

การศึกษาด้วยระเบียบวิธีวิทยาศาสตร์ในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายแบบเฉพาะที่  
ของคลัทช์ปีกปืนทรงกระบอกในระยะเริ่มต้น



นายฉันทพงศ์ กุลคิดกโพนบูลย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF WAVELET METHOD TO DETECT AN EARLY STAGE  
IN LOCALIZED DEFECT OF CYLINDRICAL BEARING



Mr. Nuntaphong Koondilopiboon

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาด้วยระเบียบวิธีเวฟเลตในการตรวจจับสัญญาณ  
ความเสียหายแบบเฉพาะที่ของคลัทช์ลูกปืนทรงกระบอก  
ในระยะเริ่มต้น

โดย

นายฉันทพงศ์ กุลคิลก ไพบูลย์


สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

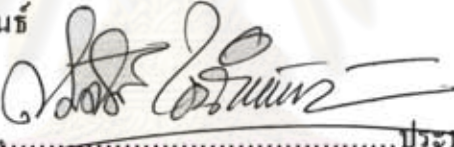
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.ชัย โรจน์ คุณพนิชกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการหลักสูตรปริญญาโท

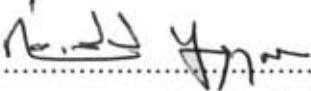
  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัย โรจน์ คุณพนิชกิจ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชนต์ รัตนสุมาวงศ์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

นันทพงศ์ กุลคิลก ไพบูลย์ : การศึกษาด้วยระเบียบวิธีเวฟเลตในการตรวจจับสัญญาณ  
ความเสียหายแบบเฉพาะที่ของดัลบ์ลูกปืนทรงกระบอกในระยะเริ่มต้น. (A STUDY  
OF WAVELET METHOD TO DETECT AN EARLY STAGE IN LOCALIZED  
DEFECT OF CYLINDRICAL BEARING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :  
รศ. ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ, 216 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้มอร์เลตเวฟเลตในการตรวจจับความเสียหายแบบ  
เฉพาะที่ในระยะเริ่มต้นของดัลบ์ลูกปืน โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษา  
ความสามารถของวิธีการต่าง ๆ ในการตรวจจับความเสียหายของดัลบ์ลูกปืน โดยใช้แบบ  
จำลองที่เป็นชุดของการตอบสนองอิมพัลส์ วิธีการตรวจจับที่ศึกษามีอยู่ 3 วิธี คือ การแยกส่วน  
ประกอบด้วยเวฟเลต การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตหรือการทำเอ็นวีลอปสเปกตรัม และการ  
ตรวจจับด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัม โดยการนับแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกับความเสียหายของดัลบ์  
ลูกปืน พบว่าวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตโดยใช้ตัวบ่งชี้สำหรับปรับความถี่กึ่งกลางและ  
ความกว้างของแถบความถี่ผ่านของเวฟเลตที่นำเสนอ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของ  
ตระกูลของฮาร์มอนิกที่ให้ค่าผลรวมมากที่สุดต่อค่าเฉลี่ยในช่วงที่กำหนดของเอ็นวีลอป-  
สเปกตรัมที่ได้จากแต่ละชุดของความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านของเวฟเลต  
ให้ค่าความถูกต้องในการตรวจจับไม่ต่ำกว่า 97% จนถึงค่า SNR=-15dB โดยไม่ขึ้นอยู่กับ  
ลักษณะของสัญญาณความเสียหาย

ในส่วนที่สองเป็นการทดลองใช้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอมาตรวจจับ  
ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของดัลบ์ลูกปืนทรงกระบอก ภายใต้ภาระในแนวรัศมี  
ความเร็วรอบการหมุน และขนาดของความเสียหายที่แตกต่างกัน พบว่าสามารถตรวจจับความ  
เสียหายที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดในกรณีที่เกิดความเสียหายที่รางวิ่งนอก และสามารถตรวจจับความ  
เสียหายที่รางวิ่งในและเม็ดลูกปืนได้บางส่วนเมื่อมีภาระในแนวรัศมีมากกระทำ ทั้งนี้เนื่องจาก  
การมอดูเลตขนาดของสัญญาณความเสียหายซึ่งเกิดจากรอบการเวียนเกิดของอิมพัลส์จากการ  
หมุนของเพลาและกรงเม็ดลูกปืนทำให้เกิดยอดที่เป็นแถบความถี่ข้างของยอดที่เกี่ยวข้องกับ  
ความเสียหายในเอ็นวีลอปสเปกตรัม ส่งผลให้ระเบียบวิธีในการตรวจจับความเสียหายทำงาน  
ผิดพลาด

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต นันทพงศ์ กุลคิลก ไพบูลย์.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2553.....

## 5270353621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ROLLING ELEMENT BEARING / DEFECT DETECTION / ENVELOPE ANALYSIS / MORLET WAVELET / WAVELET FILTERING / OPTIMAL WAVELET INDICATOR

NUNTAPHONG KOONDILOGPIBOON : A STUDY OF WAVELET METHOD TO DETECT AN EARLY STAGE IN LOCALIZED DEFECT OF CYLINDRICAL BEARING. ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAIROTE KUNPANITCHAKIT, 216 PP.

This research studied an application of Morlet wavelet in an early stage of localized bearing defect detection. The study consisted of 2 main parts. The first part investigated the bearing defect detection capability of wavelet decomposition method, wavelet filtering method (envelope spectrum) and Fourier spectrum defect-related sidebands detection method using simulated signals based on impulse response trains. It was shown that wavelet filtering method that worked in conjunction with a proposed indicator for wavelet center frequency and bandwidth adjustment provided the best result. The proposed indicator was the maximum value of the ratio between sum of one harmonic family and average value in a given range of envelope spectrum. The results yielded not less than 97% detection accuracy up to SNR=-15dB regardless of impulse signal features.

In the second part, envelope spectrum with the proposed indicator was used as the detection scheme for defect detection in cylindrical roller bearing under various radial loads, running speeds, defect locations and defect sizes. The scheme was able to detect all cases of outer race defect. Whereas it was able to detect some cases of inner race and roller defect under loaded conditions. The underlying reason of this deviated result was the amplitude modulation due to pulse trains recurrence from the shaft and roller cage rotation that led to occurrence of sidebands around defect-related peaks in envelope spectrum. These sidebands in envelope spectrum made the detection scheme worked less effective.

Department : Mechanical Engineering Student's Signature [Signature]
Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature [Signature]
Academic Year : 2010

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำปรึกษาและความช่วยเหลือในการทำวิจัยในทุกๆด้าน ตลอดจนแนะแนวทางในการวางกรอบและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อความกรุณาที่ท่านมอบให้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ที่ได้ให้ความกรุณามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล ที่ได้ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่างๆในการปรับแก้ชุดทดลอง ตลอดจนถึงการพิจารณาบทความซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยนี้ และ อ.ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ ที่ได้ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และพิจารณาบทความของงานวิจัยชิ้นนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์การวัดในขั้นตอนการปรับตั้งชุดทดลอง ผศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ ที่อนุญาตให้ผู้วิจัยเข้าไปใช้เครื่องมือของห้องปฏิบัติการกลศาสตร์การพังทลาย รวมไปถึงคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อีกมากมาย และ ผศ.ดร.นภคณัย อาชวาคม ที่ให้ความกรุณามาเป็นผู้พิจารณาบทความของผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ และทุนสนับสนุนการวิจัย ตามลำดับ

ขอขอบคุณ คุณโกวิท โกพล และ ว่าที่ร้อยตรีชนพร เสาวรัตน์ชัย สำหรับความช่วยเหลือในด้านงานปฏิบัติการเป็นอย่างดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณจิระนนท์ และ อ.สุธิดา กุลคิลกโปบลูย์ บิดามารดาของผู้เขียน ซึ่งท่านได้คอยสนับสนุน ให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียนในทุกๆด้าน ประโยชน์อันในที่เกิดจากงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยขอมอบให้แก่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณต่อผู้วิจัยทุกท่าน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	น
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1-1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1-2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1-3 สมมติฐานการศึกษา.....	12
1-4 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	13
1-5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	13
1-6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	14
1-7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีแบบจำลองสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน.....	17
2-1 แบบจำลองเกี่ยวกับความเสียหายของตลับลูกปืน.....	17
บทที่ 3 ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณ.....	20
3-1 การแปลงฟูรีเยร์.....	20
3-2 การแปลงเวฟเลต.....	26
3-2-1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง.....	29
นิยามของการแปลงเวฟเลต.....	29
การแปลงกลับเวฟเลต.....	36
พลังงานของสัญญาณ.....	40
การแปลงเวฟเลตในรูปของการแปลงฟูรีเยร์.....	43
เวฟเลตเชิงซ้อน.....	44
การเปรียบเทียบระหว่างการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น และการแปลงเวฟเลต.....	52

3-2-2 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง.....	57
3 - 3 การใช้เวฟเลตเพื่อวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน.....	60
3-3-1 การแยกส่วนด้วยเวฟเลต.....	60
วิธี Inter- and intra-scale denoising.....	62
3-3-2 การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	64
เอ็นวีลอปสเปกตรัม.....	65
ตัวบ่งชี้สำหรับปรับค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลต.....	67
เคอร์โทซิส.....	67
แซนนอนเอนโทรปี.....	68
เวฟเลตที่ใช้ในการกรองสัญญาณ.....	69
เงื่อนไขเพิ่มเติมในการพิจารณาหาพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสม.....	71
การสร้างเอ็นวีลอปของสัญญาณ.....	71
3-3-3 การกรองสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณ.....	72
การกรองสัญญาณรบกวนก่อนการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	72
การปรับปรุงสัญญาณในส่วนหลังการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	74
3 - 4 สรุปเปรียบเทียบการใช้เวฟเลตในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน.....	76
3-4-1 ผลที่ได้จากฟูรีเยร์สเปกตรัม.....	77
3-4-2 ผลที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	77
3-4-3 ผลที่ได้จากการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	79
บทที่ 4 การศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน.....	83
4 - 1 การศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน.....	83
4-1-1 การศึกษาผลที่ได้จากแบบจำลองของสัญญาณ.....	83
4-1-2 การศึกษาผลที่ได้จากการทดลองวัดสัญญาณความเสียหายจริง.....	84
4 - 2 รูปแบบการทดลอง.....	84
4-2-1 การจำลองสัญญาณ.....	84
สมการที่ใช้ในแบบจำลอง.....	84
ค่า signal to noise ratio.....	85
การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณใน โดเมนเวลา.....	86
การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณใน โดเมนความถี่.....	86
การทำออโตรีเกรสซีฟ.....	86
ค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลต.....	87



การปรับพารามิเตอร์สำหรับการแยกส่วนประกอบ ของสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	87
การปรับพารามิเตอร์สำหรับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	87
ตัวบ่งชี้เพื่อใช้หาพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสม สำหรับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	88
สรุปขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนของการจำลองสัญญาณ.....	88
4-2-2 ส่วนของการทดลองวัดสัญญาณจริง.....	88
ชุดทดลองดัดลูกปืน.....	89
ชุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	89
ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนดัดลูกปืน ภาระในแนวรัศมี และความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง.....	89
ตำแหน่งการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	90
การปรับตั้งค่าสำหรับการเก็บข้อมูล.....	90
ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนของการทดลองวัดสัญญาณจริง.....	91
บทที่ 5 ผลการศึกษาที่ได้จากสัญญาณความเสียหายของดัดลูกปืน.....	92
5 - 1 ผลการศึกษาที่ได้จากการจำลองสัญญาณ.....	92
5-1-1 ผลเนื่องจากตัวสัญญาณ.....	92
ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณ.....	92
5-1-2 ผลของสัญญาณรบกวน.....	102
5-1-3 ผลของความถี่กึ่งกลาง และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ของตัวกรองเวฟเลต.....	111
5-1-4 ผลของอัตราส่วนระหว่างความถี่กึ่งกลาง และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ของการแยกส่วนประกอบสัญญาณ.....	116
5-1-5 ตัวบ่งชี้เพื่อการเลือกพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสม.....	118
5-1-6 ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในการปรับพารามิเตอร์ ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสม.....	130
5-1-7 ผลของสัญญาณที่คาดเดาได้ที่มีต่อการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย ด้วยเวฟเลต และการใช้ข้อโครีเกรสซิฟเพื่อลดสัญญาณส่วนดังกล่าว.....	134
5-1-8 ผลของ sparse code shrinkage ที่มีต่อการตรวจจับสัญญาณความ เสียหายด้วยการกรองสัญญาณ โดยใช้ตัวกรองเวฟเลต.....	143

5-1-9	สรุปเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของฟูรีเยร์สเปกตรัม การแยกส่วนประกอบ และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเล็ต.....	147
5 - 2	ผลการศึกษาการทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากตลับลูกปืน.....	155
5-2-1	ผลการศึกษาในกรณีที่ไม่มีสัญญาณความเสียหาย.....	156
	จำนวนแถบความถี่ข้างที่ตรวจพบในฟูรีเยร์สเปกตรัมในช่วงที่กำหนด.....	161
5-2-2	การสร้างรอยความเสียหายในตลับลูกปืน.....	162
5-2-3	ลักษณะของสัญญาณความเสียหาย.....	163
5-2-4	ผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย.....	170
	ความเสียหายที่รางวิ่งนอก.....	170
	ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งนอกด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัม.....	176
	ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งนอกด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม.....	179
	ความเสียหายที่รางวิ่งใน.....	180
	ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งในด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัม.....	185
	ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งในด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม.....	189
	ความเสียหายที่เม็ดลูกปืน.....	191
	ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่เม็ดลูกปืนด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัม.....	196
	ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่เม็ดลูกปืนด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม.....	199
5-2-5	สรุปผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะสัญญาณ และการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย.....	201
บทที่ 6	การสรุปผลของวิทยานิพนธ์.....	203
6 - 1	สรุปผลการศึกษาด้วยการจำลองสัญญาณ.....	203
6 - 2	สรุปผลการศึกษาการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนจริง.....	205
6 - 3	ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป.....	206
	รายการอ้างอิง.....	208

ภาคผนวก.....	211
ภาคผนวก ก รายละเอียดของคลังลูกปืนที่ใช้ในการทดลอง.....	212
ภาคผนวก ข รายละเอียดของหัววัดสัญญาณการสันสะเทือน.....	214
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	216



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 1-1	กรอบเวลาของขั้นตอนการดำเนินงาน.....	15
ตารางที่ 3-1	ค่าสัมประสิทธิ์ $\alpha_i$ ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักชนิดต่าง ๆ .....	24
ตารางที่ 4-1	พารามิเตอร์ของตัวสัญญาณที่ถูกปรับ .....	85
ตารางที่ 4-2	ค่าความถี่ของคลัทช์ลูกปืน SKF รุ่น NU/NUP 305 ECP.....	85
ตารางที่ 4-3	ค่า signal to noise ratioที่ใช้ในการจำลองสัญญาณ .....	85
ตารางที่ 4-4	การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณจำลองในโดเมนเวลา.....	86
ตารางที่ 4-5	การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณจำลองในโดเมนความถี่.....	86
ตารางที่ 4-6	ค่า $p_{max}$ ของสัญญาณจำลองที่อัตราเร็วรอบการหมุนของเพลาดังต่าง ๆ .....	86
ตารางที่ 4-7	การปรับตั้งพารามิเตอร์สำหรับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	87
ตารางที่ 4-8	การปรับตั้งพารามิเตอร์สำหรับการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	87
ตารางที่ 4-9	ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนคลัทช์ลูกปืน ภาระในแนวรัศมี และความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง.....	89
ตารางที่ 4-10	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	90
ตารางที่ 5-1	สรุปค่า $\beta$ ที่ใช้ของแต่ละ $f_0$ ในการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	118
ตารางที่ 5-2	ประเภทของผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย .....	126
ตารางที่ 5-3	ความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายและขอบเขตในการตรวจจับ ที่ใช้ในการทดลอง.....	156

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2-1	ส่วนประกอบและการกระจายตัวของภาระบนตลับลูกปืน	17
รูปที่ 2-2	ตัวอย่างสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรางวิ่งนอกของตลับลูกปืน	18
รูปที่ 2-3	ผลของการมอดูเลตขนาดในโดเมนเวลาของสัญญาณความเสียหายของรางวิ่งใน	18
รูปที่ 2-4	ค่าทางมิติต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณความถี่ในการเกิดอิมพัลส์ของตลับลูกปืน	19
รูปที่ 3-1	สัญญาณในโดเมนเวลาและผลการแปลงฟูริเยร์	22
รูปที่ 3-2	ผลของการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด	23
รูปที่ 3-3	ความถี่หลอกที่เกิดขึ้นจากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ไม่เหมาะสม	23
รูปที่ 3-4	ความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของหน้าต่างในโดเมนเวลา	24
รูปที่ 3-5	ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักในโดเมนเวลา	25
รูปที่ 3-6	ลักษณะการเป็นตัวกรองในโดเมนความถี่ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก	25
รูปที่ 3-7	ผลของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่มีต่อสเปกตรัมของสัญญาณไซน์	26
รูปที่ 3-8	เวฟเลตรูปแบบต่าง ๆ	27
รูปที่ 3-9	ผลการปรับเปลี่ยนที่เกิดขึ้นกับเวฟเลต	27
รูปที่ 3-10	ขั้นตอนการแปลงเวฟเลต	28
รูปที่ 3-11	ผลของสเกลที่มีต่อเวฟเลต	30
รูปที่ 3-12	ตัวเวฟเลตเมื่อเทียบกับสัญญาณ	31
รูปที่ 3-13	ตัวเวฟเลตเมื่อเทียบกับสัญญาณไซน์	32
รูปที่ 3-14	ผลของการแปลงเวฟเลตที่เกี่ยวข้องกับคาบของสัญญาณ	33
รูปที่ 3-15	การแปลงเวฟเลตของสัญญาณที่มีลักษณะภายในแยกออกจากกัน	34
รูปที่ 3-16	การใช้เวฟเลตในการตรวจจับความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ	35
รูปที่ 3-17	ผลของสเกลที่มีต่อการตรวจจับความไม่ต่อเนื่อง	36
รูปที่ 3-18	สัญญาณประกอบที่ใช้กับตัวกรองเวฟเลต	37
รูปที่ 3-19	การกรองสัญญาณตามรูปที่ 3-18(ง) ด้วยเม็ทริกกันแฮทเวฟเลต	38
รูปที่ 3-20	ผลการกรองสัญญาณรบกวนจากรูปที่ 3-18(ง) ออก	39
รูปที่ 3-21	การใช้ค่าโมดูลัสสูงสุดในการพิจารณาสัญญาณ	40
รูปที่ 3-22	ตัวอย่างการวิเคราะห์พลังงานของสัญญาณด้วยเวฟเลต	42
รูปที่ 3-23	ความหมายของการแปลงเวฟเลตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่	44
รูปที่ 3-24	ลักษณะของมอร์เลตเวฟเลต	46

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3-25	ผลการแปลงสัญญาณไซน์สองความถี่.....	47
รูปที่ 3-26	สัญญาณไซน์ที่ถูกเลื่อนไปครึ่งคาบที่กึ่งกลางความยาวสัญญาณ.....	48
รูปที่ 3-27	สัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนความถี่ที่กึ่งกลางของความยาวสัญญาณ.....	49
รูปที่ 3-28	ผลของการเปลี่ยน $f_0$ ที่มีต่อผลการแปลงสัญญาณ.....	50
รูปที่ 3-29	สเปกตรัมกำลังของการแปลงเวฟเลตเทียบกับสเปกตรัมกำลังของฟูรีเยร์.....	51
รูปที่ 3-30	การแปลงสัญญาณพัลส์และสัญญาณพัลส์ที่มียอดแหลมประกอบ.....	52
รูปที่ 3-31	คุณลักษณะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของเวฟเลตและการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น.....	54
รูปที่ 3-32	เปรียบเทียบผลการแปลงเวฟเลตและการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น.....	57
รูปที่ 3-33	หลักการเบื้องต้นของการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง.....	58
รูปที่ 3-34	การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องของผลรวมของสัญญาณไซน์และสัญญาณรบกวน.....	58
รูปที่ 3-35	การแปลงเวฟเลตโดยใช้การกรองแบบออกเทคเพิลเตอร์แบงก์.....	59
รูปที่ 3-36	ขั้นตอนการแปลงและแปลงกลับเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง.....	59
รูปที่ 3-37	วิธีการใช้เวฟเลตเพื่อการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน.....	60
รูปที่ 3-38	สัญญาณจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	61
รูปที่ 3-39	ขั้นตอนการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยวิธีการแยกส่วนด้วยเวฟเลต.....	62
รูปที่ 3-40	ผลการแปลงเวฟเลตของสัญญาณจำลอง.....	63
รูปที่ 3-41	สัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับเวฟเลต.....	63
รูปที่ 3-42	ขั้นตอนโดยทั่วไปของการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	65
รูปที่ 3-43	ขนาดของฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณจำลอง.....	66
รูปที่ 3-44	การใช้เอ็นวีลอปสเปกตรัมในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน.....	66
รูปที่ 3-45	การแผ่กว้างของ PDF ของผลรวมของสัญญาณรบกวนและอิมพัลส์.....	67
รูปที่ 3-46	ค่าเคอร์โทซิสของสัญญาณที่มีลักษณะต่าง ๆ.....	68
รูปที่ 3-47	ค่าแซนนอนเอนโทรปี เมื่อ $p_n$ มีการกระจายตัวต่างกัน.....	68
รูปที่ 3-48	เปรียบเทียบลักษณะของอิมพัลส์ทางกลและมอร์เลตเวฟเลต.....	70
รูปที่ 3-49	แสดงตัวอย่างมอร์เลตเวฟเลต.....	71
รูปที่ 3-50	ตัวอย่างของสัญญาณที่ถูกกรองด้วยวิธีอโทรีเกรสซีฟ.....	73
รูปที่ 3-51	ค่าเคอร์โทซิสของส่วนตกค้างของรูปที่ 3-50 ที่จำนวนพจน์ $p$ ต่าง ๆ.....	73
รูปที่ 3-52	ส่วนตกค้างของสัญญาณที่มีค่าเคอร์โทซิสมากที่สุด.....	74

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3-53	ลักษณะสัญญาณและฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น.....	75
รูปที่ 3-54	สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยมอร์เลตต์เวฟเลตก่อนและหลังทำ SCS.....	75
รูปที่ 3-55	สัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบ.....	76
รูปที่ 3-56	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณ.....	77
รูปที่ 3-57	ผลของการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	78
รูปที่ 3-58	เอ็นวีลอปของสัญญาณที่ผ่านการกรอง.....	78
รูปที่ 3-59	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่ผ่านการกรอง.....	79
รูปที่ 3-60	มอดุลัสพล็อตของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต.....	80
รูปที่ 3-61	สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต (ส่วนจริง).....	80
รูปที่ 3-62	ผลการลดส่วนของสัญญาณรบกวน.....	81
รูปที่ 3-63	ผลการตรวจจับความเสียหาย.....	81
รูปที่ 4-1	ชุดทดลองตลับลูกปืน.....	89
รูปที่ 4-2	ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	90
รูปที่ 5-1	สัญญาณในโดเมนเวลาที่มีอัตราส่วนการหน่วงต่างกัน.....	92
รูปที่ 5-2	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-1.....	93
รูปที่ 5-3	ขั้นตอนการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	94
รูปที่ 5-4	สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต (ส่วนจริง).....	95
รูปที่ 5-5	เอ็นวีลอปของสัญญาณในรูปที่ 5-4.....	96
รูปที่ 5-6	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-1.....	97
รูปที่ 5-7	ขั้นตอนการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต.....	98
รูปที่ 5-8	พล็อตของสัมประสิทธิ์การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต (ส่วนจริง).....	99
รูปที่ 5-9	พล็อตของมอดุลัสของสัมประสิทธิ์การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต.....	99
รูปที่ 5-10	พล็อตของสัมประสิทธิ์การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต (ส่วนจริง) ที่ถูกปรับค่าแล้ว.....	100
รูปที่ 5-11	สัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับสัมประสิทธิ์ที่ถูกปรับค่าแล้วในรูปที่ 5-10.....	101
รูปที่ 5-12	สัญญาณที่ใช้ในการศึกษาที่ระดับของสัญญาณรบกวนต่าง ๆ.....	102
รูปที่ 5-13	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของรูปที่ 5-12.....	103
รูปที่ 5-14	สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตของสัญญาณในรูปที่ 5-12.....	104
รูปที่ 5-15	เอ็นวีลอปของสัญญาณในรูปที่ 5-14.....	104
รูปที่ 5-16	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-14.....	105
รูปที่ 5-17	สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตของสัญญาณ.....	106
รูปที่ 5-18	มอดุลัสของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต.....	107

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5-19	ผลที่ได้จากการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในรูปที่ 5-17.....	108
รูปที่ 5-20	สัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับเวฟเลตของสัญญาณในรูปที่ 5-19.....	109
รูปที่ 5-21	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ $f_n=4000\text{Hz}$ , $\xi=0.2$ ไม่มีสัญญาณรบกวน.....	112
รูปที่ 5-22	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ $f_n=4000\text{Hz}$ , $\xi=0.2$ SNR=-10dB.....	112
รูปที่ 5-23	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ $f_n=4000\text{Hz}$ , $\xi=0.2$ SNR=-15dB.....	113
รูปที่ 5-24	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ $f_n=8000\text{Hz}$ , $\xi=0.6$ ไม่มีสัญญาณรบกวน.....	113
รูปที่ 5-25	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ $f_n=8000\text{Hz}$ , $\xi=0.6$ SNR=-10dB.....	114
รูปที่ 5-26	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ $f_n=8000\text{Hz}$ , $\xi=0.6$ SNR=-15dB.....	114
รูปที่ 5-27	ผลการตรวจจับด้วยวิธีแยกส่วนประกอบสัญญาณของสัญญาณ $f_n=4000\text{Hz}$ , $\xi=0.2$ ที่ SNR ต่าง ๆ กัน.....	116
รูปที่ 5-28	ผลการตรวจจับด้วยวิธีแยกส่วนประกอบสัญญาณของสัญญาณ $f_n=8000\text{Hz}$ , $\xi=0.6$ ที่ SNR ต่าง ๆ กัน.....	117
รูปที่ 5-29	สรุปขั้นตอนในการหาพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสม.....	119
รูปที่ 5-30	ค่าเคอร์โทซิสของเอ็นวีลอปของสัญญาณ ที่ SNR ต่าง ๆ.....	120
รูปที่ 5-31	ค่าแซนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปของสัญญาณ ที่ SNR ต่าง ๆ.....	121
รูปที่ 5-32	เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่ SNR ต่าง ๆ.....	123
รูปที่ 5-33	ขั้นตอนในการประเมินประสิทธิภาพของตัวบ่งชี้.....	124
รูปที่ 5-34	ตัวอย่างวิธีการหาอคตในเอ็นวีลอปสเปกตรัม.....	125
รูปที่ 5-35	ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้.....	126
รูปที่ 5-36	ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้แซนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้.....	127
รูปที่ 5-37	อัตราการเกิดผลการเตือนที่ผิดพลาดของแซนนอนเอนโทรปีและเคอร์โทซิส.....	128
รูปที่ 5-38	ตัวอย่างวิธีการตัวบ่งชี้ที่น่าเสนอ.....	130
รูปที่ 5-39	ขั้นตอนในการหาพารามิเตอร์ $f_0$ และ $\beta$ ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่น่าเสนอ.....	131
รูปที่ 5-40	ค่าตัวบ่งชี้ที่น่าเสนอของสัญญาณความเสียหายที่ SNR ต่าง ๆ.....	132
รูปที่ 5-41	ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่น่าเสนอ.....	133
รูปที่ 5-42	สัญญาณในรูปที่ 5-12 เมื่อรวมกับส่วนที่คาดเดาได้ที่ SDR=-10dB.....	135
รูปที่ 5-43	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-42.....	136
รูปที่ 5-44	ค่าตัวบ่งชี้ที่น่าเสนอของสัญญาณในรูปที่ 5-42.....	136
รูปที่ 5-45	เปรียบเทียบเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากค่าสูงสุดในรูปที่ 5-44 กับที่ได้ จากการกรองที่ $f_0 = f_d$ .....	137
รูปที่ 5-46	ความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายที่ SDR= $\infty$ และ -13dB.....	139



รูปที่	หน้า
รูปที่ 5-47	ขั้นตอนในการทำออโตรีเกรสซีฟ..... 140
รูปที่ 5-48	ตัวอย่างผลที่ได้จากการทำออโตรีเกรสซีฟของสัญญาณ..... 141
รูปที่ 5-49	ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ ออโตรีเกรสซีฟ..... 142
รูปที่ 5-50	สรุปขั้นตอนการทำ sparse code shrinkage..... 143
รูปที่ 5-51	สัญญาณที่ผ่านการกรองและเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ไม่ผ่านและผ่าน SCS..... 144
รูปที่ 5-52	สัญญาณที่ผ่านการกรองและเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ไม่ผ่านและผ่าน SCS..... 145
รูปที่ 5-53	ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ SCS..... 145
รูปที่ 5-54	สรุปขั้นตอนในการหาแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัม..... 147
รูปที่ 5-55	ตัวอย่างการหาแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัม..... 148
รูปที่ 5-56	ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณ $f_n = 4000\text{Hz}$ , $\xi = 0.6$ ..... 148
รูปที่ 5-57	ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณ $f_n = 6000\text{Hz}$ , $\xi = 0.4$ ..... 149
รูปที่ 5-58	ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณ $f_n = 8000\text{Hz}$ , $\xi = 0.2$ ..... 149
รูปที่ 5-59	ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณรบกวน..... 149
รูปที่ 5-60	สรุปความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย ด้วยการหาแถบความถี่ข้าง..... 150
รูปที่ 5-61	ขั้นตอนการประเมินความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย ด้วยการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต..... 151
รูปที่ 5-62	แสดงตัวอย่างการหาคาบความเสียหายของผลการแปลงกลับเวฟเลต..... 152
รูปที่ 5-63	ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณ $f_n = 4000\text{Hz}$ , $\xi = 0.6$ ..... 152
รูปที่ 5-64	ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณ $f_n = 6000\text{Hz}$ , $\xi = 0.4$ ..... 152
รูปที่ 5-65	ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณ $f_n = 8000\text{Hz}$ , $\xi = 0.2$ ..... 152
รูปที่ 5-66	ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณรบกวน..... 153
รูปที่ 5-67	สรุปความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย ด้วยการแยกส่วนประกอบสัญญาณ..... 153
รูปที่ 5-68	สรุปเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย..... 154
รูปที่ 5-69	ตลับลูกปืนในสภาพปกติ..... 157
รูปที่ 5-70	waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดตลับลูกปืนที่สภาพดี..... 158

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5-71	สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-70: (ก)..... 158
รูปที่ 5-72	waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคลื่นที่สภาพดี..... 159
รูปที่ 5-73	สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-72..... 159
รูปที่ 5-74	อัตราการเตือนที่ผิดพลาดที่ภาระในแนวรัศมี 102N..... 160
รูปที่ 5-75	อัตราการเตือนที่ผิดพลาดที่ภาระในแนวรัศมี 830N..... 160
รูปที่ 5-76	อัตราการเตือนที่ผิดพลาดที่ภาระในแนวรัศมี 1558N..... 160
รูปที่ 5-77	ฮิสโทแกรมของแถบความถี่ข้างที่พบเมื่อพิจารณา ระยะแถบความถี่ข้างที่ BPOR..... 161
รูปที่ 5-78	ฮิสโทแกรมของแถบความถี่ข้างที่พบเมื่อพิจารณา ระยะแถบความถี่ข้างที่ BPIR..... 161
รูปที่ 5-79	ฮิสโทแกรมของแถบความถี่ข้างที่พบเมื่อพิจารณา ระยะแถบความถี่ข้างที่ BSF..... 161
รูปที่ 5-80	ตัวอย่างการสร้างรอยความเสียหาย..... 162
รูปที่ 5-81	ความเสียหายที่วางรังในเมื่อขยายด้วยกำลังขยาย 50 เท่า..... 162
รูปที่ 5-82	ความเสียหายที่วางรังนอกเมื่อขยายด้วยกำลังขยาย 50 เท่า..... 163
รูปที่ 5-83	ความเสียหายที่เม็ดคลื่นเมื่อขยายด้วยกำลังขยาย 50 เท่า..... 163
รูปที่ 5-84	สัญญาณความเสียหายของวางรังนอกในแนวตั้งและแนวระดับ..... 164
รูปที่ 5-85	สัญญาณความเสียหายของวางรังในแนวตั้งและแนวระดับ..... 165
รูปที่ 5-86	สัญญาณความเสียหายของเม็ดคลื่นในแนวตั้งและแนวระดับ..... 166
รูปที่ 5-87	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-84..... 167
รูปที่ 5-88	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-85..... 168
รูปที่ 5-89	ฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-86..... 169
รูปที่ 5-90	ส่วนที่ถูกขยายของฟูรีเยร์สเปกตรัมรูปที่ 5-87 - 5-89..... 170
รูปที่ 5-91	waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดคลื่นที่มีความเสียหาย 0.11mm ที่วางรังนอก..... 171
รูปที่ 5-92	สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-91..... 171
รูปที่ 5-93	waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคลื่นที่มีความเสียหาย 0.11mm ที่วางรังนอก..... 172
รูปที่ 5-94	สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-93..... 172

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5-95 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลบูคปิ่นที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่รางวิ่งนอก.....	174
รูปที่ 5-96 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-95.....	174
รูปที่ 5-97 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลบูคปิ่นที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่รางวิ่งนอก.....	175
รูปที่ 5-98 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-97.....	175
รูปที่ 5-99 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N.....	176
รูปที่ 5-100 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N.....	176
รูปที่ 5-101 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N.....	177
รูปที่ 5-102 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน.....	178
รูปที่ 5-103 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน.....	178
รูปที่ 5-104 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน.....	178
รูปที่ 5-105 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 102N.....	179
รูปที่ 5-106 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 830N.....	179
รูปที่ 5-107 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 1558N.....	180
รูปที่ 5-108 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลบูคปิ่นที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่รางวิ่งใน.....	181
รูปที่ 5-109 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-108.....	181
รูปที่ 5-110 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลบูคปิ่นที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่รางวิ่งใน.....	182
รูปที่ 5-111 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-110.....	182
รูปที่ 5-112 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลบูคปิ่นที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่รางวิ่งใน.....	183
รูปที่ 5-113 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-112.....	183
รูปที่ 5-114 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลบูคปิ่นที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่รางวิ่งใน.....	184
รูปที่ 5-115 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-114.....	184
รูปที่ 5-116 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N.....	185

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5-117 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N	185
รูปที่ 5-118 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N	186
รูปที่ 5-119 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน	187
รูปที่ 5-120 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน	187
รูปที่ 5-121 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน	187
รูปที่ 5-122 ผลของการมอดูเลตขนาดที่มีต่อเอ็นวิลอปปสเปกตรัม	188
รูปที่ 5-123 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 102N	189
รูปที่ 5-124 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 830N	189
รูปที่ 5-125 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 1558N	190
รูปที่ 5-126 การตรวจจับแถบความถี่ข้างที่เกิดจากความเสียหายที่รางวิ่งในขนาด 0.10mm	190
รูปที่ 5-127 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่เม็ดดัลลูปปืน	192
รูปที่ 5-128 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-127	192
รูปที่ 5-129 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่เม็ดดัลลูปปืน	193
รูปที่ 5-130 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-129	193
รูปที่ 5-131 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.12mm ที่เม็ดดัลลูปปืน	194
รูปที่ 5-132 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-131	194
รูปที่ 5-133 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.12mm ที่เม็ดดัลลูปปืน	195
รูปที่ 5-134 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-133	195
รูปที่ 5-135 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดดัลลูปปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N	196
รูปที่ 5-136 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดดัลลูปปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N	196
รูปที่ 5-137 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดดัลลูปปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N	197
รูปที่ 5-138 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดดัลลูปปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน	197

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5-139 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็คลูกปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน.....	198
รูปที่ 5-140 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็คลูกปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน.....	198
รูปที่ 5-141 ผลจากการเพิ่มความละเอียดในเอ็นวีลอปสเปกตรัม.....	199
รูปที่ 5-142 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 102N.....	200
รูปที่ 5-143 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 830N.....	200
รูปที่ 5-144 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 1558N.....	200
รูปที่ 5-145 ผลของความถี่ข้าง FTF ที่มีต่อการตรวจจับด้วยการนับแถบความถี่ข้าง ในฟูรีเยร์สเปกตรัม.....	201
รูปที่ ก-1 ตลับลูกปืนรุ่น 2207 EKTN9 สำหรับชุดให้ภาระและเพลาด้านที่ไม่ได้วัดสัญญาณ.....	212
รูปที่ ก-2 ตลับลูกปืนรุ่น N 305 ECP สำหรับสร้างรอยความเสียหายที่รางวิ่งนอก และเม็คลูกปืน.....	212
รูปที่ ก-3 ตลับลูกปืนรุ่น NUP 305 ECP สำหรับสร้างรอยความเสียหายที่รางวิ่งใน.....	213
รูปที่ ข-1 รายละเอียดของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง.....	214
รูปที่ ข-2 การตอบสนองเชิงความถี่ของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง.....	214
รูปที่ ข-3 รายละเอียดของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวระดับ.....	215
รูปที่ ข-4 การตอบสนองเชิงความถี่ของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวระดับ.....	215

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	คือ สเกลของเวฟเลต
$a_0$	คือ สเกลที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของชุดดัดลูกปืนและ โครงสร้างที่รองรับ
$A_i$	คือ ขนาดของโหมดที่ $i$ ของการสั่นสะเทือนของชุดดัดลูกปืนและ โครงสร้างที่รองรับ
$b$	คือ ตำแหน่งการเลื่อนของเวฟเลต
$BD$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดลูกปืน
$BF$	คือ ความถี่ของดัดลูกปืน (BPOR, BPIR, BSF)
BPIR	คือ ความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่วางวงใน
BPOR	คือ ความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่วางวงนอก
BSF	คือ ความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่เม็ดลูกปืน
$c'$	คือ ค่าคงตัวสำหรับการแปลงกลับมอร์เลตเวฟเลตที่ใช้ปริพันธ์ชั้นเดียว
$cA$	คือ การประมาณของการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง
$cD$	คือ รายละเอียดของการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง
$C(a, b)$	คือ มอดูลัสของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต ที่สเกล $a$ และตำแหน่งการเลื่อนของเวฟเลต $b$
$C_g$	คือ ค่าคงตัวของการยอมรับ (admissibility constant)
$d$	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ $x(t)$
$e(t)$	คือ ส่วนตกค้างของสัญญาณ
$E$	คือ พลังงานของฟังก์ชันเวฟเลต $\psi(t)$
$E(a)$	คือ การกระจายพลังงานในแต่ละสเกล
$E(a, b)$	คือ สเกลโลแกรม (scalogram)
$E_F(f)$	คือ พลังงานของฟูรีเยร์สเปกตรัม
$E_w(f)$	คือ การกระจายพลังงานในแต่ละความถี่ของเวฟเลต
$ES$	คือ เอ็นวีลอปสเปกตรัม
$\overline{ES}$	คือ ค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัม
$f, f_0$	คือ ความถี่ฐานของการแปลงฟูรีเยร์
$f_0$	คือ ความถี่กึ่งกลางของตัวกรองเวฟเลต
$f_c$	คือ ความถี่กึ่งกลางแถบความถี่ผ่านของสเปกตรัมพลังงานของเวฟเลตแม่
$f_i$	คือ ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ $i$ ของการสั่นสะเทือนของชุดดัดลูกปืนและ โครงสร้างที่รองรับ
$f_{max}$	คือ ความถี่ใช้งานสูงสุด

$f_n$	คือ ความถี่ธรรมชาติแบบไม่มีการหน่วง
$f_r$	คือ อัตราเร็วเชิงมุมของเพลลา
$f_s$	คือ ความถี่ในการสุ่มข้อมูลสัญญาณ
$F(f, b)$	คือ ผลการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้นที่ความถี่ $f$ และเวลา $b$
$h(t)$	คือ ฟังก์ชันการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของระบบอันดับสองที่มีหนึ่งองศาอิสระ
$h(t - b)$	คือ ฟังก์ชันหน้าต่าง (window function)
$h_{f,b}(t)$	คือ อะตอมของฟูรีเยร์แบบมีหน้าต่าง (windowed Fourier atom)
$HF_i^j$	คือค่ายอดตัวที่ $i$ ของของตระกูลฮาร์โมนิกที่ $j$ ที่ตรวจพบในเอ็นวีลอปสเปกตรัม
$k$	คือ พจน์ย้อนหลังที่ $k$ ในออโตรีเกรสซีฟ
$kurt$	คือ ค่าเคอร์โทซิส
$m$	คือ ค่าเฉลี่ยของ $C(a, b)$
$n$	คือ จำนวนเมล็ดลูกปืน
$n(t)$	คือ สัญญาณรบกวน
$N$	คือ จำนวนจุดจากตัวอย่างข้อมูลที่สุ่มมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลา
$p$	คือ คาบของสัญญาณไซน์
$p$	คือ จำนวนพจน์ในออโตรีเกรสซีฟ
$p(x)$	คือ ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น
$p_i$	คือ การกระจายตัวของความน่าจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง
$para$	คือ ตัวบ่งชี้สำหรับปรับมอร์เลต์เวฟเลตที่นำเสนอขึ้นมาใหม่
$P_F(f)$	คือ สเปกตรัมกำลังของการแปลงฟูรีเยร์
$P_W(f)$	คือ สเปกตรัมกำลังของการแปลงเวฟเลต
$PD$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของดัลลลูกปืน
$r_{yy}[\tau]$	คือ ออโตคอร์รีเลชัน (autocorrelation) ที่มีการเลื่อน (lag) เท่ากับ $\tau$
$s_t$	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $C(a, b)$
$sign(y)$	คือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย
$S(a, b)$	คือ ตัวแปรสำหรับการตัดสินใจในการลดส่วนของสัญญาณรบกวนด้วยการแยกส่วนด้วยเวฟเลต
$S(b), S(t)$	คือ เอ็นวีลอปหรือซอง (envelope) ของสัญญาณที่ผ่านการกรอง
$SE(p)$	คือ แชนนอนเอนโทรปี (Shannon entropy)
$t_n$	คือ เวลา ณ การสุ่มตัวอย่างข้อมูลครั้งที่ $n$
$T$	คือ คาบ
$T_r$	คือ คาบในการเกิดของอิมพัลส์

- $T(a, b)$  คือ สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต ที่สเกล  $a$  และตำแหน่งการเลื่อนของเวฟเลต  $b$
- $T'(a, b)$  คือ สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่ถูกปรับค่าแล้ว
- $w(a)$  คือ ฟังก์ชันน้ำหนักของแต่ละสเกล
- $w(t)$  คือ ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function)
- $x(t)$  คือ สัญญาณในโดเมนเวลา
- $x_f(t)$  คือ ส่วนของสัญญาณความเสียหายที่ผ่านการกรอง
- $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต
- $X_n$  คือ ฟิวรีเยสเปกตรัม
- $y(t)$  คือ สัญญาณที่ประกอบไปด้วยสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน  $x(t)$  และสัญญาณรบกวน  $n(t)$
- $y_f(t)$  คือ สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต
- $y'(t)$  คือ สัญญาณที่ผ่านการลดส่วนของสัญญาณรบกวนด้วยการแยกส่วนด้วยเวฟเลต
- $\hat{y}(t)$  คือ ส่วนที่คาดเดาได้ของสัญญาณจากออโตรีเกรสซีฟ
- $\beta$  คือ มุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างรางวิ่งกับเม็ดลูกปืน
- $\beta$  คือ ความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่นิยามจากช่วงที่สเปกตรัมพลังงานมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด
- $\Delta t$  คือ ช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ (sampling time)
- $\mu(a)$  คือ เกณฑ์สำหรับการตัดสินใจในการลดส่วนของสัญญาณรบกวนด้วยการแยกส่วนด้วยเวฟเลต
- $\xi_i$  คือ อัตราส่วนการหน่วงของโหมดที่  $i$  ของการสั่นสะเทือนของชุดตลับลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ
- $\sigma$  คือ พารามิเตอร์ปรับความกว้างของ  $\hat{\psi}(f)$
- $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวน  $n(t)$
- $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในช่วงที่กำหนด
- $\sigma^2(a)$  คือ ค่าวาเรียนซ์ของเวฟเลต (wavelet variance)
- $\sigma_f$  คือ การกระจายตัวของเวฟเลตในโดเมนความถี่
- $\sigma_i$  คือ อัตราการลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลของโหมดที่  $i$  ของการสั่นสะเทือนของชุดตลับลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ ( $\sigma_i = 2\pi\xi_i f_i$ )
- $\sigma_t$  คือ การกระจายตัวของเวฟเลตในโดเมนเวลา
- $\psi(t)$  คือ ฟังก์ชันเวฟเลตแม่
- $\psi_{a,b}(t)$  คือ ฟังก์ชันเวฟเลตลูกที่สเกล  $a$  และตำแหน่งการเลื่อน  $b$
- $\hat{\psi}(f)$  คือ การแปลงฟูรีเยร์ของ  $\psi(t)$



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1-1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การตรวจสอบสัญญาณความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนมีความสำคัญอย่างมากในงานบำรุงรักษาเครื่องจักรกล เนื่องจากทำให้รู้ถึงความผิดปกติของเครื่องจักรและสาเหตุของความผิดปกติเหล่านั้นซึ่งสามารถนำไปสู่ความเสียหายที่รุนแรงในอนาคตได้ โดยส่วนใหญ่ความผิดปกติเหล่านี้มีที่มาจากความไม่สมดุล (unbalance) การเยื้องศูนย์ (misalignment) ความเสียหายของตลับลูกปืน (bearing) เป็นต้น โดยสำหรับความเสียหายของตลับลูกปืน ถ้าตลับลูกปืนเกิดความเสียหายก่อนอายุการใช้งานที่คาดการณ์ไว้ถือว่าเป็นสิ่งผิดปกติ ซึ่งมักมีที่มาจาก การติดตั้งที่ไม่เหมาะสม การขาดการหล่อลื่นที่ดี การปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอม ตลอดจนไปจนถึงการรับภาระเกินพิกัด (overload) หรือความล้า (fatigue) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความผิดปกติอื่น ๆ เป็นต้น

การตรวจสอบความเสียหายของตลับลูกปืนมีความสำคัญต่องานบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุน เนื่องจากตลับลูกปืนที่เสียหายสามารถนำไปสู่ความเสียหายที่รุนแรงของเครื่องจักรได้ โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนส่วนมากเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ (localized defect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนโลหะบนพื้นผิวสัมผัส (contact surface) หลุดออกไปในระหว่างที่ตลับลูกปืนกำลังทำงาน ซึ่งมักมีสาเหตุจากความล้าภายใต้ภาระ (load) ที่กระทำสลับไปสลับมา ดังนั้นการเฝ้าระวังความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนจึงควรอยู่บนพื้นฐานของการตรวจจับการเกิดขึ้นของความเสียหายที่เกิดขึ้นเฉพาะที่

ในระหว่างที่ตลับลูกปืนกำลังทำงาน เมื่อเม็ดลูกปืนของตลับลูกปืนวิ่งผ่านส่วนที่เกิดความเสียหาย จะเกิดอิมพัลส์ที่มีความถี่ของการเกิดที่มีค่าเฉพาะ ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรอบของเพลาลักษณะทางเรขาคณิตและจุดที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน ส่วนมากแล้วความเสียหายมักจะเกิดขึ้นที่รางวงนอก รางวงใน และเม็ดลูกปืน โดยอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ ผลการตอบสนองของอิมพัลส์จะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการกระแทกของเม็ดลูกปืนกับส่วนที่เสียหาย แล้วจึงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ของชุดตลับลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ

เนื่องจากความถี่ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับส่วนที่เกิดความเสียหายของตลับลูกปืน ดังนั้นจึงสามารถบอกถึงการเกิดและตำแหน่งของความเสียหายของตลับลูกปืนได้ แต่ที่มีความยุ่งยากในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานของสัญญาณความเสียหายมีการกระจายตัวเป็นช่วงกว้างในโดเมนความถี่ จึงเป็นไปได้มากที่สัญญาณจะถูกกลบด้วยสัญญาณรบกวนหรือ

สัญญาณที่เกิดจากส่วนอื่น ๆ ทำให้ไม่สามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นที่สัญญาณที่ความเสียหายยังมีระดับพลังงานน้อยได้ [1]

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการคิดวิธีเพื่อตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน ทั้งในโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนเวลา-ความถี่ สำหรับในโดเมนเวลา ส่วนมากจะเป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับการสั่นที่เป็นอิมพัลส์ เช่น การวิเคราะห์เคอร์โทซิส (kurtosis) การตรวจสอบระดับค่ายอด (peak value) การนับพัลส์ที่เกิดจากการกระแทก ส่วนการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะเป็นการตรวจจับชุดการสั่นที่เกิดขึ้นที่ความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายส่วนต่าง ๆ ของตลับลูกปืน เช่น การวิเคราะห์สเปกตรัม การเฉลี่ยแบบประสานเวลา (synchronized averaging) การวิเคราะห์เซปตรัม (cepstrum analysis) และการวิเคราะห์ด้วยการสั่นพ้องที่ความถี่สูง (high frequency resonance technique: HFRT) หรือเรียกอีกอย่างว่า เอ็นวีลอปสเปกตรัม (envelope spectrum) วิธีการเฉลี่ยแบบประสานเวลาและการวิเคราะห์เซปตรัมจะพิจารณาถึงพลังงานของฮาร์มอนิกของความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหาย ดังนั้นทั้งสองวิธีนี้จึงมีความไวต่อการปรากฏขึ้นของความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายมากกว่าการวิเคราะห์สเปกตรัม แต่ก็ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นที่ฮาร์มอนิกของความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายมากกว่าเช่นกัน [2] ในการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ วิธีการที่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ การวิเคราะห์ด้วยการสั่นพ้องที่ความถี่สูง ซึ่งประกอบไปด้วย การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองชนิดผ่านช่วง (bandpass filter) และการสร้างเอ็นวีลอป (envelope) ของสัญญาณที่ผ่านกรอง วิธีการนี้มีความยุ่งยากคือ ต้องการความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านของตัวกรองที่เหมาะสม ซึ่งต้องอาศัยวิธีการเลือกที่เหมาะสมเพื่อจะได้ค่าดังกล่าว

การวิเคราะห์บนโดเมนเวลา-ความถี่ เช่น การแปลงฟูริเยร์ช่วงสั้น (short time Fourier transform: STFT) ที่ถึงแม้จะเป็นที่นิยมกับสัญญาณที่มีลักษณะแบบชั่วคราว (transient) และมีค่าทางสถิติเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (non stationary) ก็มีปัญหาที่ปรับความละเอียดในโดเมนเวลา-ความถี่ไม่ได้ ในจุดนี้เองที่ทำให้การแปลงเวฟเลต (wavelet transform: WT) มีความโดดเด่นเหนือการแปลงฟูริเยร์ช่วงสั้น เนื่องจากการแปลงเวฟเลตจะมีหน้าต่างเวลาแคบที่ความถี่สูงและกว้างที่ความถี่ต่ำ ทำให้สามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะที่ของสัญญาณได้ดี [3]

การแปลงเวฟเลตคือการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาไปสู่โดเมนเวลา-ความถี่ หรือเวลา-สเกล โดยเป็นการวัดความคล้ายกันระหว่างสัญญาณกับเวฟเลตที่ตำแหน่งเวลาและสเกลนั้น ๆ ดังนั้นชนิดของเวฟเลตที่ใช้ในการแปลงสัญญาณจึงควรมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสัญญาณที่ต้องการตรวจจับ สำหรับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นอิมพัลส์อันเกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน มอร์เลต์-เวฟเลตจะมีความเหมาะสมมากที่สุด [4]

การวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยเวฟเลต สามารถทำได้สองแนวทางใหญ่ ๆ ด้วยกัน แนวทางแรกคือ การวิเคราะห์ด้วยการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต (wavelet

decomposition) [1, 5] สำหรับวิธีการนี้ สัญญาณในโดเมนเวลาที่วัดมาได้จะถูกแปลงเวฟเลตด้วยเวฟเลตตามที่กำหนด ทำให้ได้ชุดสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่ตำแหน่งเวลาและสเกลต่าง ๆ เพื่อนำมาสร้างตัวบ่งชี้ ซึ่งส่วนมากมักเป็นค่าทางสถิติ เพื่อสร้างเกณฑ์ (threshold) ในการตัดสินใจว่าสัมประสิทธิ์ตัวนั้น ๆ เกิดจากสัญญาณรบกวนหรือไม่ จากนั้นจึงลบค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ออกไป แล้วจึงแปลงเวฟเลตกลับด้วยสัมประสิทธิ์ที่ถูกลบส่วนของสัญญาณรบกวนออกแล้ว จะได้สัญญาณในโดเมนเวลาเช่นเดียวกับสัญญาณที่ป้อนเข้า แต่ว่าสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะของคาบที่ชัดเจนขึ้น ทำให้สามารถใช้คาบที่พบนี้ตรวจสอบเทียบกับคาบที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนเพื่อดูว่ามีความเสียหายหรือไม่ ถ้ามีเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใด ส่วนอีกแนวทางหนึ่งคือการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต วิธีการนี้ก็คือการวิเคราะห์ด้วยการสั้นพ้องที่ความถี่สูง [6-9] ในวิธีการนี้สัญญาณจะถูกกรองด้วยเวฟเลตที่มีความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสม ซึ่งจะหาความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสมได้โดยการพิจารณาตัวบ่งชี้ (indicator) ต่าง ๆ ของสัญญาณที่ผ่านการกรอง เช่น แชนนอนเอนโทรปี (Shannon entropy) การกระจายตัวของพลังงานในแต่ละความถี่ หรือ ค่า เคอร์โทซิส เป็นต้น หลังจากนั้นสร้างเอ็นวีลอปที่ได้อาจมาจากสัญญาณที่ผ่านการกรอง แล้วจึงหาเอ็นวีลอปสเปกตรัมหรือผลการแปลงฟูริเยร์ของเอ็นวีลอปที่ได้ สุดท้ายจึงพิจารณาความถี่ที่เกิดขึ้นในฟูริเยร์สเปกตรัมเทียบกับความถี่ที่เกิดขึ้นจากความเสียหายของตลับลูกปืนเพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น

เราสามารถเพิ่มคุณภาพของสัญญาณ ซึ่งในที่นี้หมายถึงอัตราส่วนของพลังงานของสัญญาณที่ต้องการพิจารณาเทียบกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) ก่อนการแปลงเวฟเลต เพื่อให้ผลที่ได้จากการแปลงเวฟเลตมีลักษณะของสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น การใช้ข้อโครีเกรสซีฟ (autoregressive: AR) [10] นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่ช่วยลดส่วนของสัญญาณรบกวนในสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต เช่น sparse code shrinkage (SCS) [7] เพื่อทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

จากที่กล่าวมาในข้างต้น จะเห็นได้ว่าการใช้เวฟเลตเป็นวิธีที่น่าสนใจในการใช้ตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืน ดังนั้นจึงเห็นสมควรที่จะศึกษาการใช้เวฟเลตเพื่อใช้ในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนทั้งวิธีการแยกส่วนประกอบโดยใช้เวฟเลต และการกรองโดยใช้เวฟเลต โดยเปรียบเทียบทั้งสองวิธีการนี้กับฟูริเยร์สเปกตรัมซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วไปในการตรวจจับความเสียหายของเครื่องจักร

ขั้นตอนการศึกษาในงานชิ้นนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน ในส่วนแรกจะศึกษาผลที่ได้จากสัญญาณความเสียหายที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองความเสียหายของตลับลูกปืน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีผลต่อสัญญาณที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งจากตัวสัญญาณเอง เช่น ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณ อัตราส่วนระหว่างพลังงานของสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายกับสัญญาณรบกวน ผลกระทบที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์

ของเวฟเลต เช่น ความถี่กึ่งกลางของเวฟเลต ความกว้างของแถบความถี่ผ่าน (bandwidth) รวมไปถึงการใช้ตัวบ่งชี้ต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณาเลือกเวฟเลต เช่น แชนนอนเอนโทรปี เฮอร์โทซิส รวมไปถึงถึงผลของการประมวลสัญญาณทั้งก่อนและหลังการแปลงเวฟเลต เช่น ออโตรีเกรสซีฟ และ sparse code shrinkage ว่ามีส่วนช่วยให้ผลการตรวจจับความเสียหายมีความชัดเจนยิ่งขึ้นหรือไม่ และส่วนที่สองจะเป็นการนำความรู้ที่ได้จากส่วนแรกมาใช้ตรวจจับสัญญาณความเสียหายจากการทดสอบจริงกับตลับลูกปืนที่ถูกสร้างความเสียหายขึ้นมาก่อน ที่ความเร็วรอบและภาระในแนวรัศมีต่าง ๆ กัน โดยทดลองกับชุดทดลองที่สร้างขึ้นใหม่

## 1-2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

### 1. Customized wavelet denoising using intra- and inter- scale dependency for bearing fault detection [1]

จุดประสงค์ นำเสนอการตรวจสอบสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยวิธีการแยกส่วนด้วยเวฟเลตที่ถูกสร้างขึ้นมาเฉพาะสำหรับสัญญาณนั้น ๆ โดยอยู่บนพื้นฐานของ lifting scheme แล้วจึงลดส่วนของสัญญาณรบกวนด้วยการขึ้นต่อกันภายในสเกลและระหว่างสเกล (intra- and inter- scale dependency) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจาก neighboring coefficient

รูปแบบการทดลอง เวฟเลตชนิด biorthogonal จะถูกสร้างมาให้สอดคล้องกับสัญญาณที่จะถูกวิเคราะห์นั้น ๆ ด้วย lifting scheme ที่ใช้เฮอร์โทซิสเป็นตัวดำเนินการคาดคะเน (prediction operator) หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแปลงไปเป็นสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตซึ่งจะถูกเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ที่ตำแหน่งรอบ ๆ เพื่อหาว่าสัมประสิทธิ์ตัวนั้นเป็นผลที่มาจากสัญญาณรบกวนหรือมาจากความเสียหายด้วยวิธีการที่นำเสนอซึ่งเป็นวิธีการที่ปรับปรุงมาจากการลดสัญญาณรบกวนด้วยเวฟเลตแบบ neighboring coefficient โดยเพิ่มการนำสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในสเกลที่อยู่ติดกันมาพิจารณาด้วย จากนั้นจึงแปลงกลับเวฟเลต พิจารณาคาบของสัญญาณที่ได้กับคาบของความเสียหายของตลับลูกปืน

ผลการทดลอง ในกรณีของสัญญาณจำลอง เมื่อใช้เวฟเลตที่สร้างขึ้นมาเฉพาะสำหรับสัญญาณนั้น ๆ จะพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถแสดงสัญญาณที่มีคาบการเกิดสอดคล้องกับสัญญาณเริ่มต้นก่อนที่จะถูกรวมกับสัญญาณรบกวนได้ทุกคาบ ในขณะที่วิธีการอื่น ๆ คือ Donoho's hard/soft thresholding method และ neighboring coefficient สามารถแสดงได้เพียงบางคาบเท่านั้น นอกจากนี้ยังยกตัวอย่างกรณีที่ใช้เวฟเลตมาตรฐานที่ไม่สามารถปรับลักษณะของเวฟเลตให้สอดคล้องกับลักษณะของสัญญาณได้ เช่น เวฟเลตชนิดDb8 สัญญาณที่ได้จะไม่มีลักษณะของคาบที่ชัดเจนเหมือนกับเวฟเลตที่สร้างขึ้นมาเฉพาะ และในกรณีของสัญญาณความเสียหายที่ได้จากการวัดจริง จะพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถแสดงคาบของความเสียหายได้

ชัดเจนที่สุด โดยเฉพาะในกรณีความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รวดเร็ว ในขณะที่วิธีการลดสัญญาณรบกวนอื่นและเวฟเลตมาตรฐานไม่สามารถแสดงคาบที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายได้

**สรุปผลการทดลอง** การสร้างเวฟเลตเฉพาะสำหรับสัญญาณนั้น ๆ และวิธีการลดสัญญาณรบกวนแบบ intra- and inter-scale dependency สามารถให้ผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายที่ชัดเจนกว่าการใช้เวฟเลตมาตรฐานที่ไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ให้เข้ากับตัวสัญญาณได้กับวิธีการลดสัญญาณรบกวนอื่น ๆ โดยสัญญาณความเสียหายที่ตรวจจับได้ยากที่สุดคือสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รวดเร็วใน

## 2. Singularity analysis using continuous transform for bearing fault diagnosis [3]

**จุดประสงค์** นำเสนอวิธีการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยการพิจารณาความเป็นภาวะเอกฐาน (singularity) ในระนาบเวลา-สเกล ของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง โดยการประยุกต์ใช้ค่าสูงสุดของมอดุลัส (modulus maxima) ของการแปลงเวฟเลต

**รูปแบบการทดลอง** สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนจะถูกแปลงเวฟเลตด้วยเวฟเลตที่เกิดจากอนุพันธ์ของฟังก์ชันเกาส์ที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1 จากนั้นจึงสร้างเส้นค่าสูงสุดของมอดุลัสของผลการแปลงที่ได้ แล้วจึงปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตด้วยเกณฑ์ที่พิจารณาจากเส้นค่าสูงสุดของมอดุลัส สุดท้ายจึงแปลงกับเวฟเลตกลับมาเป็นสัญญาณที่ลดสัญญาณรบกวนแล้ว

**ผลของการทดลอง** จากทดลองกับสัญญาณจำลองพบว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถรักษาพลังงานของสัญญาณเริ่มต้นก่อนที่จะถูกรวมกับสัญญาณรบกวนได้มากกว่า 90% และการทดลองกับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนของตู้รถไฟบรรทุกทุกสินค้าทั้งที่เกิดความเสียหายจุดเดียวและหลายจุดที่รวดเร็วและช้า แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถแสดงคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายได้อย่างถูกต้อง

**สรุปผลของการทดลอง** การระบุเส้นสัน (ridgeline) หลาย ๆ เส้น ที่เดินทางจากสเกลที่หยาบไปสู่สเกลที่ละเอียดกว่าและมีการลู่ออกที่จุด ๆ หนึ่ง สามารถระบุถึงตำแหน่งในเวลาของการกระแทกที่เกิดในตลับลูกปืนได้ วิธีการที่นำเสนอได้อาศัยหลักการดังกล่าว และแสดงให้เห็นว่าสามารถลดส่วนของสัญญาณรบกวนและแสดงคาบที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายได้เป็นอย่างดี

## 3. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics [4]

**จุดประสงค์** เปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนของวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตและวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต จากนั้นนำเสนอวิธีการเลือกความถี่กึ่งกลางและพารามิเตอร์รูปทรงของมอร์เลตเวฟเลตที่ใช้เฉพาะส่วน

จริงด้วย singularity value decomposition (SVD) และแซนนอนเอนโทโรปีตามลำดับ แล้วจึงกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตที่ได้

**รูปแบบการทดลอง** ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของดัดปลุกปืนของวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตและวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต ส่วนที่สองเป็นการเลือกความถี่กึ่งกลางและพารามิเตอร์รูปทรงของมอร์เลต์เวฟเลตที่ใช้เฉพาะส่วนจริงให้เหมาะสมกับสัญญาณด้วย singularity value decomposition (SVD) และแซนนอนเอนโทโรปีตามลำดับ แล้วจึงกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตที่ได้ โดยมีการทดลองกับทั้งสัญญาณจำลองและสัญญาณจริง

**ผลการทดลอง** ในส่วนการแยกส่วนประกอบใช้เวฟเลตชนิดซิมเลตอันดับที่ 4 (fourth order Symlet) แยกส่วนประกอบโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete wavelet transform: DWT) พบว่าการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตไม่สามารถดึงเอาลักษณะยอดแหลมของสัญญาณออกมาจากสัญญาณรบกวนได้ แต่จะเหมาะสมกับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบราบรื่นมากกว่า ในส่วนที่สอง SVD สามารถหาคาบการเกิดของสัญญาณยอดแหลมที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ฟูรีเยร์สเปกตรัมตรวจไม่พบ และมอร์เลตเวฟเลตจริงที่ได้รับการปรับพารามิเตอร์ด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถสร้างสัญญาณสุดท้ายที่มีลักษณะคาบสอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างถูกต้อง

**สรุปผลการทดลอง** วิธีการที่นำเสนอเป็นการปรับรูปของมอร์เลต์เวฟเลตให้มีความคล้ายคลึงกับอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่มากที่สุด สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตที่ปรับพารามิเตอร์แล้วสามารถแสดงคาบการเกิดของความเสียหายได้ถูกต้องมากกว่าวิธีการลดสัญญาณรบกวนด้วยการแยกส่วนด้วยเวฟเลต

#### 4. Detection of signal transients based on wavelet and statistics for machine fault diagnosis

[5]

**จุดประสงค์** นำเสนอวิธีการตรวจจับสัญญาณชั่วคราวโดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (continuous wavelet transform: CWT) โดยใช้มอร์เลต์เวฟเลตกับการทดสอบทางสถิติ Kolmogorov-Smirnov (K-S) เพื่อใช้ในการตัดสินใจแยกส่วนระหว่างส่วนที่เป็นสัญญาณชั่วคราวและส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวน

**รูปแบบการทดลอง** ในส่วนแรกเป็นการใช้วิธีการที่นำเสนอกับสัญญาณจำลอง โดยใช้มอร์เลต์เวฟเลตแยกส่วนประกอบของสัญญาณก่อน หลังจากนั้นจึงทดสอบทางสถิติในแต่ละสเกลพิจารณาว่าชุดของสัมประสิทธิ์ที่อยู่ใกล้เคียงกันในจำนวนจุดที่กำหนดมีการกระจายตัวแบบไชสแควร์ (Chi-square distribution) หรือไม่ จากนั้นจึงปรับค่าสัมประสิทธิ์ตามที่นิยามไว้แล้วแปลงกลับเวฟเลตสัมประสิทธิ์ที่ถูกปรับค่าแล้ว เปรียบเทียบคาบของสัญญาณสุดท้ายกับคาบ

ของที่เกี่ยวข้องกับความเสียหาย ในส่วนที่สองทำเหมือนกับส่วนแรกแต่เปลี่ยนเป็นสัญญาณ  
ที่มาจากความเสียหายของคลັบลูกปืนจริง

**ผลการทดลอง** ในส่วนแรกวิธีการที่นำเสนอสามารถแสดงรูปแบบที่ใกล้เคียงกับสัญญาณ  
เริ่มต้นก่อนที่จะถูกรวมกับสัญญาณรบกวน โดยมีความถี่ภายในของสัญญาณผิดเพี้ยนไป แต่  
ระยะห่างระหว่างสัญญาณแต่ละลูกยังถูกต้องอยู่ ในส่วนที่สองวิธีการที่นำเสนอสามารถแสดง  
คาบที่สอดคล้องกับความเสียหายของคลັบลูกปืนได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังแสดงรูปแบบของ  
สัญญาณที่สอดคล้องกับการหมุนของเพลลาอีกด้วย ในขณะที่ฟูรีเยร์สเปกตรัมไม่สามารถ  
แสดงผลที่สื่อว่าเกิดความเสียหายที่จุดต่าง ๆ ในคลັบลูกปืนได้

**สรุปผลการทดลอง** วิธีการที่นำเสนอสามารถแยกสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ออกจากสัญญาณ  
ชั่วคราวได้ดี โดยสัญญาณชั่วคราวสุดท้ายที่ได้สามารถบ่งบอกถึงความรุนแรงของความเสียหายได้  
ด้วย

##### 5. On the study of applying Morlet wavelet to the Hilbert transform for the envelope detection of bearing vibration [6]

**จุดประสงค์** นำเสนอความสามารถในการระบุส่วนของสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายของ  
คลັบลูกปืนด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัมโดยใช้มอร์เลตเวฟเลตเป็นตัวกรอง

**รูปแบบการทดลอง** ส่วนแรกเป็นการสร้างสัญญาณจำลองความเสียหายของคลັบลูกปืนซึ่ง  
สมมติให้ระบบมี 4 ค่าความถี่ธรรมชาติ แล้วกรองสัญญาณโดยใช้มอร์เลตเวฟที่มีความถี่  
กึ่งกลางซ้อนทับกับความถี่ธรรมชาติแรกของระบบซึ่งหาได้จากการพิจารณาฟูรีเยร์สเปกตรัม  
ของสัญญาณ เนื่องจากมอร์เลตเวฟเลตประพุดิตัวเป็นตัวกรองผ่านช่วงในโดเมนความถี่ ถ้ามี  
ความกว้างของแถบความถี่ผ่านมาก ตัวเวฟเลตจะมีอัตราการลู่ออกในโดเมนเวลาสูง ในงานชิ้น  
นี้เลือกให้เวฟเลตมีความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่ทำให้เวฟเลตลู่ออกสู่ศูนย์ในโดเมนเวลา  
ภายใน 2 ms จากนั้นสร้าง เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้ ในส่วนที่สองใช้วิธีการ  
เดียวกับส่วนแรกทดลองกับคลັบลูกปืนที่สร้างจากความเสียหายไว้แล้วที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้อ  
ความเร็วรอบของเพลลาที่ต่างกัน

**ผลการทดลอง** ในส่วนที่สอง เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้มียอดที่ตรงกับความถี่ที่เกิดจากความ  
เสียหายของคลັบลูกปืนที่ตำแหน่งและความเร็วรอบการหมุนของเพลลานั้น ๆ

**สรุปผลการทดลอง** ถ้าพารามิเตอร์ของมอร์เลตเวฟเลตถูกปรับให้เหมาะสม เวฟเลตจะสามารถ  
ดึงเอาความถี่ธรรมชาติของระบบและเอ็นวีลอปที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาตินั้น ๆ ออกมา  
ได้ นอกจากนี้มอร์เลตเวฟเลตมีการลู่ออกในโดเมนเวลาที่เร็ว ทำให้เหมาะสมในการตรวจจับ  
ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคลັบลูกปืน

## 6. Bearing fault detection based on optimal wavelet filter and sparse code shrinkage [7]

**จุดประสงค์** นำเสนอการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนโดยการทำงานร่วมกันระหว่างการเลือกพารามิเตอร์ของมอร์เลต์เวฟเลตเชิงซ้อนที่เหมาะสมและวิธี sparse code shrinkage (SCS)

**รูปแบบการทดลอง** เป็นการใช genetic algorithm (GA) ซึ่งเป็นวิธี optimization วิธีหนึ่งในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านของมอร์เลต์เวฟเลตเชิงซ้อน เพื่อให้ได้ค่าเคอร์โทซิสของสัญญาณที่ผ่านการกรองมีค่ามากที่สุด โดยมีเงื่อนไขกำหนดอื่น ๆ เข้ามาร่วมด้วย หลังจากกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตตัวดังกล่าวแล้ว สัญญาณที่ผ่านการกรองจะผ่านวิธีการ SCS ซึ่งเป็นวิธีการในการประมาณค่าส่วนของสัญญาณที่มีการกระจายตัวไม่เป็นไปตามแบบของเกาส์ (non Gaussian) ภายได้สภาวะที่มีสัญญาณรบกวนประกอบด้วย หลังจากนั้นจึงหาเอ็นวิลอปสเปกตรัมของผลที่ได้

**ผลการทดลอง** วิธีการเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลตในช่วงต้นสามารถเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่ได้เหมาะสม กล่าวคือ ในกรณีของสัญญาณที่จำลองขึ้นมา ความถี่กึ่งกลางที่ระบบเลือกขึ้นมามีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติที่กำหนดขึ้นในแบบจำลอง และเอ็นวิลอปสเปกตรัมที่ผ่าน SCS สามารถแสดงค่าความถี่การเกิดอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้อง สำหรับในกรณีการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนจริง เอ็นวิลอปสเปกตรัมสามารถแสดงค่ายอดที่สอดคล้องกับความเสียหายที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง

**สรุปผลการทดลอง** การทำงานร่วมกันระหว่างการเลือกพารามิเตอร์เวฟเลตที่เหมาะสมโดยการพิจารณาถึงค่าเคอร์โทซิสของผลลัพธ์และการใช้ SCS สามารถแสดงสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนได้ชัดเจน แม้ในระดับ SNR ที่ -11 dB

## 7. Rolling element bearing fault diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement [8]

**จุดประสงค์** เพื่อแสดงประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน โดยการทำงานร่วมกันระหว่างการเลือกพารามิเตอร์ของมอร์เลต์เวฟเลตเชิงซ้อนที่เหมาะสมและการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับความเสียหายด้วยออโตคอร์รีเลชัน (autocorrelation)

**รูปแบบการทดลอง** เป็นการใช genetic algorithm ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ความถี่กึ่งกลางและแถบความถี่ผ่านของมอร์เลต์เวฟเลตเชิงซ้อน เพื่อให้ได้ค่าแซนนอนเอนโทรปีของสัญญาณที่ผ่านการกรองมีค่าต่ำที่สุด โดยมีเงื่อนไขกำหนดอื่น ๆ เข้ามาร่วมด้วย หลังจากนั้นจึงหาออโตคอร์รีเลชันของสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตตัวดังกล่าวแล้ว จากนั้นจึงหาเอ็นวิลอปสเปกตรัมของผลที่ได้



**ผลการทดลอง** วิธีการเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลตในการศึกษาสามารถเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่ได้เหมาะสม กล่าวคือ ในกรณีของสัญญาณที่จำลองขึ้นมา ความถี่กึ่งกลางที่ระบบเลือกขึ้นมา มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติที่กำหนดขึ้นในแบบจำลอง การทำออดิโตรีเลชันช่วยให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้มีความชัดเจนมากกว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากการที่กรองสัญญาณด้วยเวฟเลตที่ถูกปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุดแล้วเพียงอย่างเดียว ทั้งในส่วนของสัญญาณจำลองและสัญญาณความเสียหายจริง

**สรุปผลการทดลอง** การทำงานร่วมกันระหว่างการเลือกพารามิเตอร์เวฟเลตที่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงค่าแชนนอนเอนโทรปีของผลลัพธ์และการใช้ออดิโตรีเลชันสามารถแสดงสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนได้ชัดเจนมากกว่าการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากออดิโตรีเลชันได้ช่วยลดสัญญาณรบกวนที่หลุดรอดจากการกรองด้วยเวฟเลต

#### 8. Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearing using complex shifted Morlet wavelet [9]

**จุดประสงค์** นำเสนอระบบการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอร์เลตเวฟเลตเชิงซ้อน และการสร้างเอ็นวีลอป เพื่อดีมอดูเลต (demodulate) สัญญาณความเสียหาย

**รูปแบบการทดลอง** ใช้มอร์เลตเวฟเลตเชิงซ้อนในการสร้างเอ็นวีลอปสเปกตรัม ในขั้นแรก นำเสนอวิธีการเลือกพารามิเตอร์การลู่อื่นในโดเมนเวลาของเวฟเลต โดยใช้ตัวบ่งชี้คือแชนนอนเอนโทรปี ตัวประกอบการขยาย (magnification factor) และอัตราส่วนระหว่างแชนนอนเอนโทรปีกับตัวประกอบการขยาย หลังจากนั้นนำเสนอวิธีการสร้างเอ็นวีลอป ซึ่งมีอยู่สองแนวทางด้วยกัน แนวทางแรกคือการสร้างเอ็นวีลอปจากขนาดที่มากที่สุดของสัมประสิทธิ์การแปลงที่แต่ละเวลา (max-envelope) แนวทางที่สองคือการสร้างเอ็นวีลอปจากสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยสเกลที่มีจำนวนสัมประสิทธิ์ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดมากที่สุด (max-resonance) จากนั้นจึงหาเอ็นวีลอปสเปกตรัม

**ผลการทดลอง** ในส่วนของสัญญาณที่มาจากการจำลอง เอ็นวีลอปที่ได้จากวิธีการหาที่ได้นำเสนอทั้งสองวิธีมีลักษณะคล้ายกัน และเอ็นวีลอปสเปกตรัมแสดงค่ายอดที่สอดคล้องกับความถี่การเกิดขึ้นของอิมพัลส์ตามที่กำหนดในสัญญาณตั้งต้นรวมไปถึงฮาร์มอนิกของความถี่นั้นด้วย ในส่วนของการทดลองกับตลับลูกปืนจริงก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ในกรณีของสัญญาณที่มาจากการจำลองที่มีความถี่ธรรมชาติสองความถี่ วิธีการหาเอ็นวีลอปด้วยการสร้างเอ็นวีลอปจากขนาดที่มากที่สุดของสัมประสิทธิ์การแปลงที่แต่ละเวลาสามารถแสดงการเกิดขึ้นของอิมพัลส์ได้ชัดเจนกว่าการกรองโดยเลือกมอร์เลตเวฟเลตที่มี

ความถี่กึ่งกลางเพียงค่าใดค่าหนึ่ง อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าอิมพัลส์แต่ละลูกไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบที่ต่างกัน

**สรุปผลการทดลอง** มอเตอร์เลดเฟลตเชิงซ้อนสามารถใช้คิมอคูเลตสัญญาณความเสียหายเพื่อตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนได้ดี โดยการแยกอิมพัลส์ออกจากส่วนของสัญญาณความถี่อื่น ๆ เมื่อใช้ร่วมกับวิธีการสร้างเอ็นวีลอปที่นำเสนอ

#### 9. The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearing using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis [10]

**จุดประสงค์** นำเสนอระเบียบวิธีในการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับความเสียหายของ spectral kurtosis (SK) ด้วยการ ใช้ minimum entropy deconvolution (MED) และใช้ออโต-รีเกรสซีฟเป็นตัวช่วยเพิ่มลักษณะความเป็นอิมพัลส์ของสัญญาณก่อนการประมวลผล

**รูปแบบการทดลอง** ในขั้นแรกสัญญาณจะผ่านกระบวนการออโตรีเกรสซีฟเพื่อแยกส่วนที่คาดเดาได้ (deterministic) และคาดเดาไม่ได้ (non-deterministic) ออกจากกัน โดยอาศัยค่าเคอร์โทซิสเป็นเกณฑ์ เนื่องจากกำหนดให้จำนวนพจน์ที่ใช้ในการหาออโตรีเกรสซีฟมีค่าน้อยกว่าจำนวนจุดข้อมูลที่เกิดจากความถี่ที่มากที่สุดที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน ซึ่งก็คือความถี่ของความเสียหายที่เกิดจากรางวิ่งใน (ball pass frequency, inner race: BPIR) ดังนั้นส่วนที่เกิดจากอิมพัลส์จึงถูกจัดไปอยู่ในส่วนที่คาดเดาไม่ได้หรือส่วนตกค้าง (residual) หลังจากนั้นจึงใช้มอเตอร์เลดเฟลตเชิงซ้อนที่มีความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านต่าง ๆ กันมากรองสัญญาณส่วนตกค้างเพื่อดูว่าความถี่ใดให้ค่า SK มากที่สุด แล้วจึงนำผลที่ได้จากการกรองด้วยเวฟเลตมาหาเอ็นวีลอปสเปกตรัม ในส่วนต่อมาเป็นการกรองสัญญาณตกค้างด้วยวิธี MED ซึ่งเป็นวิธีการสร้างตัวกรองที่ขยายลักษณะความเป็นอิมพัลส์ของสัญญาณ ผลการทดลอง ออโตรีเกรสซีฟสามารถเพิ่มค่าเคอร์โทซิสของสัญญาณได้ระดับหนึ่งก่อนที่จะทำ SK ตัวกรองที่ให้ค่า SK สูงที่สุดสามารถกรองสัญญาณที่ผ่านออโตรีเกรสซีฟให้มีลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ที่เด่นชัดยิ่งขึ้นอีกระดับหนึ่ง และเอ็นวีลอปสเปกตรัมสามารถแสดงค่ายอดที่สอดคล้องกับความเสียหายของตลับลูกปืนได้ ในส่วนต่อมาได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ MED ทำให้อิมพัลส์ที่ได้มีลักษณะเป็นอิมพัลส์ที่ชัดเจนกว่าการกรองด้วยมอเตอร์เลดเฟลตมาก แต่สุดท้ายก็ให้ผลที่ได้จากเอ็นวีลอปสเปกตรัมในลักษณะเดียวกันแต่จะมีความชัดเจนมากกว่า ส่วนที่ตีความของเทคนิคนี้คือ ค่าเคอร์โทซิสที่ได้ของสัญญาณที่ผ่านวิธีการนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นในตลับลูกปืนมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่ค่าเคอร์โทซิสที่ได้จากวิธี SK ไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลง ดังนั้น MED จึงเป็นตัวประเมินความเสียหายที่บอกระดับความรุนแรงของความเสียหายได้ด้วย มิใช่เพียงแค่ว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นหรือไม่

**สรุปผลการทดลอง** การใช้โอโตรีเกรสซีฟร่วมกับ MED สามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูงมากจนทำให้แยกอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นติดกันไม่ชัดเจนได้เป็นอย่างดี อีกทั้งค่าเคอร์โทซิสของผลที่ได้ยังมีความสัมพันธ์กับระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ตลับลูกปืนอีกด้วย

#### 10. Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis [11]

**จุดประสงค์** นำเสนอความสามารถในการตรวจจับความเสียหายของเครื่องจักรโดยใช้การแยกส่วนประกอบด้วยมอร์เลตเวฟเลต โดยใช้เซนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสม

**รูปแบบการทดลอง** ในส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่แสดงการลู่เข้าในโดเมนเวลาของมอร์เลตเวฟเลต(เฉพาะส่วนจริง) ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในโดเมนเวลา-ความถี่ โดยใช้เซนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ หลังจากกล่าวถึงการสร้างเกณฑ์เพื่อลดส่วนของสัญญาณรบกวนโดยอยู่บนสมมติฐานที่ว่าสัญญาณรบกวนเป็น Gaussian white noise ซึ่งทำให้ส่วนของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่มาจากสัญญาณรบกวนมีการกระจายตัวอย่างอิสระ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแปลงที่มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์จะถูกปรับให้เป็นศูนย์ ในขณะที่สัมประสิทธิ์ที่มีค่ามากกว่าเกณฑ์จะถูกปรับค่าใหม่ตามที่ได้นิยามไว้ หลังจากได้ชุดสัมประสิทธิ์ใหม่แล้วจึงแปลงกลับเวฟเลต ในส่วนที่สองทำเช่นเดียวกับส่วนแรกแต่เป็นการทดลองกับสัญญาณที่มาจากตลับลูกปืนจริง แล้วพิจารณาคาบของสัญญาณที่ได้เปรียบเทียบกับคาบของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากตลับลูกปืน

**ผลการทดลอง** ในส่วนแรก การแยกส่วนประกอบด้วยมอร์เลตเวฟเลตและวิธีการลดสัญญาณที่นำเสนอสามารถแสดงลักษณะของสัญญาณก่อนที่จะรวมกับสัญญาณรบกวนได้เกือบสมบูรณ์ ค่าเซนนอนเอนโทรปีที่ต่ำที่สุดจะให้บริเวณที่สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตมีขนาดไม่เป็นศูนย์ มีขนาดเล็กที่สุดและเป็นจุดที่การประนีประนอม (compromise) ทางด้านรายละเอียดทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ และในส่วนที่สอง สัญญาณที่ได้แสดงถึงคาบที่สอดคล้องกับคาบที่เกิดจากความถี่ของความเสียหายของตลับลูกปืน

**สรุปผลการทดลอง** ในการดึงเอาลักษณะความเสียหายของสัญญาณออกมา เวฟเลตจำเป็นที่จะต้องมัลักษณะที่สอดคล้องกับความเสียหายที่ต้องการตรวจจับ ในกรณีของมอร์เลตเวฟเลตสามารถปรับความละเอียดในโดเมนเวลาและความถี่ได้ด้วยพารามิเตอร์ที่แสดงการลู่เข้าในโดเมนเวลาโดยใช้เซนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ และเมื่อใช้ร่วมกับวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่นำเสนอแล้ว สามารถให้ผลการตรวจจับความเสียหายของเครื่องจักรที่ชัดเจน

จากการศึกษาผลการวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ว่าแนวทางในการใช้เวฟเลตเพื่อตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนมีอยู่ 2 แนวทางหลัก ๆ คือ การแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตหรือเอ็นวีลอปสเปกตรัม สำหรับวิธีการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลตจะแปลงเวฟเลตสัญญาณความเสียหาย จากนั้นจึงปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่ได้โดยพิจารณาสัมประสิทธิ์ข้างเคียงเพื่อดูว่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีที่มาจากสัญญาณความเสียหายหรือสัญญาณรบกวน จากนั้นจึงปรับสัมประสิทธิ์ที่มาจากสัญญาณรบกวนให้เป็นศูนย์แล้วจึงแปลงกลับเวฟเลตจะได้สัญญาณในโดเมนเวลา โดยถ้าตลับลูกปืนมีความเสียหายเกิดขึ้นจะปรากฏคาบที่สอดคล้องกับคาบของความเสียหายขึ้นในสัญญาณดังกล่าว ส่วนวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต สัญญาณจะถูกกรองด้วยเวฟเลตที่มีค่าความถี่กึ่งกลาง และความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสม จากนั้นจึงหาเอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณดังกล่าว โดยถ้าเกิดความเสียหายขึ้นจะปรากฏความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหาย หรือฮาร์มอนิกของความถี่ดังกล่าวขึ้นในเอ็นวีลอปสเปกตรัม อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีตัวบ่งชี้ว่าความถี่กึ่งกลาง และความกว้างของแถบความถี่ผ่านของเวฟเลตนั้นมีความเหมาะสมแล้ว โดยได้มีผู้เสนอให้พิจารณาที่ค่าเคอร์โทซิส หรือแซนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตดังกล่าว สำหรับชนิดของเวฟเลตที่มีความเหมาะสมในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายมากที่สุดคือ มอร์เลต์เวฟเลต เนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายกับอิมพัลส์ทางกลมากที่สุด ส่วนแบบจำลองที่เหมาะสมของสัญญาณความเสียหายจะมีลักษณะเป็นการตอบสนองของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบที่สอดคล้องกับคาบความเสียหายของตลับลูกปืน เนื่องจากเมื่อเกิดความเสียหายแบบเฉพาะที่ขึ้นจะเกิดการอิมพัลส์ขึ้นเมื่อบริเวณที่เกิดความเสียหายมาพบกับพื้นผิวคู่สัมผัส ซึ่งจะ ไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบเครื่องจักร จะเห็นว่าแนวทางต่าง ๆ ที่นำเสนอมาในข้างต้นน่าจะมีศักยภาพในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจะใช้แนวทางเหล่านั้นในการศึกษาขั้นนี้ต่อไป

### 1-3 สมมติฐานการศึกษา

1. ในการศึกษาถือว่าเม็ดลูกปืนกลิ้งโดยไม่มีกรลื่นไถล (roll without slip) เทียบกับรางวิ่งนอกและรางวิ่งในของตลับลูกปืน ทำให้สามารถใช้ค่าความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนต่าง ๆ ของตลับลูกปืนในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนได้
2. ค่าความถี่เฉพาะที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืนเป็นค่าที่ทราบค่าอยู่แล้วสำหรับตลับลูกปืนรุ่นหนึ่ง ๆ ดังนั้นในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นในตลับลูกปืนนั้น ๆ คือ การมองหาคาบที่สอดคล้องกับคาบที่เกิดจากความถี่ดังกล่าวในโดเมนเวลา ส่วนสำหรับสเปกตรัม คือ การมองหาขอบของสเปกตรัมที่ความถี่ดังกล่าว

3. ถือว่าช่วงเวลาที่มีคลื่นลูกป็นกระแทกกับส่วนที่เกิดความเสียหายของตลับลูกป็นมีช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ จนสามารถสมมติว่าเป็นอิมพัลส์ได้ ดังนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จึงมีส่วนหนึ่งเป็นผลการตอบสนองอิมพัลส์ของชุดตลับลูกป็นและโครงสร้างที่รองรับ
4. สัญญาณรบกวนในระบบถือเป็นสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (wide band white noise) ที่มีฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นแบบเกาส์ (Gaussian probability distribution function) และมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์
5. สัญญาณที่ใช้ในการศึกษามีช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลของสัญญาณมากพอที่ทำให้พารามิเตอร์ทางสถิติที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา (time invariance) เช่น ค่าเคอร์โทซิส มีค่าคงที่

#### 1 - 4 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาการใช้เวฟเลตในตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกป็น ทั้งวิธีการแยกส่วนประกอบโดยใช้เวฟเลต และการกรองโดยใช้เวฟเลต เปรียบเทียบผลการตรวจจับที่ได้กับฟูริเยร์สเปกตรัม โดยศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณเริ่มต้น ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเวฟเลต การประมวลสัญญาณทั้งก่อนและหลังการแปลงเวฟเลต ที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกป็นจากการสร้างสัญญาณจำลอง (simulation) และศึกษาผลของสัญญาณจริงที่เกิดจากตลับลูกป็นที่เกิดความเสียหายที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้ภาระและความเร็วรอบการหมุนของเพลตต่าง ๆ จากการทดลองกับตลับลูกป็นจริง

#### 1 - 5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการแปลงเวฟเลต การใช้เวฟเลตเพื่อตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกป็น การใช้ตัวบ่งชี้ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเวฟเลตให้เหมาะสมในการตรวจจับความเสียหาย
2. สร้างสัญญาณจำลองจากแบบจำลองการตอบสนองอิมพัลส์ที่เกิดจากความเสียหายของระบบชุดตลับลูกป็นและโครงสร้างรองรับ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ร่วมกับสัญญาณรบกวนที่มีระดับพลังงานต่าง ๆ กัน ศึกษาผลการตรวจจับส่วนของสัญญาณที่มาจากความเสียหาย โดยใช้วิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต การกรองด้วยเวฟเลต และฟูริเยร์สเปกตรัม ศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อสัญญาณที่ได้จากกระบวนการที่เกิดขึ้นมาจากลักษณะของสัญญาณตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ พารามิเตอร์ของเวฟเลต เช่น ความถี่กึ่งกลาง ตัวประกอบรูปทรง (shape factor) รวมไปถึงการประมวลสัญญาณทั้งก่อนและหลังการแปลงเวฟเลต และศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวบ่งชี้กับลักษณะของสัญญาณที่ได้จากกระบวนการ เพื่อพิจารณาว่าตัวบ่งชี้ตัวใดเหมาะสมในการตัดสินใจเลือกค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลตเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

เปรียบเทียบผลการตรวจจับความเสียหายที่ได้จากวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต การกรองด้วยเวฟเลต และฟูรีเยร์สเปกตรัม

3. ทดลองวัดสัญญาณของตลับลูกปืนที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์และที่เกิดความเสียหายเฉพาะที่ที่วางวิ่งนอก รางวิ่งใน และเมื่อดูลูกปืน ภายใต้ภาวะและรอบการหมุนของเพลลาที่ต่างกัน โดยตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการและข้อสรุปที่ได้ในข้อที่ 2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการตรวจจับที่ได้กับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับภาวะและรอบการหมุนของเพลลา

## 1-6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนและการแปลงฟูรีเยร์
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเลตและการประยุกต์ใช้เวฟเลตเพื่อตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นในตลับลูกปืน
3. ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณและแบบจำลองสัญญาณของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหาย
4. ศึกษาการวิธีการใช้งานและข้อจำกัดของเครื่องมือเก็บข้อมูล
5. ศึกษาการใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณจำลอง การแปลงเวฟเลตและประมวลผลต่าง ๆ เพื่อตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น
6. สร้างสัญญาณความเสียหายจำลอง และศึกษาผลกระทบที่มีต่อสัญญาณสุดท้ายที่ใช้ในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่เกิดจาก ลักษณะของสัญญาณตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการพารามิเตอร์ของเวฟเลต เช่น ความถี่กึ่งกลาง ตัวประกอบรูปทรง (shape factor) รวมไปถึงการประมวลสัญญาณทั้งก่อนและหลังการแปลงเวฟเลต และศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวบ่งชี้กับลักษณะของสัญญาณที่ได้จากกระบวนการ เปรียบเทียบผลการตรวจจับที่ได้จาก วิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต การกรองด้วยเวฟเลต และฟูรีเยร์สเปกตรัม และศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวบ่งชี้กับลักษณะของสัญญาณที่ได้จากกระบวนการ จากนั้นจึงวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้
7. ออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ทดสอบตลับลูกปืน
8. ทดลองเก็บข้อมูลสัญญาณของตลับลูกปืนทั้งที่ไม่มีและมีความเสียหายเฉพาะที่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้ความเร็วรอบและภาวะในแนวรัศมีต่าง ๆ
9. ประมวลผลสัญญาณที่ได้จากข้อที่ 8 ด้วยวิธีการและความรู้ที่ได้จากข้อที่ 6
10. เปรียบเทียบผลของสัญญาณที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ต่าง ๆ และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้กับจุดที่เกิดความเสียหายความเร็วรอบและภาวะในแนวรัศมี วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้
11. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 1-1 กรอบเวลาของขั้นตอนการดำเนินงาน

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงาน	ต.ค. 52	พ.ย. 52	ธ.ค. 52	ม.ค. 53	ก.พ. 53	มี.ค. 53	เม.ย. 53	พ.ค. 53	มิ.ย. 53	ก.ค. 53	ส.ค. 53	ก.ย. 53	ต.ค. 53	พ.ย. 53	ธ.ค. 53	ม.ค. 54	ก.พ. 54	มี.ค. 54
1	ศึกษาวิธีการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน																		
2	ศึกษาการใช้เครื่องมือวัด																		
3	ศึกษาทฤษฎีการแปลงเวฟเลตและการประยุกต์ใช้																		
4	ออกแบบ สร้าง และปรับตั้งเครื่องทดสอบ																		
5	สร้างแบบจำลองสัญญาณและทำการศึกษาผลจากสัญญาณจำลอง																		
6	ทดลองโดยใช้ตลับลูกปืนจริงและทำการศึกษาผลการทดลอง																		
7	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง																		

### 1-7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการที่สามารถตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนในช่วงที่ signal to noise ratio (SNR) มีค่าต่ำได้
2. ได้ตัวบ่งชี้ที่เหมาะสมในการปรับพารามิเตอร์ของเวฟเลตให้เหมาะสมกับสัญญาณความเสียหายเพื่อให้ได้สัญญาณที่ผ่านการประมวลผลที่แสดงถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนในกรณีที่ตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย
3. ทราบถึงข้อได้เปรียบ เสียเปรียบ และขีดจำกัดของวิธีการตรวจจับความเสียหายแต่ละวิธี
4. ได้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับจุดที่เกิดความเสียหายในตลับลูกปืน ความเร็วรอบ และภาระที่กระทำในแนวนรัศมี ทั้งก่อนและหลังผ่านการประมวลผลสัญญาณ
5. เป็นแนวทางในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นจะเทียบอันเนื่องมาจากความเสียหายของตลับลูกปืน เพื่อนำมาใช้ตรวจสอบสภาพของตลับลูกปืน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

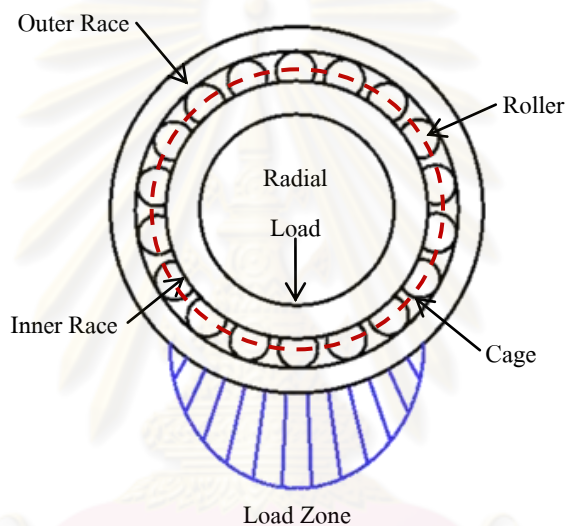


## บทที่ 2

### ทฤษฎีแบบจำลองสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน

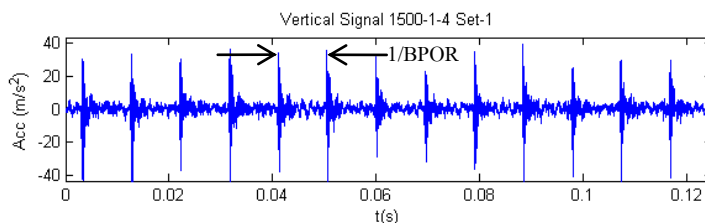
#### 2 - 1 แบบจำลองเกี่ยวกับความเสียหายของตลับลูกปืน

ในขณะที่ตลับลูกปืนทำงาน ภาระที่เกิดจากการทำงานของเครื่องจักรจะถูกส่งผ่านส่วนประกอบต่าง ๆ ของตลับลูกปืน คือ รางวิ่งนอก เม็ดลูกปืน และรางวิ่งใน ด้วยผิวสัมผัสแบบกลิ้ง (rolling contact) ในของกรณีของภาระในแนวรัศมี บริเวณที่ขึ้นส่วนของตลับลูกปืนรับภาระคือ บริเวณที่อยู่ในทิศทางที่ภาระกระทำดังแสดงในรูปที่ 2-1



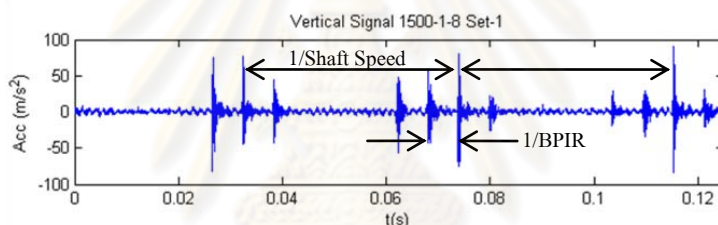
รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบและการกระจายตัวของภาระบนตลับลูกปืน

เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย ในขณะที่ผิวสัมผัสที่เกิดความเสียหายถูกผิวสัมผัสที่คู่กัน กลิ้งผ่าน จะเกิดอิมพัลส์ขึ้น อิมพัลส์นี้จะเกิดขึ้นเป็นคาบและมีความถี่ของคาบขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตและตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน ในกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นที่รางวิ่งนอก ความเสียหายมักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีภาระกระทำ และมีลักษณะการเกิดของสัญญาณที่ค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากทางเดินของสัญญาณ (transmission path) ระหว่างตำแหน่งที่เกิดความเสียหายกับหัววัดการสั่นสะเทือนเป็นทางเดินเดิมเสมอ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ในกรณีนี้จุดที่เกิดอิมพัลส์เนื่องจากความเสียหายจะเป็นตำแหน่งเดิมเสมอเมื่อเทียบกับหัววัด เรียกความถี่ในการเกิดอิมพัลส์นี้ว่า ball pass frequency, outer race (BPOR) ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ตัวอย่างสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งนอกของตลับลูกปืน

ในขณะที่กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับที่รางวิ่งในและเม็ดลูกปืน ผิวสัมผัสที่เกิดความเสียหายจะอยู่ภายใต้ภาระที่ไม่คงที่ในระหว่างการหมุนของเพลลา โดยจะเกิดการมอดูเลต (modulation) ชุดของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นกับความถี่ของชุดกรงของเม็ดลูกปืน (cage) ในกรณีของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่เม็ดลูกปืน และความถี่ของเพลลาในกรณีของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งใน เรียกความถี่ของการเกิดความเสียหายของเกิดขึ้นที่เม็ดลูกปืนและรางวิ่งในว่า ball spin frequency (BSF) และ ball pass frequency, inner race (BPIR) ตามลำดับ ลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาของสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งในแสดงดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ผลของการมอดูเลตขนาดในโดเมนเวลาของสัญญาณความเสียหายที่รางวิ่งใน

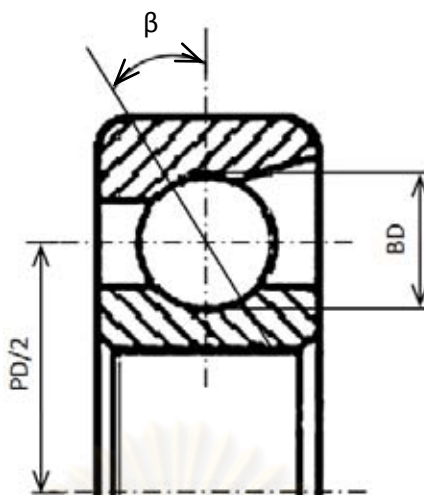
ความถี่ที่สอดคล้องกับคาบการเกิดของอิมพัลส์ที่สอดคล้องกับความเสียหายสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$BPOR = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \tag{2-1}$$

$$BPIR = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \tag{2-2}$$

$$BSF = \frac{BD}{PD} f_r \left[ 1 + \left( \frac{PD}{BD} \right)^2 \cos\beta \right] \tag{2-3}$$

- เมื่อ
- $f_r$  = อัตราเร็วเชิงมุมของเพลลา
  - $n$  = จำนวนเม็ดลูกปืน
  - $BD$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางเม็ดลูกปืน
  - $PD$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางพิตช์ของตลับลูกปืน (พิจารณารูปที่ 2-4 ประกอบ)
  - $\beta$  = มุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างรางกับเม็ดลูกปืน (พิจารณารูปที่ 2-4 ประกอบ)



รูปที่ 2-4 ค่าทางมิติต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณความถี่ในการเกิดอิมพัลส์ของตลับลูกปืน

ค่าความถี่ที่กล่าวมาในข้างต้นนี้ โดยส่วนมากผู้ผลิตตลับลูกปืนจะให้ค่าเหล่านี้มาในรูปแบบของตัวคูณของอัตราเร็วเชิงมุมของเพลลา ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่าเหล่านี้เอง จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นว่า เมื่อพื้นผิวที่เกิดความเสียหายกระทบกับพื้นผิวที่คู่กันที่กลิ้งผ่าน จะเกิดอิมพัลส์ขึ้นเป็นชุด โดยค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้ก็คือ ผลการตอบสนองของอิมพัลส์เหล่านั้นนั่นเอง โดยสามารถจำลองลักษณะการตอบสนองของอิมพัลส์ได้ด้วยสมการ (2-4)

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\sigma_i t} \cos \left( 2\pi \sqrt{1 - \xi_i^2} f_i t + \theta_i \right) \quad (2-4)$$

เมื่อ  $A_i$ ,  $\xi_i$ ,  $f_i$ , และ  $\sigma_i = 2\pi \xi_i f_i$  คือ ขนาด อัตราส่วนการหน่วง ความถี่ธรรมชาติ และอัตราการลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลของโหมดที่  $i$  ของการสั่นสะเทือนของชุดตลับลูกปืนและ โครงสร้างที่รองรับตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณ

##### 3-1 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier transformation)

การแปลงฟูรีเยร์เป็นการแปลงที่นิยมใช้ในการตรวจจับความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนเป็นอย่างมาก โดยเหมาะสมกับลักษณะของสัญญาณที่อยู่ในรูปผลรวมของสัญญาณไซน์ซอซัดัล ทำให้การแปลงชนิดนี้เหมาะสมกับการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของเครื่องจักรประเภทความไม่สมดุล และการเยื้องศูนย์กลางของเพลลา เป็นต้น

ฟูรีเยร์ได้เสนอว่าสัญญาณบนโดเมนเวลาใด ๆ ที่มีลักษณะเป็นคาบโดยมีคาบเท่ากับ  $T$  สามารถเขียนแทนได้ในรูปของผลรวมของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ โดยเรียกผลรวมนี้ว่าอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(e^{i2n\pi ft} + e^{-i2n\pi ft}) - ib_n(e^{i2n\pi ft} - e^{-i2n\pi ft})] \quad (3-1)$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [(a_n - ib_n)e^{i2n\pi ft} + (a_n + ib_n)e^{-i2n\pi ft}] \quad (3-2)$$

ถ้านิยามให้  $X_0 = \frac{a_0}{2}$ ,  $X_n = \frac{1}{2}(a_n - ib_n)$ ,  $X_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + ib_n)$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$  จะเขียนสมการ (3-2) ได้ว่า

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n e^{i2n\pi ft} \quad (3-3)$$

โดยเรียก  $X_n$  ว่าฟูรีเยร์สเปกตรัม (Fourier spectrum) โดยให้สังเกตว่า  $X_n$  และ  $X_{-n}$  คือคู่สังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate) ซึ่งกันและกัน โดยสามารถหาฟูรีเยร์สเปกตรัมได้จาก

$$X_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-i2n\pi ft} dt; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3-4)$$

สมการ (3-3) และ (3-4) สามารถนำไปใช้กับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบได้ สำหรับสัญญาณทั่วไป สามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้ โดยให้  $T \rightarrow \infty$  ซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสเปกตรัม  $X$  จึงกลายเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ทำให้สามารถเขียนสมการ (3-4) ใหม่ได้ว่า

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (3-5)$$

และเขียนสมการ (3-3) ใหม่ได้ว่า

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (3-6)$$

โดยเรียกสมการ (3-5) ว่าการแปลงฟูรีเยร์ และสมการ (3-6) ว่าการแปลงกลับฟูรีเยร์ (inverse Fourier transform) โดยเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแสดงตามรูปที่ 3-1(ก) แต่จะพบว่า การแปลงฟูรีเยร์ตามสมการ (3-5) จะต้องเก็บสัญญาณในช่วงอนันต์ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ จึงแทนช่วงของสัญญาณด้วยช่วงเวลา  $(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2})$  โดยสมมติให้ฟังก์ชันมีลักษณะซ้ำเดิมในช่วงเวลาที่อยู่นอกคาบเวลานี้ทั้งสองด้าน สัญญาณบนโดเมนเวลาสามารถแสดงได้ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน โดยความถี่ฐาน  $f$  ขึ้นอยู่กับคาบเวลาที่ใช้เก็บสัญญาณ การแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันนี้ทำให้ได้สเปกตรัมแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete spectrum) ที่มีจำนวนฮาร์มอนิกของความถี่  $f$  ไม่จำกัดจำนวน ดังแสดงในรูปที่ 3-1(ข)

นอกจากนั้นสมการ (3-5) และ (3-6) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่สุ่มตัวอย่างทุกๆ ช่วงเวลา  $\Delta t$  หรือมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล ดังแสดงในสมการ (3-7) และ (3-8) โดยแสดงกราฟของฟังก์ชันนี้ในรูปที่ 3-1(ค)

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t_n) e^{-i2\pi f t_n} \quad (3-7)$$

$$x(t_n) = \frac{1}{f_s} \int_{-\frac{f_s}{2}}^{\frac{f_s}{2}} X(f) e^{i2\pi f t_n} df \quad (3-8)$$

