



## วิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนแบบพลวัตของพื้นผิวถนนยางมะตอยด้วยข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์

นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-8550-8820 อีเมล: jeewuttinun@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.016

รับเมื่อ 27 ธันวาคม 2559 ตอรับเมื่อ 3 พฤษภาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 12 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวัดการสั่นสะเทือนแบบพลวัตโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 Version 1.5.8 และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ความถี่ในการวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนน นอกจากนี้เครื่องมือดังกล่าวยังสามารถวัดการสั่นสะเทือนในย่านความถี่ได้ตั้งแต่ 10–1,000 เฮิรตซ์ และสามารถวัดแรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนน (F) ในขณะที่ยานพาหนะกำลังเคลื่อนที่ผ่านระบบตรวจวัด มีค่าตั้งแต่  $1.80 \times 10^4$ – $7.0 \times 10^6$  นิวตัน ซึ่งสามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น การหาค่าสัมประสิทธิ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของผิวถนน อัตราการเสื่อมสภาพผิวถนน และการออกแบบพื้นผิวถนนที่เหมาะสมกับสภาพจราจรได้ในอนาคต

**คำสำคัญ:** การสั่นสะเทือน, แรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนน, ไมโครคอนโทรลเลอร์

การอ้างอิงบทความ: นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ, “วิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนแบบพลวัตของพื้นผิวถนนยางมะตอยด้วยข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 135–145, ม.ค.-มี.ค. 2561.

## A Method of Dynamic Vibration Measurement of the Asphalt Road Surface by Microcontrollers

Nithiroth Pornsuwancharoen

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industry and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan Sakhon Nakhon Campus, Sakhon Nakorn, Thailand

\*Corresponding Author: Tel: 08-8550-8820, E-mail: jeewuttinun@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.016

Received 27 December 2016; Accepted 3 May 2017; Published online: 12 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This paper presents a method of dynamic vibration measurement using a microcontroller model Arduino UNO R3, Version 1.5.8. In the measurement, the data were obtained by vibration frequency measurement from the road surface, from which the data were analyzed by the additional tools, which can also be used for vibration measurement with the frequency range from 10–1,000 Hz. Such a proposed system can also be used to measure the force being exerted on the road surface ( $F$ ), while the vehicle is in motion with the measurement range from  $1.80 \times 10^4$ – $7.0 \times 10^6$  Newton. Moreover, the useful application such as the friction coefficients that affects the road surface material compositions, the rate of deterioration of the road surface and the design of the road surface on traffic conditions in the future can also be investigated.

**Keywords:** Vibration, Force Exerted on the Road Surface, Microcontrollers.

Please cite this article as: N. Pornsuwancharoen, "A method of dynamic vibration measurement of the asphalt road surface by microcontrollers," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 135–145, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).



## 1. บทนำ

ปัจจุบันการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน การจราจรติดขัด การสูญเสียวเวลาในการสัญจร ส่วนหนึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดจากสภาพผิวถนนเสียหาย ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีเกิดการชำรุดบนพื้นผิวถนน พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และผิวถนนลาดยางมะตอย จากสภาพผิวจราจรดังกล่าวโดยเฉพาะสภาพผิวถนนลาดยางมะตอยมีลักษณะการเกิดร่องรอยการชำรุดจากคู่มือตรวจสอบและประเมินความเสียหายของผิวทางของกรมทางหลวง สามารถแบ่งประเภทความเสียหายได้ดังนี้ ผิวถนนแตกกลายหนึ่งจะซ้เกิดหลุมบ่อบนผิวถนน ผิวทางทรุดเป็นร่องตามแนวล้อทางจราจร เนื่องจากแรงเสียดทานผิวถนนแตกตามความยาวผิวถนนเกิดการเอียงการทรุดตัวในดินลึก และรอยแตกผลสะท้อนจากผิวทางชั้นล่าง สาเหตุต่างๆ เกิดจากการใช้ยานพาหนะที่ผิดกับสภาพถนนที่ออกแบบไว้ เช่น บรรทุกน้ำหนักเกิน การใช้ความเร็วในการขับซึ่งเกินกำหนดมาตรฐานการจราจร ก่อให้เกิดแรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนนโดยตรง ทำให้มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดสภาพผิวถนนโดยตรง เช่น เครื่องต้นแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงความถี่ของผิวจราจรและระยะร่องล้อเนื่องจากอิทธิพลของจำนวนรอบวิ่ง และการวัดสนามของอุณหภูมิบนพื้นผิวถนนอย่างละเอียดหลายฟังก์ชันการลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [1], [2] การเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นในสำรวจของการนับการจราจร เทคโนโลยีการนับการจราจรสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทที่วัดจากบนท้องถนนโดยตรงและวัดโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดร่วมจากภายนอก [3] วิธีการวัดโดยตรงต้องติดตั้งเซ็นเซอร์อยู่บนพื้นถนน [4] และคลื่นอัลตราโซนิกและแบบอะคูสติก [5], [6] หาความเป็นไปได้ของการสั่นสะเทือนตามคุณสมบัติของยานพาหนะในท้องถนน [7] งานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการที่วัดโดยตรงได้รับการดำเนินการในการวัดข้อมูลการจราจรโดยใช้การสั่นสะเทือนพื้นผิวถนน [8] ซึ่งเป็นยานพาหนะในการเคลื่อนไหวทำให้เกิดคลื่นสั่นสะเทือนที่รู้จักกันเป็นคลื่นบนพื้นโลก (P-wave และ S-wave) ผลการสั่นสะเทือนจากงานวิจัยนอกจากแสดงให้เห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนได้รับการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการเชิงตัวเลข [9] การศึกษาการแปลผลจากยานพาหนะโดยใช้การสั่นสะเทือนเนื่องจาก

