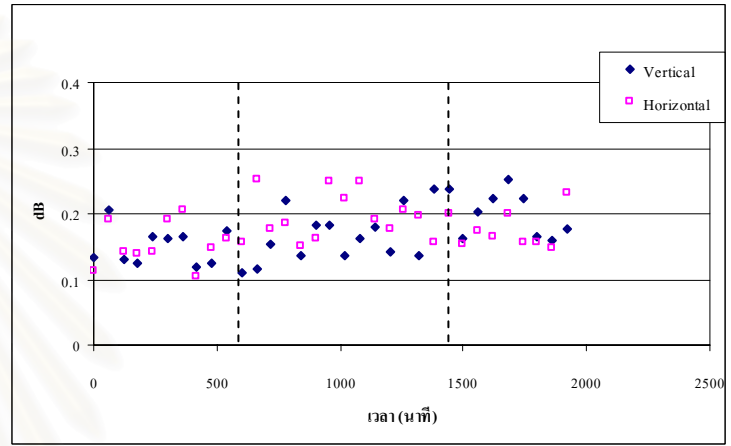


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

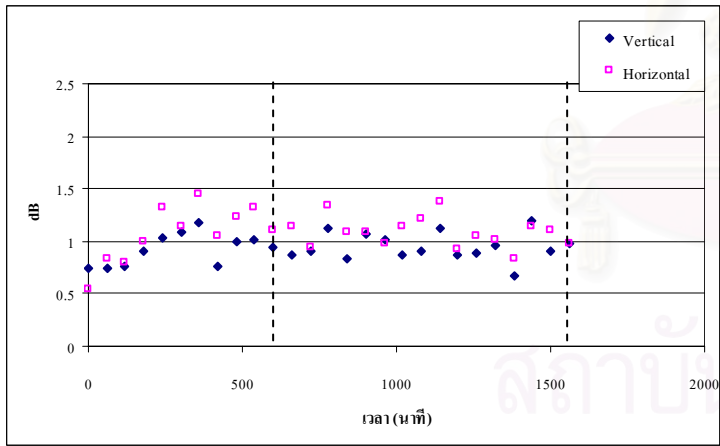
รูปที่ 4-42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/P$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



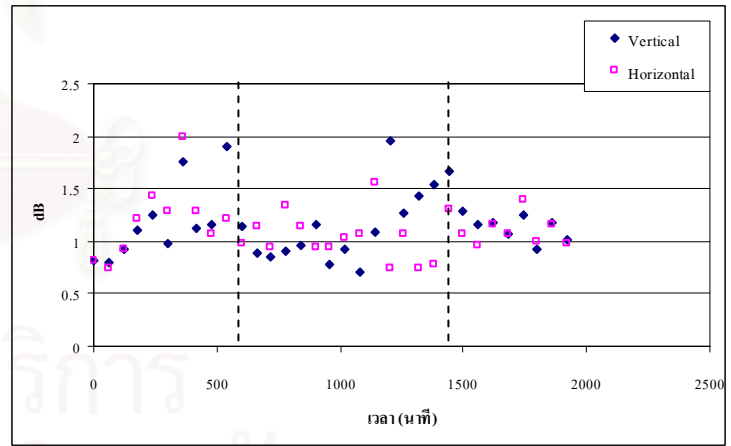
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

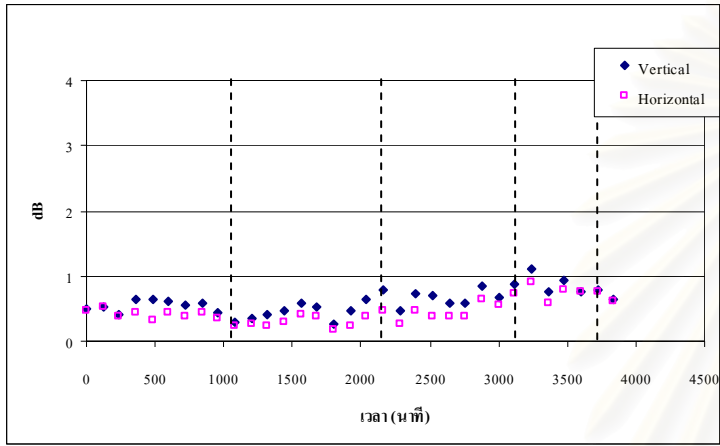


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

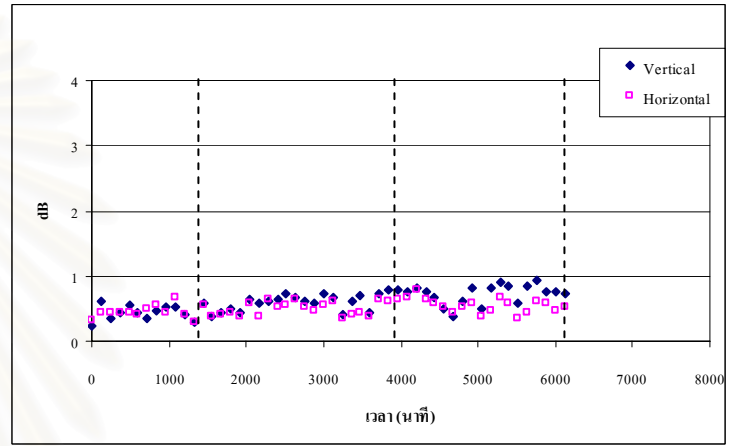


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

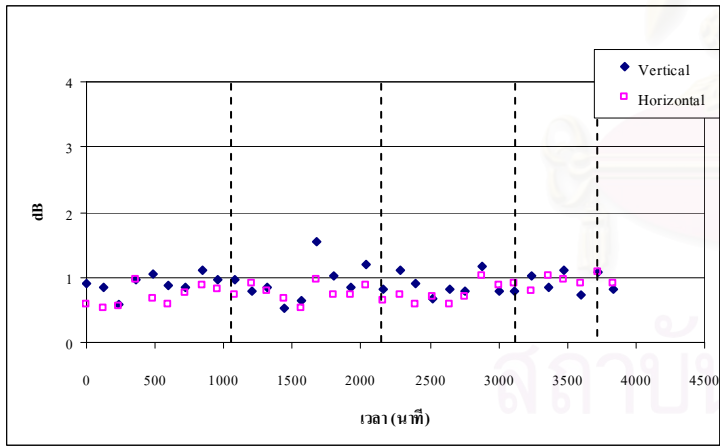
รูปที่ 4-43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM



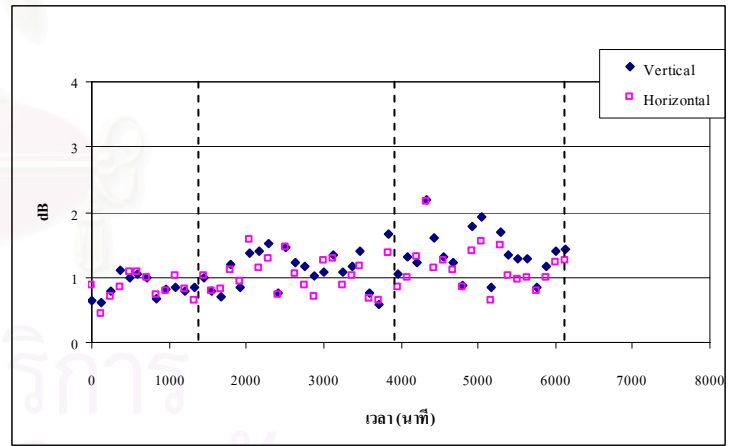
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เพียงจุดที่ 2

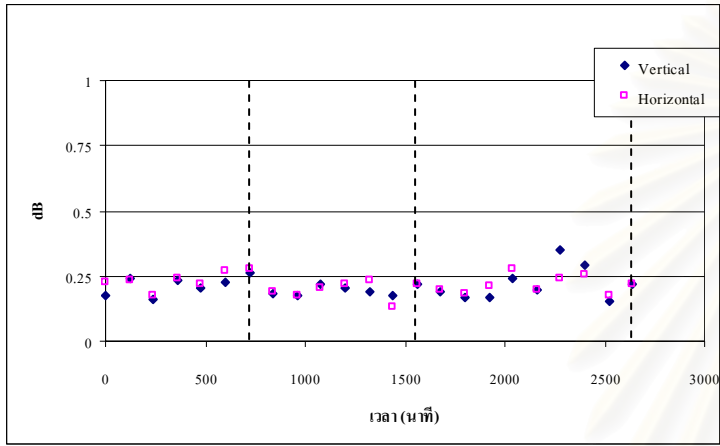


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 1

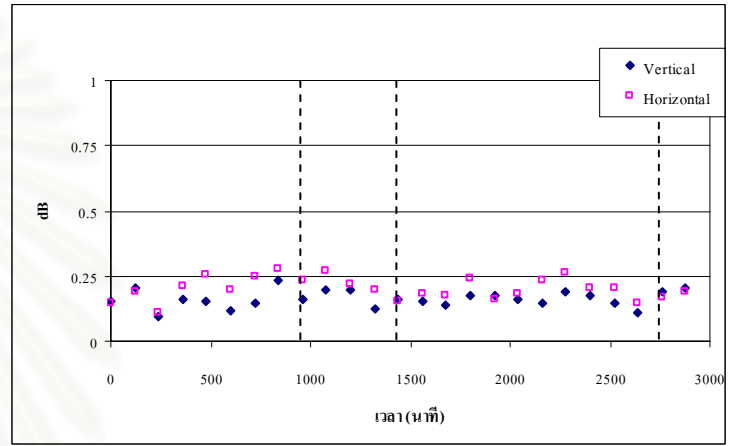


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เพียงจุดที่ 2

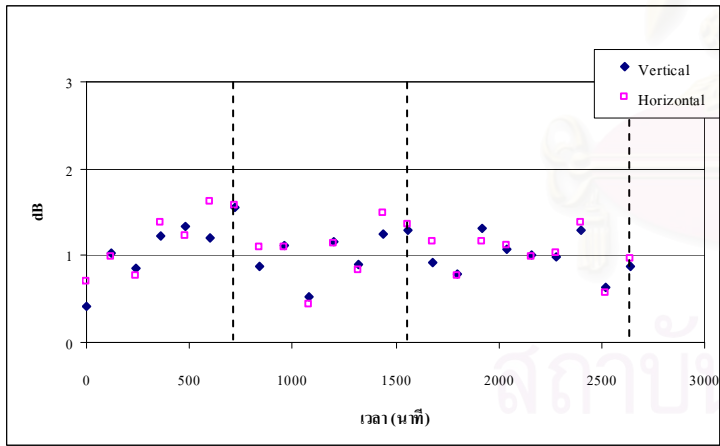
รูปที่ 4-44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