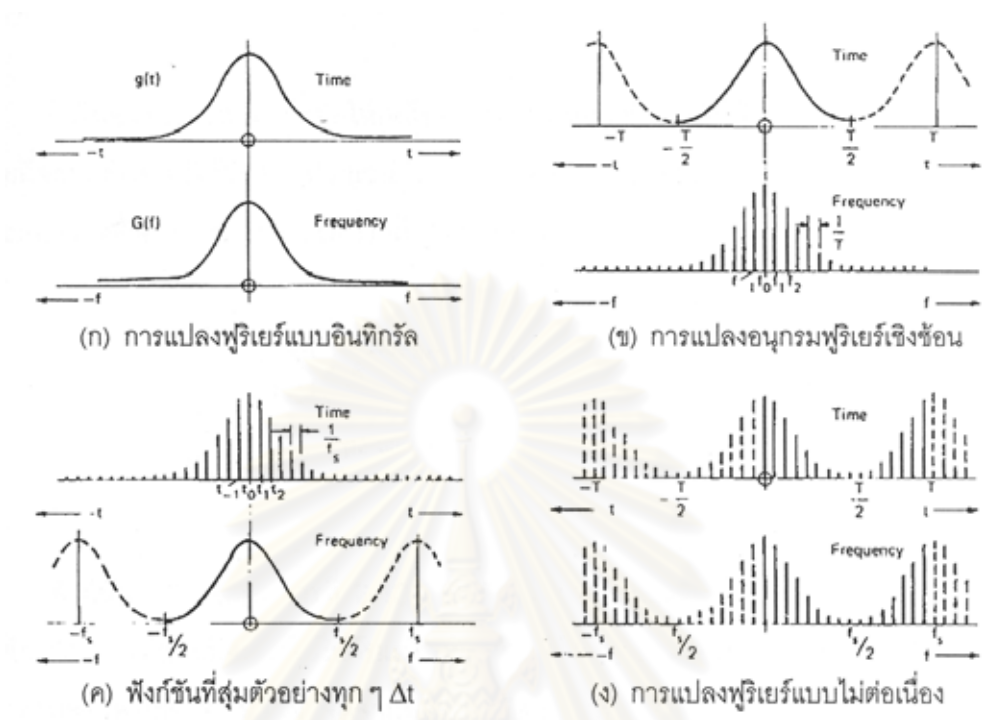
เมื่อ  $t_n = n \cdot \Delta t$  คือ เวลา ณ การสุ่มตัวอย่างข้อมูลครั้งที่  $n$  ถ้าอนุกรมเวลามีการตัดพจน์ให้เหลือน้อยลงและทำให้เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง (discrete function) ฟังก์ชันในโดเมนความถี่จะถูกตัดพจน์ให้มีจำนวนน้อยลงเช่นกัน ทำให้ได้การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete Fourier transform: DFT) ดังแสดงในสมการ (3-9) และ (3-10) ตามลำดับ โดยแสดงสัญญาณทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ดังรูปที่ 3-1(ง)

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (3-9)$$

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (3-10)$$

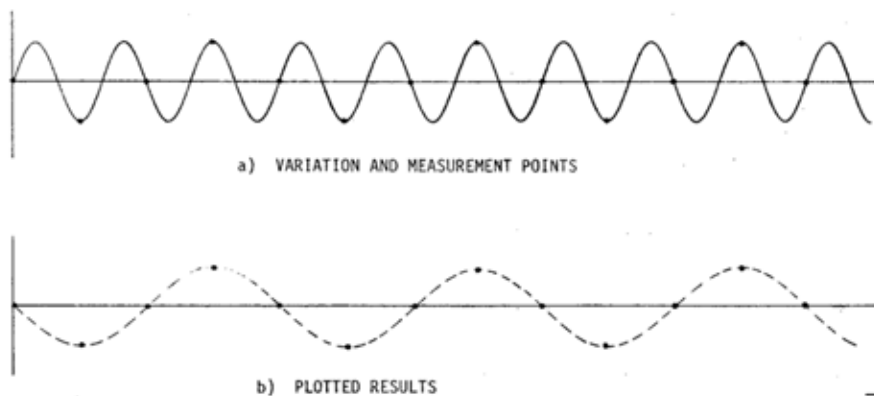
การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่องเหมาะที่จะนำไปใช้กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบดิจิทัล แต่เนื่องจากการหาค่าฟูรีเยร์สเปกตรัม  $X_k$  ทั้ง  $N$  จุดจากตัวอย่างข้อมูลที่สุ่มมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลา  $N$  จุด จะต้องมีการคูณเชิงซ้อนถึง  $N^2$  ครั้ง จึงมีการเสนอการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (fast Fourier transform: FFT) ที่ให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกับสมการ (3-9) แต่ใช้การคูณเชิงซ้อนเพียง  $N \cdot \log_2 N$  ครั้ง ทำให้สามารถทำงานได้รวดเร็วกว่า DFT มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อข้อมูลที่

สุมมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลามีจำนวนมาก โดยส่วนมากแล้วเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบดิจิทัลที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปก็ใช้การแปลงฟูรีเยร์ด้วยวิธีนี้

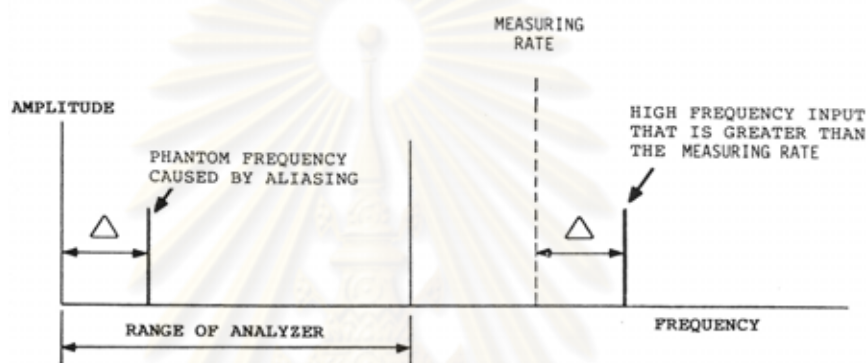


รูปที่ 3-1 สัญญาณใน โดเมนเวลาและผลการแปลงฟูรีเยร์ (ก) การแปลงฟูรีเยร์แบบอินทิกรัล, (ข) การแปลงอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน, (ค) ฟังก์ชันที่สุ่มตัวอย่างใน โดเมนเวลา, (ง) การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง

สำหรับการแปลงฟูรีเยร์ มีข้อควรคำนึงถึงเพิ่มเติมอีกบางประการ ประเด็นแรกคือเรื่องการผันกลับ (aliasing) ถ้าความถี่ในการสุ่มข้อมูลสัญญาณใน โดเมนเวลาไม่เหมาะสม จะทำให้ผลการแปลงที่ได้ออกมาในโดเมนความถี่มีความผิดพลาด ดังแสดงในรูปที่ 3-2 รูปที่ 3-2(ก) แสดงตัวอย่างการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่มีความถี่เป็น  $4/3$  เท่าของความถี่ของสัญญาณ ซึ่งน้อยกว่าความถี่น้อยที่สุดในทางอุดมคติคือ 2 เท่าของความถี่สัญญาณ เมื่อนำจุดข้อมูลที่ได้จากการสุ่มในรูป 3-2(ก) มาสร้างสัญญาณใหม่ สัญญาณที่ได้จะมีความถี่เพียง  $1/3$  เท่าของความถี่สัญญาณจริง ซึ่งทำให้เกิดความถี่หลอก (phantom frequency) ขึ้น โดยแสดงผลของการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่เกิดผิดพลาดของรูปที่ 3-2 และรูปที่ 3-3 แสดงผลดังกล่าวในโดเมนความถี่



รูปที่ 3-2 ผลของการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด



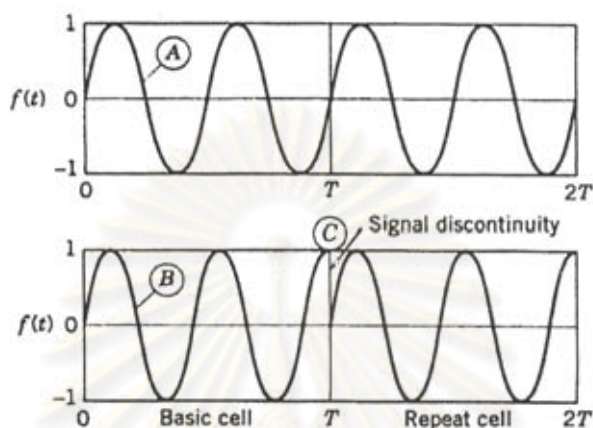
รูปที่ 3-3 ความถี่หลอกที่เกิดขึ้นจากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ไม่เหมาะสมตามรูปที่ 3-2

ปัญหาของการเกิดความถี่หลอกสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวกรองต่อต้านการผันกลับ (anti-aliasing filter) และการปรับความถี่การสุ่มข้อมูลสัญญาณให้เหมาะสม โดยความถี่ในการสุ่มข้อมูลสัญญาณที่เหมาะสม  $f_s$  สำหรับตัวกรองต่อต้านการผันกลับที่มีอัตราการลดลง 120 dB/Octave ที่มีความถี่ใช้งานสูงสุด  $f_{max}$  สามารถหาได้จากสมการ (3-11) โดยความถี่ที่ใช้ในการสุ่มจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่านี้

$$f_s = 2.56 \cdot f_{max} \tag{3-11}$$

ประเด็นที่สองที่ต้องคำนึงถึงในการแปลงฟูริเยร์ก็คือเรื่องหน้าต่างในโดเมนเวลาของสัญญาณ (time window) เนื่องจากการทำงานของ FFT มีสมมติฐานอยู่ว่า สัญญาณมีลักษณะเป็นคาบที่มีคาบพื้นฐาน (fundamental period) เท่ากับ  $T$  ตามขนาดช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณที่เรียกว่าหน้าต่างในโดเมนเวลาของสัญญาณ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสัญญาณจะถูกอธิบายในโดเมนความถี่ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency,  $f_0$ ) ดังนั้น FFT จะทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณมีความถี่เป็นจำนวนเท่าที่ลงตัวของ  $f_0$  เนื่องจากวิเคราะห์สัญญาณ FFT สมมติว่าสัญญาณจริงคือสัญญาณในหน้าต่างในโดเมนเวลาที่นำมาเรียงต่อกันทั้งในช่วงเวลาก่อนหน้าและหลังหน้าต่างต่างเวลา แต่ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณมักมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของ  $f_0$  ที่ไม่ลงตัว ดังนั้นหน้าต่างในโดเมนเวลาจึงไม่

สามารถบรรจุสัญญาณได้เต็มรอบการสั่นพอดี ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3-4 ซึ่งถ้าสัญญาณนี้ถูกนำไปพิจารณาบน โดเมนความถี่แล้ว องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณจะไม่ตรงกับเส้นสเปกตรัม ทำให้เกิดลักษณะของสัญญาณที่เรียกว่า การรั่วของการกรองสัญญาณ (filter leakage) โดยมียอดสเปกตรัมที่ความถี่อื่นเพิ่มเข้ามาเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณที่รอยต่อของหน้าต่างในโดเมนเวลา



รูปที่ 3-4 ความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของหน้าต่างในโดเมนเวลา

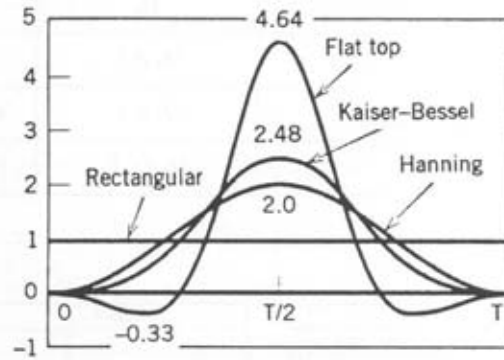
ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการนำฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function) มาทำคอนโวลูชัน (convolution) กับสัญญาณบน โดเมนเวลาก่อนที่จะทำ FFT ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่นิยมใช้กัน คือ ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (hanning weighting) ฟังก์ชันไกเซอร์-เบสเซล (Kaiser-Bessel Weighting) ฟังก์ชันแฟลตทอป (flat-top weighting) และฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (rectangular weighting) ซึ่งก็คือการไม่มีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักนั่นเอง ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเขียนได้ในรูปทั่วไปดังสมการ (3-12)

$$w(t) = a_0 - a_1 \cos(2\pi f_0 t) + a_2 \cos(2 \cdot 2\pi f_0 t) - a_3 \cos(3 \cdot 2\pi f_0 t) + a_4 \cos(4 \cdot 2\pi f_0 t) ; 0 < t < T \quad (3-12)$$

โดย  $w(t)$  มีค่าเป็นศูนย์สำหรับช่วงอื่น ๆ โดยค่าสัมประสิทธิ์  $a_i$  มีค่าดังตารางที่ 3-1 และแสดงฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 3-5 และ 3-6 ตามลำดับ ตารางที่ 3-1 ค่าสัมประสิทธิ์  $a_i$  ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักชนิดต่าง ๆ

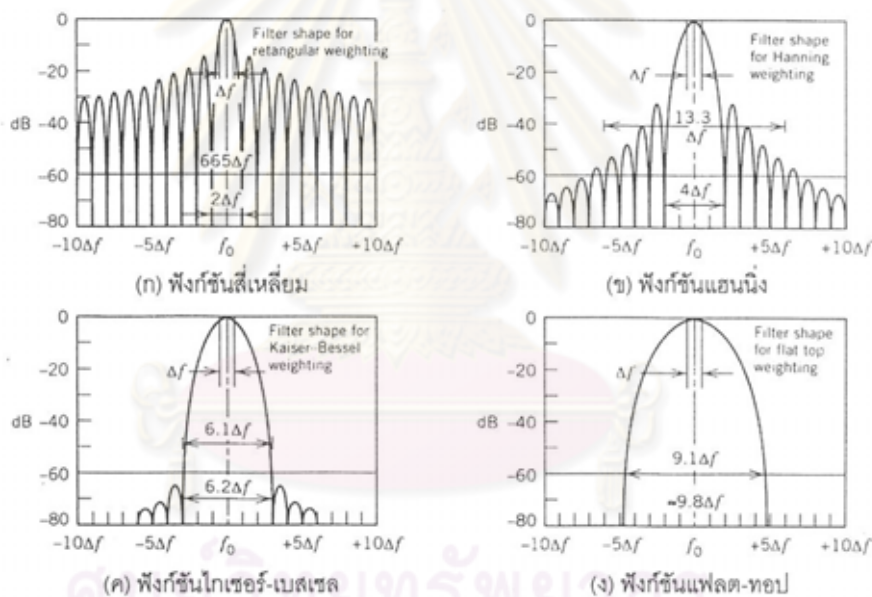
ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก	สัมประสิทธิ์				
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
แฮนนิ่ง	1	1	-	-	-
ไกเซอร์ - เบสเซล	1	1.298	0.244	0.003	-
แฟลตทอป	1	1.933	1.286	0.388	0.032
สี่เหลี่ยม	1	-	-	-	-





รูปที่ 3-5 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักใน โดเมนเวลา

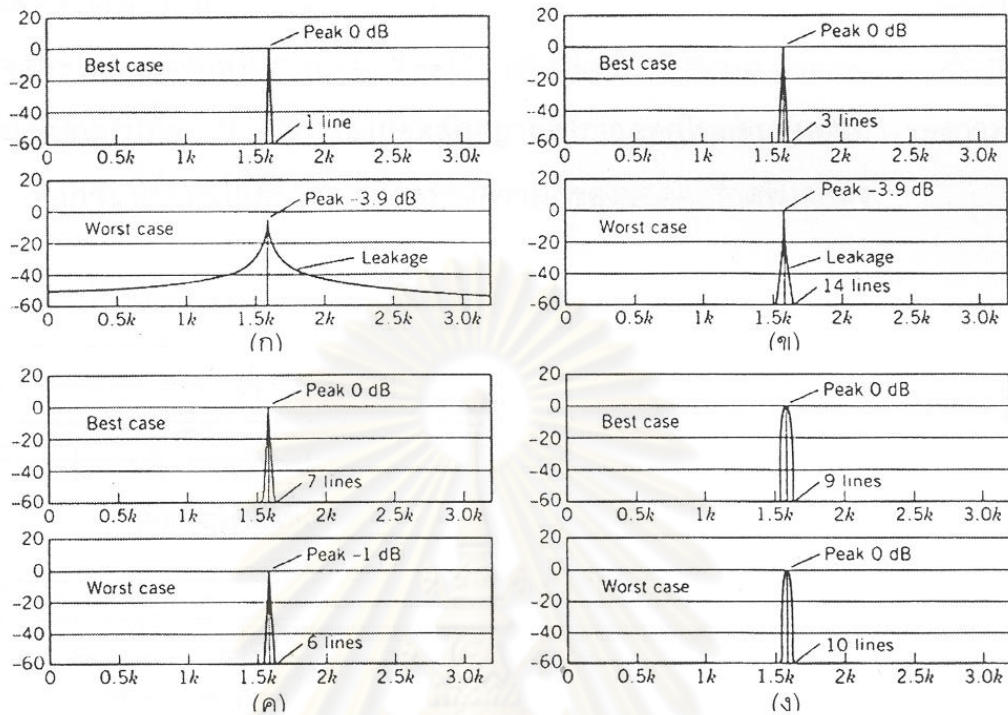
จากรูปที่ 3-5 จะเห็นได้ว่า ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักทุกชนิดยกเว้นชนิดสี่เหลี่ยมมีค่าที่จุดเริ่มต้นและสิ้นสุดเป็นศูนย์ ทำให้รอยต่อของหน้าต่างใน โดเมนเวลามีความต่อเนื่อง ทำให้ตัดปัญหาเนื่องจากการรั่วของตัวกรองตามที่ได้อธิบายไปในข้างต้นไปได้



รูปที่ 3-6 ลักษณะการเป็นตัวกรองใน โดเมนความถี่ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก

จากรูปที่ 3-6 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันสี่เหลี่ยมมีอัตราการลดที่ช้าที่สุดและเกิดลอน (lobe) ด้านข้างมากที่สุด ซึ่งลอนด้านข้างนี้เองที่ทำให้เกิดการรั่วของตัวกรอง นอกจากนี้จะพบว่ายิ่งลอนด้านข้างมีขนาดที่เล็กลง ลอนที่อยู่ตรงกลางจะมีความกว้างของแถบความถี่ผ่านมากขึ้น ผลของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักถ่วงน้ำหนักที่มีต่อสเปกตรัมของสัญญาณไซน์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3-7(ก) โดยกรณีที่ดีที่สุดคือกรณีที่ความถี่ของสัญญาณไซน์ตรงกับความถี่ของสเปกตรัมเส้นใดเส้นหนึ่งพอดี และกรณีที่แย่ที่สุดคือความถี่ของสัญญาณมีค่าอยู่กึ่งกลางของสเปกตรัมทั้งสองเส้น จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ดีที่สุดฟังก์ชันสี่เหลี่ยมจะให้รายละเอียดในการแยกแยะขอดีสเปกตรัมมากที่สุด สังเกตได้จากฐานของสเปกตรัมในกรณีนี้มีค่าเพียง 1 เส้นเท่านั้น แต่สำหรับกรณีที่แย่ที่สุด จะพบว่าฟังก์ชัน

ชนิดนี้ประสบกับปัญหาการรั่ว ในขณะที่ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักชนิดอื่น ๆ ให้ผลในโดเมนความถี่คล้าย ๆ กันทั้งในกรณีที่ดีที่สุดและกรณีที่แย่ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3-7(ข) - (ง)



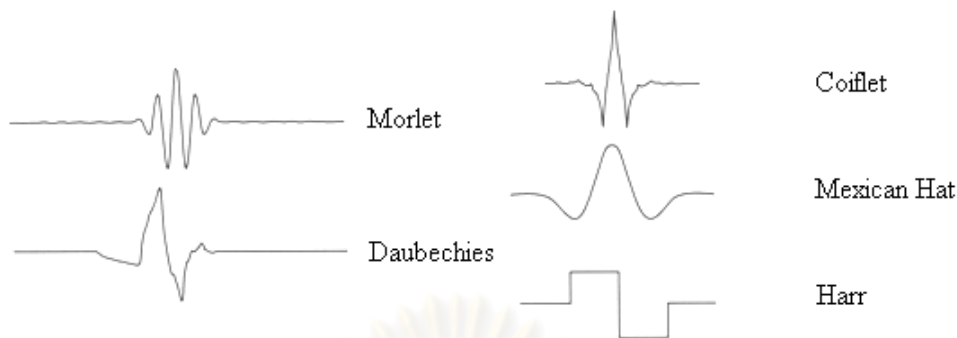
รูปที่ 3-7 ผลของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่มีต่อสเปกตรัมของสัญญาณไซน์ (ก) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม, (ข) ฟังก์ชันแฮนนิง, (ค) ฟังก์ชันไกเซอร์ - เบสเซล, (ง) ฟังก์ชันแฟลตทอป

3-2 การแปลงเวฟเลต (wavelet transformation) [12, 13]

การแปลงเวฟเลตเหมาะสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ (aperiodic) มีสัญญาณรบกวนสูง ไม่ต่อเนื่อง (intermittent) หรือมีลักษณะเป็นแบบชั่วคราว (transient) เนื่องจากการแปลงเวฟเลตสามารถตรวจสอบสัญญาณทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ไปพร้อม ๆ กัน ด้วยความสามารถที่เหนือกว่าการแปลงฟูริเยร์แบบช่วงสั้น (short time Fourier transform: STFT) ทำให้การแปลงเวฟเลตถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการประมวลผลสัญญาณต่าง ๆ รวมไปถึงการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักรกลหมุน เช่น การตรวจสอบความเสียหายของเฟืองเกียร์หรือดัลบลูกปืน เป็นต้น

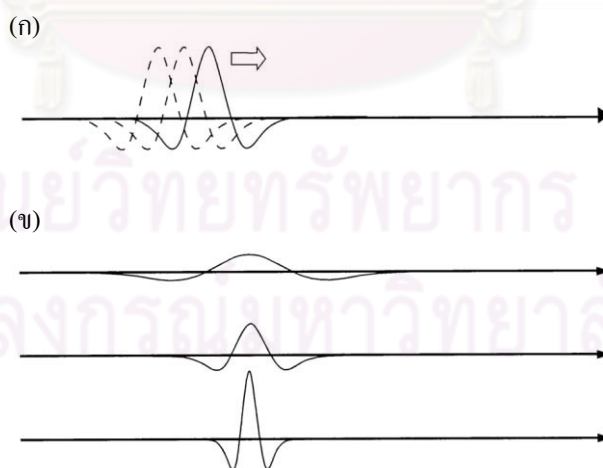
การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลตทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันที่มีลักษณะคล้ายลูกคลื่นในช่วงบริเวณหนึ่ง ๆ (local wavelike function) ที่เรียกว่า เวฟเลต ดังแสดงในรูปที่ 3-8 จะพบว่าเวฟเลตมีพลังงานจำนวนจำกัดอยู่ในบริเวณรอบจุดจุดหนึ่ง ในขณะที่คลื่นไซน์ขอยดัลที่ใช้สำหรับการแปลงฟูริเยร์ มีการสั้นในช่วง  $-\infty \leq t \leq \infty$  จึงมีพลังงานเป็นอนันต์ การแปลงเวฟเลตเป็นการแปลงข้อมูลของสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ในประมวลผลต่อไป โดยหลัก

ทางคณิตศาสตร์แล้ว การแปลงเวฟเลตคือการทำคอนโวลูชัน (convolution) ระหว่างสัญญาณกับ ฟังก์ชันเวฟเลตลูก (daughter or son wavelet)

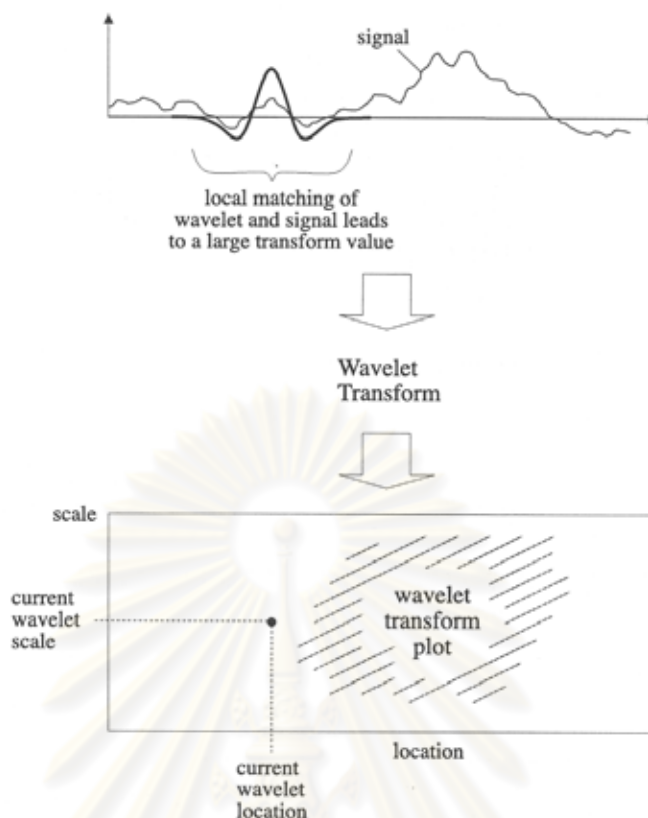


รูปที่ 3-8 เวฟเลตรูปแบบต่าง ๆ

สำหรับการแปลงเวฟเลต ก่อนที่จะทำคอนโวลูชันกับสัญญาณ เวฟเลตแม่ (mother wavelet) จะถูกปรับเปลี่ยนอยู่สองอย่างด้วยกัน คือการเลื่อนตำแหน่งไปตามความยาวของสัญญาณ (translation) และการเปลี่ยนสเกล (scaling or dilation) ดังแสดงในรูปที่ 3-9 เพื่อให้ได้เวฟเลตลูก ถ้าลักษณะของสัญญาณมีลักษณะรูปทรงคล้ายกับเวฟเลตลูกที่การเลื่อนและสเกลในช่วงนั้น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต ณ ตำแหน่งการเลื่อนและสเกลนั้น ๆ จะมีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถมองหาค่าสัมประสิทธิ์การแปลงที่ได้เป็นระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 3-10 (หมายเหตุ: ในตัวอย่างทั้งหมด สเกลจะมีค่าจากสูงไปต่ำเมื่อมองแกนสเกลจากล่างขึ้นบน ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ต่ำไปสูงเมื่อมองจากล่างขึ้นบน ความสัมพันธ์ระหว่างสเกลกับความถี่จะถูกอธิบายในเนื้อหาส่วนต่อ ๆ ไป)



รูปที่ 3-9 ผลการปรับเปลี่ยนที่เกิดขึ้นกับเวฟเลต (ก) การเลื่อนตำแหน่ง, (ข) การเปลี่ยนสเกล



รูปที่ 3-10 ขั้นตอนการแปลงเวฟเลต

ถ้าการแปลงเวฟเลตถูกกระทำด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งและสเกลแบบต่อเนื่องจะเรียกว่าการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (continuous wavelet transform: CWT) ในขณะที่การแปลงเวฟเลตที่เปลี่ยนตำแหน่งและสเกลแบบเป็นขั้น ๆ (discrete) ถูกเรียกว่าการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete wavelet transform: DWT) ในเนื้อหาส่วนทฤษฎีนี้จะเน้นถึงการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง โดยจะกล่าวถึงการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องเพียงเล็กน้อย

### เงื่อนไขของการเป็นเวฟเลต

การที่ฟังก์ชันหนึ่ง ๆ จะถือได้ว่าเป็นเวฟเลต (ในที่นี้คือเวฟเลตแม่) จำเป็นต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. เวฟเลตจะต้องมีพลังงานที่มีค่าจำกัด

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (3-13)$$

เมื่อ  $E$  คือพลังงานของฟังก์ชันเวฟเลต  $\psi(t)$  ในกรณีที่เวฟเลตเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน (complex wavelet) ต้องหาขนาดของเวฟเลตก่อนทั้งจากส่วนจริงและจินตภาพ

2. ถ้า  $\hat{\psi}(f)$  คือการแปลงฟูรีเยร์ของ  $\psi(t)$  แล้ว เงื่อนไขตามสมการ (3-14) ต้องเป็นจริง

$$C_g = \int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (3-14)$$

จากสมการ (3-14) เราจะพบว่า  $\hat{\psi}(0) = 0$  หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เวฟเลต  $\psi(t)$  ต้องมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สมการ (3-14) ถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เงื่อนไขในการยอมรับ (admissibility condition) และค่า  $C_g$  ถูกเรียกว่า ค่าคงตัวของ การยอมรับ (admissibility constant)

3. สำหรับเวฟเลตเชิงซ้อนจะมีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ ผลการแปลงฟูรีเยร์ต้องเป็นค่าจริงและไม่มีในช่วงความถี่ที่เป็นลบ

### 3-2-1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (continuous wavelet transform: CWT)

ตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องคือการแปลงเวฟเลตที่ตำแหน่งและสเกลของเวฟเลตถูกเปลี่ยนแบบต่อเนื่อง คุณสมบัติต่าง ๆ ของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องมีดังนี้

#### นิยามของการแปลงเวฟเลต

การแปลงเวฟเลตของสัญญาณต่อเนื่อง  $x(t)$  ถูกนิยามไว้ตามสมการ (3-15)

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3-15)$$

เมื่อ  $w(a)$  คือ ฟังก์ชันน้ำหนัก และเครื่องหมาย \* คือค่าสังยุค (conjugate) ของเวฟเลตเชิงซ้อน สามารถมองการแปลงเวฟเลตเป็นการหาสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างสัญญาณและเวฟเลตถูกโดยทั่วไป  $w(a)$  ถูกกำหนดให้มีค่าเป็น  $1/\sqrt{a}$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3-15) ใหม่ได้เป็น

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3-16)$$

ถ้าพิจารณาสมการ (3-16) จะพบว่าสมการประกอบไปด้วยส่วนของเวฟเลตแม่ที่ถูกเลื่อนตำแหน่งและถูกเปลี่ยนสเกล  $\psi((t-b)/a)$  หรือเรียกอีกอย่างว่าเวฟเลตลูกหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเวฟเลตแม่คือเวฟเลตลูกที่มีสเกล ( $a$ ) เป็น 1 และมีการเลื่อน ( $b$ ) เป็น 0 และสัญญาณ  $x(t)$  จากสมการผลคูณของเวฟเลตและสัญญาณจะถูกอินทิเกรตตลอดช่วงความยาวของสัญญาณคือเรียกอีกอย่างว่าคอนโวลูชัน ฟังก์ชันเวฟเลตที่ถูกนอร์มัลไลซ์ (normalize) มักนิยมเขียนในรูปแบบที่กระชับคือ

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (3-17)$$

จากสมการ (3-17) จะเห็นได้ว่าสเกล ( $a$ ) คือส่วนกลับของความถี่ การนอร์มัลไลซ์ในสมการ (3-17) เป็นการนอร์มัลไลซ์ที่พิจารณาจากพลังงานของเวฟเลต ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3-16) ใหม่ได้เป็น

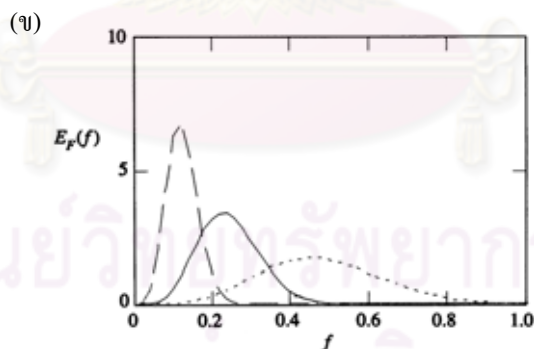
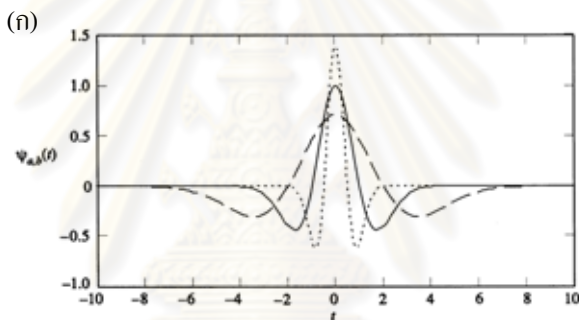
$$T(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \tag{3-18}$$

หรือสามารถเขียนในรูปที่กระชับกว่านี้อีกในรูปของผลคูณภายใน (inner product)

$$T(a, b) = \langle x, \psi_{a,b}^* \rangle \tag{3-19}$$

รูปที่ 3-11 (ก) แสดงตัวอย่างผลของการเปลี่ยนสเกลของเม็ทซิกันแสทเวฟเลต ซึ่งถูกนิยามโดย  $\psi(t) = (1 - t^2)e^{-t^2/2}$  จะพบว่ายิ่งสเกลมากขึ้นเวฟเลตจะลู่เข้าสู่ศูนย์ช้าลง ส่วนรูปที่ 3-11(ข) แสดงค่าของสเปกตรัมพลังงาน  $E_F(f) = |\hat{\psi}(f)|^2$  เนื่องจากเวฟเลตถูกนอร์มัลไลซ์ตามสมการ (3-17) ทำให้เวฟเลตที่สเกลต่าง ๆ มีพลังงาน (พื้นที่ใต้กราฟ  $E_F(f) - f$ ) เท่ากัน จะพบว่าที่สเกลสูงจะมีความถี่กึ่งกลางของสเปกตรัมต่ำและมีการกระจายตัวของพลังงานในโดเมนความถี่ต่ำกว่าที่สเกลต่ำกว่า

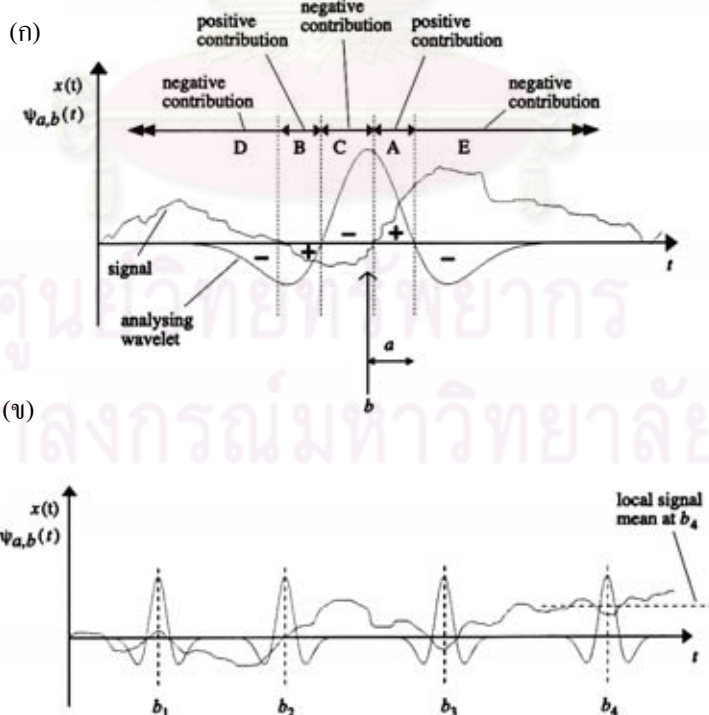
(หมายเหตุ ตัวอย่างทั้งหมดในส่วนทฤษฎีก่อนถึงส่วนที่กล่าวถึงเวฟเลตเชิงซ้อน จะสาธิตโดยใช้ เม็ทซิกันแสทเวฟเลตที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสเกลและความถี่เป็น  $a = 0.251/f$ )



รูปที่ 3-11 ผลของสเกลที่มีต่อเวฟเลต (ก) ผลของสเกลที่มีต่อเวฟเลตในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมพลังงานของเวฟเลต โดยสเกล  $a = 0.5, 1.0, 2.0$  แทนด้วยเส้นประถี่, เส้นทึบ และเส้นประห่าง ตามลำดับ

เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการแปลงเวฟเลตที่ชัดเจนยิ่งขึ้น รูปที่ 3-12(ก) แสดงภาพวิธีการแปลงเวฟเลตตามสมการ (3-18) โดยเวฟเลตที่สเกล  $a$  และมีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ตำแหน่ง  $b$  แสดงซ้อนทับอยู่บนสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ ในส่วนที่สัญญาณและเวฟเลตมีเครื่องหมายเดียวกันจะมีส่วนที่ค่าเป็นบวกในสมการ (3-18) ในขณะที่ส่วนที่เครื่องหมายตรงกันข้ามจะมีส่วนที่มีค่าเป็น

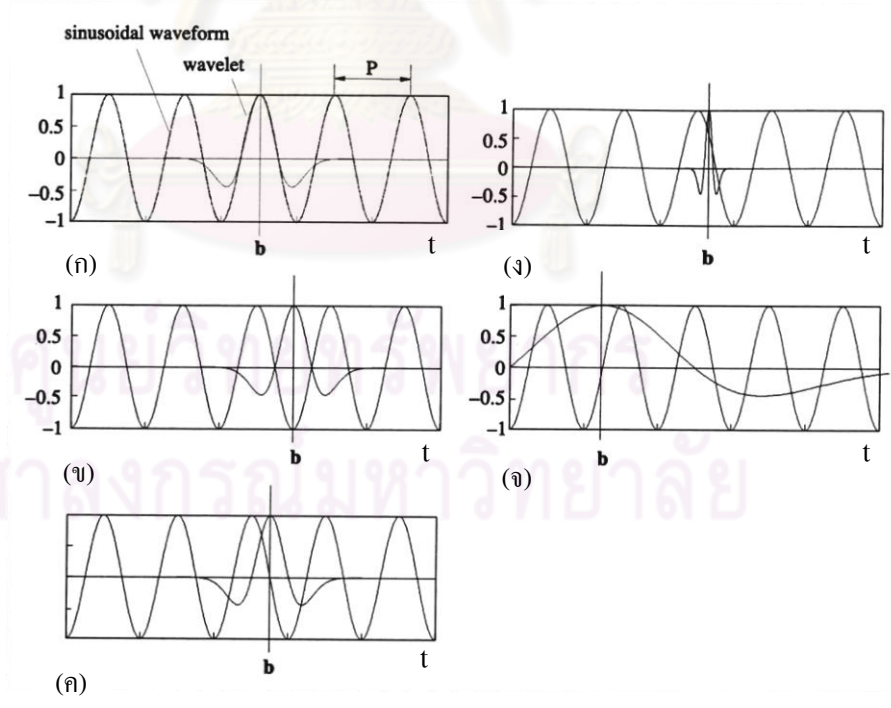
ลบ ผลรวมของส่วนย่อยเหล่านี้ คือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตที่สเกล  $a$  และตำแหน่ง  $b$  รูปที่ 3-12(ข) แสดงเวฟเลตที่สเกลค่าหนึ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ สี่ตำแหน่งบนสัญญาณ ที่ตำแหน่ง  $b_1$  เวฟเลตอยู่บนส่วนของสัญญาณที่มีส่วนที่เป็นบวกและเป็นลบคล้ายกับลักษณะของเวฟเลตทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  ที่เป็นบวกและมีค่ามาก ในขณะที่ตำแหน่ง  $b_2$  ส่วนที่เป็นบวกและลบหักล้างกันในอินทิกรัลของสมการ (3-18) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าประมาณศูนย์ ส่วนตำแหน่ง  $b_3$  จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณและเวฟเลตมีรูปทรงคล้ายคลึงกันแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบและมีค่ามาก และที่ตำแหน่ง  $b_4$  จะเห็นว่าสัญญาณมีรูปทรงคล้ายกับสัญญาณที่ตำแหน่ง  $b_3$  เพียงแต่มีการเลื่อนตำแหน่งตามแกนตั้งเนื่องจากมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น(แสดงค่าเฉลี่ยด้วยเส้นประ) ถ้าพิจารณาให้ดีจะพบว่าส่วนที่เกิดจากค่าเฉลี่ยของสัญญาณในช่วงนี้ทำให้เกิดส่วนที่เป็นบวกและลบในสัมประสิทธิ์ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ดังนั้นส่วนของผลที่เกิดจากค่าเฉลี่ยจึงไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ คงเหลือแต่ส่วนที่เปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยเท่านั้น ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ที่ตำแหน่งนี้มีค่าเป็นลบด้วยเหตุผลเดียวกับที่ตำแหน่ง  $b_3$  ดังนั้นจึงสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า การแปลงเวฟเลตเป็นการดึง โครงสร้างที่ซิดกัน (coherent structure) ของสัญญาณที่สเกลต่าง ๆ ด้วยการเลื่อนเวฟเลตไปตามความยาวสัญญาณ (การเพิ่มค่า  $b$ ) โดยจะสามารถหาโครงสร้างที่ซิดกันของสัญญาณที่สเกล  $a$  ได้ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ ที่ค่า  $a$  ต่าง ๆ จนกว่าจะครบช่วงที่ต้องการ



รูปที่ 3-12 ตัวเวฟเลตเมื่อเทียบกับสัญญาณ (ก) เวฟเลตที่สเกลและตำแหน่งหนึ่ง ๆ บนสัญญาณ,

(ข) เวฟเลตที่สเกลหนึ่งบนสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนสัญญาณ

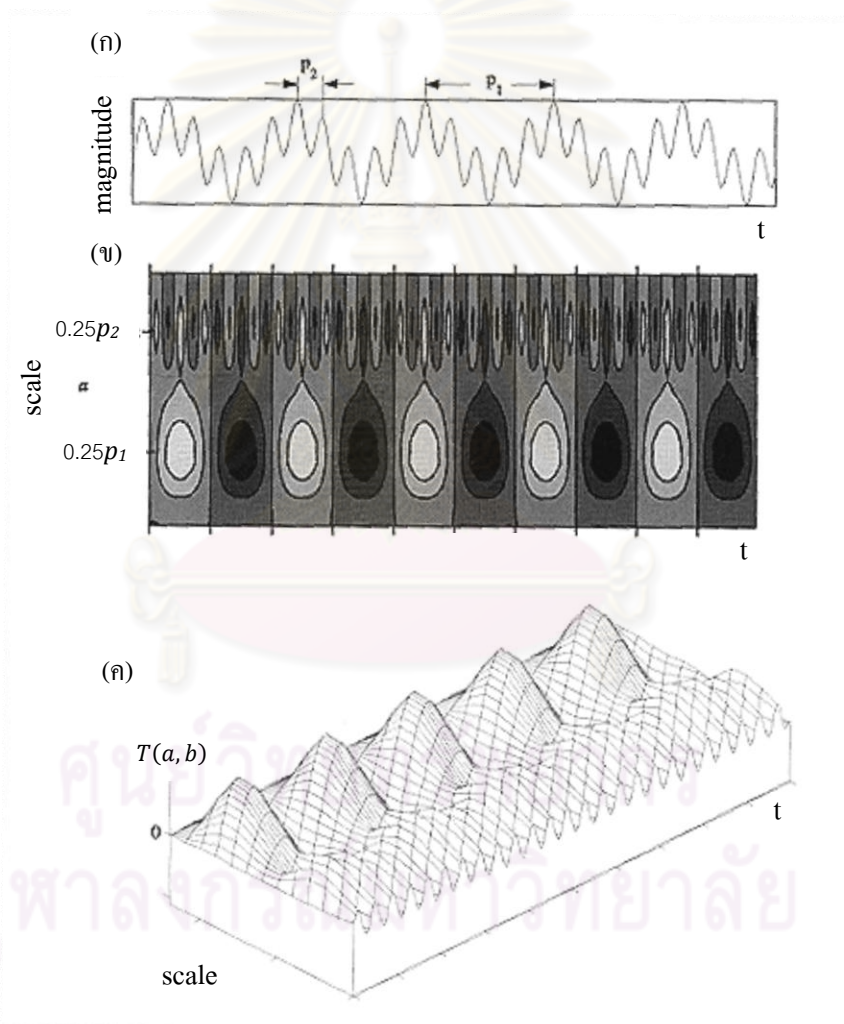
ต่อมาจะพิจารณาผลของการแปลงเวฟเลตที่เกี่ยวข้องกับความถี่ของสัญญาณ โดยสามารถพิจารณาจากตัวอย่างสัญญาณไซน์ที่ถูกตรวจสอบด้วยเวฟเลตที่สเกลและตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 3-13 ในรูปที่ 3-13(ก) แสดงให้เห็นการซ้อนทับกันของสัญญาณและเวฟเลตที่มีทั้งคาบ (สเกล) และตำแหน่งที่เข้ากันหรือมีสหสัมพันธ์กันสูงสำหรับที่สเกล  $a$  และตำแหน่ง  $b$  ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  จึงมีค่าเป็นบวกที่มาก ต่อมาพิจารณารูปที่ 3-13(ข) เมื่อเวฟเลตเลื่อนไปที่ตำแหน่งใหม่ที่ทำให้เครื่องหมายของมันและสัญญาณตรงข้ามกันแต่ยังคงมีรูปทรงที่คล้ายคลึงกันดังรูปที่ 3-13(ก) จะได้  $T(a, b)$  ในกรณีนี้เป็นลบในขนาดที่เท่ากับกรณีของรูปที่ 3-13(ก) สำหรับตำแหน่งของเวฟเลตระหว่างรูปที่ 3-13(ก) และ 3-13(ข) นั้น ค่า  $T(a, b)$  ที่ได้จะเปลี่ยนจากค่ามากที่สุดไปยังค่าน้อยที่สุด ในรูปที่ 3-13(ค) แสดงตำแหน่ง  $b$  ที่ทำให้  $T(a, b)$  มีค่าเป็นศูนย์ สำหรับรูปที่ 3-13(ก) - (ค) ถือว่าเวฟเลตมีความเข้ากันได้แบบเฉพาะที่กับสัญญาณ กล่าวคือ เวฟเลตมีขนาดและรูปทรงที่ประมาณได้ว่าคล้ายกับสัญญาณ รูปที่ 3-13(ง) แสดงผลที่เกิดจากการใช้ค่า  $a$  ที่น้อยลงกว่าเดิมมาก ๆ จะเห็นได้ว่าส่วนที่เป็นบวกและลบของเวฟเลตถูกทำคอนโวลูชันกับส่วนเดียวกันของสัญญาณทำให้ค่า  $T(a, b)$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์ หรือในกรณีของรูปที่ 3-13(จ) ที่  $a$  มีค่ามาก ๆ เวฟเลตจะครอบคลุมบริเวณที่เป็นบวกและลบซ้ำ ๆ กันของสัญญาณ ซึ่งก็ทำให้  $T(a, b)$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เช่นเดียวกัน ดังนั้นจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตที่สเกลที่ต่างจากสเกลที่สอดคล้องกับความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์มาก ๆ จะให้ค่าใกล้เคียงกับศูนย์ดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-13 ตัวเวฟเลตเมื่อเทียบกับสัญญาณไซน์ (ก) เวฟเลตที่อยู่ในเฟสเดียวกับสัญญาณ, (ข) เวฟเลตที่เฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณ, (ค) เวฟเลตที่ตำแหน่งระหว่าง (ก) และ (ข) ที่ให้  $T(a, b)$  เป็นศูนย์, (ง), (จ) เวฟเลตที่มีค่า  $a$  น้อยและมากตามลำดับ

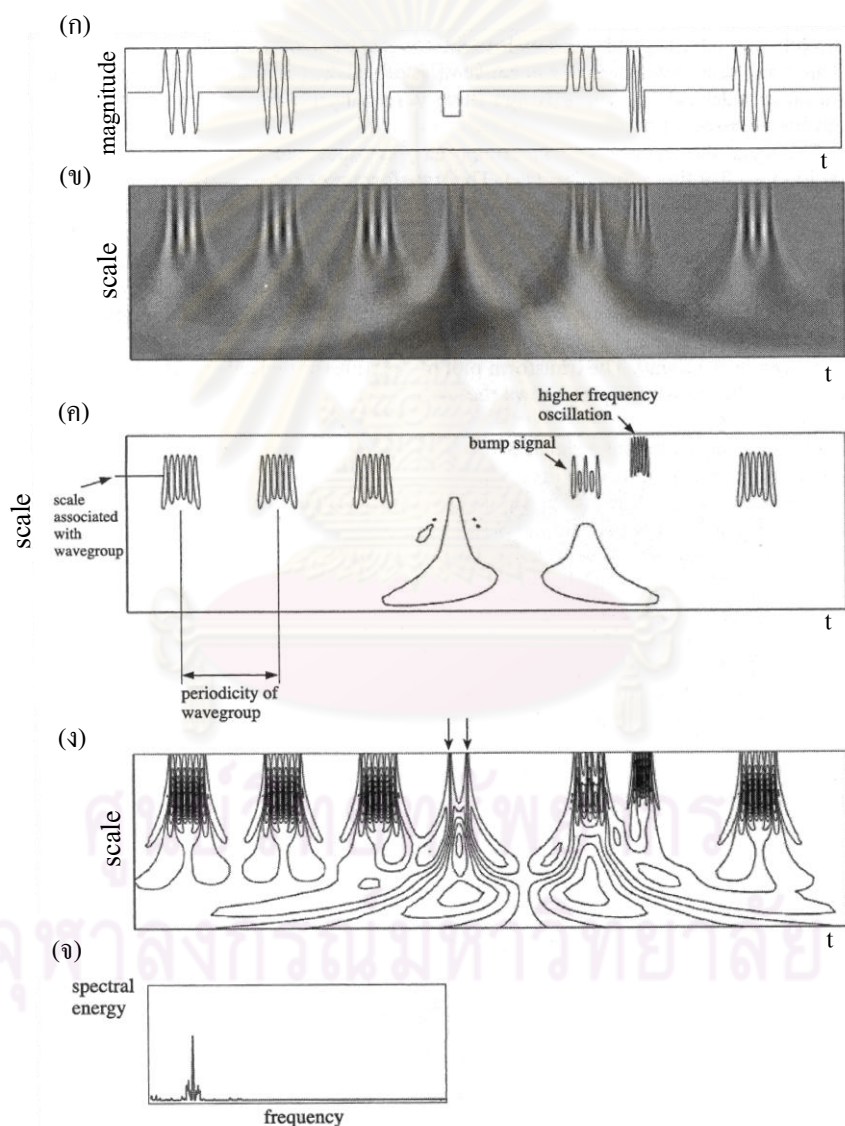


รูปที่ 3-14(ก) แสดงสัญญาณผลรวมไชน์ที่มีคาบ  $p_1$  และ  $p_2$  รูปที่ 3-14(ข) แสดงคอนทัวร์-พล็อตของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณตามรูปที่ 3-14(ก) ที่ถูกแปลงเวฟเลตด้วยเม็ทริกกันแฮทเวฟเลต โดยแสดงเป็นสเกลสีเทา ซึ่งระดับความเข้มจากสีดำไปสีขาวแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์จากน้อยไปหามากตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการแปลงเวฟเลตสามารถแสดงให้เห็นส่วนประกอบของความถี่ในสัญญาณ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุดที่สเกล  $0.25p_1$  และ  $0.25p_2$  ซึ่งเป็นสเกลที่สอดคล้องกับความถี่สำหรับเวฟเลตชนิดนี้ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในส่วนต้น ๆ ของหัวข้อนี้ รูปที่ 3-14 (ค) แสดงสัมประสิทธิ์ของรูปที่ 3-14(ข) ในรูปแบบพื้นผิวสามมิติ จะเห็นได้ว่าที่เวลา  $b$  ต่าง ๆ ในส่วนที่สเกล  $a$  มีค่าเป็นศูนย์จะมีค่าเป็นศูนย์ สอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่า ถ้าสเกลของเวฟเลตต่างจากความถี่ในสัญญาณมาก ๆ สัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3-14 ผลของการแปลงเวฟเลตที่เกี่ยวข้องกับคาบของสัญญาณ (ก) สัญญาณผลรวมของไชน์, (ข) คอนทัวร์พล็อตของการแปลงเวฟเลต, (ค) พล็อตพื้นผิวของการแปลงเวฟเลต

สำหรับสัญญาณที่มีลักษณะภายในแยกออกจากกัน ดังเช่นรูปที่ 3-15(ก) ที่ประกอบด้วยการคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่เดียวกันสามชุด สัญญาณลูกกระนาบ และสัญญาณรูปบล็อคลี่เหลี่ยม ผลของการแปลงเวฟเลตของสัญญาณดังกล่าวในรูปแบบของการพล็อตสัมประสิทธิ์ คอนทัวร์พล็อต 2 และ 12 ระดับแสดงไว้ในรูปที่ 3-15 (ข) - (ง) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปที่ 3-15(ข) และ (ง) สามารถแสดงตำแหน่งการเริ่มต้นและสิ้นสุดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้ ในขณะที่การแปลงฟูริเยร์ 3-15(จ) ให้ข้อมูลเพียงความถี่ของสัญญาณไซน์อย่างเดียว ไม่สามารถบ่งบอกลักษณะของลูกคลื่นและเวลาที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าวิธีการแสดงผลในระนาบเวลา-สเกลมีผลต่อการวิเคราะห์ด้วยสายตาซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป

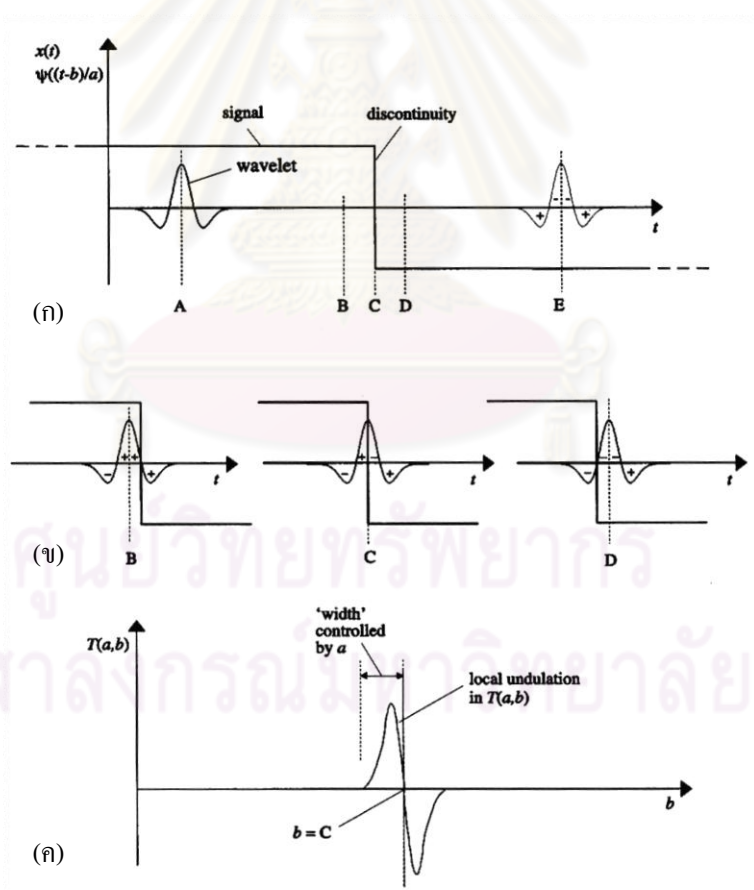


รูปที่ 3-15 การแปลงเวฟเลตของสัญญาณที่มีลักษณะภายในแยกออกจากกัน (ก) สัญญาณที่ที่เกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ , (ข) ผลการแปลงเวฟเลต, (ค)-(ง) คอนทัวร์พล็อตของผลการแปลงเวฟเลตที่ใช้ 2 และ 12 คอนทัวร์ตามลำดับ, (จ) สเปกตรัมพลังงาน

คุณสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของการแปลงเวฟเลตคือ ความสามารถในการตรวจหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (ในที่นี้จะเรียกว่า “ขอบ”) ดังแสดงในรูปที่ 3-16(ก) โดยมีหลักการดังแสดงในรูปที่ 3-16(ข) ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

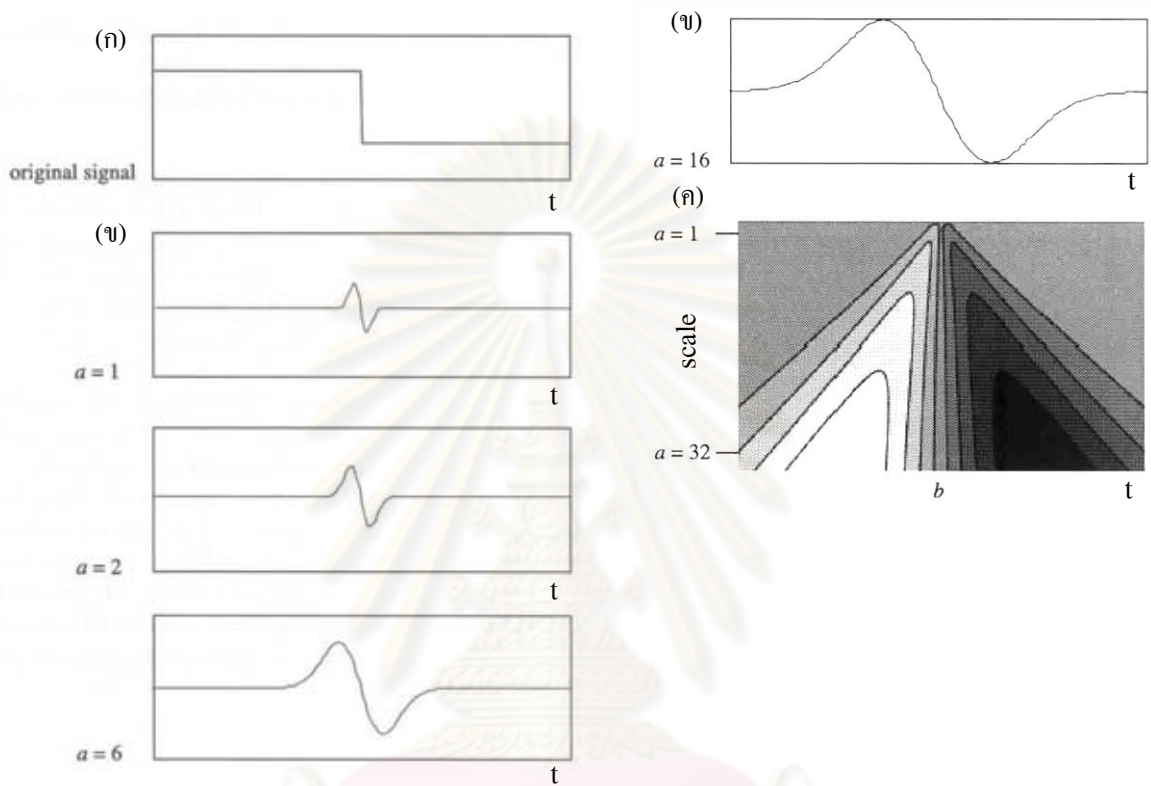
- ที่ตำแหน่ง A จุดนี้อยู่ห่างจากขอบมาก และจากการที่สัญญาณมีค่าคงที่ ทำให้  $T(a, b)$  มีค่าเป็นศูนย์
- ที่ตำแหน่ง B เวฟเลตเริ่มข้ามตำแหน่งของขอบ  $T(a, b)$  มีค่าเป็นบวก
- ที่ตำแหน่ง C จุดกึ่งกลางของเวฟเลตอยู่ที่ขอบพอดี เนื่องจากเวฟเลตต้องมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และรูปสมการของเวฟเลตมีลักษณะที่สมมาตร ทำให้ค่า  $T(a, b)$  มีค่าเป็นศูนย์
- ที่ตำแหน่ง D เวฟเลตเริ่มออกจากตำแหน่งของขอบ  $T(a, b)$  มีค่าเป็นลบ
- ที่ตำแหน่ง E  $T(a, b)$  มีค่าเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับตำแหน่ง A

ค่าของการแปลงสัญญาณที่มีขอบเกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 3-16(ค) จะเห็นได้ว่าที่จุดขอบ (C) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3-16 การใช้เวฟเลตในการตรวจจับความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ (ก) ตำแหน่งของเวฟเลตบนสัญญาณ, (ข) เวฟเลตที่ตำแหน่ง B-D ตามลำดับ, (ค) ผลการแปลงเวฟเลตที่สเกล  $a$

รูปที่ 3-17 แสดงให้เห็นผลการแปลงสัญญาณที่มีขอบตงแสดงในรูปที่ 3-17(ก) โดยใช้เม็กซิกกันแฮท เวฟเลตที่สเกลต่ง ๆ ดังรูปที่ 3-17(ข) จะเห็นได้ว่าสเกลมีผลต่อความชัดเจนในการระบุตำแหน่ง ขอบ คือเมื่อสเกลมีค่าน้อยจะสามารถระบุตำแหน่งขอบได้ชัดกว่า รูปที่ 3-17(ค) แสดงคอนทัวร์ พล็ตของการแปลงสัญญาณในรูปที่ 3-17(ก) ที่สเกลต่ง ๆ กัน จะเห็นได้ว่าเส้นคอนทัวร์ลู่เข้าสู่จุด ที่เกิดขอบที่สเกลต่ำที่สุด



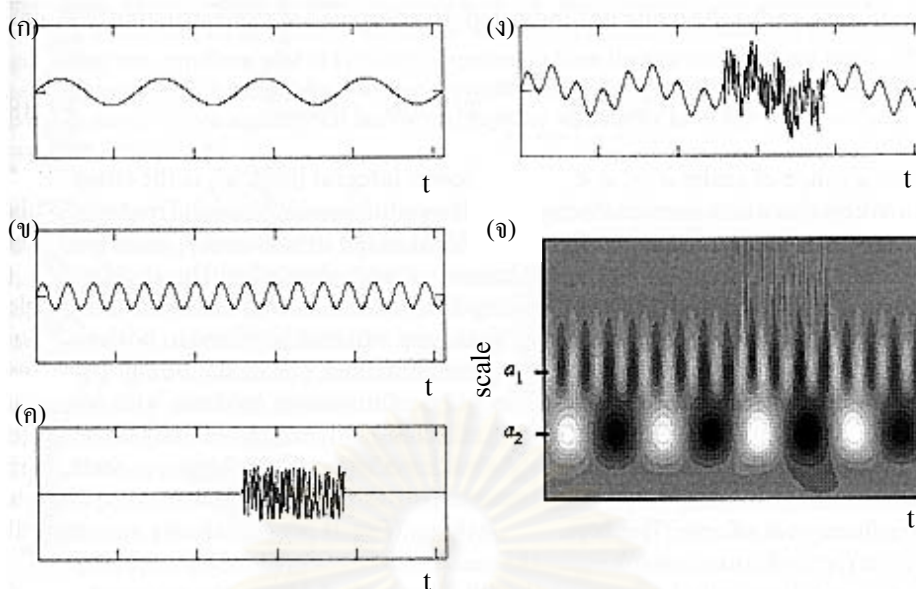
รูปที่ 3-17 ผลของสเกลที่มีต่อการตรวจจับความไม่ต่อเนื่อง (ก) สัญญาณที่ใช้, (ข) ผลการแปลง เวฟเลตที่สเกล  $a$  ต่ง ๆ , (ค) คอนทัวร์พล็ตของการแปลงเวฟเลต

**การแปลงกลับเวฟเลต**

เช่นเดียวกับการแปลงฟูริเยร์ การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องก็สามารถแปลงกลับได้ โดย อาศัยสมการ (3-20)

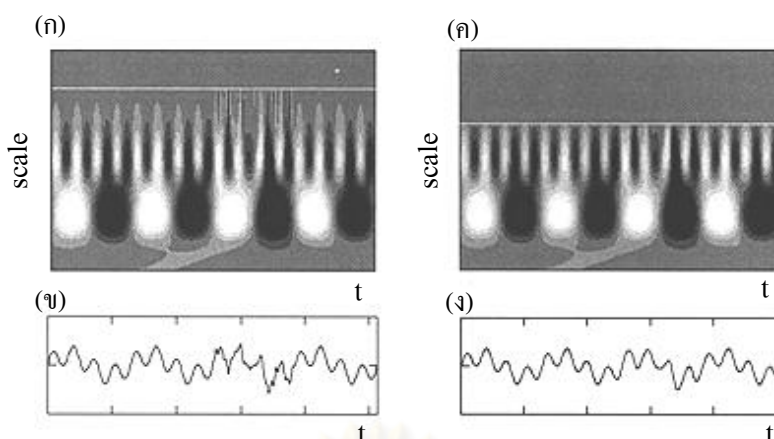
$$x(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{dadb}{a^2} \tag{3-20}$$

สมการ (3-20) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณเดิมก่อนถูกแปลงเวฟเลตสามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การ แปลงเวฟเลตตลอดช่วงสเกล  $a$  และเวลา  $b$  โดยให้สังเกตว่าเวฟเลตที่ใช้แปลงกลับไม่ได้เป็นคู่สังยุค เหมือนตอนแปลงเวฟเลตตามสมการ (3-15) ถ้าจำกัดช่วงของสเกลที่จะแปลงกลับในสมการ (3-20) ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือการกรองสัญญาณนั่นเอง แสดงตัวอย่างให้เห็นด้วยสัญญาณประกอบในรูปที่ 3-18(ง) ซึ่งเกิดจากผลรวมของสัญญาณไซน์สองความถี่ดังรูปที่ 3-18(ก) และ (ข) กับสัญญาณ ระบายความถี่สูงต่งแสดงในรูปที่ 3-18(ค)



รูปที่ 3-18 สัญญาณประกอบที่ใช้กับตัวกรองเวฟเลต ประกอบด้วย (ก) สัญญาณรูปไซน์ความถี่ต่ำ (สอดคล้องกับสเกล  $a_2$ ), (ข) สัญญาณรูปไซน์ความถี่สูง (สอดคล้องกับสเกล  $a_1$ ), (ค) สัญญาณรบกวนความถี่สูง, (ง) ผลรวมของสัญญาณในข้างต้น, (จ) สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต

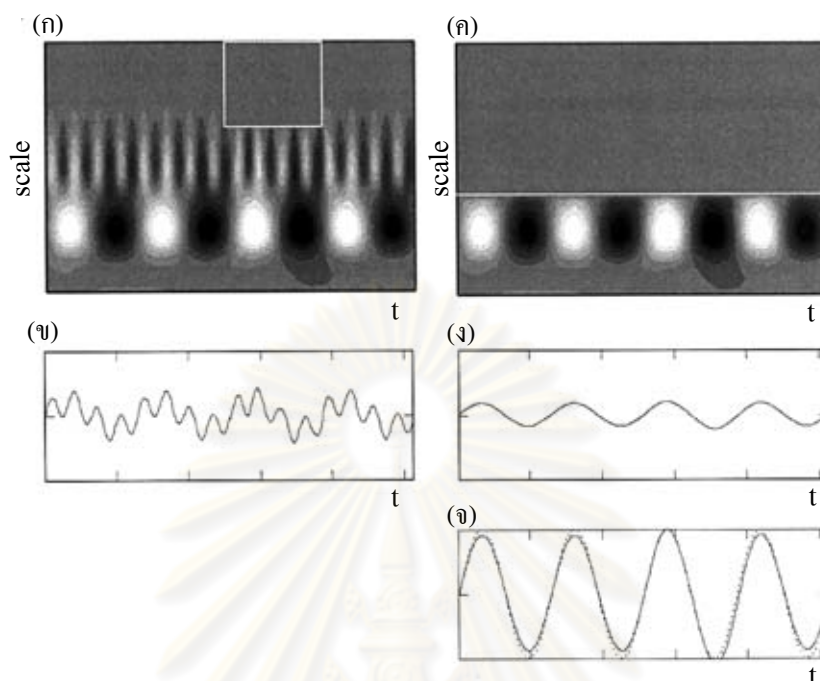
สัญญาณตามรูปที่ 3-18(ง) จะถูกแปลงเวฟเลตแล้วถูกเลือกแปลงกลับในช่วงสเกลหนึ่ง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-19 (ก) และ (ค) โดยสัญญาณที่มีความถี่อยู่นอกช่วงสเกลที่ต้องการ (สูงกว่าเส้นสีขาวในพล็อตของสัมประสิทธิ์) จะไม่ถูกแปลงกลับทำให้สัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ไม่มีส่วนประกอบของสัญญาณที่ถูกกรองออกจากเงื่อนไขของช่วงสเกลดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 3-19(ข) และ (ง) ที่เกิดจากการกรองด้วยช่วงสเกลตามรูปที่ 3-19(ก) และ (ค) ตามลำดับ จะพบว่าในรูปที่ 3-19(ค) ส่วนของสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนถูกตัดออกจนหมดทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ตามรูปที่ 3-19(ง) ไม่มีส่วนของสัญญาณรบกวน ในขณะที่รูป 3-19(ข) ยังมีส่วนของสัญญาณรบกวนอยู่บ้างเนื่องจากยังมีส่วนของสัญญาณรบกวนที่ถูกยอมให้แปลงกลับเหลืออยู่ตามรูปที่ 3-19(ก) แต่น้อยกว่าสัญญาณเริ่มต้นตามรูปที่ 3-18(ง) แต่ถ้าเลือกสเกลเพียงค่าเดียวแทนที่จะเป็นช่วง ก็เปรียบเสมือนกับการกรองสัญญาณด้วยความถี่กึ่งกลาง (center frequency) สอดคล้องกับสเกลนั้น ๆ ในขณะที่ความกว้างของแถบความถี่ผ่าน (bandwidth) ของตัวกรองขึ้นอยู่กับชนิดของเวฟเลต หลักการนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของเครื่องจักรแบบใช้ตัวกรองเวฟเลต (wavelet filtering) เช่น envelope spectrum เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงในส่วนต่อ ๆ ไป



รูปที่ 3-19 การกรองสัญญาณตามรูปที่ 3-18(ง) ด้วยเม็ทซิกันแฮทเวฟเลต (ก),(ค) สัมประสิทธิ์ที่มีตำแหน่งอยู่เหนือเส้นสีขาวจะถูกกรองออก, (ข),(ง) สัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากรูป (ก) และ (ค) ตามลำดับ

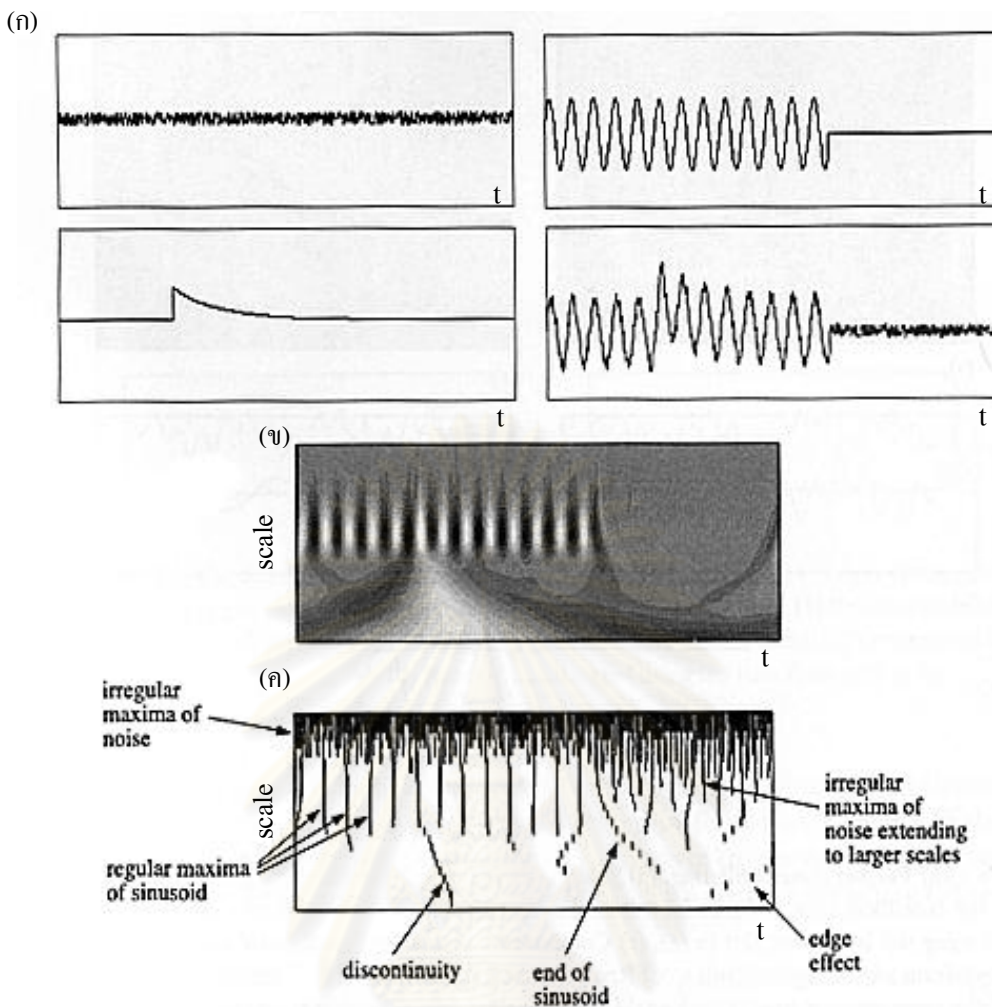
นอกจากสามารถเลือกสเกล(ความถี่) ของตัวกรองเวฟเลตได้แล้ว ยังสามารถเลือกสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่จะถูกกรองออกเป็นรายตัวได้ โดยจากรูปที่ 3-18(จ) จะพบว่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดมาจากส่วนของสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะเป็นรูปแบบสุ่ม สามารถแยกแยะออกจากสัญญาณที่สนใจซึ่งในที่นี้คือสัญญาณ ไซน์ซึ่งมีลักษณะเป็นคาบที่ชัดเจน ดังนั้นถ้ามีวิธีพิจารณาว่าสัมประสิทธิ์ตัวใดเกิดขึ้นมาจากสัญญาณรบกวนแล้วจะสามารถลดผลจากสัญญาณรบกวนได้ด้วยการตัดค่าสัมประสิทธิ์เหล่านั้นออกไปโดยตั้งค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในเวลาและสเกลที่ต้องการกรองออกให้เป็นศูนย์แล้วจึงแปลงกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3-20(ก) ที่ระบุได้ว่าส่วนของสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนอยู่ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยม จากนั้นจึงปรับค่าสัมประสิทธิ์ในบริเวณดังกล่าวให้เป็นศูนย์ ทำให้สัญญาณที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 3-20(ข) มีลักษณะเหมือนกับผลรวมของสัญญาณในรูปที่ 3-18(ก) และ (ข) หลักการนี้นำไปสู่การแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่ต้องการหาเพื่อวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของเครื่องจักรด้วยวิธีการแยกส่วนด้วยเวฟเลต (wavelet decomposition) เช่น inter and intra scale denoising method [1] ซึ่งมีหลักการที่สำคัญคือการตัดสินใจว่าสัมประสิทธิ์หนึ่ง ๆ เกิดจากสัญญาณรบกวนหรือไม่ ซึ่งจะได้อธิบายถึงวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวในส่วนต่อ ๆ ไป อย่างไรก็ตาม มีข้อพึงระวังไว้ว่าการแปลงกลับเวฟเลตจากการกรองไม่สามารถสร้างสัญญาณกลับได้เหมือนสัญญาณตั้งต้นอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความคล้ายกันของตัวเวฟเลตกับลักษณะของสัญญาณ ค่าของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่ไม่ใช่สัมประสิทธิ์ที่เราต้องการแปลงกลับที่อยู่ในสเกลใกล้เคียงกัน การเลือกช่วงสเกลที่ใช้แปลงกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3-20(ค) - (จ) ในรูปที่ 3-20(ค) เป็นการกรองเอาสัญญาณ ไซน์ความถี่ต่ำ (แปลงกลับเฉพาะสัมประสิทธิ์ที่อยู่ใต้เส้นสีขาว) ได้สัญญาณดังรูปที่ 3-20

(ง) และรูปที่ 3-20(จ) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่ได้ในรูปที่ 3-20(ง) กับสัญญาณเริ่มต้นดังรูปที่ 3-18(ก) จะเห็นได้ว่ามีความต่างกันอยู่เล็กน้อย เนื่องจากสาเหตุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 3-20 การกรองสัญญาณรบกวนจากรูปที่ 3-18(ง) ออก, (ก) ตั้งค่าสัมประสิทธิ์ในกรอบสี่เหลี่ยมให้เป็นศูนย์, (ข) สัญญาณที่ผ่านการกรอง, (ค) การกรองเอาสัญญาณไซน์ความถี่ต่ำโดยตั้งค่าสัมประสิทธิ์เหนือเส้นสีขาวเป็นศูนย์, (ง) สัญญาณที่ผ่านการกรอง, (จ) เปรียบเทียบสัญญาณที่ผ่านการกรอง (เส้นทึบ) กับสัญญาณความถี่ต่ำเริ่มต้น (เส้นประ)

สำหรับการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง นอกเหนือจากวิธีที่กล่าวมาในข้างต้นแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่เราต้องการ วิธีการนั้นคือการพิจารณาค่ามอดุลัสสูงสุด (modulus maxima) ของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต โดยที่ค่ามอดุลัสคือค่าขนาดของค่ายอดในบริเวณช่วงแคบ ๆ (local maxima or minima) การพิจารณาเส้นทางเดินของมอดุลัสสามารถแยกแยะระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนได้ รวมไปถึงบริเวณที่เกิดความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณด้วย รูปที่ 3-21(ก) แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสามสัญญาณ ผลการแปลงเวฟเลตที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-21(ข) ซึ่งสามารถนำสัมประสิทธิ์ที่ได้มาหาค่ามอดุลัสสูงสุดดังแสดงในรูป 3-21(ค) จะพบว่าเส้นมอดุลัสที่ได้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับคาบของสัญญาณรบกวนและความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณได้ (พิจารณารูปที่ 3-21(ข) และ (ค) ประกอบ) อย่างไรก็ตามในกรณีที่กล่าวมาทั้งหมด ถ้าสัญญาณรบกวนมีขนาดใหญ่เทียบกับขนาดของสัญญาณที่สนใจจะทำให้การแยกแยะสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณทำได้ยากขึ้น เนื่องจากไม่เห็นความชัดเจนนั่นเอง



รูปที่ 3-21 การใช้ค่ามอดุลัสสูงสุดในการพิจารณาสัญญาณ (ก) สัญญาณที่ใช้ในการแปลง (รูปล่างขวา), (ข) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลง, (ค) ค่ามอดุลัสสูงสุดของรูป (ข)

**พลังงานของสัญญาณ**

พลังงานทั้งหมดของสัญญาณ  $x(t)$  คือ

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \tag{3-21}$$

จะพบว่าสมการ (3-21) นิยามในรูปแบบเดียวกับพลังงานของเวฟเลตดังสมการ (3-13) ดังนั้นพลังงานของสัญญาณสามารถถูกแบ่งไปเก็บไว้ในสัมประสิทธิ์ที่สเกล  $a$  และตำแหน่ง  $b$  ได้ดังนี้

$$E(a, b) = |T(a, b)|^2 \tag{3-22}$$

พล็อตของสมการ (3-22) เรียกว่า สเกลโลแกรม (scalogram) ในทางปฏิบัติแล้วฟังก์ชันที่แตกต่างออกไปจากสมการ (3-22) เช่น มีตัวคูณที่เป็นค่าคงที่เข้ามาเพิ่มก็ถือว่าเป็นสเกลโลแกรมเช่นเดียวกัน ทั้งนี้สามารถหาพลังงานรวมของสัญญาณจากสเกลโลแกรมและค่าคงตัวของการยอมรับได้ ดังแสดงในสมการ (3-23)

$$E = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} |T(a, b)|^2 \frac{dad b}{a^2} \tag{3-23}$$



รูปที่ 3-22(ข) - (ค) แสดงสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลต และสเกลโลแกรมของสัญญาณรูปที่ 3-22 (ก) จะเห็นได้ว่าทั้งสองมีลักษณะที่คล้ายกันเนื่องจากใช้เม็ทริกกันแสทเวฟเลตที่เป็นเวฟเลตจำนวนจริงในการวิเคราะห์ สำหรับเวฟเลตจำนวนเชิงซ้อนที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปสามารถดูมอดูลัส เฟส ค่าสัมประสิทธิ์จริงและเชิงซ้อนแยกกันได้ พื้นผิวของสเกลโลแกรมบ่งบอกถึงบริเวณที่พลังงานของสัญญาณถูกเก็บไว้ใน การแปลงเวฟเลตที่ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ โดยแต่ละสเกลจะมีพลังงานเก็บไว้

$$E(a) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} |T(a, b)|^2 db \quad (3-24)$$

ดังนั้นค่ายอดของ  $E(a)$  บ่งบอกถึงสเกลที่แบ่งเอาพลังงานของสัญญาณไปมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3-22(ง) เราสามารถแปลงการกระจายพลังงานในแต่ละสเกล  $E(a)$  ไปเป็นการกระจายพลังงานในแต่ละความถี่ของเวฟเลต  $E_w(f)$  เพื่อที่จะเปรียบเทียบโดยตรงกับพลังงานของฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณ  $E_F(f)$  ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนสเกล  $a$  ให้เป็นความถี่ที่บ่งบอกลักษณะเฉพาะ (characteristic frequency) ของเวฟเลต โดยทั่วแล้วนิยมใช้ความถี่กึ่งกลางของแถบความถี่ผ่านของสเปกตรัมพลังงานของเวฟเลตนั้น ๆ จากการที่ความถี่แปรผกผันกับสเกล จะได้ว่า

$$f = \frac{f_c}{a} \quad (3-25)$$

เมื่อ  $f_c$  คือความถี่กึ่งกลางของแถบความถี่ผ่านของสเปกตรัมพลังงานของเวฟเลตแม่ ( $a=1$ ) สำหรับเม็ทริกกันแสทเวฟเลต  $f_c$  มีค่าเท่ากับ  $\sqrt{5/2}/2\pi$  หรือ 0.251 ดังนั้นจากสมการ (3-23) และ (3-24) จะได้ว่า

$$E = \int_0^{\infty} E(a) \frac{da}{a^2} \quad (3-26)$$

จาก (3-25) จะได้ว่า  $da/a^2 = -df/f_c$  ดังนั้นถ้านิยามให้  $E_w(f) = E(a)/f_c$  จะได้ว่า

$$E = \int_0^{\infty} E_w(f) df \quad (3-27)$$

โดยที่สามารถเปรียบเทียบ  $E_w(f)$  และ  $E_F(f)$  ได้โดยตรง จากสมการ (3-24) และ (3-27) ทำให้สามารถเขียนพลังงานของสัญญาณใหม่ได้เป็น

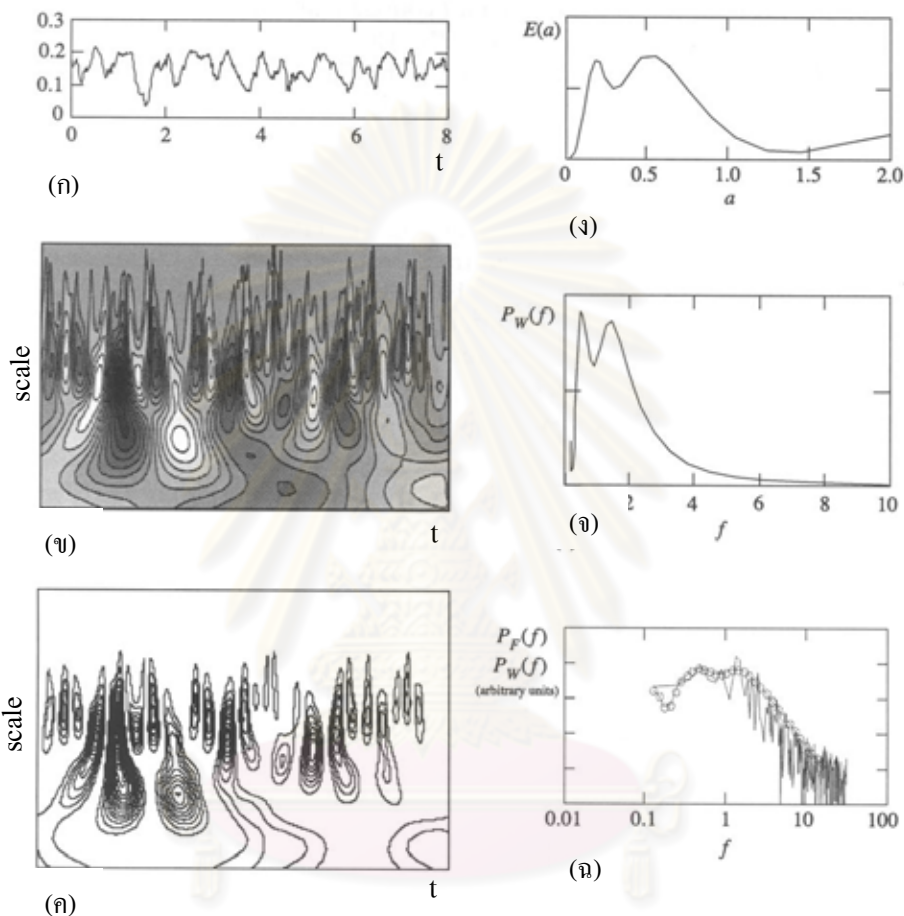
$$E = \frac{1}{C_g f_c} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} |T(f, b)|^2 df db \quad (3-28)$$

จากนิยาม  $T(f, b) = T(a, b)$  จะเห็นได้ว่าปริมาตรใต้พื้นผิวความหนาแน่นของพลังงาน  $E(f, b) = (|T(f, b)|^2)/(C_g f_c)$  จะมีค่าเท่ากับพลังงานรวมของสัญญาณ

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} E(f, b) df db \quad (3-29)$$

พื้นผิวความหนาแน่นของพลังงานนี้สามารถเอาไปเปรียบเทียบได้โดยตรงกับพื้นผิวความหนาแน่นของพลังงานของการแปลงฟูรีเยร์แบบช่วงสั้นหรือสามารถเรียกอีกอย่างว่า สเปกโตรแกรม (spectrogram) มีข้อสังเกตอยู่ว่า สเกลโลแกรม  $E(a, b)$  (รูปที่ 3-22 (ค)) และกราฟการกระจาย

พลังงานที่สเกลต่าง ๆ  $E(a)$  (รูปที่ 3-22(ง)) ไม่เป็นรูปปิด ในขณะที่  $E(f, b)$  และ  $E_w(f)$  เป็นรูปปิด ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนในการนิยามที่ได้กล่าวมาในข้างต้นได้ระบุให้ปิดล้อมไว้แล้ว อย่างไรก็ตาม ขอดต่าง ๆ ใน  $E(a, b)$  และ  $E(a)$  ก็ยังสอดคล้องกับช่วงที่มีพลังงานมากที่สุดใน  $E(f, b)$  และ  $E(f)$  ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ทั้งสเกลโลแกรม  $E(a, b)$  หรือการกระจายพลังงานที่สเกลต่าง ๆ  $E(a)$  ในการหาการกระจายตัวของพลังงานของสัญญาณในสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตได้



รูปที่ 3-22 ตัวอย่างการวิเคราะห์พลังงานของสัญญาณด้วยเวฟเลต (ก) สัญญาณที่ใช้วิเคราะห์, (ข) สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต (ค่าน้อยที่สุดสีดำ ค่ามากที่สุดสีขาว), (ค) สเกลโลแกรม, (ง) การกระจายตัวของพลังงานในแต่ละสเกล, (จ) ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการแปลงเวฟเลต, (ฉ) เปรียบเทียบความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมระหว่างเวฟเลตสเปกตรัม (จุดวงกลม) และฟูริเยร์สเปกตรัม (เส้นทึบ)

ถ้าสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์มีความยาวเป็นอนันต์ พลังงานก็ย่อมมีค่าเป็นอนันต์ด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วสัญญาณที่ได้จากการวัดจะมีความยาวที่มีค่าจำกัด ดังนั้นในทางปฏิบัติสเปกตรัมกำลัง (power spectra) จึงมักจะถูกนำมาใช้กับสัญญาณที่มีความยาวจำกัด โดยสเปกตรัมกำลังคือสเปกตรัมพลังงานที่ถูกหารด้วยช่วงเวลาของสัญญาณที่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นพื้นที่ใต้กราฟสเปกตรัมกำลังคือพลังงานเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยเวลาของสัญญาณ (ดังนั้นจึงมีมิติเป็นกำลัง) สำหรับ

สัญญาณความยาว  $\tau$  สเปกตรัมกำลังของการแปลงฟูรีเยร์และเวฟเลตสามารถเขียนได้ดังสมการ (3-30) และ (3-31) ตามลำดับ

$$P_F(f) = \frac{1}{\tau} E_F(f) \quad (3-30)$$

$$P_W(f) = \frac{1}{\tau} E_W(f) = \frac{1}{\tau f_c C_g} \int_0^\tau |T(f, b)|^2 db \quad (3-31)$$

รูปที่ 3-22(จ) แสดงสเปกตรัมกำลังของการแปลงเวฟเลต จะเห็นได้ว่าพบจุดยอดสองจุดเหมือนกับรูปที่ 3-22(ง) แต่มีตำแหน่งกลับกันเนื่องจากสเกลแปรผกผันกับความถี่ พื้นที่ใต้กราฟของ  $P_F$  มีค่าเท่ากับพลังงานต่อหน่วยเวลาของสัญญาณ รูปที่ 3-22(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมกำลังของการแปลงฟูรีเยร์  $P_F$  และเวฟเลต  $P_W$  โดยแกนความถี่พล็อตแบบล็อกการิทึม จะพบว่า  $P_W$  มีแนวโน้มแนวเดียวกับ  $P_F$  แต่ที่ไม่มีมีความไวต่อการเปลี่ยนความถี่เท่ากับ  $P_F$  ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างของเวฟเลตมีความเกี่ยวข้องอย่างมากในการวิเคราะห์สัญญาณ เวฟเลตบางตัวอาจจะมีสหสัมพันธ์กับลักษณะที่อยู่ในสัญญาณ ได้ดีกว่า ทำให้เห็นผลที่ชัดเจนในสเปกตรัมกำลังมากกว่า

### การแปลงเวฟเลตในรูปของการแปลงฟูรีเยร์

จากสมการ (3-18) ได้กล่าวไว้ว่าการแปลงเวฟเลตคือการทำคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณกับฟังก์ชันเวฟเลต ดังนั้นเราสามารถนำทฤษฎีของคอนโวลูชันมาอธิบายการแปลงเวฟเลตให้อยู่ในรูปผลคูณของการแปลงฟูรีเยร์ของตัวสัญญาณเอง  $\hat{x}(f)$  และตัวเวฟเลตลูก  $\hat{\psi}_{a,b}(f)$  ดังสมการ (3-32)

$$T(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(f) \hat{\psi}_{a,b}^*(f) df \quad (3-32)$$

ผลการแปลงฟูรีเยร์ของเวฟเลตลูก ที่สเกล  $a$  และตำแหน่งการเลื่อน  $b$  คือ

$$\hat{\psi}_{a,b}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) e^{-i(2\pi f)t} dt \quad (3-33ก)$$

และถ้าเราแทนค่า  $t' = (t-b)/a$  (ดังนั้น  $dt = a dt'$ ) จะได้

$$\hat{\psi}_{a,b}(f) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t') e^{-i(2\pi f)(at'+b)} a dt' \quad (3-33ข)$$

ถ้าดึงค่าคงตัวออกอยู่นอกอินทิกรัลทั้งหมด จะได้ว่า

$$\hat{\psi}_{a,b}(f) = \sqrt{a} e^{-i(2\pi f)(b)} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i(2\pi af)(t)} a dt \quad (3-33ค)$$

จะเห็นได้ชัดว่าการแปลงฟูรีเยร์ของเวฟเลตลูกที่สเกล  $a$  และตำแหน่งการเลื่อน  $b$  คือผลคูณของค่าคงตัวที่ขึ้นกับ  $a$  และ  $b$  กับผลการแปลงฟูรีเยร์ของเวฟเลตแม่ โดยเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการแปลงฟูรีเยร์ใหม่เป็น  $af$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ (3-33ค) ใหม่ได้เป็น

$$\hat{\psi}_{a,b}(f) = \sqrt{a} \hat{\psi}(af) e^{-i(2\pi f)(b)} \quad (3-34)$$

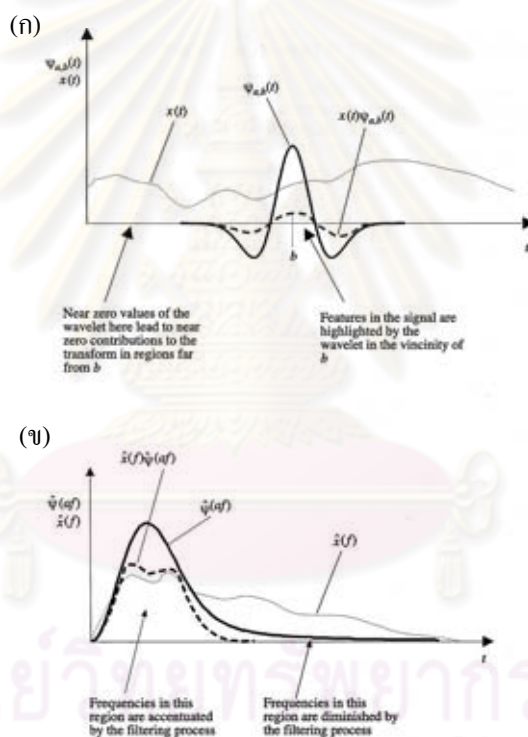
สำหรับค่าสังยุคในโดเมนความถี่สามารถหาได้จาก

$$\hat{\psi}_{a,b}^*(f) = \sqrt{a} \hat{\psi}^*(af) e^{-i(2\pi f)(b)} \quad (3-35)$$

ดังนั้นสมการ (3-32) จึงสามารถเขียนได้ในรูปของ

$$T(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(f) \hat{\psi}^*(af) e^{-i(2\pi f)(b)} df \tag{3-36}$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (3-37) คือการแปลงกลับฟูรีเยร์นั่นเอง การกระทำที่ได้กล่าวมานี้มีประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะการประมาณแบบไม่ต่อเนื่อง (discretized approximation) และเป็นวิธีการทั่วไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง จะพบว่าวิธีการนี้ช่วยเพิ่มความเร็วในการแปลงเวฟเลตขึ้นได้มากเมื่อเทียบกับสมการ (3-18) เพราะอัลกอริทึม FFT มีใช้กันโดยทั่วไปอยู่แล้ว นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ามีความจำเป็นในการหา FFT ของสัญญาณ  $x(t)$  เพียงครั้งเดียวเท่านั้น อีกทั้งถ้า  $\hat{\psi}_{a,b}(f)$  สามารถเขียนในรูปชัดเจน (explicit) ได้แล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องหา FFT ในส่วนนี้ เพื่อเป็นสร้างความเข้าใจที่ดีขึ้น รูปที่ 3-23(ก) และ (ข) แสดงการทำคอนโวลูชันของเวฟเลตกับตัวสัญญาณที่ถูกวิเคราะห์ทั้งใน โดเมนเวลาและผลที่เกิดขึ้นในโดเมนความถี่ตามลำดับ



รูปที่ 3-23 ความหมายของการแปลงเวฟเลตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (ก) ผลที่เกิดจากคอนโวลูชันระหว่างเวฟเลตกับสัญญาณ, (ข) ผลที่เกิดขึ้นจากข้อ (ก) ในโดเมนความถี่

**เวฟเลตเชิงซ้อน: มอร์เลต์เวฟเลต**

ในหัวข้อก่อนหน้านี้ทั้งหมดเป็นการแสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะต่าง ๆ ของทั้งเวฟเลตและการแปลงเวฟเลตโดยใช้เม็กซิกกันแฮทเวฟเลตที่เป็นเวฟเลตจริง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงมอร์เลต์-เวฟเลตซึ่งประกอบด้วยทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ เวฟเลตเชิงซ้อนมีผลการแปลงฟูรีเยร์เป็นศูนย์ในช่วงความถี่ที่ติดลบดังกล่าวไว้ในสมการ (3-14) เวฟเลตเชิงซ้อนสามารถแยกส่วนประกอบ

ของสัญญาณได้ทั้งขนาดและเฟส ในขณะที่เวฟเลตจริงจะไม่มีค่าเฟส โดยมอร์เลตเวฟเลตเป็นเวฟเลตเชิงซ้อนที่เป็นที่นิยมในการใช้วิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของเครื่องจักรมากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายกับผลการตอบสนองอิมพัลส์ โดยสามารถที่นิยามได้ตามสมการ (3-37)

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} (e^{i2\pi f_0 t} - e^{-(2\pi f_0)^2/2}) e^{-t^2/2} \quad (3-37)$$

เมื่อ  $f_0$  คือความถี่กึ่งกลางของมอร์เลตเวฟเลต พจน์ที่สองในวงเล็บเป็นพจน์ปรับแก้ค่าเพื่อให้เวฟเลตมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติแล้วเราสามารถละพจน์นี้ได้ เมื่อ  $f_0 \gg 0$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} (e^{i2\pi f_0 t}) e^{-t^2/2} \quad (3-38)$$

จากสมการ (3-38) จะเห็นได้ว่าเวฟเลตนี้เป็นคลื่นเชิงซ้อนที่มีกรอบเป็นเส้นโค้งก่าแบบเกาส์ (Gaussian curve) ดังแสดงในรูปที่ 3-24(ก) จะเห็นได้ว่า จาก  $e^{i2\pi f_0 t}$  ส่วนจริงและส่วนจินตภาพมีเฟสต่างกันอยู่หนึ่งในสี่คาบ ส่วนค่า  $\pi^{-1/4}$  มีไว้เพื่อให้พลังงานของเวฟเลตมีค่าเป็น 1 ค่าที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์ของสมการ (3-38) คือ

$$\hat{\psi}(f) = \pi^{1/4} \sqrt{2} e^{-\frac{1}{2}(2\pi f - 2\pi f_0)^2} \quad (3-39)$$

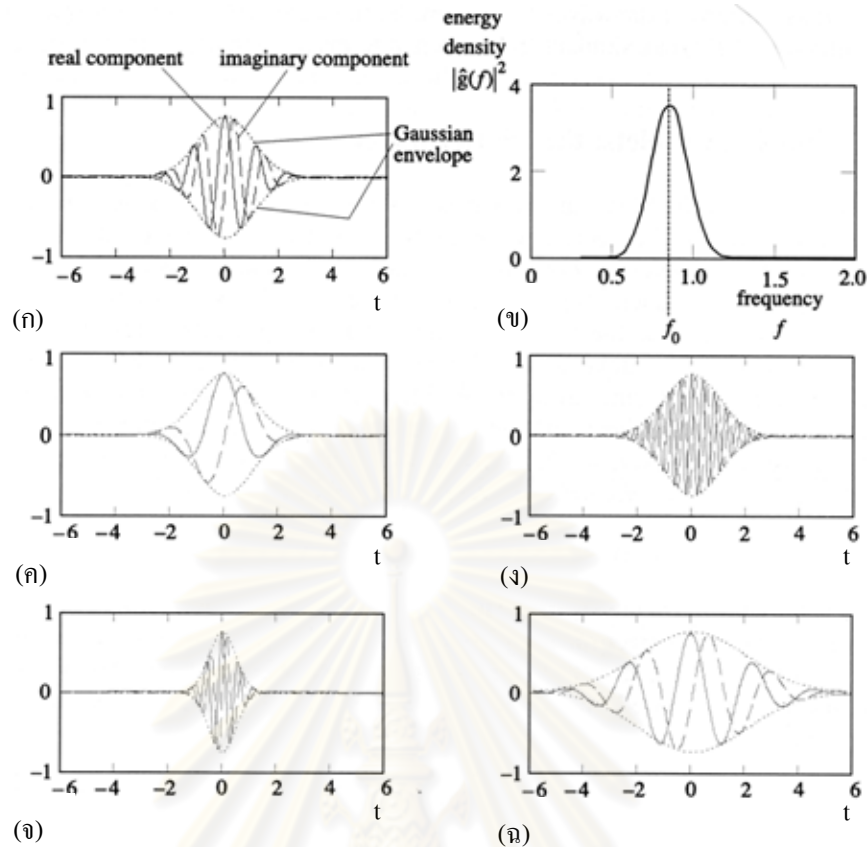
ซึ่งยังคงมีรูปแบบฟังก์ชันของเกาส์รอบจุด  $f_0$  บนแกนความถี่ สเปกตรัมพลังงานของเวฟเลตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$|\hat{\psi}(f)|^2 = 2\pi^{1/2} e^{-(2\pi f - 2\pi f_0)^2} \quad (3-40)$$

สเปกตรัมพลังงานของเวฟเลตแสดงในรูปที่ 3-24(ข) ความถี่กึ่งกลาง เป็นความถี่ที่บ่งบอกถึงจำนวนลูกคลื่นที่อยู่ในกรอบของเกาส์ โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ค่า  $f_0 = \sqrt{1/(2\ln 2)} = 0.849$  เพราะทำให้ค่ายอดของส่วนจริงที่มีขนาดสูงสุดมีขนาดเป็นสองเท่าของยอดที่มีขนาดรองลงมา (ในบางตำราใช้ อัตราเร็วเชิงมุม  $\omega_0 = 2\pi f_0$  ดังนั้น ถ้า  $f_0 = 0.849$  จะได้  $\omega_0 = 5.336$  จึงมีการใช้ค่า  $\omega_0$  ระหว่าง 5 ถึง 6 กันในทางปฏิบัติ สำหรับกรณีที่  $\omega_0 < 5$  ( $f_0 < 0.8$ ) ต้องใช้สมการเต็มรูปแบบตามสมการ (3-37) เนื่องจากเวฟเลตมีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ในระดับที่มีนัยสำคัญ รูปที่ 3-24(ค) และ (ง) แสดงมอร์เลตเวฟเลตที่  $f_0$  มีค่า 0.318 และ 1.909 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงจำนวนการสั่นในกรอบของเกาส์เพิ่มขึ้นตาม  $f_0$  สำหรับเวฟเลตลูกที่มีสเกล  $a$  และตำแหน่ง  $b$  จะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \pi^{-1/4} (e^{i2\pi f_0 (t-b)/a}) e^{-[(t-b)/a]^2/2} \quad (3-41)$$

รูปที่ 3-24(จ) และ (ฉ) แสดงมอร์เลตเวฟเลตที่สเกล 0.5 และ 2 ตามลำดับ

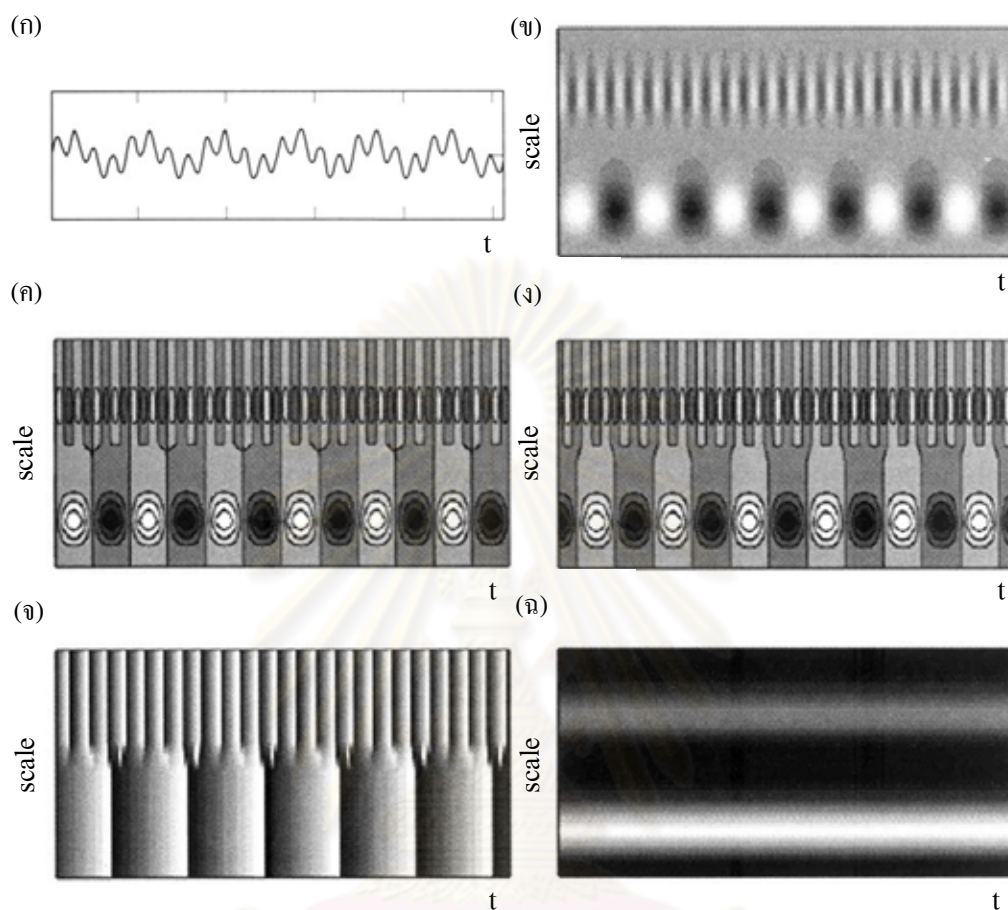


รูปที่ 3-24 ลักษณะของมอร์เลตเวฟเลต (ก) มอร์เลตเวฟเลตที่  $a = 1$   $f_0 = 0.894$ , (ข) สเปกตรัมพลังงานของรูป (ก), (ค) มอร์เลตเวฟเลตที่  $a = 1$   $f_0 = 0.318$ , (ง) มอร์เลตเวฟเลตที่  $a = 1$   $f_0 = 1.909$ , (จ) มอร์เลตเวฟเลตที่  $a = 0.5$   $f_0 = 0.894$ , (ฉ) มอร์เลตเวฟเลตที่  $a = 2$   $f_0 = 0.894$

จากสมการ (3-41) จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน้าต่างแบบเกาส์มีค่าเท่ากับ  $a$  รูปที่ 3-25 แสดงการแปลงเวฟเลตของสัญญาณไซน์สองความถี่ด้วยมอร์เลตเวฟเลต เมื่อพิจารณารูป 3-25 (ค) และ (ง) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเหมือนกันเพียงแต่มีการเลื่อน (เปลี่ยนเฟส) เท่านั้นเนื่องจากส่วนจินตภาพของเวฟเลตจะนำส่วนจริงอยู่หนึ่งในสี่ของคาบ ดังนั้นเมื่อแปลงเวฟเลตซึ่งใช้สังยุค (conjugate) ของเวฟเลตก็จะทำให้ส่วนจริงกลับมาส่วนจินตภาพอยู่หนึ่งในสี่คาบดังแสดงในรูปที่ 3-25(ค) และ (ง) นั่นเอง

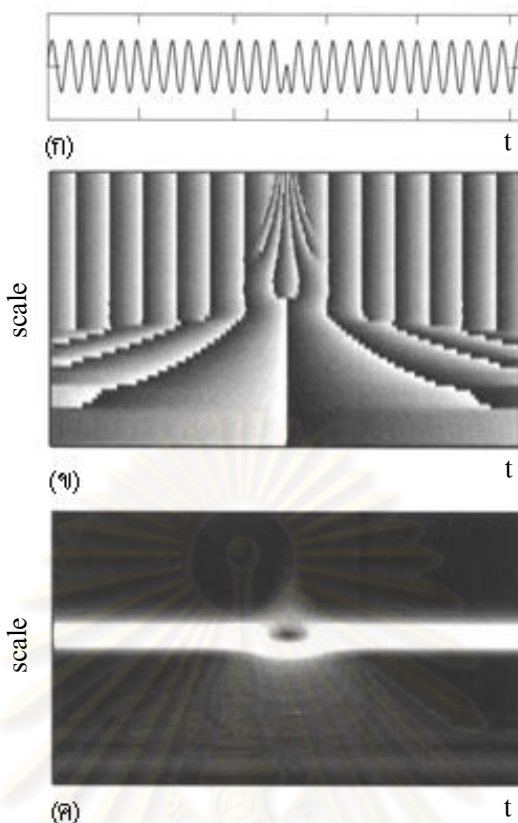
เนื่องจากสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  ที่ได้เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นจึงสามารถแทน  $T(a, b)$  ได้ด้วยเฟส (phase)  $\phi(a, b) = \tan^{-1}\{[Im(T(a, b))]/[Re(T(a, b))]\}$  และมอดุลัส (modulus) หรือขนาดของจำนวนเชิงซ้อน  $C(a, b) = \sqrt{[Re(T(a, b))]^2 + [Im(T(a, b))]^2}$  ซึ่งเฟสจะมีค่าระหว่าง  $-\pi$  ถึง  $\pi$  เป็นรอบ ๆ ตามความยาวของสัญญาณ ถ้าเฟสมีค่าเป็นศูนย์แสดงว่ากึ่งกลางส่วนจริงของเวฟเลตซ้อนทับกับค่ามากที่สุดของสัญญาณรูปไซน์พอดี ส่วนกรณีที่เฟสเป็น  $-\pi$  และ  $\pi$  หมายความว่าส่วนจริงของสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3-25(จ) ส่วนค่ามอดุลัส