ถนนขรุขระพื้นผิวในลักษณะเดียวกับการอ้างอิงใน [10] วิธีการทางสถิติถูกใช้ในการวิเคราะห์แบบพลวัตโดยการสะท้อนแสงของจอภาพผลึกเหลวภายใต้การสั่นสะเทือน การเร่งความเร็วแบบสุ่ม ดังเรื่องการปรับปรุงพื้นถนนวัดโดยวิธีเรขาคณิตใช้ระบบวัดแรงเฉื่อยในยานพาหนะบันทึกข้อมูลแบบฐานเวลาจริงใน Data Logger [11] จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยสนใจปัจจัยด้านความเร็วของยานพาหนะ นำไปหาค่าแรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนนความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนนี้สามารถวัดเป็นความถี่ของการสั่นสะเทือน (Hz) ความเร็วในการสั่นของพื้นถนน (V) ความเร่งของการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนน (a) และสามารถหาค่าแรงที่กระทำบนพื้นผิวถนน (F)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการวัดความถี่ หาค่าความเร็ว ความเร่ง และแรงของยานพาหนะที่กระทำกับพื้นผิวถนนจากสัญญาณการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการช่วยประมวลผลและเก็บข้อมูลแบบฐานเวลาจริง ในส่วนที่สองของบทความนี้จะอธิบายถึงวิธีการ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และการบันทึกข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนน ผลการค้นหาค่าข้อมูลการสั่นสะเทือนแสดงอยู่ในส่วนที่สาม และผลการทดลองที่หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนกับความเร็วของการสั่นสะเทือน ความเร่งของการสั่นสะเทือน และแรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนอยู่ในส่วนที่สี่ และส่วนสุดท้ายจะเป็นบทสรุปและอภิปรายผล

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

### 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 เครื่องวัดการสั่นของรุ่น FLUKE 805 เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน ดังรูปที่ 1 ค่าผิดพลาดจากการเปรียบเทียบเครื่องวัดการสั่นของรุ่น FLUKE 805 กับการวัดการสั่นสะเทือนโดยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ผิดพลาดไม่เกิน 0.38 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 1

2.1.2 เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนผิวถนนโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.1.3 รถยนต์ยี่ห้อฮิซุซุ รุ่น TFR 2500 จำนวน 1 คัน

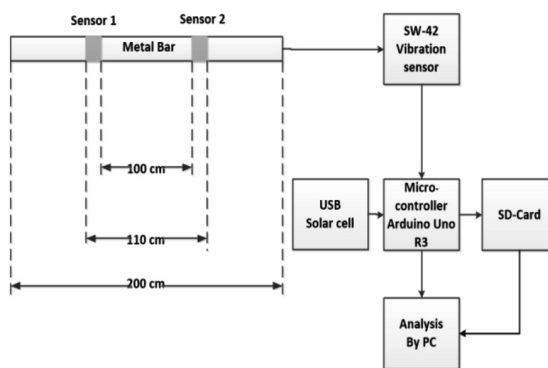


รูปที่ 1 เครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้งานจริงกับการวัดการสั่นสะเทือนของรุ่น FLUKE 805

และรถจักรยานยนต์ ยี่ห้อฮอนด้า รุ่น Wave 110 จำนวน 1 คัน

## 2.2 วิธีการทดลอง

โดยมีหลักการทำงานดังนี้ จากรูปที่ 2 หลักการเก็บข้อมูลของการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนน แบบพลวัตโดยไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะทำการติดตั้งกับแผ่นโลหะอะลูมิเนียมความยาว 2 เมตร และระยะห่างของอุปกรณ์เซ็นเซอร์นั้นห่างกัน 0.5–1.0 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้เซ็นเซอร์อยู่ในรัศมี 1 ตารางเมตร ซึ่งจะเป็นการวัดในแนวระนาบกับพื้นผิวถนน ซึ่งจะรับการสั่นสะเทือนโดยตรงจากพื้นถนนแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อกขนาดเล็ก (Small Signal) และทำการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Signal Converter) โดยอุปกรณ์ SW-42 [12], [13] จากนั้นส่งระดับของแรงดัน 0–5 โวลต์ ออกจากอุปกรณ์ SW-42 และส่งค่าแรงดันที่ได้มายังไมโครคอนโทรลเลอร์และทำการเปรียบเทียบระดับแรงดันกับจำนวน 0–255 ระดับ เพื่อเทียบแสดงค่า 0–1,000 เฮิร์ตซ์ กระบวนการแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) และแปลงเป็นข้อมูลตัวเลขในรูปไฟล์ข้อมูลที่ได้จะถูกจัดการโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งให้บันทึกข้อมูลลงแผ่นบันทึกข้อมูล SD-card การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมส่วนใหญ่ต้องใช้เวลาเป็นตัวกำหนดการทำงาน เช่น การบันทึกเวลาการทำงานและการเก็บผลการสั่นสะเทือนต้องมียุทธศาสตร์เวลาจริง ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ได้ติดตั้งระบบฐานเวลาเป็นโมดูลเวลา (Timer) ในระบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว และ