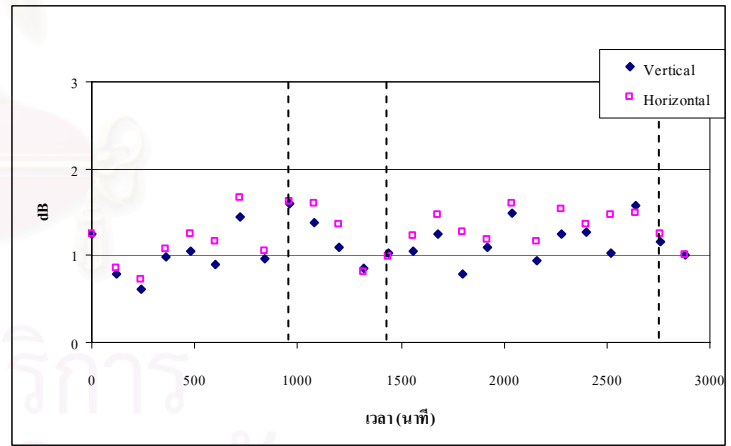
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

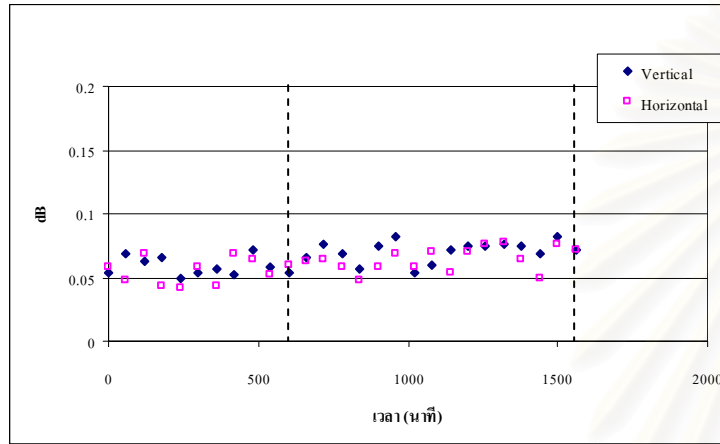


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

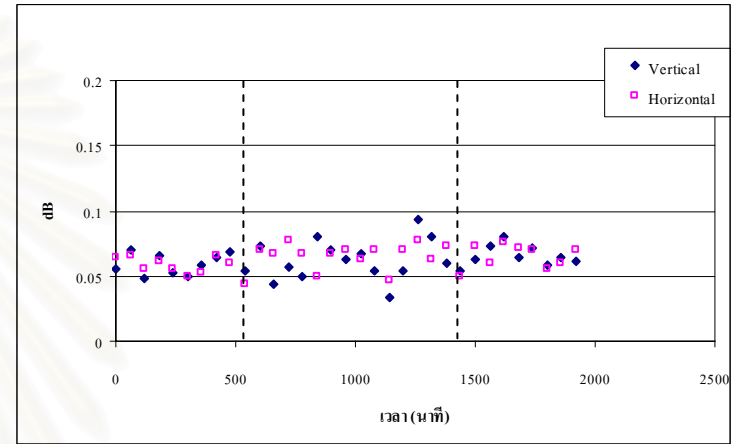


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

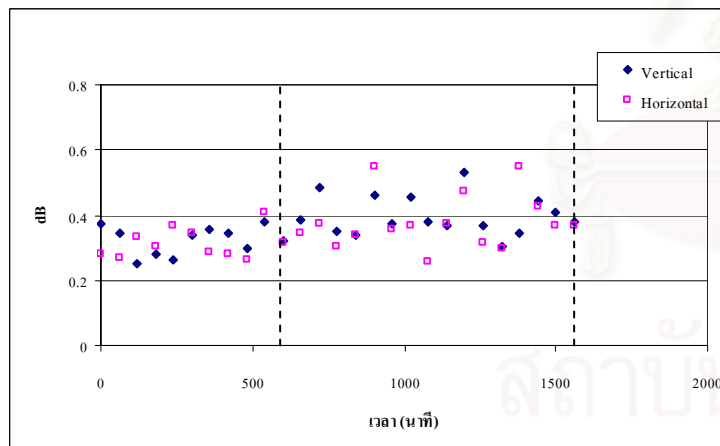
รูปที่ 4-45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



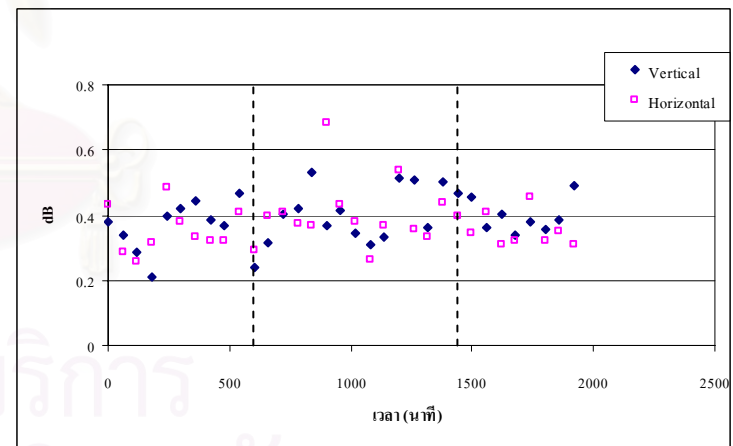
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

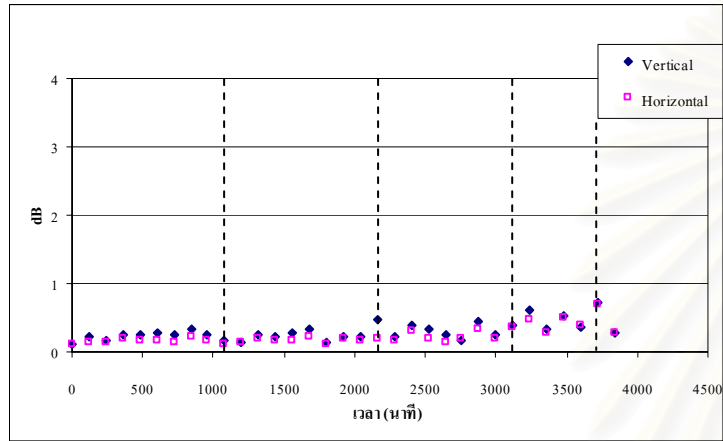


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

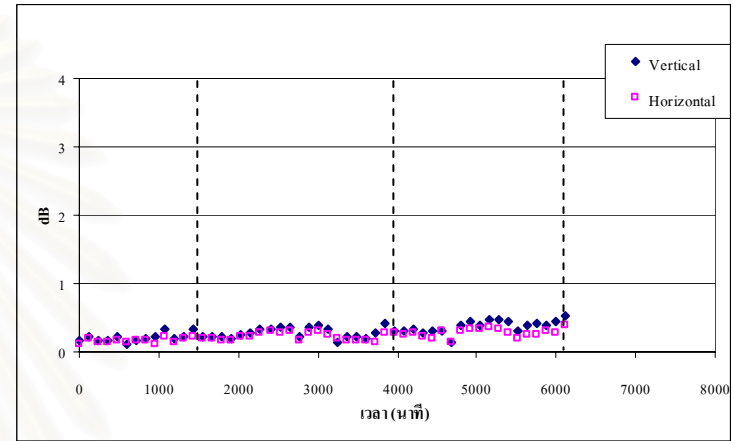


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

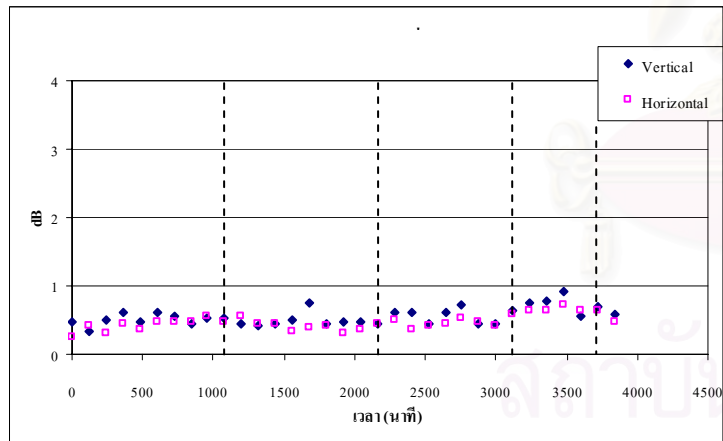
รูปที่ 4-46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM



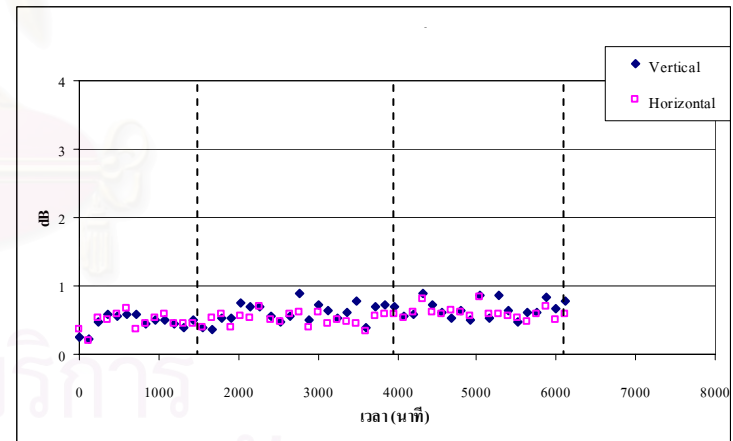
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

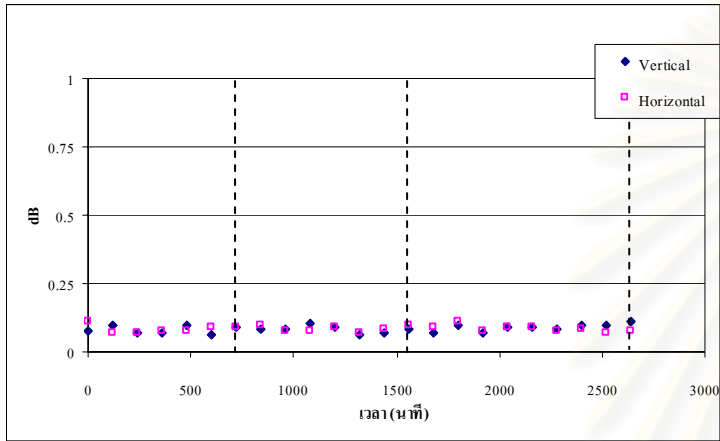


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

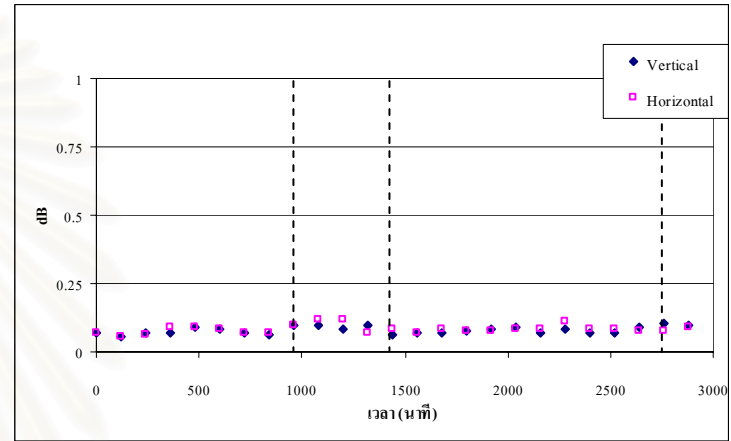


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

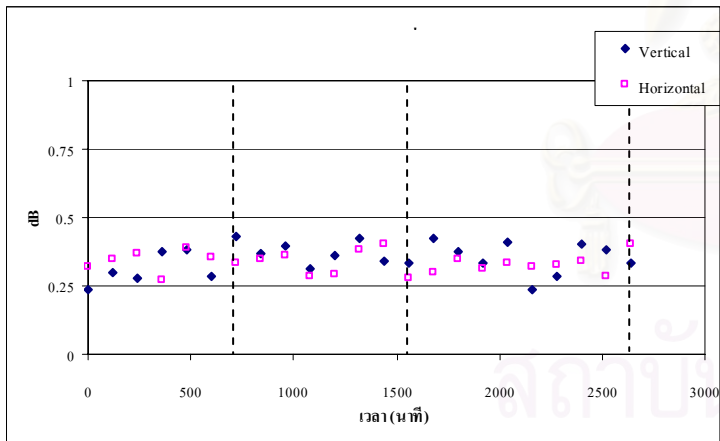
รูปที่ 4-47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 3/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



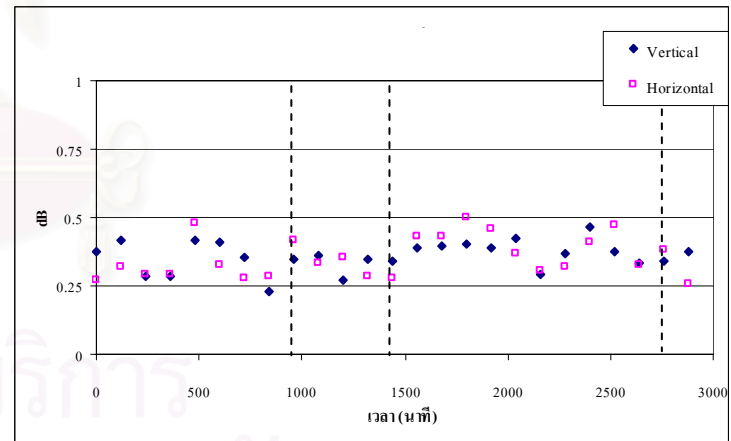
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

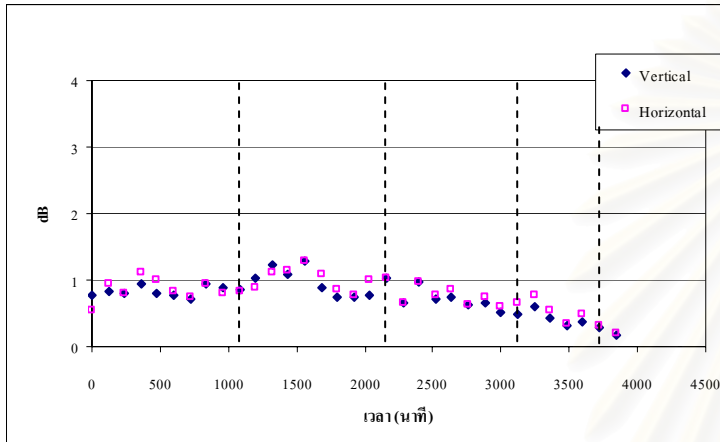


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

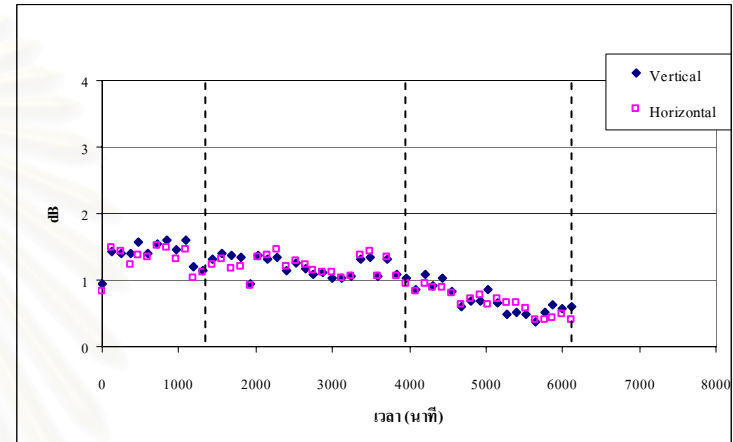


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

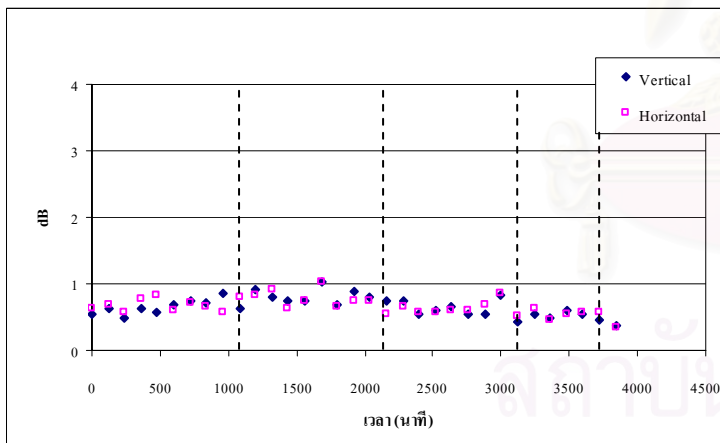
รูปที่ 4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 3/P กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