แสดงถึงลักษณะของสัญญาณไซน์ทั้งสองความถี่ที่เกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาของความยาวสัญญาณ โดยจะเห็นเป็นแถบยาวตลอดสัญญาณที่สองสเกลที่สอดคล้องกับความถี่นั้น ๆ



รูปที่ 3-25 ผลการแปลงสัญญาณไซน์สองความถี่ (ก) สัญญาณไซน์สองความถี่, (ข) ส่วนจริงของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลง, (ค) คอนทัวร์พล็อตของ (ข), (ง) คอนทัวร์พล็อตของส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์, (จ) เฟสของสัมประสิทธิ์ ( $-\pi$  สีดำ,  $\pi$  สีขาว), (ฉ) มอดุลัสของสัมประสิทธิ์

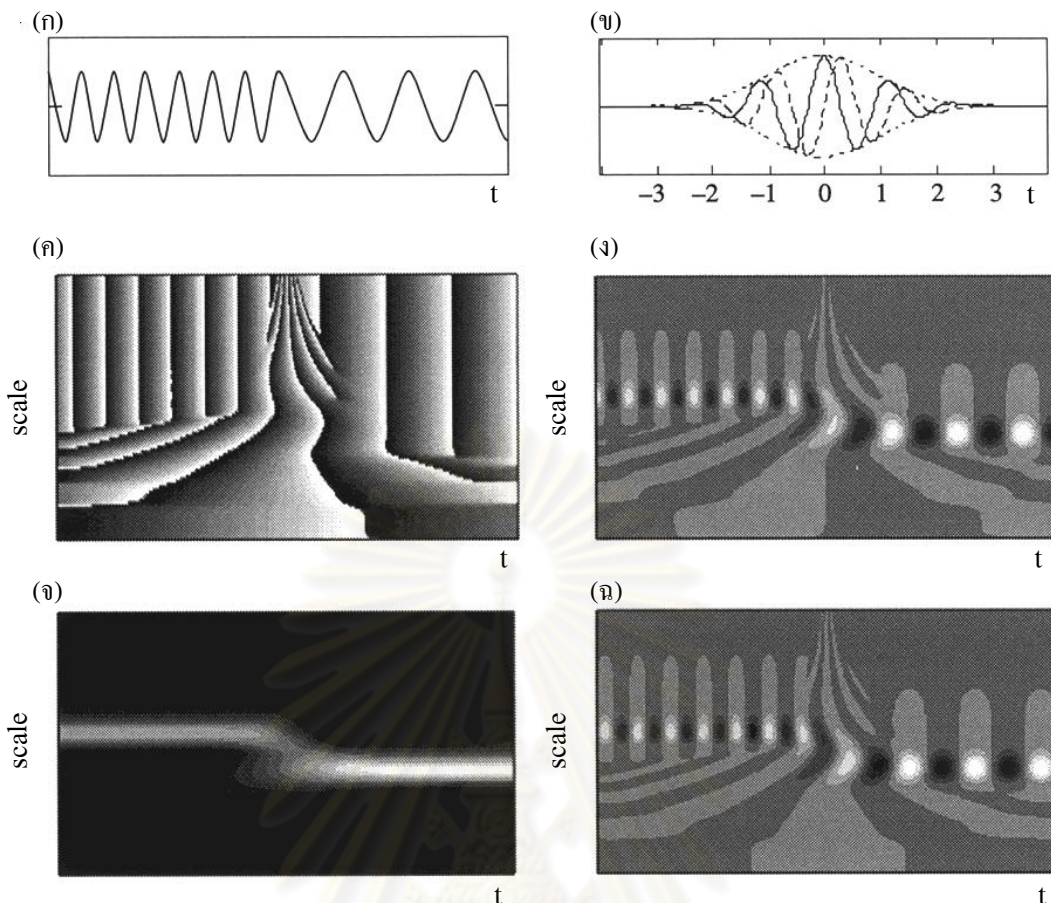
รูปที่ 3-26(ก) แสดงตัวอย่างของสัญญาณไซน์ที่ถูกเลื่อนไปครึ่งคาบที่กึ่งกลางของความยาวสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณชุดนี้จึงประกอบไปด้วยความไม่ต่อเนื่องและการเลื่อนเฟส จากรูปที่ 3-26(ข) และ (ค) จะเห็นได้ว่าเฟสและมอดุลัสของสัมประสิทธิ์สามารถบอกตำแหน่งบนสัญญาณที่เกิดความไม่ต่อเนื่องบนสัญญาณได้ โดยเฉพาะเฟสพล็อตที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณอีกด้วย



รูปที่ 3-26 สัญญาณไซน์ที่ถูกเลื่อนไปครึ่งคาบที่กึ่งกลางความยาวสัญญาณ  
(ก) สัญญาณที่ใช้วิเคราะห์, (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์, (ค) มอดุลัสของสัมประสิทธิ์

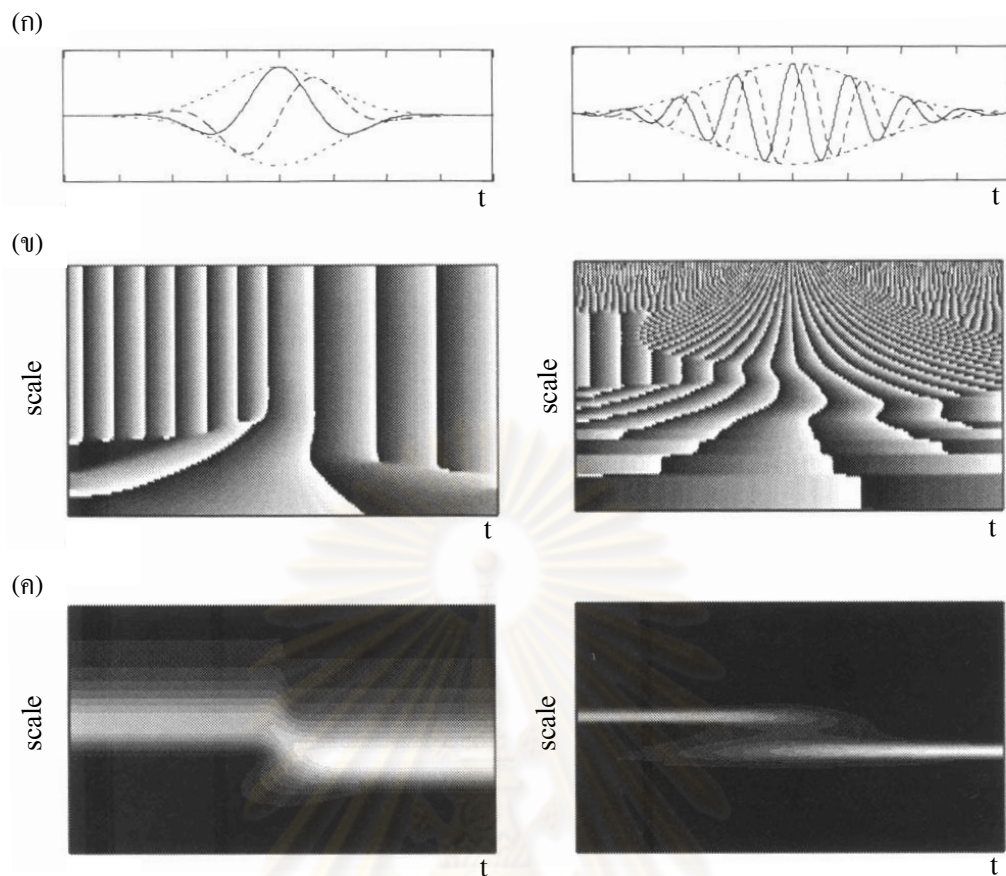
รูปที่ 3-27 แสดงถึงตัวอย่างผลการแปลงสัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนความถี่ที่กึ่งกลางของความยาวสัญญาณดังรูปที่ 3-27(ก) ด้วยมอร์เลตเวฟเลตที่มีค่า  $f_0$  เป็น 0.849 ตามรูปที่ 3-27(ข) ได้ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์ดังแสดงในรูปที่ 3-27(ง) และ (ฉ) ตามลำดับ ทำให้ได้เฟสและมอดุลัสของสัมประสิทธิ์ดังรูปที่ 3-27 (ค) และ (จ) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเฟสสามารถแสดงจุดที่เกิดความไม่ต่อเนื่องได้ชัดเจนกว่ามอดุลัส ในขณะที่มอดุลัสสามารถบ่งบอกถึงความถี่ของสัญญาณที่เวลาต่าง ๆ ได้ หรือถ้ามองภาพฉายตามแกนตั้งหรือแกนสเกล(ส่วนกลับของความถี่) ก็จะพบยอดของสเปกตรัมสองยอดที่สอดคล้องกับความถี่ทั้งสองช่วงของสัญญาณในทำนองเดียวกับฟูรีเยร์-สเปกตรัม





รูปที่ 3-27 สัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนความถี่ที่กึ่งกลางของความยาวสัญญาณ (ก) สัญญาณที่ใช้วิเคราะห์ (ข) มอร์เลตเวฟเลต  $f_0 = 0.849$ , (ค) เฟสของสัมประสิทธิ์, (ง) ส่วนจริงของสัมประสิทธิ์, (จ) มอดูลัสของสัมประสิทธิ์, (ฉ) ส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์

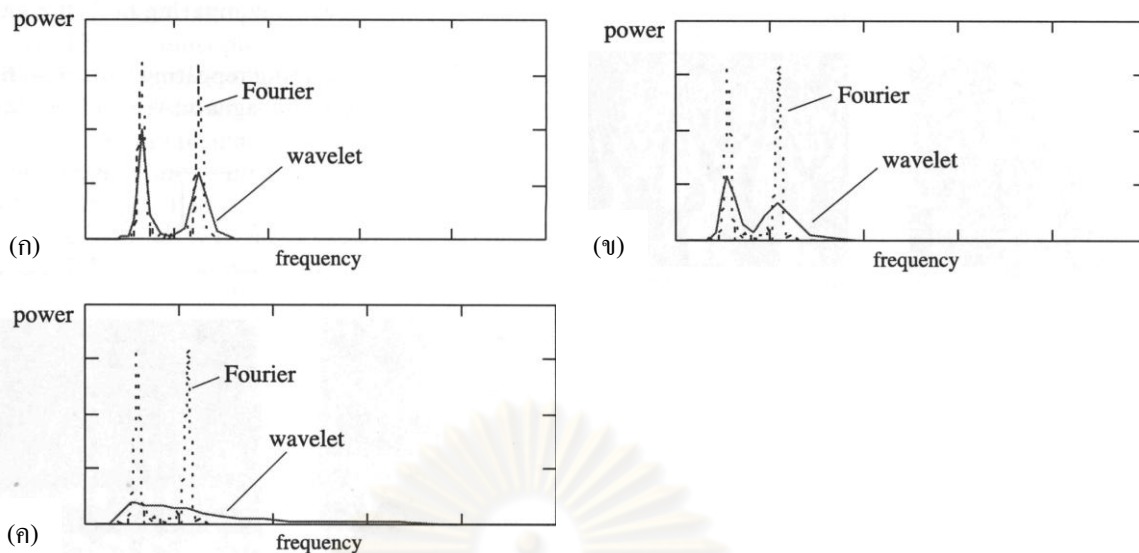
รูปที่ 3-28 แสดงถึงผลของ  $f_0$  ที่มีต่อการแปลงเวฟเลตของสัญญาณดังรูป 3-27(ก) โดยใช้ค่า  $f_0$  เป็น 0.318 และ 1.909 ตามลำดับ จะพบว่าที่  $f_0$  เป็น 0.318 ผลการที่จุดเปลี่ยนความถี่มีลักษณะเรียบกว่า เนื่องจากเวฟเลตมีลักษณะของลูกกระพอนเพียงลูกเดียว ดังรูปที่ 3-28(ข) และจากมอดูลัสในรูปที่ 3-28(ค) เราจะพบว่าค่า  $f_0$  ที่มากกว่าจะมีรายละเอียดในโดเมนความถี่มากกว่า ในขณะที่เดียวกันจะเสียรายละเอียดในส่วน โดเมนเวลาไป ดังจะเห็นได้จากความชัดเจนในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนความถี่ เราสามารถเปรียบเทียบสเปกตรัมกำลังของมอร์เลตเวฟเลตที่  $f_0$  กับสเปกตรัมกำลังของฟูริเยร์ได้ดังรูปที่ 3-29 อย่างไรก็ตามไม่ควรนำมอร์เลตเวฟเลตที่มีค่า  $f_0$  น้อย ๆ มาใช้วิเคราะห์สัญญาณเนื่องจากมีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในส่วนก่อนหน้า



รูปที่ 3-28 ผลของการเปลี่ยน  $f_0$  ที่มีต่อผลการแปลงสัญญาณในรูปที่ 3-27 (ก) (ค) มอร์เลต์เวฟเลต  $f_0 = 0.318$  (ซ้าย) และ  $1.909$  (ขวา), (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์, (ค) มอดูลัสของสัมประสิทธิ์

จากรูปที่ 3-29 จะพบว่ามอร์เลต์เวฟเลตที่  $f_0$  สูงกว่า จะมีความละเอียดในโดเมนความถี่มากกว่า เห็นได้จากลักษณะยอดแหลมในโดเมนความถี่ที่ชัดเจนกว่า สอดคล้องกับรูป 3-28(ค) ที่มอดูลัสพล็อตมีแถบความกว้างน้อยกว่าในโดเมนความถี่ แต่ก็ต้องแลกกับความละเอียดที่ลดลงในโดเมนเวลาดังแสดงในรูป 3-27(จ) และ 3-28(ค) โดยจะเห็นได้จากการเลื่อมกันของมอดูลัสพล็อตเมื่อมองจากแกนนอน (แกนเวลาหรือแกนตำแหน่งการเลื่อน) มอร์เลต์เวฟเลตที่  $f_0$  สูงกว่าจะมีการเลื่อมซ้อนกันมากกว่า ดังนั้นจึงให้ข้อมูลความไม่ต่อเนื่องในโดเมนเวลาที่แยกกว่าตัวที่มีค่า  $f_0$  ต่ำกว่า

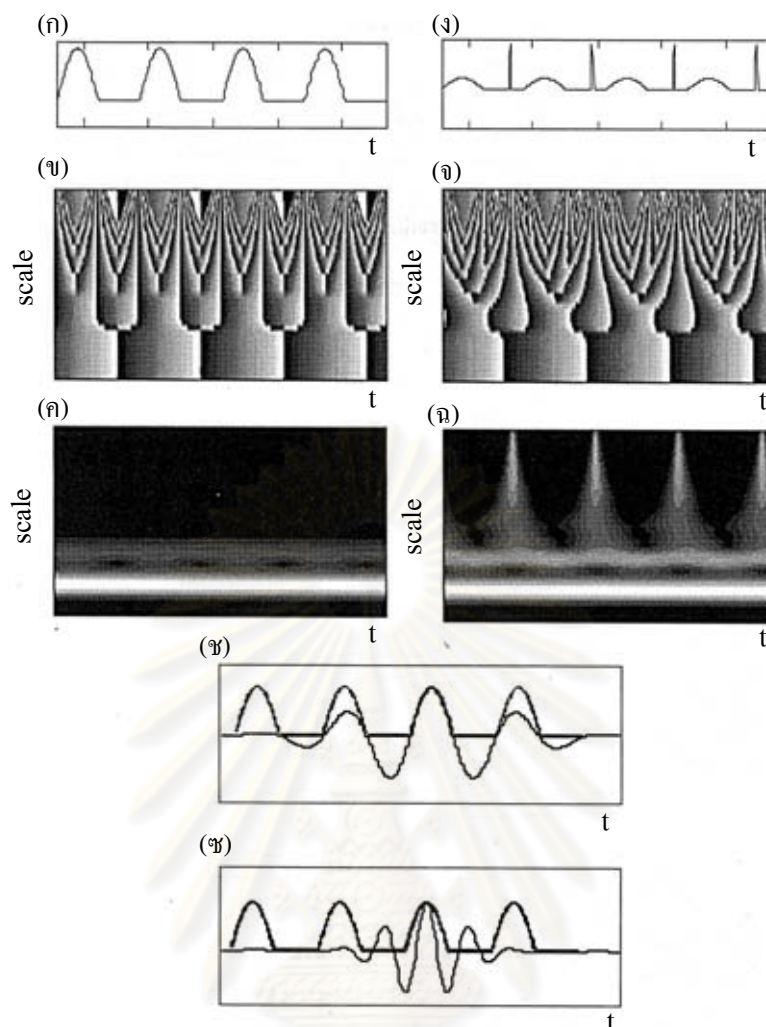
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-29 สเปกตรัมกำลังของการแปลงเวฟเลต(เส้นทึบ) เทียบกับสเปกตรัมกำลังของฟูรีเยร์ (เส้นประ) ที่ (ก)  $f_0 = 1.909$ , (ข)  $f_0 = 0.849$ , (ค)  $f_0 = 0.318$

รูปที่ 3-30 แสดงถึงการแปลงเวฟเลตของสัญญาณรูปที่ถูกระนาบในรูปที่ 3-30(ก) และสัญญาณรูปถูกระนาบร่วมกับสัญญาณยอดแหลมในรูปที่ 3-30(ง) จะพบว่าถึงแม้สัญญาณที่ใช้วิเคราะห์จะเป็นสัญญาณที่ไม่ซับซ้อน แต่เฟสของสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีรูปแบบที่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 3-30(ข) และ (จ) ค่ามอดุลัสในรูปที่ 3-30(ค) แสดงตำแหน่งของการเกิดสัญญาณยอดแหลมได้ถูกต้อง และจากการสังเกตมอดุลัสพล็อตจะพบว่ามีส่วนที่ทำให้เวฟเลตมีสหสัมพันธ์กับตัวสัญญาณมากที่สุด 2 ส่วน โดยสามารถอธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 3-30(ข) และ (ข) รูปที่ 3-30(ข) มอร์เลตเวฟเลตมีความเข้ากันได้กับสัญญาณมากที่สุด ทำให้เกิดแถบที่สว่างที่สุด ส่วนรูปที่ 3-30(ข) เวฟเลตมีความเข้ากันได้กับสัญญาณมากที่สุด ทำให้เกิดแถบสว่างรองลงมา โดยได้อธิบายเรื่องความเข้ากันได้ระหว่างเวฟเลตกับสัญญาณไว้แล้วในรูปที่ 3-12 และ 3-13

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-30 การแปลงสัญญาณพัลส์และสัญญาณพัลส์ที่มีขอบแหลมประกอบ (ก) สัญญาณรูปลูก  
 ธรรมชาติ, (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์, (ค) มอดุลัสของสัมประสิทธิ์, (ง) สัญญาณลูกธรรมชาติและขอบ  
 แหลม, (จ) เฟสของสัมประสิทธิ์, (ฉ) มอดุลัสของสัมประสิทธิ์, (ช) และ (ซ) สเตลที่ทำให้เวฟเลตมี  
 สหสัมพันธ์กับสัญญาณมากที่สุดและรองลงมา

### การเปรียบเทียบระหว่างการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้นและการแปลงเวฟเลต

ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบระหว่างการแปลงเวฟเลตที่ใช้มอร์เลต์เวฟเลตกับการแปลงฟูรีเยร์  
 แบบช่วงสั้นของเกเบอร์ (Gabor STFT) ซึ่งการแปลงทั้งคู่มีหน้าต่างแบบเกาส์ (Gaussian window)  
 เหมือนกัน

ความแตกต่างที่สำคัญที่สุดระหว่างการแปลงทั้งสองแบบคือ สำหรับการแปลงเวฟเลต  
 ขนาดของหน้าต่างและความถี่ของคลื่นรูปไซน์ที่อยู่ข้างในจะถูกปรับพร้อม ๆ กัน เมื่อเปลี่ยนสเตล  
 (ความถี่) ในขณะที่การแปลงฟูรีเยร์แบบช่วงสั้นจะมีขนาดของหน้าต่างคงที่และมีเพียงความถี่ของ  
 คลื่นรูปไซน์ที่อยู่ข้างในเท่านั้นที่ถูกเปลี่ยน ดังนั้นเวฟเลตจะสามารถระบุตำแหน่งบน โดเมนเวลา  
 ได้ดีขึ้นที่ความถี่สูง แต่ก็จะทำให้ผลในทางกลับกันที่สเตลต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 3-31(ก) โดยแสดงทั้ง

ลักษณะส่วนจริงของเวฟเลต ความหนาแน่นของพลังงานทั้งในโดเมนเวลา  $|\psi_{a,b}(t)|^2$  และความถี่  $|\hat{\psi}_{a,b}(f)|^2$  จะเห็นได้ว่าถ้าเวฟเลตถูกบีบอัดในโดเมนเวลาเวฟเลตจะมีความถี่ที่สูงขึ้นและในขณะเดียวกันก็จะมีกระจายตัวในโดเมนความถี่มากขึ้นด้วย โดยนิยามการกระจายตัวในโดเมนเวลาและความถี่เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรอบค่าเฉลี่ย  $\sigma_t$  และ  $\sigma_f$  ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถแสดงการกระจายตัวของเวฟเลตทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ด้วยกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวด้าน  $2\sigma_t$  และ  $2\sigma_f$  กรอบสี่เหลี่ยมนี้คือ กรอบของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg boxes) ตามหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กซึ่งบอกถึงพื้นที่ที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ของสี่เหลี่ยม จากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก  $\sigma_t\sigma_f \geq 1/4\pi$  ดังนั้นกรอบของไฮเซนเบิร์กจึงมีพื้นที่มากกว่าหรือเท่ากับ  $1/\pi$  โดยหน้าต่างที่มีการกระจายแบบเกาส์จะให้พื้นที่ของกรอบของไฮเซนเบิร์กมีค่าน้อยที่สุด คือ มีค่าเป็น  $1/\pi$

ตำแหน่งบนแกนความถี่ของกรอบของไฮเซนเบิร์กขึ้นอยู่กับความถี่กึ่งกลาง ( $f_0$ ) ของเวฟเลตแม่ ( $a=1$ ) แต่ตราบใดที่หน้าต่างของเกาส์สำหรับเวฟเลตนั้นยังเหมือนเดิม รูปทรงและพื้นที่ของกรอบของไฮเซนเบิร์กก็จะเหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3-31(ข) ถ้าเปรียบเทียบกับรูปที่ 3-31(ก) จะพบว่าค่า  $f_0$  ที่น้อยกว่าจะสอดคล้องกับกรอบของไฮเซนเบิร์กที่กว้างกว่าในความถี่และแคบกว่าในเวลาเมื่อเทียบกับเวฟเลตที่มีค่า  $f_0$  ที่มากกว่า

ต่อมาพิจารณาการแปลงฟูริเยร์แบบช่วงสั้น (short-time Fourier transform: STFT) ที่มีนิยามดังนี้

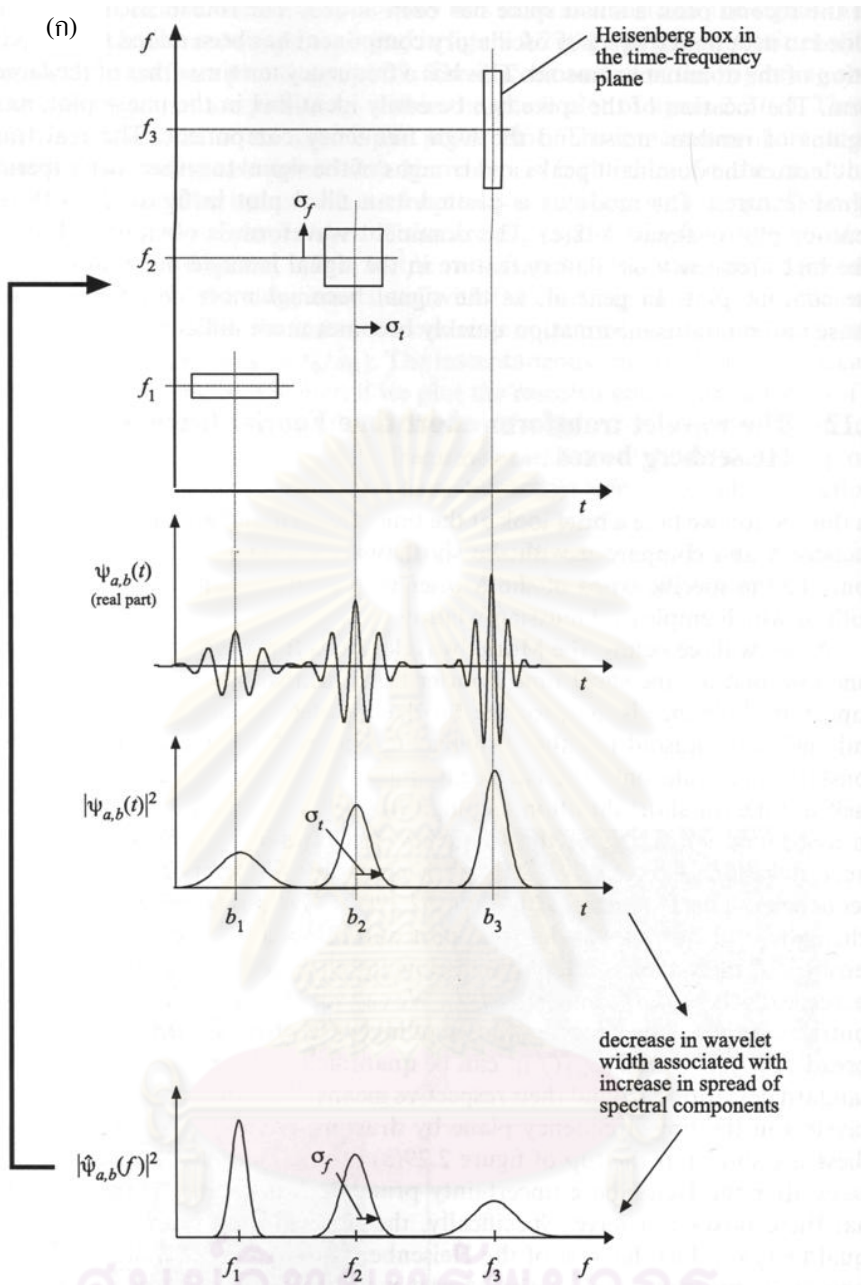
$$F(f, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t-b)e^{-i2\pi ft} dt \quad (3-42)$$

โดยที่  $h(t-b)$  คือฟังก์ชันหน้าต่างที่ปิดล้อม  $e^{-i2\pi ft}$  อยู่ ฟังก์ชันหน้าต่างนี้มีหลายรูปแบบแต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะแบบเกาส์เนื่องจากเป็นหน้าต่างชนิดเดียวกับหน้าต่างของมอร์เลต์เวฟเลต โดยมีนิยามของฟังก์ชันหน้าต่าง คือ

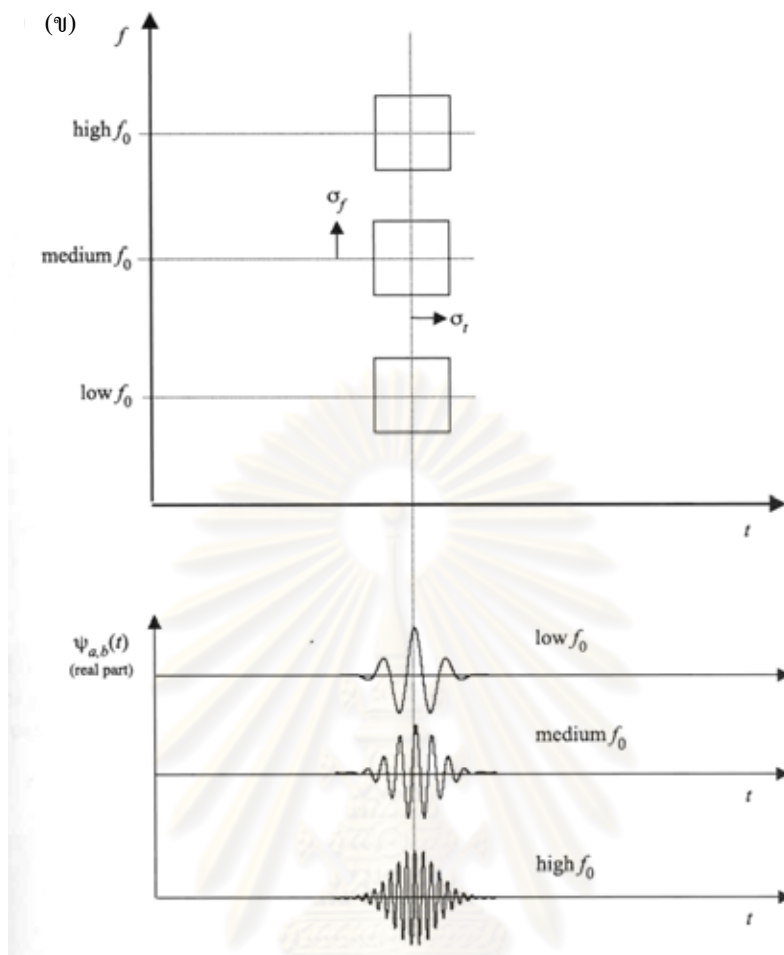
$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}\pi^{1/4}} e^{-\frac{1}{2}(t^2/\sigma^2)} \quad (3-43ก)$$

เมื่อ  $\sigma$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำหน้าที่เป็นตัวปรับความกว้างของหน้าต่างของเกาส์ พจน์ที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณไซน์ซอซัดลเชิงซ้อนกับฟังก์ชันหน้าต่าง ถูกเรียกว่า อะตอมของฟูริเยร์แบบมีหน้าต่าง (windowed Fourier atom) หรืออะตอมในโดเมนเวลา-ความถี่ (time-frequency atom) ดังนี้

$$h_{f,b}(t) = h(t-b)e^{i2\pi ft} \quad (3-43ข)$$



รูปที่ 3-31 คุณลักษณะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของเวฟเลตและการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น (ก) (เรียงจากบนไปล่าง) กรอบของไฮเซนเบิร์ก, ส่วนจริงของเวฟเลต, การกระจายตัวของพลังงานในโดเมนเวลาและความถี่ ของมอร์เลตเวฟเลตที่ความถี่ (สเกล) ต่าง ๆ ตามลำดับ



รูปที่ 3-31 คุณลักษณะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของเวฟเลตและการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น  
(ข) กรอบของไฮเซนเบิร์กของมอร์เลต์เวฟเลตที่ความถี่กึ่งกลาง ( $f_0$ ) ต่าง ๆ

จากสมการ (3-42) และ (3-43) จะได้ว่า

$$F(f, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h_{f,b}^*(t) dt \quad (3-44)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{\sigma}\pi^{1/4}} e^{-\frac{1}{2}[(t-b)^2/\sigma^2]} e^{-i2\pi ft} dt$$

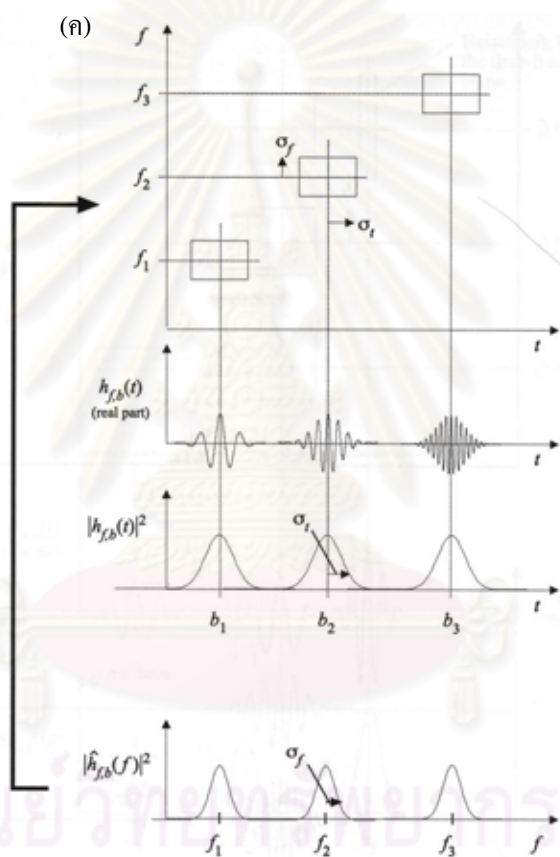
เมื่อเราพิจารณาการแปลงเวฟเลตที่ใช้มอร์เลต์เวฟเลต

$$T(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3-45)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}\pi^{1/4}} e^{-\frac{1}{2}[(t-b)^2/a^2]} e^{-i2\pi(f_0/a)(t-b)} dt$$

จะเห็นได้ว่ามีรูปสมการที่คล้ายกันมาก แต่จะพบความแตกต่างที่ซ่อนอยู่ นั่นก็คือในกรณีของ STFT ความถี่  $f$  สามารถเปลี่ยนได้ภายในหน้าต่างของเกาส์ที่มีความกว้างคงที่ (ถูกกำหนดโดย  $\sigma$ ) ในขณะที่การแปลงเวฟเลต ความถี่ ( $f_0/a$ ) มีการเชื่อมโยงกับความกว้างของหน้าต่าง (ถูกกำหนด

โดย  $a$ ) นอกจากนี้ จุดกึ่งกลางของคลื่นไซน์สซอชอว์คัลเชิงซ้อนของเวฟเลตจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $b$  บนแกนเวลา ในขณะที่ STFT จะอยู่ที่จุดกำเนิด ( $t=0$ ) หรือกล่าวสรุปโดยง่ายคือ ในกรณีของการแปลงเวฟเลต หน้าต่างกับลูกคลื่นที่อยู่ข้างในจะเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กัน ในขณะที่ STFT มีเพียงหน้าต่างเท่านั้นที่เคลื่อนที่ ลูกคลื่นที่อยู่ข้างในจะอยู่ตำแหน่งเดิมเสมอ รูปที่ 3-31(ค) แสดงถึงกรอบของไฮเซนเบิร์กของ STFT จะเห็นได้ว่าความยาวของหน้าต่าง  $h$  มีผลทำให้กรอบของไฮเซนเบิร์กกว้างขึ้นแต่แคบลง หรือแคบลงแต่สูงขึ้นเท่านั้น (พื้นที่เท่ากัน) และเมื่อเลือกหน้าต่าง  $h$  แล้ว กรอบของไฮเซนเบิร์กจะไม่เปลี่ยนรูปร่างตลอดการแปลงไม่ว่าที่ความถี่ใดก็ตาม (พิจารณาเปรียบเทียบกับกรอบของไฮเซนเบิร์กของเวฟเลตในรูปที่ 3-31(ก))

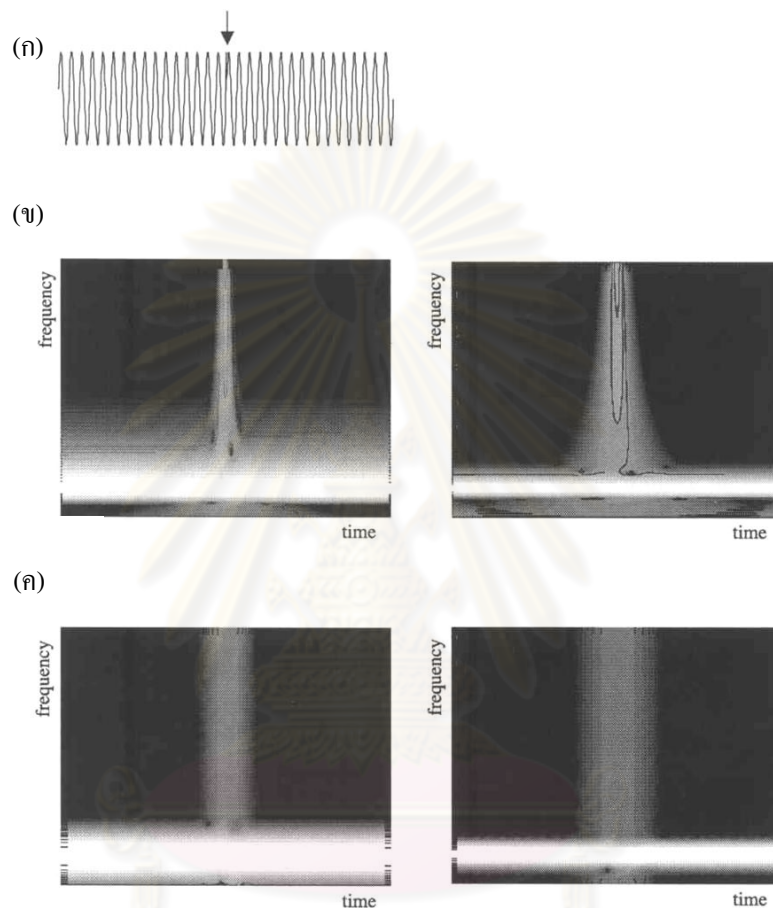


รูปที่ 3-31 คุณลักษณะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ของเวฟเลตและการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น (ค) กรอบของไฮเซนเบิร์ก, อะตอมของฟูรีเยร์แบบมีหน้าต่าง, การกระจายตัวของพลังงานใน โดเมนเวลาและความถี่ของอะตอมของฟูรีเยร์แบบมีหน้าต่างที่ความถี่ต่าง ๆ

เพื่อแสดงความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับผลที่เกิดจากการแปลงทั้งสองวิธี พิจารณารูปที่ 3-32 จะพบว่าถ้าแปลงสัญญาณรูปไซน์ที่มีขดแหลมหนึ่งขดประกอบอยู่ด้วยในตำแหน่งที่ถูกครีชีตามรูปที่ 3-32 (ก) ด้วยมอร์เลตเวฟเลต ในรูปที่ 3-32(ข) รูปทางซ้ายใช้มอร์เลตเวฟเลตที่มี  $f_0$  เป็นครึ่งหนึ่งของรูปทางขวา(ดังนั้นรูปทางซ้ายจะมีความละเอียดในโดเมนเวลามากกว่า) จะพบว่ามอร์เลตเวฟเลตให้รายละเอียดของจุดที่เกิดความไม่ต่อเนื่องดีกว่า STFT เนื่องจากเวฟเลตจะมีรายละเอียดในเวลาที



สูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น(สเกลลดลง) เมื่อเทียบกับ STFT ที่มีความละเอียดในโดเมนเวลาคงที่ รูปที่ 3-32(ค) รูปทางซ้ายมีความกว้างของหน้าต่างเกาส์เป็นครึ่งหนึ่งของรูปทางขวา อย่างไรก็ตาม การแปลงทั้งสองแบบได้แสดงถึงผลของกรอบของไฮเซนเบิร์กที่มีต่อรายละเอียดในโดเมนเวลาและความถี่ จากรูปที่ 3-32(ข) และ 3-32(ค) จะเห็นได้ว่าถ้าแถบนอน (รายละเอียดทางความถี่) แคบ แถบตั้ง (รายละเอียดทางเวลา) จะกว้าง

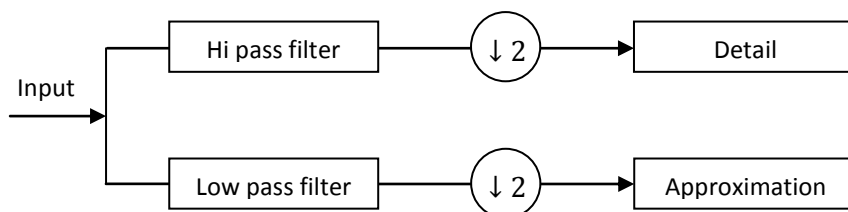


รูปที่ 3-32 เปรียบเทียบผลการแปลงเวฟเลตและการแปลงฟูริเยร์ช่วงสั้น (ก) สัญญาณไซน์ที่มีความไม่ต่อเนื่องผสมอยู่, (ข) ผลที่ได้จากการแปลงเวฟเลต (รูปทางซ้ายใช้มอร์เลตเวฟเลตที่มี  $f_0$  เป็นครึ่งหนึ่งของรูปทางขวา), (ค) ผลที่ได้จาก STFT รูปทางซ้ายมีความกว้างของหน้าต่างเกาส์เป็นครึ่งหนึ่งของรูปทางขวา

### 3-2-2 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete wavelet transform) [13]

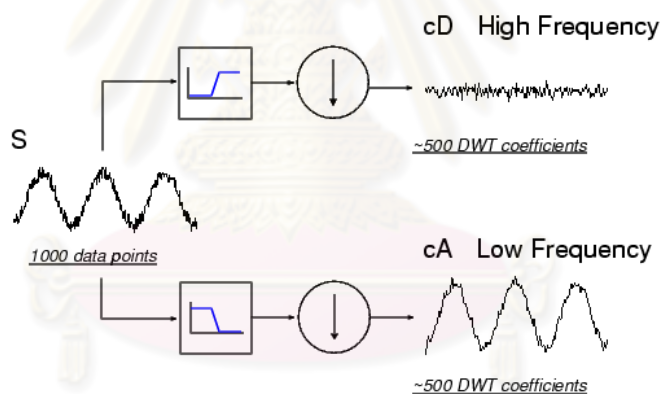
การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องมีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแปลงในทุก ๆ สเกล และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแปลงที่ตำแหน่งสเกลใกล้เคียงกันที่เวลาเดียวกันย่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3-14(ข) ทำให้เกิดข้อมูลจำนวนมากเกินความจำเป็น (redundant) เป็นเหตุให้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก ดังนั้นจึงมีการคิดวิธีการแปลงเวฟเลตที่เลือกสเกลและตำแหน่งที่ใช้ในการแปลงที่ไม่ต่อเนื่องกัน กล่าวคือ เลือกค่าสเกลและตำแหน่งเป็น

คำยกกำลังของสอง วิธีการนี้ถูกเรียกว่าการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete wavelet transform) โดยหลักการทำงานเบื้องต้นของการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 3-33

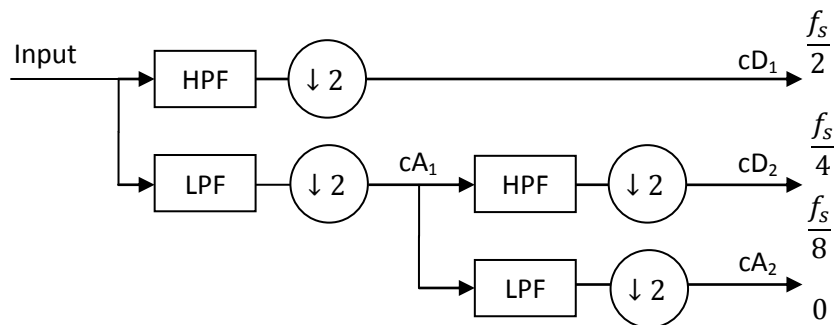


รูปที่ 3-33 หลักการเบื้องต้นของการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง

ในรูปที่ 3-33 สัญญาณจะถูกกรองด้วยตัวกรองผ่านต่ำ (low pass filter: LPF) และตัวกรองผ่านสูง (high pass filter: HPF) หลังจากนั้นสัญญาณที่ผ่านการกรองจะถูกลดอัตราการสุ่มลงครึ่งหนึ่ง (down sampling) โดยเรียกองค์ประกอบที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองผ่านสูงว่ารายละเอียด (detail: cD) และองค์ประกอบที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองผ่านต่ำว่าการประมาณ (approximation: cA) โดยได้แสดงตัวอย่างการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องของผลรวมของสัญญาณไซน์และสัญญาณรบกวนไว้ในรูปที่ 3-34



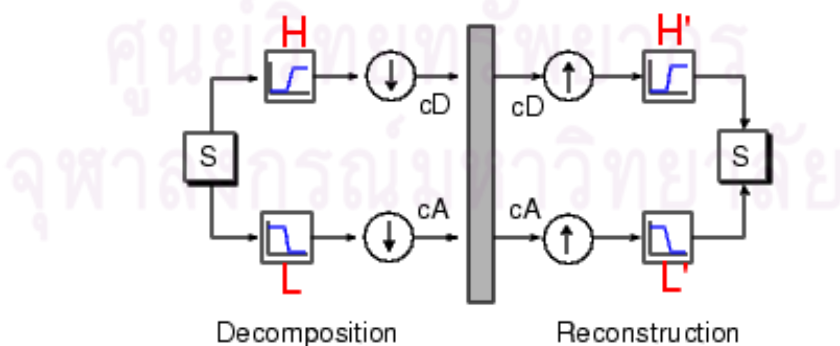
รูปที่ 3-34 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องของผลรวมของสัญญาณไซน์และสัญญาณรบกวน จากรูปที่ 3-34 จะเห็นได้ว่าจำนวนพจน์ของการประมาณและรายละเอียดจะเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณขาเข้า แทนที่จะเท่ากับจำนวนพจน์ของสัญญาณขาเข้าเช่นเดียวกับกรณีการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องเนื่องจากมีการลดอัตราการสุ่มลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้นการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องจึงลดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณลงเมื่อเทียบกับการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง ถ้าเรานำตัวกรองสัญญาณดังรูปที่ 3-33 มาต่อกันเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณการประมาณก่อนหน้ามาแยกออกอีกครั้งหนึ่ง จะเรียกการกรองแบบนี้ว่า ออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (octave filter bank) โดยสามารถอธิบายเป็นรูปภาพได้ตามรูปที่ 3-35



รูปที่ 3-35 การแปลงเวฟเลตโดยใช้การกรองแบบออกเทฟฟิลเตอร์เบงค์

จากรูปที่ 3-35 จะเห็นได้ว่าความถี่สูงสุดในส่วนของรายละเอียดจะลดลงครึ่งละ 2 เท่า โดย  $f_s$  คือความถี่ในการสุ่มสัญญาณ จะเห็นได้ว่าการแยกครั้งแรก จะได้  $cD_1$  ที่มีช่วงความถี่  $\frac{f_s}{4} - \frac{f_s}{2}$  และ  $cA_1$  ที่มีช่วงความถี่  $0 - \frac{f_s}{4}$  และในการแยกครั้งที่ 2 จะได้  $cD_2$  ที่มีช่วงความถี่  $\frac{f_s}{8} - \frac{f_s}{4}$  และ  $cA_2$  ที่มีช่วงความถี่  $0 - \frac{f_s}{8}$  จะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถเลือกช่วงความถี่ของเวฟเลตได้อย่างอิสระเหมือนกับการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องไม่เหมาะกับการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของเครื่องจักรกลแม้ว่าจะคำนวณได้เร็วกว่า นอกจากนี้เวฟเลตหลายชนิดไม่สามารถใช้การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องได้ รวมถึงมอร์เลตเวฟเลตซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการตรวจจับความเสียหายของเครื่องจักรด้วย

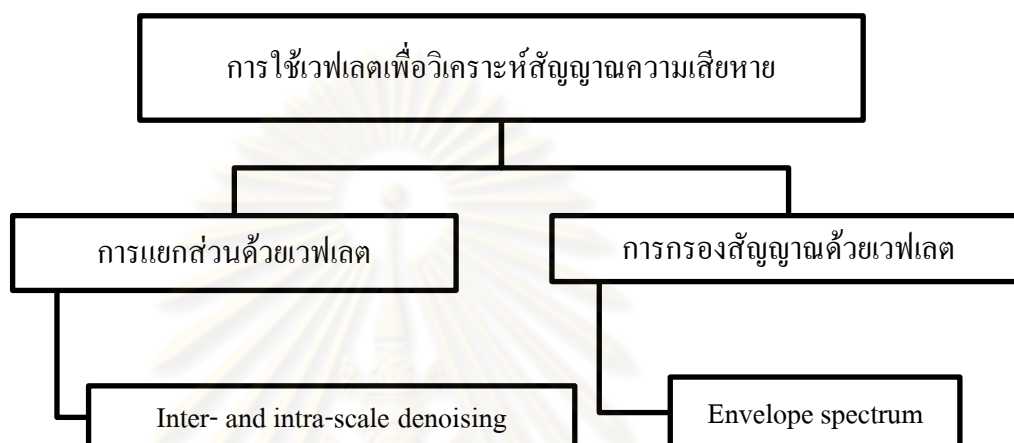
อนึ่ง การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องสามารถแปลงกลับได้เช่นเดียวกับการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง โดยการนำ  $cD$  และ  $cA$  มาเพิ่มอัตราการสุ่มขึ้นสองเท่า (upsampling) โดยการแทรกศูนย์ระหว่างจุดข้อมูล หลังจากนั้นจึงนำไปผ่านตัวกรองที่ใช้ในการสร้างกลับ (reconstruction filter) ที่สอดคล้องกับตัวกรองที่ใช้ในการแปลงเวฟเลตเพื่อให้ได้มาซึ่งสัมประสิทธิ์การแปลง โดยแสดงหลักการพื้นฐานของการแปลงเวฟเลตและการแปลงกลับเวฟเลตด้วยดังรูปที่ 3-36



รูปที่ 3-36 ขั้นตอนการแปลงและแปลงกลับเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง

### 3-3 การใช้เวฟเลตเพื่อวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลต ที่ได้กล่าวถึงในส่วนของทฤษฎีในหัวข้อก่อนหน้า เพื่อวิเคราะห์หาสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน จากการที่มีผู้เสนอวิธีการหลายวิธีด้วยกัน สามารถแบ่งออกได้เป็นสองจำพวกใหญ่ คือ การแยกส่วนด้วยเวฟเลต และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต ในที่นี้จะนำเสนอบางวิธีการที่เป็นที่นิยม ดังแสดงในรูปที่ 3-37



รูปที่ 3-37 วิธีการใช้เวฟเลตเพื่อการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน

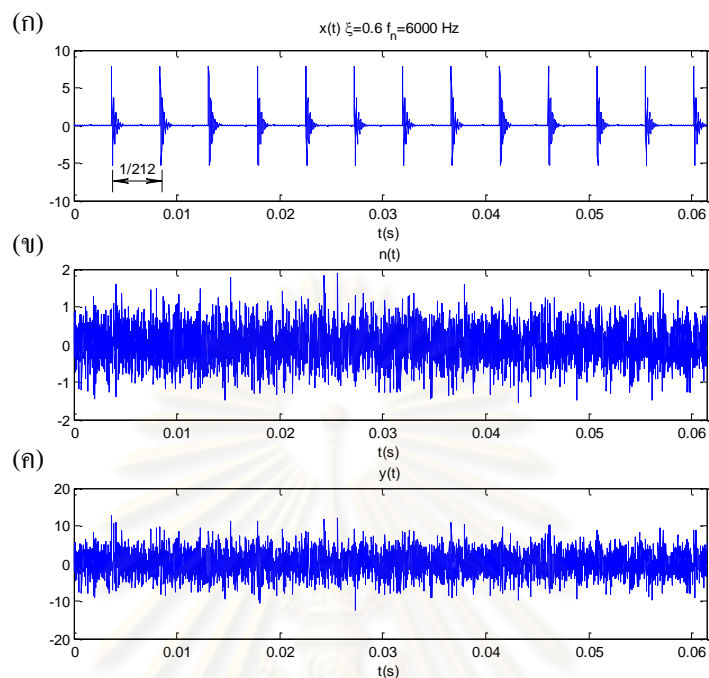
#### 3-3-1 การแยกส่วนด้วยเวฟเลต (wavelet decomposition)

แนวคิดของวิธีนี้คือแปลงสัญญาณ  $y(t) = x(t) + n(t)$  ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน  $x(t)$  และสัญญาณรบกวน  $n(t)$  ดังแสดงในรูปที่ 3-38 ให้เป็นสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต  $T(a, b)$  แล้วใช้เกณฑ์ต่าง ๆ ตัดสินว่า  $T(a, b)$  นั้น ๆ เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนเพียงอย่างเดียวหรือไม่ ถ้าเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนเพียงอย่างเดียว ให้ตั้งค่า  $T(a, b)$  นั้น ๆ ให้มีค่าเป็นศูนย์ ถ้าไม่ใช่ก็มีส่วนที่เกิดจากสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายให้ปรับค่าตามที่กำหนด เมื่อได้ชุดสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต  $T'(a, b)$  ที่ถูกปรับค่าแล้ว จึงทำการแปลงกลับเวฟเลตได้สัญญาณ  $y'(t)$  แต่เนื่องจากสมการ (3-20) ต้องหาปริพันธ์ (integral) สองชั้น ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมาก สำหรับมอร์เลตเวฟเลต สามารถลดรูปสมการ (3-20) ให้เหลือปริพันธ์ชั้นเดียวได้ตามสมการ (3-46) [14]

$$x(t) = x(b) = c' \int T(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a^{3/2}} \quad (3-46)$$

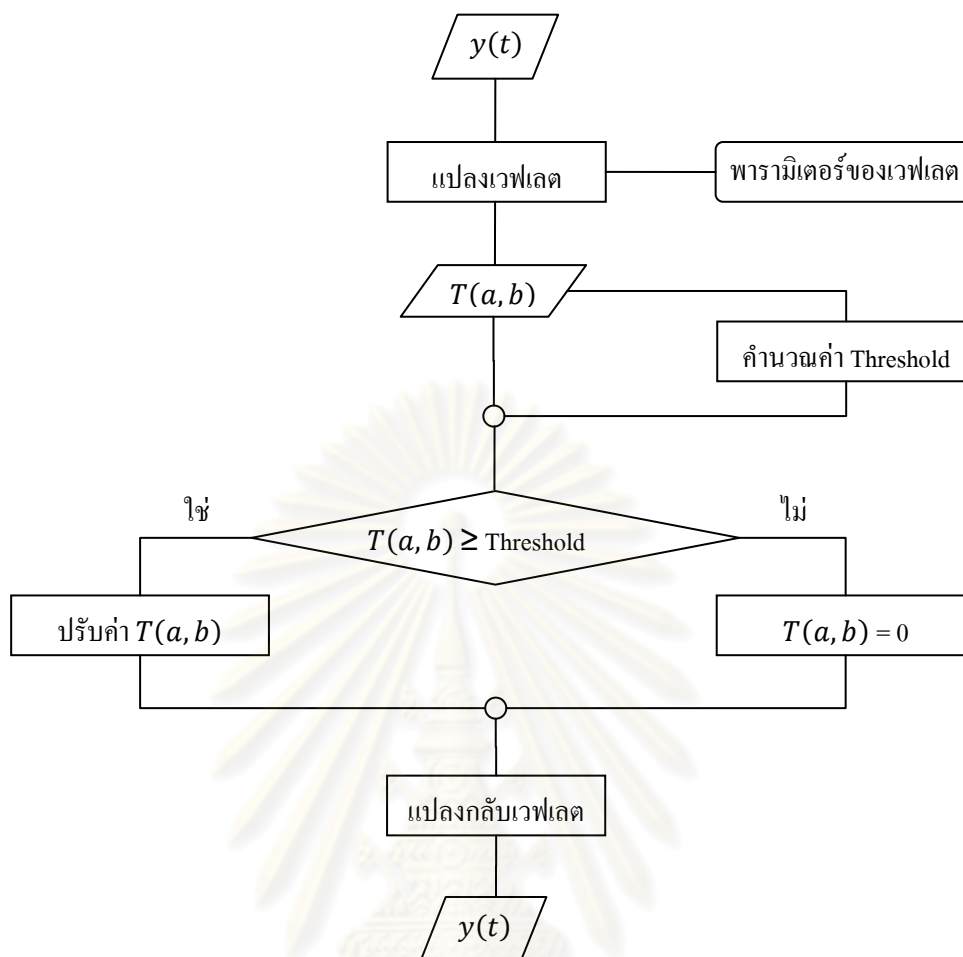
เมื่อ  $c'$  คือ ค่าคงตัว ในที่นี้กำหนดให้เป็น 1 จากนั้นจึงเปรียบเทียบคาบที่เกิดขึ้นของสัญญาณ  $y'(t)$  กับคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายของตลับลูกปืน เพื่อตรวจสอบว่าตลับลูกปืนนั้น ๆ เกิดความเสียหายอยู่หรือไม่ แผนภาพขั้นตอนการทำงานของวิธีนี้แสดงในรูปที่ 3-39

สำหรับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนโดยใช้การแยกส่วนด้วยเวฟเลตนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะวิธี Inter- and intra-scale denoising [1]



รูปที่ 3-38 สัญญาณจำลองที่ใช้ในการศึกษา (ก) แบบจำลองของสัญญาณที่เกิดจากความเสียหาย  $x(t) = e^{-2\pi\xi f_n t} \cos 2\pi\sqrt{1-\xi^2} f_n t$ ;  $\xi = 0.6$ ,  $f_n = 6000 \text{ Hz}$  ที่เกิดซ้ำด้วยความถี่ 212Hz, (ข) สัญญาณรบกวน  $n(t)$ , (ค) ผลรวมของ (ก) และ (ข)  $y(t)$  มี signal to noise ratio -10 dB

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-39 ขั้นตอนการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยวิธีการแยกส่วนด้วยเวฟเลต

### วิธี Inter- and intra-scale denoising [1]

วิธีการนี้มีแนวคิดว่า สำหรับการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องแล้ว ถ้าค่าของสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  มีส่วนที่มาจากสัญญาณแล้ว สัมประสิทธิ์ตัวที่อยู่ข้างเคียงทั้งในสเกลเดียวกันและสเกลที่อยู่ข้างเคียงก็ควรมีค่ามาจากสัญญาณด้วย โดยการสร้างตัวแปร  $S(a, b)$  ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ (threshold)  $\mu(a)$  ในการแบ่งแยกว่าสัมประสิทธิ์นั้น ๆ ว่าเกิดจากสัญญาณรบกวนหรือไม่ โดยตัวแปรและเกณฑ์ถูกแสดงไว้ในสมการ (3-47) และ (3-48) ตามลำดับ

$$S_{i,j}^2 = T_{i,j-1}^2 + T_{i,j}^2 + T_{i,j+1}^2 \quad (3-47)$$

เมื่อ  $T_{i,j}$  คือ สมาชิกแถวที่  $i$  และสดมภ์ที่  $j$  สอดคล้องกับแถวและสดมภ์ของเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลง  $T(a, b)$  สำหรับกรณีที่  $T_{i,j}$  อยู่ที่ตำแหน่งขอบ ให้จุดที่อยู่นอกช่วงข้อมูลออกไป ซึ่งนำไปสู่การสร้างเกณฑ์ในการตัดสินใจของแต่ละสเกล

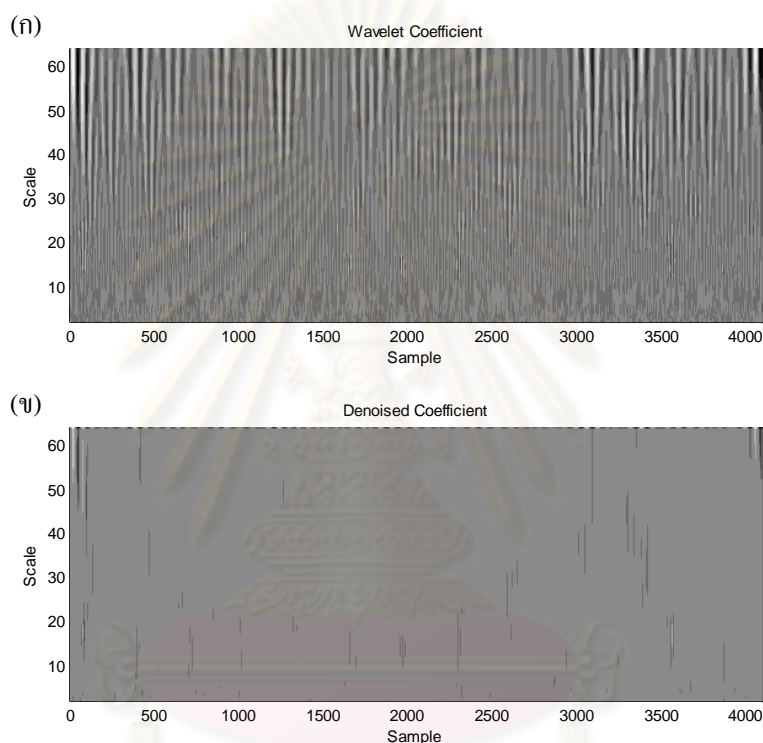
$$\mu_i = \sqrt{2\sigma_i^2 \log N} \quad (3-48)$$

เมื่อ  $\mu_i$  คือ เกณฑ์ในการตัดสินใจ และ  $\sigma_i$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์ในแถวที่  $i$  ของเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  และ  $N$  คือจำนวนจุดข้อมูลของสัญญาณ  $y(t)$  โดยมีเกณฑ์ในการเลือกตั้งแสดงในสมการ (3-49)

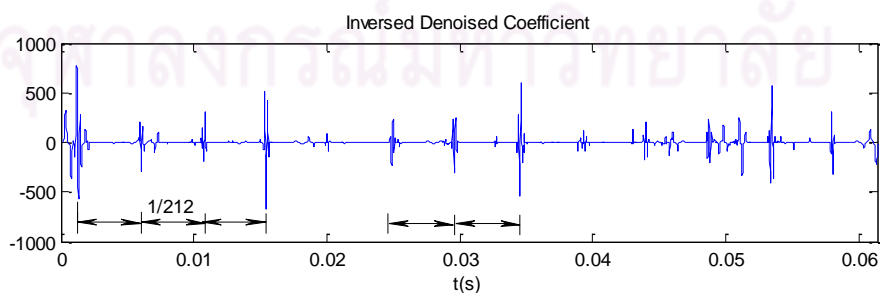
$$T_{i,j} = T_{i,j} \left( 1 - \frac{\mu_i^2 + \mu_{i+1}^2}{T_{i,j}^2 + T_{i+1,j}^2} \right) \text{ เมื่อ } S_{i,j}^2 + S_{i+1,j}^2 \geq \mu_i^2 + \mu_{i+1}^2 \quad (3-49)$$

และมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีอื่น ๆ

จากสมการ (3-49) จะได้ผลในระนาบเวลา-สเกล แสดงเป็นคอนทัวร์พล็อตระดับสีเทา ดังแสดงในรูปที่ 3-40(ก) และผลการแปลงกลับเวฟเลตดังรูปที่ 3-41



รูปที่ 3-40 ผลการแปลงเวฟเลตของสัญญาณจำลอง (ก) ผลการแปลงเวฟเลตของสัญญาณ  $y(t)$  ในรูปที่ 3-38 (ค) ด้วยมอร์เลตเวฟเลตเฉพาะส่วนจริง, (ข) ผลที่ได้จากสมการ (3-48)



รูปที่ 3-41 สัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับเวฟเลตของผลในรูปที่ 3-40(ข)

จากรูปที่ 3-41 จะเห็นได้ว่า วิธีการนี้สามารถตรวจจับคาบที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืนได้บางส่วน เนื่องจากถ้าสัญญาณรบกวนมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม (white noise) ย่อมมีโอกาสที่สัญญาณรบกวนจะหักล้างกับสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายจริง ๆ ทำให้ค่า  $T(a, b)$  ที่สอดคล้องกับตำแหน่งของสัญญาณนั้น ๆ มีค่าน้อยจนไม่สามารถผ่านเกณฑ์ตามสมการ (3-48) ได้ ดังนั้นวิธีการนี้จึงจำเป็นต้องมีช่วงระยะเวลาในการเก็บสัญญาณที่ยาวพอที่จะเห็นคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายติดกันหลาย ๆ คาบ จึงจะยืนยันได้ว่าเกิดความเสียหายขึ้นจริง นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่  $T(a, b)$  ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนจะสูงกว่าเกณฑ์แล้วปรากฏขึ้นในสัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับเวฟเลต แต่เนื่องจากสัญญาณรบกวนมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบสุ่ม จึงมีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดคาบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเท่ากับคาบที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน

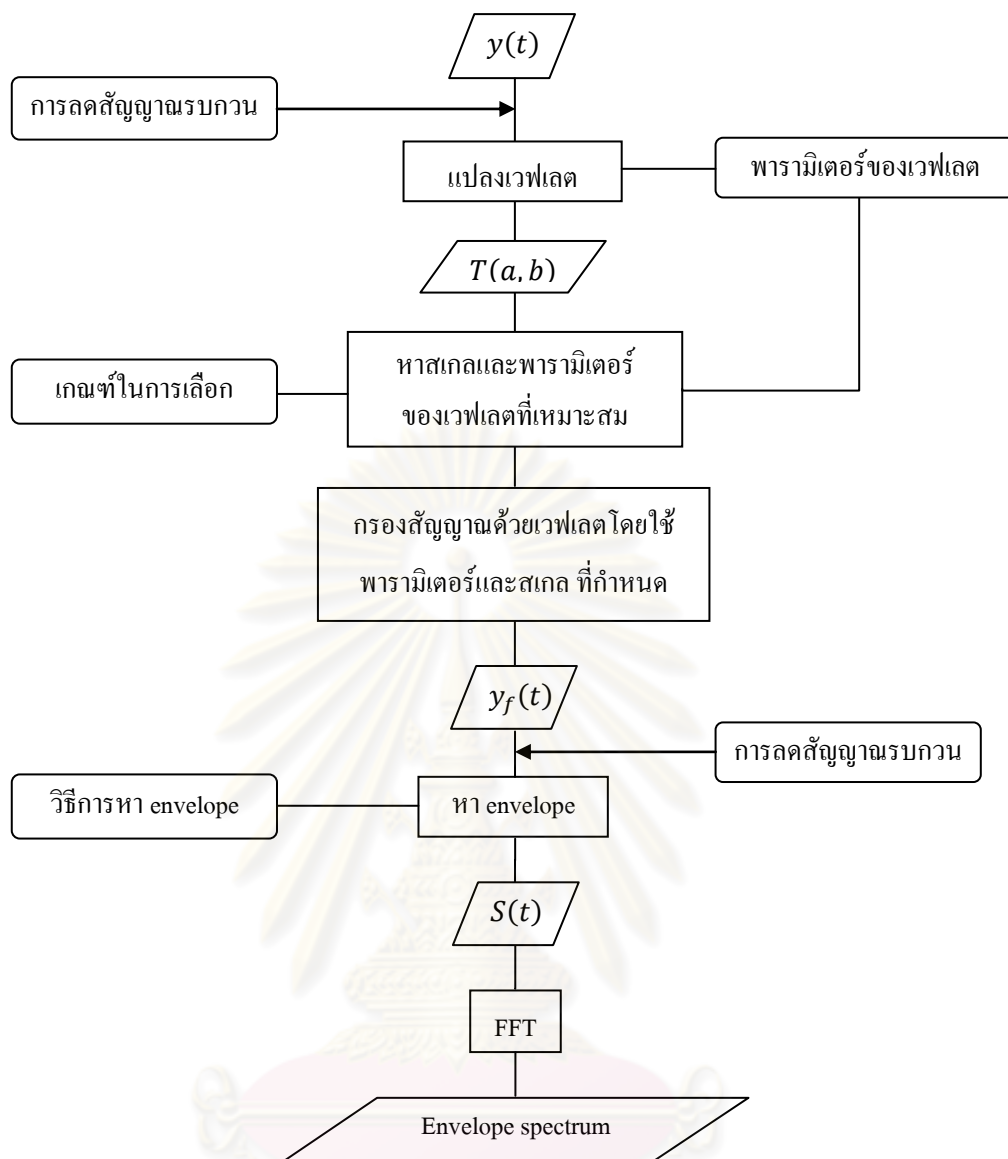
นอกจากนั้น ขนาดของสัญญาณรบกวน ยังมีผลต่อความสามารถในการตรวจจับด้วย ถ้าค่า SNR มีค่าต่ำมาก ๆ ก็จะทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายได้ ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกับที่กล่าวมาในข้างต้น

### 3-3-2 การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต (wavelet filtering)

วิธีการนี้มีแนวความคิดอยู่ว่า เวฟเลตก็คือตัวกรองตัวหนึ่งใน โดเมนความถี่ ดังนั้นถ้าเลือกความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสม ก็จะสามารถกรองข้อมูลของสัญญาณในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของตลับลูกปืนออกจากสัญญาณรบกวนได้ จากนั้นจึงนำสัญญาณไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไป ในที่นี้วิธีที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ การทำเอ็นวีลอป-สเปกตรัม (envelope spectrum) ซึ่งในวิธีนี้มีวิธีการย่อย ๆ ที่มีรายละเอียดแตกต่างกันไป ดังที่จะนำเสนอในส่วนตัวไป ขั้นตอนโดยทั่วไปของการค้นหาสัญญาณความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตแสดงดังรูปที่ 3-42

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





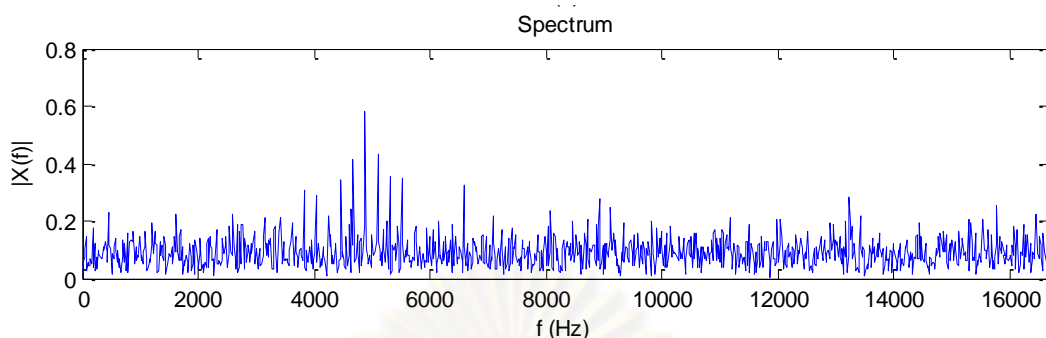
รูปที่ 3-42 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

**เอ็นวีลอปสเปกตรัม (Envelope spectrum)**

เนื่องจากลักษณะของสัญญาณที่บ่งบอกถึงความเสียหายของตลับลูกปืนในระยะเริ่มต้นตามแบบจำลองการตอบสนองอิมพัลส์ คือ เกิดแถบความถี่ข้าง (sideband) ที่มีระยะห่างเท่ากับความถี่ที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืนรอบความถี่ธรรมชาติของชุดเพลาและตลับลูกปืนในโดเมนความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3-43 จึงเลือกใช้เวฟเลตที่มีความถี่กึ่งกลางใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของชุดเพลา-ตลับลูกปืน และมีความกว้างของแถบความถี่ผ่าน (bandwidth) ที่เหมาะสมกรองสัญญาณ แล้วจึงหาเอ็นวีลอปของสัญญาณที่ผ่านการกรอง จากนั้นแปลงฟูริเยร์เอ็นวีลอปของสัญญาณที่ได้ ก็จะได้ความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน สำหรับเวฟเลตเชิงซ้อน เช่น มอร์เลตเวฟเลต สามารถหาเอ็นวีลอป  $S(b)$  ของสัญญาณได้จาก

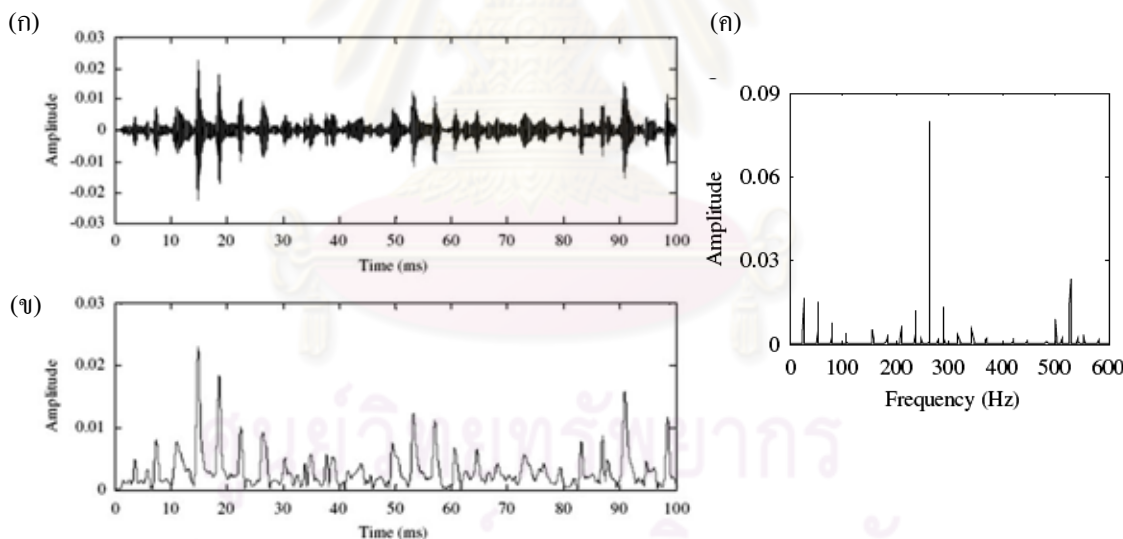
$$S(b) = \sqrt{[Re(T(a_0, b))]^2 + [Im(T(a_0, b))]^2} \tag{3-50}$$

โดยที่  $a_0$  เป็นสเกลที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของชุดเพลลา-ตลับลูกปืน



รูปที่ 3-43 ขนาดของฟูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณจำลองตามรูปที่ 3-38 (ก) ที่มีความถี่ธรรมชาติ ( $f_0$ ) 4800Hz และเกิดแถบข้าง (sideband) ที่ความถี่ 212Hz รอบความถี่ธรรมชาติ

รูปที่ 3-44 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองของตลับลูกปืนที่เกิดความเสียหายที่วางไว้ในที่มีอัตราเร็วรอบการหมุนของเพลลา 1600 รอบ/นาที และมีความถี่ของความเสียหายของรางวิ่งในเป็น 263.6Hz จะพบว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมสามารถแสดงค่ายอดที่ความถี่ดังกล่าวได้ถูกต้อง [6]



รูปที่ 3-44 การใช้เอ็นวีลอปสเปกตรัมในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน

(ก) สัญญาณที่ผ่านการกรอง(ส่วนจริง) ด้วยมอร์เลตเวฟเลตที่มีความถี่ที่กึ่งกลาง 4000Hz และมีความกว้างของแถบความถี่ผ่าน 1712Hz โดยความถี่ของความเสียหายคือ 263.6Hz, (ข) เอ็นวีลอปที่ได้

จาก (ก), (ค) เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากข้อ (ข) จะพบค่ายอดที่ 263Hz

### ตัวบ่งชี้สำหรับปรับค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลต

จากขั้นตอนในข้างต้น จะปรากฏคำถามขึ้นมาว่า จะหาความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสมได้อย่างไร ในประเด็นนี้สามารถใช้ตัวบ่งชี้ (indicator) ได้หลายตัว ซึ่งแต่ละตัวก็จะบ่งบอกถึงลักษณะของสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยความถี่กึ่งกลางและความกว้างของแถบความถี่ผ่านในมุมมองที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

#### เคอร์โทซิส (Kurtosis) [16]

ค่าเคอร์โทซิสเป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่เป็น โมเมนต์อันดับที่ 4 ซึ่งใช้สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น (probability distribution function: PDF) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการกระจายตัวของแอมพลิจูดของสัญญาณ ตัวอย่างเช่น สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (white noise) จะมีลักษณะของ PDF เป็นเส้นโค้งรูประฆังคว่ำของเกาส์ ในขณะที่สัญญาณอิมพัลส์ร่วมกับสัญญาณรบกวนแบบสุ่มจะมีการแผ่กว้างของ PDF มากกว่าเส้นโค้งรูประฆังคว่ำของเกาส์ ดังแสดงในรูปที่ 3-45



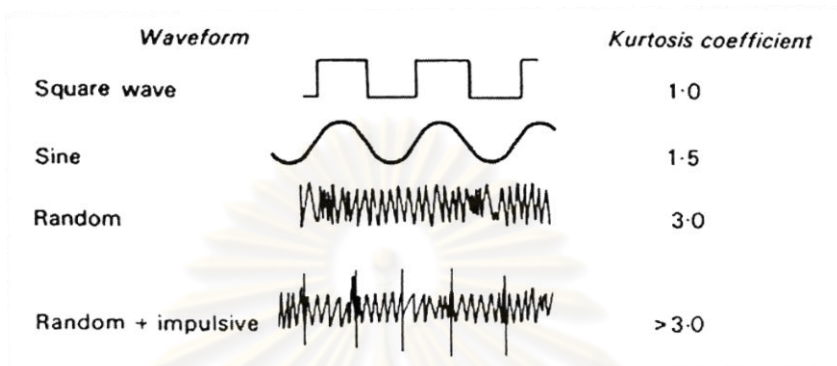
รูปที่ 3-45 การแผ่กว้างของ PDF ของผลรวมของสัญญาณรบกวนและอิมพัลส์

โดยเพิ่มระดับความแรงของอิมพัลส์จากรูปบนลงมารูปล่าง

ค่าเคอร์โทซิสสามารถนิยามได้ดังสมการ (3-51) ดังนี้

$$kurt = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^4}{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} \quad (3-51)$$

สำหรับสัญญาณที่เป็นสัญญาณลักษณะสุ่มจะมีค่าเคอร์โทซิสประมาณ 3 และสัญญาณสุ่มที่มีอิมพัลส์ประกอบอยู่ด้วยจะมีค่ามากกว่า 3 โดยค่าจะมากขึ้นเมื่อลักษณะของอิมพัลส์โดดเด่นขึ้น ดังนั้นถ้าค่าเคอร์โทซิสมีค่ามากย่อมหมายถึงสัญญาณที่กรองได้ มีความเป็นยอดแหลม (peakiness) มาก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะแสดงลักษณะของอิมพัลส์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณความเสียหาย โดยค่าเคอร์โทซิสของสัญญาณที่มีลักษณะต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 3-46



รูปที่ 3-46 ค่าเคอร์โทซิสของสัญญาณที่มีลักษณะต่าง ๆ

แชนนอนเอนโทรปี (Shannon entropy) [12]

เมื่อ  $p_i$  เป็นการกระจายตัวของความน่าจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete probability distribution) สามารถนิยามแชนนอนเอนโทรปีได้ ดังนี้

$$SE(p) = - \sum_n p_n \log(p_n) \tag{3-52}$$

เมื่อ  $\sum_n p_n = 1$  ค่าแชนนอนเอนโทรปีจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $p_n$  ทุกตัวมีค่าเท่ากัน และมีค่าน้อยที่สุดเป็นศูนย์ เมื่อ  $p_n$  ใด ๆ มีค่าเป็นหนึ่ง (ดังนั้น  $p_m = 0; m \neq n$ ) เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเวฟเลตได้ กล่าวคือถ้ามองสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  เปรียบเสมือน  $p$  ค่าแชนนอนเอนโทรปีที่น้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์  $T(a, b)$  เพียงไม่กี่ตัวที่มีขนาดของค่ามากเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่น ๆ ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3-47

Box 1	Box 2	Box 3	Box 4	
0.25	0.25	0.25	0.25	$-\sum_n p_n \log(p_n) = 0.602$ maximum entropy
0.80	0.10	0.10	0.00	$-\sum_n p_n \log(p_n) = 0.277$ Intermediate entropy
1.00	0.00	0.00	0.00	$-\sum_n p_n \log(p_n) = 0$ minimum entropy

รูปที่ 3-47 ค่าแชนนอนเอนโทรปี เมื่อ  $p_n$  มีการกระจายตัวต่างกัน

ถ้ามองค่าเซนนอนเอนโทรปีในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแปลง  $T(a, b)$  เป็นรายตัว ก็จะสามารถเขียนค่าพลังงานที่ถูกลบออกแล้วสัมประสิทธิ์การแปลง  $\bar{T}_{i,j}^2$ ; ดังสมการ (3-53)

$$\bar{T}_{i,j}^2 = \frac{T_{i,j}^2}{\sum_i \sum_j T_{i,j}^2} \quad (3-53)$$

จากสมการ (3-52) และ (3-53) สามารถเขียนค่าเซนนอนเอนโทรปีในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแปลงรายตัว ได้ดังนี้

$$SE(\bar{T}^2) = - \sum_i \sum_j \bar{T}_{i,j}^2 \log(\bar{T}_{i,j}^2) \quad (3-54)$$

แต่ถ้ามอง  $p$  ให้เปรียบเสมือนพลังงานของทั้งสเกล ก็สามารถนิยามค่าเซนนอนเอนโทรปีได้ในอีกรูปแบบ ดังนี้

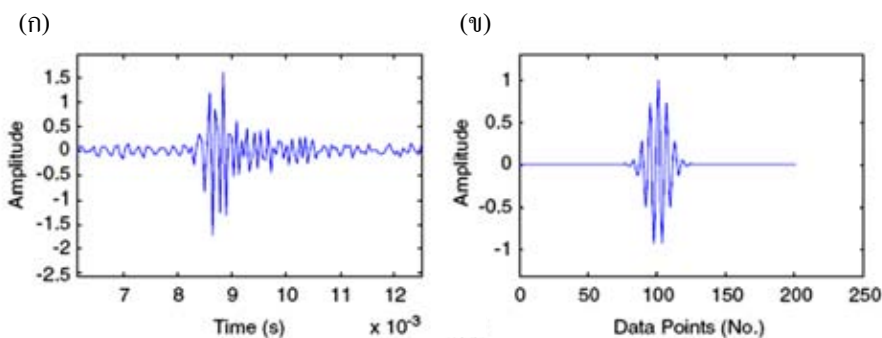
$$\bar{T}_i^2 = \frac{\sum_j T_{i,j}^2}{\sum_i \sum_j T_{i,j}^2} \quad (3-55)$$

$$SE(\bar{T}^2) = - \sum_i \bar{T}_i^2 \log(\bar{T}_i^2) \quad (3-56)$$

ความแตกต่างของเซนนอนเอนโทรปีที่ได้จากสมการ (3-54) และ (3-56) คือ ในสมการ (3-54) จะพิจารณาหาค่าเซนนอนเอนโทรปีจาก  $T(a, b)$  เป็นตัว ๆ ไปทั่วทั้งระนาบเวลา-สเกล แต่สมการ (3-56) จะเป็นเซนนอนเอนโทรปีที่พิจารณาผลรวมของพลังงานของ  $T(a, b)$  เป็นแต่ละสเกล ๆ ไป ดังนั้นการที่มีค่าเซนนอนเอนโทรปีน้อยที่สุดตามสมการ (3-54) หมายถึงมี  $T(a, b)$  เพียงไม่กี่ตัวที่มีขนาดของค่ามากเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่น ๆ ทั้งหมดในระนาบ เวลา-ความถี่ ในขณะที่ความหมายตามสมการ (3-56) หมายถึง ผลรวมของขนาดของ  $T(a, b)$  ในบางสเกลมีขนาดของค่ามากเทียบกับสเกลตัวอื่น ๆ ในระนาบ เวลา-ความถี่ ดังนั้นจึงควรเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่จะมาใช้แปลงสัญญาณที่ทำให้สมการ (3-54) หรือ (3-56) มีค่าน้อยที่สุด

### เวฟเลตที่ใช้ในการกรองสัญญาณ [7, 11]

โดยทั่วไปแล้วเวฟเลตที่นิยมใช้ในการกรองสัญญาณเพื่อตรวจสอบความเสียหายของคลัทช์ลูกปืน คือ มอร์เลตเวฟเลต เนื่องจากมอร์เลตเวฟเลตมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณผลการตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งเป็นลักษณะของสัญญาณความเสียหายของคลัทช์ลูกปืน ในระยะเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 3-48 เปรียบเทียบลักษณะของอิมพัลส์ทางกลและมอร์เลต์เวฟเลต

(ก) อิมพัลส์ทางกล, (ข) มอร์เลต์เวฟเลต [4]

จากหัวข้อทฤษฎีการแปลงเวฟเลต สามารถนิยามมอร์เลต์เวฟเลตในรูปแบบที่กระชับรัดกุมได้ดังนี้ [12]

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} (e^{i2\pi f_0 t}) e^{-t^2/2} \quad (3-57)$$

จากสมการ (3-57) จะพบว่า มีพารามิเตอร์เพียงตัวเดียวที่ปรับค่าได้ คือความถี่กึ่งกลางของเวฟเลต  $f_0$  ซึ่งไม่สามารถปรับความกว้างของแถบความถี่ผ่านได้ด้วยรูปสมการนี้ แต่จะสังเกตได้ว่าความกว้างของแถบความถี่ผ่านจะกำหนดได้ด้วยตัวเอ็นวีลอป  $e^{-t^2/2}$  ดังนั้นจึงปรับแก้สมการ (3-57) ให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกในการปรับช่วงความกว้างของแถบความถี่ผ่านได้ ดังนี้

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} (e^{i2\pi f_0 t}) e^{-\sigma^2 t^2} \quad (3-58)$$

สมการของฟูรีเยร์สเปกตรัมของสมการ (3-58) คือ

$$\hat{\psi}(f) = e^{-(\pi^2/\sigma^2)(f-f_0)^2} \quad (3-59)$$

ถ้าเปรียบเทียบกับสมการ (3-59) กับสเปกตรัมของสมการ (3-57)

$$\hat{\psi}(f) = \pi^{1/4} \sqrt{2} e^{-\frac{1}{2}(2\pi f - 2\pi f_0)^2} \quad (3-60)$$

จะพบว่าจะได้พารามิเตอร์  $\sigma$  มาปรับความกว้างของ  $\hat{\psi}(f)$  แสดงว่าด้วยรูปสมการที่ดัดแปลงแล้วตามสมการ (3-58) ทำให้สามารถสร้างมอร์เลต์เวฟเลตที่ปรับแถบความถี่ผ่านได้

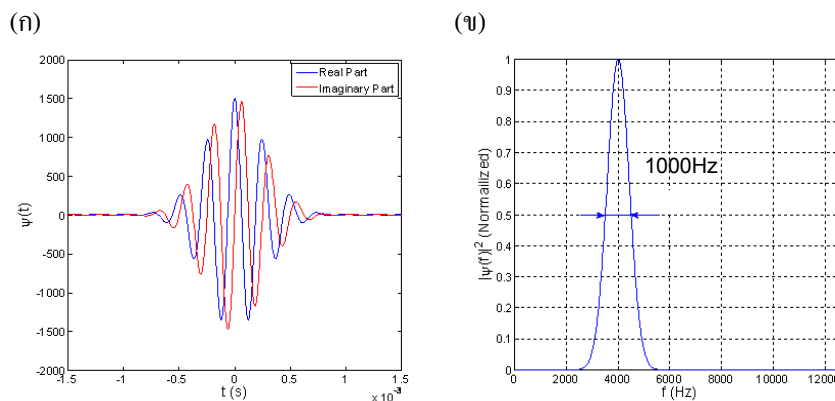
สำหรับการนิยามความกว้างของแถบความถี่ผ่าน (bandwidth) ในที่นี้จะนิยามว่าความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ( $\beta$ ) คือช่วงที่สเปกตรัมพลังงานจากสมการ (3-59) มีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ซึ่งจะได้ว่า

$$\beta = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \sigma \quad (3-61)$$

ดังนั้นแถบความถี่ผ่าน คือช่วง  $[f_0 - \beta/2, f_0 + \beta/2]$  และจากสมการ (3-59) และ (3-61) จะได้

$$\hat{\psi}(f) = e^{-(2 \ln 2 / \beta^2)(f-f_0)^2} \quad (3-62)$$

รูปที่ 3-49 แสดงตัวอย่างของมอร์เลต์เวฟเลตที่มี  $f_0 = 4000 \text{ Hz}$ ,  $\beta = 1000 \text{ Hz}$  ในโดเมนเวลา และสเปกตรัมพลังงานที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว จะเห็นว่าที่ความกว้างของแถบความถี่ผ่าน  $1000 \text{ Hz}$  พลังงานของตัวกรองมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานสูงสุด



รูปที่ 3-49 แสดงตัวอย่างมอร์เลตเวฟเลต (ก) ในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมกำลังที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) แล้ว

**เงื่อนไขเพิ่มเติมในการพิจารณาพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสม**

ในส่วนก่อนหน้าได้กล่าวถึงเกณฑ์แบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณาเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเวฟเลตหนึ่ง ๆ แล้ว แต่ยังมีเงื่อนไขเพิ่มเติมในการพิจารณาเลือกพารามิเตอร์ (ความถี่กึ่งกลาง และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน) ที่เหมาะสมอีก ดังนี้

1. จากที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่แล้วว่า มอร์เลตเวฟเลตมีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ จึงขัดกับเงื่อนไขแห่งการยอมรับของเวฟเลตนั้นคือ  $\hat{\psi}(0) = 0$  แต่จากสมการ (3-62) จะพบว่าถ้า  $f_0/\beta > 3.5$  จะได้ว่า  $\hat{\psi}(0) < 4.21 \times 10^{-8}$  ซึ่งประมาณว่าเป็นศูนย์ได้ จึงตั้งเงื่อนไขว่า  $f_0/\beta > 3.5$
2. ขอบเขตบนของแถบความถี่ผ่านต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสุ่มสัญญาณ (sampling frequency) นั่นคือ  $f_0 + \frac{\beta}{2} < \frac{f_s}{2}$
3. ขอบเขตล่างของแถบความถี่ผ่านต้องมีค่าสูงพอที่จะกันสัญญาณความถี่ต่ำของเครื่องจักร เช่น สัญญาณที่เกิดจากความไม่สมดุล การไม่ได้ศูนย์ของเพลลา เป็นต้น ออกจากสัญญาณที่ผ่านการกรอง นั่นคือ  $f_0 - \frac{\beta}{2} > f_r \times 20$  เมื่อ  $f_r$  คือความถี่การหมุนของเพลลา
4. แถบความถี่ผ่านจะต้องกว้างพอที่จะจับแถบความถี่ข้าง (sideband) ที่เกิดจากความเสียหายของดิสก์ได้หลาย ๆ แถบ ในที่นี้ความถี่ที่มีค่ามากที่สุดคือความถี่ที่เกิดจากความเสียหายที่วางวงในของดิสก์ (ball pass frequency of inner race:  $f_{BPIR}$ ) นั่นคือ  $\beta > 3f_{BPIR}$

**การสร้างเอ็นวีลอป (envelope) ของสัญญาณ**

หลังจากที่กรองสัญญาณด้วยมอร์เลตเวฟเลตเชิงซ้อนด้วยพารามิเตอร์ของเวฟเลตตามที่กำหนด จะได้สัญญาณที่ผ่านการกรองอยู่ในโดเมนเวลา  $y_f(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณจำนวนเชิงซ้อน การสร้างเอ็นวีลอป (envelope)  $S(t)$  ของสัญญาณที่ผ่านการกรองได้สามารถกระทำได้โดยใช้สมการ (3-63)

$$S(t) = \sqrt{[Re(y_f(t))]^2 + [Im(y_f(t))]^2} \tag{3-63}$$

หลังจากนั้นจึงนำเอ็นวีลอป  $S(t)$  ที่ได้ไปหาผลการแปลงฟูริเยร์ สำหรับคลัสเตอร์ที่เกิดความเสียหาย จะพบค่าสเปกตรัมที่ความถี่ตรงกับความถี่ที่เกิดความเสียหาย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของคลัสเตอร์นั้น ๆ มีค่าเด่นชัด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3-44(ค)

### 3-3-3 การกรองสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณ

การกรองสัญญาณรบกวนออกทั้งก่อนและหลังขั้นตอนการแปลงเวฟเลตมีส่วนช่วยในการดึงเอาลักษณะของความเสียหายของสัญญาณออกมามากขึ้น โดยสามารถทำได้ทั้งในขั้นตอนก่อนและหลังการแปลงเวฟเลต ทั้งนี้จะมีวิธีที่เหมาะสมกับในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกันไป สำหรับการกรองสัญญาณรบกวนก่อนการแปลงเวฟเลตเหมาะที่จะใช้วิธีออโตรีเกรสซีฟ (autoregressive: AR) ในขณะที่ส่วนหลังการกรองสัญญาณรบกวนหลังการแปลงด้วยเวฟเลตเหมาะที่จะใช้วิธี sparse code shrinkage (SCS)

#### การกรองสัญญาณรบกวนก่อนการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต: วิธีออโตรีเกรสซีฟ (AR) [10]

แนวคิดของวิธีนี้คือแยกส่วนที่คาดเดาได้ (deterministic) ของสัญญาณออกจากส่วนที่คาดเดาไม่ได้ (non deterministic) โดยการหาออโตคอร์รีเลชันของสัญญาณ ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของข้อมูลจุดหนึ่งในรูปของข้อมูลของจุดก่อนหน้าได้ ดังนี้

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^p a(k)y(t-k) \quad (3-64)$$

โดยรูปแบบตามสมการนี้สามารถใช้แทนสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ได้ดี แต่ไม่สามารถแทนส่วนที่คาดเดาไม่ได้ เช่น สัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่เกิดจากอิมพัลส์ได้ (ในที่นี้กำหนดให้ค่า  $p$  มีค่าน้อยกว่าจำนวนช่วงของจุดข้อมูลระหว่างอิมพัลส์สองลูกที่มีความถี่สูงที่สุด นั่นก็คือความเสียหายที่เกิดจากรางวังในของคลัสเตอร์นั้น เนื่องจากไม่ต้องทำให้ส่วนของสัญญาณที่เป็นอิมพัลส์กลายเป็นส่วนของสัญญาณที่คาดเดาได้นั่นเอง) ทำให้ส่วนของสัญญาณที่เป็นสัญญาณรบกวนแบบสุ่มและอิมพัลส์กลายเป็นส่วนตกค้างที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (3-64) ดังนั้นสามารถเขียนรูปความสัมพันธ์ของสัญญาณ  $y(t)$  ส่วนที่คาดเดาได้  $\hat{y}(t)$  และส่วนตกค้าง  $e(t)$  ได้ดังนี้

$$y(t) = \hat{y}(t) + e(t) \quad (3-65)$$

โดยสามารถหา  $a(k)$  ในสมการ (3-64) ได้จากสมการ (3-66)

$$\begin{bmatrix} r_{yy}[0] & r_{yy}[-1] & \dots & r_{yy}[p-1] \\ r_{yy}[1] & r_{yy}[0] & \dots & r_{yy}[p-2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{yy}[p-1] & r_{yy}[p-2] & \dots & r_{yy}[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a[1] \\ a[2] \\ \vdots \\ a[p] \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_{yy}[1] \\ r_{yy}[2] \\ \vdots \\ r_{yy}[p] \end{bmatrix} \quad (3-66)$$

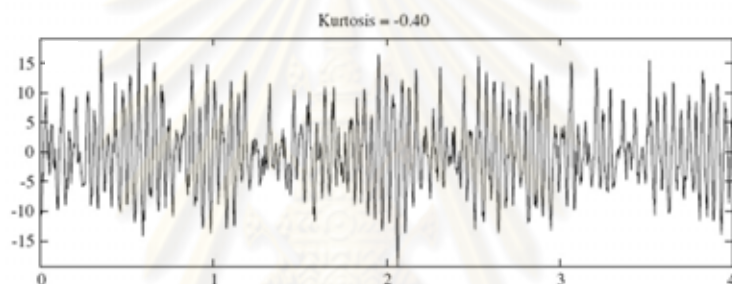
เมื่อ  $r_{yy}[\tau]$  คือค่าออโตคอร์รีเลชัน (autocorrelation) ของสัญญาณ  $y(t)$  ที่มีการเลื่อน (lag) เท่ากับ  $\tau$  โดยนิยามออโตคอร์รีเลชัน ได้ดังสมการ (3-67)



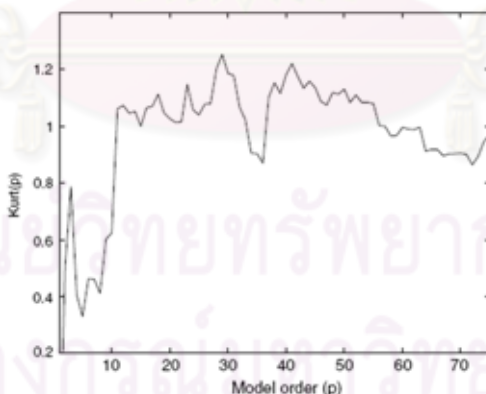
$$r_{yy}[\tau] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (3-67)$$

จากสมการ (3-64) จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้มีเพียงพารามิเตอร์  $p$  เท่านั้นที่ปรับค่าได้ ซึ่งค่า  $p$  ที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้เคอร์โทซิสของส่วนตกค้างที่ได้ของค่า  $p$  นั้น ๆ มีค่ามากที่สุด ซึ่งหมายความว่าส่วนตกค้างนั้นมีลักษณะของอิมพัลส์แค่นัดที่สุ่มนั่นเอง รูปที่ 3-50 แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ถูกกรองด้วยวิธีอตรีเกรสซีฟ รูปที่ 3-51 แสดงค่าเคอร์โทซิสของส่วนตกค้าง  $e(t)$  ในสมการ (3-65) ของแต่ละจำนวนพจน์  $p$  จะเห็นได้ว่าจำนวนพจน์  $p = 28$  ให้ค่าเคอร์โทซิสมากที่สุดในรูปที่ 3-50 จะทำให้ส่วนตกค้างมีลักษณะของ อิมพัลส์ที่ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับจำนวนพจน์  $p$  ค่าอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-51 [10]

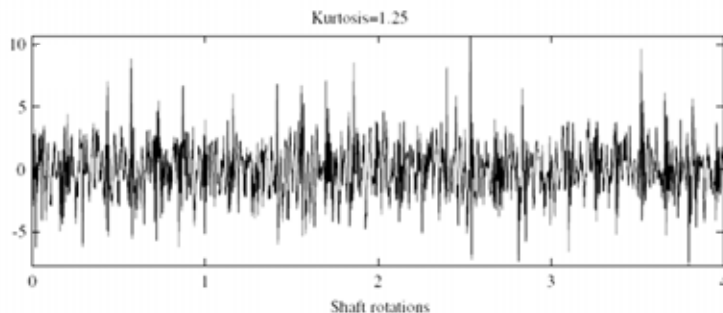
(หมายเหตุ ค่าเคอร์โทซิสที่แสดงในรูปที่ 3-50 - 3-52 เป็นค่าจากสมการ (3-51) ที่ถูกลบออกด้วย 3 เนื่องจากสัญญาณที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์จะมีค่าเคอร์โทซิสเป็น 3)



รูปที่ 3-50 ตัวอย่างของสัญญาณที่ถูกกรองด้วยวิธีอตรีเกรสซีฟ



รูปที่ 3-51 ค่าเคอร์โทซิสของส่วนตกค้างของรูปที่ 3-50 ที่จำนวนพจน์  $p$  ต่าง ๆ



รูปที่ 3-52 ส่วนตกค้างของสัญญาณตามรูปที่ 3-50 ที่จำนวนพจน์  $p = 28$

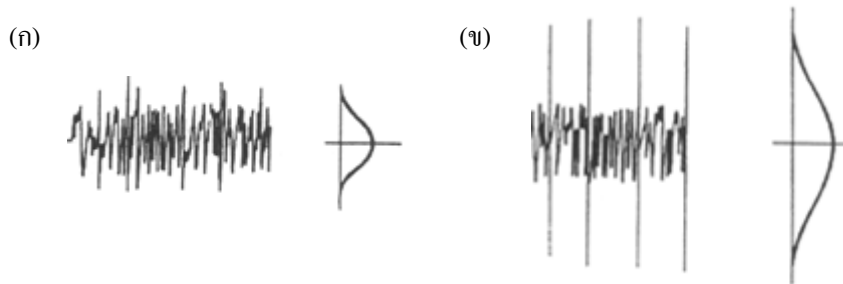
ให้ค่าเคอร์โทซิสมากที่สุดในการรูปที่ 3-51

### การปรับปรุงสัญญาณในส่วนหลังการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต: วิธี sparse code shrinkage (SCS) [7]

สำหรับกรณีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต หลังจากทีกรองสัญญาณ  $y(t)$  ด้วยเวฟเลตที่มีความถี่กึ่งกลางและแถบความถี่ผ่านแล้วตามที่หาได้จากเกณฑ์ที่ได้กล่าวไปในข้างต้น จะได้สัญญาณที่ผ่านการกรอง  $y_f(t)$  ถึงแม้ว่าสัญญาณที่ได้จะถูกกรองสัญญาณรบกวนออกไปส่วนหนึ่งแล้ว แต่ยังสามารถเอาส่วนของสัญญาณรบกวนออกไปได้อีก ก็จะช่วยให้ได้ลักษณะของสัญญาณความเสียหายที่ชัดเจนขึ้น มีผู้เสนอวิธี sparse code shrinkage (SCS) โดยมีแนวความคิดที่ว่า สัญญาณที่วัดได้จากตลับลูกปืน  $y(t) = x(t) + n(t)$  ประกอบไปด้วยสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืน  $x(t)$  และสัญญาณรบกวน  $n(t)$  ที่มีการกระจายแบบเกาส์ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่าความแปรปรวน  $\sigma$  ถ้าตลับลูกปืนเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว  $x(t)$  จะมีการกระจายที่ต่างออกไปจากแบบของเกาส์อย่างมาก เนื่องจากเกิดอิมพัลส์ขึ้น ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น ของสัญญาณที่มีการกระจายตัวแบบเหนือแบบของเกาส์ (super Gaussian) (แสดงการกระจายตัวแบบเกาส์และแบบเหนือแบบของเกาส์ในรูปที่ 3-53) คือ

$$p(x) = \frac{1}{2d} \frac{(\alpha + 2)[\alpha(\alpha + 1)/2]^{(\frac{\alpha+1}{2})}}{\sqrt{\frac{\alpha(\alpha + 1)}{2} + |x|^{\alpha+3}}} \quad (3-68)$$

เมื่อ  $d$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $x(t)$  และ  $\alpha$  คือพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการกระจาย (Sparseness) ของฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น มีค่าเป็น 1 สำหรับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นอิมพัลส์



รูปที่ 3-53 ลักษณะสัญญาณและฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น  
(ก) การกระจายตัวแบบเกาส์, (ข) การกระจายตัวแบบเหนือแบบของเกาส์

ดังนั้นจะหาค่า  $x(t)$  ที่ถูกฝังอยู่ใน  $y(t)$  ได้โดย

$$x(t) = \text{sign}(y(t)) \times \max\left(0, \frac{|y| - ad}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(|y| + ad)^2 - 4\sigma^2(\alpha + 3)}\right) \tag{3-69}$$

เมื่อ  $a = \sqrt{\alpha(\alpha + 1)}/2$  และ  $\text{sign}(y)$  คือฟังก์ชันเครื่องหมายที่นิยามโดย

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} -1 & ; y < 0 \\ 0 & ; y = 0 \\ 1 & ; y > 0 \end{cases} \tag{3-70}$$

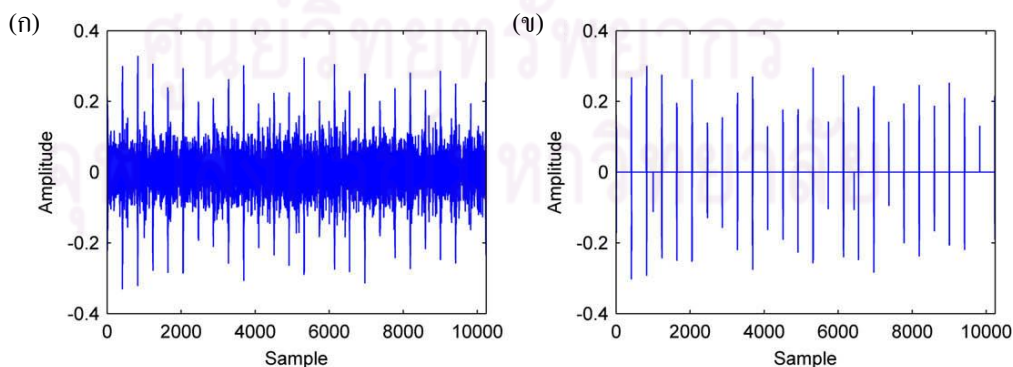
และ  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวน  $n(t)$  ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\sigma = \frac{\text{median}(|y_i - \text{median}(y)|)}{0.6745} \tag{3-71}$$

และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $d$  ของ  $x(t)$  สามารถหาได้จาก

$$d = \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma^2} \tag{3-72}$$

เมื่อ  $\sigma_y^2$  คือค่าความแปรปรวนของ  $y(t)$  ตัวอย่างการใช้งานของ SCS แสดงดังรูปที่ 3-54 โดยรูปที่ 3-54(ก) และ (ข) เป็นสัญญาณก่อนและหลังทำ SCS ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณที่ได้คงเหลือแต่ลักษณะของอิมพัลส์เท่านั้น



รูปที่ 3-54 สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยมอร์เลต์เวฟเลตก่อนและหลังทำ SCS  
(ก) สัญญาณก่อนทำ SCS, (ข) สัญญาณหลังทำ SCS

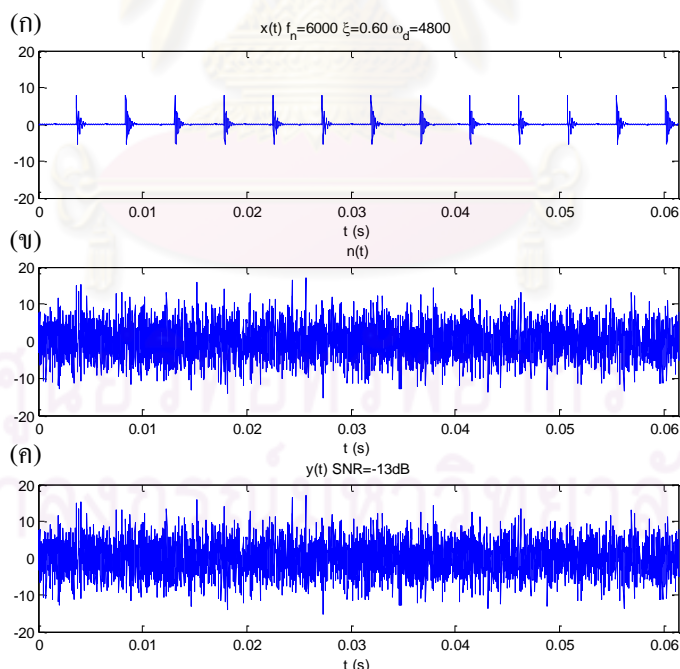
### 3 - 4 สรุปเปรียบเทียบการใช้เวฟเลตในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายเปรียบเทียบหลักการการทำงานและผลที่ได้ของวิธีการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนทั้งแบบวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตและการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต เปรียบเทียบกับการตรวจจับสัญญาณความเสียหายโดยใช้ฟูรีเยร์สเปกตรัม โดยใช้สัญญาณที่จำลองขึ้นมาที่มีสมการดังนี้

$$x(t) = \sum_{i=1}^N h(t - iT_r) \quad (3-74)$$

$$h(t) = e^{-2\pi\xi f_n t} \cos 2\pi\sqrt{1 - \xi^2} f_n t \quad (3-75)$$

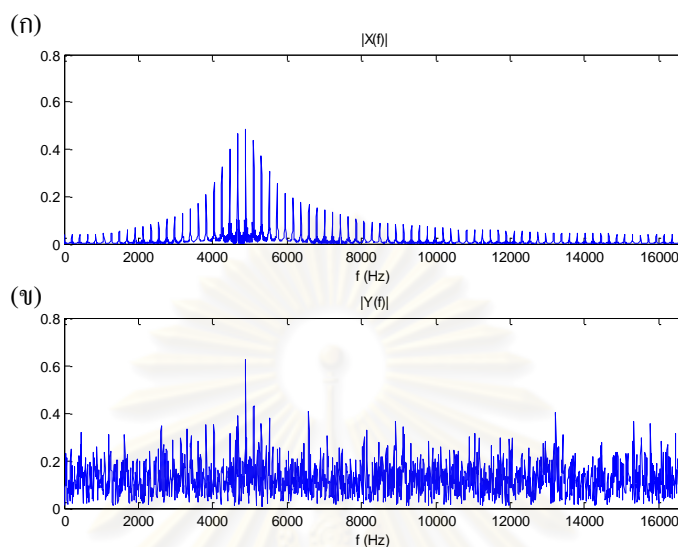
เมื่อ  $h(t)$  คือฟังก์ชันการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของระบบการสั่นสะเทือนแบบเชิงเส้นอันดับสองที่มีหนึ่งองศาอิสระ โดยมีอัตราส่วนการหน่วง  $\xi$  และความถี่ธรรมชาติเท่ากับ  $f_n$  โดย  $T_r$  คือ คาบในการเกิดของอิมพัลส์ ในที่นี้สมมติให้  $T_r = \frac{1}{212}$  s,  $f_n = 6000$  Hz และ  $\xi = 0.6$  จะได้สัญญาณที่มีลักษณะดังรูปที่ 3-55(ก) โดยสัญญาณดังกล่าวมีค่าถูกทำให้มีค่า RMS เป็น 1 หลังจากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวไปรวมกับสัญญาณรบกวน  $n(t)$  ดังแสดงในรูปที่ 3-55(ข) โดยปรับให้มีขนาด SNR = -13 dB จะได้สัญญาณ  $y(t)$  ดังรูปที่ 3-55(ค) แล้วนำสัญญาณนี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 3-55 สัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบ (ก) สัญญาณที่ได้จากสมการ (3-74), (ข) สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม, (ค) สัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบซึ่งได้มาจากผลรวมของสัญญาณในรูปที่ 3-55(ก) และ (ข)

