



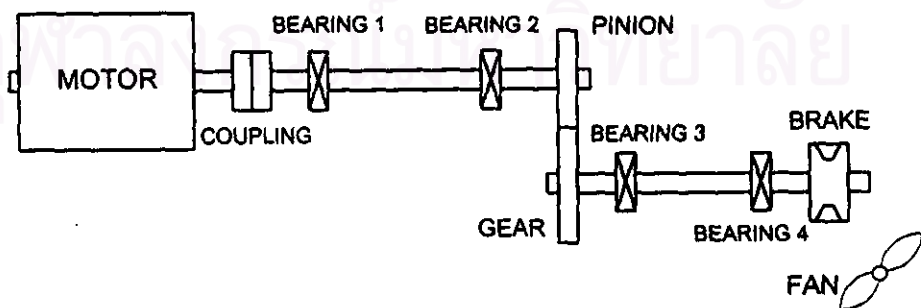
## บทที่ 5

### การทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน

ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอ (wear) ของซี่ฟัน ชุดเฟืองที่ใช้ทดลองเป็นแบบเฟืองตรง 1 คู่ทำงานโดยไม่มีสารหล่อลื่นระหว่างฟันเฟือง ระหว่างที่ชุดเฟืองทำงาน ทำการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นระยะๆ ชุดเฟืองทำงานจนฟันเฟืองสึกหรอไปแล้วราว 50% นำสัญญาณการสั่นสะเทือนมาวิเคราะห์สเปกตรัมและเซปส์ตรัม

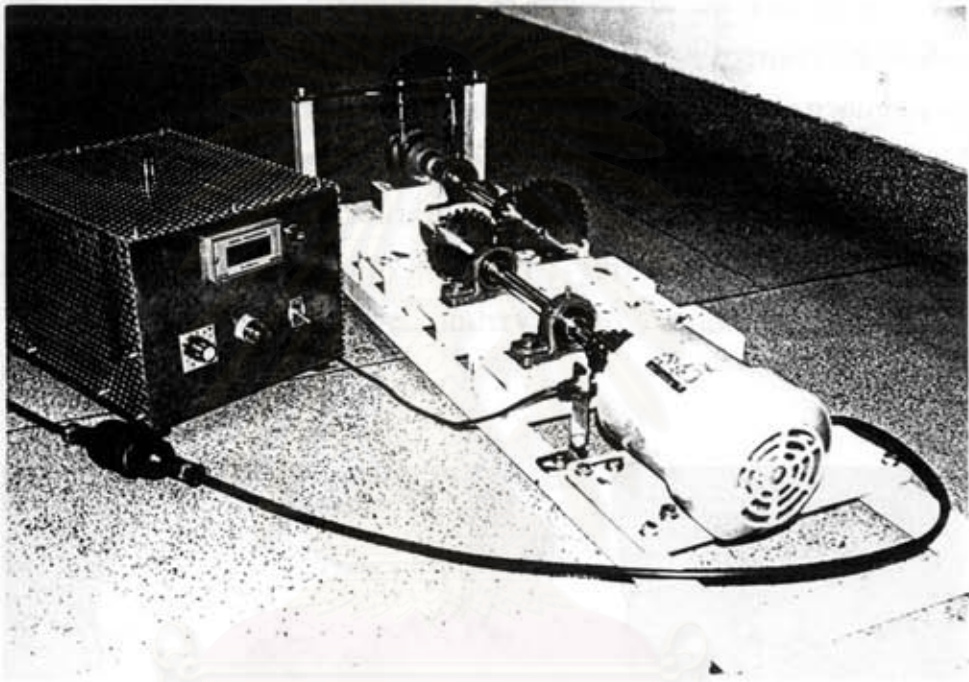
#### 5-1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองประกอบด้วย ชุดเฟือง มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า คัปปลิง (coupling) เพลาขับ เพลาดำม แบริงลูกปืน 4 ตำแหน่ง ชุดเบรก (brake) ที่สามารถปรับแรงดึงได้ พัดลมระบายความร้อนที่ชุดเบรก ฐานของชุดทดลอง อินเวอร์เตอร์ (inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ และมีเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า ระหว่างฐานของชุดทดลองกับพื้นได้เสริมยางแผ่นที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตรเพื่อให้ฐานสัมผัสกับพื้นตลอดเวลา เฟืองขับ (pinion) ทำด้วยทองเหลืองมี 26 ฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทช์ 91 มิลลิเมตร และมีความหนา 12 มิลลิเมตร ส่วนเฟืองตาม (gear) ทำจากเหล็กกล้ามี 38 ฟัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทช์ 133 มิลลิเมตร และมีความหนา 13 มิลลิเมตร เฟืองทั้งสองเป็นเฟืองตรง โมดูล 3.5 มิลลิเมตร แผนภาพของชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5-1 รูปถ่ายของชุดทดลองจริงแสดงในรูปที่ 5-2 ขนาดของชุดทดลองแสดงในภาคผนวก ง

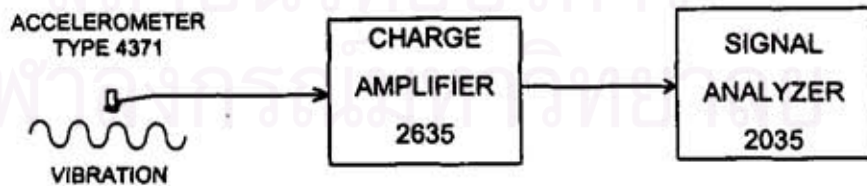


รูปที่ 5-1 แผนภาพของชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน

อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนประกอบด้วย ตัวตรวจรู้ชนิดวัดความเร่ง (accelerometer) รุ่น 4371 ซึ่งถูกจับยึดกับตำแหน่งวัดด้วยแม่เหล็ก เครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier) รุ่น 2635 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) รุ่น 2035 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณทุกอย่างที่ใช้ในการทดลอง เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Bruel&Kjaer หวังการต่ออุปกรณ์วัดสัญญาณแสดงในรูปที่ 5-3 รูปถ่ายของอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแสดงในภาคผนวก ข



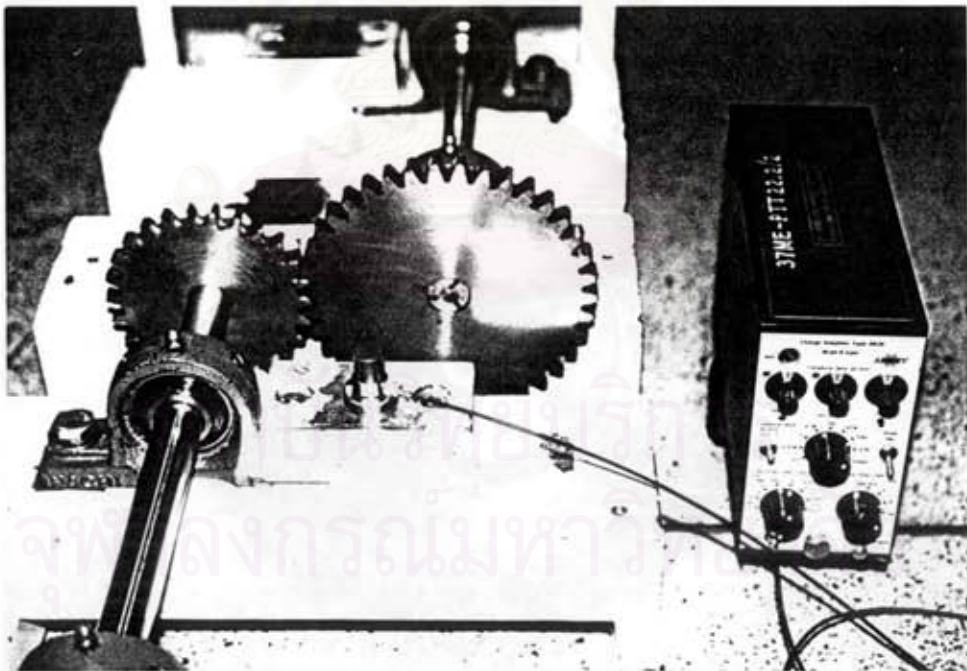
รูปที่ 5-2 รูปถ่ายชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน



รูปที่ 5-3 หวังแสดงการต่ออุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

## 5-2 การทดลอง

ชุดเฟืองทำงานด้วยการขับของมอเตอร์และรับภาระจากชุดเบรก เฟืองขับหมุนด้วยความเร็วรอบ 510-513 รอบต่อนาทีโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นระหว่างฟันเฟือง ป้อนกระแสไฟฟ้าสลับขนาดคงที่ 220 โวลต์ 1.8 แอมแปร์ให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง ขณะทำการทดลอง ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และขนาดของกระแสไฟที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ ด้วยการปรับแรงดึงของเบรกและปรับการจ่ายไฟของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณการสั่นสะเทือนถูกตรวจวัดเป็นช่วงๆ ห่างกันประมาณ 30-120 นาที ตำแหน่งที่ตรวจวัดคือแบร้งตัวที่ 1 2 และ 3 ในทิศแนวตั้งและแนวนอน การทดลองใช้ชุดเฟือง 2 ชุด แต่ละชุดทำงานจนฟันของเฟืองขับสึกหรอไปแล้วราว 50 เปอร์เซ็นต์<sup>1</sup> (ดูภาคผนวก ค) หลังจากติดตั้งชุดเฟืองเข้ากับชุดทดลองแล้ว เฟืองขับและเฟืองตามของเฟืองชุด 1 มีระยะเยื้องเท่ากับ 0.10 และ 0.05 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับเฟืองขับและเฟืองตามของชุดเฟือง 2 มีระยะเยื้อง 0.06 และ 0.04 มิลลิเมตร ตามลำดับ รูปที่ 5-4 แสดงการติดตั้งตัวตรวจรับแบร้ง 2 ทิศแนวตั้ง และต่อเข้ากับเครื่องขยายประจุ รูปที่ 5-5 แสดงรูปถ่ายของเฟืองขับก่อนและหลังทำการทดลอง

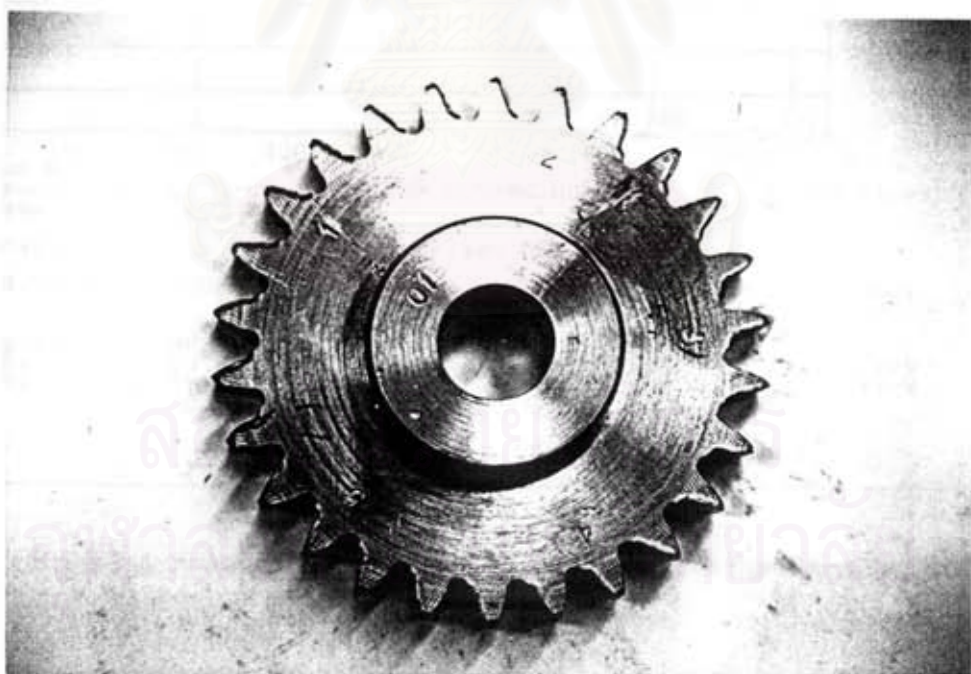


รูปที่ 5-4 แสดงการติดตั้งตัวตรวจรับแบร้ง 2 ทิศแนวตั้ง และต่อตัวตรวจรับเข้ากับเครื่องขยายประจุ

<sup>1</sup> เปอร์เซ็นต์การสึกหรอคิดจากระยะสันฟันตามส่วนโค้งแอดเดนดัมที่หายไปต่อระยะสันฟันปกติ



เฟืองขับก่อนทำการทดลอง

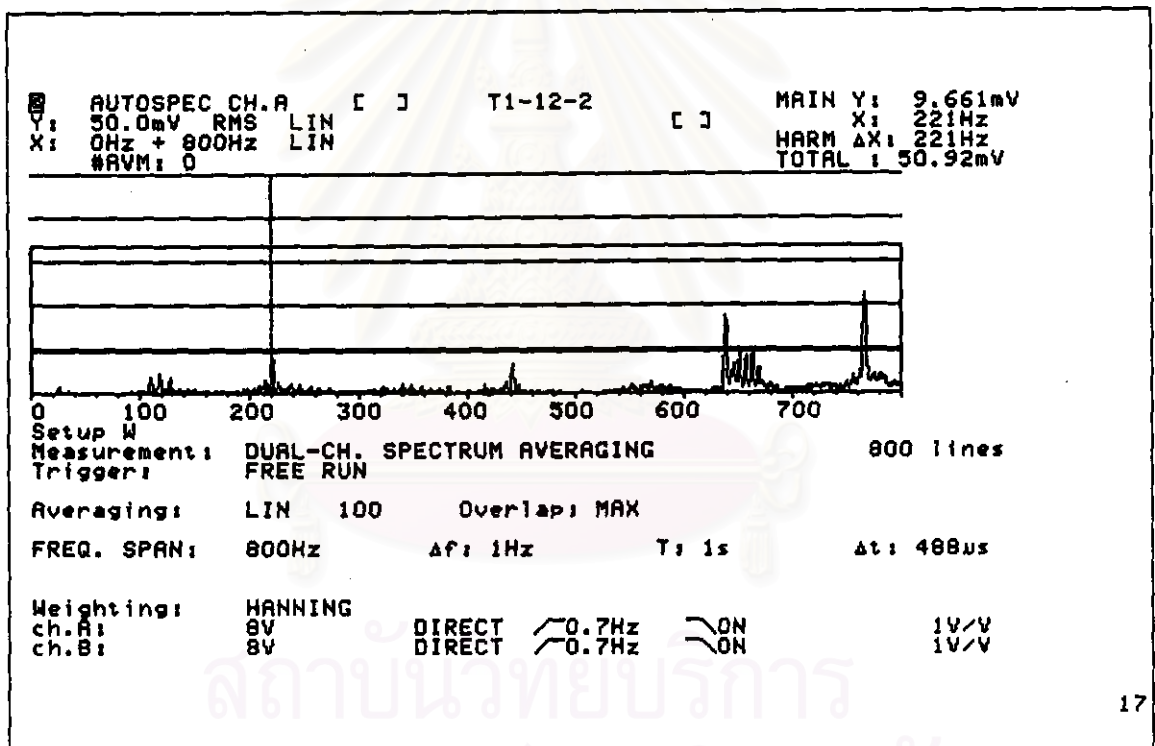


เฟืองขับหลังจากทำการทดลอง

รูปที่ 5-5 รูปถ่ายเฟืองขับ ก่อนทำการทดลองและหลังจากทำการทดลอง

### 5-3 การวิเคราะห์สัญญาณ

สัญญาณที่ตรวจวัดได้ถูกเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ 100 ครั้ง การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งนาน 1 วินาทีและการเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน (overlap) มากที่สุด การเฉลี่ย 100 ครั้งใช้เวลาประมาณ 10 วินาที แล้วนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์สเปกตรัมและเซปส์ตรัม การวิเคราะห์สเปกตรัมมีพิสัยของโดเมนความถี่ 800 Hz ความละเอียด (resolution) 1 Hz และใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฮานนิง (Hanning) ส่วนการวิเคราะห์เซปส์ตรัมมีพิสัยของโดเมนคิวเฟรนซี 0.5 วินาที ความละเอียด 488 ไมโครวินาที และใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฮานนิง รูปที่ 5-6 แสดงภาพบนหน้าจอของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณขณะทำการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน



รูปที่ 5-6 ภาพบนหน้าจอของมอนิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Signal Analyzer 2035

ค่าสัญญาณต่างๆ ที่วิเคราะห์บนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนคิวเฟรนซี มีดังนี้

#### (1) โดเมนเวลา

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

(2) โดเมนความถี่

- P คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับซึ่งเท่ากับ 8.5 Hz
- G คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองตามซึ่งเท่ากับ 5.8 Hz
- 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่การขบกันของเฟือง ฮาร์โมนิกอันดับที่สองและอันดับที่สามของความถี่การขบกันของเฟือง ตามลำดับ หรือที่ความถี่ 221-222 Hz 442-444 Hz และ 663-666 Hz ตามลำดับ ขึ้นกับความถี่รอบของเพลลาขับที่ตรวจวัดได้จริง
- SBD-P คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองขับ
- SBD-G คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองตาม

(3) โดเมนคิวเฟรนซี

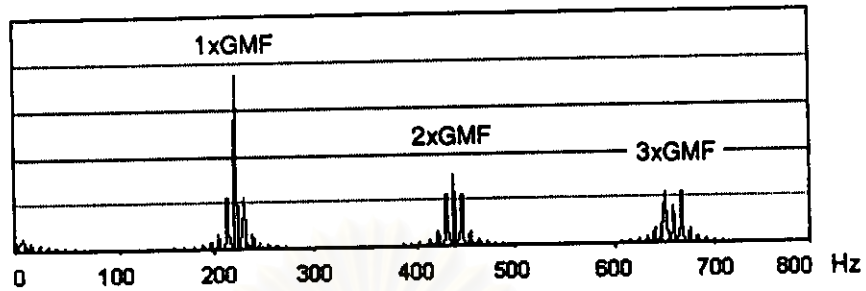
- 1/P คือ ค่าแอมพลิจูดของยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับ) ซึ่งเท่ากับ 117.0-117.6 มิลลิวินาที ขึ้นกับความถี่รอบของเพลลาขับที่ตรวจวัดได้จริง
- 1/G คือ ค่าแอมพลิจูดของยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความเร็วรอบหมุนของเฟืองตาม) ซึ่งเท่ากับ 170.9-172.0 มิลลิวินาที ขึ้นกับความถี่รอบของเพลลาขับที่ตรวจวัดได้จริง

ตำแหน่งของค่าสัญญาณบางส่วนบนโดเมนความถี่และโดเมนคิวเฟรนซีแสดงในรูปที่ 5-7 สัญญาณที่แสดงในรูปถูกจำลองมาจากแบบจำลองในบทที่ 4 โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ยอดสัญญาณสังเกตเห็นได้ชัดเจน

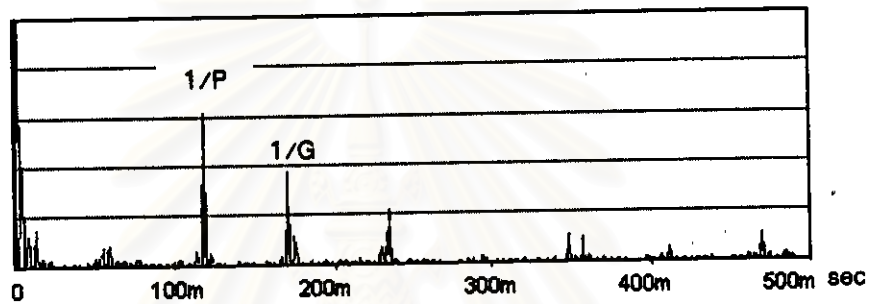
สำนักงานวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สเปกตรัม



## เซปส์ตรัม



รูปที่ 5-7 ตำแหน่งของค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF บนโดเมนความถี่  
ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G บนโดเมนคิวเฟรนซี สัญญาณที่แสดงในรูป  
ถูกจำลองขึ้นมาจากแบบจำลองในบทที่ 4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5-4 ผลการทดลอง

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

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

เนื่องจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณที่ตรวจวัดจากแบบวิ่ง 1 แบบวิ่ง 2 และแบบวิ่ง 3 มีลักษณะสอดคล้องกัน ผลการทดลองจึงแสดงเฉพาะผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณ และลักษณะสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดจากแบบวิ่ง 2 ทิศแนวตั้ง

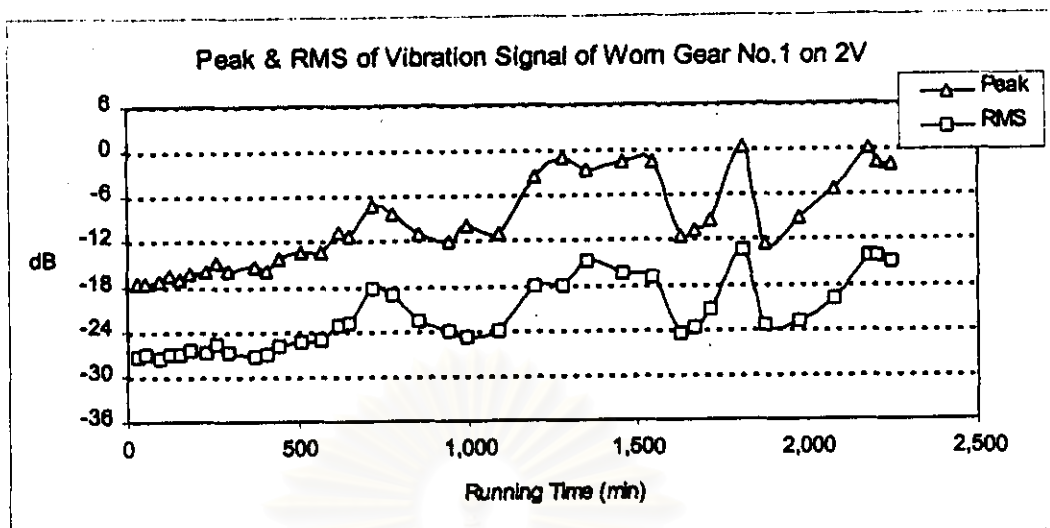
##### 5-4-1 ผลการทดลองของชุดเฟือง 1

จากการฉายโปรไฟล์ของฟันเฟืองด้วยเครื่องฉายโปรไฟล์ที่มีอัตราขยาย 20 เท่า พบว่าหลังจากการทดลองแล้วซี่ฟันของเฟืองขับสึกหรอไปประมาณ 43% แต่ไม่พบว่าซี่ฟันของเฟืองตามมีการสึกหรอ ผลการทดลองแบ่งเป็นสองส่วน คือ หัวข้อ 5-4-1-1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณ และหัวข้อ 5-4-1-2 ลักษณะสเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณ

##### 5-4-1-1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1

ผลการทดลองวิเคราะห์ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบบวิ่ง 2 ทิศแนวตั้งแสดงในรูปที่ 5-8 ถึง รูปที่ 5-12 ดังนี้





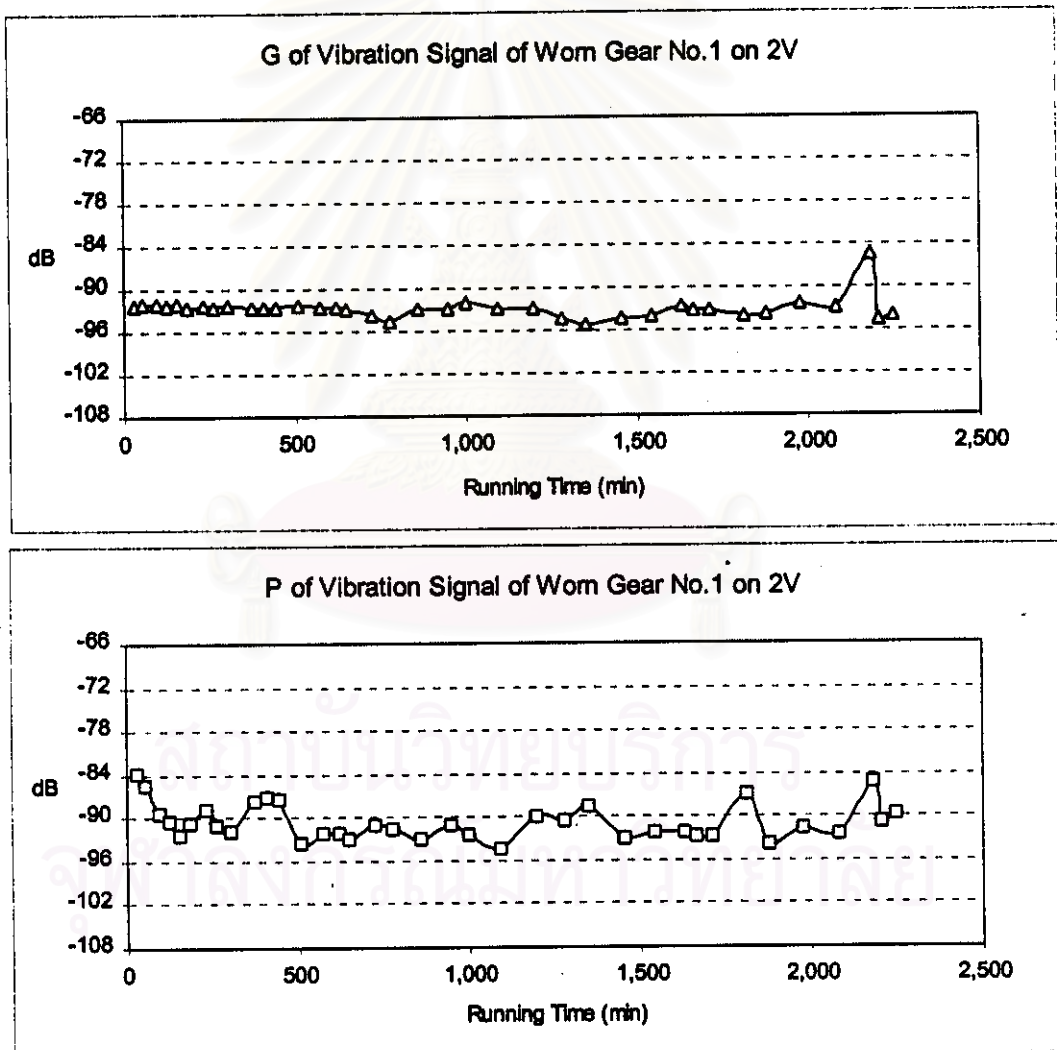
รูปที่ 5-8 ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน  
ตรวจวัดที่เบร้ง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-8 ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกัน คือกราฟของค่าสัญญาณทั้งสองค่อนข้างขนานกัน จากการสังเกตกราฟเมื่อชุดเฟือง 1 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS เป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่ง 0-648 นาทีและช่วงที่สอง 648-2249 นาที ในตารางที่ 5-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณมากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละช่วงโดยเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิง และแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณแบบทันทีทันใด เครื่องหมายบวกหมายถึงถึงค่าสัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณอ้างอิง ส่วนเครื่องหมายลบหมายถึงถึงค่าสัญญาณน้อยกว่าค่าสัญญาณอ้างอิง

ค่าสัญญาณ	Peak	RMS
ช่วงที่หนึ่ง 0-648 นาที	มากที่สุด +6.4 dB น้อยที่สุด +0 dB	มากที่สุด 4.3 dB น้อยที่สุด -0.3 dB
ช่วงที่สอง 648-2249 นาที	มากที่สุด +18.0 dB น้อยที่สุด +4.9 dB	มากที่สุด +13.7 dB น้อยที่สุด +2.4 dB
การเปลี่ยนแปลง แบบทันทีทันใด	+4.1 dB ระหว่าง 648-721 นาที +10 dB ระหว่าง 1089-1282 นาที +11.8 dB ระหว่าง 1630-1813 นาที	+4.6 dB ระหว่าง 648-721 นาที +9.3 dB ระหว่าง 1089-1348 นาที +11.2 dB ระหว่าง 1630-1813 นาที

ตารางที่ 5-1 การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 1

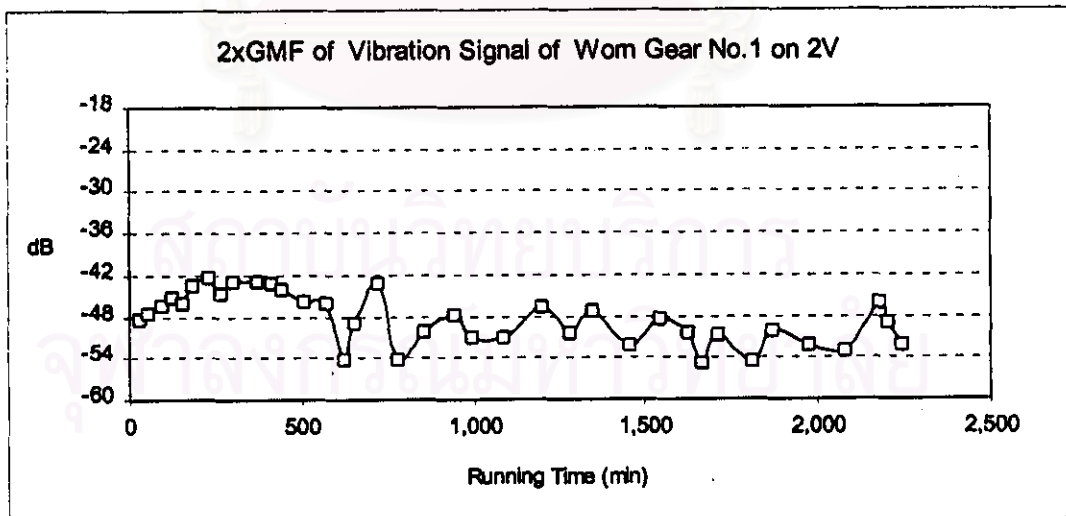
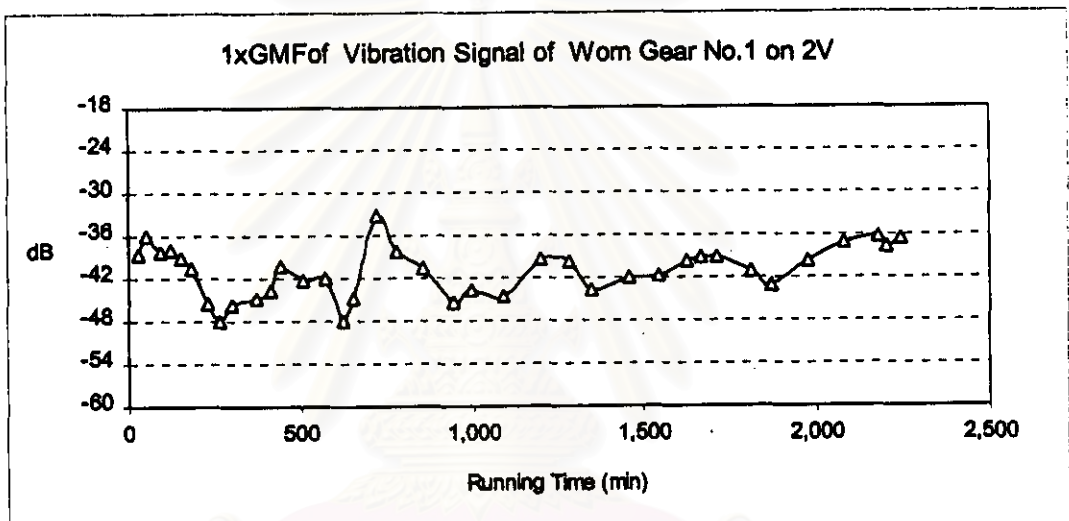
- ช่วงที่หนึ่ง 0-648 นาที ค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ค่าสัญญาณในช่วงนี้สูงขึ้น 4.3-6.4 dB เมื่อเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิง
- ช่วงที่สอง 648-2249 นาที จากกราฟคร่าวๆ ค่าสัญญาณโดยเฉลี่ยในช่วงนี้สูงกว่าค่าสัญญาณอ้างอิงประมาณ 10-12 dB ค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างมากคือมีค่าสัญญาณสูงสุด 13.7-18.0 dB และค่าสัญญาณต่ำสุด 2.4-4.9 dB พบการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดภายในช่วงที่สองและตรงที่บริเวณรอยต่อระหว่างช่วงที่หนึ่งกับช่วงที่สอง



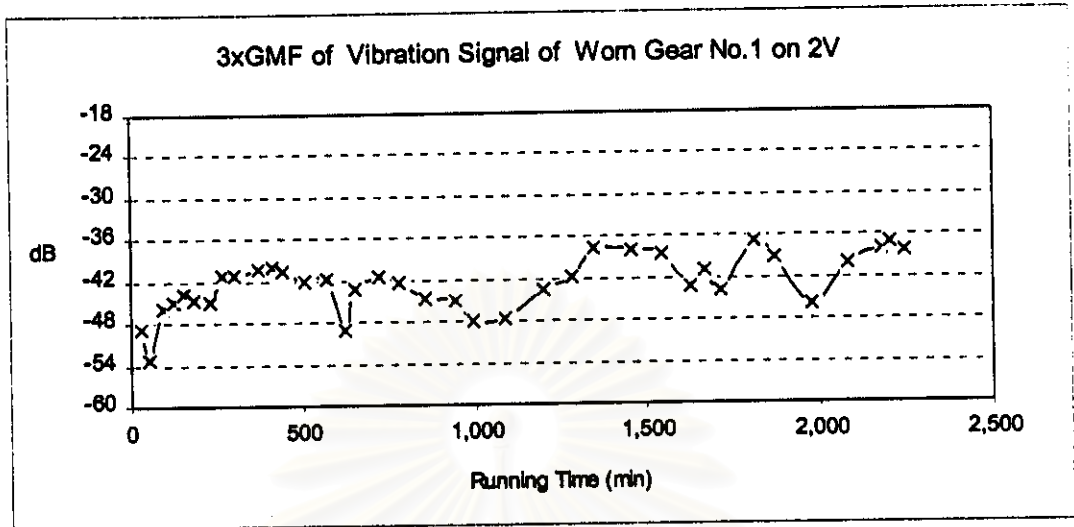
รูปที่ 5-9 ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน  
ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-9 เมื่อชุดเฟือง 1 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ค่าสัญญาณ G มีแนวโน้มคงที่ บริเวณท้ายกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณประมาณ 9 dB
- ค่าสัญญาณ P ช่วงแรก 0-154 นาที ค่าสัญญาณต่ำลงอย่างต่อเนื่อง 8.4 dB หลังจากนั้นแนวโน้มคงที่แต่สั่นขึ้นลงเกิน 6 dB



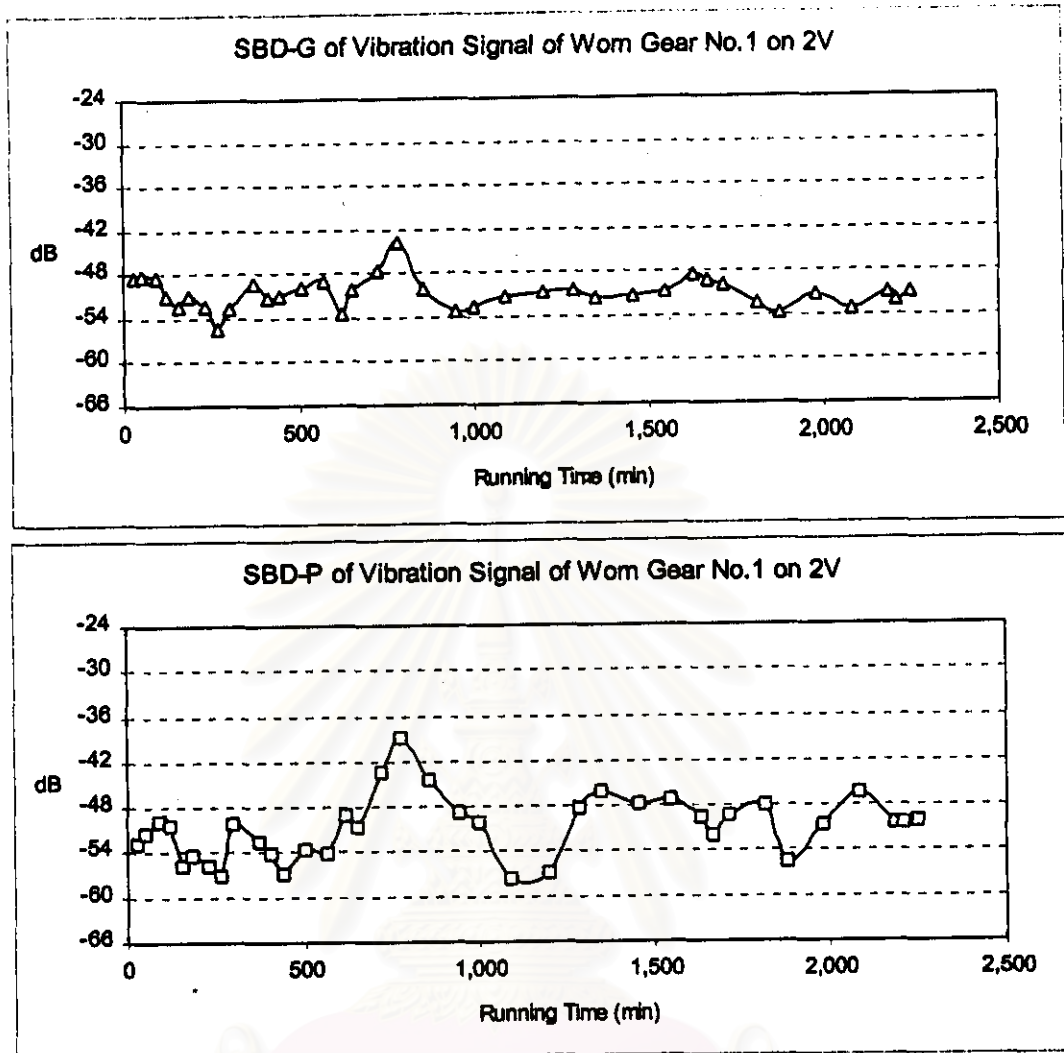
รูปที่ 5-10 ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-10(ต่อ) ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง1 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่เบริง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-10 เมื่อชุดเฟือง 1 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

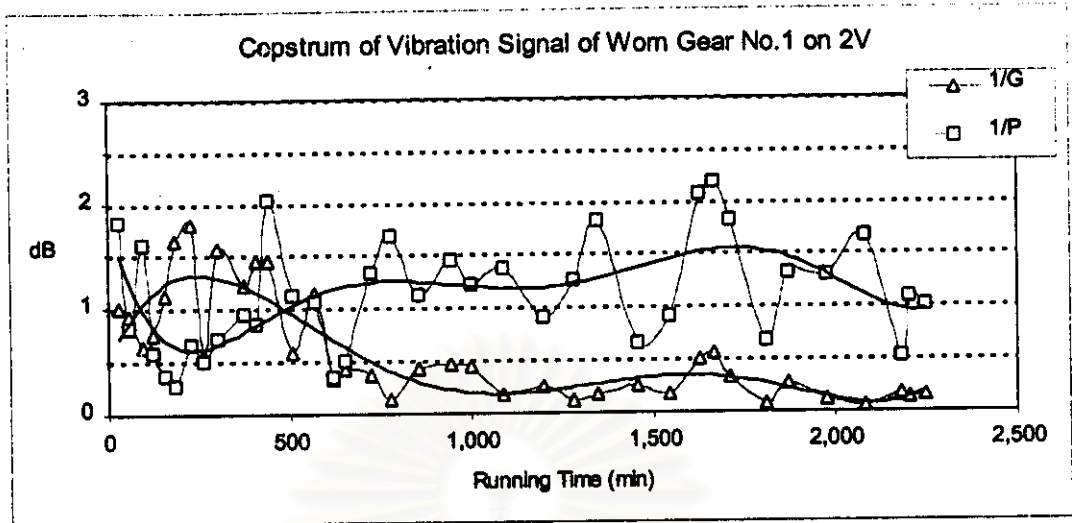
- ค่าสัญญาณ 1xGMF ในช่วงแรก 0-261 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มต่ำลงอย่างต่อเนื่อง 9.4 dB ต่อมาช่วง 261-648 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วต่ำลง 6 dB มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +14.8 dB ระหว่าง 618-721 นาที หลังจากนั้นค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่แต่สั้นขึ้นลงประมาณ 6 dB
- ค่าสัญญาณ 2xGMF ในช่วงแรก 0-261 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง 6.1 dB ต่อมาช่วง 261-648 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มต่ำลง 12 dB มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +11.1 dB ระหว่าง 618-721 นาที หลังจากนั้นค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่แต่สั้นขึ้นลงประมาณ 6 dB
- ค่าสัญญาณ 3xGMF ในช่วงแรก 0-261 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง 7.5 dB ต่อมาช่วง 261-648 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่ หลังจากนั้นค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่แต่สั้นขึ้นลงประมาณ 6-10 dB



รูปที่ 5-11 ค่าสัญญาณ SBD-G และ SBD-P ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน  
ตรวจวัดที่เบร้ง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-11 เมื่อชุดเฟือง 1 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ SBD-G และ SBD-P ของชุดเฟือง 1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

- ค่าสัญญาณ SBD-G ค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่แต่จะสั่นขึ้นลงประมาณ 6 dB ยกเว้นระหว่าง 618-777 นาทีที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +9.7 dB
- ค่าสัญญาณ SBD-P ค่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างมากคือสูงชันมากที่สุด +14 dB และต่ำลงมากที่สุด -4.7 dB มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +11.8 dB ระหว่าง 648-777 นาที



รูปที่ 5-12 ค่าสัญญาณ 1/G และ 1/P กับระยะเวลาทำงาน และเส้นโค้งแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ ของชุดเฟือง 1 ตรวจวัดที่แปริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง

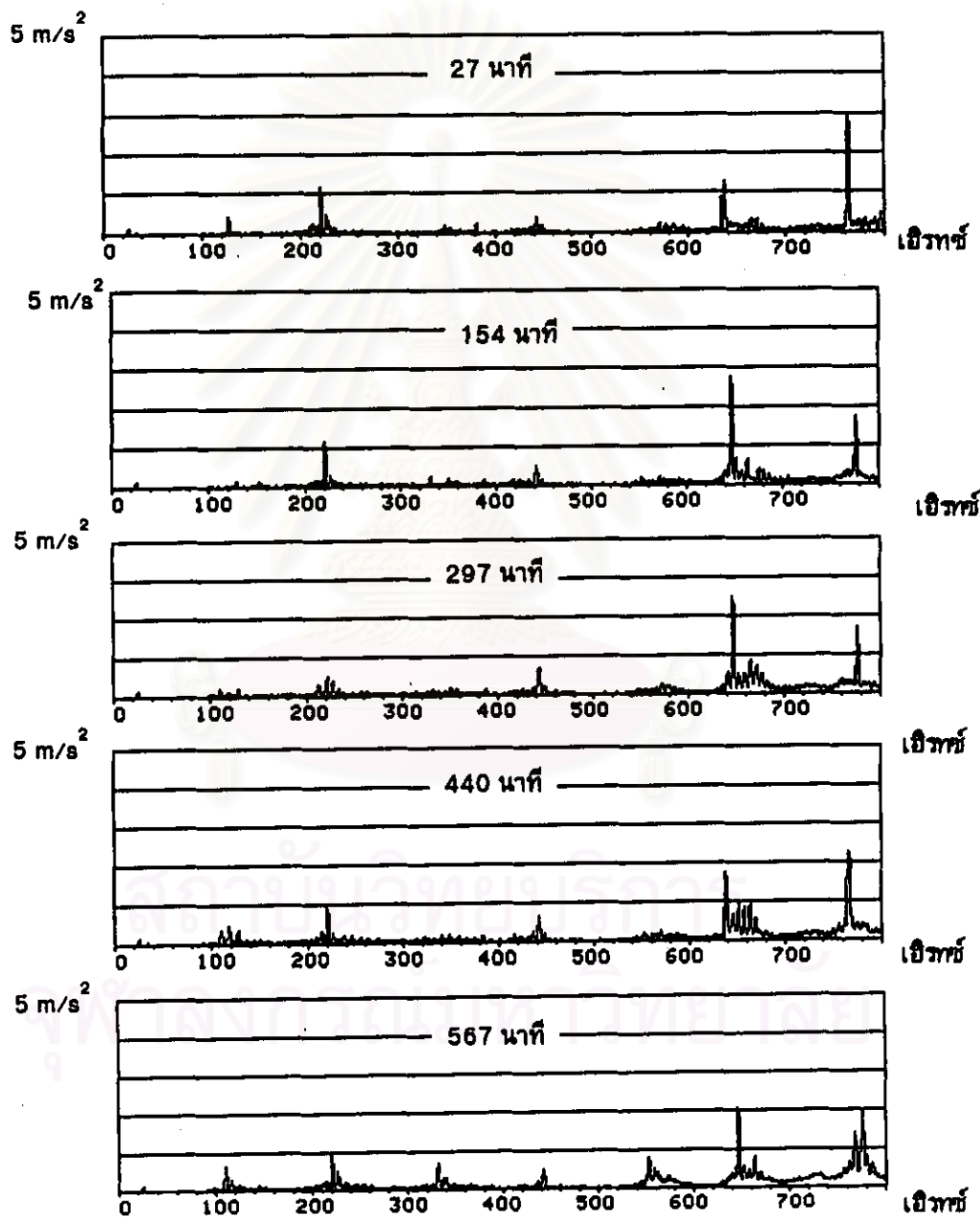
จากรูปที่ 5-12 เมื่อชุดเฟือง 1 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G ของชุดเฟือง 1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง เป็นสองช่วงคือ

- ช่วงที่หนึ่ง 0-648 นาที ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G จะผลัดกันสูงกว่าและต่ำกว่า เริ่มต้นจากค่าสัญญาณ 1/P สูงกว่าค่าสัญญาณ 1/G จากนั้น 1/P มีแนวโน้มต่ำลง ส่วน 1/G มีแนวโน้มสูงขึ้น ต่อมา 1/P สูงขึ้นแต่ 1/G ต่ำลงจนค่าสัญญาณทั้งสองมีค่าเท่ากันที่ระยะเวลาทำงานประมาณ 500 นาที หลังจากนั้น 1/P มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วน 1/G มีแนวโน้มต่ำลงจนคงที่
- ช่วงที่สอง 648-2249 นาที ค่าสัญญาณ 1/P มีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณ 1/G ตลอดเวลา ค่า 1/G ต่ำมากและมีค่าค่อนข้างคงที่คือมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.5 dB และมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 0.1 dB ส่วนค่า 1/P สูงกว่าค่า 1/G ตลอดเวลาแต่มีการสั่นขึ้นลงมากคือ มีค่ามากที่สุดประมาณ 2.2 dB และมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 0.5 dB

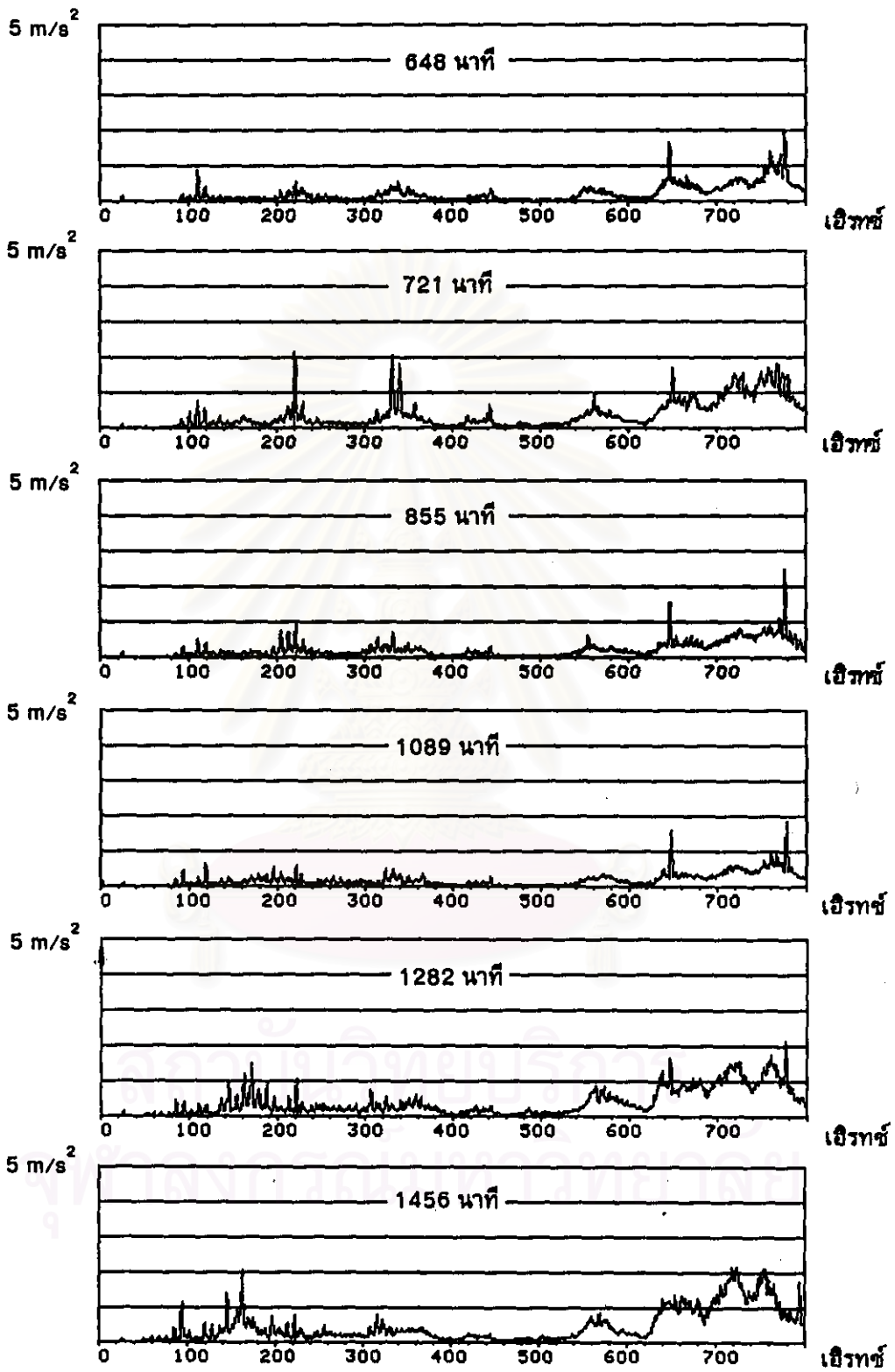
การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G ดังกล่าวอาจสังเกตได้ง่ายขึ้น ด้วยการลากเส้นโค้งแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (trendline) ของค่าสัญญาณ เส้นโค้งที่แสดงในกราฟเป็นเส้นโค้งการถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) อันดับหก

### 5-4-1-2 ลักษณะสเปกตรัมและเชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1

สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง แสดงในรูปที่ 5-13 โดยเรียงลำดับตามระยะเวลาทำงานของชุดเฟือง เชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง แสดงในรูปที่ 5-14 โดยเรียงลำดับตามระยะเวลาทำงานของชุดเฟือง

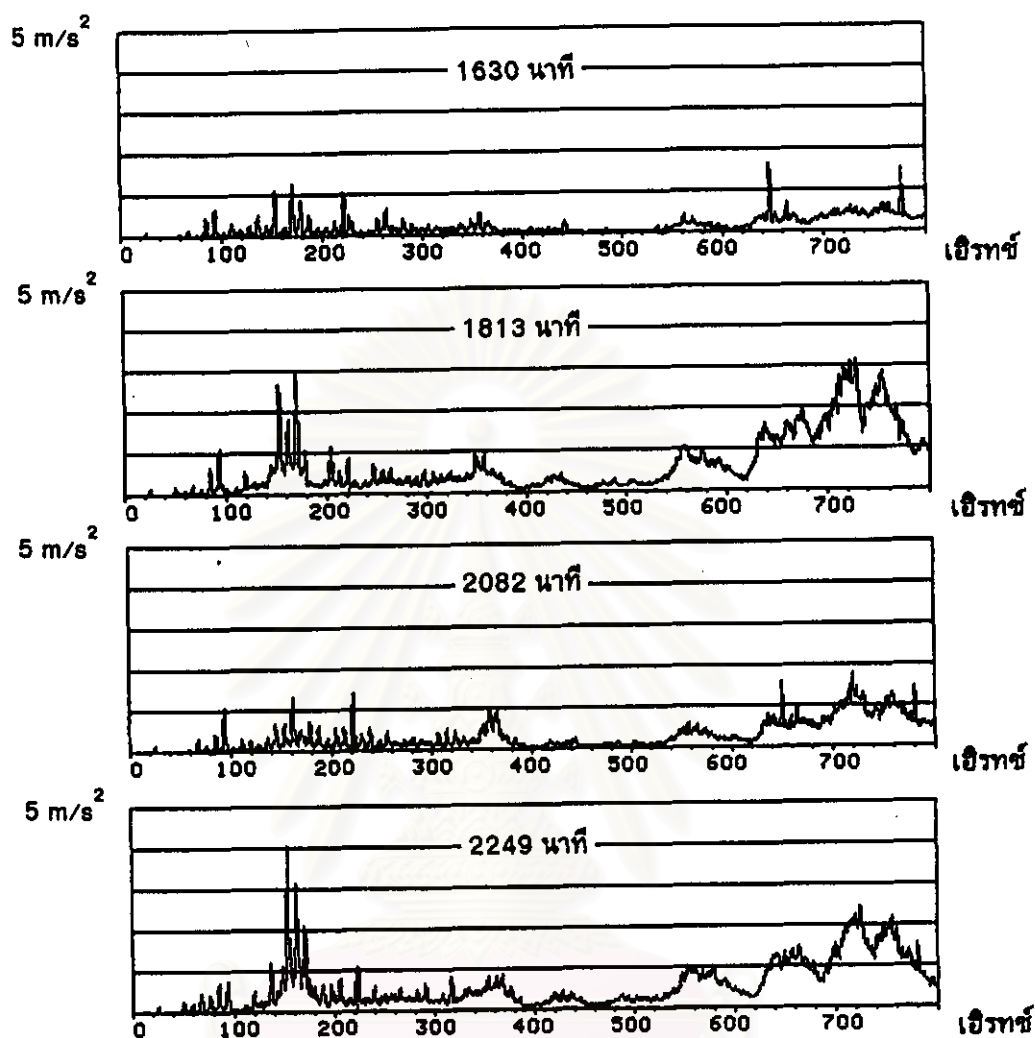


รูปที่ 5-13 สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-13(ต่อ) สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง





รูปที่ 5-13(ต่อ) สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แมบริง 2 กิตแนวดิ่ง

จากรูปที่ 5-13 แบ่งลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

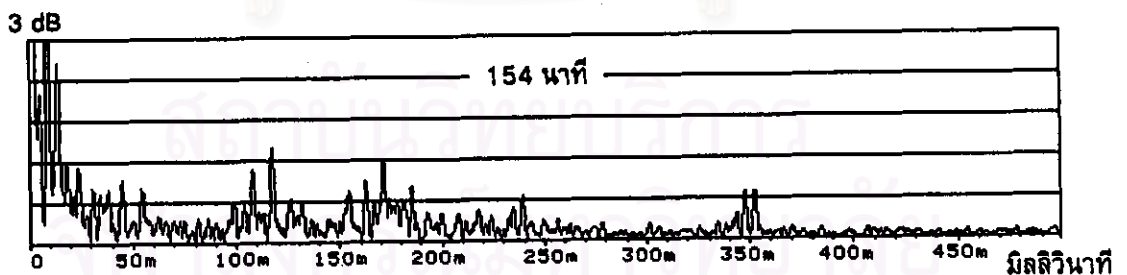
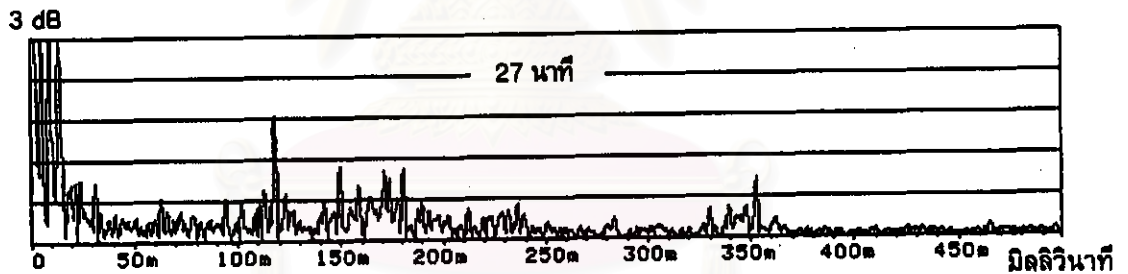
1) ช่วงที่หนึ่ง 0-648 นาที

- สเปกตรัมของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ครั้งแรก ประกอบด้วยยอด 1xGMF 2xGMF 3xGMF และแถบความถี่ข้างที่มีแอมพลิจูดต่ำ
- ยอด 1xGMF มีแนวโน้มต่ำลงแล้วมีแนวโน้มสูงขึ้นอีก
- ยอด 2xGMF และ 3xGMF มีแนวโน้มสูงขึ้นมาก
- ไม่พบยอด P และ G
- แถบความถี่ข้างรอบ 1xGMF และฮาร์มอนิก มีแนวโน้มสูงขึ้น

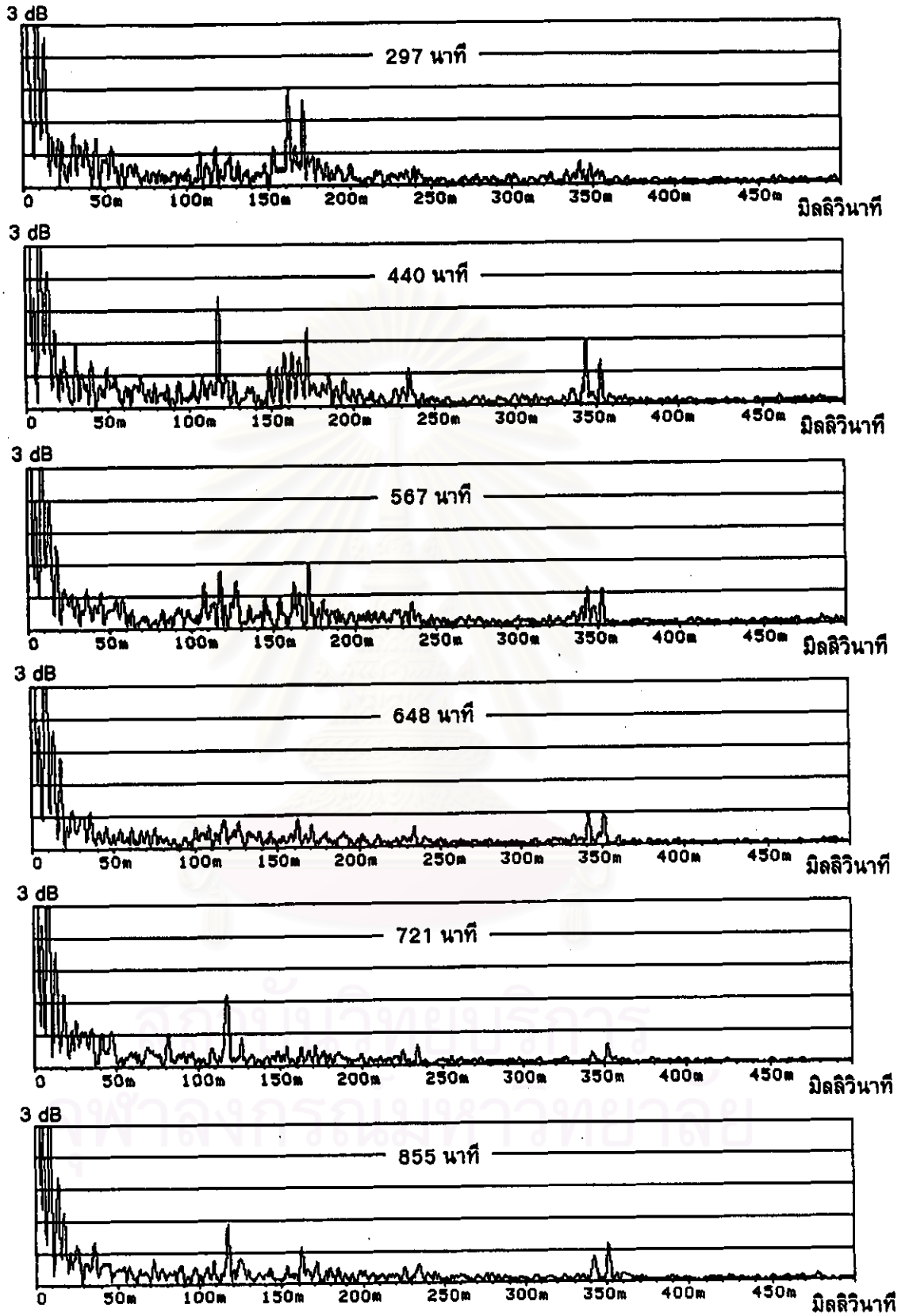
- ยอด 0.5xGMF 1.5xGMF และ 2.5xGMF ปรากฏขึ้นจนสังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อชุดเฟืองทำงานไปได้ประมาณ 505 นาที และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อชุดเฟืองทำงานเพิ่มขึ้น
- สังเกตเห็นแถบความถี่กว้างระหว่างความถี่ 550-800 เฮิรตซ์ และเมื่อชุดเฟืองมีระยะเวลาทำงานมากขึ้น แถบความถี่กว้างมีแนวโน้มสูงขึ้น

## 2) ช่วงที่สอง 648-2249 นาที

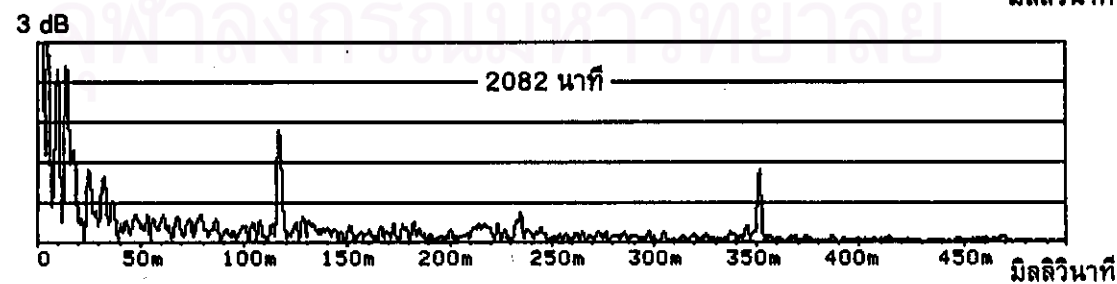
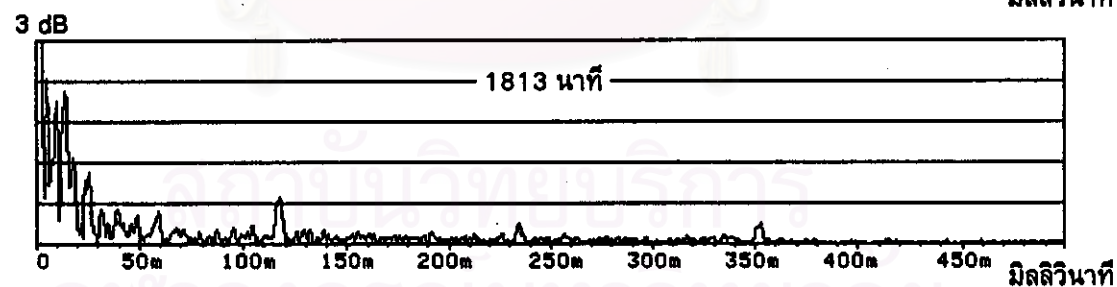
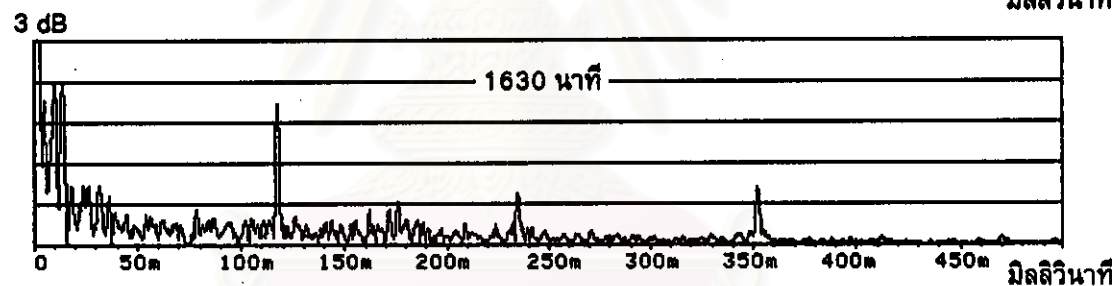
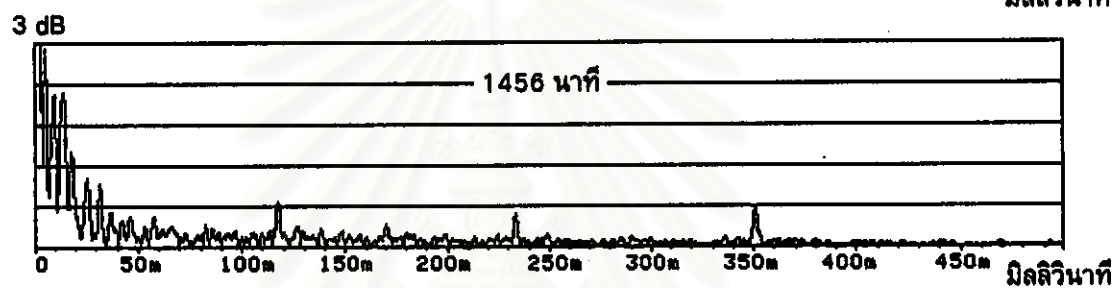
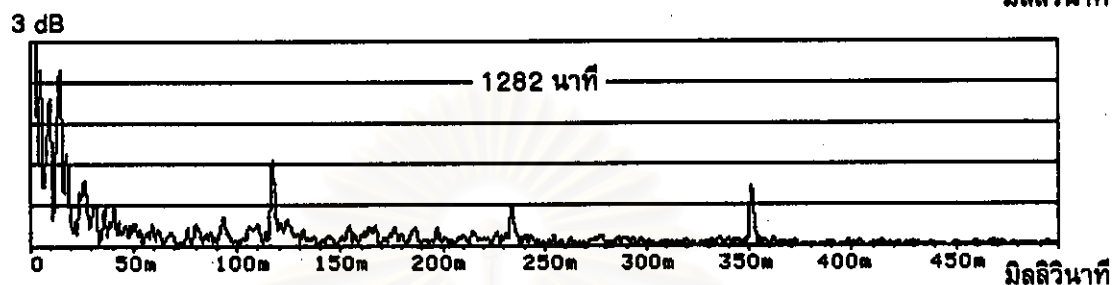
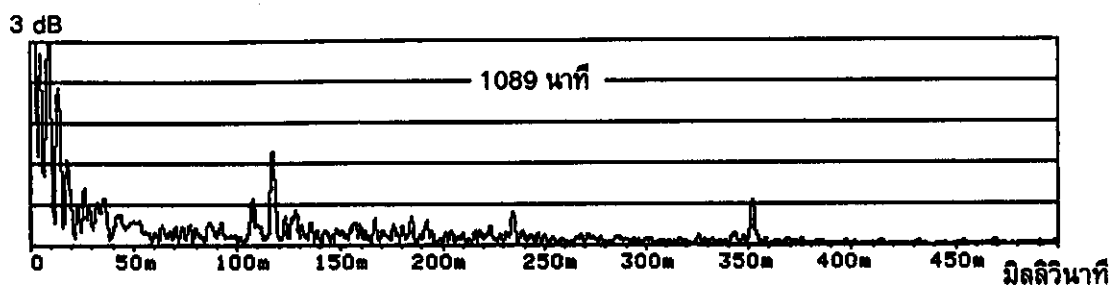
- แถบความถี่ข้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมากจนมีแอมพลิจูดสูงกว่ายอด 1xGMF ยอดแถบความถี่ข้างส่วนใหญ่กระจายอยู่ระหว่าง 0.5xGMF และ 1.5xGMF
- แถบความถี่กว้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมาก กระจายต่อเนื่องอยู่ระหว่างความถี่ 400-800 เฮิรตซ์
- ยอด 2xGMF มีแอมพลิจูดต่ำลงมาก
- สังเกตไม่พบยอด 3xGMF ตำแหน่งของยอดคสัญลักษณ์อยู่ที่ท่ามกลางแถบความถี่กว้างที่มีแอมพลิจูดสูงและต่อเนื่อง
- ไม่พบยอด P และ G



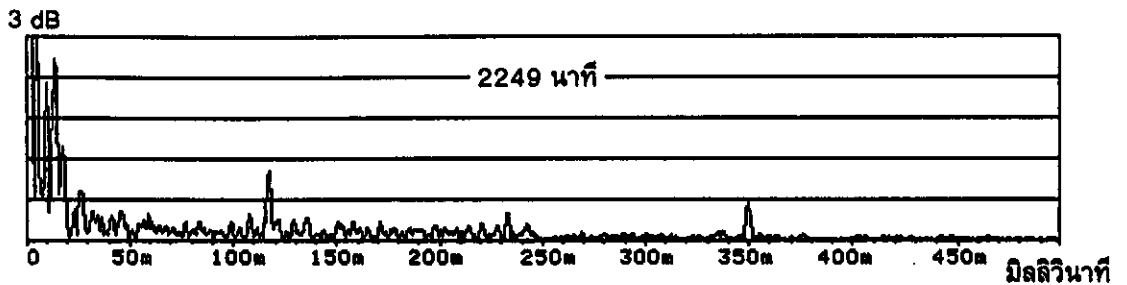
รูปที่ 5-14 เซปต์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-14(ต่อ) เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-14(ต่อ) เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-14(ต่อ) เชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-14 แบ่งลักษณะเชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงที่หนึ่ง 0-648 นาฬิกา

- ยอดเชปส์ตรัมมีหลายยอด แต่จะเห็นเด่นที่ยอด 1/P และ 1/G รอบๆ ยอด 1/P และ 1/G มียอดเชปส์ตรัมอยู่ข้างๆ หลายยอด
- สังเกตเห็นชุดราร์มอนิก 1/P 2/P และ 3/P และชุดราร์มอนิก 1/G และ 2/G
- ยอด 1/P และ 1/G สลับกันสูงกว่า แต่ระหว่าง 618-648 นาฬิกา ยอด 1/P และ 1/G ต่ำลงพร้อมกันจนมองไม่เห็นเป็นยอดสัญญาณ

2) ช่วงที่สอง 648-2249 นาฬิกา

- ยอด 1/P เด่นมาก ส่วนยอด 1/G มองไม่เห็นเป็นยอดสัญญาณ
- ยอดเชปส์ตรัมรอบๆ ยอด 1/P ต่ำลงมาก
- สังเกตเห็นชุดราร์มอนิก 1/P 2/P และ 3/P ได้ชัดเจน

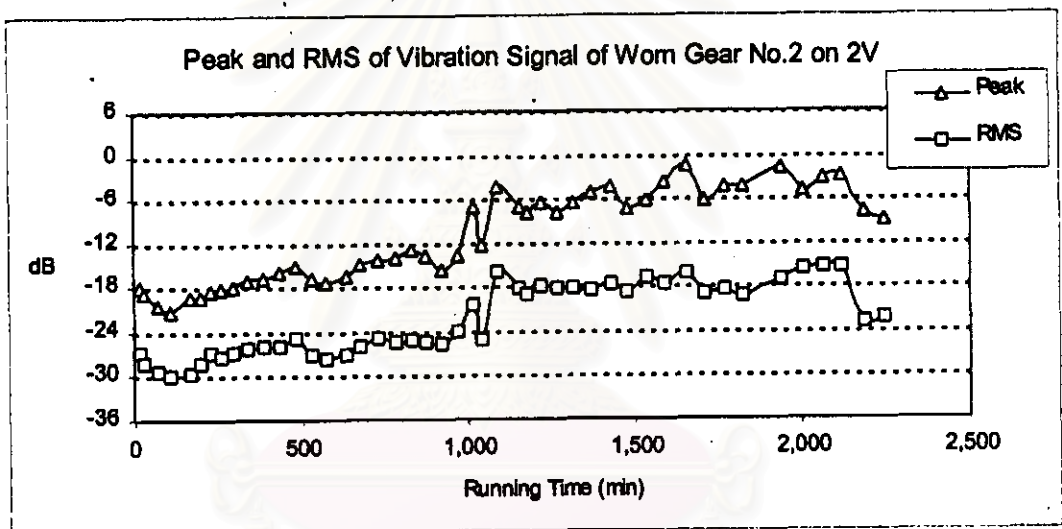
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5-4-2 ผลการทดลองของชุดเฟือง 2

จากการฉายโปรไฟล์ของฟันเฟืองด้วยเครื่องฉายโปรไฟล์ที่มีอัตราขยาย 20 เท่า พบว่าหลังจากการทดลองแล้วซี่ฟันของเฟืองขับสึกหรอไปประมาณ 48% แต่ไม่พบว่ามีซี่ฟันของเฟืองตามมีการสึกหรอ ผลการทดลองแบ่งเป็นสองส่วน คือ หัวข้อ 5-4-2-1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณ และหัวข้อ 5-4-2-2 ลักษณะสเปกตรัมและเชปส์ตรัมของสัญญาณ

#### 5-4-2-1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2

ผลการทดลองวิเคราะห์ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้งแสดงในรูปที่ 5-15 ถึง รูปที่ 5-19 ดังนี้



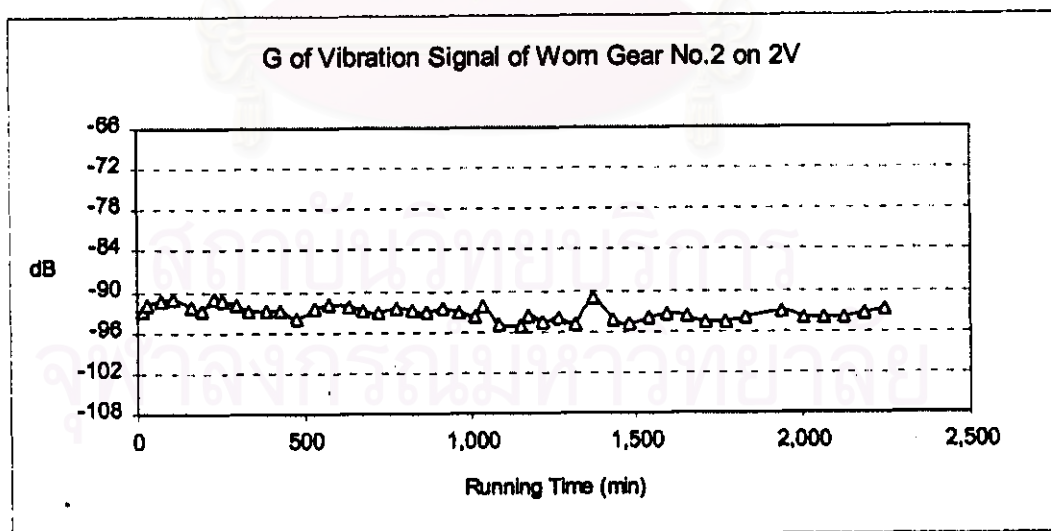
รูปที่ 5-15 ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-15 ค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกัน คือกราฟของค่าสัญญาณทั้งสองค่อนข้างขนานกัน จากการสังเกตกราฟ เมื่อชุดเฟือง 2 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น แบ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS เป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาทีและช่วงที่สอง 965-2247 นาที ในตารางที่ 5-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณมากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละช่วงโดยเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิง และแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณแบบทันทีทันใด

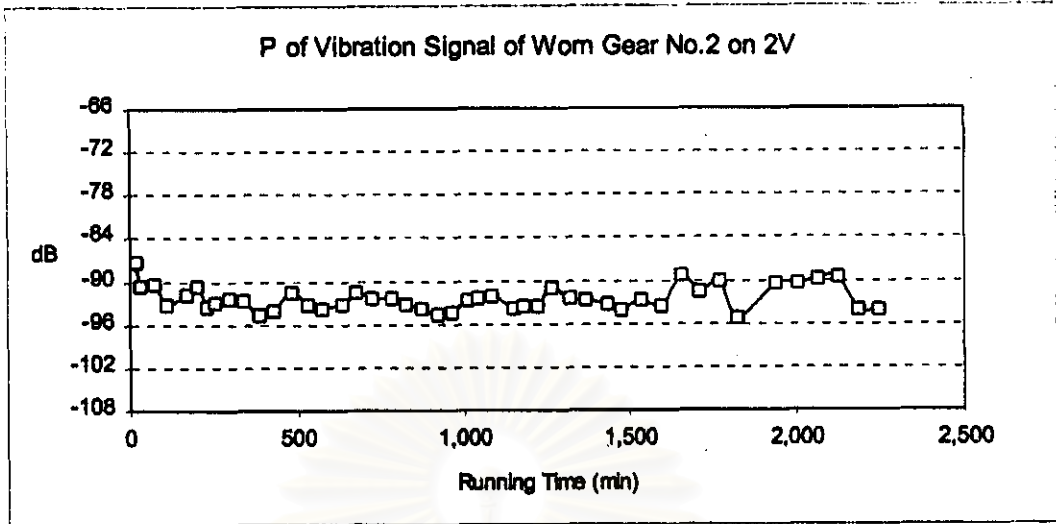
ค่าสัญญาณ	Peak	RMS
ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาที	มากที่สุด +4.9 dB น้อยที่สุด -5.1 dB	มากที่สุด +2.6 dB น้อยที่สุด -5.5 dB
ช่วงที่สอง 965-2247 นาที	มากที่สุด +16.0 dB น้อยที่สุด +9.0 dB	มากที่สุด +11.0 dB น้อยที่สุด +3.9 dB
การเปลี่ยนแปลง แบบทันทีทันใด	+8.5 dB ระหว่าง 920-1015 นาที +11.4 dB ระหว่าง 920-1086 นาที	+5.3 dB ระหว่าง 920-1015 นาที +9.8 dB ระหว่าง 920-1086 นาที

ตารางที่ 5-2 การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 2

- ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาที ค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างค่อนข้างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ค่าสัญญาณในช่วงนี้สูงขึ้น 2.6-4.9 dB และในระหว่าง 0-111 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มต่ำลง 5.1-5.5 dB
- ช่วงที่สอง 965-2247 นาที จากกราฟคร่าวๆ ค่าสัญญาณโดยเฉลี่ยในช่วงนี้สูงกว่าค่าสัญญาณอ้างอิงประมาณ 8-10 dB ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ส่วนใหญ่ในช่วงที่สองค่อนข้างคงที่ และพบการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดบริเวณรอยต่อระหว่างช่วงที่หนึ่งกับช่วงที่สอง



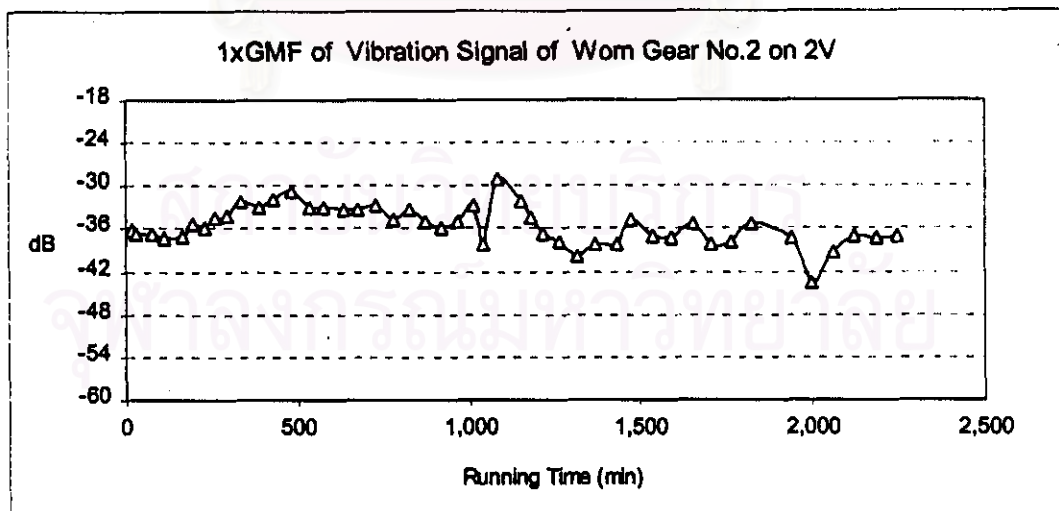
รูปที่ 5-16 ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน  
ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-16(ต่อ) ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน  
ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง

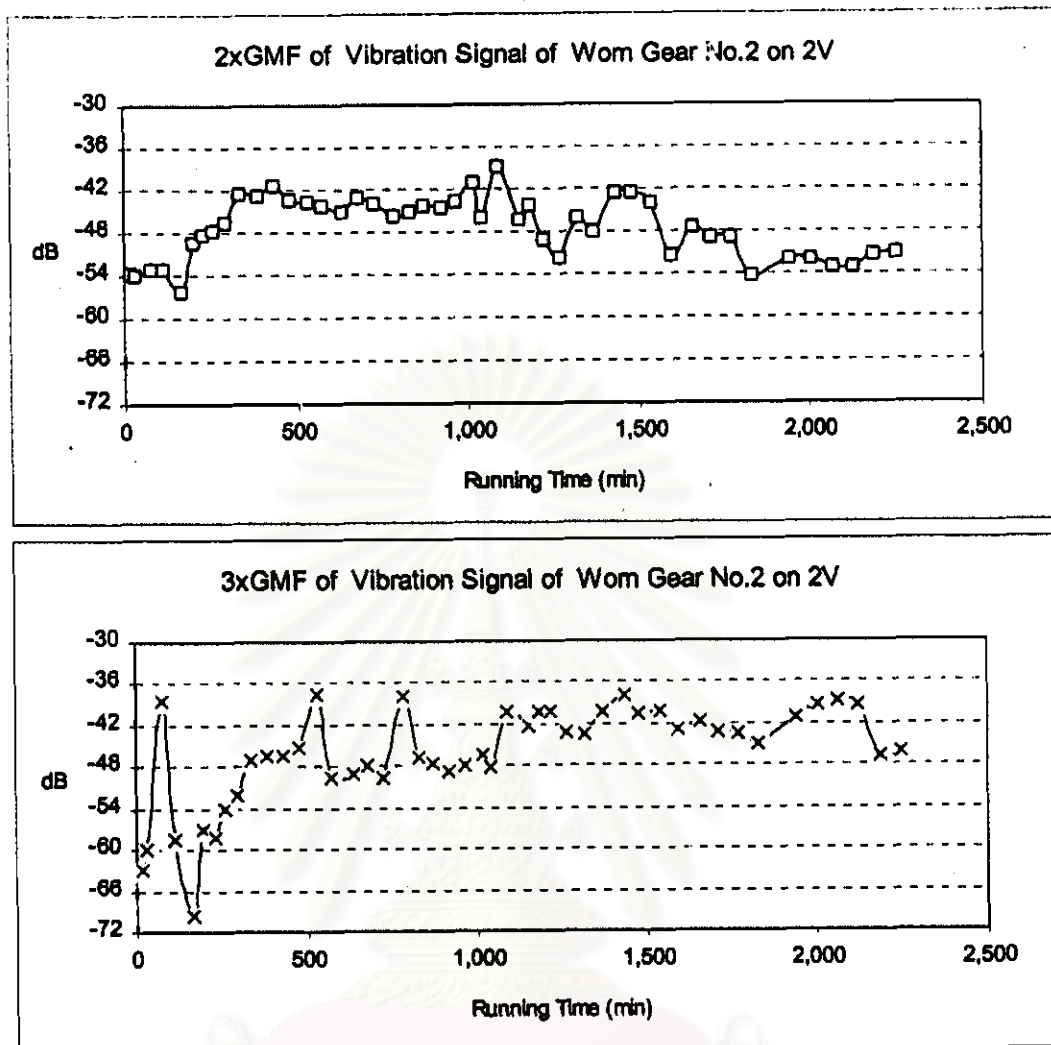
จากรูปที่ 5-16 เมื่อชุดเฟือง 2 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

- ค่าสัญญาณ G มีแนวโน้มคงที่
- ค่าสัญญาณ P ช่วงแรก 0-111 นาที ค่าสัญญาณต่ำลงอย่างต่อเนื่อง 6.0 dB หลังจากนั้น มีแนวโน้มคงที่แต่สั่นขึ้นลงไม่เกิน 6 dB



รูปที่ 5-17 ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน  
ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



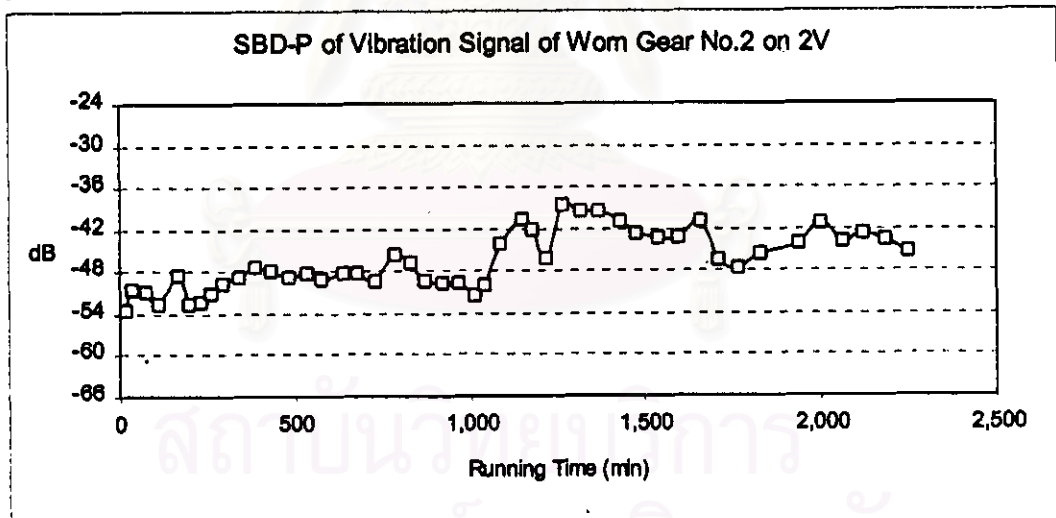
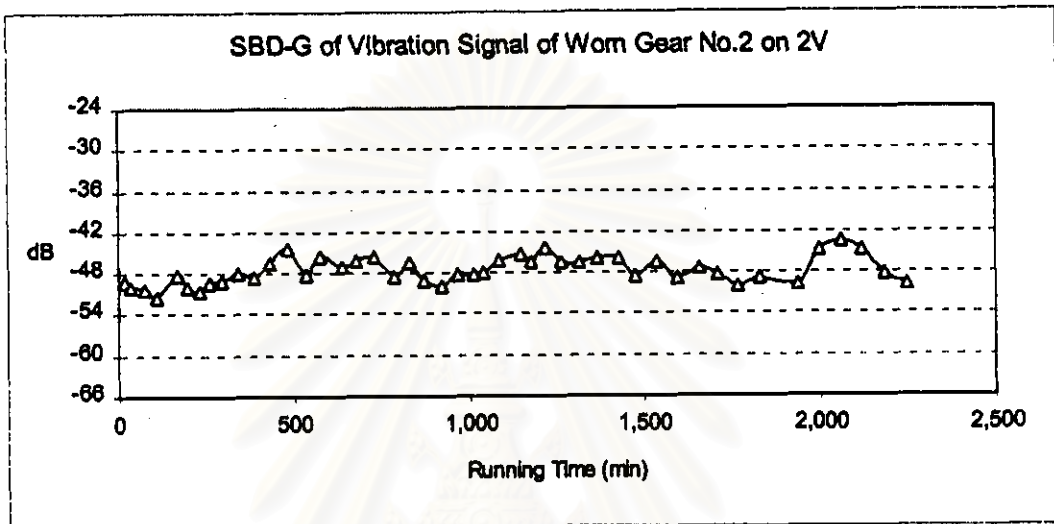


รูปที่ 5-17(ต่อ) ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แมรี่ 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-17 เมื่อชุดเฟือง 2 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ค่าสัญญาณ 1xGMF ในช่วงแรก 0-479 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง 5.2 dB ต่อมาช่วง 479-965 นาทีค่าสัญญาณมีแนวโน้มต่ำลง มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +9.0 dB ระหว่าง 1015-1086 นาที หลังจากนั้นค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่
- ค่าสัญญาณ 2xGMF ในช่วงแรก 0-479 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง 12.4 dB ต่อมาช่วง 479-965 นาทีค่าสัญญาณค่อนข้างคงที่ หลังจากนั้นค่าสัญญาณมีแนวโน้มต่ำลง

- ค่าสัญญาณ 3xGMF ในช่วงแรก 0-479 นาที ค่าสัญญาณมีแนวโน้มสูงขึ้น 17.6 dB และพบการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +24.3 dB ระหว่าง 0-74 นาที ต่อมาช่วง 479-965 นาทีค่าสัญญาณค่อนข้างคงที่ หลังจากนั้นค่าสัญญาณสูงขึ้นประมาณ 6 dB แล้วมีแนวโน้มคงที่

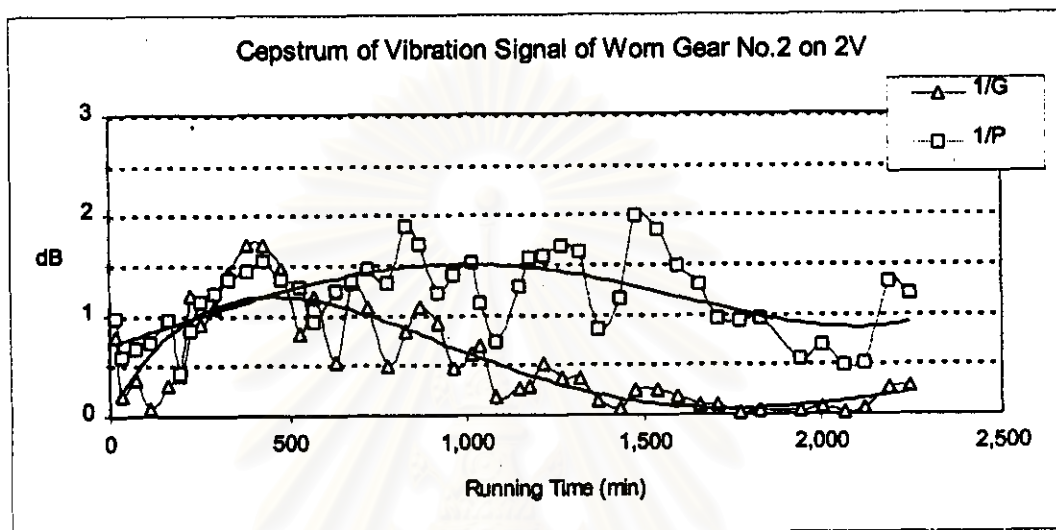


รูปที่ 5-18 ค่าสัญญาณ SBD-G และ SBD-P ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจจวัดที่แมริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-18 เมื่อชุดเฟือง 2 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ SBD-G และ SBD-P ของชุดเฟือง 2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ค่าสัญญาณ SBD-G ค่าสัญญาณมีแนวโน้มคงที่แต่จะสั่นขึ้นลงประมาณ 6 dB

- ค่าสัญญาณ SBD-P แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาที มีแนวโน้มคงที่ ช่วงที่สอง 965-2247 นาที ค่าสัญญาณโดยเฉลี่ยสูงกว่าช่วงแรกประมาณ 6 dB ค่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด +11.3 dB ระหว่าง 1015-1151 นาที



รูปที่ 5-19 ค่าสัญญาณ 1/G และ 1/P กับระยะเวลาทำงาน และเส้นโค้งแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ ของชุดเฟือง 2 ทรจวต์ที่เบร้ง 2 ทิศแนวตั้ง

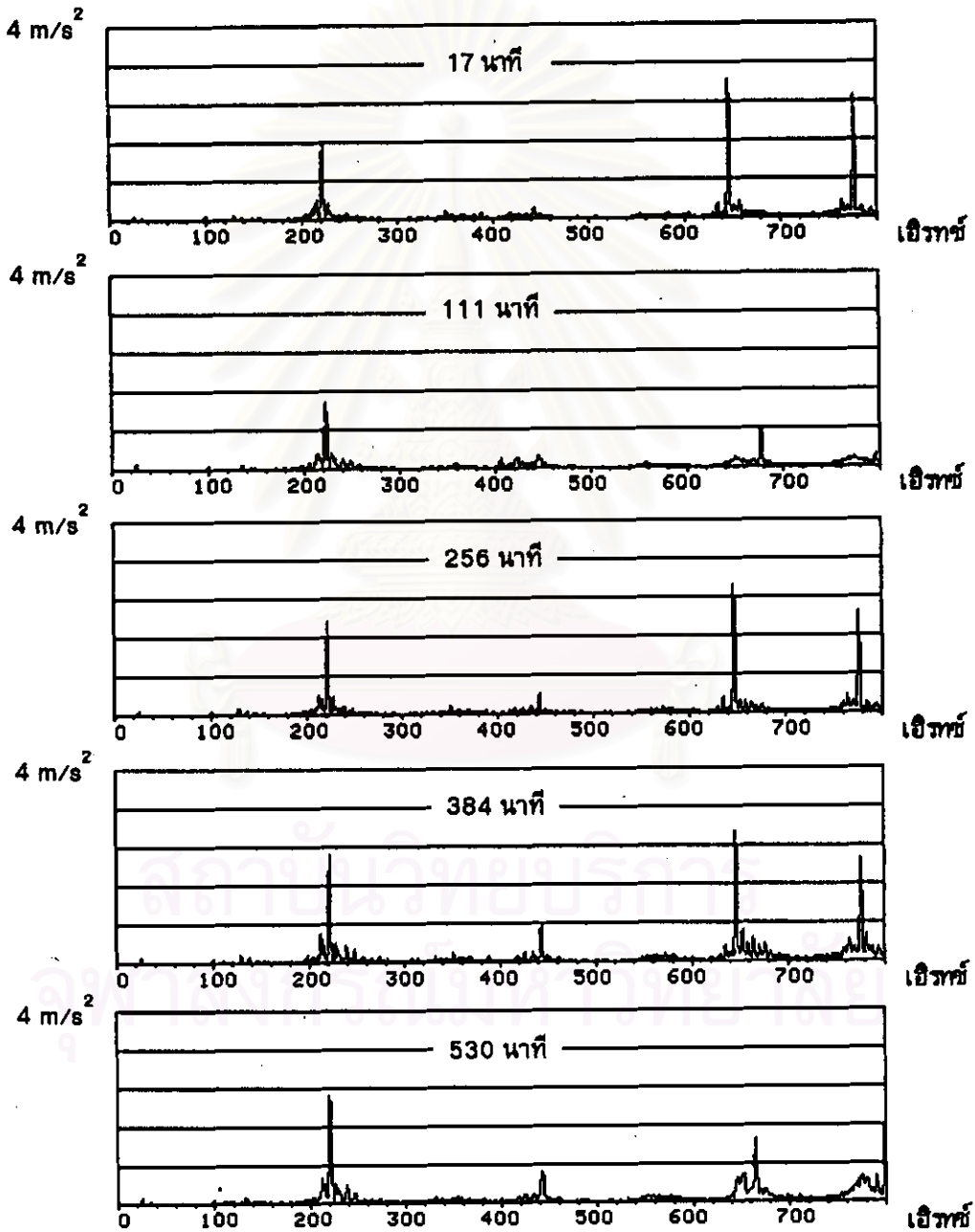
จากรูปที่ 5-19 เมื่อชุดเฟือง 2 มีระยะเวลาทำงานมากขึ้น ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นสองช่วง ดังนี้

- ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาที ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G จะผลัดกันสูงกว่าและต่ำกว่า เริ่มต้นจากค่าสัญญาณ 1/P พอๆกับค่าสัญญาณ 1/G จากนั้น 1/P มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วน 1/G มีแนวโน้มต่ำลง ต่อมา 1/P สูงขึ้นและ 1/G สูงขึ้นจนค่าสัญญาณทั้งสองมีค่าเท่ากัน ที่ระยะเวลาทำงานประมาณ 450 นาที หลังจากนั้น 1/P มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วน 1/G มีแนวโน้มต่ำลงจนคงที่
- ช่วงที่สอง 965-2247 นาที ค่าสัญญาณ 1/P มีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณ 1/G ตลอดเวลา ค่า 1/G ต่ำมากและมีค่าค่อนข้างคงที่คือมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.7 dB และมีค่าน้อยที่สุด 0.02 dB ส่วนค่า 1/P สูงกว่าค่า 1/G ตลอดเวลาแต่มีการสั่นขึ้นลงมากคือ มีค่ามากที่สุดประมาณ 2.0 dB และมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 0.5 dB

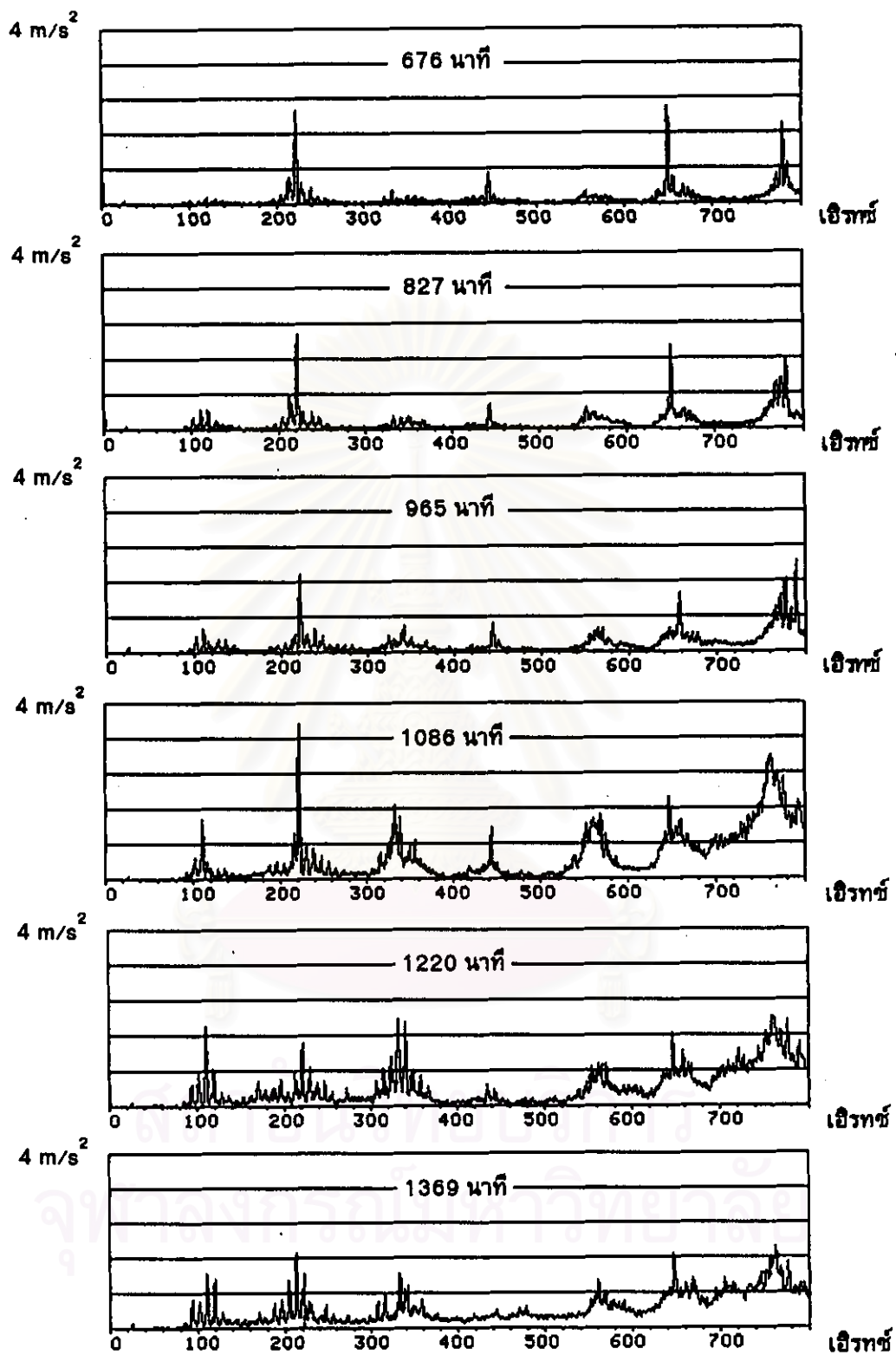
การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G ดังกล่าวอาจสังเกตได้ง่ายขึ้น ด้วยการลากเส้นโค้งการถดถอยแบบพหุนามอันดับหกแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณ

### 5-4-2-2 ลักษณะสเปกตรัมและเชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2

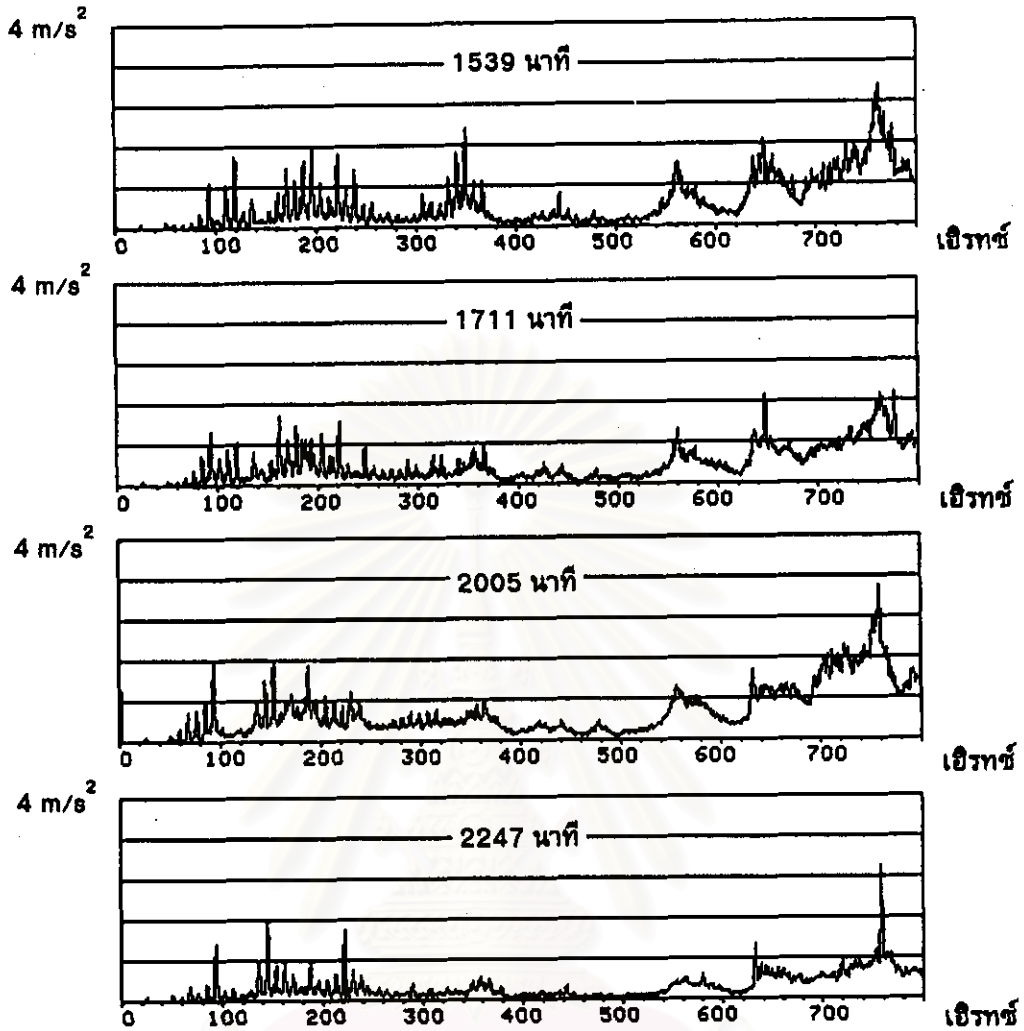
สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง แสดงในรูปที่ 5-20 โดยเรียงลำดับตามระยะเวลาทำงานของชุดเฟือง เชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้งแสดงในรูปที่ 5-21 โดยเรียงลำดับตามระยะเวลาทำงานของชุดเฟือง



รูปที่ 5-20 สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-20(ต่อ) สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเพื่อง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-20(ต่อ) สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แมริ่ง 2 กิตแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-20 แบ่งลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

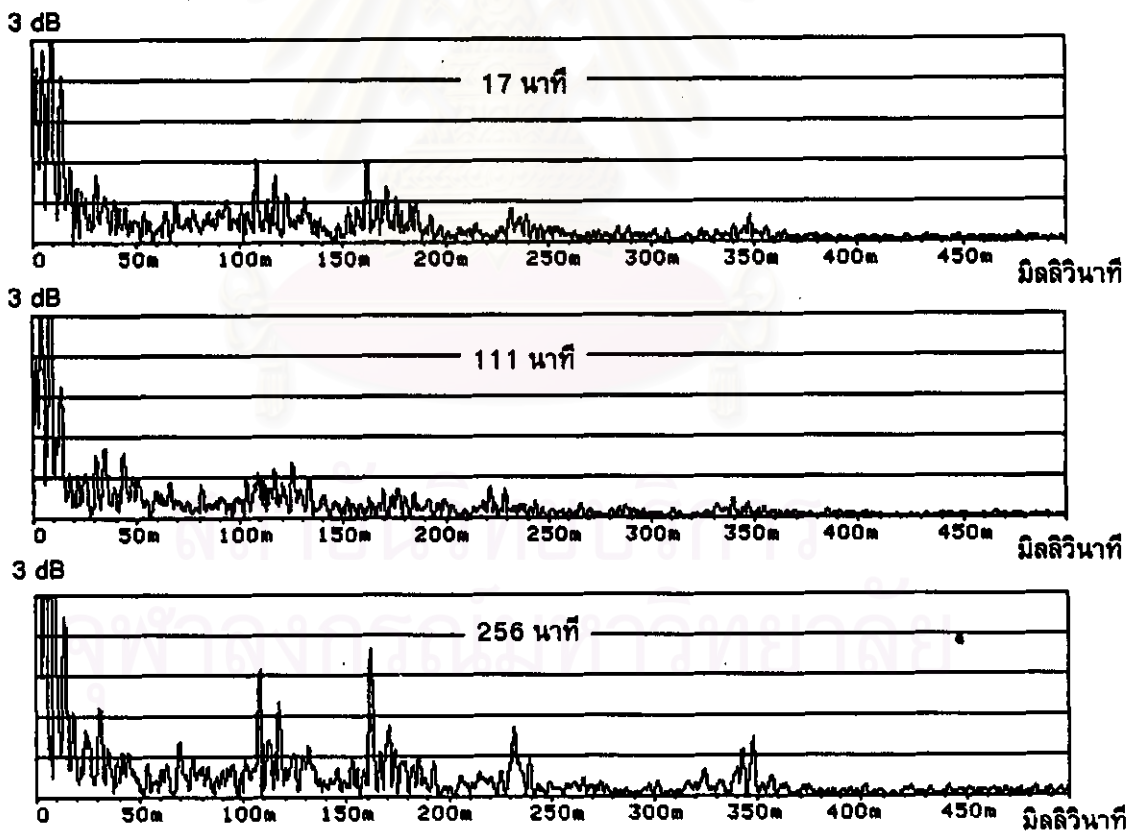
1) ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาที

- สเปกตรัมของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ครั้งแรก ประกอบด้วยยอด 1xGMF 2xGMF 3xGMF และแถบความถี่ข้างแอมพลิจูดต่ำ
- ยอด 1xGMF มีแนวโน้มสูงขึ้น
- ยอด 2xGMF และ 3xGMF มีแนวโน้มสูงขึ้น
- ไม่พบยอด P และ G
- แถบความถี่ข้างรอบ 1xGMF และฮาร์โมนิก มีแนวโน้มสูงขึ้น

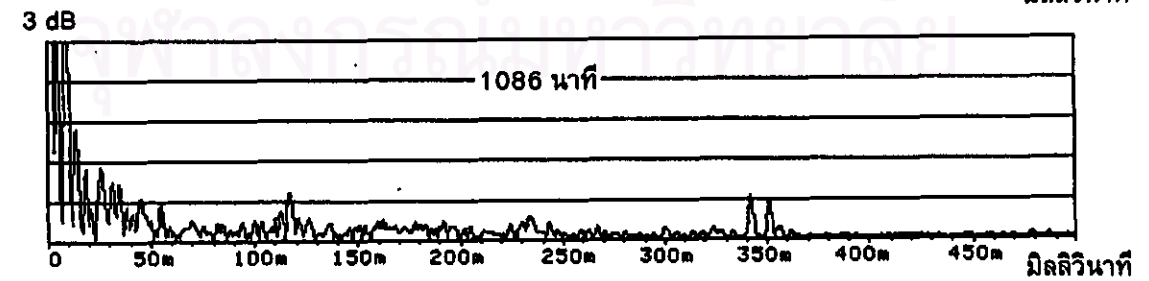
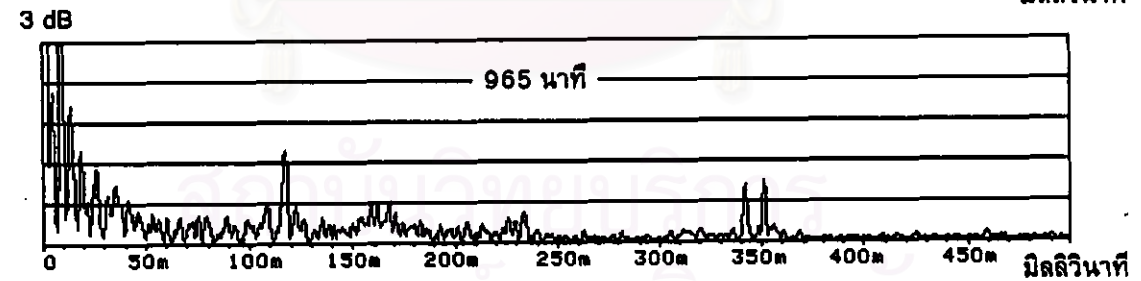
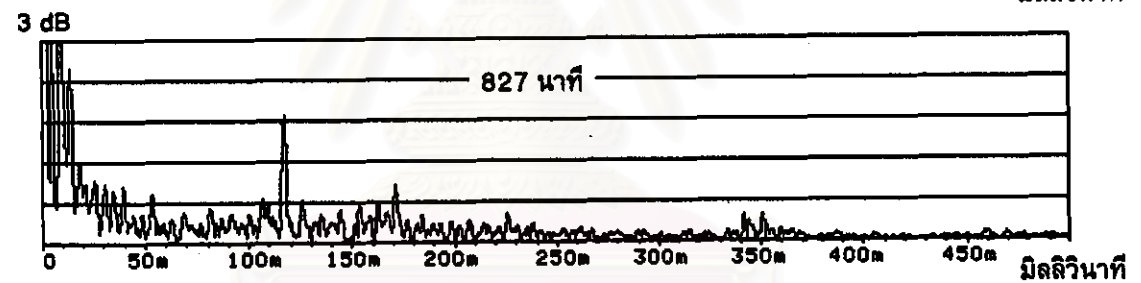
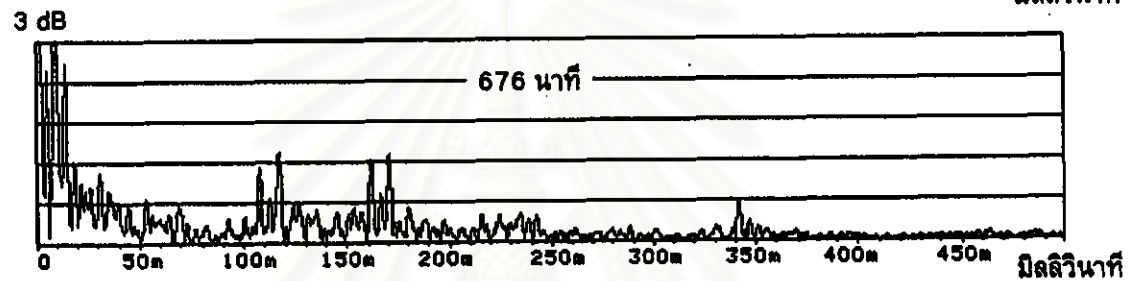
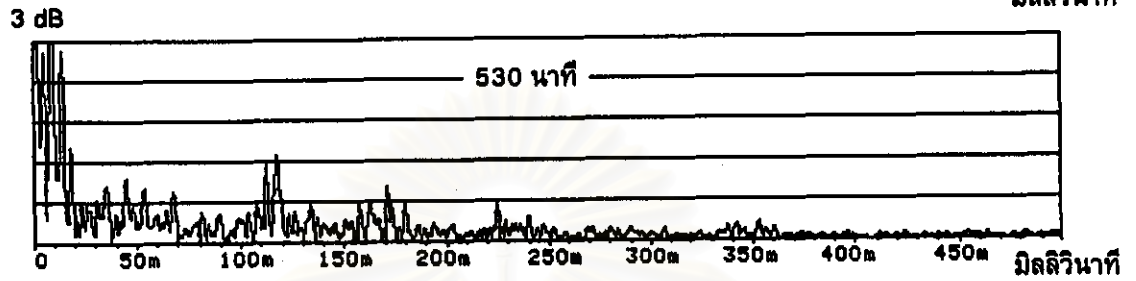
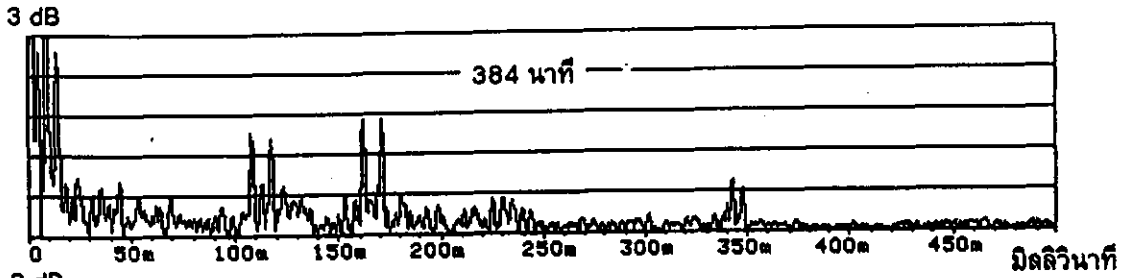
- ยอด 0.5xGMF 1.5xGMF และ 2.5xGMF ปรากฏขึ้นจนสังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อชุดเฟืองทำงานไปได้ประมาณ 725 นาที และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อชุดเฟืองทำงานเพิ่มขึ้น
- สังเกตเห็นแถบความถี่กว้างระหว่างความถี่ 550-800 เฮิรตซ์ และเมื่อชุดเฟืองมีระยะเวลาทำงานมากขึ้น แถบความถี่กว้างมีแนวโน้มสูงขึ้น

## 2) ช่วงที่สอง 965-2247 นาที

- แถบความถี่ข้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมากจนมีแอมพลิจูดสูงกว่ายอด 1xGMF แถบความถี่ข้างส่วนใหญ่กระจายอยู่รอบ 0.5xGMF 1xGMF และ 1.5xGMF
- แถบความถี่กว้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมาก กระจายต่อเนื่องอยู่ระหว่างความถี่ 400-800 เฮิรตซ์
- สังเกตไม่พบยอด 3xGMF ตำแหน่งของยอดคสญญาณอยู่ที่ท่ามกลางแถบความถี่กว้างที่มีแอมพลิจูดสูงและต่อเนื่อง
- ไม่พบยอด P และ G

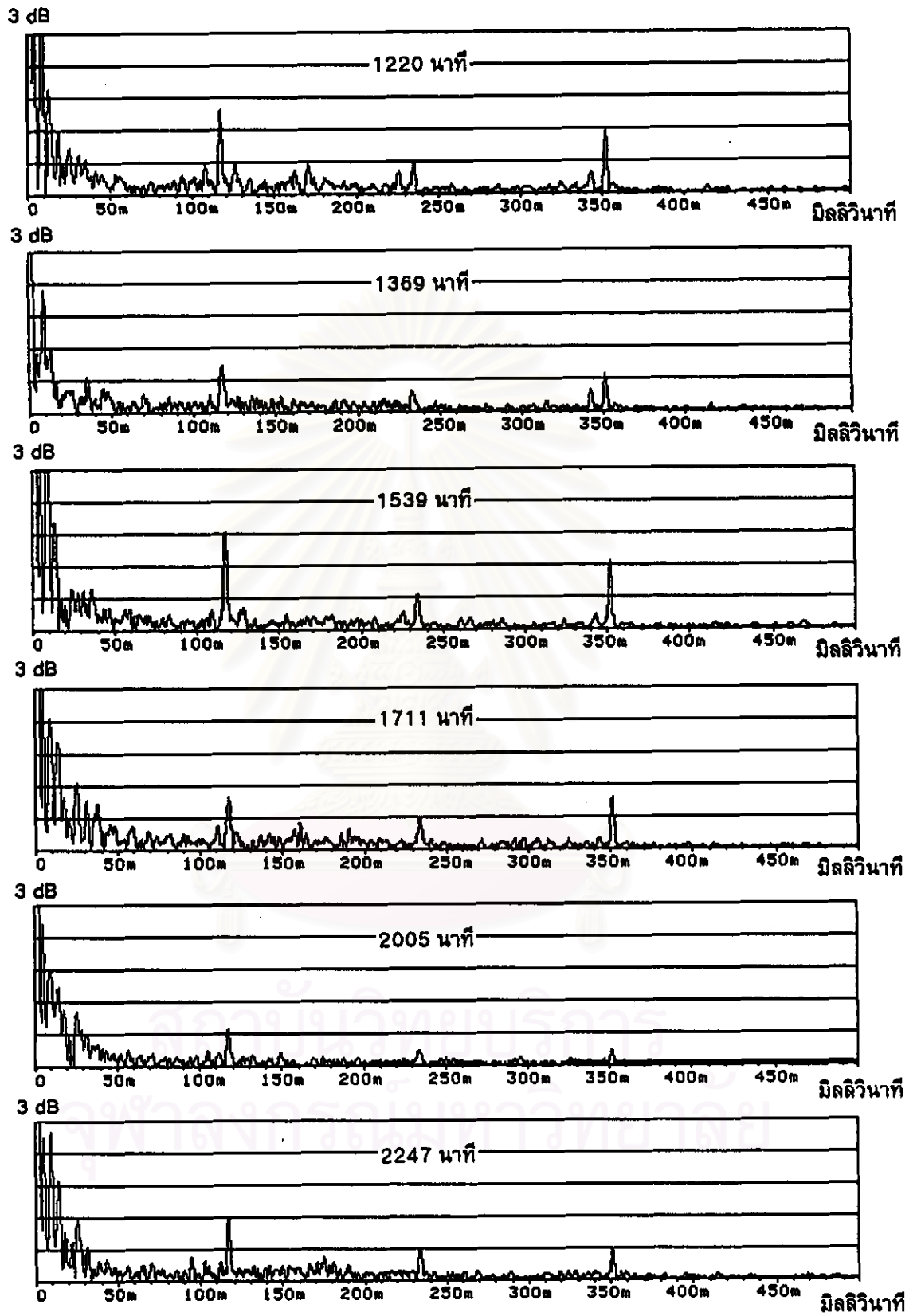


รูปที่ 5-21 เซปัสต์รัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แมบริง 2 ทิศแนวตั้ง



รูปที่ 5-21(ต่อ) เซปัสต์รัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แมบริง 2 ทิศนทางตั้ง





รูปที่ 5-21(ต่อ) เชปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แมบริง 2 ทิศแนวตั้ง

จากรูปที่ 5-21 แบ่งลักษณะเซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะท้อนของชุดเฟือง 2 ออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงที่หนึ่ง 0-965 นาทิ

- ยอดเซปส์ตรัมมีหลายยอด แต่จะเห็นเด่นที่ยอด 1/P และ 1/G รอบๆ ยอด 1/P และ 1/G มียอดเซปส์ตรัมอยู่ข้างๆ หลายยอด
- สังเกตเห็นชุดราร์มอนิก 1/P 2/P และ 3/P และชุดราร์มอนิก 1/G และ 2/G
- ยอด 1/P และ 1/G สลับกันสูงกว่า

2) ช่วงที่สอง 965-2247 นาทิ

- ยอด 1/P เด่นมาก ส่วนยอด 1/G มองไม่เห็นเป็นยอดสัญญาณ
- ยอดเซปส์ตรัมรอบๆ ยอด 1/P ต่ำลงมาก
- สังเกตเห็นชุดราร์มอนิก 1/P 2/P และ 3/P ได้ชัดเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5-5 อภิปรายผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง ชุดเฟืองทั้งสองชุดทำงานไปแล้วราว 2250 นาที จากผลการฉายโปรไฟล์ของฟันเฟืองด้วยเครื่องฉายโปรไฟล์ที่มีอัตราขยาย 20 เท่า พบว่า ซีฟันของเฟืองขับของชุดเฟือง 1 สึกหรือไปแล้วประมาณ 43% ซีฟันของชุดเฟือง 2 สึกหรือไปแล้วประมาณ 48% แต่สำหรับซีฟันของเฟืองตามของชุดเฟืองทั้งสองชุด ไม่พบว่ามี การสึกหรือของซีฟัน ดังนั้นระยะเวลาทำงานของชุดเฟืองที่เพิ่มขึ้นหมายถึง ซีฟันของเฟืองขับมีการสึกหรือมากขึ้น

ค่าสัญญาณ Peak และ RMS เป็นการบอกขนาดโดยรวม (overall) ของสัญญาณการสั่นสะเทือน จากผลการทดลอง พบว่า กราฟที่พลอตระหว่างค่าสัญญาณ Peak และ RMS กับระยะเวลาทำงานของชุดเฟือง ได้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่หนึ่ง และช่วงที่สอง ช่วงที่หนึ่ง ค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอจนสูงกว่าค่าสัญญาณอ้างอิง<sup>1</sup> ประมาณ 2 เท่า รอยต่อระหว่างช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด คือมีสัญญาณสูงขึ้นประมาณ 2 เท่าอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่สอง ในช่วงที่สอง ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ลดลงอย่างมากคือ ค่าต่ำสุดและสูงสุดต่างกัน 2-4 เท่า แต่ค่าสัญญาณโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณในช่วงที่หนึ่งและมีแนวโน้มสูงขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณและลักษณะสัญญาณบนโดเมนความถี่และโดเมนคิวเฟรนซี ในช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีดังนี้

### ช่วงที่หนึ่ง

- 1) สเปกตรัมของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ครั้งแรก ประกอบด้วยยอดสเปกตรัม 1xGMF 2xGMF 3xGMF และแถบความถี่ข้างที่มีแอมพลิจูดต่ำ
- 2) ระหว่างที่ชุดเฟืองเริ่มต้นทำงานจนทำงานได้ระยะเวลาหนึ่ง ยอด 2xGMF และ 3xGMF มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ยอด 1xGMF ของชุดเฟือง 1 และ ชุดเฟือง 2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนกัน คือ สำหรับชุดเฟือง 1 ยอด 1xGMF มีแนวโน้มต่ำลง แต่สำหรับชุดเฟือง 2 ยอด 1xGMF มีแนวโน้มสูงขึ้นโดยสูงขึ้นน้อยกว่าที่ยอด 2xGMF และ 3xGMF สูงขึ้น
- 3) เมื่อชุดเฟืองมีระยะเวลาทำงานมากขึ้น แถบความถี่ข้างมีแนวโน้มสูงขึ้น
- 4) ไม่พบยอดสเปกตรัม P และ G

<sup>1</sup> ค่าสัญญาณอ้างอิง คือ ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดครั้งแรกหลังจากชุดเฟืองเริ่มทำงาน

- 5) เมื่อชุดเฟืองทำงานได้ระยะเวลาหนึ่ง พบแถบความถี่กว้างซึ่งเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะต่อเนื่องระหว่าง 550 - 800 เฮิรตซ์ และพบฮาร์โมนิก (subharmonics) ของ GMF คือยอด 0.5xGMF 1.5xGMF และ 2.5xGMF
- 6) ยอดเซปส์ตรัม 1/P และ 1/G ผัดกันสูงกว่ากัน

### ช่วงที่สอง

- 1) แถบความถี่ข้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมาจนมีแอมพลิจูดสูงกว่ายอด 1xGMF แถบความถี่ข้างส่วนใหญ่กระจายอยู่ระหว่างยอด 0.5xGMF และ 1.5xGMF
- 2) แถบความถี่กว้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมา กระจายต่อเนื่องระหว่างความถี่ 400-800 เฮิรตซ์
- 3) ไม่พบยอด P และ G

สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ตรวจวัดครั้งแรกหลังจากชุดเฟืองเริ่มทำงานไปแล้วครึ่งชั่วโมง จะถือว่าเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองสภาพปกติ และให้ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดครั้งแรกเป็นค่าสัญญาณอ้างอิง เพราะสภาพของชุดเฟืองยังมีสภาพดีและสมบูรณ์ที่สุด ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในสภาพปกติประกอบด้วยชุดฮาร์โมนิกของ GMF และแถบความถี่ข้างที่มีแอมพลิจูดต่ำปรากฏรอบ 1xGMF และฮาร์โมนิก ลักษณะสเปกตรัมดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเสนอของ Wowk [ 4 ] Martin [6] และ [ 11 ]

ตั้งแต่ชุดเฟืองเริ่มต้นทำงานจนทำงานได้ระยะเวลาหนึ่ง (ประมาณครั้งแรกของช่วงที่หนึ่ง) ยอด 2xGMF และยอด 3xGMF มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ยอด 1xGMF ของชุดเฟือง 1 มีแนวโน้มต่ำลง ส่วนยอด 1xGMF ของชุดเฟือง 2 มีแนวโน้มสูงขึ้นแต่สูงขึ้นน้อยกว่าที่ยอด 2xGMF และ 3xGMF สูงขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณเช่นนี้สอดคล้องกับที่ Martin [6] ได้เสนอไว้ Martin เสนอว่า “เมื่อฟันเฟืองสึกหรอ โปรไฟล์ของฟันเฟืองจะเปลี่ยนไปเนื่องจากการไถลกันระหว่างฟันเฟือง การไถลจะเกิดขึ้นที่ทุกๆ จุดบนโปรไฟล์ยกเว้นที่จุดพิชิตซ์ เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ลักษณะเช่นนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นรูปไซน์ ดังนั้นยอดความถี่ 2xGMF และ 3xGMF จะสูงขึ้น”

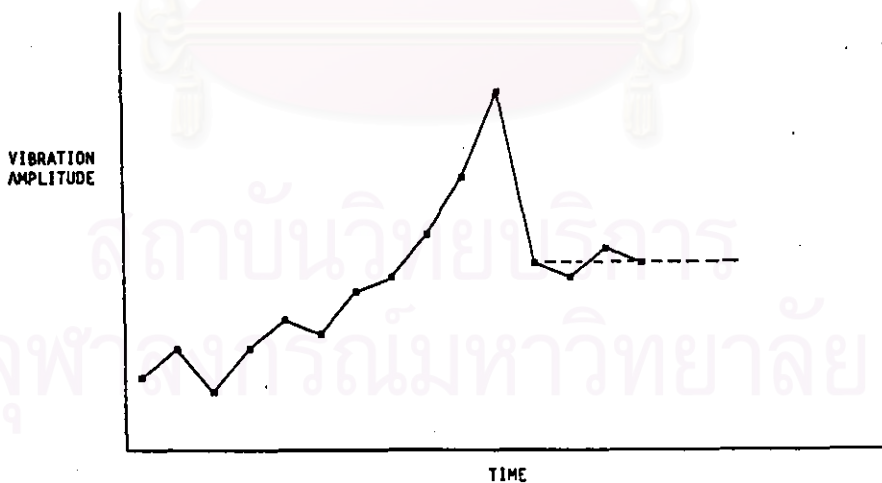
เมื่อชุดเฟืองมีระยะเวลาทำงานมากขึ้น พบว่าแถบความถี่ข้างมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีการกระจายแอมพลิจูดสม่ำเสมอมากขึ้น คือแอมพลิจูดของยอดที่อยู่ไกลจาก 1xGMF และฮาร์โมนิกมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมาจนใกล้เคียงกับยอดที่อยู่ใกล้ 1xGMF และฮาร์โมนิก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับข้อเสนอของ Martin [6] และ [ 11 ]

เมื่อฟันเฟืองสึกหรอไปได้ระดับหนึ่ง ค่าแบล็กแลช (backlash) ระหว่างฟันจะสูงขึ้น ทำให้ฟันเฟืองหลุดจากการสัมผัสง่ายขึ้น ทำให้ฟันเฟืองกระทบกัน ซึ่งจะให้แถบความถี่กว้างบน

โดเมนความถี่ และทำให้เกิดซัพฮาร์โมนิกของความถี่ GMF [7] [13] [14] และ [15] ในการทดลองเมื่อชุดเฟืองทำงานได้ระยะหนึ่ง พบแถบความถี่กว้างและซัพฮาร์โมนิกของ GMF ที่ความถี่  $0.5 \times \text{GMF}$   $1.5 \times \text{GMF}$  และ  $2.5 \times \text{GMF}$  แต่เมื่อชุดเฟืองทำงานไปอีกจนอยู่ในช่วงที่สอง แถบความถี่กว้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นมาก

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณในช่วงที่หนึ่งน่าจะเป็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัญหาการสึกหรอแบบปกติ กล่าวคือ ค่าสัญญาณ Peak และ RMS สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

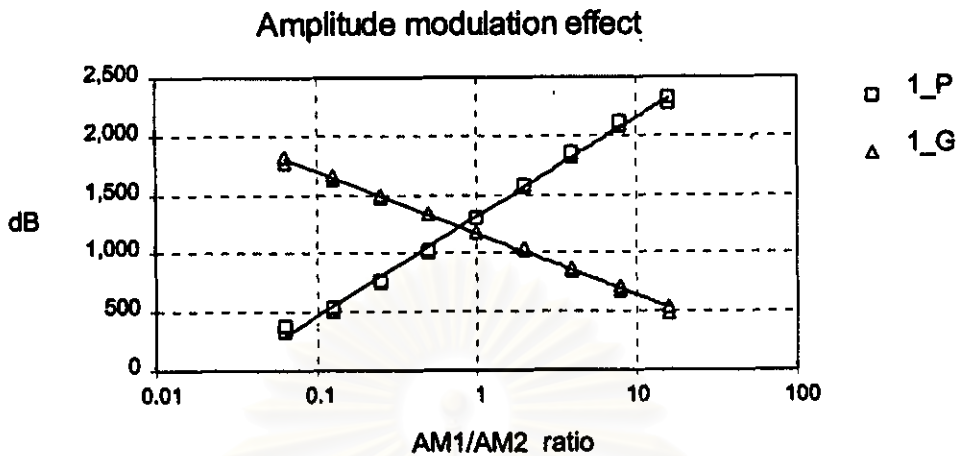
รอยต่อระหว่างช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สอง ค่าสัญญาณ Peak และ RMS มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด หลังจากนั้นค่าสัญญาณจะลดลงและมีระดับค่าสัญญาณสูงกว่าค่าสัญญาณในช่วงที่หนึ่ง ปรากฏการณ์ลักษณะเช่นนี้สอดคล้องกับประสบการณ์ของ Wowk [4] ซึ่งพบว่าถ้าการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองมีระดับสูงขึ้นแบบทันทีทันใดแล้วลดลงแต่ยังคงมีระดับสูงแล้วชุดเฟืองอาจเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากประสบการณ์ของ Wowk แสดงในรูปที่ 5-22 อย่างไรก็ตาม ขณะนี้ยังไม่สามารถหาสาเหตุที่ทำให้ค่าสัญญาณ Peak และ RMS เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด



รูปที่ 5-22 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณจากประสบการณ์ของ Wowk [4] (หน้า 164)

จากการฉายโปรไฟล์ของพื้นเพื่องก่อนและหลังทดลองด้วยเครื่องฉายโปรไฟล์ขนาดขยาย 20 เท่า พบว่าพื้นของเพื่องตามไม่มีการสึกหรอ แต่พื้นของเพื่องขับมีการสึกหรอโดยเฉลี่ยราว 40-50 % และเกิดการสึกหรอของโปรไฟล์ทั้งทางด้านหน้า (ด้านที่พื้นสัมผัสกัน) และทางด้านหลัง แต่การสึกหรอทางด้านหลังจะมีเพียงเล็กน้อย จากข้อเท็จจริงดังกล่าว แสดงว่าพื้นเพื่องกระทบกันรุนแรงจนโปรไฟล์ทางด้านหลังสัมผัสกัน เป็นการยืนยันว่าเกิดการหลุดจากการสัมผัสและมีการกระทบของพื้นเพื่องอย่างรุนแรงจริง จากการฉายโปรไฟล์ยังพบว่าโปรไฟล์ของพื้นที่สึกหรอแล้วมีลักษณะแตกต่างกันทุกพื้นและมีการสึกหรอไม่เท่ากันทุกพื้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการสึกหรอทำให้เพื่องขับมีความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนสูงมากขึ้น ดังนั้นปัญหาการสึกหรอทำให้แนวโน้มการมอดูเลตแอมพลิจูดรุนแรงขึ้นและทำให้แถบความถี่ข้างสูงขึ้น

ยอดเชปส์ตรัม  $1/P$  และ  $1/G$  เป็นค่าสัญญาณที่บอกถึงภาวะเป็นคาบของชุดแถบความถี่ข้างที่เกิดจากปัญหาในเพื่องขับและเพื่องตาม ตามลำดับ ถ้าภาวะเป็นคาบของชุดแถบความถี่ข้างของเพื่องไหนมีมากกว่ายอดเชปส์ตรัมที่ระบุปัญหาของเพื่องนั้นก็จะเด่นกว่า แถบความถี่ข้างเกิดจากการมอดูเลตของความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนสูง การสึกหรอเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเพื่องขับมีปัญหาการสึกหรอมากขึ้น การมอดูเลตจากปัญหาของเพื่องขับก็จะรุนแรงขึ้น แถบความถี่ข้างก็จะสูงตามไปด้วย และจะทำให้ยอด  $1/P$  สูงขึ้น ส่วนยอด  $1/G$  จะต่ำลง เมื่อปัญหาการสึกหรอของเพื่องขับรุนแรงถึงระดับหนึ่งซึ่งมากพอที่จะทำให้ยอด  $1/P$  สูงกว่ายอด  $1/G$  ปรัชญาการณที่ที่เกิดขึ้นในการทดลองวิเคราะห์เชปส์ตรัมคล้ายกับผลการศึกษาการแปลงสัญญาณในบทที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 5-23 ในรูปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยอดเชปส์ตรัม  $1_P$  และ  $1_G$  กับค่าสัดส่วนการมอดูเลตแอมพลิจูดของเพื่อง 1 และเพื่อง 2 ( $AM1/AM2$ ) แกนตั้งเป็นแกมมาของยอดเชปส์ตรัมมีหน่วยเป็น dB แกนนอนเป็นค่าสัดส่วน ( $AM1/AM2$ ) ซึ่งมีสเกลเป็นลอการิทึมสังเกตจากกราฟ ถ้าให้  $AM2$  คงที่ และลองแปรค่า  $AM1$  ให้สูงขึ้น สัดส่วน ( $AM1/AM2$ ) จะสูงขึ้น ยอดเชปส์ตรัมของเพื่อง 1 หรือ  $1_P$  จะมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนยอดเชปส์ตรัมของเพื่อง 2 หรือ  $1_G$  จะมีแนวโน้มต่ำลง ในทางตรงกันข้าม ถ้าให้  $AM2$  คงที่ แต่ลองแปรค่า  $AM1$  ให้ต่ำลง ยอดเชปส์ตรัมของเพื่อง 1 จะมีแนวโน้มต่ำลง ส่วนยอดเชปส์ตรัมของเพื่อง 2 จะมีแนวโน้มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบนี้คล้ายกับที่เกิดขึ้นในการทดลอง กล่าวคือ เมื่อเกิดการสึกหรอของซีพินมากขึ้นการมอดูเลตแอมพลิจูดจะรุนแรงขึ้น ผลการทดลองพบว่า เพื่องขับเกิดการสึกหรอ ส่วนเพื่องตามไม่สึกหรอ ยอดเชปส์ตรัมของเพื่องขับมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนยอดเชปส์ตรัมของเพื่องตามมีแนวโน้มต่ำลง คล้ายกับที่  $AM2$  คงที่แต่  $AM1$  สูงขึ้น แล้วยอดเชปส์ตรัมของเพื่อง 1 มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนยอดเชปส์ตรัมของเพื่อง 2 มีแนวโน้มต่ำลง



รูปที่ 5-23 ความสัมพันธ์ระหว่างยอดเขปส์ตรัม 1\_P และ 1\_G กับค่าสัดส่วน (AM1/AM2) จากผลการศึกษาในบทที่ 4

จากผลการทดลองในช่วงที่หนึ่ง จุดตัดของยอดเขปส์ตรัม 1/P และ 1/G จะคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางในการตรวจวัดสัญญาณ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะผลของเฟสที่แตกต่างกัน ในช่วงที่สอง ยอด 1/P มีการสั่นขึ้นลงอาจจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากผลของสัญญาณรบกวนซึ่งจะมากขึ้นถ้าพื้นเพื่องกระแทกกันรุนแรงขึ้น

เมื่อเฟื่องขับสึกหรอมากขึ้น การมอดูเลตแอมพลิจูดจะรุนแรงขึ้น ทำให้แถบความถี่ข้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นและมีจำนวนยอดมากขึ้น แต่การกระจายแอมพลิจูดของยอดแถบความถี่ข้างเปลี่ยนไปตลอดเวลา กล่าวคือเมื่อเฟื่องขับสึกหรอมากขึ้น ยอดเขปส์ตรัมของเฟื่องขับแต่ละยอดไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ค่าสัญญาณ SBD-P และ SBD-G เป็นแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้างเพียงสองยอด ดังนั้นการใช้ค่าสัญญาณ SBD-P และ SBD-G มาเป็นตัวแทนของชุดแถบความถี่ข้างจึงไม่เหมาะสมกับปัญหาการสึกหรอของชุดเฟื่อง

และจากการทดลองวิเคราะห์สัญญาณยังพบว่า การวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของชุดเฟื่องด้วยเขปส์ตรัมให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและง่ายกว่าการวิเคราะห์สเปกตรัม เนื่องจาก การวิเคราะห์เขปส์ตรัมอ่านค่าสัญญาณเพียงสองค่าแล้วเปรียบเทียบกัน และสังเกตเห็นยอดเขปส์ตรัมของเฟื่องที่สึกหรอได้ชัดเจน ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมต้องอ่านค่าสัญญาณหลายค่าประกอบกัน และจะต้องสังเกตลักษณะสำคัญของสัญญาณหลายอย่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสึกหรอเช่น แถบความถี่ข้าง ชับฮาร์โมนิกของ GMF และแถบความถี่กว้าง ซึ่งไม่สามารถบอกเป็นค่าสัญญาณได้ ทำให้ช้าและยากต่อการวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของเฟื่อง

## 5-6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า สัญญาณการสันสะเทือนของชุดเฟืองในสภาพปกติประกอบด้วย ยอดสเปกตรัม 1xGMF 2xGMF 3xGMF และแถบความถี่ข้างที่มีแอมพลิจูดต่ำ เมื่อชุดเฟืองมีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน สัญญาณการสันสะเทือนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- 1) เมื่อชุดเฟืองเริ่มเกิดการสึกหรอ ยอดสเปกตรัม 2xGMF และ 3xGMF สูงขึ้น
- 2) เมื่อชุดเฟืองมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น ระดับการสันสะเทือนสูงขึ้น แถบความถี่ข้างมีแนวโน้มสูงขึ้น มีแถบความถี่กว้าง และมีซบฮาร์โมนิกของ GMF
- 3) เมื่อชุดเฟืองมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น ยอดเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซ์เท่ากับ  $1/($ ความเร็วรอบหมุน) ของเฟืองที่สึกหรอมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนยอดเซปส์ตรัมที่  $1/($ ความเร็วรอบหมุน) ของเฟืองอีกตัวหนึ่งมีแนวโน้มต่ำลง

การเฝ้าตรวจสัญญาณการสันสะเทือนของชุดเฟืองทำให้สามารถติดตามสภาพการทำงานของชุดเฟืองได้ และจากผลการทดลองพบว่าการสึกหรอในชุดเฟืองให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสัญญาณการสันสะเทือนในรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นในกรณีที่สเปกตรัมและเซปส์ตรัมของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับที่พบจากการทดลอง ก็จะช่วยสนับสนุนฐานได้ว่ามีปัญหการสึกหรอเกิดขึ้นในชุดเฟืองแล้วซึ่งจะทำให้ทราบถึงสภาพการทำงานของชุดเฟืองและเป็นประโยชน์ในการวางแผนบำรุงรักษาเครื่องจักรต่อไป อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของชุดเฟืองด้วยเซปส์ตรัมให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและง่ายกว่าการวิเคราะห์สเปกตรัม

ผลการศึกษาแบบจำลองสัญญาณการสันสะเทือนของชุดเฟืองในบทที่ 4 มีประโยชน์ในการช่วยเสริมความเข้าใจการวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนเมื่อชุดเฟืองมีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์เซปส์ตรัมของสัญญาณ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงผลของการกระแทกกันของฟันเฟืองซึ่งน่าจะมีผลกระทบอย่างมากต่อสัญญาณ ถ้าแบบจำลองได้รับการพัฒนาโดยรวมผลดังกล่าวเข้าไปด้วย แบบจำลองก็น่าจะให้ข้อมูลที่ เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณมากขึ้น