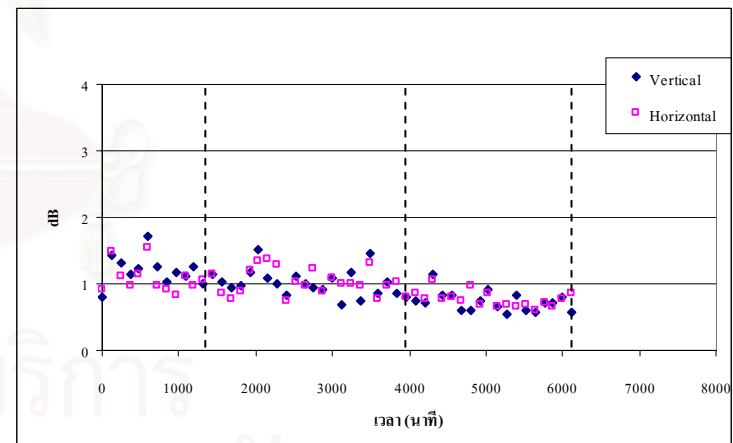
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

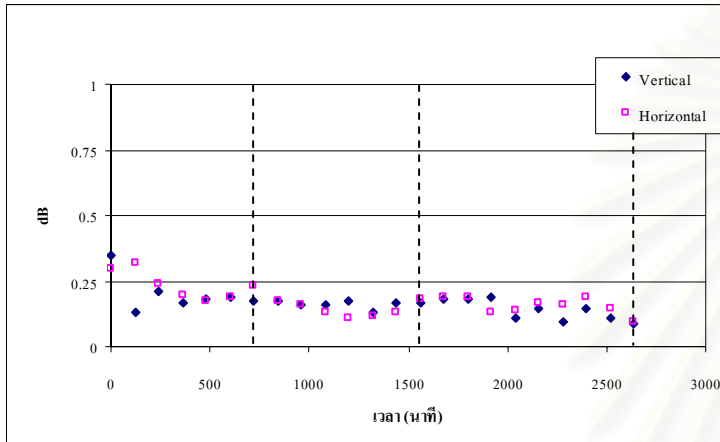


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

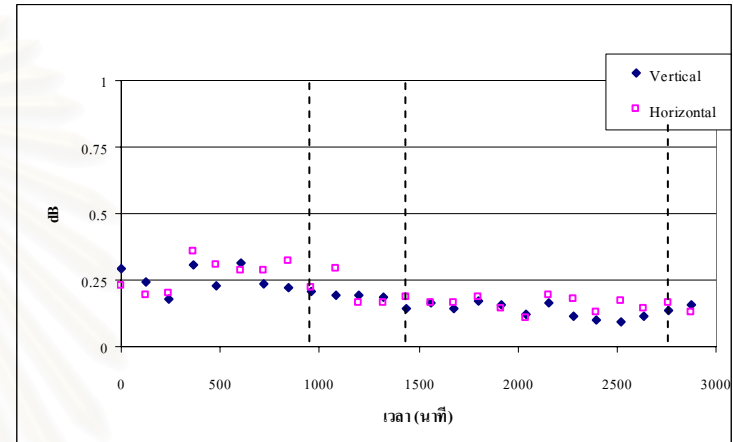


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

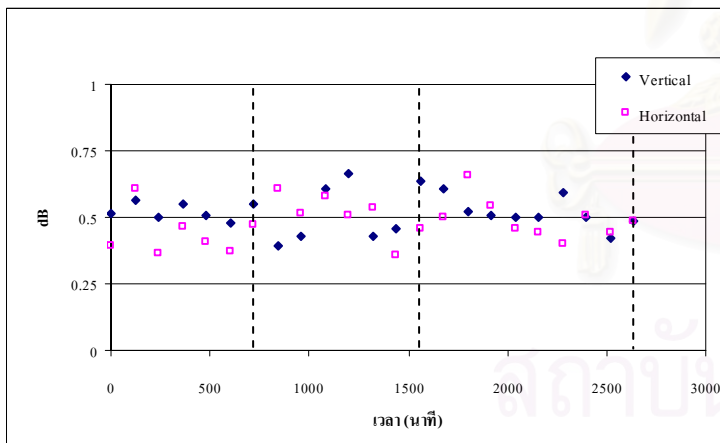
รูปที่ 4-49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/W$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM



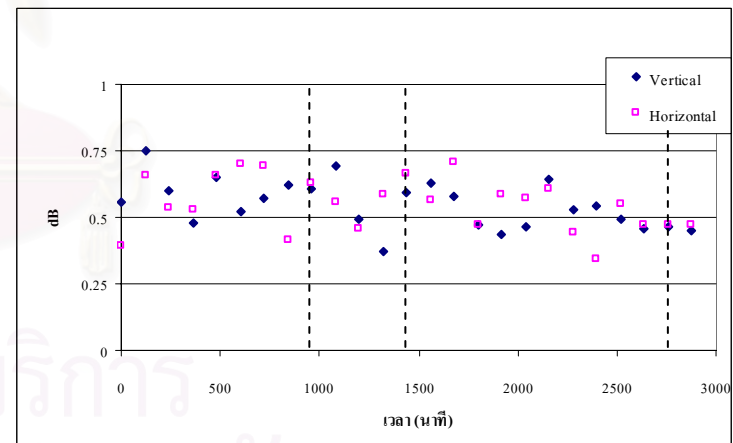
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2

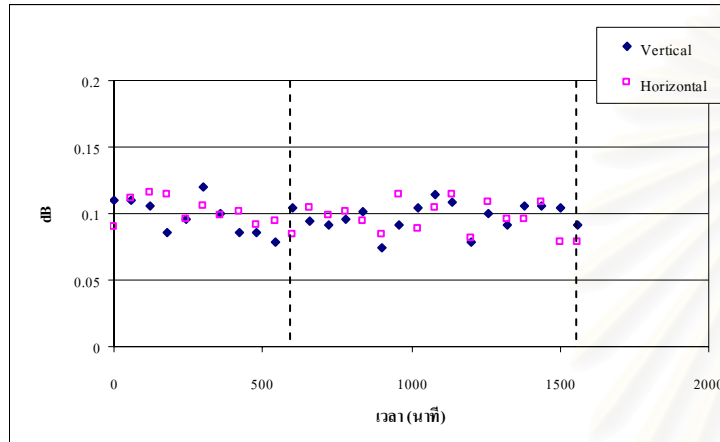


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1

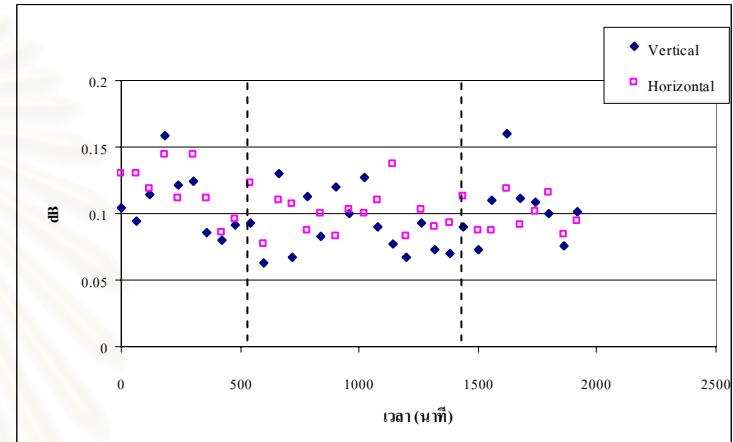


เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

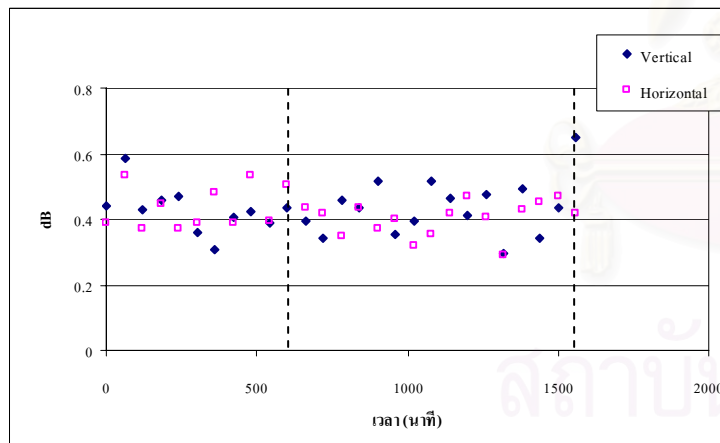
รูปที่ 4-50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/W$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM



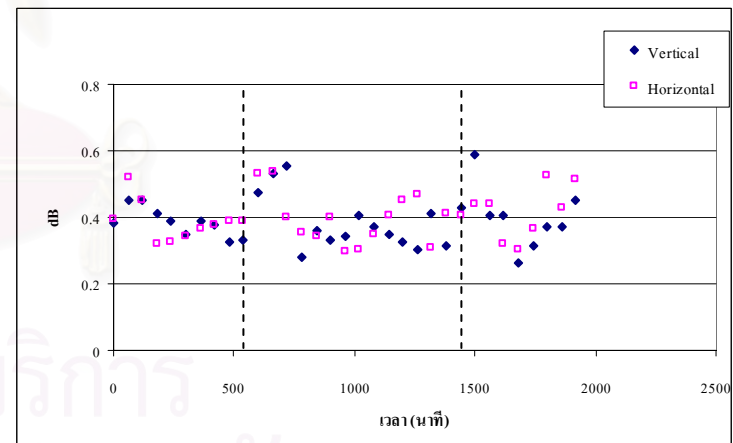
เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging เฟืองชุดที่ 2



เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 1



เก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging เฟืองชุดที่ 2

รูปที่ 4-51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/W$ กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 RPM

ผลและการวิเคราะห์เซปต์ตรัม

ในการพิจารณาผลของเซปต์ตรัมจะพิจารณาแวนวโน้มแกมนิจุดของเซปต์ตรัมเมื่อที่เวลาผ่านไป ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