### 3-4-1 ผลที่ได้จากฟูริเยร์สเปกตรัม

ถ้านำสัญญาณในรูปที่ 3-55(ก) และ (ค) มาแปลงฟูริเยร์แล้วเอาเฉพาะขนาดในส่วนที่ความถี่เป็นบวก จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3-56(ก) และ (ข) ตามลำดับ

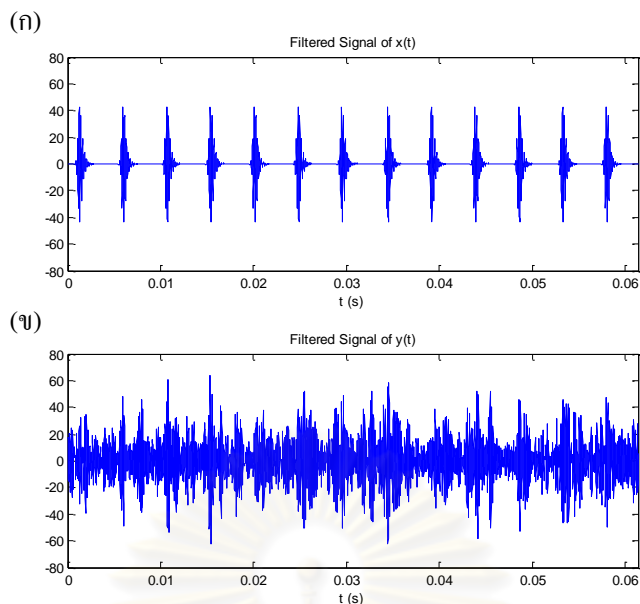


รูปที่ 3-56 ฟูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณ (ก) รูปที่ 3-55(ก) และ (ข) รูปที่ 3-55 (ค)

จะพบว่าสเปกตรัมที่ได้ในกรณีของสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 3-56(ก) และ (ข) มียอดสูงสุดที่ประมาณ 4800Hz สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่มีการหน่วงของระบบ นอกจากนี้จะพบว่ารูปที่ 3-56(ก) มียอดสเปกตรัมอื่น ๆ ที่เป็นแถบข้างที่มีระยะห่าง 212Hz ซึ่งเป็นความถี่การเกิดของอิมพัลส์ที่กำหนดในสมการ (3-74) ลักษณะของแถบข้างนี้สามารถบอกถึงตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนดรัมลูกปืนได้ แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 3-56(ข) จะพบว่าลักษณะความเป็นแถบข้างก็ไม่ได้ชัดเจนเหมือนกับรูปที่ 3-56(ก) ดังนั้นการใช้ฟูริเยร์สเปกตรัมในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นซึ่งมีสัญญาณรบกวนจำนวนมากอาจไม่ใช่วิธีที่เหมาะสม

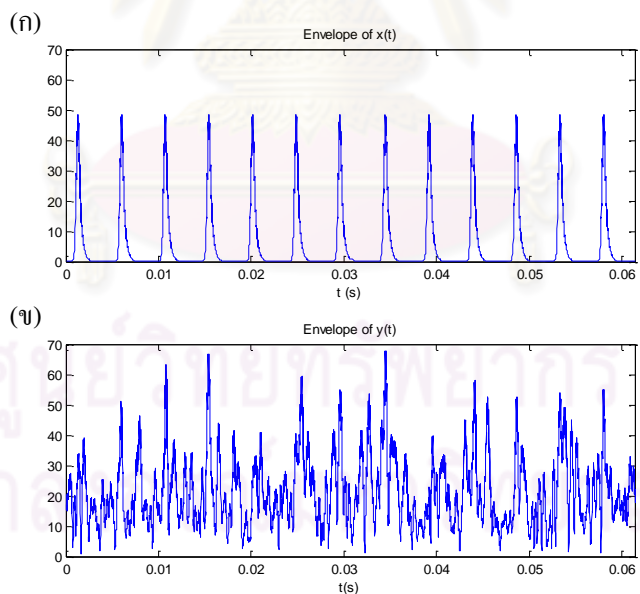
### 3-4-2 ผลที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

สัญญาณในรูปที่ 3-55(ก) และ (ค) จะถูกกรองด้วยมอร์เลตต์เวฟเลตที่มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ในที่นี้คือมอร์เลตต์เวฟเลตที่มี  $f_0$  เท่ากับ 5000Hz และ  $\beta$  เท่ากับ 1429Hz (การเลือกพารามิเตอร์สำหรับเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสมจะกล่าวถึงในส่วนถัด ๆ ไป) จะได้สัญญาณที่ผ่านการกรอง (ส่วนจริง) ดังรูปที่ 3-57(ก) และ (ข) ตามลำดับ



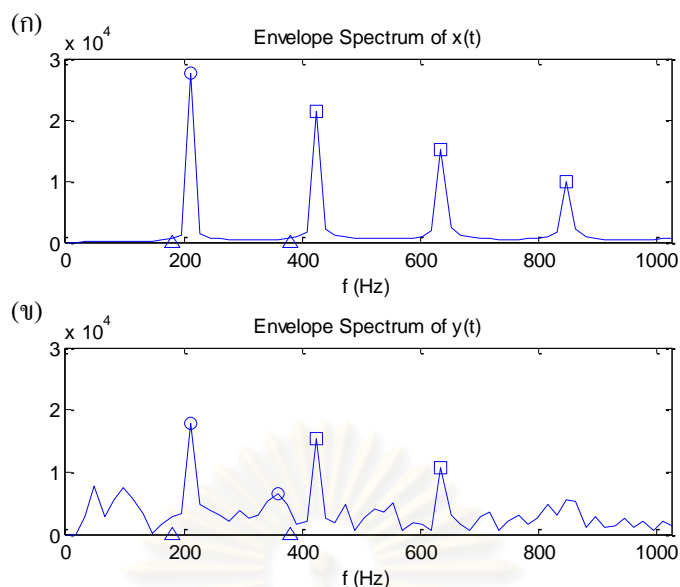
รูปที่ 3-57 ผลของการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต (ก), (ข) สัญญาณที่ผ่านการกรองของสัญญาณในรูปที่ 3-55(ก) และ (ค) ตามลำดับ

จากรูปที่ 3-57(ข) จะพบว่าสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตที่มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะเห็นลักษณะความเป็นคาบของอิมพัลส์ได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3-55(ค) หลังจากที่ได้สัญญาณที่ผ่านการกรองแล้วจึงหาเอ็นวีลอปของสัญญาณดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3-58



รูปที่ 3-58 เอ็นวีลอปของสัญญาณที่ผ่านการกรอง (ก), (ข) เอ็นวีลอปของสัญญาณในรูปที่ 20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

เมื่อได้เอ็นวีลอปดังรูปที่ 3-58 แล้วจึงหาเอ็นวีลอปเอ็นวีลอปสเปกตรัมดังกล่าวโดยการแปลงฟูริเยร์ ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3-59



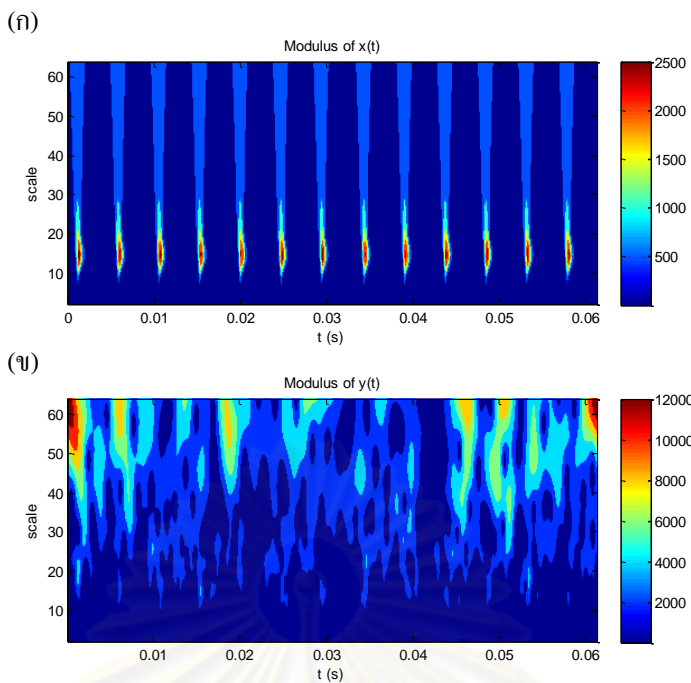
รูปที่ 3-59 เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่ผ่านการกรอง (ก), (ข) เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 3-55 (ก) และ (ค) ตามลำดับ

จากรูปที่ 3-59 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าจะพบยอดของสเปกตรัมที่มีความที่เป็นฮาร์มอนิกของ 212Hz ซึ่งแสดงถึงความเสียหายของตลับลูกปืน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้สามารถแสดงถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนกว่าการแปลงฟูริเยร์

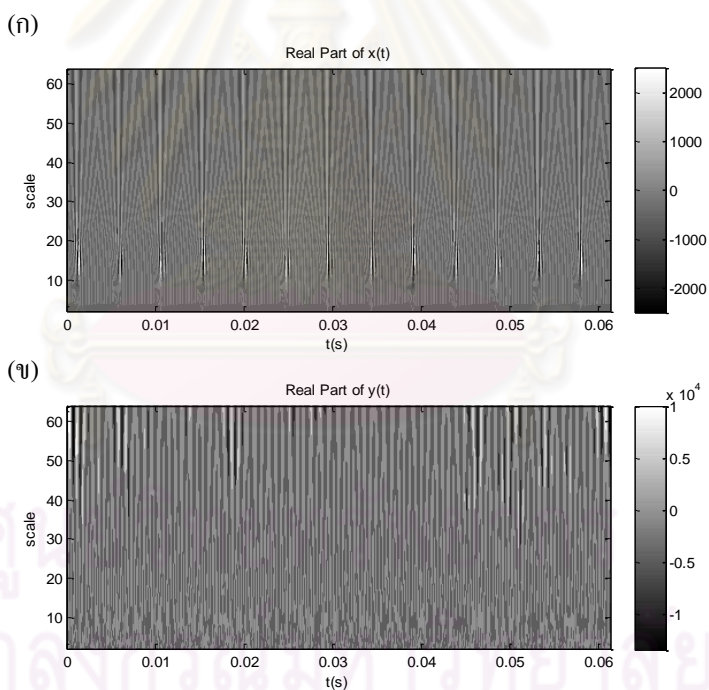
#### 3-4-3 ผลที่ได้จากการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต

สัญญาณในรูปที่ 3-55(ก) และ (ค) จะถูกแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตตามสมการ (3-58) โดยเวฟเลตที่มี  $f_0 = 3.5\beta$  ตั้งแต่สเกล  $a=2$  ถึง 64 (สอดคล้องกับความถี่ 33,333 ถึง 1,042Hz ตามลำดับ) จะได้มอดูลัสพล็อตและส่วนจริงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตดังรูปที่ 3-60 และ 3-61 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



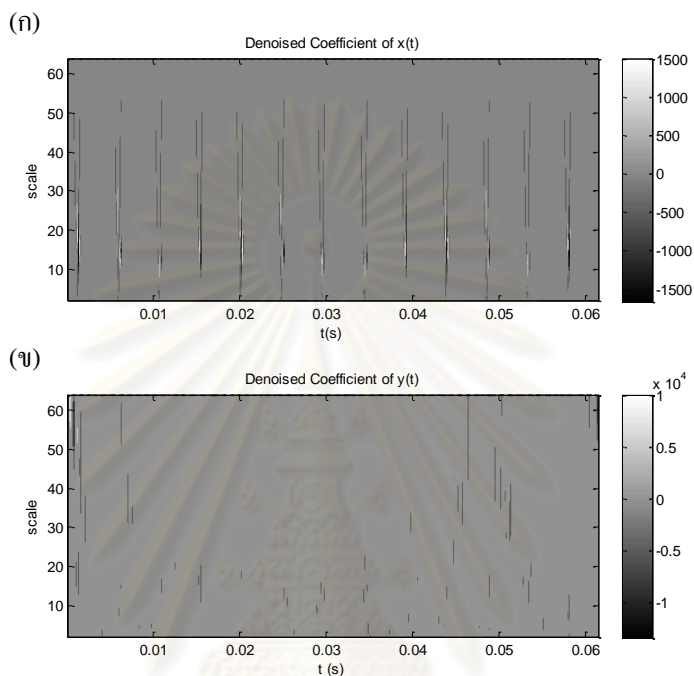
รูปที่ 3-60 มอดุลัสพล็อตของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต (ก), (ข) ของสัญญาณดังรูปที่ 3-55 (ก) และ (ค) ตามลำดับ



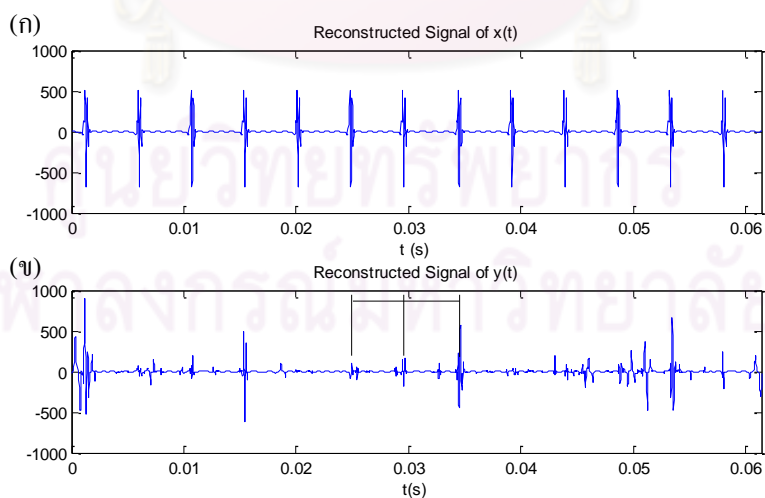
รูปที่ 3-61 สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต (ส่วนจริง) (ก), (ข) ของสัญญาณดังรูปที่ 3-55 (ก) และ (ค) ตามลำดับ



หลังจากที่ได้สัญญาณส่วนจริงดังรูปที่ 3-61 จะใช้วิธีลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี Inter- and intra-scale denoising ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการ (3-47 - 3-49) ทำให้ได้สัมประสิทธิ์ที่ถูกลดส่วนของสัญญาณรบกวน (ส่วนจริง) ดังแสดงในรูปที่ 3-62(ก) - (ข) หลังจากนั้นจึงแปลงกลับเวฟเลตเพื่อให้ได้สัญญาณในโดเมนเวลา ได้สัญญาณดังรูปที่ 3-63 ต่อจากนั้นจึงพิจารณาหาลักษณะความเป็นคาบของสัญญาณในรูปที่ 3-63



รูปที่ 3-62 ผลการลดส่วนของสัญญาณรบกวน (ก), (ข) พล็อตสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต (ส่วนจริง) ที่ลดส่วนของสัญญาณรบกวนแล้วของรูปที่ 3-61 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 3-63 ผลการตรวจจับความเสียหาย (ก) สัญญาณที่สร้างกลับจากรูปที่ 3-62(ก), (ข) สัญญาณที่สร้างกลับจากรูปที่ 3-62(ข) (หมายเหตุ ค่าที่ได้จากการแปลงกลับเวฟเลตยังไม่ได้ถูกนอร์มัลไลซ์)

จากรูปที่ 3-63(ก) พบลักษณะของอิมพัลส์ที่สอดคล้องกับสัญญาณเริ่มต้นทั้งหมด แต่จะพบว่ารูปทรงและเฟสของอิมพัลส์มีลักษณะเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับรูปที่ 3-55(ก) แต่สิ่งที่ใช้ในการตรวจจับความเสียหายคือคาบของสัญญาณ ดังนั้นรูปทรงและเฟสที่ผิดเพี้ยนไปจึงไม่ส่งผลกระทบต่อ การตรวจจับความเสียหายมากนัก トラบใดที่คาบการเกิดความเสียหายยังคงเดิม ในรูปที่ 3-63(ค) จะพบว่าเกิดคาบของสัญญาณที่สร้างกลับติดต่อกันมากที่สุดเพียงสองคาบเท่านั้น อีกทั้งการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมองหาคาบที่เกิดขึ้นติดต่อกันในสัญญาณสัญญาณ ทำให้ค่อนข้างยุ่งยากในการใช้งาน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับเอ็นวีลอปสเปกตรัมในรูปที่ 3-59(ข) จะพบว่าวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต (เอ็นวีลอปสเปกตรัม) เป็นวิธีการที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ และค่อนข้างมีความน่าเชื่อถือในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นมากกว่าวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต ทั้งนี้จะเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองอย่างละเอียดในหัวข้อต่อ ๆ ไป



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน

#### 4-1 การศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน

การศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ๆ ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาผลที่ได้จากแบบจำลองของสัญญาณ และส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาผลจากการทดลองวัดสัญญาณความเสียหายจริงของตลับลูกปืน โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการศึกษาในแต่ละหัวข้อต่อไป

##### 4-1-1 การศึกษาผลที่ได้จากแบบจำลองของสัญญาณ

ในส่วนนี้จะศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อผลการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดจากการจำลองสัญญาณทั้งหมด โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ที่นำมาพิจารณา ดังนี้

- ตัวแบบจำลองสัญญาณ
  - ค่าความถี่ธรรมชาติของสัญญาณ ( $f_n$ )
  - อัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณ ( $\xi$ )
  - Signal to noise ratio (SNR)
- การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต
  - การแยกส่วนประกอบของสัญญาณด้วยเวฟเลต
    - ผลของ  $f_0/\beta$  ของมอร์เลตเวฟเลตที่ใช้ในการแยกส่วนประกอบของสัญญาณ
  - การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต (เอ็นวีลอปสเปกตรัม)
    - ผลของ  $f_0$  และ  $\beta$  ของมอร์เลตเวฟเลตที่ใช้ในการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต
    - พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงความเหมาะสมของพารามิเตอร์ของ  $f_0$  และ  $\beta$  ของตัวกรองเวฟเลต
      - ◆ เคอร์โทซิส
      - ◆ แชนนอนเอนโทรปี
- การปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณก่อนและหลังการแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต
  - ผลของวิธีอโทรีเกรสซีฟในการลดส่วนที่คาดเดาได้ (deterministic) ของสัญญาณ
  - ผลของวิธี sparse code shrinkage ในการลดสัญญาณรบกวนที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองเวฟเลต
- เปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของฟูรีเยร์สเปกตรัม การแยกส่วนประกอบ และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

#### 4-1-2 การศึกษาผลที่ได้จากการทดลองวัดสัญญาณความเสียหายจริง

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการวิเคราะห์สัญญาณเนื่องจากปัจจัยที่ไม่สามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลอง โดยมีปัจจัยที่พิจารณาคือ

- ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน
- ภาระในแนวรัศมีที่กระทำต่อตลับลูกปืน
- ความเร็วรอบการหมุนของเพลา

#### 4-2 รูปแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลองได้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ๆ ตามส่วนของการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน มีรายละเอียดในการปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาดังนี้

##### 4-2-1 การจำลองสัญญาณ

การจำลองสัญญาณจะศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4-1-1 ด้วยการสร้างและวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีรายละเอียด ดังนี้

##### สมการที่ใช้ในแบบจำลอง

ในที่นี้เลือกสมการการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของระบบการสั่นสะเทือนเชิงเส้นอันดับสองที่มีหนึ่งองศาอิสระ ดังแสดงในสมการ (4-1) และ (4-2)

$$h(t) = e^{-2\pi\xi f_n t} \cos 2\pi\sqrt{1-\xi^2} f_n t \quad (4-1)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^N h\left(t - \frac{i}{f_r \cdot BF}\right) \quad (4-2)$$

เมื่อ  $\xi$ ,  $f_n$ ,  $f_r$ ,  $BF$  และ  $i$  คืออัตราส่วนการหน่วง ความถี่ธรรมชาติแบบไม่มีการหน่วงของระบบลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ ความถี่ในการหมุนของเพลา ความถี่ของตลับลูกปืน และลำดับที่ของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณตามลำดับ โดยมีการทดลองใช้ค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ของตัวสัญญาณที่ถูกปรับ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ทดลอง
$\xi$	0.2, 0.4 และ 0.6
$f_n$ (Hz)	2000, 4000, 6000, 8000 และ 10000
$f_r$ (Hz)	50

โดยค่า BF ที่ประกอบไปด้วย BPOR, BPIR และ BSF จะอ้างอิงมาจากตลับลูกปืนแบบเม็ดทรงกระบอก (cylindrical roller bearing) ยี่ห้อ SKF รุ่น NU/NUP 305 ECP ซึ่งเป็นตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดสอบจริงในส่วนที่สอง โดยมีค่าความถี่ต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 4-2 ค่าความถี่ของตลับลูกปืน SKF รุ่น NU/NUP 305 ECP [SKF]

ความถี่	จำนวนเท่าของของ $f_r$
BPOR	4.25
BPIR	6.75
BSF	4.17

เนื่องจากไม่มีแบบจำลองที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณจำลองความเสียหายที่วางไว้ในและเม็ดลูกปืน จึงศึกษาเฉพาะกรณีที่เกิดความเสียหายที่วางไว้บนนอกของตลับลูกปืนเท่านั้น

#### ค่า signal to noise ratio

ชุดของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ (Gaussian white noise) จะถูกสร้างขึ้นมาจำนวน 100 ชุดที่ไม่ซ้ำกัน โดยจะถูกรวมกับสัญญาณที่ถูกสร้างด้วยสมการ (4-1) และ (4-2) ที่ถูกปรับขนาดให้มีค่า RMS เป็น 1 โดยจะปรับขนาดของสัญญาณรบกวนที่นำมารวมเพื่อให้มีค่า SNR เป็นไปตามที่ต้องการ เพื่อใช้ในการศึกษาผลของ SNR ที่มีต่อการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อไป โดยกำหนดให้มีค่า SNR ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่า signal to noise ratio ที่ใช้ในการจำลองสัญญาณ

signal to noise ratio (dB)	$\infty$ (ไม่มีสัญญาณรบกวน)
	-10, -13, -15
	$-\infty$ (มีเฉพาะสัญญาณรบกวน)

### การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณในโดเมนเวลา

สัญญาณทั้งหมดที่ถูกจำลองขึ้นในโดเมนเวลาทั้งส่วนของสัญญาณความเสียหายและสัญญาณรบกวน มีรายละเอียดในการปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณจำลองในโดเมนเวลา

Sampling time ( $\mu s$ )	15
Sampling rate (kHz)	66.7
จำนวนจุดข้อมูล	4096
ระยะเวลา (ms)	61.4

### การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณในโดเมนความถี่

สืบเนื่องจากการปรับตั้งการเก็บข้อมูลสัญญาณในโดเมนเวลา ทำให้ได้การปรับตั้งสำหรับการเก็บข้อมูลสัญญาณในโดเมนความถี่ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 การปรับตั้งค่าการเก็บข้อมูลสัญญาณจำลองในโดเมนความถี่

ความถี่ต่ำสุด (Hz)	0
ความถี่สูงสุด (kHz)	33.33
จำนวนเส้นสเปกตรัม	4096
ระยะระหว่างเส้นสเปกตรัม (Hz)	8.14

### การทำออโตรีเกรสซีฟ (autoregressive)

การทำออโตรีเกรสซีฟของสัญญาณบนโดเมนเวลามีพารามิเตอร์ที่ปรับได้หนึ่งตัว คือ จำนวนพจน์สูงสุดในการเขียนอธิบายสัญญาณในรูปของพจน์ของสัญญาณก่อนหน้า ( $p_{\max}$ ) ในสมการ (3-64) โดยค่าดังกล่าวหาได้จากคาบการเกิดของความถี่ที่เกิดจากความเสียหายของตลับลูกปืนตัวที่สูงที่สุด นั่นก็คือ BPIR จากตารางที่ 4-1, 4-2 และ 4-4 จะได้  $p_{\max}$  ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ค่า  $p_{\max}$  ของสัญญาณจำลองที่อัตราเร็วรอบการหมุนของเพลาดังต่าง ๆ

$f_r$ (Hz)	$p_{\max}$ (พจน์)
50	197

### ค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลต

ในส่วนนี้จะแบ่งการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเวฟเลตออกเป็นสองรูปแบบด้วยกัน คือ การปรับพารามิเตอร์สำหรับการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลตและการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

### การปรับพารามิเตอร์สำหรับการแยกส่วนประกอบของสัญญาณด้วยเวฟเลต

ในการแยกส่วนประกอบของสัญญาณด้วยเวฟเลตมีหลักการในการปรับตั้งคล้ายกับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต แต่มีความแตกต่างกันอยู่ตรงที่  $f_0$  คือ sampling rate ของการเก็บสัญญาณ ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือก  $f_0$  อย่างอิสระได้เช่นการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต แต่สามารถเลือกค่า  $f_0/\beta$  ของเวฟเลตแม่ได้ โดยเวฟเลตแม่ดังกล่าวจะถูกสร้างให้เป็นเวฟเลตลูกที่สเกล  $\alpha$  ต่าง ๆ การปรับตั้งเวฟเลตสำหรับการแยกส่วนประกอบแสดงไว้ในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 การปรับตั้งพารามิเตอร์สำหรับการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ทดลอง
$f_0$ (kHz)	66.7 (ตาม sampling rate)
$f_0/\beta$	3.5 และ 7
ช่วงของ scale ( $\alpha$ )	2 ถึง 64 ปรับทีละ 0.5

### การปรับพารามิเตอร์สำหรับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

ในการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต ถือว่าเป็นการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลตที่สเกล  $\alpha=1$  (เวฟเลตแม่) เพียงสเกลเดียว สำหรับมอร์เลตเวฟเลตมีพารามิเตอร์ที่ปรับตั้งได้อยู่สองตัวด้วยกัน คือ ความถี่กึ่งกลาง  $f_0$  และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน  $\beta$  ดังที่ได้นิยามไว้ในสมการ (3-61) โดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ ที่จำกัดช่วงของค่า  $f_0$  และ  $\beta$  ที่ได้กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้า ค่า  $f_0$  และ  $\beta$  ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 4-8 โดยสำหรับค่า  $f_0$  หนึ่ง ๆ จะใช้ค่า  $\beta$  3 ค่าในการทดลอง

ตารางที่ 4-8 การปรับตั้งพารามิเตอร์สำหรับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

$f_0$ (Hz)	$\beta$ (Hz)
2,000 ถึง 10,000Hz ปรับทีละ 500Hz	ใช้ $\beta$ 3 ค่าโดยเว้นระยะเท่า ๆ กัน โดยมีเงื่อนไข ดังนี้ $f_0/\beta > 3.5$ $f_0 + \frac{\beta}{2} < \frac{f_s}{2},$ $f_0 - \frac{\beta}{2} > f_r \times 20$ $\beta \geq 500\text{Hz}$

ตัวบ่งชี้เพื่อใช้หาพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสมสำหรับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

ตัวบ่งชี้จะถูกพิจารณาเป็นฟังก์ชันของ  $f_0$  และ  $\beta$  โดยตัวบ่งชี้ที่จะศึกษาในเบื้องต้นคือ เคอร์โทซิส และ แชนนอนเอนโทรปี โดยรายละเอียดของพารามิเตอร์ดังกล่าวได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3-3-2

สรุปขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนของการจำลองสัญญาณ

1. สร้างสัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4-1, 4-2 และ 4-4 จะได้สัญญาณจำลองที่ไม่มีสัญญาณรบกวนลักษณะต่าง ๆ
2. วิเคราะห์สัญญาณด้วย 3 วิธี คือ การแปลงฟูรีเยร์ การแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตสัญญาณที่ได้ในข้อ 1 เพื่อศึกษา
  - ผลกระทบต่อการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นจากลักษณะของสัญญาณเอง
  - ผลกระทบต่อการตรวจจับความเสียหายที่เกิดจากการปรับพารามิเตอร์ของเวฟเลต
  - ลักษณะความแตกต่างของการวิเคราะห์ในแต่ละวิธี
3. นำสัญญาณที่ได้ในข้อที่ 1 ไปรวมกับสัญญาณรบกวน ให้ได้สัญญาณความเสียหายที่มี SNR ค่าต่าง ๆ
4. ทำซ้ำข้อ 2 อีกครั้งกับสัญญาณที่ได้ในข้อที่ 3 แต่ละ SNR
5. พิจารณาประสิทธิภาพของเคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีในการเป็นตัวบ่งชี้ในการเลือกตัวกรองเวฟเลต (ค่า  $f_0$  และ  $\beta$ ) ที่เหมาะสมของสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต
6. นำสัญญาณที่ได้จากข้อที่ 3 ไปเพิ่มส่วนที่คาดเดาได้ (deterministic) แล้วจึงทำออโตรีเกรสซิฟ เพื่อดูผลของ AR ที่มีต่อสัญญาณทั้งในโดเมนเวลา ความถี่ และเอ็นวีลอปสเปกตรัม เปรียบเทียบผลที่ได้กับสัญญาณที่ไม่ได้ผ่าน AR
7. นำสัญญาณที่ได้จากข้อที่ 3 ไปผ่านการกรองด้วยเวฟเลตที่เหมาะสมไปทำ sparse code shrinkage (SCS) พิจารณาเปรียบเทียบ envelope spectrum ที่ได้กับกรณีที่ไม่ได้ผ่าน SCS

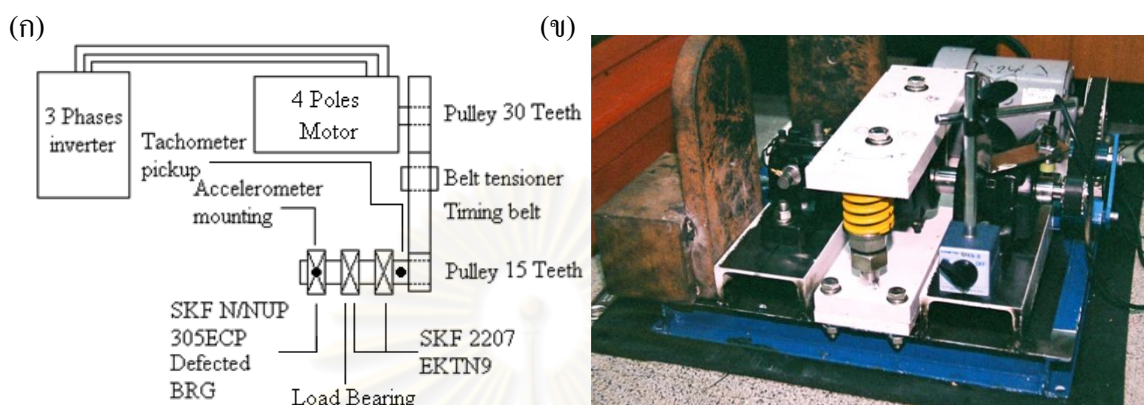
4-2-2 ส่วนของการทดลองวัดสัญญาณจริง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบสองส่วนหลัก คือ ชุดทดลองตลับลูกปืนและชุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยแต่ละชุดมีรายละเอียดดังนี้



### ชุดทดลองตลับลูกปืน

ชุดทดลองตลับลูกปืนมีหน้าที่ให้ภาระในแนวรัศมีกับตลับลูกปืนที่ต้องการศึกษาการตรวจจับความเสียหาย โดยสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์ ชุดทดลองดังกล่าวมีรายละเอียดพอสังเขปดังแสดงในรูปที่ 4-1 (ก) และ (ข)



รูปที่ 4-1 ชุดทดลองตลับลูกปืน (ก) แผนภาพส่วนประกอบของชุดทดลอง, (ข) ภาพชุดทดลอง

### ชุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

ชุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนมีหน้าที่เก็บข้อมูลบนโดเมนเวลาเพื่อที่จะนำไปใช้ในการประมวลสัญญาณในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ต่อไป มีส่วนประกอบดังนี้

1. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (signal analyzer) B&K 2035
2. เครื่องขยายประจุ (charge amplifier) B&K 2635
3. เครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) B&K 4444
4. เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer)

ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน ภาระในแนวรัศมี และความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง

ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน ภาระในแนวรัศมี และความเร็วรอบ ที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน ภาระในแนวรัศมี และความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ทดลอง
ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย	รางวิ่งนอก, รางวิ่งใน และเม็ดลูกปืน
ภาระในแนวรัศมี (N)	102, 830 และ 1558
ความเร็วรอบ (rpm)	900, 1500, 2100 และ 2700

### ตำแหน่งการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

ในการทดลอง จะวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนใน 2 ทิศทาง คือ ในแนวนอนและแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

### การปรับตั้งค่าสำหรับการเก็บข้อมูล

ในการทดลอง จะใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน B&K 2035 เก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไปด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีการปรับตั้งค่าในการเก็บข้อมูลดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ประเภทการเก็บข้อมูล	Dual Channel Time Capture
จำนวนจุดข้อมูลต่อช่องสัญญาณ	32,768
Sampling time ( $\mu\text{s}$ )	30.5
ระยะเวลาในการเก็บสัญญาณ (s)	1
Trigger	External, Slope +
ความยาวของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ (จุดข้อมูล)	4,096
จำนวนชุดของสัญญาณที่เก็บ (ชุด)	40

### ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนของการทดลองวัดสัญญาณจริง

1. ปรับตั้งและสอบเทียบชุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน
2. ปรับตั้งชุดทดลองตลับลูกปืนให้ได้ศูนย์
3. วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์ที่อัตราเร็วการหมุนของเพลาและภาระในแนวรัศมีค่าต่าง ๆ
4. ทำซ้ำข้อ 3 แต่เปลี่ยนเป็นตลับลูกปืนที่มีความเสียหายแบบเฉพาะที่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนตลับลูกปืน
5. นำผลที่ได้จากข้อ 4 และ 5 ไปวิเคราะห์ต่อด้วยความรู้ที่ได้จากส่วนการจำลองสัญญาณความเสียหาย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ผลการศึกษาที่ได้จากสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน

#### 5-1 ผลการศึกษาที่ได้จากการจำลองสัญญาณ

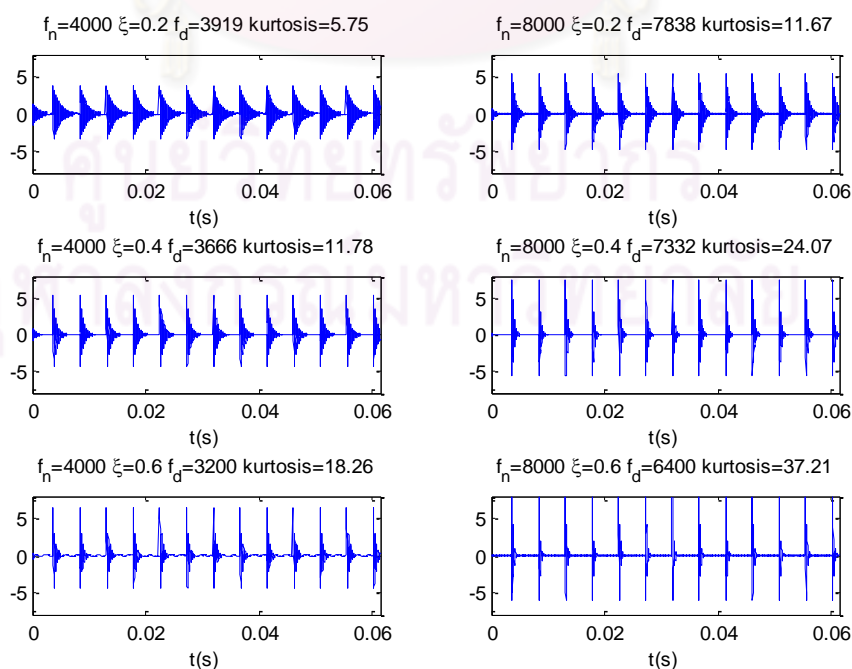
ในบทนี้จะแสดงผลของการจำลองสัญญาณที่มีผลต่อการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยวิธีที่นำเสนอทั้งสามวิธี โดยแสดงถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อผลการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน ขั้นตอนที่ทำให้ได้มาซึ่งผลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน และประสิทธิภาพของวิธีทั้งสามในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน โดยเรียงลำดับตามประเด็นที่นำเสนอตามหัวข้อการจำลองสัญญาณ

##### 5-1-1 ผลเนื่องจากตัวสัญญาณ

##### ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณ

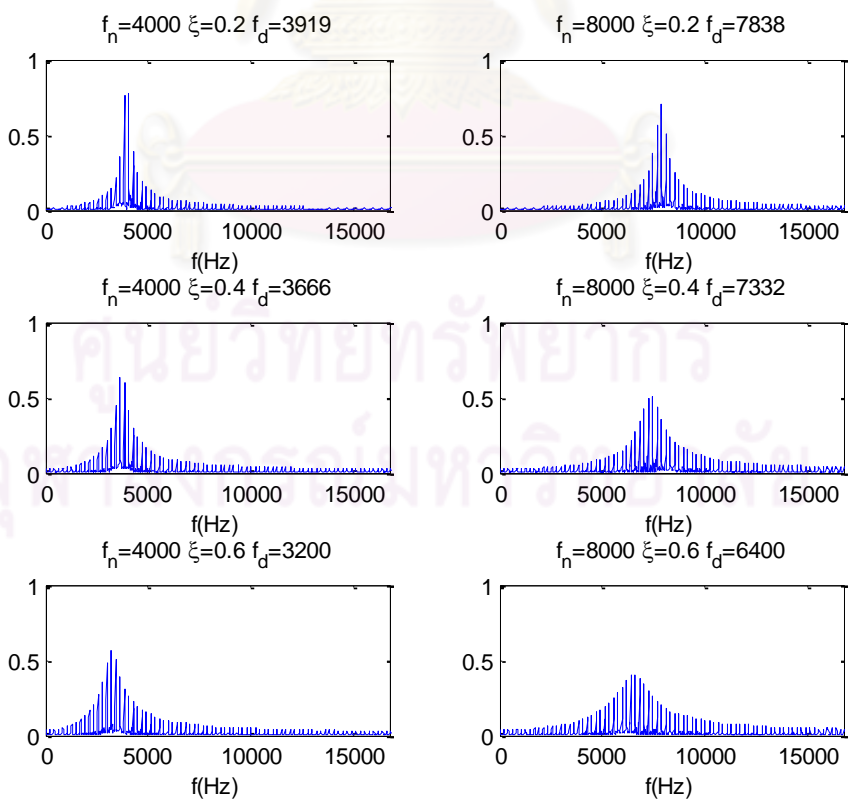
รูปที่ 5-1 แสดงลักษณะของสัญญาณการตอบสนองของอิมพัลส์ที่มีค่าความถี่ธรรมชาติ ( $f_n$ ) และอัตราส่วนการหน่วง ( $\xi$ ) ของสัญญาณต่าง ๆ กัน โดยในตัวอย่างเป็นการจำลองระบบที่มีคาบการเกิดอิมพัลส์  $T_r = \frac{1}{212}$  s และความถี่ธรรมชาติแบบไม่มีกการหน่วง  $f_n = 4000, 8000$  Hz และมีอัตราส่วนการหน่วงเป็น 0.2, 0.4 และ 0.6 ตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกทำให้มีค่า RMS ของตัวสัญญาณเป็น 1

(หมายเหตุ เนื่องจากสัญญาณที่จำลองขึ้นมาไม่มีหน่วย ดังนั้นแกนตั้งของพล็อตที่เป็นสองมิติจึงแสดงถึงขนาดของสัญญาณที่ไม่มีหน่วย)



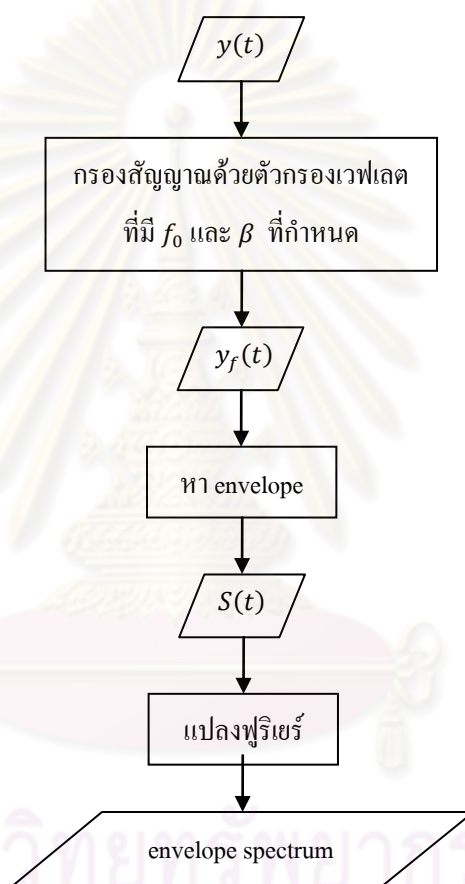
รูปที่ 5-1 สัญญาณในโดเมนเวลาที่มีอัตราส่วนการหน่วงต่างกัน

จะเห็นได้ว่าการลู่อ้างของสัญญาณขึ้นอยู่กับทั้งอัตราส่วนการหน่วง ( $\xi$ ) และความถี่ธรรมชาติ ( $f_n$ ) ของสัญญาณ ซึ่งก็เป็นไปตามสมการ (4-1) โดยจะเห็นได้ชัดว่าช่องหรือกรอบที่ปิดล้อมยอดของสเปกตรัมของสัญญาณ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  มีรูปทรงคล้ายกับสัญญาณ  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.4$  เนื่องจากมีช่องซึ่งควบคุมอัตราการลดลงของสัญญาณไซน์ในสมการ (4-1) เท่ากันนั่นเอง เมื่อนำสัญญาณในรูปที่ 5-1 ไปทำ FFT จะได้สัญญาณดังแสดงไว้ในรูปที่ 5-2 จะพบว่าเมื่ออัตราการลดของสัญญาณในรูปที่ 5-1 มีมากขึ้น อัตราการลดลงของยอดสเปกตรัมในโดเมนความถี่จะน้อยลง หรือสามารถกล่าวได้ว่าสัญญาณที่มีการลู่อ้างอย่างรวดเร็วบนโดเมนเวลาจะมีการกระจายตัวที่กว้างในโดเมนความถี่ สอดคล้องกับหลักการแปลงฟูริเยร์ที่สัญญาณที่มีอัตราการลดลงในโดเมนเวลาที่เร็วจำเป็นต้องใช้ผลรวมของสัญญาณไซน์ชอยดัลในจำนวนพจน์ที่มากกว่า นอกจากนี้จะพบว่า กรณีสเปกตรัมของรูปที่  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  จะมีช่องที่ปิดล้อมยอดของเส้นสเปกตรัมรูปทรงคล้ายกับสเปกตรัมของรูปที่  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.4$  ต่างกันที่ตำแหน่งในแกนความถี่ของช่องเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการแผ่ตัวของสเปกตรัมในโดเมนความถี่ถูกกำหนดโดยพจน์  $\xi f_n$  ในสมการ (4-1) ดังนั้นทั้งสองรูปจึงมีลักษณะรูปทรงของช่องในโดเมนความถี่ที่คล้ายกัน แตกต่างกันที่ขนาดและความถี่กึ่งกลางเท่านั้น โดยจะเห็นได้ว่ายอดที่สูงที่สุดของสเปกตรัมทุกรูปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติที่มีการหน่วง ( $f_d$ ) ของระบบซึ่งก็สอดคล้องกับสมการ (4-1) และการแปลงฟูริเยร์เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของระบบที่ปรากฏจริงคือ  $f_d$  ไม่ใช่  $f_n$

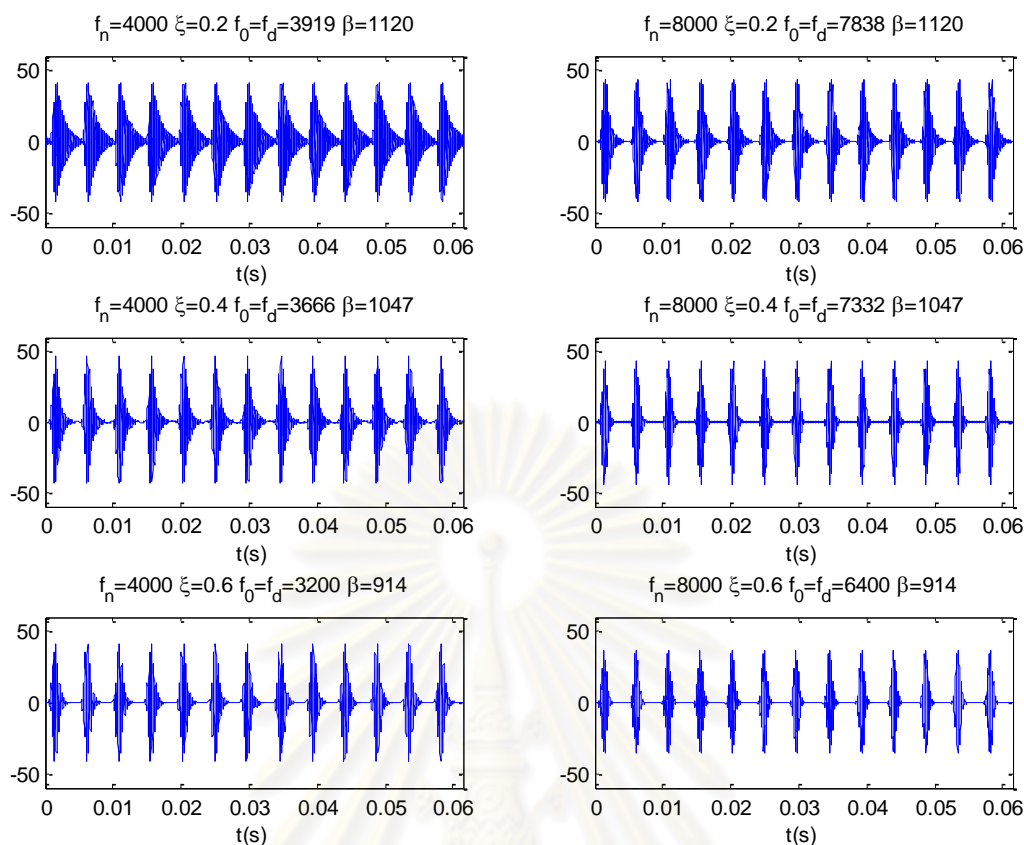


รูปที่ 5-2 ฟูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-1

ถ้านำสัญญาณในรูปที่ 5-1 มากรองสัญญาณด้วยเวฟเลตด้วยขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5-3 โดยใช้ตัวกรองเวฟเลตที่มีพารามิเตอร์  $f_0 = f_d$  และ  $\beta = f_d/3.5$  สำหรับกรณีของ  $f_n = 4000\text{Hz}$  และ  $\beta = f_d/7$  สำหรับ  $f_n = 8000\text{Hz}$  เนื่องจากสเปกตรัมของสัญญาณมีค่ามากที่สุดในช่วงดังกล่าว และสาเหตุที่กำหนดให้ความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ( $\beta$ ) มีค่าดังกล่าวเนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดจากเฉพาะตัวสัญญาณ ดังนั้นจึงเลือกความกว้างของแถบความถี่ผ่านให้มีค่าเท่ากัน เพื่อให้ตัวกรองเวฟเลตจึงมีรูปร่างเหมือนกัน แตกต่างกันที่เพียงความถี่กึ่งกลางของตัวกรองเท่านั้น จะได้สัญญาณที่ผ่านการกรองดังแสดงในรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-3 ขั้นตอนการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต (หมายเหตุ ค่าของการแปลงเวฟเลตทั้งหมดได้มาจากการแปลงเวฟเลตในรูปแบบการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว ตามสมการ (3-36) ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งในโปรแกรมนี้ ขนาดของการแปลงฟูรีเยร์จะต้องคูณออร์มัลไลซ์ (normalize) ด้วยจำนวนจุดข้อมูลของสัญญาณ แต่เนื่องจากสัญญาณจำลองที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดมีความยาวเท่ากัน จึงขอละการนอร์มัลไลซ์ค่า เนื่องจากการคูณด้วยค่าคงที่เป็นเพียงการปรับสเกลของรูปเท่านั้น ด้วยเหตุนี้สัญญาณจำลองทั้งหมดจึงให้เปรียบเทียบกันได้โดยไม่ต้องมีการนอร์มัลไลซ์ ดังนั้นค่าของสัญญาณที่ผ่านการกรอง เอ็นวีลอป และเอ็นวีลอป-สเปกตรัมจะมีตัวเลขที่สูง)

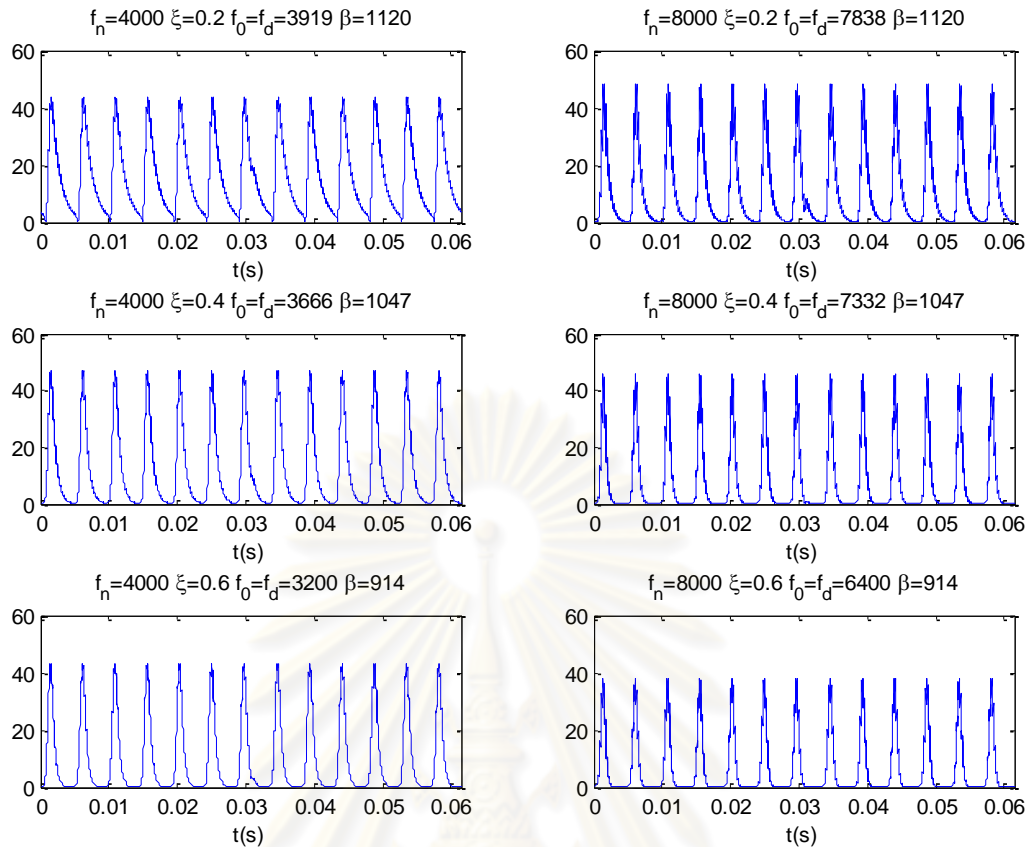


รูปที่ 5-4 สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต (ส่วนจริง)

จากรูปที่ 5-4 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตที่มี  $f_0$  และ  $\beta$  ตามที่ได้กล่าวมาในช่วงต้น มีลักษณะที่สัมพันธ์กับสัญญาณในรูปที่ 5-1 โดยจะเห็นได้จากลักษณะการลู่อเข้าของสัญญาณ แม้ว่าตำแหน่งของพัลส์แต่ละลูกของสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้วจะเลื่อนตำแหน่งไปเมื่อเทียบกับสัญญาณเริ่มต้นในรูปที่ 5-1 อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าระยะห่างของพัลส์แต่ละลูกซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเสียหายที่เกิดขึ้นในตลับลูกปืนยังคงเท่าเดิม ซึ่งในการตรวจจับความเสียหายจะพิจารณาตรงระยะห่างนี้ ดังนั้นการเลื่อนตำแหน่งของพัลส์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ผ่านการกรองจึงไม่ส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย

หลังจากที่ได้สัญญาณที่ผ่านการกรองดังรูปที่ 5-4 แล้ว ต่อไปจะนำสัญญาณดังกล่าวมา คีมอดดูเลตส่วนสัญญาณความถี่สูงที่เป็นคลื่นพาห้ (carrier) ออกไปให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นความถี่ที่สอดคล้องกับคาบการเกิดสัญญาณความเสียหาย โดยการสร้างเอ็นวีลอป (envelope)ตามสมการ (3-50) จะได้สัญญาณดังรูปที่ 5-5

$$S(b) = \sqrt{[\text{Re}(T(a_0, b))]^2 + [\text{Im}(T(a_0, b))]^2} \quad (3-50)$$

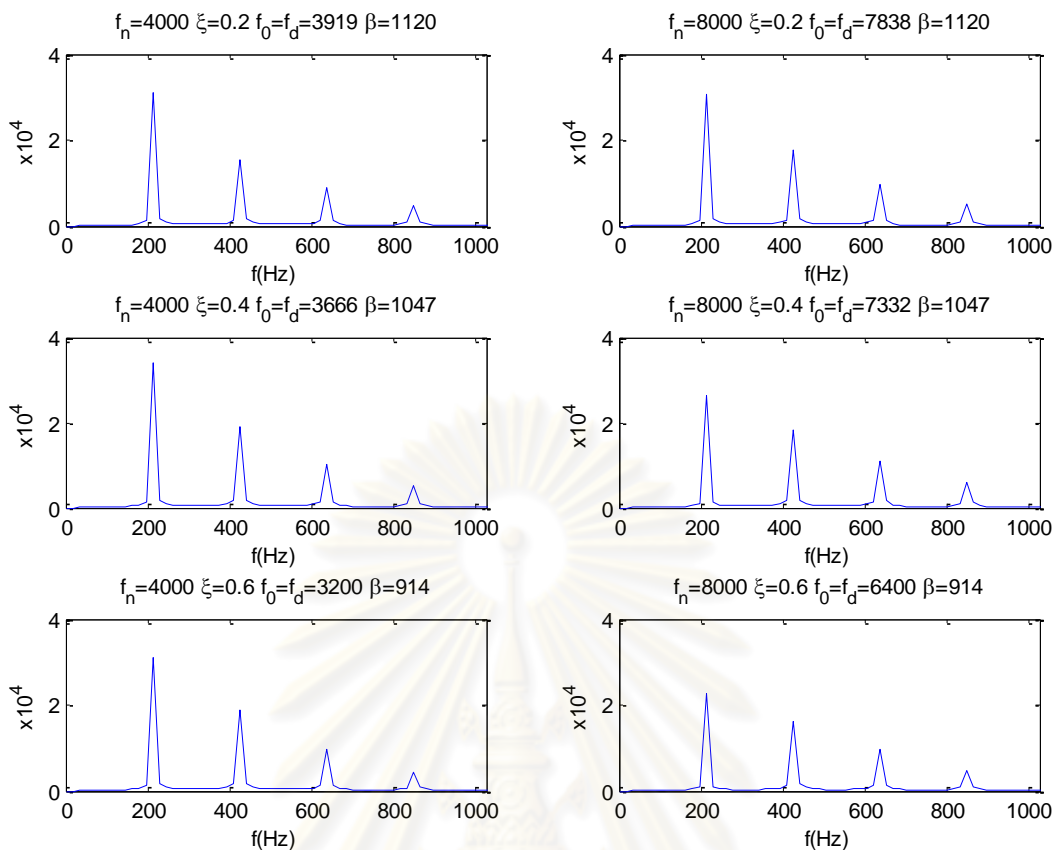


รูปที่ 5-5 เอ็นวีลอปของสัญญาณในรูปที่ 5-4

จะเห็นว่าสัญญาณในรูปที่ 5-5 มีลักษณะเป็นซองหรือกรอบที่ปิดล้อมในด้านที่มีค่าเป็นบวกของสัญญาณในรูปที่ 5-4 ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของสัญญาณไซน์และโคไซน์ถูกนำมาแยกกำลังสองแล้วบวกกันทำให้มีขนาดเป็น 1 และจะไม่ขึ้นกับเฟสของไซน์และโคไซน์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสัญญาณในรูปที่ 5-5 จะไม่ไว (sensitive) ต่อเฟสของสัญญาณ ไซน์หรือโคไซน์ที่มีความถี่สูงที่อยู่ในพัลส์แต่ละลูก

หลังจากที่ได้เอ็นวีลอปดังรูปที่ 5-5 แล้ว ต่อไปจึงหาความถี่ที่สอดคล้องกับตำแหน่งที่เกิดความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยการนำสัญญาณในรูปที่ 5-5 มาหาฟูริเยร์สเปกตรัมอีกครั้ง จะได้สัญญาณดังรูปที่ 5-6 ซึ่งเรียกว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัม (envelope spectrum)

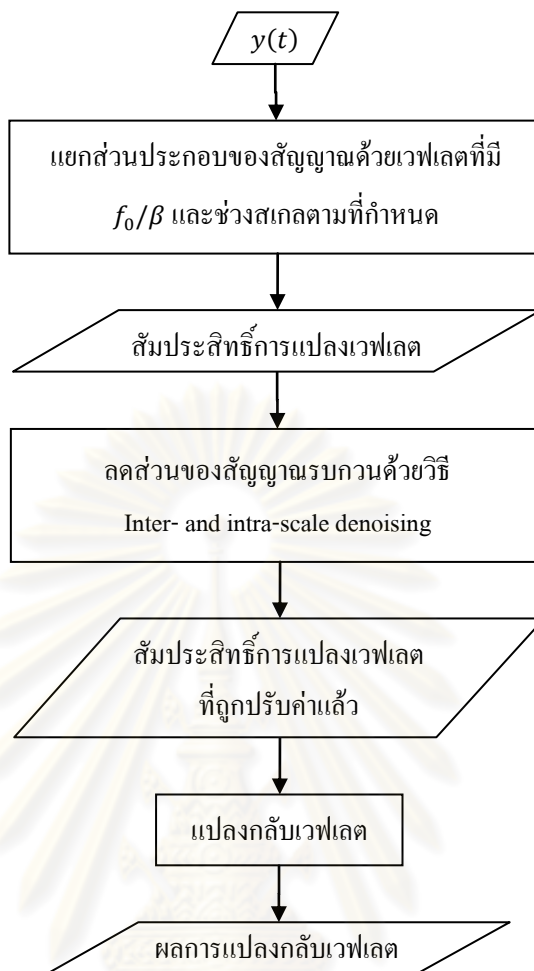




รูปที่ 5-6 เอ็นวิลอปสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-1

ในรูปที่ 5-6 จะเห็นได้ว่าเอ็นวิลอปสเปกตรัมทั้งหมดสามารถแสดงยอดที่เป็นความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ที่สอดคล้องกับความเสียหายที่สมมติ (212Hz) และฮาร์มอนิกของความถี่ดังกล่าวได้ และจะพบว่าเอ็นวิลอปสเปกตรัมในกรณีที่ผลคูณของความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วง ( $\xi f_n$ ) มีค่ามาก อัตราการลดลงของขนาดของฮาร์มอนิกตัวต่าง ๆ เมื่อเทียบกับยอดที่เป็นความถี่พื้นฐานจะมีอัตราการลดที่ช้าลง ทั้งนี้เนื่องจากสำหรับสัญญาณที่มีขนาดค่า RMS เป็น 1 เท่ากัน สัญญาณที่ผลคูณของ  $f_n$  และ  $\xi$  มีค่ามากจะมีฟูรีเยร์สเปกตรัมที่แผ่กว้างมากกว่า ทำให้อัตราการลดลงของแถบความถี่ข้างเมื่อเทียบกับความถี่กึ่งกลางมีน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5-2 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเนื่องจากการแผ่กว้างในโดเมนความถี่มากกว่า ทำให้ขนาดของแต่ละยอดในเอ็นวิลอปสเปกตรัมมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของสัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  น้อย ส่งผลให้ขนาดของยอดความถี่พื้นฐานและฮาร์มอนิกมีขนาดที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการนอร์มัลไลซ์ขนาดของสัญญาณให้มีค่า RMS เป็น 1 นั่นเอง

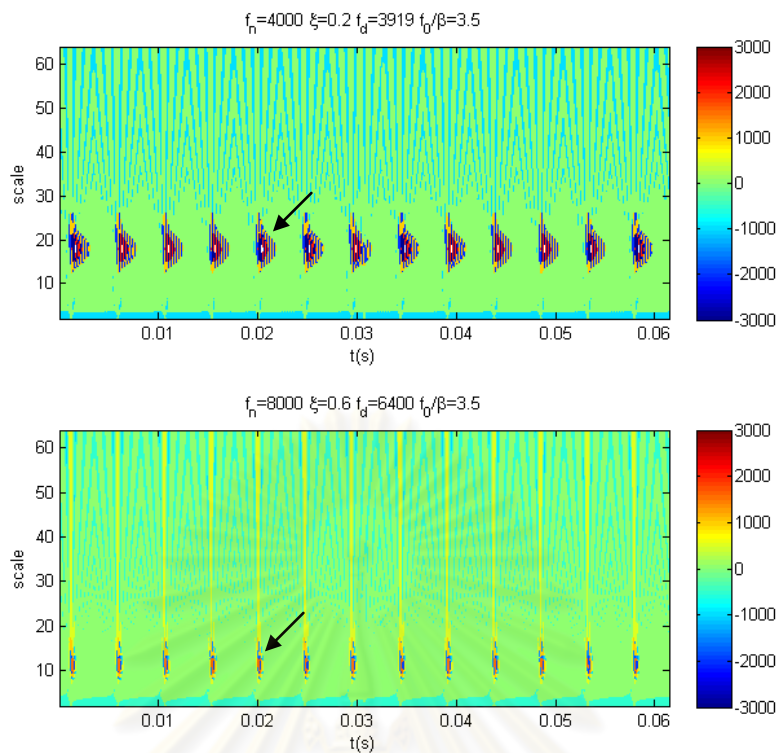
ต่อมาจะพิจารณาถึงผลกระทบของค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5-7



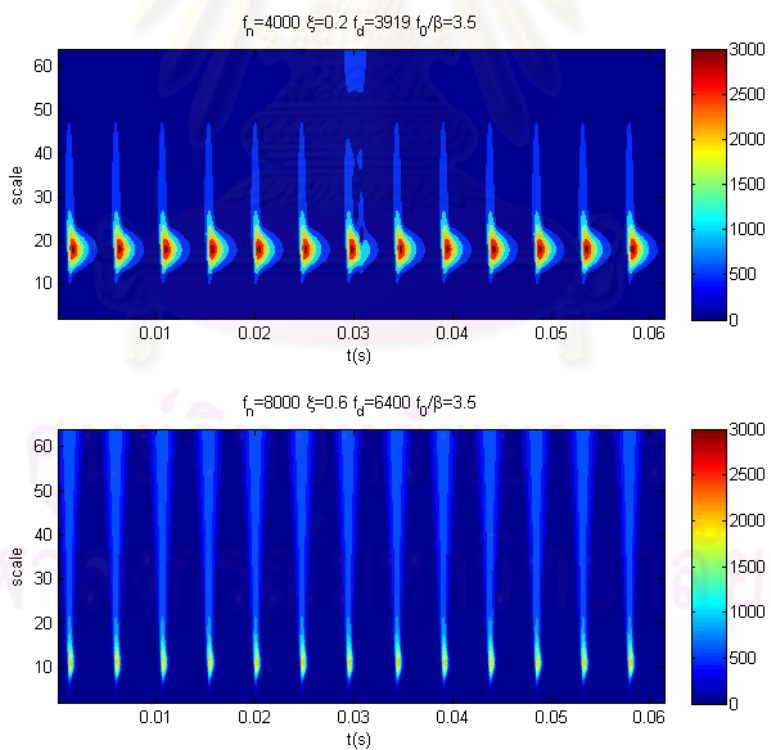
รูปที่ 5-7 ขั้นตอนการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต

โดยในที่นี้จะเลือกสัญญาณ  $f_n = 4000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.2$  และ  $f_n = 8000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.6$  ในรูปที่ 5-1 เป็นตัวอย่างในการอธิบาย โดยนำสัญญาณดังกล่าวมาแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต โดยใช้เวฟเลตที่มีค่า  $\beta = f_0/3.5$  ทำการแปลงเวฟเลตตั้งแต่สเกล  $a=2$  (33 kHz) ถึง 64 (1.04 kHz) โดยปรับสเกลทีละ 0.5 จะได้พล็อตของสั้มประสิทธิ (ส่วนจริง) และมอดุลัสหรือขนาดของสั้มประสิทธิ ดังรูปที่ 5-8 และ 5-9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



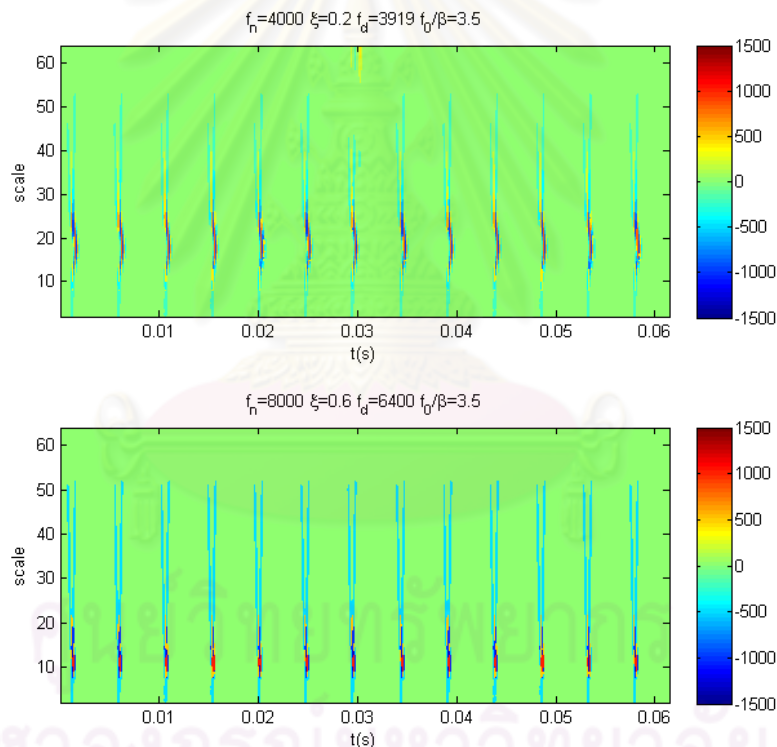
รูปที่ 5-8 พล็อตของสัมประสิทธิ์การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต (ส่วนจริง)



รูปที่ 5-9 พล็อตของมอดุลัสของสัมประสิทธิ์การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต

จากรูปที่ 5-8 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตจะมีขนาดใหญ่ในสเกลช่วงหนึ่งเท่านั้น โดยจะพบว่าสเกลดังกล่าวสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติแบบมีการหน่วง ( $f_d$ ) เช่น ในกรณีที่สัญญาณมี  $f_d = 3919\text{Hz}$  ก็จะพบว่าในช่วงสเกล 16-18 ( $66.7\text{ kHz}/3919\text{Hz} = 17$ ) สัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีขนาดใหญ่ โดยจะยังเห็นได้ชัดเจนในพล็อตของมอดูลัสในรูปที่ 5-9 ซึ่งแสดงถึงขนาดของสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 5-8 นอกจากนี้ยังเห็นถึงผลของอัตราการสุ่มเข้าของสัญญาณในโดเมนเวลา โดยจะเห็นได้ว่าถ้าสัญญาณสุ่มเข้าสู่ศูนย์ช้า สัมประสิทธิ์และมอดูลัสจะมีค่าที่ไม่เป็นศูนย์อยู่ในระยะเวลาที่ยาว นอกจากนั้นจะเห็นว่า สัญญาณที่มีอัตราการสุ่มเข้าเร็วจะให้สัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่า ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านการกรองก็คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่สเกลเพียงสเกลเดียวนั่นเอง

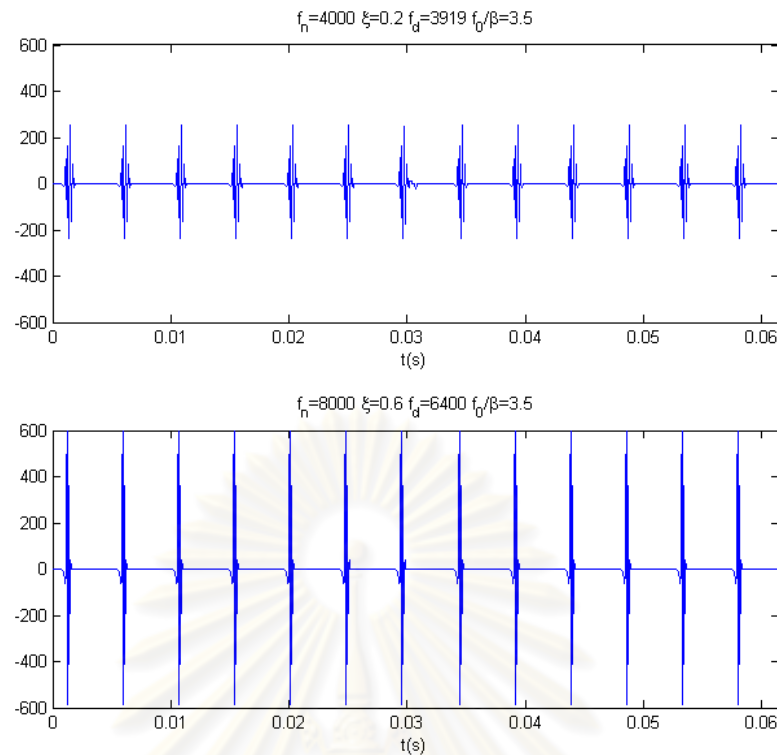
หลังจากนั้นนำสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในรูปที่ 5-8 ไปผ่านกระบวนการ Inter- and intra-scale denoising โดยใช้สมการ (3-47 - 3-49) จะได้สัมประสิทธิ์ที่ถูกปรับค่าแล้วดังรูปที่ 5-10



รูปที่ 5-10 พล็อตของสัมประสิทธิ์การแปลงสัญญาณด้วยเวฟเลต (ส่วนจริง) ที่ถูกปรับค่าแล้ว

จากรูปที่ 5-8 จะพบว่าลักษณะที่เป็นลอนคลื่นในรูปที่ 5-6 หายไป และสัมประสิทธิ์ที่ถูกปรับค่าแล้วของสัญญาณที่มีอัตราการสุ่มเข้าสู่ศูนย์เร็วใน โดเมนเวลาจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าทั้งที่มีขนาดเล็กกว่าในรูปที่ 3-56 ทั้งนี้เนื่องจากผลของสมการ (3-49) นั่นเอง จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ที่ได้ในรูปที่ 5-10 แปลงกลับเวฟเลตด้วยสมการ (3-46) จะได้สัญญาณที่ถูกแปลงกลับดังรูปที่ 5-11

$$x(t) = x(b) = c' \int T(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a^{3/2}} \quad (3-46)$$



รูปที่ 5-11 สัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับสัมประสิทธิ์ที่ถูกปรับค่าแล้วในรูปที่ 5-10

ในรูปที่ 5-11 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ถูกแปลงกลับของสัญญาณที่เข้าสู่ศูนย์เร็วจะมีความคมชัดมากกว่าสัญญาณที่มีอัตราการสุ่มเข้าช้า ตามลักษณะของสัญญาณเริ่มต้นในรูปที่ 5-1

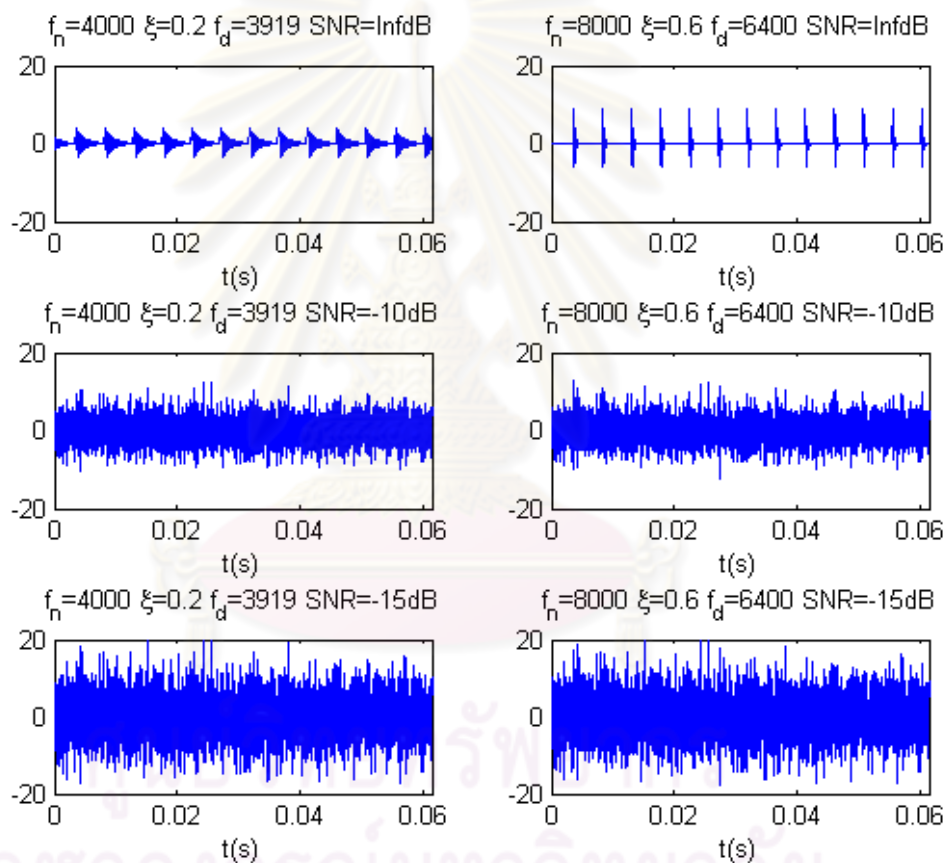
จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปถึงผลกระทบของความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายวิธีต่าง ๆ ดังนี้

- ในกรณีการแปลงฟูริเยร์ สัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  มากกว่าจะมีรูปทรงการแผ่ตัวของช่องที่ปิดล้อมยอดสเปกตรัมที่กว้างกว่าหรือมีอัตราการลดลงในโดเมนความถี่ที่ช้ากว่า แต่เนื่องจากปรับค่าสัญญาณให้มีค่า RMS เท่ากัน ทำให้ความสูงของสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $\xi f_n$  มากกว่ามีค่าน้อยกว่า
- กรณีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต ผลที่ได้มีความสัมพันธ์กับผลที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์ กล่าวคือ ในกรณีที่ใช้ตัวกรองที่มีความกว้างของแถบความถี่ผ่านเท่ากัน โดยกำหนดให้ความถี่กึ่งกลางของตัวกรองเวฟเลตอยู่ที่  $f_d$  จะพบว่าสัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  มากกว่าจะมีอัตราการลดลงของความถี่ฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมเมื่อเทียบกับความถี่พื้นฐานที่ช้ากว่า เนื่องจากฟูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  มากกว่าจะมีรูปทรงการแผ่ตัวของช่องที่ปิดล้อมยอดสเปกตรัมที่กว้างกว่าหรือมีอัตราการลดลงที่ช้ากว่านั่นเอง แต่ว่ายอดต่าง ๆ ในเอ็นวีลอปสเปกตรัมก็จะมีขนาดที่เล็กลง เนื่องจากการปรับให้ค่า RMS ของสัญญาณเท่ากัน ทำให้ความสูงของสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $\xi f_n$  มากกว่าจะมีค่าน้อยกว่า

- ในกรณีของการแยกส่วนประกอบของสัญญาณด้วยเวฟเลต สัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  มากกว่าจะทำให้สัญญาณที่ถูกแปลงกลับที่มีความคมชัดมากกว่า ทำให้สามารถหาคาบของสัญญาณได้ชัดเจนมากกว่า

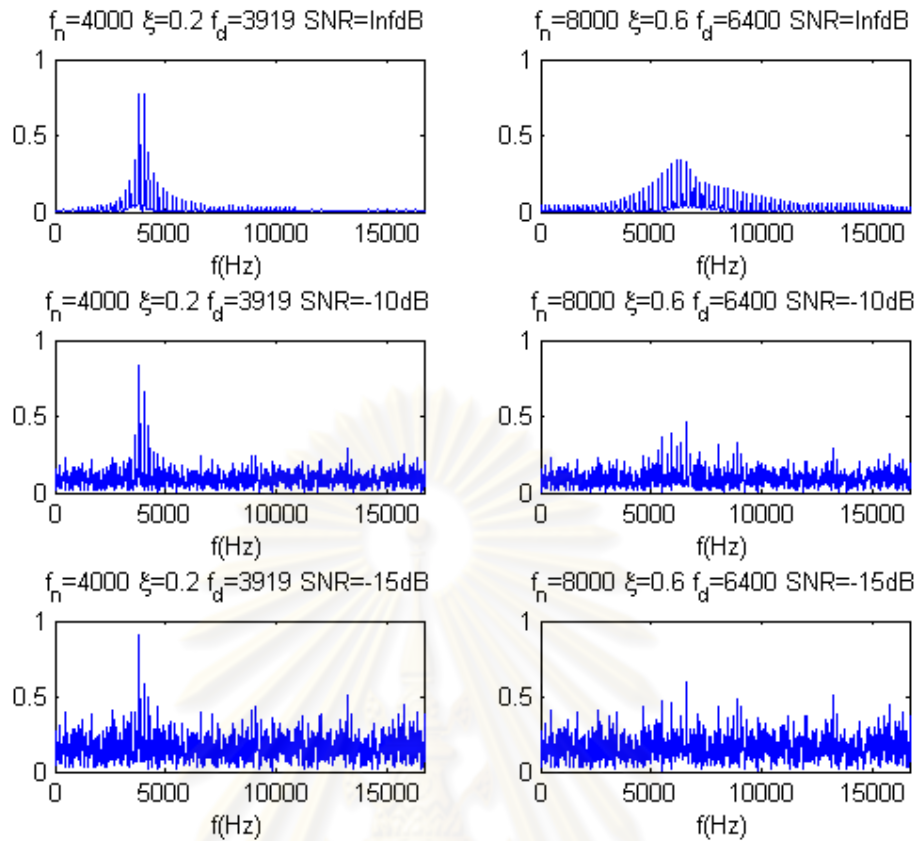
### 5-1-2 ผลของสัญญาณรบกวน

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยจะใช้สัญญาณ  $f_n = 4000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.2$  และ  $f_n = 8000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.6$  ในรูปที่ 5-1 เป็นตัวอย่างในการอธิบาย โดยจะนำสัญญาณรบกวนแบบสุ่มมารวมกับสัญญาณดังกล่าวให้มี SNR = -10 และ -15dB จะได้สัญญาณดังรูปที่ 5-12



รูปที่ 5-12 สัญญาณที่ใช้ในการศึกษาที่ระดับของสัญญาณรบกวนต่าง ๆ

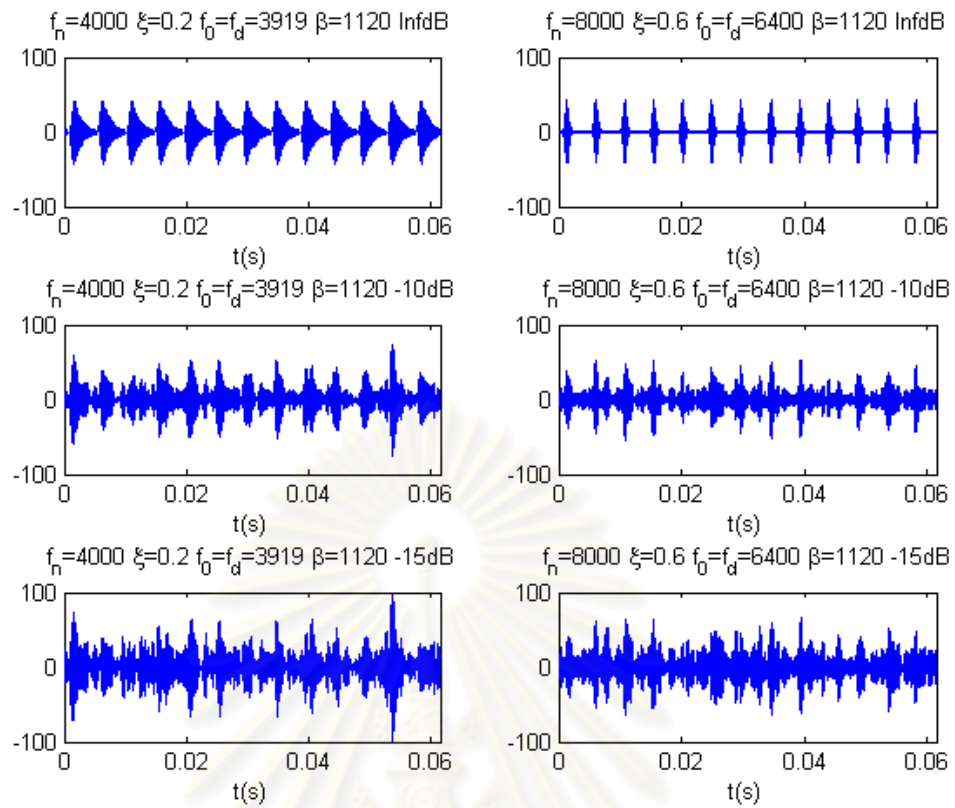
จะเห็นได้ว่าไม่สามารถมองเห็นคาบของคาบเสียหายในโดเมนเวลาได้ทั้งในกรณี SNR = -10 และ -15 dB จากนั้นนำสัญญาณในรูปที่ 5-12 ไปแปลงฟูริเยร์ จะได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 5-13



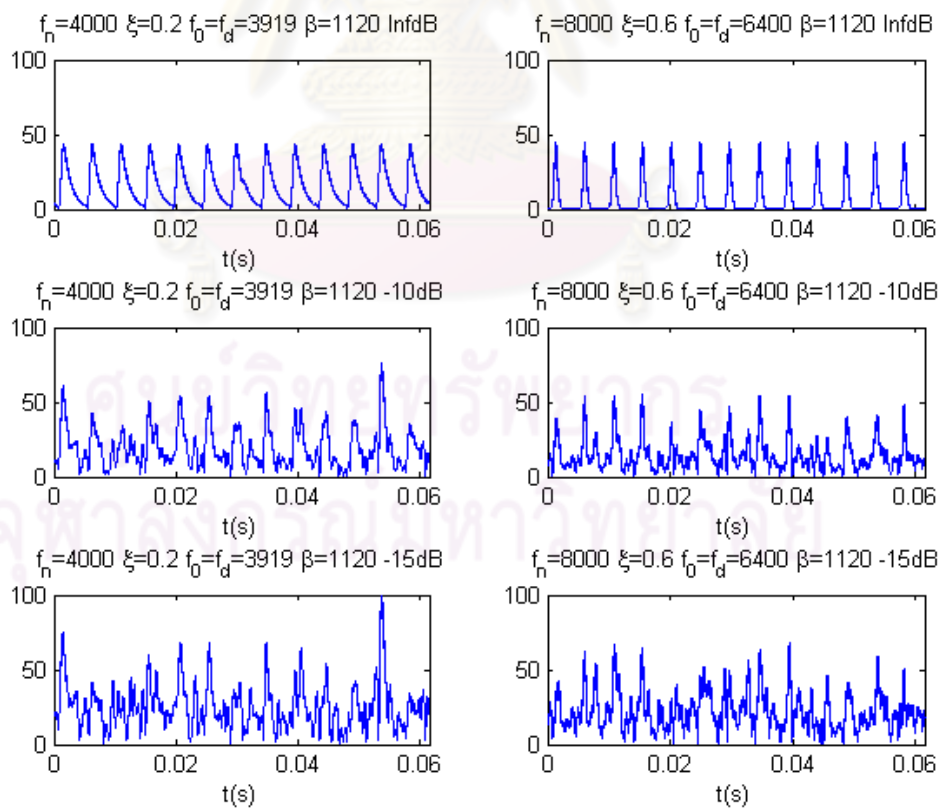
รูปที่ 5-13 พูริเยอร์สเปกตรัมของรูปที่ 5-12

เมื่อพิจารณารูปที่ 5-13 ประกอบกับรูปที่ 5-2 จะพบว่ารูปที่ 5-13 คือรูปที่ 5-2 ที่ถูกซ้อนทับด้วยส่วนของสเปกตรัมสัญญาณรบกวน โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  ต่ำกว่าจะมียอดสเปกตรัมของตัวสัญญาณความเสียหายจริงยกตัวขึ้นมาจากส่วนของสัญญาณรบกวนที่เป็นพื้น (noise floor) ได้ชัดเจนกว่า แต่จะตรวจพบแถบความถี่ข้าง (sideband) ได้ในจำนวนน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของสัญญาณส่วนที่เป็นความเสียหายในโดเมนความถี่ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมากขึ้น การตรวจจับแถบความถี่ข้างก็ทำได้ยากขึ้นไม่ว่าสัญญาณความเสียหายจริงจะมีลักษณะใดก็ตาม

ถ้านำสัญญาณในรูปที่ 5-12 ไปผ่านขั้นตอนการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย โดยใช้พารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลต  $f_0 = f_d$  และ  $\beta = 1120$  จะได้สัญญาณที่ผ่านการกรอง, เอ็นวีลอป และเอ็นวีลอปสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 5-14 - 5-16 ตามลำดับ

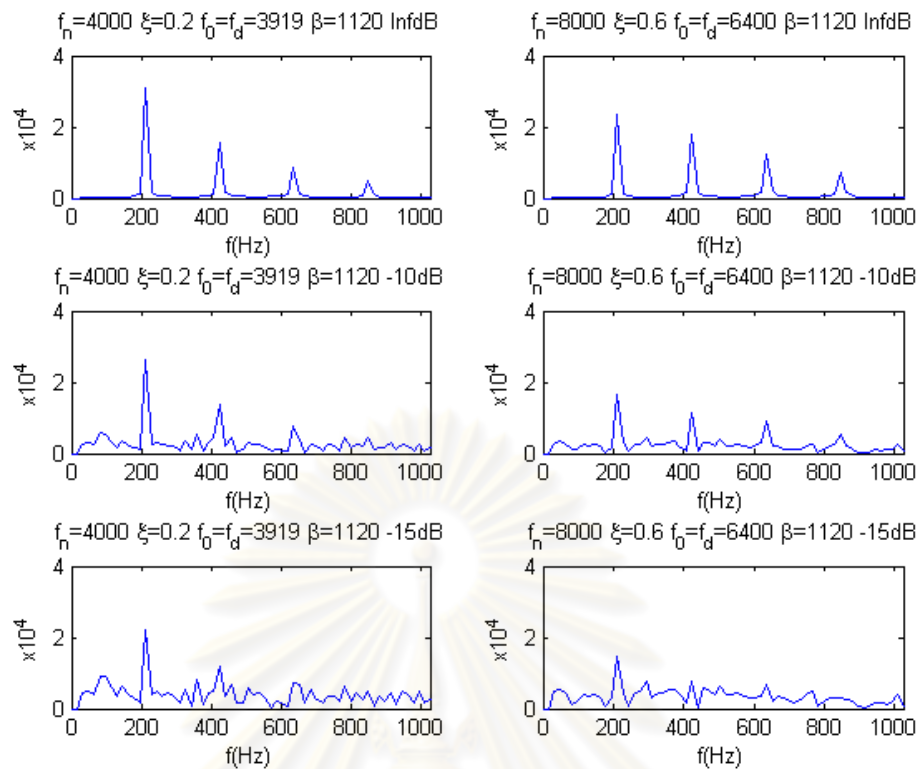


รูปที่ 5-14 สัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตของสัญญาณในรูปที่ 5-12



รูปที่ 5-15 เอ็นวิลอปของสัญญาณในรูปที่ 5-14

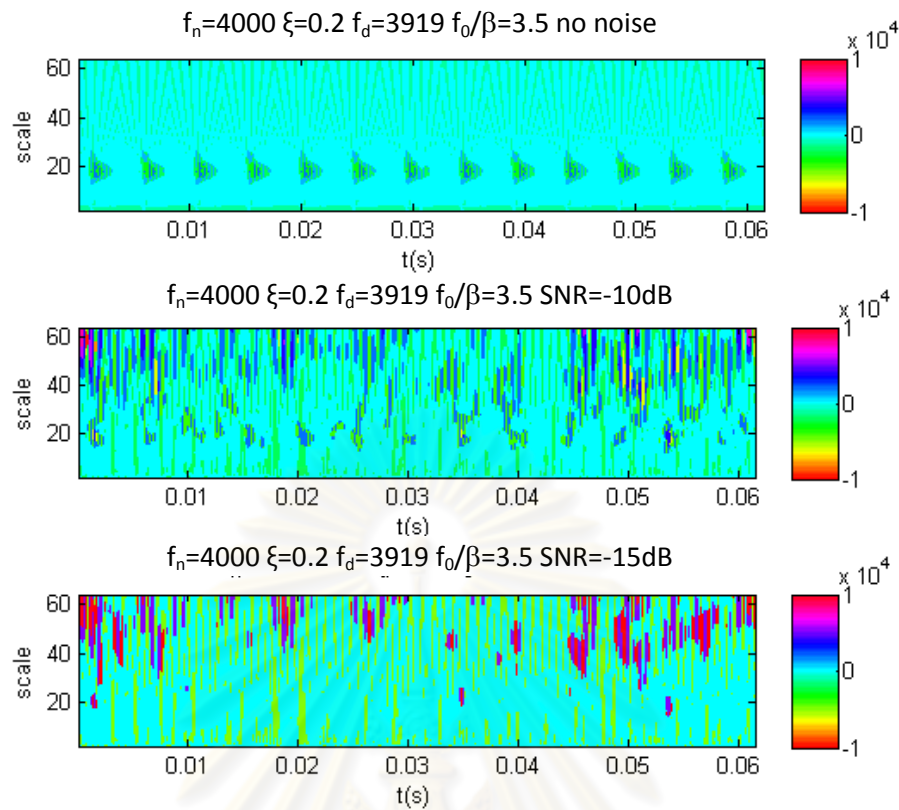




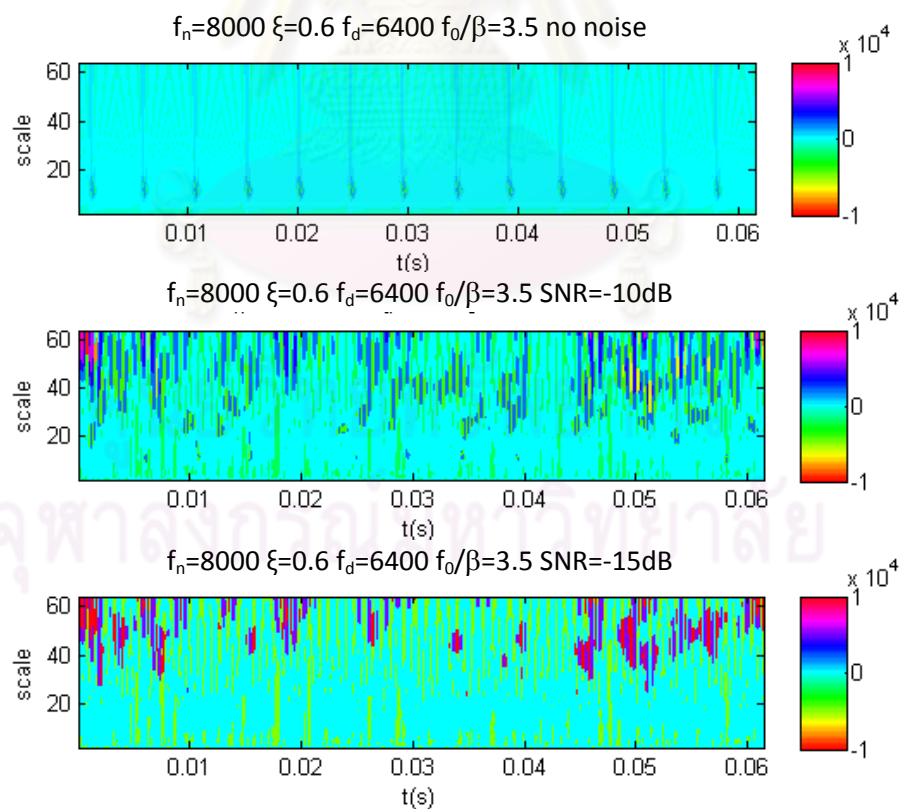
รูปที่ 5-16 เอ็นวิลอปสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-14

ในรูปที่ 5-14 จะเห็นได้ว่าเมื่อส่วนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น สัญญาณที่ผ่านการกรองจะมีลักษณะของความเป็นคาบที่สอดคล้องกับสัญญาณความเสียหายน้อยลง ทั้งนี้เพราะระดับของพื้นสัญญาณรบกวนในรูปที่ 5-13 สูงขึ้นนั่นเอง ในรูปที่ 5-16 ซึ่งเป็นเอ็นวิลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่ผ่านการกรองในรูปที่ 5-14 จะพบว่าขนาดของยอดในเอ็นวิลอปสเปกตรัมจะมีค่าลดลง และจะมีส่วนของพื้นสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณรบกวนสูงขึ้น โดยจะเห็นว่ายอดที่เป็นฮาร์มอนิกสูง ๆ จะเริ่มหายไปก่อนเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่ายอดที่เป็นฮาร์มอนิกสูงก็คือแถบความถี่ข้างตัวที่อยู่ไกลออกไปจากความถี่กึ่งกลาง สอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นในเอ็นวิลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่ SNR=-10dB ที่พบว่าสัญญาณที่มี  $\xi f_n$  สูงกว่าจะเห็นยอดที่เป็นฮาร์มอนิกสูง ๆ ได้ชัดเจนกว่า ทั้งนี้เนื่องจากถ้าพิจารณาฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณดังกล่าวในรูปที่ 5-13 จะพบแถบความถี่ข้างมากกว่าสัญญาณที่มี  $\xi f_n$  ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม แม้ว่า SNR จะสูงถึง -15dB แต่เอ็นวิลอปสเปกตรัมก็ยังสามารถตรวจจับยอดที่เป็นความถี่พื้นฐานซึ่งสอดคล้องกับความถี่ที่เกิดจากความเสียหายของตั้บลูกปืนได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-16

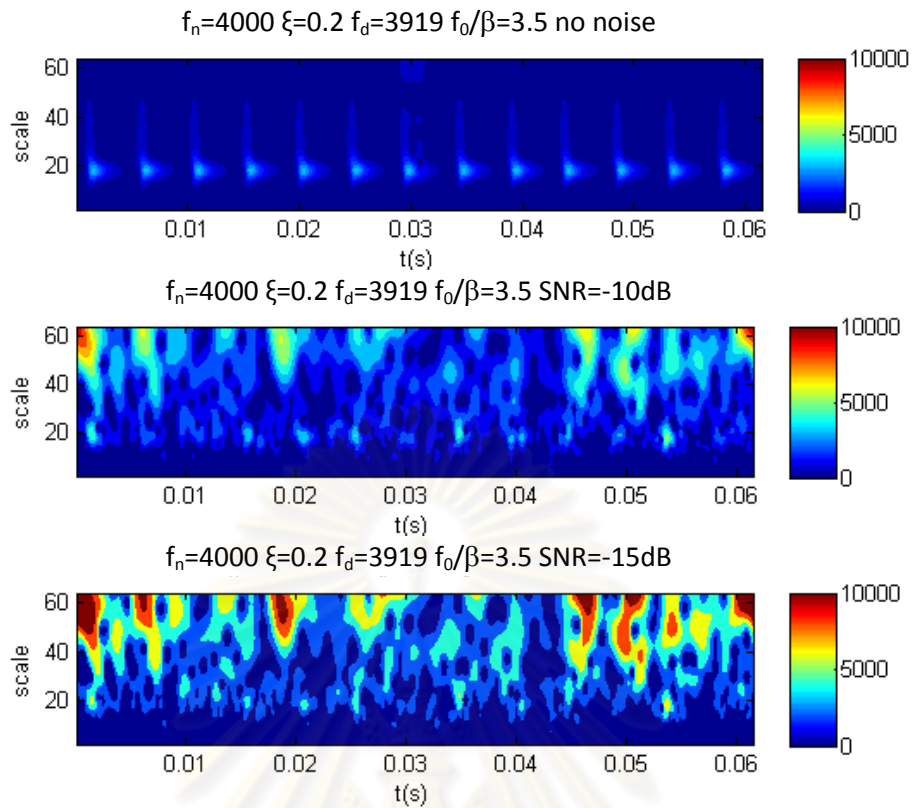
ต่อไปจะพิจารณาถึงผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายด้วยการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต โดยนำสัญญาณในรูปที่ 5-12 มาแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต ปรับค่าสัมประสิทธิ์ แล้วแปลงกลับ เช่นเดียวกับที่ทำในรูป 5-8 - 5-11 จะได้สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตมอดูลัส สัมประสิทธิ์ที่ถูกปรับค่าแล้ว และสัญญาณที่ถูกแปลงกลับ ดังแสดงในรูปที่ 5-17 - 5-20 ตามลำดับ



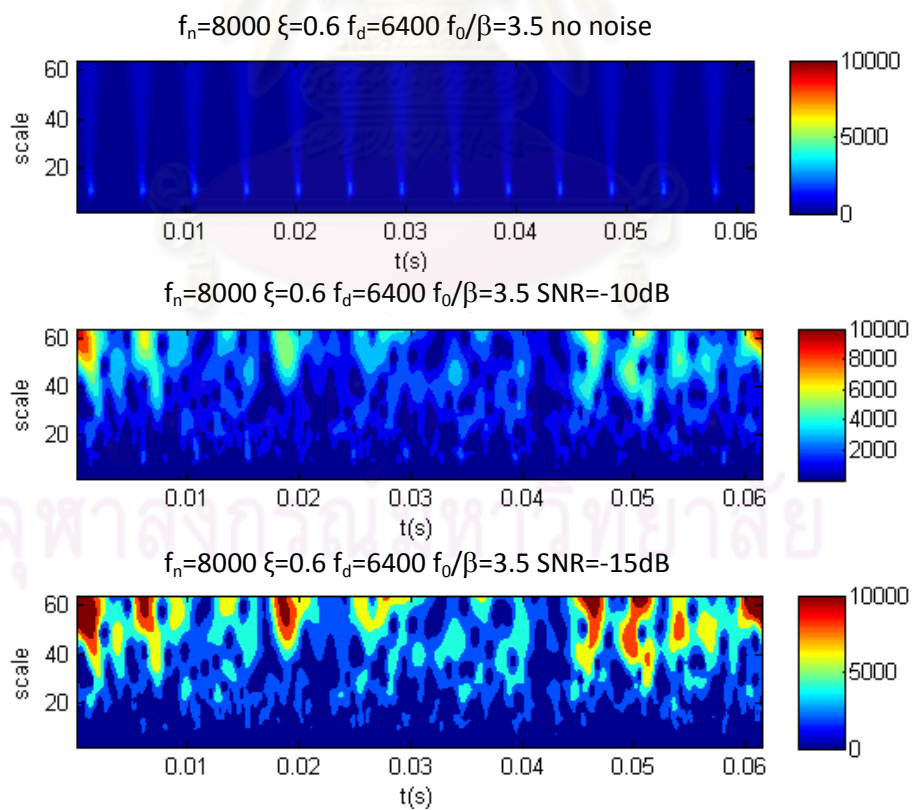
รูปที่ 5-17 (ก) สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตของสัญญาณ  $f_n = 4000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.2$  ที่ค่า SNR ต่าง ๆ



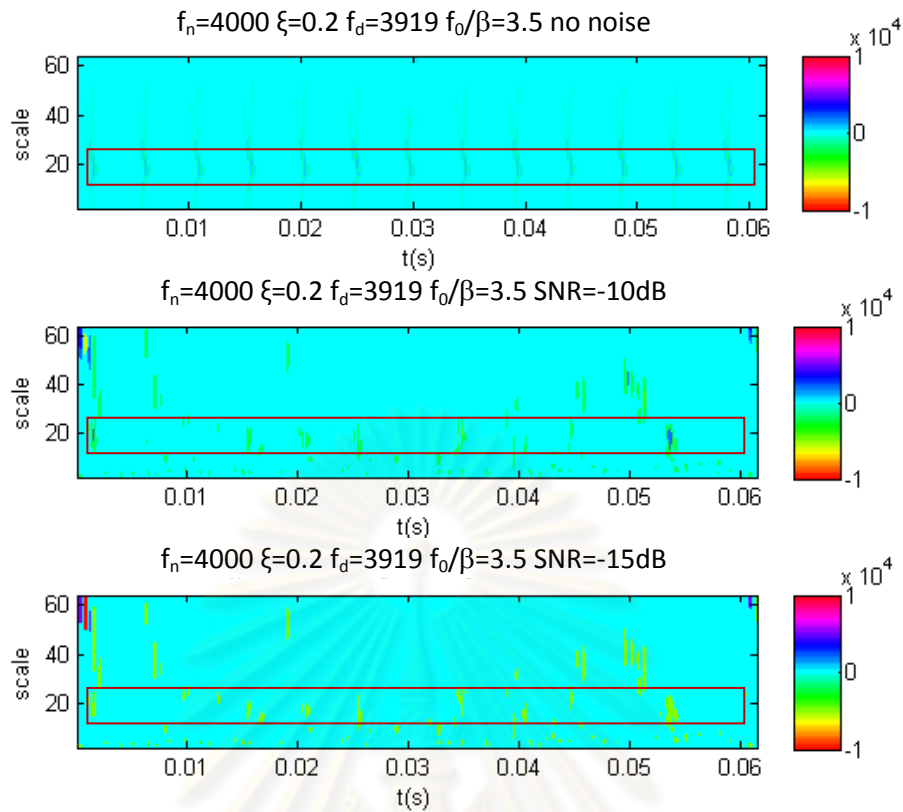
รูปที่ 5-17 (ข) สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตของสัญญาณ  $f_n = 8000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.6$  ที่ค่า SNR ต่าง ๆ



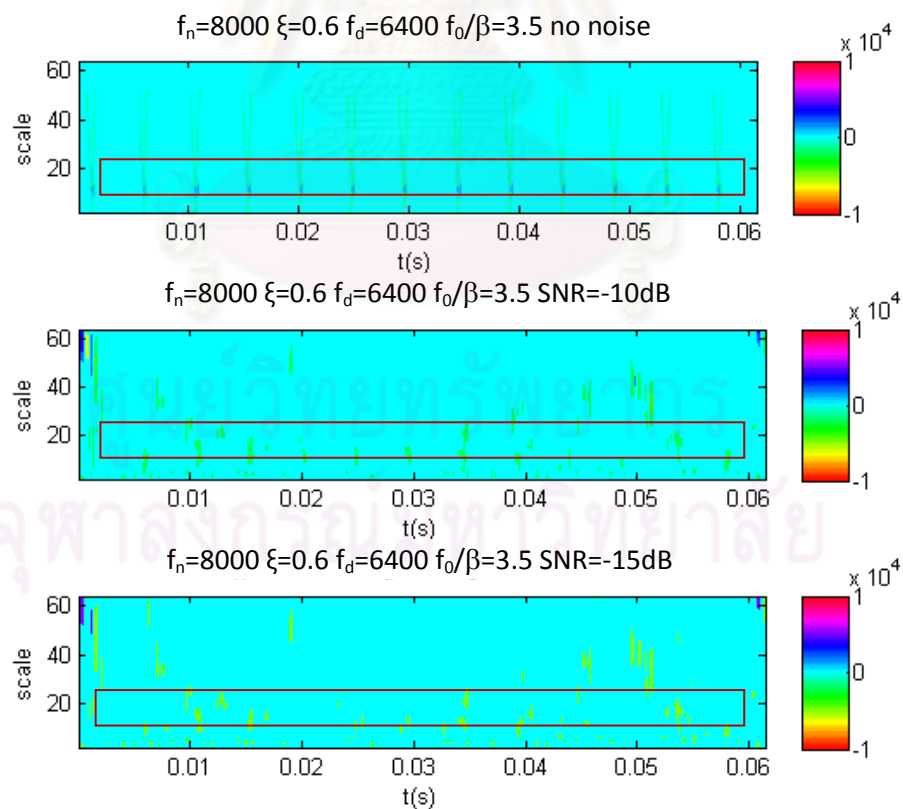
รูปที่ 5-18 (ก) มอดุลัสของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในรูปที่ 5-17 (ก)



รูปที่ 5-18 (ข) มอดุลัสของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในรูปที่ 5-17 (ข)

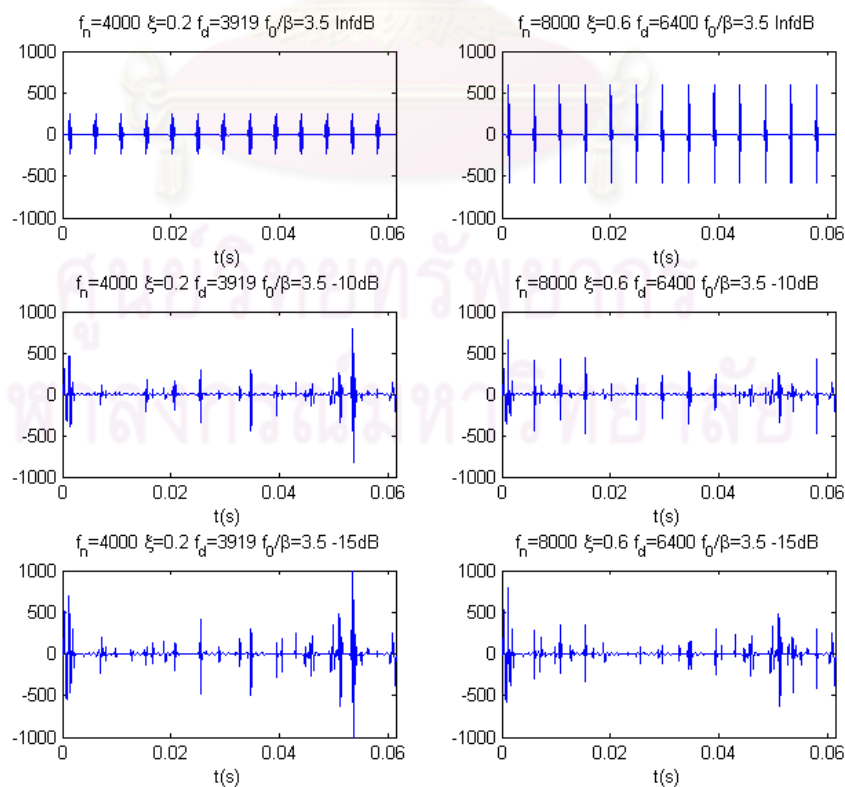


รูปที่ 5-19 (ก) ผลที่ได้จากการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในรูปที่ 5-17 (ก)



รูปที่ 5-19 (ข) ผลที่ได้จากการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตในรูปที่ 5-17 (ข)

จากรูปที่ 5-17 และ 5-18 จะพบว่าสัญญาณรบกวนแบบสุ่มทำให้เกิดสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตกระจายตัวอย่างสุ่มไปทุก ๆ สเกล โดยสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น สัญญาณรบกวนดังกล่าวทำให้ลักษณะความเป็นคาบของสัญญาณความเสียหาย (รูปย่อยบนสุดของแต่ละรูป) ถูกตรวจพบได้ยากขึ้น เมื่อนำสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 5-17 มาปรับค่าใหม่ดังรูปที่ 5-19 จะพบว่าเมื่อมีสัญญาณความเสียหาย สัมประสิทธิ์ที่มีความเป็นคาบที่สอดคล้องกับความเสียหาย (อยู่ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงของทุก ๆ รูปย่อย) จะหายไปจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะกรณีที่สัญญาณมีค่า  $\xi f_n$  น้อย เพราะว่าพลังงานของสัญญาณดังกล่าวมีการกระจายตัวในช่วงเวลาที่กว้างกว่า ดังแสดงในแถบบนสุดของรูปที่ 5-17 และ 5-18 โดยสังเกตได้จากช่วงเวลาที่สัมประสิทธิ์ไม่เป็นศูนย์ของสัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  น้อยจะนานกว่า ทำให้เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามารวมอยู่ด้วยจะทำให้ความแตกต่างของขนาดระหว่างจุดในโดเมนเวลา-สเกลที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายกับจุดที่อยู่รอบ ๆ ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับความเสียหายที่ไม่ชัดเจนเท่ากับสัญญาณที่มี  $\xi f_n$  มากกว่า ทำให้สัมประสิทธิ์ที่มาจากความเสียหายไม่ผ่านเกณฑ์ (threshold) ของสมการ (3-49) และยังพบอีกว่าสัมประสิทธิ์ที่ปรับค่าแล้วบางส่วนไม่ได้เกี่ยวข้องกับสัญญาณความเสียหาย (สัมประสิทธิ์ที่อยู่นอกกรอบสีแดง) เนื่องจากสัญญาณรบกวนในช่วงเวลาและสเกลดังกล่าวมีขนาดใหญ่ทำให้ผ่านเกณฑ์การปรับค่ามา (พิจารณาบริเวณดังกล่าวประกอบกับบริเวณเดียวกันในรูปที่ 5-17 และ 5-18) จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ที่ได้ในรูปที่ 5-19 มาแปลงกลับเวฟเลตจะได้สัญญาณดังรูปที่ 5-20



รูปที่ 5-20 สัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับเวฟเลตของสัญญาณในรูปที่ 5-19

ในรูปที่ 5-20 จะเห็นว่ายิ่งระดับของสัญญาณรบกวนสูงขึ้น ลักษณะคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายของตลับลูกปืนที่ต่อเนื่องกันจะถูกตรวจพบในจำนวนที่น้อยลง และจะปรากฏลักษณะของเส้นขีดตั้งในสัญญาณที่ไม่มีเกี่ยวข้องกับความเสียหายมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่สัญญาณมีค่า  $\xi f_n$  น้อย โดยจะเห็นได้ด้วยการเปรียบเทียบกับลักษณะของสัญญาณที่ได้ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน (รูปในแถบบนสุด) ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวมีค่าของสัญญาณที่ได้จากการแยกส่วนประกอบในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนน้อยกว่า ทำให้เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามารวมอยู่ด้วยแล้ว โอกาสที่สัญญาณความเสียหายจะถูกกลบด้วยสัญญาณรบกวน หรือ สัญญาณรบกวนจะกลายมาเป็นเส้นขีดตั้งจึงมีมากกว่ากรณีที่สัญญาณมีค่า  $\xi f_n$  มาก ดังที่ได้อธิบายสิ่งในสิ่งที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5-19

จากการศึกษาผลกระทบของทั้งลักษณะของสัญญาณความเสียหายและระดับของสัญญาณรบกวนที่มีต่อการตรวจจับ จะได้ข้อสรุปดังนี้

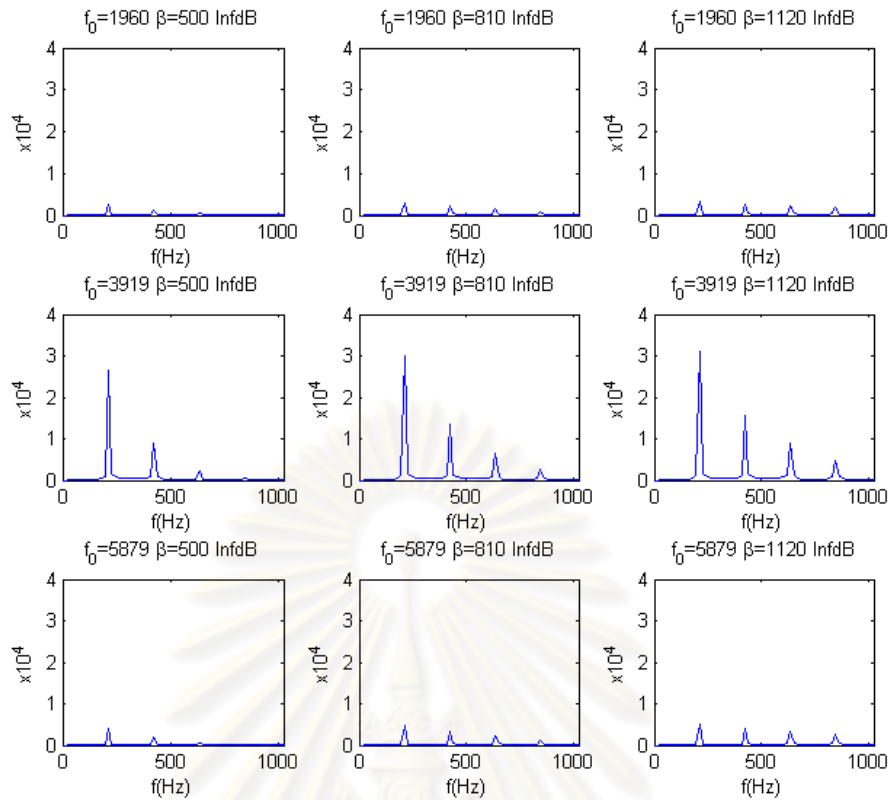
- ความสามารถในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนของวิธีการทั้ง 3 วิธี ขึ้นอยู่กับทั้งกับลักษณะของสัญญาณความเสียหายและระดับของสัญญาณรบกวนประกอบกัน
- ในกรณีของการตรวจจับด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัม สัญญาณความเสียหายที่มีค่า  $\xi f_n$  มากจะมีโอกาสที่จะถูกสัญญาณรบกวนกลบมากกว่า (เมื่อสัญญาณความเสียหายมีค่า RMS เท่ากัน) แต่ถ้าวัดระดับของสัญญาณรบกวนไม่มากนัก สัญญาณดังกล่าวจะให้เส้นแถบความถี่ข้างที่ตรวจพบเจอในจำนวนที่มากกว่า ซึ่งระยะแถบความถี่ข้างดังกล่าวสะท้อนถึงการมีอยู่และตำแหน่งของความเสียหายบนตลับลูกปืน เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวมีการกระจายตัวที่กว้างกว่าในโดเมนความถี่ นอกจากนี้จะพบว่าสัญญาณรบกวนจะให้ลักษณะที่เป็นพื้นสัญญาณ (noise floor) ในโดเมนความถี่ โดยความสูงของพื้นนี้จะขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณรบกวน ถ้าสัญญาณความเสียหายไม่สามารถยกตัวให้เหนือขึ้นมาจากพื้นสัญญาณส่วนนี้ ก็ไม่สามารถที่จะตรวจจับสัญญาณความเสียหายได้ สำหรับวิธีการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัม ถ้าตรวจพบลักษณะของแถบความถี่ข้างที่ยกตัวขึ้นมาจากพื้นของสัญญาณรบกวนที่ชัดเจน และมีเส้นแถบข้างจำนวนมาก อีกทั้งถ้าระยะห่างระหว่างเส้นแถบข้างดังกล่าวสอดคล้องกับความถี่ของความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยแล้ว ความมั่นใจในการตรวจจับความเสียหายจะมีสูงขึ้น
- กรณีของการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต สัญญาณรบกวนก็จะก่อให้เกิดลักษณะของพื้นสัญญาณในเอ็นวีลอปสเปกตรัมคล้ายกับที่เกิดในฟูรีเยร์สเปกตรัม โดยจะเห็นได้ว่าพื้นดังกล่าวจะมีลักษณะที่สูงขึ้นในขณะที่ยอดความถี่พื้นฐานของความเสียหายและยอดที่เป็นฮาร์มอนิกจะมีค่าที่ลดลงเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น ยอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมก็จะถูกกลืนลงไปในพื้นที่ของ

สัญญาณรบกวน โดยจะเริ่มถูกกลืนที่ฮาร์โมนิกสูง ๆ ก่อน เนื่องจากฮาร์โมนิกสูง ๆ มีความสอดคล้องกับแถบความถี่ข้างตัวที่อยู่ไกล ๆ ในแถบความถี่ผ่านของตัวกรองเวฟเลต โดยถ้าพิจารณาที่ฟูรีเยร์สเปกตรัมจะพบว่าขนาดของความถี่ดังกล่าวจะลดลงจากความถี่  $f_d$  ในรูปแบบที่ขึ้นกับค่า  $\xi f_n$  ของสัญญาณ ดังนั้นกรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่ามากและสัญญาณความเสียหายมีค่า  $\xi f_n$  มาก จะไม่สามารถตรวจพบยอดที่เป็นฮาร์โมนิกในเอ็นวีลอป-สเปกตรัมได้ โดยสามารถใช้เหตุผลเดียวกันกับสิ่งเกิดขึ้นในฟูรีเยร์สเปกตรัมในการอธิบาย แต่เมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยลง จะพบจำนวนฮาร์โมนิกในเอ็นวีลอป-สเปกตรัมของสัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  มากกว่าได้มากกว่า เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวจะทำให้เส้นแถบความถี่ข้างที่ตรวจพบเจอที่ยกตัวขึ้นมาเหนือพื้นของสัญญาณรบกวนในฟูรีเยร์-สเปกตรัมจำนวนมากกว่า

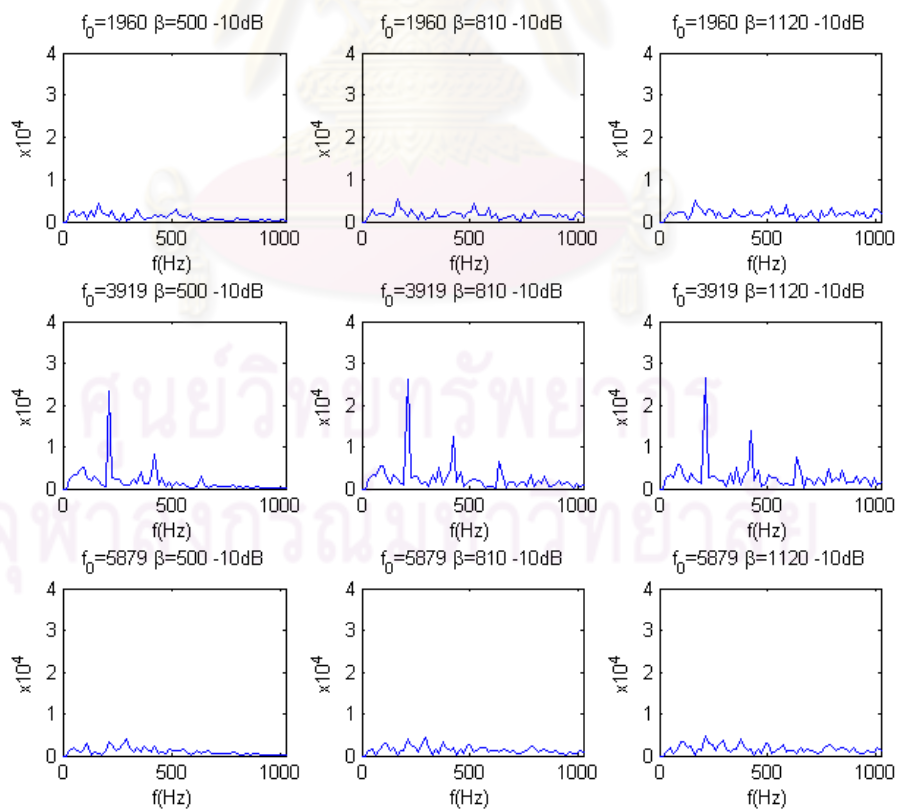
- สำหรับการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต ในกรณีที่สัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  ต่ำ จะตรวจพบคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้น้อยกว่าและมีขีดตั้งที่ไม่เกี่ยวข้องกับคาบของความเสียหายในสัญญาณที่ถูกแปลงกลับมากกว่า เนื่องจากสัญญาณมีอัตราผู้เข้าในโดเมนเวลาต่ำ ทำให้มีสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่มีขนาดไม่เป็นศูนย์จำนวนมากกว่า ดังนั้นเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามารวมอยู่ด้วยจะทำให้มีโอกาสที่สัญญาณความเสียหายจะไม่ผ่านเกณฑ์ในสมการ (3-49) ทำให้ไม่ถูกนำมาแสดง และส่วนของสัญญาณรบกวนที่ถูกบวกกับส่วนที่เป็นหางคลื่นของสัญญาณความเสียหายสูงกว่าเกณฑ์ ทำให้ถูกนำมาแสดงเป็นเส้นขีดตั้งที่ไม่เกี่ยวข้องกับคาบของความเสียหายเมื่อทำการลดส่วนของสัญญาณรบกวน ในขณะที่สัญญาณที่มีค่า  $\xi f_n$  สูงจะมีอัตราผู้เข้าในโดเมนเวลาสูง ทำให้เมื่อแปลงเวฟเลตสามารถแยกแยะระหว่างส่วนของสัญญาณความเสียหายและส่วนของสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า ทำให้ตรวจพบคาบที่ต่อเนื่องกันได้มากกว่า ทั้งนี้ เมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น ก็จะทำให้คาบดังกล่าวถูกตรวจพบได้ยากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดเส้นขีดตั้งที่ไม่เกี่ยวข้องกับคาบความเสียหายมากขึ้น

### 5-1-3 ผลของความถี่กึ่งกลาง ( $f_0$ ) และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ( $\beta$ ) ของตัวกรองเวฟเลต

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของความถี่กึ่งกลาง ( $f_0$ ) และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ( $\beta$ ) ของตัวกรองเวฟเลตที่มีต่อการตรวจจับสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยใช้สัญญาณ  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  ( $f_d=3919\text{Hz}$ ) และ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ( $f_d=6400\text{Hz}$ ) ที่  $\text{SNR}=\infty$ ,  $-10\text{dB}$  และ  $-15\text{dB}$  ดังแสดงในรูปที่ 5-12 มาตรฐานด้วยเวฟเลตที่มี  $f_0 = 0.5f_d$ ,  $f_d$  และ  $1.5f_d$  ตามลำดับ และใช้ค่า  $\beta$  3 ค่า โดยเว้นระยะเท่า ๆ กันตั้งแต่  $500\text{Hz}$  ถึง  $f_d/3.5$  จะได้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ 5-21 - 5-26

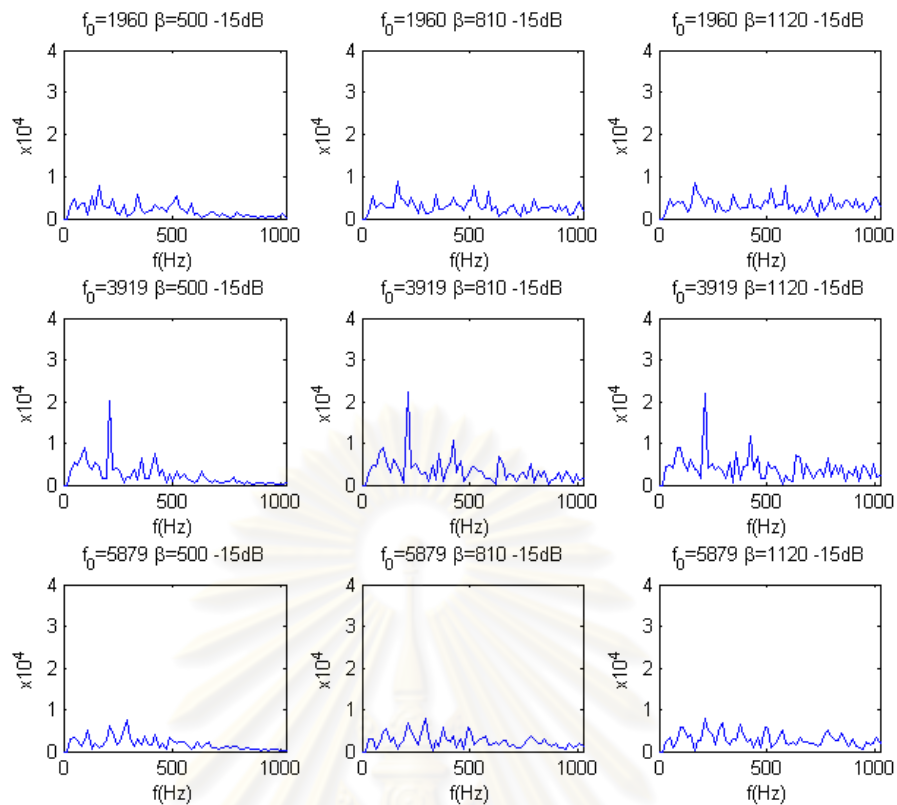


รูปที่ 5-21 เอ็นวิคอปสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\zeta=0.2$  ไม่มีสัญญาณรบกวน

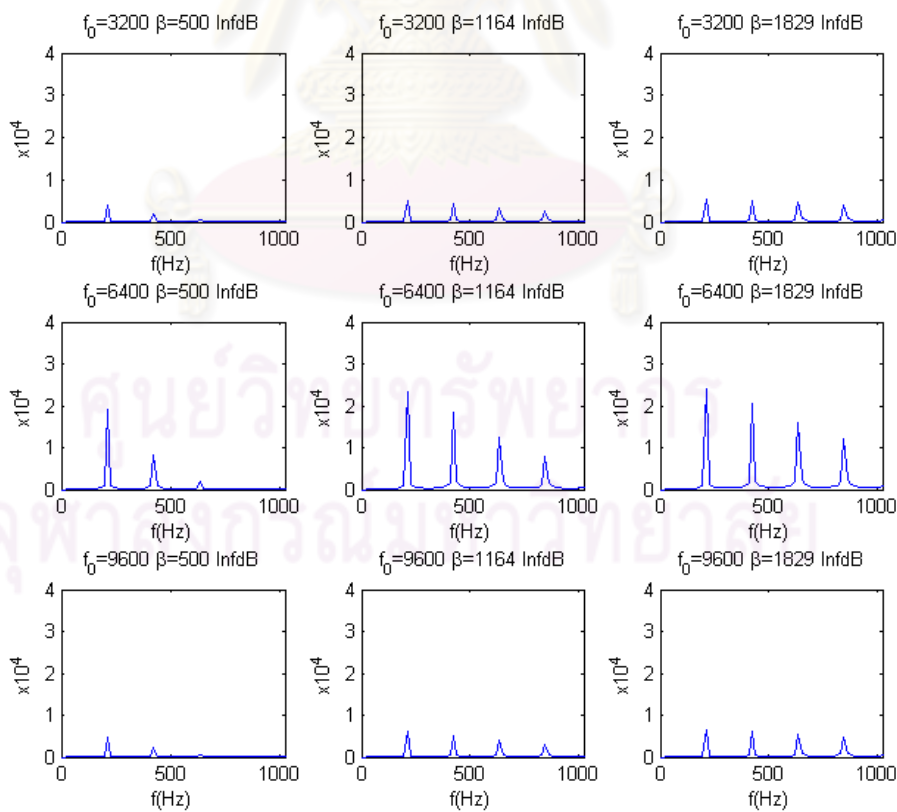


รูปที่ 5-22 เอ็นวิคอปสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\zeta=0.2$  SNR=-10dB

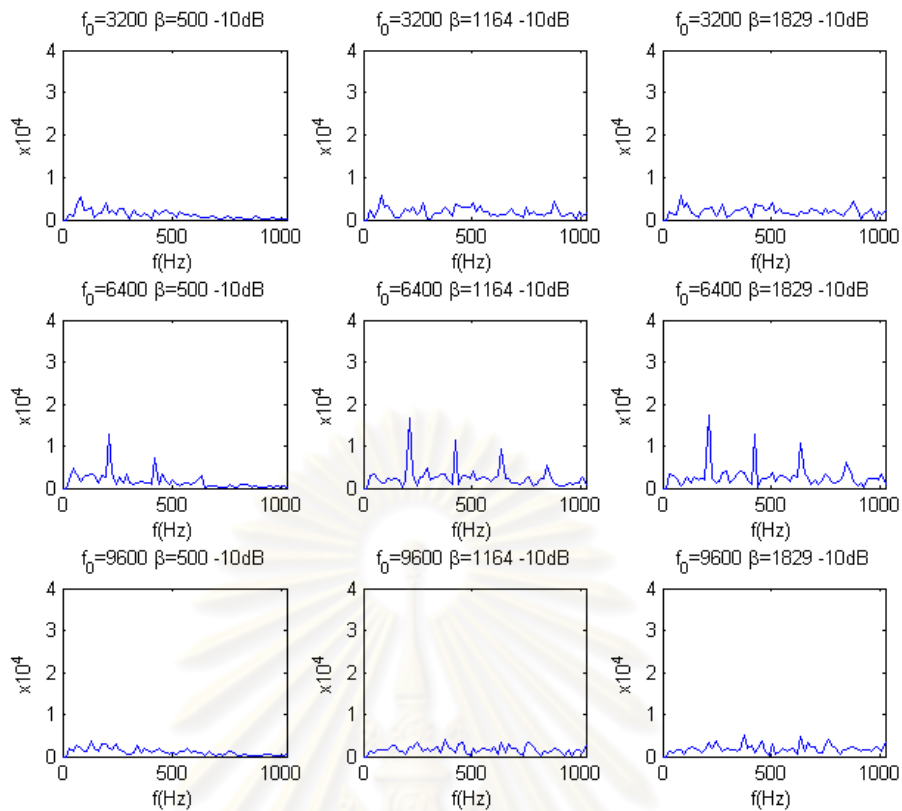




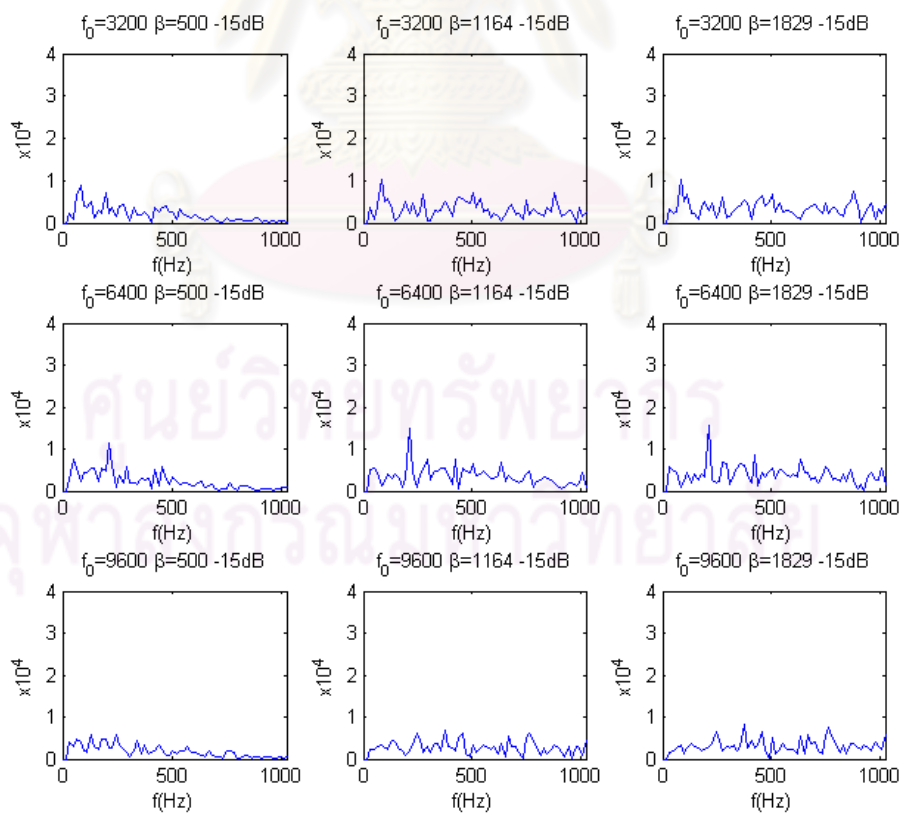
รูปที่ 5-23 เอ็นวิคอปสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$   $\text{SNR}=-15\text{dB}$



รูปที่ 5-24 เอ็นวิคอปสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ไม่มีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5-25 เอ็นวิคอปสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $f_n = 8000 \text{ Hz}$ ,  $\xi = 0.6$   $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$



รูปที่ 5-26 เอ็นวิคอปสเปกตรัมของสัญญาณที่มี  $f_n = 8000 \text{ Hz}$ ,  $\xi = 0.6$   $\text{SNR} = -15 \text{ dB}$

ในขั้นแรก เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 5-21 และ 5-24 จะพบว่าในช่วง  $f_0$  และ  $\beta$  ที่นำมาแสดงนั้น จุดที่  $f_0 = f_d$  จะให้ค่ายอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับที่  $f_0$  ค่าอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อมาพิจารณาที่  $f_0$  ค่านั้น จะพบว่าขนาดของฮาร์มอนิกจะใหญ่ขึ้นและจะพบฮาร์มอนิกได้มากขึ้น เมื่อ  $\beta$  มีค่ามากที่สุด ( $\beta = f_0/3.5$ ) ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงเวฟเลตเป็นการทำคอนโวลูชันของสัญญาณและตัวกรองเวฟเลตในโดเมนความถี่แล้ว ตัวกรองเวฟเลตที่มีความถี่กึ่งกลางซ้อนทับกับช่วงความถี่ที่สัญญาณมีค่ามากที่สุด ในโดเมนความถี่จะให้ผลที่ได้จากการทำคอนโวลูชันที่มีค่ามาก และเมื่อ  $\beta$  มีค่ามากย่อมหมายถึงตัวกรองสามารถครอบคลุมแถบความถี่ข้างในโดเมนความถี่ได้จำนวนมากกว่า ทำให้เห็นฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมได้ใหญ่กว่าและจำนวนมากกว่า

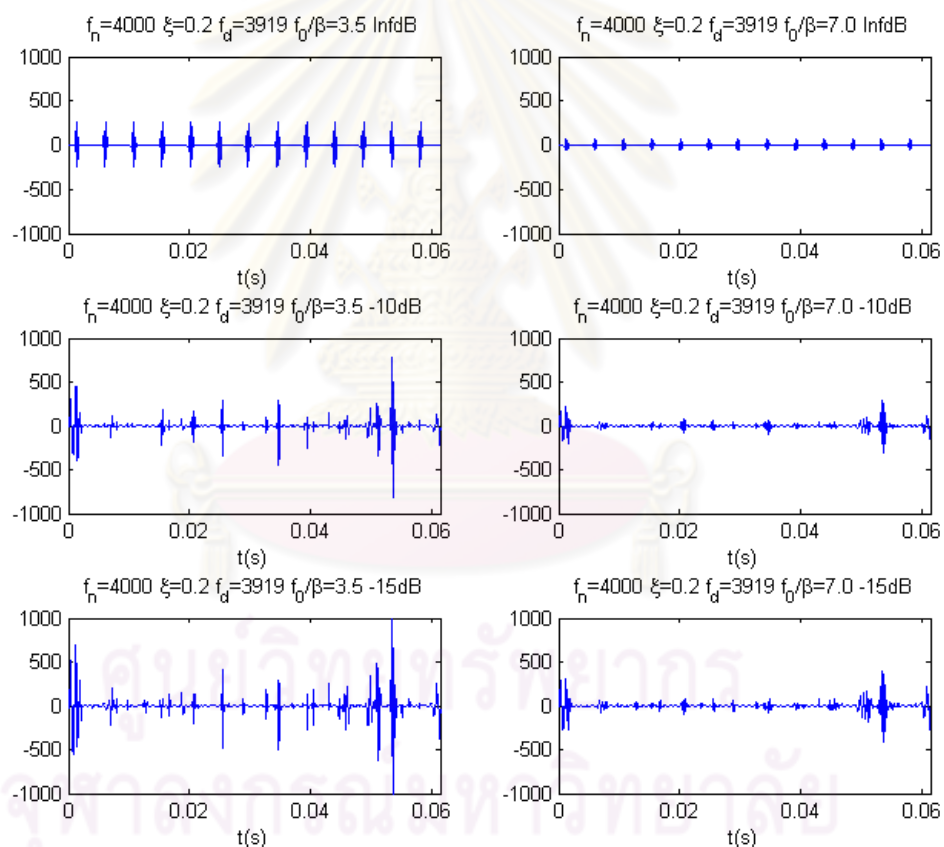
ในขั้นต่อมาพิจารณาถึงกรณีที่มิสัญญาณรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 5-22, 5-23, 5-25 และ 5-26 จะพบว่าในกรณีที่  $f_0$  ไม่ตรงกับ  $f_d$  จะไม่สามารถตรวจพบความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายและฮาร์มอนิกได้ เนื่องจากในช่วงความถี่ดังกล่าวลักษณะของแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกับความเสียหายไม่ได้ยกตัวขึ้นมาจากพื้นของสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 5-13 แต่จะมีสิ่งที่สังเกตได้เพิ่มเติมคือ ยิ่งค่า  $\beta$  มีค่ามากขึ้น ระดับพื้นของสัญญาณรบกวนก็จะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากตัวกรองเวฟเลตมีความกว้างของแถบความถี่ผ่านที่กว้างขึ้น ทำให้สัญญาณรบกวนที่อยู่ในย่านความถี่ที่ใกล้เคียงกับสัญญาณความเสียหายผ่านตัวกรองได้มากขึ้น ดังนั้นค่า  $\beta$  ที่เหมาะสมจึงต้องอยู่ในการประนีประนอม (compromise) ระหว่างความชัดเจนของยอดความถี่ซึ่งสอดคล้องกับความเสียหายและฮาร์มอนิกของความถี่ดังกล่าวกับความสูงของพื้นของสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 5-21 - 5-26 และสิ่งที่ได้กล่าวมาในสองย่อหน้าข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ความถี่กึ่งกลางของตัวกรองเวฟเลต ( $f_0$ ) ที่เหมาะสมควรจะซ้อนทับกับความถี่ธรรมชาติแบบมีการหน่วง ( $f_d$ ) ของสัญญาณความเสียหาย เพื่อให้ได้ยอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่มีความชัดเจนมากที่สุด ในขณะที่ความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ( $\beta$ ) ที่เหมาะสมต้องมีการพิจารณาระหว่างความชัดเจนของยอดความถี่ของสัญญาณความเสียหายกับความสูงของพื้นของสัญญาณรบกวนในเอ็นวีลอปสเปกตรัม

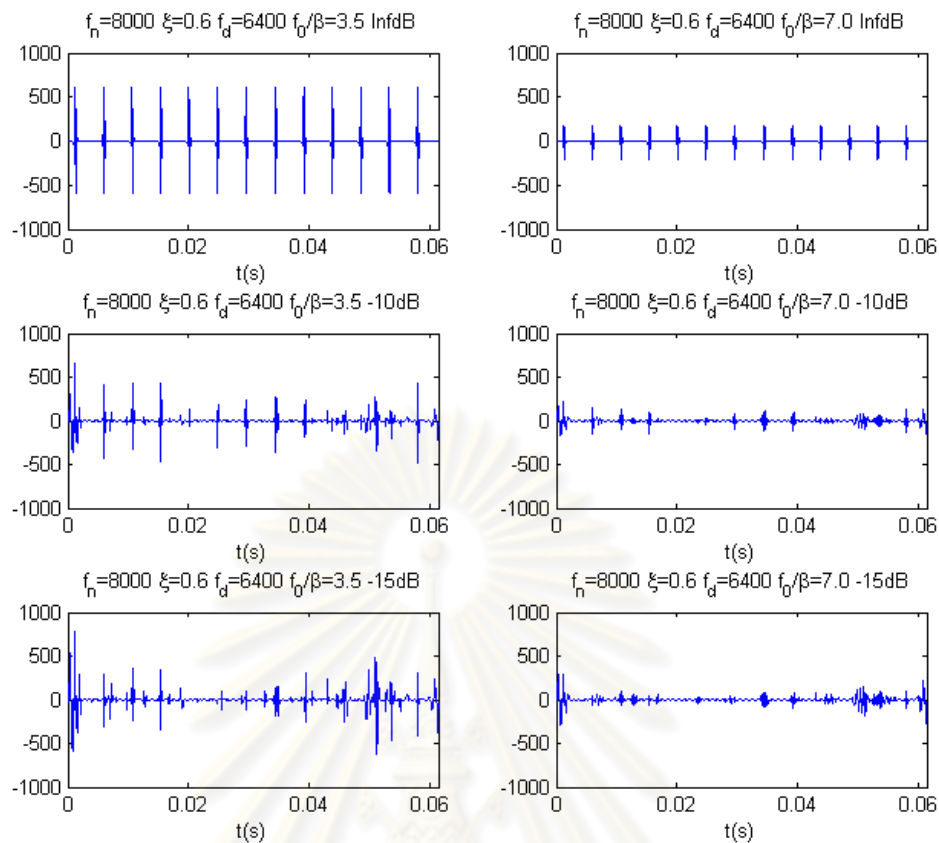
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5-1-4 ผลของอัตราส่วนระหว่างความถี่กึ่งกลาง และความกว้างของแถบความถี่ผ่าน ( $f_0/\beta$ ) ของการแยกส่วนประกอบสัญญาณ

ในการตรวจจับความเสียหายด้วยการแยกส่วนประกอบของสัญญาณ จะไม่สามารถเลือก  $f_0$  และ  $\beta$  ได้อย่างอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากการแยกส่วนประกอบสัญญาณก็คือการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตลูกที่หลาย ๆ สเกล โดยเวฟเลตลูกแต่ละสเกลจำเป็นต้องมีค่า  $f_0/\beta$  เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เพียง  $f_0/\beta$  ของเวฟเลตแม่ ซึ่งเวฟเลตลูกที่สเกลต่าง ๆ ก็จะมีอัตราส่วนนี้คงที่เสมอในทุกสเกลของการแปลงเวฟเลต ในหัวข้อนี้จะใช้สัญญาณชุดเดียวกับที่ใช้อธิบายในหัวข้อ 5-1-3 มาศึกษาการตรวจจับความเสียหายด้วยการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต ในการศึกษาจะใช้อัตราส่วน  $f_0/\beta = 3.5$  และ  $7$  ได้ผลการตรวจจับความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 5-27 และ 5-28 ตามลำดับ



รูปที่ 5-27 ผลการตรวจจับด้วยวิธีแยกส่วนประกอบสัญญาณของสัญญาณ  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  ที่ SNR ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5-28 ผลการตรวจจับด้วยวิธีแยกส่วนประกอบสัญญาณของสัญญาณ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ที่ SNR ต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 5-27 และ 5-28 จะเห็นว่าค่า  $f_0/\beta$  ที่มากกว่าจะให้สัญญาณที่มีขนาดเล็กกว่าทั้งในกรณีที่ไม่มีการรบกวนและเมื่อมีการรบกวนเข้ามารวมอยู่ด้วย โดยเฉพาะเมื่อมีสัญญาณรบกวนอยู่ด้วย ลักษณะของคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายจะหายไป ทั้งนี้เพราะ  $f_0/\beta$  ที่มากกว่าหมายถึงความกว้างของแถบความถี่ผ่าน (bandwidth) ที่แคบกว่า ทำให้มีจำนวนสัญญาณไซนูซอยด์ในช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกันผ่านตัวกรองเวฟเลตไปได้น้อยตัวกว่า นั่นย่อมหมายถึงสัมประสิทธิ์การแปลงที่ได้จะมีอัตราการสุ่มเข้าสู่ศูนย์ที่ช้ากว่า ทำให้มีจำนวนสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่มีค่ามากอยู่มากกว่ากรณีที่  $f_0/\beta$  มีค่าน้อย ทำให้ลักษณะของสัมประสิทธิ์ที่ได้ไม่มีความคมชัด ดังที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของการแยกส่วนประกอบสัญญาณในหัวข้อ 5-1-2 ดังนั้นเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ด้วยสมการ (3-47 - 3-49) สัมประสิทธิ์ที่มาจากส่วนของสัญญาณความเสียหายจึงมีโอกาสที่จะไม่ผ่านเกณฑ์มากกว่า หรือถ้าผ่านมาได้ค่าที่ได้ก็จะไม่สูงมากนักเนื่องจากสัมประสิทธิ์ตัวที่อยู่รอบ ๆ จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าในกรณีที่  $f_0/\beta$  มีค่าน้อย

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าเวฟเลตที่ใช้ในการแยกส่วนประกอบของสัญญาณควรมี  $f_0/\beta$  น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตมีลักษณะคาบของสัญญาณความเสียหายที่ชัดเจน ดังนั้นในการประเมิน

ความสามารถของการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบสัญญาณ จะใช้ค่า  $f_0/\beta = 3.5$  ซึ่งแสดงลักษณะของคาบความเสียหายในสัญญาณได้ชัดเจนกว่า

#### 5-1-5 ตัวบ่งชี้เพื่อการเลือกพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสม

จากหัวข้อที่ 5-1-3 จะเห็นได้ว่าการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตจำเป็นต้องมีการเลือกพารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ของตัวกรองที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่สามารถแสดงถึงลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวบ่งชี้ (indicator) ว่าพารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ที่ใช้กรองสัญญาณนั้น ๆ มีความเหมาะสมเพียงใด

โดยทั่วไปแล้วตัวบ่งชี้ที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่สองตัว คือ เคอร์โทซิส (kurtosis) [7] และ แชนนอนเอนโทรปี (Shannon entropy) [8, 9] ของเอ็นวีลอปของสัญญาณ ดังแสดงในสมการ (5-1) และ (5-2) ตามลำดับซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ทั้งสองได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3-3-2

$$kurt(f_0, \beta) = \frac{\frac{1}{N} \sum_i (S_i(f_0, \beta) - \bar{S}(f_0, \beta))^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_i (S_i(f_0, \beta) - \bar{S}(f_0, \beta))^2\right)^2} \quad (5-1)$$

$$SE(f_0, \beta) = - \sum_i \hat{S}_i(f_0, \beta) \log(\hat{S}_i(f_0, \beta)) ; \hat{S}_i = S_i / \sum_i S_i \quad (5-2)$$

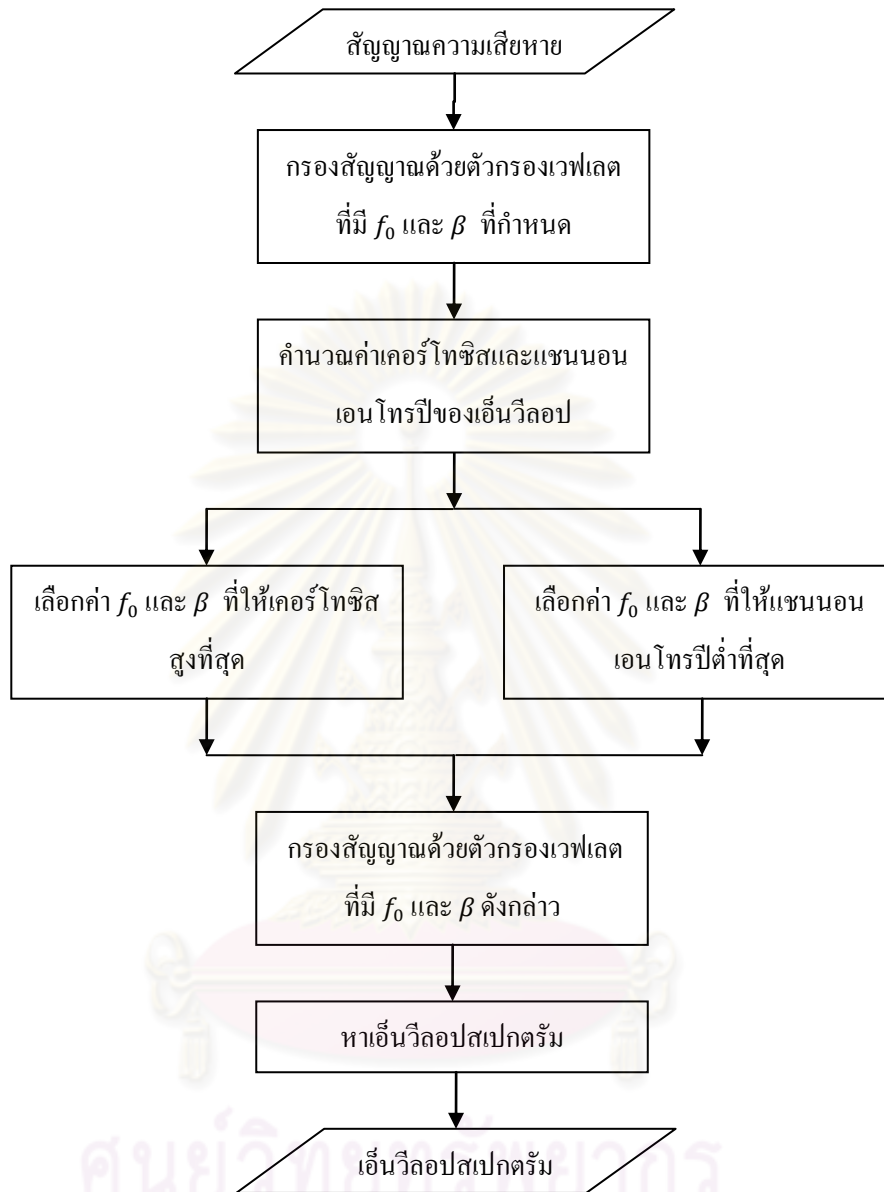
เมื่อ  $S(f_0, \beta)$  คือเอ็นวีลอปที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วยมอร์เลตเวฟเลตที่มีพารามิเตอร์เป็น  $f_0$  และ  $\beta$  โดยตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสมที่สุดจะให้ค่าเคอร์โทซิสของเอ็นวีลอปสูงที่สุดหรือให้ค่าแชนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปต่ำที่สุด เมื่อใช้เคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ตามลำดับ

ในการศึกษาจะใช้ค่าพารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ของตัวกรองดังที่แสดงไว้แล้วในตารางที่ 4-8 โดยสามารถสรุปค่า  $\beta$  ที่ใช้ของแต่ละ  $f_0$  ได้ในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สรุปค่า  $\beta$  ที่ใช้ของแต่ละ  $f_0$  ในการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

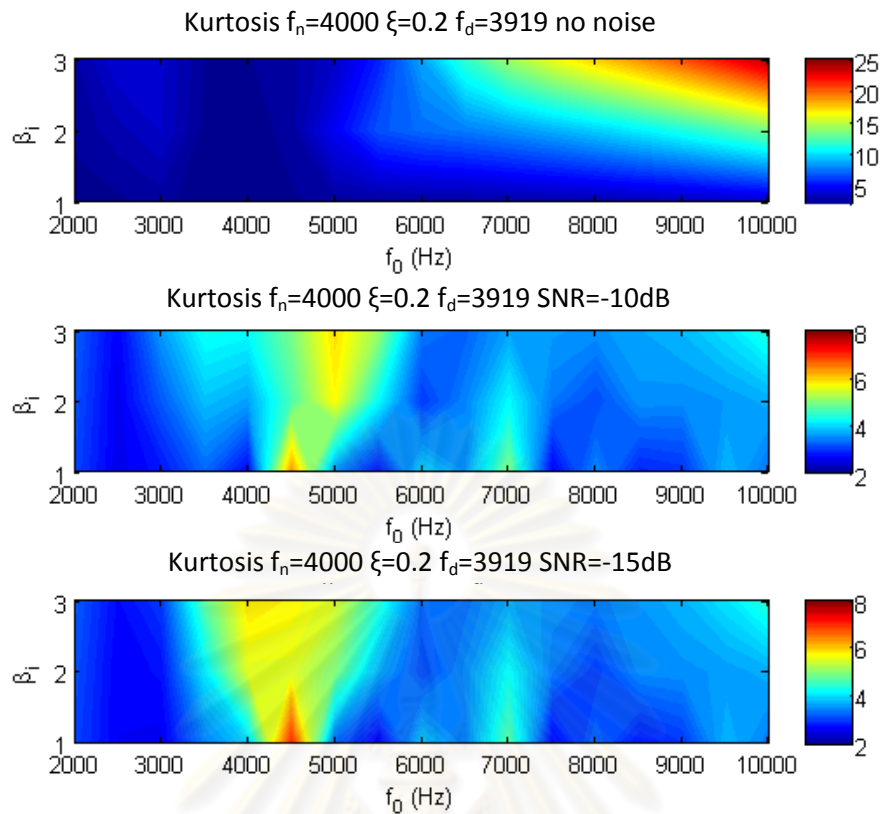
$f_0$ (Hz)	$\beta_1$ (Hz)	$\beta_2$ (Hz)	$\beta_3$ (Hz)	$f_0$ (Hz)	$\beta_1$ (Hz)	$\beta_2$ (Hz)	$\beta_3$ (Hz)	$f_0$ (Hz)	$\beta_1$ (Hz)	$\beta_2$ (Hz)	$\beta_3$ (Hz)
2000	500	536	571	5000	500	964	1429	8000	500	1393	2286
2500	500	607	714	5500	500	1036	1571	8500	500	1464	2429
3000	500	679	857	6000	500	1107	1714	9000	500	1536	2571
3500	500	750	1000	6500	500	1179	1857	9500	500	1607	2714
4000	500	821	1143	7000	500	1250	2000	10000	500	1679	2857
4500	500	893	1286	7500	500	1321	2143				

ขั้นตอนในการหาพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสมโดยใช้เคอร์โทซิสหรือ  
แชนนอนเอนโทรปีจะสามารถสรุปได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5-29

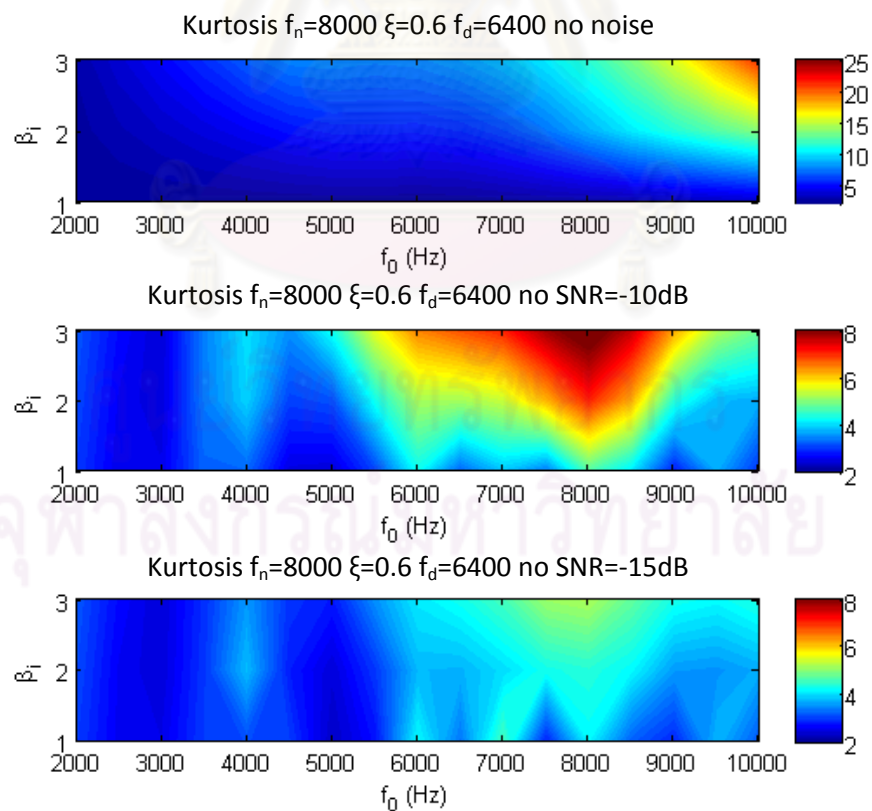


รูปที่ 5-29 สรุปขั้นตอนในการหาพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสมโดยใช้เคอร์โทซิส  
หรือแชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้

ในหัวข้อนี้จะใช้สัญญาณในรูปที่ 5-12 เช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้าเป็นตัวอย่างในการ  
ศึกษาโดยจะแสดงค่าของเคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีของสัญญาณในรูปที่ 5-30 และ 5-31  
ตามลำดับ

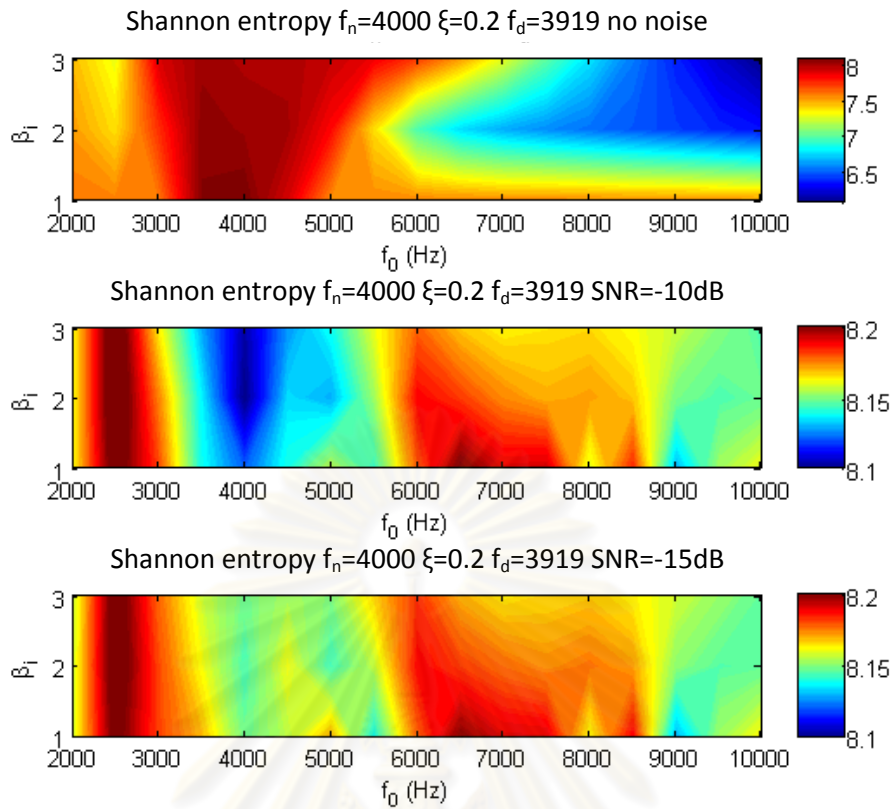


รูปที่ 5-30 (ก) ค่าเคอร์โทซิสของเอ็นวีลอปของสัญญาณ  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  ที่ SNR ต่าง ๆ

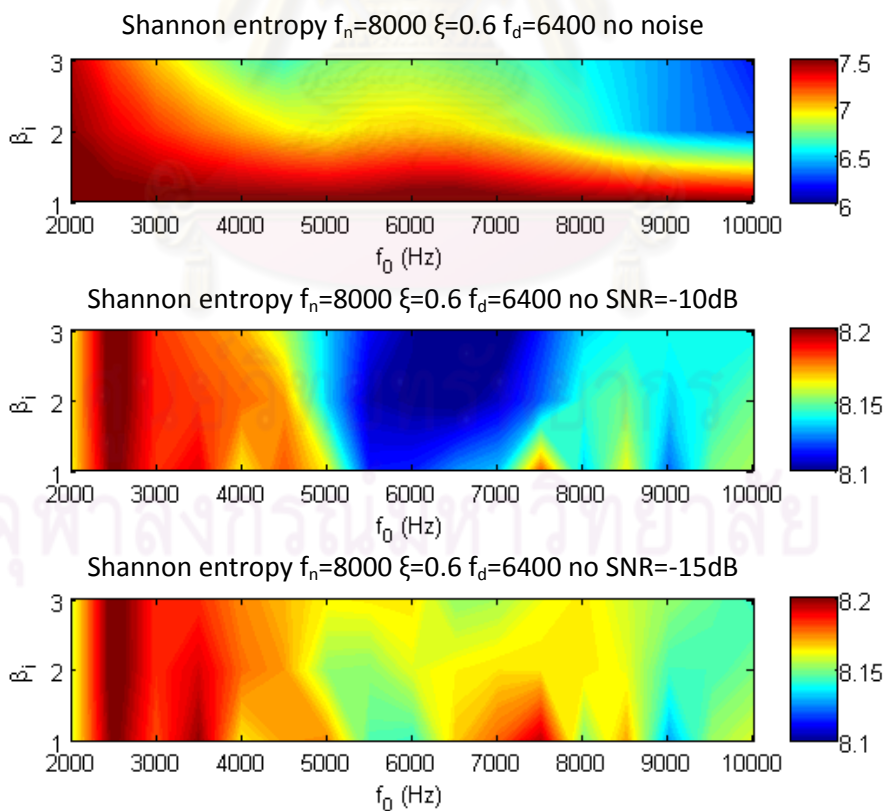


รูปที่ 5-30 (ข) ค่าเคอร์โทซิสของเอ็นวีลอปของสัญญาณ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ที่ SNR ต่าง ๆ





รูปที่ 5-31 (ก) ค่าแฮนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปของสัญญาณ  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  ที่ SNR ต่าง ๆ



รูปที่ 5-31 (ข) ค่าแฮนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปของสัญญาณ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ที่ SNR ต่าง ๆ

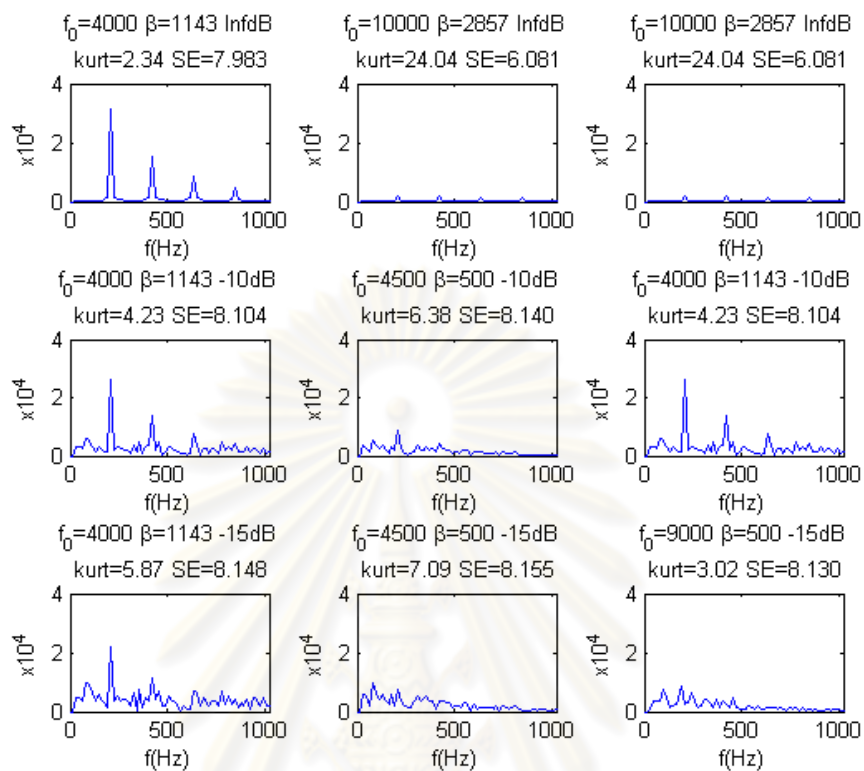
ในรูปที่ 5-30 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน (รูปย่อยแถวบนสุด) จุดที่มีค่าเคอร์โทซิสสูงที่สุดไม่ได้อยู่บนแนวเส้นตั้งที่ลากไปจาก  $f_d$  ทั้งนี้เพราะในช่วงความถี่สูงมาก ๆ ที่ให้ค่าเคอร์โทซิสสูงที่สุดเป็นช่วงที่ยอดในฟูริเยร์สเปกตรัมที่อยู่ในย่านความถี่นั้นมีความสูงเท่า ๆ กัน ซึ่งหมายความว่าสัญญาณที่ผ่านการกรองจะมีลักษณะความเป็นยอดแหลมมากกว่าช่วงความถี่  $f_d$  ที่แถบความถี่ข้างจะมีขนาดที่แตกต่างกับยอดที่อยู่ข้าง ๆ กันอย่างเห็นได้ชัดเจนกว่า (พิจารณารูปที่ 5-13 ประกอบ) เมื่อสัญญาณที่ได้มีลักษณะมีความเป็นยอดแหลมมากกว่าย่อมทำให้ค่าเคอร์โทซิสสูง แต่ในความเป็นจริง ไม่มีทางที่สัญญาณความเสียหายที่วัดมาได้จะไม่มีสัญญาณรบกวนผสมอยู่ ดังนั้นถ้าตัวบ่งชี้สามารถทำงานกับสัญญาณความเสียหายที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับหนึ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ถือว่าน่าจะเป็นพอแล้ว

ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนในรูปที่ 5-30 จะเห็นได้ว่าจุดที่ค่าเคอร์โทซิสมีค่าสูงสุดขยับเข้ามาใกล้  $f_d$  มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน แต่ก็ไม่ใช่ว่าจุด  $f_0$  ที่อยู่ใกล้  $f_d$  มากที่สุด สาเหตุที่  $f_0$  ขยับเข้ามาอยู่ใกล้  $f_d$  มากขึ้นเพราะว่าพื้นของสัญญาณรบกวนในรูปที่ 5-13 ยกตัวสูงขึ้น ทำให้ยอดสัญญาณที่เกิดจากความเสียหายที่ความถี่ที่ให้ค่าเคอร์โทซิสสูงที่สุดตอนที่ไม่มีสัญญาณรบกวนซึ่งมีความสูงไม่มากถูกกลืนลงไปในพื้นที่ของสัญญาณรบกวน ทำให้ค่าเคอร์โทซิสลดลงอย่างมาก (สัญญาณรบกวนแบบสุ่มมีค่าเคอร์โทซิสประมาณ 3) ดังนั้นจึงเหลือแต่บริเวณที่สัญญาณความเสียหายยกตัวสูงขึ้นมาจากพื้นของสัญญาณรบกวนเท่านั้นที่จะให้ค่าเคอร์โทซิสที่สูงกว่าสัญญาณรบกวนแบบสุ่มได้

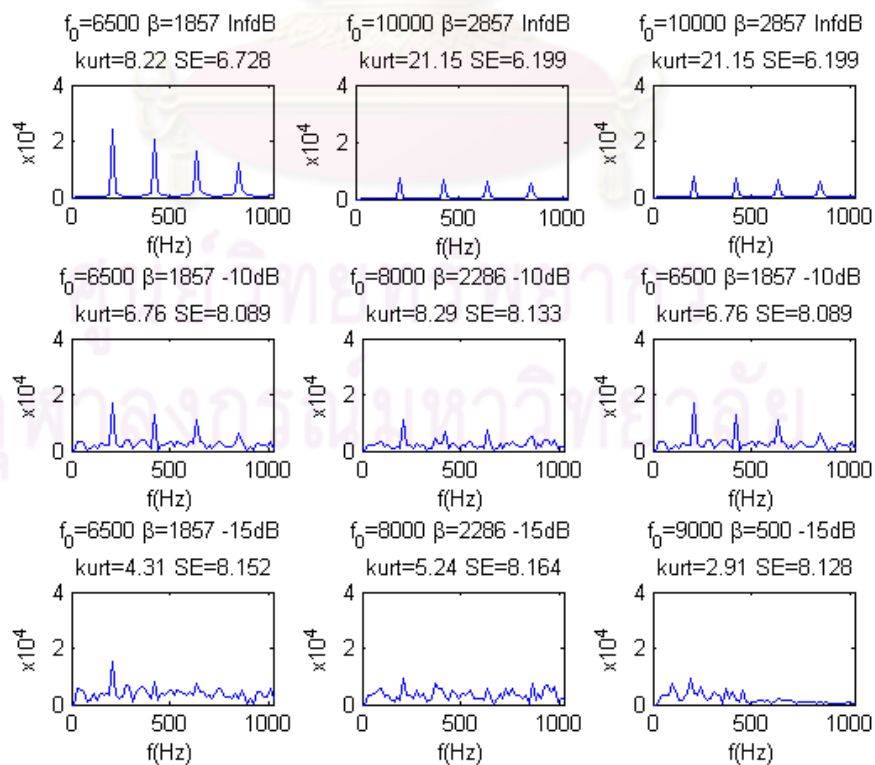
ต่อมาพิจารณารูปที่ 5-31 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน แชนนอนเอนโทรปีให้ผลเช่นเดียวกับเคอร์โทซิส ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่มีค่าเคอร์โทซิสมากมักจะมีค่ามาก ๆ ที่เวลาหนึ่งและมีค่าในเวลาที่เหลือส่วนใหญ่ในคาบเป็นศูนย์จะให้ค่าแชนนอนเอนโทรปีที่ต่ำ แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามารวมอยู่ด้วยแล้ว ค่า  $f_0$  ที่ทำให้ค่าแชนนอนเอนโทรปีที่ต่ำที่สุดอยู่เป็นจุด  $f_0$  ที่ใกล้กับ  $f_d$  ของสัญญาณมากที่สุด (ยกเว้นกรณี SNR=-15dB ในรูปที่ 5-31(ข) เนื่องจากสัญญาณซึ่งมีการแผ่ตัวกว้างในโดเมนความถี่จมอยู่ในพื้นของสัญญาณรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 5-13) ดังนั้นค่าแชนนอนเอนโทรปีน่าจะให้ผลการตรวจจับที่ดีกว่าค่าเคอร์โทซิส ซึ่งจะต้องมีการประเมินผลต่อไป

เพื่อให้เห็นภาพมากขึ้น รูปที่ 5-32 แสดงเอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณที่  $f_0 \approx f_d$  ( $\beta = f_0/3.5$ ) และ  $f_0$  กับ  $\beta$  ที่ให้ค่าเคอร์โทซิสสูงที่สุด และค่าแชนนอนเอนโทรปีที่ต่ำที่สุด แสดงจากสดมภ์ซ้ายไปขวาตามลำดับ ที่ SNR =  $\infty$ , -10 และ -15dB จากแถวบนลงล่างตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจุดที่ค่าเคอร์โทซิสสูงที่สุดในกรณีมีสัญญาณรบกวนไม่ได้ให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่แสดงถึงความเสียหายที่ชัดเจนนักทั้งที่ -10 และ -15dB ในขณะที่แชนนอนเอนโทรปีให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่แสดงความเสียหายได้ชัดเจนที่ -10dB แต่ก็ไม่สามารแสดงเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่

ถูกต้องได้ในกรณี SNR= -15dB เช่นเดียวกันกับเคอร์โทซิส ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจุดที่ให้ค่าเคอร์โทซิสสูงสุดหรือเซนนอนเอนโทรปีต่ำสุดไม่ได้ให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ถูกต้องเสมอไป

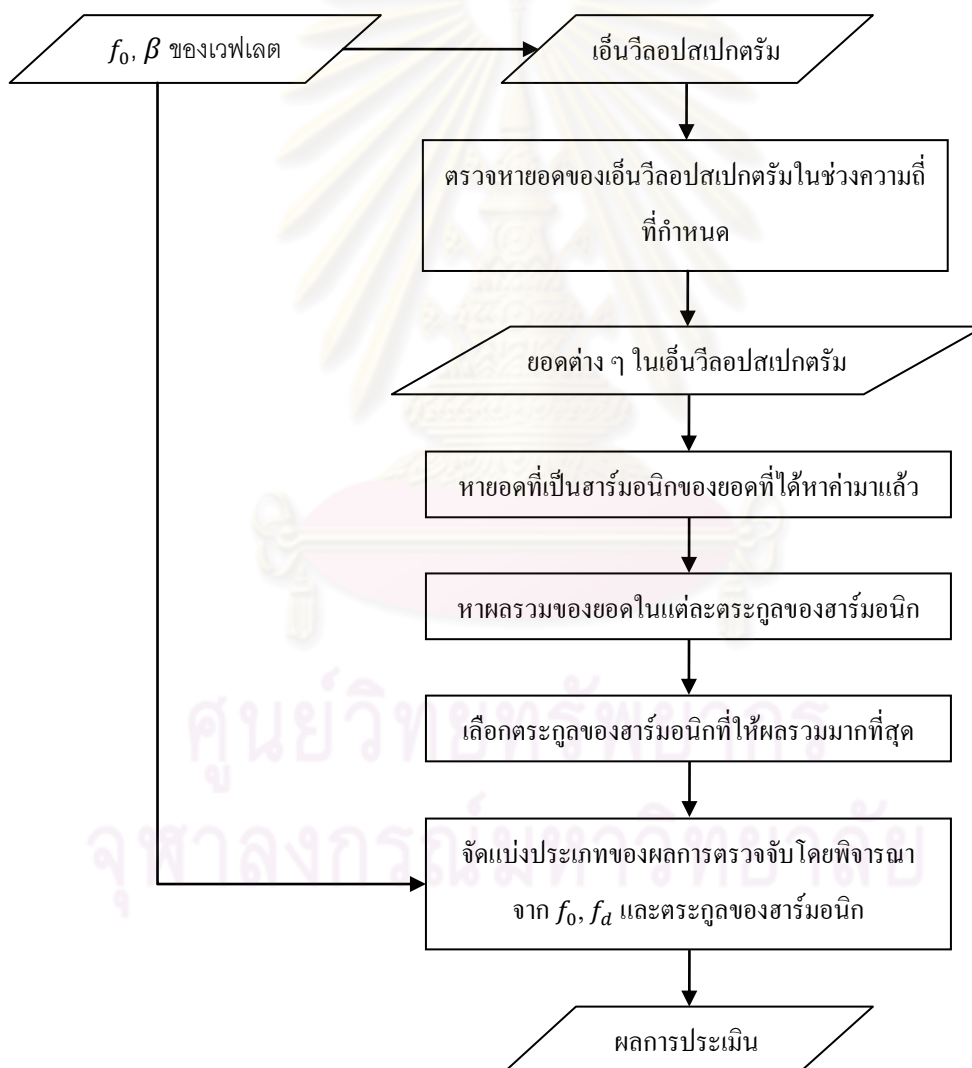


รูปที่ 5-32 (ก) เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  ที่ SNR ต่าง ๆ



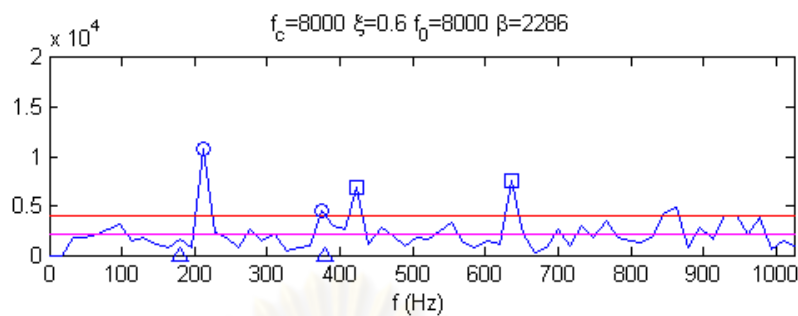
รูปที่ 5-32 (ข) เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ที่ SNR ต่าง ๆ

ในตัวอย่างที่แสดงมาในข้างต้นสัญญาณความเสียหายถูกรวมกับสัญญาณรบกวนเพียงชุดเดียว ค่า SNR ที่ต่างกันเกิดจากสัญญาณรบกวนชุดเดียวกันที่ถูกปรับขนาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประเมินที่สัญญาณรบกวนหลายชุด โดยในการประเมินนี้จะใช้สัญญาณความเสียหายทั้งหมด 12 รูปแบบตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 และใช้ระดับ SNR ที่ -10, -13, และ -15dB โดยใช้สัญญาณรบกวน 100 ชุดด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อประเมินความสามารถของตัวบ่งชี้ในการสร้างเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่สามารถแสดงถึงลักษณะของสัญญาณความเสียหาย นอกจากนี้ยังประเมินตัวบ่งชี้ทั้งสองที่ SNR =  $-\infty$ dB เพื่อตรวจดูโอกาสในการเตือนที่ผิดพลาด (false alarm) ที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการในการประเมินประสิทธิภาพของตัวบ่งชี้ที่เหมาะสม ซึ่งแผนผังขั้นตอนดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 5-33



รูปที่ 5-33 ขั้นตอนในการประเมินประสิทธิภาพของตัวบ่งชี้

เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนมากขึ้นจะยกตัวอย่างเอ็นวีลอปของกรณีค่าเคอร์โทซิสสูงที่สุดในระดับ SNR=-10dB ของรูปที่ 5-32 (ข) ดังแสดงในรูปที่ 5-34



รูปที่ 5-34 ตัวอย่างวิธีการหายอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัม

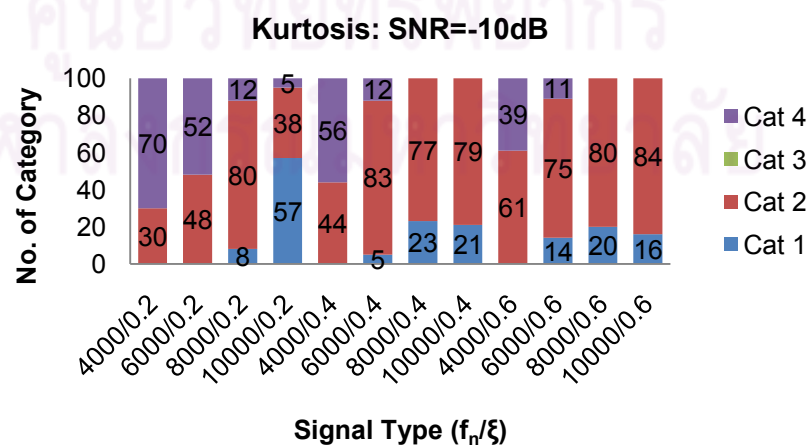
โดยในขั้นแรกจะพิจารณาเอ็นวีลอปสเปกตรัมเฉพาะช่วงความถี่ 0 - 1024Hz เนื่องจากที่ช่วงความถี่สูงกว่านี้ค่ายอดของเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา จากนั้นจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในช่วงดังกล่าว จะได้เส้นสีบานเย็น หลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของช่วงดังกล่าว ต่อไปจึงกำหนดเกณฑ์ความสูงของค่ายอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัม โดยในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ ผลรวมของค่าเฉลี่ยบวกหนึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณซึ่งก็คือเส้นสีแดง ยอดเอ็นวีลอปสเปกตรัมต่าง ๆ ที่มีความสูงมากกว่าเส้นสีแดงนี้จะถูกนับเป็นยอดเพื่อนำไปพิจารณาในขั้นต่อไป หลังจากนั้นจึงหายอดที่เป็นความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) เนื่องจากค่าความถี่ความเสียหายตัวที่ต่ำสุดคือ BSF ที่มีค่าอยู่ที่ 208.5Hz และตัวที่สูงที่สุดคือ BPIR มีค่าอยู่ที่ 337.5Hz สำหรับเพลทที่มีรอบการหมุน 50Hz ดังนั้นกำหนดช่วงการหายอดให้อยู่ระหว่าง 180 และ 380Hz โดยแสดงเป็นเครื่องหมายสามเหลี่ยมบนแกนนอน ค่ายอดที่ถูกพิจารณาเป็นความถี่พื้นฐานก็คือยอดที่อยู่ระหว่างเครื่องหมายสามเหลี่ยมทั้งสองและมีความสูงมากกว่าเส้นสีแดง โดยยอดดังกล่าวจะถูกวงไว้ด้วยจุดวงกลม จะพบยอดได้ที่ความถี่ 211.7 และ 374.5Hz (ค่าจะเปลี่ยนแปลงจากค่าที่คำนวณเล็กน้อยเนื่องจากรายละเอียดของเส้นสเปกตรัม) ต่อมาจะหายอดที่เป็นฮาร์มอนิกของทั้งสองตระกูลนี้ โดยจะพบว่า ความถี่พื้นฐาน 211.7Hz จะมี ฮาร์มอนิกที่ 423.4 และ 635.1Hz ขณะที่ความถี่พื้นฐาน 374.5Hz ไม่พบฮาร์มอนิก (กำหนดให้ค่าความเผื่อ (tolerance) ของการหาฮาร์มอนิกอยู่ที่ 5Hz โดยเส้นสเปกตรัมแต่ละเส้นอยู่ห่างกัน 16.28Hz) โดยยอดที่เป็นฮาร์มอนิกจะถูกวงไว้ด้วยกรอบสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 5-34 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลรวมของตระกูลฮาร์มอนิก 211.7Hz มีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปว่าในเอ็นวีลอปสเปกตรัมรูปนี้พบความถี่ที่ 211.7Hz ซึ่งตรงกับความถี่ของสัญญาณความเสียหายพอดี

เมื่อได้ความถี่ของเอ็นวีลอปสเปกตรัมแล้ว จะนำความถี่ดังกล่าวมาพิจารณาร่วมกับ  $f_0$  ของตัวกรอง เวฟเลต และ  $f_d$  ของสัญญาณที่จำลองขึ้นมา เพื่อจะจัดแบ่งประเภท (category: Cat) ของการตรวจจับ โดยกำหนดเกณฑ์ในการจัดแบ่ง ดังแสดงในตารางที่ 5-2

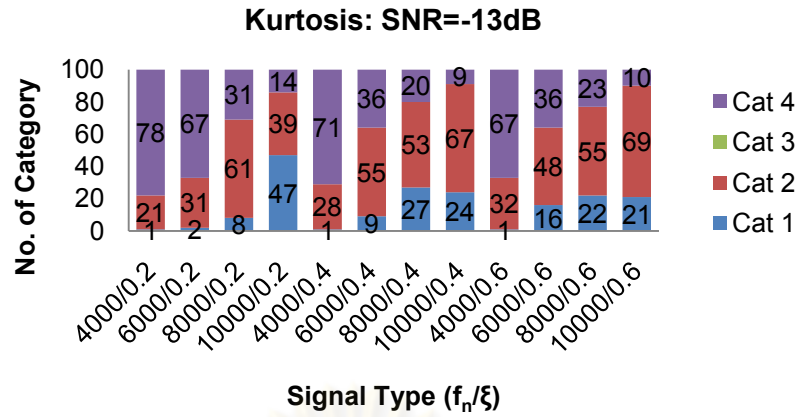
ตารางที่ 5-2 ประเภทของผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย

ประเภท (category)	เงื่อนไข
1	$f_0$ ของตัวกรองต่างจาก $f_d$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 250Hz และความถี่ที่ถูกเลือกจากเอ็นวีลอปสเปกตรัมต่างจากค่าความถี่ของความเสียหายน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ของค่าความถี่ของความเสียหาย
2	$f_0$ ของตัวกรองต่างจาก $f_d$ มากกว่า 250Hz แต่ความถี่ที่ถูกเลือกจากเอ็นวีลอปสเปกตรัมต่างจากค่าความถี่ของความเสียหายน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ของค่าความถี่ของความเสียหาย
3	$f_0$ ของตัวกรองต่างจาก $f_d$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 250Hz แต่ความถี่ที่ถูกเลือกจากเอ็นวีลอปสเปกตรัมต่างจากค่าความถี่ของความเสียหายมากกว่า 5% ของค่าความถี่ของความเสียหาย
4	$f_0$ ของตัวกรองต่างจาก $f_d$ มากกว่า 250Hz และความถี่ที่ถูกเลือกจากเอ็นวีลอปสเปกตรัมต่างจากค่าความถี่ของความเสียหายมากกว่า 5% ของค่าความถี่ของความเสียหาย

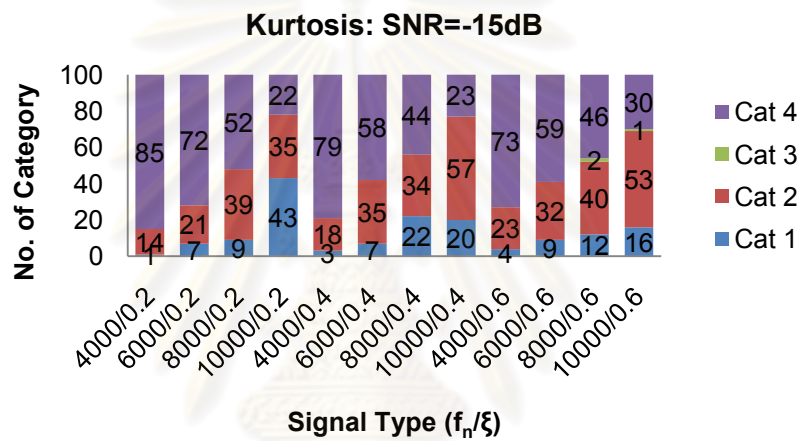
จากตารางที่ 5-2 สามารถสรุปได้ว่าผลของตรวจจับประเภทที่ 1 และ 2 แสดงว่าตรวจพบลักษณะของความเสียหายในสัญญาณ ในขณะที่ประเภทที่ 3 และ 4 ไม่สามารถตรวจพบลักษณะของความเสียหายของสัญญาณ จากการจัดแบ่งประเภทในข้างต้น ทำให้สามารถประเมินความสามารถของ เคอร์โทซิสและแซนนอนเอนโทรปีสำหรับใช้เป็นตัวบ่งชี้เพื่อปรับพารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ของตัวกรองเวฟเลตได้ดังรูปที่ 5-35 และ 5-36 ตามลำดับ โดยแกนนอนแสดงถึงชุดสัญญาณความเสียหายที่มีความถี่ธรรมชาติแบบไม่มีการหน่วงและอัตราส่วนการหน่วงที่แตกต่างกัน แกนตั้งแสดงจำนวนในแต่ละประเภทของผลการตรวจจับที่ได้จากสัญญาณชุดต่าง ๆ ซึ่งประเภทของผลการตรวจจับถูกแสดงด้วยสีที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 5-37 เป็นการแสดงผลการเตือนที่ผิดพลาด (false alarm) ซึ่งหมายถึงกรณีที่ป้อนสัญญาณรบกวนเข้าไปเพียงอย่างเดียว (SNR=-∞dB) แต่ได้ผลการตรวจจับออกมาเป็นประเภท 1 หรือ ประเภท 2 ทั้ง ๆ ที่ไม่มีสัญญาณความเสียหาย



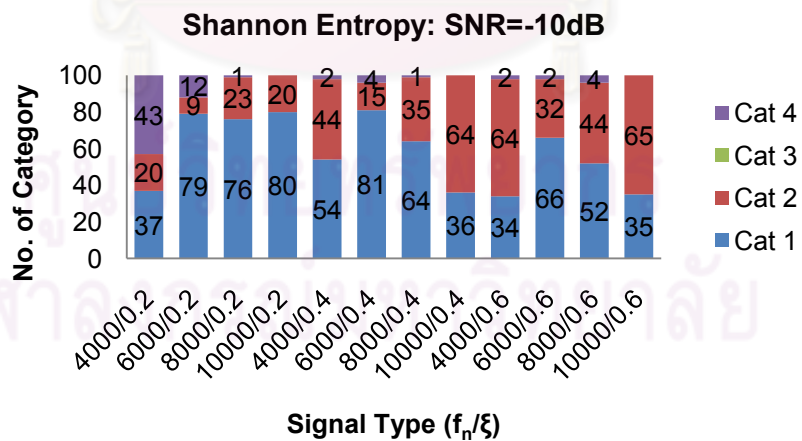
รูปที่ 5-35 (ก) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ SNR=-10dB



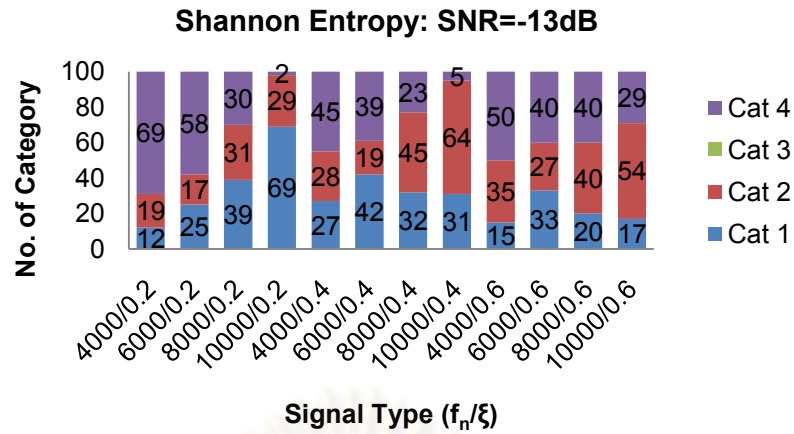
รูปที่ 5-35 (ข) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ SNR=-13dB



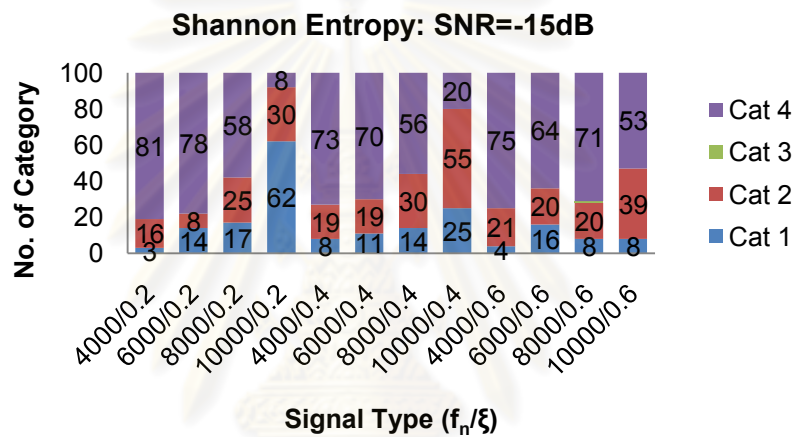
รูปที่ 5-35 (ค) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ SNR=-15dB



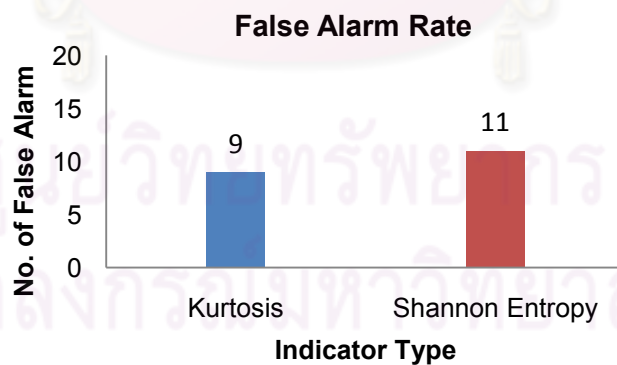
รูปที่ 5-36 (ก) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้เอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ SNR=-10dB



รูปที่ 5-36 (ข) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้แซนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ SNR=-13dB



รูปที่ 5-36 (ค) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้แซนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ SNR=-15dB



รูปที่ 5-37 อัตราการเกิดผลการเตือนที่ผิดพลาดของแซนนอนเอนโทรปีและเคอร์โทซิส

จากรูปที่ 5-35(ก) ในกรณีที่มีระดับของสัญญาณรบกวนต่ำ การใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้สามารถตรวจจับลักษณะสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องเป็นส่วนใหญ่(ผลรวมของ Cat1 และ Cat2) แต่จะมีบางกรณีที่ตรวจจับความเสียหายได้ไม่ถึง 50% นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าสามารถ



ตรวจจับได้มากขึ้นเมื่อค่า  $f_n$  และ  $\xi$  มีค่ามากขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 5-35(ข) และ (ค) ก็จะพบว่าในกรณีที่  $f_n$  เท่ากัน เมื่อ  $\xi$  มีค่ามากขึ้น ผลการตรวจจับก็ยังคงเพิ่มมากขึ้นเช่นเดิม แต่ว่าเมื่อพิจารณาที่ค่า  $\xi$  ที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของ  $f_n$  ไม่ได้ทำให้สามารถตรวจจับความเสียหายได้มากขึ้นเหมือนกับในกรณีที่ SNR=-10dB นอกจากนี้จะพบว่าการใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ให้ผลที่ถูกต้องลดลงโดยให้ค่าการตรวจจับที่ถูกต้องสูงสุด 90% และ 78% ในขณะที่ค่าการตรวจจับที่ถูกต้องต่ำสุดมีค่าเพียง 22 และ 15% ที่ SNR=-13dB และ -15dB ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความถูกต้องในการตรวจจับโดยใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อ SNR มีค่าต่ำ ๆ

สำหรับการใช้แซนอนอนโทริเป็นตัวแทนตัวบ่งชี้ เมื่อพิจารณารูปที่ 5-36 (ก) เปรียบเทียบกับรูปที่ 5-35 (ก) จะเห็นได้ว่าที่ SNR=-10dB แซนอนอนโทริให้ผลการตรวจจับโดยรวมถูกต้องมากกว่าเคอร์โทซิส (กรณีต่ำสุดอยู่ที่ 57% ซึ่งความถูกต้องของการใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้สำหรับกรณีนี้มีอยู่เพียง 30%) อีกทั้งยังจะเห็นได้ว่าผลการตรวจจับที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายมาก ต่างจากการใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ค่อนข้างชัดเจน แต่เมื่อระดับของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นดังเช่นแสดงในรูป 5-36(ข) และ (ค) ความถูกต้องในการตรวจจับจะลดลก่อนข้างมากเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งความถูกต้องในการตรวจจับจะกลับมากขึ้นอยู่กับค่า  $\xi$  ของสัญญาณโดยจะเพิ่มขึ้นตามค่า  $\xi$  แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับ  $f_n$  ของสัญญาณเท่าใดนัก

จากรูปที่ 5-37 จะพบว่าทั้งเคอร์โทซิสและแซนอนอนโทริให้อัตราการเกิดผลการเตือนที่ผิดพลาดที่ใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 10%

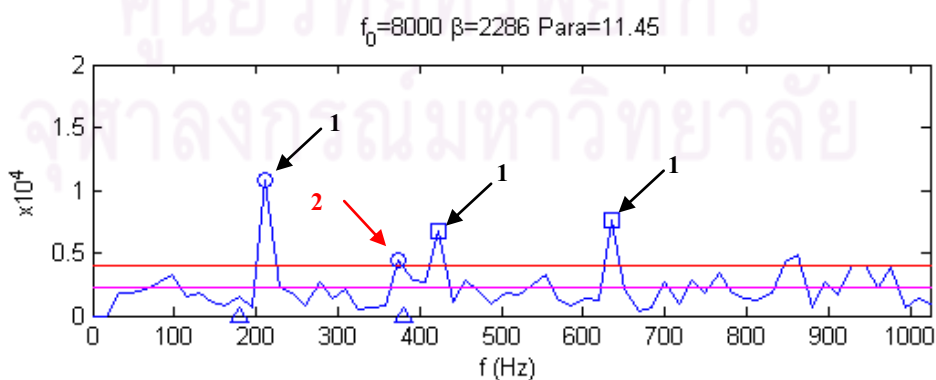
จากที่ได้กล่าวมาไว้ในข้างต้น จะพบว่าการใช้ตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวเป็นตัวบ่งชี้ที่มีข้อจำกัดบางประการด้วยกัน ประการแรกคือ ผลการตรวจจับโดยใช้พารามิเตอร์ทั้งสองเป็นตัวบ่งชี้มีความขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายค่อนข้างมาก โดยเฉพาะเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ความถูกต้องของผลการตรวจจับชุดที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดจะต่างกันมาก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนจริงอาจจะมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณชุดใดใน 12 รูปแบบสัญญาณที่จำลองขึ้นมาก็ได้ ประการต่อมาคือ ผลการตรวจจับที่ถูกต้องจะลดลงอย่างมากเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะแล้วจะต่ำกว่า 50% ที่ SNR=-15dB ซึ่งถือว่าไม่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับแล้ว ดังนั้นถ้าต้องหาตรวจจับสัญญาณของความเสียหายในระยะเริ่มต้น จำเป็นที่จะต้องหาตัวบ่งชี้ที่สามารถใช้ตรวจจับสัญญาณความเสียหายได้ถูกต้องที่ระดับของสัญญาณรบกวนสูง ๆ อีกทั้งควรจะให้ผลการตรวจจับที่ถูกต้องโดยไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายด้วย ซึ่งหลักการและรายละเอียดของตัวบ่งชี้ดังกล่าวจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

5-1-6 ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสม

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการใช้เคอร์โทซิสและแซนนอนเอนโทโรปีเป็นตัวบ่งชี้ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตที่เหมาะสมไม่ประสบความสำเร็จในภาพรวม โดยเฉพาะที่ SNR=-13 และ -15dB อีกทั้งผลการตรวจจับยังขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวสัญญาณความเสียหาย ( $f_n$  และ  $\xi$ ) อยู่ค่อนข้างมาก แต่จากการสังเกตลักษณะของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในหัวข้อที่ 5-1-3 และหัวข้อที่ผ่านมา จะพบว่าจุดที่พารามิเตอร์ของตัวกรองมีค่าเหมาะสมที่สุด จะเป็นจุดที่ให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่มียอดแหลมที่เป็นฮาร์มอนิกที่เด่นชัดขึ้นมาจากพื้นของสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการสร้างตัวบ่งชี้ที่พิจารณาความเด่นชัดของยอดแหลมที่เป็นฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัม โดยนิยามตัวบ่งชี้ดังกล่าวได้ดังสมการ (5-3)

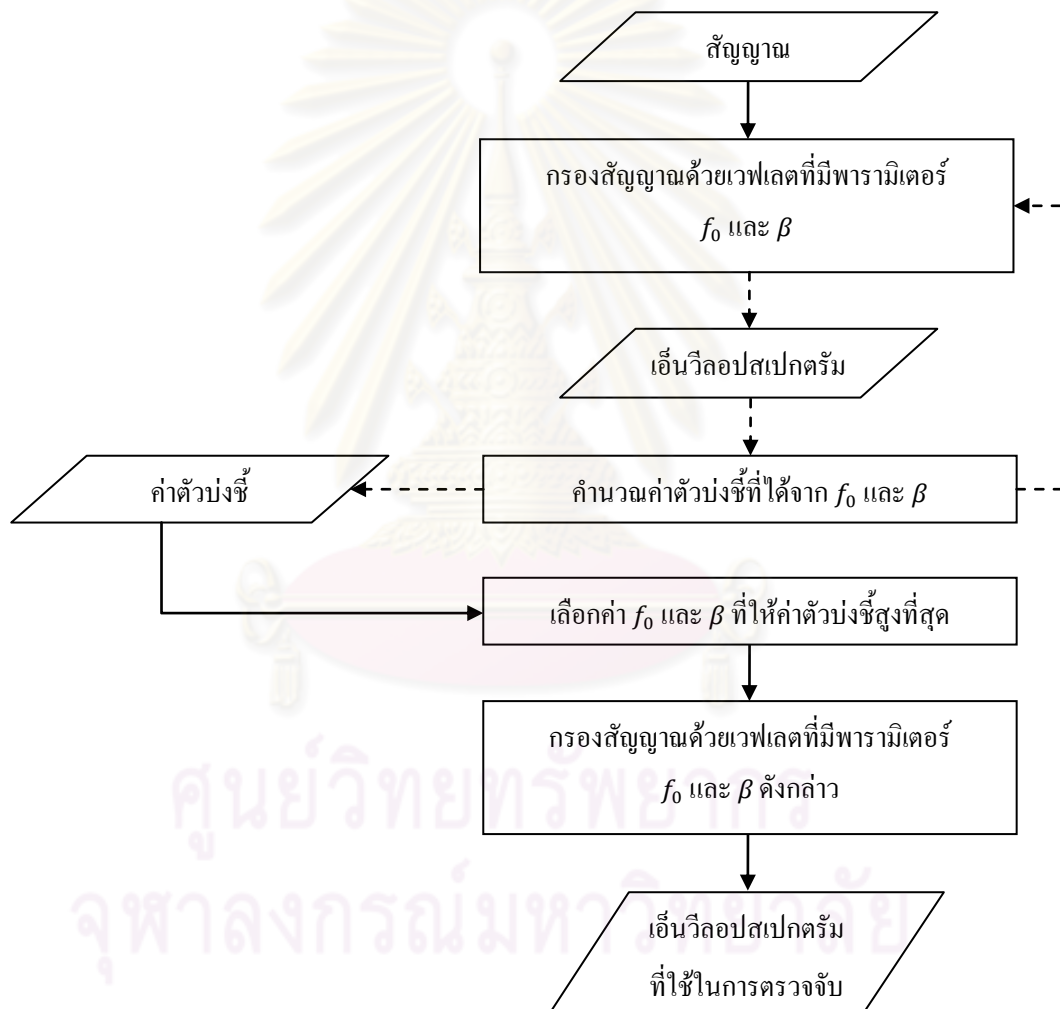
$$para(f_0, \beta) = \max \left( \frac{\sum_i HF_i^j(f_0, \beta)}{\overline{ES}(f_0, \beta)} \right) \quad (5-3)$$

เมื่อ  $HF_i^j$  คือค่ายอดตัวที่  $i$  ของของตระกูลฮาร์มอนิกที่  $j$  ที่ตรวจพบในเอ็นวีลอปสเปกตรัม  $ES$  ที่ได้จากการกรองสัญญาณความเสียหายด้วยตัวกรองเวฟเลตที่มีพารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  และ  $\overline{ES}$  คือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในช่วงที่กำหนด หรือสามารถกล่าวได้ว่า สมการ (5-3) เป็นการเลือกอัตราส่วนของผลรวมของค่ายอดที่เป็นฮาร์มอนิกแต่ละตระกูลกับค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่มีค่ามากที่สุด โดยกำหนดให้ช่วงในการหาความถี่พื้นฐาน และเกณฑ์ความสูงของสัญญาณที่จะถือว่าเป็นยอดเหมือนกับที่ใช้ในการประเมินความสามารถของตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนจะขอยกตัวอย่างการคำนวณค่า ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอขึ้นมาใหม่โดยใช้สัญญาณความเสียหาย  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ที่ SNR=-10dB โดยใช้ตัวกรองเวฟเลตที่มี  $f_0=8000\text{Hz}$  และ  $\beta = 2286\text{Hz}$  ซึ่งมีเอ็นวีลอปสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 5-34 มาพิจารณาอีกครั้ง ดังรูปที่ 5-38



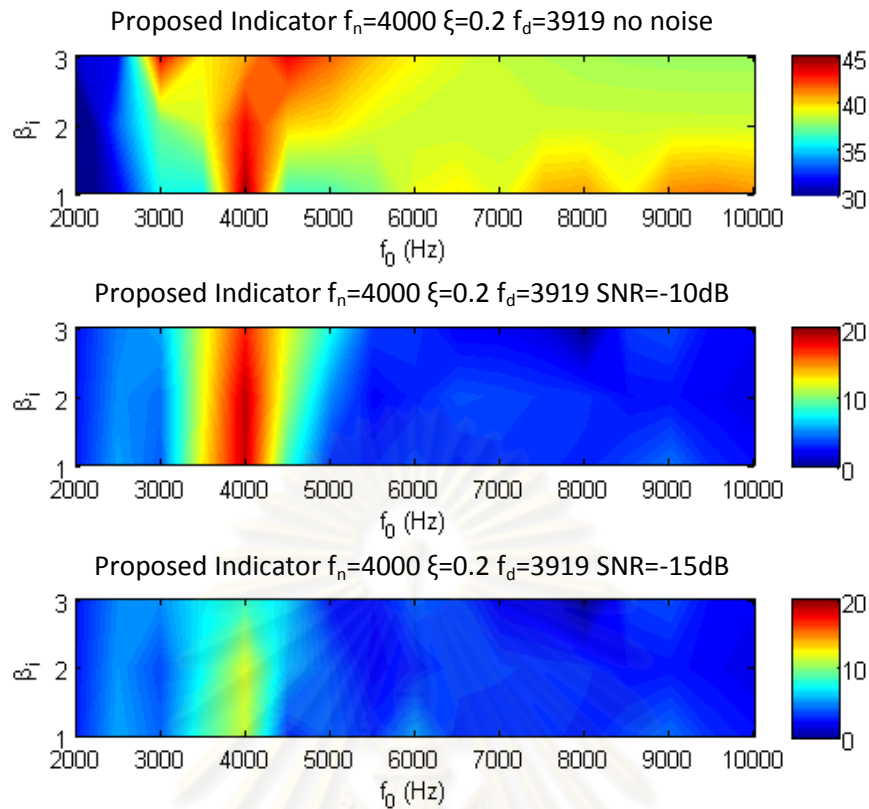
รูปที่ 5-38 ตัวอย่างวิธีการหาตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ

หลังจากที่ได้หาค่าที่เป็นความถี่พื้นฐานและฮาร์มอนิกด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่แล้ว จะพบว่ามียอดที่เป็นฮาร์มอนิกอยู่ 2 ตระกูลด้วยกัน คือที่ 211.7 และ 374.5Hz โดยตระกูลของ 211.7Hz จะมีอยู่ 2 ฮาร์มอนิก และไม่พบฮาร์มอนิกในตระกูล 374.5Hz จากนั้นจึงคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างผลรวมของยอดในตระกูลกับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเอ็นวีลอปสเปกตรัม (เส้นสีบานเย็น) จะได้ค่าตัวบ่งชี้ของตระกูล 211.7 และ 374.5Hz เป็น 11.45 และ 2.02 ตามลำดับ ดังนั้นค่าตัวบ่งชี้สำหรับรูปนี้คือ 11.45 ซึ่งเกิดจากฮาร์มอนิก 211.7Hz พารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ที่เหมาะสมที่สุดจะให้ค่าตัวบ่งชี้มีค่ามากที่สุด โดยรูปที่ 5-39 จะเป็นการแสดงขั้นตอนในการหาเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตรวจจับความเสียหาย

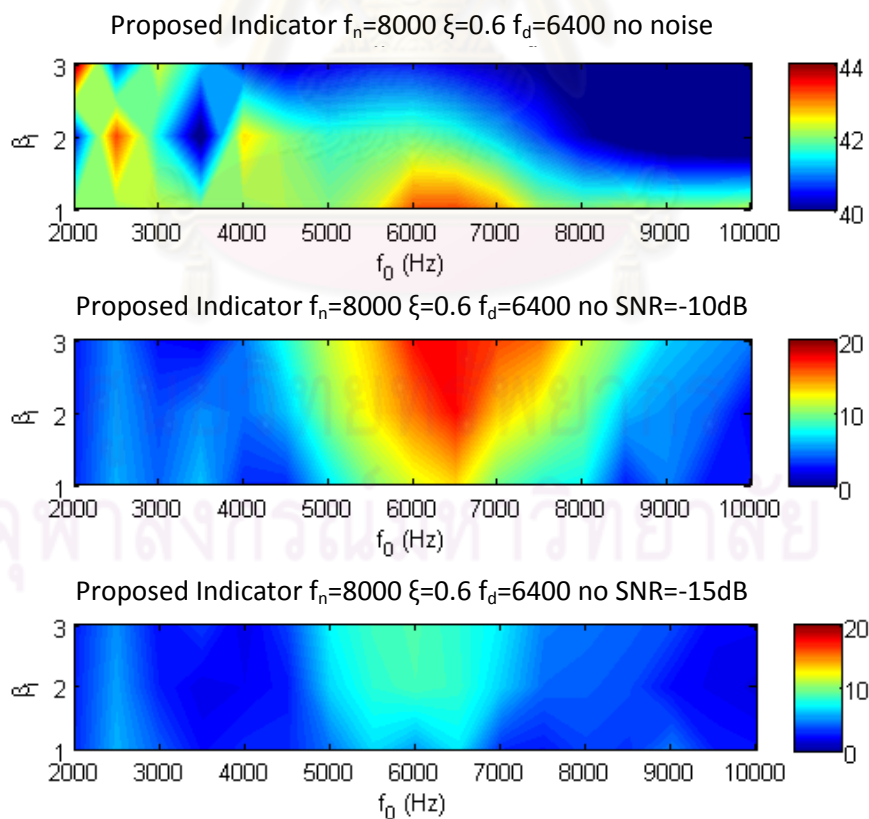


รูปที่ 5-39 ขั้นตอนในการหาพารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ

รูปที่ 5-40 (ก) และ (ข) จะเป็นการแสดงคอนทัวร์พล็อตของตัวบ่งชี้ดังกล่าวของสัญญาณความเสียหาย  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  และ  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับคอนทัวร์พล็อตของเคอร์โทซิสและแซนนอนเอนโทรปีในรูปที่ 5-30 และ 5-31 ตามลำดับ

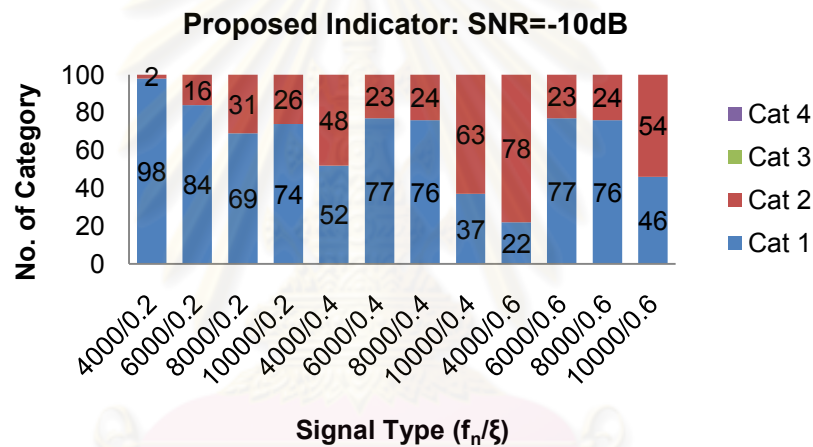


รูปที่ 5-40 (ก) ค่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอของสัญญาณความเสียหาย  $f_n=4000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.2$  ที่ SNR ต่าง ๆ

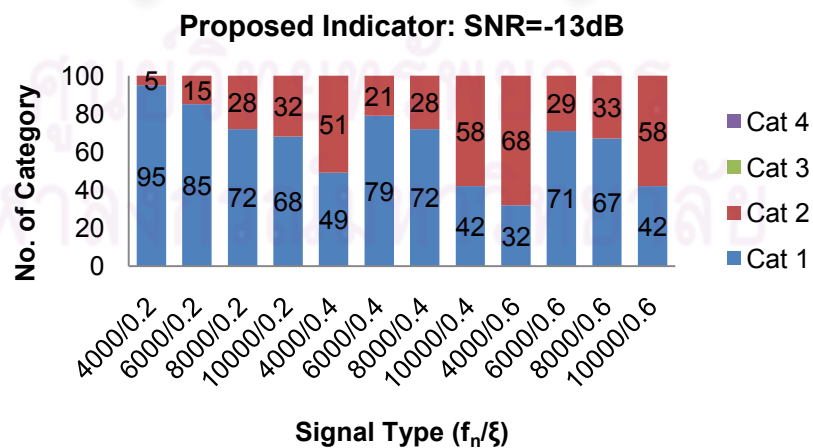


รูปที่ 5-40 (ข) ค่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอของสัญญาณความเสียหาย  $f_n=8000\text{Hz}$ ,  $\xi=0.6$  ที่ SNR ต่าง ๆ

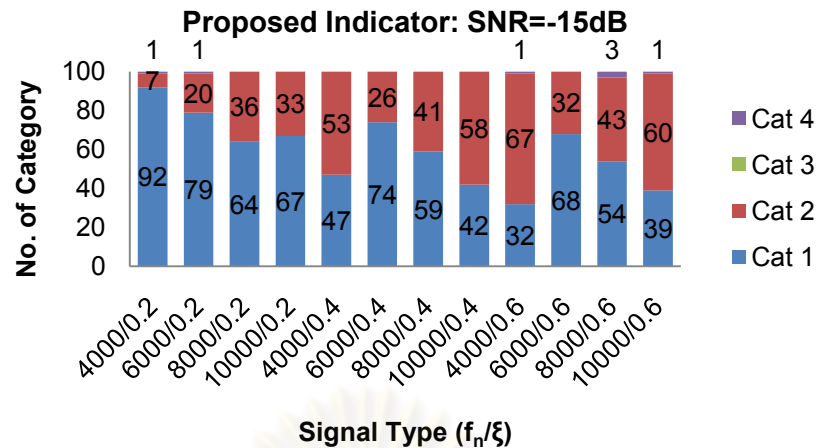
เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนในรูปที่ 5-40 จะพบว่าในกรณีของสัญญาณรบกวนชนิดนี้  $f_0$  ที่ให้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอสูงที่สุดมีค่าใกล้เคียงกับ  $f_d$  ของสัญญาณความเสียหายมากกว่าการใช้เคอร์โทซิสและแซนนอนเอนโทรปีดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5-30 และ 5-31 ตามลำดับ ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่า  $f_0$  ที่ให้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอสูงที่สุดมีค่าใกล้เคียงกับ  $f_d$  ของสัญญาณความเสียหาย (เป็น  $f_0$  ตัวที่อยู่ใกล้กับ  $f_d$  มากที่สุด) แม้ว่าเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมากขึ้นจะทำให้ค่าของตัวบ่งชี้ที่นำเสนอจะมีค่าที่ลดลงก็ตาม แต่อย่างไรก็ตาม การแสดงดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะสรุปว่าตัวบ่งชี้ดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการตรวจจับได้จริง ดังนั้นจึงประเมินความสามารถของตัวบ่งชี้ดังกล่าวด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 5-1-5 กับสัญญาณที่เป็นผลรวมของสัญญาณความเสียหายแบบต่าง ๆ กับสัญญาณรบกวนจำนวน 100 ชุด ที่ SNR ต่าง ๆ กัน เช่นเดียวกับที่ใช้ประเมินเคอร์โทซิสและแซนนอนเอนโทรปี จะได้ผลการตรวจจับดังแสดงในรูปที่ 5-41



รูปที่ 5-41 (ก) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ SNR=-10dB



รูปที่ 5-41 (ข) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ SNR=-13dB



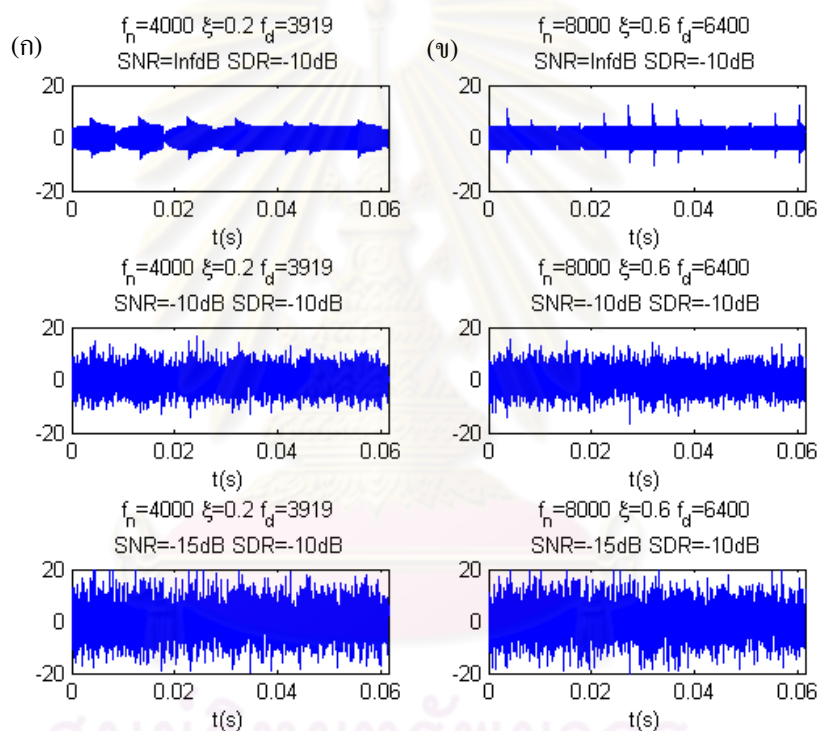
รูปที่ 5-41 (ค) ผลการตรวจจับความเสียหายโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ SNR=-15dB