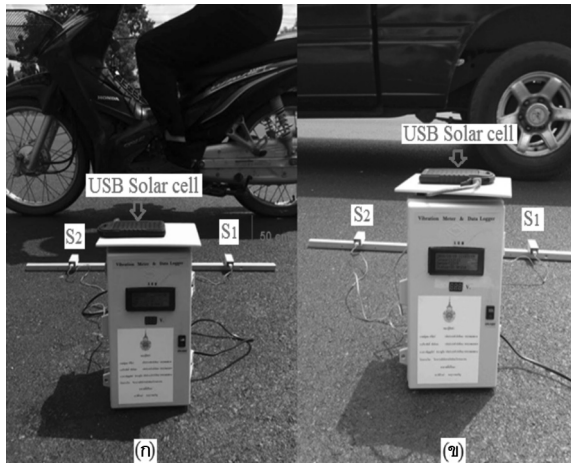


รูปที่ 2 ผังการติดตั้งและการทำงานของอุปกรณ์เซ็นเซอร์เครื่องวัดการสั่นสะเทือน

มีระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ (USB Solar Cell) ในกรณีวัดในพื้นที่ไม่มีไฟฟ้า จากนั้นนำเอาข้อมูลที่ได้จาก SD-card มาประมวลผลโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้โปรแกรม Excel และวิเคราะห์รูปสัญญาณโดยโปรแกรมสำเร็จรูป MatLAB เพื่อสร้างกราฟแสดงดังรูปที่ 5–8

ตารางที่ 1 การวัดการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน FLUKE 805 เพื่อหาความผิดพลาดของระบบที่สร้างขึ้น

ลำดับที่	ค่าจากเครื่องกำเนิดความถี่มาตรฐาน (เฮิร์ตซ์)	ค่าที่วัดได้จาก FLUKE 805 (เฮิร์ตซ์)	ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ SW-42 sensor (เฮิร์ตซ์)	% error
1	10.00	10.10	10.12	0.19
2	20.00	21.00	21.25	1.19
3	30.00	30.05	30.15	0.33
4	40.00	40.12	40.20	0.19
5	50.00	50.09	50.30	0.41
6	100.00	100.20	100.50	0.29
7	200.00	200.15	201.20	0.52
8	300.00	301.00	301.50	0.16
9	500.00	502.00	503.60	0.31
10	1,000.00	1,002.00	998.05	0.39
ค่าผิดพลาดเฉลี่ย $\sum x$				0.38



รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องวัดการสั่นสะเทือนกับพื้นถนน



รูปที่ 4 การวัดการสั่นสะเทือนที่มีรถยนต์กำลังมีการขับผ่าน อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือน

$$\text{สูตร } \% \text{ error} = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100 \% \quad (1)$$

เมื่อ % error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์  $Y_n$  คือ ค่าที่วัดได้จาก FLUKE 805 หน่วยเป็นเฮิรตซ์  $X_n$  คือ ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ SW-42 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ หน่วยเป็นเฮิรตซ์

### 2.3 การคำนวณและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากสมการของคลื่นการวัดการสั่นสะเทือน [14], [15] คือ