1. การทดลองที่สภาวะ 500 RPM

แกมนิจุดของ 1/P มีแวนวโน้มของสัญญาณในลักษณะที่คล้ายกันทั้ง 2 วิธีการเก็บสัญญาณ กล่าวคือมีแวนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีกหรือเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งในแวนวคังและแวนวระดับ แต่แกมนิจุดนั้นจะมีความแปรปรวนอยู่มากแวนวโน้มที่ได้นั้นจึงยังไม่ชัดเจนนัก

แกมนิจุดของ 2/P แวนวโน้มแกมนิจุดของสัญญาณ 2/P ให้แวนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกับสัญญาณ 1/P โดยสัญญาณมีแวนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งในแวนวคังและแวนวระดับ แต่แกมนิจุดยังมีความแปรปรวนอยู่มากเช่นกัน

แกมนิจุดของ 3/P แวนวโน้มของสัญญาณจะมีลักษณะเดียวกับสัญญาณ 1/P และ 2/P คือจะมีแวนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระดับสีกหรือ

แกมนิจุดของ 1/W แวนวโน้มสัญญาณมีลักษณะที่คล้ายกันทั้ง 2 วิธีการเก็บสัญญาณ คือมีแวนวโน้มที่ลดลงเมื่อระดับการสีกหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งสัญญาณในแวนวคังและสัญญาณในแวนวระดับมีลักษณะในทิศทางเดียวกัน แต่ลักษณะของกราฟยังมีความแปรปรวนเช่นเดียวกับค่าแกมนิจุดที่ได้กล่าวมาในข้างต้น

2. การทดลองที่สภาวะ 800 RPM

ในสภาวะการทดลองนี้ค่าแกมนิจุด 1/P และ 2/P มีความแปรปรวนอยู่มากมีค่าแกว่งตัวขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่ชัดเจนโดยเป็นไปในลักษณะเช่นนี้ทั้งแวนวคังและแวนวระดับ

ส่วนค่าแกมนิจุด 3/P ในการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging ค่าแกมนิจุดค่อนข้างคงที่และสม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับการสีกหรือ การเก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging ค่าแกมนิจุดมีความแปรปรวนและไม่มีแวนวโน้มของสัญญาณที่ชัดเจนเช่นกัน

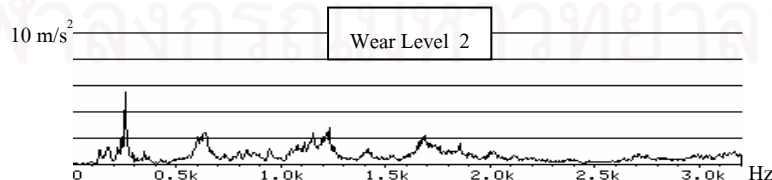
ค่าแกมนิจุด 1/W ในการเก็บสัญญาณแบบ Spectrum Averaging มีแวนวโน้มที่ลดลงเมื่อระดับการสีกหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งสัญญาณในแวนวคังและสัญญาณในแวนวระดับมีลักษณะในทิศทางเดียวกัน แต่การเก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging ค่าแกมนิจุดมีความแปรปรวนและไม่มีแวนวโน้มของสัญญาณที่ชัดเจน

3. การทดลองที่สภาวะ 1100 RPM

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของแกมมาแกมมา 1/P, 2/P, และ 1/W ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยรวมแนวโน้มของสัญญาณค่อนข้างแปรปรวนขึ้น ๆ ลง ๆ ซึ่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เด่นชัด อีกทั้งค่าสัญญาณแกมมาแกมมาก่อนข้างทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ยาก ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งสัญญาณในแนวตั้ง แนวระดับ และการเก็บสัญญาณทั้ง 2 วิธี

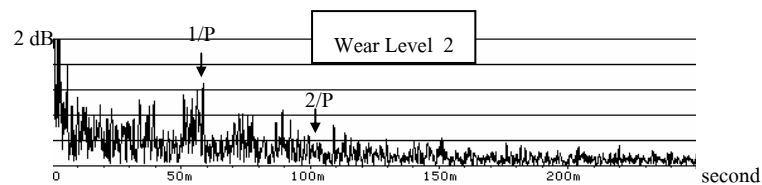
ในทุกสภาวะการทดลองแนวโน้มแกมมาแกมมาของเซปส์ตรัมที่ 1/P, 2/P และ 3/P โดยรวมจะมีลักษณะที่คล้ายกันในวิธีการเก็บสัญญาณแบบเดียวกัน โดย 1/P จะให้แนวโน้มที่เด่นชัดที่สุด และแนวโน้มแกมมาแกมมาของเซปส์ตรัมที่ 1/P, 2/P, 3/P และ 1/W ที่ได้จากวิธีการเก็บสัญญาณทั้ง 2 วิธีในแต่ละสภาวะการทดลองจะคล้ายกันในเกือบทุกสภาวะ ยกเว้นที่สภาวะ 500 RPM แกมมาแกมมาและการเปลี่ยนแปลงแกมมาแกมมาของ 1/P สูงกว่า 2/P และ 3/P โดยการเก็บสัญญาณแบบ Synchronous Time Averaging ให้ค่าแกมมาแกมมาและการเปลี่ยนแปลงสูงสุด เนื่องจากสัญญาณได้ลดทอนสัญญาณรบกวนให้เห็นความเป็นคาบของแถบความถี่ข้างในสเปกตรัมได้ชัดเจน เมื่อนำสัญญาณมาวิเคราะห์บนโดเมนคิวเฟรนซึ่งจึงทำให้เห็นรามอนิกต่าง ๆ ได้ง่ายและมีแกมมาแกมมาที่สูงขึ้นด้วย

การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซึ่งสำหรับกรณีการสึกหรอบนพื้นเพื่องนั้นพารามิเตอร์ในการพิจารณาส่วนใหญ่มีแนวโน้มของสัญญาณไม่ชัดเจนนัก ค่าของแกมมาแกมมาที่มีความแปรปรวนขึ้น ๆ ลง ๆ แต่ในสภาวะความเร็วรอบ 500 RPM จะเห็นแนวโน้มของสัญญาณได้ชัดเจนกว่าความเร็วรอบอื่น กล่าวคือค่าแกมมาแกมมา 1/P, 2/P, และ 3/P มีแนวโน้มของสัญญาณเพิ่มขึ้นตามระดับการสึกหรอ ส่วนค่าแกมมาแกมมา 1/W จะมีค่าของสัญญาณลดลงเมื่อระดับการสึกหรอสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงสภาวะการทดลองที่ความเร็วรอบต่างกันจะพบว่าที่ความเร็วรอบสูงจะมีค่าของแกมมาแกมมาน้อย เนื่องจากสเปกตรัมที่ความเร็วรอบสูงมีภาวะความเป็นคาบของยอดสเปกตรัมด้วยระยะห่างความถี่ที่มากซึ่งสังเกตความเป็นคาบได้ยากดังรูปที่ 4-52



รูปที่ 4-52 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 1100 RPM เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวตั้ง

จากรูปจะเห็นความถี่แบบสุ่มเกิดขึ้นในสัญญาณสเปกตรัมมากทำให้ไม่มีลักษณะของความเป็นคาบที่แน่นอน ค่าแกมมาจุดที่ได้จึงต่ำยากต่อการนำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 4-53



รูปที่ 4-53 สัญญาณเซปส์ตรัม ที่สภาวะ 1100 RPM ภาระ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ในแนวดิ่ง

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการเก็บสัญญาณจะเห็นว่าวิธีการเก็บสัญญาณทั้ง 2 พบว่าการเก็บสัญญาณโดยวิธี Synchronous Time Averaging มีความความแปรปรวนสัญญาณมากกว่าวิธีการเก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากที่วิธีการดังกล่าวใช้เวลาในการเก็บสัญญาณค่อนข้างนานกว่าอยู่มากจึงอาจเกิดความผิดพลาดจากการเก็บสัญญาณเนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สม่ำเสมอในขณะที่ทำการเก็บสัญญาณ

แนวโน้มสัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซ์ ในบางสภาวะสามารถบ่งบอกถึงระดับการสึกหรอได้ แต่ยังคงมีความแปรปรวนของสัญญาณอยู่มาก ในบางสภาวะก็ไม่อาจจะระบุถึงระดับการสึกหรอที่เกิดขึ้นได้ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ทำให้ยากที่จะระบุถึงระดับการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นเพื่องที่สภาวะนอกเหนือจากการทดลอง