จากรูปที่ 5-41 จะเห็นได้ว่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอสามารถตรวจจับสัญญาณความเสียหายได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่า อีกทั้งความถูกต้องในการตรวจจับยังไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายเหมือนการใช้เคอร์โทซิสหรือแซนนอนอนโทโรปีเป็นตัวบ่งชี้อีกด้วย แต่วิธีการนี้มีข้อเสียก็คือจะมีอัตราการเตือนที่ผิดพลาด (false alarm) อยู่ที่ 23% ซึ่งสูงกว่าตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวอย่างเห็นได้ชัด แต่ว่าการเตือนที่ผิดพลาดยังให้ผลอยู่ในด้านที่ปลอดภัย (safe side) ของการเฝ้าตรวจสภาพเครื่องจักร ซึ่งเราอาจจะวัดและประเมินผลสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนดังกล่าวซ้ำ ๆ อีกเพื่อยืนยันว่าสัญญาณว่าเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง ๆ ไม่ใช่การเตือนที่ผิดพลาด เนื่องจากถ้าเป็นการเตือนที่ผิดพลาด โอกาสที่สัญญาณรบกวนจะซ้ำกับสัญญาณชุดเดิมที่ให้การเตือนที่ผิดพลาดเป็นไปได้ยากมาก อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการตรวจจับความเสียหายที่ระดับของสัญญาณรบกวนสูงแล้ว ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงตัดสินใจใช้พารามิเตอร์ตัวใหม่ที่นำเสนอในการศึกษาเกี่ยวกับการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตในส่วนต่อ ๆ ไป

#### 5-1-7 ผลของสัญญาณที่คาดเดาได้ที่มีต่อการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยเวฟเลต และการใช้โอโตรีเกรสซีฟเพื่อลดสัญญาณส่วนดังกล่าว

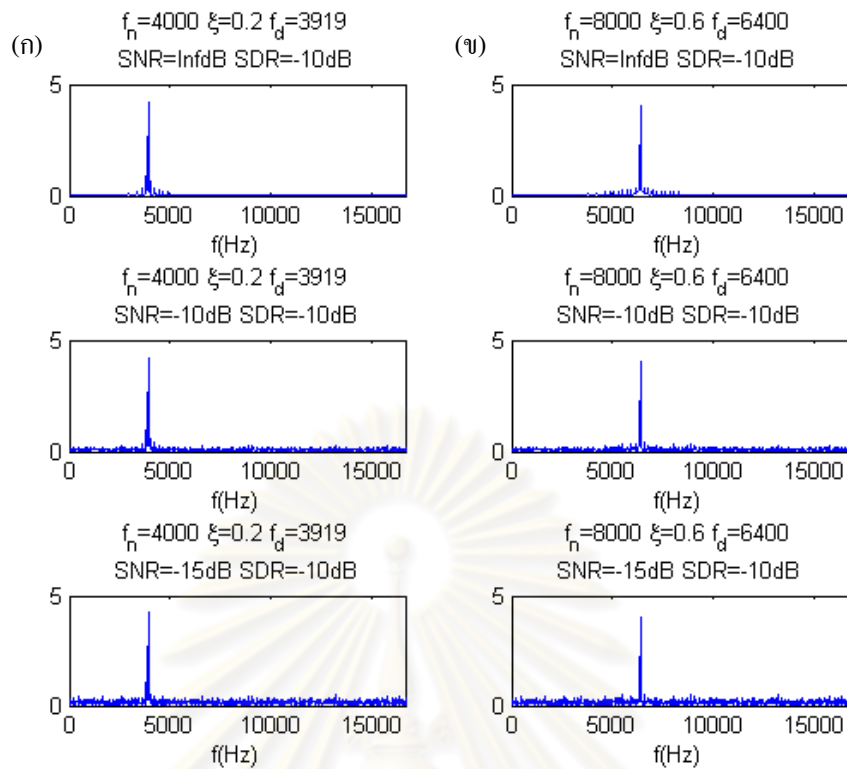
หลังจากที่ตัดสินใจเลือกตัวบ่งชี้ที่นำเสนอขึ้นมาใหม่เป็นตัวบ่งชี้ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวกรองเวฟเลตในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ต่อมาจะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ (deterministic) ที่มีต่อการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้คือ สัญญาณรูปไซน์ ซึ่งสามารถเกิดได้จากความบกพร่องอื่น ๆ ของเครื่องจักรที่ไม่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของตลับลูกปืน เช่น ความไม่ได้ศูนย์ ความไม่สมดุล เป็นต้น แต่เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวมักจะปรากฏเป็นขอดในฟูริเยร์สเปกตรัมในช่วงความถี่ไม่เกิน 10 เท่าของความถี่การหมุนของเพลลา ดังนั้นความถี่ดังกล่าวจึงไม่มีทางที่จะผ่านตัวกรองเวฟเลตเข้ามาได้ เนื่องจาก

ความถี่กึ่งกลางที่ต่ำที่สุดของตัวกรองมีค่า 2000Hz และที่ความถี่ดังกล่าวจะมีความกว้างของแถบความถี่ผ่านไม่เกิน 571Hz ดังนั้นจึงจะพิจารณาเพียงผลที่เกิดจากสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ (สัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f_d$ ) ที่มีความถี่อยู่ในความกว้างของแถบความถี่ผ่านของตัวกรองเวฟเลตที่มีต่อผลการตรวจจับดังกล่าว โดยกำหนดให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อส่วนที่คาดเดาได้ (signal to deterministic part ratio: SDR) เป็น -10dB และความถี่ของส่วนที่คาดเดาได้มีค่าเท่ากับ  $f_d$  ของสัญญาณความเสียหาย เมื่อนำส่วนที่คาดเดาได้มารวมกับสัญญาณความเสียหายดังรูปที่ 5-12 จะได้สัญญาณความเสียหายและฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณดังกล่าว ดังรูปที่ 5-42 และ 5-43 ตามลำดับ โดยจะพบว่าฟูรีเยร์สเปกตรัมมีลักษณะเป็นยอดแหลมชัดเจนที่ความถี่  $f_d$  ของสัญญาณไซน์ โดยมีสัญญาณที่ความถี่อื่น ๆ ต่ำมาก



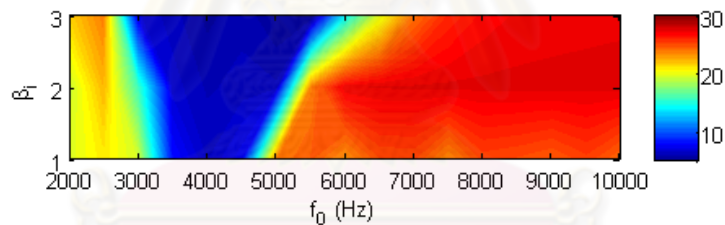
รูปที่ 5-42 สัญญาณในรูปที่ 5-12 เมื่อรวมกับส่วนที่คาดเดาได้ที่ SDR=-10dB

จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวไปหาค่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอที่พารามิเตอร์  $f_0$  และ  $\beta$  ต่าง ๆ จะได้คอนทัวร์พล็อตดังรูปที่ 5-44 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 5-40 จะพบว่าในกรณีที่ไม่มีการรบกวน ช่วงความถี่  $f_0$  ที่ใกล้กับ  $f_d$  จะให้ค่าตัวบ่งชี้ที่ต่ำที่สุด และในกรณีที่มีสัญญาณรบกวน จุดที่ค่าตัวบ่งชี้สูงสุดจะไม่เหมือนเดิม โดยมีค่า  $f_0$  ที่ห่างออกจาก  $f_d$  มากกว่าเดิม ดังนั้นเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่สอดคล้องกันนี้อาจจะไม่ได้แสดงลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น เพื่อยืนยันตามที่กล่าวมาจึงแสดงเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ให้ค่าตัวบ่งชี้มากที่สุดเปรียบเทียบกับเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่เกิดจากการกรองสัญญาณด้วย  $f_0 = f_d$  ที่  $\beta = f_0/3.5$  ดังแสดงในรูปที่ 5-45 (สคมถ์ทางซ้ายและขวาตามลำดับ) โดยจะแสดงตระกูลของฮาร์มอนิกที่ให้ค่าตัวบ่งชี้มากที่สุดด้วย

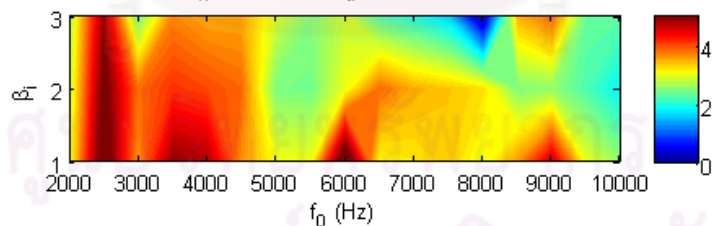


รูปที่ 5-43 พูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-42

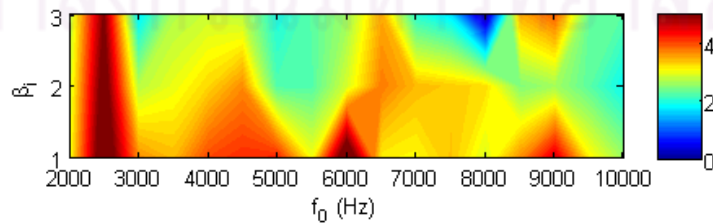
Proposed Indicator:  $f_n=4000$   $\xi=0.2$   $f_d=3919$  SNR=Inf dB SDR=-10 dB



Proposed Indicator:  $f_n=4000$   $\xi=0.2$   $f_d=3919$  SNR=-10 dB SDR=-10 dB

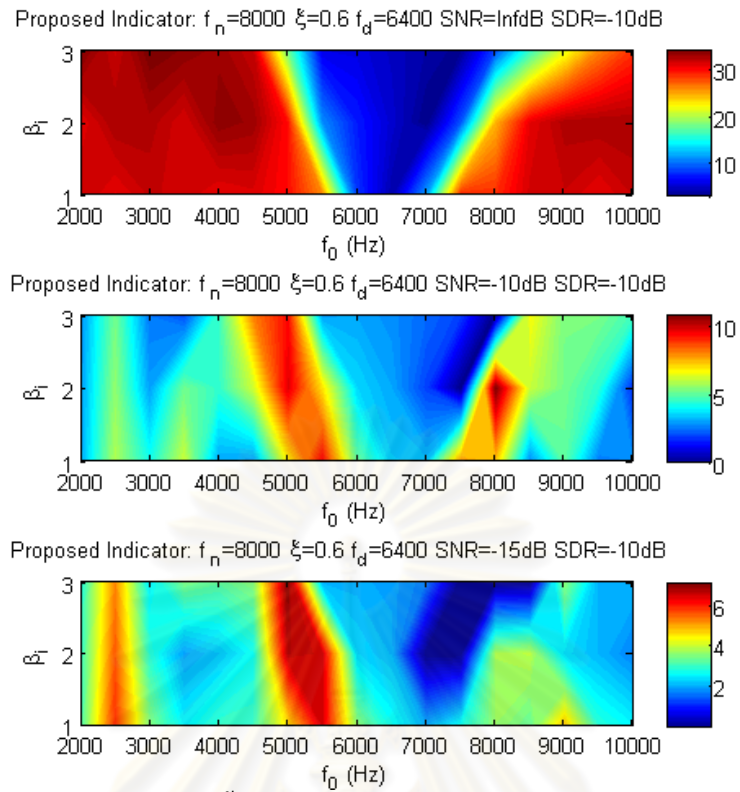


Proposed Indicator:  $f_n=4000$   $\xi=0.2$   $f_d=3919$  SNR=-15 dB SDR=-10 dB

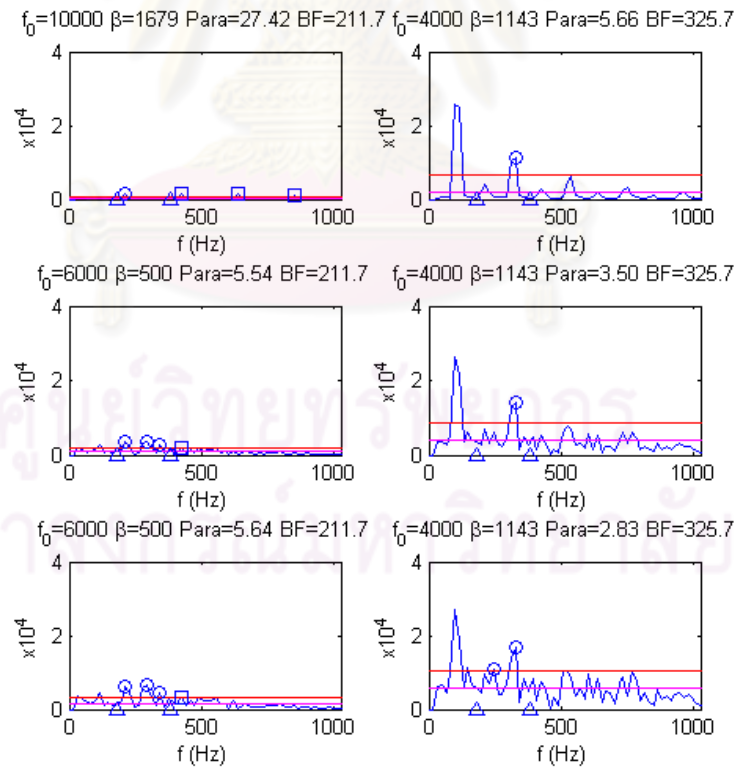


รูปที่ 5-44 (ก) ค่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอของสัญญาณในรูปที่ 5-42 (ก)

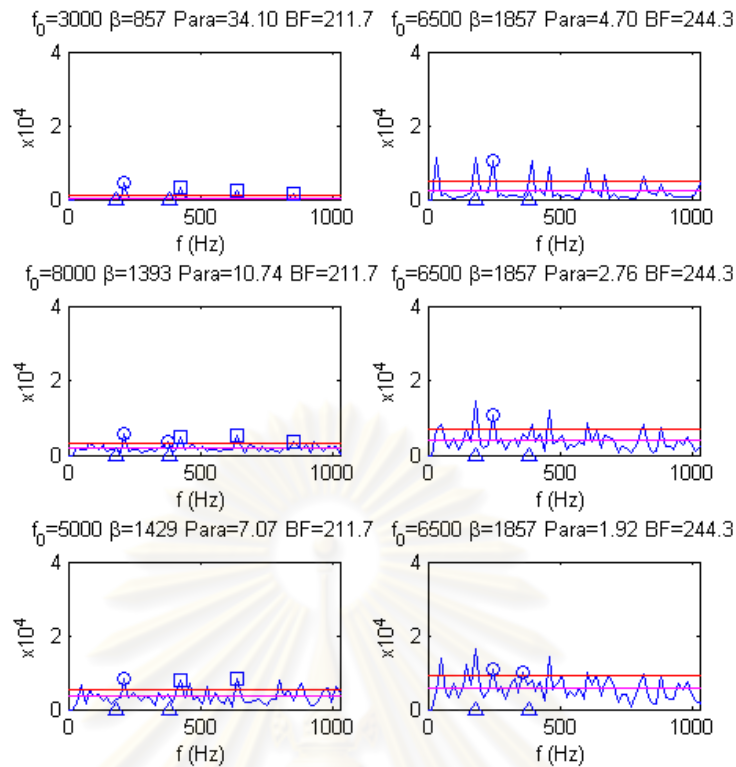




รูปที่ 5-44 (ข) ค่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอของสัญญาณในรูปที่ 5-42 (ข)



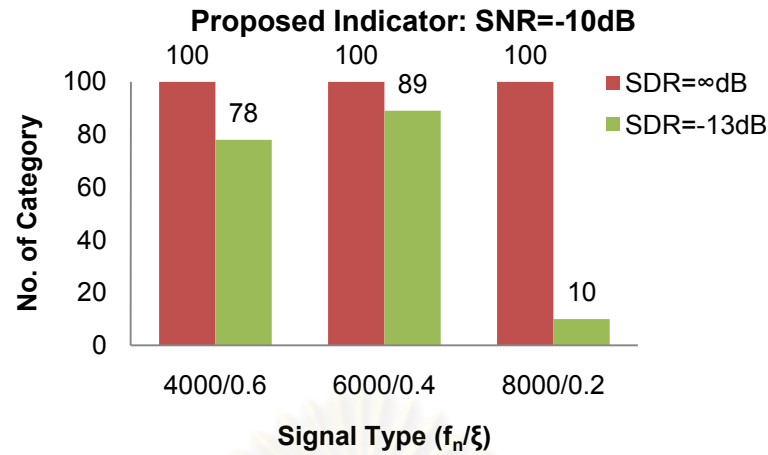
รูปที่ 5-45 (ก) เปรียบเทียบเอ็นวิลอปสเปกตรัมที่ได้จากค่าสูงสุดในรูปที่ 5-44 (ก) กับที่ได้จากการกรองที่  $f_0 = f_d$  (สคมถ้ทางซ้ายและขวาตามลำดับ)



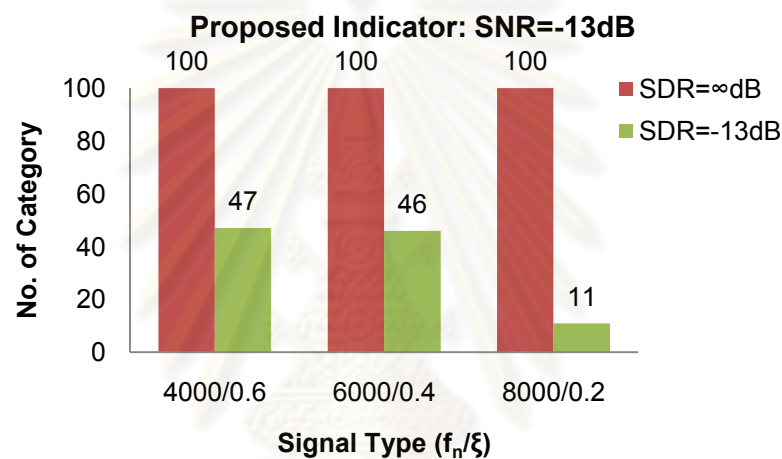
รูปที่ 5-45 (ข) เปรียบเทียบเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากค่าสูงสุดในรูปที่ 5-44 (ข) กับที่ได้จากการกรองที่  $f_0 = f_d$

จากรูปที่ 5-45 โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีความถี่สัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่าถ้ามีความถี่สัญญาณส่วนที่คาดเดาได้สามารถรบกวนอยู่ในสัญญาณความเสียหาย ลักษณะยอดของเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะเปลี่ยนไปทำให้ไม่สามารถตรวจพบยอดที่แสดงถึงความเสียหายของตลับลูกปืนได้ (ขนาดเล็กจนไม่ผ่านเกณฑ์ดังรูปที่ 5-45(ก) หรือตรวจไม่พบความถี่ของความเสียหายเลยดังรูปที่ 5-45(ข)) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ส่งผลทำให้ความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายของตัวบ่งชี้ที่นำเสนอลดลง และเมื่อพิจารณาเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ให้ค่าตัวบ่งชี้สูงที่สุด จะพบว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมดังกล่าวยังสามารถแสดงถึงลักษณะของยอดที่มีความถี่ของความเสียหายที่ถูกต้อง แต่ลักษณะของยอดดังกล่าวไม่ชัดเจนนักเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นของสัญญาณรบกวน เนื่องจาก  $f_0$  ที่ห่างออกจาก  $f_d$  ทำให้ส่วนที่ผ่านการกรองเป็นส่วนของสัญญาณความเสียหายที่ถูกกลบด้วยสัญญาณรบกวนมาก

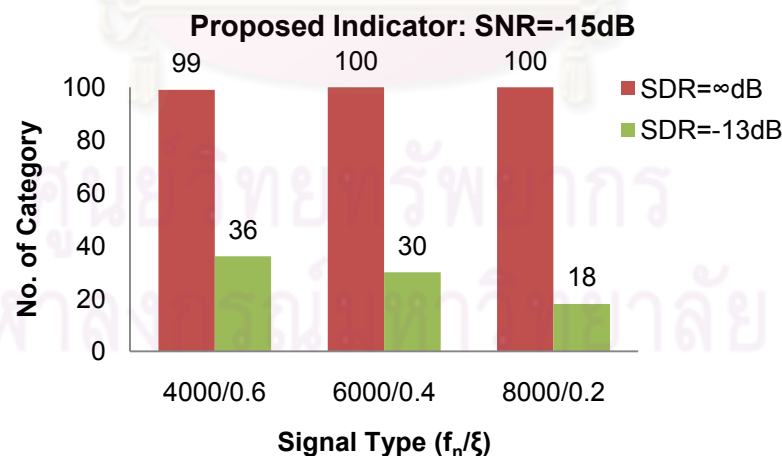
ในรูปที่ 5-46 จะแสดงความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น (ผลรวมของผลการตรวจจับประเภท 1 และ 2) ของสัญญาณความเสียหายในกรณี  $f_n = 4000\text{Hz}$   $\xi = 0.6$ ,  $f_n = 6000\text{Hz}$   $\xi = 0.4$  และ  $f_n = 8000\text{Hz}$   $\xi = 0.2$  ในกรณีที่ไม่มีความถี่สัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ที่มี  $\text{SDR} = -13\text{dB}$  ที่  $\text{SNR} = -10, -13$  และ  $-15\text{dB}$  โดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอในการปรับตัวกรองเวฟเลต



รูปที่ 5-46 (ก) ความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายที่ SNR=-10dB, SDR=  $\infty$  และ -13dB



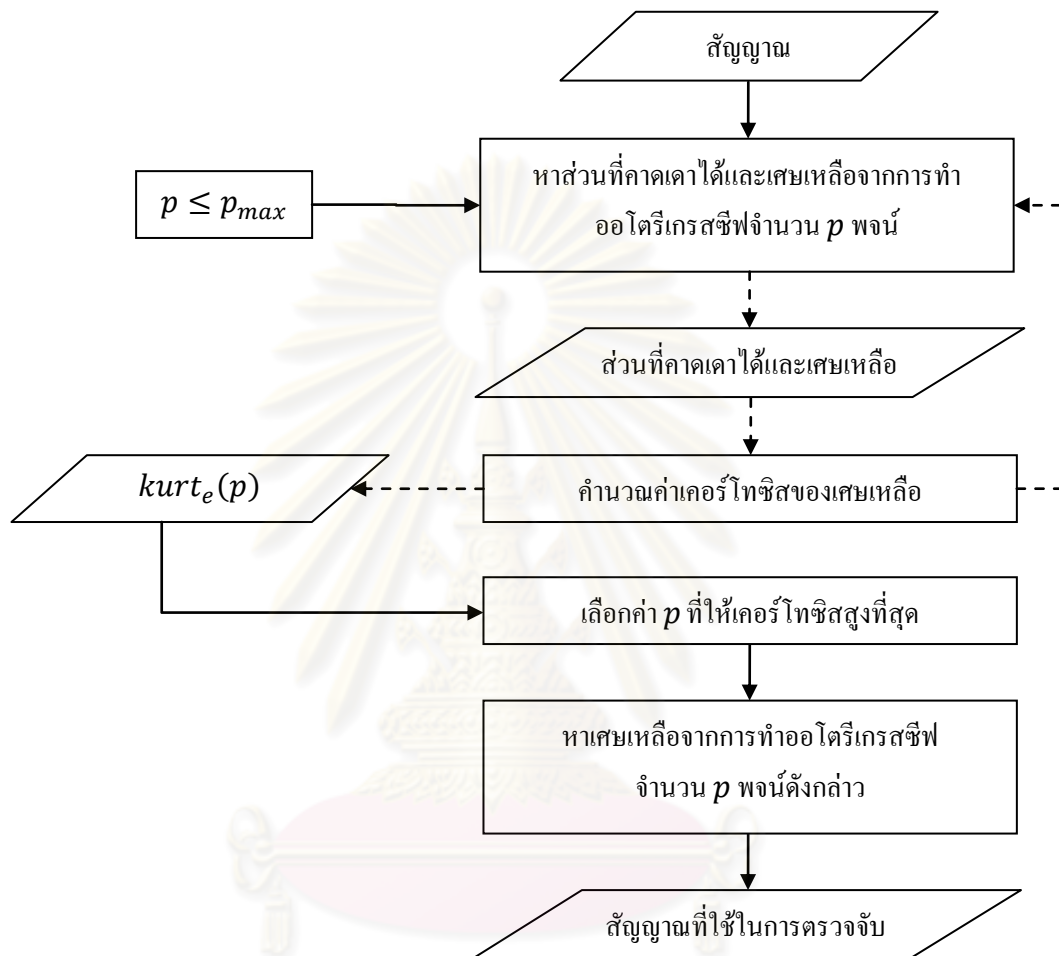
รูปที่ 5-46 (ข) ความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายที่ SNR=-13dB, SDR=  $\infty$  และ -13dB



รูปที่ 5-46 (ค) ความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายที่ SNR=-15dB, SDR=  $\infty$  และ -13dB

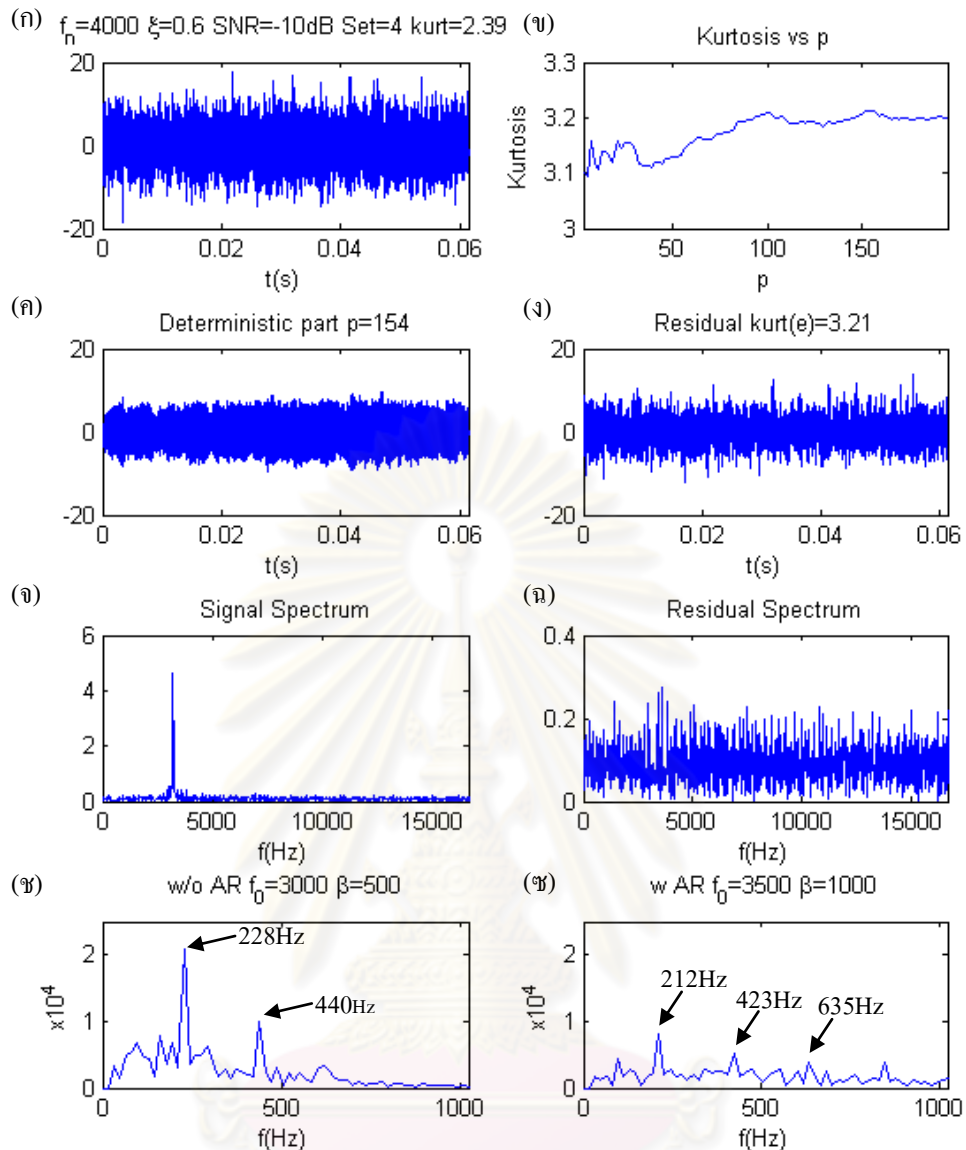
จากรูปที่ 5-46 จะเห็นได้ว่าความถูกต้องของการตรวจจับสัญญาณความเสียหายโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอในการปรับตัวกรองเวฟเลตมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อมีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้เข้ามารบกวน โดยเฉพาะในกรณีที่ SNR มีค่าต่ำ ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการลดสัญญาณส่วนที่คาด

ค่าได้ที่เข้ามารบกวนสัญญาณดังกล่าว เพื่อที่จะทำให้สามารถขยับ  $f_0$  เข้าไปใกล้  $f_d$  ได้มากขึ้น โดยที่ผลกระทบที่เป็นข้อความถี่ที่เกิดจากส่วนดังกล่าวในเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะลดลง มีผู้นำเสนอวิธีออดิโตรีเกรสซีฟ [19] ในการลดส่วนที่คาดเดาได้ดังกล่าว โดยมีหลักการในการทำดังแสดงในรูปที่ 5-47 ทั้งนี้ได้กล่าวถึงแนวคิดและสมการของวิธีออดิโตรีเกรสซีฟไว้ในหัวข้อที่ 3-3-3



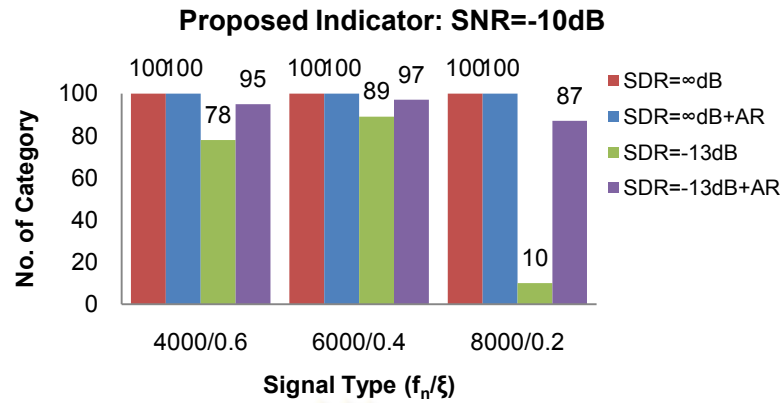
รูปที่ 5-47 ขั้นตอนในการทำออดิโตรีเกรสซีฟ

รูปที่ 5-48 เป็นการแสดงตัวอย่างผลที่ได้จากการทำออดิโตรีเกรสซีฟของสัญญาณ โดย (ก) คือสัญญาณความเสียหายที่มีส่วนของสัญญาณที่คาดเดาได้รวมอยู่ด้วย, (ข) คือค่าเคอร์โทซิสที่ได้จากการทำออดิโตรีเกรสซีฟในแต่ละจำนวนพจน์  $p$ , (ค) และ (ง) คือส่วนที่คาดเดาได้และเศษเหลือจากการทำออดิโตรีเกรสซีฟที่ให้ค่าเคอร์โทซิสของเศษเหลือมีค่าสูงสุด, (จ) และ (ฉ) คือฟูริเยร์-สเปกตรัมของสัญญาณเริ่มต้นและเศษเหลือ และ (ช) และ (ซ) คือ เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ให้ค่าตัวบ่งชี้สูงสุดของสัญญาณเริ่มต้นและเศษเหลือตามลำดับ

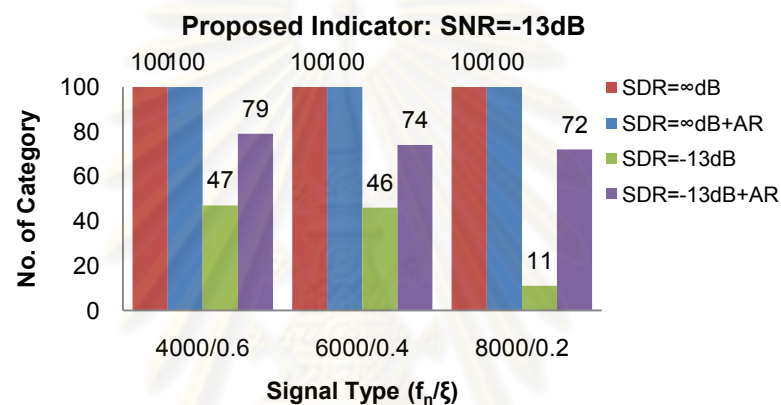


รูปที่ 5-48 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทำอโตรีเกรสซีฟของสัญญาณ

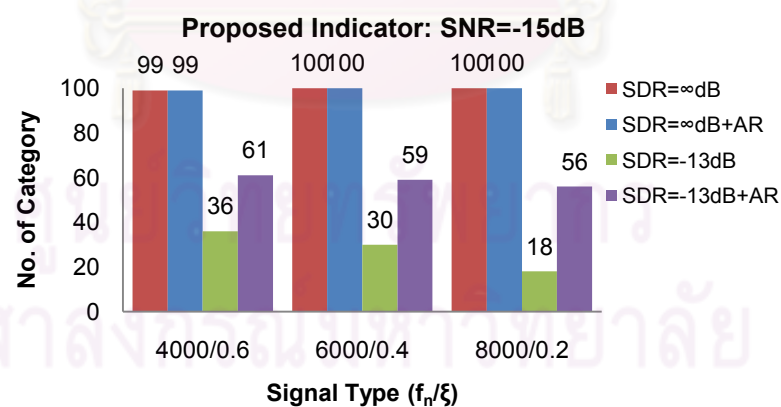
จากตัวอย่างในรูปที่ 5-48 จะเห็นได้ว่าการทำอโตรีเกรสซีฟสามารถช่วยให้เอ็นวีลอป-สเปกตรัมที่ให้ค่าตัวบ่งชี้สูงสุดสามารถแสดงถึงยอดที่สอดคล้องกับความเสียหายได้ ในรูปที่ 5-49 แสดงถึงความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ออโตรีเกรสซีฟตามขั้นตอนของรูปที่ 5-48 ทั้งนี้เพื่อเป็นการประเมินว่าในกรณีที่ไม่มีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้วิธีการนี้จะลดความแม่นยำในการตรวจจับหรือไม่ จึงแสดงเปรียบเทียบผลการตรวจจับในกรณีที่มีสัญญาณไม่มีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้มารบกวนเมื่อใช้และไม่ใช้ออโตรีเกรสซีฟในผลการตรวจจับไว้ด้วย ในรูปที่ 5-49 สีแดงและสีน้ำเงินแสดงถึงความถูกต้องในการตรวจจับของกรณีที่ไม่มีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้เมื่อไม่ใช้และใช้ออโตรีเกรสซีฟตามลำดับ ส่วนสีเขียวและสีม่วงแสดงถึงความถูกต้องในการตรวจจับของกรณีที่มีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ที่ SDR=-13dB เมื่อไม่ใช้และใช้ออโตรีเกรสซีฟตามลำดับ



รูปที่ 5-49 (ก) ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ออโตรีเกรสซีฟ  
ที่ SNR=-10dB



รูปที่ 5-49 (ข) ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ออโตรีเกรสซีฟ  
ที่ SNR=-13dB



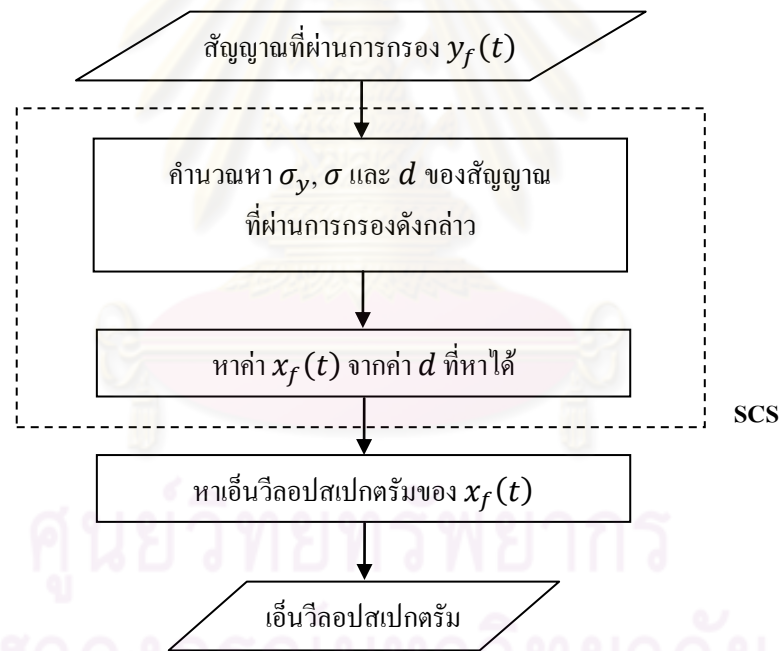
รูปที่ 5-49 (ค) ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ออโตรีเกรสซีฟ  
ที่ SNR=-15dB

จากรูปที่ 3-49 จะเห็นได้ว่าการทำออโตรีเกรสซีฟสามารถเพิ่มความถูกต้องในการตรวจจับลักษณะของสัญญาณความเสียหายในกรณีที่มีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้มารบกวนได้ และในขณะที่เดียวกันก็ไม่ทำให้ความถูกต้องในการตรวจจับกรณีที่มีสัญญาณความเสียหายไม่ได้มีส่วนที่คาดเดา

ได้ลดลง ดังนั้นจึงสามารถใช้ข้อโครีเกรสซีฟปรับสภาพสัญญาณความเสียหายก่อนกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตได้

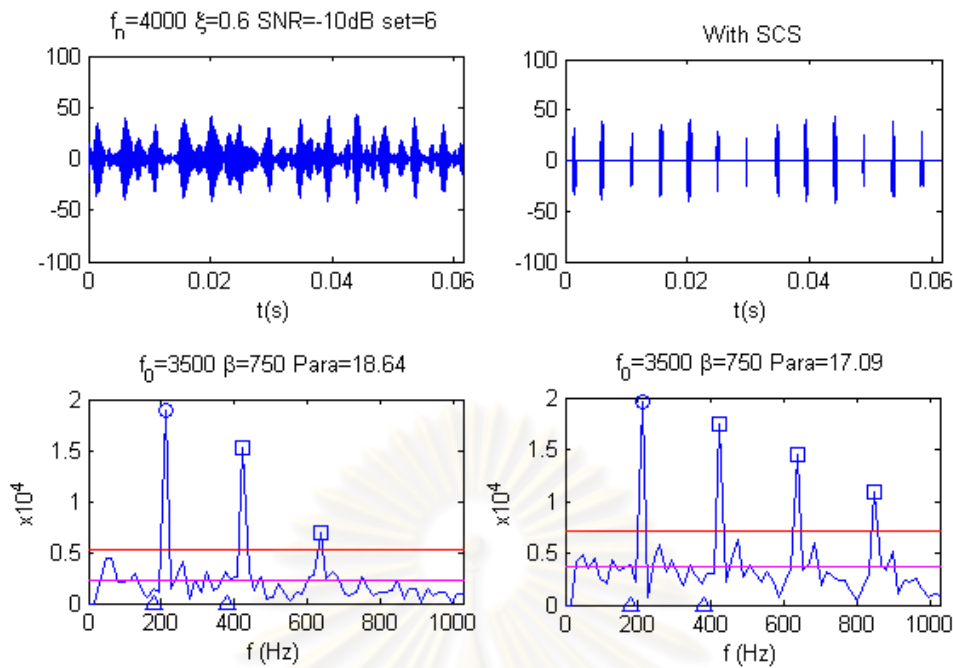
#### 5-1-8 ผลของ sparse code shrinkage ที่มีต่อการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณโดยใช้ตัวกรองเวฟเลต

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลที่เกิดจากการใช้ sparse code shrinkage (SCS) ที่มีต่อลักษณะของเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ใช้ในการตรวจจับความเสียหาย โดยเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ผ่านการทำ SCS ซึ่งได้มาจากการทำ SCS กับสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตตัวที่ให้ค่าตัวบ่งชี้สูงที่สุด จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเอ็นวีลอปสเปกตรัมปกติที่ไม่ได้ผ่าน SCS แต่ได้มาจากตัวกรองเวฟเลตตัวเดียวกัน วัตถุประสงค์และวิธีการทำ SCS ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3-3 สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 5-50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำ SCS เป็นเพียงการปรับลักษณะของสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้วเท่านั้น จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวกรองเวฟเลตเหมือนในกรณีการทำอโครีเกรสซีฟ



รูปที่ 5-50 สรุปขั้นตอนการทำ sparse code shrinkage (SCS)

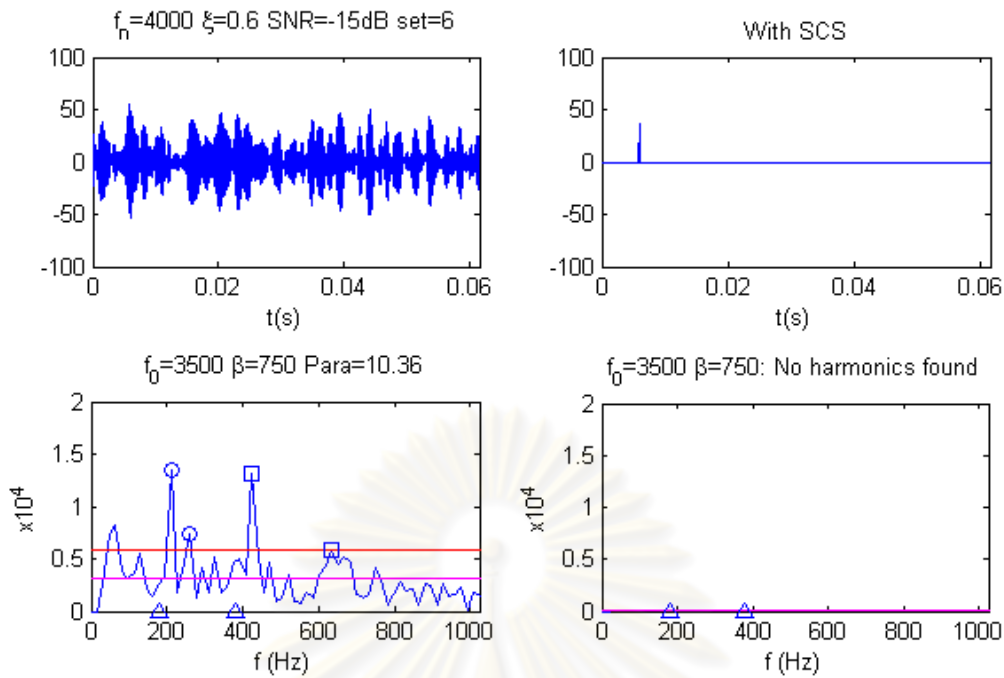
โดยรูปที่ 5-51 เป็นการแสดงตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านการกรองและเอ็นวีลอปสเปกตรัม ทั้งในกรณีก่อนและหลังทำ SCS



รูปที่ 5-51 สัญญาณที่ผ่านการกรองและเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ไม่ผ่านและผ่าน SCS ที่ SNR=-10dB แสดงในสคมถ์ทางซ้ายและขวาตามลำดับ

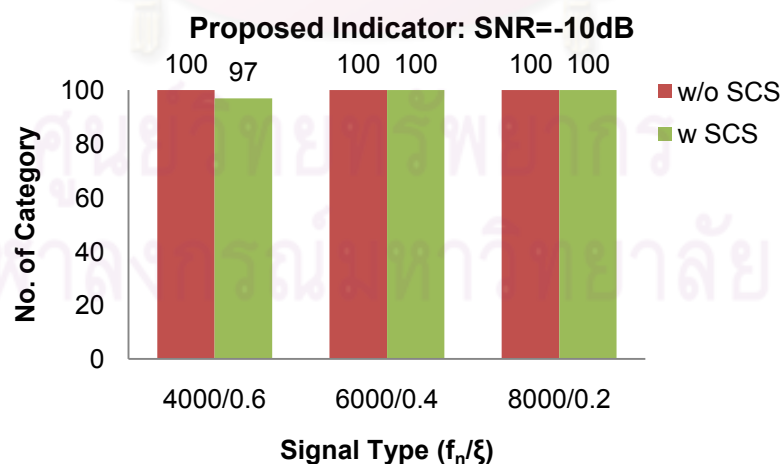
จากรูปที่ 5-51 จะเห็นได้ว่า การทำ SCS สามารถทำให้คาบของความเสียหายชัดเจนขึ้น สังเกตได้จากสัญญาณที่ผ่านการกรอง (รูปแฉวน) และเนื่องจากลักษณะของสัญญาณที่ผ่านการกรองมีความคมชัดมากขึ้น จึงทำให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมมีขนาดของฮาร์มอนิกที่ใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าของตัวบ่งชี้จะมีค่าลดลง เนื่องจากพื้นที่ของสัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้น ดังเห็นได้จากรูปในแถวล่าง แต่เมื่อพิจารณาเอ็นวีลอปสเปกตรัมด้วยสายตา ก็จะเห็นว่าลักษณะของยอดที่เป็นฮาร์มอนิกมีความเด่นชัดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากการทำ SCS คือการปรับค่าของสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต โดยอาศัยเกณฑ์ที่ได้มาจากค่าทางสถิติ ( $\sigma$ ) ของตัวสัญญาณเอง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่เกณฑ์ของ SCS จะสูงมากจนทำให้สัญญาณที่ผ่านการกรองไม่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าวและถูกปรับเป็นศูนย์ โดยเฉพาะในกรณีที่ SNR มีค่าต่ำ ๆ รูปที่ 5-52 จะแสดงผลที่ได้จากการทำ SCS ของสัญญาณความเสียหายลักษณะเดียวกับสัญญาณในรูปที่ 5-51 แต่ปรับ SNR ให้มีค่าเป็น -15dB จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตยังมีลักษณะของสัญญาณแบบสุ่มที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ผ่านการกรองที่ยังไม่ได้ทำ SCS ในรูปที่ 5-51 ทำให้เมื่อทำ SCS แล้วสัญญาณดังกล่าวจึงถูกปรับค่าเป็นศูนย์เกือบทั้งหมด ยังผลให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณดังกล่าวไม่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะของสัญญาณความเสียหายได้



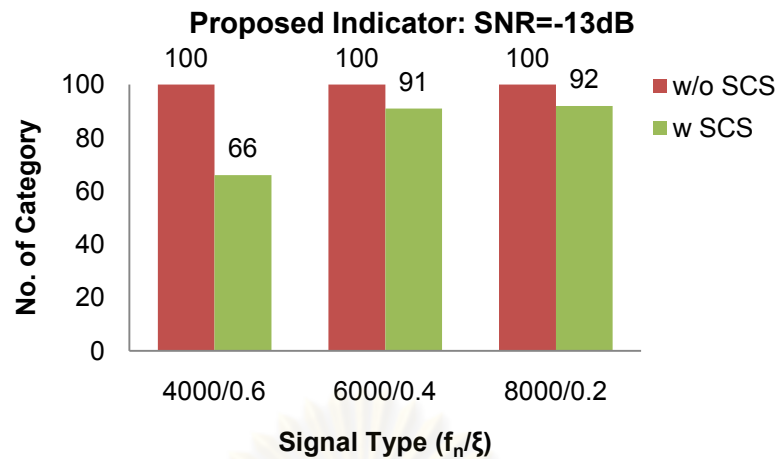


รูปที่ 5-52 สัญญาณที่ผ่านการกรองและเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ไม่ผ่านและผ่าน SCS ที่ SNR=-15dB แสดงในสคมถ์ทางซ้ายและขวาตามลำดับ

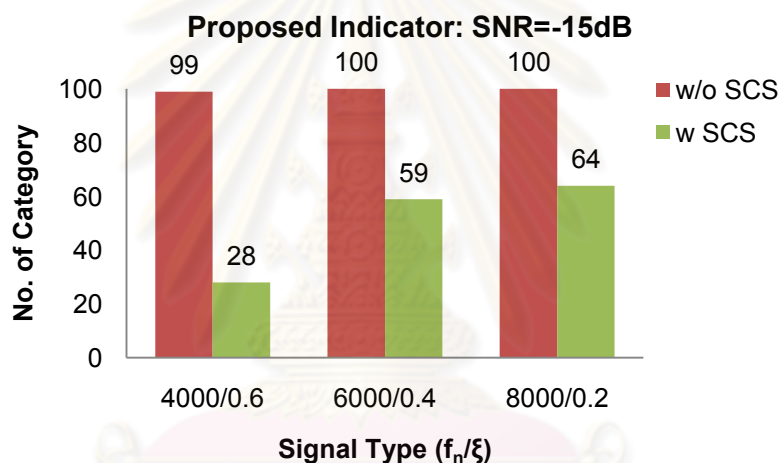
เพื่อเป็นการประเมินว่า SCS ช่วยในการทำให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมแสดงถึงลักษณะถึงความเสียหายได้ชัดเจนขึ้น จะใช้สัญญาณความเสียหายชุดเดียวกับที่ใช้ในการประเมินอโตริเกรสซีฟในหัวข้อที่แล้ว แต่จะไม่มีส่วนของสัญญาณที่คาดเดาได้ โดยจะแสดงความถูกต้องในการตรวจจับของสัญญาณประเภทดังกล่าว (ผลรวมของผลการตรวจจับประเภทที่ 1 และ 2) เมื่อไม่ใช้และใช้ SCS ที่ SNR=-10, -13 และ -15dB ตามลำดับ ได้ผลการประเมินดังแสดงในรูปที่ 5-53



รูปที่ 5-53 (ก) ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ SCS ที่ SNR=-10dB



รูปที่ 5-53 (ข) ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ SCS ที่ SNR=-13dB

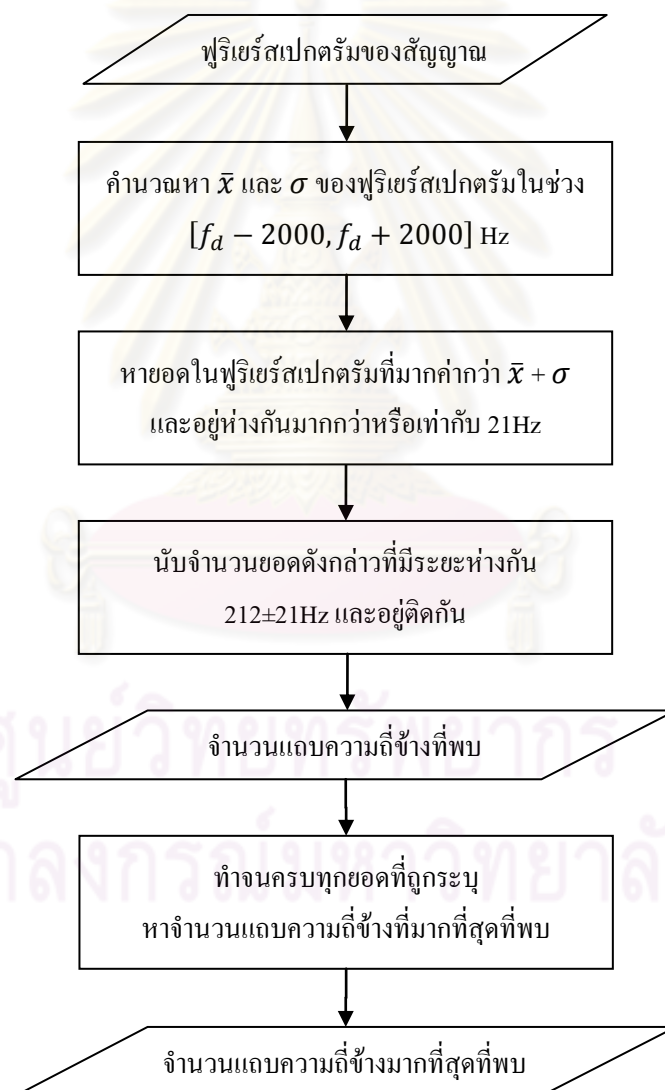


รูปที่ 5-53 (ค) ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเมื่อไม่ใช้และใช้ SCS ที่ SNR=-15dB

จากรูปที่ 5-53 จะเห็นได้ชัดว่าการทำ SCS ถึงแม้ว่าจะมีตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่าทำให้เห็นฮาร์มอนิกที่ชัดเจนขึ้น แต่ในภาพรวมก็จะพบว่าการทำ SCS ทำให้ผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายมีความถูกต้องลดลง โดยเฉพาะกรณีที่ SNR มีค่าต่ำ ๆ นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่ากรณีที่สัญญาณความเสียหายมีค่า  $\xi$  สูง จะให้ความถูกต้องในการตรวจจับที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณมีการแผ่ตัวในโดเมนความถี่ที่มาก ทำให้ระดับของสัญญาณความเสียหายและสัญญาณรบกวนต่างกันไม่ชัดเจน ทำให้ SCS ตีสัญญาณส่วนดังกล่าวเป็นสัญญาณรบกวน จึงปรับสัญญาณส่วนดังกล่าวเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 5-52 จากที่กล่าวมาในข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า SCS ไม่ช่วยให้ความถูกต้องในการตรวจจับเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกลับทำให้ความถูกต้องในการตรวจจับลดลง โดยเฉพาะเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าสูง เนื่องจาก SCS ตีค่าสัญญาณความเสียหายในกรณีดังกล่าวเป็นสัญญาณรบกวน

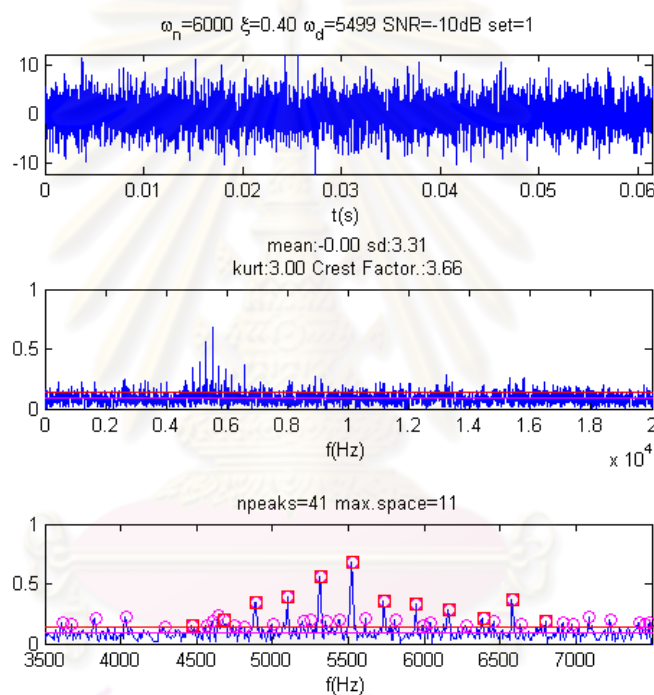
5-1-9 สรุปเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของฟูรีเยร์สเปกตรัม การแยกส่วนประกอบ และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของฟูรีเยร์สเปกตรัม การแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต และการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต โดยในส่วนแรกจะเป็นการประเมินความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัม ในกรณีนี้ความเสียหายจะถูกตรวจพบโดยแถบความถี่ข้างที่มีค่าเท่ากับความถี่ของความเสียหายของคัลบลูกปืน โดยในที่นี้จะกำหนดให้ช่วงการหาแถบความถี่ข้างอยู่ระหว่าง  $f_d - 2000\text{Hz}$  ถึง  $f_d + 2000\text{Hz}$  เนื่องจากสเปกตรัมในช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5-54



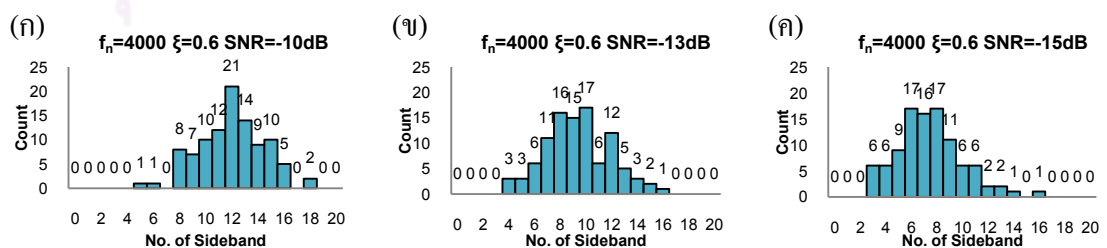
รูปที่ 5-54 สรุปขั้นตอนในการหาแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม

ในรูปที่ 5-55 จะเป็นการแสดงตัวอย่างในการหาแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม โดยจะหาค่าเฉลี่ย (เส้นสีบานเย็น) และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะได้เกณฑ์ในการนับยอดซึ่งกำหนดไว้ให้มีค่าเป็นผลรวมของค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เส้นสีแดง) จากนั้นฟูรีเยร์สเปกตรัมจะถูกตัดมาพิจารณาเฉพาะช่วง  $f_d - 2000\text{Hz}$  ถึง  $f_d + 2000\text{Hz}$  เพื่อใช้หายอดในสเปกตรัมที่มีความสูงมากกว่าเส้นสีแดงในช่วงดังกล่าวจะได้ยอดที่ถูกวงกลมไว้ด้วยสีบานเย็น ต่อมาจึงนำยอดดังกล่าวมาพิจารณาว่ามีลักษณะเป็นแถบความถี่ข้างหรือไม่ ซึ่งกลุ่มของยอดที่ทำให้เกิดแถบความถี่ข้างที่มีระยะห่าง 212Hz มีได้หลายกลุ่ม จากนั้นนับจำนวนช่วงที่มีแถบความถี่ข้างที่อยู่ติดกัน โดยกลุ่มของยอดที่ทำให้เกิดแถบความถี่ข้างที่มีระยะห่าง 212Hz ต่อเนื่องกันมากที่สุดจะถูกวงไว้ด้วยกรอบสี่เหลี่ยมสีแดง จะได้จำนวนแถบความถี่ข้างที่เกิดขึ้นในฟูรีเยร์สเปกตรัมดังกล่าว



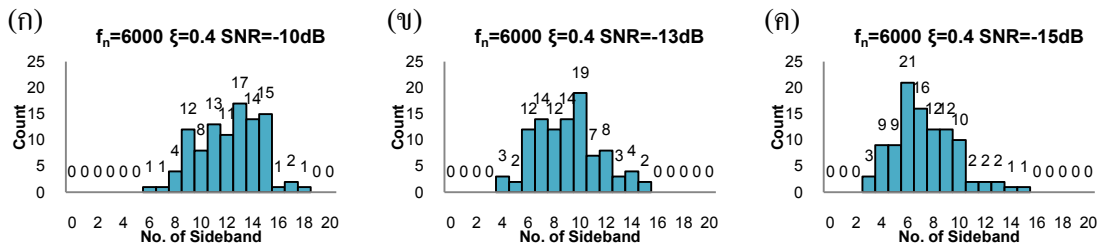
รูปที่ 5-55 ตัวอย่างการหาแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม

เมื่อหาจำนวนแถบความถี่ข้างของสัญญาณความเสียหายตามวิธีที่แสดงมาข้างต้นที่ SNR ต่าง ๆ จนครบ 100 ชุดของสัญญาณรบกวน จะได้ฮิสโตแกรมดังแสดงในรูปที่ 5-56 - 58

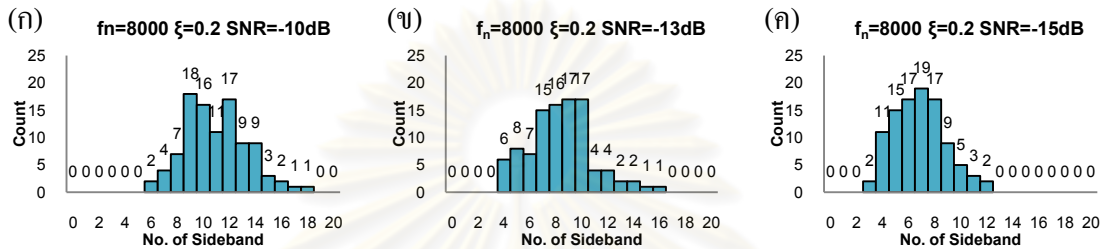


รูปที่ 5-56 ฮิสโตแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณ  $f_n = 4000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.6$ ,

(ก) SNR= -10dB, (ข) SNR= -13dB และ (ค) SNR= -15dB

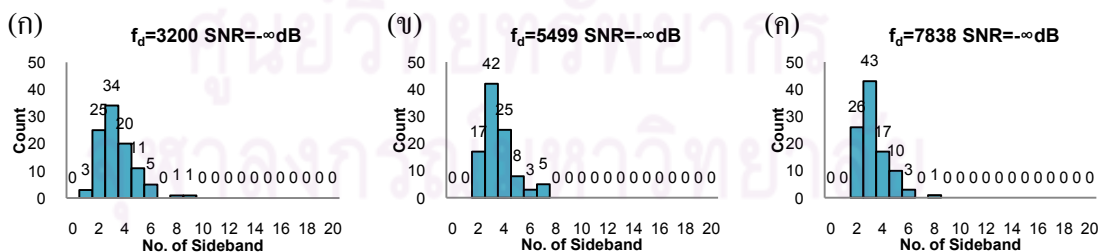


รูปที่ 5-57 ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณ  $f_n = 6000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.4$ ,  
(ก) SNR= -10dB, (ข) SNR= -13dB และ (ค) SNR= -15dB



รูปที่ 5-58 ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณ  $f_n = 8000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.2$ ,  
(ก) SNR= -10dB, (ข) SNR= -13dB และ (ค) SNR= -15dB

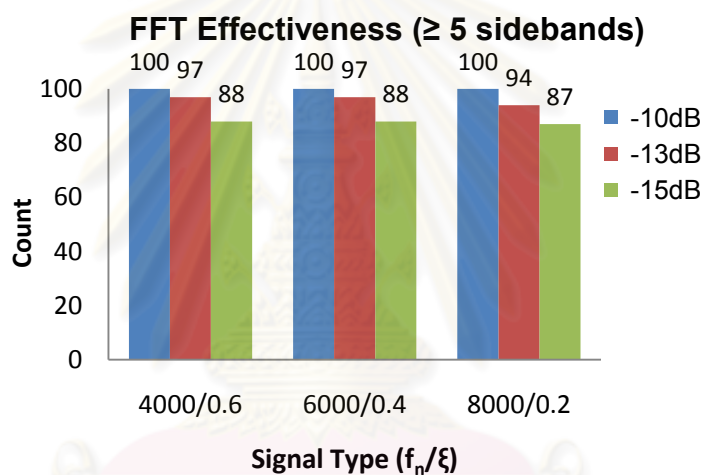
จากฮิสโทแกรมที่ได้ในรูปที่ 5-56 - 5-58 จะเห็นได้ว่าจะพบแถบความถี่ข้างในการตรวจจับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัมเสมอ แต่จะมีประเด็นขึ้นมาว่า แถบความถี่ข้างที่ตรวจพบดังกล่าวเป็นแถบความถี่ข้างที่เกิดจากความเสียหายจริงหรือไม่ หรือเป็นเพียงสิ่งที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนที่มีระยะห่างเท่ากับระยะที่กำลังมองหาพอดี ดังนั้นจึงทดลองหาแถบความถี่ข้างที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีแต่สัญญาณรบกวนอย่างเดียว โดยตัดช่วงความถี่ที่ใช้พิจารณาเช่นเดียวกับช่วงความถี่ที่ใช้พิจารณาตรวจจับแถบความถี่ข้างในรูปที่ 5-56 - 5-58 จะได้ผลการตรวจจับแถบความถี่ข้างในกรณีที่มีแต่สัญญาณรบกวนดังรูปที่ 5-59 (ก) - (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 5-59 ฮิสโทแกรมของจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบของสัญญาณรบกวน ช่วงที่พิจารณา (ก)  $3200\pm 2000\text{Hz}$ , (ข)  $5499\pm 2000\text{Hz}$  และ (ค)  $7838\pm 2000\text{Hz}$

จากรูปที่ 5-59 จะเห็นได้ว่าแม้ในกรณีที่เป็นสัญญาณรบกวน ก็จะพบยอดที่เป็นแถบความถี่ข้างเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะการสุ่มของสัญญาณรบกวนทำให้มีโอกาสที่จะมียอดที่เป็นแถบข้างดังกล่าว แต่จะเห็นได้ว่าจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบอยู่ติดกันจะมีน้อยกว่าในกรณีที่มีความ

เสียหายจริงดังรูปที่ 5-56 - 5-58 นอกจากนี้ยังจะพบอีกว่าไม่ว่าจะตัดช่วงความถี่มาพิจารณาช่วงใด ฮิสโทแกรมที่ได้ในกรณีที่มีแต่สัญญาณรบกวนอย่างเดียวจะมีลักษณะที่คล้ายกัน ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์มีการกระจายตัวไปเท่า ๆ กันในทุกช่วงความถี่ ดังนั้นในการประเมินความสามารถในการตรวจจับของการนับแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัมจะประเมินโดยพิจารณาจากจำนวนแถบความถี่ข้างที่มากพอที่จะแยกแยะว่าความถี่แถบข้างที่เกิดขึ้นมาจากสัญญาณความเสียหาย ไม่ใช่สัญญาณรบกวน โดยในที่นี้จะถือว่าจำนวนแถบความถี่ข้างที่พบต่อเนื่องกันตั้งแต่ 5 ช่องขึ้นไปจะมีที่มาจากความเสียหาย เนื่องจากถ้าพิจารณาในรูปที่ 5-59 แล้วจะพบว่าอัตราการเตือนที่ผิดพลาดจะมีต่ำกว่า 20% เมื่อยึดเอาจำนวนแถบความถี่ข้างดังกล่าวเป็นเกณฑ์ ดังนั้นถ้ายึดจำนวนแถบความถี่ข้าง 5 ช่องขึ้นไปเป็นหลักจะสามารถประเมินความถูกต้องในการตรวจจับด้วยวิธีดังกล่าวได้ผลดังรูปที่ 5-60

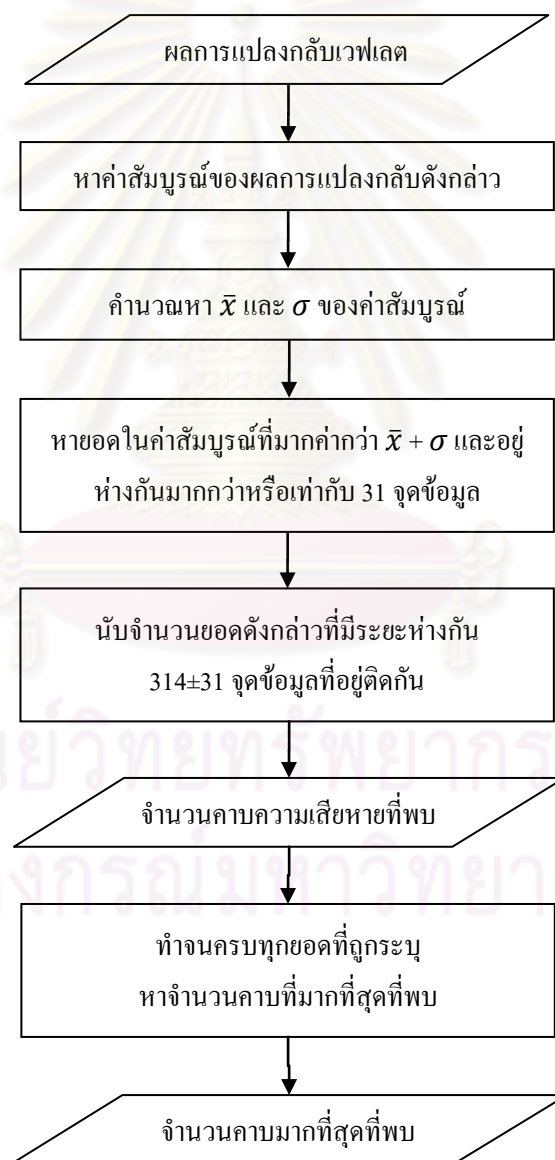


รูปที่ 5-60 สรุปความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการหาแถบความถี่ข้าง

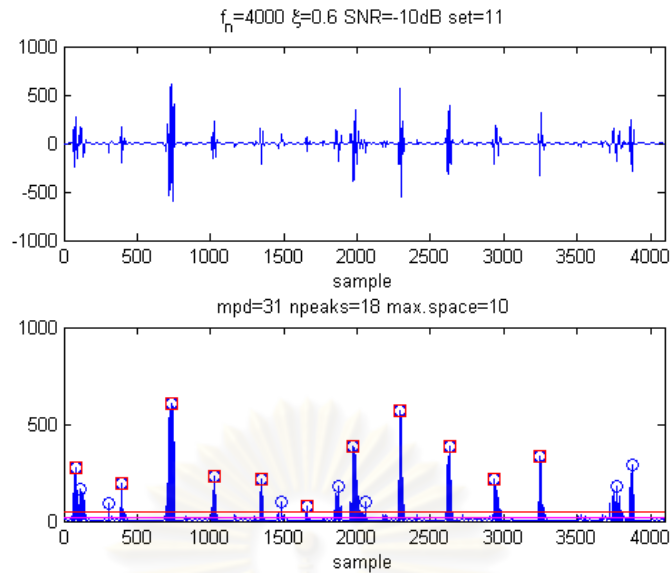
จากรูปที่ 5-60 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับแถบความถี่ข้างมีความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายที่สูง แต่อย่างไรก็ดีที่ SNR=-13 และ -15 dB วิธีการดังกล่าวมีความถูกต้องในการตรวจจับที่ต่ำกว่าวิธีการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ

ในส่วนต่อมาจะเป็นการพิจารณาความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต โดยจากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 5-1-4 จะพบว่าการใช้เวฟเลตที่มี  $f_0/\beta = 3.5$  จะให้ลักษณะของสัญญาณความเสียหายได้ชัดเจนกว่าเวฟเลตที่มี  $f_0/\beta = 7$  ดังนั้นจึงจะเลือกใช้เวฟเลตที่มี  $f_0/\beta = 3.5$  ในการประเมินความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย โดยการนับจำนวนคาบที่สอดคล้องกับคาบของความเสียหายของดัดลูกปืน ในกรณีนี้คือ 314 จุดข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ 212Hz (เนื่องจากช่วงเวลาของการสุ่มสัญญาณอยู่ที่  $15\mu s$  ดังนั้นคาบที่สอดคล้องกับความถี่ 212Hz จะเท่ากับจำนวนจุดข้อมูล  $1/212Hz/15\mu s = 314.5$  จุดข้อมูล) โดยสัญญาณความเสียหายจะถูกแยกส่วนประกอบของสัญญาณและถูกลดส่วนของ

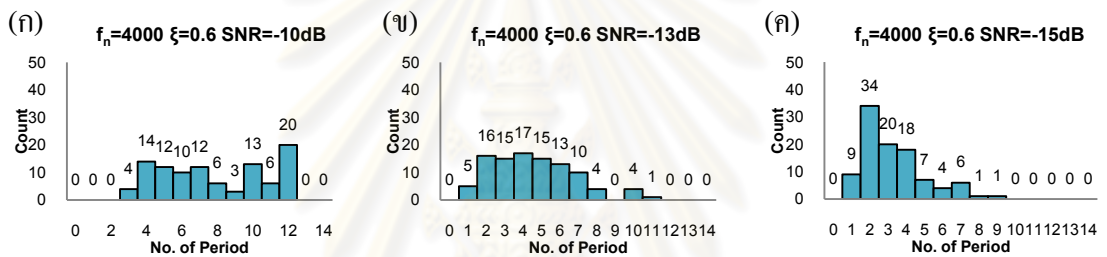
สัญญาณรบกวนด้วยวิธี intra- and inter-scale dependency ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 5-7 หลังจากนั้นจะประเมินความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยวิธีการนับจำนวนคาบของสัญญาณที่มีระยะห่าง  $314 \pm 31$  จุดข้อมูลที่อยู่ติดกัน โดยใช้วิธีดังแสดงในแผนภาพของรูปที่ 5-61 จะได้จำนวนคาบของความเสียหายของในแต่ละกรณีสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 5-62 โดยคาบความเสียหายที่อยู่ติดกันจะถูกล้อมกรอบด้วยกรอบสีเหลี่ยมสีแดง เมื่อทำครบ 100 กรณีของสัญญาณรบกวนจะได้ฮิสโทแกรมของคาบของสัญญาณความเสียหายที่อยู่ติดกันดังรูปที่ 5-63 - 5-65 จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับฮิสโทแกรมของสัญญาณรบกวนเพียงอย่างเดียวในรูปที่ 5-66 เพื่อที่จะประเมินความถูกต้องของการตรวจจับในลักษณะคล้ายกับที่ทำกับกรณีของการประเมินความถูกต้องในการตรวจจับของฟูรีเยร์สเปกตรัม



รูปที่ 5-61 ขั้นตอนการประเมินความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต

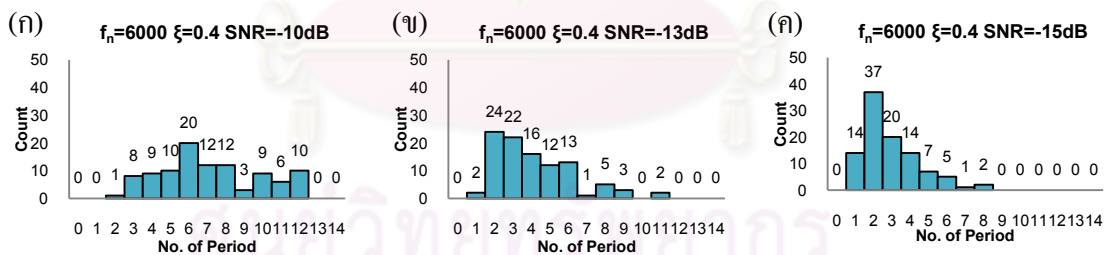


รูปที่ 5-62 แสดงตัวอย่างการหาความเสียหายของผลการแปลงกลับเวฟเลต



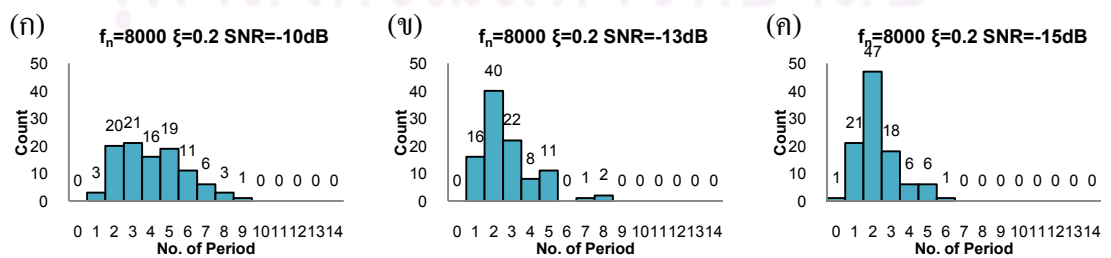
รูปที่ 5-63 ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณ  $f_n = 4000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.6$

(ก) SNR=-10dB, (ข) SNR=-13dB และ (ค) SNR=-15dB



รูปที่ 5-64 ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณ  $f_n = 6000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.4$

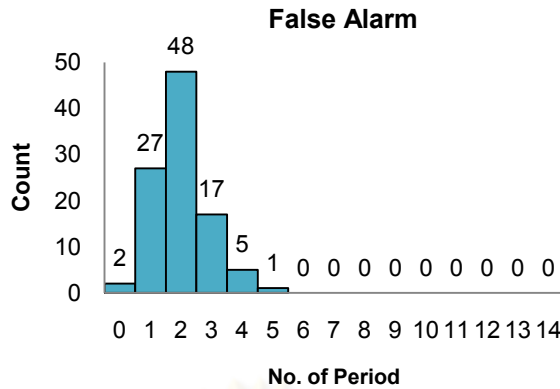
(ก) SNR=-10dB, (ข) SNR=-13dB และ (ค) SNR=-15dB



รูปที่ 5-65 ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณ  $f_n = 8000\text{Hz}$ ,  $\xi = 0.2$

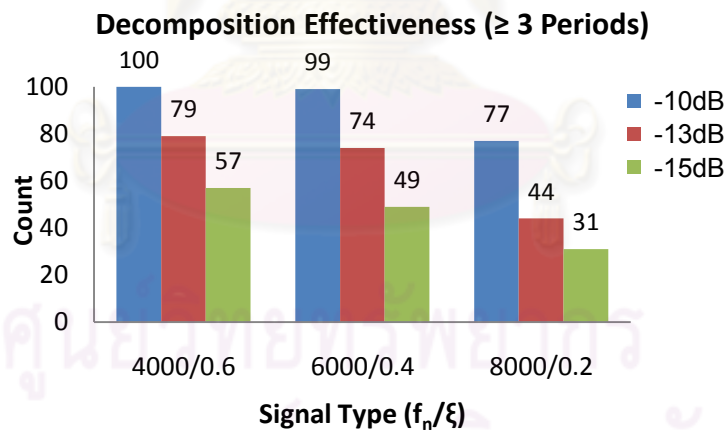
(ก) SNR=-10dB, (ข) SNR=-13dB และ (ค) SNR=-15dB





รูปที่ 5-66 ฮิสโทแกรมของจำนวนคาบความเสียหายที่พบของสัญญาณรบกวน

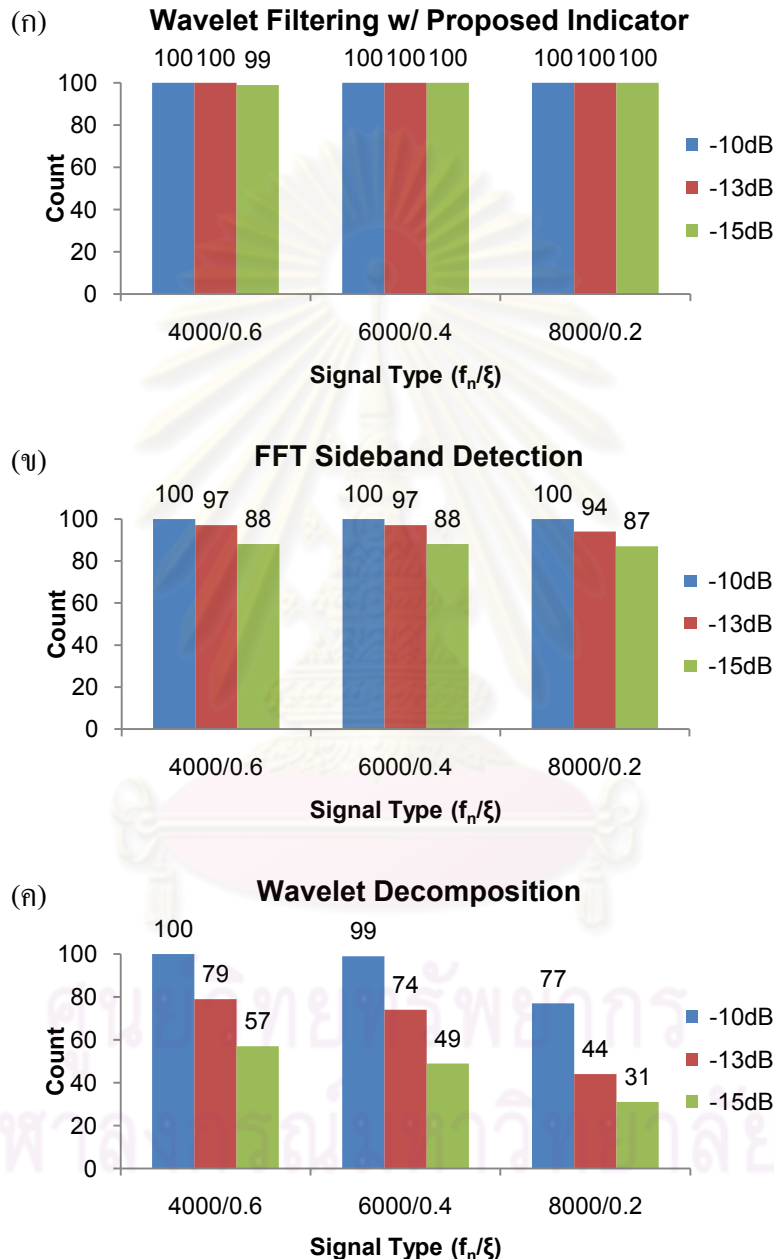
จากฮิสโทแกรมในรูปที่ 5-66 จะเห็นว่าโอกาสที่จะตรวจพบคาบที่อยู่ต่อเนื่องกันในผลการแปลงกลับเวฟเลตเกิน 3 คาบต่อเนื่องกันของสัญญาณรบกวนมีค่าอยู่ที่ 23% ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนคาบที่อยู่ติดกันตั้งแต่ 3 คาบเป็นต้นไปเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความถูกต้องของการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของวิธีนี้ เพื่อให้อัตราการเตือนที่ผิดพลาดมีค่าที่ใกล้เคียงกับการตรวจจับ โดยการพิจารณาแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัมและการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ จะได้ผลความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนด้วยวิธีการแยกส่วน ประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลตดังรูปที่ 5-67



รูปที่ 5-67 สรุปความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการแยกส่วนประกอบสัญญาณ

จากการพิจารณารูปที่ 5-41, 5-60 และ 5-67 ประกอบกัน จะได้ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับความเสียหายของวิธีต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-68 จะพบว่าวิธีการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตโดยใช้ตัวบ่งชี้ (indicator) ที่นำเสนอเป็นตัวบ่งชี้สามารถให้ความถูกต้องในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดในทุกระดับสัญญาณความเสียหายที่ใช้ในการศึกษา จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการกรอง

สัญญาณด้วยเวฟเลต โดยใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอเป็นตัวบ่งชี้ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบ ด้วยเหตุที่ความเสียหายแบบเฉพาะที่ของตลับลูกปืนจัดเป็นสัญญาณในประเภทนี้ด้วย จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการดังกล่าวน่าจะมี ความเหมาะสมที่สุดในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายแบบเฉพาะที่ของตลับลูกปืน



รูปที่ 5-68 สรุปเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของ (ก) การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต (เอ็นวีลอปสเปกตรัม), (ข) การนับแถบความถี่ข้างในสเปกตรัม และ (ค) การแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลต

## 5-2 ผลการศึกษาการทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากตลับลูกปืน

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากตลับลูกปืนจริง ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองสัญญาณความเสียหายที่ใช้ในการศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณในหัวข้อก่อน ๆ และยังเป็นการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนและผลการตรวจจับความเสียหายที่ใช้แบบจำลองอธิบายได้ไม่ดัดจริต เช่น ภาวะในแวนรัศมี ขนาดของความเสียหาย รวมไปถึงผลที่เกิดจากทางเดินของสัญญาณการสั่นสะเทือน (transmission path) ในกรณีที่ความเสียหายเกิดขึ้นที่รางวิ่งในและเม็ดลูกปืนซึ่งระยะทางเดินของสัญญาณการสั่นสะเทือนไม่คงที่ โดยส่วนของรายละเอียดในการปรับตั้งชุดทดลองและการตั้งค่าในการเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนจะเป็นไปตามตารางที่ 4-9 และ 4-10 ตามลำดับ จะได้สัญญาณในโดเมนเวลาและฟูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณดังกล่าว

(หมายเหตุ ภาวะในแวนรัศมีเป็นค่าที่คำนวณมาจากระยะยวบของสปริงและการทดคานของชุดให้ ภาวะ ค่าภาวะที่แท้จริงจะต่ำกว่านี้เนื่องจากน้ำหนักของเพลลา)

ตารางที่ 4-9 ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนตลับลูกปืน ภาวะในแวนรัศมี และความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ทดลอง
ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย	รางวิ่งนอก, รางวิ่งใน และเม็ดลูกปืน
ภาวะในแวนรัศมี (N)	102, 830 และ 1558
ความเร็วรอบ (rpm)	900, 1500, 2100 และ 2700

ตารางที่ 4-10 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ประเภทการเก็บข้อมูล	Dual Channel Time Capture
จำนวนจุดข้อมูลต่อช่องสัญญาณ	32,768
Sampling time ( $\mu$ s)	30.5
ระยะเวลาในการเก็บสัญญาณ (s)	1
Trigger	External, Slope +
ความยาวของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์	4,096
จำนวนชุดของสัญญาณที่เก็บ	40

จากความเร็วรอบในตารางที่ 4-9 จะได้ความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายทั้งหมดในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5-3 และจากในตารางที่ 4-10 จะได้ว่าเส้นสเปกตรัมในเอ็นวีลอป-

สเปกตรัมแต่ละเส้นจะอยู่ห่างกัน 8.0085Hz ทำให้ค่าความถี่ลักษณะเฉพาะของสัญญาณความเสียหายมีโอกาสที่จะอยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นสเปกตรัมสองเส้นพอดี ซึ่งอาจทำให้ผลการตรวจจับเกิดความผิดพลาดได้ ความถี่ดังกล่าวจะแสดงด้วยอักษรตัวเอียงในตารางที่ 5-3 อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการนำสัญญาณชุดที่ติดกันมาต่อกันซึ่งจะทำให้ความละเอียดของเส้นสเปกตรัมเพิ่มขึ้นเท่าตัว ทำให้ความถี่ลักษณะเฉพาะที่เคยอยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นสเปกตรัมเปลี่ยนมาอยู่ที่ตำแหน่งใกล้เส้นสเปกตรัมเส้นใหม่พอดี สาเหตุที่สามารถนำสัญญาณที่ติดกันมาต่อกันได้นั้นเพราะว่าจากตารางที่ 4-10 สัญญาณจะถูกเก็บมาครั้งละ 32768 จุดข้อมูล หรือ 8 ชุดของสัญญาณ ก่อนที่จะถูกนำมาแบ่งออกเป็น 8 ชุด ดังนั้นสัญญาณชุดที่อยู่ติดกันใน 8 ชุดที่เก็บมาจึงเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องกัน

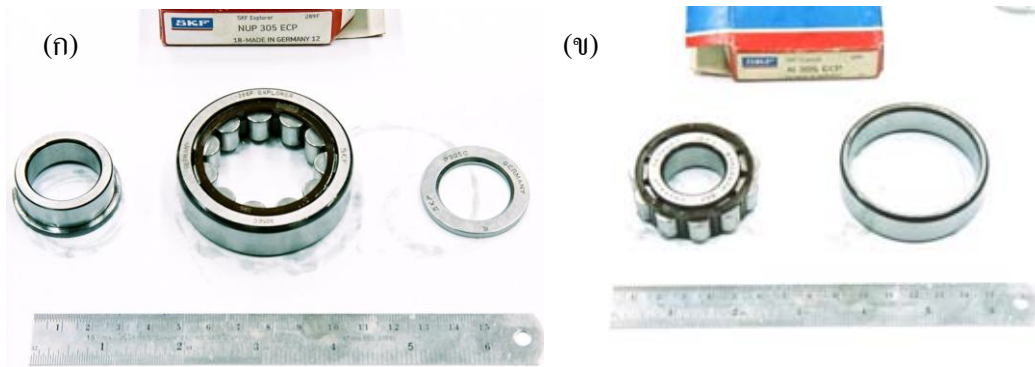
ในผลการทดลองกับตลับลูกปืนจริงจะแสดงผลการตรวจจับที่ได้จากเอ็นวีลอปสเปกตรัมและการตรวจจับแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัม ซึ่งจะเลือกช่วงความถี่กึ่งกลางที่พิจารณาจากลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณในกรณีที่ไม่มีความเสียหายน่าจะมีความถี่ธรรมชาติอยู่ในช่วงความถี่ใด

ตารางที่ 5-3 ความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายและขอบเขตในการตรวจจับที่ใช้ในการทดลอง

ตำแหน่ง	ความถี่ (Hz)			
	900	1500	2100	2700
Outer Race (BPOR)	63.75	106.25	148.75	191.25
Roller (BSF)	62.55	104.25	145.95	187.65
Inner Race (BPIR)	101.25	168.75	236.25	303.75
Roller Cage (FTF)	5.79	9.65	13.51	17.37
ขอบเขตล่างในการตรวจจับ	54.00	90.00	126.00	162.00
ขอบเขตบนในการตรวจจับ	114.00	190.00	266.00	342.00

#### 5-2-1 ผลการศึกษาในกรณีที่ไม่มีความเสียหาย

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนที่ไม่มีความเสียหายภายใต้ความเร็วรอบ และภาระในแนวรัศมีที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวที่มีต่อสัญญาณการสั่นสะเทือน และยังเป็นภาระระบุลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนเฉพาะของชุดทดลองอีกทางหนึ่งด้วย การเก็บข้อมูลดังกล่าวใช้ตลับลูกปืน SKF รุ่น NUP 305 ECP ดังแสดงในรูปที่ 5-69(ก) ซึ่งมีความถี่ลักษณะเฉพาะดังแสดงในตารางที่ 5-3

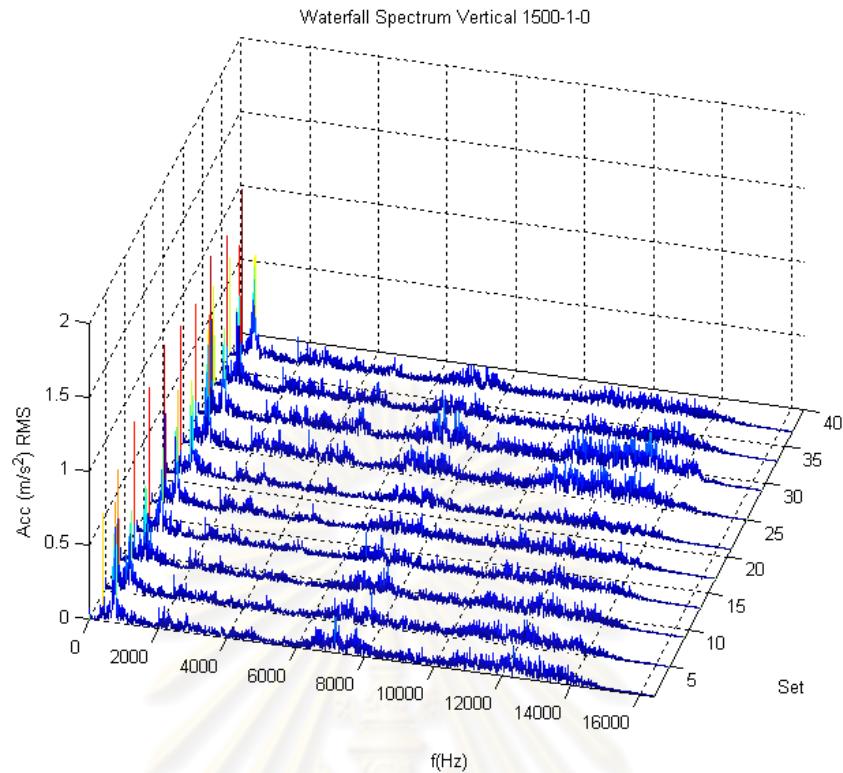


รูปที่ 5-69 คลับลูกปืน SKF รุ่น (ก) NUP 305 ECP และ (ข) N 305 ECP ในสภาพปรกติ

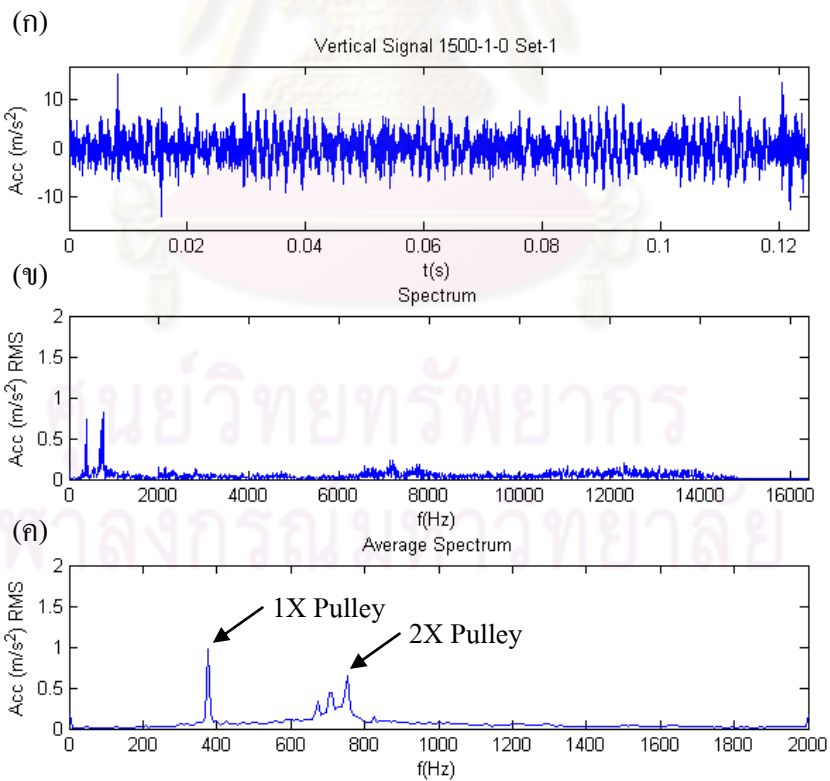
นำคลับลูกปืนดังกล่าวไปทดลองเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ และภาระในแนวรัศมีที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4-9 จะได้สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ ในรูปที่ 5-70 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งจำนวน 40 ค่า ที่วัดได้จากคลับลูกปืนในรูปที่ 5-69(ก) ที่ยังไม่มี ความเสียหาย โดยให้ภาระในแนวรัศมี 830N ที่ 1500 รอบ/นาที จะพบยอดสูงสุดของสเปกตรัมที่ความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นความถี่ที่สอดคล้องกับจำนวนฟันของพูลเลย์ของเพลลาของคลับลูกปืน ที่ 375Hz ดังแสดงในรูปที่ 5-71 (ก) และในขณะเดียวกันก็จะพบลักษณะที่เป็นพื้นยกขึ้นมาในช่วง 6000-8000Hz และ 10000-14000Hz ซึ่งสันนิษฐานว่าเกี่ยวข้องกับความถี่ธรรมชาติของระบบ

รูปที่ 5-72 และ 5-73 แสดง waterfall spectrum และตัวอย่างของชุดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวระดับ โดยจะพบว่าสัญญาณในทิศทางดังกล่าวก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสัญญาณในแนวตั้ง แต่จะมีความแตกต่างอยู่ตรงที่ยอดสูงสุดของสเปกตรัมจะเป็น 750Hz ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกของความถี่ของพูลเลย์ แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะพิจารณาช่วงที่ความถี่สูงขึ้นไปจากช่วงความถี่ดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการทำออโตรีเกรสซีฟเพื่อลดทอนความถี่ที่เกิดจากฟันของพูลเลย์เนื่องจากไม่มีความถี่ที่คาดเดาได้อยู่ในช่วงที่ใช้ในการพิจารณาเอ็นวีแอลพี-สเปกตรัม

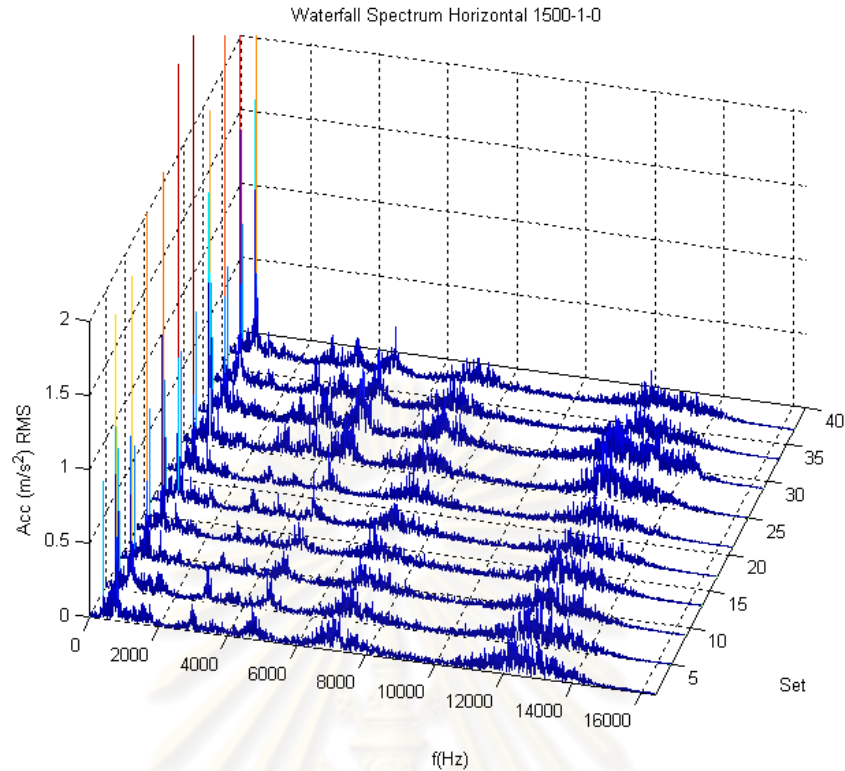
จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปตรวจจับความเสียหายด้วยเอ็นวีแอลพีสเปกตรัมเพื่อพิจารณาผลการเตือนที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะได้การเกิดการเตือนที่ผิดพลาดในกรณีต่าง ๆ โดยอาศัยการพิจารณาความถี่ที่พบในเอ็นวีแอลพีสเปกตรัมกับความถี่ลักษณะเฉพาะในตารางที่ 5-3 โดยกำหนดให้ค่าความถี่ในการพิจารณาเป็นครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างเส้นสเปกตรัมในเอ็นวีแอลพีสเปกตรัม (4.0043Hz) จะได้จำนวนการเกิดการเตือนที่ผิดพลาดดังแสดงในรูปที่ 5-74 - 5-76



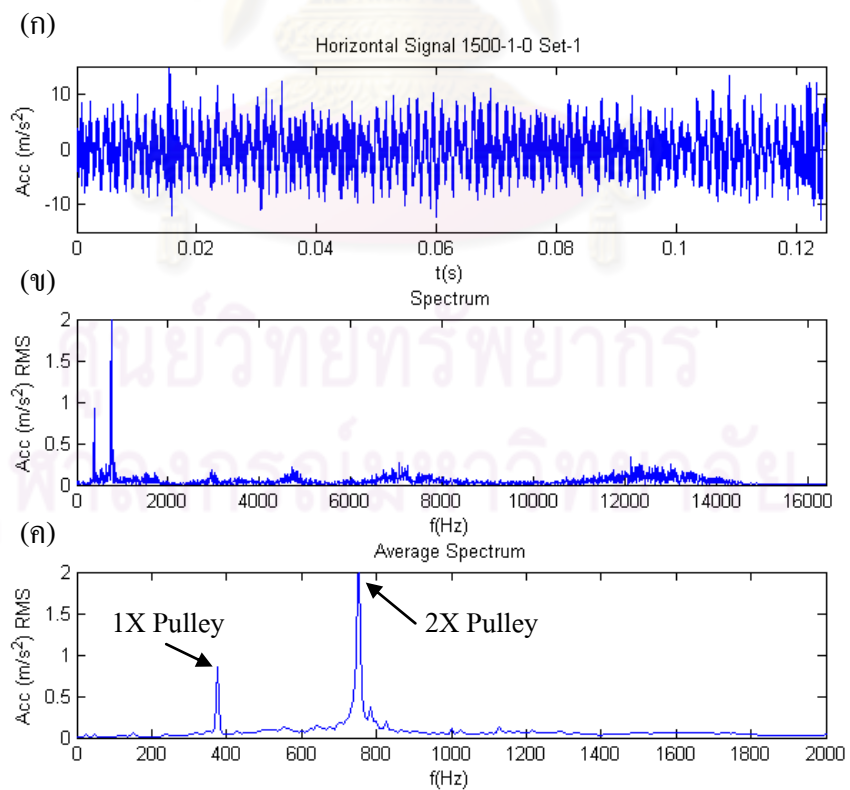
รูปที่ 5-70 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดตลับลูกปืนที่สภาพดี ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



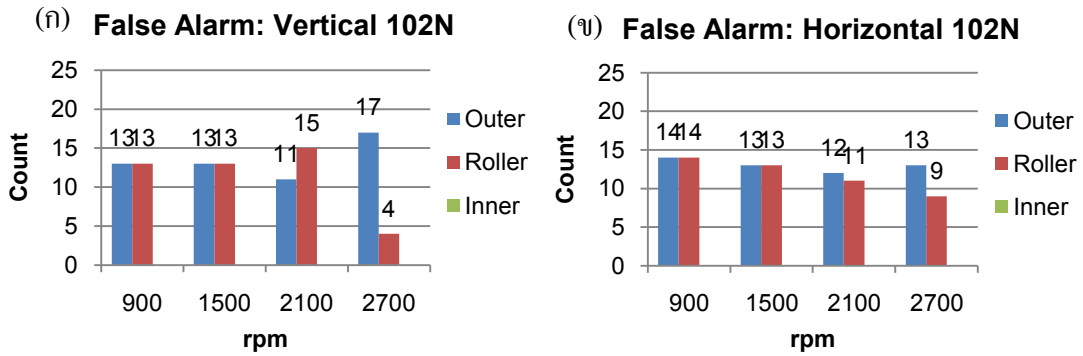
รูปที่ 5-71 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-70: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ  
 ในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



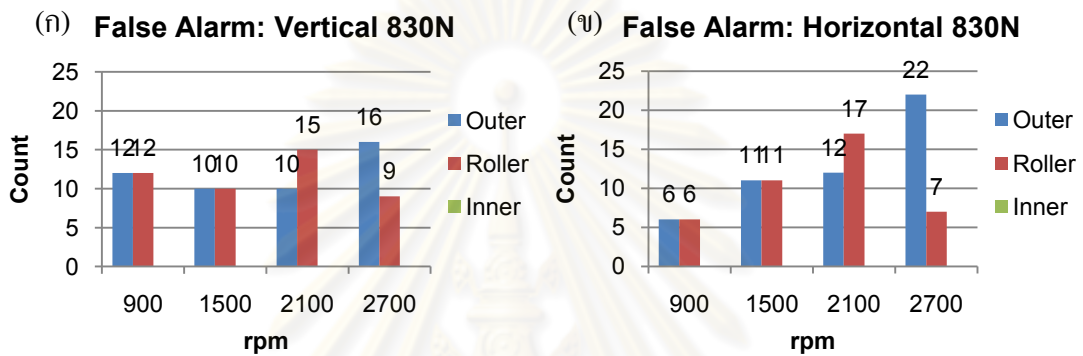
รูปที่ 5-72 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลลูปปืนที่สภาพดี ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



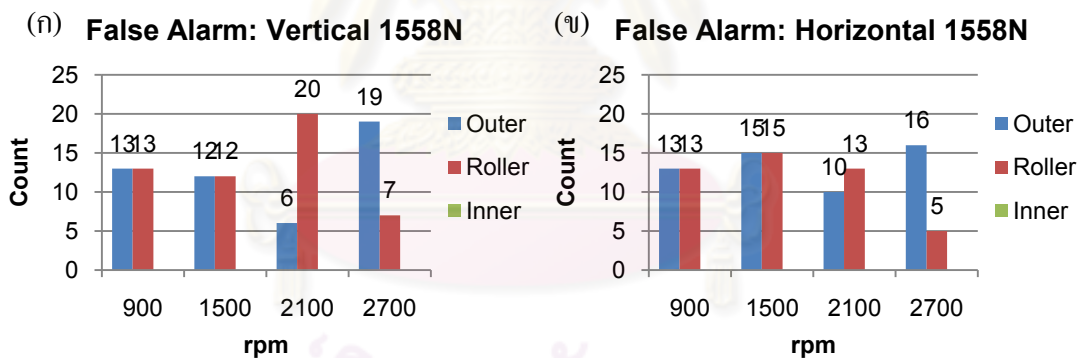
รูปที่ 5-73 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-72: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ ในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



รูปที่ 5-74 อัตราการเตือนที่ผิดพลาดที่ภาระในแนวรัศมี 102N (ก) แนวตั้ง, (ข) แนวระดับ



รูปที่ 5-75 อัตราการเตือนที่ผิดพลาดที่ภาระในแนวรัศมี 830N (ก) แนวตั้ง, (ข) แนวระดับ



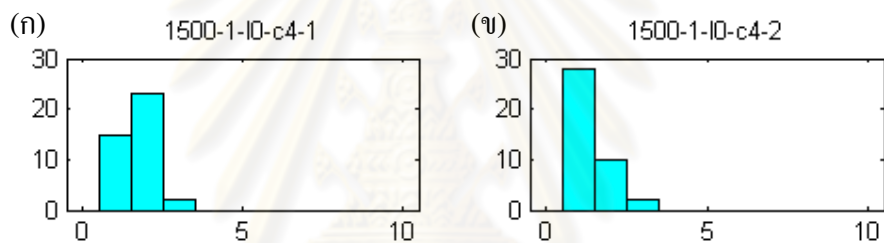
รูปที่ 5-76 อัตราการเตือนที่ผิดพลาดที่ภาระในแนวรัศมี 1558N (ก) แนวตั้ง, (ข) แนวระดับ

จากรูปที่ 5-74 - 5-76 จะเห็นได้ว่าไม่มีการเตือนที่ผิดพลาดที่ BPIR ทั้งนี้เนื่องมาจากเอ็นวีลอป-สเปกตรัมที่ได้มีลักษณะเป็นแบบส้อม ทำให้ BPIR ซึ่งมีค่าความถี่สูงกว่าความถี่อื่นเกือบเป็นเท่าตัว จะถูกตรวจพบเป็นตระกูลของฮาร์โมนิกได้ยาก เพราะขอบเขตล่างของการตรวจจับความถี่มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ BPIR ดังแสดงในตารางที่ 5-3 ดังนั้นถ้าตระกูลของ BPIR ไม่มีขนาดใหญ่จริงๆ ยอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมก็จะถูกตรวจจับที่ความถี่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของ BPIR แทน และที่ความเร็วต่ำ จำนวนการเตือนที่ผิดพลาดของ BPOR และ BSF จะมีค่าเกือบเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองความถี่ใช้สเปกตรัมเส้นเดียวกันนั่นเอง



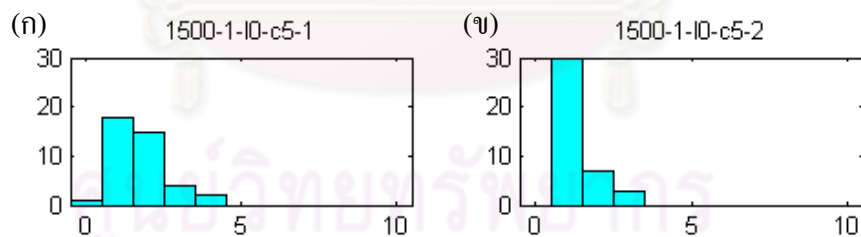
### จำนวนแถบความถี่ข้างที่ตรวจพบในฟูรีเยร์สเปกตรัมในช่วงที่กำหนด

ในส่วนต่อมาจะพิจารณาผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายด้วยวิธีการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม โดยจะใช้วิธีการเดียวกับที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 5-1-9 แต่จะเปลี่ยนรายละเอียดเกี่ยวกับระยะเว้นว่าง (peak distance) ของการหายอดจากที่เป็น 21Hz (10% ของBPOR ที่ 3000รอบ/นาที) ที่ใช้ในส่วนของการจำลองสัญญาณ เป็น 10% ของความถี่ของตลับลูกปืนที่ต้องการจะตรวจจับ เมื่อพิจารณา waterfall spectrum ดังเช่นในรูปที่ 5-70 และ 5-72 ที่ทุกความเร็วและภาระในแนวมุมประกอบกัน จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 6000-8000Hz น่าจะเป็นช่วงความถี่ธรรมชาติของระบบ ดังนั้นจึงเลือกช่วง 5000-7000Hz เป็นช่วงในการพิจารณาแถบความถี่ข้าง โดยกำหนดค่าความถี่เพื่อไว้เท่ากับ 1 เส้นของฟูรีเยร์สเปกตรัม คือประมาณ  $\pm 4\text{Hz}$  จะได้ผลการตรวจจับแถบความถี่ข้างในช่วงดังกล่าวของฟูรีเยร์สเปกตรัมในรูปที่ 5-70 และ 5-72 เมื่อพิจารณาแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกับ BPOR, BPIR และ BSF ตามตารางที่ 5-3 ดังแสดงในรูปที่ 5-77 - 5-79 ตามลำดับ



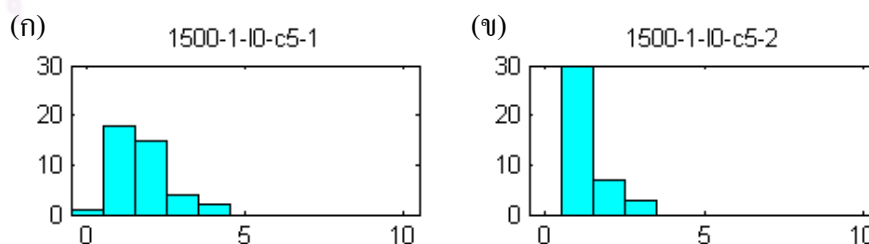
รูปที่ 5-77 ฮิสโตแกรมของแถบความถี่ข้างที่พบใน (ก) รูปที่ 5-70, (ข) รูปที่ 5-71

เมื่อพิจารณาระยะแถบความถี่ข้างที่ BPOR



รูปที่ 5-78 ฮิสโตแกรมของแถบความถี่ข้างที่พบใน (ก) รูปที่ 5-70, (ข) รูปที่ 5-71

เมื่อพิจารณาระยะแถบความถี่ข้างที่ BPIR



รูปที่ 5-79 ฮิสโตแกรมของแถบความถี่ข้างที่พบใน (ก) รูปที่ 5-70, (ข) รูปที่ 5-71

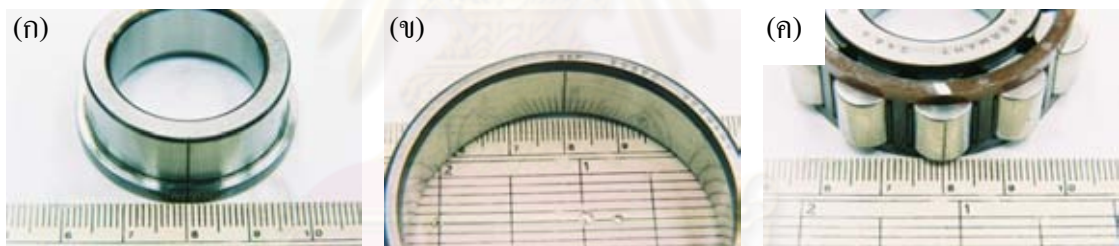
เมื่อพิจารณาระยะแถบความถี่ข้างที่ BSF

เมื่อพิจารณาฮิสโทแกรมของตลับลูกปืนที่อยู่ในสภาพดีที่ทุกความเร็วรอบและภาระในแนวรัศมี จะพบว่าจะมีชุดข้อมูลไม่เกิน 10% ของชุดข้อมูลทั้งหมดในแต่ละชุดภาระและความเร็วที่มีแถบความถี่ข้างติดกัน 3 ช่องขึ้นไป ดังนั้นเพื่อเป็นการประเมินความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายด้วยวิธีดังกล่าว จึงเลือกใช้ค่าจำนวนแถบความถี่ข้างที่อยู่ติดกัน 3 ช่องขึ้นไปเป็นเกณฑ์ว่าตรวจพบความเสียหายในทุก ๆ ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย

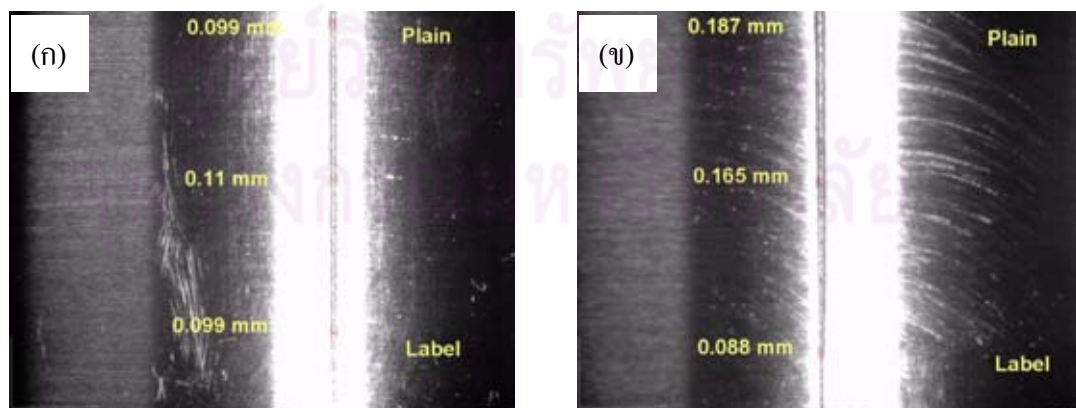
#### 5-2-2 การสร้างรอยความเสียหายในตลับลูกปืน

รอยความเสียหายของตลับลูกปืนจะถูกสร้างขึ้นด้วยการทำ wirecut โดยใช้ตลับลูกปืน 2 รุ่นที่มีความถี่ลักษณะเฉพาะที่เหมือนกันทุกประการ คือ รุ่น NUP 305 ECP ดังรูปที่ 5-69(ก) สำหรับสร้างความเสียหายที่รางวิ่งในดังแสดงในรูปที่ 5-80(ก) โดยจะสร้างความเสียหาย 2 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5-81 ส่วนตลับลูกปืนรุ่น N 305 ECP ดังรูปที่ 5-69(ข) ถูกใช้สร้างความเสียหายที่รางวิ่งนอกและเม็ดลูกปืน ดังรูปที่ 5-80(ข) และ 5-80(ค) ตามลำดับ โดยจะสร้างความเสียหาย 2 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5-82 และ 5-83 ตามลำดับ

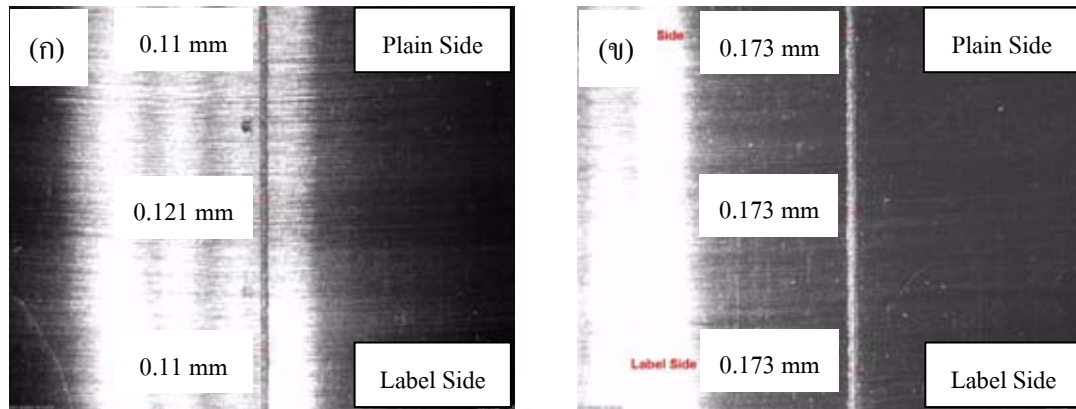
(หมายเหตุ ตลับลูกปืนรุ่น NUP 305 ECP และ N 305 ECP มีมิติของรางวิ่งนอก รางวิ่งใน และเม็ดลูกปืนเท่ากัน แตกต่างกันเพียงลักษณะและกายภาพของการประกอบลูกปืน)



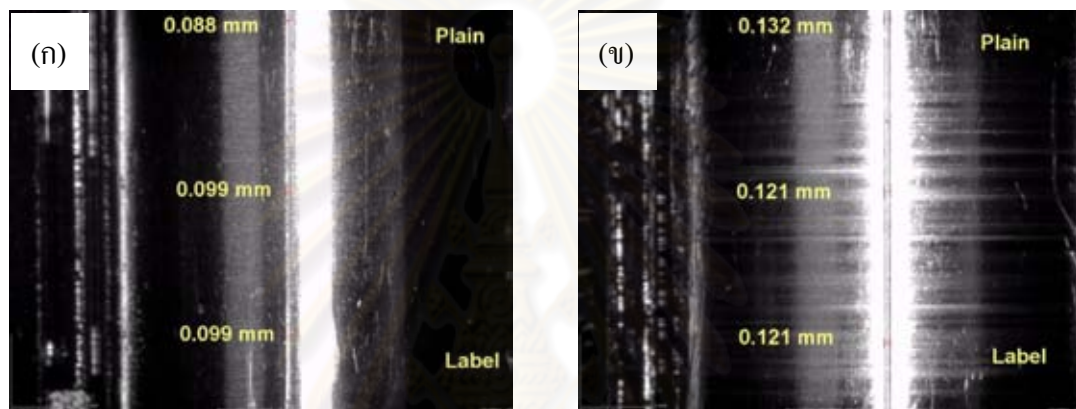
รูปที่ 5-80 ตัวอย่างการสร้างรอยความเสียหาย (ก) รางวิ่งใน (ข) รางวิ่งนอก และ (ค) เม็ดลูกปืน



รูปที่ 5-81 ความเสียหายที่รางวิ่งในเมื่อขยายด้วยกำลังขยาย 50 เท่า (ก) 0.1mm, (ข) 0.17mm



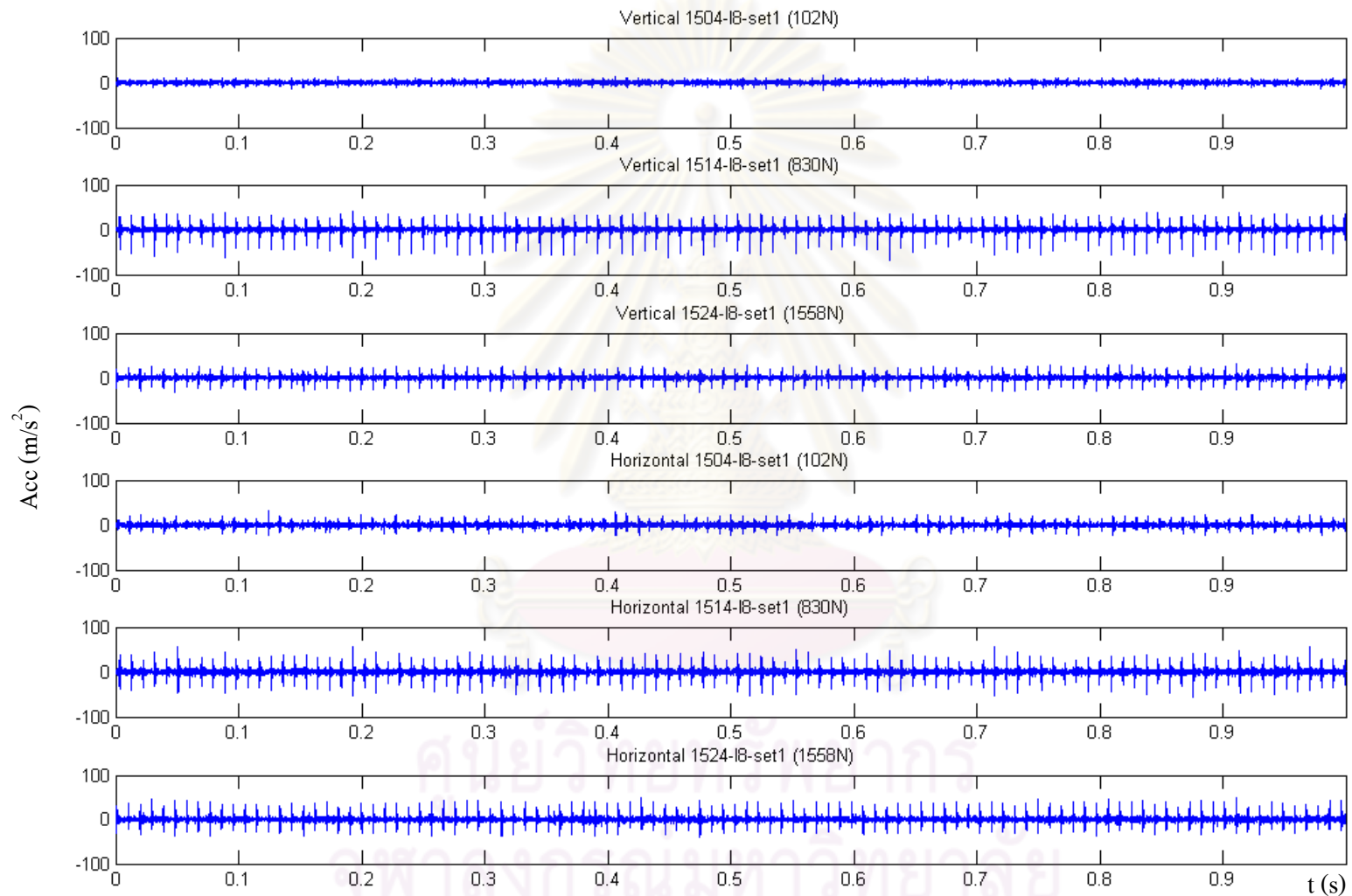
รูปที่ 5-82 ความเสียหายที่รางวิ่งนอกเมื่อขยายด้วยกำลังขยาย 50 เท่า (ก) 0.11mm, (ข) 0.17mm



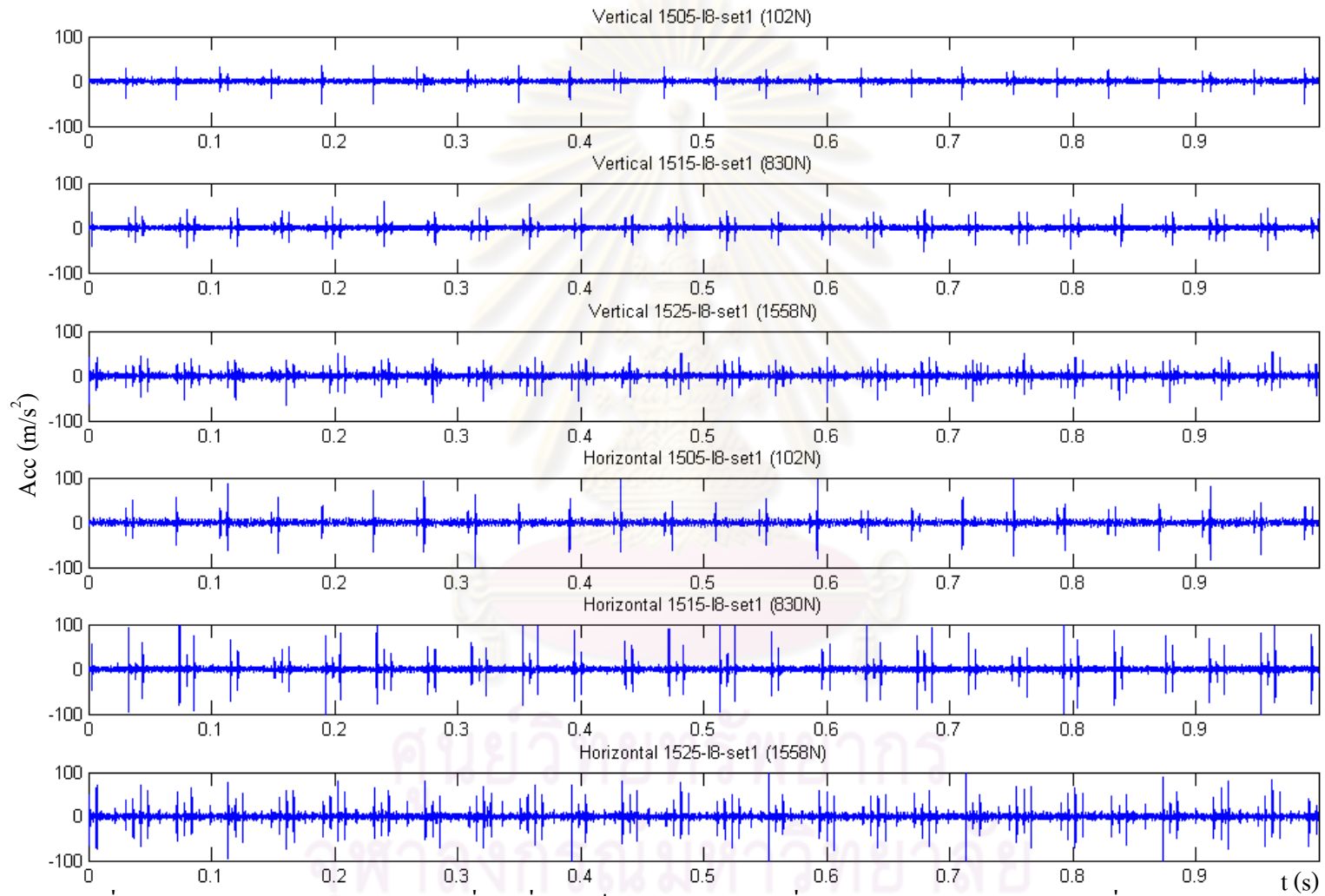
รูปที่ 5-83 ความเสียหายที่เม็ดลูกปืนเมื่อขยายด้วยกำลังขยาย 50 เท่า (ก) 0.1mm, (ข) 0.12mm

### 5-2-3 ลักษณะของสัญญาณความเสียหาย

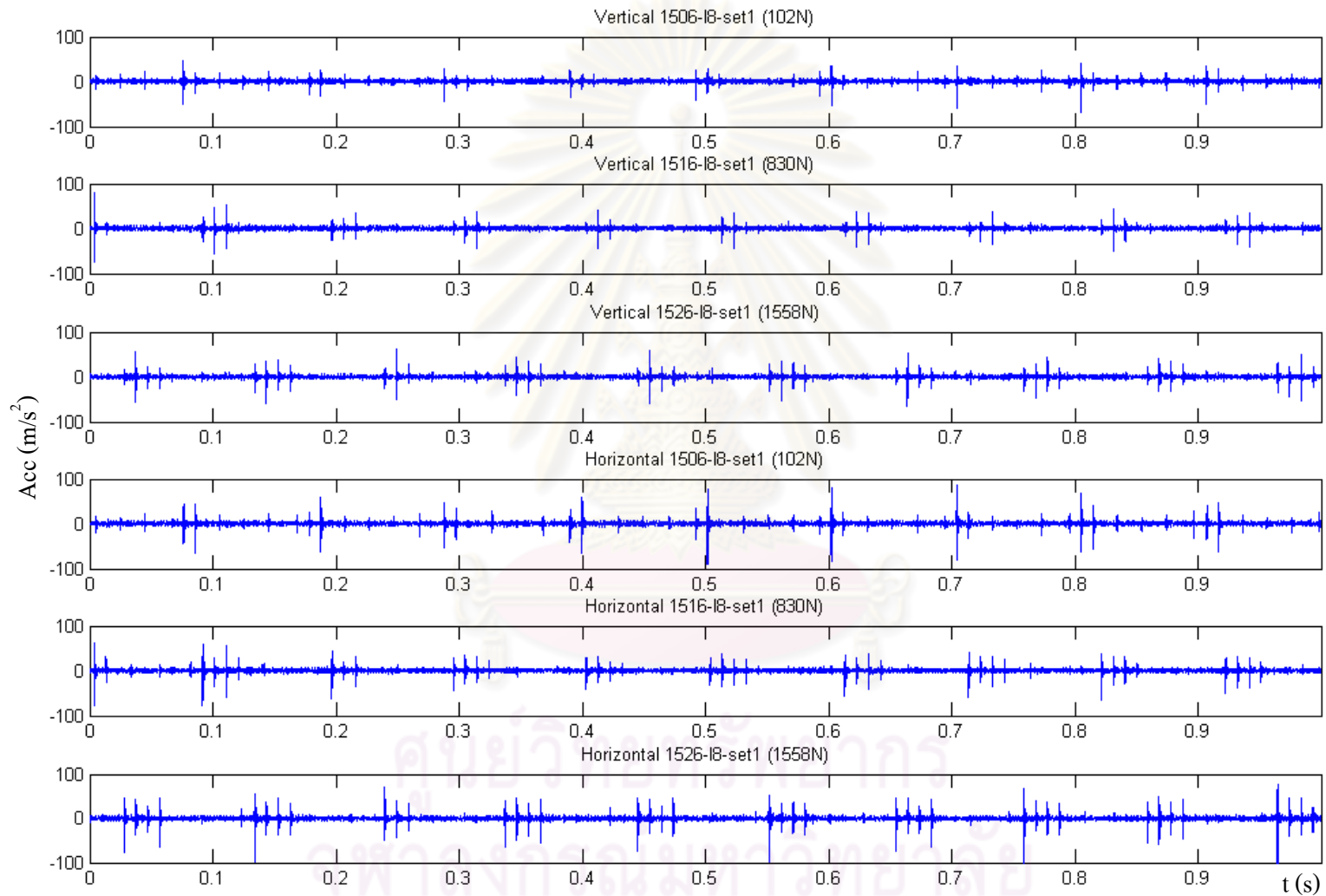
หลังจากที่ได้สร้าง ความเสียหายเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำตลับลูกปืนที่มีความเสียหายไปวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนภายใต้ภาระในแนวรัศมีและความเร็วรอบต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 4-9 โดยใช้พารามิเตอร์ในการเก็บค่าสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 4-10 จะได้สัญญาณความเสียหายรูปที่ 5-84 - 5-86 สำหรับกรณีที่เกิดความเสียหายที่รางวิ่งนอก รางวิ่งใน และเม็ดลูกปืน โดยเรียงรูปของภาระ 102N, 830N และ 1558N จากบนลงล่างตามลำดับ จะพบว่าในกรณีที่มีภาระในแนวรัศมีน้อยที่สุด ลักษณะของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณจะไม่ชัดเจน และในกรณีที่ภาระในแนวรัศมีมากขึ้น จะพบว่าในกรณีความเสียหายที่รางวิ่งนอกจะมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจนนี้กระหว่างภาระ 830N และ 1558N ส่วนในกรณีความเสียหายที่รางวิ่งในและเม็ดลูกปืน ภาระที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พบคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายได้มากขึ้น ในกรณีที่ความเสียหายเกิดขึ้นที่รางวิ่งนอกจะเห็นได้ว่าอิมพัลส์แต่ละลูกมีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากตำแหน่งในการกระแทกอยู่ที่เดิมตลอด ขณะที่กรณีของรางวิ่งในและเม็ดลูกปืน ขนาดของอิมพัลส์จะไม่คงที่ โดยในกรณีของรางวิ่งในจะมีรอบการเวียนเกิดที่ประมาณ 1 รอบการหมุนของเพลา และประมาณ 3 รอบการหมุนของเพลาในกรณีของเม็ดลูกปืน



รูปที่ 5-84 สัญญาณความเสียหายของรางวิ่งนอกที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที ที่ภาระในแนวรัศมีต่าง ๆ ในแนวตั้งและแนวระดับ

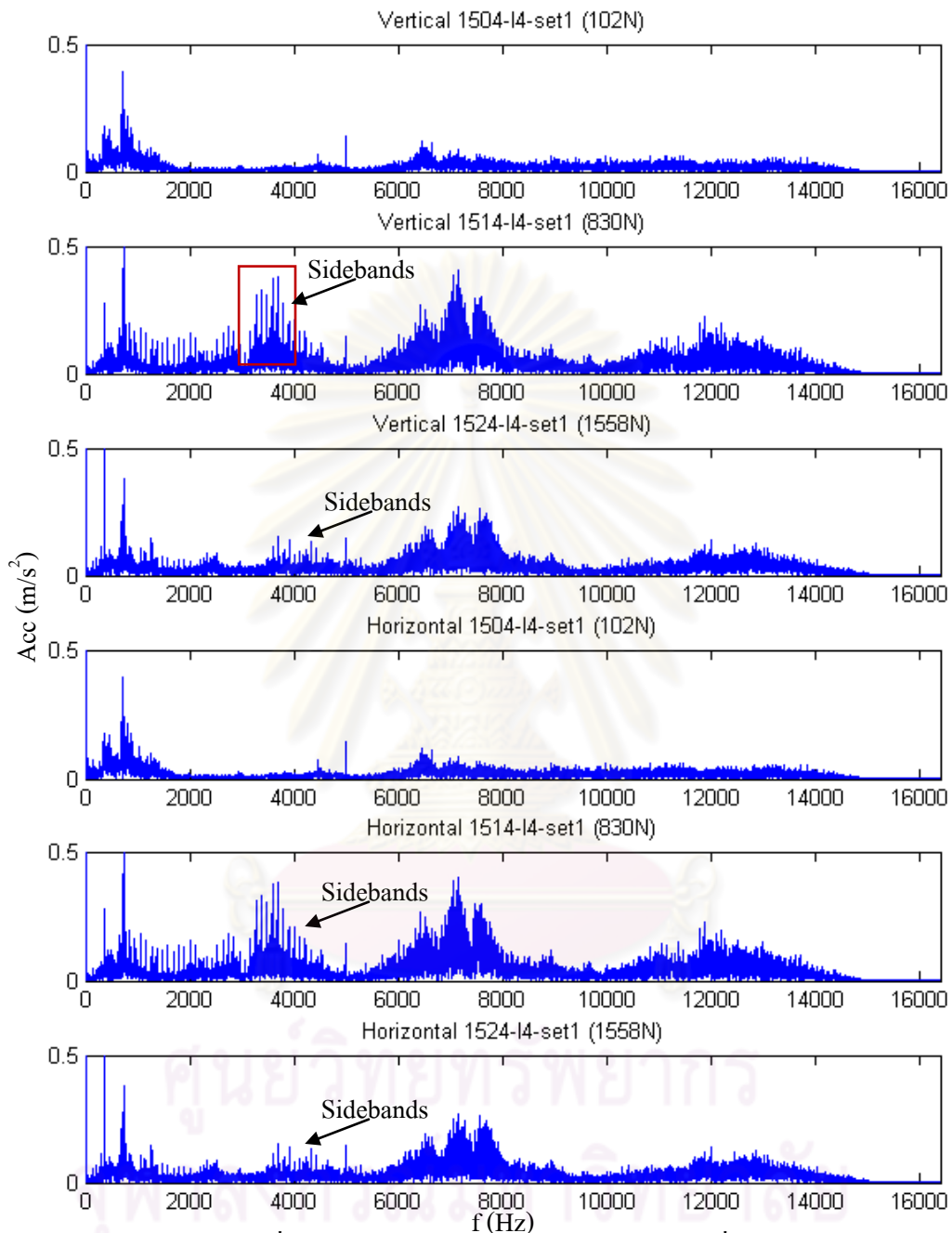


รูปที่ 5-85 สัญญาณความเสียหายของรางวิ่งในที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที ที่ภาระในแวนร์สมิต่าง ๆ ในแนวตั้งและแนวนระดบ



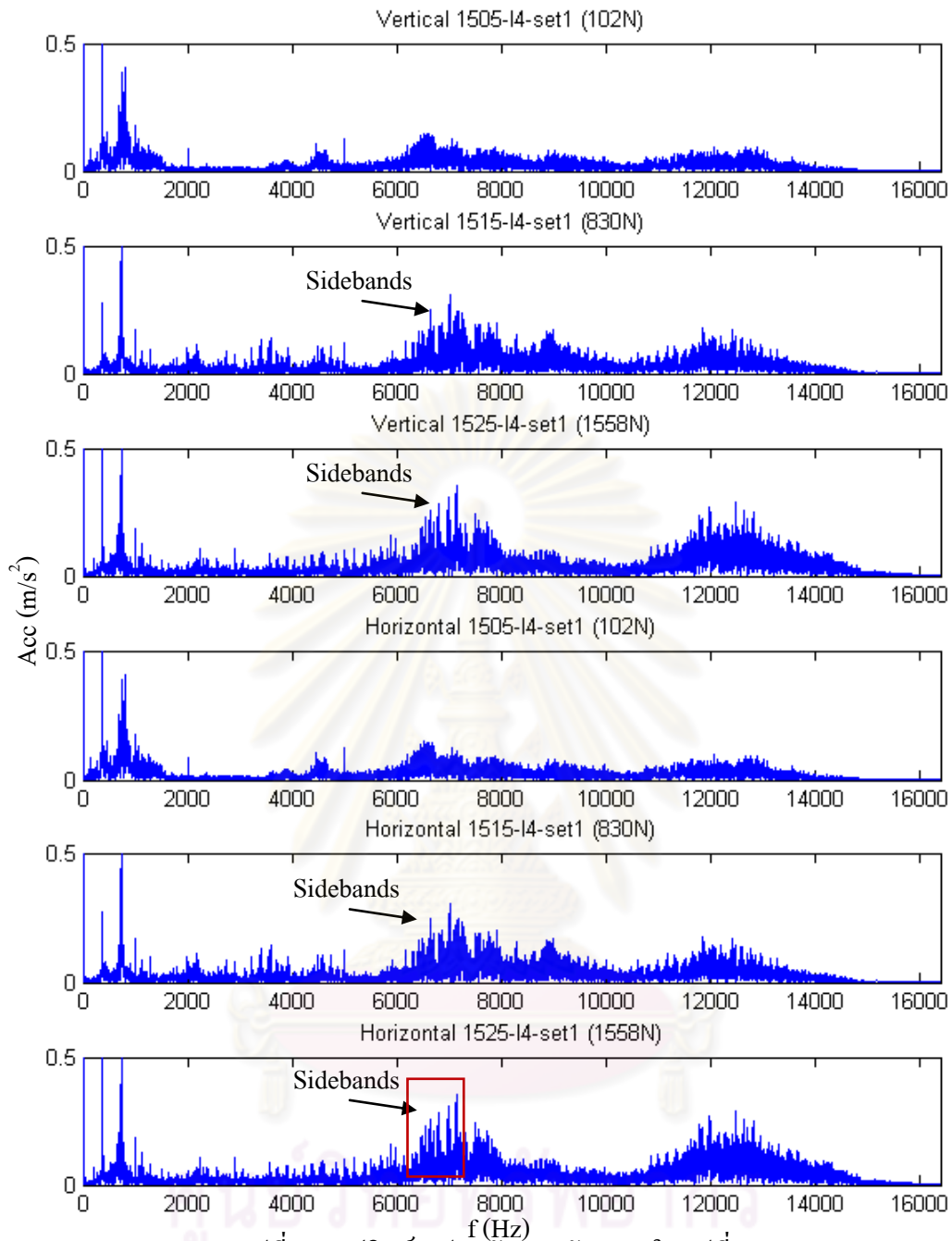
รูปที่ 5-86 สัญญาณความเสียหายของเม็ดลูกปืนในทีความเร็ว 1500 รอบ/นาที ที่ภาระในแนวรัศมีต่าง ๆ ในแนวตั้งและแนวระดับ

เมื่อนำสัญญาณในรูปที่ 5-84 - 5-86 ไปหาฟูริเยร์สเปกตรัม จะได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 5-87 - 5-89 ตามลำดับ



รูปที่ 5-87 ฟูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-84

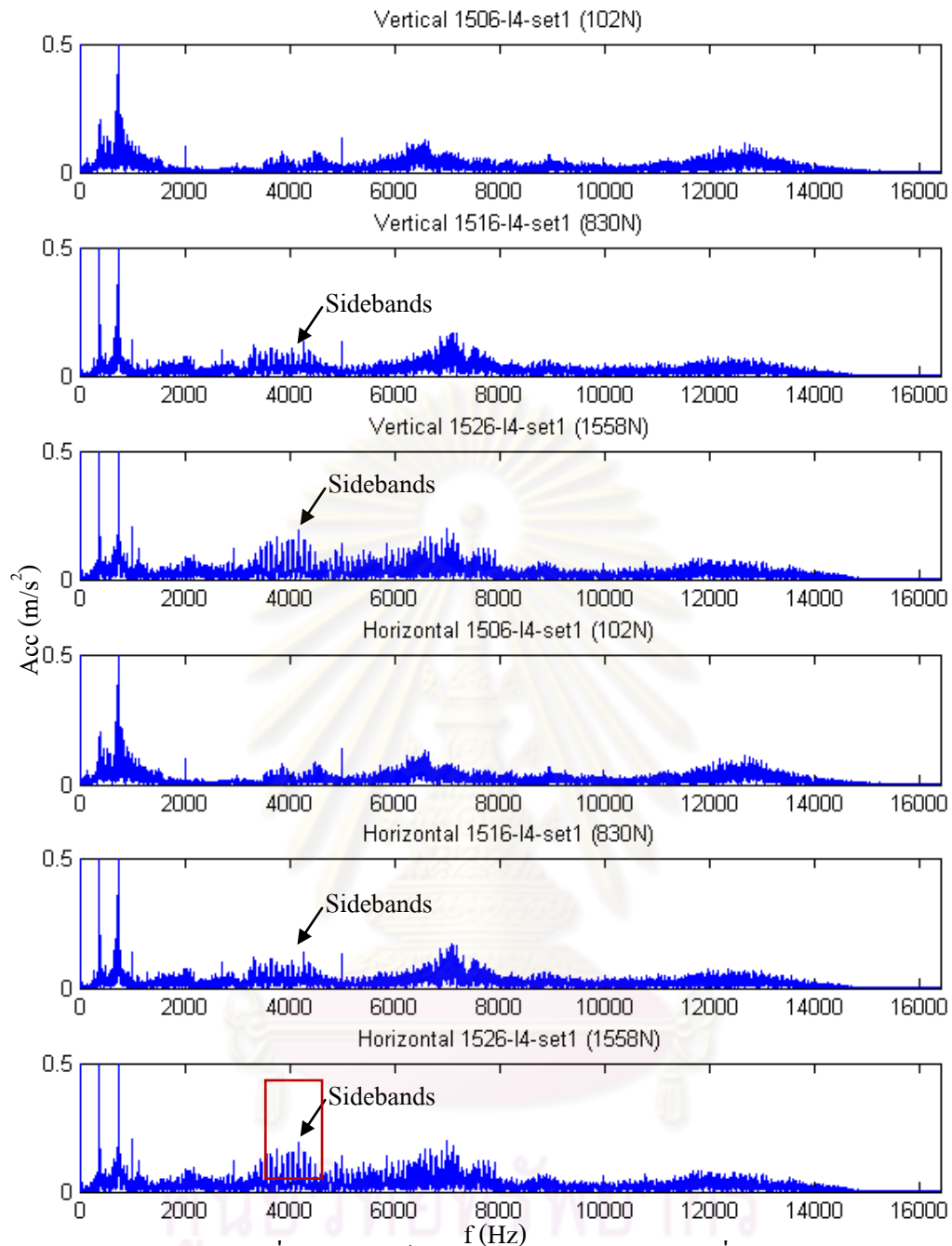
จากรูปที่ 5-87 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มภาระในแนวรัศมีจาก 102N เป็น 830N ทำให้แถบความถี่ข้างซึ่งมีระยะเท่ากับความถี่ของความเสียหายของรางวิ่งนอกมีความชัดเจน แต่ว่าการเพิ่มภาระจาก 830N ไปเป็น 1558N กลับทำให้ลักษณะของแถบความถี่ข้างดังกล่าวชัดเจนน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถพบเห็นแถบความถี่ข้างดังกล่าวได้อยู่



รูปที่ 5-88 พูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-85

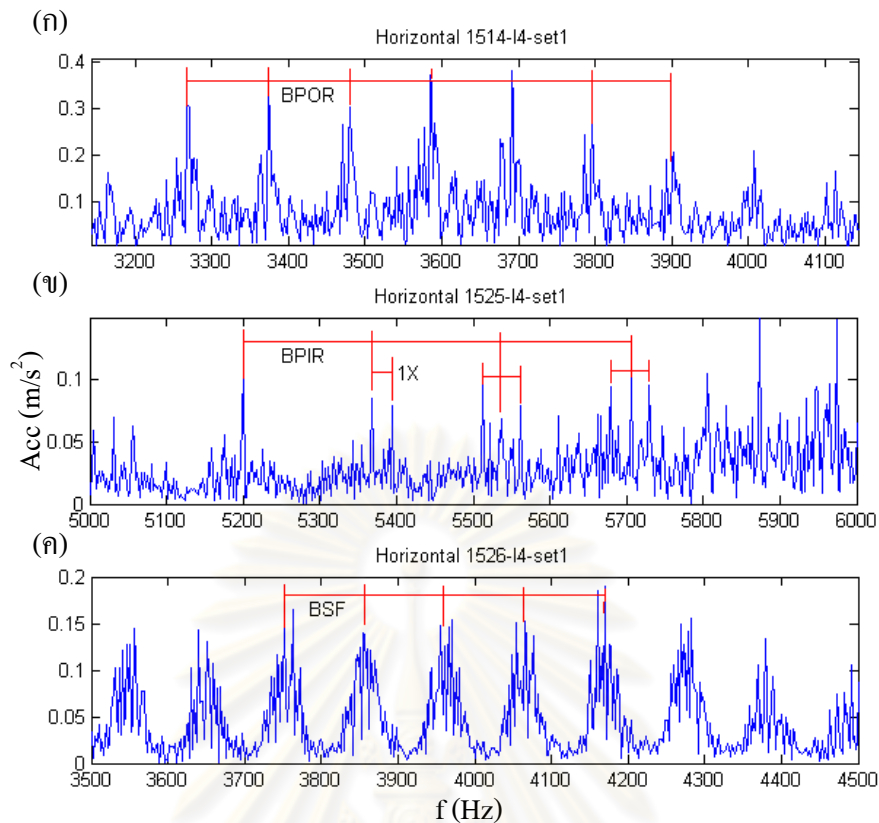
จากรูปที่ 5-88 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มภาระในแนวนรัศมีจาก 102N เป็น 830N ทำให้แถบความถี่ข้างซึ่งมีระยะเท่ากับความถี่ของความเสียหายของรางวิ่งในมีความชัดเจนมากขึ้น และการเพิ่มภาระจาก 830N ไปเป็น 1558N ก็ทำให้ลักษณะของแถบความถี่ข้างดังกล่าวชัดเจนขึ้นอีกเล็กน้อย แต่จะเห็นว่าแถบความถี่ข้างที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะในกรณีที่มีภาระ 830N จะไม่ชัดเจนจากพื้นของสัญญาณดังเช่นรูปที่ 5-87 ทั้งนี้เนื่องจากอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลาไม่ได้เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน โดยมีรอบของการเวียนเกิดที่ประมาณ 1 รอบการหมุนของเพลลา ซึ่งทำให้เกิดแถบความถี่ข้างที่มีระยะห่างเท่ากับความถี่ในการหมุนของเพลลาแทรกอยู่ด้วยเป็นลักษณะของเส้นสเปกตรัมที่แซมขึ้นมาในชุดของความถี่ข้าง BPIR ดังปรากฏในรูปที่ 5-88





รูปที่ 5-89 พูริเยร์สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5-86

จากรูปที่ 5-89 จะพบว่า มีแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกับความถี่ BSF โดยลักษณะของแถบความถี่ข้างจะชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อภาระมีค่ามากขึ้น แต่จากการสังเกตสัญญาณในรูปที่ 5-86 จะพบว่าจะมีรอบการวนเกิดซ้ำของอิมพัลส์ที่ความถี่ต่ำกว่ารอบการหมุนของเพลลา ด้วยแนวคิดเดียวกันกับรูปที่ 5-88 จึงมีความเป็นไปได้ว่า ยอดของแถบความถี่ข้างอาจจะมีส่วนของความถี่ของการเวียนเกิดของอิมพัลส์ ซึ่งเป็นความถี่ต่ำแทรกอยู่ ดังนั้นจึงจะตัดเฉพาะช่วงความถี่ที่เกิดแถบความถี่ข้างขึ้น ดังแสดงในบริเวณในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงของรูปที่ 5-87 - 5-89 มาขยายเพื่อพิจารณาถึงลักษณะของยอดแหลมของแถบความถี่ข้างในกรณี BPOR, BPIR และ BSF ดังแสดงในรูปที่ 5-90(ก) - (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 5-90 ส่วนที่ถูกขยายของฟูริเยร์สเปกตรัมรูปที่ 5-87 - 5-89 (ก) BPOR, (ข) BPIR และ (ค) BSF

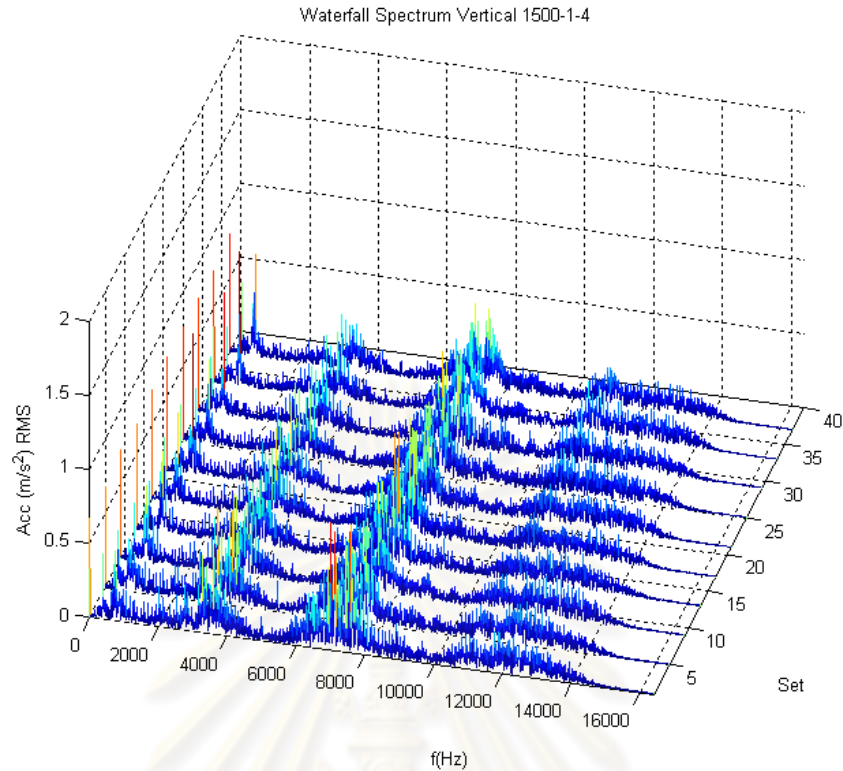
จากรูปขยายที่ 5-89 เมื่อพิจารณาร่วมกับสัญญาณในรูปที่ 5-84 - 5-86 จะพบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5-90 กับคาบของอิมพัลส์ความเสียหายและคาบการเวียนเกิดของอิมพัลส์ โดยจะเห็นว่าความถี่ดังกล่าวจะกลายเป็นแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัม ได้ความถี่ของการเวียนเกิดของอิมพัลส์ในรูปที่ 5-86 จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วรอบซึ่งถือว่าเป็นความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงเกิดยอดสเปกตรัมเป็นเส้นแซมขึ้นมา ดังรูปที่ 5-90(ค) ส่วนในกรณีของ BPOR จะไม่มียอดที่ความถี่อื่นเข้ามาแทรกนอกจาก BPOR เนื่องจากอิมพัลส์เกิดขึ้นเป็นคาบคงที่ตลอด ดังนั้นฟูริเยร์สเปกตรัมที่ได้จึงมีแถบความถี่ข้างที่ชัดเจนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองตำแหน่งอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 5-90(ก)

เนื่องจากสัญญาณในโดเมนเวลาดังรูปที่ 5-84 - 5-86 มีจำนวนจุดข้อมูลถึง 32768 จุดข้อมูลต่อเนื่องกัน ถ้าจะนำมาใช้คำนวณจะให้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นจึงนำสัญญาณดังกล่าวมาตัดออกเป็น 8 ส่วน ซึ่งมีความยาวเพียงพอในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น

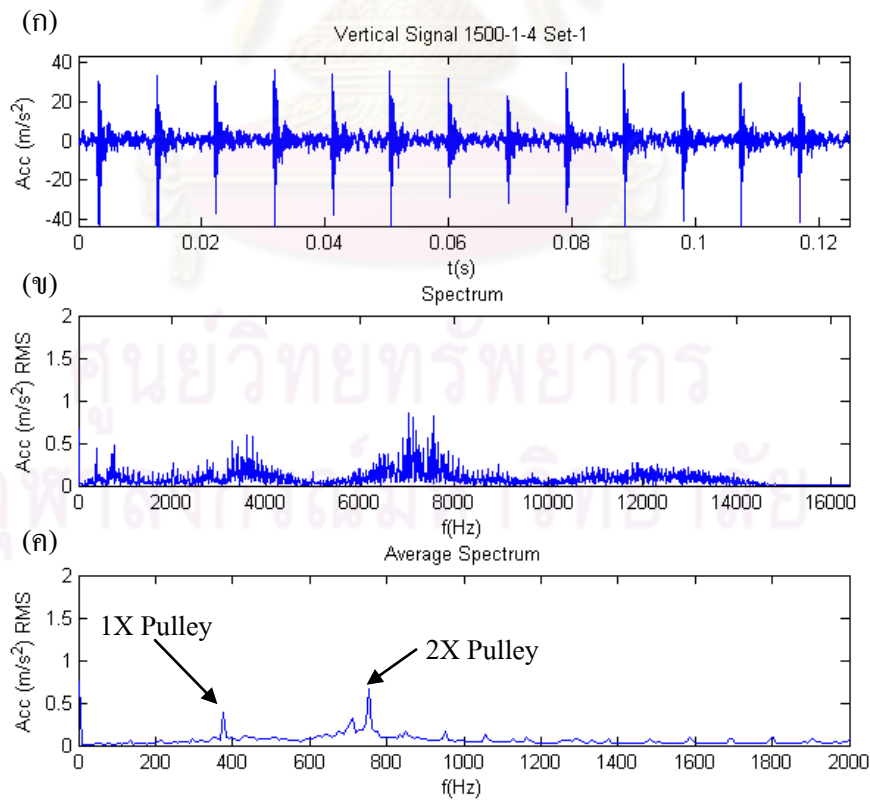
#### 5-2-4 ผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย

##### ความเสียหายที่ราววิ่งนอก

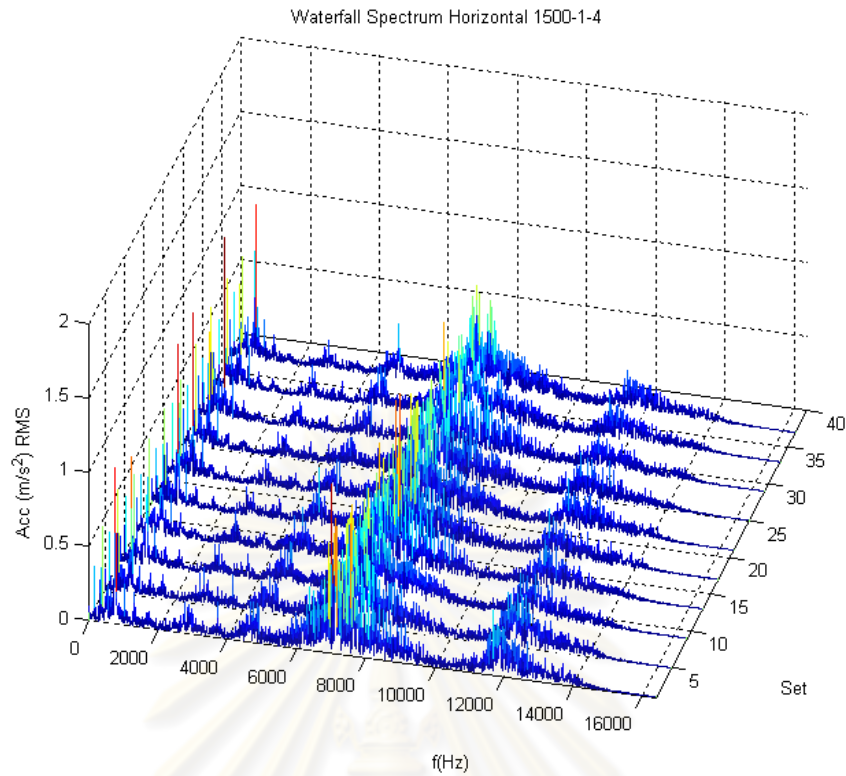
รูปที่ 5-91 แสดง waterfall plot ของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของตลับลูกปืนที่มีความเสียหายที่ราววิ่งนอกกว้าง 0.11mm ภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที่ โดยสัญญาณแต่ละชุดมี 4096 จุดข้อมูล



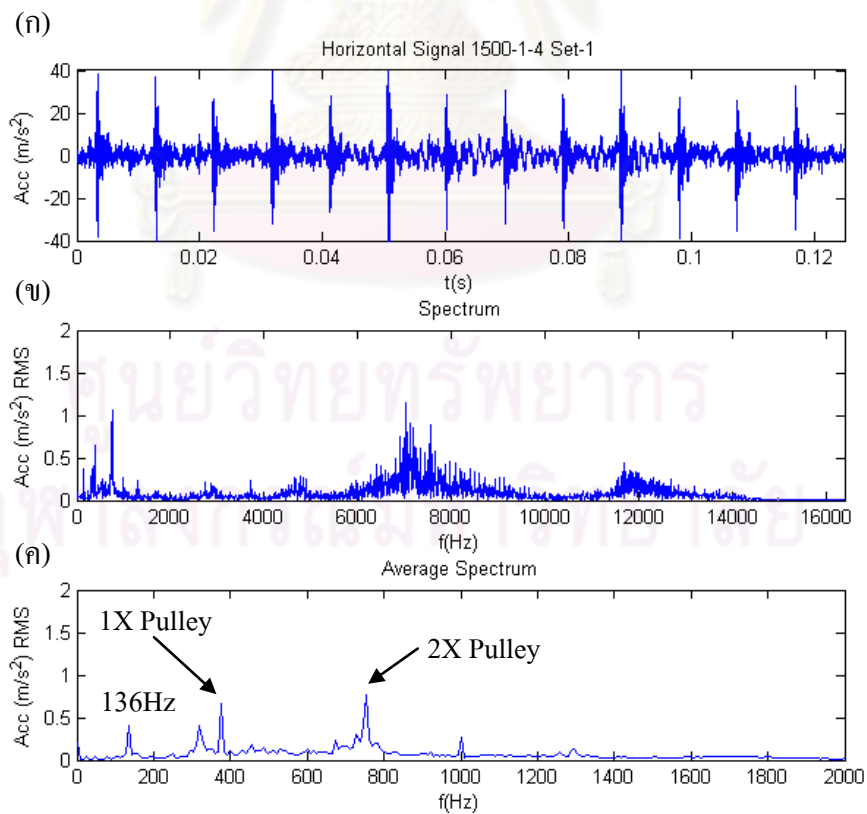
รูปที่ 5-91 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดตลับลูกปืนที่มีความเสียหาย 0.1mm ที่วางวิ่งนอก  
ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



รูปที่ 5-92 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-91: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ  
ในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



รูปที่ 5-93 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดดัลบูลูกปืนที่มีความเสียหาย 0.11mm ที่วางวีนอก ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที

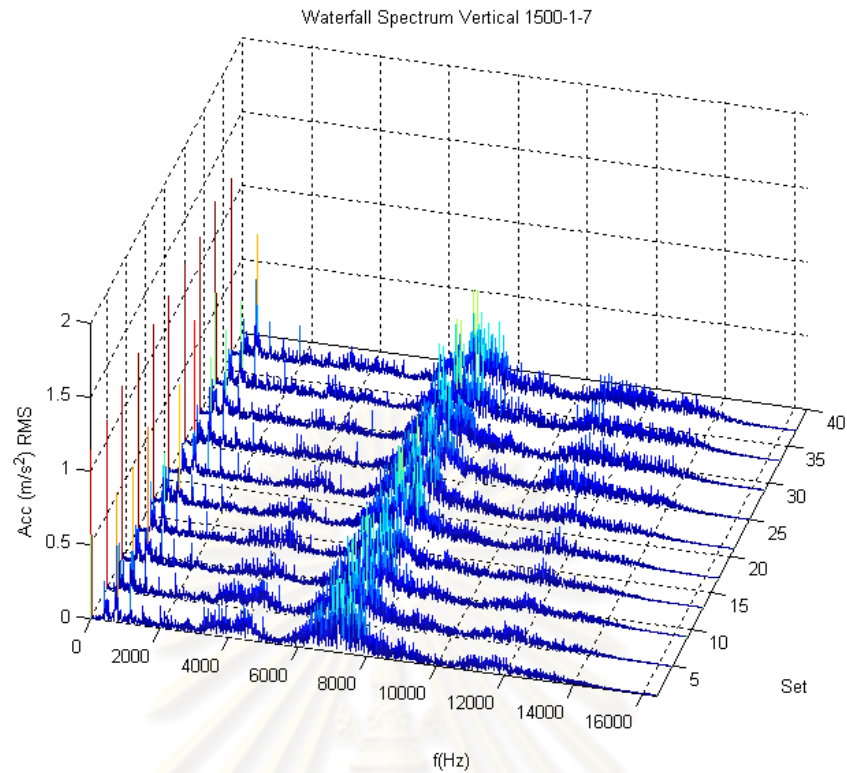


รูปที่ 5-94 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-93: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ ในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูรีเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz

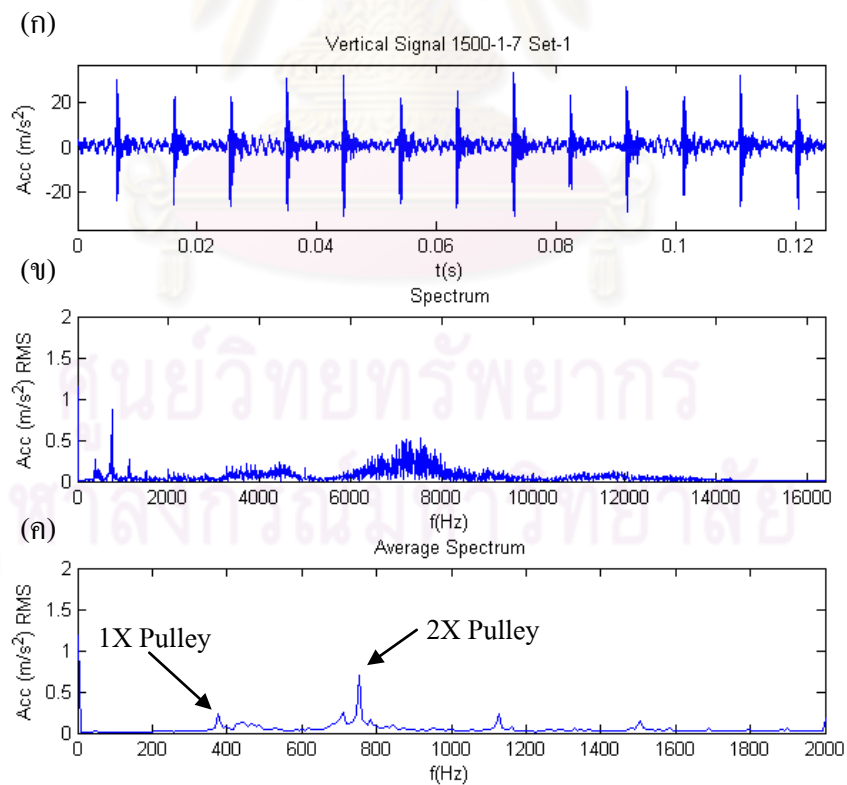
จากรูปที่ 5-91 จะพบว่าขนาดของการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 6000-8000Hz และ 10000-14000Hz มีค่ามากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5-70 อีกทั้งยังเกิดลักษณะของพื่นยกในช่วง 2000-4000Hz เมื่อพิจารณารายละเอียดในรูปที่ 5-92 จะพบลักษณะแถบความถี่ข้างที่ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วง 2000-4000Hz และ 6000-8000Hz ถ้าพิจารณาต่อไปอีกจะพบว่าแถบความถี่ข้างดังกล่าวมีระยะห่าง 104.11Hz ซึ่งเป็นเส้นสเปกตรัมที่ใกล้เคียงกับความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายดังกล่าวที่ 106.25Hz มากที่สุด (ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมเท่ากับ 8.0085Hz) ดังนั้นจึงพอยืนยันได้ว่าแบบจำลองสัญญาณความเสียหายที่เป็นการตอบสนองของอิมพัลส์ที่ถูกใช้ในขั้นตอนการศึกษาด้วยการจำลองสัญญาณมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง แต่จะมีสิ่งที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือ ในเครื่องจักรจริงสามารถมีได้หลายความถี่ธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากช่วงที่สัญญาณยกตัวขึ้นมาในรูปที่ 5-91 นอกจากนี้มีสิ่งที่น่าสนใจก็คือจะไม่พบความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายในสเปกตรัมค่าเฉลี่ยในรูปที่ 5-92(ค) ซึ่งหมายความว่า การใช้ฟูริเยร์สเปกตรัมทั่ว ๆ ไปที่ไม่ได้วัดในช่วงความถี่ที่สูงนักจะไม่สามารถบ่งบอกถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นได้

ในรูปที่ 5-93 และ 5-94 เป็นการแสดงข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวระดับซึ่งจะพบว่ามีลักษณะโดยรวมที่คล้ายกับรูปที่ 5-91 และ 5-92 แต่จะพบว่าช่วงความถี่ 2000-4000Hz จะมีขนาดลดลงในรูปที่ 5-93 และในรูปที่ 5-94(ค) ยอดสเปกตรัมความถี่ต่ำที่เห็นเด่นชัดที่ความถี่ต่ำที่สุดคือ 136.14Hz ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกับความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายของตลับลูกปืน

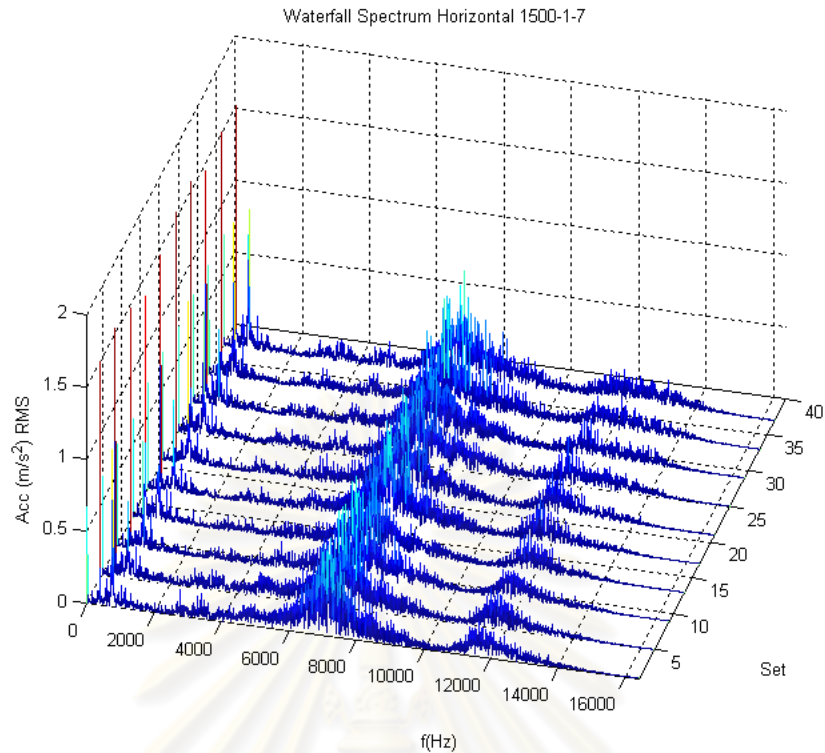
เมื่อเปลี่ยนขนาดของความเสียหายของรางวิ่งนอกให้ใหญ่ขึ้นเป็น 0.17mm จะได้สัญญาณความเสียหายในแนวตั้งดังรูปที่ 5-95 และ 5-96 และในแนวระดับดังรูปที่ 5-97 และ 5-98 ตามลำดับจากรูปที่ 5-95 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 5-91 จะพบว่าพื่นสัญญาณมีลักษณะยกตัวขึ้นมาน้อยลง และในรูปที่ 5-96 (ข) จะพบว่าลักษณะของแถบความถี่ข้างจะไม่ชัดเจนเหมือนในกรณีของรูปที่ 5-92(ข) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากขนาดของความเสียหายที่ใหญ่ขึ้นทำให้ช่วงเวลาของการกระตุ้นนานขึ้นไปด้วย ทำให้อิมพัลส์ที่ได้มีความคมน้อยกว่า (พิจารณาหน้าคลื่นของอิมพัลส์ในรูปที่ 5-96(ค) และ 5-92(ค) ประกอบ จะเห็นได้ว่าหน้าคลื่นในรูปที่ 5-96 มีลักษณะที่เป็นเส้นหนากว่า) จึงทำให้ลักษณะของแถบความถี่ข้างดังกล่าวชัดเจนน้อยลง สำหรับในกรณีของสัญญาณในแนวระดับในรูปที่ 5-97 และ 5-98 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5-93 และ 5-94 ก็ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาในข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการใช้ฟูริเยร์สเปกตรัมทั่ว ๆ ไปไม่สามารถแสดงถึงความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ที่ขนาดของความเสียหายดังกล่าว เช่นเดียวกับที่ขนาดความเสียหาย 0.11mm



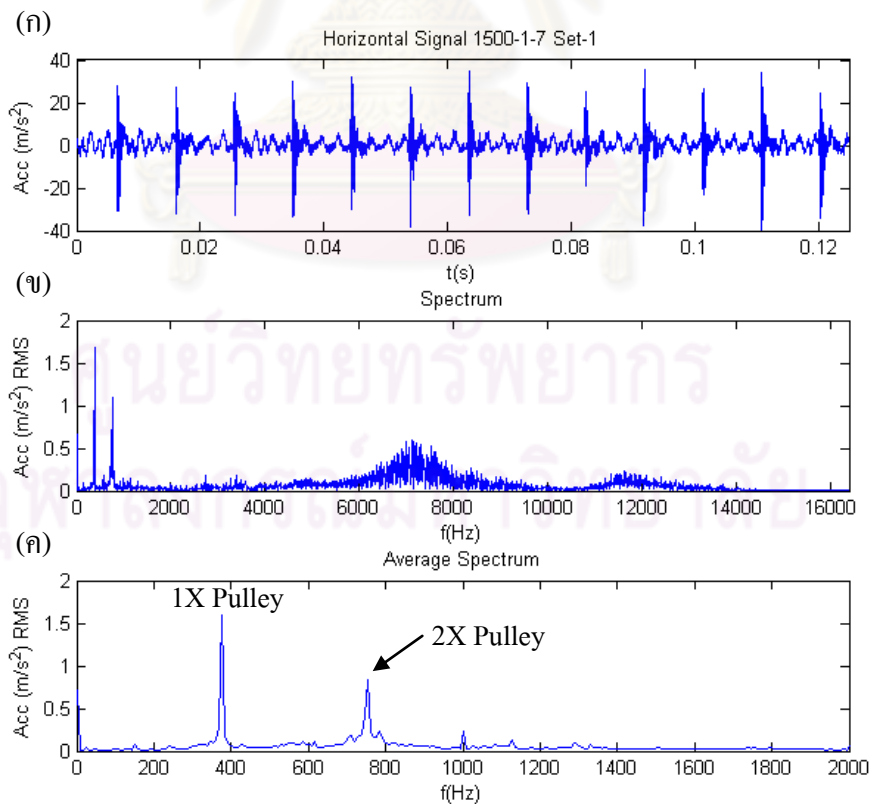
รูปที่ 5-95 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดตลับลูกปืนที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่รางวิ่งนอก  
ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



รูปที่ 5-96 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-95: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ  
ในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



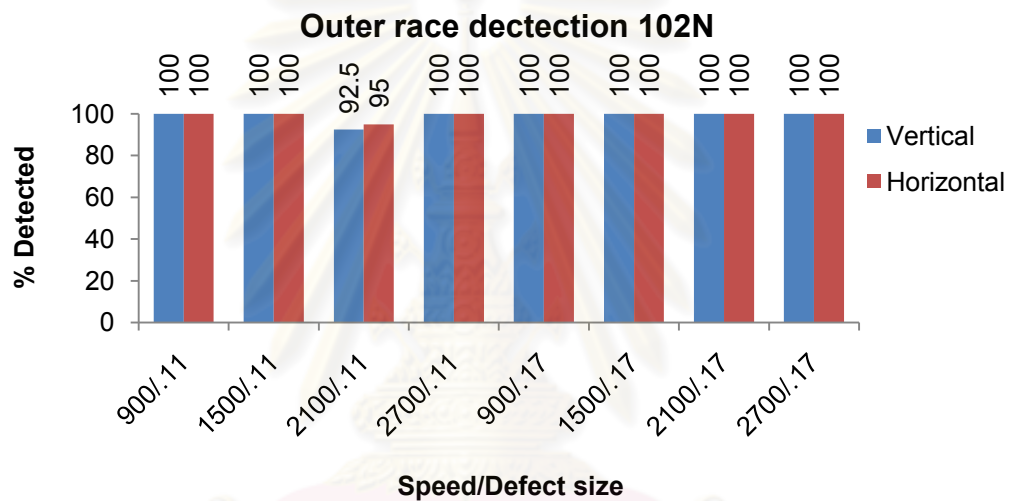
รูปที่ 5-97 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคัลบูกปืนที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่วางวีนอก ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



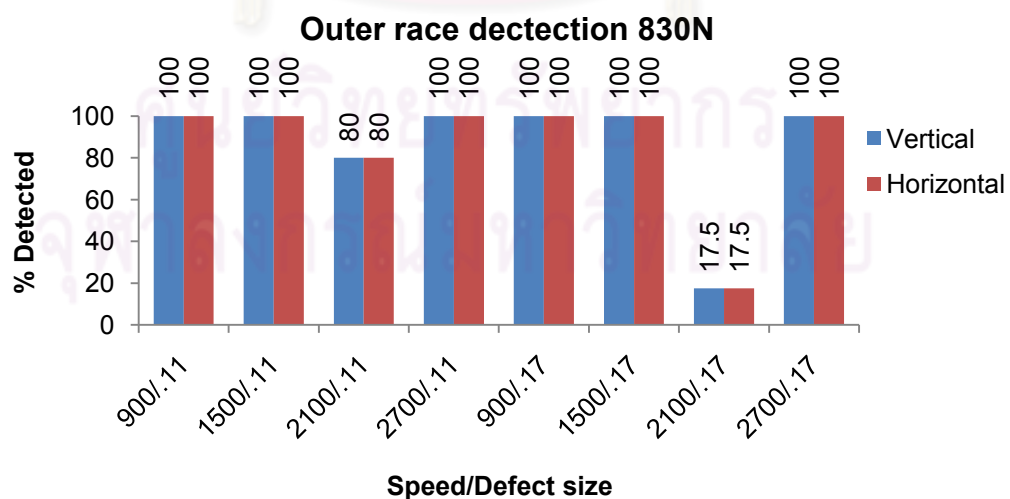
รูปที่ 5-98 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-97: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ ในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz

### ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งนอกด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัม

ในการวัดสัญญาณจริง ตัวกรองมอร์เลต์เวฟเลตจะถูกปรับค่า  $f_0$  ในช่วงระหว่าง 2000-12000Hz เนื่องจากระบบมีความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่งอยู่ในช่วง 10000-14000Hz ด้วย ดังนั้นจึงเลือกค่า  $f_0$  สูงสุดที่ 12000Hz ซึ่งยังคงสอดคล้องกับเงื่อนไข  $f_0 + \frac{\beta}{2} < \frac{f_s}{2}$  อยู่ ผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายซึ่งใช้หลักเกณฑ์เดียวกับที่ใช้ในการศึกษาด้วยการจำลองสัญญาณในหัวข้อที่ 5-1-5 แต่จะมีรายละเอียดที่แตกต่างออกไป โดยประเภทของการตรวจจับจะมีเพียง 2 ประเภทเท่านั้น คือ ตรวจพบ และตรวจไม่พบ เนื่องจากในสัญญาณความเสียหายจริงมีหลายความถี่ธรรมชาติ จึงไม่นำเอาความถี่ธรรมชาติของระบบมาพิจารณา ได้ผลการประเมินที่ภาวะในแนวรัศมี 102, 830 และ 1558N ดังแสดงในรูปที่ 5-99 - 5-101 ตามลำดับ

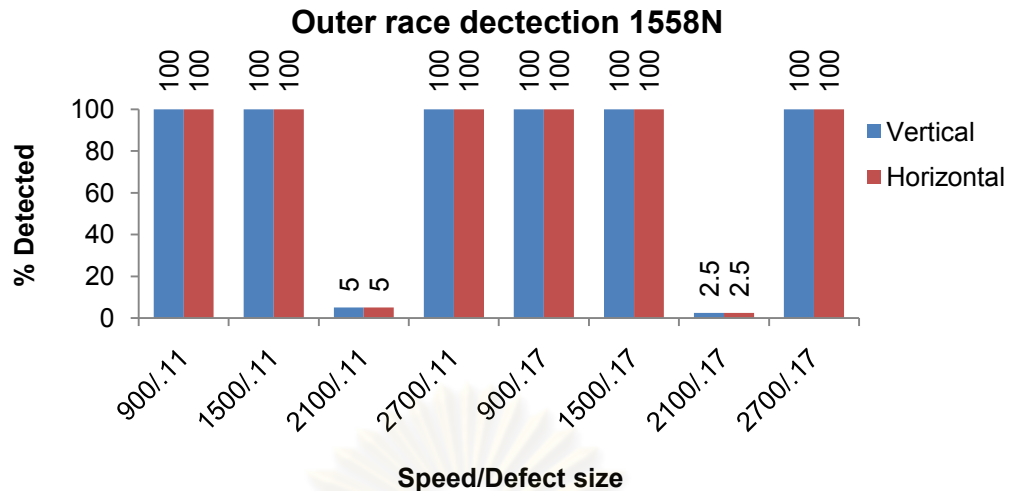


รูปที่ 5-99 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาวะในแนวรัศมี 102N



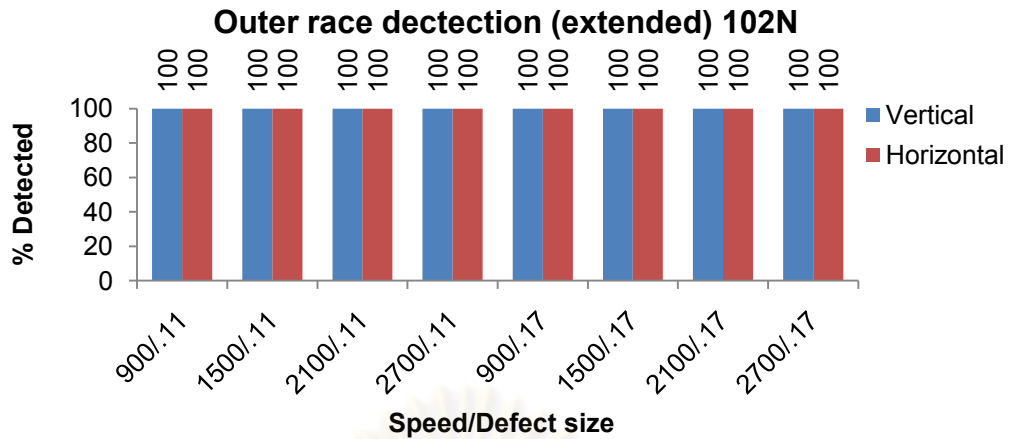
รูปที่ 5-100 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาวะในแนวรัศมี 830N



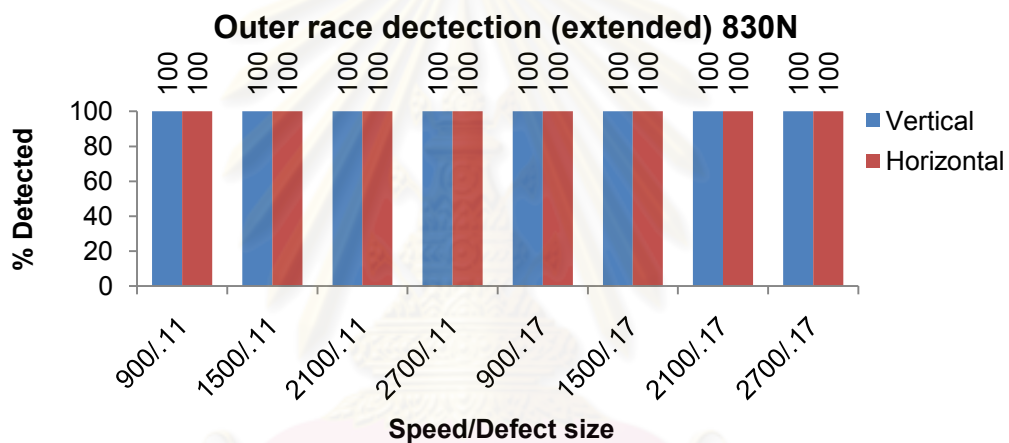


รูปที่ 5-101 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N

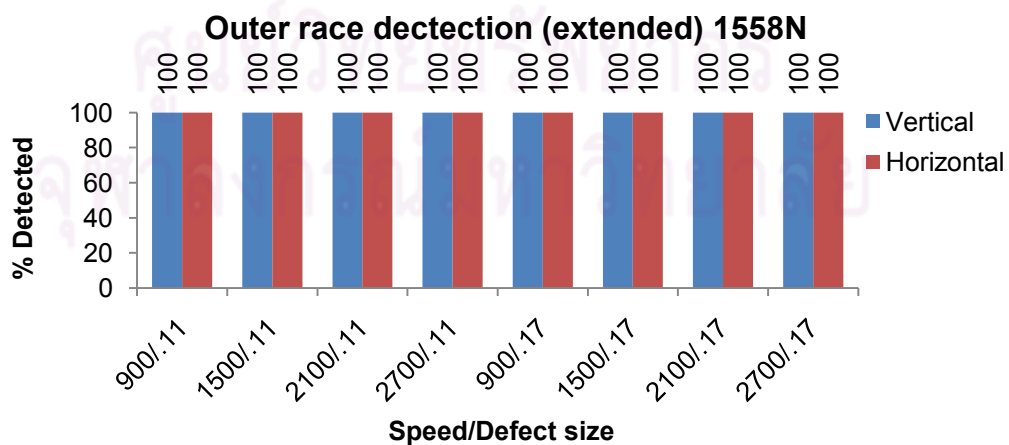
จากรูปที่ 5-100 - 5-101 จะเห็นได้ว่าในกรณีความเร็ว 2100 รอบ/นาที ความถูกต้องในการตรวจจับจะมีค่าต่ำมากจนผิดสังเกต ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายมีค่า 148.75Hz ซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นสเปกตรัมสองเส้นในเอ็นวีลอปสเปกตรัม (144.15 และ 152.16Hz) ดังแสดงในตารางที่ 5-3 ซึ่งทั้ง 40 กรณีของการตรวจจับในกรณี 2100 รอบ/นาที แสดงค่าความถี่ที่ตรวจพบที่ 144.15 และ 152.16Hz เท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่การตรวจจับไม่ได้เนื่องจากความถี่ลักษณะเฉพาะอยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นสเปกตรัมทั้งสองเส้นพอดี ทำให้เกิดความสับสนว่าค่าที่ถูกต้องการจะเป็นค่าใด ในกรณีดังกล่าวจะแก้ปัญหาก็ได้โดยการนำสัญญาณในโดเมนเวลาที่อยู่ติดกันสองตัวมาต่อกัน ที่สามารถทำเช่นนี้ได้เพราะสัญญาณแต่ละชุดที่มีความยาว 4096 จุดข้อมูลเกิดจากสัญญาณที่เก็บต่อเนื่องกัน 32768 จุดข้อมูลที่ถูกตัดแบ่งเป็น 8 ช่วง ดังนั้นผลที่ได้จะทำให้ความละเอียดของเส้นสเปกตรัมในเอ็นวีลอปสเปกตรัมมีค่าเป็นสองเท่าของค่าเดิม ทำให้มีเส้นสเปกตรัมที่ 148.16Hz ซึ่งใกล้กับค่าความถี่ลักษณะเฉพาะมากกว่า น่าจะทำให้การตัดสินใจว่าตรวจพบสัญญาณความเสียหายมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่เพิ่มความละเอียดได้ผลการตรวจจับในกรณี 2100 รอบ/นาที ซึ่งจะทำให้จำนวนชุดข้อมูลดังกล่าวเหลืออยู่ 20 ชุด ได้ดังรูปที่ 5-102 - 5-104 ตามลำดับ จากรูปที่ 5-102 - 5-104 จะพบว่าการใช้เอ็นวีลอปสเปกตรัมสามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งนอกของดัลลิ่งถูกปืนได้ทั้งหมด



รูปที่ 5-102 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน



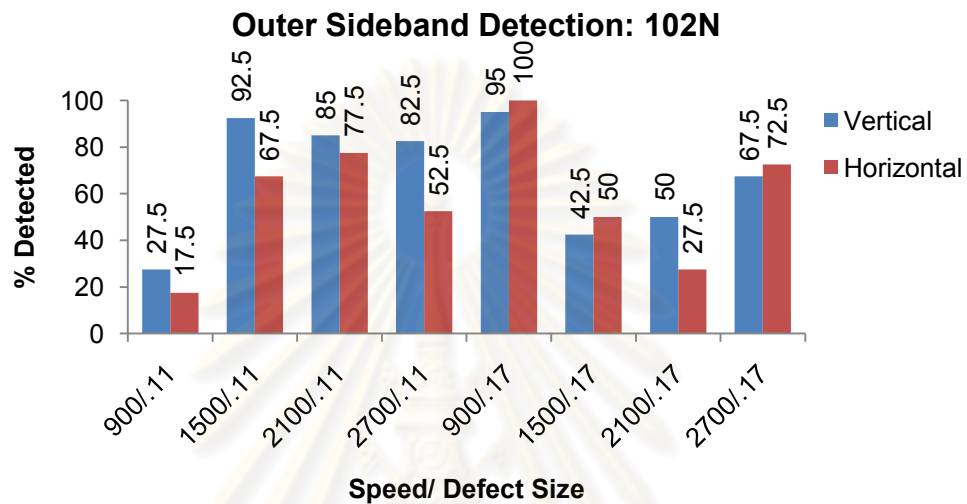
รูปที่ 5-103 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน



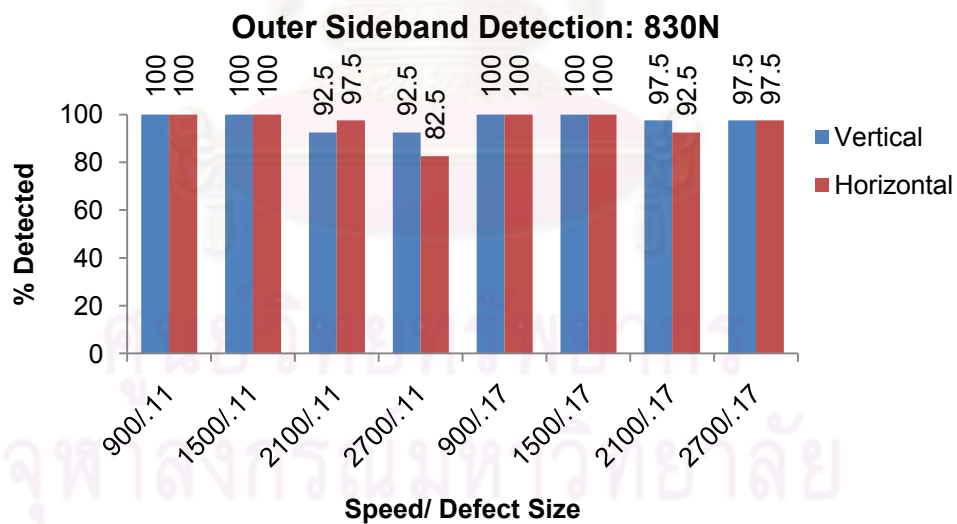
รูปที่ 5-104 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งนอกภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ราววังนอกด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม

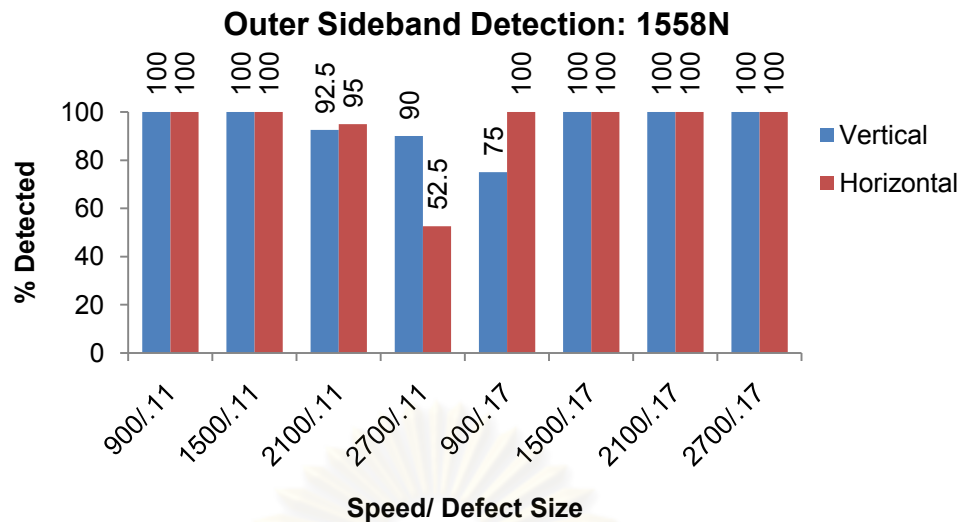
การตรวจจับความเสียหายด้วยนับแถบความถี่ข้างสามารถทำได้ตามขั้นตอนที่แสดงในหัวข้อ 5-1-9 และจากหัวข้อ 5-2-1 จะได้ว่าแถบความถี่ข้างต้องมี 3 ช่องติดกันขึ้นไปจึงจะถือว่าเป็นความเสียหายขึ้น จะได้ผลการตรวจจับความเสียหายเมื่อพิจารณาของแถบความถี่ข้างที่ BPOR ตามตารางที่ 5-3 ในกรณีเกาะในแนวรัศมีต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5-105 - 5-107



รูปที่ 5-105 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่เกาะในแนวรัศมี 102N



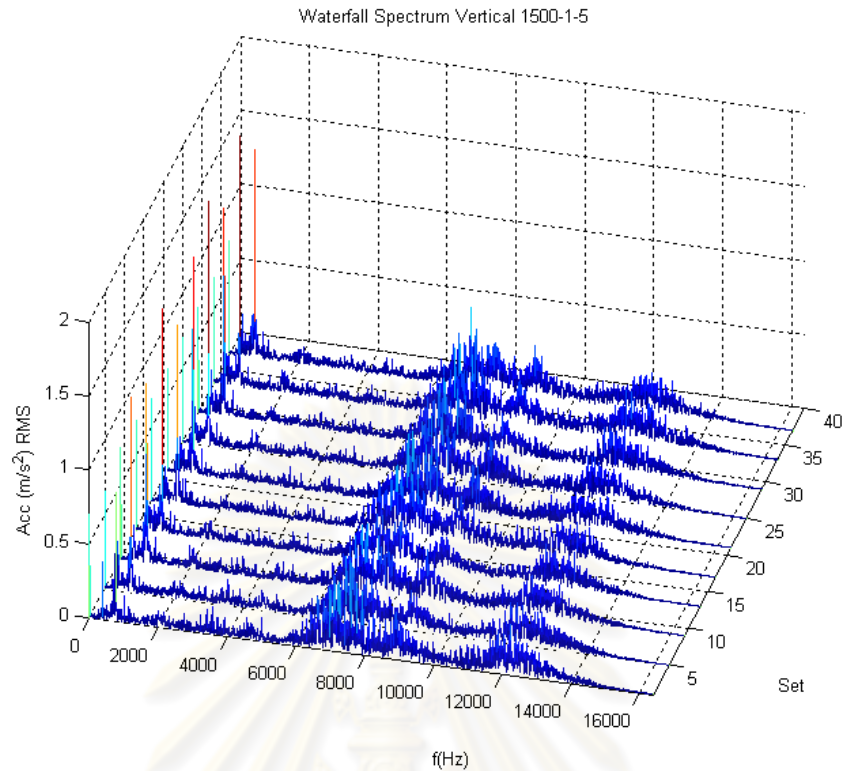
รูปที่ 5-106 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่เกาะในแนวรัศมี 830N



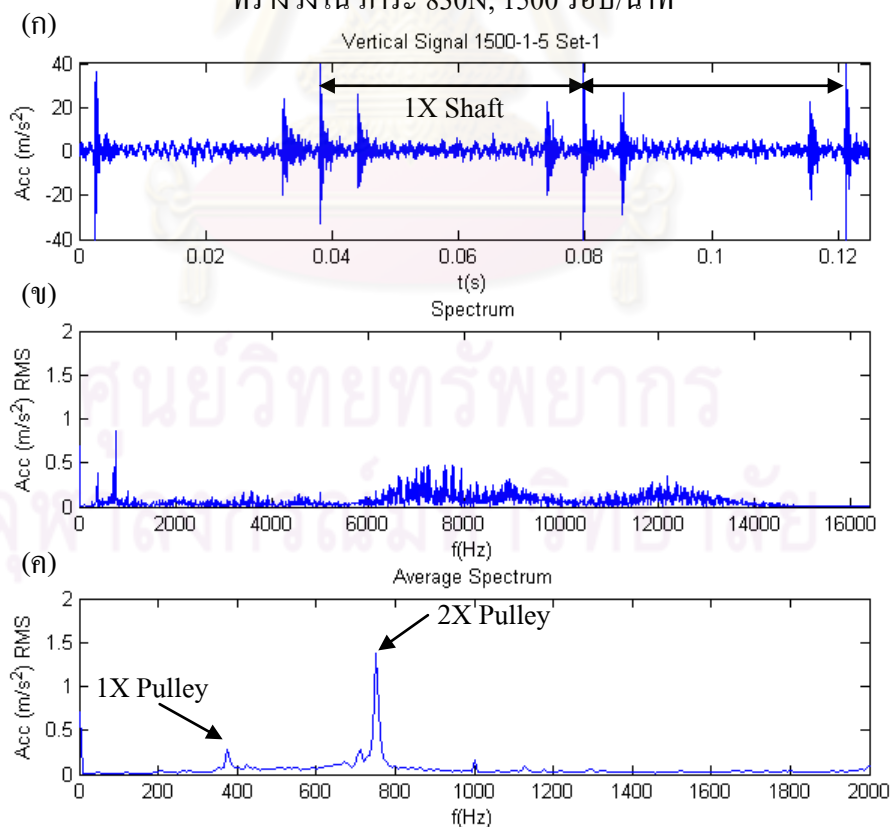
รูปที่ 5-107 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 1558N

จากรูปที่ 5-105 จะเห็นได้ว่าการตรวจจับความเสียหายด้วยการนับแถบความถี่ข้างให้ผลความถูกต้องในการตรวจจับที่ต่ำในกรณีภาระในแนวรัศมี 102N ทั้งนี้เนื่องจากภาระดังกล่าวเป็นภาระที่คำนวณจากการยุบตัวของสปริง ภาระที่แท้จริงที่กระทำต่อบริเวณที่รับภาระ (load zone) จะมิต่ำกว่าค่านี้ ทำให้ความรุนแรงในการเกิดอิมพัลส์มีค่าต่ำจึงเกิดแถบความถี่ข้างไม่ชัดเจน สิ่งนี้สามารถยืนยันได้ด้วยผลการตรวจจับในรูปที่ 5-106 และ 5-107 ซึ่งมีภาระมากกระทำต่อบริเวณที่รับภาระมากขึ้น ทำให้เกิดอิมพัลส์ที่มีความรุนแรงมากกว่า ทำให้เกิดแถบความถี่ข้างที่ชัดเจนมากกว่า ส่งผลให้อัตราการตรวจจับพบสูงขึ้นตามไปด้วย แต่มีข้อสังเกตว่าในกรณีการตรวจจับในแนวระดับที่ภาระ 1558N และความเร็ว 2700 รอบ/นาที ของความเสียหายขนาด 0.11mm ความถูกต้องในการตรวจจับมีค่าต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของการสั่นสะเทือนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ความเสียหายของตลับลูกปืนมีขนาดใหญ่ ทำให้เกณฑ์ในการตรวจจับขอดีเพื่อหาแถบความถี่ข้างมีค่าสูงขึ้น ประกอบกับลักษณะของแถบความถี่ข้างที่ไม่ชัดเจน ทำให้สามารถตรวจจับแถบความถี่ข้างได้น้อย ความเสียหายที่ราววังใน

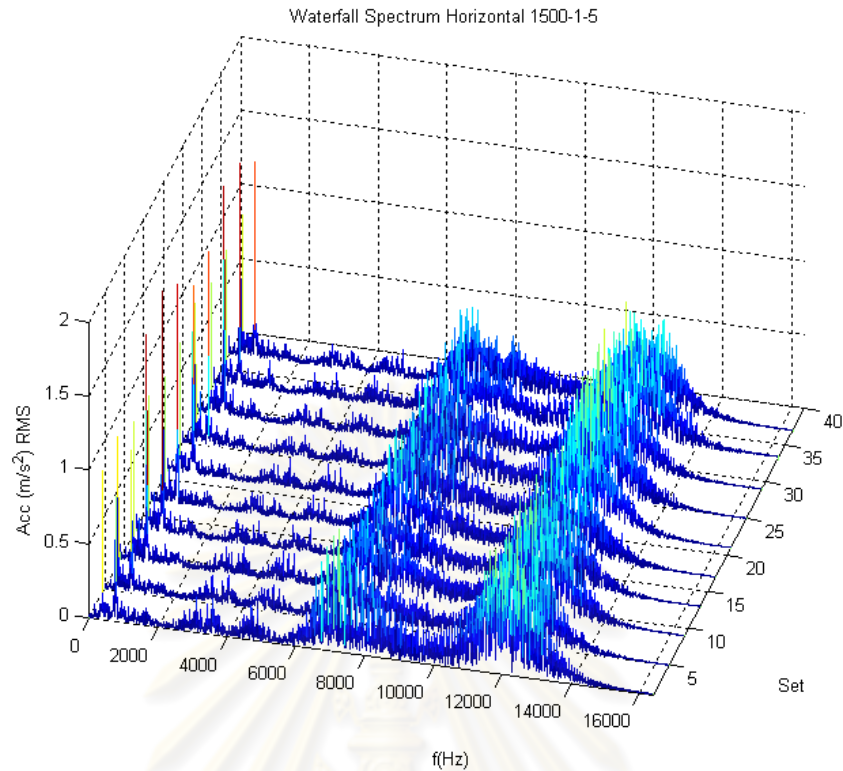
รูปที่ 5-108 แสดง waterfall plot ของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของตลับลูกปืนที่มีความเสียหายที่ราววังในขนาด 0.10mm จะเห็นได้ว่า จะพบลักษณะแถบความถี่ข้างในช่วงความถี่ 6000-12000Hz แต่จะไม่ชัดเจนเช่นกรณีความเสียหายที่ราววังนอก และในรูปที่ 5-109(ก) จะพบว่าอิมพัลส์ไม่ได้เกิดติด ๆ กัน ทั้งนี้เนื่องจากภาระที่กระทำต่อบริเวณที่เกิดความเสียหายไม่คงที่ แต่จะเห็นได้ว่า จะมีการเวียนเกิดที่ทุก ๆ 1 รอบการหมุนของเพลลา จึงทำให้สเปกตรัมในรูปที่ 5-109(ข) มียอดแหลมขึ้นมาด้วยเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 5-2-3 จึงทำให้ยอดของแถบความถี่ข้างไม่มีความชัดเจนนัก ส่วนในรูปที่ 5-112 - 5-115 จะแสดงข้อมูลของสัญญาณความเสียหายที่ราววังในที่มีขนาด 0.17mm



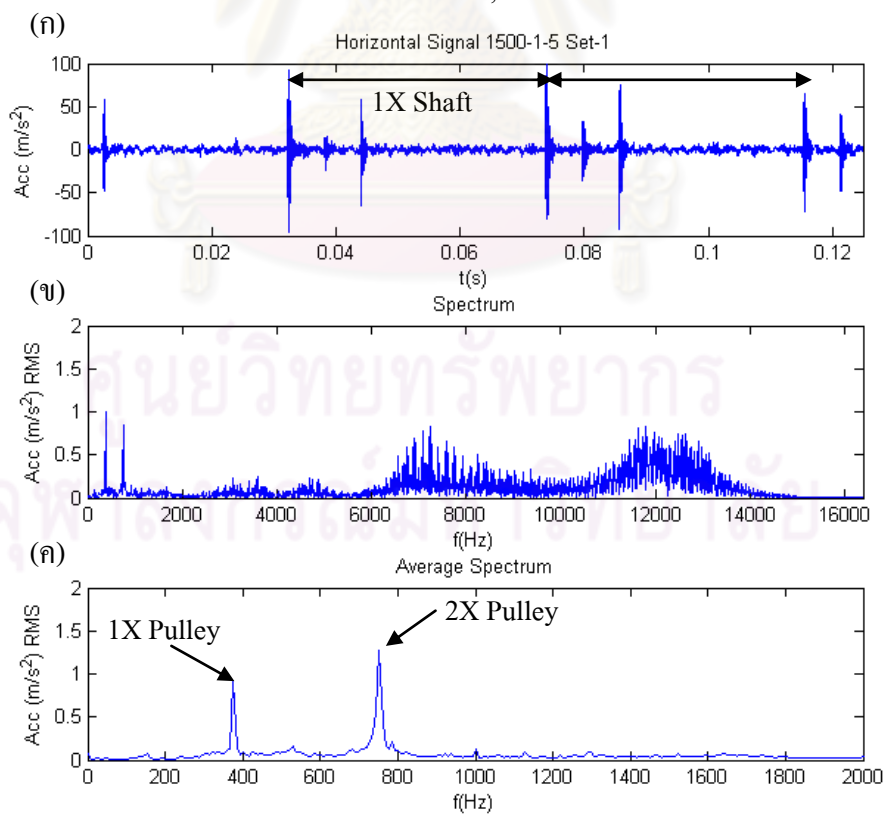
รูปที่ 5-108 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดตลับลูกปืนที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่วางไว้ใน ภาวะ 830N, 1500 รอบ/นาที



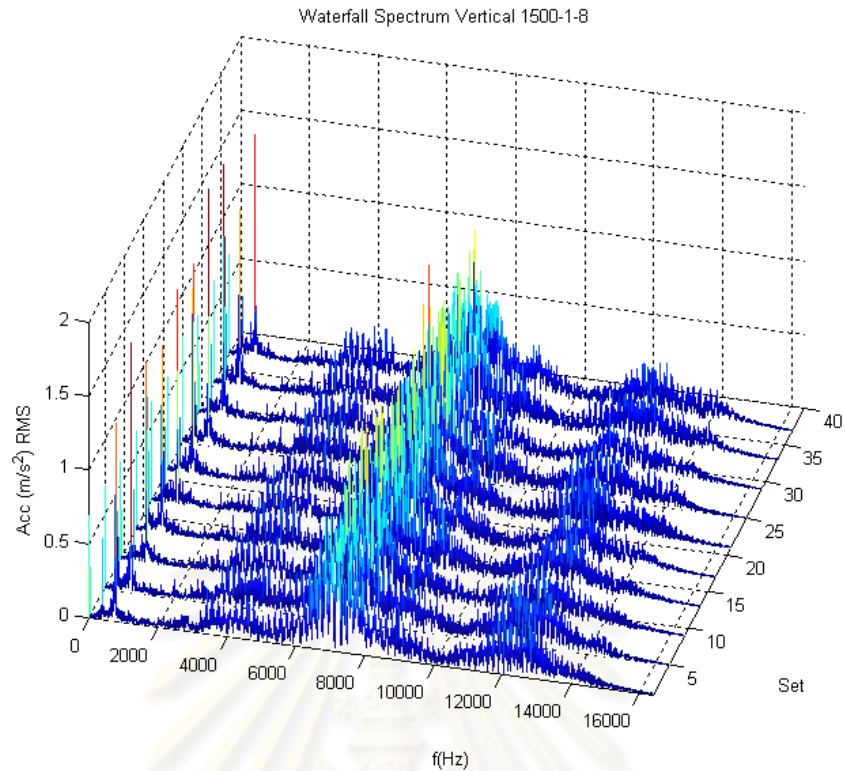
รูปที่ 5-109 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-108: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



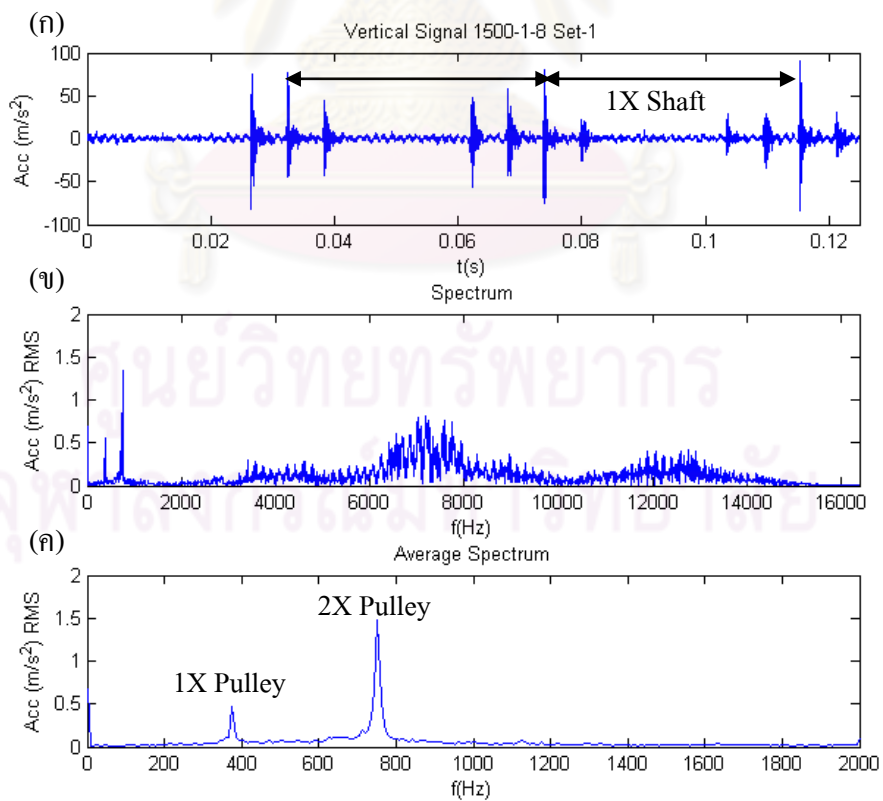
รูปที่ 5-110 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคัลบูกปืนที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่วางไว้ใน ภาวะ 830N, 1500 รอบ/นาที



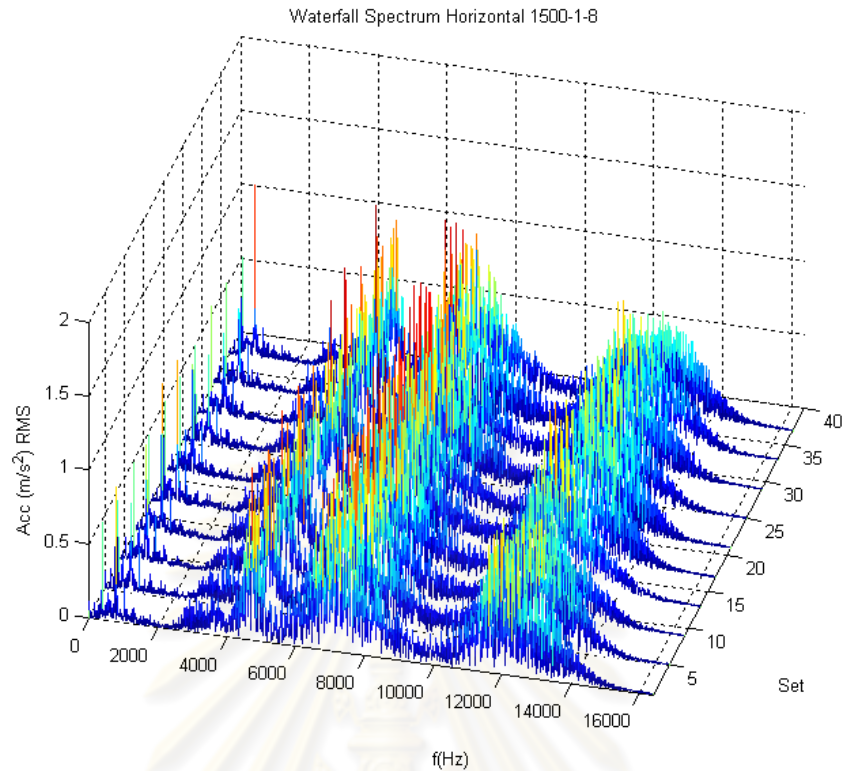
รูปที่ 5-111 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-110: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



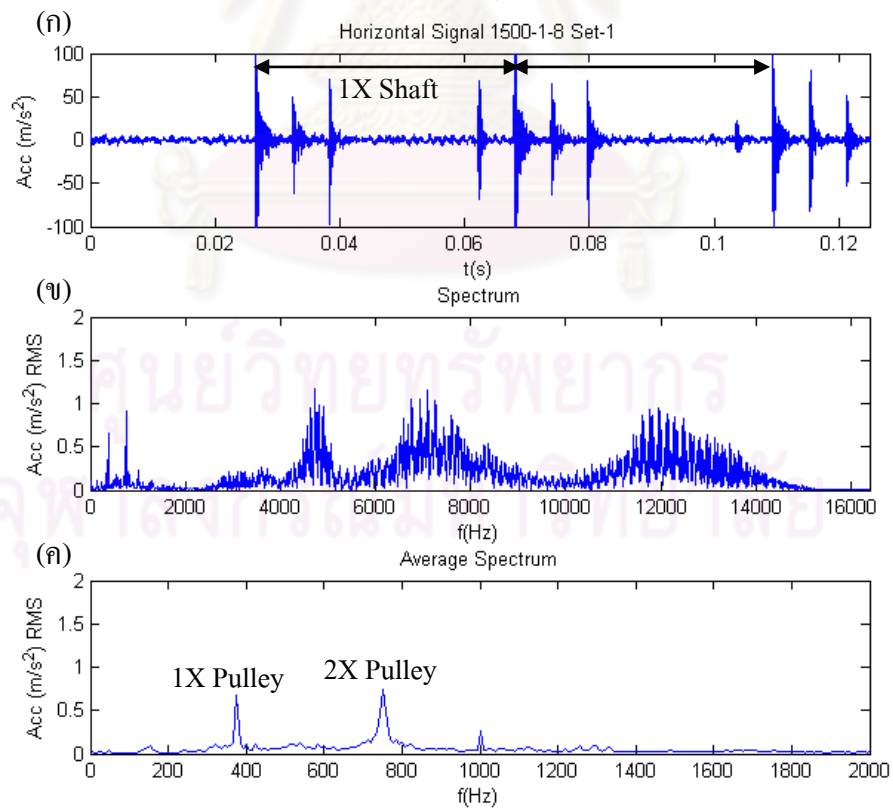
รูปที่ 5-112 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่วางไว้ใน ภาวะ 830N, 1500 รอบ/นาที



รูปที่ 5-113 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-112: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



รูปที่ 5-114 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคลัทช์ปืนที่มีความเสียหาย 0.17mm ที่วางไว้ใน ภาวะ 830N, 1500 รอบ/นาที



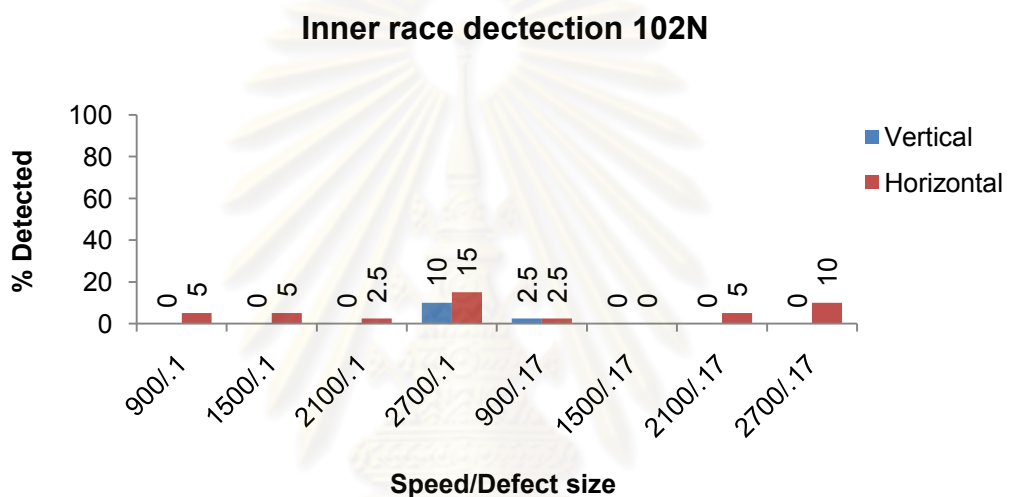
รูปที่ 5-115 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-114: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



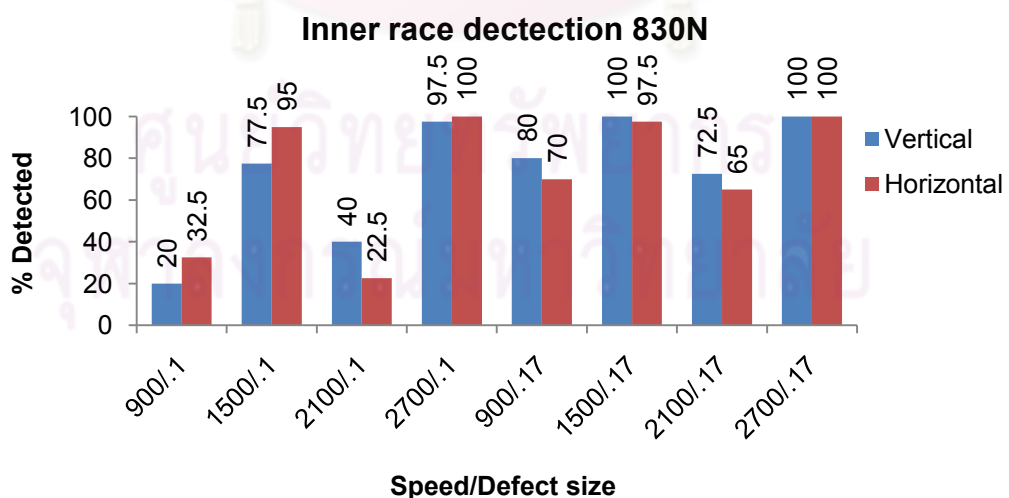
เมื่อพิจารณารูปที่ 5-112 - 5-115 เทียบกับรูปที่ 5-108 - 5-111 จะพบว่าขนาดของความเสียหายที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดลักษณะของแถบความถี่ข้างที่มากขึ้น โดยเฉพาะขนาดในช่วงความถี่ 6000-8000Hz ทั้งแถบความถี่ข้างและตัวพื้นสัญญาณจะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งในแนวระดับและแนวดิ่ง

ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รางวิ่งในด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัม

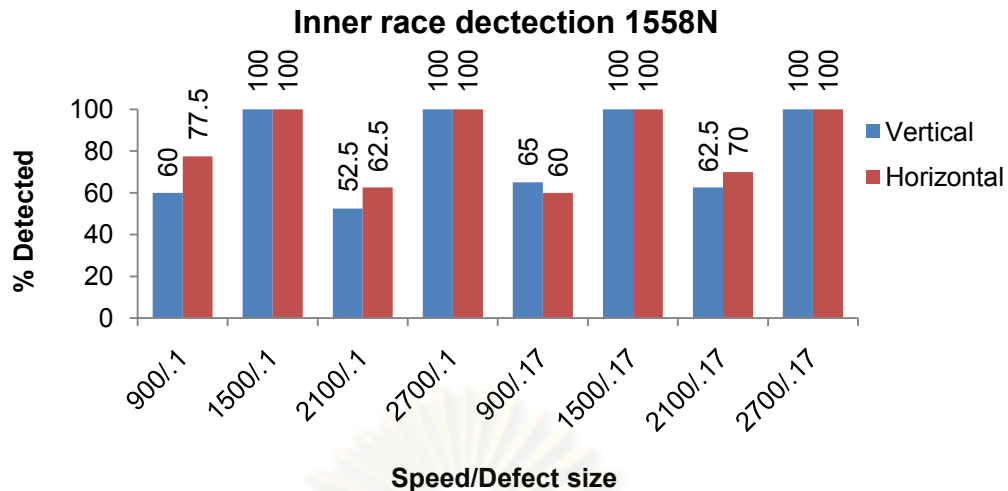
ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะใช้วิธีและประเภทของผลการตรวจจับเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้แล้วในกรณีของความเสียหายที่รางวิ่งนอก ได้ผลการตรวจจับที่ ภาระต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5-116 - 5-118



รูปที่ 5-116 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N



รูปที่ 5-117 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N

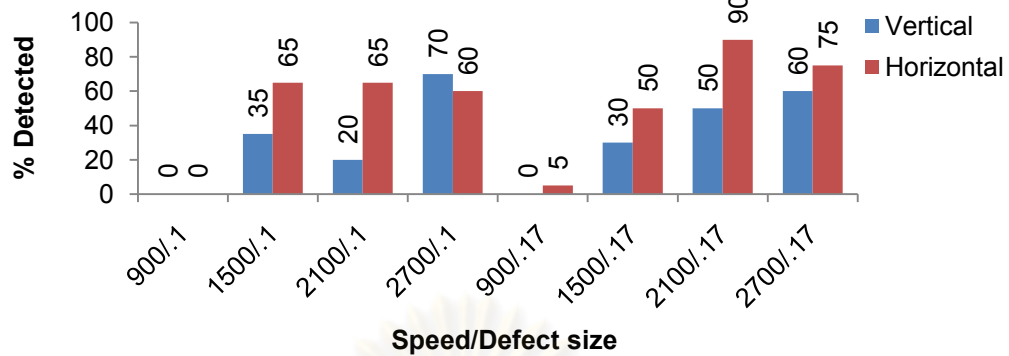


รูปที่ 5-118 ผลการตรวจจับความเสียหายที่ราววิ่งในภายใต้ภาระในแฉวรัศมี 1558N

จากรูปที่ 5-116 จะพบว่าในกรณีที่มีภาระ 102N เอ็นวีลอปสเปกตรัมไม่ประสบความสำเร็จในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากทุก ๆ หนึ่งรอบของการหมุนของเพลลาจะเกิดอิมพัลส์เพียงครั้งเดียว แทนที่จะเกิดอิมพัลส์หลาย ๆ ครั้งที่มีคาบสอดคล้องกับความเสียหายที่ราววิ่งในดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5-85 โดยจะเห็นได้ว่ากรณีที่มีภาระน้อยที่สุดจะแสดงคาบระหว่างอิมพัลส์ที่สอดคล้องกับความเสียหายน้อยกว่ากรณีที่มีภาระอีก 2 กรณีอย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มภาระให้มากขึ้น จะเห็นได้ว่าความถูกต้องในการตรวจจับโดยรวมเพิ่มขึ้นมาอย่างชัดเจนจากกรณีที่ไม่มีการะ แต่ในกรณีระหว่างภาระ 830N และ 1558N จะไม่มีความแตกต่างของผลการตรวจจับโดยรวมนัก ดังแสดงในรูปที่ 5-117 และ 5-118 และเมื่อพิจารณาทั้งสองรูปเพิ่มเติมจะพบว่าที่กรณีความเร็ว 900 และ 2100 รอบ/นาที จะมีความถูกต้องในการตรวจจับต่ำกว่าที่ความเร็วอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ดังกล่าวอยู่ระหว่างเส้นสเปกตรัมในเอ็นวีลอปสเปกตรัมพอดี้ ดังแสดงในตารางที่ 5-3 ดังนั้นจึงจะนำสัญญาณทั้งสองชุดมาต่อกันเช่นเดียวกับที่เคยทำในกรณีของราววิ่งนอก จะได้ผลการตรวจจับความเสียหายที่ราววิ่งในดังแสดงในรูปที่ 5-119 - 5-121

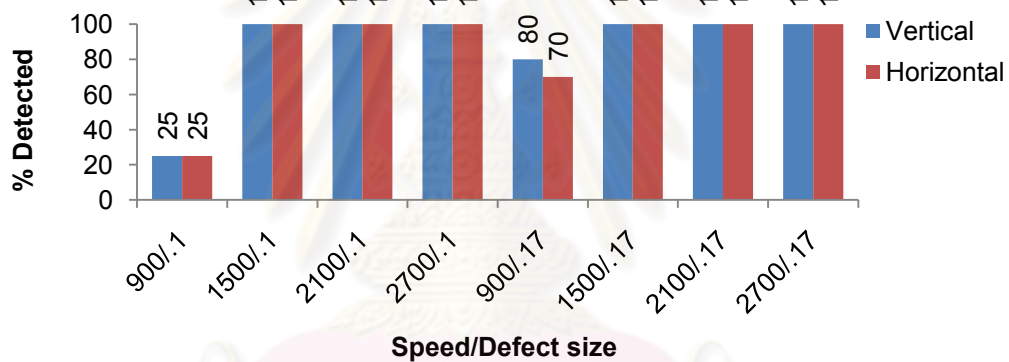
จากรูปที่ 5-119 จะพบว่าในกรณีที่มีภาระน้อยการตรวจจับยังคงไม่ประสบผลสำเร็จในภาพรวม แต่ในกรณีที่ภาระมากขึ้น จะเห็นได้ว่าการนำสัญญาณมาต่อกันสามารถแก้ไขปัญหาผลการตรวจจับที่ความเร็ว 2100 รอบ/นาทีได้ ในขณะที่ความเร็ว 900 รอบ/นาที จะได้ผลการตรวจจับที่ดีขึ้นเฉพาะที่ความเสียหายขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากแผลขนาดใหญ่ให้แถบความถี่ข้างที่มีความชัดเจนกว่าในกรณีของความเสียหายขนาดเล็ก เช่นเดียวกับในกรณีของความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5-108 - 5-115

### Inner race detection (extended) 102N



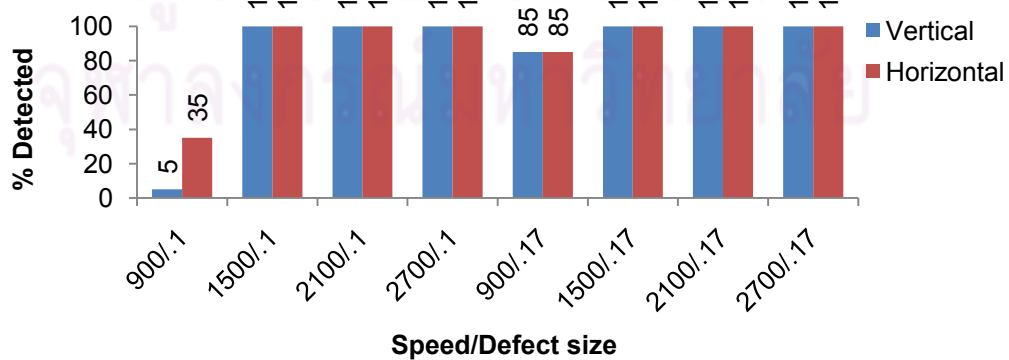
รูปที่ 5-119 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแวนรค์มี 102N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

### Inner race detection (extended) 830N



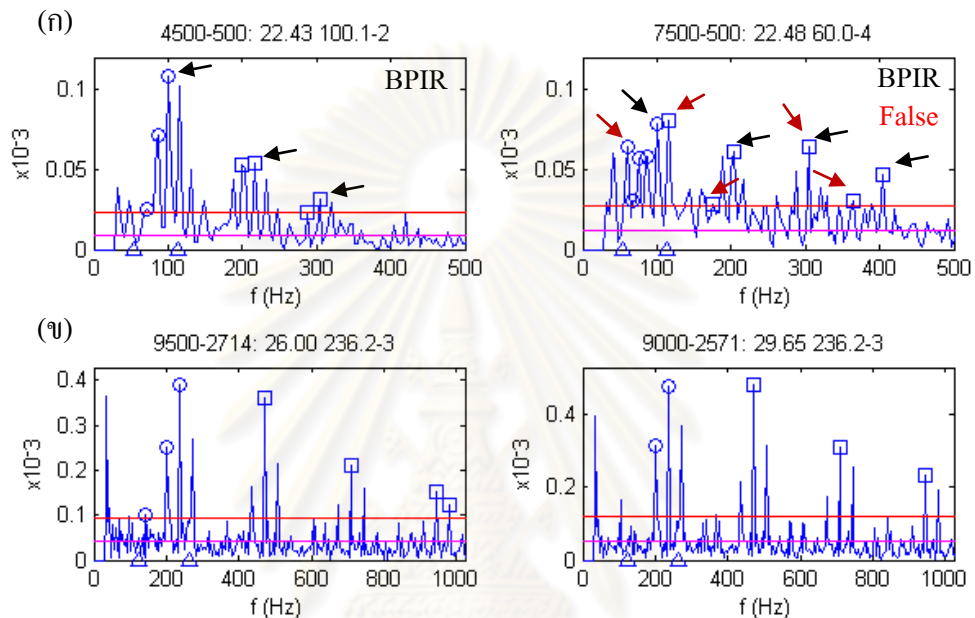
รูปที่ 5-120 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแวนรค์มี 830N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

### Inner race detection (extended) 1558N



รูปที่ 5-121 ผลการตรวจจับความเสียหายที่รางวิ่งในภายใต้ภาระในแวนรค์มี 1558N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

อย่างไรก็ตาม จะพบว่าเมื่อนำสัญญาณมาต่อกันในกรณีความเสียหายขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 900 รอบ/นาที กลับมีความถูกต้องในการตรวจจับที่ต่ำลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการมอดูเลตขนาด (amplitude modulation) ที่เกิดจากรอบการเวียนเกิดของอิมพัลส์เนื่องจากวงจรการรับภาระ (loading cycle) ของบริเวณที่เกิดความเสียหาย (ในที่นี้มีค่าเท่ากับรอบการหมุนของเพลลา) ดังแสดงในรูปที่ 5-122(ก) โดยสคมถ์ทางซ้ายแสดงสัญญาณในแนวตั้ง และทางขวาแสดงสัญญาณในแนวระดับตามลำดับ



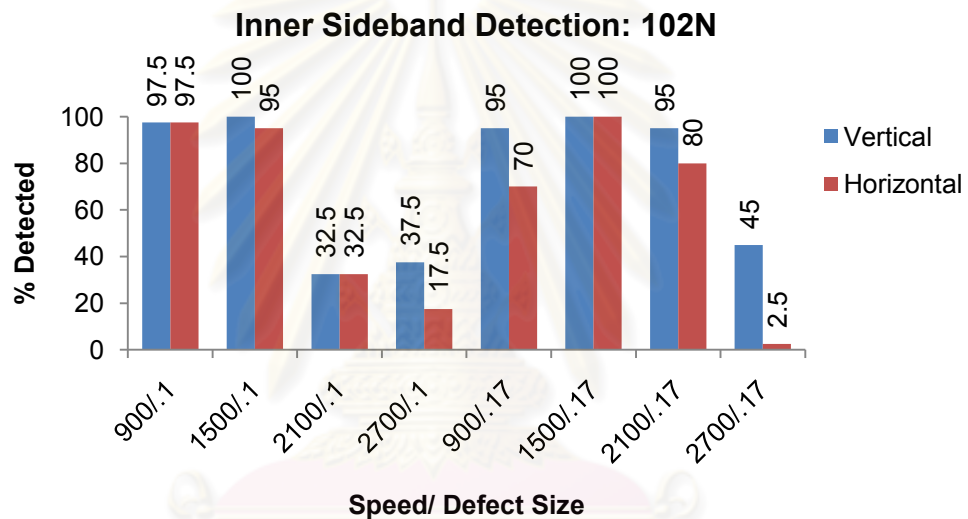
รูปที่ 5-122 ผลของการมอดูเลตขนาดที่มีต่อเอ็นวิลอปสเปกตรัมในกรณีที่เกิดความเสียหายที่  
 รางวิ่งใน ที่ภาระ 1558N ความเร็วรอบ (ก) 900 รอบ/นาที, (ข) 2100 รอบ/นาที

จากรูปที่ 5-122(ก) และ(ข) จะพบว่าในเอ็นวิลอปสเปกตรัมนอกจากจะมียอดที่สอดคล้องกับความเสียหายและฮาร์มอนิกแล้ว ยอดเหล่านั้นยังมีแถบความถี่ข้างที่มีระยะเท่ากับรอบการหมุนของเพลลาอีกด้วย ซึ่งมีผลจากรอบการเวียนเกิดของอิมพัลส์นั่นเอง เมื่อพิจารณารูปที่ 5-122 (ก) ในสคมถ์ทางซ้าย จะเห็นได้ว่าเอ็นวิลอปสเปกตรัมเลือกความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายได้ถูกต้อง เนื่องจากผลรวมของตระกูลความถี่ความเสียหายของรางวิ่งในมีค่ามากที่สุด แต่ในสคมถ์ทางขวาจะเห็นได้ว่าเอ็นวิลอปสเปกตรัมกลับเลือกความถี่ที่ผิด ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ 60Hz ซึ่งไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกับใด ๆ กับความเสียหายมีค่าความถี่น้อย จึงมีโอกาที่จะมีฮาร์มอนิกได้หลายตัว ดังเช่นที่แสดงด้วยลูกศรสีแดง จึงทำให้ได้ผลรวมฮาร์มอนิกที่มากที่สุด แม้ว่าจะปรากฏตระกูลความถี่ของความเสียหายเป็นจำนวนมาก (ลูกศรสีดำ) แต่ตระกูลดังกล่าวให้ผลรวมที่น้อยกว่าตระกูลของ 60Hz ดังนั้นจึงไม่ถูกแสดงเป็นความถี่ที่ตรวจพบ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาให้ดีจะพบว่ายังพบยอดที่เป็นของฮาร์มอนิกของ BPIR(101Hz) อยู่หลายยอดด้วยกัน แต่เนื่องจากมีแถบความถี่ข้างเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและแต่ละยอดที่มีค่ามากอยู่ห่างกันเป็นระยะเท่า ๆ กัน จึงทำให้

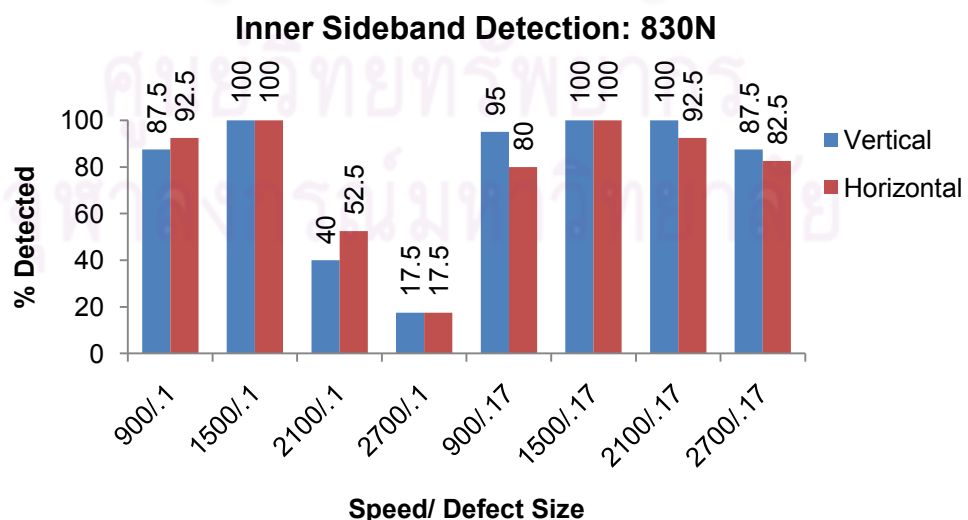
ระเบียบวิธีในการเลือกความถี่เกิดความผิดพลาดขึ้น ในขณะที่ไม่เกิดปัญหาดังกล่าวที่ความเร็ว 2100 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 5-122(ข) เนื่องจากยอดที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเกี่ยวข้องกับ BPIR กับ ยอดที่เป็นแถบความถี่ข้างของยอดดังกล่าวมีค่าต่างกันชัดเจนมากกว่า รวมไปถึงการเว้นระยะระหว่างแต่ละฮาร์โมนิกมีความชัดเจนมากกว่า

ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ราววิ่งในด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม

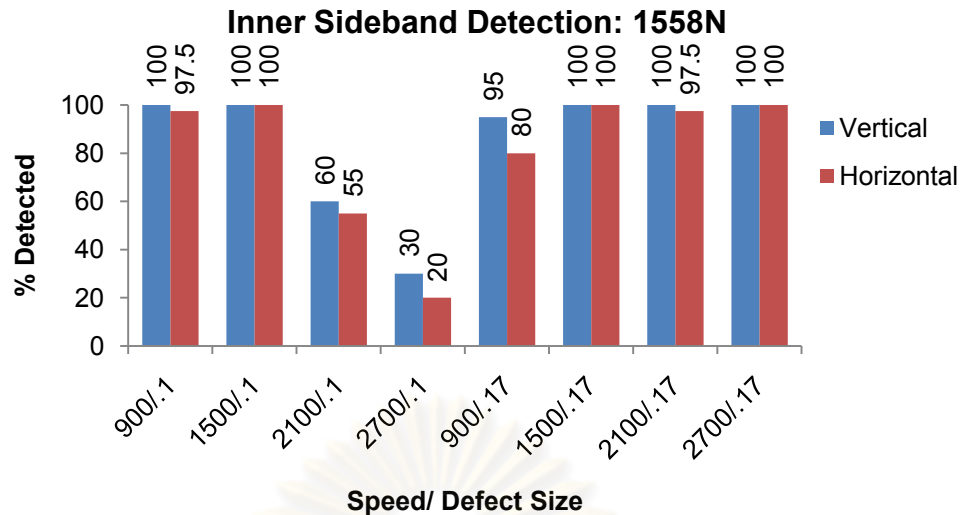
การตรวจจับความเสียหายด้วยนับแถบความถี่ข้างจะพิจารณาความถี่ในช่วง 5000-9000Hz และใช้เกณฑ์ว่าแถบความถี่ข้างต้องมี 3 ช่องติดกัน (4 ยอดฮาร์โมนิก) ขึ้นไปจึงจะถือว่าเกิดความเสียหายขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของความเสียหายที่ราววิ่งนอก แต่เปลี่ยนระยะของแถบความถี่ข้างที่มองหาเป็น BPIR ดังแสดงในตารางที่ 5-3 จะได้ผลการตรวจจับดังแสดงในรูปที่ 5-123 - 5-125



รูปที่ 5-123 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาวะในแนวรัศมี 102N

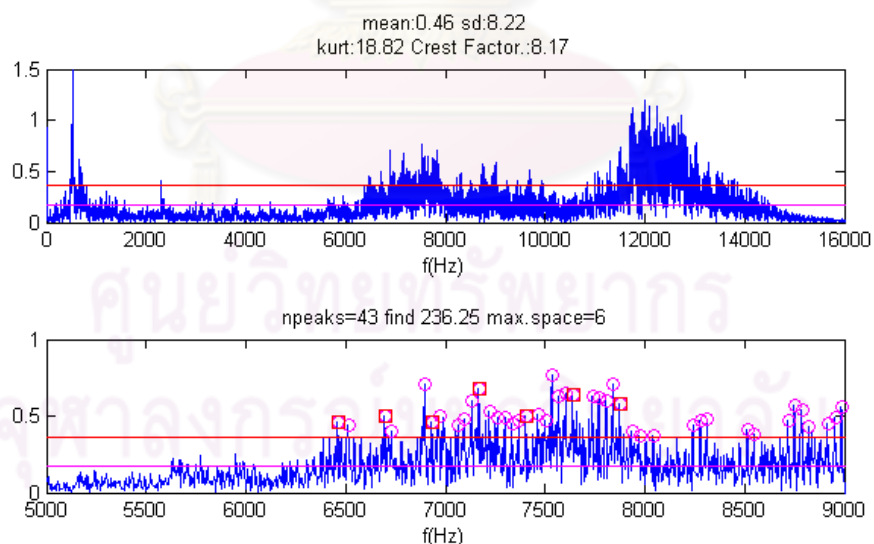


รูปที่ 5-124 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาวะในแนวรัศมี 830N



รูปที่ 5-125 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 1558N

จะเห็นได้ว่าการใช้วิธีนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัมในช่วง 5000-9000Hz สามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ความเร็ว 900รอบ/นาทีเนื่องจากที่ความเร็วดังกล่าวระเบียบวิธีในการระบุยอดจะทำงานผิดพลาดดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้า แต่จะตรวจจับความเสียหายขนาดเล็กที่ความเร็วรอบสูงไม่ด้นัก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่มีสเปกตรัมยกตัวสูงขึ้นมาในกรณีของ 2100 และ 2700 รอบ/นาที อยู่ที่ช่วง 10000-14000Hz จึงทำให้ยอดที่ผ่านเกณฑ์ในช่วงที่พิจารณามีค่าน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5-126

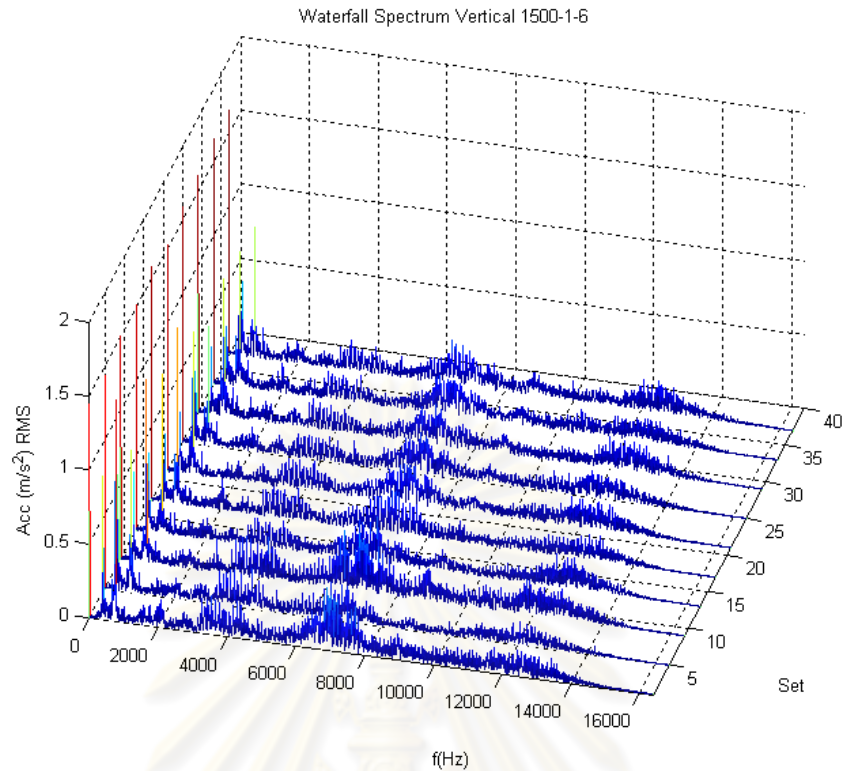


รูปที่ 5-126 การตรวจจับแถบความถี่ข้างที่เกิดจากความเสียหายที่รางวิ่งในขนาด 0.10mm ที่ความเร็ว 2100 รอบ/นาที ภาระ 1558N

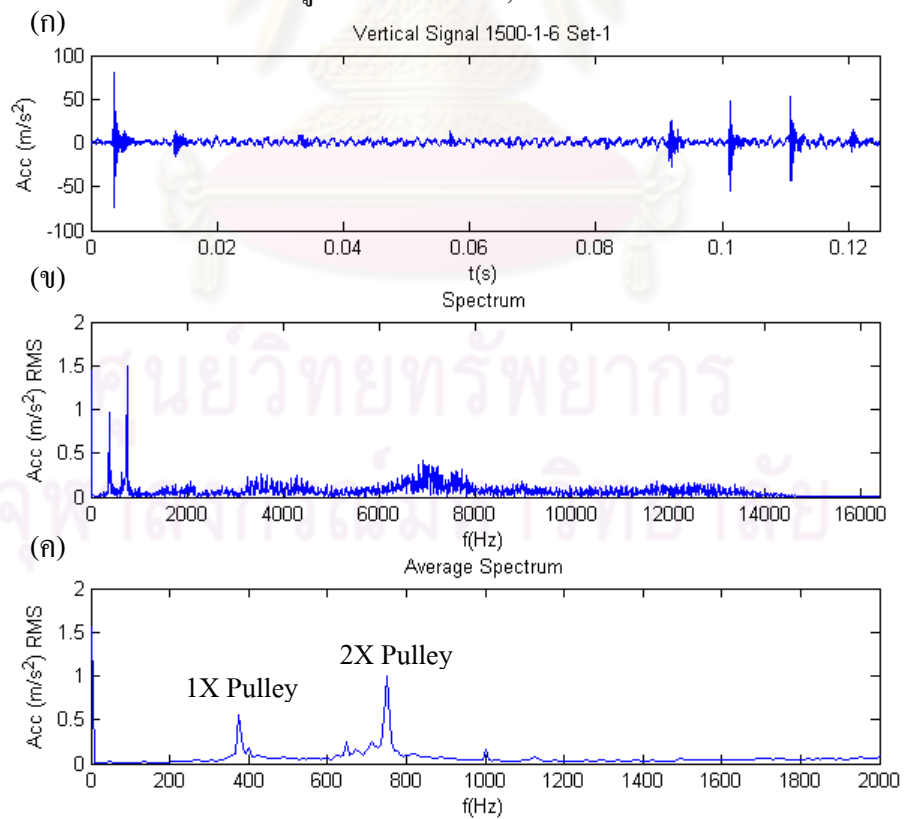
### ความเสียหายที่เม็ดลูกปืน

รูปที่ 5-127 แสดง waterfall plot ของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของตลับลูกปืนที่มีความเสียหายที่เม็ดลูกปืนขนาด 0.10mm จะเห็นได้ว่าจะพบลักษณะแถบความถี่ข้างในช่วงความถี่ 3000-5000Hz และที่ 6000-8000Hz ส่วนช่วง 10000-14000Hz จะไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตาม ลักษณะยอดของแถบความถี่ข้างดังกล่าวจะไม่คมชัดดังเช่นกรณีความเสียหายที่รางวิ่งนอก ในรูปที่ 5-128(ก) จะพบว่าอิมพัลส์ไม่ได้เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน โดยระยะห่างระหว่างกลุ่มของอิมพัลส์จะมีค่ามากกว่าระยะของความถี่รอบของเพลามาก ด้วยหลักการมอดูเลตขนาดของสัญญาณเนื่องมาจากวงจรการรับภาระ (loading cycle) เดียวกับในกรณีของความเสียหายที่รางวิ่งใน ทำให้คาดได้ว่าแต่ละเส้นสเปกตรัมในรูปที่ 5-128(ข) จะมียอดแหลมที่สอดคล้องกับความถี่ต่ำดังกล่าว ส่วนสัญญาณที่วัดได้ในแนวระดับก็มีลักษณะไม่ต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 5-129 และ 5-130

ในกรณีที่ความเสียหายมีขนาดใหญ่ขึ้น คือ ขนาด 0.12mm จะพบว่าแถบความถี่ข้างในช่วงความถี่เดียวกับในกรณีของความเสียหายขนาด 0.10mm จะมีความชัดเจนมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 5-131 - 5-134 และจะพบว่าฟูริเยร์สเปกตรัมที่พิจารณาช่วง 0-2000Hz ไม่สามารถแสดงลักษณะที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายได้เช่นเดียวกับกรณีที่เกิดความเสียหายที่ตำแหน่งอื่น ๆ

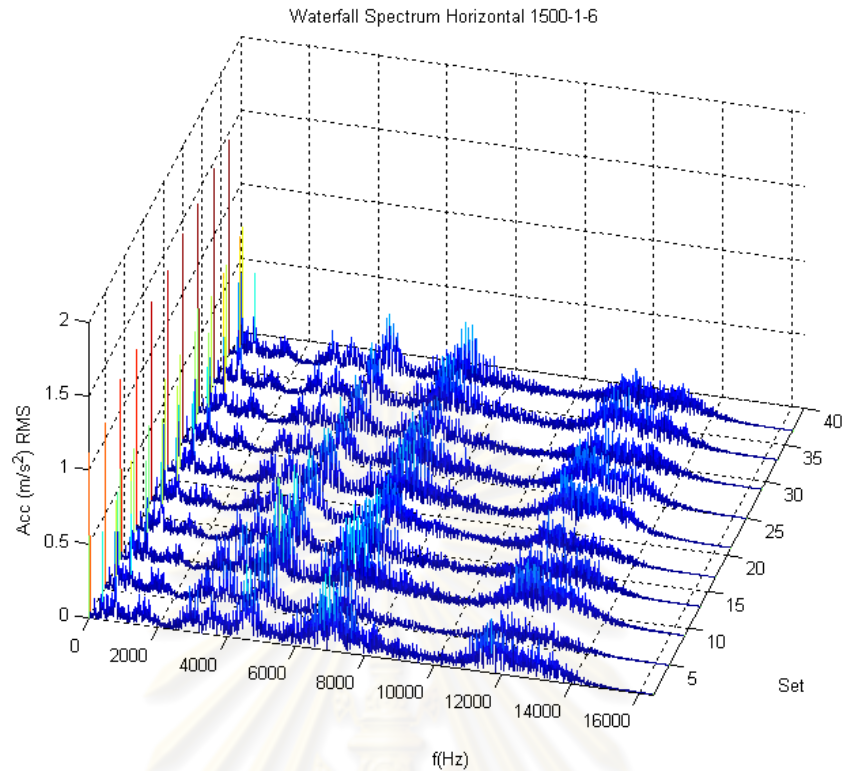


รูปที่ 5-127 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่เมื่อดัลลูปปืน ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที

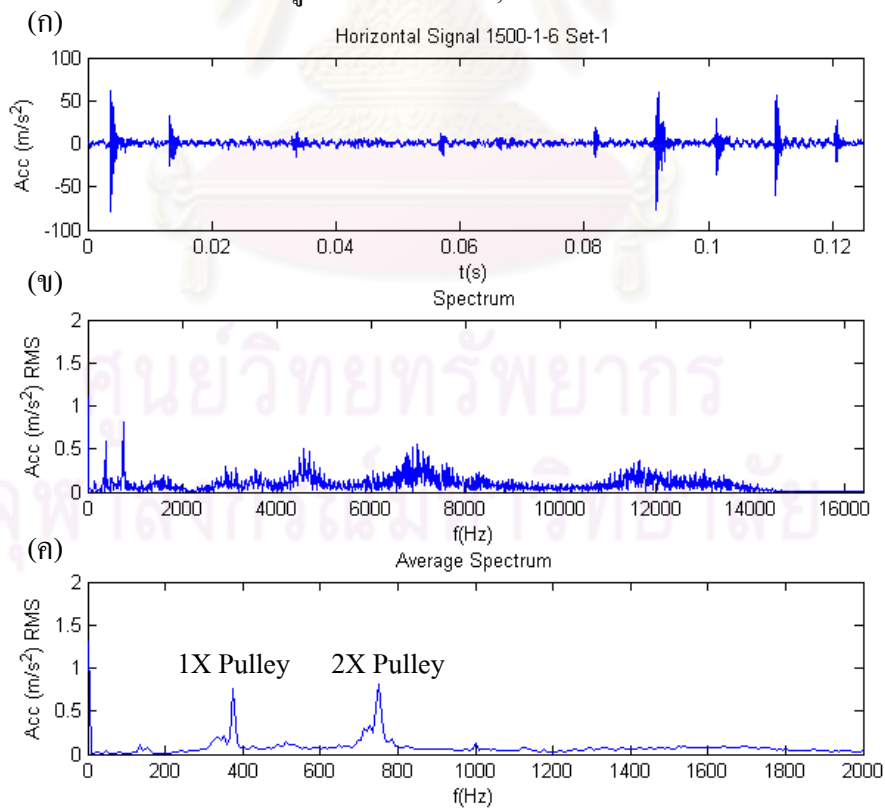


รูปที่ 5-128 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-127: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz

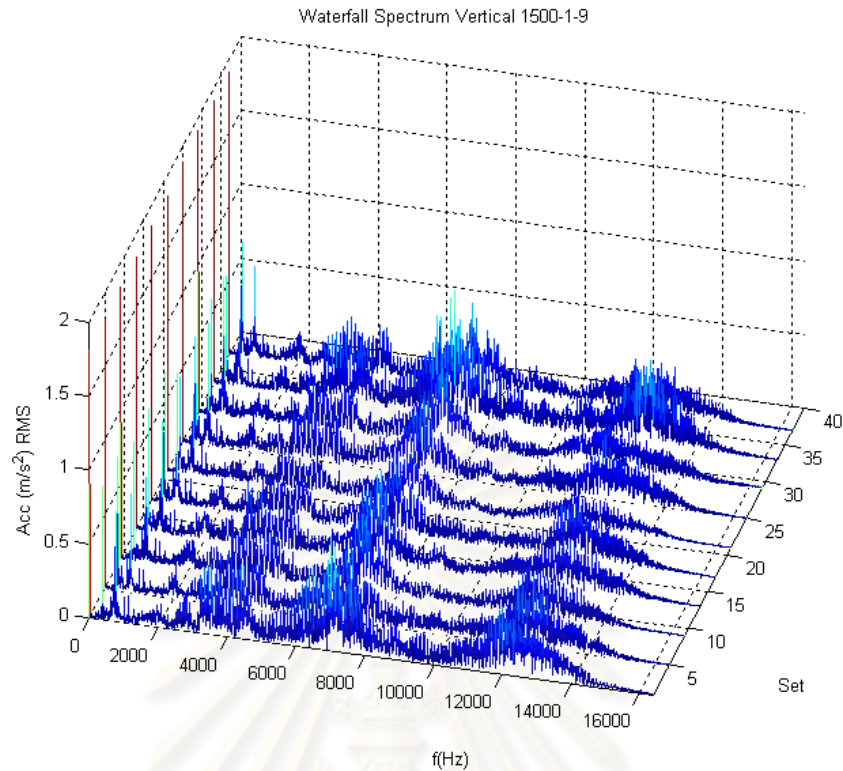




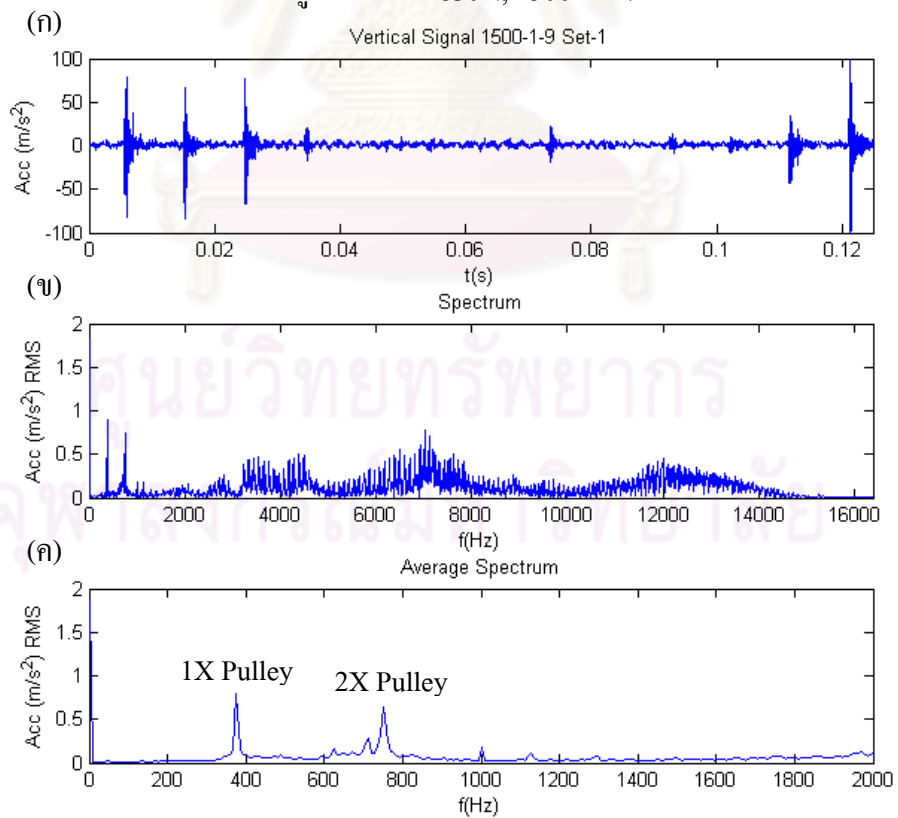
รูปที่ 5-129 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคลัทช์ปืนที่มีความเสียหาย 0.10mm ที่เม็คลูกปืน ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



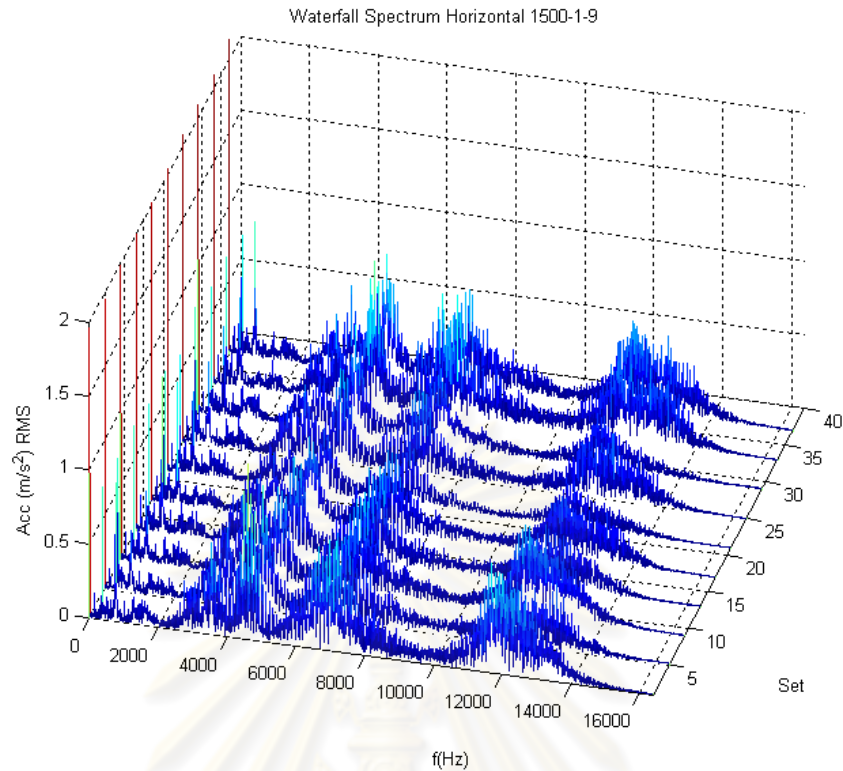
รูปที่ 5-130 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-129: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



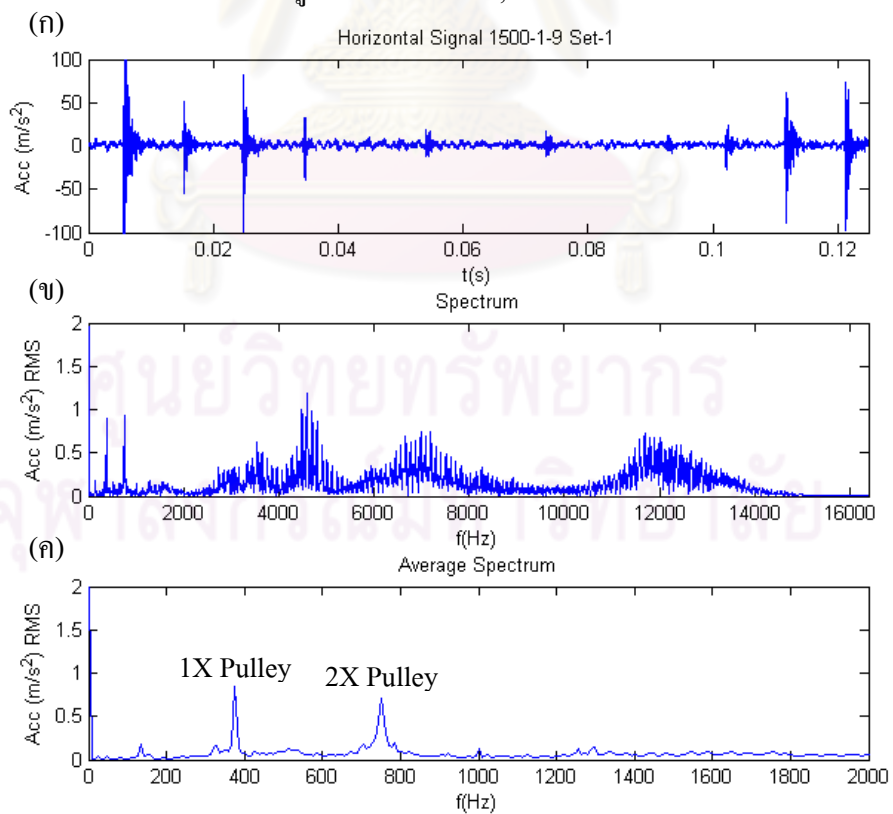
รูปที่ 5-131 waterfall spectrum ในแนวตั้งของชุดดัลลูปปืนที่มีความเสียหาย 0.12mm ที่เม็ดดัลลูปปืน ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



รูปที่ 5-132 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-131: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz



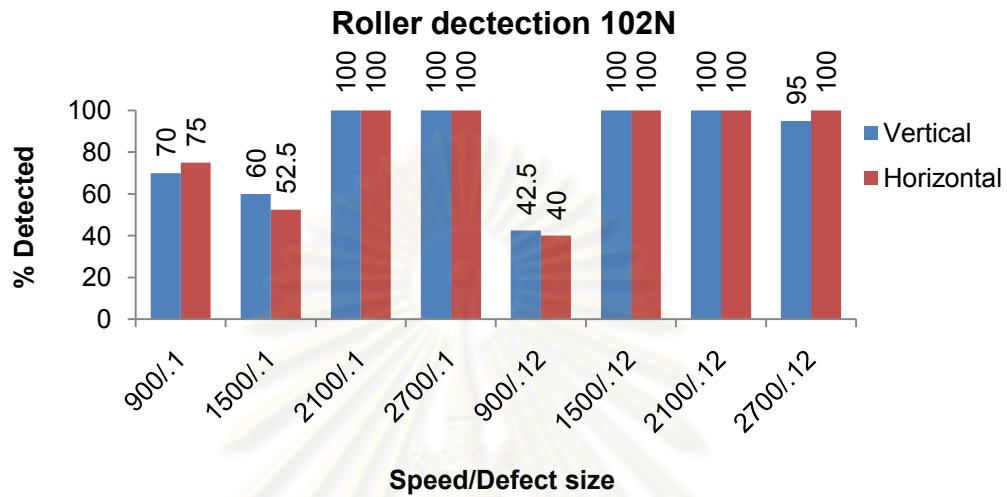
รูปที่ 5-133 waterfall spectrum ในแนวระดับของชุดคลัทช์ปืนที่มีความเสียหาย 0.12mm ที่มีคลัทช์ปืน ภาระ 830N, 1500 รอบ/นาที



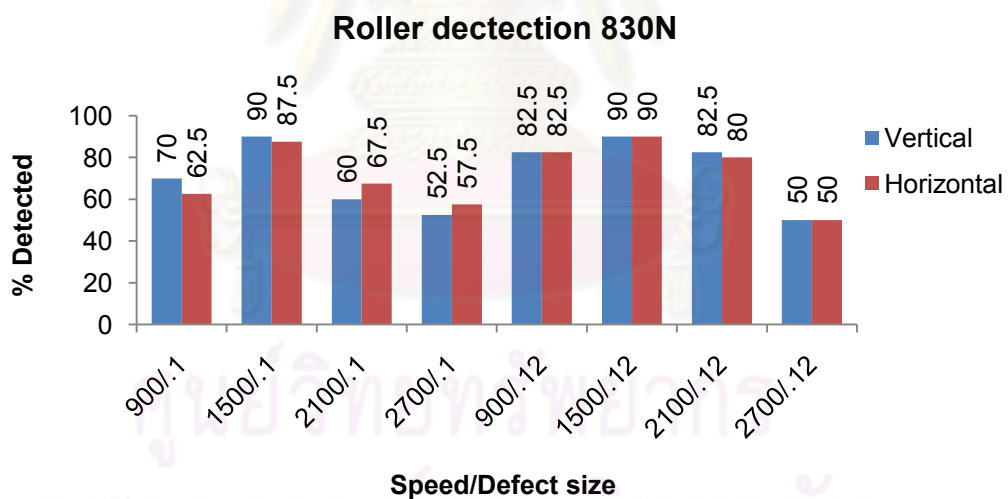
รูปที่ 5-134 สัญญาณชุดที่ 1 จากรูปที่ 5-133: (ก) สัญญาณในโดเมนเวลา, (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก), (ค) ค่าเฉลี่ยของฟูริเยร์สเปกตรัมทั้ง 40 ชุด แสดงเฉพาะช่วง 0-2000Hz

### ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่เม็ดลูกปืนด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัม

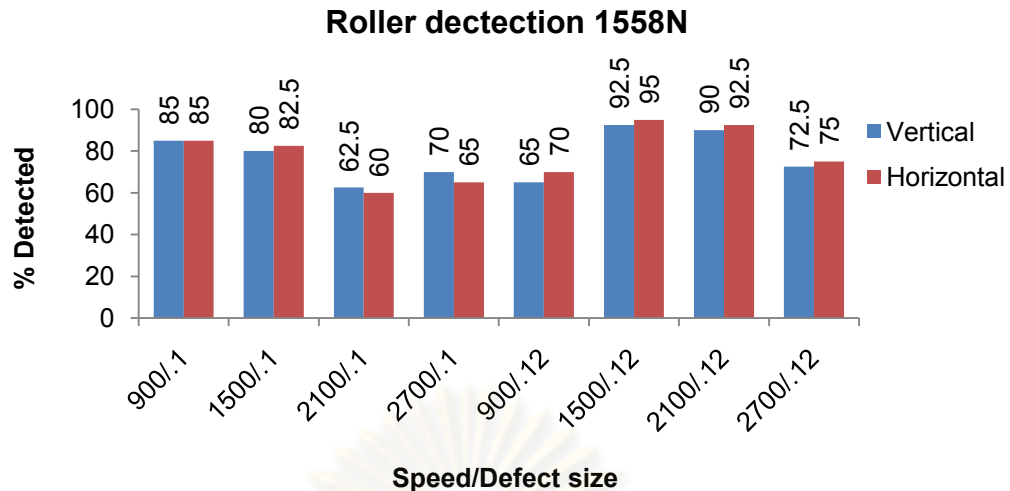
ในส่วนของการตรวจจับความเสียหายด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะใช้วิธีและประเภทของผลการตรวจจับตำแหน่งความเสียหายอื่น ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้ว จะได้ผลการตรวจจับที่ภาวะต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5-135 - 5-137



รูปที่ 5-135 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดลูกปืนภายใต้ภาวะในแนวรัศมี 102N

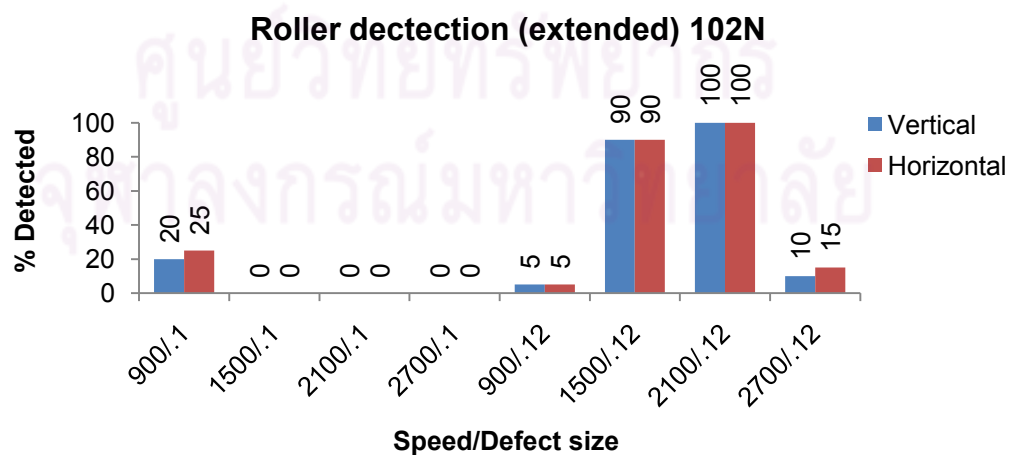


รูปที่ 5-136 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดลูกปืนภายใต้ภาวะในแนวรัศมี 830N



รูปที่ 5-137 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดลูกปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N

จากรูปที่ 5-136 และ 5-137 จะพบว่าความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายในภาพรวมเมื่อมีภาระในแนวรัศมี 830 และ 1558N มักกระทำตามลำดับอยู่ในระดับที่ค่อนข้างดี แต่กรณี 2700 รอบ/นาที ที่ผลการตรวจจับมีความถูกต้องน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจาก BSF ของความเร็วรอบดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่างเส้นสเปกตรัม 2 เส้นพอดี ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 5-3 ดังนั้นจึงทดลองนำสัญญาณมาต่อกัน จะได้ผลการตรวจจับดังรูปที่ 5-138 - 5-140 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถูกต้องในการตรวจจับจะลดลงอย่างมาก ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากการมอดูเลตสัญญาณที่เกิดจากรอบการหมุนของกรงเม็ดลูกปืน ทำให้เกิดลักษณะแถบความถี่ข้างในลักษณะที่คล้ายกับที่เกิดขึ้นในกรณีของความเสียหายที่วางวงใน แต่เนื่องจาก FTF มีค่าน้อยกว่าความเร็วรอบการหมุนของเพลามาก ทำให้กรณีที่นำสัญญาณมาต่อกันจะมีโอกาสที่แถบความถี่ข้างที่เกิดจาก FTF จะถูกแสดงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้นำสัญญาณมาต่อกัน ทำให้การเลือกยอดในเอ็นวีแอลสเปกตรัมทำงานผิดพลาด



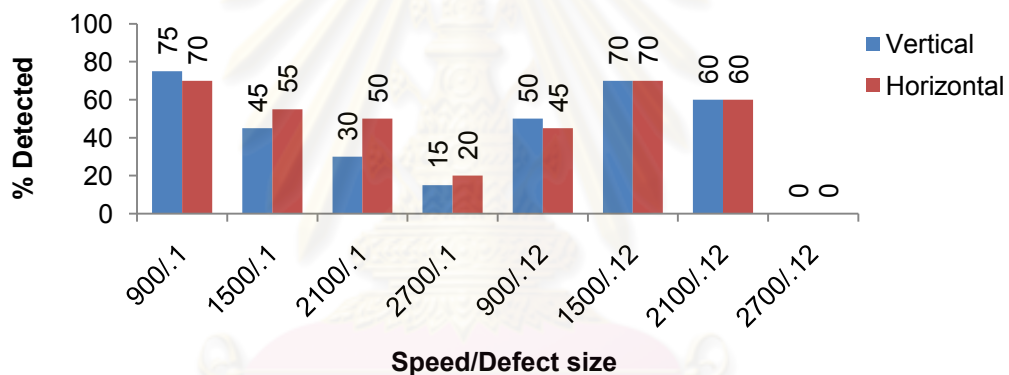
รูปที่ 5-138 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดลูกปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 102N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

### Roller detection (extended) 830N



รูปที่ 5-139 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดลูกปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 830N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

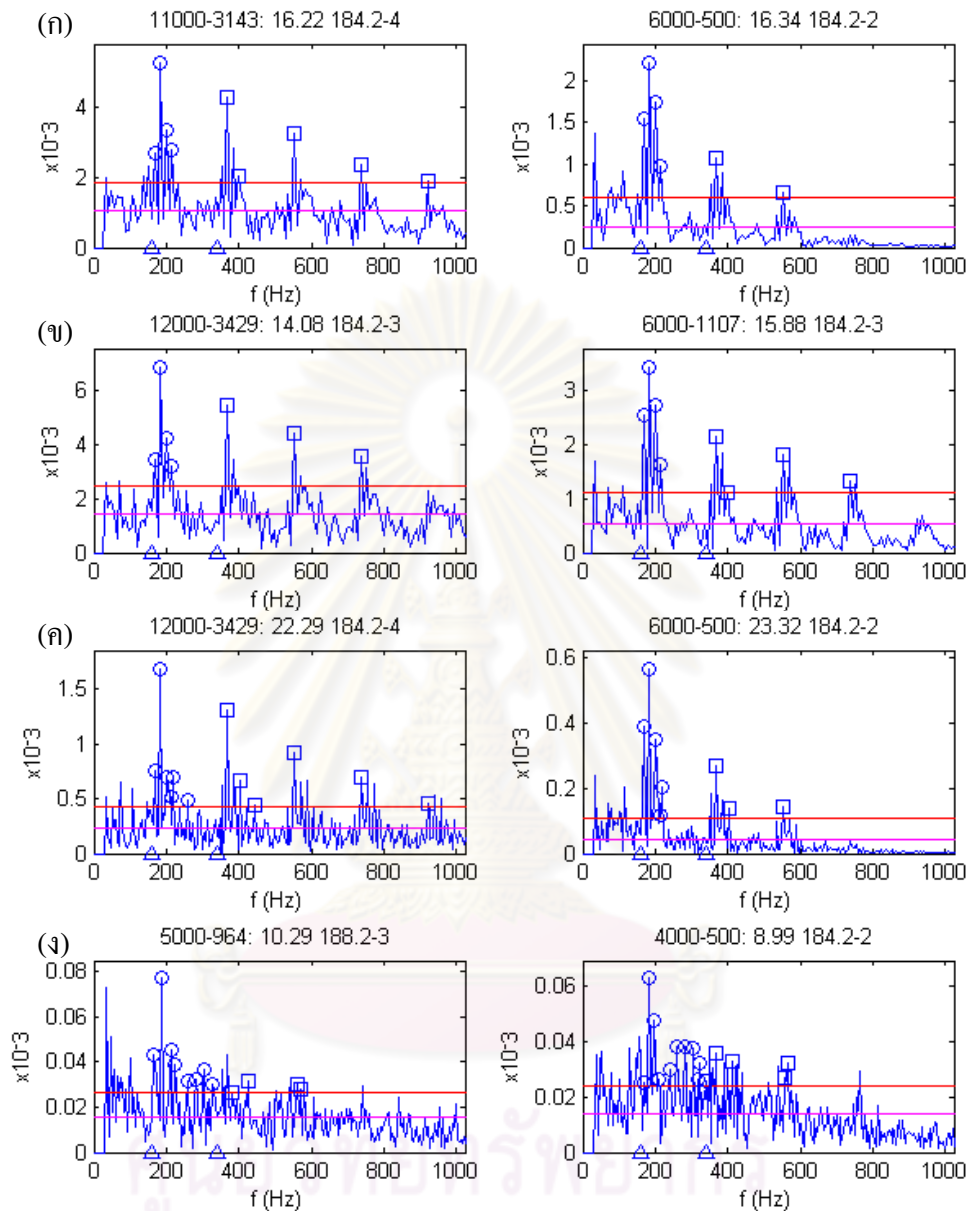
### Roller detection (extended) 1558N



รูปที่ 5-140 ผลการตรวจจับความเสียหายที่เม็ดลูกปืนภายใต้ภาระในแนวรัศมี 1558N  
เมื่อนำสัญญาณ 2 ชุดมาต่อกัน

รูปที่ 5-141 เป็นการแสดงผลของการเพิ่มความละเอียดของเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ทำให้ผลการตรวจจับเปลี่ยนแปลงจากที่เคยตรวจจับได้ มาเป็นตรวจจับไม่ได้ โดยรูปที่ 5-141(ก) เป็นการแสดงสัญญาณในแนวตั้งและแนวระดับเมื่อเกิดความเสียหายที่ 2700 รอบ/นาที ที่ภาระ 1558N และรูปที่ 5-141(ข) เป็นสัญญาณชุดที่อยู่ต่อเนื่องกัน และรูปที่ 5-141(ค) เป็นเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่เกิดจากการนำสัญญาณสองชุดดังกล่าวมาต่อกัน จะเห็นได้ว่ายอดที่ตรวจจับได้ไม่ได้เปลี่ยนจาก 184Hz มาเป็น 188Hz อย่างที่ควรจะเป็น (ในกรณีที่ยังไม่ได้ต่อสัญญาณ ถือว่าตรวจพบความเสียหายเมื่อเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ถูกเลือกแสดงกลุ่มของความถี่ 184Hz ในขณะที่เมื่อต่อสัญญาณแล้วจะเป็น 188Hz) แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า ลักษณะของเอ็นวีลอปสเปกตรัมยังคงมีลักษณะเป็นฮาร์มอนิกที่ค่อนข้างชัดเจนเมื่อมองยอดที่เกิดจาก BSF และแถบความถี่ข้างเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่กรณีที่ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นจะตรวจไม่พบลักษณะฮาร์มอนิกดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5-141(ง) แม้ว่า

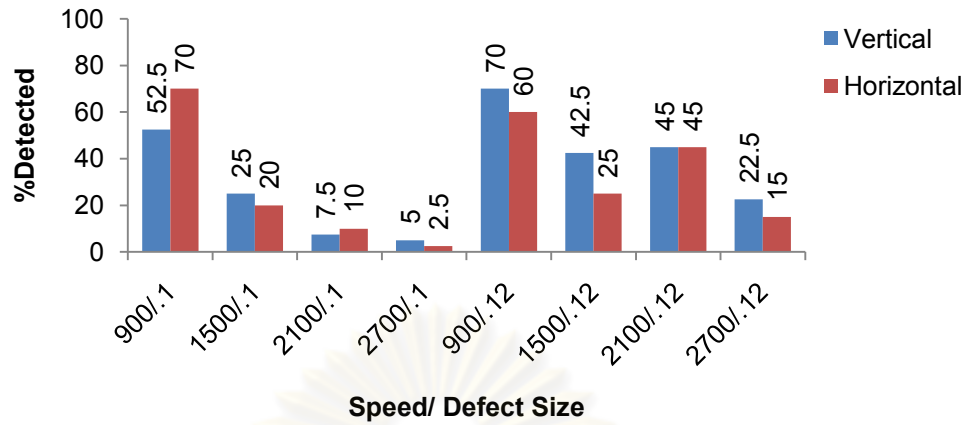
สัญญาณในแนวดิ่งจะเลือกความถี่ที่ตรงกับความเสียหายของตลับลูกปืนขึ้นมาก็ตาม (เกิดการเตือนที่ผิดพลาด)



รูปที่ 5-141 ผลจากการเพิ่มความละเอียดในเอ็นวีลอปสเปกตรัม (ก), (ข) เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ถูกเลือกของสัญญาณสองชุดที่ติดกัน, (ค) เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ถูกเลือกเมื่อนำสัญญาณสองชุดดังกล่าวมาต่อกัน, (ง) เอ็นวีลอปสเปกตรัมเมื่อนำสัญญาณมาต่อกันเมื่อไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น ผลการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ราววังในด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัม

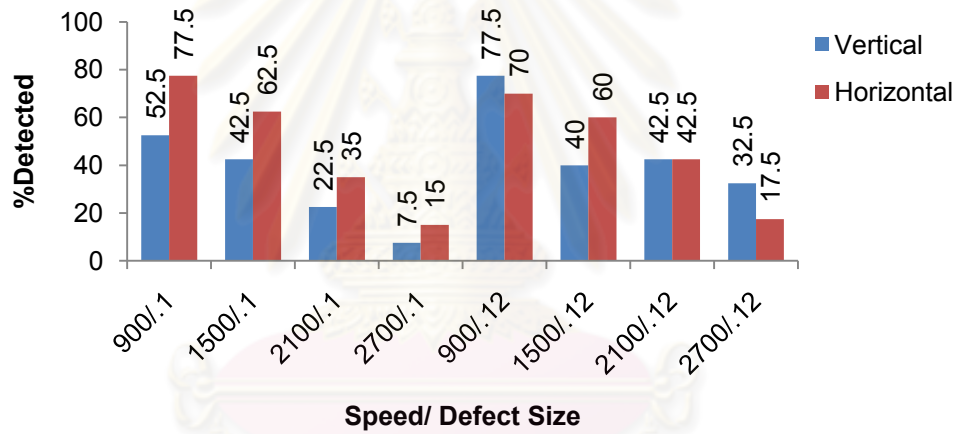
การตรวจจับความเสียหายด้วยนับแถบความถี่ข้างจะใช้ช่วงความถี่และใช้เกณฑ์ขั้นต่ำของจำนวนแถบความถี่ข้างเช่นเดียวกับกรณีของความเสียหายอื่น ๆ ที่ผ่านมา แต่จะเปลี่ยนระยะของแถบความถี่ข้างที่มองหาคือ BSF ดังแสดงในตารางที่ 5-3 จะได้ผลการตรวจจับดังแสดงในรูปที่ 5-142 - 5-144

### Roller Sideband Detection: 102N



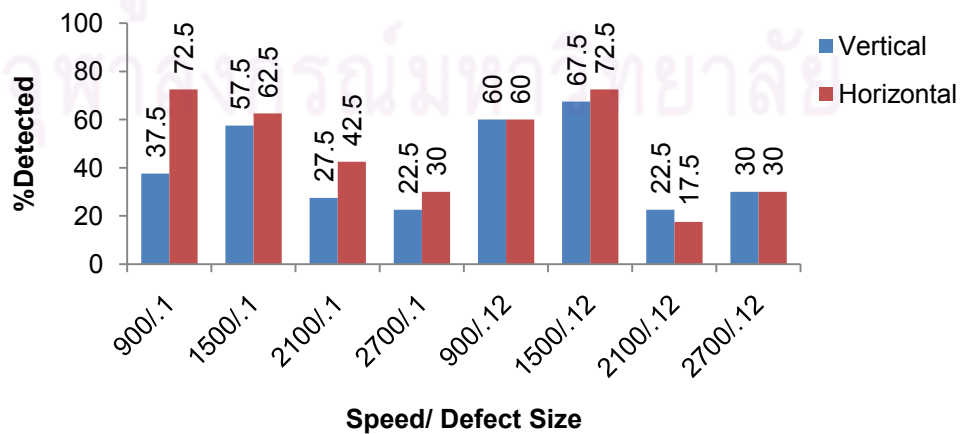
รูปที่ 5-142 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 102N

### Roller Sideband Detection: 830N



รูปที่ 5-143 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 830N

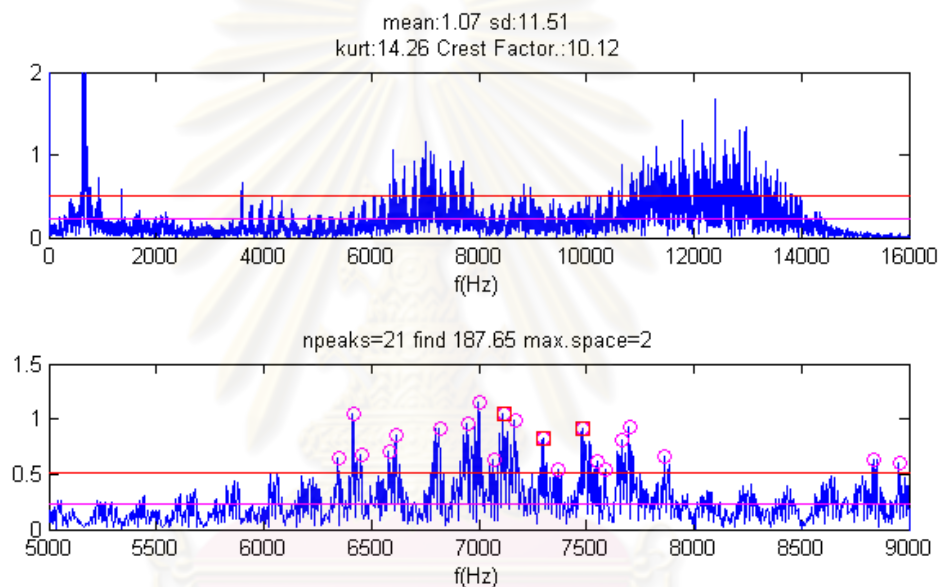
### Roller Sideband Detection: 1558N



รูปที่ 5-144 ผลการตรวจจับความเสียหายด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมที่ภาระในแนวรัศมี 1558N



จากรูปที่ 5-142 - 5-144 จะเห็นได้ว่าผลการตรวจจับโดยใช้การนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัมจะมีค่าที่ต่ำโดยเฉพาะในกรณีที่มีความเร็วรอบ 2100 และ 2700 รอบ/นาที ทั้งนี้เนื่องจากเกณฑ์การนับยอดที่กำหนดให้มีการเว้นว่าง (peak distance) เท่ากับ 10% ของความถี่ที่ต้องการหาแถบความถี่ข้าง ซึ่งจะมีความถี่ขึ้นตามรอบการหมุนของเพลลา ทำให้ยอดที่ทำให้เกิดระยะระหว่างยอดอื่น ๆ เท่ากับ BSF อาจจะไม่ถูกเลือก เพราะยอดเหล่านั้นจะอยู่ห่างกันประมาณเท่ากับ FTF ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 10% ของ BSF ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5-145 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรอวงกลมสีชมพูจะเลือกเฉพาะค่าที่มากที่สุดที่สุดในบริเวณที่มีการเว้นว่าง เพื่อนำไปหาคู่ที่มีระยะสอดคล้องกับ BSF ซึ่งแสดงด้วยกรอบสี่เหลี่ยมสีแดง ดังในรูปที่ 5-145 จะพบเพียง 2 ช่องของกรอบสี่เหลี่ยมที่อยู่ติดกัน จึงไม่ผ่านเกณฑ์ในการตรวจจับ



รูปที่ 5-145 ผลของความถี่ข้าง FTF ที่มีต่อการตรวจจับด้วยการนับแถบความถี่ข้างในฟูรีเยร์สเปกตรัม

#### 5-2-5 สรุปผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะสัญญาณ และการตรวจจับสัญญาณความ

##### เสียหาย

ในการทดลองมีการปรับตัวแปรต้น 4 อย่าง คือ ความเร็วรอบของเพลลา ตำแหน่งของความเสียหาย ขนาดของความเสียหาย และภาระในแนวรัศมี ตัวแปรทุกอย่างร่วมกันส่งผลต่อลักษณะของสัญญาณความเสียหาย ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงถึงความถูกต้องในการตรวจจับ

เมื่อพิจารณาความเร็วการหมุนของเพลลา ที่ความเร็วรอบสูงกว่าจะทำให้ขนาดของอิมพัลส์ที่เกิดจากความเสียหายที่ใหญ่กว่า แต่ขนาดของสัญญาณรบกวนก็จะมากกว่าด้วยเช่นกัน ส่วนในแง่ของการตรวจจับ ความเร็วรอบจะเป็นตัวคูณกับความถี่ของความเสียหายที่จะทำให้ทั้งที่เป็นยอดและแถบข้างในเอ็นวีลอปสเปกตรัม ซึ่งส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกชุดของเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่

เหมาะสมและความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น ถ้าผลคูณดังกล่าวก่อให้เกิดระยะของยอดในเอ็นวิลอปปสเปกตรัมที่แยกแยะลำบากก็จะทำให้ผลการตรวจจับไม่ดี ตัวอย่างที่ชัดเจนของกรณีดังกล่าวคือ ความเสียหายที่ราววังในที่ 900 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 5-122 นอกจากนี้ความเร็วรอบยังส่งผลถึงโหมดที่ถูกกระตุ้นในบางกรณีด้วย เช่นในกรณีที่เกิดความเสียหายที่ราววังใน โหมดที่ถูกกระตุ้นจะเป็น 10000-12000Hz ที่ความเร็ว 2100 รอบ/นาทิต่างรูปที่ 5-125 ในขณะที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาทิตะกระตุ้นในช่วง 6000-8000Hz มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5-109 และ 5-111

ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย จะมีผลต่อลักษณะของสัญญาณใน โดเมนเวลาอย่างชัดเจน โดยจะแสดงเป็นคาบการเวียนเกิดของอิมพัลส์ซึ่งมีค่าเป็น 1 รอบการหมุนของเพลลาในกรณีความเสียหายที่ราววังใน และประมาณ FTF ในกรณีของความเสียหายที่เม็ดลูกปืน ซึ่งเป็นการมอดูเลตขนาด ส่งผลให้เกิดแถบความถี่ข้างที่ความถี่ของการเวียนเกิดดังกล่าวทั้งในฟูริเยร์สเปกตรัมและเอ็นวิลอปปสเปกตรัม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการตรวจจับ โดยเฉพาะในกรณีที่แถบความถี่ข้างในเอ็นวิลอปปสเปกตรัมมีระยะห่างน้อย เช่นในกรณีของความเสียหายที่เม็ดลูกปืน นอกจากนี้ตำแหน่งของความเสียหายยังส่งผลถึงขนาดของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เช่น ในกรณีของที่เกาะและความเร็วรอบมีค่าเท่ากัน โดยมีขนาดของความเสียหายใกล้เคียงกัน ความเสียหายที่เม็ดลูกปืนและราววังในจะมีขนาดของอิมพัลส์ลูกที่ใหญ่ที่สุด (เนื่องจากกรณีดังกล่าวมีการเวียนเกิดของอิมพัลส์) ใหญ่กว่ากรณีของความเสียหายที่ราววังใน (อิมพัลส์แต่ละลูกมีขนาดใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้คาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากลักษณะการกระจายตัวของเกาะในบริเวณที่รับภาระของบริเวณชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายดังกล่าว

สำหรับขนาดของความเสียหายจะมีผลต่อขนาดและความชัดเจนของแถบความถี่ข้าง โดยขนาดของความเสียหายที่ใหญ่กว่าจะให้แถบความถี่ข้างที่ชัดเจนกว่าในกรณีที่เกิดความเสียหายที่ราววังในและเม็ดลูกปืน ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับด้วยเอ็นวิลอปปสเปกตรัมดังเช่นในกรณีของความเสียหายที่เม็ดลูกปืน ดังแสดงในรูปที่ 5-138 - 5-140 ในขณะที่กรณีความเสียหายที่ราววังนอก เมื่อขนาดความเสียหายใหญ่ขึ้นกลับทำให้แถบความถี่ข้างมีความชัดเจนลดลง แต่ก็ยังมากพอที่จะตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลจากภาระในแนวรัศมีที่กระทำต่อตลับลูกปืน จะพบว่าในกรณีที่ให้ภาระน้อยที่สุด (102N) ลักษณะของแถบความถี่ข้างที่ได้จะไม่มีความชัดเจนมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการที่จะเกิดอิมพัลส์ได้จำเป็นต้องมีภาระมากระทำ ส่งผลให้การตรวจจับด้วยเอ็นวิลอปปสเปกตรัมที่ภาระดังกล่าวไม่ประสบความสำเร็จในกรณีที่เกิดความเสียหายที่ราววังใน เมื่อเพิ่มภาระมากขึ้นลักษณะของอิมพัลส์และแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกันจะเด่นชัดขึ้นมากขึ้น แต่ว่าผลที่ได้จากการเพิ่มภาระจาก 830N เป็น 1558N จะไม่ได้เด่นชัดดังเช่นในกรณีการเพิ่มภาระจาก 102N เป็น 830N

## บทที่ 6

### การสรุปผลของวิทยานิพนธ์

#### 6-1 สรุปผลการศึกษาดำเนินการจำลองสัญญาณ

ส่วนของการจำลองสัญญาณมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบวิธีการตรวจจับความเสียหายของ ตลับลูกปืนวิธีการต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองที่เป็นชุดของการตอบสนองอิมพัลส์ของระบบการ สั่นสะเทือนเชิงเส้นที่มีหนึ่งความถี่ธรรมชาติ ที่กำหนดให้มีความถี่ธรรมชาติแบบไม่มีภาระหน่วง อัตราส่วนการหน่วง และระดับของสัญญาณรบกวนต่าง ๆ กัน วิธีการในการตรวจจับที่ศึกษามีอยู่ 3 วิธี คือ การแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลต การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตหรือการทำเอ็นวีแอลพี- สเปกตรัม โดยใช้มอร์เลตเวฟเลตในการศึกษาเนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับอิมพัลส์เชิงกล และ การตรวจจับด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัม โดยการนับแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกับความเสียหายของตลับ ลูกปืน

การแยกส่วนประกอบสัญญาณด้วยเวฟเลตเป็นการนำสัญญาณมาทำไวลูชันกับเวฟเลตลูกที่ สเกลและตำแหน่งต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลต จากนั้นจึงพิจารณาว่า สัมประสิทธิ์ตัวใดมาจากสัญญาณความเสียหายหรือสัญญาณรบกวน โดยใช้เกณฑ์ที่ตั้งขึ้น แล้วจึง ลบส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนออก ต่อไปแปลงค่าสัมประสิทธิ์ที่เหลือกลับไปสู่โดเมนเวลาอีกครั้ง เพื่อตรวจสอบด้วยว่าสัญญาณดังกล่าวมีลักษณะคาบที่สอดคล้องกับคาบของความเสียหายของตลับ ลูกปืนหรือไม่ โดยพิจารณาถึงจำนวนคาบดังกล่าวที่อยู่ต่อเนื่องกันต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งได้มาจากฮิสโทแกรมของการนับคาบที่ได้จากวิธีการแยกส่วนประกอบของสัญญาณในกรณีที่มี เฉพาะสัญญาณรบกวน วิธีการแยกส่วนประกอบด้วยเวฟเลตให้ความถูกต้องในการตรวจจับที่ไม่ดี เมื่อระบบมีอัตราส่วนการหน่วงต่ำและระดับของสัญญาณรบกวนสูง อีกทั้งยังใช้เวลาในการปรับค่า สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตมากอีกด้วย

สำหรับวิธีการตรวจจับด้วยฟูรีเยร์สเปกตรัมโดยการนับแถบความถี่ข้างที่สอดคล้องกับ ความเสียหายของตลับลูกปืนนั้นมีที่มาจากแนวคิดที่ว่า การเกิดอิมพัลส์เป็นชุด ๆ ต่อเนื่องกัน จะทำ ให้เกิดแถบความถี่ข้างที่มีระยะสอดคล้องกับคาบการเกิดของอิมพัลส์นั้น ๆ รอบความถี่ธรรมชาติที่ มีการหน่วงของระบบ ดังนั้นถ้าเกิดแถบความถี่ข้างในจำนวนที่มากพอย่อมสามารถบ่งบอกถึง ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ วิธีการดังกล่าวจะตัดฟูรีเยร์สเปกตรัมมาพิจารณาในช่วงความถี่ธรรมชาติ ที่มีการหน่วงของระบบเพื่อนับจำนวนแถบความถี่ข้างที่มีระยะห่างสอดคล้องกับความเสียหายของ ตลับลูกปืน โดยจะถือว่าเกิดความเสียหายขึ้นเมื่อตรวจพบแถบความถี่ข้างที่อยู่ต่อเนื่องกันมากกว่า จำนวนที่กำหนดซึ่งได้มาจากการพิจารณาฮิสโทแกรมของฟูรีเยร์สเปกตรัมของสัญญาณรบกวน วิธีการดังกล่าวสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องในการตรวจจับที่ค่อนข้างสูงแต่

ยังน้อยกว่าการใช้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ และจะมีความถูกต้องลดลงเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนสูงขึ้น

วิธีการตรวจจับด้วยเอ็นวีลอปสเปกตรัมมีแนวคิดที่ว่า ถ้าใช้ตัวกรองผ่านช่วงที่เหมาะสมมากรองสัญญาณในช่วงความถี่ที่แสดงถึงลักษณะของแถบความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายได้ชัดเจน เอ็นวีลอปสเปกตรัมซึ่งเป็นผลจากการดีมอดูเลตความถี่ของความเสียหายออกจากความถี่ธรรมชาติของระบบจะแสดงยอดที่สอดคล้องกับความถี่ของความเสียหายที่เกิดขึ้นรวมไปถึงฮาร์มอนิกของความถี่ดังกล่าวด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อตัวกรองผ่านช่วงมีความถี่กึ่งกลางและแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีตัวบ่งชี้เพื่อใช้ปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวของเวฟเลต ทั้งนี้ มีผู้เสนอตัวบ่งชี้ 2 ตัว คือ เคอร์โทซิส และ แชนนอนเอนโทรปี โดยตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวไม่ประสบความสำเร็จในการตรวจจับความเสียหายที่ระดับสัญญาณรบกวนสูง อีกทั้งยังมีความถูกต้องในการตรวจจับที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้

จากการสังเกตว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่สะท้อนถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ดี จะมีลักษณะที่สามารถแสดงกลุ่มของยอดที่เป็นฮาร์มอนิกได้ชัดเจนจากพื้นของสัญญาณรบกวน ด้วยเหตุนี้จึงได้นำเสนอตัวบ่งชี้ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดของผลรวมของตระกูลฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมหารด้วยค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัมนั้น โดยตัวกรองเวฟเลตชุดใดที่ให้ค่าตัวบ่งชี้ดังกล่าวมากที่สุดจะถือเป็นตัวกรองที่เหมาะสมที่สุดและจะถูกเลือกมาใช้สร้างเอ็นวีลอปสเปกตรัมเพื่อพิจารณาผลการตรวจจับต่อไป จากการใช้แบบจำลองสัญญาณพบว่าตัวบ่งชี้ดังกล่าวสามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องไม่ต่ำกว่า 97% จนถึง SNR=-15dB ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวบ่งชี้ดังกล่าวในการศึกษาขั้นต่อไป รวมไปถึงการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนจริงด้วย

หลังจากที่ได้ตัวบ่งชี้สำหรับใช้หาเอ็นวีลอปสเปกตรัมแล้ว ต่อไปจึงศึกษาถึงผลกระทบของส่วนของสัญญาณที่คาดเดาได้ที่มีความถี่อยู่ในช่วงแถบความถี่ผ่านของตัวกรองผ่านช่วง พบว่าสัญญาณลักษณะดังกล่าวทำให้ความถูกต้องของผลการตรวจจับลดลง แต่สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณดังกล่าวได้ด้วยการทำอโตรีเกรสซีฟ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมักไม่มีสัญญาณส่วนที่คาดเดาได้ที่มีความถี่สูงถึงช่วงการทำงานของตัวกรองผ่านช่วง

ส่วนสุดท้ายของการศึกษาด้วยการจำลองสัญญาณเป็นการศึกษาถึงผลของการทำ sparse code shrinkage (SCS) เพื่อลดส่วนของสัญญาณรบกวนของสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลต พบว่าที่ระดับสัญญาณรบกวนน้อย ๆ การทำ SCS ช่วยให้พบจำนวนฮาร์มอนิกของความถี่ของความเสียหายในเอ็นวีลอปสเปกตรัมมากขึ้น แต่เมื่อระดับสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นกลับทำให้ตรวจไม่พบยอดที่สอดคล้องกับความเสียหาย ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของสัญญาณรบกวนและส่วนของสัญญาณที่มาจากความเสียหายของสัญญาณที่ผ่านการกรองมีค่าที่ต่างกันไม่มาก ทำให้ SCS ประเมินว่าสัญญาณทั้งหมดเป็นสัญญาณรบกวนและลบสัญญาณดังกล่าวออกไป

## 6-2 สรุปผลการศึกษการตรวจจับความเสียหายของคัลลูปป็นจริง

วัตถุประสงค์ของการทดลองในส่วนนี้คือ การศึกษาถึงผลกระทบต่อลักษณะสัญญาณความเสียหายจากปัจจัยที่แบบจำลองอธิบายได้ไม่ได้นัก เช่น ภาระในแนวรัศมี ขนาดของความเสียหาย รวมไปถึงผลที่เกิดจากตำแหน่งการเกิดอิมพัลส์ที่ไม่คงที่ในกรณีของความเสียหายที่วางไว้ใน และ เม็ดลูกปืน ในการทดลองมีการปรับตัวแปรต้น 4 อย่างด้วยกัน คือ ความเร็วรอบของเพลลา ตำแหน่งของความเสียหาย ขนาดของความเสียหาย และภาระในแนวรัศมี

ในกรณีของความเสียหายที่วางไว้นอก พบว่าลักษณะของสัญญาณความเสียหายเป็นไปตามแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา ทำให้ระเบียบวิธีการในการหาตัวกรองที่เหมาะสมทำงานได้ดี โดยเอ็นวีลอปสเปกตรัมสามารถตรวจจับความเสียหายได้ทั้งหมด ในกรณีนี้พบประเด็นเรื่องเกี่ยวกับรายละเอียดของเส้นสเปกตรัมในเอ็นวีลอปสเปกตรัม กล่าวคือ ถ้าความถี่ของความเสียหายมีค่าอยู่ระหว่างเส้นสเปกตรัมในเอ็นวีลอปสเปกตรัมอาจจะทำให้ผลการตรวจจับผิดพลาดได้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มความยาวของสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์ ทำให้รายละเอียดของเส้นสเปกตรัมจะมากขึ้น ส่วนการตรวจจับด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมจะให้ความถูกต้องที่สูงที่ภาระ 830 และ 1558N ในขณะที่มีความถูกต้องในการตรวจจับที่ต่ำเมื่อให้ภาระ 102N ที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ

ในกรณีที่ความเสียหายเกิดที่วางไว้ใน สัญญาณที่ได้จะเป็นกลุ่มของอิมพัลส์ที่มีคาบเท่ากับ BPIR โดยจำนวนอิมพัลส์ในกลุ่มจะขึ้นอยู่กับภาระในแนวรัศมีและขนาดของความเสียหาย โดยจะพบจำนวนอิมพัลส์ในกลุ่มมากขึ้นเมื่อมีภาระมากขึ้นหรือขนาดของความเสียหายใหญ่ขึ้น แต่สิ่งสำคัญที่ตรวจพบคือกลุ่มของอิมพัลส์ดังกล่าวจะมีคาบของการเวียนเกิดเท่ากับความเร็วรอบการหมุนของเพลลา ซึ่งเป็นการมอดูเลตขนาด ทำให้เกิดแถบความถี่ข้างในเอ็นวีลอปสเปกตรัมขึ้น ส่งผลให้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอให้ผลการตรวจจับที่ผิดพลาดในบางกรณีที่ระยะระหว่างฮาร์มอนิกของความถี่ความเสียหายเป็นจำนวนเต็มเท่าของของระยะแถบความถี่ข้าง เช่น ในกรณีความเร็ว 900 รอบ/นาที นอกจากนี้ที่ภาระ 102N จะพบว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมไม่สามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากภาระที่น้อยไม่ทำให้เกิดอิมพัลส์ที่มีคาบสอดคล้องกับความถี่ของความเสียหาย ส่วนการตรวจจับด้วยฟูริเยร์สเปกตรัมให้ผลการตรวจจับโดยรวมที่ค่อนข้างดี ยกเว้นที่ความเร็ว 2100 และ 2700 รอบ/นาที ซึ่งโหมดที่ถูกกระตุ้นมากที่สุดไม่ได้อยู่ในช่วงที่ใช้พิจารณาแถบความถี่ข้าง

ในกรณีที่ความเสียหายเกิดขึ้นที่เม็ดลูกปืน พบว่าสัญญาณมีลักษณะเป็นกลุ่มของอิมพัลส์คล้ายกับในกรณีของความเสียหายที่วางไว้ใน แต่ว่าจะมีความแตกต่างที่คาบการเกิดของกลุ่มของอิมพัลส์ดังกล่าวจะมีค่าสอดคล้องกับ FTF เนื่องจากเม็ดลูกปืนถูกบังคับไว้ด้วยกรงของเม็ดลูกปืน ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับในกรณีของความเสียหายที่วางไว้ใน จึงเกิดแถบความถี่ข้างขึ้นในเอ็นวีลอปสเปกตรัม แต่ในกรณีนี้จะมีระยะแถบความถี่ข้างเท่ากับ FTF ซึ่งมีค่าน้อยมาก ๆ ด้วยเหตุดังกล่าว

จึงทำให้การเพิ่มรายละเอียดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมส่งผลให้ความถูกต้องในการตรวจจับน้อยลง เนื่องจากระเบียบวิธีในการตรวจจับความเสียหายอาจจะไปพิจารณาที่ยอดซึ่งเป็นแถบความถี่ข้างของยอดของความเสียหายก็ได้เพราะยอดทั้งสองจะอยู่ใกล้กันมาก ต่างจากกรณีของความเสียหายที่วางไว้ในที่อยู่ห่างกันเท่ากับรอบการหมุนของเพลลา โดยจะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวเมื่อรายละเอียดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมยังน้อย เพราะกลุ่มของยอดที่เป็นความถี่ของความเสียหายและยอดที่เป็นแถบความถี่ข้างที่อยู่ติด ๆ กันจะหลอมรวมกลายเป็นสเปกตรัมเส้นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม แม้ผลลัพธ์สุดท้ายในกรณีที่เพิ่มรายละเอียดจะแสดงออกมาว่าตรวจไม่พบความเสียหาย แต่เมื่อพิจารณาเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่เป็นที่มาของผลลัพธ์ดังกล่าวแล้วจะพบว่าลักษณะของฮาร์มอนิกของความเสียหายยังคงชัดเจน เพียงแต่จะมีแถบความถี่ข้างของฮาร์มอนิกเหล่านั้นเพิ่มขึ้นมา จึงทำให้ระเบียบวิธีในการตรวจจับความเสียหายทำงานผิดพลาด ในส่วนของการตรวจจับด้วยฟูริเยร์-สเปกตรัม ความถูกต้องในการตรวจจับจะลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เนื่องจากเกณฑ์การนับยอดที่กำหนดให้มีการเว้นว่าง (peak distance) เท่ากับ 10% ของความถี่ที่ต้องการตรวจจับ ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นตามรอบการหมุนของเพลลา ทำให้ยอดที่ทำให้เกิดระยะระหว่างยอดอื่น ๆ เท่ากับ BSF อาจจะไม่ถูกเลือกเนื่องจากไม่ได้มีค่ามากที่สุดในช่วงการเว้นว่างดังกล่าว

### 6-3 ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป

การการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีส่วนหลัก ๆ ที่สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมต่อไปได้อยู่ 3 ส่วนด้วยกัน คือ อุปกรณ์การทดลอง การสร้างรอยความเสียหาย และระเบียบวิธีในการตรวจจับความเสียหาย

อุปกรณ์ทดลอง สิ่งที่สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้คือ การเปลี่ยนจากสายพานฟัน เป็นสายพานแบบเรียบหรือตัววี ซึ่งให้การถ่ายเทกำลังที่นุ่มนวลกว่า ส่งผลให้ระดับของสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยรวมลดลง และในส่วนของชุดให้ภาระ ถ้ามีการปรับเปลี่ยนจากเดิมที่ใช้ตลับลูกปืนแบบปรับตัวเข้าหาศูนย์กลางได้เองเพียงตัวเดียวมาเป็นสองตัว น่าจะทำให้ชุดให้ภาระมีเสถียรภาพเมื่อให้ภาระน้อย ๆ มากยิ่งขึ้น

การสร้างรอยความเสียหาย ควรจะมีการหาวิธีที่สร้างรอยความเสียหายที่มีขนาดเล็กลง และไม่ยาวตลอดระยะตามแนวแกนของตลับลูกปืนซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการสร้างความเสียหายด้วยการทำ wirecut เพื่อที่จะศึกษาว่าสัญญาณความเสียหายในกรณีที่รอยความเสียหายไม่ได้ยาวตลอดระยะตามแนวแกนของตลับลูกปืนซึ่งน่าจะใกล้เคียงกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าว่ามีลักษณะอย่างไร นอกจากนี้ยังควรทดลองกับตลับลูกปืนหลาย ๆ ประเภทเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดอิมพัลส์ว่าขึ้นอยู่กับชนิดของตลับลูกปืนหรือไม่ หรือว่าตัวเลขที่ได้จากการคำนวณสามารถ

อธิบายได้อย่างเพียงพอแล้ว เพื่อที่จะได้ปรับปรุงระเบียบวิธีในการตรวจจับความเสียหายให้เหมาะสมกับลักษณะสัญญาณความเสียหายโดยทั่วไปต่อไป

ส่วนของระเบียบวิธีในการตรวจจับความเสียหายถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักคือต้องการระเบียบวิธีที่สามารถใช้ตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนที่ครอบคลุมได้มากที่สุด เนื่องจากระเบียบวิธีในการเลือกตัวบ่งชี้สำหรับปรับตัวกรองเวฟเลตที่ใช้ในการศึกษานี้อาศัยอยู่บนพื้นฐานที่ว่าอิมพัลส์เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องกันจึงไม่เกิดแถบความถี่ข้างในเอ็นวีลอปสเปกตรัม ซึ่งเป็นจริงเฉพาะเมื่อเกิดความเสียหายที่ร้าววงนอกเท่านั้น ในขณะที่จะเกิดแถบความถี่ข้างขึ้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่อีกสองบริเวณ โดยเฉพาะกรณีที่เกิดความเสียหายที่เม็ดลูกปืนที่ระยะแถบความถี่ข้างจะน้อยมาก (เท่ากับ FTF) ส่งผลให้ระเบียบวิธีดังกล่าวตัดสินใจผิดพลาด ด้วยเหตุนี้จึงควรมีการปรับปรุงระเบียบวิธีในการเลือกตัวบ่งชี้ที่สามารถจัดการกับกรณีที่เกิดแถบความถี่ข้างในเอ็นวีลอปสเปกตรัมได้ อาจจะด้วยการจำกัดจำนวนยอดที่ถูกระบุเพื่อใช้เป็นความถี่พื้นฐานสำหรับยอดที่อยู่ติด ๆ กัน เพื่อลดจำนวนแถบความถี่ข้างและมีการปรับค่าความถี่ในการระบุฮาร์มอนิกของยอดดังกล่าวให้สอดคล้องกันน่าจะช่วยลดผลกระทบที่มาจากแถบความถี่ข้างที่เกิดจากการมอดูเลตของรอบการเกิดอิมพัลส์ลงไปได้ นอกจากนี้เกณฑ์การตัดสินใจพบความเสียหายหรือไม่ควรพิจารณาข้อมูลที่เป็นบริบทอื่น ๆ ในเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ถูกเลือกด้วย มิใช่ยึดอยู่ที่ค่าความถี่ของตระกูลฮาร์มอนิกที่ให้ผลรวมสูงสุดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมชุดที่ถูกเลือกเช่นที่ใช้อยู่ในการศึกษานี้เท่านั้น เพราะจากการสังเกตในหลาย ๆ กรณี ถ้าพิจารณาด้วยสายตาจะพบรูปแบบที่สื่อได้ว่าเกิดความเสียหายขึ้น แต่เมื่อยึดหลักเกณฑ์ที่ค่าความถี่จะกลับกลายเป็นว่าตรวจไม่พบความเสียหาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Zhen, L., Zhengjia, H., Yanyang, Z., and Yanxue, W. Customized wavelet denoising using intra- and inter-scale dependency for bearing fault detection. Journal of Sound and Vibration 313 (2000) : 342-359.
- [2] Li, C., and Ma, J. Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing-localized defects. NDT&E International 30 (3) (1997) : 143-149.
- [3] Sun, Q., and Tang, Y. Singularity analysis using continuous wavelet transform for bearing fault diagnosis. Mechanical Systems and Signal Processing 16 (6) (2002) : 1025-1051.
- [4] Qiu, H., Lee, J., Lin, J., and Yu, G. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics. Journal of Sound and Vibration 289 (2006) : 1066-1090.
- [5] Zhu, Z.K., Yan, R., Luo, L., Feng, Z.H., and Kong, F.R. Detection of signal transients based on wavelet and statistics for machine fault diagnosis. Mechanical Systems and Signal Processing 23 (2009) : 1076-1097.
- [6] Sheen, Y.T. On the study of applying Morlet wavelet to the Hilbert transform for the envelope detection of bearing vibration. Mechanical Systems and Signal Processing 23 (2009) : 1518-1527.
- [7] He, W., Jiang, Z.N., and Feng, K. Bearing fault detection based on optimal wavelet filter and sparse code shrinkage. Measurement (2009).
- [8] Su, W., Wang, F., Zhu, H., Zhang, Z., and Guo, Z. Rolling element bearing fault diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement. Mechanical Systems and Signal Processing 24 (2010) : 1458-1472.
- [9] Nikolaou, N.G., and Antoniadis, I.A. Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearing using complex shifted Morlet wavelet. Mechanical Systems and Signal Processing 16 (4) (2002) : 677-694.
- [10] Sawalhi, N., Randall, R.B., and Endo, H. The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearing using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) : 2616-2633.



- [11] Lin, J., and Qu, L. Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis. Journal of Sound and Vibration 234 (1) (2000) : 135-148.
- [12] Addison, P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [13] Burrus, C.S., Gopinath, R.A., and Guo, H. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [14] Rioul, O., and Duhamel, P. Fast algorithm for discrete and continuous wavelet transforms. IEEE Transactions on Information Theory 38 (2) (1992) : 569-586.
- [15] Collacott, R.A. Vibration Monitoring and Diagnosis: Techniques for Cost-effective Plant Maintenance. London: George Goodwin Limited, 1979.
- [16] Wowk, V. Machinery Vibration: Measurement and Analysis. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [17] Buscarell, R.T. Practical solution to machinery and maintenance vibration problems. Texas: Update International, 1987.
- [18] Al-Raheem, K.F., Roy, A., Ramachandran, K.P., and Grainger, S. Rolling element bearing faults diagnosis based on autocorrelation of optimized: wavelet de-noising technique. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 40 (2009) : 393-402.
- [19] Endo, H., and Randall, R.B. Enhancement of autoregressive model based gear tooth fault detection technique by use of minimum entropy deconvolution filter. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) : 906-919.
- [20] Wang, D., Miao, Q., Fan, X., and Huang, H.Z. Rolling element bearing fault detection using an improved combination of Hilbert and wavelet transform. Journal of Mechanical Science and Technology 23 (2009) : 3292-3301.
- [21] Büsow, R. An algorithm for the continuous Morlet wavelet transform. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) : 2970-2979.
- [22] Schukin, E.L., Zanaraev, R.U., and Schukin, L.I. The optimization of wavelet transform for the impulse analysis in vibration signals. Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) : 1315-1343.

- [23] Rubini, R., and Meneghetti, U. Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient fault in ball bearing. Mechanical Systems and Signal Processing 15 (2) (2001) : 287-302.
- [24] Peng, Z.K., Tse, P.W., and Chu, F.L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing. Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) : 974-988.
- [25] Junsheng, C., Dejie, Y., and Yu, Y. Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) : 920-929.
- [26] Ericsson, S., Grip, N., Johansson, E., Persson, L-E., Sjöberg, R., and Strömberg, J-O. Towards automatic detection of local bearings defects in rotating machines. Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) : 509-535.
- [27] Liu, J., Wang, W., Golnaraghi, F., and Liu, K. Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnosis. Measurement Science and Technology 19 (2008).



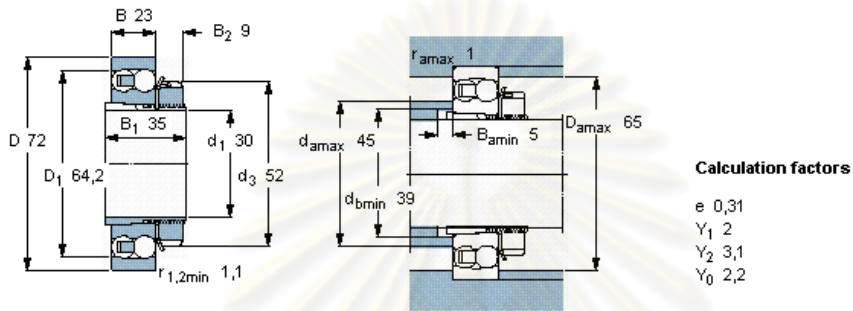
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

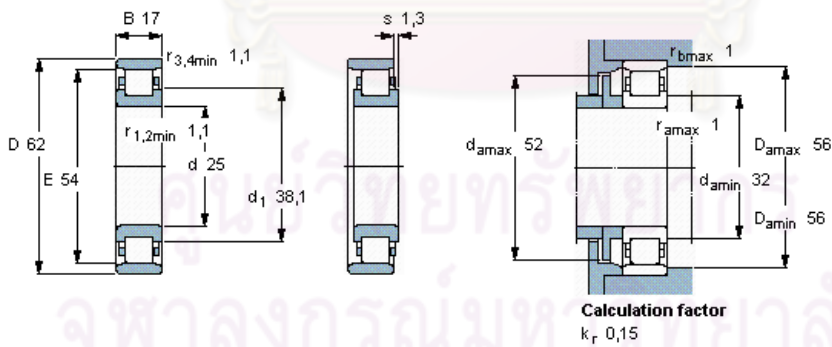
### รายละเอียดของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดลอง

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit $P_u$	Speed ratings		Mass	Designation Bearing + adapter sleeve
$d_1$	D	B	dynamic	static		Reference speed	Limiting speed		
mm			kN		kN	r/min		kg	-
30	72	23	30,7	8,8	0,46	18000	12000	0,54	2207 EKTN9 + H 307



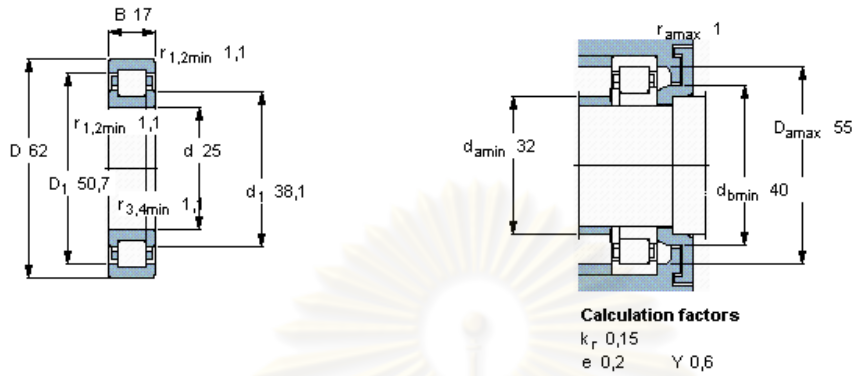
รูปที่ ก-1 ตลับลูกปืนรุ่น 2207 EKTN9 สำหรับชุดให้ภาระและเพลาด้านที่ไม่ได้วัดสัญญาณ

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit $P_u$	Speed ratings		Mass	Designation
d	D	B	dynamic	static		Reference speed	Limiting speed		
mm			kN		kN	r/min		kg	-
25	62	17	46,5	36,5	4,55	12000	15000	0,24	N 305 ECP



รูปที่ ก-2 ตลับลูกปืนรุ่น N 305 ECP สำหรับสร้างรอยความเสียหายที่รางวงนอกและเม็ดลูกปืน

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit $P_u$	Speed ratings		Mass	Designation
d	D	B	dynamic	static		Reference speed	Limiting speed		
mm			kN	$C_0$	kN	r/min	kg	-	
25	62	17	46,5	36,5	4,55	12000	15000	0,25	NUP 305 ECP




รูปที่ ก-3 ตลับลูกปืนรุ่น NUP 305 ECP สำหรับสร้างรอยความเสียหายที่รางวิ่งใน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

รายละเอียดของหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

**Calibration Chart for Accelerometer Type 4371**

  
**Brüel & Kjær**

Serial No. 1812513

Reference Sensitivity at 159.2Hz ( $\omega = 1000\text{ s}^{-1}$ ),  
100ms<sup>-2</sup> and 23 °C

Charge Sensitivity\* 1,007 pC/ms<sup>-2</sup> or 1,888 pC/g

Voltage Sensitivity\* (incl. AO 0038)  
0,817 mV/ms<sup>-2</sup> or 8,01 mV/g  
(Voltage Preamp. input Capacitance: 3.5pF)

Capacitance (incl. cable) 12,33 pF

Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF

Maximum Transverse Sensitivity  
(at 30Hz, 100ms<sup>-2</sup>) 1,5 %

Typical Undamped Natural Frequency ..... 48kHz

Typical Transverse Resonance Frequency, using Calibration Exciter 4290, with accelerometer mounted on a steel cube by a 10 - 32 UNF-2A steel stud, mounting torque 1.8Nm and greased surfaces: ..... 15kHz

**Polarity** is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer

**Resistance** minimum 20000MΩ at room temperature

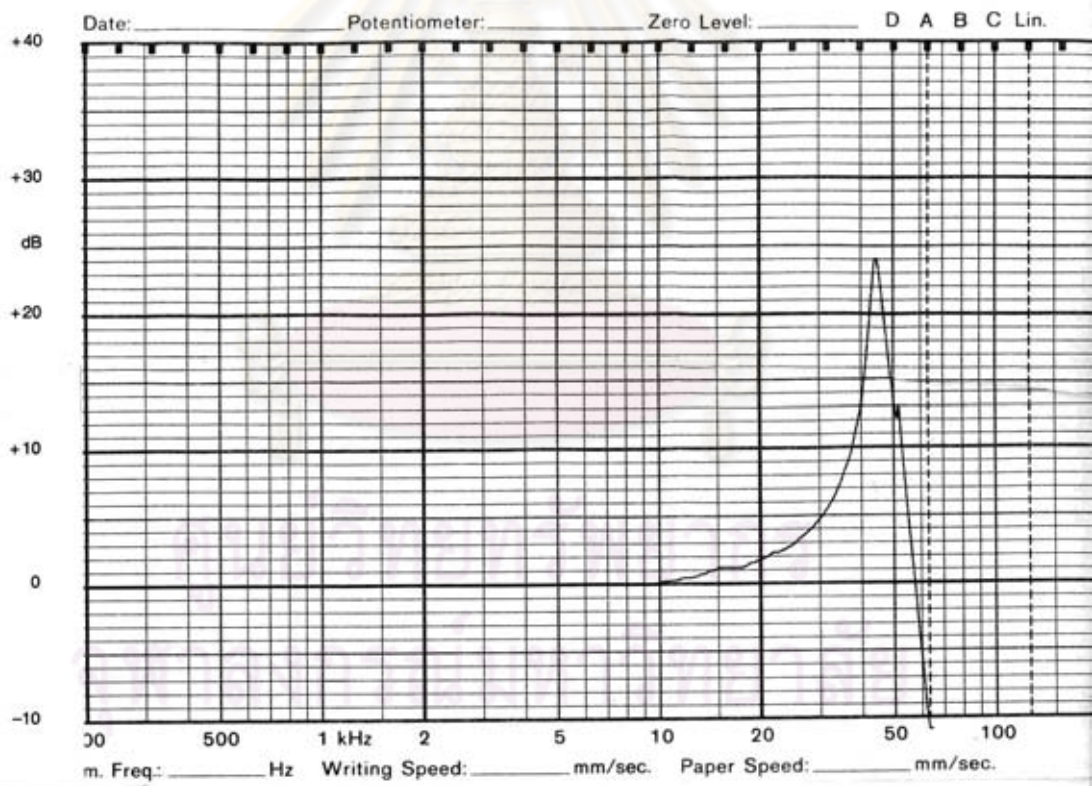
Date: 94-10-18 Signature: EJ

1 g = 9.807ms<sup>-2</sup> or 10ms<sup>-2</sup> = 1.02g

\* This calibration is traceable to:  
NIST - National Institute of Standards and Technology, U.S.A.,  
and  
PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany

BC 0101-15

รูปที่ ข-1 รายละเอียดของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง



รูปที่ ข-2 การตอบสนองเชิงความถี่ของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง

**Calibration Chart for Accelerometer Type 4371**



Serial No. 1812515

Reference Sensitivity at 159.2Hz ( $\omega = 1000\text{s}^{-1}$ ),  
 100 ms<sup>-2</sup> and 23 °C  
 Charge Sensitivity\* 0.996 pC/ms<sup>-2</sup> or 9.77 pC/g  
 Voltage Sensitivity\* (incl. AO 0038)  
0.815 mV/ms<sup>-2</sup> or 7.99 mV/g  
 (Voltage Preamp. input Capacitance: 3.5 pF)  
 Capacitance (incl. cable) 1222 pF  
 Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF  
 Maximum Transverse Sensitivity  
 (at 30 Hz, 100 ms<sup>-2</sup>) 1.2 %

Typical Undamped Natural Frequency ..... 48 kHz

Typical Transverse Resonance Frequency, using Calibration Exciter 4290, with accelerometer mounted on a steel cube by a 10 - 32 UNF-2A steel stud, mounting torque 1.8Nm and greased surfaces:

..... 15 kHz

**Polarity** is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer

**Resistance** minimum 20 000 MΩ at room temperature

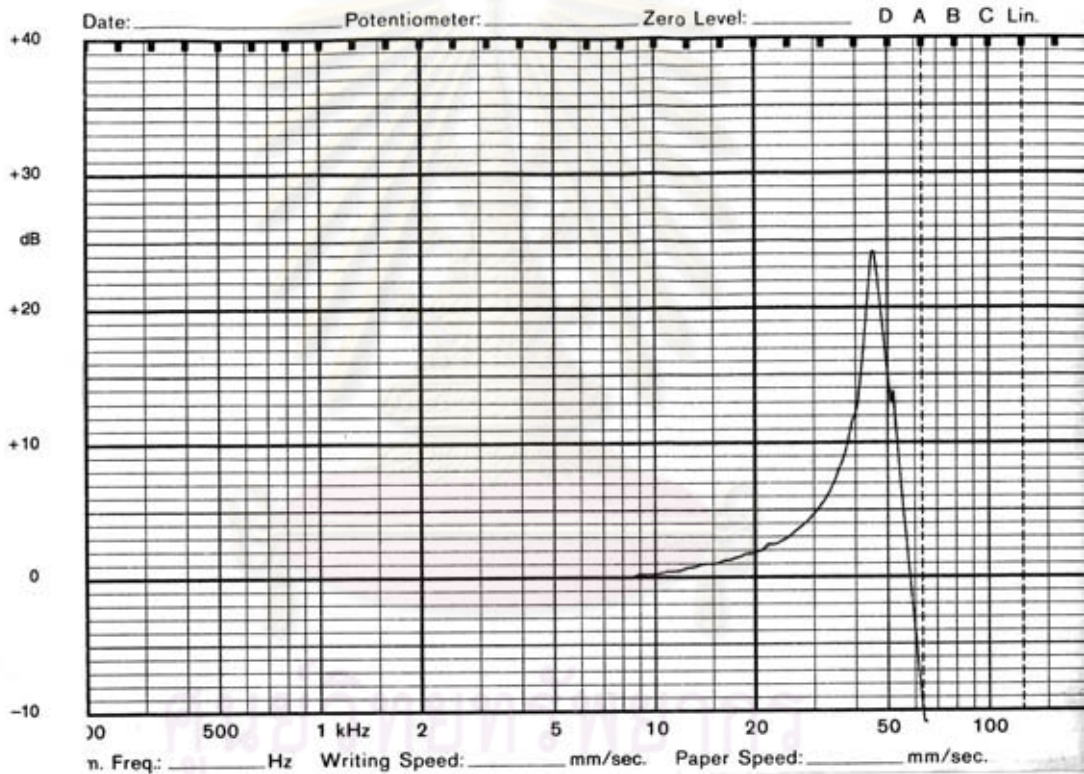
Date: 94-10-18 Signature: EJ

1 g = 9.807 ms<sup>-2</sup> or 10 ms<sup>-2</sup> = 1.02 g

\* This calibration is traceable to:  
 NIST - National Institute of Standards and Technology, U.S.A.,  
 and  
 PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany

BC 0101-15

รูปที่ ข-3 รายละเอียดของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวระดับ



รูปที่ ข-4 การตอบสนองเชิงความถี่ของหัววัดที่ใช้วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวระดับ

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนั้นรพงศ์ กุลคิดกไพบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2529 ที่จังหวัดกำแพงเพชร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย