

การกำหนดลักษณะถนนเพื่อใช้ในการทดสอบรถกอล์ฟ



นายอนวัช คงสุริยะภิญโญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF ROAD CHARACTERISTIC FOR A GOLF CART TESTING

Mr. Anawat Kongsuriyapinyo



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำหนดลักษณะถนนเพื่อใช้ในการทดสอบรถกอล์ฟ

โดย

นาย อนวัช คงสุริยะภิญโญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

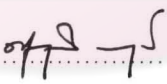
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiratวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทร์วานวัฒน์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์)

ศูนย์วิทยานิพนธ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนวัช คงสุริยะภิญโญ : การกำหนดลักษณะถนนเพื่อใช้ในการทดสอบรถกอล์ฟ. (DESIGN OF ROAD CHARACTERISTIC FOR A GOLF CART TESTING) อ. ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร, 297 หน้า.

ลักษณะถนนเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบรถกอล์ฟ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงสมรรถนะจากการใช้งานจริงของรถกอล์ฟ การกำหนดลักษณะถนนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบรถกอล์ฟนี้แบ่งกิจกรรมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาได้เป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เพื่อกำหนดลักษณะถนนของสนามทดสอบจากการวัดด้วยวิธีและอุปกรณ์การวัดที่เรียกว่า Rolling Straightedge ที่ประยุกต์ใช้กับ Accelerometer เพื่อวัดความเร่งที่เกิดขึ้นกับล้อตรงกลางของ Rolling Straightedge โดยนำผลความเร่งที่วัดได้มาแปรเป็นค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวดิ่งแล้วนำมาผ่านกระบวนการใน ISO 8608 เพื่อจัดรูปสมการให้ได้ตามมาตรฐาน จากนั้นจึงสอบเทียบผลการวัดที่ได้จาก Rolling Straightedge กับผลที่ได้จากการวัดด้วยระดับน้ำซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการวัดลักษณะถนน จากผลการสอบเทียบพบว่าการวัดด้วย Rolling Straightedge มีค่าสอบเทียบ(Calibration factor) เท่ากับ 0.14 การกำหนดลักษณะถนนนั้นได้จากการเก็บค่าทางสถิติของข้อมูลลักษณะถนน จากฐานนิยมของข้อมูลลักษณะถนนที่วัดจากสนามกอล์ฟที่เป็นตัวแทนจำนวน 4 สนาม ได้แก่ สนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ต คลับ สนามกอล์ฟไพร์เอิร์ธ กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ สนามกอล์ฟไดนาสตี สนามกอล์ฟ และ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ ซึ่งผลการวัดพบว่าถนนส่วนใหญ่มีสมการความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวดิ่งของถนนใกล้เคียงกับสมการ  $G_d(\Omega) = 0.000724 \cdot (\Omega)^{-2}$  ดังนั้นจึงนำสมการที่ได้นี้มาใช้เพื่อจำลองเป็นข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบรถกอล์ฟต่อไป

ส่วนที่ 2 เป็นการนำสนามทดสอบที่ได้ในส่วนที่ 1 มาสาธิตการประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบระบบรองรับของรถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของบริษัท ทีเอส วิซิเคิล เทคโนโลยี จำกัด ให้เกิดความสะดวกสบายจากการขับขี่ (Ride Comfort) มากที่สุด ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 เริ่มจากการสร้างแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ จากผลการศึกษาลักษณะการใช้งานและวัดค่าตัวแปรคุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ จากนั้นนำแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งสี่ และข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบ มาจำลองการเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับของรถกอล์ฟซึ่งเป็นตำแหน่งของผู้โดยสาร เพื่อประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ ผลจากการทวนสอบแบบจำลองรถกอล์ฟด้วยการทดสอบวัดข้อมูลจากการขับขี่รถกอล์ฟในถนนจริง พบว่าค่าประสิทธิผลของความเร่งรวมของมวลส่วนสปริงรองรับในการขับขี่รถกอล์ฟบนถนนจริงมีค่ามากกว่าที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่อยู่ที่  $0.3 \text{ m/s}^2$  ทุกค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆ ที่ใช้ทดสอบ ซึ่งค่าดังกล่าวให้ผลการประเมินตามมาตรฐาน ISO 2631-1 อยู่ในระดับความสะดวกสบายเดียวกัน ดังนั้นจึงถือได้ว่าแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งสี่และลักษณะถนนจำลองนี้สามารถใช้ประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ได้

จากการใช้แบบจำลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ทำให้ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับมีค่าน้อยที่สุดจากการจำลองการเคลื่อนที่ พบว่าการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่  $445 \text{ N-s/m}$  จะทำให้ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของผู้โดยสารอยู่ที่  $0.507 \text{ m/s}^2$  ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดสำหรับรถกอล์ฟรุ่นนี้

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิติ:.....อนวัช คงสุริยะภิญโญ.....  
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:.....คณิต วัฒนวิเชียร.....  
ปีการศึกษา : 2551



# # 5070504921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: ROAD PROFILE / SUSPENSION / VIBRATION

ANAWAT KONGSURIYAPINYO : DESIGN OF ROAD CHARACTERISTIC FOR A  
GOLF CART TESTING. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC. PROF. KANIT  
WATTANAVICHIEEN, Ph.D., 297 pp.

Road characteristic is the important factor for golf cart design because it can indicate performance of golf cart operation. Determining the suitable road characteristic for golf cart testing field could be divided according to this research objective into 2 parts.

First part is to establish road characteristic of the testing field using rolling straightedge method incorporate with accelerometer measuring the acceleration that take place at the center wheel of the rolling straightedge. Obtained results are converted in the form of vertical displacement power spectral density according to ISO 8608 from a standard road characteristic equation. Then, rolling straightedge calibration with respect to Water level method was evaluated. The calibration results had shown that system has calibration factor of 0.14. The road characteristic was, then, formulated from statistical data of road characteristics using the measured data from 4 representative golf courts: Patana Sport Club, Summit Piehurst Golf and Country Club, Dynasty golf and Country Club and Bangkok golf Club. It was found that road characteristic in typical golf court can be presented by the Displacement power spectral density equation:  $G_d(\Omega) = 0.000724 \cdot (\Omega)^{-2}$ . So this equation was employed to formulate the road profile that can be determined as road characteristic for the testing field.

The second part is to demonstrate the use of testing field that obtained from the first part in order to design of the suspension of golf cart Bravo TT-11, which is produce by TS Vehicle Tech Co., Ltd., for the maximum riding comfort according to ISO 2631-1. The quarter car model of this golf cart which was formulated from the operating characteristics of general golf cart and properties of its suspension system that obtain from measurements. Using the designed road characteristic of testing field, the quarter model of golf cart was used to simulate the motion of the golf cart sprung mass, which is the position of passenger, for the riding comfort evaluation. The validation result of this golf cart model, by comparing results with data obtain from riding golf cart on the real road in the golf court, was found that, at the same damping coefficients of suspension, the effective value of weighting acceleration of sprung mass of riding golf cart is more than the results from simulated motion about  $0.3 \text{ m/s}^2$ . From this validation results, we can draw a conclusion that the results either calculated from model or obtained from golf cart riding have the same level of comfort according to ISO 2631-1. So the quarter car model of golf cart and designed road characteristic can be used to design suspension system and to evaluate riding comfort of a golf cart.

The model of golf cart and the design road characteristic were successfully used to determine the minimum effective value of weighting acceleration of sprung mass. The result from this simulation was found that, with the most suitable damping coefficient of Shock absorber of 445 N-s/m, the minimum weighting acceleration of sprung mass for this golf cart model at  $0.507 \text{ m/s}^2$  will be obtained.

Department : ...Mechanical Engineering

Field of study : Mechanical Engineering

Academic year : ..... 2008.....

Student's signature : *Anawat kongsuriyapinyo*

Thesis principal advisor's signature *Kanit Wattanavichien*

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ ร่วมติดตามการทดสอบอย่างใกล้ชิดในทุกขั้นตอนจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ทีเอส วิสิเคิล เทค จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ อะไหล่ อุปกรณ์การทดสอบ และคำแนะนำ และการช่วยเหลือในการทดสอบ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท คิสเลอร์ ไทยแลนด์ จำกัด สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์วัดความเร่งในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณสร้างสรรค์ ศิริปิยะวัฒน์ วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัท สีมณฑลอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock Absorber) ตลอดจนการช่วยเหลือในด้านการทดสอบ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่ปุ๊ เล่ พี่โม พี่อาร์ต พี่จ๊ก พี่กิม พี่ก๊อบ พี่ป๊อบ พี่บอย พี่ปาล์ม ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายในทุกคนที่ช่วยให้คำปรึกษาและให้การช่วยเหลืออื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณปู่ คุณย่า ญาติ พี่น้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนในทุกด้าน ทั้งคำปรึกษา ให้ความดูแล ตลอดจนกำลังใจ จนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ชาวสวนกุหลาบวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจ และ ให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในทุกด้าน ทั้งคำปรึกษา และกำลังใจ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และกล่าวขอโทษบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือหากผู้วิจัยไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	๗
สารบัญภาพ .....	๘
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	กก
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม.....</b>	<b>4</b>
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนในรถยนต์.....	4
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นในการออกแบบระบบรองรับ .....	4
2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบสั่นสะเทือน .....	6
2.1.3 การกระตุ้นความเป็นคลื่นของผิวถนน .....	8
2.1.4 การแปลงอนุกรมฟูเรียร์และการวิเคราะห์แบบสเปคตรัม.....	19
2.2 การประเมินสภาพถนนตามหลักเกณฑ์ ISO 8608 .....	26
2.2.1 ขอบเขต.....	26
2.2.2 ความหมายและสัญลักษณ์ .....	26
2.2.3 การระบุลักษณะถนน.....	26
2.2.4 การรายงานผลแบบ Smoothed Power Spectral Density.....	27
2.2.5 การทำ Curve fitting PSD และประเมินประเภทถนน.....	30
2.3 การวัดลักษณะของถนนในรูปแบบต่างๆ.....	33

	หน้า
2.3.1 Rod and Level method .....	33
2.3.2 Dipstick.....	34
2.3.3 Inertial Profiler.....	34
2.3.4 Profilograph .....	37
2.3.5 Sliding Straightedges .....	37
2.3.6 Rolling Straightedges .....	38
2.3.7 The BPR Roughometer .....	39
2.3.8 CHLOE .....	40
2.3.9 Road meter .....	40
2.4 การประเมินความเสถียรของสภาวะจากการขับที่ตามมาตราฐาน ISO 2631-1 .....	41
2.4.1 ขอบเขต.....	41
2.4.2 Frequency weightings และ การใช้งาน.....	41
2.4.3 การคำนวณค่า Frequency weightings.....	44
2.4.4 การคำนวณความเสถียรของสภาวะจากการขับและการประเมินผล .....	46
2.5 ทบทวนวรรณกรรม.....	47
<b>บทที่ 3 ภาพรวมและวิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>52</b>
3.1 ภาพรวมในการดำเนินงานวิจัย .....	52
3.2 รายละเอียดแต่ละขั้นตอนโดยสังเขป .....	53
3.2.1 การศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งาน และ คุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ .....	53
3.2.2 การสร้างแบบจำลองรถกอล์ฟด้วยแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ .....	54
3.2.3 การจำลองถนนที่เป็นตัวแทนจากสนามกอล์ฟในกรุงเทพฯและปริมณฑล เพื่อใช้กำหนดลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับ .....	54
3.2.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลลักษณะถนนของสนาม ทดสอบระบบรองรับที่ได้มาใช้กับแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่.....	55
3.2.5 การประเมินระดับความเสถียรของสภาวะจากการขับและการวิเคราะห์ผลที่ ได้.....	55

3.2.6 การทวนสอบแบบจำลองรถกอล์ฟด้วยการขับขึ้นรถกอล์ฟจริงและสถิติการประยุกต์ใช้งานข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับและแบบจำลองรถกอล์ฟ .....	56
---	----

<b>บทที่ 4 การศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ .....</b>	<b>57</b>
4.1 การศึกษาลักษณะการใช้งานของรถกอล์ฟ.....	57
4.2 การศึกษาคุณสมบัติของระบบรองรับ .....	58
4.2.1 การหาค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง .....	58
4.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง.....	58
4.2.1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	59
4.2.1.3 ผลการทดสอบ .....	59
4.2.2 การหาค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับ .....	60
4.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความแข็งสปริงของแหนบ.....	60
4.2.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	60
4.2.2.3 ผลการทดสอบ .....	60
4.2.3 การทดสอบหาค่ามวลสปริงไม่ได้รองรับของระบบรองรับด้านหลัง.....	61
4.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่ามวลสปริงไม่ได้รองรับของระบบรองรับด้านหลัง.....	61
4.2.3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	61
4.2.3.3 ผลการทดสอบ .....	62
4.2.4 การหาค่ามวลสปริงรองรับของระบบรองรับด้านหลัง.....	62
4.2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่ามวลสปริงรองรับ .....	62
4.2.4.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	63
4.2.4.3 ผลการทดสอบ .....	63
4.2.5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของ Shock Absorber.....	64
4.2.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน.....	64
4.2.5.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	65



	หน้า
4.2.5.3 ผลการทดสอบ .....	65
4.2.6 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อและยาง .....	65
4.2.7 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับที่ไม่มี Shock Absorber.....	65
4.2.7.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับโดยไม่มี Shock Absorber .....	66
4.2.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	68
4.2.7.3 ผลการทดสอบ .....	69
4.3 สรุปค่าตัวแปรของคุณสมบัติระบบรองรับ .....	69
<b>บทที่ 5 แบบจำลองรถกอล์ฟด้วยแบบจำลองรถชนิดหนึ่งโนสี้ .....</b>	<b>70</b>
5.1 ความหมายและนิยามของแบบจำลองชนิดหนึ่งโนสี้ .....	70
5.2 สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งโนสี้ในงานวิจัย .....	71
5.3 สมการการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลองรถชนิดหนึ่งโนสี้.....	71
5.4 ปัจจัยและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	72
<b>บทที่ 6 การสร้างแบบจำลองถนนที่เป็นตัวแทนจากสนามกอล์ฟในกรุงเทพฯ และ</b>	
<b>ปริมณฑล .....</b>	<b>74</b>
6.1 ลักษณะถนนและรูปแบบการวัด .....	74
6.2 การวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ.....	78
6.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย .....	78
6.2.1.1 รถกอล์ฟ.....	78
6.2.1.2 ชุดควบคุมความเร็ว .....	79
6.2.1.3 Rolling Straightedge และ ชุดอุปกรณ์การวัด .....	80
6.2.1.4 การสอบเทียบอุปกรณ์ Rolling Straightedge.....	86
6.2.2 ขั้นตอนการวัดลักษณะถนนจากสนามกอล์ฟด้วยอุปกรณ์ Rolling Straightedge .....	98
6.2.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ ...	100
6.2.3.1 ผลลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ไทยพัฒนา สปอร์ต คลับ.....	100

6.2.3.2	ผลลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ซัมมิท ไฟร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	105
6.2.3.3	ผลลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ .....	109
6.2.3.4	ผลลักษณะถนนสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ.....	112
6.2.3.5	ผลแจกแจงความถี่ของลักษณะถนนทั้ง 4 สนามแบ่งลักษณะ ถนนตามค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังจูดอ้างอิง .....	116
6.2.3.6	ผลการแจกแจงความถี่ของลักษณะถนนทั้ง 4 สนามโดยที่พบ โดยแบ่งลักษณะถนนจากการสังเกตทางกายภาพ .....	117
6.2.3.7	วิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	118
6.3	แบบจำลองลักษณะถนน .....	119
6.3.1	กำหนดสภาวะเงื่อนไขในการออกแบบแบบจำลองลักษณะถนน.....	119
6.3.2	กำหนดสมการลักษณะถนนที่จะใช้ในแบบจำลอง .....	120
6.3.3	สร้างสัญญาณแบบสุ่มและดัดแปลงที่ได้ให้เป็นสัญญาณถนนจำลอง .....	120
6.4	สรุปผลการวัดลักษณะถนน.....	124
<b>บทที่ 7</b>	<b>การจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลแบบจำลองถนนที่ได้มาใช้ กับแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ .....</b>	<b>125</b>
7.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ .....	125
7.2	การจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับ .....	126
<b>บทที่ 8</b>	<b>การประเมินระดับความสะดวกสบายจากการขับขี่และการวิเคราะห์ผลที่ได้... ..</b>	<b>127</b>
8.1	การแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่.....	127
8.2	วิธีการประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ....	127
<b>บทที่ 9</b>	<b>การทวนสอบด้วยการขับขี่รถกอล์ฟจริง และ สาทิตการประยุกต์ใช้ แบบจำลอง .....</b>	<b>129</b>
9.1	การทวนสอบผลของแบบจำลองด้วยผลที่ได้จากการขับขี่รถกอล์ฟจริง.....	129
9.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทวนสอบ .....	130

9.1.2	วิธีการทวนสอบ.....	136
9.1.3	ผลการทวนสอบและวิเคราะห์ผล .....	137
9.1.3.1	ผลการคำนวณค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจาก แบบจำลองที่ศึกษาได้.....	138
9.1.3.2	ผลการเก็บค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับของรถกอล์ฟใน สนามกอล์ฟจริง .....	144
9.1.3.3	ผลการทวนสอบค่าที่คำนวณได้จากการใช้แบบจำลอง เปรียบเทียบกับค่าที่เก็บได้จากการแล่นรถกอล์ฟจริง .....	154
9.2	การสาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลอง.....	158
<b>บทที่ 10</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>160</b>
10.1	สรุปผลงานวิจัย.....	160
10.1.1	สรุปผลการเก็บข้อมูลสภาพถนนในสนามกอล์ฟ .....	160
10.1.2	สรุปผลการทวนสอบด้วยการขับขีรถกอล์ฟจริง และ สาธิตการ ประยุกต์ใช้แบบจำลอง .....	160
10.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป .....	161
	<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>162</b>
	<b>บรรณานุกรม .....</b>	<b>165</b>
	<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>166</b>
	ภาคผนวก ก การกรองความถี่แบบ Butterworth Filter .....	167
	ภาคผนวก ข การเกิดปรากฏการณ์ Aliasing .....	170
	ภาคผนวก ค ข้อมูลการวัดลักษณะถนนที่สนามต่างๆ .....	172
	ภาคผนวก ง การคำนวณค่าความแข็งสปริงเพื่อใช้กับ Rolling Straightedge .....	253
	ภาคผนวก จ ผลการทดสอบหาค่าตัวแปรของระบบรองรับต่าง ๆ .....	259
	ภาคผนวก ฉ ผลการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับหน้าและหลัง.....	278
	ภาคผนวก ช ข้อมูลรายละเอียดกล่องควบคุมความเร็วมอเตอร์และชุดควบคุม ความเร็ว.....	281

	หน้า
ภาคผนวก ช ผลการทดสอบอุปกรณ์การวัด Rolling Straightedge บนเส้นทางอื่น.....	287
ภาคผนวก ฉ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง.....	293
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	297