$$y = A \sin \omega t \quad (2)$$

สมการของความเร็วของการสั่นสะเทือน คือ

$$v = \omega A \cos \omega t \quad (3)$$

สมการของความเร่งของการสั่นสะเทือน คือ

$$a = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 y \quad (4)$$

สมการแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวถนน คือ

$$F = ma \quad (5)$$

เมื่อความเร็วเชิงมุม คือ

$$\omega = 2\pi f \quad (6)$$

เมื่อ  $y$  คือ ฟังก์ชันคลื่นที่เกิดจากการสั่นสะเทือน  $A$

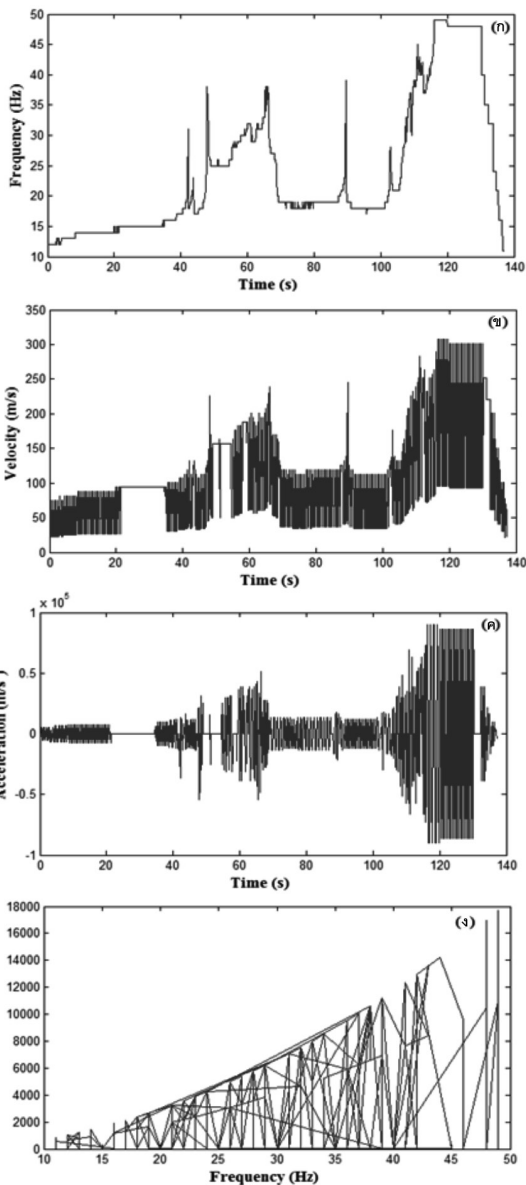
คือ ขนาดของความสูงของแอมพลิจูดของคลื่น ซึ่งการวัดจะมีค่าในช่วง 0-5 โวลต์  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม  $f$  คือ ความถี่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือน หน่วยเป็นเฮิรตซ์  $t$  คือ เวลา หน่วยเป็นวินาที  $v$  คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุ หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที  $a$  คือ ความเร่งของวัตถุ หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที<sup>2</sup>  $F$  คือ แรงที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุ กิโลกรัมเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> หรือนิวตัน และ  $m$  คือ มวลของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ หน่วยเป็นกิโลกรัม จากข้อ 2 เป็นการเก็บข้อมูลความเร็วของรถจักรยานยนต์และรถยนต์ความเร็วตั้งแต่ 20-100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่มีผลของการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันตั้งแต่ 47.21-350.15 เฮิรตซ์ จากรูปที่ 3 เป็นการเก็บข้อมูลกับรถจักรยานยนต์ และรถยนต์ที่กำลังวิ่งด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 3 (ก) และ 3 (ข) ตามลำดับ โดยระยะที่ทำการวัดจุดที่จักรยานยนต์จะห่างจากเซนเซอร์ 50 เซนติเมตร ส่วนรถยนต์นั้นจะห่างจากจุดเซนเซอร์ 100 เซนติเมตร ซึ่งจะเกิดจากแรงที่กระทำโดยตรงที่กับพื้นผิวถนนทำการวัดสองจุด คือ S1 และ S2 คือ อุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นทำการบันทึกลงในแผ่นสำรองข้อมูลแบบ SD-card นำได้วิเคราะห์ผลตัวเลขโดยโปรแกรม Excel ซึ่งจะระบุค่าทั้งสองเซนเซอร์หาค่าเฉลี่ย  $\bar{x}$  และนำค่านั้นมาประมวลเป็นกราฟโดยโปรแกรม MatLab 2010 อีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 2 การเก็บข้อมูลที่ของความเร็วรถจักรยานยนต์ และรถยนต์

ความเร็วของรถ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ความถี่สูงสุดของการสั่นสะเทือนรถจักรยานยนต์ (เฮิรตซ์)	ความถี่สูงสุดของการสั่นสะเทือนรถยนต์ (เฮิรตซ์)
20.00	47.21	180.09
40.00	52.20	210.10
60.00	57.12	240.22
80.00	73.32	310.13
100.00	81.12	350.15

### 3. ผลการทดลอง

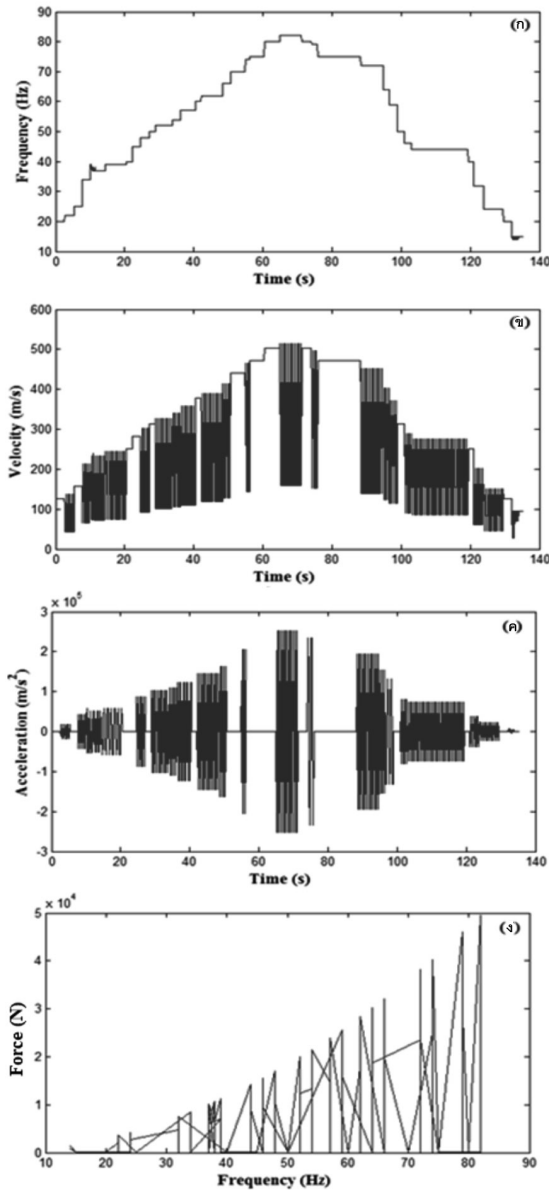
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าความถี่กับเวลา เริ่มเก็บข้อมูลที่เวลา 0–140 วินาที และมีความถี่ในช่วง 11.00–47.21 เฮิรตซ์ ที่ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ เก็บข้อมูลและแปลงข้อมูลจากค่าการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนที่เกิดจากความเร็วของรถจักรยานยนต์ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีมวลขนาด 122.00 รวมกับมวลน้ำหนักคนขับชั่งอีก 74.00 กิโลกรัม จะได้ 196.00 กิโลกรัม จากสมการที่ (2) เป็นสมการคลื่นจะได้ ดังรูปที่ 5 (ก) คือ สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของความเร็วของการสั่นสะเทือนจากความถี่ที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนนโดยสมการที่ (3) วัดความถี่ที่ได้สูงสุดคือ 47.21 เฮิรตซ์ เมื่อเทียบกับเวลาได้ค่าความเร็วสูงสุดของการสั่นสะเทือน 310.15 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 5 (ข) และหากนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและความเร่งของการสั่นสะเทือนได้ดังสมการที่ (4) เราจะเห็นได้จากรูปที่ 5 (ค) และเมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน ซึ่งอัตราเร่งที่ได้มีค่าทั้งบวกและลบ คือ  $0.90 \times 10^5$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> แรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ที่กระทำโดยรวมสามารถวัดได้จากระบบของการวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากสมการที่ (6) แสดงดังรูปที่ 5 (ง) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ความเร็ว ความเร่ง และแรงที่สามารถวัดได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนน ที่เกิดจากความเร็วของรถจักรยานยนต์ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ความถี่กับแรงที่ถูกกระทำบนพื้นผิวถนนที่เทียบต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร เนื่องจากการวัดดังรูปที่ 3 (ก) ซึ่งสามารถวัดแรงสูงสุดที่  $1.80 \times 10^4$  นิวตัน



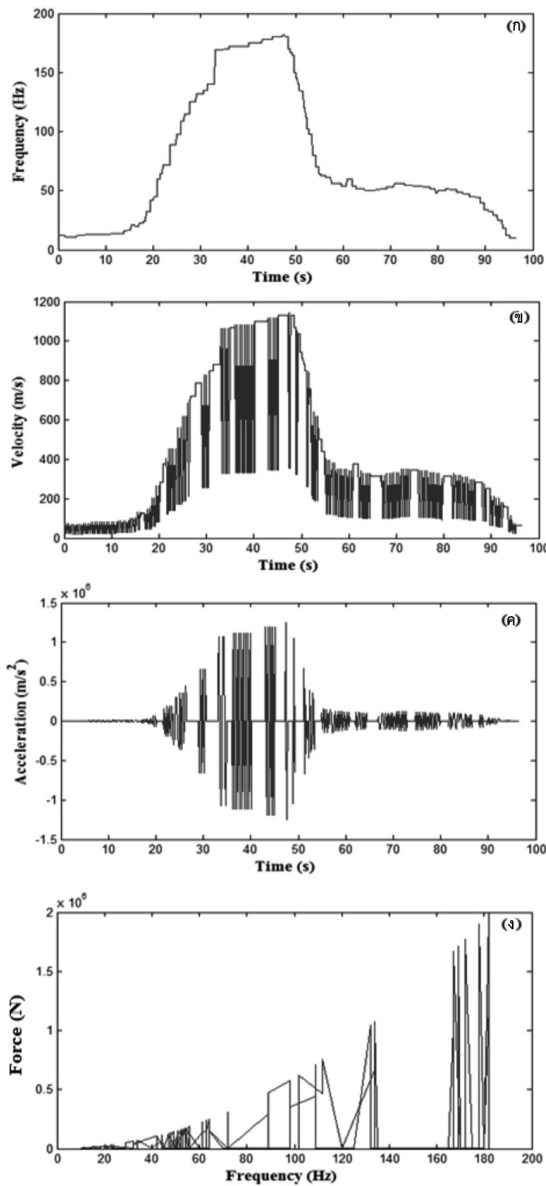


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ความเร็ว ความเร่ง และแรงที่สามารถวัดได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนที่เกิดจากความเร็วของรถจักรยานยนต์ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าความถี่กับเวลาเริ่มเก็บข้อมูลเวลา 0-140 วินาที และตั้งแต่ความถี่ 11-81.12 เฮิรตซ์ ที่ทำการวัดการ

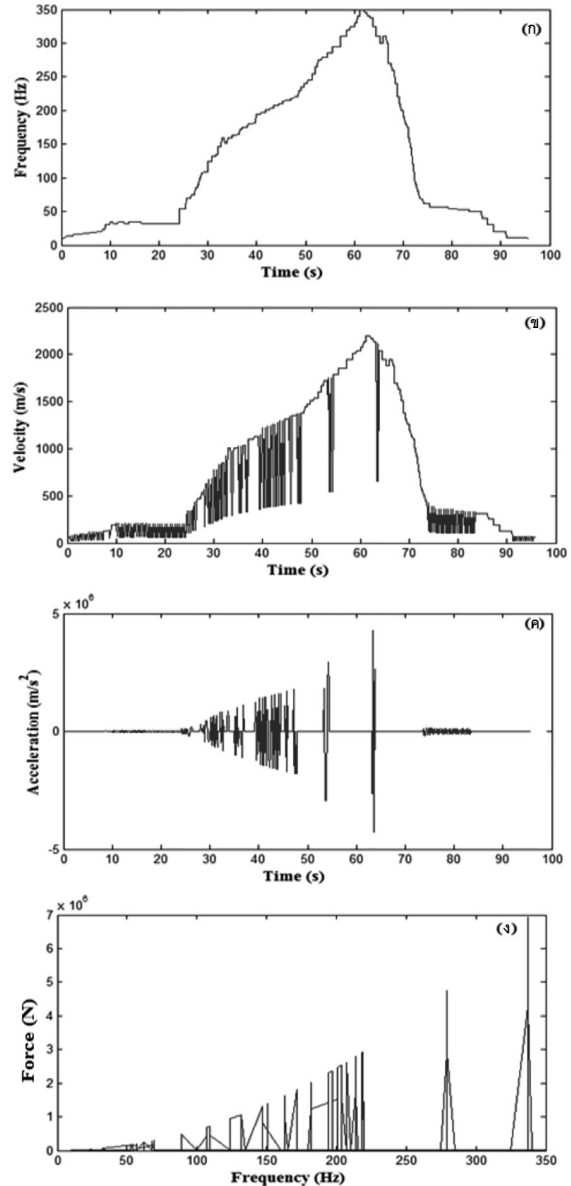
เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ถูกเก็บข้อมูลและแปลงข้อมูลจากค่าการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนที่เกิดจากความเร็วของรถจักรยานยนต์ที่มีมวลขนาด 196.00 กิโลกรัม ดังรูปที่ 6 (ก) คือ สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของความเร็วของการสั่นสะเทือนจากความถี่ที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนนโดยสมการที่ (3) วัดความถี่จากการสั่นสะเทือนที่ได้สูงสุดคือ 82.12 เฮิรตซ์ เมื่อเทียบกับเวลาได้ค่าความเร็วในการสั่นสะเทือนสูงสุด 510.19 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 6 (ข) และหากนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนและความเร่งของการสั่นสะเทือนดังสมการที่ (4) เราจะเห็นได้จากรูปที่ 6 (ค) เมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน ซึ่งอัตราเร่งของการสั่นสะเทือนที่ได้มีค่าทั้งบวกและลบ คือ  $2.50 \times 10^5$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> แรงที่กระทำโดยรวมสามารถวัดได้จากระบบของการวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากสมการที่ (5) ดังรูปที่ 6 (ง) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงที่ถูกกระทำบนพื้นผิวถนนที่สามารถวัดแรงสูงสุดที่  $5.07 \times 10^4$  นิวตัน

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าความถี่กับเวลาเริ่มเก็บข้อมูลเวลา 0-100 วินาที และมีความถี่ในช่วง 11-180.09 เฮิรตซ์ ที่ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ซึ่งเก็บข้อมูลและแปลงข้อมูลจากค่าการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนที่เกิดจากความเร็วของรถยนต์ที่มีมวลขนาด 1,555 รวมกับมวลน้ำหนักคนขับชั่งอีก 74 กิโลกรัม จะได้ 1,624 กิโลกรัม จากสมการที่ (2) เป็นสมการคลื่นจะได้ ดังรูปที่ 7 (ก) คือ สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของความเร็วของการสั่นสะเทือนจากความถี่ในการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนนโดยสมการที่ (3) วัดความถี่ที่ได้สูงสุดคือ 180.09 เฮิรตซ์ เมื่อเทียบกับเวลาได้ค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุด 1,150.12 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 7 (ข) และหากนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนและความเร่งของการสั่นสะเทือนดังสมการที่ (4) เราจะเห็นได้จากรูปที่ 7 (ค) เมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน ซึ่งค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนคือ  $1.30 \times 10^6$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ค่าความเร่งที่กระทำโดยรวมสามารถวัดได้จากระบบของการวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนจากสมการที่ (5) แสดงดังรูปที่ 7 (ง)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ความเร็ว ความเร่ง และแรงที่สามารถวัดได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนที่เกิดจากความเร็วของรถยนต์ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงที่ถูกกระทำบนพื้นผิวถนนที่เทียบต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร เนื่องจากการวัดดังรูปที่ 3 (ข) ซึ่งสามารถวัดแรงสูงสุดที่  $2.00 \times 10^6$  นิวตัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ความเร็ว ความเร่ง และแรงที่สามารถวัดได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนน ที่เกิดจากความเร็วของรถยนต์ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าความถี่กับเวลาเก็บข้อมูลเวลา 0-100 วินาที และมีความถี่ในช่วง 11.00-350.15 เฮิรตซ์ ที่ทำการ





ตารางที่ 3 ค่าความสัมพันธ์ของความถี่ ความเร็ว ความเร่ง และแรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนนแบบลาดยางมะตอย

ลำดับ	ความเร็วของยานพาหนะ (km/h.)	ความถี่ที่วัดได้ (Hz)		ความเร็วของการสั่นสะเทือนพื้นถนน (m/s.)		ความเร่งของการสั่นสะเทือนพื้นถนน (m/s <sup>2</sup> )		แรงที่กระทำกับพื้นถนน (N)	
		จักรยานยนต์	รถยนต์	จักรยานยนต์	รถยนต์	จักรยานยนต์	รถยนต์	จักรยานยนต์	รถยนต์
1	20	47.21	180.09	310.00	1,150.09	$0.90 \times 10^5$	$1.30 \times 10^5$	$1.80 \times 10^4$	$2.00 \times 10^6$
2	40	52.20	210.10	325.10	1,390.12	$1.10 \times 10^5$	$1.58 \times 10^5$	$2.10 \times 10^4$	$2.90 \times 10^6$
3	60	57.12	240.22	360.12	1,550.21	$1.25 \times 10^5$	$2.10 \times 10^5$	$2.40 \times 10^4$	$3.40 \times 10^6$
4	80	73.32	310.13	480.05	1,950.17	$2.20 \times 10^5$	$2.90 \times 10^5$	$4.40 \times 10^4$	$4.60 \times 10^6$
5	100	81.12	350.15	510.21	2,250.09	$2.50 \times 10^5$	$4.80 \times 10^5$	$5.00 \times 10^4$	$8.00 \times 10^6$

วัดการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ซึ่งจะถูกเก็บข้อมูลและแปลงข้อมูลจากค่าการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนที่เกิดจากความเร็วของรถยนต์ที่มีมวลขนาดรวม 1,624 กิโลกรัม ดังรูปที่ 8 (ก) สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของความเร็วของการสั่นสะเทือนจากความถี่ที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนนโดยสมการที่ (3) วัดความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ได้สูงสุด คือ 350.15 เฮิรตซ์ เมื่อเทียบกับเวลาได้ค่าความเร็วสูงสุด 2,250.09 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 8 (ข) และหากนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและความเร่งดังสมการที่ (4) เราจะเห็นได้จากรูปที่ 8 (ค) เมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน ซึ่งค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนพื้นผิวถนนที่ได้ คือ  $4.80 \times 10^5$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ตลอดเวลาที่วัดแบบพลวัตรวมถึงแรงที่กระทำโดยรวมสามารถวัดได้จากระบบของการวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนจากสมการที่ (5) แสดงดังรูปที่ 8 (ง) สามารถวัดแรงสูงสุดที่  $8.00 \times 10^6$  นิวตัน

งานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาการวิเคราะห์การทดลองของการตอบสนองของยานพาหนะการสั่นสะเทือนจากพื้นผิวถนนที่มีการสั่นสะเทือนวัดเป็นความถี่โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัดจากเซ็นเซอร์การสั่น (Vibration Sensor) อุปกรณ์ SW-42 ที่มีความซับซ้อนน้อยลง เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนนนั้น เมื่อพิจารณาให้แรงกระทำตามแนวเส้นแรงกระทำ และมีตำแหน่งที่แรงกระทำต่อวัตถุเป็นจุดๆ เดียว เรียกแรงลักษณะนี้ว่า Concentrated Force การพิจารณาแบบนี้ช่วยลดการซับซ้อนลงอย่างมาก ตำแหน่งของแรงกระทำจะกระจายเป็นพื้นที่ แรงกระทำที่

กระจายทั่วพื้นที่นี้ เรียกว่าแรงกระจาย (Area Distribution Force) พื้นที่ขณะที่ทำการวัดในพื้นที่ 1 ตารางเมตร เท่านั้น เรานับว่าแรงที่กระทำนั้นกระจายออกมีการส่งถ่ายแรงไปตามแนววัตถุ หรือยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ ค่าที่เราวัดได้นั้นมีค่าผิดพลาดน้อยมาก ซึ่งอาจแสดงให้เห็นจากผลการทดลองที่มีสัญญาณรบกวนที่แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 อาจใช้วงจรกรองความถี่สูงในการลดสัญญาณรบกวนได้ แต่ผลกระทบนี้เป็นผลกระทบจากการสั่นสะเทือนธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นได้ในขณะที่ทำการวัดแรงแบบพลวัตและเทียบกับเวลาจริง จากการวัดค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากได้รับค่าโดยตรงจากการสั่นสะเทือนของผิวถนนโดยตรง ผลการทดลองแสดง ดังตารางที่ 3

#### 4. สรุป

จากผลการวิจัยพบว่าความถี่ของการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวถนนมีผลกระทบโดยตรงต่อแรงกระจาย ที่ถูกกระทำ อันเกิดจากการที่รถจักรยานยนต์ รถยนต์ หรือยานพาหนะอื่นๆ ที่ขับเคลื่อนบนท้องถนน สามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนได้นั้น แรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความเร่งของพื้นผิวถนน เราสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ทั้ง 3 ตัวแปรนี้ คือ ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Frequency) ความเร็วของการสั่นสะเทือนพื้นถนน (Velocity) และความเร่งของการสั่นสะเทือนพื้นถนน (Acceleration) เพื่อหาแรงสูงสุดที่กระทำต่อพื้นผิวถนน (Force of Surface Road) แบบลาดยางมะตอยได้อย่าง

ใกล้เคียงและเป็นแบบพลวัตนี้ ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัยนี้คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวถนน อัตราการเสื่อมสภาพของพื้นผิวถนนและการออกแบบพื้นผิวถนนที่เหมาะสมกับสภาพการจราจร และนอกจากนี้ยังสามารถออกแบบเครื่องมือวัดแรงที่กระทำต่อพื้นผิวถนนกรณีการห้ามล้อรถบรรทุกในขณะหยุดรถขณะรอสัญญาณจราจรบริเวณทางแยก เครื่องชั่งน้ำหนักขณะที่รถกำลังวิ่งกรณีบรรทุกน้ำหนักเกิน เป็นต้น หรือนำไปเพื่อการปรับปรุงการออกแบบพื้นผิวถนนที่เหมาะสมกับสภาพผิวการจราจรได้และในอนาคต

### เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Horpibulsuk, A. Chinkulkijniwat, W. Kongkitkul, A. Udomchai, S. Chotisakul, and S. Siriphun, “A prototype machine for measuring pavement skid resistance and rutting under various cycles of wheel track,” *Technical Education Journal King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 6, no. 1, pp. 187-196, January–June 2015.
- [2] H. Higashiyama, M. Sanob, F. Nakanishic, O. Takahashid, and S. Tsukumad, “Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 4, pp. 73–80, June 2016.
- [3] G. Leduc, “Road traffic data: Collection methods and applications,” *JRC Technical Notes, European Commission*, pp. 1–55, 2008.
- [4] H. Sakakibara, M. Aoki, and H. Matsumoto, “Advanced traffic signal control system installed in Phuket City, Kingdom of Thailand,” *SEI Technical Review*, no. 60, pp. 54–58, 2005.
- [5] V. Cevher, R. Chellappaand, and J. H. McClellan, “Vehicle speed estimation using acoustic wave patterns,” *IEEE T. Signal Process.*, vol. 57, no. 1, pp. 30–47, 2009.
- [6] F. P. Gonzalez, R. L. Valcarce, and C. Mosquera “Road vehicle speed estimation from a two-microphone array,” in *Processing International Conference Acoustics, Speech Signal Processing*, 1993.
- [5] H. A. Rahim, R. B. Ahmad, A. S. M. Zain, and U. U. Sheikh, “An adapted point based tracking for vehicle speed estimation in linear spacing,” in *Processing International Conference Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2010.
- [6] S. Roussel, H. Porumamilla, C. Birdsong, P. Schuster, and C. Clark, “Enhanced vehicle identification utilizing sensor fusion and statistical algorithms,” in *Processing ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2009.
- [7] R. Hostettler, W. Birk, and M. L. Nordenvaad, “Feasibility of road vibration-based vehicle property,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 356–364, 2010.
- [8] S. Jian and J. Ruichen, “Generation of virtual road surfaces and simulation of nonlinear vibration of vehicles,” in *Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference*, 1999.
- [9] R. Martin, “Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics,” *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 9, no. 5, pp. 504–512, 2001.
- [10] E. I. Laftchiev, C.M. Lagoa, and S. N. Brennan, “Vehicle localization using in-vehicle pitch data and dynamical models,” *Intelligent*



- Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 1, pp. 206–220, 2015.
- [11] F. Jiménez, “Improvements in road geometry measurement using inertial measurement systems in datalog vehicles,” *Measurement*, vol. 44, no. 1, pp. 102–112, 2011.
- [12] Elecrow Policy, Vibration Sensor SW-420 [Online]. Available: <https://www.elecrow.com/vibration-sensor-module-sw420-p-525.html>
- [13] S. Maliphan, N. Pornsuwancharoen, and S. Thongmee, “A method of vibration measurement dynamics of motorcycle by microcontroller,” in *Proceedings The 8th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference viii*, 2017, pp. 253–258.
- [14] T. J. Gordon Zevi Bareket, “Vibration transmission from road surface features: Vehicle measurement and detection,” Technical Report for Nissan Technical Center North America, Inc., The University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), UMTRI-2007-4 (99796), January 2007.
- [15] M. Gobbi and G. Mastinu, “Analytical description and optimization of the dynamic behavior of passively suspended road vehicles,” *Journal of Sound and vibration*, vol. 254, no. 3, pp. 457–481, 2001.