บทที่ 5

การสรุปผลของวิทยานิพนธ์

สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณบนโดเมนเวลา เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าสัญญาณ Peak และค่า RMS จะมีความเหมาะสมมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยค่า Crest Factor หรือ Kurtosis เนื่องจากค่า Crest Factor และ Kurtosis เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณในลักษณะที่เป็นพัลส์ชั่วขณะ ซึ่งเหมาะกับการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของฟันเฟืองใดฟันเฟืองหนึ่งมากกว่าการตรวจสอบระดับความสึกหรอ แต่ในกรณีนี้การสึกหรอเกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอในทุก ๆ ฟัน ดังนั้นสัญญาณบนโดเมนเวลาจึงไม่ปรากฏลักษณะความเป็นพัลส์ในขณะใดขณะหนึ่งซ้ำกัน แต่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะเป็นในรูปแบบของการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดโดยรวมมากกว่า แนวโน้มสัญญาณของ Peak และ RMS ปรากฏมีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดของการสึกหรออย่างชัดเจนในทุก ๆ สภาวะ เมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น ช่องว่างระหว่างฟันที่ขบกัน (Backlash) ก็มากขึ้นด้วยทำให้ฟันเฟืองมีโอกาสที่จะหลุดจากการขบกันได้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีการกระทบกันของฟันเฟืองมากขึ้นทำให้สัญญาณของ Peak และ RMS มีแอมพลิจูดสูงขึ้นเมื่อการสึกหรอมากขึ้น เมื่อกำหนดภาระให้คงที่เฟืองที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูงกว่าจะมีการส่งผ่านของแรงที่ฟันเฟืองน้อยลงทำให้ฟันเฟืองมีโอกาสที่จะหลุดจากการขบกันในขณะส่งผ่านการเคลื่อนที่ได้มากกว่าเฟืองที่มีความเร็วรอบต่ำประกอบกับเมื่อเฟืองหมุนด้วยความเร็วรอบสูงขึ้นแรงพลวัต ที่เกิดจากการกระทบกันของฟันเฟืองจะมีค่าสูงเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้แนวโน้มของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับของความเร็วยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาจึงสามารถนำมาวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของฟันเฟืองได้เป็นอย่างดี

การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณบนโดเมนความถี่ พารามิเตอร์ในการพิจารณาส่วนใหญ่มีแนวโน้มของสัญญาณไม่ชัดเจนนัก ค่าของแอมพลิจูดมีความแปรปรวนแกว่งตัวขึ้น ๆ ลง ๆ เมื่อพิจารณาถึงวิธีการเก็บสัญญาณจะเห็นว่าการเก็บสัญญาณทั้ง 2 พบว่าการเก็บสัญญาณโดยวิธี Synchronous Time Averaging มีความความแปรปรวนสัญญาณมากกว่าวิธีการเก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากที่วิธีการดังกล่าวใช้เวลาในการเก็บสัญญาณนานกว่าอยู่มาก จึงอาจจะเกิดความผิดพลาดจากการเก็บสัญญาณเนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สม่ำเสมอในขณะที่ทำการเก็บสัญญาณ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวสามารถลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่าง ๆ อันไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้สามารถสังเกตยอดสเปกตรัมของ GMF และฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในสัญญาณบนโดเมนความถี่ได้ชัดเจนกว่า แนวโน้มสัญญาณบนโดเมนความถี่มีความแปร

ปรวนมากและไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้เด่นชัดเมื่อระดับการสีกหรือเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ สภาวะการทดลอง ทำให้ยากที่จะระบุถึงระดับการสีกหรือที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซ์สำหรับกรณีการสีกหรือบนพื้นผิวนั้นพารามิเตอร์ในการพิจารณาส่วนใหญ่มีแนวโน้มของสัญญาณไม่ชัดเจนนัก ค่าของแอมพลิจูดมีความแปรปรวนขึ้น ๆ ลง ๆ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ แต่ในสภาวะความเร็วรอบ 500 RPM จะเห็นแนวโน้มของสัญญาณได้ชัดเจนกว่าความเร็วรอบอื่น กล่าวคือค่าแอมพลิจูด 1/P, 2/P, และ 3/P มีแนวโน้มของสัญญาณเพิ่มขึ้นตามระดับการสีกหรือ ส่วนค่าแอมพลิจูด 1/W จะมีค่าของสัญญาณลดลงเมื่อระดับการสีกหรือสูงขึ้น ในสภาวะการทดลองที่ความเร็วรอบสูงพบว่าค่าของแอมพลิจูดน้อยเนื่องมาจากสเปกตรัมที่ความเร็วรอบสูงมีภาวะความเป็นคาบของยอดสเปกตรัมด้วยระยะห่างความถี่ที่มากซึ่งสังเกตความเป็นคาบได้ยาก โดยจะเห็นความถี่แบบสุ่มเกิดขึ้นในสัญญาณสเปกตรัมเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่มีลักษณะของความเป็นคาบที่แน่นอนค่าแอมพลิจูดจึงต่ำยากต่อการนำมาวิเคราะห์แนวโน้มสัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซ์ซึ่งบางสภาวะสามารถบ่งบอกถึงระดับการสีกหรือได้แต่ยังมีความแปรปรวนของสัญญาณอยู่มาก

จากข้อสรุปข้างต้นพบว่าวิธีการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาสามารถนำมาประยุกต์ระบุถึงระดับการสีกหรือที่สูงขึ้นได้เป็นอย่างดี และการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณทั้ง 3 โดเมนจะได้ผลการวิเคราะห์ที่สมบูรณ์แบบขึ้น โดยโดเมนความถี่แม้ว่าสัญญาณที่ได้ยังมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนแต่สามารถบ่งบอกถึงความเสียหายหรือความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งในเครื่องจักร ส่วนการวิเคราะห์เซปต์ตรัมแม้ว่าแนวโน้มแอมพลิจูดของเซปต์ตรัมจะไม่ชัดเจนนัก แต่การวิเคราะห์เซปต์ตรัมสามารถบอกได้ว่าการสีกหรือเกิดขึ้นที่เฟืองตัวใด โดยจะปรากฏแอมพลิจูดที่เด่นชัดในสัญญาณเซปต์ตรัมที่คิวเฟรนซ์ 1/(ความถี่ของเฟืองตัวที่มีปัญหา) ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อตรวจพบสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรมีค่า RMS หรือ Paak สูงขึ้นผิดปกติต้องวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนโดยละเอียดมากขึ้นในโดเมนเวลาเพื่อสังเกตสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์ โดเมนความถี่เพื่อสังเกตแอมพลิจูดของความถี่ GMF และฮาร์โมนิก และโดเมนคิวเฟรนซ์เพื่อสังเกตแอมพลิจูดของ 1/P หรือ 1/W แล้วจึงใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การวิเคราะห์เศษโลหะที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น เพื่อให้การทำนายสภาพการทำงานของเครื่องจักรถูกต้องและแม่นยำขึ้น สำหรับทิศทางในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองการวัดสัญญาณในทิศทางเดียวกับทิศทางที่แรงกระทำบนพื้นผิวจะให้ผลที่ดีกว่าการวัดในทิศทางอื่นเนื่องจากสามารถเห็นสัญญาณได้ชัดเจน

ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป

1. จากการทดลองพบว่าความเร็วรอบในการทดลองไม่สม่ำเสมอเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ไม่สม่ำเสมอส่งผลทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งมีผลต่อการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะทำให้ชุดสัญญาณไม่เข้าจังหวะกันอย่างสมบูรณ์ ปัญหาของความเร็วรอบที่ไม่คงที่ดังกล่าวอาจแก้ไขโดยการติดตั้งเครื่องสำรองไฟที่มีวงจร Voltage stability อยู่เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่อยู่ตลอดเวลาทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ด้วย
2. จากการทดลองพบว่าความละเอียดในการเก็บสัญญาณสเปกตรัมค่อนข้างน้อย กราฟสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จึงยกตัวขึ้นจากแกนและสังเกตยอดสเปกตรัมได้ยาก เนื่องจากสเปกตรัมความถี่ที่เกิดขึ้นของฟันเฟืองอาจอยู่ระหว่างจุดที่แสดงในกราฟ ทำให้การแสดงผลไม่ได้ค่าที่แม่นยำตรงกับความถี่ของเฟืองนัก ถ้าเพิ่มความละเอียดในการเก็บสัญญาณให้มากขึ้นจะทำให้เห็นยอดสเปกตรัมได้ชัดเจนและนำไปวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น
3. จากการวัดโปรไฟล์ของฟันเฟืองที่สึกหรอด้วยภาพจากกล้องดิจิทัลสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างเสียเวลาในการวัด และใช้กระดาษและหมึกพิมพ์ค่อนข้างสิ้นเปลือง ควรใช้วิธีทาง Image Processing ในการคำนวณระยะการสึกหรอจากจำนวน pixels ในภาพ เพื่อประหยัดเวลาและวัสดุที่ใช้ในการวัดโปรไฟล์ฟันเฟือง
4. ศึกษากรณีปัญหาที่เกิดกับชุดเฟืองเพิ่มเติมและศึกษาถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ กับปัญหาอื่น ๆ ของชุดเฟือง และเพิ่มเทคนิคใหม่ ๆ ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน เช่น การดีมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Demodulation), การดีมอดูเลตทางความเฟส (Phase Demodulation), และ เวฟเลต (Wavelet) เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] เจษฎา เตชัสหงส์. การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของคู่เฟืองตรงที่มีการสึกหรอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.
- [2] American Gear Manufacturers Association (AGMA). Appearance of Gear Teeth Terminology of Wear and Failure. United States of America: American Gear Manufacturers Association, 1995.
- [3] ปนัดดา นิรนาทลำพังศ์ และคณะ. การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม: ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [4] สมชาย เดโชธรรมสถิต. การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเซปต์รั่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2540.
- [5] กมลวรรณ พงศาพิชญ์. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.
- [6] Rao, S. Mechanical Vibration. 2nd ed. United States of America: Addison-Wiley, 1990.
- [7] Shopswarf. Spur Gear Terms & Calculations[Online]. Available from: <http://shopswarf.orcon.net.nz/spur.html>[2008, Feb 4].
- [8] Walton, D., Goodwin, A.J. The wear of unlubricated metallic spur gears. Wear 222 (Aug 1998): 103-113.
- [9] Taylor, J.I. The Gear Analysis Handbook : A Practical Guide for Solving Vibration Problem in Gear. 1st ed. New York: VCI, 2000.
- [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] Brüel & Kjær. Technical documentation : Multichannel analysis system type 3550 vol.1 guide tours., 1993.

- [12] ชีระชัย เจ้าสกุล. เขียนแบบเทคนิคเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [13] Canon. Barrel and Pincushion Distortion[Online]. Available from:
<http://www.dpreview.com/reviews/canona620/page6.asp>[2007, Feb15].
- [14] วรวิทย์ อิงภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2523.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

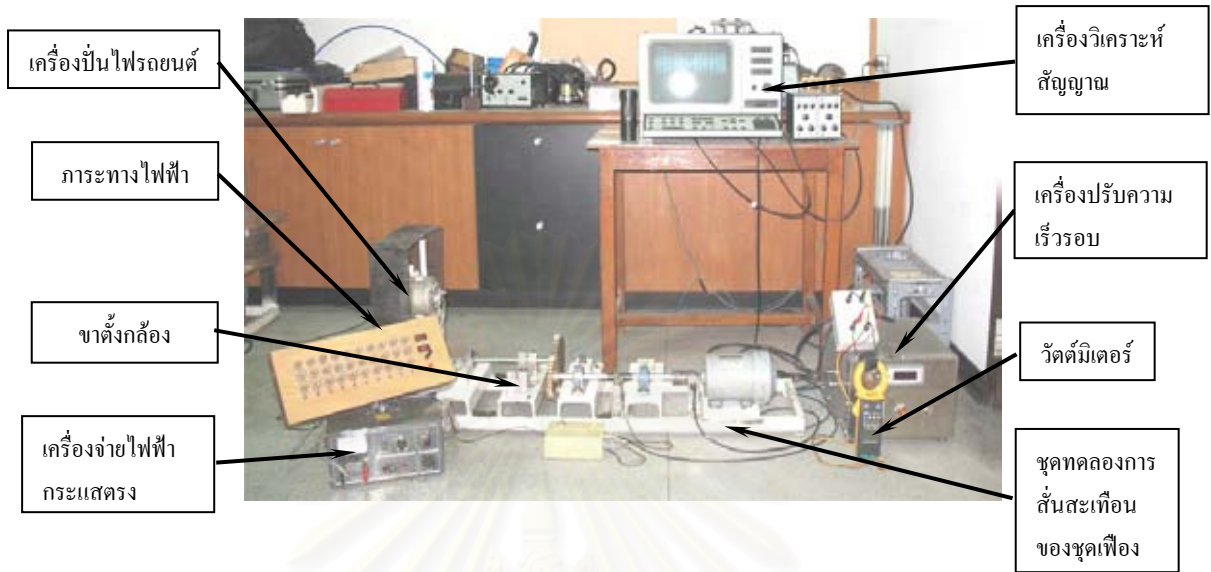
- [1] McFadden, P.D. Detecting the location of a fatigue crack in a gear from the phase of the change in the vibration. Mechanical Systems and Signal Processing 2 (1988) : 403-409.
- [2] American Gear Manufacturers Association (AGMA). Specification for Measurement of Linear Vibration on Gear Unit. United States of America: American Gear Manufacturers Association, 1996.
- [3] John, S.M. Machinery Analysis and Monitoring. 2nd ed. Oklahoma: PennWell , 1993.
- [4] Collacott, R. A. Vibration Monitoring and Diagnosis : Techniques for Cost-Effective Plant Maintenance. 1st ed. London: George Godwin, 1979.
- [5] Figliola, R. S. Theory and Design for Mechanical Measurements. 3rd ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2000.
- [6] Mark, W.D. Analysis of the vibration excitation of gear systems: Basic theory. Journal of the Acoustical Society of America, 63 (May 1978):1409-1403.
- [7] Guy, K.R. Data Acquisition. Vibration Institute, 24 (June 2000): 31-38.
- [8] Guy K. R. Data Analysis. Vibration Institute, 24 (June 2000): 57-68.
- [9] Taub, H. Principles of communication systems. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [10] ก่อเกียรติ บุญชูกุล สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน : การเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.
- [11] ธนู จุฑาย. การสั่นสะเทือนเชิงกล. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2541.
- [12] จักร จันทลักษณ์. สัญญาณและระบบ. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.(เอกสารไม่ตีพิมพ์)



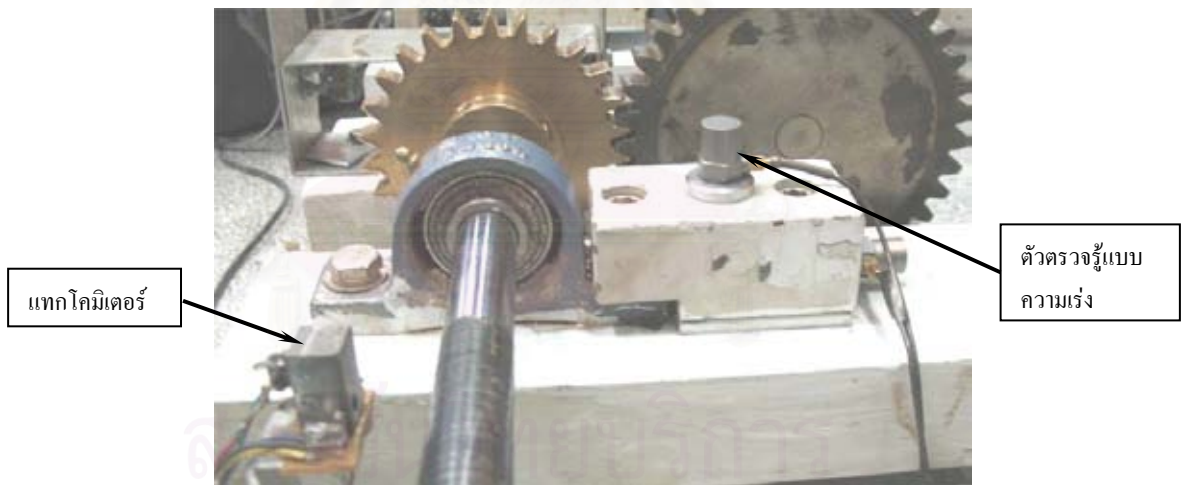
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
 อุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ ก-1 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดลองการสั้นสะท้อนของชุดเฟือง



รูปที่ ก-2 ภาพถ่ายการติดตั้งตัวตรวจรู้แบบความเร่งและแทกโคมิเตอร์

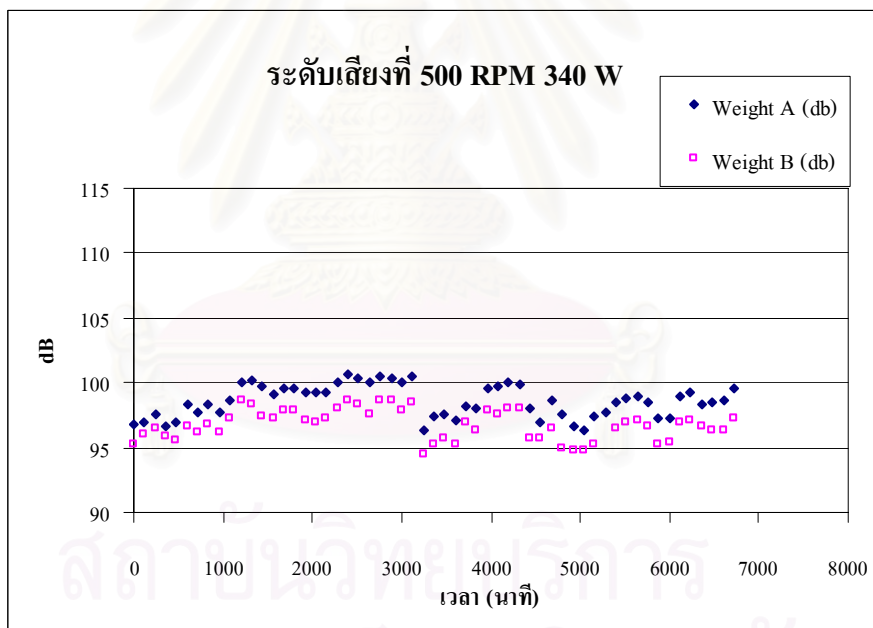
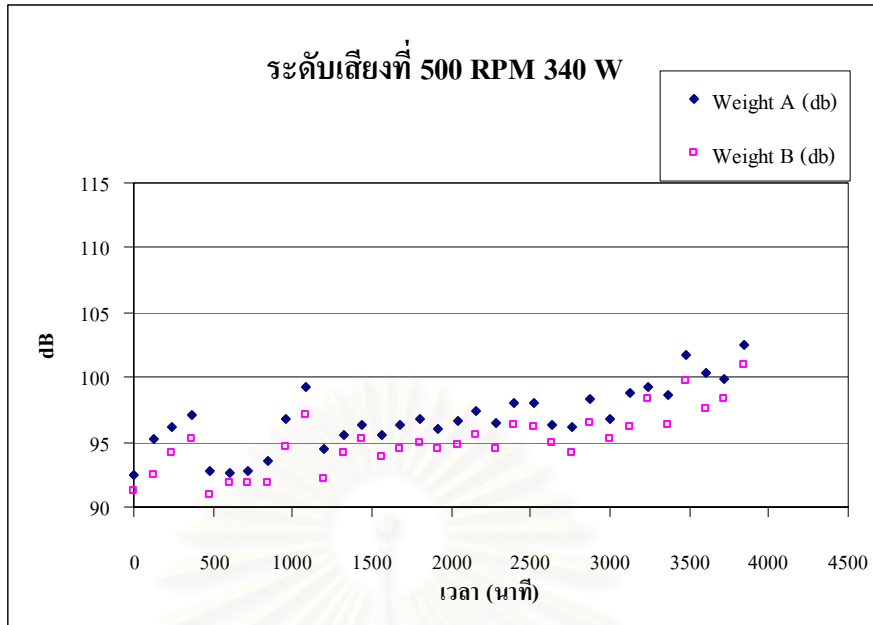
ภาคผนวก ข

ระดับเสียง

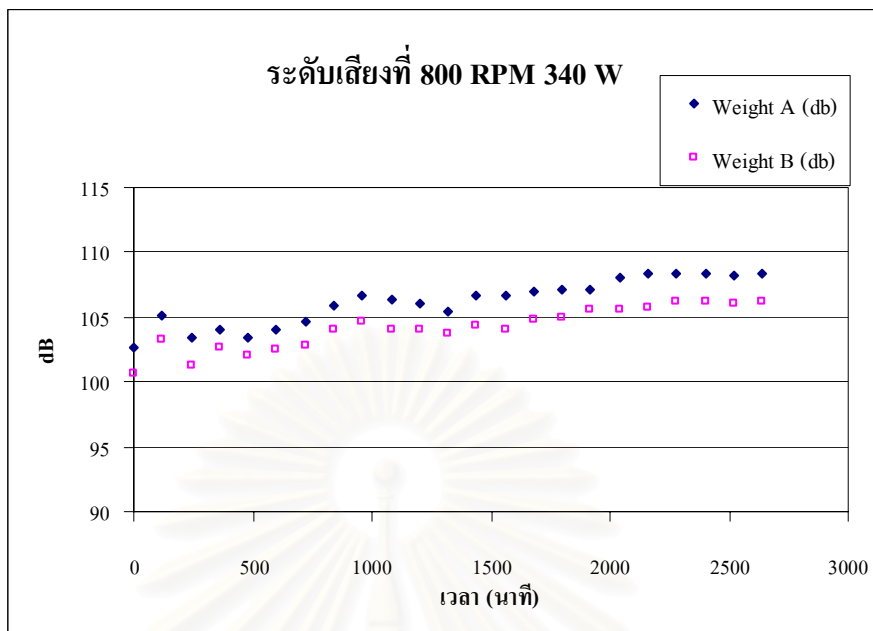
จากการทดลองพบว่าเสียงที่เกิดขึ้นมีการแปรเปลี่ยนไปเมื่อเพียงเกิดการสีกหรือเพิ่มมากขึ้น เมื่อวัดระดับเสียงพร้อมกันกับการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในระหว่างการทดลองทุก ๆ สถานะ ทำการวัดโดยนำไมโครโฟนไปไว้บริเวณใกล้กับจุดที่เฟืองขบกันมีระยะห่างประมาณ 1 เซนติเมตร และวัดโดยใช้วงจร Weighting ทั้งแบบ A และ B พบว่าแนวโน้มของระดับเสียงมีลักษณะคล้าย ๆ กับแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของเวลากว่าคือมีระดับของเสียงเพิ่มสูงขึ้น ตามระดับการสีกหรือดังรูปที่ ข-1 ถึง ข-3



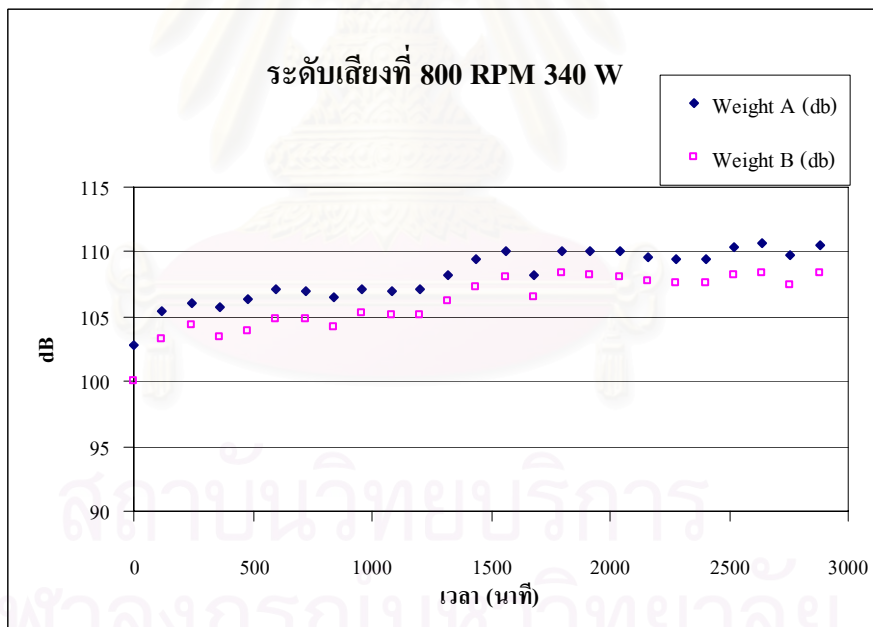
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-1 ระดับเสียง ที่ความเร็วรอบ 500 RPM

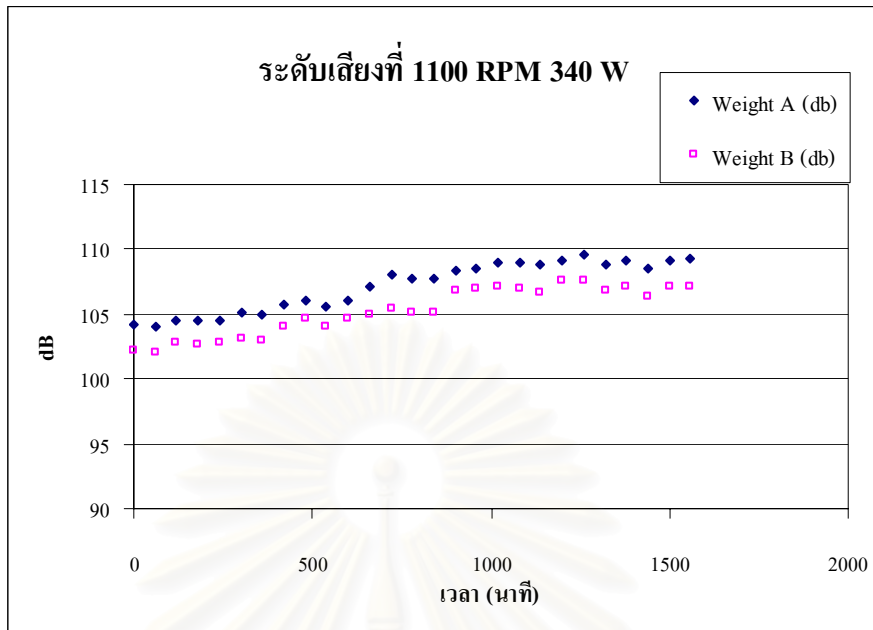


จุดที่ 1

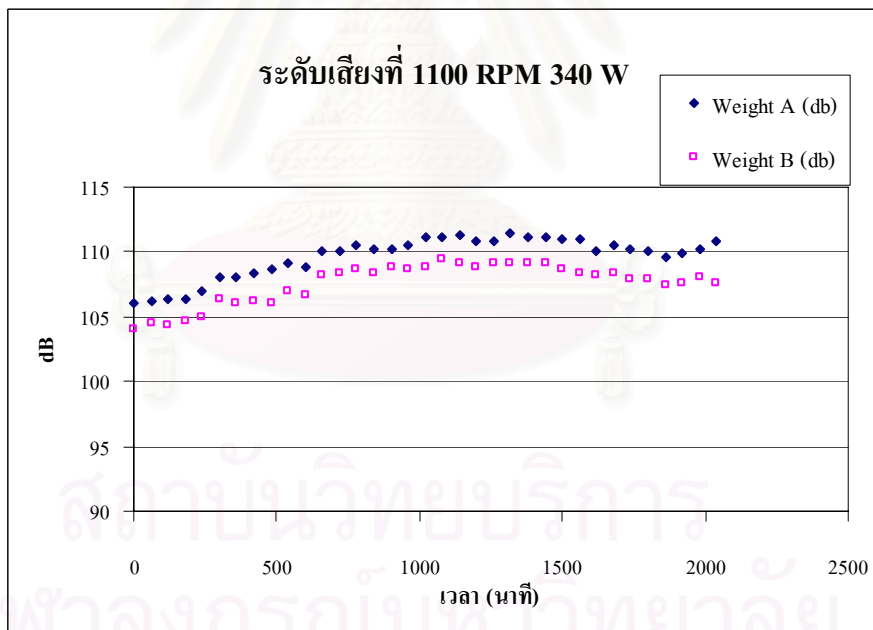


จุดที่ 2

รูปที่ ข-2 ระดับเสียง ที่ความเร็วรอบ 800 RPM



ชุดที่ 1



ชุดที่ 2

รูปที่ ข-3 ระดับเสียง ที่ความเร็วรอบ 1100 RPM

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรัชญา นवलปลับ เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย