

การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

อริวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กุมภาพันธ์ 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ อธิวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธาน  
(ดร. ณัฐวุฒิ ชนศรีสถิตย์)

.....กรรมการ  
(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงแก้ว)

.....กรรมการ  
(ดร. รอบรู้ รังสิเวศ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ดร. อาถิติ ดีพัฒนา)

วันที่ 20 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 3 และแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดชลบุรี ที่อนุญาตให้ทำการทดสอบภาคสนามในโครงสร้างสะพานที่ทำการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแต่ บุพการีบูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

อิทธิวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์

57910230: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ความถี่ธรรมชาติของสะพาน/ วิธีทดสอบทางอ้อม/ รถยนต์นั่งส่วนบุคคล/

ผลตอบสนองความเร่ง/ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน

อธิวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์: การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนอง

ความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (BRIDGE NATURAL FREQUENCY IDENTIFICATION BY

USING A PASSENGER CAR'S ACCELERATION RESPONSE) คณะกรรมการควบคุม

วิทยานิพนธ์: พัชรพงษ์ อาสนจินดา, ปร.ด., 123 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม เพื่อแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของวิธีการทดสอบ รวมทั้งนำเสนอกระบวนการวิเคราะห์และรูปแบบการทดสอบที่เหมาะสม โดยได้ทำการทดสอบภาคสนามกับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้นจำนวน 3 สะพาน และใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup) และรถนั่งสามตอนเอนกประสงค์ (SUV) เป็นยานพาหนะทดสอบ โดยห้วงวัดความเร่งได้ถูกติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางเพลาลังของรถยนต์ทดสอบ และทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ได้กับความถี่จากห้วงวัดความเร่งที่ได้ที่ห้องสะพาน ซึ่งเป็นการวัดแบบทางตรง โดยพิจารณาผลของความถี่ที่แตกต่างกัน

ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถหาค่าได้จากกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งตรวจวัดที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วย 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่ 1) การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) 2) การแยกรูปแบบสัญญาณเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) การแยกรูปแบบสัญญาณเชิงประจักษ์ร่วมกับการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง จากผลการศึกษาพบว่าความถี่ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ที่นำเสนอมีค่าตรงกันกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดทางตรงที่สะพาน คิดเป็นร้อยละ 79.67 ของกรณีที่ระบุค่าความถี่ได้ ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการทดสอบทางอ้อมแทนการวัดโดยตรง และจากผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีน้ำหนักมาก มีช่วงล่างที่มีความหน่วงสูง และเคลื่อนที่เพียงคันเดียวบนสะพานด้วยความเร็วประมาณ 36-55 กม./ชม. เป็นกรณีที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ ส่วนการหาความถี่ธรรมชาติจริงของสะพานเป็นไปได้ยากและมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นวิธีการทดสอบทางอ้อมจึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้เพื่อคัดกรองสะพานที่อาจเกิดความเสียหายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความถี่

57910230: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M. Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: BRIDGE NATURAL FREQUENCY/ INDIRECT METHOD/ PASSENGER  
CAR/ ACCELERATION RESPONSE/ VEHICLE-BRIDGE INTERACTION

ATHIWAT MANEERADROJ: FIELD VERIFICATION OF BRIDGE NATURAL  
FREQUENCY IDENTIFICATION FROM ACCELERATION RESPONSE OF PASSENGER  
CAR. ADVISORY COMMITTEE: PATTARAPONG ASNACHINDA, Ph.D., 123 P. 2017.

This research studied bridge natural frequency identification from a passenger car's acceleration response by field testing. The research aimed to propose the analytical process and the appropriate testing scenario. In addition, effect of relevant parameters was studied. The field test was carried out with three short span reinforce concrete bridges and two types of passenger car i.e. full size pick-up truck (pickup) and sport utility vehicle (SUV) as the test vehicles. The acceleration transducers were mounted at the mid-point of vehicle rear axle as well as beneath the bridge at the mid-span in order to compare the analyzed frequency obtained from the direct and the indirect methods. Besides, effect of various moving speed was also considered. The bridge natural frequency can be identified by using indirect method from the process of signal analysis of the measured acceleration response. The proposed process consisted of 3 steps of calculation i.e. 1) the simple Fast Fourier Transformation (FFT) 2) the Empirical Mode Decomposition technique (EMD) and 3) the combination of the EMD and the cut of acceleration signal techniques. Regarding to the result of study, it was revealed that the proposed process was able to identify the bridge fundamental frequency of 79.67% for available cases. Moreover, it was observed that the analyzed frequencies were exactly the same to those obtained from the direct measurement to the bridge. Consequently, the indirect test with the proposed process of analysis can be successfully used instead of the conventional direct test. According to the parametric study, it was found that using a passenger car having heavier weight, higher suspension damping and only one vehicle moving on the bridge with speed at 36-55 km./hr. Which was recommended for application. However, estimating the actual bridge fundamental frequency was observed to be difficult with high complexity. Therefore, the proposed indirect method is appropriate for classification the potential damage bridges according to the change of frequency.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
การดำเนินงานวิจัย .....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
ความถี่ธรรมชาติของสะพาน .....	4
ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน .....	4
การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน .....	11
3 วิธีการศึกษาและผลการศึกษาเบื้องต้น .....	20
สะพานที่ทำการทดสอบ .....	20
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	27
ผลการทดสอบเบื้องต้น.....	32
ยานพาหนะทดสอบ .....	36
การเตรียมการทดสอบ .....	40
ขั้นตอนการทดสอบ .....	42
พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา.....	44
รูปแบบการทดสอบ .....	45
4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล .....	48
ความถี่ของรถทดสอบเนื่องจากการสั่นไหวในขณะที่เข้าและออกจากสะพาน .....	48

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	กระบวนการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติที่เป็นไปได้.....	51
	กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งเพื่อระบุค่าความถี่สะพาน .....	53
	ปัจจัยที่มีผลต่อการระบุค่าความถี่สะพาน .....	68
	ความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน .....	82
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	88
	สรุปผลการศึกษา .....	88
	ข้อเสนอแนะ .....	89
	บรรณานุกรม .....	90
	ภาคผนวก .....	92
	ประวัติย่อของผู้วิจัย .....	123

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบแทนของความเร่งของยานพาหนะ ..... 10
3-1	ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ใช้ทดสอบ ..... 25
3-2	ค่าเปรียบเทียบห้วงความเร่งที่ใช้ในการทดสอบภาคสนาม ..... 32
3-3	ข้อมูลทางเทคนิคของรถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ปี 2016 ..... 36
3-4	ข้อมูลทางเทคนิคของรถยนต์ Toyota hilux vigo champ ปี 2012 ..... 37
3-5	ความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลาลังของรถยนต์ทดสอบเกิดการสั่นไหว ..... 38
3-6	พารามิเตอร์ที่ปรับค่าในการทดสอบภาคสนาม ..... 46
4-1	ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) และเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ( $e_{f_{bridge}}$ ) หลังผ่านกระบวนการที่นำเสนอ 62



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับ สะพาน..... 5
2-2	การวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม . 12
2-3	ตัวอย่างการสร้างเส้นกรอบและการเฉลี่ยเส้นกรอบ (อานนท์ นิยมสุข, 2558)..... 16
2-4	ผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่ถูกแยกด้วยเทคนิค EMD โดยที่ $C_1 - C_6$ คือ IMF ทั้งหมดของสัญญาณที่ถูกแยกย่อย และ $r_7$ คือ สัญญาณที่เหลือ (Yang & Chang, 2009b)..... 18
3-1	สะพาน พ.ศ. 2550..... 21
3-2	แบบขยายด้านข้างของสะพาน พ.ศ. 2550..... 21
3-3	แบบขยายแนวตัด A-A ของสะพาน พ.ศ. 2550..... 22
3-4	สะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์..... 22
3-5	แบบขยายด้านข้างของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์..... 23
3-6	แบบขยายแนวตัด A-A ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์..... 23
3-7	สะพานห้วยหนองซาก..... 24
3-8	แบบขยายด้านข้างของสะพานห้วยหนองซาก..... 24
3-9	แบบขยายแนวตัด A-A ของสะพานห้วยหนองซาก..... 25
3-10	สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพาน พ.ศ. 2550..... 26
3-11	สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์..... 26
3-12	สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานห้วยหนองซาก..... 26
3-13	ห้วงวัดความเร่ง..... 27
3-14	ชุดหน่วยแปลงสัญญาณ..... 28
3-15	อุปกรณ์รวมสัญญาณ..... 28
3-16	เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง..... 29
3-17	Notebook Asus N43sl..... 30
3-18	UPS Leonics รุ่น Green-1000VA 600 watt..... 30
3-19	IP camera Plenty C50 Pro..... 31

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3-20	สเปกตรัมความถี่ที่ได้จากผลการทดสอบด้วยวิธีทางตรงของสะพาน พ.ศ. 2550.....	33
3-21	สเปกตรัมความถี่ที่ได้จากผลการทดสอบด้วยวิธีทางตรงสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ..... 33	33
3-22	ตำแหน่งของหัววัดความเร่งที่ยานพาหนะเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม .....	34
3-23	ความเร่งและสเปกตรัมความถี่ของยานพาหนะที่ตำแหน่งติดตั้งหัววัดความเร่งต่าง ๆ..	35
3-24	ยานพาหนะทดสอบรถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ปี 2016.....	36
3-25	ยานพาหนะทดสอบรถยนต์ Toyota hilux vigo champ ปี 2012 .....	37
3-26	ความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลาลังเกิดการสั่นไหวของรถยนต์ประเภท SUV .....	38
3-27	การลดลงของฟังก์ชันลอการิทึมของสัญญาณความเร่งจากรถ SUV .....	39
3-28	การลดลงของฟังก์ชันลอการิทึมของสัญญาณความเร่งจากรถ Pickup .....	39
3-29	ตำแหน่งของหัววัดความเร่งที่ทำการติดตั้ง .....	40
3-30	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบภาคสนาม.....	41
3-31	รูปแบบการทดสอบ กรณียานพาหนะเคลื่อนที่บนสะพานเพียงคันเดียว.....	45
3-32	รูปแบบการทดสอบ กรณียานพาหนะเคลื่อนที่จำนวนมากกว่า 1 คัน บนสะพาน เคลื่อนที่ในทิศสวนทางกัน .....	46
3-33	แผนผังรูปแบบการทดสอบ.....	47
4-1	สัญญาณความเร่งที่เกิดการกระแทกของยานพาหนะช่วงเข้าและออกจากสะพาน.....	49
4-2	การตัดช่วงสัญญาณความเร่งขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพานเพื่อลด ผลการกระแทก .....	49
4-3	สเปกตรัมความถี่จากสัญญาณความเร่งของรถ SUV ที่ผ่านวิธีการตัดสัญญาณเร่ง.....	51
4-4	แผนผังกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งจากยานพาหนะเพื่อระบุค่าความถี่ ของสะพานที่เป็นไปได้.....	52
4-5	จำนวนของกรณีที่สามารถระบุค่าได้จากกระบวนการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ .....	53
4-6	แผนผังกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งตรวจวัด .....	54
4-7	สัดส่วนการระบุค่าความถี่ได้ของแต่ละขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่ง .....	56
4-8	ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการ FFT แบบทั่วไป .....	56

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-9 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ EMD แล้วระบุความถี่ได้ .....	58
4-10 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ EMD แล้วระบุความถี่ไม่ได้.....	59
4-11 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการตัดช่วง สัญญาณความเร่งแล้วระบุความถี่ได้.....	60
4-12 ร้อยละกรณีที่ระบุค่าความถี่สะพานได้หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ของรถทดสอบ ทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	69
4-13 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัด ทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะ ทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	69
4-14 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัด ทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะ ทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	70
4-15 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัด ทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณี ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	70
4-16 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัด ทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบ โดยใช้รถ Pickup กรณี ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	71
4-17 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัด ทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณี ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	71
4-18 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการ ทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบ โดยใช้รถ Pickup กรณี ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	72

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-19 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	72
4-20 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	73
4-21 จำนวนกรณีที่ระบุค่าได้หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ในแต่ละความเร็วทดสอบ กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	74
4-22 สัญญาณความเร่งตรวจวัดในช่วงความเร็วต่าง ๆ ของรถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	76
4-23 สเปกตรัมความถี่ในช่วงความเร็วต่าง ๆ ของรถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	77
4-24 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	78
4-25 สัญญาณความเร่งตรวจวัดและสเปกตรัมความถี่ของรถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพานเปรียบเทียบกับกรณียานพาหนะมากกว่า 1 คัน .....	79
4-26 จำนวนกรณีที่สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ของยานพาหนะทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	80
4-27 จำนวนกรณีที่สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ของรถประเภท SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	81
4-28 จำนวนกรณีที่สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ของรถประเภท Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	81
4-29 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	83

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-30 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน.....	83
4-31 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	84
4-32 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน.....	84
4-33 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน.....	85
4-34 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน .....	85
4-35 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน.....	86
4-36 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน.....	86
4-37 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน.....	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สะพานเป็นโครงสร้างที่ถูกละเลยให้ความสำคัญมากขึ้นจากอดีตเนื่องจากการเติบโต และการขยายตัวของเศรษฐกิจ ซึ่งเป็นผลมาจากการคมนาคมเพื่อการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขนส่งทางรถยนต์ สะพานที่ถูกใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่งแล้ว จะเกิดการเสื่อมสภาพ และเกิดการเสียหายของตัวโครงสร้างสะพาน ซึ่งเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ ดังนั้นการประเมิน สภาพความแข็งแรงของสะพานจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากที่จะนำไปสู่การซ่อมบำรุงโครงสร้าง สะพานเพื่อให้ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

การประเมินสภาพความแข็งแรงของสะพานโดยทั่วไปแล้วนั้นจะมุ่งประเด็นไปที่การหาค่าความถี่ของสะพาน (Bridge natural frequency) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการตรวจสอบ เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาตินี้เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่สัมพันธ์กับค่าสติฟเนส (Stiffness) หากเกิดการเสื่อมสภาพซึ่งเป็นผลให้เกิดความเสียหายในตัวโครงสร้างขึ้นนั้น จะส่งผลให้ค่าสติฟเนส ของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่มีนัยสำคัญจึงเป็นข้อบ่งชี้ถึง ความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้ แต่เนื่องจากวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างสะพานในปัจจุบันนั้นจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตัวโครงสร้างสะพานโดยตรง ซึ่งยากต่อการติดตั้งและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งกลายเป็นข้อจำกัดของวิธีการทางตรง ด้วยเหตุนี้วิธีการ ทดสอบแบบทางอ้อม (Indirect approach) จึงถูกเสนอขึ้นเพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการติดตั้ง ทั้งยังง่ายต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อมนั้น สามารถทำได้โดย การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งไว้ที่ยานพาหนะทดสอบแทนการติดตั้งโดยตรงที่สะพาน โดย วิธีทางอ้อมมีหลักการดังนี้ เมื่อยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่ผ่านสะพาน จะเกิดการสั่นไหวทั้งที่ตัว สะพานและยานพาหนะ สะพานจะส่งต่อการสั่นไหวที่เกิดขึ้นไปยังยานพาหนะที่มีปฏิสัมพันธ์ซึ่ง กันและกัน โดยยานพาหนะจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้น (Exciter) ให้เกิดการสั่นไหวและตัวรับ (Receiver) ผลตอบสนองการสั่นไหวในช่วงเวลาเดียวกัน ผลตอบสนองการสั่นไหวนั้นจะถูกบันทึก ในรูปแบบของสัญญาณความเร่ง ซึ่งอยู่ในโดเมนของเวลา (Time domain) โดยจะทำการแปลงจาก

โดเมนของเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (Frequency domain) เพื่อให้สามารถจำแนกความถี่ของสะพานออกจากสัญญาณความถี่ตรงวัดได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ ซึ่งจะทำการทดสอบในภาคสนามกับสะพานจริงที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ด้วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีอยู่ในตลาดรถยนต์ภายในประเทศไทย การศึกษาจะมุ่งเน้นที่จะนำเสนอประเภทและลักษณะการเคลื่อนที่ รวมทั้งกระบวนการวิเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่เคลื่อนผ่าน และทำการวิเคราะห์ความถี่โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier transformation, FFT) ประกอบกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณความถี่จากเทคนิคการแยกรูปแบบสัญญาณเชิงประจักษ์ (Empirical mode decomposition, EMD) รวมทั้งเพิ่มเติมวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ โดยพิจารณาระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้ด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อมเทียบกับความถี่จากวิธีการวัดทางตรงและความถี่จริงของสะพาน แต่จะมุ่งเน้นไปที่ระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่จากการวัดทางตรง ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของยานพาหนะ

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อมโดยใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล
2. เพื่อศึกษาประเภทและลักษณะการเคลื่อนที่ที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อม โดยใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล
2. สามารถรู้สภาพความเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน
3. สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย เวลาและแรงงานคนในการสำรวจเพื่อประเมินสภาพของโครงสร้างสะพาน
4. สามารถนำผลที่ได้ไปประกอบการวางแผนการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานอย่างมีประสิทธิภาพ

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. พิจารณาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้น ที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 20 เมตร
2. พิจารณาประเภทรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้ในการศึกษา 2 ชนิด ได้แก่ รถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup) และรถนั่งสามตอน (SUV)
3. พิจารณาความเร็วของยานพาหนะที่ศึกษาไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
4. พิจารณาสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ 2 กรณี ได้แก่ กรณียานพาหนะเคลื่อนที่บนสะพานเพียงคันเดียวและกรณียานพาหนะจำนวนมากกว่า 1 คัน เคลื่อนที่บนสะพานในทิศทางสวนทางกัน
5. พิจารณาผลตอบสนองการสั่นไหวทางพลศาสตร์ด้วยสัญญาณความเร่ง
6. ความถี่ของโครงสร้างที่ทำการประมาณค่า คือ ความถี่ธรรมชาติของการตัดโหมดที่ 1

### การดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อในงานวิจัย ด้วยการรวบรวมข้อมูลและทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต รวมถึงศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้
2. ศึกษา วางแผน และคัดเลือกยานพาหนะทดสอบการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม
3. ทำการทดสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานในภาคสนาม โดยประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม
4. ทำการศึกษาเทคนิคที่จะนำเข้ามาใช้ในการช่วยประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมในภาคสนามให้มีผลที่ดียิ่งขึ้น
5. ทำการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบเบื้องต้น
6. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
7. ทำการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานเพิ่มเติม รวมไปถึงศึกษาในกรณีศึกษาอื่น
8. ทำการวิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด
9. สรุปผลการศึกษา
10. จัดทำวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

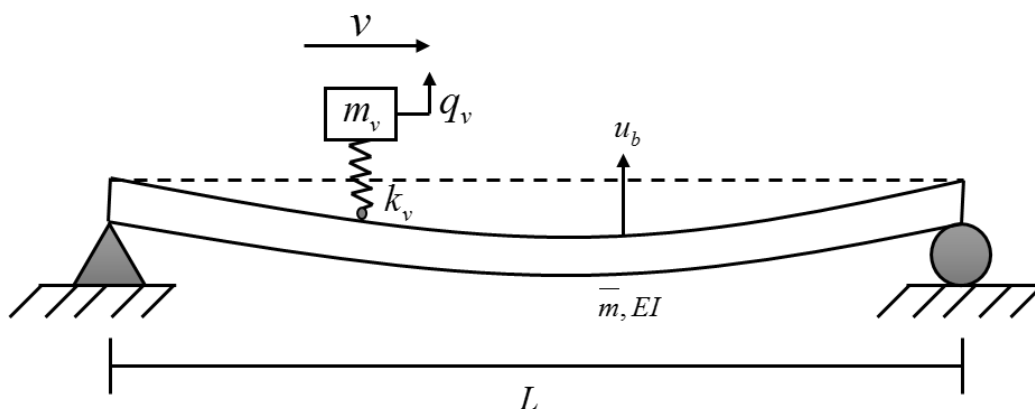
#### ความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในงานโครงสร้างสะพาน เช่น การออกแบบ การตรวจสอบความคงทนและการซ่อมบำรุง เป็นต้น โดยเฉพาะการตรวจสอบสภาพความคงทน และการซ่อมบำรุงเพื่อรักษาสภาพความคงทนของสะพานให้สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาตินั้นมีความสัมพันธ์กับค่าสตีเฟนส์ของสะพาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติสามารถบ่งบอกถึงการลดลงของค่าสตีเฟนส์ที่มีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพาน (Siringoringo & Fujino, 2011)

โดยทั่วไปแล้วการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของ โครงสร้างนั้นจะเป็นผลรวมของการสั่นไหวเนื่องมาจากความถี่ธรรมชาติที่มีขนาดของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน ซึ่งความถี่แต่ละค่านี้จะมีรูปแบบการสั่นไหวเป็นรูปร่างเชิงโหมด (Mode shape) ที่ต่างกันออกไป โดยมีความถี่ในโหมดที่ 1 เป็นความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ของโครงสร้างที่มีความถี่ต่ำที่สุด แต่มีส่วนของการสั่นไหวของโครงสร้างมากที่สุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความถี่โหมดที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญจึงมีความสำคัญเนื่องจากสามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของ โครงสร้างได้

#### ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน

เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพานจะทำให้สะพานเกิดการสั่นไหวด้วยความถี่หลายองค์ประกอบปนกันอยู่ ซึ่งสะพานจะส่งผ่านการสั่นไหวดังกล่าวมาที่ยานพาหนะด้วยเช่นกัน โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน (Vehicle-bridge interaction) การวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพานที่เคลื่อนผ่าน จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อจำลองพฤติกรรมที่กล่าวมา ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ด้วยการจำลองยานพาหนะให้อยู่ในลักษณะของก้อนมวล (Lumped mass) ที่มี 1 ดิกรีความอิสระในแนวตั้ง เคลื่อนที่ไปด้านหลังด้วยความเร็วผ่านสะพานที่ถูกจำลองให้มีจุดรองรับอย่างง่าย ที่มีความกว้างคงที่และมีพื้นผิวเรียบ (Smooth pavement) ตลอดช่วงความยาวของสะพาน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีแกนของ Euler-Bernoulli โดยจะไม่คิดผลของความหน่วง (Damping effect) ทั้งของสะพานและยานพาหนะ



ภาพที่ 2-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน

โดยที่  $m_v$  คือ มวลของยานพาหนะ

$k_v$  คือ สติฟเนสของช่วงล่างของยานพาหนะ

$V$  คือ ความเร็วของยานพาหนะ

$L$  คือ ความยาวช่วงของสะพาน

$\bar{m}_b$  คือ มวลของสะพานต่อหนึ่งหน่วยความยาว

$E$  คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของสะพาน

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของสะพาน

$u_b$  คือ การกระจัดในแนวตั้งของสะพาน ณ ระยะที่  $x$  และที่เวลา  $t$  ใด ๆ

$q_v$  คือ การกระจัดในแนวตั้งของยานพาหนะ

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$f_c$  คือ แรงสัมผัสระหว่างยานพาหนะกับสะพาน

$\omega_b$  คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน

$\omega_v$  คือ ความถี่เนื่องจากการสั่นไหวของยานพาหนะ

$\phi_n$  คือ โหมดการสั่นไหวในโหมดที่  $n$

$\sigma$  คือ เคลต้าฟังก์ชัน

$P(x,t)$  คือ แรงที่กระทำกับสะพานที่จุดสัมผัส ณ ตำแหน่ง  $x$

จากการวิเคราะห์แบบจำลองสามารถเขียนสมการการสั่นไหวของสะพานและการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในขณะที่อยู่บนสะพาน ได้ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2)

$$\bar{m}_v \ddot{u} + EIu''' = P(x,t) \quad (2-1)$$

$$m_v \ddot{q}_v + k_v q_v = k_v u|_{x=Vt} \quad (2-2)$$

โดยสามารถทราบค่าแรงลัพธ์  $f_c(t)$  จากกฎการรวมแรงในทิศทางแนวดิ่งเนื่องจากผลของน้ำหนักของยานพาหนะและแรงในขณะเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากระบบช่วงล่างของยานพาหนะ โดย  $q_v$  คือ การโก่งตัวในแนวดิ่งของยานพาหนะ ซึ่งวัดจากตำแหน่งสมดุลของยานพาหนะในขณะหยุดนิ่ง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-3)

$$f_c(t) = -m_v g + k_v (q_v - u|_{x=Vt}) \quad (2-3)$$

ขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพานเป็นระยะทาง  $x$  และที่เวลา  $t$  ใดๆ ส่งผลทำให้เกิดแรง  $P(x,t)$  ซึ่งกระทำกับสะพานที่จุดสัมผัส ณ ตำแหน่ง  $Vt$  โดยมีความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ (2-4)

$$P(x,t) = f_c(t) \delta(x-Vt) \quad (2-4)$$

ซึ่ง  $\delta(x-Vt)$  คือ เดลต้าฟังก์ชัน (Dirac delta function) ณ จุดสัมผัส  $x = Vt$  ดังนั้นจึงได้ดังสมการที่ (2-5) คือ สมการการเคลื่อนที่ของระบบสะพานและยานพาหนะ

$$\bar{m}_v \ddot{u} + EIu''' = f_c(t) \delta(x-Vt) \quad (2-5)$$

เนื่องจากสะพานถูกจำลองโดยเป็นไปตามทฤษฎีของ Euler-Bernoulli และมีจุดรองรับอย่างง่าย เมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) จึงทราบว่าโหมดการสั่น  $\phi_n$  จะอยู่ในรูปแบบไซน์ซอยด์ (Sinusoid) เมื่อแก้สมการที่ (2-5) ด้วยวิธีการรวมโหมด (Modal superposition method) ซึ่งจะได้โหมดการสั่น  $\phi_n$  และตำแหน่งของการกระจัดของสะพาน  $q_{b,n}(t)$  ณ โหมดที่  $n$  ดังแสดงในสมการที่ (2-6)

$$u(x,t) = \sum_n \phi_n(x) q_{b,n}(t) = \sum_n \sin \frac{n\pi x}{L} q_{b,n}(t) \quad (2-6)$$

แทน  $u(x,t)$  ซึ่งเป็นการกระจัดในแนวตั้งของสะพานลงในสมการที่ (2-5) และใช้เงื่อนไขตั้งฉาก (Orthogonality conditions) สำหรับโหมดการสั่น  $\phi_n$  พร้อมกับสมมติฐานที่ว่าน้ำหนักของยานพาหนะ  $m_v$  มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของสะพาน  $\bar{m}L$  ซึ่งหมายถึง  $m_v / \bar{m}L \leq 1$  ทำให้สามารถประมาณสมการที่ (2-1) ให้อยู่ในรูปของสมการควบคุม (Governing equation) ได้ดังสมการที่ (2-7)

$$\ddot{q}_{b,n} + \omega_{b,n}^2 q_{b,n} = -\frac{2m_v g}{\bar{m}_b L} \sin \frac{n\pi Vt}{L} \quad (2-7)$$

เมื่อ  $\omega_{b,n}$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโหมดที่  $n$

$$\omega_{b,n} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}_b}} \quad (2-8)$$

จากสมการที่ (2-2) ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\ddot{q}_v + \omega_v^2 q_v = \omega_v^2 u|_{x=Vt} \quad (2-9)$$

เมื่อ  $\omega_v$  คือ ความถี่ของยานพาหนะ

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} \quad (2-10)$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขเบื้องต้น (Initial conditions) เพื่อใช้แก้สมการของสะพานในสมการที่ (2-7) จะได้

$$q_{b,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{1 - S_n^2} [\sin \eta - S_n \sin \omega_{b,n} t] \quad (2-11)$$

โดยที่  $\Delta_{st,n}$  คือ การโก่งตัวทางสถิตในโหมดที่  $n$  เนื่องจากยานพาหนะ

$\eta$  คือ ความถี่เนื่องจากการขับเคลื่อน (Driving frequency) ของยานพาหนะ

$S_n$  คือ พารามิเตอร์ไร้มิติเชิงความเร็ว

$$\Delta_{st,n} = \frac{-2m_v g L^3}{n^4 \pi^4 EI} \quad (2-12)$$

$$\eta = \frac{n\pi V}{L} \quad (2-13)$$

$$S_n = \frac{n\pi V}{L\omega_{b,n}} = \frac{\eta}{\omega_{b,n}} \quad (2-14)$$

แทนสมการที่ (2-11) ลงในสมการที่ (2-6) ทำให้ได้การกระจัดทั้งหมดของสะพาน เมื่อ ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็ว  $V$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2-15)

$$u(x,t) = \sum_n \frac{\Delta_{st,n}}{1-S_n^2} \left\{ \sin \frac{n\pi x}{L} \left\{ \sin \eta t - S_n \sin \omega_{b,n} t \right\} \right\} \quad (2-15)$$

เมื่อ ได้ผลตอบแทนทั้งหมดของสะพานจากสมการที่ (2-15) ทำให้ได้การกระจัดทั้งหมด ของยานพาหนะได้จาก การวิเคราะห์โดยวิธีอินทิกรัลของคูฮามเมล (Duhamel integral method) ใน สมการที่ (2-9) โดย สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-16)

$$q_v(t) = \sum_n \left\{ -A_{dl,n} \cos \frac{(n-1)\pi V}{L} t - A_{dr,n} \cos \frac{(n+1)\pi V}{L} t + A_{v,n} \cos \omega_v t - A_{bl,n} \cos(\omega_{b,n} - \eta)t + A_{br,n} \cos(\omega_{b,n} + \eta)t \right\} \quad (2-16)$$

โดยที่  $A_{dl,n}$ ,  $A_{dr,n}$ ,  $A_{v,n}$ ,  $A_{bl,n}$  และ  $A_{br,n}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความสอดคล้องกับ ค่าแอมพลิจูดของผลตอบแทน โดยแสดงค่าต่าง ๆ ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$A_{dl,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1-S_n^2)(1-\mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)} \quad (2-17a)$$

$$A_{dr,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1-S_n^2)(1-\mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} \quad (2-17b)$$

$$A_{v,n} = \frac{2\Delta_{st,n}\mu_n^2 S_n^2}{(1-S_n^2)} \left[ \frac{1}{(1-\mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)(1-\mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} - \frac{1}{(1-\mu_n^2(1-S_n^2))(1-\mu_n^2(1+S_n^2))} \right] \quad (2-17c)$$

$$A_{bl,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1-S_n^2)(1-\mu_n^2(1-S_n^2)^2)} \quad (2-17d)$$

$$A_{br,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1-S_n^2)(1-\mu_n^2(1+S_n^2)^2)} \quad (2-17e)$$

และ  $\mu_n$  คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ของยานพาหนะ (Bridge-vehicle frequency ratio) ในโหมดที่  $n$

$$\mu_n = \frac{\omega_{b,n}}{\omega_v} \quad (2-18)$$

จากผลตอบสนองทั้งหมดของสะพาน ในสมการที่ (2-16) พบว่าสามารถที่จะจำแนกกลุ่มของความถี่ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ความถี่เนื่องจากการขับเคลื่อนของยานพาหนะ ( $\eta$ ) ความถี่ของยานพาหนะ ( $\omega_v$ ) และความถี่ธรรมชาติของสะพาน ( $\omega_{b,n}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานดั้งเดิม คือ สามารถหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งที่วัดได้จากยานพาหนะที่เคลื่อนผ่านสะพานได้ โดยวิธีการที่ถูกระบุขึ้นนี้เรียกว่า วิธีทางอ้อม (Indirect approach)

หลังจากนั้นได้ทำการอนุพันธ์ลำดับที่ 2 ของฟังก์ชัน ในสมการที่ (2-16) เพื่อหาผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ ได้ผลแสดงดังสมการที่ (2-19)

$$\ddot{q}_v(t) = \sum_n \left\{ \tilde{A}_{dl,n} \cos \frac{(n-1)\pi V}{L} t + \tilde{A}_{dr,n} \cos \frac{(n+1)\pi V}{L} t - \tilde{A}_{v,n} \cos \omega_v t + \tilde{A}_{bl,n} \cos(\omega_{b,n} - \eta)t - \tilde{A}_{br,n} \cos(\omega_{b,n} + \eta)t \right\} \quad (2-19)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความสอดคล้องกับค่าแอมพลิจูดของผลตอบสนองความเร่ง ได้ถูกแสดงค่าไว้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ

สัมประสิทธิ์	$\tilde{A}_{dl,n}$	$\tilde{A}_{dr,n}$	$\tilde{A}_{v,n}$	$\tilde{A}_{bl,n}$	$\tilde{A}_{br,n}$
สมการ	$A_{dl,n} \omega_{b,n-1}^2 S_{n-1}^2$	$A_{dr,n} \omega_{b,n+1}^2 S_{n+1}^2$	$A_{v,n} \omega_v^2$	$A_{bl,n} \omega_{b,n}^2 (1-S_n)^2$	$A_{br,n} \omega_{b,n}^2 (1-S_n)^2$

ในการทดสอบภาคสนามนั้นสามารถที่จะวัดผลตอบสนองได้ทั้งค่าการ โกงตัวจากสมการที่ (2-16) และค่าความเร่งจากสมการที่ (2-19) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การตรวจวัดผลตอบสนองความเร่งของการสั่นไหวโดยใช้หัววัดความเร่ง และสามารถสังเกตได้จากสมการที่ (2-19) ว่าผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่วัดได้จะมีองค์ประกอบของสัญญาณความเร่งหลายความถี่ที่ส่งผลต่อความเร่งรวม ได้แก่ ความถี่ขับเคลื่อนของยานพาหนะ  $\eta = n\pi V / L$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของยานพาหนะและความยาวช่วงของสะพาน และค่าความถี่ขับเคลื่อนจะเพิ่มหรือลดขึ้นอยู่กับค่าคงที่  $n$  ของความถี่ที่สั่นในโหมดต่าง ๆ ความถี่ของยานพาหนะ ( $\omega_v$ ) และความถี่ของสะพาน ( $\omega_b$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ได้จากสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ จะได้ค่าความถี่ที่ไม่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน โดยค่าความถี่ที่ได้จะอยู่ในช่วงความถี่ที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าความถี่จริงของสะพานเป็นจำนวนเท่าของค่าความถี่ขับเคลื่อน เนื่องจากค่าความถี่ของสะพานมีองค์ประกอบของความถี่ขับเคลื่อนของยานพาหนะป็นอยู่  $\omega_{bl,n} = \omega_b - \eta$  และ  $\omega_{br,n} = \omega_b + \eta$  ดังนั้นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสัญญาณความเร่งของยานพาหนะมีได้ดังนี้

1. ความเร็วของยานพาหนะ
2. ความยาวช่วงของสะพาน
3. ความถี่ของยานพาหนะ
4. ความถี่ของสะพาน

นอกจากนี้ในการทดสอบภาคสนามยังมีพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสัญญาณความเร่งที่วัดได้จากยานพาหนะ แต่ที่กล่าวไปนั้นเป็นองค์ประกอบความถี่ที่ป็นอยู่ในสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ และการที่ในค่าความถี่ของสะพานมีเทอมที่สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ จึงมีความเป็นไปได้ว่าจะพบยอดสเปกตรัมความถี่ของสะพาน 1 ถึง 2 ยอด รอบค่าความถี่จริงของสะพานเนื่องมาจากผลของความถี่ขับเคลื่อน ซึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณสามารถที่จะทราบค่าความถี่ขับเคลื่อนได้ ถ้าทราบความเร็วของยานพาหนะและความยาวช่วงของสะพาน ดังนั้นจึงสามารถที่จะ

ประมาณช่วงของความถี่จริงของสะพานได้ จะต้องบวกเพิ่มหรือลบออกจากยอดของความถี่ที่ปรากฏเป็นจำนวนเท่าของค่าความถี่ขับเคลื่อน

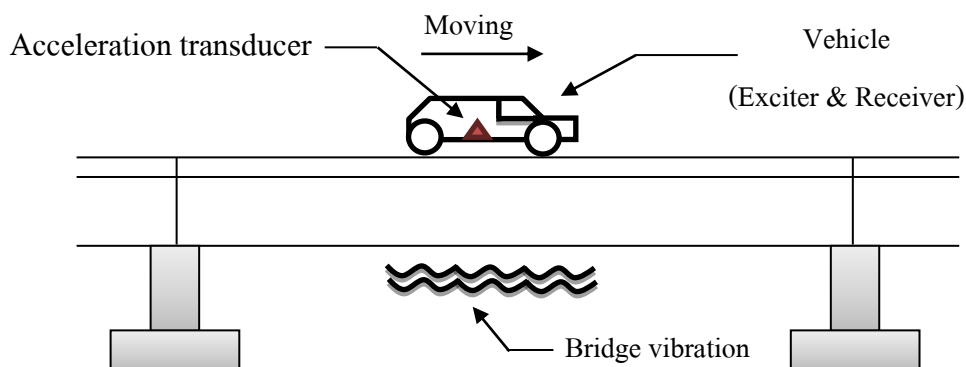
### การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ปัจจุบันวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถทำการทดสอบได้หลายรูปแบบ เช่น การสั่นไหวแบบอิสระ (Free vibration test) การทดสอบการสั่นไหวแบบบังคับ (Forced vibration test) การทดสอบด้วยการวัดการสั่นไหวธรรมชาติ (Ambient vibration test) และการทดสอบด้วยแรงกระแทก (Impact test) เป็นต้น ซึ่งวิธีทดสอบทั้งหลายที่กล่าวมานั้นจำเป็นต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตัวสะพานโดยตรง จึงทำให้เกิดความยากลำบากในการติดตั้งอุปกรณ์ รวมทั้งเกิดความสั่นเปลืองเกิดเนื่องจากต้องใช้ทั้งแรงงานคน ระยะเวลา งบประมาณที่สูง ในการตรวจสอบเพื่อประเมินสภาพของโครงสร้างสะพานและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้ทำการติดตั้งไว้ ดังนั้นจึงได้มีการเสนอวิธีการทดสอบทางอ้อม (Indirect approach) ขึ้นเพื่อทดแทนข้อจำกัดดังกล่าวของวิธีการตรวจวัดทางตรง

#### วิธีการทดสอบทางอ้อม

วิธีการทดสอบทางอ้อมถูกเสนอขึ้น โดย Yang, Lin and Yau (2004) เพื่อนำมาใช้แทนวิธีการวัดทางตรง ซึ่งจะใช้หลักการของปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตัวยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานแทนการติดตั้งโดยตรงที่สะพาน จากหลักการของปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้อานพาหนะทดสอบทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้น (Exciter) ให้เกิดการสั่นไหวที่สะพาน พร้อมทั้งเป็นตัวรับ (Receiver) ผลตอบสนองของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเดียวกับที่ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยจะอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อสะพานเกิดการสั่นไหวจะส่งผ่านการสั่นไวนั้นมายังยานพาหนะที่อยู่บนสะพาน ซึ่งการสั่นไหวที่ถูกส่งผ่านมานี้จะมีองค์ประกอบของการสั่นไหวที่เกิดจากความถี่ธรรมชาติของสะพานปนอยู่ด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2-2





ภาพที่ 2-2 การวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม

### การวิเคราะห์สัญญาณความเร่งตรวจวัด

ผลตอบสนองที่ได้จากหัววัดความเร่งซึ่งติดตั้งที่ยานพาหนะจะเป็นรูปแบบของสัญญาณความเร่งที่อยู่ในโดเมนของเวลา (Time domain) ซึ่งทำให้ไม่สามารถจำแนกองค์ประกอบความถี่ของสะพานที่ปนอยู่ในสัญญาณความเร่งตรวจวัดได้ แต่เมื่อนำสัญญาณความเร่งนี้ไปทำการแปลงจากโดเมนของเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยอาศัยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier transformation, FFT) ทำให้สามารถจำแนกองค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ ที่ปนกันอยู่ ออกได้ ซึ่งในองค์ประกอบความถี่ที่ถูกจำแนกได้ จะมีความถี่ธรรมชาติของสะพานอยู่ ความถี่ของสะพานที่ระบุได้และเด่นชัดที่สุดจะเป็นความถี่โหมดที่ 1 ของสะพาน ที่มีสัดส่วนการสั่นไหวมากที่สุด จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้ยืนยันความเป็นไปได้ในการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทดสอบทางอ้อมในด้านการศึกษาเชิงทฤษฎีและด้านการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทดสอบภาคสนามยังมีจำนวนไม่มาก แต่ผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาทางทฤษฎี และพบปัญหาในการศึกษาภาคสนามนี้ อย่างหนึ่งว่า ที่ความเร็วยานพาหนะทดสอบที่มาก อิทธิพลของความถี่เนื่องมาจากการสั่นไหวของยานพาหนะ มีขนาดและลักษณะที่โดดเด่นซึ่งมักจะส่งผลทำให้เกิดการบดบังความถี่ธรรมชาติของสะพานในผลการตอบสนองความเร่งที่วัดได้ ดังนั้นจึงยากที่จะระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ นอกจากความเร็วของยานพาหนะยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ ซึ่งทำให้ความชัดเจนของสเปกตรัมความถี่ของสะพานลดลง โดยมีงานวิจัยหลายรูปแบบทั้งการศึกษาทางทฤษฎี การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบภาคสนามที่ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องนี้

### ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่

ประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายตัว ทั้งจากวิธีการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ ซึ่งจากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้น แสดงถึงความเป็นไปได้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายตัว ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกระบวนการวิเคราะห์ความถี่และทำให้การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทำได้ยากขึ้น โดยปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ ได้แก่ ความเร็วของยานพาหนะ น้ำหนักของยานพาหนะ ประเภทของยานพาหนะ ความหน่วงและลักษณะผิวทางบนสะพาน เป็นต้น ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ ทั้งต่อประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่และต่อความถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ระบุได้จากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ ซึ่งได้มีงานวิจัยของ Yang and Lin (2005) ที่ศึกษาผลของความถี่ของยานพาหนะ (Vehicle speed) โดยเป็นการทดสอบภาคสนามที่ใช้รถบรรทุกต่อพ่วง (Tractor-trailer) เป็นยานพาหนะทดสอบ และติดตั้งหัววัดความถี่ที่พ่วง (Cart) พบว่าเมื่อความเร็วของยานพาหนะทดสอบเพิ่มขึ้น จะทำให้การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทำได้ยากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของค่าความถี่เนื่องจากการสั่นไหวของยานพาหนะ ซึ่งมีสัดส่วนการสั่นไหวมากส่งผลทำให้เกิดการบดบังค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ และยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้รายงานผลของความถี่ของยานพาหนะที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลองย่อส่วนของอาสนันท์ นิยมสุข และพัชรพงษ์ อาสนจินดา (2558, 2559) นอกจากความเร็วของยานพาหนะแล้ว อัตราส่วนของค่าความถี่ของยานพาหนะต่อความถี่ของสะพาน (Vehicle/ bridge acceleration amplitude ratio) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการระบุค่าความถี่ โดยพบว่าค่าอัตราส่วนดังกล่าวควรน้อยกว่า 3 จะทำให้อัตราความสำเร็จในการระบุค่าความถี่สูงขึ้นจากผลการศึกษาของ Yang and Chang (2009a)

การศึกษาผลของหน่วงของสะพาน (Bridge damping) ต่อผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ โดย McGetrick, Gonzalez and OBrien (2009) ได้ทำการศึกษาทางทฤษฎีด้วยการสร้างแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพานจากโปรแกรม MATLAB และมุ่งเน้นไปที่การลดลงของยอดสเปกตรัมความถี่ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความหน่วงของสะพานเพิ่มขึ้นยอดของสเปกตรัมความถี่ของสะพานจะลดลง และนอกจากการศึกษาทางทฤษฎีแล้ว ยังมีงานวิจัยของ Kim et al. (2011) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองย่อส่วน ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหน่วงของสะพานสามารถตรวจพบได้จากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ

นอกจากพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะผิวทางที่ขรุขระก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่เช่นเดียวกับทั้งความเร็วและความหน่วง จากการศึกษาผลของความขรุขระของผิวทางโดย Chang, Wu and Yang (2010) เป็นการศึกษาทางทฤษฎีผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความขรุขระของผิวทางส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน เนื่องจากทำให้แอมพลิจูดของการสั่นไหวของยานพาหนะทดสอบสูงขึ้น ส่งผลให้ความถี่ของยานพาหนะไปคบบังความถี่ของสะพานจึงยากที่จะระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ โดยนอกจากการศึกษาประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่ซึ่งเกิดจากผลของความขรุขระแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาในทางตรงกันข้าม คือ การหาวิธีการลดผลของความขรุขระที่ไปคบบังความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งเป็นการศึกษาทางทฤษฎีเพียงอย่างเดียวโดย Yang, Lin and Chang (2012) พบว่าการใช้รถบรรทุกพ่วงคู่ (Tractor dual-trailer) เป็นยานพาหนะทดสอบ มีความเป็นไปได้ที่จะลดผลซึ่งเกิดจากความขรุขระของผิวทางได้ โดยการศึกษานี้ได้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Keenahan, McGetrick, Gonzalez and OBrien (2013)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่ธรรมชาติมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย ทั้งการศึกษาทางทฤษฎี รวมทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม ซึ่งได้ผลที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงได้มีงานวิจัยของ Yang, Chen, Yu and Chan (2013) ที่ทำการศึกษาในเชิงของวัสดุ (Materials) โดยวัสดุที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดของล้อของยานพาหนะทดสอบที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น โดยการทดสอบการสั่นไหวบนพื้นราบเพื่อตรวจสอบสนองทางพลศาสตร์ของวัสดุ รวมทั้งศึกษาผลของน้ำหนักของยานพาหนะและผลของยานพาหนะคันอื่นที่อยู่บนสะพานด้วย ในการศึกษาจะใช้รถเข็นชนิดที่ใช้คนลาก (Hand-drawn cart) เป็นยานพาหนะทดสอบ และผลที่ได้พบว่าการใช้รถบรรทุกคู่พ่วงจะทำให้เกิดการสั่นไหวเพิ่มเติมจากรถที่ใช้ลาก ทำให้ยากในการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน และได้แนะนำวัสดุที่เหมาะสมในกรณีที่ต้องการที่จะประดิษฐ์ยานพาหนะเพื่อใช้ในการทดสอบภาคสนาม คือ วัสดุที่มีค่าความถี่ธรรมชาติไม่อยู่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่พิจารณา ดังเช่นในงานวิจัยนี้พบว่าล้อแบบโพลียูรีเทน (Polyurethane, PU) เหมาะที่จะนำประดิษฐ์ยานพาหนะเพื่อใช้ในการทดสอบภาคสนาม นอกจากนั้นยังพบอีกว่าน้ำหนักของยานพาหนะและปริมาณยานพาหนะคันอื่นบนสะพานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สเปกตรัมความถี่ของสะพานชัดเจนขึ้น

จากงานวิจัยในอดีตที่กล่าวมาพบว่าผลของยานพาหนะคันอื่นที่อยู่บนสะพานก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติ แต่ในการศึกษาที่ผ่านมา ยังไม่มีการรายงานผลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะและทิศทางการสัญจรของยานพาหนะ จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการ

หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยทำการเปลี่ยนลักษณะและทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเพื่อศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าว เป็นการศึกษาที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการของอานนท์ นิยมสุข และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา (2558, 2559) พบว่าสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ โดยที่ยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ในแนวด้านใดของสะพานก็ได้ ทั้งในแนวกึ่งกลางสะพานหรือในช่องจราจรด้านริมของสะพาน โดยการเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพานจะได้สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานที่เด่นชัดกว่าการเคลื่อนที่ในช่องจราจรด้านริมของสะพาน และการสัจจกร่วมกับยานพาหนะคันอื่นในทิศทางเดียวกัน โดยที่ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่ตามหลังยานพาหนะคันอื่นจะให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด เนื่องจากยานพาหนะคันอื่นที่เคลื่อนที่เข้าไปในสะพานก่อนจะช่วยกระตุ้นสะพานให้เกิดการสั่นไหวก่อน ทำให้ผลตอบสนองของยานพาหนะทดสอบที่เข้าสะพานตามหลังมามีความเด่นชัดมากขึ้น

ในการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ผ่านมา นอกจากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว ยังมีงานวิจัยบางส่วนที่เป็นการทดสอบในภาคสนาม ซึ่งมักจะใช้ยานพาหนะทดสอบที่มีลักษณะคล้ายรถบรรทุกต่อพ่วง โดยจะประกอบไปด้วยยานพาหนะหลักและส่วนต่อพ่วง ดังนั้น Siringoringo and Fujino (2011) จึงทำการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองของยานพาหนะ ซึ่งใช้ยานพาหนะทดสอบเป็นยานพาหนะเชิงพาณิชย์ขนาดเล็ก (Light commercial vehicle) หรือรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (Passenger vehicle) พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ผลที่ได้มีแนวโน้มในทางที่ดีเช่นเดียวกับการศึกษาทางทฤษฎีและการทดสอบโดยใช้ยานพาหนะประเภทต่อพ่วง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Miyamoto and Yabe (2011) ที่ทำการศึกษาค่าความถี่ด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อม และจะใช้รถโดยสารประจำทางทั่วไปเป็นยานพาหนะทดสอบ จากผลการศึกษาพบว่าเป็นไปได้ในการใช้รถโดยสารประจำทางในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน และจากการที่ประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่นั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผลและสัญญาณความถี่ที่ได้มีสัญญาณรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ปนอยู่ทำให้การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทำได้ยาก จึงต้องหาเทคนิคหรือวิธีการอื่น ๆ มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่ ซึ่งช่วยให้การระบุค่าความถี่ของสะพานเป็นไปได้ง่ายขึ้น

#### **วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่**

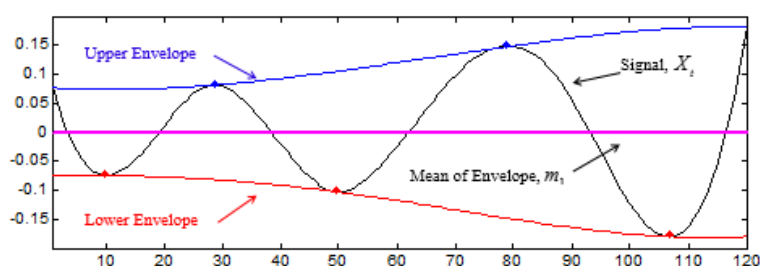
จากที่กล่าวไปแล้วนั้น ว่าจะต้องนำเทคนิคหรือวิธีการอื่น ๆ มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการระบุค่าความถี่ของสะพานเพื่อทำให้สามารถระบุค่าได้ง่ายขึ้น จึงได้มีการศึกษาหาวิธีการต่าง ๆ และพบว่าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าความถี่สามารถใช้ได้หลายวิธี เช่น การแยกสลายโหมดเชิงประจักษ์ (Empirical mode decomposition, EMD) และการกรองสัญญาณ

(Signal filtering) เป็นต้น ทั้งนี้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษการใช้เทคนิคเหล่านี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าความถี่ของสะพาน โดยวิธีการแยกสลายโหมดเชิงประจักษ์ถูกนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่จากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ โดยทั่วไปนั้นสัญญาณความถี่ที่วัดได้จากยานพาหนะจะมีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีความไม่คงที่สูง รวมทั้งยังมีสัญญาณรบกวนมากอีกด้วย ที่สัญญาณมีลักษณะดังกล่าวเนื่องจากว่ามีการรวมกันขององค์ประกอบสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน เข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นการจะวิเคราะห์เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่ออกมานั้นอาศัยแค่วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจึงไม่เพียงพอ ทำให้มีการนำวิธีการแยกสลายโหมดเชิงประจักษ์เข้ามาใช้โดย Yang and Chang (2009b) เสนอขึ้นว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณลักษณะดังกล่าว เนื่องจาก EMD จะทำการแยกโหมดของการแกว่ง (Oscillatory mode) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสัญญาณความถี่ออกเป็นโหมดย่อยที่เรียกว่า ฟังก์ชันโหมดแท้จริง (Intrinsic mode function, IMF) โดยโหมดการสั่นที่มีความถี่สูงหรือมีคาบการสั่นสั้นจะถูกแยกออกมาเป็นลำดับต้น ๆ และโหมดการสั่นที่มีความถี่ต่ำกว่าหรือคาบการสั่นยาวจะถูกแยกออกมาเป็นลำดับต่อ ๆ ไป ซึ่งการแยกสัญญาณย่อยนี้จะต้องอยู่บนพื้นฐาน 2 เงื่อนไข ได้แก่

1. จำนวนยอดของค่าสูงสุดกับจำนวนยอดของค่าต่ำสุด และจำนวนของข้อมูลที่ข้ามผ่านเส้นศูนย์กลาง (Zero-mean) ต้องมีจำนวนที่เท่ากันหรือต่างกันไม่เกิน 1
2. ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นกรอบ (Envelope line) หรือเส้นที่ลากเป็นขอบของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดต้องมีค่าเท่ากับ 0

โดยการสร้าง IMF ของวิธี EMD มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างเส้นกรอบบน (Upper envelope) และเส้นกรอบล่าง (Lower envelope) จากค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของเวกเตอร์สัญญาณความถี่ตรวจวัดจากยานพาหนะ  $a_v$  โดยลากจากยอดคลื่นไปยังยอดคลื่นถัดไปของชุดข้อมูล และทำการหาค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นกรอบบนและเส้นกรอบล่าง ถูกแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างการสร้างเส้นกรอบและการเฉลี่ยเส้นกรอบ (อานนท์ นิยมสุข, 2558)

2. นำค่าเฉลี่ยของเส้นกรอบบนและล่าง  $m_1$  ไปลบออกจากสัญญาณ ซึ่งจะได้เวกเตอร์องค์ประกอบของสัญญาณครั้งที่ 1 เรียกว่า  $h_1$

$$\mathbf{a}_v - m_1 = \mathbf{h}_1 \quad (2-20)$$

3. นำสัญญาณ  $h_1$  ที่ได้มาตรวจสอบว่าเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 2 ข้อ ของการสร้าง IMF หรือไม่ ถ้าหากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ต้องนำเวกเตอร์  $h_1$  มาทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จนกว่าจะทำให้สัญญาณที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไข เมื่อทำซ้ำและตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ข้อของการสร้าง IMF แล้ว จะเรียก  $h_1$  ว่าเป็นค่า IMF ที่ 1 หรือ  $\mathbf{IMF}_1$

4. นำ  $\mathbf{IMF}_1$  ลบออกจากเวกเตอร์สัญญาณความแรงตรวจวัดเพื่อให้ได้สัญญาณความแรงที่เหลือ  $\mathbf{r}_1$  ดังสมการที่ (2-21)

$$\mathbf{a}_v - \mathbf{IMF}_1 = \mathbf{r}_1 \quad (2-21)$$

5. นำสัญญาณที่เหลือ  $\mathbf{r}_1$  ไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 จำนวน  $n$  รอบ ซึ่งจะทำให้ได้ IMF ออกมาทั้งหมด  $n$  ตัว

โดยกระบวนการทำซ้ำนี้จะหยุดเมื่อเวกเตอร์สัญญาณความแรงที่เหลือ  $\mathbf{r}_1$  เป็นฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบความถี่เดียว (Monotonic function) ซึ่งไม่สามารถแยก IMF ออกมาอีกได้ ดังนั้นจะได้

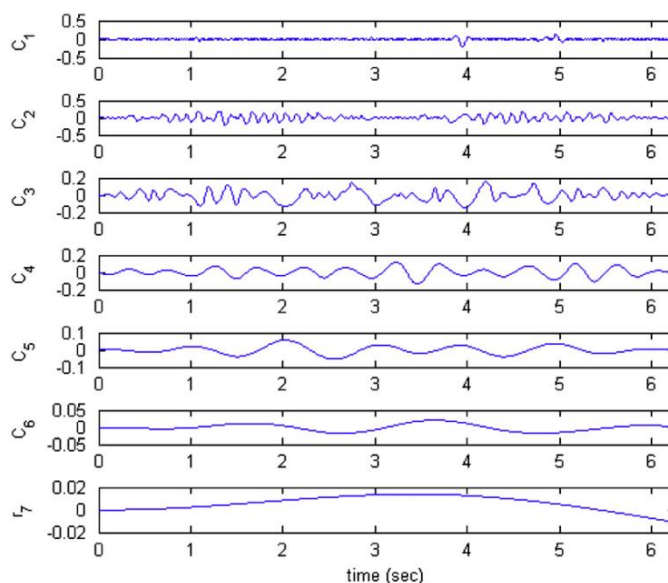
$$\mathbf{a}_v = \sum_{j=1}^n \mathbf{IMF}_j + \mathbf{r}_n \quad (2-22)$$

โดย  $\mathbf{a}_v$  คือ เวกเตอร์สัญญาณความแรงตรวจวัดจากยานพาหนะ

$\mathbf{IMF}_j$  คือ เวกเตอร์องค์ประกอบสัญญาณความแรงตรวจวัดซึ่งแยกออกเป็นโหมดย่อยที่  $j$

$j$  คือ โหมดย่อยขององค์ประกอบสัญญาณ โดยเริ่มตั้งแต่ 1 ถึง  $n$

$\mathbf{r}_n$  คือ เวกเตอร์สัญญาณความแรงที่เหลือจากการทำ EMD ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบความถี่เดียว



ภาพที่ 2-4 ผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะที่ถูกแยกด้วยเทคนิค EMD โดยที่  $c_1 - c_6$  คือ IMF ทั้งหมดของสัญญาณที่ถูกแยกย่อย และ  $r_7$  คือ สัญญาณที่เหลือ (Yang & Chang, 2009b)

ผลที่ได้พบว่าวิธีการแยกสลายโหมดเชิงประจักษ์สามารถทำให้ผลของสเปกตรัมความถี่ที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะสัญญาณความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดที่สูงที่มีแอมพลิจูดต่ำ และมีการนำวิธีการกรองสัญญาณ (Signal filtering) เพื่อช่วยกรองสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ โดย Yang, Chang and Li (2013) พบว่าให้ผลที่มีประสิทธิภาพมากในการที่จะจำแนกความถี่ของสะพานจากผลตอบสนองของยานพาหนะ เนื่องจากไม่พบความถี่ที่ไม่พึงประสงค์ในสัญญาณที่ผ่านการกรอง โดยการกรองสัญญาณที่ถูกนำมาใช้จะมี 2 รูปแบบ ได้แก่ วิธีการกรองสัญญาณแบบต่ำผ่าน (Low-Pass filter) และวิธีการกรองสัญญาณแบบช่วงหยุด (Band-Stop filter)

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวมาทั้งหมด การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อมนี้ ได้ถูกรวบรวมไว้โดย McGetrick and O'Brien (2015) และสรุปประเด็นสำคัญของงานวิจัยในหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ วิธีการหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน วิธีการหาค่าความหน่วงของสะพาน วิธีการหาลักษณะการสั่นไหวเชิงโหมด (Mode shape) ของสะพาน ผลของความขรุขระของผิวทางต่อปฏิสัมพันธ์ยานพาหนะกับสะพานและวิธีการตรวจสอบความเสียหายของสะพานด้วยวิธีทดสอบทางอ้อม

จากผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น พบว่าการศึกษาส่วนใหญ่ที่เป็นการทดสอบจะใช้ยานพาหนะประเภทต่อพ่วงหรือยานพาหนะที่

ประดิษฐ์ขึ้นเอง แต่ยังมีงานวิจัยน้อยมากที่จะใช้รถยนต์ที่มีอยู่แล้วในการศึกษาการหาค่าความถี่ของสะพาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ โดยจะทำการศึกษาทดสอบในภาคสนามกับโครงสร้างสะพานจริงที่มีการใช้งานในปัจจุบันด้วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่สามารถหาได้ในตลาดรถยนต์ของประเทศไทย แทนการใช้ยานพาหนะประเภทต่อพ่วงหรือยานพาหนะที่ประดิษฐ์ขึ้นเองซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า การศึกษาจะมุ่งเน้นที่จะนำเสนอประเภทและลักษณะการวิ่งที่มีความเป็นไปได้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อม โดยพิจารณาความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับผลจากการวัดทางตรง ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของยานพาหนะที่สามารถใช้แทนการวัดทางตรงได้ มากกว่าการมุ่งเน้นไปที่การระบุค่าความถี่เพื่อให้ได้ค่าความถี่จริงของสะพาน ซึ่งมีความซับซ้อนสูงและค่าความถี่ที่ได้อาจเกิดการบิดเบือนไปจากค่าความถี่จริง ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนทางด้านงานทาง เนื่องจากมันสามารถบ่งชี้ถึงสภาพของโครงสร้างสะพาน ณ ปัจจุบันได้จากการเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติ และยังสัมพันธ์กับค่าสถิติเฟนสที่บ่งบอกความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ทำให้ง่ายต่อการประเมินความเสียหายและการวางแผนเพื่อทำการบำรุงรักษา



## บทที่ 3

### วิธีการศึกษาและผลการศึกษาเบื้องต้น

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบในภาคสนามกับโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้น และใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลเป็นยานพาหนะทดสอบ เนื่องจากต้องนำรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีภายในประเทศมาใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติจากสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้นที่มีจำนวนมาก และการทดสอบภาคสนามเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติก็มีงานวิจัยที่ทำการศึกษามากพอสมควร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางส่วนที่สนับสนุนการใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลนี้ และให้ผลการศึกษามีแนวโน้มที่ดี โดยจะทำการเปลี่ยนความเร็วของรถในการทดสอบตั้งแต่ 20-80 กม./ชม. รวมทั้งศึกษาผลของยานพาหนะคันอื่นบนสะพานด้วย ซึ่งก่อนเริ่มการทดสอบภาคสนามได้ทำการศึกษาผลเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกประเภทของรถยนต์ที่จะนำมาใช้เป็นยานพาหนะทดสอบ

#### สะพานที่ทำการทดสอบ

##### การเลือกสะพานที่ใช้ในการศึกษา

การสำรวจสะพานจะมุ่งเน้นไปที่สะพานในพื้นที่เขตอำเภอบ้านบึง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสะพานในความดูแลของหมวดการทางบ้านบึง สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 3 และแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดชลบุรี โดยครอบคลุมถนนหลายสาย เช่น ถนนหมายเลข ชบ. 4004 ชบ. 3023 และ ชบ. 3026 เป็นต้น สะพานที่มีอยู่ในบริเวณนี้เป็นคอนกรีตประเภทแผ่นพื้นช่วงสั้น ทั้งแบบช่วงเดียวและหลายช่วง

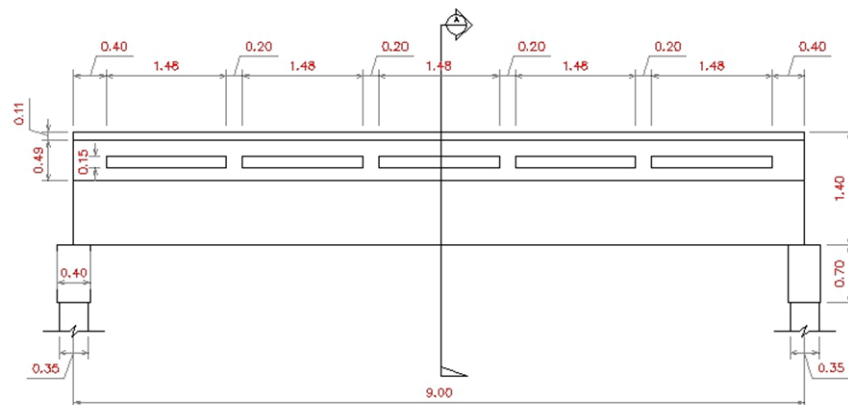
การประเมินสภาพโครงสร้างสะพานที่จะเลือกมาทำการทดสอบนั้นจะใช้การตรวจพินิจ (Visual inspection) เป็นหลัก โดยโครงสร้างสะพานที่เลือกจะต้องมีความสมบูรณ์มากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับสภาพของโครงสร้างก่อนการใช้งาน ซึ่งจะประเมินจากรอยแตกร้าวของตัวโครงสร้าง และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นหลัก อีกส่วนที่ต้องพิจารณาในการเลือกสะพาน นอกจากสภาพของโครงสร้างนั้น คือ ความสะดวกในการทำงาน โดยจะต้องมีพื้นที่ใต้สะพานที่เพียงพอในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด และต้องง่ายต่อการเข้าถึง เช่น ไม่เป็นทางน้ำที่มีกระแสน้ำไหลแรงทำให้เข้าถึงพื้นที่ข้างใต้ได้ยาก

### สะพานที่เลือกในการศึกษา

1. สะพาน พ.ศ. 2550 ลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว ความยาว 9 เมตร โครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กกว้าง 7.34 เมตร หนา 0.45 เมตร ตั้งอยู่บนถนนทางหลวงชนบทหมายเลข ชบ. 4004 บริเวณกิโลเมตรที่ 4+600



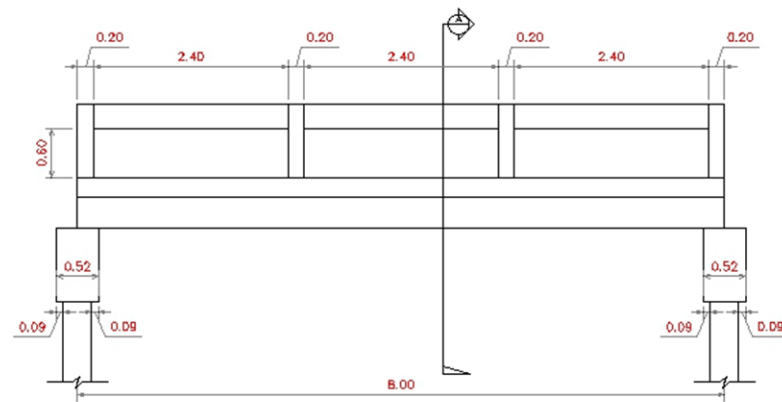
ภาพที่ 3-1 สะพาน พ.ศ. 2550



SIDE VIEW (m.)

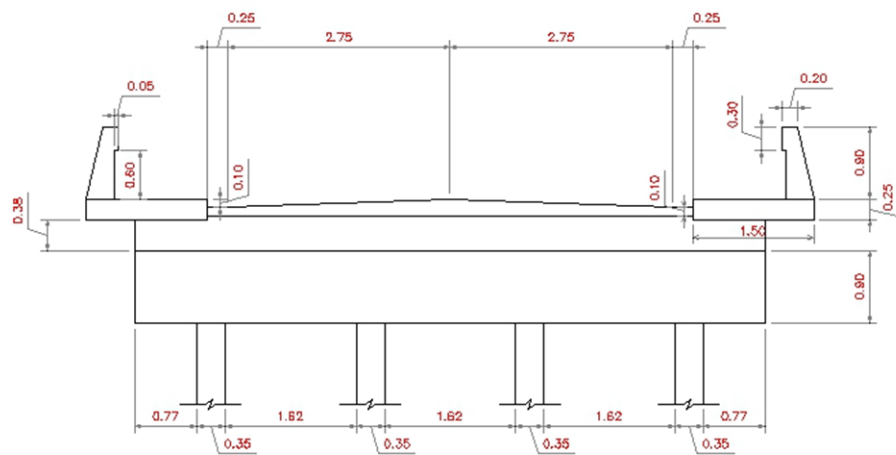
ภาพที่ 3-2 แบบขยายด้านข้างของสะพาน พ.ศ. 2550





SIDE VIEW (m.)

ภาพที่ 3-5 แบบขยายด้านข้างของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์



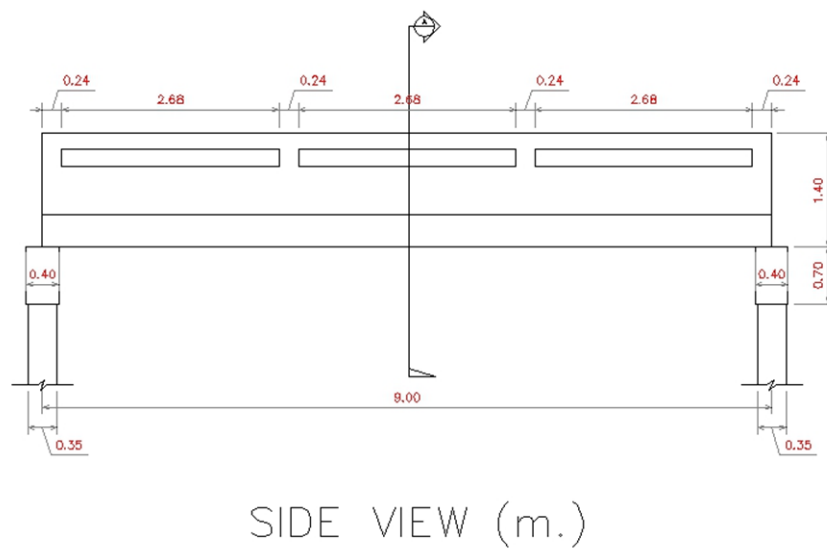
SECTION A - A (m.)

ภาพที่ 3-6 แบบขยายแนวตัด A-A ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์

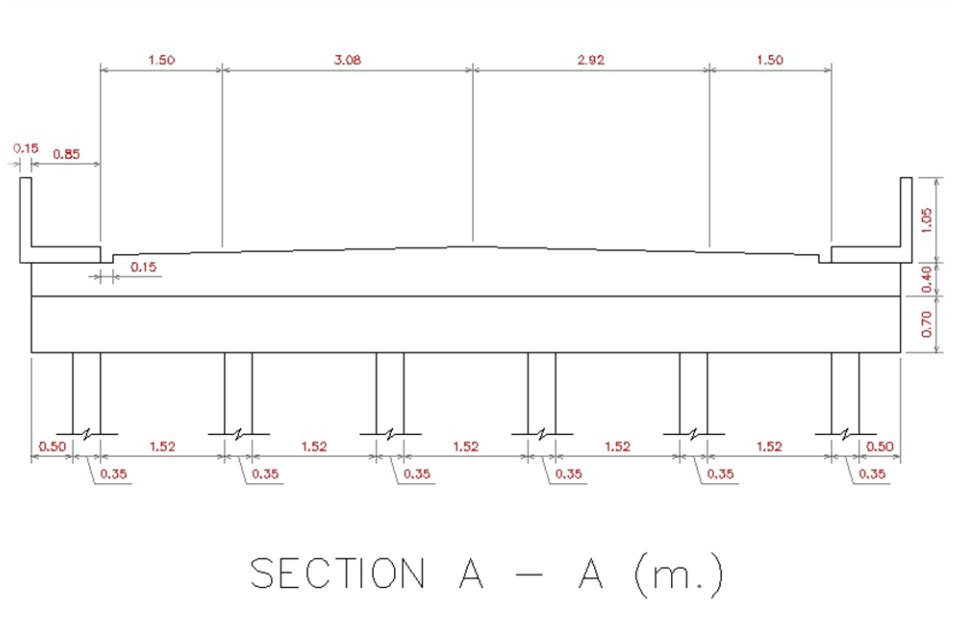
3. สะพานห้วยหนองซาก ลักษณะเป็นสะพาน 3 ช่วง ความยาวทั้งหมด 28 เมตร แบ่งเป็นช่วงแรก 9 เมตร ช่วงกลาง 10 เมตร และช่วงท้าย 9 เมตร โครงสร้างเป็นแผ่นพื้นคอนกรีต เททับหน้าด้วยคอนกรีต และผิวทางแอสฟัลท์ มีขนาดกว้าง 10.7 เมตร หนา 0.40 เมตร ตั้งอยู่บนถนนทางหลวงชนบทหมายเลข ชบ. 3023 บริเวณกิโลเมตรที่ 4+300



ภาพที่ 3-7 สะพานห้วยหนองซาก



ภาพที่ 3-8 แบบขยายด้านข้างของสะพานห้วยหนองซาก



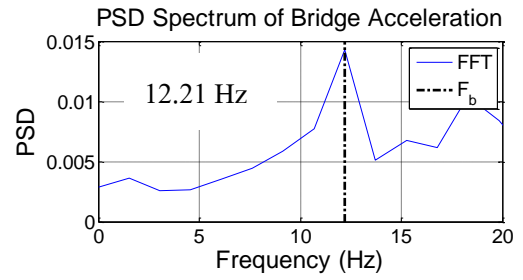
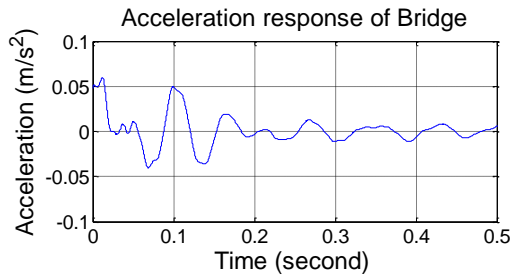
ภาพที่ 3-9 แบบขยายแนวตัด A-A ของสะพานห้วยหนองซาก

#### คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของสะพาน

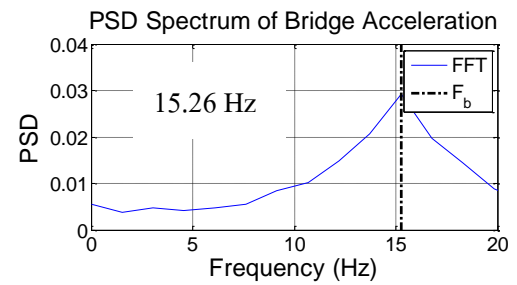
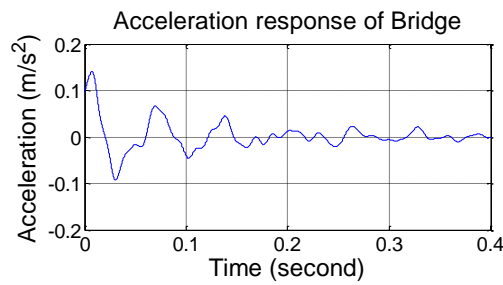
ก่อนการทดสอบภาคสนามนั้นต้องทำการหาคุณสมบัติพื้นฐานของโครงสร้างสะพานที่จำเป็นต้องทราบก่อนการศึกษา ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพานสะพานทั้ง 3 ตัว โดยเลือกใช้การทดสอบการสั่นไหวธรรมชาติ (Ambient vibration test) ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทั้ง 3 ตัว ถูกแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ใช้ทดสอบ

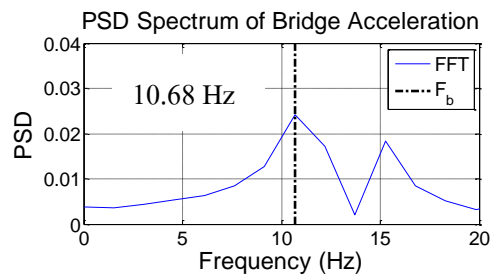
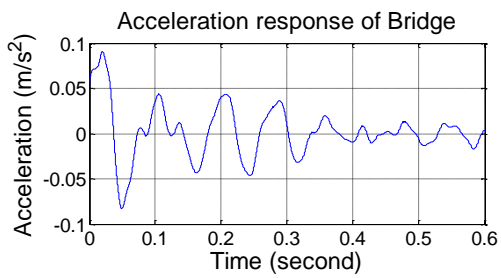
สะพาน	ความยาวช่วง (m)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	สัญลักษณ์
สะพาน พ.ศ. 2550	9	12.21	B1
สะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์	8	15.26	B2
สะพานห้วยหนองซาก	9	10.68	B3



ภาพที่ 3-10 สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพาน พ.ศ. 2550



ภาพที่ 3-11 สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์



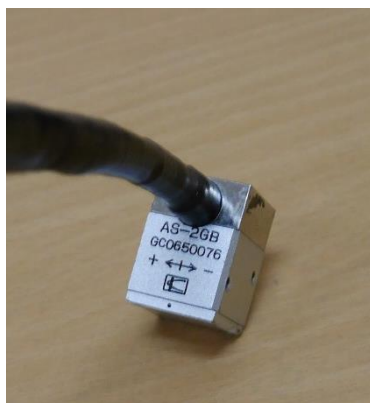
ภาพที่ 3-12 สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานห้วยหนองซาก

## เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

### เครื่องมือและอุปกรณ์

#### 1. หัววัดความเร่ง (Acceleration transducer)

อุปกรณ์ซึ่งมีเซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าความเร่งจากการสั่นไหวเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ โดยหัววัดความเร่งที่ใช้เป็นอุปกรณ์รุ่น AS-2GB ของบริษัท KYOWA ซึ่งสามารถวัดความเร่งสูงสุด  $\pm 2g$  ( $19.61 \text{ m/s}^2$ ) ดังแสดงในภาพที่ 3-13 โดยในการทดสอบจะทำการติดตั้งหัววัดความเร่งที่ยานพาหนะที่ตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งให้สัญญาณความเร่งที่มีประสิทธิภาพที่สุด (จะทำการทดสอบตำแหน่งของหัววัดความเร่งที่เหมาะสม ก่อนการติดตั้งบนยานพาหนะที่ทำการทดสอบจริง) เพื่อวัดสัญญาณความเร่งของการสั่นสะเทือนของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน



ภาพที่ 3-13 หัววัดความเร่ง (Acceleration transducer)

#### 2. ชุดหน่วยแปลงสัญญาณ (Signal transformer module)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณที่แปลงจากสัญญาณแบบ Analog เป็นสัญญาณแบบ Digital ซึ่งชุดหน่วยแปลงสัญญาณที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ National Instrument โดยจะมีชุดแปลงสัญญาณแบบวงจรปริคัจขนาด 4 ช่องสัญญาณเพื่อต่อเข้ากับหัววัดความเร่ง ดังแสดงในภาพที่ 3-14





ภาพที่ 3-14 ชุดหน่วยแปลงสัญญาณ (Signal transformer module)

### 3. อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition)

อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณการสั่นไหว และทำการแปลงแล้วเข้าสู่คอมพิวเตอร์ในลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้า ผ่านทางซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ตามลักษณะของงานวิจัย โดยใช้อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instrument NI CDAQ 9178 เป็นชุดแปลงสัญญาณขนาด 8 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 3-15 และเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม NI Signal Express 2013



(a)

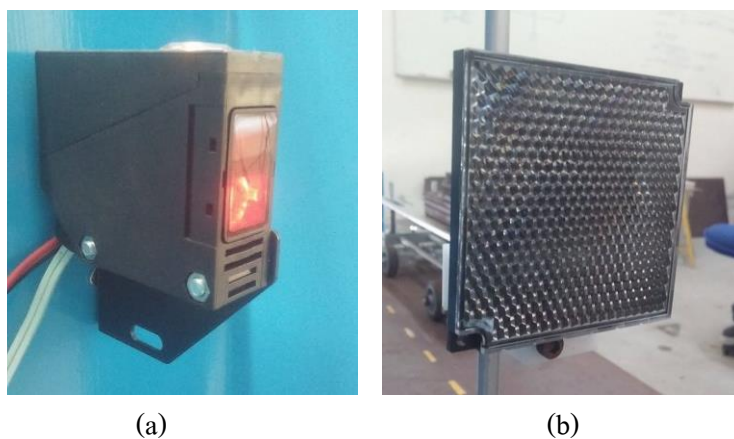


(b)

ภาพที่ 3-15 อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition) a) แบบทั่วไป b) แบบ Stand-alone

#### 4. เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง (Photo electric sensor)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแสง โดยจะมีตัวส่งแสงและตัวรับแสงในตัวเดียวกัน ซึ่ง เซ็นเซอร์ที่ใช้เป็นชนิดตรวจจับแสงสะท้อน โดยแสงจะสะท้อนจากตัวสะท้อน เมื่อมีวัตถุเคลื่อนผ่านจะทำให้เกิดการสะท้อนของแสงซึ่งจะสามารถทราบได้จากการเปลี่ยนแปลงของคลื่นไฟฟ้าที่วัดได้ สามารถตรวจจับวัตถุได้เกือบทุกชนิด ยกเว้น วัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวฉานหรือดูดกลืนแสง และวัตถุที่โปร่งแสง เหมาะสำหรับการตรวจจับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ เป็นมันวาวและทึบแสง โดยเซ็นเซอร์ตรวจจับแสงจะถูกใช้ในการตัดสัญญาณในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าและออกจากสะพาน แสดงดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง (a) ตัวส่งแสงและตัวรับ (b) ตัวสะท้อนแสง

#### 5. คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์จะถูกใช้เก็บข้อมูลที่ทำการแปลงจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณแล้วทำการรวมสัญญาณที่อุปกรณ์รวมสัญญาณ และส่งผ่านสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ คือ Notebook Asus N43s1 ดังแสดงในภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 Notebook Asus N43sl

#### 6. อุปกรณ์สำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply, UPS)

ในการทดสอบภาคสนามทั้งคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์รวมสัญญาณจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าในการทำงาน ดังนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำรองไฟฟ้า โดยในการทดสอบจะใช้ UPS Leonics รุ่น Green-1000VA 600 watt ดังแสดงในภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 UPS Leonics รุ่น Green-1000VA 600 watt

## 7. กล้อง IP Camera

กล้องวิดีโอใช้สำหรับบันทึกภาพการศึกษาในขณะที่ยานพาหนะกำลังเคลื่อนผ่านสะพาน โดยกล้อง IP camera ที่ใช้ในการทดสอบ คือ Plenty C50 Pro ดังแสดงในภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 IP camera Plenty C50 Pro

### การเปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง

อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งรุ่น AS-2GB นั้นจะวัดสัญญาณความเร่งออกมาในหน่วยโวลต์ต่อโวลต์ (V/V) ดังนั้นอุปกรณ์จะมีค่าคงที่เปรียบเทียบเพื่อแปลงจากหน่วยโวลต์ให้กลายเป็นหน่วยของความเร่ง ( $m/s^2$ ) โดยค่าคงที่เปรียบเทียบนี้จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละตัว โดยการนำอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งไปทำการวางไว้กับพื้นผิวซึ่งได้ระนาบ จากนั้นทำการวัดค่าสัญญาณความเร่งทั้ง 2 ด้าน คือ ด้านบวกและด้านลบ รวมถึงวัด โดยให้ทั้ง 2 ด้าน อยู่ในแนวระนาบจะได้ข้อมูลสัญญาณความเร่ง 3 ข้อมูล นำทั้ง 3 ข้อมูลมาเฉลี่ยแล้วหาผลต่างของแต่ละข้อมูล แล้วจึงเปรียบเทียบกับค่าความเร่งที่ทราบจากอุปกรณ์ว่าเป็นระบบ  $2g$  ซึ่งจะสามารถหาค่าคงที่เปรียบเทียบได้ และเปรียบเทียบกับค่าจากอุปกรณ์ได้อีกด้วย ค่าเปรียบเทียบของหัววัดความเร่งแต่ละตัว ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3-2

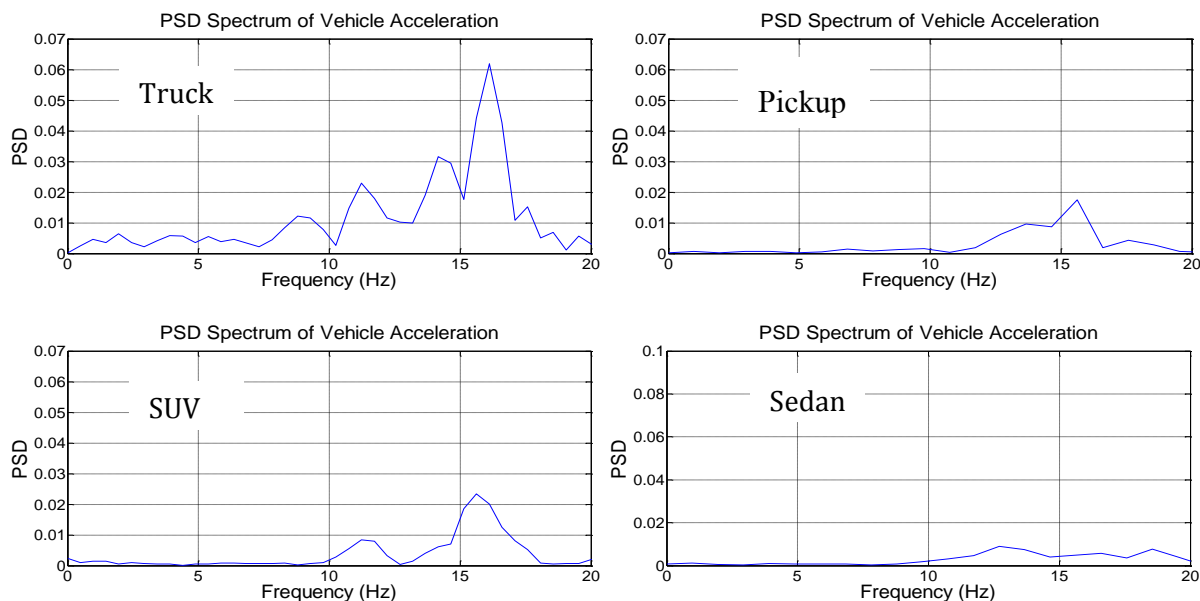
ตารางที่ 3-2 ค่าเปรียบเทียบหัววัดความเร่งที่ใช้ในการทดสอบภาคสนาม

หัววัดความเร่งหมายเลข	ค่าเปรียบเทียบ
76	3.356E4
39	3.202E4
37	3.200E4

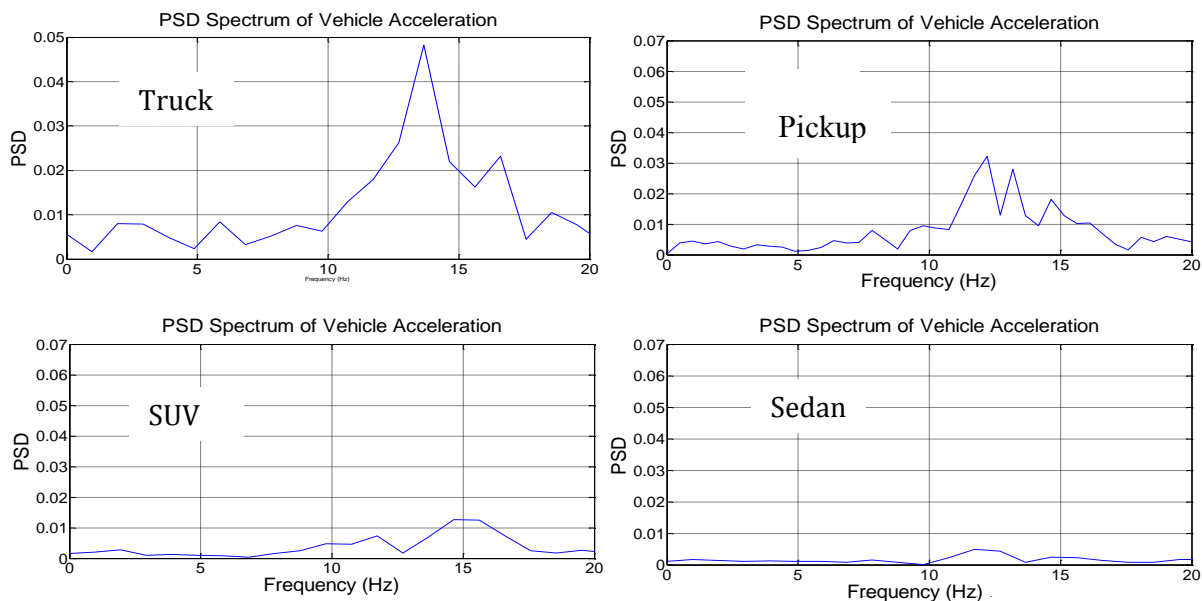
### ผลการทดสอบเบื้องต้น

ผลทดสอบจากวิธีการวัดทางตรงที่สะพานเพื่อเลือกประเภทของยานพาหนะทดสอบ

ในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้น เพื่อคัดเลือกประเภทของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่นำมาใช้เป็นยานพาหนะทดสอบ ซึ่งได้ทำการติดตั้งหัววัดความเร่งที่ได้ห้องสะพานเพื่อทำการวัดความเร่งด้วยวิธีทางตรง ความเร่งตรวจวัดที่ได้มาจากรถยนต์ประเภทต่าง ๆ ที่เคลื่อนผ่านสะพาน ซึ่งเป็นรถยนต์ที่สัญจรในขณะที่ทำการทดสอบ และไม่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ที่จะนำมาทดสอบ การที่เลือกใช้วิธีทดสอบทางตรงเนื่องจากว่า ถ้าผลจากการทดสอบทางตรงมีแนวโน้มที่ไม่ดี ก็สามารถคาดเดาได้ว่าผลจากวิธีการทดสอบทางอ้อมจะมีแนวโน้มไม่ดี และได้ทำการเลือกสะพานที่จะทดสอบมา 2 ตัว ได้แก่ สะพาน พ.ศ. 2550 และสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ โดยผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานจากรถบรรทุกให้ผลดีที่สุด โดยพบยอดความถี่สะพานชัดเจน รองลงมา คือ รถนั่งสามตอนและรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุกให้ผลที่ดีกว่ารถแก่งสองตอน เนื่องจากรถแก่งสองตอนทำให้เกิดสเปกตรัมที่มีแอมพลิจูดไม่เพียงพอในการระบุค่าความถี่ของสะพาน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะช่วงล่างของรถที่มีความนุ่มนวลสูง ทำให้ดูดซับการสั่นไหวของตัวยานพาหนะได้มาก ส่งผลให้การสั่นไหวของยานพาหนะที่ไปกระตุ้นสะพานมีน้อย สะพานจึงเกิดการสั่นไหวได้น้อย โดยสเปกตรัมความถี่ที่ได้จากรถยนต์แต่ละประเภทของสะพาน พ.ศ. 2550 และสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-20 และภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-20 สเปกตรัมความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทางตรงของสะพาน พ.ศ. 2550



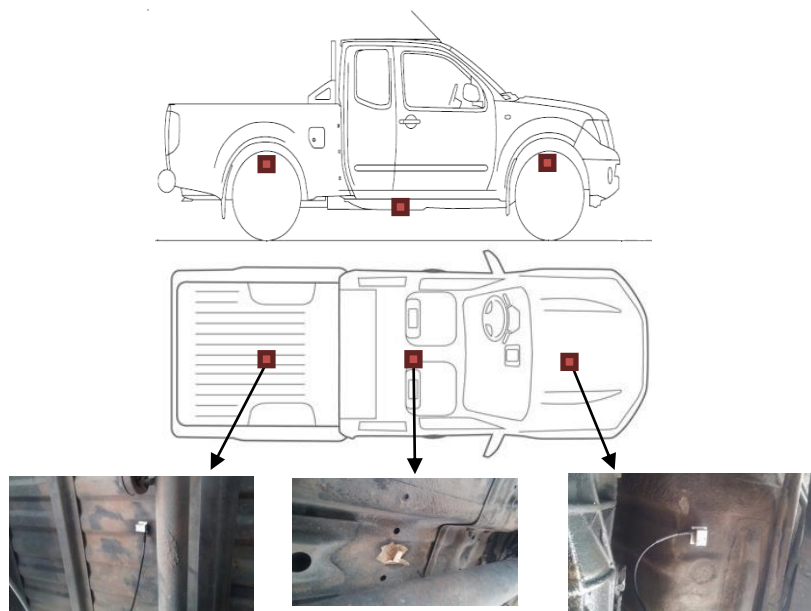
ภาพที่ 3-21 สเปกตรัมความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทางตรงสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์

จากผลการทดสอบเบื้องต้นดังที่แสดงไปแล้วนั้น พบว่ารถบรรทุก รถนั่งสามตอนและรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุกให้สเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของสะพานที่มีแนวโน้มที่ดี มีแอมพลิจูดที่มากพอและชัดเจนที่จะระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ส่วนรถเก๋งสองตอนยังให้ผลที่มี

แนวโน้มที่ไม่ชัดเจนในการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ดังนั้นรถเก๋งสองตอนไม่เหมาะสมในการเลือกใช้เป็นยานพาหนะทดสอบ เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะไม่พบความถี่หรืออาจจะสามารถระบุได้ยาก

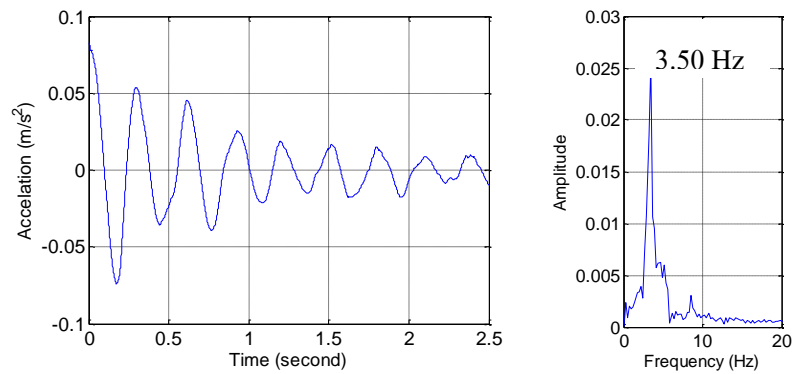
#### ผลทดสอบเพื่อเลือกตำแหน่งติดตั้งหัววัดความเร่งที่ยานพาหนะทดสอบ

ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่งเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน เนื่องจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลมีความซับซ้อนสูง ทำให้อาจมีความถี่จากอุปกรณ์อื่น ๆ ปนเข้ามาในสัญญาณความเร่ง และไปบดบังความถี่ของสะพานได้ จึงได้ทำการทดสอบจริงกับยานพาหนะจริงเพื่อเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม โดยทดสอบกับรถยนต์ Toyota SR5 ตำแหน่งที่ได้ทำการทดสอบ ถูกแสดงดังภาพที่ 3-22

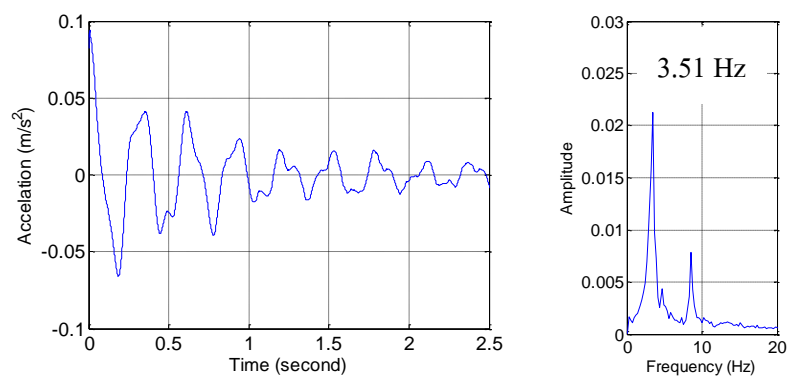


ภาพที่ 3-22 ตำแหน่งของหัววัดความเร่งที่ยานพาหนะเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม

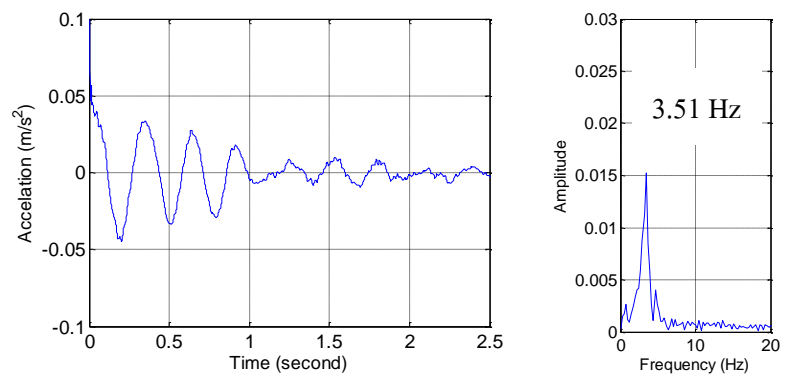
จากตำแหน่งการทดสอบดังกล่าวจะได้มาซึ่งสัญญาณความเร่งในแต่ละตำแหน่งโดยการทดสอบการสั่นไหวแบบอิสระ (Free vibration test) แล้วจึงนำสัญญาณความเร่งนั้นไปทำการแปลงด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) จะได้สเปกตรัมของความถี่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-23



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 3-23 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่ของยานพาหนะที่ตำแหน่งติดตั้งหัววัดความเร่งต่าง ๆ  
 (a) ตำแหน่งเพลาหลัง (b) ตำแหน่งกึ่งกลางเพลาหน้าและเพลาหลัง และ (c) ตำแหน่งเพลาหน้า



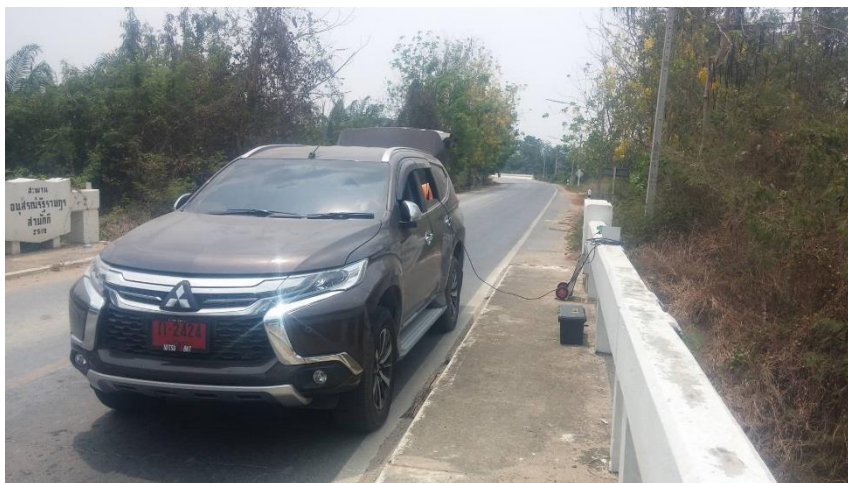
จากผลการทดสอบที่แสดงไว้ด้านบน พบว่าความถี่ของยานพาหนะที่ได้จากการทดสอบ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงจะทำการติดตั้งหัววัดความเร่งที่บริเวณตัวถังในช่วงกึ่งกลางช่วงเพลลาของยานพาหนะทดสอบในการทดสอบภาคสนาม

## ยานพาหนะทดสอบ

### ยานพาหนะที่เลือกใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ทำการคัดเลือกยานพาหนะทดสอบ 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสามตอน (SUV) คือ รถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ปี 2016 และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup truck) คือ รถยนต์ Toyota hilux vigo champ ปี 2012 โดยรถยนต์ทั้งสองประเภทมีความถี่ที่เป็นผลของการสั่นไหวที่ต่างกันและมีช่วงล่างที่ต่างกัน

#### 1. รถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ปี 2016



ภาพที่ 3-24 ยานพาหนะทดสอบรถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ปี 2016

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลทางเทคนิคของรถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ปี 2016

มิติภายนอก	ความยาวช่วงล้อ	ความกว้างช่วงล้อ	น้ำหนักโดยประมาณ
ยาวxกว้างx สูง (mm)	(mm)	หน้า/หลัง (mm)	(kg)
4,785x1,815x1,800	2,800	1,520/1,515	2,100

## 2. รถยนต์ Toyota hilux vigo champ ปี 2012



ภาพที่ 3-25 ยานพาหนะทดสอบรถยนต์ Toyota hilux vigo champ ปี 2012

ตารางที่ 3-4 ข้อมูลทางเทคนิคของรถยนต์ Toyota hilux vigo champ ปี 2012

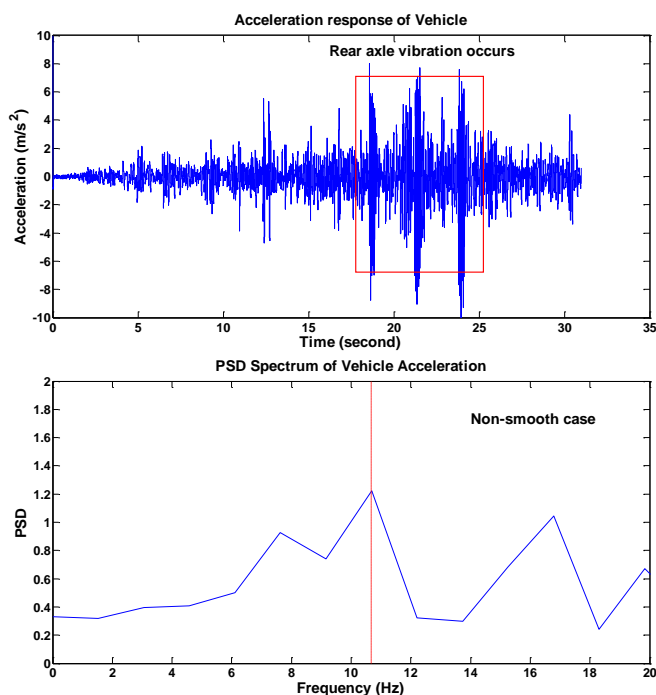
มิติภายนอก ยาวxกว้างx สูง (mm)	ความยาวช่วงล้อ (mm)	ความกว้างช่วงล้อ หน้า/หลัง (mm)	น้ำหนักโดยประมาณ (kg)
5,135x1,835,1,860	3,085	1,540/1,540	1,920

**คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของสะพาน**

ก่อนการทดสอบภาคสนามนั้นต้องทำการหาคุณสมบัติพื้นฐานของยานพาหนะที่จำเป็นต้องทราบก่อน ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าความหน่วงของรถทั้ง 2 ประเภท

ในการศึกษาได้ทดลองติดตั้งหัววัดความเร่งที่ยานพาหนะทดสอบทั้ง 2 ประเภท ที่บริเวณตัวถังในช่วงกึ่งกลางช่วงเพลลา ซึ่งพบว่าค่าความถี่จากสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งที่ติดตั้ง ณ กึ่งกลางช่วงเพลลา ไม่พบความถี่ของสะพานซึ่งอาจเป็นเพราะช่วงล่างรถยนต์อาจดูดซับขนาดการสั่นสะเทือนของสะพานไปจนไม่มีนัยสำคัญ จึงทำการติดตั้งที่ตำแหน่งใต้เพลลาหลังแทนพบว่าสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งบริเวณใต้เพลลาหลังมีค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแฝงอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการสั่นไหวของตัวยานพาหนะด้วยการทดสอบให้รถยนต์เคลื่อนผ่านแถบขรุขระสำหรับชะลอความเร็วดังลักษณะสัญญาณในกรอบสีแดงที่แสดงดังในภาพที่ 3-26 ซึ่งเพลลาหลังของรถจะมีการสั่นไหวคล้ายกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่เข้าและออกสะพาน

ในช่วงรอยต่อซึ่งไม่ราบเรียบ ทำให้ได้ค่าความถี่ที่เป็นผลจากยานพาหนะดังตารางที่ 3-5 ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคัดกรองความถี่นี้ออกจากสัญญาณความเร่งในกระบวนการของวิธี EMD ต่อไป

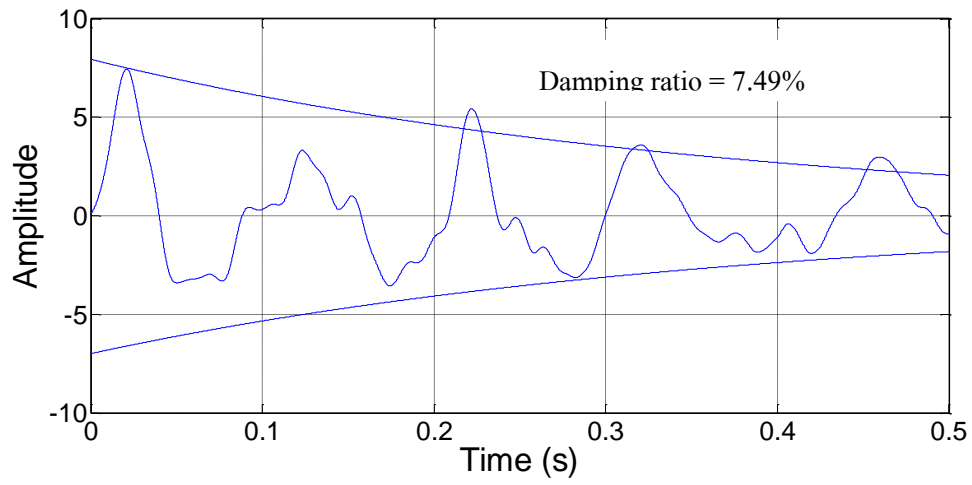


ภาพที่ 3-26 ความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลาลังเกิดการสั่นไหวของรถยนต์ประเภท SUV

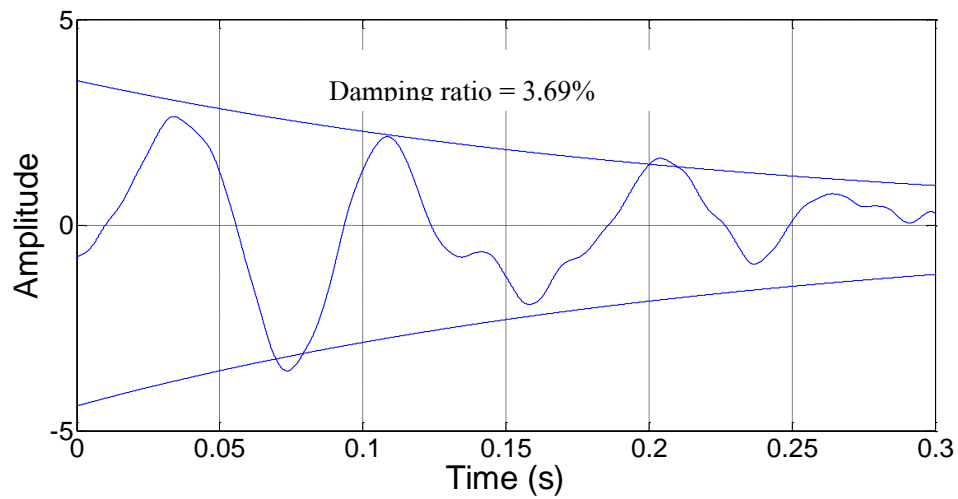
ตารางที่ 3-5 ความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลาลังของรถยนต์ทดสอบเกิดการสั่นไหว

ยานพาหนะ	น้ำหนัก (kg)	ความถี่ที่พบขณะที่เกิดการสั่นไหว (Hz)	ความยาวช่วงล้อ (mm)
SUV	2,100	10.68	2,800
Pickup	1,920	9.155	3,085

นอกค่าความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลแล้ว ยังมีค่าความหน่วงของช่วงล่างที่มีผลต่อการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งค่าสัดส่วนความหน่วง (Damping ratio) ที่ได้จากการประมาณฟังก์ชันลอการิทึมโดยใช้การลดของฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic decrement) ถูกแสดงในภาพที่ 3-27 และภาพที่ 3-28



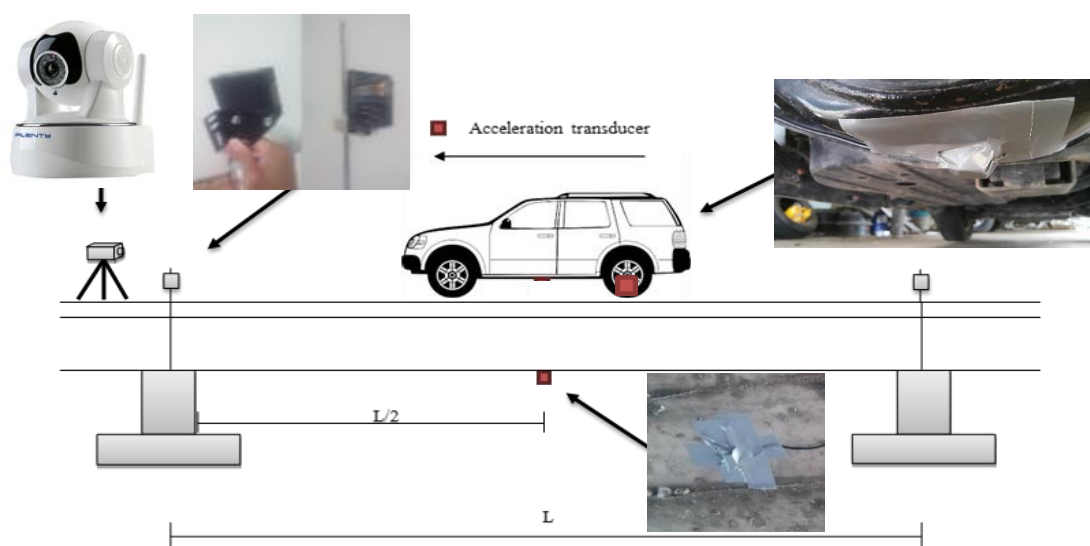
ภาพที่ 3-27 การลดลงของฟังก์ชันลอการิทึมของสัญญาณความเร่งจากรถ SUV



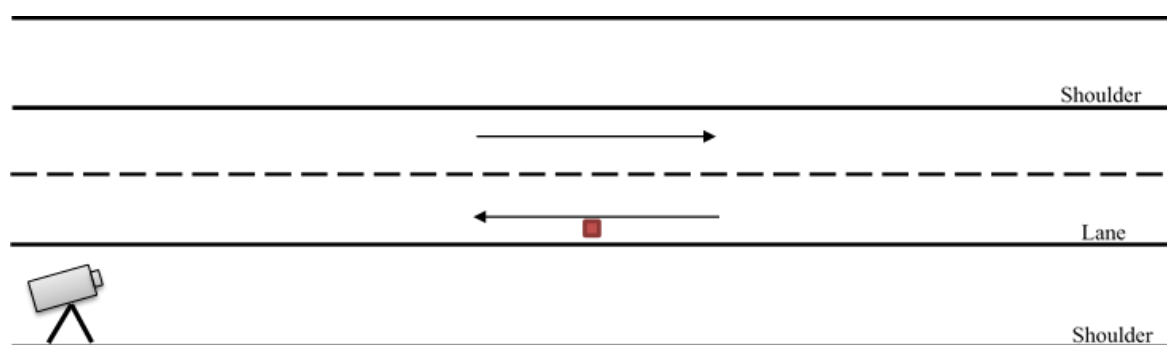
ภาพที่ 3-28 การลดลงของฟังก์ชันลอการิทึมของสัญญาณความเร่งจากรถ Pickup

### การเตรียมการทดสอบ

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตัวสะพานนั้นจะทำการติดตั้งบริเวณกึ่งกลางความยาวช่วงของสะพาน โดยอยู่ในตำแหน่งที่แนวล้อของยานพาหนะเคลื่อนผ่าน เพื่อวัดการโก่งตัวในแนวกึ่งกลางซึ่งเป็นรูปแบบของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 ส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดที่ยานพาหนะจะถูกติดตั้งที่กึ่งกลางเพลาลังของยานพาหนะ และทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบใช้แสงที่บริเวณปลายสะพานเพื่อช่วยตัดสัญญาณในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดในการทดสอบภาคสนาม ดังแสดงในภาพที่ 3-29



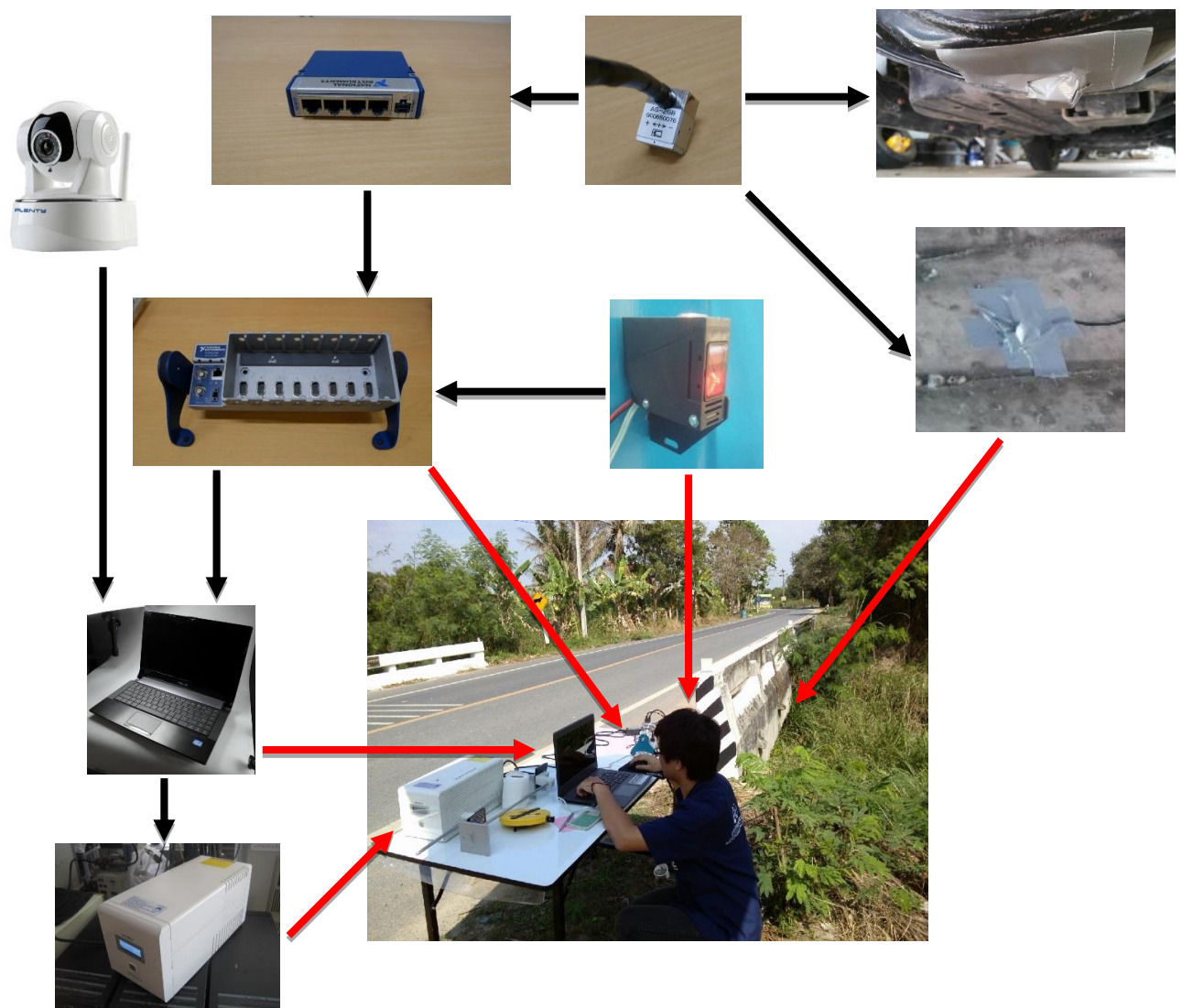
(a)



(b)

ภาพที่ 3-29 ตำแหน่งของหัววัดความเร่งที่ทำการติดตั้ง (a) มุมมองด้านข้าง (b) มุมมองด้านบน

ในการทดสอบภาคสนามต้องทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายตัวเข้าด้วยกัน และต้องนำหัววัดความเร่งไปติดตั้งทั้งที่สะพานและยานพาหนะทดสอบ โดยหัววัดความเร่งจะต่อเข้ากับหน่วยแปลงสัญญาณที่จะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์รวมสัญญาณ เพื่อรวมและส่งสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์ ซึ่งนอกหัววัดความเร่งแล้ว เช่น เซอร์ตรวจจับแสงที่จะติดตั้งบริเวณปลายสะพานทั้งสองด้านก็ยังคงเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รวมสัญญาณด้วย ทั้งนี้ในการทดสอบภาคสนามอุปกรณ์ส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าในการทำงาน เช่น Notebook, กล้อง IP Camera และอุปกรณ์รวมสัญญาณ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำรองไฟฟ้า (UPS) เพื่อให้สามารถยืดเวลาการทดสอบได้นานยิ่งขึ้น



ภาพที่ 3-30 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบภาคสนาม

## ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการวัดความถี่ธรรมชาติของทั้งสะพานและยานพาหนะด้วยวิธีทางตรง
2. ทำการทดสอบจริงโดยใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลเป็นพาหนะทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองความเร่งโดยใช้หัววัดความเร่ง
3. ใช้เทคนิค EMD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ความถี่
4. ทำการแปลงสัญญาณผลตอบสนองความเร่งที่ได้โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
5. วิเคราะห์สัญญาณความถี่ที่ได้และทำการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากสเปกตรัมความถี่

### 6. ประเมินผลการศึกษาโดยการหาค่าความคลาดเคลื่อน

6.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ระบุได้จากวิธีการวัดทางอ้อม โดยเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางตรง

เป็นความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่สามารถระบุได้จากวิธีการวัดทางอ้อม โดยเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางตรง ซึ่งถือเอาเป็นความถี่ตัวแทนของความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้น แต่ความถี่ตัวแทนนี้อาจจะมีค่าไม่ตรงกับความถี่จริงของสะพาน เนื่องจากผลของการทดสอบด้วยการวัดการสั่นไหวธรรมชาติ (Ambient vibration test) อาจมีผลของน้ำหนักรถยนต์ที่เคลื่อนผ่าน ซึ่งมีนัยสำคัญปนอยู่ด้วย

$$e_{f_{bridge}} = \left( \frac{|f_{indirect} - f_{bridge}|}{f_{bridge}} \right) \times 100 (\%) \quad (3-1)$$

โดยที่  $e_{f_{bridge}}$  คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อมที่เปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้จากวิธีการวัดทางตรง

$f_{bridge}$  คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางตรง

$f_{indirect}$  คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อม

6.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อม เทียบกับความถี่การสั่นไหวของสะพานจากสเปกตรัมที่ได้จากวิธีการวัดทางตรงในกรณีทดสอบเดียวกัน

เป็นความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่สามารถระบุได้จากวิธีการวัดทางอ้อม โดยเทียบกับค่าความถี่การสั่นไหวของสะพานจากสเปกตรัมที่ได้จากวิธีการวัดทางตรง ซึ่งจะเทียบในกรณีทดสอบเดียวกันที่เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน เนื่องจากหากว่ายานพาหนะสามารถที่จะสั่นไหวด้วยลักษณะที่ตรงกับการสั่นไหวของสะพานแล้ว แสดงว่ายานพาหนะทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพแล้ว

$$e_{f_{direct}} = \left( \frac{|f_{indirect} - f_{direct}|}{f_{direct}} \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (3-2)$$

โดยที่  $e_{f_{direct}}$  คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อมเทียบกับความถี่การสั่นไหวของสะพานจากสเปกตรัมที่ได้จากวิธีการวัดทางตรงในกรณีทดสอบเดียวกัน

$f_{direct}$  คือ ความถี่การสั่นไหวของสะพานจากสเปกตรัมที่ได้จากวิธีการวัดทางตรง

$f_{indirect}$  คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อม

7. ทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้

8. สรุปผลการทดสอบ



## พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

### 1. ความเร็วยานพาหนะ (Vehicle speeds)

ความเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนผ่านสะพานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งส่งผลต่อการปรากฏของความถี่ในสเปกตรัมความถี่ โดยเฉพาะที่ความเร็วยานพาหนะที่สูง ในการศึกษาจะมีการปรับความเร็วยานพาหนะในช่วง 20-80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

### 2. น้ำหนักยานพาหนะ (Vehicle weight)

น้ำหนักของยานพาหนะจะส่งผลต่อแอมพลิจูดของผลตอบสนองความเร่งที่ตรวจวัดได้ ซึ่งในการศึกษานี้จะไม่มีการปรับค่าน้ำหนักของยานพาหนะ แต่จะยึดน้ำหนักของตัวยานพาหนะทดสอบบวกกับน้ำหนักของเครื่องมือตรวจวัดที่ต้องติดตั้งภายในยานพาหนะ รวมทั้งน้ำหนักของผู้ควบคุมอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นหลัก

### 3. ประเภทยานพาหนะ (Vehicle types)

ในการศึกษานี้จะทดสอบโดยใช้ยานพาหนะหลายชนิดซึ่งมีจำหน่ายภายในประเทศไทย ซึ่งยานพาหนะที่ใช้จะแบ่งตามลักษณะของยานพาหนะได้ 2 ชนิด ได้แก่ รถนั่งสองตอนท้ายบรรทุกและรถนั่งสามตอน

### 4. ช่องจราจร (Lane)

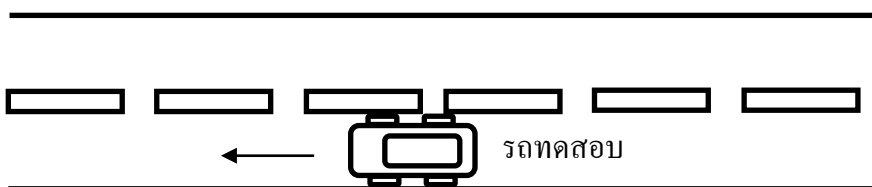
จำนวนช่องจราจรจะส่งผลต่อลักษณะการเคลื่อนตัวของยานพาหนะทดสอบและการเคลื่อนตัวของยานพาหนะอื่นในกระแสจราจรเดียวกัน ซึ่งจำนวนช่องจราจรจะขึ้นกับลักษณะและบริเวณที่ตั้งของสะพาน ในการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่สะพานช่วงสั้นซึ่งส่วนใหญ่จะมีจำนวนช่องจราจร 1-2 ช่อง เท่านั้น

### 5. ผลของยานพาหนะคันอื่นบนสะพาน (Effect of another vehicle)

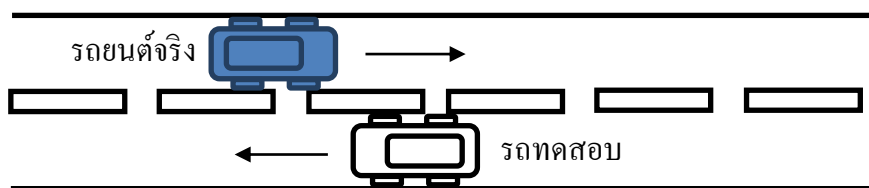
จากงานวิจัยในอดีตพบว่ายานพาหนะคันอื่นบนสะพานมีผลต่อการหาค่าความถี่ธรรมชาติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี คือ กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่เพียงคันเดียวบนสะพานและกรณียานพาหนะจำนวนมากกว่า 1 คันเคลื่อนที่บนสะพาน

## รูปแบบการทดสอบ

ในการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนองของยานพาหนะที่เคลื่อนผ่านในภาคสนามนั้น จะทำการทดสอบด้วยกันทั้งหมด 65 กรณี โดยแบ่งพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนในขณะที่ทำการทดสอบเป็น 4 ชนิด ได้แก่ สะพานจำนวน 3 สะพาน ยานพาหนะทดสอบซึ่งใช้รถยนต์ส่วนบุคคลที่หาได้ในประเทศไทยจำนวน 2 ชนิด ความเร็วของยานพาหนะทดสอบอยู่ในช่วง 20-80 กม./ชม. (ในการทดสอบยังควบคุมความเร็วให้คงที่ได้ลำบาก ดังนั้นในระหว่างทดสอบจึงยอมให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดเท่ากับ  $\pm 5$  กม./ชม.) และรูปแบบการทดสอบจำนวน 2 กรณี ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-31 และ 3-32 โดยในกรณีที่คิดผลของยานพาหนะคันอื่นบนสะพาน จะเป็นการทดสอบในลักษณะที่ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่สวนกับยานพาหนะคันอื่นบริเวณกลางสะพาน เนื่องจากสะพานที่ใช้ทดสอบเป็นสะพานช่วงสั้น ทำให้ความยาวช่วงของสะพานไม่เพียงพอต่อลักษณะการเคลื่อนที่แบบตามกันหรือนำหน้ากัน โดยการทดสอบดังกล่าวจะเป็นแบบกรณีทดสอบแบบสุ่ม จากเหตุการณ์จริงและยานพาหนะคันอื่นที่สัญจรในขณะที่ทำการทดสอบ ดังนั้นจึงไม่ได้ควบคุมให้จำนวนกรณีของการทดสอบมีจำนวนเท่ากันในแต่ละสะพาน รายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนถูกแสดงดังตารางที่ 3-6 โดยในแต่ละกรณีของกรณียานพาหนะเพียงคันเดียวบนสะพานจะทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งแผนผังการทดสอบได้ถูกแจกแจงไว้ในภาพที่ 3-33



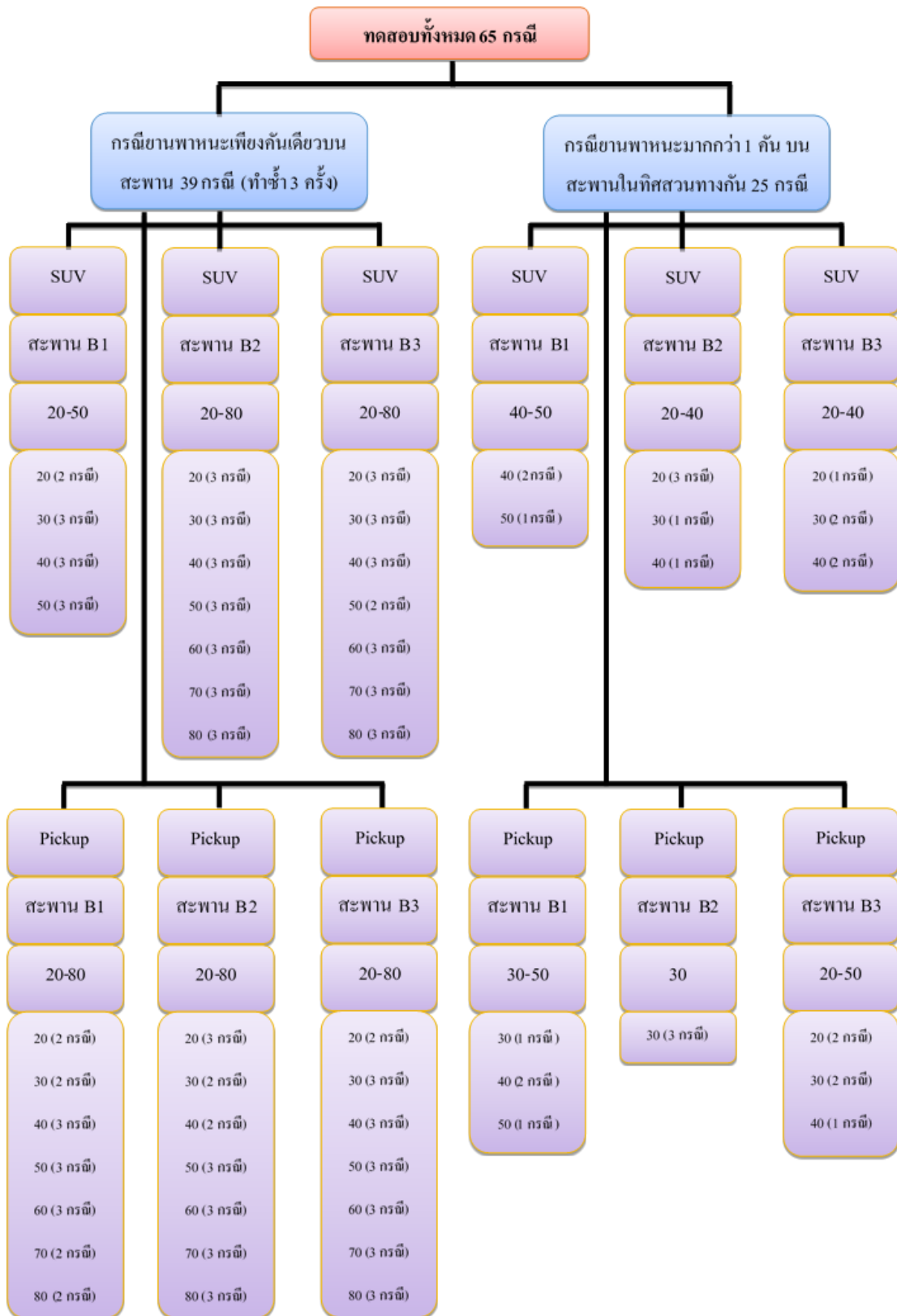
ภาพที่ 3-31 รูปแบบการทดสอบ กรณียานพาหนะเคลื่อนที่บนสะพานเพียงคันเดียว



ภาพที่ 3-32 รูปแบบการทดสอบ กรณียานพาหนะเคลื่อนที่จำนวนมากกว่า 1 คัน บนสะพานเคลื่อนที่ในทิศสวนทางกัน

ตารางที่ 3-6 พารามิเตอร์ที่ปรับค่าในการทดสอบภาคสนาม

ยานพาหนะ	สะพาน	ความเร็ว	การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ
1. รถนั่งสามตอน (SUV)	1. สะพาน พ.ศ. 2550 (B1)	20-80 กม./ชม. ( $\pm 5$ กม./ชม.)	1. ยานพาหนะบนสะพานคันเดียว
2. รถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup)	2. สะพานอนุสรณ์รัฐ ราษฎร์ (B2) 3. สะพานห้วยหนองซาก (B3)		2. ยานพาหนะบนสะพานมากกว่าหนึ่งคัน เคลื่อนที่ในทิศสวนทางกัน



ภาพที่ 3-33 แผนผังรูปแบบการทดสอบ

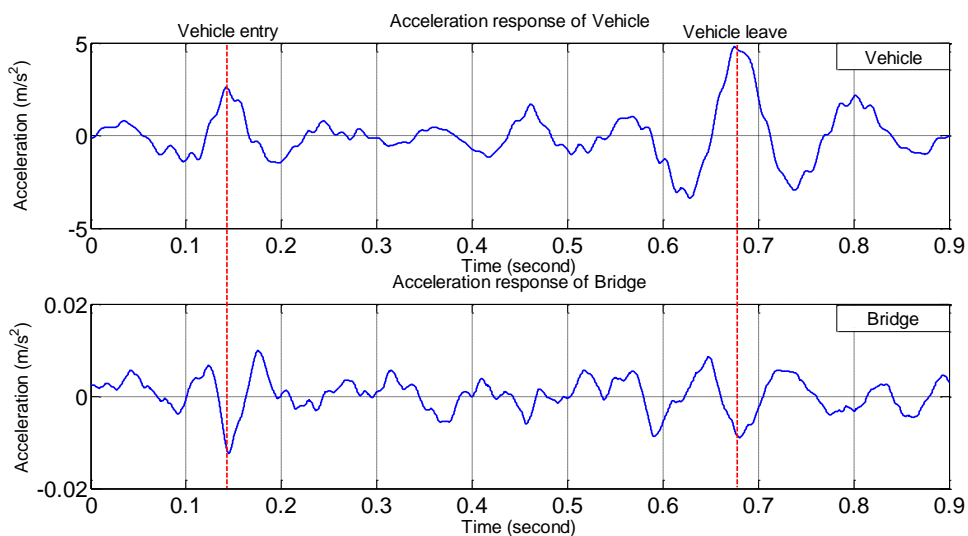
## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการทดสอบภาคสนามการหาค่าความถี่ธรรมชาติจากผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup) และรถนั่งสามตอนเอนกประสงค์ (SUV) ที่เคลื่อนผ่านสะพานที่ถูกเลือกมาทำการทดสอบทั้ง 3 สะพาน โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) ผลการทดสอบภาคสนาม 2) กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความถี่จากยานพาหนะเพื่อระบุค่าความถี่สะพานที่เหมาะสม 3) ปัจจัยในการทดสอบที่ส่งผลต่อการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน และ 4) ความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน

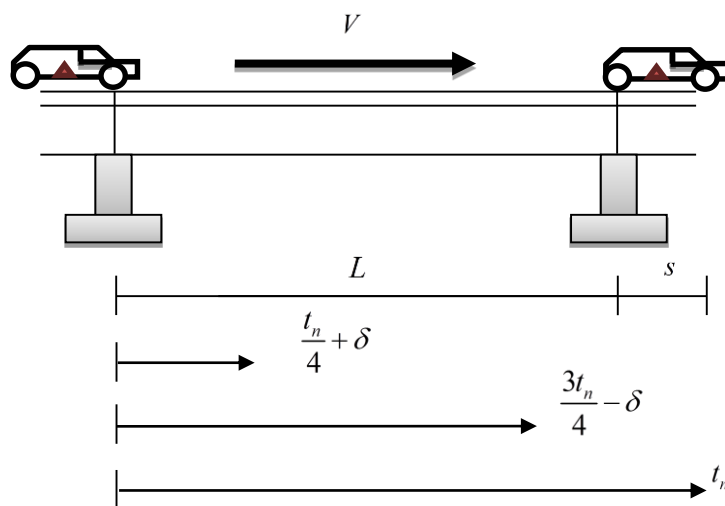
#### ความถี่ของรถทดสอบเนื่องจากการสั่นไหวในขณะที่เข้าและออกจากสะพาน

จากการสังเกตผลการทดสอบภาคสนาม พบว่าในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน มักจะเกิดการกระแทกที่บริเวณช่วงรอยต่อของสะพาน ซึ่งทำให้มีสัญญาณความถี่ที่ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้นและความถี่ที่เกิดจากสัญญาณความถี่นี้ จะมีแอมพลิจูดสูงกว่าการสั่นไหวของสะพานในผลตอบสนองของยานพาหนะ รวมทั้งการกระแทกที่เกิดขึ้นยังส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณความถี่เนื่องมาจากการสั่นของยานพาหนะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดความถี่เนื่องจากการสั่นไหวที่ไปบดบังความถี่ของสะพานทำให้การระบุค่าความถี่เป็นไปได้ยาก ดังนั้นวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่จึงถูกเสนอขึ้นและนำมาใช้เพื่อลดผลของการกระแทกดังกล่าว โดยการตัดช่วงสัญญาณความถี่จะเลือกตัดสัญญาณในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน ส่วนช่วงสัญญาณที่เหลือจะเป็นช่วงสัญญาณที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคัน ซึ่งตัวอย่างสัญญาณที่เกิดการกระแทกของยานพาหนะช่วงเข้าและออกจากสะพาน ถูกแสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 สัญญาณความเร่งที่เกิดการกระแทกของยานพาหนะช่วงเข้าและออกจากสะพาน

จากภาพด้านบนจะสังเกตได้ว่า สัญญาณความเร่งในช่วงเวลาที่ยานพาหนะทดสอบเข้าและออกจากสะพาน จะมีการสั่นไหวสูงกว่าสัญญาณความเร่งในช่วงเวลาอื่น



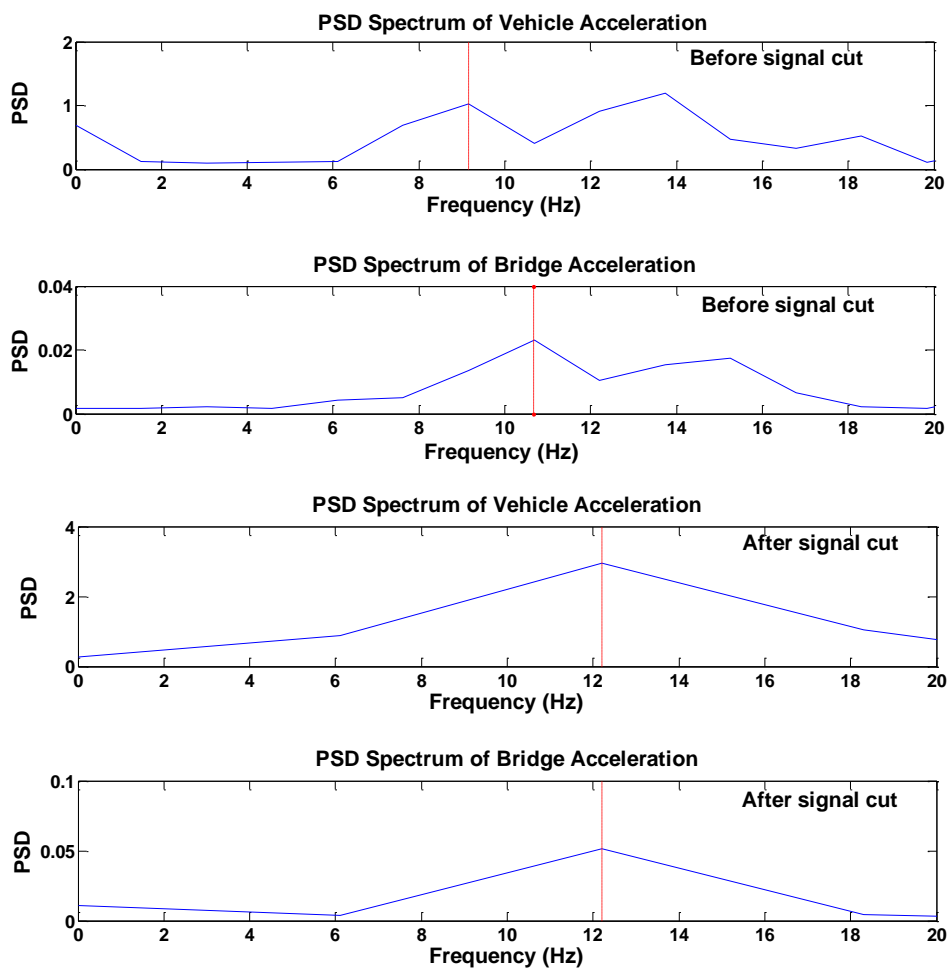
ภาพที่ 4-2 การตัดช่วงสัญญาณความเร่งขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพานเพื่อลดผลการกระแทก

จากการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอย่างง่ายจะได้ว่า ในขณะที่ยานพาหนะที่มีความยาวช่วงล้อ  $s$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $V$  ผ่านสะพานที่มีความยาวช่วง  $L$  ซึ่งทำให้เกิดการกระจัดทั้งหมดของยานพาหนะตั้งแต่เข้าสะพานจนกระทั่งออกจากสะพานที่เวลา  $t_n$  เท่ากับ  $L+s$  โดยจะทำการแบ่งช่วงสัญญาณความเร่งอย่างง่ายเป็น 4 ส่วน และตัดสัญญาณความเร่งที่ปลายทั้งสองด้านเท่ากับ  $\frac{t_n}{4}$  โดยช่วงสัญญาณที่ทำการตัดออก ได้แก่ สัญญาณความเร่งที่เวลา  $t_0$  ถึงเวลา  $\frac{t_n}{4}$  และที่เวลา  $\frac{3t_n}{4}$  ถึงเวลา  $t_n$  ซึ่งเป็นช่วงที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพานตามลำดับ ดังนั้นจะเหลือสัญญาณความเร่งที่เวลา  $\frac{t_n}{4}$  และเวลา  $\frac{3t_n}{4}$  ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคันและเพื่อให้ช่วงการตัดสัญญาณความเร่งครอบคลุมและมั่นใจได้มากขึ้นว่าเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคันจะบวกเพิ่มค่า  $\delta$  เข้าไปสำหรับช่วงขาเข้าสะพาน และทำการหักออกสำหรับช่วงขาออกจากสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 4-2

การตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าช่วงสัญญาณความเร่งที่ทำการตัดสัญญาณเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคัน จะทำการเปรียบเทียบเวลาระหว่างเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่  $t_s$  กับช่วงเวลาที่ทำการตัดสัญญาณความเร่ง  $\frac{t_n}{4} + \delta$  และทำการเปรียบเทียบเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านช่วงสะพานทั้ง  $t_L$  กับช่วงเวลาที่ทำการตัดสัญญาณความเร่ง  $\frac{3t_n}{4} - \delta$  โดยทำการแปลงให้อยู่ในรูปของความยาวช่วงเพื่อหาข้อจำกัดในการใช้งาน จะได้ว่า

$$s \leq \frac{\left(\frac{t_n}{4} + \delta\right)L}{\frac{3t_n}{4} - \delta} \quad (4-1)$$

โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า  $\delta$  ที่ร้อยละ 10 ของเวลา  $\frac{t_n}{4}$  และสเปกตรัมความถี่ที่ผ่านวิธีการตัดสัญญาณ ถูกแสดงในภาพที่ 4-3

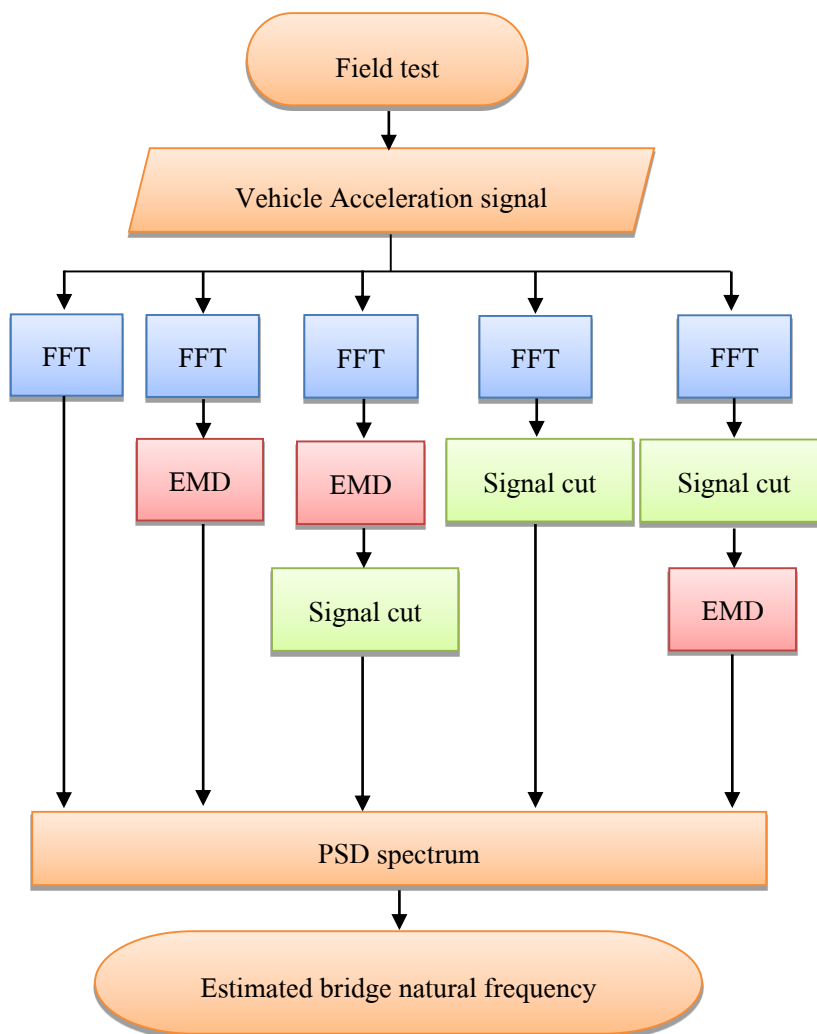


ภาพที่ 4-3 สเปกตรัมความถี่จากสัญญาณความเร่งของรถ SUV ที่ผ่านวิธีการตัดสัญญาณเร่ง

### กระบวนการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติที่เป็นไปได้

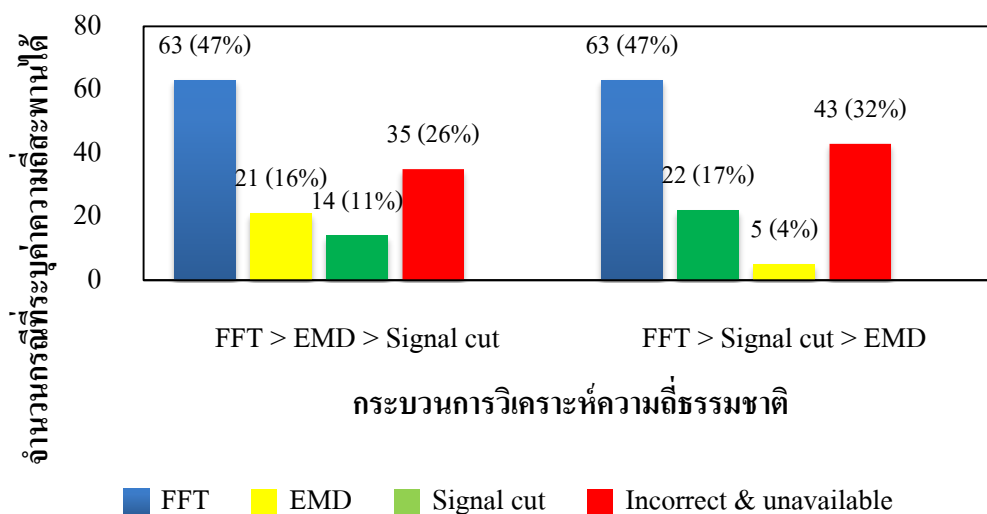
จากวิธีการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ทำให้สามารถสร้างเป็นแผนผังกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ได้ 5 กระบวนการ ได้แก่ 1) FFT 2) FFT > EMD 3) FFT > EMD > Signal cut 4) FFT > Signal cut และ 5) FFT > Signal cut > EMD โดยในการวิเคราะห์ข้อมูลจะทำการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทั้ง 5 กระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 4-4 เพื่อหาความถูกต้องของแต่ละกระบวนการวิเคราะห์ ซึ่งจะนำเสนอแนวทางของกระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด





ภาพที่ 4-4 แผนผังกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งจากยานพาหนะเพื่อระบุค่าความถี่ของสะพานที่เป็นไปได้

หลังจากนำผลการทดสอบภาคสนามมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทั้ง 5 กระบวน ที่ได้แสดงไว้ด้านบน พบว่ากระบวนการวิเคราะห์ที่สามารถระบุค่าความถี่สะพานได้ตรงกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการทดสอบทางตรงที่ได้สะพาน คือ กระบวนการวิเคราะห์ที่ประกอบด้วย 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่ 1) วิธีแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Simple FFT) 2) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ร่วมกับการตัดช่วงสัญญาณ (EMD & Signal cut) การที่พิจารณาเฉพาะกรณีความถี่ที่ระบุได้ตรงกับค่าความถี่จากวิธีการทดสอบทางตรง เนื่องจากจุดประสงค์ที่จะนำวิธีการทดสอบทางอ้อมและกระบวนการวิเคราะห์เหล่านี้ ไปใช้แทนวิธีการทดสอบทางตรง โดยจำนวนของกรณีที่สามารถระบุค่าได้จากกระบวนการวิเคราะห์ดังกล่าว ถูกแสดงในภาพที่ 4-5



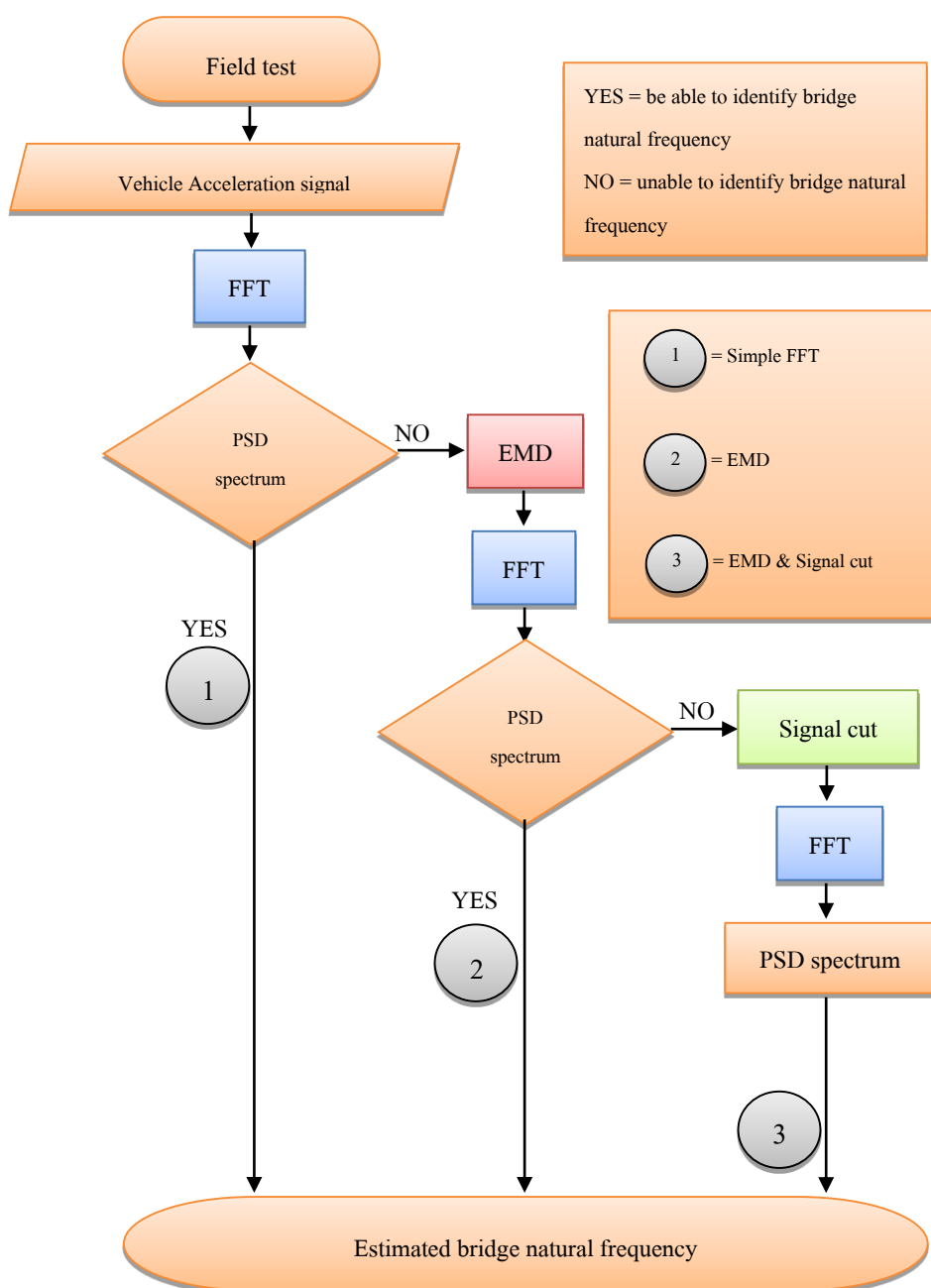
ภาพที่ 4-5 จำนวนของกรรมที่สามารถระบุค่าได้จากกระบวนการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ

จากภาพที่ 4-5 จะสังเกตเห็นได้ว่าหลังผ่านขั้นตอนลำดับที่ 2 จำนวนกรรมที่สามารถระบุค่าได้มีจำนวนใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนลำดับที่ 3 จำนวนกรรมที่สามารถระบุค่าความถี่ได้จะต่างกันมาก โดยกระบวนการแรกสามารถระบุค่าความถี่ได้เพิ่มอีกร้อยละ 11 ส่วนกระบวนการที่สองระบุค่าความถี่ได้เพิ่มเพียงแค่อ้อยละ 4 เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการซึ่งประกอบด้วย FFT > EMD > Signal cut เป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยสามารถระบุค่าความถี่ได้ร้อยละ 74 จากกรรมทดสอบทั้งหมด และร้อยละความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้เปรียบเทียบกับทั้งความถี่จากวิธีการทดสอบทางตรงและความถี่ธรรมชาติของสะพานของผลการทดสอบภาคสนามทั้งหมด ถูกแสดงไว้ในตารางภาคผนวกที่ 1 และตารางภาคผนวกที่ 2

### กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความถี่เพื่อระบุค่าความถี่สะพาน

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทั้ง 5 กระบวนการ ที่ได้นำเสนอไป โดยพิจารณาความถี่ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ตรวจวัดเทียบกับความถี่ที่ได้จากการวัดโดยตรงบริเวณใต้ท้องสะพานเป็นหลัก จนกระทั่งได้กระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแบ่งได้เป็น 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่ 1) วิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Simple FFT) 2) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ร่วมกับวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ (EMD & Signal cut) ดังแสดงในภาพที่ 4-6 การที่ในกระบวนการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนมุ่งเน้นไปที่การระบุค่าความถี่โดยเทียบกับความถี่ที่

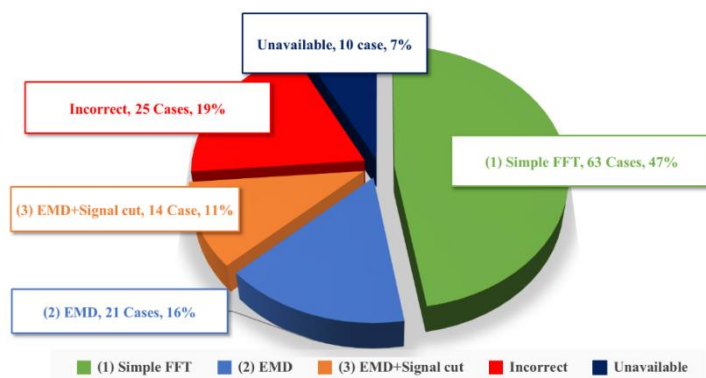
ได้จากการวัดทางตรง ก็เพื่ออธิบายว่าวิธีทางอ้อมสามารถใช้แทนวิธีทางตรงได้หรือไม่ มากกว่าการมุ่งความสนใจไปที่การระบุค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน ซึ่งพบว่ามีความแปรปรวนขึ้นกับคุณสมบัติของยานพาหนะ เนื่องจากความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงที่ได้ที่ห้องสะพาน มีค่าที่ถูกบิดเบือนไปจากค่าความถี่จริงของสะพาน ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนมวลของยานพาหนะกับสะพาน รวมทั้งผลจากลักษณะการเคลื่อนที่และตำแหน่งของยานพาหนะด้วย



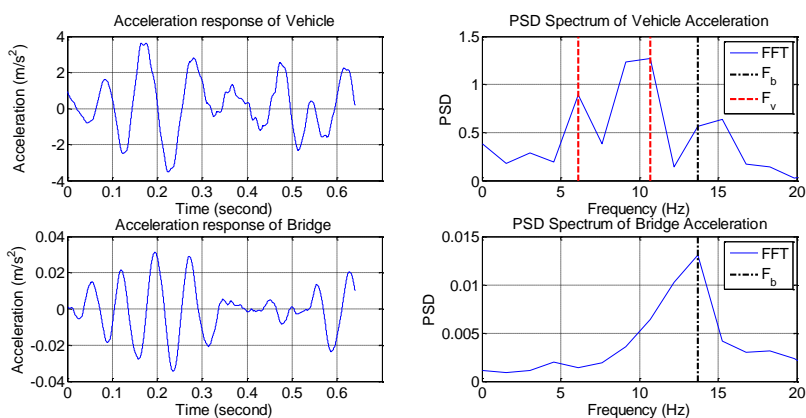
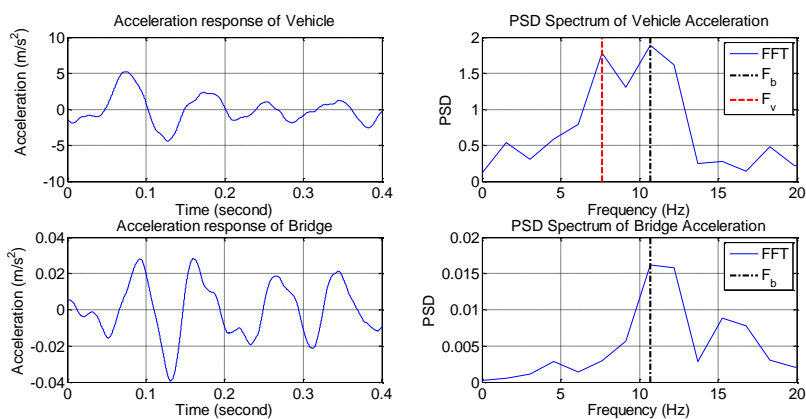
ภาพที่ 4-6 แผนผังกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งตรวจวัด

จากภาพที่ 4-6 กระบวนการวิเคราะห์จะเริ่มจากขั้นตอนแรก คือ การระบุความถี่จากวิธี FFT แบบทั่วไป ซึ่งพบว่ากระบวนการแรกนี้เป็นกระบวนการที่มีสัดส่วนในการระบุค่าความถี่ได้มากที่สุด และสามารถระบุความถี่สะพานได้เกือบทุกช่วงความเร็ว โดยระบุค่าความถี่ของสะพานได้ 63 กรณีจากทั้งหมด 133 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 47.37 ดังแสดงในภาพที่ 4-7 พบว่ากรณีส่วนใหญ่ที่สามารถระบุค่าตอบได้ถูกต้องในขั้นตอนนี้ คือ ยานพาหนะประเภท SUV ที่สัญจรด้วยความเร็วประมาณ 30-60 กม./ชม. ถ้าหากยานพาหนะมีความเร็วต่ำและสูงกว่าช่วงดังกล่าว พบว่าระบุค่าความถี่ได้ยาก เนื่องจากหากรถยนต์เคลื่อนที่ช้าเกินไปจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถกับสะพานได้น้อย และการสั่นไหวที่เกิดเนื่องจากยานพาหนะก็มีแอมพลิจูดต่ำ ในขณะที่หากรถยนต์เคลื่อนที่เร็วมากเกินไปจะทำให้สัญญาณแรงตรวจวัดที่ได้มีความละเอียดของข้อมูลที่ต่ำ เพราะว่าการที่รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงทำให้เวลาที่อยู่บนสะพานสั้นและด้วยช่วงเวลาสั้นมากจึงทำให้สะพานสั่นไหวได้จำนวนน้อยรอบ ซึ่งทำให้ระบุความถี่ได้ยากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FFT แบบทั่วไป ถูกแสดงในภาพที่ 4-8 จากผลการทดสอบที่สามารถระบุค่าได้จากวิธีการ FFT แบบทั่วไป พบว่าลักษณะสัญญาณความเร่งที่เหมาะสมกับกระบวนการนี้ คือ สัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่มีคลื่นการสั่นไหวคล้ายกับการสั่นไหวของสะพาน มีการสั่นไหวที่ชัดเจนและมีสัญญาณรบกวนน้อย จากลักษณะของคลื่นสัญญาณความเร่งที่กล่าวมา พบว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบของสะพาน B3 ซึ่งเป็นสะพานที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จ ดังนั้นการทดสอบกับสะพานที่เป็นประเภทแผ่นพื้นสำเร็จจะได้ผลตอบสนองความเร่งที่มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับการสั่นไหวของสะพานมากที่สุด เนื่องจากแผ่นพื้นเกิดการสั่นไหวได้มากและส่งผ่านการสั่นไหวได้ดี



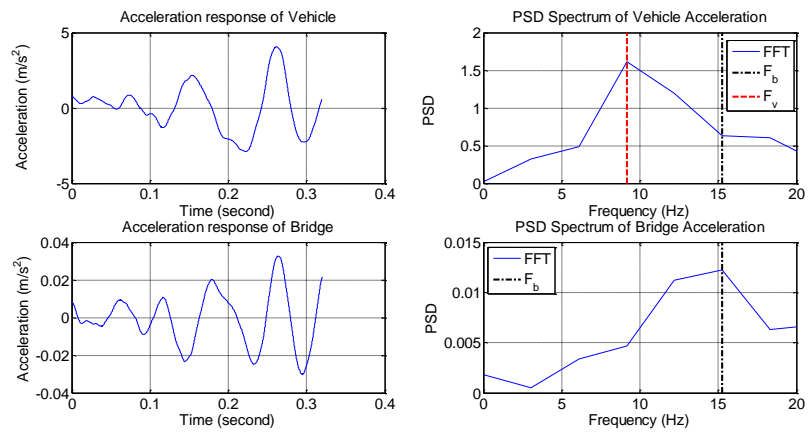
ภาพที่ 4-7 สัดส่วนการระบุค่าความถี่ได้ของแต่ละขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่ง



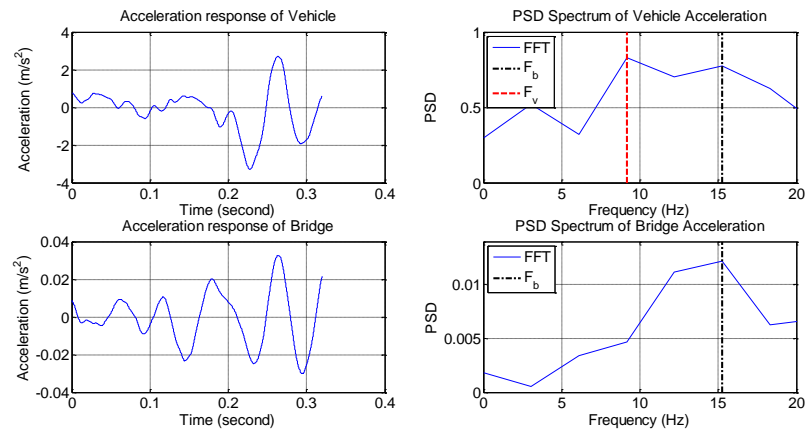
ภาพที่ 4-8 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FFT แบบทั่วไป (a) ระบุความถี่ได้ (b) ระบุความถี่ไม่ได้

จากกระบวนการแรก พบว่ามีกรณีที่ยังไม่สามารถระบุความถี่ของสะพานได้จำนวน 70 กรณี จึงนำไปวิเคราะห์ในกระบวนการที่สอง คือ การแยกความถี่ที่เกิดจากการสั่นไหวของเพลาลังของยานพาหนะออกจากสัญญาณความเร่งตรวจวัดด้วยวิธี EMD ก่อนนำไปหาสเปกตรัมเพื่อระบุค่าความถี่ของสะพาน ซึ่งพบว่าขั้นตอนนี้สามารถระบุค่าความถี่สะพานได้เพิ่มอีก 21 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 15.79 ของกรณีทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี EMD สามารถกำจัดค่าความถี่ที่ไม่พึงประสงค์จากการสั่นของรถยนต์ออกจากสัญญาณความเร่งตรวจวัดหลัก และทำให้สเปกตรัมที่ได้มีค่าความถี่ของสะพานที่ชัดเจนและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดทางตรง

จากผลการวิเคราะห์พบว่ากรณีส่วนใหญ่ที่เหมาะสมกับการนำวิธี EMD มาใช้ คือ กรณีที่ผลตอบสนองความเร่งมีลักษณะที่แอมพลิจูดของสัญญาณความเร่งแต่ละรอบการสั่นไหวมีขนาดใกล้เคียงหรือไม่ต่างกันมาก โดยไม่พบขดคลื่นที่มีแอมพลิจูดมากผิดปกติ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการกระแทกของยานพาหนะทดสอบในช่วงรอยต่อขณะเข้าและออกจากสะพาน ดังนั้นความเร็วของยานพาหนะที่เหมาะสมจะใกล้เคียงกับความเร็วของกระบวนการวิเคราะห์ลำดับแรก เนื่องจากที่ความเร็วยานพาหนะต่ำกว่าสาเหตุของการระบุค่าความถี่ไม่ได้เกิดจากการสั่นไหวของสะพานที่มีแอมพลิจูดไม่เพียงพอ ส่วนที่ความเร็วยานพาหนะสูงกว่า ส่วนมากพบขดคลื่นที่มีลักษณะของการกระแทกในช่วงรอยต่อดังกล่าว ซึ่งตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ EMD ถูกแสดงในภาพที่ 4-9 และภาพที่ 4-10

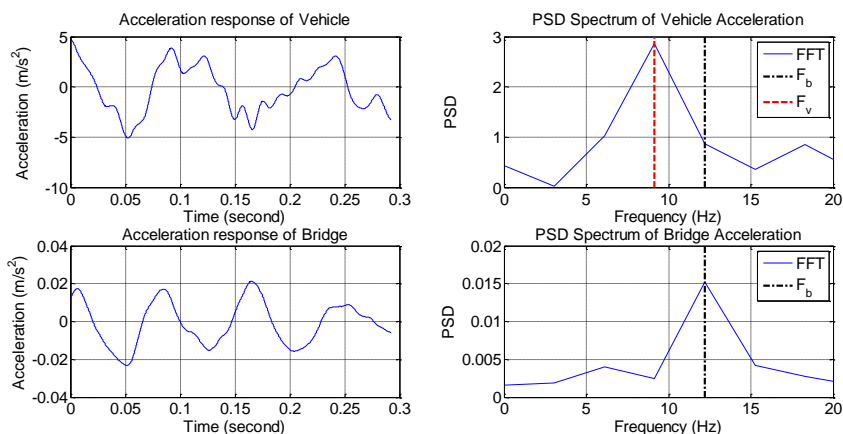


(a)

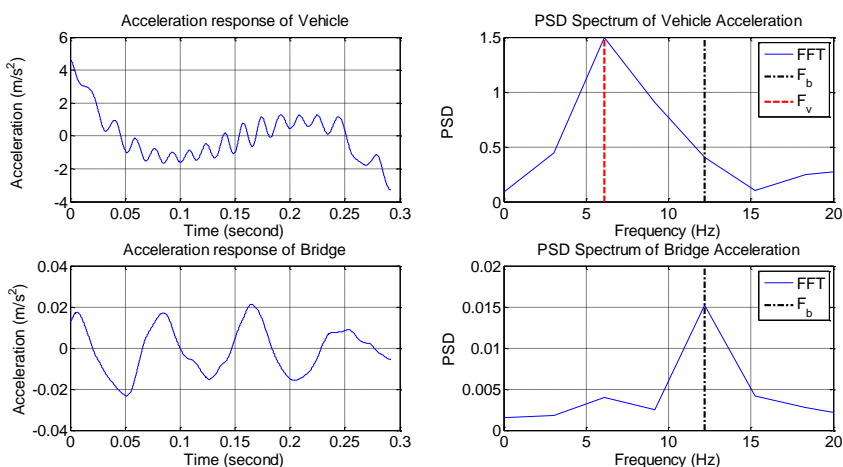


(b)

ภาพที่ 4-9 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ EMD แล้วระบุมความถี่ได้ (a) หลังทำ FFT (b) หลังทำ EMD



(a)



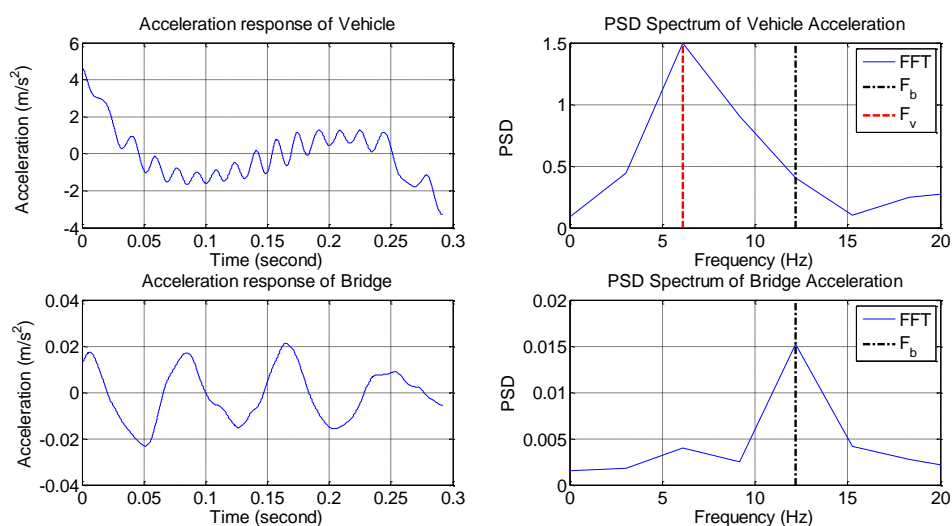
(b)

ภาพที่ 4-10 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ EMD แล้วระบุความถี่ไม่ได้ (a) หลังทำ FFT (b) หลังทำ EMD

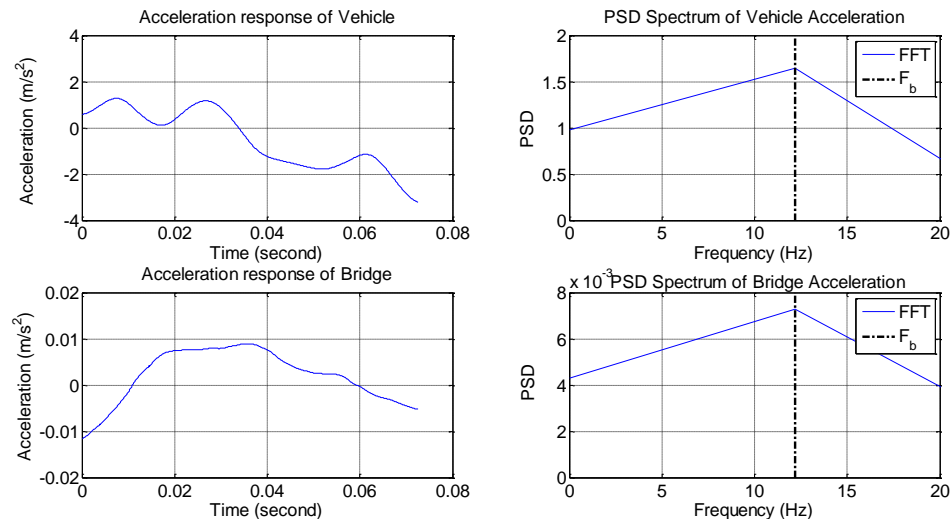
อย่างไรก็ตามจากกระบวนการที่สอง ยังพบว่ามีความถี่ที่ไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้ สอดคล้องกับความถี่จากการวัดทางตรงที่สะพานอีก 49 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 36.84 ของกรณีสองทั้งหมด จึงถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการสุดท้าย คือ วิธีการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง ซึ่งคาดว่า เป็นผลจากการที่ยานพาหนะมีการสั่นสะเทือนในขนาดที่มากเมื่อเทียบกับสะพาน เนื่องจากการสั่นไหวที่เกิดขึ้นในขณะที่เข้าและออกจากสะพานในช่วงรอยต่อที่ไม่ราบเรียบ และเมื่อแยกค่าความถี่ด้วยวิธี EMD แล้วยังไม่เพียงพอที่จะทำให้สัญญาณความถี่ของสะพานมีความเด่นชัดขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้สัญญาณความเร่งที่แยกองค์ประกอบของยานพาหนะด้วยวิธี EMD แล้ว จะถูกนำมาตัดช่วงเวลาในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าและออกในช่วงรอยต่อของสะพานออก เพื่อเป็น



การลดผลการสั่นสะเทือนของตัวรถยนต์เองดังที่ได้สังเกตและอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการตัดช่วงสัญญาณความถี่แล้ว พบว่าค่าความถี่ของยานพาหนะและค่าสเปกตรัมที่ได้สามารถสังเกตและระบุค่าความถี่ของสะพานได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4-11



(a)



(b)

ภาพที่ 4-11 ตัวอย่างสัญญาณความถี่และสเปกตรัมหลังผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่แล้วระบุความถี่ได้ (a) หลังทำ EMD (b) หลังตัดช่วงสัญญาณ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า กรณีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง คือ สัญญาณความเร่งของรถ Pickup ซึ่งมีความหน่วงต่ำทำให้ผลตอบสนองการสั่นไหวของยานพาหนะมีมาก และเมื่อสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้จะมีลักษณะของยอดคลื่นการสั่นไหวที่มีขนาดมากกว่าคลื่นสัญญาณ โดยรอบ ซึ่งจะพบบริเวณช่วงแรกและช่วงปลายของสัญญาณความเร่งที่เกิดจากการกระแทกบริเวณช่วงรอยต่อในขณะที่เข้าและออกจากสะพาน รวมทั้งในขณะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเวลาที่ยานพาหนะทดสอบจะเกิดการสั่นไหวจากตัวยานพาหนะเองมาก ซึ่งมีขนาดที่มากกว่าการสั่นไหวของสะพาน ทำให้ความถี่เนื่องจากการสั่นไหวดังกล่าวไปบดบังความถี่สะพานได้ วิธีการตัดสัญญาณจึงให้ผลที่ดีเนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ลดผลการสั่นไหวของยานพาหนะ

หลังจากผ่านกระบวนการวิเคราะห์ทั้ง 3 ขั้นตอน พบว่ามีกรณีที่ไม่สามารถระบุค่าความถี่สะพานได้อยู่ 35 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 26.32 จากกรณีทดสอบทั้งหมด 133 กรณี ซึ่งแสดงว่ากระบวนการที่นำเสนอสามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ทั้งหมด 98 กรณี คิดเป็นร้อยละ 73.68 โดยผลลัพธ์ของแต่ละกรณีแสดงไว้ในตารางที่ 4-1 โดยสามารถแบ่งสเปกตรัมความถี่ของกรณีที่ไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ กรณีที่ไม่พบค่าความถี่และกรณีที่พบค่าความถี่แต่ไม่ตรงกับความถี่จากการวัดทางตรง ซึ่งพบว่าสัดส่วนของกรณีที่ไม่พบค่าความถี่แต่ไม่ตรงกับความถี่จากการวัดทางตรง มีสัดส่วนที่มากกว่ากรณีที่ไม่พบค่าความถี่ คิดเป็นร้อยละ 18.79 ของกรณีที่ไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4-9

ลักษณะของสัญญาณความเร่งกรณีที่ไม่พบค่าความถี่ คือ สัญญาณความเร่งของยานพาหนะทดสอบที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ เนื่องจากเมื่อรถสัญญาณความเร่งต่ำขนาดของการสั่นไหวของสะพานไม่มากพอ ที่จะทำให้สเปกตรัมความถี่ที่ได้จากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะซึ่งมีความถี่ของสะพานปนอยู่มีความเด่นชัดกว่า และเมื่อสะพานเกิดการสั่นไหวที่น้อยทำให้สัญญาณรบกวน (Noise) มีผลต่อการระบุค่าความถี่มาก ส่วนเมื่อรถสัญญาณความเร่งสูงการสั่นไหวของยานพาหนะมีขนาดการสั่นไหวมาก ทำให้การกระแทกในบริเวณช่วงรอยต่อของสะพานมีผลต่อการระบุค่าความถี่ธรรมชาติมาก เนื่องจากความถี่ของยานพาหนะที่เกิดจากการกระแทกดังกล่าวจะบดบังความถี่ของสะพาน โดยกรณีที่พบค่าความถี่แต่ไม่ตรงกับความถี่จากการวัดทางตรงถือเป็นข้อจำกัดของวิธีการ เนื่องจากว่าหลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ที่นำเสนอแล้วยังคงพบค่าความถี่ที่ไม่ตรงกับความถี่ที่วัดทางตรง ทำให้ในการนำวิธีการทดสอบทางอ้อมและกระบวนการที่นำเสนอไปใช้ อาจระบุค่าความถี่ผิดไปได้เพราะในการนำไปใช้จะไม่ทราบความถี่จากการวัดทางตรงดังเช่นในการทดสอบนี้

ตารางที่ 4-1 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) และเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ( $e_{f_{bridge}}$ ) หลังผ่านกระบวนการที่นำเสนอ

สะพาน	ยานพาหนะ	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)			$e_{f_{bridge}}$ (%)				
			Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut	Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut		
B1	V1	22.31	0			6.22				
		23.63	5.54	54.55	0	6.22	6.22	0		
		30.54	0			0				
		29.72	6.73	26.64	25.02	0	31.27	25.02		
		30.25	26.64	26.64	50.01	31.27	31.27	50.01		
		39.04	0			24.98				
		37.15	44.44	22.21	49.96	37.52	12.53	49.96		
		38.98	0			0				
		47.86	0			0				
		48.43	0			12.45				
		48.36	0			25.02				
		V2	V2	19.37	46.88	34.60	0	18.77	0	0
				28.95	35.3	17.66	36.35	31.27	12.53	12.53
				30.17	22.21	0		12.53	12.45	
37.20	0					12.45	0			
37.41	0					12.45	0			
38.71	22.21			0		12.53	12.45			
46.88	0					0				
46.89	0					0				
46.09	0			0						

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดพาดหน้า	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)			$e_{f_{bridge}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut	Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut
B1	V2	57.14	25.02	0		25.02	0	
		56.06	11.07	11.07	33.32	0	0	0
		55.10	28.57	57.13	66.66	37.52	62.51	50.01
		66.80	49.96	25.02	50.01	49.96	25.02	50.01
		65.72	25.02	25.02	50.01	25.02	25.02	50.01
		67.22	50.01	0		50.01	0	
		75.17	19.99	19.99	33.32	0	0	0
		76.60	25.02	0		25.02	0	
		B2	V1	21.98	12.53	18.77	17.66	30.01
21.51	19.99			19.99	40.01	19.99	19.99	40.01
20.57	0					19.99		
30.33	0					10.03		
29.32	0					19.99		
28.85	0					10.03		
39.04	0					0		
39.64	25.02			49.96	66.66	40.01	19.99	80.00
38.09	0					0		
48.48	49.96			49.96	0	19.99	19.99	19.99
48.65	25.02			50.01	50.01	40.01	60.00	60.00
47.45	40.01			19.99	0	40.01	19.99	0

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดพาดหน้า	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)			$e_{f_{bridge}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut	Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut
B2	V1	57.95	0			0		
		58.65	0			0		
		57.31	0			0		
		68.23	25.02	74.99	0	40.01	79.99	19.99
		66.21	25.02	24.98	0	40.01	0	19.99
		66.05	0			19.99		
		77.63	0			0		
		76.23	0			0		
		78.05	0			0		
		21.44	0			9.96		
	21.41	35.30	11.80	0	45.01	25.03	30.01	
	20.85	21.10	31.60	49.97	25.03	35.01	10.03	
	31.30	0			10.03			
	32.84	19.99	70.51	79.99	19.99	70.51	79.99	
	41.03	11.14	0		0	10.03		
	38.45	37.52	50.01	50	50.01	60.00	40.01	
	49.66	0			10.03			
	50.26	24.98	24.98	0	0	0	19.99	
	50.88	24.98	0		0	19.99		
	61.54	19.99	19.99	33.32	19.99	19.99	19.99	

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดพาดหน้า	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)			$e_{f_{bridge}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut	Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut
B2	V2	61.67	19.99	19.99	33.32	19.99	19.99	19.99
		60.63	0			0		
		69.40	25.02	75.00	50.01	40.01	80.00	60
		70.59	12.45	0		10.03	19.99	
		70.42	0			40.01	0	
		78.90	0			19.99		
		80.90	50.01	50.01	0	60.00	60.00	19.99
		80.67	25.02	75.00	0	40.01	80.00	19.99
		B3	V1	20.38	0			14.28
23.48	0					0		
21.74	0					0		
30.56	0					0		
29.32	0					0		
33.34	14.28			0		14.28	0	
39.18	0					0		
38.57	0					0		
36.88	0					0		
46.28	0					0		
48.72	0					0		
58.91	0					14.33		

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาด ยานพาหนะ	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)			$e_{f_{bridge}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut	Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut
B3	V1	55.19	0			14.33		
		58.91	0			0		
		66.12	25.02	75	50.01	14.28	71.42	42.85
		69.23	25.02	0		14.28	14.33	
		73.64	0			14.33		
		81.02	24.98	25.02	50.01	42.88	14.28	42.85
		78.64	19.99	0		14.33	42.88	
		76.23	25.02	0		14.28	14.33	
		V2	22.52	30.01	30.01	12.53	0	0
	20.78		0			7.13		
	31.4		5.86	5.86	0	14.33	14.33	14.33
	31.98		22.21	0		0	28.56	
	30.68		0			0		
	40.5		0			0		
	39.32		22.21	22.21	22.21	0	0	0
	41.22		0			28.56		
	50.31		37.52	12.45	25.02	28.57	28.56	14.28
	49.77		37.52	50.01	75	28.57	42.85	71.42
	50.08	0			14.33			
59.89	0			14.33				

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

สะพาน	ยานพาหนะ	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)			$e_{f_{bridge}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut	Simple FFT	EMD	EMD & Signal cut
B3	V2	58.7	19.99	0		14.33	42.88	
		60.11	49.96	49.96	49.96	71.44	71.44	71.44
		68.35	0			14.33		
		68.79	0			14.33		
		69.38	24.98	50.01	50.01	42.88	42.85	42.85
		80.2	25.02	50.01	50.01	14.28	42.85	42.85
		77.14	0			14.33		
		78.45	49.96	49.96	49.96	71.44	71.44	71.44

จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบด้วยวิธีทางอ้อมและวิเคราะห์ด้วยกระบวนการที่นำเสนอสามารถใช้แทนการทดสอบทางตรงได้ เนื่องจากค่าความถี่ที่ได้นั้นตรงกันกับค่าความถี่จากสเปกตรัมของค่าความเร่งที่ติดตั้งใต้ท้องสะพาน แต่ยังคงมีข้อจำกัดของวิธีการอยู่ เนื่องจากไม่สามารถใช้แทนวิธีการทดสอบทางตรงได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้เพื่อคัดกรองสะพานที่อาจเกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่สะพานที่มีนัยสำคัญ



## ปัจจัยที่มีผลต่อการระบุค่าความถี่สะพาน

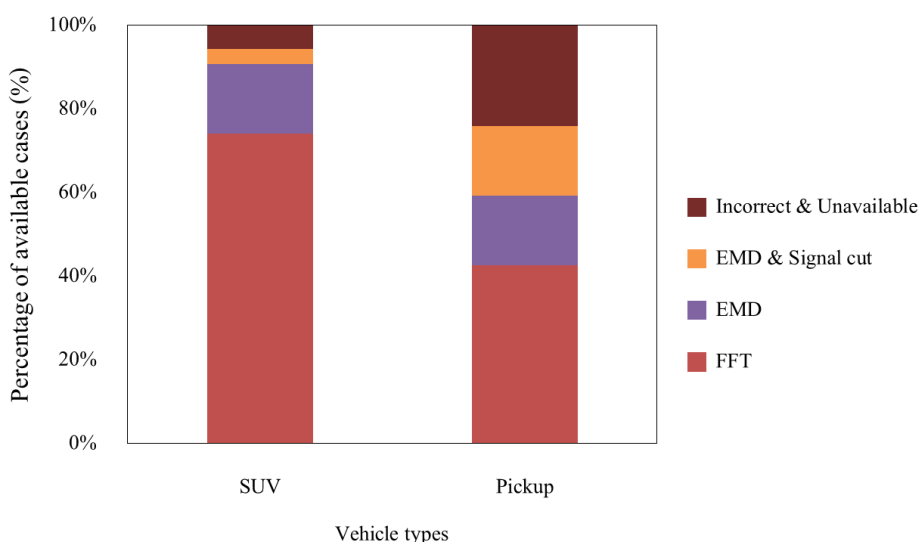
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการทดสอบภาคสนาม ซึ่งสามารถแบ่งปัจจัยเหล่านี้ได้เป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

### ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้

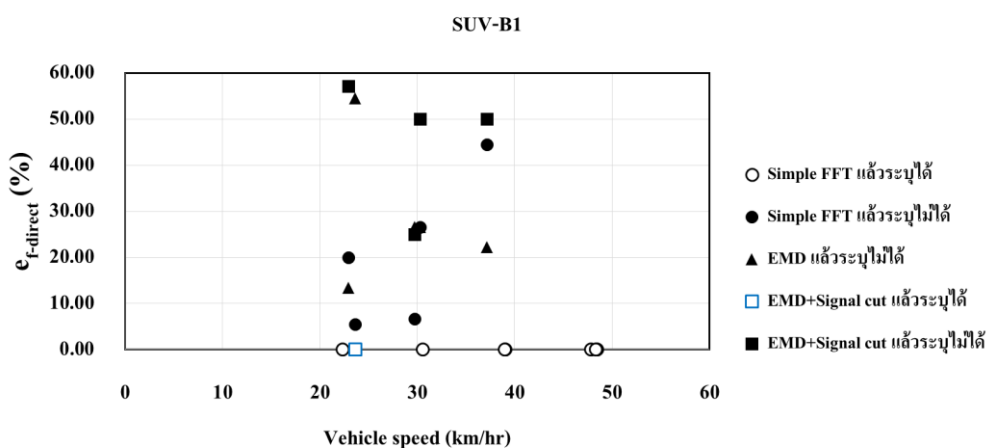
#### 1. ประเภทของยานพาหนะ

งานวิจัยนี้ใช้ยานพาหนะทดสอบเป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสามตอนอเนกประสงค์ (SUV) และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup) ซึ่งยานพาหนะทดสอบที่เลือกใช้จะมีน้ำหนักและลักษณะช่วงล่างที่ต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า รถยนต์ประเภท SUV ที่ใช้เป็นยานพาหนะทดสอบนั้น ทำให้ระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ได้ตรงกับค่าที่ได้จากการวัดทางตรงได้ง่ายกว่า โดยส่วนมากแล้วสามารถระบุค่าความถี่ได้จากกระบวนการ FFT แบบทั่วไป ในขณะที่รถยนต์ประเภท Pickup มีหลายกรณีที่พบว่าจำเป็นต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์ที่มากขึ้นทั้งการใช้วิธี EMD และการตัดช่วงสัญญาณความถี่ จึงจะได้ค่าความถี่สะพาน รวมทั้งรถประเภท SUV ยังมีกรณีที่ระบุค่าไม่ได้หรือได้ไม่ตรงกับค่าจากการวัดทางตรงน้อยกว่ารถประเภท Pickup ดังแสดงในภาพที่ 4-12 ซึ่งแสดงร้อยละกรณีที่ระบุค่าความถี่สะพานได้ของรถทั้งสองประเภทหลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ที่นำเสนอ และภาพที่ 4-13 ถึงภาพที่ 4-18 เป็นความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่สะพานจากการทดสอบทางตรง โดยสังเกตจากสัญลักษณ์วงกลมกลวง คือ กรณีที่ระบุค่าความถี่สะพานได้หลังจากการทำ FFT แบบทั่วไป ในกรณีของรถยนต์ประเภท SUV จะมีสัญลักษณ์ดังกล่าวมากกว่ากรณีรถยนต์ประเภท Pickup เนื่องจากว่ารถประเภท SUV มีน้ำหนักที่มากกว่าทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ที่ได้ชัดเจนกว่า (Yang, Chen, Yu & Chan, 2013) และการที่ช่วงล่างของรถประเภท SUV ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความหน่วงที่สูงกว่า ทำให้การสั่นไหวของยานพาหนะที่ถูกกระตุ้นจากสะพานหยุดสั่นได้เร็วกว่ารถประเภท Pickup และในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงทำให้ผลการสั่นไหวของรถยนต์เองมีขนาดที่มากซึ่งอาจไปบดบังความถี่ของสะพานได้ ทำให้การระบุค่าความถี่สะพานเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะกรณีของรถยนต์ประเภท Pickup ที่ช่วงล่างมีความหน่วงต่ำกว่ารถประเภท SUV ซึ่งช่วงล่างมีความนุ่มนวลและความหน่วงสูงกว่า จึงทำให้การสั่นสะเทือนของรถที่เกิดจากการกระเทือนด้วยความขรุขระหรือผลของรอยต่อบริเวณปลายสะพานในขณะที่ยานพาหนะกำลังเคลื่อนที่เข้าและออกจากสะพานมีผลต่อสัญญาณความถี่ที่นานกว่ากรณีที่ยานพาหนะมีช่วงล่างที่มีความหน่วงสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการ EMD และวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่เข้ามาช่วยเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่ของยานพาหนะออกจากสัญญาณความถี่ตรวจวัด ซึ่งจะช่วยให้

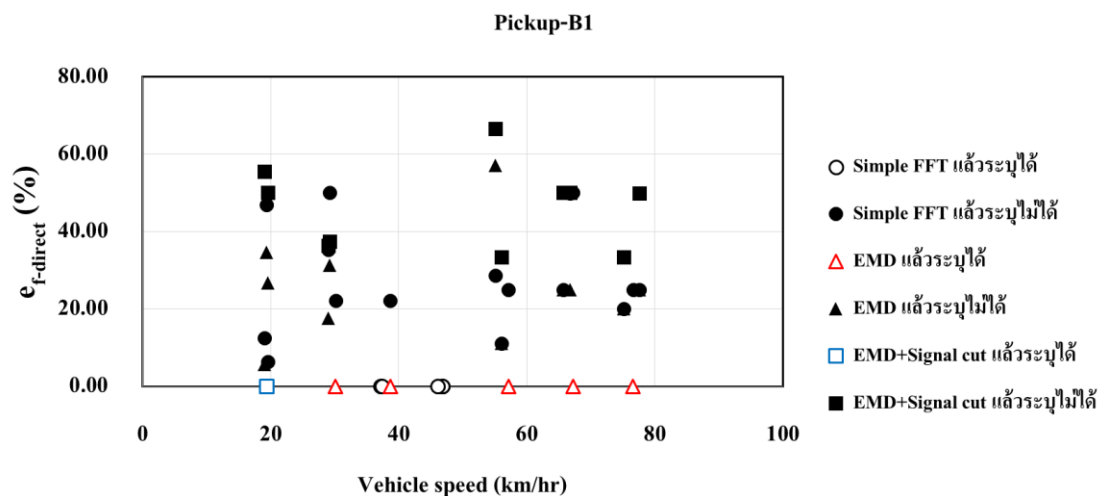
ให้ยอดของค่าความถี่สะพานในสเปกตรัมเด่นชัดขึ้น ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้ คือ รถประเภท Pickup มีสัดส่วนการระบุค่าความถี่หลังผ่านวิธีการ EMD และวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ ที่มากกว่ารถประเภท SUV



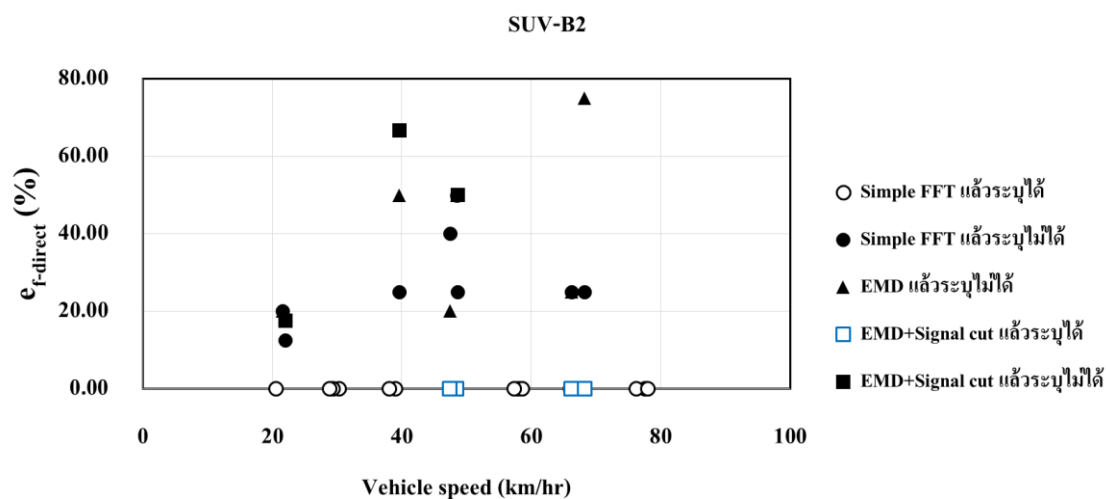
ภาพที่ 4-12 ร้อยละกรณีที่ระบุค่าความถี่สะพานได้หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ของรถทดสอบทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



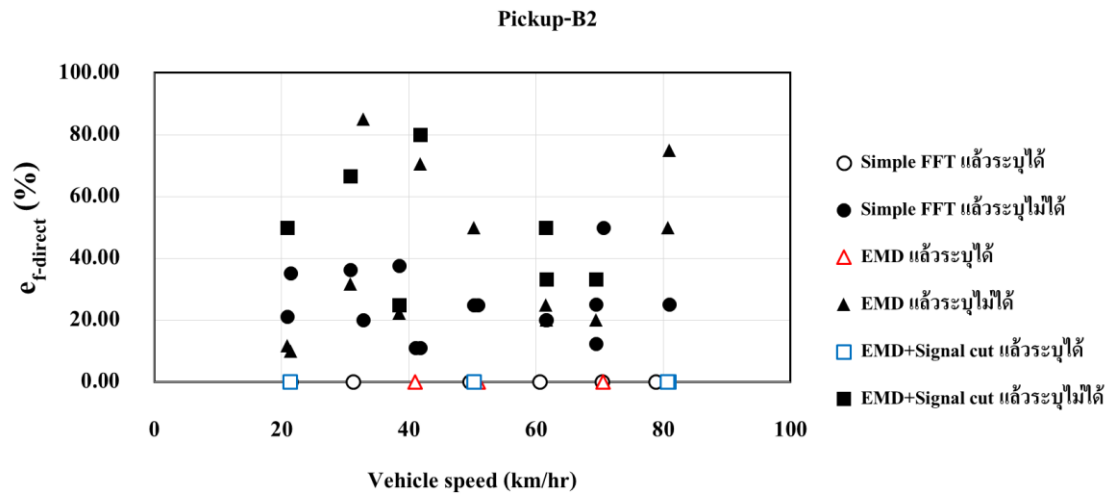
ภาพที่ 4-13 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f\_direct}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



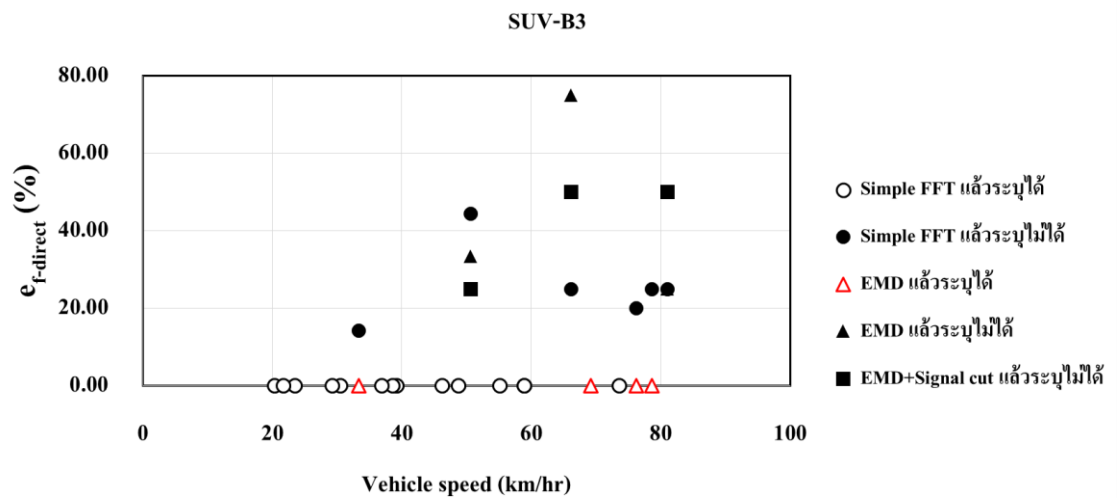
ภาพที่ 4-14 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f-direct}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



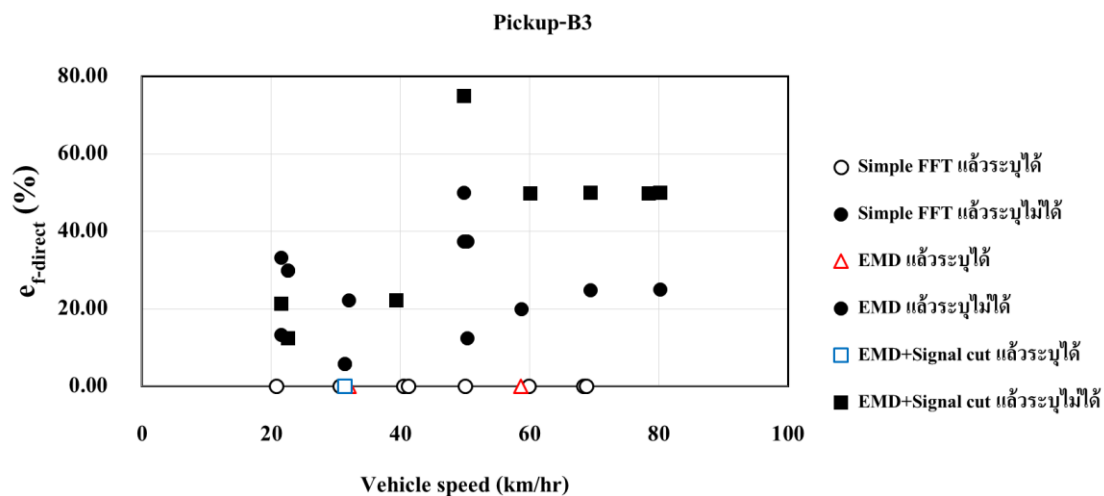
ภาพที่ 4-15 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f-direct}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



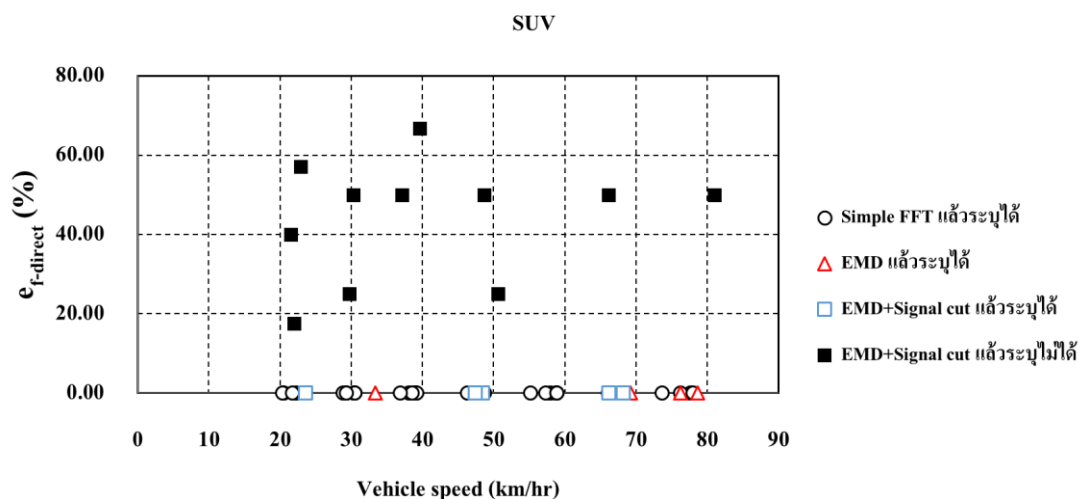
ภาพที่ 4-16 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f\text{-direct}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบ โดยใช้รถ Pickup กรณี ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



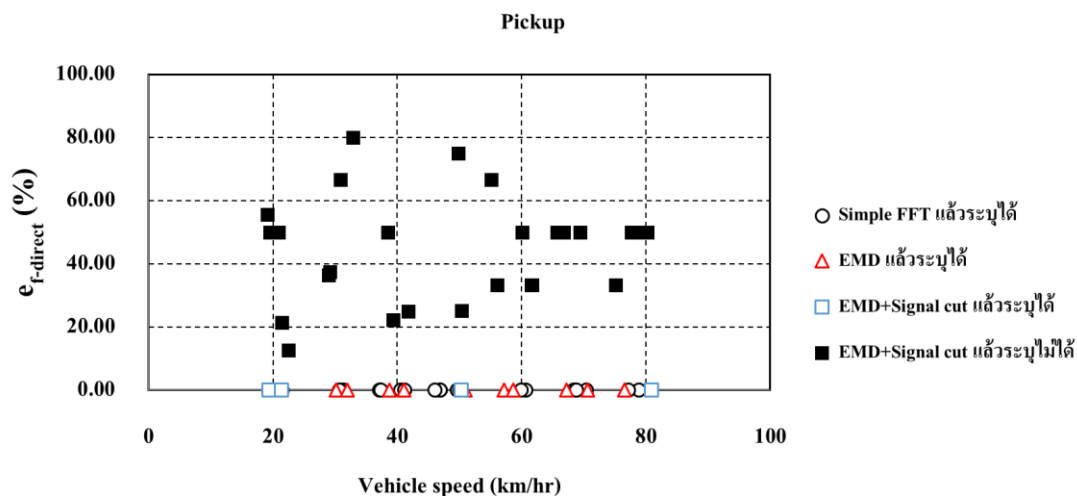
ภาพที่ 4-17 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f\text{-direct}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบ โดยใช้รถ SUV กรณี ยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพที่ 4-18 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพที่ 4-19 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f_{direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



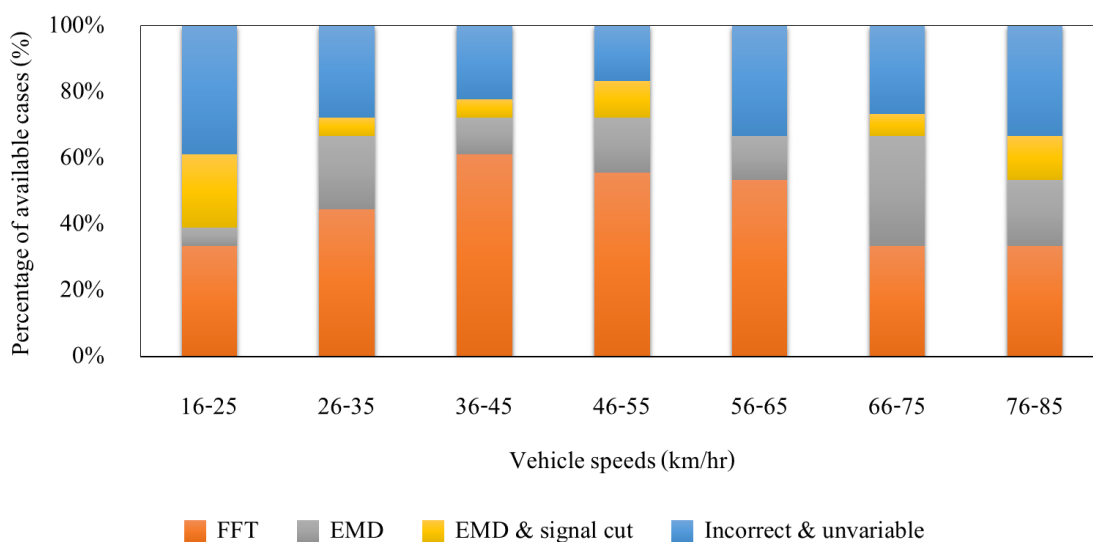
ภาพที่ 4-20 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f\text{direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

จากภาพที่ 4-19 และภาพที่ 4-20 พบว่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f\text{direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถประเภท SUV ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับร้อยละ 50.01 และเมื่อทดสอบโดยใช้รถประเภท Pickup เท่ากับร้อยละ 66.66 แสดงให้เห็นว่ารถประเภท SUV มีระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้ที่น้อยกว่ารถประเภท Pickup

## 2. ความเร็วของยานพาหนะ

การทดสอบนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของยานพาหนะ โดยใช้ความเร็วคงที่อยู่ระหว่าง 20-80 กม./ชม. จากผลการทดสอบพบว่า กรณีที่สามารถระบุค่าความถี่สะพานได้ตรงกับค่าความถี่ที่ได้จากวิธีทางตรง โดยใช้เพียงขั้นตอนการระบุค่าด้วยวิธี FFT แบบทั่วไปของสัญญาณความถี่ที่ได้จากรถยนต์ซึ่งเคลื่อนที่ความเร็วประมาณ 36-45 กม./ชม. มีจำนวนมากที่สุด รองลงมาจะเป็นที่ความเร็วประมาณ 46-55 กม./ชม. และ 56-65 กม./ชม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-21 เนื่องจากในช่วงความเร็วดังกล่าว การสั่นไหวของยานพาหนะมีแอมพลิจูดเพียงพอที่จะกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวและทำให้เกิดคลื่นการสั่นไหวที่ชัดเจน แต่ไม่มากเกินไปจนไปบดบังความถี่ของสะพาน และเมื่อสังเกตที่สัญญาณความถี่และสเปกตรัมของผลตอบสนองในช่วงความเร็วดังกล่าว ซึ่งเป็นช่วงความเร็วปานกลางในการทดสอบ พบว่าการสั่นไหวของรถสอดคล้องกับการสั่นไหวสะพานทำให้สเปกตรัมที่ได้สามารถระบุค่าความถี่ได้ง่ายกว่าช่วงความเร็วอื่น ดังแสดงใน

ภาพที่ 4-22 และภาพที่ 4-23 ส่วนเมื่อผ่านขั้นตอนการ EMD และการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง มีแนวโน้มของช่วงความเร็วที่ไม่ชัดเจน แต่จากการสังเกตจะพบว่าช่วงความเร็วที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีแนวโน้มที่ดีจะเป็นช่วงความเร็วที่ช้าและเร็วกว่าความเร็วที่เหมาะสมหลังผ่านวิธี FFT



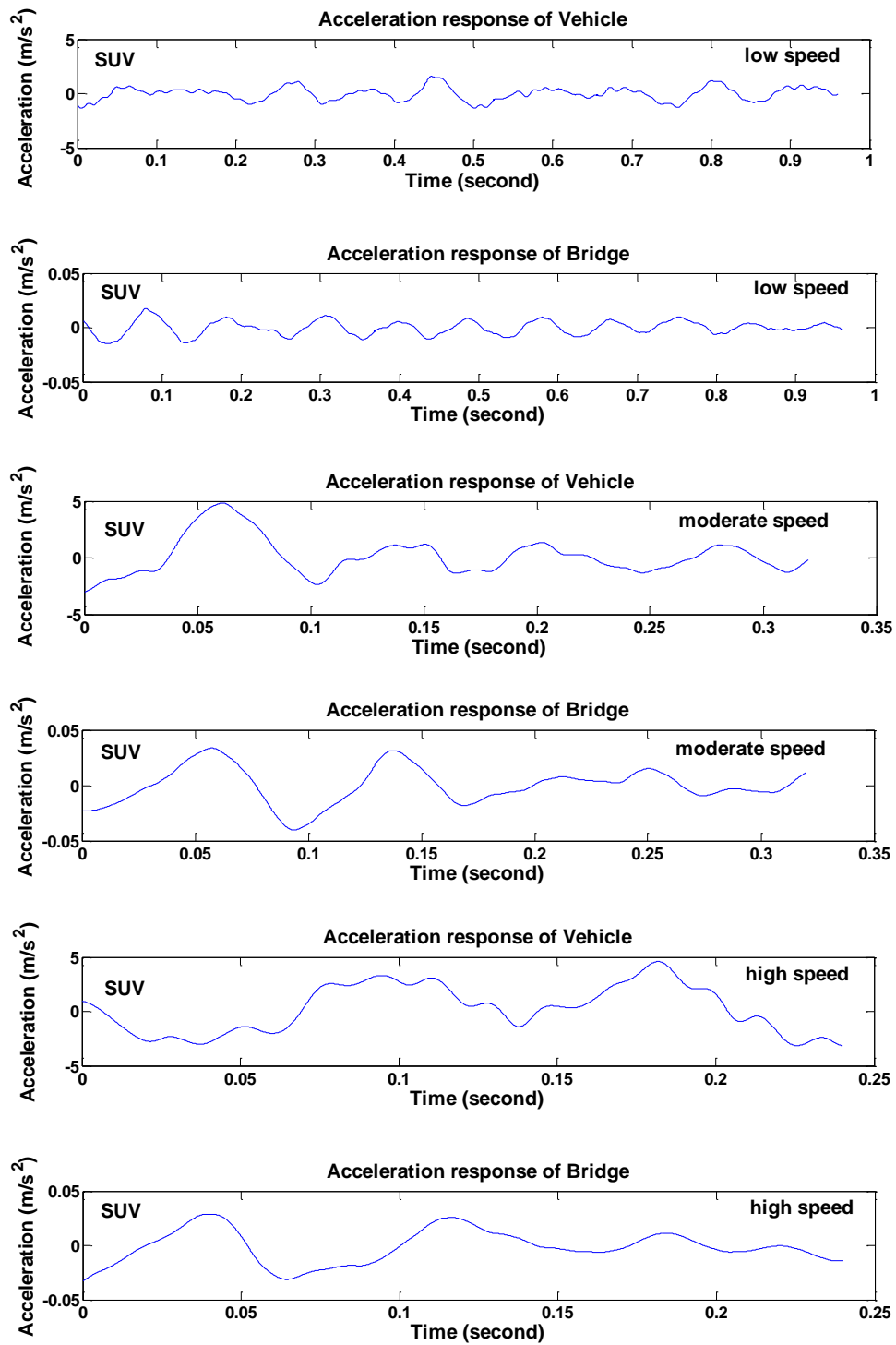
ภาพที่ 4-21 จำนวนกรณีที่ระบุค่าได้หลังผ่านกระบวนการวิเคราะห์ในแต่ละความเร็วทดสอบ กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานเนื่องจากการสัญจรยานพาหนะด้วยความเร็วต่ำ สะพานเกิดการสั่นไหวด้วยแอมพลิจูดที่ต่ำและจำนวนรอบของการสั่นไหวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ยานพาหนะสัญจรด้วยความเร็วสูง ซึ่งทำให้เกิดผลตอบสนองความเร่งที่สะพานน้อย ความถี่สะพานจึงอาจถูกคบบังเนื่องจากสัญญาณรบกวนและการสั่นไหวของรถยนต์เอง ซึ่งจะเกิดค่าความถี่เนื่องจากสั่นไหวของเพลาลังขณะเข้าและออกจากสะพานในช่วงรอยต่อที่ไม่ราบเรียบ การสั่นไหวของยานพาหนะกรณีที่สัญจรด้วยความเร็วจะพบว่ามีค่า  $e_{f_{direct}}$  ที่เกิดขึ้นมีค่ามาก ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงที่สะพาน เนื่องจากช่วงเวลาที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานและทำให้เกิดการสั่นไหวมีช่วงเวลาที่สั้น ทำให้จำนวนรอบที่สะพานสั่นไหวและความละเอียดของข้อมูลจากสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่จะนำไปทำการวิเคราะห์หาค่าลดลง อีกทั้งยานพาหนะจะเกิดการสั่นสะเทือนจากการกระแทกบริเวณรอยต่อที่ช่วงปลายสะพานทั้งสองด้านในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าและออกจากสะพานมากขึ้น ทำให้ผลของค่าความถี่ของยานพาหนะเองมีองค์ประกอบในสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้มาก

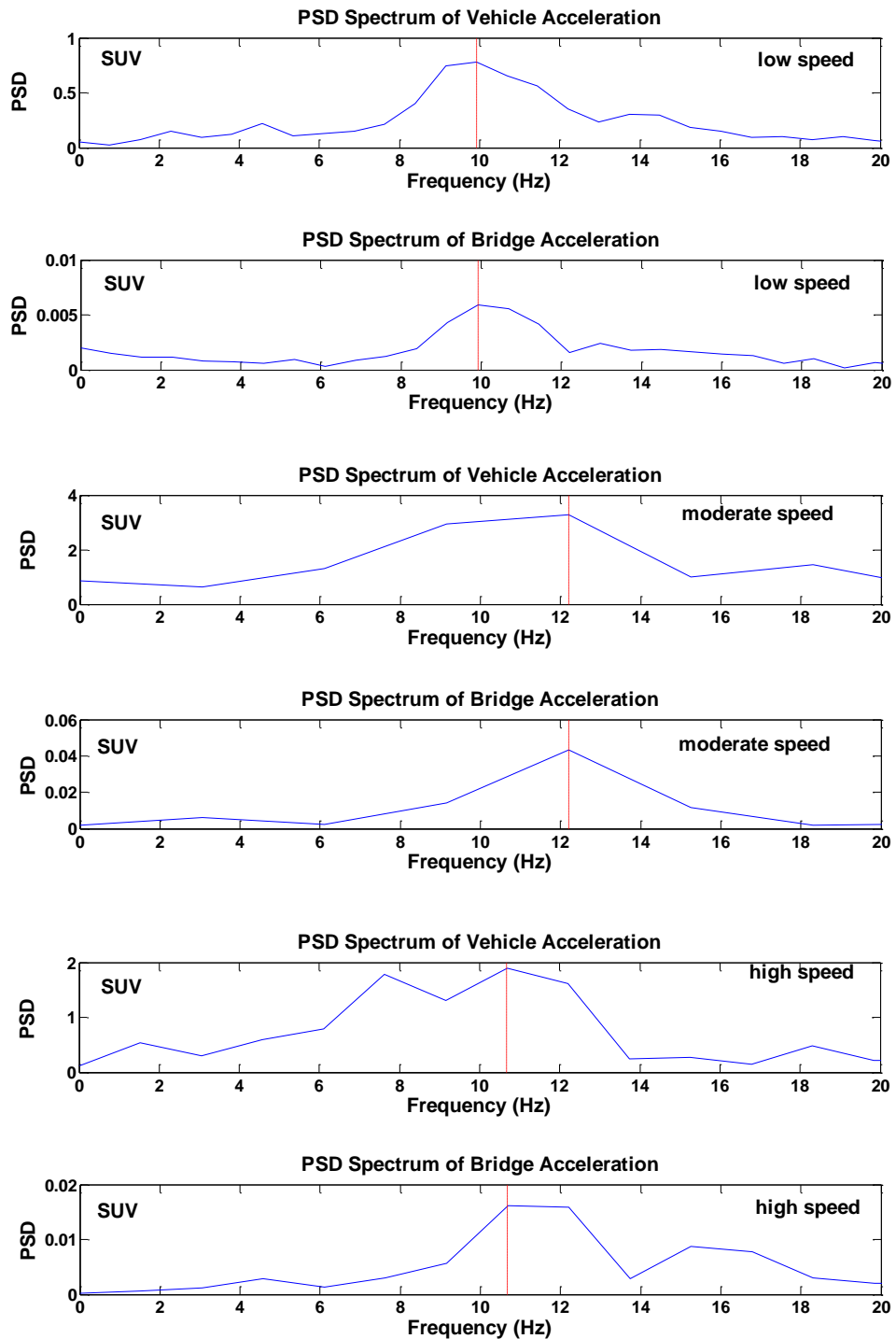
ขึ้น ผลของการสั่นไหวด้วยความถี่ของสะพานจึงสังเกตได้ยากขึ้นในสเปกตรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวถึงผลของความขรุขระที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการระบุค่าความถี่สะพาน (Yang, Lin & Chang, 2012) ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการ EMD ร่วมกับการตัดช่วงสัญญาณความเร่งเพื่อลดผลขององค์ประกอบของความถี่ของยานพาหนะดังกล่าว โดยลักษณะสัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่แตกต่างกันเนื่องจากระดับความเร็วในภาพที่ 4-22 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าลักษณะสัญญาณความเร่งเนื่องจากการสั่นไหวของรถยนต์เทียบกับสะพานในช่วงความเร็วปานกลางจะมีความคล้ายคลึงมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของรถยนต์ในขณะที่เคลื่อนผ่านสะพานนั่นเอง โดยการที่สัญญาณความเร่งมีความสอดคล้องกันมากนั้น บ่งบอกถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถกับสะพานที่เกิดขึ้นได้มาก

ความเร็วของยานพาหนะทดสอบเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งส่งผลต่อการระบุค่าความถี่ของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งอย่างมาก โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเร็วที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งเป็นความเร็วที่แนะนำ คือ ความเร็วยานพาหนะที่ประมาณ 36-55 กม./ชม. จะให้ผลลัพธ์ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วในช่วงอื่น เนื่องจากมีร้อยละของกรณีที่ระบุค่าความถี่ได้ถึงร้อยละ 80.56 และค่าความถี่ที่ระบุ ได้มีค่าตรงกับความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงสูงถึงร้อยละ 90.00 ดังแสดงในภาพที่ 4-24 ส่วนช่วงความเร็วที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะทำให้การระบุค่าความถี่ของสะพานเป็นไปได้ยาก คือ ความเร็วยานพาหนะที่ตั้งแต่ 56 กม./ชม. ขึ้นไป โดยให้ผลที่มีแนวโน้มที่ไม่ดี ทำให้ยากในการระบุค่าความถี่ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ช้ามาก ๆ ที่ความเร็วต่ำ 35 กม./ชม. ที่ความเร็วตั้งแต่ 56 กม./ชม. ขึ้นไป ยังให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มที่แย่กว่าเมื่อเคลื่อนที่ช้ามาก ๆ

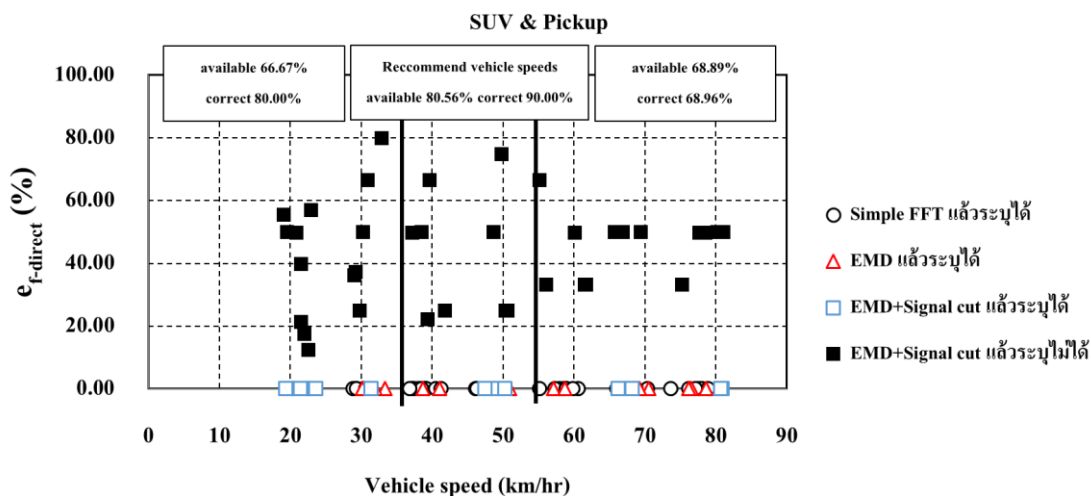




ภาพที่ 4-22 สัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ช่วงความเร็วต่าง ๆ ของรถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพที่ 4-23 สเปกตรัมความถี่ในช่วงความเร็วต่าง ๆ ของรถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่  
คันเดียวบนสะพาน

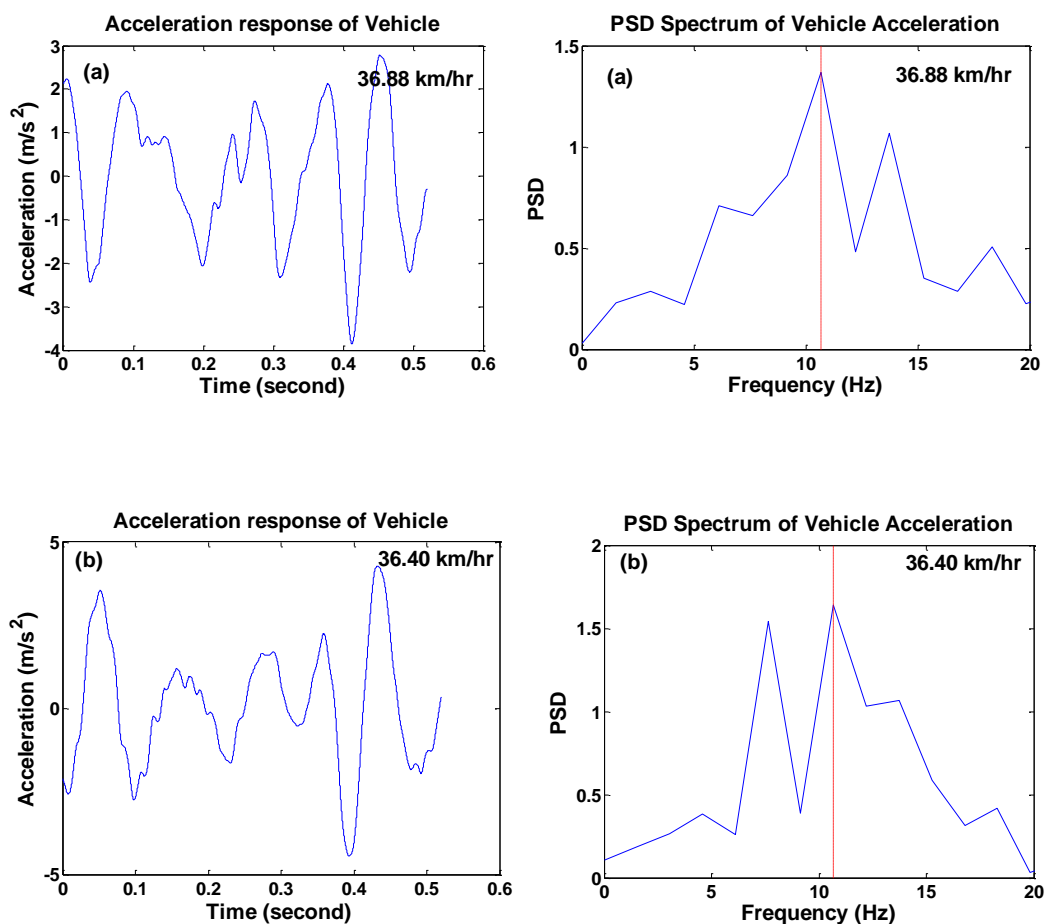


ภาพที่ 4-24 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ( $e_{f\text{-direct}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

### 3. ผลของยานพาหนะคันอื่นบนสะพาน

ในการศึกษานี้ ลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเป็นพารามิเตอร์อีกตัวที่ได้ทำการทดสอบ โดยจะแบ่งได้เป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่บนสะพานเพียงคันเดียวและกรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่บนสะพานมากกว่า 1 คัน โดยผลการทดสอบพบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะกรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่บนสะพานมากกว่า 1 คัน สามารถช่วยเพิ่มแอมพลิจูดของยอดความถี่สะพานในสเปกตรัมความถี่ได้ สังเกตได้จากความถี่ที่เพิ่มขึ้นในสัญญาณความถี่และแอมพลิจูดในสเปกตรัมความถี่จากกรณียานพาหนะมากกว่า 1 คันบนสะพาน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณียานพาหนะเพียงคันเดียวบนสะพาน ถูกแสดงในภาพที่ 4-25 การเพิ่มของแอมพลิจูดดังกล่าวเกิดจากการที่เมื่อมียานพาหนะมากกว่า 1 คัน ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับสะพานมากขึ้นส่งผลทำให้การ โกงตัวของสะพานสูงขึ้น และทำให้ความถี่ของการสั่นไหวเพิ่มขึ้นนั่นเอง แต่จากการทดสอบพบว่าการเพิ่มของแอมพลิจูดนี้จะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่ที่ความเร็วประมาณ 36-55 กม./ชม ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงความเร็วแนะนำ (46-55 กม./ชม) ที่เป็นความเร็วที่เหมาะสมจากการทดสอบผลของความเร็วของยานพาหนะในหัวข้อความเร็วของยานพาหนะ แต่จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเพียงอย่างเดียว โดยไม่ช่วยทำให้ความเค้นซัดของสเปกตรัมเพิ่มขึ้นหรือช่วยทำให้ความถี่ของ

สะพานปรากฏขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับกรณียานพาหนะเพียงคันเดียว ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยในอดีตของ Yang, Chen, Yu and Chan (2013)



ภาพที่ 4-25 สัญญาณความเร่งตรวจวัดและสเปกตรัมความถี่ของรถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพานเปรียบเทียบกับกรณียานพาหนะมากกว่า 1 คัน (a) กรณียานพาหนะคันเดียว (b) กรณียานพาหนะมากกว่า 1 คัน เคลื่อนที่ในทิศสวนทางกัน

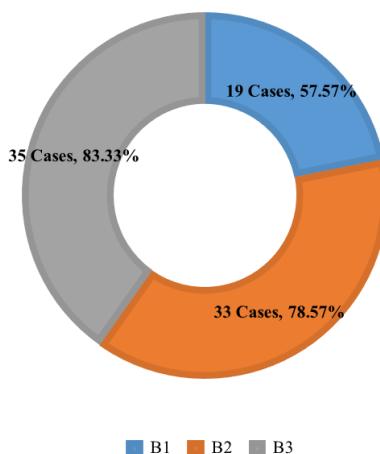
### ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ประเภทและความถี่ของสะพาน

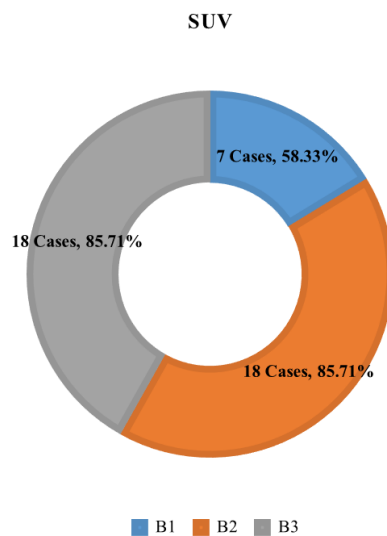
จากสะพานที่ทำการศึกษา 3 แห่ง ซึ่งเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้นทั้ง 3 สะพาน ที่มีความยาวช่วงและค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าสะพานทั้ง 3 สะพาน สามารถระบุค่าความถี่จากผลตอบสนองความเร่งตรวจวัดจากรถยนต์ได้ โดยสะพาน

พ.ศ. 2550 (B1) จำนวน 23 กรณี สะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ (B2) จำนวน 35 กรณี และสะพานห้วยหนองซาก (B3) จำนวน 38 กรณี เมื่อคิดเป็นร้อยละจะเท่ากับ 65.71, 72.92 และ 76.0 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-26 แสดงว่าประเภทและความถี่ของสะพานไม่ได้มีนัยสำคัญต่อการระบุค่าความถี่จากสัญญาณความเร่ง เนื่องจากค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้เทียบกับค่าความถี่ที่ตรวจวัดทางตรงของทั้งสามสะพานด้วยกระบวนการที่นำเสนอมีส่วนที่ใกล้เคียงกัน ประมาณช่วงร้อยละ 57.57-83.33 จากกรณีทดสอบทั้งหมด 133 กรณี เมื่อทดสอบด้วยรถยนต์ทั้งประเภท SUV และ Pickup เมื่อทำการทดสอบกับสะพานที่มีความถี่เพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบความถี่ของสะพานจะสังเกตจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดจากยานพาหนะได้ยากยิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อค่าความถี่ของสะพานและยานพาหนะแตกต่างกันมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันลดลง ทำให้ระบุค่าความถี่ได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาแยกกันระหว่างรถทั้งสองประเภทพบว่า รถทดสอบทั้งสองประเภทให้สัดส่วนของร้อยละกรณีที่มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน แต่กรณีใช้รถทดสอบประเภท SUV จะได้รับร้อยละกรณีที่มีแนวโน้มที่ต่ำกว่า เมื่อใช้รถทดสอบประเภท Pickup ดังแสดงในภาพที่ 4-27 และภาพที่ 4-28 ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของรถประเภท SUV ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากหัวข้อประเภทของยานพาหนะ

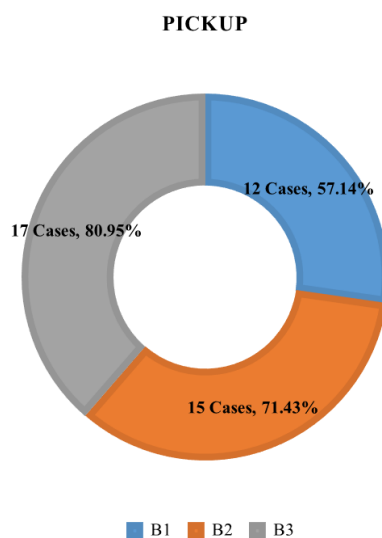
SUV &amp; PICKUP



ภาพที่ 4-26 จำนวนกรณีที่สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ของยานพาหนะทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



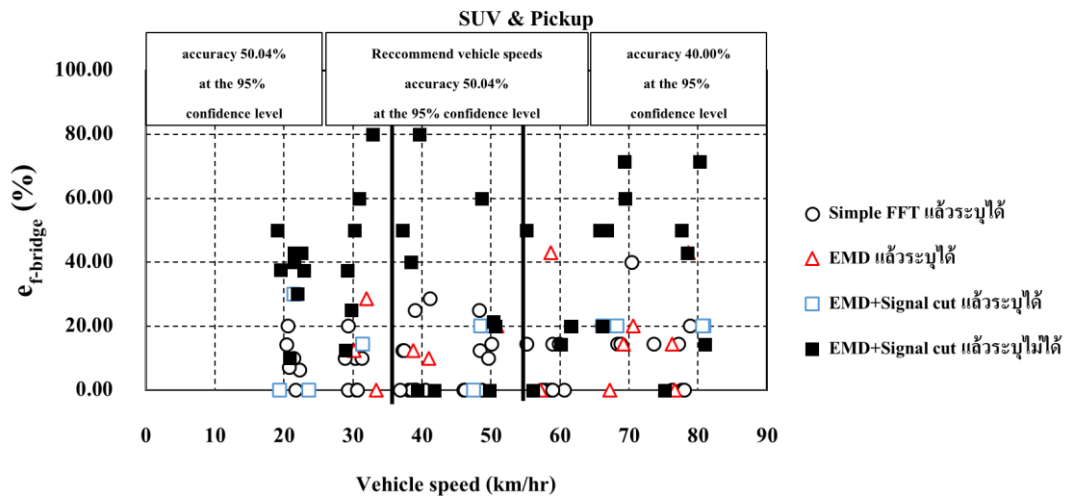
ภาพที่ 4-27 จำนวนกรณีที่สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ของรถประเภท SUV  
กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



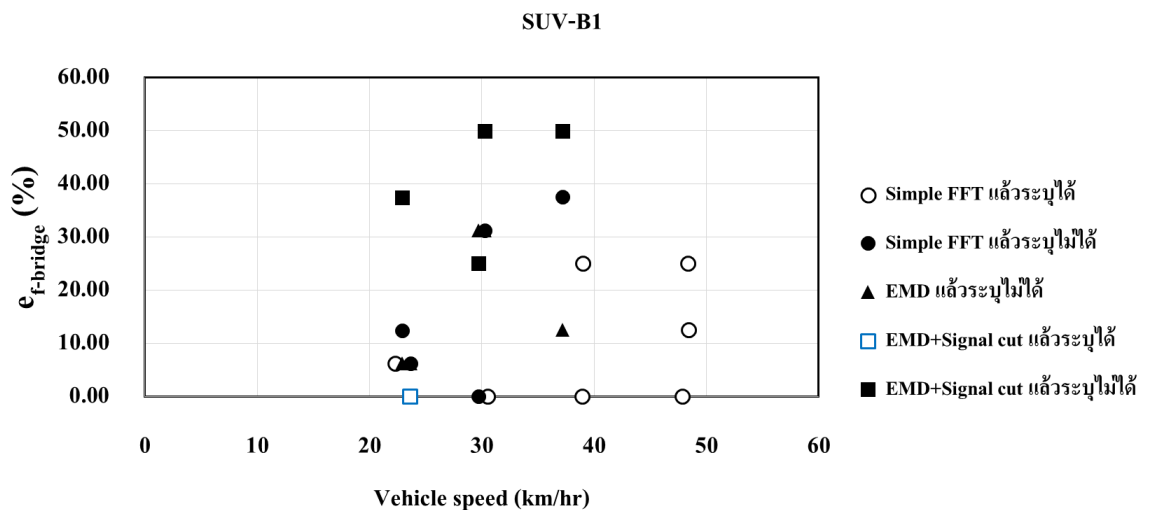
ภาพที่ 4-28 จำนวนกรณีที่สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ของรถประเภท Pickup  
กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

### ความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน

ในการทดสอบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ระบุได้จากกระบวนการที่ได้นำเสนอ กับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งใต้สะพานเพื่อหาระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่สามารถระบุได้ พบว่าระดับความถูกต้องของความถี่ที่ระบุได้จากวิธีทางอ้อมหลังจากผ่านกระบวนการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ที่ร้อยละ 40.00 เทียบกับค่าความถี่จริงของสะพานที่ทำการวัดก่อนการทดสอบ ซึ่งถ้าหากว่าในการทดสอบใช้ความเร็วยานพาหนะที่ได้แนะนำ คือ ที่ 36-55 กม./ชม จะสามารถเพิ่มระดับความถูกต้องได้เป็นร้อยละ 50.04 ดังแสดงในภาพที่ 4-29 และพบอีกว่าความถี่ที่ระบุได้จากสัญญาณความเร่งของรถประเภท SUV มีระดับความถูกต้องมากกว่ารถประเภท Pickup ดังแสดงในภาพที่ 4-30 ถึงภาพที่ 4-35 โดยจะแสดงเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ( $e_{f_{bridge}}$ ) เนื่องจากว่าพฤติกรรมของรถ SUV มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ซึ่งระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่ได้นำเสนออยู่ในช่วงร้อยละ 50.04 และร้อยละ 40.00 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับรถประเภท SUV และ Pickup ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-36 และภาพที่ 4-37 โดยจากระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่ได้จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงความยากลำบากในการระบุค่าความถี่จริงของสะพาน เนื่องจากว่าในการหาค่าความถี่จริงของสะพานนั้นมีความซับซ้อนสูงและจากงานวิจัยในอดีตของ Cantero and Obrien (2013) ; Lalthlamuana and Talukdar (2016) พบว่า ในการวัดความถี่ด้วยวิธีการวัดทางตรงนั้นค่าความถี่ที่ได้ยังมีค่าบิดเบือนไปจากค่าจริงด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนมวลของยานพาหนะกับสะพาน รวมทั้งผลจากลักษณะการเคลื่อนที่และตำแหน่งของยานพาหนะด้วย

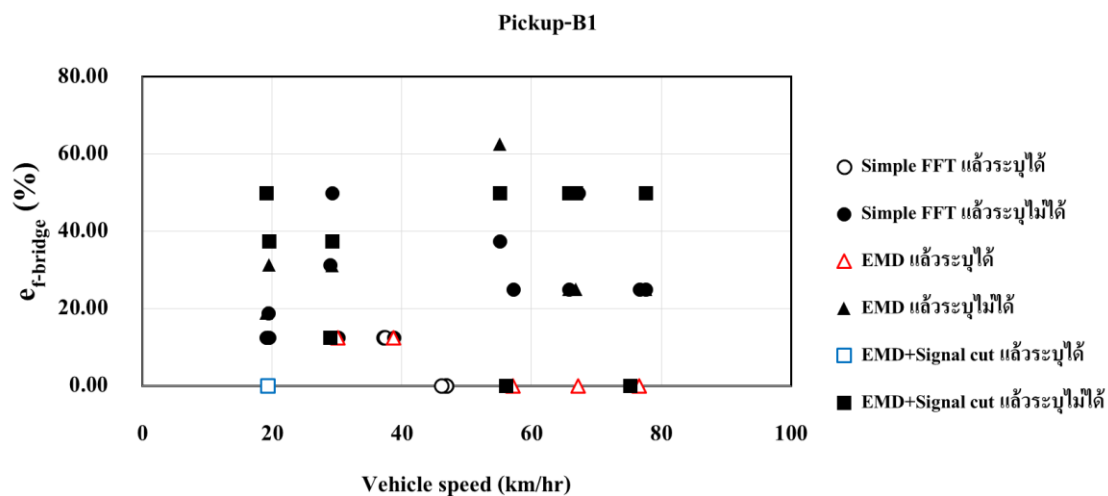


ภาพที่ 4-29 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถทั้งสองประเภท กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

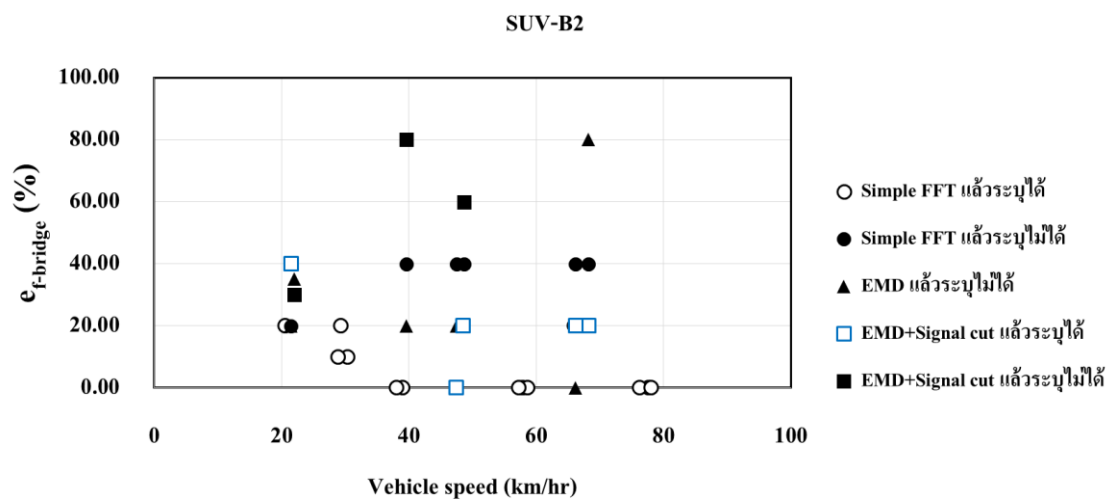


ภาพที่ 4-30 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

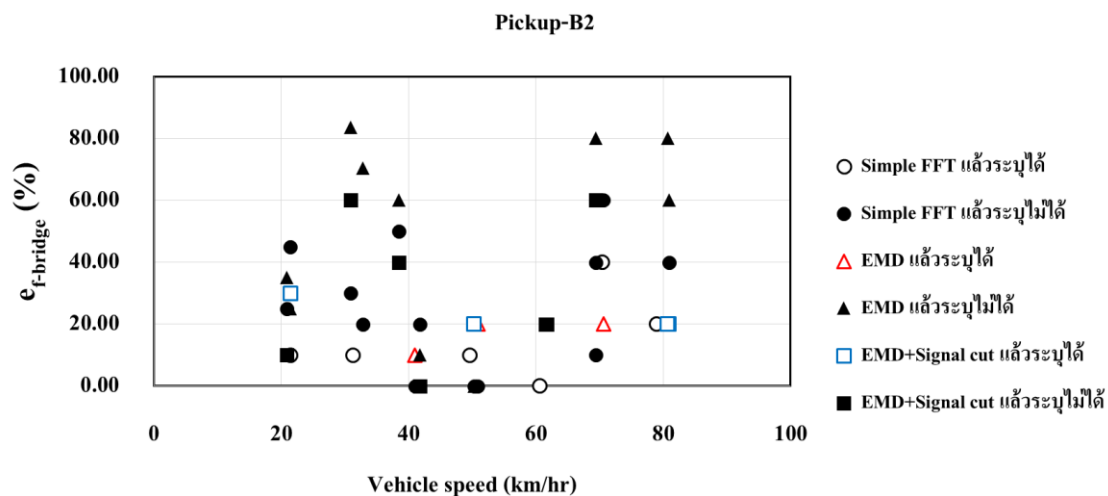




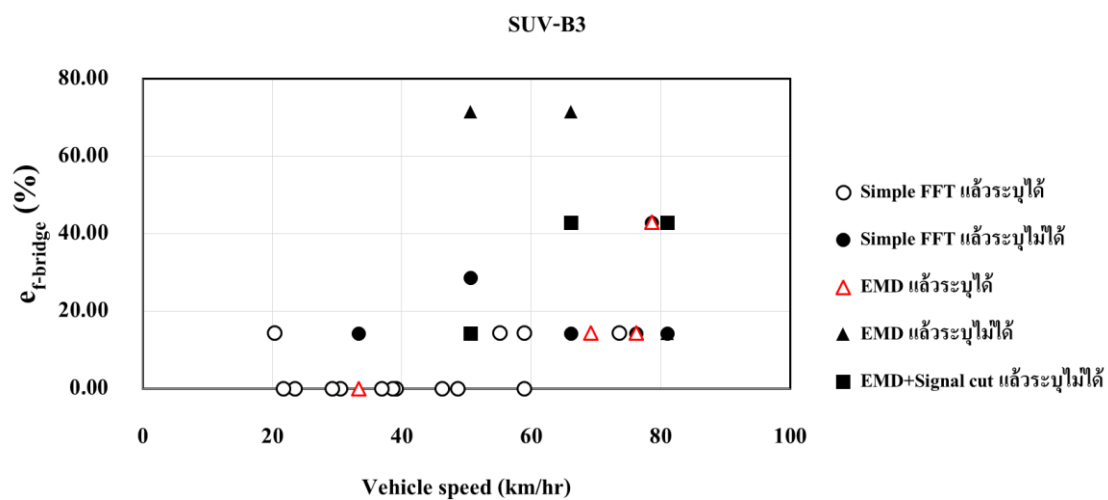
ภาพที่ 4-31 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพาน พ.ศ. 2550 ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



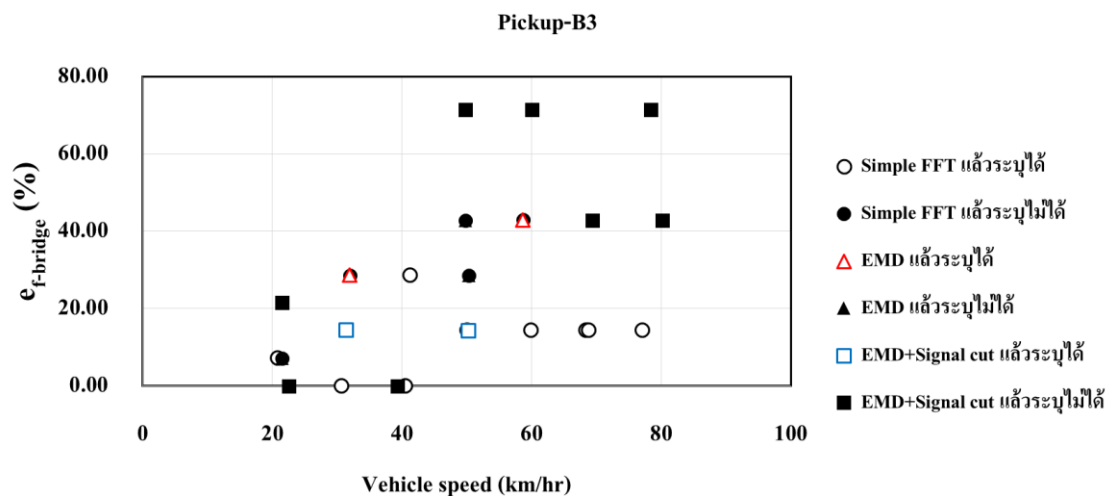
ภาพที่ 4-32 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



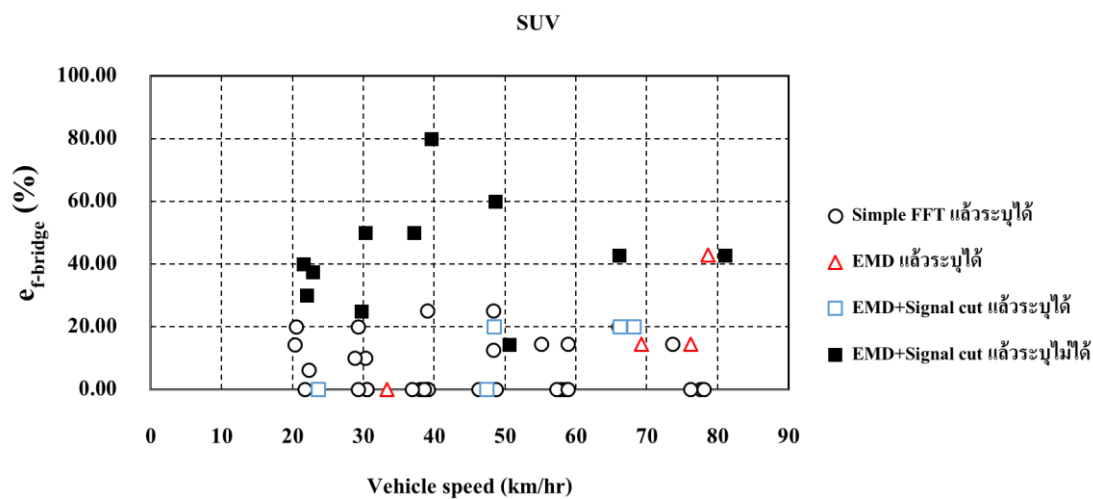
ภาพที่ 4-33 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์ ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



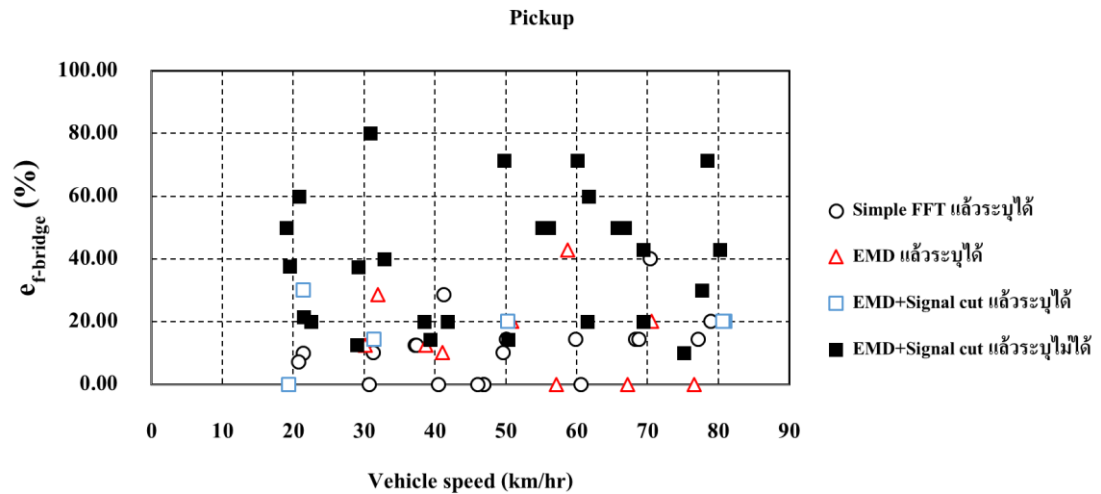
ภาพที่ 4-34 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพที่ 4-35 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานห้วยหนองซาก ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพที่ 4-36 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ SUV กรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพที่ 4-37 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ( $e_{f_{bridge}}$ ) ของสะพานทั้งสามสะพาน ทดสอบโดยใช้รถ Pickup กรณียานพาหนะทดสอบ เคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

จากผลการศึกษาทดสอบทั้งหมดในภาคสนาม หลังจากผ่านกระบวนการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วย 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่ 1) วิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Simple FFT) 2) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ร่วมกับวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ (EMD + Signal cut) และจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการหาค่าความถี่ธรรมชาติ สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยดังกล่าวจะแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แต่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญในการทดสอบ คือ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งประกอบไปด้วย ประเภทของยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะ และยานพาหนะคันอื่นบนสะพาน โดยปัจจัยที่กล่าวมาทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือเลือกใช้ให้เหมาะสมได้ในการนำวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมไปใช้งาน เพื่อให้สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการนำวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมไปใช้เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานควรเลือกใช้ยานพาหนะทดสอบที่ช่วงล่างมีความหน่วงสูง สัญจรด้วยความเร็วในช่วง 36-55 กม./ชม. และการมียานพาหนะคันอื่นบนสะพานจะทำให้ความถี่ตรวจวัดที่ได้มีขนาดมากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งบุคคล รวมทั้งผลจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาแนวทางการทดสอบและกระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถระบุได้จากผลตอบสนองความถี่ การสั่นสะเทือนของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยการวิเคราะห์ความถี่ด้วยกระบวนการที่นำเสนอที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) วิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Simple FFT) 2) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ร่วมกับการตัดช่วงสัญญาณความถี่ (EMD & Signal cut) พบว่าสามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้คิดเป็นร้อยละ 73.68 ของกรณีทดสอบทั้ง และค่าความถี่ที่ระบุได้มีค่าตรงกับค่าจากการวัดทางตรงคิดเป็น 79.67 ของกรณีที่ระบุค่าความถี่ได้ ดังนั้นวิธีการทดสอบทางอ้อมสามารถที่จะนำมาใช้แทนวิธีการทดสอบทางตรงได้ในกรณีส่วนใหญ่

#### 2. ปัจจัยที่มีผลต่อการระบุค่าความถี่ธรรมชาติ

2.1 ประเภทของยานพาหนะไม่ได้มีผลต่อความเด่นชัดของสเปกตรัมความถี่อย่างมีนัยสำคัญ แต่อาจจะส่งผลต่อแอมพลิจูดของความถี่ของสะพานที่ระบุได้ โดยรถยนต์ส่วนบุคคลทั้งประเภท SUV และ Pickup ที่นำมาศึกษาสามารถนำมาใช้ระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ ทั้งนี้ลักษณะของช่วงล่างที่มีค่าความหน่วงสูง จะทำให้ความถี่ของสะพานที่ระบุได้เด่นชัดกว่าช่วงล่างที่มีค่าความหน่วงต่ำและการสั่นไหวที่เกิดขึ้นยังมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับสะพาน ดังเช่นผลการวิจัยนี้ ซึ่งพบว่ารถยนต์ประเภทที่มีช่วงล่างนุ่มนวลหรือมีความหน่วงสูงกว่าจะเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่ารถยนต์ประเภทที่ช่วงล่างมีความนุ่มนวลน้อยและมีความหน่วงที่ต่ำ

2.2 ความเร็วของยานพาหนะเป็นปัจจัยหลักที่ต้องให้ความสำคัญในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณความถี่ โดยความเร็วของยานพาหนะที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความเร็วประมาณ 36-55 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงความเร็วที่เพียงพอต่อการกระตุ้นการสั่นไหวของสะพาน และทำให้เกิดคลื่นการสั่นไหวที่ชัดเจน โดยที่พฤติกรรมการสั่นไหวยานพาหนะยังคงสอดคล้องกับพฤติกรรมของสะพาน

2.3 ประเภทและความถี่ธรรมชาติของสะพานไม่ได้มีนัยสำคัญต่อการระบุค่าความถี่ของสะพาน โดยวิธีการทดสอบทางอ้อม ซึ่งแสดงว่าวิธีการทดสอบทางอ้อมสามารถใช้ได้กับสะพานทุกประเภทและมีแนวโน้มที่ดีเมื่อทดสอบกับสะพานที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดจากยานพาหนะ

3. ระดับความถูกต้องของค่าความถี่จริงของสะพานที่สามารถระบุได้จากสัญญาณความเร่งตรวจวัดจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลประเภท SUV มีระดับความถูกต้องที่มากกว่ารถยนต์ประเภท Pickup โดยระดับความถูกต้องของค่าความถี่จริงของสะพานที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่นำเสนอเท่ากับร้อยละ 50.04 และร้อยละ 40.00 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรถประเภท SUV และ Pickup ตามลำดับ ทั้งนี้การประเมินความถี่ธรรมชาติจริงจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่แล้วเนื่องจากผลของพฤติกรรมจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะและสะพาน

4. ผลของยานพาหนะคันอื่นที่อยู่บนสะพาน ในขณะที่ทำการตรวจวัดผลตอบสนองความเร่ง พบว่ายานพาหนะคันอื่นที่อยู่บนสะพานทำให้ขนาดของความเร่งตรวจวัดมากขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดของสเปกตรัมความถี่ที่ระบุได้มากขึ้น แต่ไม่ได้ทำให้สามารถระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณียานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่เพียงคันเดียวบนสะพาน

## ข้อเสนอแนะ

### ข้อเสนอแนะในการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยประเภทยานพาหนะและจำนวนสะพานที่จำกัด ซึ่งยังมีสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างและความยาวช่วงที่แตกต่างกันออกไป เช่นเดียวกับรถยนต์อีกหลายประเภทที่ยังไม่ได้ถูกนำมาทดสอบ โดยมีลักษณะช่วงล่างที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของประเภทและช่วงล่างให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนากระบวนการทดสอบแบบทางอ้อมเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

### ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้

จากการศึกษาและการทดสอบภาคสนามในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการนำวิธีการทดสอบทางอ้อมไปใช้แทนการทดสอบทางตรง แต่วิธีการทดสอบทางอ้อมและกระบวนการวิเคราะห์ที่นำเสนอยังมีข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถใช้แทนการทดสอบทางตรงได้ในทุกกรณี ดังนั้นในการนำไปใช้งานควรเลือกใช้ยานพาหนะและความเร็วที่แนะนำ เพื่อให้ความถี่ที่ระบุได้สอดคล้องกับค่าจากวิธีการวัดทางตรง และวิธีการดังกล่าวเหมาะที่จะนำมาใช้เพื่อคัดกรองสะพานที่อาจเกิดความเสียหายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ หลังจากการตรวจวัดที่เป็นรอบ (Routine) ตามระยะเวลาที่กำหนด มากกว่าการหาค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน

## บรรณานุกรม

- อานนท์ นิยมสุข และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา. (2558). *การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20. ชลบุรี.
- อานนท์ นิยมสุข และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา. (2559). *การทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งการสั่นสะเทือนของยานพาหนะ*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21. สงขลา.
- Cantero Daniel & Obrien Eugene J. (2013). *Tracing the evolution of bridge natural frequencies as a vehicle traverses the bridge*. 11<sup>th</sup> International Conference on Vibration Problems. Lisbon.
- Chang K.C., Wu F.B., & Yang Y.B. (2010). *Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle*. Interaction and Multiscale Mechanics, 3(4), 299-308.
- Keenahan J., McGetrick P.J., Gonzalez A. & OBrien E.J. (2013). *The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping*. Structural Health Monitoring, 13(2), 143-157.
- Kim C.W., Isemoto R., Toshinami T., Kawatani M., McGetrick P.J. & O'Brien E.J. (2011). *Experimental Investigation of Drive-by Bridge Inspection*. 5<sup>th</sup> International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Cancún.
- Lalthlamuana R. & Talukdar S. (2016). *Conditions of visibility of bridge natural frequency in vehicle vertical acceleration*. 12<sup>th</sup> International Conference on Vibration Problems, 144, 26-33.
- McGetrick P.J. & Obrien E.J. (2015). *A review of indirect bridge monitoring using passing vehicles*. Shock and Vibration.
- McGetrick P.J., Gonzalez A. & OBrien E.J. (2009). *Theoretical investigation of the use of a moving vehicle to identify bridge dynamic parameters*. Insight Non-Destructive , 51(8), 433-438.

- Miyamoto A. & Yabe A. (2011). *Bridge condition assessment based on vibration response of passenger vehicle*. 9<sup>th</sup> International Conference on Damage Assessment of Structures. Damas.
- Siringoringo D.M. & Fujino Yozo. (2011). *Estimating Bridge Fundamental Frequency from Vibration Response of Instrumented Passing Vehicle: Analytical and Experimental Study*. *Advances in Structural Engineering*, 15(3), 443-459.
- Yang Y.B. & Chang K.C. (2009a). *Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle: parametric study*. *Engineering Structures*, 31(10), 2448-2459.
- Yang Y.B. & Chang K.C. (2009b). *Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique*. *Journal of Sound and Vibration*, 32(4), 718-739.
- Yang Y.B. & Lin C.W. (2005). *Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification*. *Engineering Structures*, 27(13), 1865-1878.
- Yang Y.B., Lin C.W. & Yau J.D. (2004). *Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle*. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), 471-493.
- Yang Y.B., Chang K.C. & Li Y.C. (2013). *Filtering techniques for extracting bridge frequencies from a test vehicle moving over the bridge*. *Engineering Structures*, 48, 353-362.
- Yang Y.B., Chang K.C. & Wu F.B. (2010). *Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle*. *Interaction and Multiscale*, 3(4), 299-308.
- Yang Y.B., Chen W.F., Yu H.W. & Chan C.S. (2013). *Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies*. *Engineering Structures*, 57, 222-231.
- Yang Y.B., Lin Y.C. & Chang K.C. (2012). *Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: a theoretical study*. *Acta Mechanica*, 223(8), 1851-1861 .



ภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 ค่าความถูกต้องของเวลาที่ได้หลังจากกระบวนการวิเคราะห์ กรณียานพาหนะคันเดียวบนสะพาน

สะพาน	ยานพาหนะ	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	Simple FFT	$e_{f_{direct}}$ (%)				$e_{f_{bridge}}$ (%)					
					EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple FFT	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	
						cut	cut	cut>EMD			cut	cut	cut>EMD	
B1	V1	คันเดียว	22.31	0					6.22					
			23.63	5.54	54.55	0	12.49	12.49	6.22	6.22	0	12.49	12.49	
			30.54	0					0					
			29.72	6.73	26.64	25.02	63.14	63.14	0	31.27	25.02	63.14	63.14	
			30.25	26.64	26.64	50.01	12.53	12.53	31.27	31.27	50.01	12.53	12.53	
			39.04	0					24.98					
			37.15	44.44	22.21	49.96	63.14	63.14	37.52	12.53	49.96	63.14	63.14	
			38.98	0					0					
			47.86	0					0					
			48.43	0					12.45					
			48.36	0					25.02					

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดสะพาน	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B1	V2	คันเดียว	19.37	46.88	34.60	0	12.53	0	18.77	0	0	12.53	0
			28.95	35.30	17.66	36.35	18.18	9.06	31.27	12.53	12.53	12.45	24.98
			30.17	22.21	0		78.15	12.45	12.53	12.45		75.43	12.45
			37.20	0					12.45				
			37.41	0					12.45				
			38.71	22.21	0		10.03	0	12.53	12.45		12.45	24.98
			46.88	0					0				
			46.89	0					0				
			46.09	0					0				
			57.14	25.02	0				25.02	0			
			56.06	11.07	11.07	33.32	16.66	16.66	0	0	0	24.98	24.98

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดสะพาน	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B1	V2	คันเดียว	55.10	28.57	57.13	66.66	33.32	33.32	37.52	62.51	50.01	0	0
			66.80	49.96	25.02	50.01	0		49.96	25.02	50.01	0	
			65.72	25.02	25.02	50.01	50.86	50.86	25.02	25.02	50.01	50.86	50.86
			67.22	50.01	0		0		50.01	0		0	
			75.17	19.99	19.99	33.32	50.00	33.32	0	0	0	25.02	0
			76.60	25.02	0		0		25.02	0		0	
B2	V1	คันเดียว	21.98	12.53	18.77	17.66	50.01	50.01	30.01	35.01	30.01	60.00	60.00
			21.51	19.99	19.99	40.01	50.01	50.01	19.99	19.99	40.01	60.00	60.00
		20.57	0					19.99					
		30.33	0					10.03					
		29.32	0					19.99					

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดพาดหน้า	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)					
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD	
B2	V1	คัน	28.85	0					10.03					
		เดียว	39.04	0					0					
				39.64	25.02	49.96	66.66	33.37	33.37	40.01	19.99	80.00	19.99	19.99
				38.09	0					0				
				48.48	49.96	49.96	0	0		19.99	19.99	19.99	19.99	
				48.65	25.02	50.01	50.01	50.01	50.01	40.01	60	60.00	60.00	60.00
				47.45	40.01	19.99	0	50.01	50.01	40.01	19.99	0	60.00	60.00
				57.95	0					0				
				58.65	0					0				
				57.31	0					0				
				68.23	25.02	74.99	0	0		40.01	79.99	19.99	19.99	

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ยานพาหนะ	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B2	V1	กั้น	66.21	25.02	24.98	0	19.99	79.99	40.01	0	19.99	19.99	79.99
		เดี่ยว	66.05	0					19.99				
			77.63	0					0				
			76.23	0					0				
			78.05	0					0				
B2	V2	กั้น	21.44	0					9.96				
		เดี่ยว	21.41	35.30	11.80	0	30.01	30.01	45.01	25.03	30.01	30.01	30.01
			20.85	21.10	31.60	49.97	24.98	24.98	25.03	35.01	10.03	24.98	24.98
			31.30	0					10.03				
			32.84	19.99	70.51	79.99	22.21	22.21	19.99	70.51	79.99	22.21	22.21
			41.03	11.14	0				0	10.03			

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดพาดหน้า	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B2	V2	คันเดียว	38.45	37.52	50.01	50.00	33.32	33.32	50.01	60.00	40.01	19.99	19.99
			49.66	0					10.03				
			50.26	24.98	24.98	0	50.01	19.99	0	0	19.99	60.00	0
			50.88	24.98	0				0	19.99			
			61.54	19.99	19.99	33.32	32.95	32.95	19.99	19.99	19.99	19.99	19.99
			61.67	19.99	19.99	33.32	32.95	32.95	19.99	19.99	19.99	19.99	19.99
			60.63	0					0				
			69.40	25.02	75.00	50.01	25.02	0	40.01	80.00	60.00	40.01	19.99
			70.59	12.45	0				10.03	19.99			
			70.42	0					40.01				
			78.90	0					19.99				

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดพาดหน้า	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B2	V2	คันเดียว	80.90	50.01	50.01	0	50.01	0	60.00	60.00	19.99	60	19.99
			80.67	25.02	75.00	0	25.02	50.01	40.01	80.00	19.99	40.01	60.00
B3	V1	คันเดียว	20.38	0					14.28				
			23.48	0					0				
			21.74	0					0				
			30.56	0					0				
			29.32	0					0				
			33.34	14.28	0		25.02	50.01	14.28	0		14.28	42.85
			39.18	0					0				
			38.57	0					0				
			36.88	0					0				



ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดสะพาน	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B3	V1	กั้นเดี่ยว	46.28	0					0				
			48.72	0					0				
		58.91	0					14.33					
		55.19	0					14.33					
		58.91	0					0					
		66.12	25.02	75	50.01	0	14.28	71.42	42.85	14.33			
		69.23	25.02	0		0	14.28	14.33		14.33			
		73.64	0				14.33						
		81.02	24.98	25.02	50.01	0	42.88	14.28	42.85	14.33			
		78.64	19.99	0			14.33	42.88					
		76.23	25.02	0			14.28	14.33					

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาด สะพาน	จำนวน รถบน สะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B3	V2	คัน	22.52	30.01	30.01	12.53	33.31	33.31	0	0	0	28.57	28.57
		เดี่ยว	20.78	0					7.13				
			31.40	5.86	5.86	0	11.07	0	14.33	14.33	14.33	14.33	14.33
			31.98	22.21	0		0	11.07	0	28.56		22.21	14.33
			30.68	0					0				
			40.50	0					0				
			39.32	22.21	22.21	22.21	25.02	50.01	0	0	0	14.28	14.28
			41.22	0					28.56				
			50.31	37.52	12.45	25.02	25.02	14.28	28.57	28.56	14.28	14.28	14.28
			49.77	37.52	50.01	75.00	12.45	50.01	28.57	42.85	71.42	28.56	14.28
			50.08	0					14.33				

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

สะพาน	ขนาดสะพาน	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B3	V2	คันเดียว	59.89	0					14.33				
			58.7	19.99	0		50.01	50.01	14.33	42.88		42.85	42.85
			60.11	49.96	49.96	49.96	49.96	49.96	71.44	71.44	71.44	71.44	71.44
			68.35	0					14.33				
			68.79	0					14.33				
			69.38	24.98	50.01	50.01	25.02	25.02	42.88	42.85	42.85	14.28	14.28
			80.20	25.02	50.01	50.01	50.01	50.01	14.28	42.85	42.85	42.85	42.85
			77.14	0					14.33				
			78.45	49.96	49.96	49.96	50.01	0	71.44	71.44	71.44	42.85	14.28

ตารางภาคผนวกที่ 2 ค่าความถูกต้องของควมถี่ที่ได้หลังจากกระบวนการวิเคราะห์ กรณียานพาหนะมากกว่า 1 คัน บนสะพาน

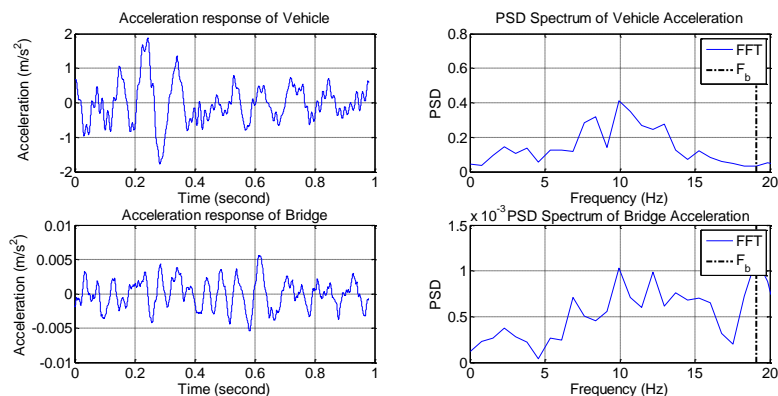
สะพาน	ยานพาหนะ	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B1	V1	มาก	44.30	0					37.43				
		กว่า	42.02	5.54	54.55	12.53	12.49	12.49	12.49	6.22	0	24.98	12.49
		1 คัน	53.38	20.02	13.37	57.12	28.59	0	12.45	6.22	37.43	25.02	12.53
	V2		50.00	0					0				
			37.54	6.73	26.64	25.02	63.14	63.14	0	31.27	25.02	63.14	63.14
			44.63	26.64	26.64	0	12.53	12.53	31.27	31.27	50.01	12.53	12.53
			35.92	25.02	50.01	50.01	31.27	25.02	12.45	60.00	19.99	60	19.99
B2	V1		21.98	44.44	22.21	49.96	63.14	63.14	37.52	12.53	49.96	63.14	63.14
			35.82	37.52	12.45	25.02	25.02	14.28	0	28.56	14.28	22.21	14.33
			23.19	0					0				
			21.04	33.31	13.3	21.44	30.01	30.01	12.45	42.85	42.85	42.85	42.85

ตารางภาคผนวกที่ 2 (ต่อ)

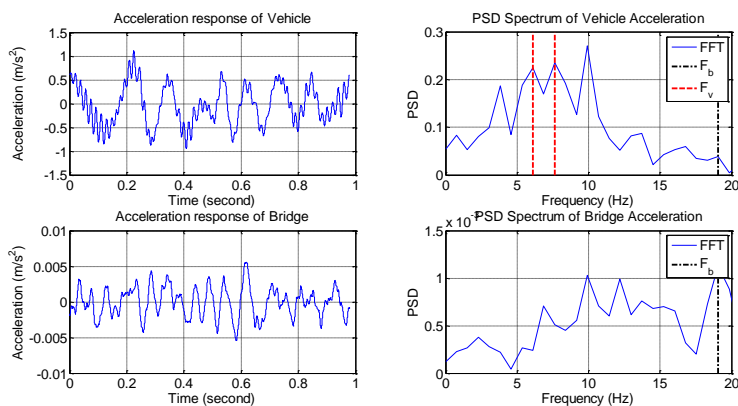
สะพาน	ยานพาหนะ	จำนวนรถบนสะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B2	V2	มาก	38.04	5.86	0		11.07	0	25.02	0		14.28	14.28
		กว่า	19.51	0					0				
		1 คัน	31.07	5.54	54.55	0	12.49	12.49	12.53	6.22	0	12.49	12.49
			34.41	20.02	13.37	57.12	28.59	0	12.45	6.22	37.43	12.49	12.53
			32.58	0					0				
B3	V1		36.40	6.73	26.64	25.02	63.14	63.14	5.54	31.27	25.02	63.14	63.14
			20.97	0					0				
			25.31	0					24.98				
			35.96	0					0				
			28.42	0					0				
	V2	32.24	0					0					

ตารางภาคผนวกที่ 2 (ต่อ)

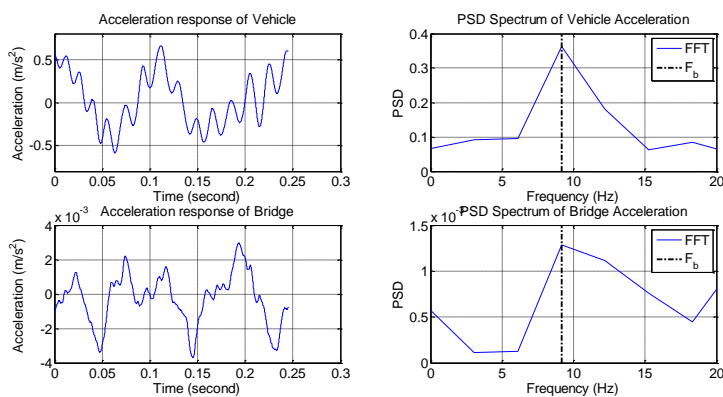
สะพาน	ยานพาหนะ	จำนวน รถบน สะพาน	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{direct}}$ (%)					$e_{f_{bridge}}$ (%)				
				Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal	Simple	EMD	EMD>Signal	Signal	Signal
				FFT		cut	cut	cut>EMD	FFT		cut	cut	cut>EMD
B3	V2	มาก	47.02	0					0				
		กว่า	24.60	11.07	22.21	24.98	37.43	12.45	25.02	12.45	24.98	31.27	37.52
		1 คัน	32.17	6.73	26.64	25.02	63.14	63.14	19.99	19.99	33.32	32.95	32.95
			23.51	26.64	26.64	50.01	12.53	12.53	19.99	19.99	33.32	32.95	32.95



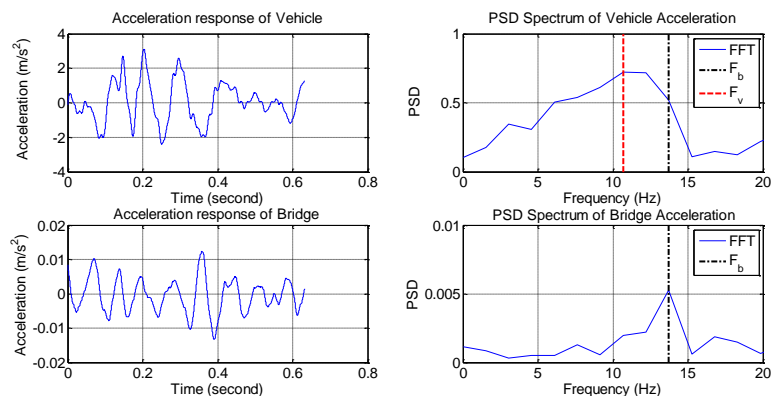
ภาพภาคผนวกที่ 1 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 19.37 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



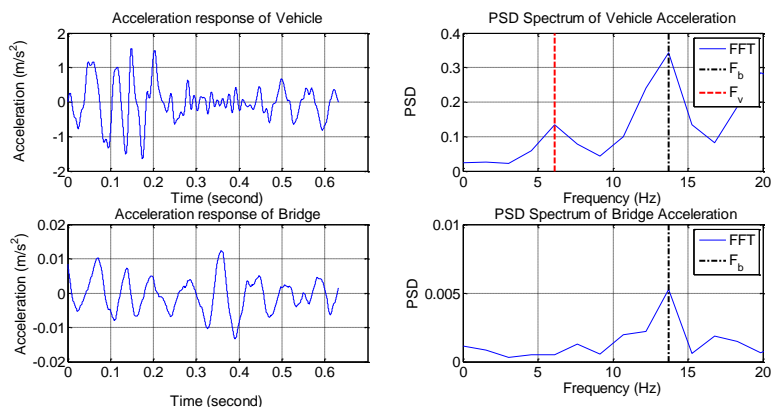
ภาพภาคผนวกที่ 2 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 19.37 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



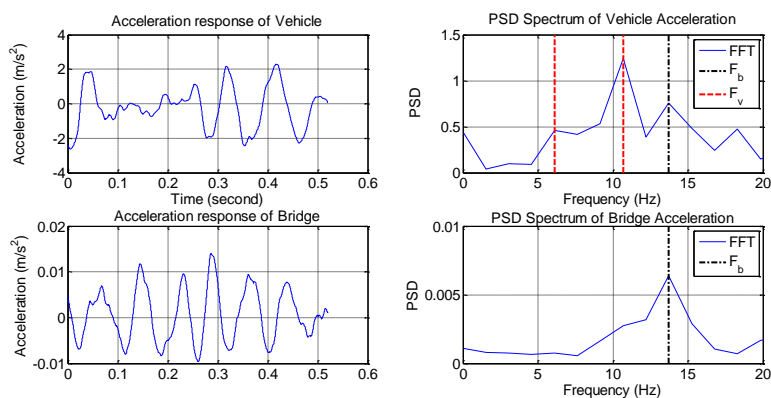
ภาพภาคผนวกที่ 3 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการตัดสัญญาณของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 19.37 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพภาคผนวกที่ 4 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 30.17 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

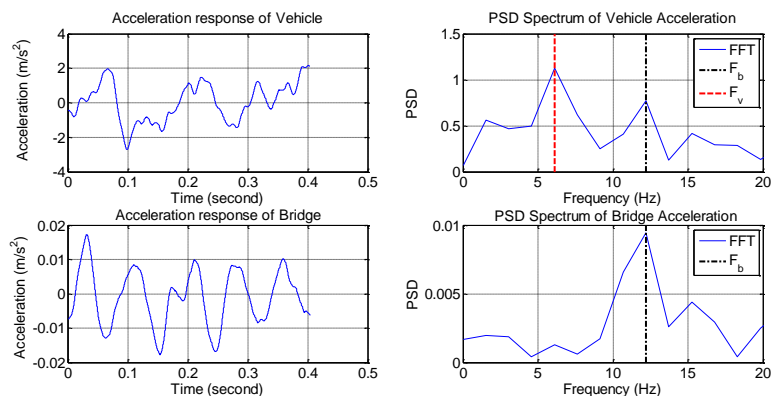


ภาพภาคผนวกที่ 5 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 30.17 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

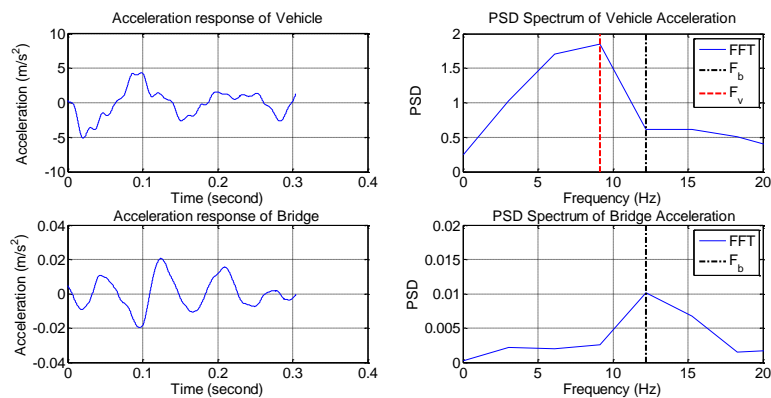


ภาพภาคผนวกที่ 6 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 37.20 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

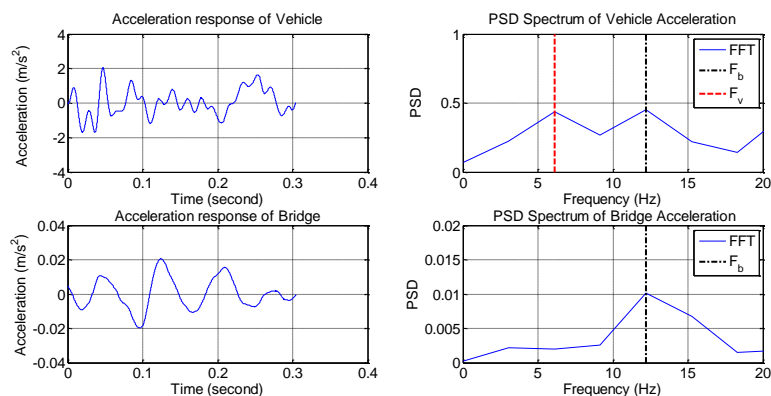




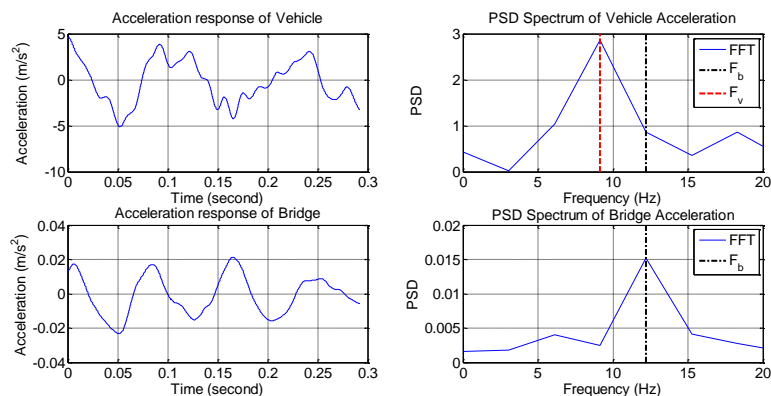
ภาพภาคผนวกที่ 7 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 46.89 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



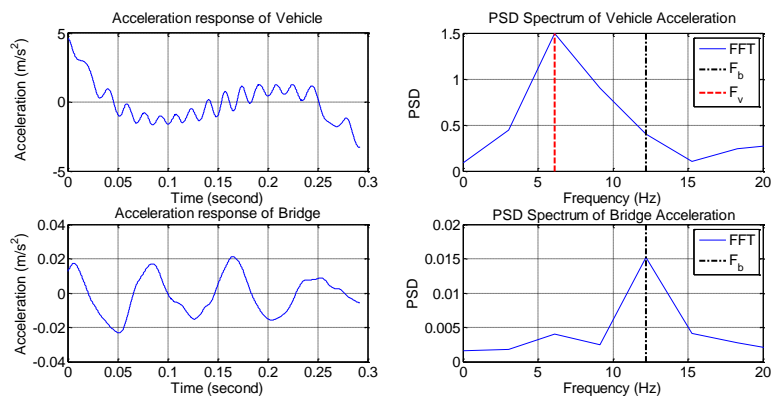
ภาพภาคผนวกที่ 8 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 57.14 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



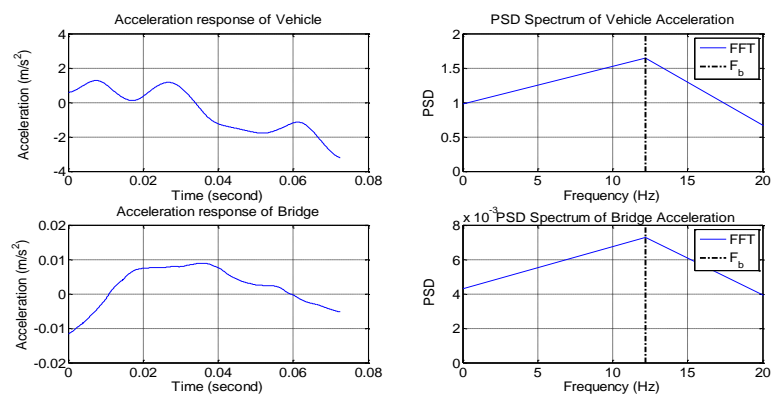
ภาพภาคผนวกที่ 9 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 57.14 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



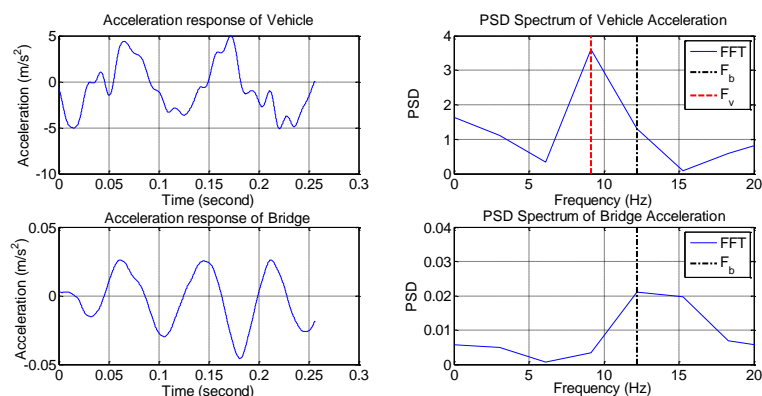
ภาพภาคผนวกที่ 10 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 65.72 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



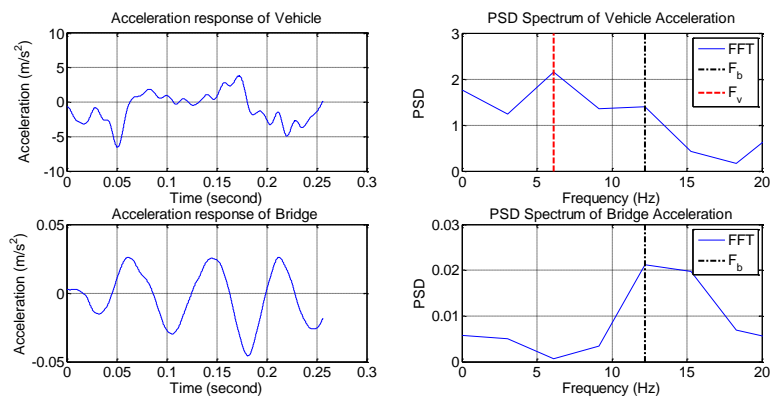
ภาพภาคผนวกที่ 11 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 65.72 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



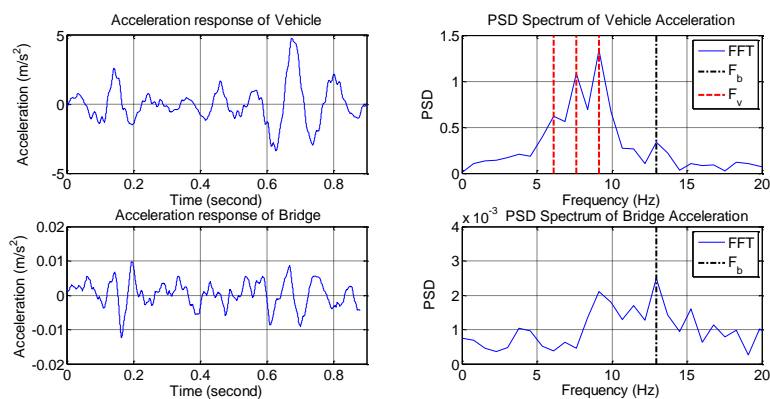
ภาพภาคผนวกที่ 12 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังการตัดสัญญาณของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 65.72 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



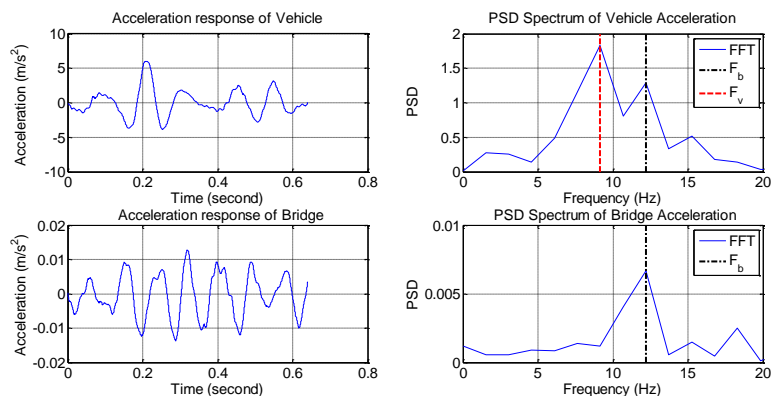
ภาพภาคผนวกที่ 13 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 76.60 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



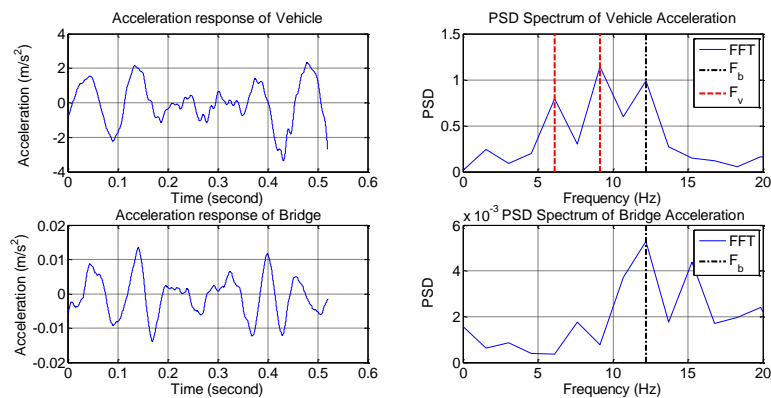
ภาพภาคผนวกที่ 14 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B1 ที่ความเร็ว 76.60 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



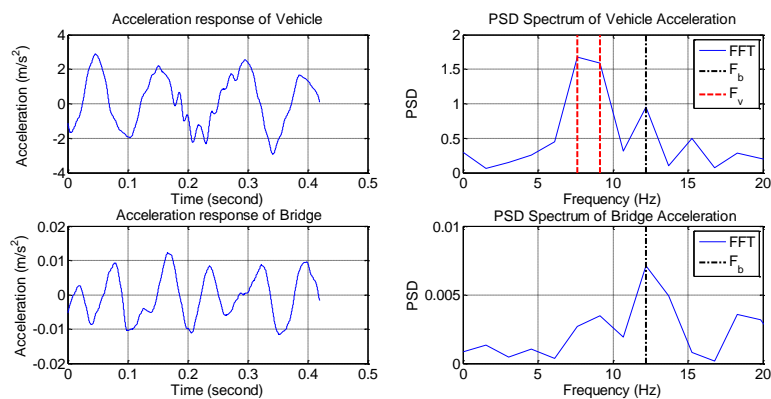
ภาพภาคผนวกที่ 15 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B1 ที่ความเร็ว 22.31 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



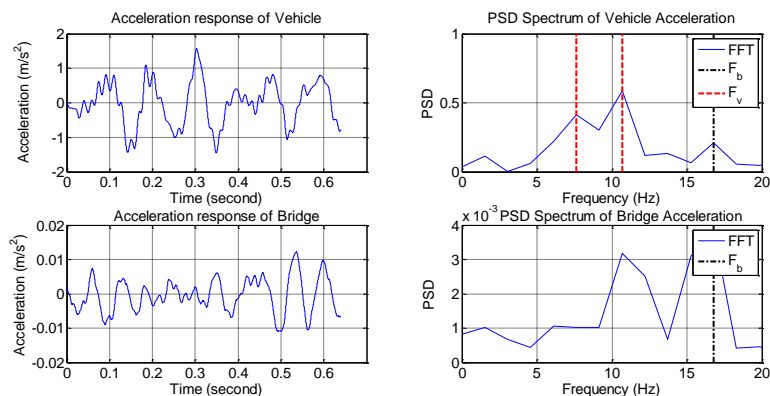
ภาพภาคผนวกที่ 16 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B1 ที่ความเร็ว 30.54 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



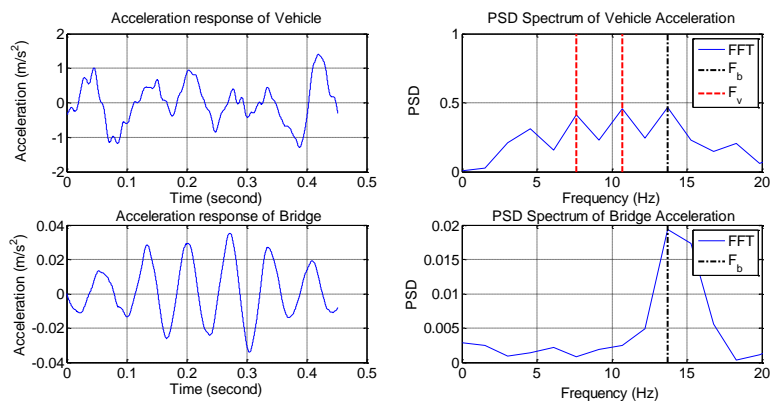
ภาพภาคผนวกที่ 17 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B1 ที่ความเร็ว 38.98 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



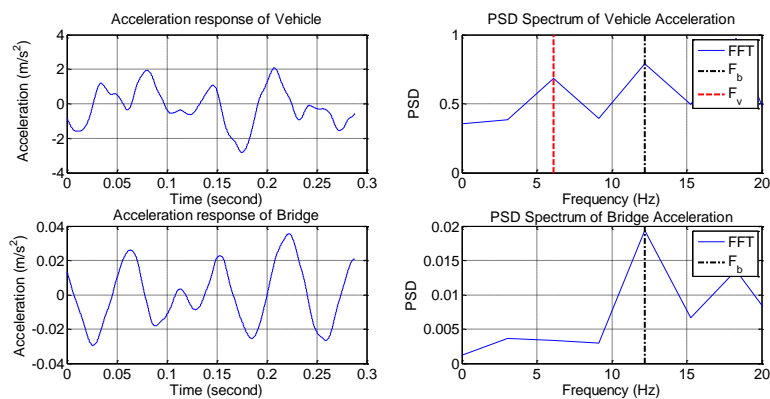
ภาพภาคผนวกที่ 18 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B1 ที่ความเร็ว 47.86 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



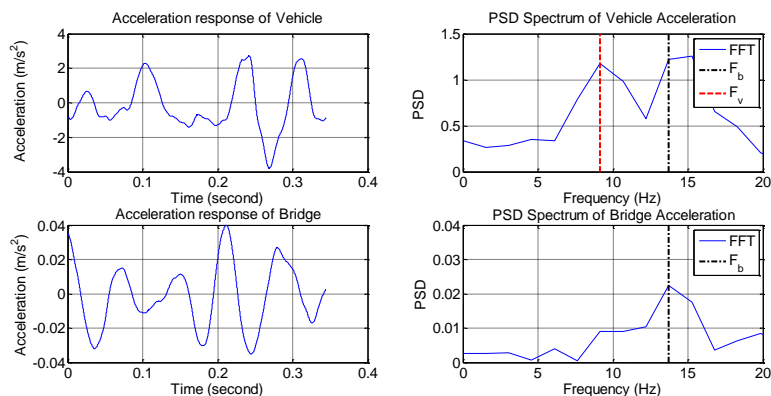
ภาพภาคผนวกที่ 19 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 21.44 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



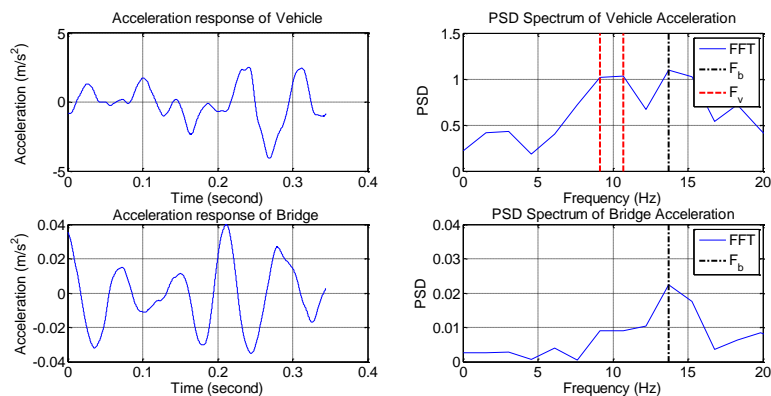
ภาพภาคผนวกที่ 20 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 31.30 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



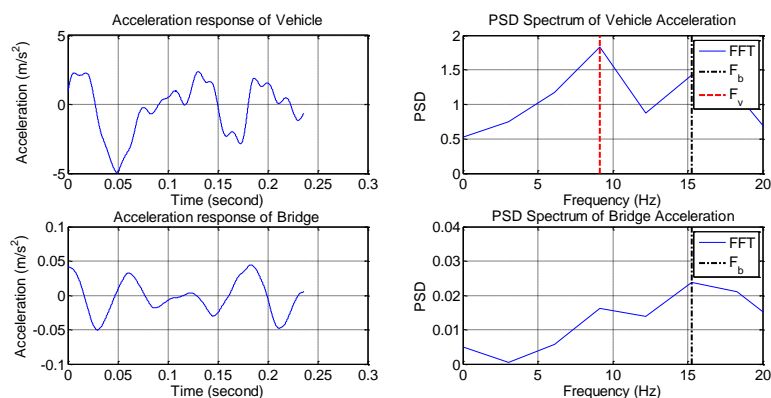
ภาพภาคผนวกที่ 21 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 49.66 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



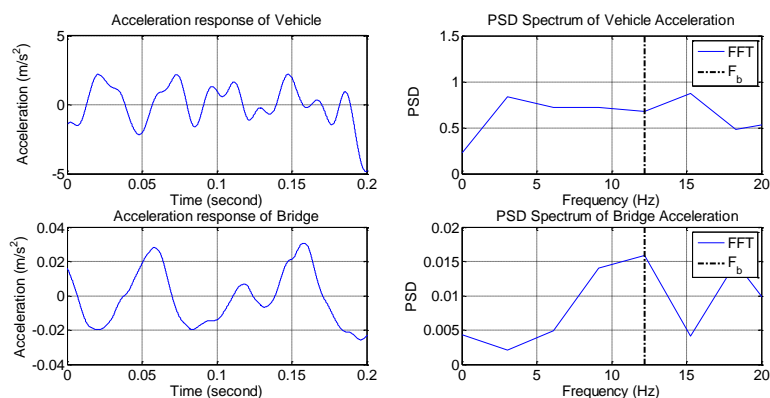
ภาพภาคผนวกที่ 22 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 41.03 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



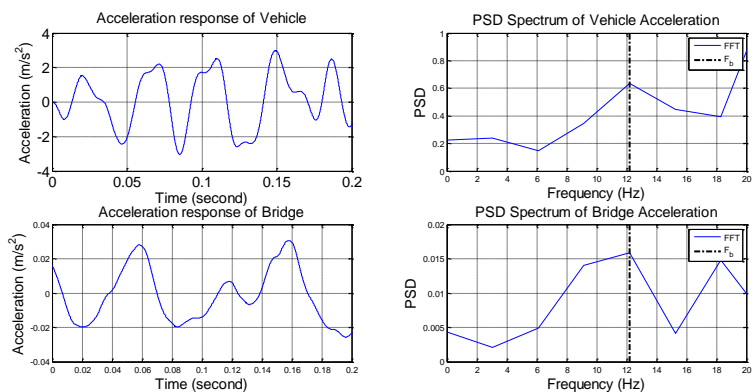
ภาพภาคผนวกที่ 23 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 41.03 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



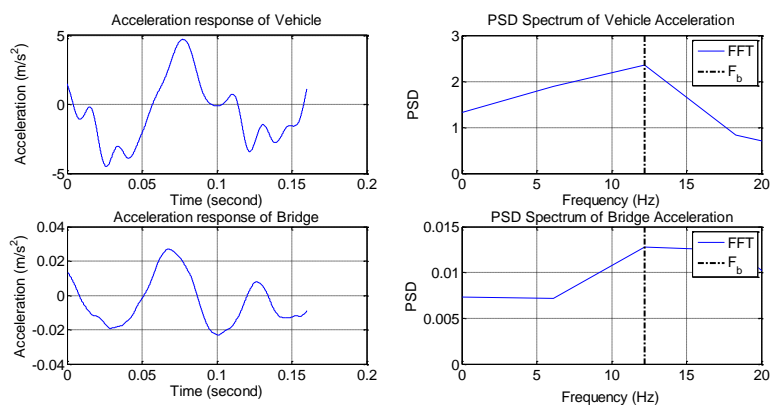
ภาพภาคผนวกที่ 24 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 60.63 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



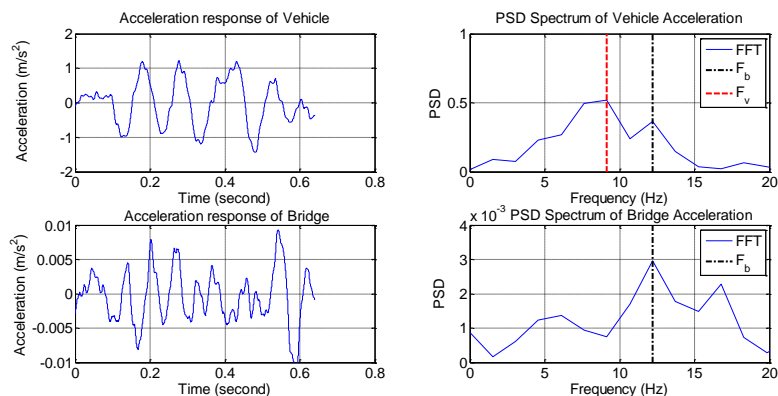
ภาพภาคผนวกที่ 25 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 70.59 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



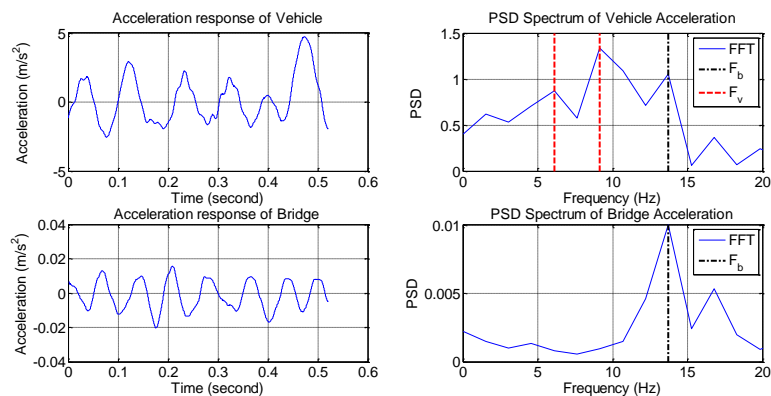
ภาพภาคผนวกที่ 26 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 70.59 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



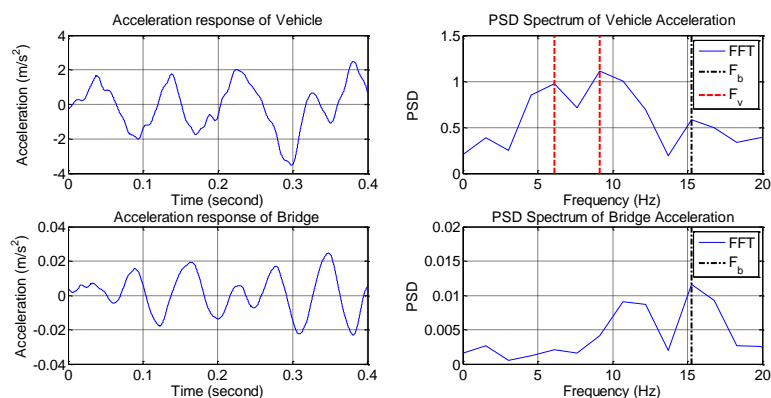
ภาพภาคผนวกที่ 27 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B2 ที่ความเร็ว 78.90 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพภาคผนวกที่ 28 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 20.57 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

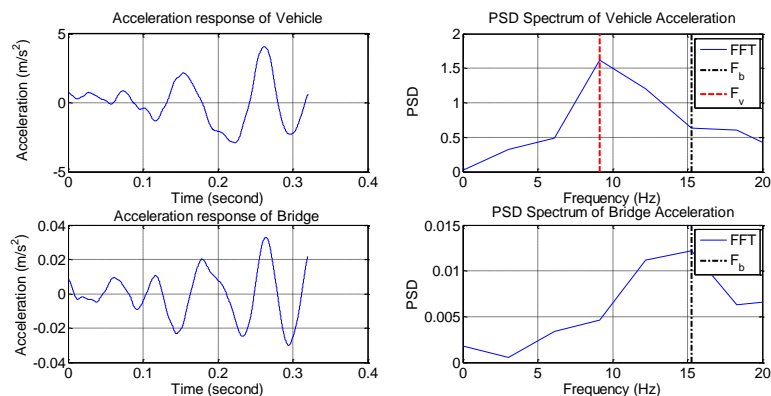


ภาพภาคผนวกที่ 29 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 30.33 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

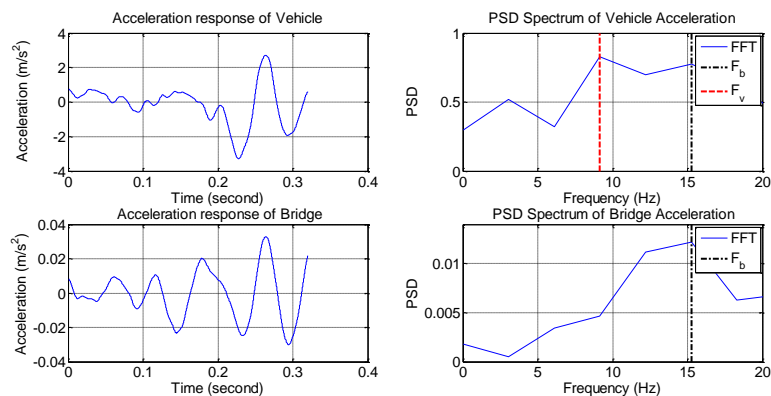


ภาพภาคผนวกที่ 30 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 38.09 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน

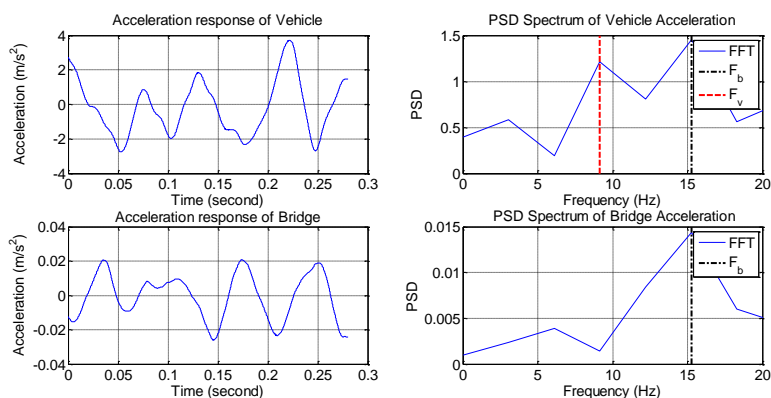




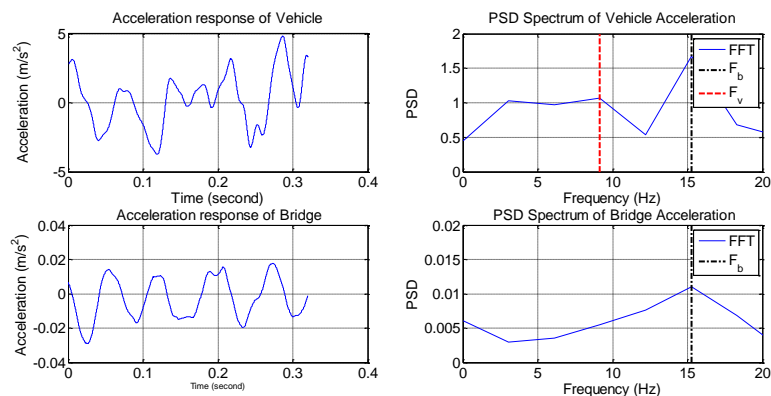
ภาพภาคผนวกที่ 31 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 47.45 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



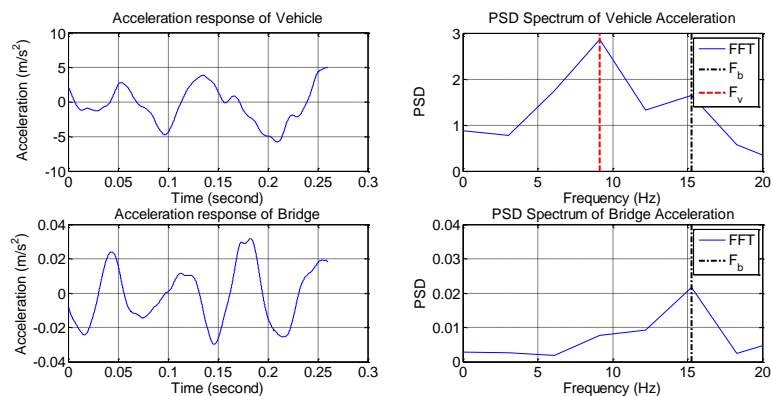
ภาพภาคผนวกที่ 32 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 47.45 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



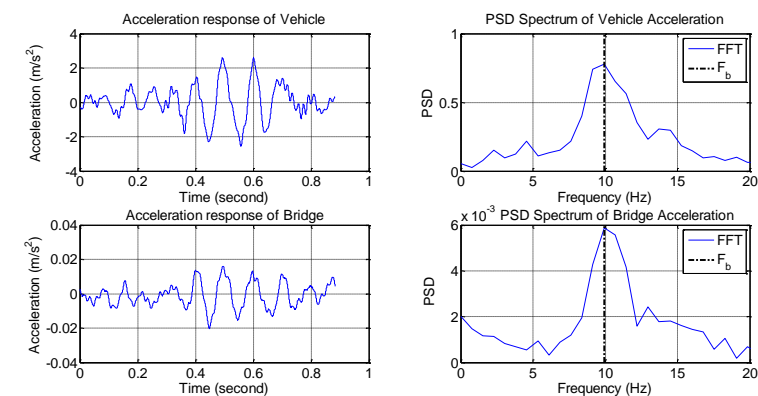
ภาพภาคผนวกที่ 33 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 57.95 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



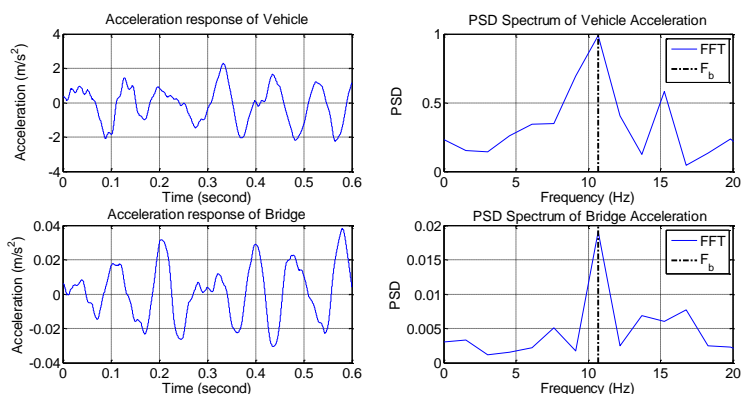
ภาพภาคผนวกที่ 34 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 66.05 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



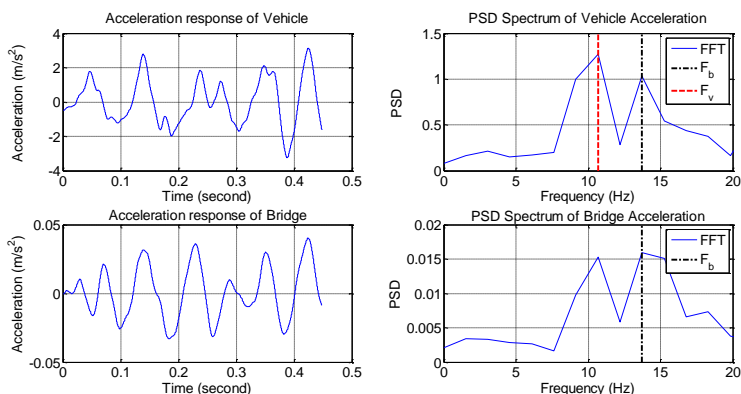
ภาพภาคผนวกที่ 35 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B2 ที่ความเร็ว 77.63 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



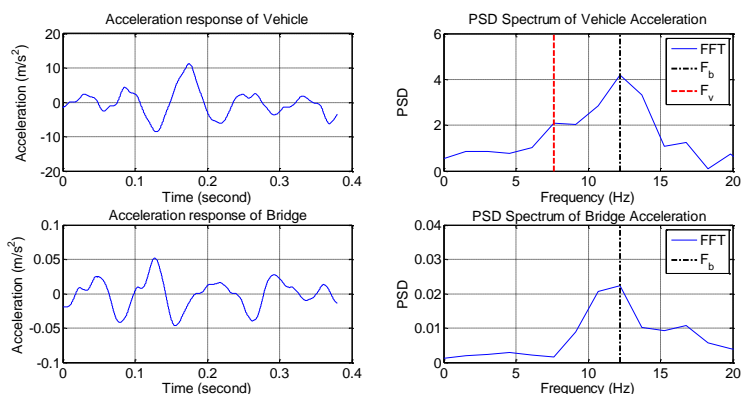
ภาพภาคผนวกที่ 36 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 20.78 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



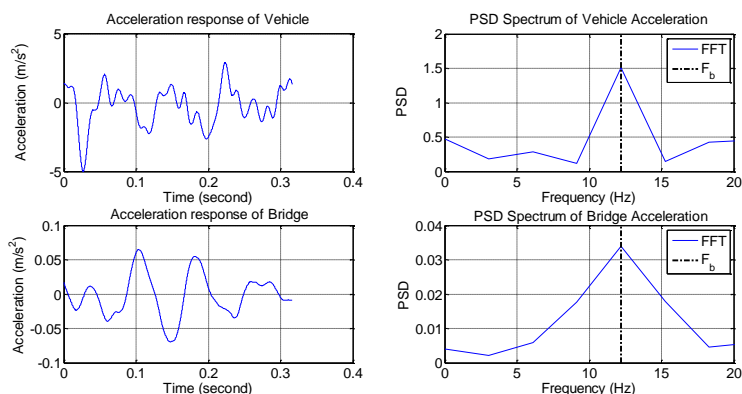
ภาพภาคผนวกที่ 37 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 30.68 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



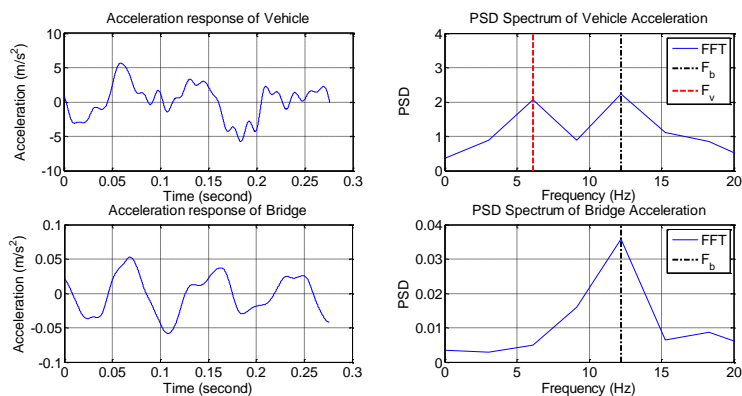
ภาพภาคผนวกที่ 38 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 41.22 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



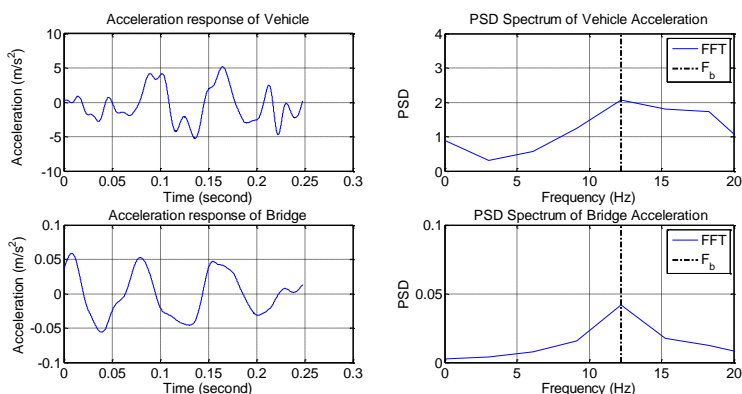
ภาพภาคผนวกที่ 39 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 50.08 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



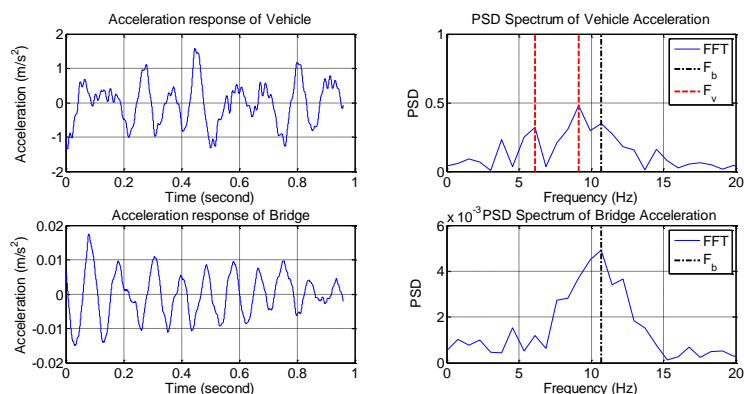
ภาพภาคผนวกที่ 40 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 59.89 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



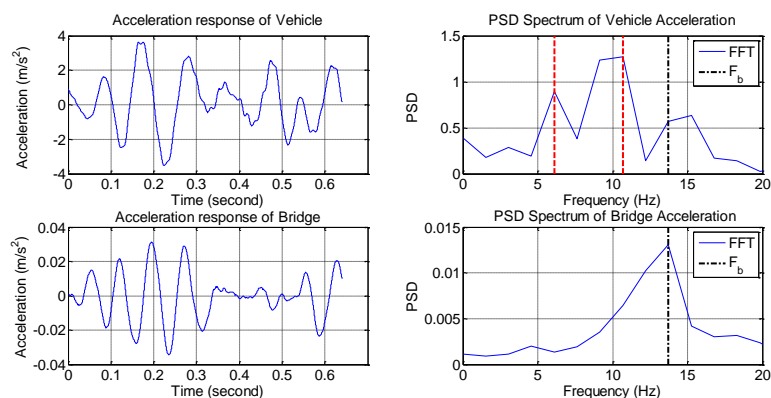
ภาพภาคผนวกที่ 41 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 68.79 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



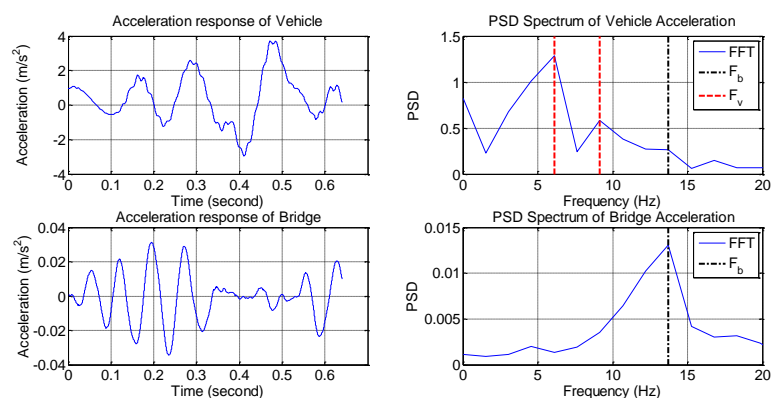
ภาพภาคผนวกที่ 42 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ Pickup สะพาน B3 ที่ความเร็ว 77.14 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



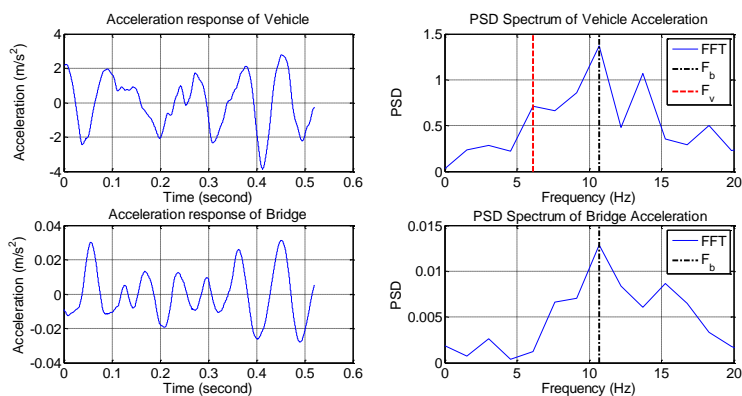
ภาพภาคผนวกที่ 43 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 21.74 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



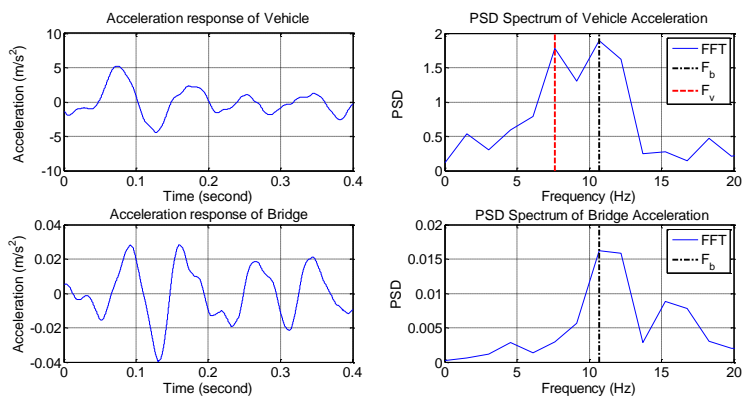
ภาพภาคผนวกที่ 44 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 33.34 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



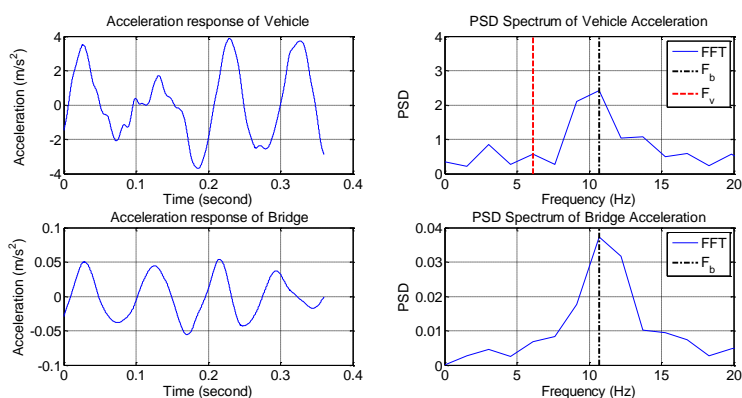
ภาพภาคผนวกที่ 45 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 33.34 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



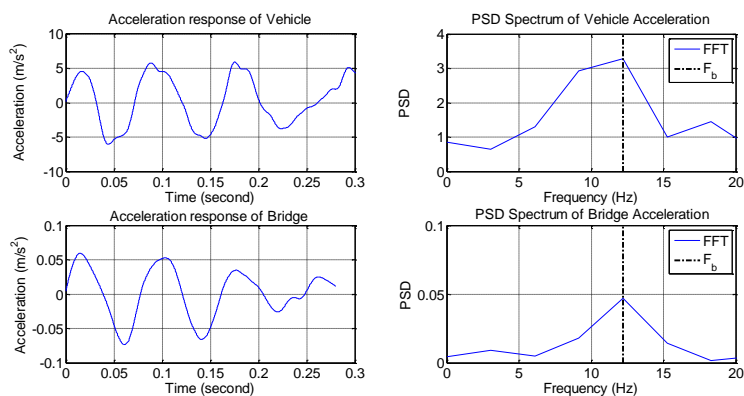
ภาพภาคผนวกที่ 46 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 36.88 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



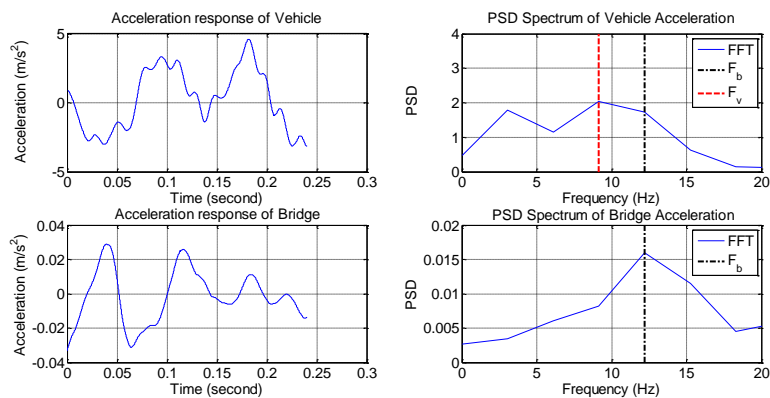
ภาพภาคผนวกที่ 47 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 46.28 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



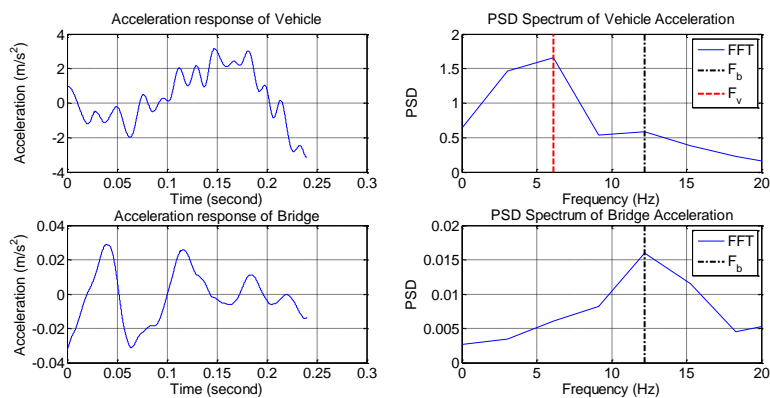
ภาพภาคผนวกที่ 48 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 58.91 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพภาคผนวกที่ 49 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 73.64 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพภาคผนวกที่ 50 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ FFT ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 76.23 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน



ภาพภาคผนวกที่ 51 ความเร่งและสเปกตรัมความถี่หลังผ่านการทำ EMD ของรถ SUV สะพาน B3 ที่ความเร็ว 76.23 km/hr กรณีรถทดสอบเคลื่อนที่คันเดียวบนสะพาน