

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาการสันตะเพื่อนและระดับการสีกหรือของเฟือง



นางสาว กมลวรรณ พงศาพิชญ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศีกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0183-5

ลิขสิทธิ์ของจฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

23 ก.ค. 2546

I 20602509

AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VIBRATION SIGNAL AND GEAR WEAR LEVEL

Miss Kamolwan Pongsapich

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2001

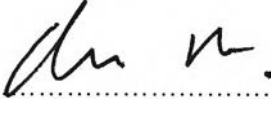
ISBN 974-03-0183-5

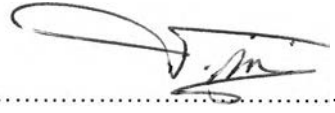
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสิ้นเสเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง
โดย	นางสาว กมลวรรณ พงศาพิชญ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ

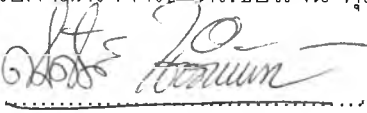
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล ปานงาม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

นางสาว กมลวรรณ พงศาพิชญ์ : การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง : (AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VIBRATION SIGNAL AND GEAR WEAR LEVEL) อ.ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ : จำนวนหน้า 132 หน้า ISBN 974-03-0183-5

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง โดยจำลองการสึกหรอของฟันเฟืองขับที่ระดับต่างๆกัน ทำการทดลองที่หลายสภาวะด้วยการปรับระดับภาระและความเร็วรอบ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณโดเมนเวลา สเปกตรัม และ เชปส์ตรัม

จากผลของสัญญาณโดเมนเวลา ค่าPeakของสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอของฟันเฟืองเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าRMSมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามาก ผลของสัญญาณสเปกตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ 1GMF 2GMF และ 3GMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้น ค่าแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างเนื่องจากเฟืองขับและเฟืองตามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความถี่GMF ผลของสัญญาณเชปส์ตรัม ค่าแกมมาจุดที่ความเร็วรอบเฟืองขับ (1/P) มีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 40 % ของความหนาของฟัน จากนั้นค่าแกมมาจุดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงค่าการสึกหรอสูงสุดที่ทดลอง จากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและการสึกหรอของเฟืองพบว่าการวิเคราะห์เชปส์ตรัมเป็นวิธีที่ชัดเจนที่สุดในการวิเคราะห์สภาพชุดเฟือง ซึ่งอาจใช้ค่าแกมมาจุดสูงสุดเป็นเกณฑ์กำหนดระดับสึกหรอที่สามารถยอมรับได้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่ออนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4170209621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: VIBRATION SIGNAL / VIBRATION / SPECTRUM / SPECTRAL ANALYSIS / CEPSTRUM /
CEPSTRAL ANALYSIS / GEAR / GEARBOX / DIAGNOSIS / MONITORING / WEAR / GMF /
SIDE BAND / GAMNITUDE

KAMOLWAN PONGSAPICH : AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN
VIBRATION SIGNAL AND GEAR WEAR LEVEL. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.
CHAIROTE KUNPANITCHAKIT , Ph.D. 132 pp. ISBN 974-03-0183-5

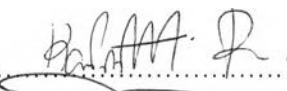
This research deals with gear wear diagnosis based on vibration signal analysis. The relationship of vibration signal and gear wear level was analyzed by means of Time domain, Spectral and Cepstral Analysis. Gear wear was prepared in several levels and tested at various speed and applied load.

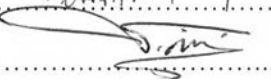
The relation of time domain signal and gear wear level shows that Peak increases with wear evolution while RMS slightly changes compared with Peak. In case of spectrum, the amplitude of GMF and its harmonics increase with wear level as well as the amplitude of gear and pinion sideband. Cepstrum proposes differently, the gamitude of rpm of pinion (1/P) increases with wear level and reaches its maximum point at approximate 40% of gear tooth wear compared with full profile thickness. After that the gamnitude reduces continuously toward the maximum tested wear level. According to the relationship studied, Cepstral Analysis is considered to be the best technique to predict the wear evolution because the maximum point can be used as the threshold of acceptable wear level.

Department Mechanical Engineering

Field of Study Mechanical Engineering

Academic year 2001

Student's signature.....

Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย ทุนวิจัยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และทุนผู้ช่วยวิจัยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ซึ่งทุนทั้งสามนี้ช่วยแบ่งเบาค่าใช้จ่ายในการทดลอง วัสดุอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายส่วนตัวของผู้วิจัยตามลำดับ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ชัยโรจน์ คุณพนชกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย รวมทั้งความพร้อมของชุดทดลองในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลที่ช่วยให้การวิจัยเป็นไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยพลังงานและอาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการ Measurement & Instrumentation และ คุณ สิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล อดีตนิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการ Measurement & Instrumentation ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยกรุณาจัดหาวัตต์มิเตอร์สำหรับการทดลอง

ขอขอบพระคุณ คุณ สมชาย เดโชธรรมสถิต ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุง บริษัท ฐนูน จำกัด อดีตนิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีบำรุงรักษาเครื่องจักรกลที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณ พีรพล ทินกรศรีสุภาพ นักศึกษาปริญญาโทสาขา Wireless Network University of Wisconsin Madison และ คุณ ภาคภูมิ อร่ามวารีกุล นักศึกษาปริญญาโทสาขาเมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่กรุณาส่งวารสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเป็นจำนวนมาก และช่วยเสนอแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบผลสำเร็จ

ขอบคุณ คุณ สุรศักดิ์ คคมิ นิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเก็บข้อมูลบางส่วนในการทดลองและวัดโพสิทีฟของเฟืองหลังการทดลอง และขอบคุณเทคนิคเขียนเวิร์คชอป ชั้น 1 ดีก ฮันส์ บันตลี ที่ช่วยบัดกรีสายไฟต่อกล่องวงจรขั้วเสียบสำหรับวัตต์มิเตอร์

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ ครอบครัววงศาพิชญ์ ที่เห็นความสำคัญและให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ขออุทิศส่วนกุศลให้ แต่ นาย ธีระ พงศาพิชญ์ บิดาของผู้วิจัยซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
1 – 1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1 – 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1 – 3 สมมติฐานการทดลอง.....	9
1 – 4 วัตถุประสงค์.....	10
1 – 5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	10
1 – 6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	10
1 – 7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
บทที่ 2	
ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเฟือง.....	12
2 – 1 เฟืองตรง.....	12
2 – 2 ความถี่ GMF และ HTF.....	14
2 – 3 การสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	15
2-3-1 สมการการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	16
2-3-2 สมการจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	18
2-3-3 สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	19
2-3-4 สัญญาณการสั่นสะเทือนจริงที่วัดได้จากชุดเฟือง.....	21
บทที่ 3	
ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	24
3 – 1 ประเภทของสัญญาณโดยทั่วไป.....	24
3 – 2 การวิเคราะห์สัญญาณโดเมนเวลา.....	25

	3-3 การวิเคราะห์สเปกตรัม.....	27
	3-2-1 การแปลงฟูรีเยร์.....	28
	3-2-2 พิงค์ซ์นถ่วงน้ำหนัก.....	29
	3-2-3 โอเวอร์แล็ป.....	31
	3-4 การวิเคราะห์เซปส์ตรัม.....	35
บทที่ 4	การทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเพื่อง.....	37
	4-1 รูปแบบการสั่นหรือของชุดเพื่องที่ใช้ในการทดลอง.....	37
	4-2 รูปแบบการทดลอง.....	41
	4-3 ขั้นตอนการทดลอง.....	44
	4-4 การวิเคราะห์สัญญาณ.....	44
	4-5 สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทดลอง.....	46
	4-6 อภิปรายผลการทดลอง.....	59
บทที่ 5	ผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเพื่อง.....	61
	5-1 สัญญาณโดเมนเวลา.....	61
	5-2 สเปกตรัม.....	72
	5-3 เซปส์ตรัม.....	87
บทที่ 6	สรุปผลวิทยานิพนธ์.....	95
	6-1 สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน.....	95
	6-2 สรุปผลโพสไฟล์ของเพื่องที่ใช้ในการทดลอง.....	97
	6-3 ความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณโดเมนเวลา สเปกตรัม และ เซปส์ตรัม ในการวิเคราะห์การสั่นหรือของเพื่อง.....	97
	6-4 ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป.....	98
	เอกสารอ้างอิง.....	100
	บรรณานุกรม.....	101
	ภาคผนวก.....	103
	ภาคผนวก ก ชุดทดลองและอุปกรณ์วัดสัญญาณ.....	104
	ภาคผนวก ข รูปแบบการสั่นหรือของเพื่อง.....	106
	ภาคผนวก ค โพสไฟล์ของเพื่องก่อนและหลังการทดลอง.....	114
	ภาคผนวก ง ข้อมูลดิบจากการทดลอง.....	119
	ประวัติผู้วิจัย.....	132

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จำลองสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง	22
ตารางที่ 4-1 สภาวะการทดลอง.....	42
ตารางที่ 4-2 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่างๆที่วัดได้จากวิเคราะห์สัญญาณ.....	45
ตารางที่ 4-3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ	46
ตารางที่ 5-1 ค่าความถี่ GMF และ แถบความถี่ข้าง.....	71
ตารางที่ ง-1 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ไม่มีภาระ ความเร็วเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแวนอน.....	120
ตารางที่ ง-2 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ไม่มีภาระ ความเร็วเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง	121
ตารางที่ ง-3 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ไม่มีภาระ ความเร็วเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแวนอน	122
ตารางที่ ง-4 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ไม่มีภาระ ความเร็วเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง	123
ตารางที่ ง-5 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ภาระ 200 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแวนอน.....	124
ตารางที่ ง-6 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ภาระ 200 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง.....	125
ตารางที่ ง-7 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ภาระ 200 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแวนอน.....	126
ตารางที่ ง-8 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ภาระ 200 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง.....	127
ตารางที่ ง-9 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ภาระ 340 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแวนอน.....	128
ตารางที่ ง-10 ข้อมูลดิบจากการทดลอง: ภาระ 340 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง.....	129

ตารางที่ ง-11 ข้อมูลดิบจากการทดลอง:ภาวะ 340 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที	
วัดสัญญาณแนวนอน.....	130
ตารางที่ ง-12 ข้อมูลดิบจากการทดลอง:ภาวะ 340 วัตต์ ความเร็วเฟืองขับ 800 รอบต่อนาที	
วัดสัญญาณแนวตั้ง.....	131

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1-1 ค่าสัญญาณ Peak และ Rms กับระยะเวลาการทำงานของชุดเฟือง วัดสัญญาณที่แบริงเฟืองขับ ทิศแนวตั้ง	5
รูปที่ 1-2 ค่าสัญญาณสเปกตรัม GMF กับระยะเวลาการทำงานของชุดเฟือง วัดสัญญาณที่แบริงเฟืองขับ ทิศแนวตั้ง	6
รูปที่ 1-3 ค่าสัญญาณสเปกตรัม SBP กับระยะเวลาการทำงานของชุดเฟือง วัดสัญญาณที่แบริงเฟืองขับ ทิศแนวตั้ง	6
รูปที่ 1-4 ค่าสัญญาณสเปกตรัม SBG กับระยะเวลาการทำงานของชุดเฟือง วัดสัญญาณที่แบริงเฟืองขับ ทิศแนวตั้ง	6
รูปที่ 1-5 ค่าสัญญาณเซปส์ตรัม 1/P และ 1/G กับระยะเวลาการทำงานของชุดเฟือง วัดสัญญาณที่แบริงเฟืองขับ ทิศแนวตั้ง.....	6
รูปที่ 2-1 ฟันเฟืองตรง	12
รูปที่ 2-2 รูปเฟืองขณะขบกันถ่ายโดยPhotoelastic	13
รูปที่ 2-3 ฟันเฟืองขบกัน และ มุมความดัน	14
รูปที่ 2-4 สัญญาณจำลองที่มีการมอดูเลตทางความถี่ และ แอมพลิจูด	20
รูปที่ 2-5 สัญญาณการสั่นสะเทือนจริงของเฟืองที่ทำการวัดที่นาที่ที่ 17	22
รูปที่ 2-6 สัญญาณการสั่นสะเทือนจริงของเฟืองที่ทำการวัดที่นาที่ที่ 2247	23
รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงชนิดของสัญญาณ	25
รูปที่ 3-2 การวัดสัญญาณโดเมนเวลาเฉลี่ยแบบเข้าจังหวะ	27
รูปที่ 3-3 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม.....	29
รูปที่ 3-4 การรั่ว (Leakage) ของสัญญาณเนื่องจากการถูกตัดสัญญาณตอนต้นและตอนท้าย (Trancation).....	30
รูปที่ 3-5 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันสี่เหลี่ยม	30
รูปที่ 3-6 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันแฮนนิ่ง	31
รูปที่ 3-7 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันแฟล็ต-ท้อป	31
รูปที่ 3-8 การโอเวอร์แล็ปของสัญญาณที่ระดับต่างๆ	32
รูปที่ 3-9 สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนความถี่.....	34

รูปที่ 4-1	ระดับสีทหรอของเฟืองที่ใช้ในการทดลอง.....	38
รูปที่ 4-2	โพรไฟล์เฟืองที่ระดับสีทหรอต่างๆ.....	38
รูปที่ 4-3	การกระจายค่าโพรไฟล์ของระดับสีทหรอที่ 1.....	39
รูปที่ 4-4	ระดับสีทหรอของชุดเฟืองที่ทำได้อ่อนการทดลอง.....	40
รูปที่ 4-5	ระดับสีทหรอของชุดเฟืองหลังกการทดลอง.....	40
รูปที่ 4-6	พื้นเฟืองสีทหรอระดับ 5 ภายหลังกการทดลอง.....	41
รูปที่ 4-7	แนวโน้มลักษณะโพรไฟล์ของพื้นเฟืองที่เกิดขึ้นภายหลังกการใช้งาน.....	41
รูปที่ 4-8	ชุดทดลอง.....	42
รูปที่ 4-9	แผนภาพการส่งสัญญาณของอุปกรณ์วัดวิเคราะห์สัญญาณ.....	42
รูปที่ 4-10	สัญญาณโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 340 วัดด้ วัดสัญญาณ แนวด้ง.....	47
รูปที่ 4-11	สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 340 วัดด้ วัดสัญญาณ แนวด้ง.....	49
รูปที่ 4-12	สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 340 วัดด้ วัดสัญญาณ แนวด้ง.....	51
รูปที่ 4-13	สัญญาณโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาวะ 340 วัดด้ วัดสัญญาณ แนวด้ง.....	53
รูปที่ 4-14	สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาวะ 340 วัดด้ วัดสัญญาณ แนวด้ง.....	55
รูปที่ 4-15	สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาวะ 340 วัดด้ วัดสัญญาณ แนวด้ง.....	57
รูปที่ 4-11	เปอร์เซ็นต์การสีทหรอที่เพิ่มขึ้นหลังกการทดลอง.....	59
รูปที่ 5-1	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณโดเมนเวลาและระดับสีทหรอ : ความเร็ว 500 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ.....	63
รูปที่ 5-2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณโดเมนเวลาและระดับสีทหรอ : ความเร็ว 500 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวด้ง.....	64
รูปที่ 5-3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณโดเมนเวลาและระดับสีทหรอ : ความเร็ว 800 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ.....	65
รูปที่ 5-4	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณโดเมนเวลาและระดับสีทหรอ : ความเร็ว 800 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวด้ง.....	66

รูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัมและระดับสีทรวง : ความเร็ว 500 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง.....	89
รูปที่ 5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัมและระดับสีทรวง : ความเร็ว 800 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ	90
รูปที่ 5-22 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัมและระดับสีทรวง : ความเร็ว 800 รอบ ต่อนาที วัดสัญญาณแนวตั้ง.....	91
รูปที่ ก-1 ชุดทดลองและอุปกรณ์วัดสัญญาณ.....	105
รูปที่ ก-2 ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดสัญญาณ.....	105
รูปที่ ข-1 วิธีการวัดระยะสีทรวงของเฟือง	107
รูปที่ ข-2 รูปแบบการสีทรวงของเฟืองจากการทดลองของสมชาย	108
รูปที่ ข-3 เปรียบเทียบการสีทรวงของเฟืองจากการทดลองของสมชาย.....	109
รูปที่ ข-4 ลักษณะฟันเฟืองใหม่และฟันเฟืองผ่านการใช้งาน ทดลองโดย Rensselaer Polytechnique	110
รูปที่ ข-5 ระยะสีทรวงของเฟืองในลอนชนิดต่างๆ.....	111
รูปที่ ข-6 รูปแบบการสีทรวงตามสมการการสีทรวงของเฟืองของ R.A. Thomson.....	112
รูปที่ ค-1 ระยะสีทรวงของฟันเฟืองก่อนและหลังการทดลอง ระดับที่ 0 – 1.3	116
รูปที่ ค-2 ระยะสีทรวงของฟันเฟืองก่อนและหลังการทดลอง ระดับที่ 2.45 – 3.45	117
รูปที่ ค-3 ระยะสีทรวงของฟันเฟืองก่อนและหลังการทดลอง ระดับที่ 4 – 5.5	118

คำอธิบายสัญลักษณ์

ω	คือ	ความเร็วเชิงมุมของเฟือง (เรเดียน/วินาที)
D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์
N	คือ	จำนวนฟันเฟือง
B_L	คือ	ระยะแบกแลช
p_o	คือ	ระยะ Circular Pitch
T_{PO}	คือ	ความหนาของฟันเฟืองขั้วบริเวณวงกลมพิตช์
T_{GO}	คือ	ความหนาของฟันเฟืองตามบริเวณวงกลมพิตช์
RPM	คือ	ความเร็วรอบของเฟืองมีหน่วย รอบต่อนาที
GMF	คือ	Gear Meshing Frequency
HTF	คือ	Hunting Tooth Frequency
SBP	คือ	ความถี่ข้างเนื่องจากเฟืองขั้ว
SBG	คือ	ความถี่ข้างเนื่องจากเฟืองตาม
W	คือ	ค่าภาระที่กระทำกับฟันเฟือง
C	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับความยืดหยุ่นของขบกันของเฟือง
ξ	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่ (Transmission Error)
ξ_s	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต (Static Transmission Error)
$R_1 R_2$	คือ	ค่ารัศมีวงกลมพิตช์ของเฟืองขั้วและเฟืองตามตามลำดับ
$I_1 I_2$	คือ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเฟืองขั้วและเฟืองตามตามลำดับ
$T_1 T_2$	คือ	ค่าทอร์กที่กระทำที่ฟันเฟืองขั้วและเฟืองตามตามลำดับ
x,y	คือ	สัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นสัญญาณแบบความเร่ง
X_n	คือ	แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่ฮาร์มอนิกที่ n
am_n	คือ	ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
fm_n	คือ	ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
A_{np}	คือ	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
F_{ns}	คือ	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
f_m, f_r	คือ	ความถี่ GMF และ ความถี่ของฟังก์ชันมอดูเลตตามลำดับ

f_{rpm1}, f_{rpm2}	คือ	ความถี่เนื่องจากความเร็วรอบของเฟืองขับและเฟืองตามตามลำดับ
$\alpha_{np}, \phi_n, \beta_{np}$	คือ	มุมเฟสฮาร์มอนิกที่ n
T_1, T_2	คือ	จำนวนฟันของเฟืองขับและเฟืองตามตามลำดับ
N, P, S	คือ	จำนวนฮาร์มอนิกที่พิจารณาของฟังก์ชันการกระจัด ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด และ ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่ ตามลำดับ
$A(\omega)$	คือ	สเปกตรัมของฟูรีเยร์ (Fourier Spectrum of $f(t)$)
$A^2(\omega)$	คือ	เพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum of $f(t)$)
$\phi(\omega)$	คือ	มุมเฟส (Phase Angle of $f(t)$)
$R(\tau)$	คือ	ออโตคอรีเลชัน (Autocorrelation)