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2-1 ค่ามัธยฐาน ขอบเขตบน ขอบเขตล่าง สำหรับการวัดสมการให้อยู่ในรูป Smoothed PSD ที่แต่ละช่วงความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง n .....	29
2-2 แสดงการแบ่งประเภทของถนน .....	32
2-3 ค่า Frequency weightings $W_k$ , $W_d$ , $W_f$ ที่ใช้ในแกนอ้างอิงต่างๆ.....	43
2-4 ค่า Frequency weightings $W_c$ , $W_e$ , $W_j$ ที่ใช้ในแกนอ้างอิงต่างๆ.....	43
2-5 ค่า $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, Q_4, Q_5, Q_6$ สำหรับค่า $W_k, W_d, W_f$ .....	45
2-6 ค่า $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, Q_4, Q_5, Q_6$ สำหรับค่า $W_c, W_e, W_j$ .....	45
2-7 สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนในแบบต่างๆ.....	49
4-1 รายละเอียดของเครื่องทดสอบแรงกดยี่ห้อ Avery Denison รุ่น 7110CCJ.....	59
4-2 รายละเอียดของเครื่องทดสอบแรงกด ยี่ห้อ Morita .....	60
4-3 รายละเอียดของตาชั่งสปริง ยี่ห้อ Trade mark.....	61
4-4 รายละเอียดของตาชั่งสปริงวางพื้น ยี่ห้อ Mimaki .....	63
4-5 ผลการหาค่ามวลที่ลดลงแต่ละล้อขณะทำการวัด.....	63
4-6 รายละเอียดของเครื่องทดสอบแรงกดค่าความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน Koni Testing Machine, Model 4423-05.....	64
4-7 ข้อมูลทางเทคนิคของ Accelerometer รุ่น K-Beam 8393B10 ยี่ห้อ Kristler .....	67
4-8 ข้อมูลทางเทคนิคของ Data logger รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 ยี่ห้อ Dewetrons .....	68
4-8 สรุปค่าตัวแปรของคุณสมบัติระบบรองรับของรถกอล์ฟตัวอย่าง.....	69
6-1 ข้อมูลทางเทคนิคของ Accelerometer รุ่น K-Beam 8393B10 ยี่ห้อ Kristler .....	82
6-2 ข้อมูลทางเทคนิคของ Data logger รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 ยี่ห้อ Dewetrons.....	83
6-3 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ PM.....	85
6-4 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ SKYWISE.....	85
6-5 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A ในแต่ละช่วง .....	101
6-6 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B ในแต่ละช่วง .....	102
6-7 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ ใน โซน West ในแต่ละช่วง .....	106



ตาราง	หน้า
6-8 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ใน โซน North ในแต่ละช่วง.....	107
6-9 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟไดนาสตี ในแต่ละช่วง.....	110
6-10 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ ในหลุม 1 – 9 ในแต่ละ ช่วง .....	113
6-11 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ ในหลุม 9 – 18 ในแต่ ละช่วง .....	114
9-1 ข้อมูลทางเทคนิคของ Accelerometer รุ่น K-Beam 8393B10 ยี่ห้อ Kristler.....	131
9-2 ข้อมูลทางเทคนิคของ Data logger รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 ยี่ห้อ Dewetrons .....	132
9-3 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ PM.....	135
9-4 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ SKYWISE.....	135
9-5 ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับที่ใช้ในการทวนสอบ.....	137
9-6 ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลสปริงรองรับ และ การประเมินความ สะดวกสบายจากการขับขีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆ โดย เปรียบเทียบระหว่างการจำลองการเคลื่อนที่การขับขีรถกอล์ฟจริง.....	157
ค-1 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ช่วง 0 - 1000 เมตรของสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	201
ค-2 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ช่วง 1000 – 1400 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A ....	202
ค-3 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1400 – 1600 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	203
ค-4 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1600 – 2000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	204
ค-5 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1600 – 2000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	205
ค-6 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2650 – 3450 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	206



ตาราง	หน้า
ค-20 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3200 – 3800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน west.....	220
ค-21 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3800 – 3900 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน west.....	221
ค-22 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 700 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North.....	222
ค-23 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 700 – 900 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North .....	223
ค-24 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 900 – 1000 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North .....	224
ค-25 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1000 – 1100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน North .....	225
ค-26 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1100 – 1200 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North .....	226
ค-27 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1200 – 1300 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน North .....	227
ค-28 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1300 – 2600 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน North .....	228

ตาราง	หน้า
ค-29 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2600 – 2800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน North .....	229
ค-30 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2800 – 3400 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน North .....	230
ค-31 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 200 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ .....	231
ค-32 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 200 – 350 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ..	232
ค-33 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 350 – 2050 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	233
ค-34 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2050 – 2650 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	234
ค-35 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2650 – 2850 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	235
ค-36 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2850 – 3000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	236
ค-37 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3000 – 4400 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	237
ค-38 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 4400 – 5100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	238

ตาราง	หน้า
ค-39 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 5100 – 7000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอนคันทรี คลับ.....	239
ค-40 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 500 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 1-9 .....	240
ค-41 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 500 – 800 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 1- 9.....	241
ค-42 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 800 – 1100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 1 – 9 .....	242
ค-43 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1100 – 1900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 1- 9.....	243
ค-44 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1900 – 2700 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 1- 9.....	244
ค-45 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2700 – 2900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 1- 9.....	245
ค-46 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 10 – 18 .....	246
ค-47 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 200 – 900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ กลุ่ม 10 - 18.....	247



ตาราง	หน้า
ค-48 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 900 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18 .....	248
ค-49 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1900 – 3100 เมตรของ สนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18 .....	249
ค-50 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3100 – 3200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18 .....	250
ค-51 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3200 – 3300 เมตร ของ สนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18 .....	251
ค-52 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3300 – 3700 เมตรของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18 .....	252
จ-1 ข้อมูลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 445.45 N-s/m .....	262
จ-2 ข้อมูลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 612.5 N-s/m .....	264
จ-3 ข้อมูลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 1057.5 N-s/m .....	265
จ-4 ข้อมูลการทดสอบค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง .....	267
จ-5 ข้อมูลการทดสอบค่าความแข็งสปริงของแหนบด้านหลัง .....	268
จ-6 ผลการทดสอบและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลัง ขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน .....	275
จ-7 ข้อมูลการทดสอบค่าความแข็งสปริงของแหนบด้านหน้า .....	276
ฉ-1 ความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับด้านหลังที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่างๆ .....	275
ฉ-2 ความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับด้านหน้า .....	276

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	(บน) ระบบแกว่งอ้างอิงสำหรับรถยนต์ (ล่าง) ระบบทดแทนสำหรับคำนวณการ สั่นสะเทือน .....	4
2-2	ความสัมพันธ์ระหว่างการตุ้มจะผิวดน และเกณฑ์การประเมินคุณภาพ.....	6
2-3	ภาพด้านข้างตัวถังรถสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบ สั่นสะเทือน .....	7
2-4	ระบบทดแทนไดนามิกส์อย่างง่าย.....	8
2-5	คลื่นของผิวดนในรูปแบบฟังก์ชันไซน์ในความสัมพันธ์กับเวลา t (ซ้าย) คลื่นของผิวดนในรูปแบบฟังก์ชันไซน์ในความสัมพันธ์กับระยะทาง x (ขวา).....	9
2-6	อัตราส่วนของแอมพลิจูดในความสัมพันธ์กับความเร็ว $v$ ที่ $L$ คงที่ (ซ้าย) อัตราส่วนของแอมพลิจูดในความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น $L$ ที่ $v$ คงที่ (ขวา).....	10
2-7	คลื่นของผิวดนแบบพีริออดิกฟังก์ชัน (Periodic function) (ซ้าย) Amplitude spectrum (ขวา) .....	11
2-8	การอ่านค่า Amplitude ratio ของระบบสั่นสะเทือน $(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}})_i$ ที่ $i\omega$ ต่างๆ (ซ้าย) ค่าแอมพลิจูด $\hat{F}_{zi}$ ซึ่งได้จากการคูณ Amplitude ratio $(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}})_i$ กับ $\hat{h}_i$ (ขวา).....	12
2-9	ความเป็นคลื่นของผิวดนแบบไม่มีกฎเกณฑ์ (ซ้าย) Amplitude spectrum ในความสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุม $\Omega$ (กลาง) Amplitude spectrum ในความสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุม $\omega$ (ขวา).....	13
2-10	กราฟแสดงแรงกดรรวม $F_z(t)$ แสดงค่าเฉลี่ย (ซ้าย) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ขวา).....	15
2-11	การคำนวณค่าประสิทธิภาพ (Effective value) จาก power spectrum $G_d(\omega)$ ของ ถนนที่ขึ้นกับคลื่นและความเร็ว.....	17
2-12	ความสัมพันธ์ระหว่าง Power spectrum $G_d(\Omega)$ กับ $G_d(\omega)$ ที่ความเร็ว $V$ ต่างๆ ...	19
2-13	การเคลื่อนที่แบบลักษณะเป็นคาบ .....	20
2-14	สัญญาณการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกที่แสดงอยู่บนแกนความถี่ .....	21
2-15	สัญญาณบนโดเมนเวลา .....	22
2-16	สัญญาณบนโดเมนความถี่ .....	22
2-17	การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนเวลา .....	23

รูปที่	หน้า
2-18	การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนความถี่..... 23
2-19	ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ ..... 24
2-20	ตัวอย่างของสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ บนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่..... 25
2-21	การแบ่งลำดับชั้นของถนนตามข้อแนะนำใน ISO 8608 ..... 31
2-22	วิธีการวัดลักษณะถนนด้วยวิธี Rod and Level method ..... 33
2-23	วิธีการทำงานของอุปกรณ์ Dipstick..... 34
2-24	ภาพวิธีการวัดแบบ Inertial Profiler และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์..... 35
2-25	การทำงานของวิธีการวัดแบบ Inertial Profiler ..... 35
2-26	ผลการวัดระหว่าง วิธี Dipstick และ วิธี Inertial Profiler 2 ยี่ห้อที่ยังไม่ได้กรอง ความถี่ต่ำ แกนตั้ง คือ ความสูงเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง แกนนอน คือ ระยะทางที่ทำ การวัด..... 36
2-27	ผลการวัดระหว่าง วิธี Dipstick และ Inertial Profiler 2 ยี่ห้อ ที่ผ่านการกรองความถี่ ต่ำแล้ว แกนตั้ง คือ ความสูงเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง แกนนอน คือ ระยะทางที่ทำการ วัด..... 36
2-28	ฟังก์ชันขยายของ Profilograph เทียบกับขนาดของฐาน..... 37
2-29	ฟังก์ชันขยายของ Sliding Straightedges เทียบกับขนาดของฐาน..... 38
2-30	ตัวแปรที่จะใช้คำนวณความขรุขระของถนนของสมการที่ 2-54..... 39
2-31	ฟังก์ชันขยายของ Rolling Straightedges เทียบกับขนาดของฐาน..... 39
2-32	ภาพของ BPR Roughometer และ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง..... 39
2-33	ภาพของ CHLOE และ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง..... 40
2-34	ภาพของ RTRRMS และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ถูกต้อง..... 40
2-35	แกนอ้างอิงของมนุษย์ที่ใช้ในการคำนวณ..... 42
2-36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Frequency weightings $W_k$ , $W_d$ , $W_f$ กับความถี่(f) ..... 45
2-37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Frequency weightings $W_c$ , $W_e$ , $W_j$ กับความถี่(f) ..... 46
2-38	อุปกรณ์และการติดตั้งของ Road profilometer ..... 48
2-39	แผนภูมิแสดงการคำนวณของ Road profilometer ..... 48

รูปที่	หน้า
3-1	แผนภูมิขั้นตอนการทำงานวิจัย ..... 52
3-2	ตัวอย่างแผนภูมิการแจกแจงข้อมูลเพื่อหาค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิงของถนนที่พบบ่อยที่สุดเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการออกแบบลักษณะถนนจำลอง..... 55
4-1	รถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของ บริษัท ทีเอส วีอีเคิลเทค..... 58
4-2	การทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของ ล้อและยาง ..... 59
4-3	การทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของแหนบ ..... 60
4-4	การชั่งมวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ ..... 61
4-5	การชั่งมวลรถกอล์ฟเพื่อหาค่ามวลส่วนสปริงรองรับ ..... 62
4-6	การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน..... 64
4-7	ตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer..... 66
4-8	ภาพแสดง Data Logger และตำแหน่งที่ติดตั้งในรถกอล์ฟ ..... 67
4-9	ถุงทรายที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสั่นแบบอิสระ (ซ้าย) ตำแหน่งการทิ้งถุงทรายเพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ระบบรองรับ (ขวา) .. 69
5-1	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรองรับด้วยแบบจำลองรถชนิดหนึ่งในสี่..... 70
5-2	Free Body Diagram ของมวล $m_2$ ..... 71
5-3	Free Body Diagram ของมวล $m_1$ ..... 71
5-4	แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ (Quarter Car Model) ของรถกอล์ฟที่จะนำมาใช้ในการศึกษา ..... 73
6-1	แผนภูมิแสดงการคำนวณในกรณีการวัดความสูงของถนนด้วยระดับน้ำเพื่อให้สมการของลักษณะถนนตามมาตรฐาน ISO 8608..... 77
6-2	ภาพรถกอล์ฟที่นำมาใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้และชุดอุปกรณ์สำหรับลาก Rolling Straightedge ด้านหลังรถกอล์ฟ..... 79
6-3	อุปกรณ์ที่ทำสำหรับการยึด Rolling Straightedge กับ รถกอล์ฟ..... 79
6-4	การทำงานชุดควบคุมความเร็วและการเชื่อมต่อ ..... 79
6-5	Rolling Straightedge และการติดตั้งกับรถกอล์ฟ ..... 80
6-6	เพลลาของล้อกลางของ Rolling Straightedge (ซ้าย) และจุดติดตั้ง (ขวา)..... 81
6-7	ส่วนฐานรองรับ Accelerometer ของ Rolling Straightedge..... 81
6-8	Accelerometer และวิธีการติดตั้งกับ Rolling Straightedge ..... 82

รูปที่	หน้า
6-9	ภาพแสดง Data Logger และตำแหน่งที่ติดตั้งในรถกอล์ฟ ..... 83
6-10	แบตเตอรี่และตำแหน่งที่ติดตั้ง ..... 83
6-11	รูปหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ..... 84
6-12	โปรแกรม Dewesoft 6.3.3 ..... 85
6-13	ถนนที่ใช้ทำการสอบเทียบ ..... 86
6-14	ภาพเสาตั้งสำหรับการตั้งจุดอ้างอิงในการวัดระดับน้ำ ..... 86
6-15	ภาพถ่ายยางสำหรับการตั้งระดับน้ำ ..... 87
6-16	สายเอ็นขณะใช้งานและสัญลักษณ์เพื่อเป็นตัวบอกจุดที่จะทำการวัด ..... 87
6-17	สายดึงสำหรับการวัดความสูงของผิวถนนเทียบกับจุดอ้างอิง ..... 88
6-18	วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการวัดระดับน้ำ (ซ้าย) สภาพถนนที่ใช้ในการสอบเทียบ (ขวา) ..... 89
6-19	แผนภูมิแสดงการคำนวณในกรณีการวัดความสูงของถนนด้วยการวัดระดับน้ำ เพื่อให้ได้สมการของลักษณะถนนตามมาตรฐาน ISO 8608 ..... 90
6-20	ลักษณะถนนที่ได้จากการวัดระดับน้ำ ..... 91
6-21	ลักษณะถนนที่ผ่านการกรองความถี่ต่ำแล้ว ..... 92
6-22	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของการวัดลักษณะถนนด้วย ระดับน้ำก่อนและหลังปรับให้อยู่ในรูป Octave Bandwidth ..... 93
6-23	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของระดับน้ำเมื่อปรับให้ค่ากำลัง ของสมการให้มีค่า $w$ เท่ากับ 2 เพื่อประเมินมาตรฐาน ISO 8608 ..... 93
6-24	ตัวอย่างสัญญาณความเร่งที่ได้จาก Accelerometer ..... 94
6-25	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับ เวลา ..... 95
6-26	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับ ระยะทาง ..... 96
6-27	ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทางของผลการวัดด้วย Rolling Straightedge ทั้ง 3 ครั้งในรูป Octave Bandwidth ..... 96



รูปที่	หน้า
6-28	ค่าความหนาแน่นสเปคตรัมกำลังของการกระจัดของการวัดด้วย Rolling Straightedge เมื่อปรับให้สมการความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังมีค่า $w$ เท่ากับ 2 เพื่อประเมินมาตรฐาน ISO 8608..... 97
6-29	เปรียบเทียบผลการวัดค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จาก Rolling Straightedge กับการวัดด้วยระดับน้ำ เส้นสีดำแสดงเส้นแบ่งเกรดของถนนตาม ISO 8608 ..... 97
6-30	แผนผังการประกอบอุปกรณ์การเก็บข้อมูลสภาพถนน ..... 98
6-31	ภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ 1. รถกอล์ฟ 2. Rolling Straightedge 3. Data Logger 4. Accelerometer 5. Computer Notebook ..... 99
6-32	ภาพของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ต คลับ เส้นสีแดงและเส้นสีน้ำเงินแสดงเส้นทางการเก็บข้อมูลโซน A และ B ตามลำดับ..... 100
6-33	ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสม ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ ..... 104
6-34	แสดงภาพสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ ..... 105
6-35	ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสม ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ ..... 108
6-36	ภาพของสนามไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ ..... 109
6-37	ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสมของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ..... 111
6-38	ภาพสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ..... 112
6-39	ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสมของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ ..... 115

รูปที่	หน้า
6-40	ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสมของสนามกอล์ฟ ทั้ง 4 สนาม ..... 116
6-41	ลักษณะของถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยางที่ไม่สามารถสังเกตคลื่นความถี่ต่ำได้ ..... 117
6-42	ถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยางที่สังเกตคลื่นความถี่ต่ำได้ ..... 117
6-43	บริเวณถนนที่ใช้วัสดุที่หยาบขนาดใหญ่ปูพื้นทำทาง ..... 118
6-44	บริเวณถนนที่ใช้วัสดุตัวหนอนขนาดเล็กปูพื้นทำทาง ..... 118
6-45	สัญญาณ White Gaussian Noise จำนวน 1636070 จุด บนถนนจำลอง 100 m .... 121
6-46	ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันของสัญญาณ White Gaussian Noise ในรูป Octave Bandwidth ..... 121
6-47	สัญญาณความชันของถนนที่ตำแหน่งต่างๆหลังการปรับเปลี่ยน ..... 122
6-48	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของสัญญาณในรูป Octave Bandwidth หลังการปรับเปลี่ยนเป็นความชันของถนน ..... 123
6-49	สัญญาณความสูงของถนนที่ตำแหน่งต่างๆหลังการปรับเปลี่ยน ..... 123
6-50	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของสัญญาณในรูป Octave Bandwidth หลังการปรับเปลี่ยน ..... 124
7-1	สัญญาณที่จะใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ ..... 125
7-2	ภาพแสดง Block diagram model ในโปรแกรม MATLAB & SIMULINK ที่ได้จัดทำขึ้น ..... 126
7-3	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ บนโปรแกรม MATLAB & SIMULINK ..... 126
8-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักและความถี่ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ในกรณีของท่านั่งมีแรงกระทำจากใต้เบาะ ..... 128
9-1	การทำงานชุดควบคุมความเร็วและการเชื่อมต่อ ..... 130
9-2	ตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer ..... 131
9-3	Data Logger และตำแหน่งที่ติดตั้งในรถกอล์ฟ ..... 132
9-4	อุทราบายที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนัก ..... 133

รูปที่	หน้า
9-5	ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 445 N-s/m, 612 N-s/m และ 1057 N-s/m จากซ้ายไปขวาตามลำดับ ..... 133
9-6	แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 134
9-7	รูปหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ..... 134
9-8	โปรแกรม Dewesoft 6.3.3 ..... 135
9-9	ถนนที่ใช้ทำการทดสอบเทียบ ..... 136
9-10	ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ $(a(t))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ เท่ากับ 285.16 N-s/m.... 138
9-11	ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ $(a(t))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ เท่ากับ 730.16 N-s/m.... 139
9-12	ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ $(a(t))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ เท่ากับ 897.16 N-s/m.... 139
9-13	ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ $(a(t))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ เท่ากับ 1342.16 N-s/m.. 140
9-14	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 $(\tilde{a}_w(f))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ เท่ากับ 285.16 N-s/m ..... 141
9-15	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 $(\tilde{a}_w(f))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ เท่ากับ 730.16 N-s/m ..... 141
9-16	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 $(\tilde{a}_w(f))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับเท่ากับ $(c_2)$ 897.16 N-s/m ..... 142
9-17	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 $(\tilde{a}_w(f))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับเท่ากับ $(c_2)$ 1342.16 N-s/m ..... 142
9-18	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่ $(\tilde{a}_w(f))$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ $(c_2)$ ต่างๆ..... 143

รูปที่	หน้า
9-19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งประสิทธิผลที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับ ( $\xi$ ) ต่างๆ ..... 144
9-20	สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16 Ns/m ..... 145
9-21	สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 730.16 Ns/m ..... 146
9-22	สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 897.16 Ns/m ..... 147
9-23	สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 1342.16 Ns/ ..... 148
9-24	ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีรอกอลด์ฟริงที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16 N-s/m ..... 150
9-25	ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีรอกอลด์ฟริงที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 730.16 N-s/m ..... 150
9-26	ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีรอกอลด์ฟริงที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 897.16 N-s/m ..... 151
9-27	ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีรอกอลด์ฟริงที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 1342.16 N-s/m ..... 151
9-28	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วบนโดเมนความถี่ ( $G_a(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) ต่างๆ ..... 152
9-29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $G_a(f)$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับ ( $\xi$ ) ต่างๆ ..... 153

รูปที่	หน้า
9-30 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักบนโดเมนความถี่ ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับช็อคกอล์ฟจริงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 285.16 N-s/m .....	154
9-31 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับช็อคกอล์ฟจริงบนโดเมนความถี่ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 730.16 N-s/m .....	155
9-32 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับช็อคกอล์ฟจริงบนโดเมนความถี่ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 897.16 N-s/m .....	155
9-33 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับช็อคกอล์ฟจริงบนโดเมนความถี่ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 1342.16 N-s/m .....	156
9-34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับหลังให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับ ( $\xi$ ) ต่างๆ.....	158
9-35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631 -1 ของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนต่างๆ ( $c_s$ ) .....	159
9-36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนัก $W_k$ ตาม ISO 2631 -1 ของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) เทียบกับค่าอัตราส่วนความหน่วง ( $\xi$ ) ของระบบรองรับต่างๆ.....	160
ก-1 การกรองความถี่แบบ Butterworth filter ในอันดับต่างๆ.....	169
ข-1 ภาพแสดงการเก็บสัญญาณด้านซ้าย ไม่เป็นไปตามกฎของ Nyquist criterion ด้านขวาเป็นการเก็บสัญญาณที่เป็นไปตามกฎ Nyquist criterion .....	171



รูปที่	หน้า
ค-1	แสดงลักษณะถนนในช่วง 0 – 1000 เมตรแรกนับจากจุดเริ่มตีกอล์ฟที่หลุม 1 ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 174
ค-2	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1400 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 175
ค-3	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1400 – 1600 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 175
ค-4	แสดงลักษณะถนนในระยะเวลาตั้งแต่ 1600 – 2000 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 176
ค-5	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2000 – 2600 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 176
ค-6	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 3450 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 177
ค-7	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3450 – 3850 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน A ..... 177
ค-8	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 450 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 178
ค-9	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 450 – 550 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 178
ค-10	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 550 – 650 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 179
ค-11	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 650 – 850 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 179
ค-12	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 850 – 1250 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 180
ค-13	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1250 – 1350 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 180
ค-14	แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1350 – 1550 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โชน B ..... 181

รูปที่	หน้า
ค-15 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1550 – 2050 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โซน B .....	181
ค-16 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 2150 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โซน B .....	182
ค-17 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน West .....	182
ค-18 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 100 – 3100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน West .....	183
ค-19 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน West .....	183
ค-20 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3800 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน West .....	184
ค-21 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3800 – 3900 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน West .....	184
ค-22 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 700 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North .....	185
ค-23 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 700 – 900 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North .....	185
ค-24 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1000 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North.....	186
ค-25 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North.....	186
ค-26 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1200 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North.....	187
ค-27 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1200 – 1300 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North.....	187
ค-28 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1300 – 2600 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ด แอน คันทรี่ คลับ โซน North.....	188

รูปที่	หน้า
ค-29 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2600 – 2800 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน North.....	188
ค-30 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2800 – 3400 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน North.....	189
ค-31 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	189
ค-32 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 350 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	190
ค-33 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 350 – 450 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	190
ค-34 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 2650 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	191
ค-35 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 2850 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	191
ค-36 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2850 – 3000 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	192
ค-37 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3000 – 4400 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	192
ค-38 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 4400 – 5100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	193
ค-39 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 5100 – 7000 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	193
ค-40 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 500 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 1-9.....	194
ค-41 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 500 – 800 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 1-9.....	194
ค-42 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 800 – 1100 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 1-9.....	195

รูปที่	หน้า
ค-43 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 1-9.....	195
ค-44 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 2700 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 1-9.....	196
ค-45 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2700 – 2900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 1-9.....	196
ค-46 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	197
ค-47 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	197
ค-48 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	198
ค-49 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 3100 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	198
ค-50 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	199
ค-51 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3300 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	199
ค-52 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3300 – 3700 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18.....	200
ค-53 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 - 1000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	201
ค-54 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1000 – 1400 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ต คลับ โซน A.....	202

รูปที่	หน้า
ค-55 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1400 – 1600 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	203
ค-56 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1600 – 2000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ .....	204
ค-57 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2000 – 2600 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	205
ค-58 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2650 – 3450 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	206
ค-59 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3450 – 3850 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	207
ค-60 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 450 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A.....	208
ค-61 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 450 – 550 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	209
ค-62 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 550 – 650 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	210
ค-63 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 650 – 850 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	211



รูปที่	หน้า
ค-64 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 850 – 1250 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	212
ค-65 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1250 – 1350 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	213
ค-66 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1350 – 1550 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	214
ค-67 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1550 – 2050 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	215
ค-68 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2050 – 3300 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B.....	216
ค-69 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน west.....	217
ค-70 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 100 – 3100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน west.....	218
ค-71 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3100 – 3200 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับโซน west.....	219
ค-72 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3200 – 3800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน west.....	220



รูปที่	หน้า
ค-82 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2800 – 3400 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ไชน North .....	230
ค-83 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 200 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	231
ค-84 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 200 – 350 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	232
ค-85 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 350 – 2050 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	233
ค-86 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2050 – 2650 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	234
ค-87 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2650 – 2850 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	235
ค-88 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2850 – 3000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	236
ค-89 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3000 – 4400 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	237
ค-90 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 4400 – 5100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	238

รูปที่	หน้า
ค-91 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 5100 – 7000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ.....	239
ค-92 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 500 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9.....	240
ค-93 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 500 – 800 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9.....	241
ค-94 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 800 – 1100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 1– 9.....	242
ค-95 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1100 – 1900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9.....	243
ค-96 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1900 – 2700 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9.....	244
ค-97 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2700 – 2900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9.....	245
ค-98 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 10 – 18.....	246
ค-99 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 200 – 900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 10 - 18.....	247

รูปที่	หน้า
ค-100 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 900 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18 .....	248
ค-101 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1900 – 3100 เมตรของ สนามกอล์ฟบางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18.....	249
ค-102 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3100 – 3200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 10 - 18.....	250
ค-103 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3200 – 3300 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ หลุม 10 - 18.....	251
ค-104 ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3300 – 3700 เมตรของ สนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18 .....	252
ง-1 ลักษณะถนนที่ได้จากการวัดระดับน้ำ .....	254
ง-2 ตัวแปรที่จะใช้คำนวณสมการ ง-1.....	255
ง-3 ผลต่างของระยะทางระหว่างล้อสำหรับวัดลักษณะถนนกับส่วนของฐานในแนวตั้ง ....	255
ง-4 ระยะการทำงานและการติดตั้งของสปริง.....	256
ง-5 การเคลื่อนที่ของล้อกลางสำหรับวัดลักษณะถนนที่เวลาต่างๆ .....	257
ง-6 ความเร่งของล้อกลางกรณีล้อติดกับถนนตลอดเวลาในเส้นทางที่สอบเทียบ .....	257
จ-1 ภาพเครื่องทดสอบ Koni Testing Machine, Model 4423-05.....	260
จ-2 ตัวอย่างผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือน โดยใช้ Koni Testing Machine, Model 4423-05 .....	261
จ-3 ผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยทั้งจังหวะอัดและจังหวะขยายอยู่ที่ 445.45 N-s/m .....	262
จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร่งที่เกิดขึ้นของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนในจังหวะอัดและขยาย .....	263



รูปที่	หน้า
จ-5 ผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยทั้งจังหวัด อัดและจังหวัดขยายอยู่ที่ 612.5 N-s/m .....	263
จ-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็วที่เกิดขึ้นของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ใน จังหวัดอัดและขยาย .....	264
จ-7 ผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยทั้งจังหวัด อัดและจังหวัดขยายอยู่ที่ 1057.5N-s/m .....	265
จ-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็วที่เกิดขึ้นของตัวหน่วงการ สั่นสะเทือน ในจังหวัดอัดและขยาย .....	266
จ-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยาง .....	267
จ-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยาง .....	268
จ-11 การลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic Decrement).....	269
จ-12 การเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟหลังจากได้รับแรงกระตุ้นในกรณีที่มี มวลของระบบ 135 kg มีค่าความแข็งสปริง 33000 N/m ตัวเลขที่แสดงในกราฟขนาด ของการสั่นสะเทือนของจุดสูงสุดสัมพัทธ์ 4 ค่าแรก .....	272
จ-13 การเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟหลังจากได้รับแรงกระตุ้นในกรณีที่มี มวลของระบบ 150 kg มีค่าความแข็งสปริง 33000 N/m ตัวเลขที่แสดงในกราฟขนาด ของการสั่นสะเทือนของจุดสูงสุดสัมพัทธ์ 4 ค่าแรก .....	273
จ-14 การเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟหลังจากได้รับแรงกระตุ้นในกรณีที่มี มวลของระบบ 165 kg มีค่าความแข็งสปริง 33000 N/m ตัวเลขที่แสดงในกราฟขนาด ของการสั่นสะเทือนของจุดสูงสุดสัมพัทธ์ 4 ค่าแรก .....	274
จ-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยาง .....	276
จ-16 การชั่งมวลส่วนที่เป็นคูลล์อ.....	277
ด-1 ระบบรองรับด้านหน้าเป็นแหนบวางขวาง .....	280
ช-1 ข้อมูลทั่วไปของกล่องควบคุมความเร็ว Curtis PMC Model 1266 SepEx@.....	282
ช-2 วงจรไฟฟ้าภายในกล่องควบคุมความเร็ว Curtis PMC Model 1266 SepEx@.....	283
ช-3 ขนาดของกล่องควบคุมความเร็ว Curtis PMC Model 1266 SepEx@ .....	284
ช-4 ข้อมูลทั่วไปของชุดควบคุมความเร็ว Model 113 LP.....	285
ช-5 รายละเอียดของชุดควบคุมความเร็วและขนาด ของ Model 113 LP.....	286

รูปที่	หน้า
ซ-1	เส้นทางถนนที่ใช้ในการทดสอบ ..... 288
ซ-2	สัญญาณความเร่งบนโดเมนเวลาที่ได้จาก Accelerometer ..... 288
ซ-3	สัญญาณความเร่งบนโดเมนความถี่..... 289
ซ-4	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา.. 289
ซ-5	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ..... 290
ซ-6	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ..... 291
ซ-7	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมในรูป Octave band ..... 291
ซ-8	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมที่จัดอยู่ในรูปสมการกำลัง 2 ตาม ISO 8608 แล้ว ..... 292
ฉ-1	กระแสไฟฟ้า $x(t)$ และ $x_T(t)$ ..... 295

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
$a(t)$	ความเร่งบนโดเมนเวลา	$m/s^2$
$\tilde{a}_w(f)$	ค่าประสิทธิภาพผลของความเร่งที่ให้น้ำหนักแล้วบนโดเมนความถี่	$m/s^2$
$a_w$	ค่าประสิทธิภาพผลของความเร่งรวมที่ให้น้ำหนักแล้ว	$m/s^2$
$c$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง	N-s/m
$c_1$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อและยาง	N-s/m
$c_2$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ	N-s/m
$c_s$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน	N-s/m
$F$	แรง	N
$F_z$	แรงกดที่ล้อกระทำกับผิวถนนหรือแรงในแนวดิ่งที่ล้อ	N
$F_{z,stat}, F_{z,dyn}$	แรงกดที่ล้อกระทำกับผิวถนนที่เป็นแรงสถิตและแรงพลวัต	N
$\hat{F}_z, \hat{F}_z$	แอมพลิจูดเชิงซ้อนและจริงของแรงพลวัต	N
$f$	ความถี่ที่ขึ้นกับเวลา(Time frequency)	Hz
$G_a(\Omega)$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง	$\frac{m^{-2}}{rad/m}, m^{-1}$
$G_a(\omega)$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา	$\frac{m^2}{(rad/s) \cdot s^4}$
$G_a(f)$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่	$\frac{m^2}{s^4 \cdot Hz}$
$G_d(\Omega)$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง	$\frac{m^2}{rad/m}, m^3, cm^3$
$G_d(\omega)$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา	$\frac{m^2}{(rad/s)}$
$G_F$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของแรงพลวัต	$N^2 / Hz$
$G_v(\Omega)$	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง	$\frac{1}{rad/m}, m$
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $g = 9.81 m/s^2$ )	$m/s^2$

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
$h$	ฟังก์ชันกระตุ้น, ความสูงของคลื่นถนน, ฟังก์ชันคลื่นถนน	$m$
$\hat{h}, \hat{h}$	แอมพลิจูดเชิงซ้อน, จริ่งของคลื่นถนน	$m$
$i$	รัศมีไจเรชัน	$m$
$J$	โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนแกนหนึ่ง	$kg\ m^2$
$j$	หนึ่งหน่วยจินตภาพ ( $j = \sqrt{-1}$ )	-
$k$	ค่าความแข็งสปริง	N/m
$k_1$	ค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง	N/m
$k_2$	ค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับ	N/m
$L$	ความยาวคลื่น (Wavelength)	$m$
$l$	ระยะช่วงล้อ	$m$
$l_{zV}$	ระยะห่างในแนวระดับจากจุดศูนย์กลางมวลถึงเพลาหน้า	$m$
$l_{zH}$	ระยะห่างในแนวระดับจากจุดศูนย์กลางมวลถึงเพลาหลัง	$m$
$m$	มวล	kg
$m_1$	มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ	kg
$m_2$	มวลส่วนสปริงรองรับ	kg
$n$	ความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง(Spatial frequency)	$cycle / m$
$n_0$	ความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง( $n_0 = 0.1\ cycle / m$ )	$cycle / m$
PSD	ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density)	
RMS	ค่าประสิทธิผล(Root Mean Square)	
$v$	ความเร็ว	$m / s$
$\alpha, \delta, \varepsilon$	มุมเฟส	องศา( $^{\circ}$ ), $rad$
$\chi$	มุมโคลง, มุมรอบแกน $x$	$rad$
$\nu$	ความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่หน่วง	$1/s, rad/s$
$\sigma_q$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ $q$ ใดๆ ( $\sigma_q^2 =$ ค่าความแปรปรวนของ $q$ )	ขึ้นกับ $q$
$\varphi$	มุมปัก, มุมรอบแกน $y_2$	$rad$
$\psi$	มุมเบนของรถ (yaw angle)	$rad$
$\Omega$	ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง (Angular spatial frequency)	$rad / m$

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
$\Omega_0$	ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $\Omega_0 = 1 \text{ rad} / m$ )	$\text{rad} / m$
$\omega$	ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา (Angular frequency)	$\text{rad} / s$
$\xi$	Damping ratio	



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ธุรกิจหนึ่งที่คนไทยให้ความสนใจเป็นอย่างมาก คือ อุตสาหกรรมที่ผลิตรถไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือ รถกอล์ฟ เนื่องมาจากมีตลาดรองรับในประเทศไทย คนไทยมีความสามารถในการผลิตได้เอง รวมทั้งในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศมีจำนวนน้อย นอกจากนี้เป้าหมายของกลุ่มอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีความหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นสนามกอล์ฟ หมู่บ้านโรงพยาบาล หรือ ห้างสรรพสินค้า นอกจากนี้รถไฟฟ้ายังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งขณะนี้พลังงานไฟฟ้าเริ่มมีบทบาทและมีความสำคัญมากขึ้นต่อยานยนต์ในอนาคต ในแง่ของพลังงานที่สะอาด และดูแลรักษาง่ายจึงเป็นที่สนใจในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย ดังนั้นการพัฒนาและการปรับปรุงคุณภาพของรถกอล์ฟจึงมีความจำเป็นเพื่อความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมในประเทศต่อไป

สิ่งหนึ่งที่สำคัญในการทดสอบและการออกแบบรถกอล์ฟทั่วไป คือ การรู้สภาพการใช้งานจริง เพื่อให้มีการออกแบบและทดสอบรถกอล์ฟได้ถูกต้องตรงกับสภาวะการใช้งาน สภาพถนนจึงเป็นปัจจัยหนึ่งแสดงถึงสภาพการใช้งานจริงซึ่งมีความสำคัญในออกแบบระบบรองรับ และประเมินการใช้งานในด้านความสะดวกสบายจากการขับขี่ ความปลอดภัยของรถกอล์ฟ อีกทั้งมีส่วนในการกำหนดคุณภาพความทนทานของรถกอล์ฟอีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการวัดลักษณะถนนในรูปแบบต่างๆ
- 1.2.2 เพื่อกำหนดสนามทดสอบระบบรองรับของรถกอล์ฟจากข้อมูลสภาพถนนในสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล
- 1.2.3 เพื่อสถิติการใช้งานของสนามทดสอบที่สร้างขึ้นโดยการจำลองการทดสอบระบบรองรับของรถกอล์ฟ

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาวิธีการวัดลักษณะถนนจากการทบทวนวรรณกรรม
- 1.3.2 เลือกรูปวิธีการวัดลักษณะถนนพร้อมทำการสอบเทียบกับวิธีมาตรฐาน
- 1.3.3 ศึกษาคุณลักษณะ ลักษณะการใช้งาน ของรถกอล์ฟที่จำเป็นต่องานวิจัย
- 1.3.4 ศึกษาและประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้กับรถกอล์ฟ
- 1.3.5 เลือกกลุ่มตัวอย่างของถนนในสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลเพื่อทำการวัด
- 1.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลลักษณะถนนที่ได้จากการวัดเพื่อกำหนดข้อมูลของลักษณะถนนของสนามทดสอบ
- 1.3.7 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลลักษณะถนนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถกอล์ฟ
- 1.3.8 ศึกษาวิธีการประเมินคุณภาพของระบบรองรับในแบบต่างๆ และเลือกการประเมินที่มีดัชนีชี้วัดที่เหมาะสมสอดคล้องกับงานวิจัย
- 1.3.9 ทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถกอล์ฟ
- 1.3.10 สานิตวิธีการใช้งานข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบสำหรับการออกแบบระบบรองรับ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาวิธีการวัดลักษณะถนนตาม สื่อ หนังสือ และ วารสาร ต่างๆ
- 1.4.2 เลือกหรือดัดแปลงวิธีการทดสอบให้เหมาะสมกับการวัดและทำการสอบเทียบกับวิธีมาตรฐานที่ได้ศึกษามา
- 1.4.3 ศึกษาคุณลักษณะ ลักษณะการใช้งาน และคุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ
- 1.4.4 สร้างแบบจำลองรถกอล์ฟด้วยแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่
- 1.4.5 เลือกกลุ่มตัวอย่างของถนนในสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล และทำการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟในกลุ่มตัวอย่าง
- 1.4.6 วิเคราะห์ข้อมูลลักษณะถนนที่ได้เก็บค่ามา นำไปหาค่าฐานนิยมของข้อมูลที่ได้นำมา กำหนดลักษณะถนนของสนามทดสอบ
- 1.4.7 จำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้แบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่และข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบที่ได้เก็บค่ามา
- 1.4.8 ศึกษาวิธีการประเมินระดับของความสะดวกสบายจากการขับขี่ ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 และวิเคราะห์ผลที่ได้

- 1.4.9 ทวนสอบแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ด้วยการขับขึ้นรถกอล์ฟจริงโดยเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับและระดับของความสะดวกสบายจากการขับขึ้นที่ตามมาตรฐาน ISO 2631-1
- 1.4.10 สถิติการประยุกต์ใช้งานข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock Absorber) ที่ให้ความสะดวกสบายจากการขับขึ้นมากที่สุด

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบสภาวะการใช้งานของรถกอล์ฟและเก็บข้อมูลสภาพถนนเป็นค่าทางสถิติเพื่อใช้ในการงานด้านกิจการด้านการออกแบบรถกอล์ฟ
- 1.5.2 ข้อมูลที่ได้จะสามารถนำไปใช้ต่อไปใช้ในการออกแบบและการทดสอบรถกอล์ฟ เช่น การออกแบบและทดสอบระบบรองรับ การทดสอบเพื่อประกันคุณภาพ การทดสอบความทนทานของชิ้นส่วน เป็นต้น
- 1.5.3 สร้างมาตรฐานในการทดสอบระบบรองรับของรถกอล์ฟโดยอ้างอิงจากสนามกอล์ฟในประเทศไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

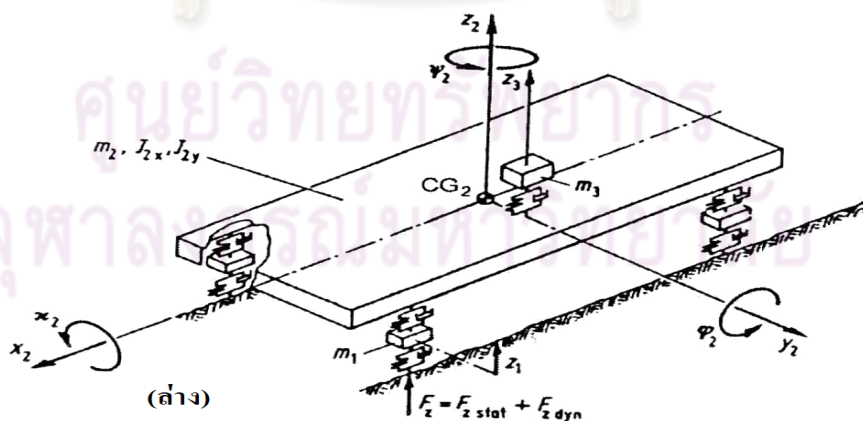
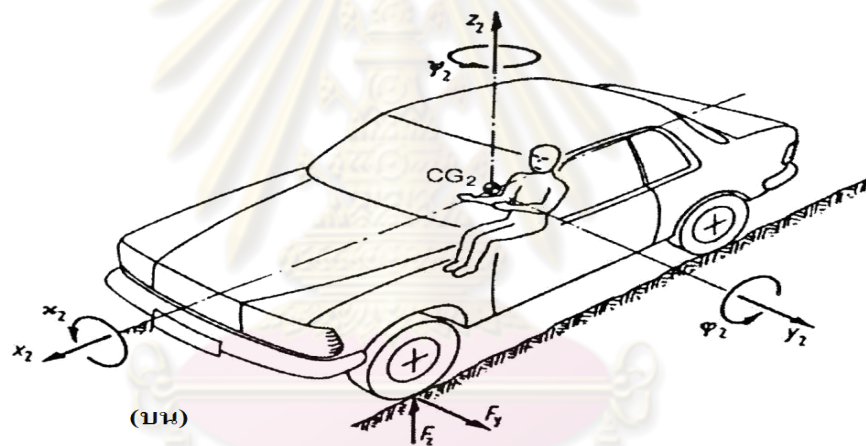
## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนในรถยนต์

##### 2.1.1 ความรู้เบื้องต้นในการออกแบบระบบรองรับ [1]

การสั่นสะเทือนของรถยนต์เกิดจากถนน ซึ่งมีความเป็นคลื่นของผิวถนนเป็นตัวกระตุ้น สำหรับความถี่ที่เราสนใจจะอยู่ในช่วงความถี่  $0 < f < 25$  Hz เนื่องจากว่าความถี่ของการสั่นสะเทือนที่มากกว่า 25 Hz จะมีขนาดของแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่น้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา ในการคำนวณต่างๆเราจะยึดแกนอ้างอิงไว้แสดงดังรูปที่ 2-1 (บน) ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นระบบทดแทนทางพลศาสตร์ได้ดังรูปที่ 2-1 (ล่าง)

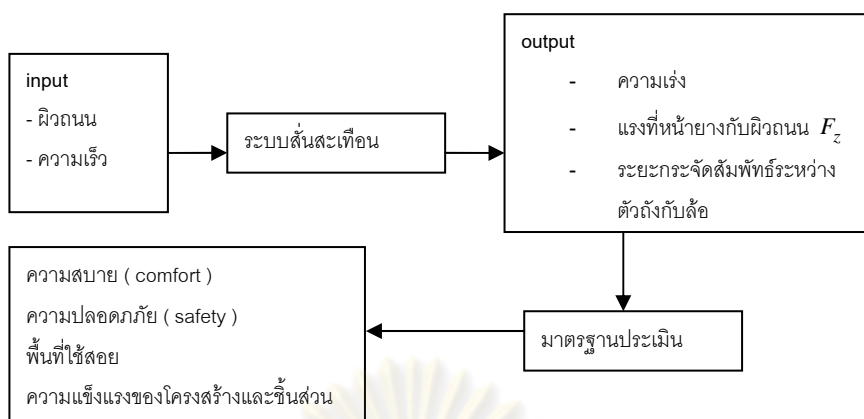


รูปที่ 2-1 (บน) ระบบแกนอ้างอิงของรถ (ล่าง) ระบบทดแทนสำหรับคำนวณการสั่นสะเทือน [1]

โครงสร้างของรถหรือตัวถังรถให้มีมวล  $m_2$  มีโมเมนต์ความเฉื่อย  $J_{2,x}, J_{2,y}$  รอบแกน  $x$  และ  $y$  บนตัวถังรถมีมวลของคน  $m_3$  ถูกรองรับไว้ด้วย สปริงและแดมเปอร์ของเบาะ และสมมุติให้มวลของคนเป็นมวลเฉพาะที่ (Point mass) ซึ่งไม่คิดค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และ เช่นเดียวกับมวลที่ล้อ ก็เป็นมวลเฉพาะที่  $m_1$  แรงที่หน้ายางทำกับถนนให้เป็น  $F_z$  แยกได้เป็น  $F_{z,Static}$  และ  $F_{z,Dynamic}$  เขียนย่อได้เป็น  $F_{z,stat}$  และ  $F_{z,dyn}$  จุด  $SP_2$  แทนจุด CG หรือจุดศูนย์กลางมวลของตัวถังรถ และใช้ระบบพิกัดฉาก  $x_2, y_2, z_2$  มุม(Roll)  $\chi_2$  เรียกว่ามุมการโคลง มุม(Pitch)  $\varphi_2$  เรียกว่ามุมปัก และมุม(Yaw)  $\psi_2$  เรียกว่ามุมเบน ให้  $z_1$  เป็นแกนอ้างอิงของล้อ ล้อจะถูกกระตุ้นด้วยความเป็นคลื่นของผิวถนน ซึ่งมีการสั่นสะเทือนในทิศ  $z_1$  ส่วนตัวถังรถจะถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนในทิศทาง  $z_2, \chi_2, \varphi_2$  และให้  $z_3$  เป็นแกนอ้างอิงถึงมวลของคน โดยคนจะถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนในทิศ  $z_3, \varphi_2, \chi_2$  นอกจากนั้นการเคลื่อนที่ในทิศทาง  $y_2$  และ  $\psi_2$  ก็สามารถเกิดขึ้นได้ขณะขับขี่ในแนวตรง

ผลจากการสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดความเร่งในทิศ  $z_2, z_3, \varphi_2, \chi_2$  ซึ่งเป็นปริมาณที่บอกถึงความสะดักสะบวย นอกจากนี้ผลการสั่นสะเทือนยังก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นแรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงกลับไปกลับมาระหว่างผิวถนนกับหน้ายาง  $F_{z,dyn}$  โดยค่าจะเปลี่ยนไปกับเวลา ในกรณีนี้  $F_z = 0$  ( $F_z = F_{z,stat} + F_{z,dyn}$ ) ล้อจะไม่สัมผัสกับผิวถนน และไม่สามารถรับแรงในแนวเส้นสัมผัส  $F_x, F_y$  ได้ โดยอาจเป็นแรงขับเคลื่อน แรงเบรกหรือแรงต้านข้าง สำหรับการบังคับเลี้ยวและการทรงตัวค่าของแรงสั่นสะเทือนจึงมีความสำคัญในด้านความปลอดภัย ดังนั้นค่าแรง  $F_z$  ที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นค่าเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาเรื่องความปลอดภัย ในกรณีที่แรง  $F_{z,dyn}$  เป็นบวก และเมื่อรวมผลกับแรงสถิตจะหมายถึงภาวะที่กดลงบนผิวถนน ซึ่งจะใช้เป็นเกณฑ์ในการก่อสร้างกำหนดอายุการใช้งานของผิวถนน นอกจากนี้แรงที่กระทำกลับไปกลับมาจะมีผลต่อความสามารถในการรับแรงเค้นและลดอายุการใช้งานของชิ้นส่วน และระยะกระจัดสัมพัทธ์ระหว่างตัวถังกับล้อจะมีความสำคัญต่อพื้นที่ใช้งานในตัวถังรถ ซึ่งข้อสรุปทั้งหมดจะถูกแสดง ในแผนภูมิในรูปที่ 2-2



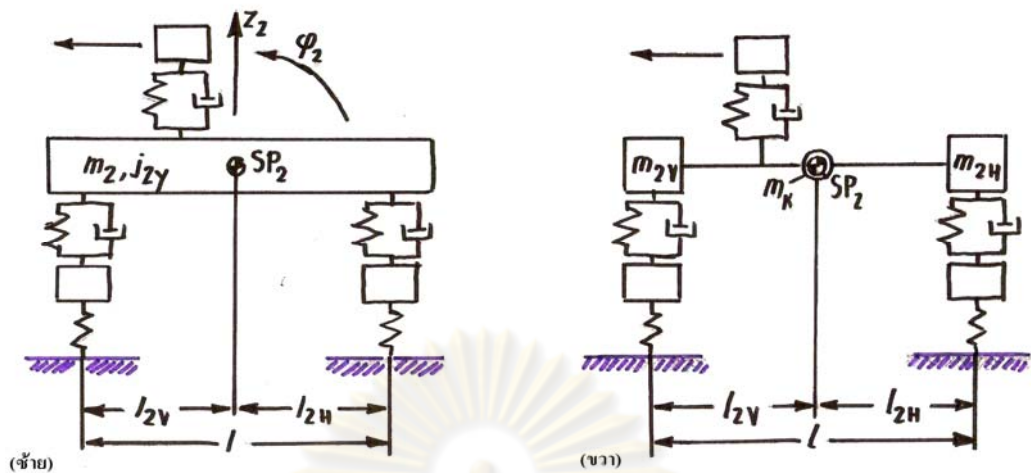


รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างการตุ้มจะผิวถนน และเกณฑ์การประเมินคุณภาพ [1]

### 2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบสั่นสะเทือน [1]

ปัจจุบันเรามีเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจึงสามารถใช้คำนวณการสั่นสะเทือนของระบบสั่นสะเทือนที่มีระดับขั้นเสรี (Degree of freedom) สูง ๆ ได้ แต่ผลจากการคำนวณนั้นจะซับซ้อนยากในการวิเคราะห์และทำความเข้าใจ เพื่อให้เข้าใจถึงการสั่นสะเทือนของรถได้ดีขึ้นจำเป็นจะต้องทำการลดรูปของแบบจำลองของระบบสั่นสะเทือนให้อยู่ในรูปที่ง่ายที่สุด มีจำนวนระดับความเสรีที่น้อยที่สุด จากนั้นจึงเพิ่มระดับขั้นเสรีและปรับแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับจริงยิ่งขึ้น การลดรูปทำได้โดย

สมมติให้รถมีสมมาตรกับแกนยาวคือแกน  $x_2$  จากนั้นสมมติให้ความเป็นคลื่นของถนนตรงตำแหน่งของรอยล้อด้านซ้ายและขวาเหมือนกัน ดังนั้นรถจึงไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $y_2$  และการเคลื่อนที่เชิงมุม  $\chi_2$  (มุมโคลง) จะมีก็เฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $Z_2$  และการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน  $y$  มุม  $\phi_2$  เท่านั้น รูปที่ 2-3 สำหรับรถที่มีการเคลื่อนที่แบบในแนวแกน  $Z_2$  และ  $\phi_2$  เพียงอย่างเดียว ในรูปที่ 2-3(ซ้าย) แสดงภาพด้านข้างตัวถังรถที่มีมวล  $m_2$  และมี Mass moment of inertia  $J_{2y}$  ซึ่งสามารถแทนด้วยมวลเฉพาะที่ (Concentrate mass)  $m_{2y}, m_{2H}, m_K$  ดังแสดงในรูปที่ 2-3 (ขวา) ซึ่งจะเป็นระบบทดแทนทางไดนามิกส์รูปที่ 2-3(ซ้าย) นั่นเอง



รูปที่ 2-3 ภาพด้านข้างตัวถังรถของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบสั่นสะเทือน [1]

โดยตัวถังจะต้องมีมวลรวมเท่าเดิม

$$m_{2y} + m_k + m_{2H} = m_2 \quad (2-1)$$

จุดศูนย์กลางมวลจะอยู่ที่เดิม

$$m_{2y}l_{2y} - m_{2H}l_{2H} = 0 \quad (2-2)$$

และ Mass moment of inertia ต้องเท่าเดิม

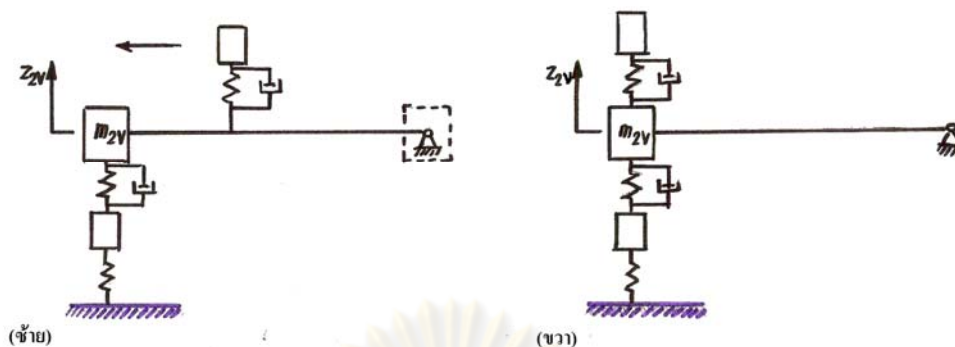
$$J_{2y} = m_2 i_y^2 = m_{2y} l_{2y}^2 + m_{2H} l_{2H}^2 \quad (2-3)$$

ในสมการที่ 2-3 ค่า  $i_y$  คือ รัศมีไจเรชั่นรอบจุด  $SP_2$  และจากสมการทั้ง 3 จะได้

$$m_{2y} = m_2 \frac{i_y^2}{l \cdot l_{2v}} ; m_{2H} = m_2 \frac{i_y^2}{l \cdot l_{2H}} ; m_k = m_2 \left( 1 - \frac{i_y^2}{l_{2v} \cdot l_{2H}} \right)$$

สำหรับมวล  $m_k = 0$  การเคลื่อนที่ของมวล  $m_{2y}$  และ  $m_{2H}$  จะเป็นอิสระต่อกัน หมายถึงว่า หากมวล  $m_{2y}$  ถูกกระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน z มวล  $m_{2H}$  ก็จะอยู่กับที่ และถ้า  $m_{2H}$  ถูกกระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มวล  $m_{2y}$  จะอยู่กับที่เช่นกัน

ค่า  $m_k$  เป็นเพียงตัวเลขจากการคำนวณและอาจมีค่าติดลบได้ สำหรับรถยนต์(รถแก๊ง)มวล  $m_k$  มีค่าประมาณศูนย์ และสามารถคิดให้มวล  $m_{2y}$  และ  $m_{2H}$  มีการเคลื่อนที่เป็นอิสระกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-4 (ซ้าย) จากเดิมที่มีระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) เท่ากับ 5 จะสามารถลดรูปลงได้อีก โดยสมมุติให้มีการกระตุ้นจากผิวนถนนเฉพาะที่ล้อหน้าเพียงอย่างเดียว ระบบนั้นจะลดรูปลงเหลือระดับขั้นเสรี (Degree of freedom) เท่ากับ 3 ซึ่งสามารถทำความเข้าใจผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณง่ายกว่าระบบที่มีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) เท่ากับ 5 และเพื่อให้่ายยิ่งขึ้น อาจสมมุติให้มวลของคนอยู่เหนือเพลลาของล้อหน้าพอดี ซึ่งถ้าเป็นในกรณีของรถบรรทุก มวลของคนจะอยู่เหนือเพลลาหน้าพอดีดังรูปที่ 2-4 (ขวา)



รูปที่ 2-4 ระบบทดแทนไดนามิกส์อย่างง่าย [1]

### 2.1.3 การกระตุ้นจากความเป็นคลื่นของผิวถนน [1]

เมื่อพิจารณาถึงการขับเคลื่อนของรถยนต์ ขณะขับเคลื่อนที่น้ำหนักรถยนต์จะทำให้ล้อกดพื้นตลอดเวลาและเมื่อมีการเคลื่อนที่ในแนวราบความสูงของถนนที่ตำแหน่งต่างๆ จะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลของรถยนต์ในแนวดิ่ง เรียกการกระตุ้นนี้ว่า การกระตุ้นจากผิวถนน (road Excitation) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแบ่งการกระตุ้นนี้เป็น 3 รูปแบบดังแสดงดังต่อไปนี้

#### 2.1.3.1 คลื่นถนนแบบฮาร์มอนิกฟังก์ชัน (Harmonic function)

ฟังก์ชันที่ใช้กระตุ้นระบบของมวลก้อนเดียวอยู่ในรูปของฮาร์มอนิกฟังก์ชัน (Harmonic function) ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเลขจริง และเลขเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$h(t) = \hat{h} \sin \omega t = \underline{\hat{h}} e^{j\omega t} \quad (2-4)$$

โดยที่  $h$  คือ ความสูงของคลื่น  $h$  ที่เวลาใด ๆ

$\hat{h}$  คือ ขนาดความสูงของคลื่น  $h$  ในรูปจำนวนจริงที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา

$\underline{\hat{h}}$  คือ ขนาดความสูงของคลื่น  $h$  ในรูปจำนวนเชิงซ้อนที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา (Angular frequency) มีหน่วยเป็น rad/s

ในรูปที่ 2-5 (ซ้าย) แสดงฟังก์ชันของคลื่นถนนที่กระตุ้นให้รถเกิดการสั่นสะเทือน การกระตุ้นอยู่ในรูปของฮาร์มอนิกฟังก์ชัน ( $\sin \omega t$ ) ซึ่งความสูงของคลื่น  $h$  ในตอนแรกจะแปรกับระยะทาง  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ขวา) แต่เมื่อมีความเร็วรถที่วิ่งผ่านเข้ามาเกี่ยวข้องก็จะได้ความสูงของคลื่น  $h$  ที่แปรกับเวลา  $t$  ดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ซ้าย)

คลื่นของถนนที่เป็นฮาร์มอนิกฟังก์ชันที่แปรกับระยะทางสามารถเขียนได้ดังนี้

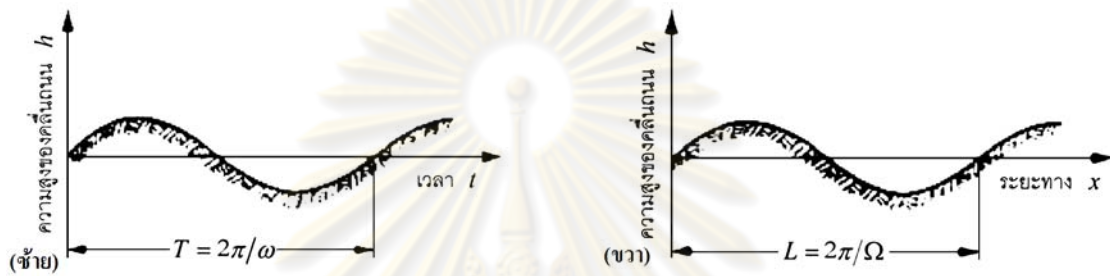
$$h = \hat{h} \sin \Omega x = \hat{h} e^{j\Omega x} \quad (2-5)$$

โดยที่  $\hat{h}$  คือ ความสูงของคลื่น  $h$  ที่ระยะทางใด ๆ

$\hat{h}$  คือ ขนาดความสูงของคลื่น  $h$  ในรูปจำนวนจริงที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง

$\hat{h}$  คือ ขนาดความสูงของคลื่น  $h$  ในรูปจำนวนเชิงซ้อนที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง

$\Omega$  คือ ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง (Angular spatial frequency) มีหน่วยเป็น rad/m



รูปที่ 2-5 คลื่นของผิวถนนในรูปฟังก์ชันไซน์ในความสัมพันธ์กับเวลา  $t$  (ซ้าย)

คลื่นของผิวถนนในรูปฟังก์ชันไซน์ในความสัมพันธ์กับระยะทาง  $x$  (ขวา) [1]

โดย  $\Omega$  เป็นค่ามุมที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง ในที่นี้มีหน่วยเป็น rad/m และได้จาก

$$\Omega = \frac{2\pi}{L} \quad (2-6)$$

โดย  $L$  คือ ความยาวคลื่นของผิวถนน

ขณะขับที่ความเร็วคงที่  $v$  จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง  $x$  และเวลา  $t$  ดังนี้

$$x = vt \quad (2-7)$$

เมื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง  $\Omega$  กับความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา  $\omega$  โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการ 2-4 และ 2-5 จะได้  $\Omega x = \omega t$  จากสมการ 2-6

จะได้  $\Omega vt = \omega t$  และได้ความสัมพันธ์ดังสมการ 2-8

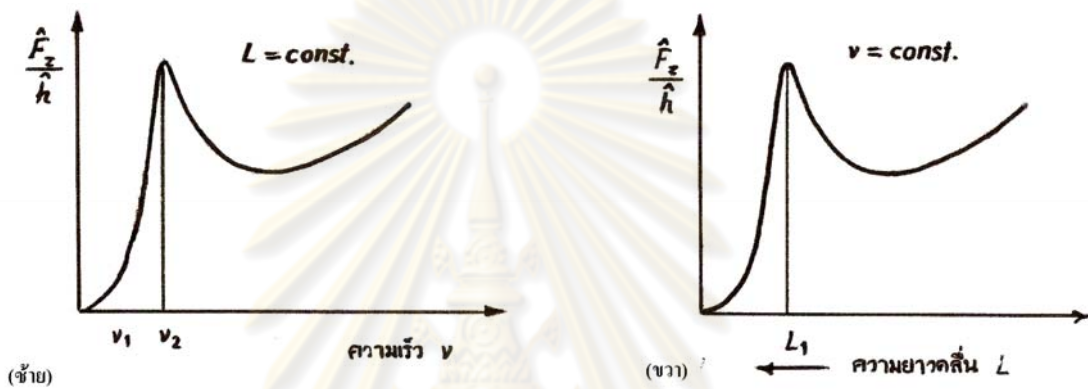
$$\omega = v\Omega = 2\pi \frac{v}{L} \quad (2-8)$$

ที่ความยาวคลื่นคงที่  $L$  ความถี่เชิงมุม  $\omega$  จะสูงขึ้นตามความเร็วรถ  $v$  และที่ความยาวคลื่นคงที่

$L$  ค่าหนึ่ง สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูด (Amplitude ratio)  $\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}$

กับ  $\omega$  ได้โดยใช้แกนนอนเป็นแกนของความเร็วรถดังรูปที่ 2-6 (ซ้าย) จากรูปจะเห็นว่า เมื่อแทนรถยนต์ด้วยระบบมวลก้อนเดียว และให้วิ่งผ่านถนนที่มีรูปคลื่นดังรูปที่ 2-6 (ขวา) โดยให้ความยาว

คลื่น  $L$  คงที่ ด้วยความเร็ว  $v$  ต่างๆกันที่ความเร็ว  $v_1$  ต่ำๆ จะได้อัตราส่วนของแอมพลิจูด  $\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}$  ที่เล็กมาก และเมื่อวิ่งที่ความเร็วสูงขึ้นอัตราส่วนของแอมพลิจูดก็จะสูงขึ้น ที่ความเร็ว  $v_2$  เป็นความเร็วที่ทำให้ความเร็วเชิงมุมของการกระตุ้น  $\omega$  ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural circular frequency)  $\nu$  ของระบบสั่นสะเทือนพอดิ กรณีเช่นนี้เรียก การสั่นพ้อง (Resonance) ค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดจะสูงที่สุด



รูปที่ 2-6 อัตราส่วนของแอมพลิจูดในความสัมพันธ์กับความเร็ว  $v$  ที่  $L$  คงที่ (ซ้าย) อัตราส่วนของแอมพลิจูดในความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น  $L$  ที่  $\nu$  คงที่ (ขวา) [1]

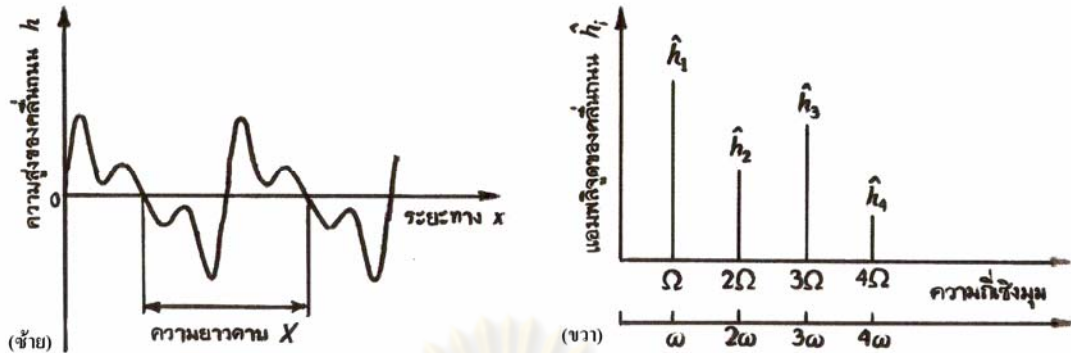
ในรูปที่ 2-6 (ขวา) ให้ความเร็ว  $v$  คงที่ แต่ผิวถนนมีความยาวคลื่น  $L$  ต่างๆกันจะเห็นได้ว่า ที่ความยาวคลื่น  $L_1$  จะเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) และจะได้อัตราส่วนของแอมพลิจูด  $\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}$  ที่สูงที่สุด

จากที่ผ่านมาเป็นการพิจารณาผลจากความเร็วเชิงมุมของการกระตุ้น  $\omega$  หรือ ก็คือความเร็วรถที่วิ่งผ่านผิวถนนหารด้วยความยาวคลื่น  $L$  ที่มีผลต่อระบบสั่นสะเทือนตัวขนาดแอมพลิจูดคลื่น  $\hat{h}$  ก็มีผลต่อระบบสั่นสะเทือนเช่นกัน เพราะถ้า  $\hat{h} = 0$  แล้วขณะที่รถวิ่งไปก็จะไม่เกิดการสั่นสะเทือน

### 2.1.3.2 คลื่นถนแบบพีริออดิก (Periodic function)

รูปที่ 2-7 (ซ้าย) แสดงคลื่นของถนนในรูปพีริออดิกฟังก์ชัน (Periodic function) ซึ่งสามารถแทนด้วยผลบวกของฮาร์โมนิกฟังก์ชัน (Harmonic function) ในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ดังแสดงในรูปที่ 2-7





รูปที่ 2-7 คลื่นของผิวดนแบบพีริอดิกฟังก์ชัน (Periodic function) (ซ้าย)

Amplitude spectrum (ขวา) [1]

$$h(x) = h_0 + \hat{h}_1 \sin(\Omega x + \varepsilon_1) + \hat{h}_2 \sin(2\Omega x + \varepsilon_2) + \dots + \hat{h}_i \sin(i\Omega x + \varepsilon_i) + \dots \quad (2-9)$$

สำหรับผิวดนแบบพีริอดิกฟังก์ชัน (Periodic function) เมื่อแทนด้วยอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) จะได้แอมพลิจูดหลายค่า  $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots$  และเขียนรวมๆได้เป็น  $\hat{h}_i$  ซึ่งเป็นแอมพลิจูดที่ความถี่  $\Omega_1 = \Omega, \Omega_2 = 2\Omega \dots$  และเขียนรวมๆได้เป็น  $\Omega_i = i\Omega$  โดยที่

$$\Omega = \frac{2\pi}{X} \quad (2-10)$$

เมื่อ  $X$  เป็นความยาวของคาบใน รูปที่ 2-7 (ซ้าย) รูปที่ 2-7 (ขวา) แสดงค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ต่างๆเรียกแอมพลิจูดสเปกตรัมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Amplitude Spectrum) เป็นกราฟความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดบนแกนของความถี่เชิงมุม  $\Omega$  หรือ  $\omega$

จากความสัมพันธ์ในสมการ 2-7 และ 2-8 แทนลงในสมการ 2-9 จะได้ฟังก์ชันของผิวดนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับเวลา  $t$

$$h(t) = h_0 + \hat{h}_1 \sin(\omega t + \varepsilon_1) + \hat{h}_2 \sin(2\omega t + \varepsilon_2) + \dots + \hat{h}_i \sin(i\omega t + \varepsilon_i) + \dots \quad (2-11)$$

จะเห็นได้ว่าระบบสั่นสะเทือน ซึ่งในที่นี้คือรถยนต์ จะถูกกระตุ้นจากผิวดนด้วยความถี่หลายๆค่า  $\omega_1 = \omega, \omega_2 = 2\omega, \dots, \omega_i = i\omega$  ในทำนองเดียวกันผลจากการกระตุ้น ตัวอย่างเช่น ค่าแรงกระทำพลวัตระหว่างล้อกับถนน  $F_{z,dyn}$  ที่ได้ก็จะอยู่ในรูปแบบเดียวกันคือ

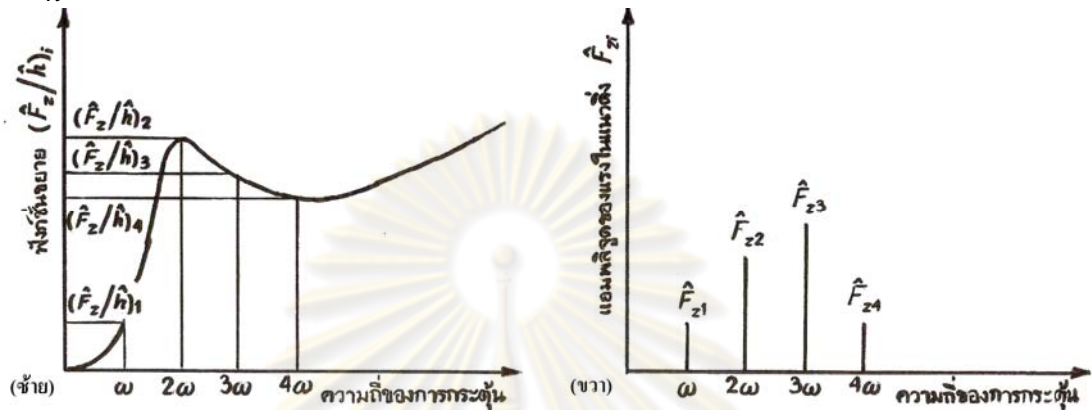
$$F_{z,dyn} = \hat{F}_{z1} \sin(\omega t + \delta_1) + \hat{F}_{z2} \sin(2\omega t + \delta_2) + \dots + \hat{F}_{zi} \sin(i\omega t + \delta_i) + \dots \quad (2-12)$$

ค่า Amplitude  $\hat{F}_{zi}$  ที่ความถี่  $\omega_i$  ได้จากการเอา Amplitude ratio  $(\frac{\hat{F}_{z_i}}{\hat{h}})_i$  ที่ความถี่  $\omega_i$  คูณ

กับ  $\hat{h}_i$  ที่ความถี่เดียวกัน และเมื่อพิจารณามุมเฟส (Phase angle)  $\alpha_i$  จะได้

$$F_{z,dyn} = \left(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}\right)_1 \hat{h}_1 \sin(\omega t + \varepsilon_1 + \alpha_1) + \left(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}\right)_2 \hat{h}_2 \sin(2\omega t + \varepsilon_2 + \alpha_2) + \dots$$

$$+ \left(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}\right)_i \hat{h}_i \sin(i\omega t + \varepsilon_i + \alpha_i) + \dots$$



รูปที่ 2-8 การอ่านค่า Amplitude ratio ของระบบสั่นสะเทือน  $\left(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}\right)_i$  ที่  $i\omega$  ต่างๆ (จ้าย)

ค่าแอมพลิจูด  $\hat{F}_{zi}$  ซึ่งได้จากการคูณ Amplitude ratio  $\left(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}\right)_i$  กับ  $\hat{h}_i$  (ขวา) [1]

ฟังก์ชันของการกระตุ้น สมการ 2-9 และ 2-10 รวมทั้งผลที่ได้จากการกระตุ้นในรูปของแรงพลวัต สมการ 2-12 และ 2-13 สามารถเขียนใหม่ในรูปเชิงซ้อนได้ ดังนี้

$$h(x) = \sum_{i=1}^n \hat{h}_i e^{ji\Omega x} \quad (2-14)$$

$$h(t) = \sum_{i=1}^n \hat{h}_i e^{ji\omega t} \quad (2-15)$$

$$F_{z,dyn} = \sum_{i=1}^n \hat{F}_{zi} e^{ji\omega t} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{F}_z}{\hat{h}}\right)_i \hat{h}_i e^{ji\omega t} \quad (2-16)$$

### 2.1.3.3 คลื่นถนนแบบสุ่ม(Random function)

ในความเป็นจริงผิวถนนที่มีรูปคลื่นเป็นแบบฮาร์มอนิกฟังก์ชัน และเป็นแบบพีริออดิกฟังก์ชัน (Periodic function) นั้นไม่มีอยู่จริง โดยปกติแล้วคลื่นของผิวถนนจะสูงๆต่ำๆเป็นแบบไม่เจาะจง แต่ความรู้ที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมาก็ยังไม่เสียเปล่าและสามารถนำมาใช้งานได้ สำหรับกรณีคลื่นถนนที่เป็นแบบไม่เจาะจงหรือแบบสุ่ม ก็สามารถมองให้เป็นคลื่นถนนแบบพีริออดิกฟังก์ชัน (Periodic function) ได้ โดยให้ค่าความยาวของคาบการแกว่ง  $X$  มีขนาดยาวมากเช่น 100m หรือมีขนาดเป็น 2-3 km ซึ่งจะเป็นผลให้ช่องว่างระหว่างค่า  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_i$  มีขนาดเล็ก

ลดลงตามขนาดของ  $X$  ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อให้  $X \rightarrow \infty$  ก็จะทำให้แอมพลิจูดสเปกตรัม (Amplitude spectrum) ในรูปที่ 2-8 (ขวา) กลายเป็นแอมพลิจูดสเปกตรัมแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 2-9 (กลาง) เป็นฟังก์ชันของความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางและจะได้สมการทางคณิตศาสตร์อยู่ในรูปอินทิกรัล

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\Omega) e^{-j\Omega x} d\Omega \tag{2-17}$$

และ Continuous Spectrum เรียกว่า Spectrum Density

$$\hat{h}(\Omega) = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(x) e^{-j\Omega x} dx$$

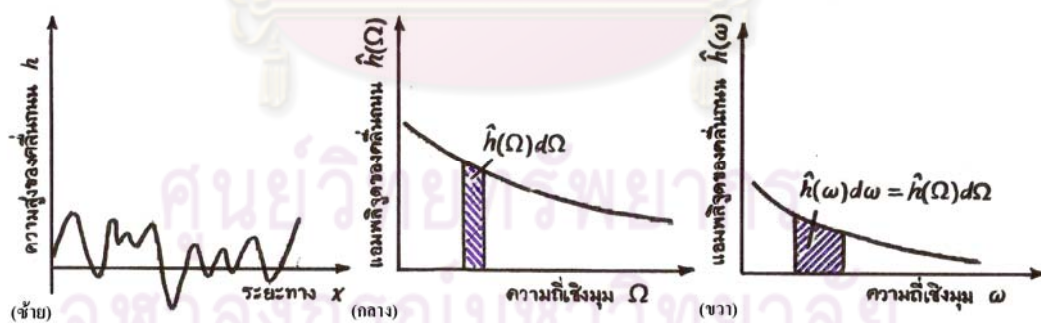
เมื่อเขียนในรูปความสัมพันธ์กับเวลา  $t$  และจากสมการ 2-7 และ 2-8 จะได้

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\Omega) e^{-j\Omega t} \frac{d\Omega}{v} = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \tag{2-18}$$

$$\text{เมื่อให้ } \hat{h}(\omega) = \frac{1}{v} \hat{h}(\Omega) \tag{2-19}$$

$$\text{หรือ } \hat{h}(\omega) d\omega = \hat{h}(\Omega) d\Omega \tag{2-20}$$

จากสมการ 2-19 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Spectrum Density ทั้ง 2 แบบที่มีความแตกต่างกันและจะต้องระวังเรื่องของหน่วยด้วยเนื่องจาก Spectrum Density กับแอมพลิจูด  $\hat{h}$  มีหน่วยที่ต่างกันในสมการ 2-9, 2-11, 2-14, 2-15 หน่วยของ  $\hat{h}$  จะเป็นหน่วยความยาวเนื่องจากคลื่นของถนน  $h$  มีหน่วยความยาว



รูปที่ 2-9 ความเป็นคลื่นของผิวถนนแบบไม่มีกฎเกณฑ์ (ซ้าย)

Amplitude spectrum ในความสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุม  $\Omega$  (กลาง)

Amplitude spectrum ในความสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุม  $\omega$  (ขวา) [1]

ในสมการ 2-20 ผลคูณ  $\hat{h}(\omega)d\omega$  และ  $\hat{h}(\Omega)d\Omega$  มีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว ดูสมการ 2-17 และ 2-18 เนื่องจาก  $\Omega$  มีหน่วยเป็น(1/หน่วยความยาว) ดังนั้น  $\hat{h}(\Omega)$  ก็จะมีหน่วยเป็น (หน่วยความยาว)<sup>2</sup> และ  $\omega$  มีหน่วยเป็น(1/หน่วยเวลา) ดังนั้น  $\hat{h}(\omega)$  ก็จะมีหน่วยเป็น(หน่วยความยาว-เวลา)

เช่นเดียวกันกับ ตัวอย่างที่ผ่านมา จะที่ได้แรงกระทำพลวัตล้อยกับผิวถนน  $F_{z,dyn}$  เป็นคำตอบของระบบสั่นสะเทือนซึ่งในที่นี้คือรถที่วิ่งบนถนนที่มีความเป็นคลื่น ดังนี้

$$F_{z,dyn}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{F}_z(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{\hat{F}_z}{\hat{h}} \right) \hat{h}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-21)$$

### 2.1.3.4 ค่าทางสถิติที่สำคัญ , การคำนวณหาค่า Power Spectrum Density ในแบบต่างๆ

สมการที่ 2-21 เป็นสมการคำตอบของระบบสั่นสะเทือนของมวลก้อนเดียวที่ถูกกระตุ้นด้วยฟังก์ชันคลื่นถนนแบบสุ่ม โดยทั่วไปแล้วเรามักจะไม่ถามผลของการสั่นสะเทือน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง แต่จะสนใจผลของการสั่นสะเทือนจากการกระตุ้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวพอสมควรและอาศัยค่าทางสถิติเป็นเครื่องมือในการประเมินผลจากการสั่นสะเทือนด้วยวิธีนี้จึงสามารถตอบคำถามที่เกี่ยวกับความสะดวกสบายของคนโดยสาร ความปลอดภัยของการขับขี่และอื่นๆได้

ค่าทางสถิติที่นำมาใช้ได้แก่ ค่าเฉลี่ย(Mean) ค่ายังผล (Effective) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D) ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นที่รู้จักกันดีอยู่แล้ว ในที่นี้จะขอยกมาใช้โดยไม่ต้องมีคำอธิบายถึงที่มาและความหมาย

ขณะที่รถวิ่งผ่านคลื่นถนนแบบสุ่ม

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\Omega) e^{-j\Omega x} d\Omega \quad (2-22)$$

รถยนต์หรือระบบสั่นสะเทือนจะถูกกระตุ้นจากผิวถนนด้วยฟังก์ชัน

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (2-23)$$

และจะได้สมการคำตอบซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

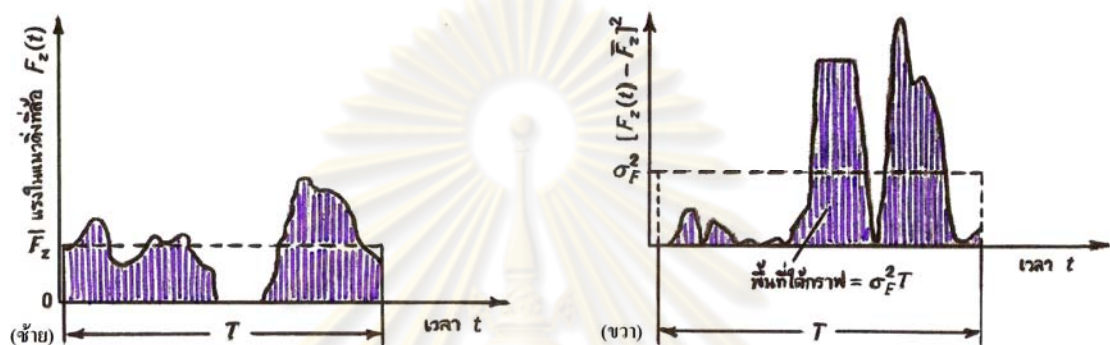
$$q(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{q}(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{\hat{q}(\omega)}{\hat{h}(\omega)} \right] \hat{h}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-24)$$

โดย q (t) เป็นปริมาณที่เกิดจากการกระตุ้นระบบสั่นสะเทือนและเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป ซึ่งอาจหมายถึงแรงพลวัตที่ล้อย  $F_{z,dyn}$  ก็ได้

สำหรับค่าเฉลี่ย เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา T ที่ยาวพอจากนิยามจะได้

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt \quad (2-25)$$

ในรูปที่ 2-10 (ซ้าย) แสดงแรงกดที่ล้อ  $F_z$  พื้นที่ส่วนที่อยู่บนและใต้เส้น  $\bar{F}_z$  จะมีขนาดเท่ากัน ค่าเฉลี่ย  $\bar{F}_z$  โดยทั่วไปจะเป็นค่าที่ทราบขนาดอยู่แล้ว ซึ่งในรูปก็คือแรงสถิต  $F_{z,stat}$  นั้นเอง สำหรับความแรงเฉลี่ยของตัวถัง  $\bar{z}_2$  ก็คือความเร่ง  $g$  และระยะยุบของสปริงเฉลี่ยก็คือระยะยุบตัวสถิตนั่นเอง



รูปที่ 2-10 กราฟแสดงแรงกดรวม  $F_z(t)$  แสดงค่าเฉลี่ย (ซ้าย) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ขวา) [1]

ปริมาณทางสถิติที่สำคัญตัวต่อไปก็คือ ค่าประสิทธิผล (Effective value) ซึ่งนิยามโดย

$$\tilde{q} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt} = q_{eff} \quad (2-26)$$

และค่าเบี่ยงเบนของ  $q(t)$  จากค่าเฉลี่ย  $\bar{q}$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_q$

$$\sigma_q = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} [q(t) - \bar{q}]^2 dt} \quad (2-27)$$

ในรูปที่ 2-10 และจากสมการ 2-25 และ 2-26 จะได้

$$\sigma_q = \sqrt{(\tilde{q})^2 - (\bar{q})^2} \quad (2-28)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2-24 ใน สมการที่ 2-26 จะได้ค่าประสิทธิผล (Effective value)  $\tilde{q}$  [2] (ดูที่มาของสมการได้จากภาคผนวก ฉ) มีค่าเท่ากับ

$$\tilde{q}^2 = \int_0^\infty \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{q}_T(\omega))^2 d\omega \quad (2-29)$$

ค่า  $\lim_{T \rightarrow \infty}$  ในสมการบอกขีดจำกัดของสมการเมื่อให้ช่วงเวลา  $T$  ที่พิจารณายาวมากพอ จากสมการ 2-28 กำหนดให้



$$G_q(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{q}_T(\omega))^2 \quad (2-30)$$

โดย  $G_q(\omega)$  เรียก ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง (Power spectral density เขียนย่อ เป็น PSD ของฟังก์ชัน  $q$  ที่แปรตาม  $\omega$  เนื่องจากขนาดของ  $\hat{q}$  ขึ้นกับ  $\omega$  และในสมการจะปรากฏ ค่าแอมพลิจูด  $\hat{q}$  ที่เป็นเลขจริง คือ  $|\hat{q}| = \hat{q}$  มิใช่แอมพลิจูดเชิงซ้อนดังนั้น มุมเฟส (Phase-angle) จึงไม่มีความหมายในการคำนวณค่าประสิทธิผล (Effective value) เมื่อแทนค่าสมการ 2-30 ลงใน สมการ 2-29 จะได้สมการที่ 2-31

$$\tilde{q}^2 = \int_0^{\infty} G_q(\omega) d\omega \quad (2-31)$$

สมการ 2-31 บอกให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผล (Effective value) และแอมพลิจูด  $\hat{q}$  เพื่อให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับคลื่นถนน สมการ 2-29 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\tilde{q}^2 = \int_0^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[ \frac{\hat{q}(\omega)}{\hat{h}(\omega)} \right]^2 (\hat{h}(\omega))^2 d\omega$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$\tilde{q}^2 = \int_0^{\infty} \left[ \frac{\hat{q}(\omega)}{\hat{h}(\omega)} \right]^2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{h}(\omega))^2 d\omega \quad (2-32)$$

และให้

$$G_d(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{h}(\omega))^2 \quad (2-33)$$

โดย  $G_d(\omega)$  คือ ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง (Power spectral density) ของฟังก์ชันของ คลื่นถนน  $h$  ที่ขึ้นกับความถี่เชิงมุม  $\omega$  ค่าอัตราขยาย (Amplitude ratio)  $\frac{\hat{q}(\omega)}{\hat{h}(\omega)}$  ของ  $\hat{q}$  ให้

$$\left( \frac{\hat{q}(\omega)}{\hat{h}(\omega)} \right)^2 = \hat{V}^2(\omega) \text{ เป็นค่าอัตราขยายกำลังสอง และจากการเปรียบเทียบสมการ 2-30, 2-32}$$

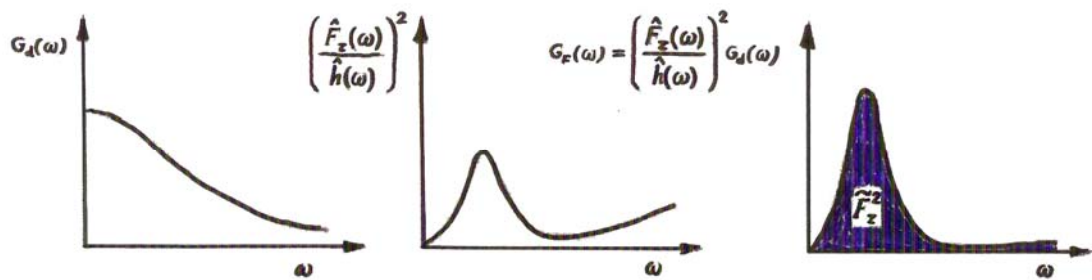
และ 2-33 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Power spectrum  $G_d(\omega)$  และ  $G_q(\omega)$  ดังนี้

$$G_q(\omega) = \hat{V}^2(\omega) G_d(\omega) \quad (2-34)$$

จะได้ค่าประสิทธิผล (Effective value) ของฟังก์ชัน  $q$

$$\tilde{q}^2 = \int_0^{\infty} \left[ \frac{\hat{q}(\omega)}{\hat{h}(\omega)} \right]^2 G_d(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \hat{V}^2(\omega) G_d(\omega) d\omega \quad (2-35)$$

จากสมการ 2-35 เมื่อให้  $q$  เป็นแรงพลวัต  $F_{z,dyn}$  ผังของการคำนวณจะเป็นดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 การคำนวณค่าประสิทธิผล (Effective value) จาก power spectrum  $G_d(\omega)$  ของถนนที่ขึ้นกับคลื่นและความเร็ว [1]

ในการคำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณนั้น ค่าที่คำนวณได้จะเป็นฟังก์ชันกับความถี่ ( $G(\omega)$ ) ซึ่งจะให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณกับความถี่ เท่ากับผลรวมของพลังงานของทั้งสัญญาณ และ ค่า  $G(\omega) \cdot \Delta\omega$  จะมีค่าเท่ากับพลังงานเฉลี่ยในช่วงความถี่  $\Delta\omega$  ที่จุด  $\omega$

ส่วนการหาค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังสามารถแบ่งได้รูปแบบการคำนวณได้ 3 รูปแบบดังนี้

- Non-parametric methods ซึ่งเป็นการคำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณโดยตรงจากตัวสัญญาณเอง ได้แก่ Periodogram method, Welch method, Multitaper method
- Parametric methods เป็นวิธีที่ความละเอียดของผลการคำนวณมากกว่า Non-parametric methods ในกรณีที่สัญญาณที่ได้มีจำนวนไม่มาก วิธีนี้ไม่ได้คำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณโดยตรงจากข้อมูล แต่จะสมมุติเอาว่าสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณเชิงเส้นที่ถูกกระตุ้นจากคลื่นความถี่แบบสุ่ม (white noise) และ คำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณของสัญญาณเชิงเส้นนั้น ได้แก่ Yule-Walk AR method, Burg method, Covariance and modified covariance methods
- Subspace methods บางครั้งถูกเรียกว่า high-resolution method หรือ super-resolution method ซึ่งหาค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ ด้วยหลักการ Eigenanalysis หรือ Eigendecomposition ของ Correlation matrix ได้แก่ Eigenvector method, Multiple Signal Classification (MUSIC) method

ในงานวิจัยนี้จะคำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ ที่เรียกว่า Periodogram ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่มีการดัดแปลงสัญญาณก่อนคำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง ทำให้เหมาะกับการใช้งานทั่วไป อีกทั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลส่วนใหญ่ (Data logger) ใช้วิธีนี้ในการแสดงผลเนื่องจากมีความไวในการคำนวณสูง ผู้ใช้งานเข้าใจง่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ดัดแปลงต่อได้

จากนิยามของ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังมีค่าเท่ากับค่ากำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณต่อช่วงกว้างความถี่[3] (ค่ากำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณรูปไซน์ =  $RMS^2$  หรือ  $\frac{Amplitude^2}{2}$ ) จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ใดๆ  $G(\omega)$  ดังนี้

$$G(\omega) = \frac{RMS^2}{bandwidth} = \frac{Amplitude^2}{2 \times bandwidth}$$

โดยที่

$G(\omega)$  คือ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ

$RMS$  คือ ค่าประสิทธิภาพของสัญญาณที่ความถี่  $\omega$  สำหรับสัญญาณรูปไซน์มีค่า 0.707 เท่าของขนาด

$Amplitude$  คือ ขนาดของสัญญาณที่ความถี่  $\omega$

$bandwidth$  คือ ช่วงกว้างของความถี่ ( $\Delta\omega$ )

### 2.1.3.5 Power Spectrum Density ของคลื่นถนน

Power Spectrum Density  $G_d(\omega)$  จากสมการ 2-36 เป็นค่าที่บอกถึงความเป็นคลื่นของถนนโดยจะรวมผลเนื่องจากความเร็วรถเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อความสะดวกในการทำงานจึงนิยาม Power spectral Density  $G_d(\Omega)$  ขึ้นซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความเป็นคลื่นของถนนเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่าง Power spectrum Density ทั้งสองเช่นเดียวกับสมการ 2-36

$$G_d(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{h}(\omega))^2 \quad (2-36)$$

จะได้ Power spectrum ดังนี้

$$G_d(\Omega) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x} (\hat{h}(\Omega))^2 \quad (2-37)$$

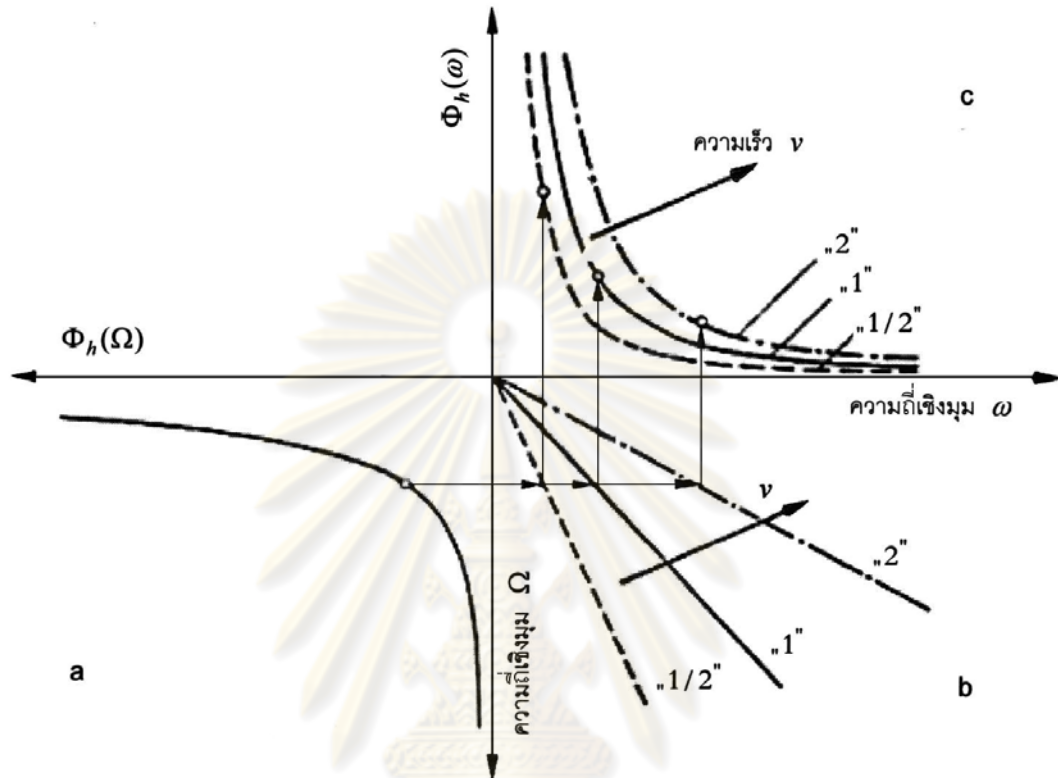
ในสมการ 2-34 เป็นการแทนคาบเวลา T ด้วยความยาวของคาบ X และแทน  $\hat{h}(\omega)$  ด้วย  $\hat{h}(\Omega)$

จากสมการ 2-19  $\hat{h}(\omega) = \frac{1}{v} \hat{h}(\Omega)$  และ

$$X = vT \quad (2-38)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ 2-36 กับ 2-37 จะได้ความสัมพันธ์

$$G_d(\omega) = \frac{1}{v} G_d(\Omega) \quad (2-39)$$



รูปที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Power spectrum  $G_d(\Omega)$  กับ  $G_d(\omega)$  ที่ความเร็ว  $V$  ต่างๆ [1]

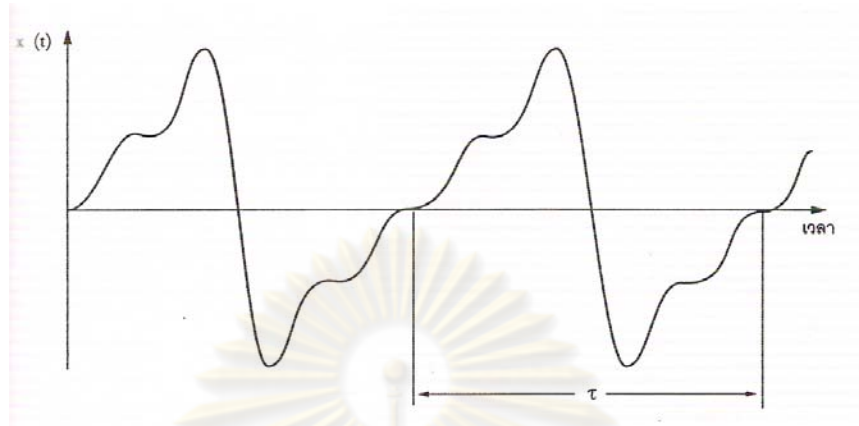
ในรูป 2-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power spectrum  $G_d(\Omega)$  และ  $G_d(\omega)$  จากค่า Power Spectrum  $G_d(\Omega)$  และที่ความเร็ว  $v$  ใดๆ จากสมการ 2-38 จะได้  $\omega$  และจากสมการ 2-39 จะได้  $G_d(\omega)$

#### 2.1.4 การแปลงอนุกรมฟูเรียร์และการวิเคราะห์แบบสเปกตรัม [4]

##### 2.1.4.1 การแปลงแบบฟูเรียร์(Fourier Transform)

สำหรับการสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้นนั้น การกระตุ้นอาจจะไม่อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบ ฮาร์มอนิกจะอยู่ในรูปแบบลักษณะเป็นคาบ (Periodic Motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่มีรูปแบบเหมือนกันในแต่ละคาบ แต่ไม่ใช่รูปของคลื่นรูปไซน์ รูปที่ 2-13 แสดงถึงตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบ รูปการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบนี้จะสามารถแยกเขียนออกมาเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่างๆ กันได้ โดยการใช่วิธีของฟูเรียร์(Fourier) ถ้าให้  $x(t)$  ใน

รูปที่ 2-13 เป็นการเคลื่อนที่มีคาบเท่ากับ  $\tau$  จากสามารถเขียน  $x(t)$  เป็นสมการอนุกรมฟูเรียร์(Fourier Series)



รูปที่ 2-13 การเคลื่อนที่มีแบบลักษณะเป็นคาบ [4]

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos \omega_2 t + \dots + b_1 \sin \omega_1 t + b_2 \sin \omega_2 t + \dots \quad (2-40)$$

โดยที่  $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau}$ ,  $\omega_n = n\omega_1$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$

และค่าสัมประสิทธิ์  $a_n$  และ  $b_n$  หาได้จาก

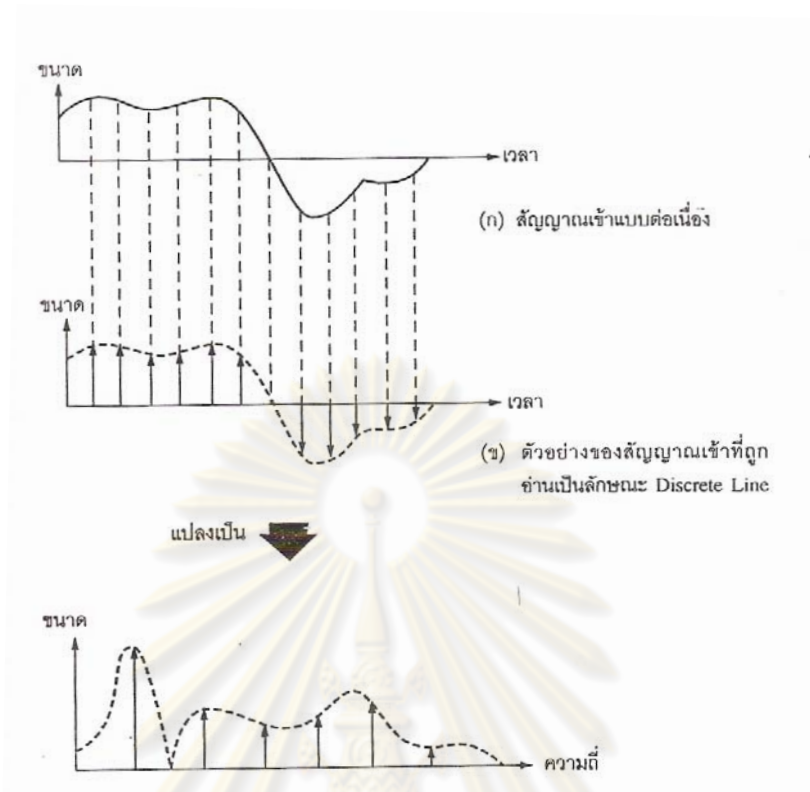
$$a_n = \frac{2}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x(t) \cos \omega_n t dt \quad (2-41)$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x(t) \sin \omega_n t dt \quad (2-42)$$

เมื่อนำสมการที่ 2-40 มาเขียนโดยให้แกนในแนวตั้งเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน และแกนนอนเป็นแกนความถี่จะได้สัญญาณในลักษณะเป็นชุดเส้นดิสครีต (Discrete Line) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



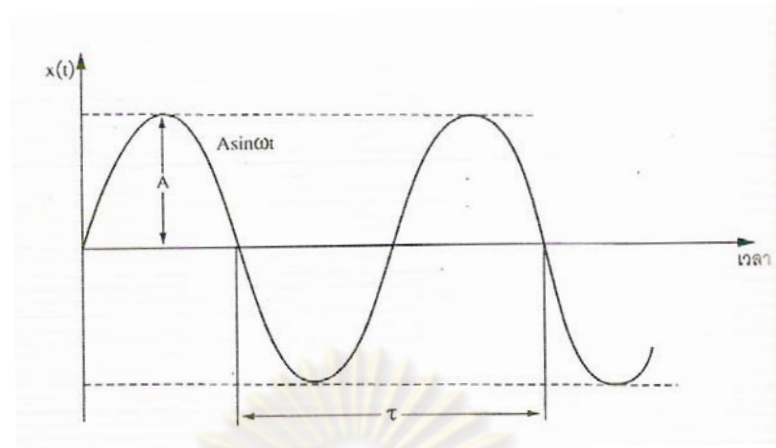


รูปที่ 2-14 สัญญาณการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกที่แสดงอยู่บนแกนความถี่ [4]

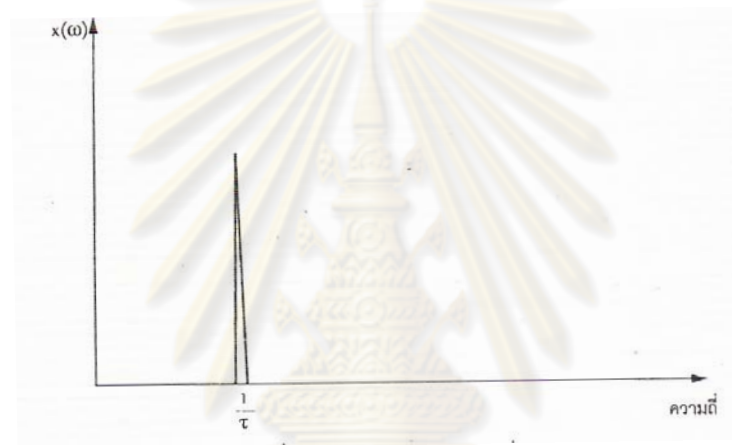
ในปัจจุบันด้วยวิทยาการที่ก้าวหน้าของคอมพิวเตอร์แบบดิจิทัล การแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบมาเป็นสัญญาณบนแกนความถี่นั้นจะกระทำด้วยขั้นตอนวิธีที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform; FFT) ซึ่งทำให้การแปลงสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว

#### 2.1.4.2 การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม (Spectrum Analysis)

การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม คือ การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะนี้หากนำมาใช้กับสัญญาณของการวัดลักษณะถนนจะให้ข้อมูลของการสันสะเทือนได้มากกว่าข้อมูลจากการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา เพื่อเป็นการทำความเข้าใจให้ดีขึ้นสำหรับการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมนี้สัญญาณคลื่นรูปไซน์บนโดเมนเวลาจะถูกพิจารณาเป็นกรณีแรก สัญญาณดังกล่าวถูกแสดงไว้ใน สัญญาณนี้จะมีค่าความถี่ค่าเดียวซึ่งก็คือ  $1/\tau$  เมื่อ  $\tau$  คือ คาบของสัญญาณที่ครบ 1 รอบ ดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวนี้ไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ก็จะมีสัญญาณเพียงค่าเดียวบนแกนความถี่ดังรูปที่ 2-16

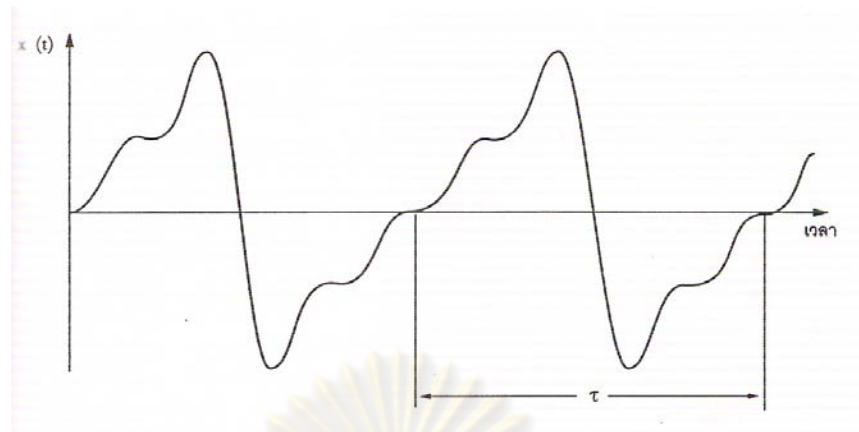


รูปที่ 2-15 สัญญาณบนโดเมนเวลา [4]

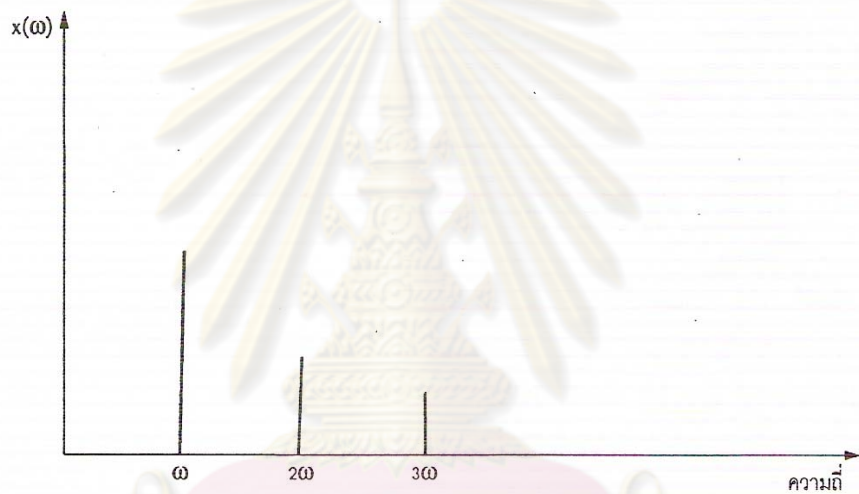


รูปที่ 2-16 สัญญาณบนโดเมนความถี่ [4]

ในกรณีที่สอง เมื่อมีสัญญาณอยู่ในรูปของลักษณะที่เป็นคาบซึ่งเขียนอยู่บนโดเมนเวลา เมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้สามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์มอนิกได้หลายความถี่ โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกัน ซึ่งกรณีนี้สัญญาณโดเมนเวลาสามารถเขียนเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3 ความถี่ คือ  $\omega$ ,  $2\omega$  และ  $3\omega$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-17 และรูปที่ 2-18 โดยที่  $\omega = 1/\tau$

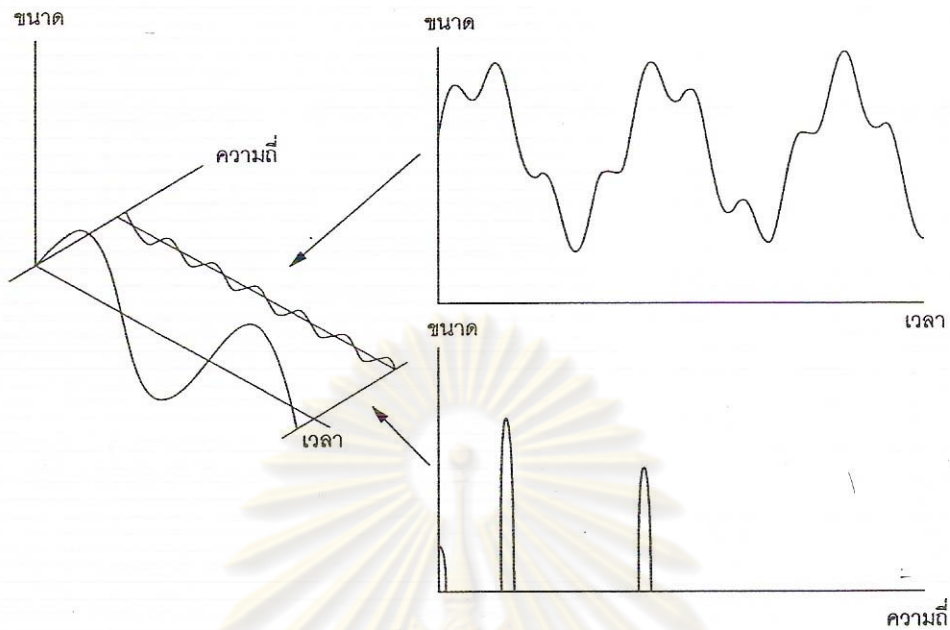


รูปที่ 2-17 การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนเวลา [4]



รูปที่ 2-18 การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนความถี่ [4]

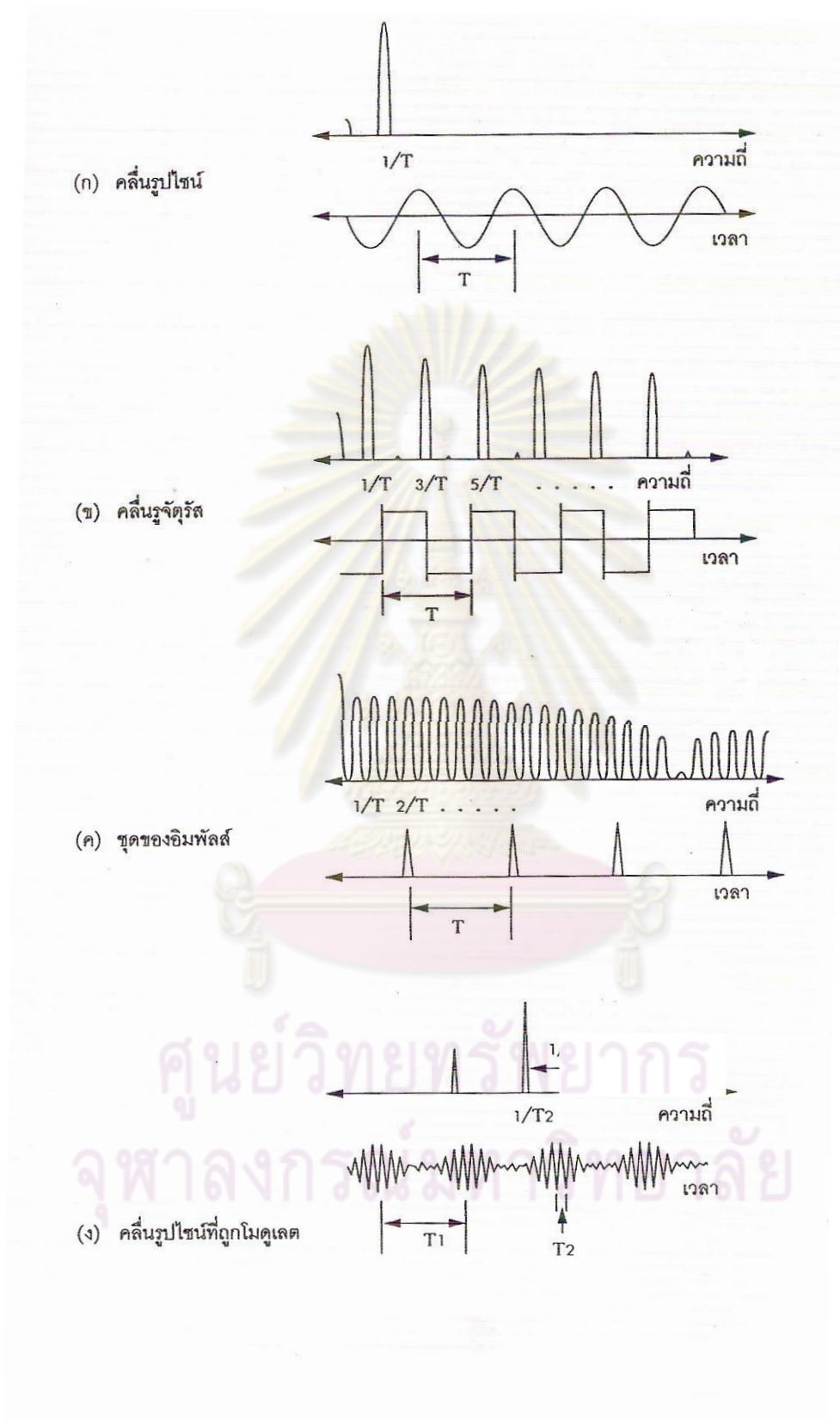
เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาสู่สัญญาณบนโดเมนความถี่ การมองแบบ 3 มิติจึงถูกเขียนขึ้นและแสดงไว้ในรูปที่ 2-19 ซึ่งภาพสามมิตินั้นจะมีแกนตั้งเป็นแกนที่แสดงถึงขนาดของสัญญาณ ในขณะที่แกนแนวนอนแกนหนึ่งเป็นแกนเวลาและแกนแนวนอนที่ตั้งฉากกับแกนแนวนอนแรกเป็นแกนความถี่ จากภาพแกน 3 มิติ ในรูปที่ 2-19 จะแสดงถึงสัญญาณคลื่นรูปไซน์ 2 รูปที่มีความถี่แตกต่างกัน โดยมีรูปคลื่นรูปใหญ่มีความถี่น้อยกว่าคลื่นรูปเล็ก เมื่อมองสัญญาณในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนเวลา จะเห็นเป็นสัญญาณลักษณะเป็นคาบบนโดเมนเวลาตามที่แสดงไว้ในภาพทางขวามือบน และเมื่อมองสัญญาณในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนความถี่ก็จะเห็นเป็นสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน โดยมีสัญญาณขนาดใหญ่อยู่ที่ความถี่ต่ำ และสัญญาณในขนาดที่เล็กกว่าอยู่ที่ความถี่สูงกว่าตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-19 (ด้านขวามือ)



รูปที่ 2-19 ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ [4]

รูปที่ 2-20 จะแสดงถึงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณบนโดเมนเวลากับสัญญาณบนโดเมนความถี่ โดยในภาพ(ก) จะแสดงถึงการแปลงสัญญาณคลื่นรูปไซน์ไปเป็นสัญญาณเพียงสัญญาณเดียวบนแกนความถี่ ภาพ (ข) จะแสดงถึงการแปลงสัญญาณคลื่นรูปจตุรัสไปเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ที่เป็นเลขคี่ ภาพ (ค) จะแสดงถึงการแปลงสัญญาณกระแทกที่เป็นชุด (impulse Train) ไปเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกที่มีทุกค่าความถี่ที่บนแกนความถี่ ภาพ (ง) แสดงถึงการแปลงสัญญาณ Modulate Sine Wave เป็นสัญญาณในลักษณะ Side Band บนแกนความถี่

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-20 ตัวอย่างของสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ บนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [4]



## 2.2 การประเมินสภาพถนนตามหลักเกณฑ์ ISO 8608 [5]

### 2.2.1 ขอบเขต

ใน ISO 8608 มุ่งเน้นเสนอวิธีมาตรฐานในการรายงานผลการวัดลักษณะถนนในแนวตั้งของถนนทุกประเภท ทั้งถนนในตัวเมือง ซอย ทางด่วนหรือ แม่กระทั้งถนน ออฟโรด

### 2.2.2 ความหมายและสัญลักษณ์

Spatial Frequency คือ จำนวนครั้งของการเคลื่อนที่สลับไปมาของคลื่นถนน มีหน่วยเป็น cycle/m

Power Spectral Density (PSD) คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยความถี่ หรือ ค่ากำลังสองของค่าประสิทธิผลของสัญญาณ (RMS) ต่อหนึ่งหน่วยความถี่

Displacement PSD คือ ค่า Power Spectral Density (PSD) ของระยะทางในแนวตั้ง

Acceleration PSD คือ ค่า Power Spectral Density (PSD) ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันในแนวตั้ง

### 2.2.3 การระบุลักษณะถนน

การระบุค่าของลักษณะถนนทำได้ด้วยกัน 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 รายงานผลแบบค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้ง ( $G_d$ ) เป็นการรายงานผลค่าสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งของพื้นถนน มีหน่วยเป็น  $m^3$  การรายงานผลจะประกอบด้วยค่าสเปกตรัมกำลังของการกระจัด เทียบกับความถี่ของถนนบน กราฟแบบ log-log scale ส่วนการประเมินลักษณะของถนนนั้นจะจัดรูปดังสมการที่ 2-43 และ 2-44

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot (n/n_0)^{-w} \quad (2-43)$$

หรือ

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \cdot (\Omega/\Omega_0)^{-w} \quad (2-44)$$

โดยที่

$n_0$  คือ ค่าความถี่อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 0.1 cycle/m

$\Omega_0$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 1 rad/m

$w$  คือ ค่ากำลังในการสร้างสมการ เป็นอัตราส่วนของขนาดคลื่นความถี่ต่ำต่อคลื่นความถี่สูง

วิธีที่ 2 รายงานผลแบบค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งแนวตั้ง ( $G_a$ ) เป็นการรายงานผลของค่าสเปกตรัมกำลังของอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันในแนวตั้งของถนนต่อระยะทาง

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของความเร่งแนวตั้ง ( $G_a$ ) กับความถี่ของคลื่นถนนเป็นดังสมการที่ 2-45 และ 2-46

$$G_a(n) = G_a(n_0) \cdot (n/n_0)^{-w'} \quad (2-45)$$

หรือ

$$G_a(\Omega) = G_a(\Omega_0) \cdot (\Omega/\Omega_0)^{-w'} \quad (2-46)$$

โดยที่

$n_0$  คือ ค่าความถี่อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 0.1 cycle/m

$\Omega_0$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 1 rad/m

$w'$  คือ ค่ากำลังในการสร้างสมการ เป็นอัตราส่วนของขนาดคลื่นความถี่ต่ำต่อคลื่นความถี่สูง

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้ง ( $G_d$ ) และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของความเร่งแนวตั้ง ( $G_a$ ) เป็นดังสมการที่ 2-47, 2-48 และ 2-49

$$G_a(n) = (2\pi n)^4 \cdot G_d(n) \quad (2-47)$$

$$G_a(\Omega) = (\Omega)^4 \cdot G_d(\Omega) \quad (2-48)$$

$$w' = w - 4 \quad (2-49)$$

#### 2.2.4 การรายงานผลแบบ Smoothed Power Spectral Density

ในการคำนวณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่ได้ หากคำนวณด้วยวิธีการแบ่งช่วงความถี่คงที่ (Constant Bandwidth Method) บนกราฟแบบ log-log ผลที่ได้จะไปเน้นหนักในช่วงที่มีความถี่สูงเพราะจุดที่ได้ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ช่วงความถี่สูง และค่าที่ได้จะผันผวนมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดการคำนวณที่ผิดพลาดทางสถิติได้

ด้วยเหตุนี้เองค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง ที่ได้ควรจัดอยู่ในรูป Smoothed PSD โดยให้มีการแบ่งช่วงกว้างความถี่แบบสัดส่วน (Proportional bandwidth) ซึ่งนิยมใช้กันอยู่ 3 แบบ คือ Octave bandwidth Third-octave bandwidth และ Twelfth-octave bandwidth ซึ่งช่วง

ความถี่ของการคำนวณทั้ง 3 แบบดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-1 ส่วนค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังเฉลี่ยในแต่ละช่วงความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการ 2-50

$$G_s(i) = \frac{[(n_L + 0.5) \cdot B_e - n_l(i)]G(n_L)}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{\sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j) \cdot B_e}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{[n_h(i) - (n_H - 0.5) \cdot B_e]G(n_H)}{n_h(i) - n_l(i)} \quad (2-50)$$

โดยที่

$G_s(i)$  คือ ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังที่ผ่านการคำนวณให้เป็นช่วงความถี่ที่เป็นแบบ  
สัดส่วน

$B_e$  คือ ค่าช่วงกว้างของความถี่กรณีแบ่งช่วงความถี่คงที่

$$n_H = INT\left(\frac{n_h(i)}{B_e} + 0.5\right) \quad (2-51)$$

$$n_L = INT\left(\frac{n_l(i)}{B_e} + 0.5\right) \quad (2-52)$$

โดยที่

$n_h(i)$  คือ ค่าขอบเขตบนของการแบ่งแบบสัดส่วน ดูค่าจากตารางที่ 2-1

$n_l(i)$  คือ ค่าขอบเขตล่างของการแบ่งแบบสัดส่วน ดูค่าจากตารางที่ 2-1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-1 ค่ามัธยฐาน ขอบเขตบน ขอบเขตล่าง สำหรับการวัดสมการให้อยู่ในรูป Smoothed PSD ที่แต่ละช่วงความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง n [5]

## a) Octave bandwidth

EXP	$n_l$ $m^{-1}$	$n_c$ $m^{-1}$	$n_h$ $m^{-1}$
-9	0,001 4	0,002 0	0,002 8
-8	0,002 8	0,003 9	0,005 5
-7	0,005 5	0,007 8	0,011 0
-6	0,011 0	0,015 6	0,022 1
-5	0,022 1	0,031 2	0,044 2

## b) Third-octave bandwidth

EXP	$n_l$ $m^{-1}$	$n_c$ $m^{-1}$	$n_h$ $m^{-1}$
-4,333	0,044 2	0,049 6	0,055 7
-4	0,055 7	0,062 5	0,070 2
-3,667	0,070 2	0,078 7	0,088 4
-3,333	0,088 4	0,099 2	0,111 4
-3	0,111 4	0,125 0	0,140 3
-2,667	0,140 3	0,157 5	0,176 8
-2,333	0,176 8	0,198 4	0,222 7
-2	0,222 7	0,250 0	0,280 6

## NOTES

8  $n_l$  = lower cut-off frequency

$n_c$  = centre frequency

$n_h$  = upper cut-off frequency

$n_c = 2^{EXP}$

9 A small overlap exists between the lowest twelfth-octave bandwidth and the highest third-octave bandwidth. This overlap maintains the values 0,5; 1; 2; 4 as centre frequencies in the twelfth-octave bands. This makes it convenient to calculate the road characterization (see B.3) immediately from the twelfth-octave band smoothing.

## c) Twelfth-octave bandwidth

EXP	$n_l$ $m^{-1}$	$n_c$ $m^{-1}$	$n_h$ $m^{-1}$
-1,833	0,272 6	0,280 6	0,288 8
-1,750	0,288 8	0,297 3	0,306 0
-1,667	0,306 0	0,315 0	0,324 2
-1,583	0,324 2	0,333 7	0,343 5
-1,500	0,343 5	0,353 6	0,363 9
-1,417	0,363 9	0,374 6	0,385 6
-1,333	0,385 6	0,396 9	0,408 5
-1,250	0,408 5	0,420 4	0,432 8
-1,167	0,432 8	0,445 4	0,458 5
-1,083	0,458 5	0,471 9	0,485 8
-1	0,485 8	0,5	0,514 7
-0,917	0,514 7	0,529 7	0,545 3
-0,833	0,545 3	0,561 2	0,577 7
-0,750	0,577 7	0,594 6	0,612 0
-0,667	0,612 0	0,630 0	0,648 4
-0,583	0,648 4	0,667 4	0,687 0
-0,500	0,687 0	0,707 1	0,727 8
-0,417	0,727 8	0,749 2	0,771 1
-0,333	0,771 1	0,793 7	0,817 0
-0,250	0,817 0	0,840 9	0,865 5
-0,167	0,865 5	0,890 9	0,917 0
-0,083	0,917 0	0,943 9	0,971 5
0	0,971 5	1	1,029 3
0,083	1,029 3	1,059 5	1,090 5
0,167	1,090 5	1,122 5	1,155 4
0,250	1,155 4	1,189 2	1,224 1
0,333	1,224 1	1,259 9	1,296 8
0,417	1,296 8	1,334 8	1,374 0
0,500	1,374 0	1,414 2	1,455 7
0,583	1,455 7	1,498 3	1,542 2
0,667	1,542 2	1,587 4	1,633 9
0,750	1,633 9	1,681 8	1,731 1
0,833	1,731 1	1,781 8	1,834 0
0,917	1,834 0	1,887 7	1,943 1
1	1,943 1	2	2,058 6
1,083	2,058 6	2,118 9	2,181 0
1,167	2,181 0	2,244 9	2,310 7
1,250	2,310 7	2,378 4	2,448 1
1,333	2,448 1	2,519 8	2,593 7
1,417	2,593 7	2,669 7	2,747 9
1,500	2,747 9	2,828 4	2,911 3
1,583	2,911 3	2,996 6	3,084 4
1,667	3,084 4	3,174 8	3,267 8
1,750	3,267 8	3,363 6	3,462 1
1,833	3,462 1	3,563 6	3,668 0
1,917	3,668 0	3,775 5	3,886 1
2	3,886 1	4	4,117 2
2,083	4,117 2	4,237 9	4,362 0
2,167	4,362 0	4,489 8	4,621 4
2,250	4,621 4	4,756 8	4,896 2
2,333	4,896 2	5,039 7	5,187 4
2,417	5,187 4	5,339 4	5,495 8
2,500	5,495 8	5,656 9	5,822 6
2,583	5,822 6	5,993 2	6,168 8
2,667	6,168 8	6,349 6	6,535 7
2,750	6,535 7	6,727 2	6,924 3
2,833	6,924 3	7,127 2	7,336 0
2,917	7,336 0	7,551 0	7,772 3
3	7,772 3	8	8,234 4

### 2.2.5 การทำ Curve fitting PSD และประเมินประเภทถนน

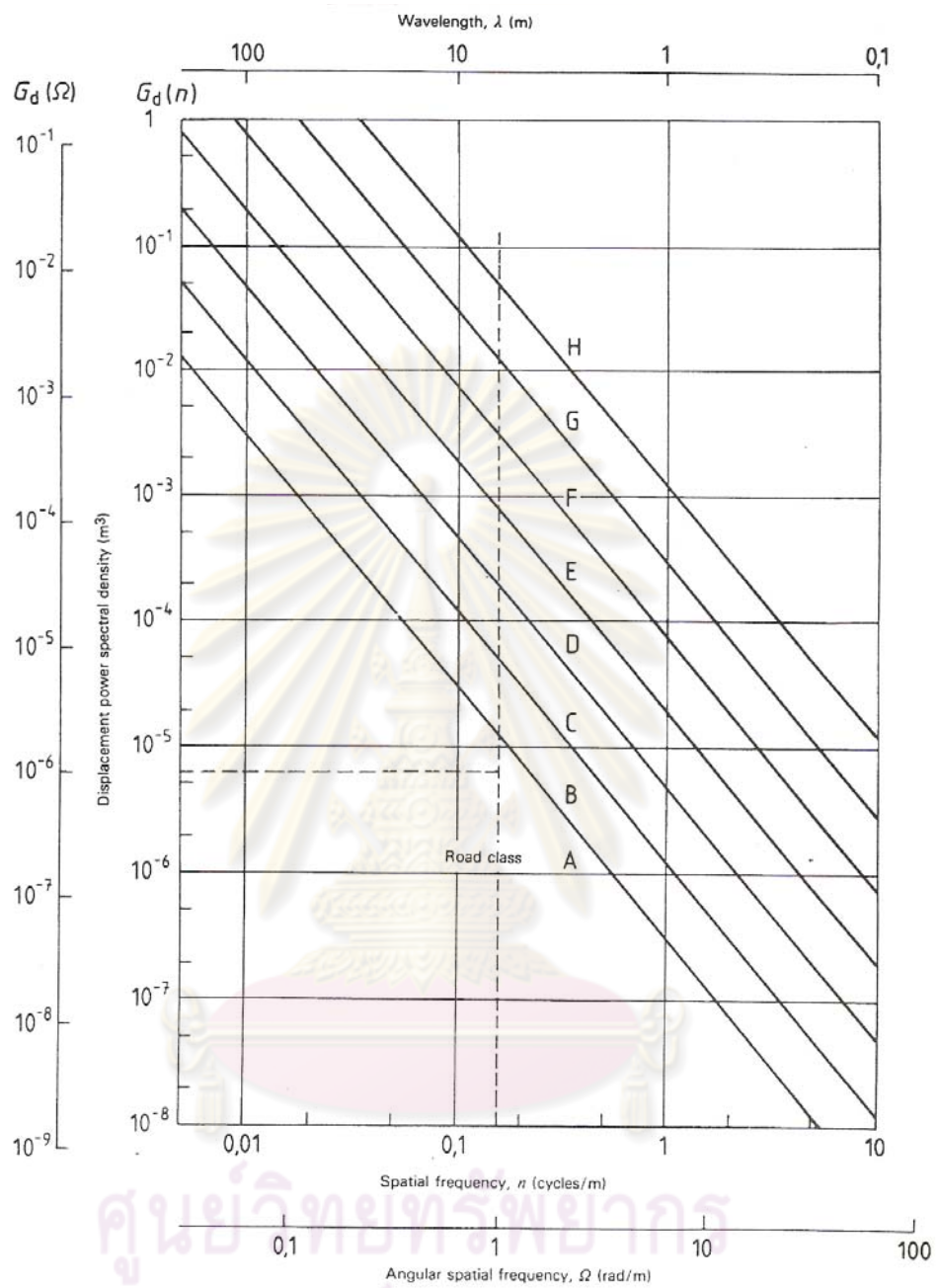
การทำ Curve fitting PSD นั้นทำการประเมินและแบ่งประเภทของถนน ซึ่งทำหลังจากแปลงข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูป Smoothed PSD แล้ว ด้วยวิธีการหาค่ากำลังสองน้อยสุด โดยสนใจในช่วงความถี่ 0.011 cycle/m ถึง 2.83 cycle/m ผลที่ได้จะสามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไป ได้ดังสมการที่ 2-43 และ 2-44

ส่วนในการประเมินและแบ่งประเภทของถนนนั้นจะใช้ค่า  $G_d(n_0)$  หรือ  $G_d(\Omega_0)$  หลังจากทำการ Curve fitting แล้ว โดยตั้งสมมุติฐานตามมาตรฐาน ISO 8608 ว่าข้อมูลที่ได้มามีค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร็วในแนวดิ่งมีคิงที่ทุกความถี่ซึ่งหมายความว่า จะมีค่า  $w$  ในสมการ 2-43 และ 2-44 มีค่าเท่ากับ 2 ค่าของถนนที่ได้จะแบ่งเป็นเกรด A – H ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2-21 และ ตารางที่ 2-2



คุนยวิทยทรพยากร  
จุพาลงกรณ์มหาวิทยาฬย





รูปที่ 2-21 การแบ่งลำดับชั้นของถนนตามข้อแนะนำใน ISO 8608 [5]

ตารางที่ 2-2 การแบ่งลำดับชั้นของถนนตามมาตรฐาน ISO 8608 [5]

Road Class	Degree of roughness			
	$G_d(n_0)$ $10^{-6} \text{ m}^3$			$G_v(n)$ $10^{-6} \text{ m}^3$
	Lower limit	Geometric mean	Upper limit	Geometric mean
A	-	16	32	6.3
B	32	64	128	25.3
C	128	256	512	101.1
D	512	1024	2048	404.3
E	2048	4096	8192	1617.0
F	8192	16384	32768	5468.1
G	32768	65536	131072	25872.6
H	131072	252144	-	103490.3

หมายเหตุ : ตารางนี้ใช้กับหน่วยความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง(Spatial frequency),  $n$  และ  $n_0$  เท่ากับ 0.1 cycle/m

Road Class	Degree of roughness			
	$G_d(\Omega_0)$ $10^{-6} \text{ m}^3$			$G_v(\Omega)$ $10^{-6} \text{ m}^3$
	Lower limit	Geometric mean	Upper limit	Geometric mean
A	-	1	2	1
B	2	4	8	4
C	8	16	32	16
D	32	64	128	64
E	128	256	512	256
F	512	1024	2048	1024
G	2048	4086	8192	4086
H	8192	16385	-	16385

หมายเหตุ : ตารางนี้ใช้กับหน่วยความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง(Spatial frequency),  $\Omega$  และ  $\Omega_0$  เท่ากับ 1 rad/m

## 2.3 การวัดลักษณะของถนนในแบบต่างๆ

ลักษณะถนน คือ เส้นสมมุติที่แสดงถึงพื้นผิวของถนนในแนวขวางและแนวยาวของถนน การวัดลักษณะถนนนั้น คือ การวัดความสูงของเส้นสมมุติแต่ละจุดตามแนวของเส้นสมมุตินี้ ในงานวิจัยครั้งนี้จะกล่าวในส่วนของคุณลักษณะถนนตามแนวยาวเนื่องจากมีผลต่อการขับขี่ของรถกอล์ฟโดยตรง

ในการวัดลักษณะถนนนั้นมีหลายแบบแต่ที่พบบ่อยและได้ทำการศึกษามีดังนี้

### 2.3.1 Rod and Level method [6], [7]

เป็นวิธีที่คล้ายกับอุปกรณ์ในการสำรวจ บางครั้งจะถูกเรียกว่า Static Method ด้วยเหตุที่ว่าไม่มีส่วนใดมีการเคลื่อนที่ขณะทำการวัด

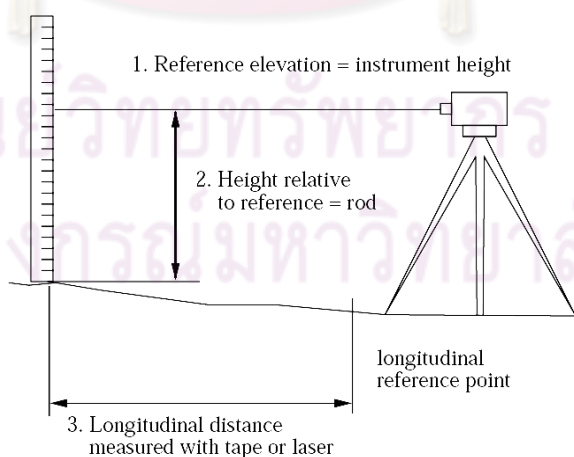
ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 อย่างด้วยกัน คือ

เครื่องมือที่ใช้วัดระดับ (Level) จะอ่านค่าความสูงจากจุดอ้างอิง ซึ่งโดยปกติแล้วความสูงของจุดอ้างอิงนั้น คือ ค่าความสูงของเครื่องมือที่ใช้วัดระดับ (Level) ซึ่งความละเอียดในการวัดระดับนั้นขึ้นอยู่กับระดับความขรุขระของถนน ซึ่งกำหนดไว้ใน ASTM Standard E1364 [7]

เสาตั้ง (Rod) จะมีสเกลการในวัดติดอยู่เป็นตัวบอกระดับความสูง และควรมีระดับน้ำเพื่อให้เสานั้นถูกตั้งตรง

สายวัด (Tape) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจสำหรับกำหนดจุดที่จะทำการวัดส่วนสูง ซึ่งควรมีความแม่นยำประมาณ 0.2% ของความยาวแต่ละช่วงที่ทำการวัด

วิธีการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 2-22

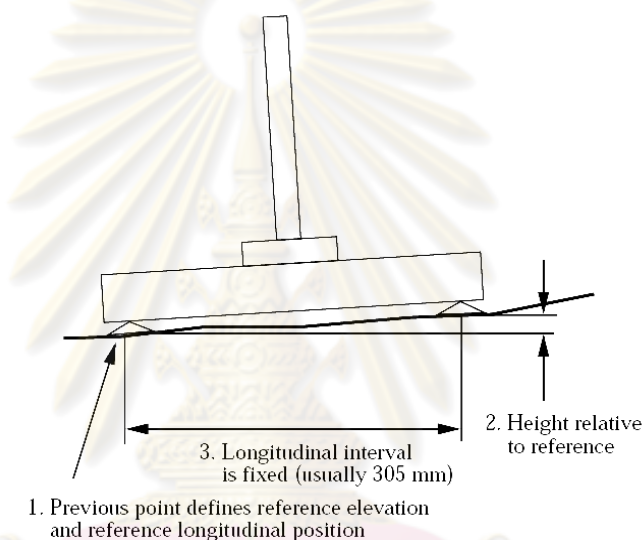


รูปที่ 2-22 วิธีการวัดลักษณะถนนด้วยวิธี Rod and Level method [6]

ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะเป็นวิธีที่เข้าใจง่ายและปฏิบัติได้ง่าย แต่ลักษณะถนนที่จะศึกษานั้นจะต้องมีการวัดค่าอย่างละเอียด ความถี่ในการวัดควรวัดมากกว่า 5 ครั้งในระยะทาง 1 เมตร ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เชื่องช้า ไม่เหมาะกับเส้นทางที่มีระยะทางยาวมาก

### 2.3.2 Dipstick [6]

Dipstick เป็นอุปกรณ์ที่ถูกทำขึ้นโดยบริษัท Face เป็นวิธีการที่ให้ผลเร็วกว่าวิธี Rod and Level และเหมาะสมสำหรับการประเมินความขรุขระของถนน ภายในประกอบด้วย Battery และคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล และเก็บข้อมูล รายละเอียดการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 2-23



รูปที่ 2-23 วิธีการทำงานของอุปกรณ์ Dipstick [6]

วิธีการใช้งาน คือ ใช้ Dipstick วัดลักษณะถนนในขณะที่ผู้ใช้เดินไปด้วย ภายในประกอบด้วย Inclinator ซึ่งมีความแม่นยำสูงสำหรับวัดความแตกต่างของความสูงระหว่างสองจุดวัดหัวท้ายของอุปกรณ์ ซึ่งมีระยะห่างกันประมาณ 305 cm จากนั้นเมื่อทำการวัดครั้งแรกแล้วให้หมุนอุปกรณ์ไป 180 องศา จุดที่เป็นจุดวัดส่วนท้ายของอุปกรณ์จะกลายเป็นส่วนหัว และเมื่ออุปกรณ์สมดุลแล้วจะทำการวัดความแตกต่างของความสูงต่อไป

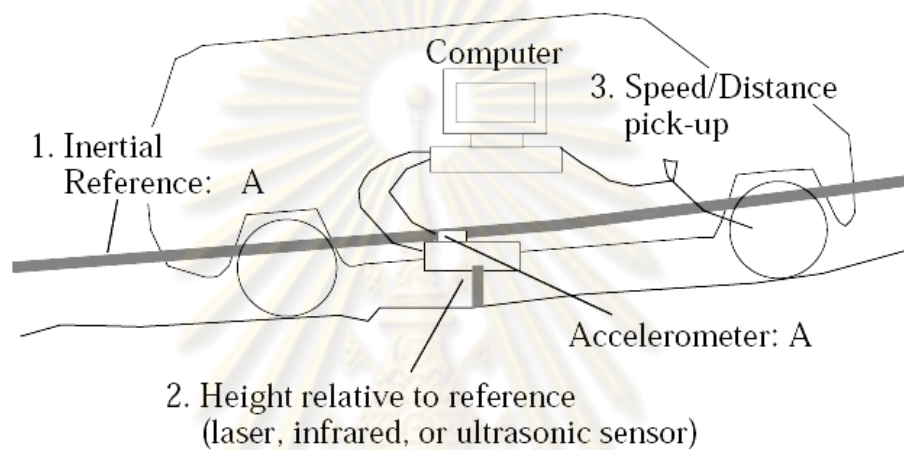
ด้วยการออกแบบนี้ค่าความสูงจะถูกคำนวณจากจุดที่ทำการวัดก่อนหน้านี้อีกทั้งระยะทางตามแนวราบก็สามารถคำนวณได้จากความยาวของอุปกรณ์และมุมการเอียง วิธีนี้จะให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี Rod and Level method หากมีการตั้งจุดอ้างอิงจุดเดียวกัน

### 2.3.3 Inertial Profiler [6]

ในปี ค.ศ. 1960 General Motor ได้พัฒนาวิธีการวัดลักษณะถนน ด้วยความเร็วสูงได้ จึงได้รับความนิยมในปัจจุบัน มีชื่อเรียกวิธีการนี้ว่า Inertial Profiler ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2-24

การวัดด้วยวิธีนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วน ซึ่งติดกับตัวรถด้วยกัน คือ

1. Accelerometer ซึ่งมีหน้าที่ระบุตำแหน่งจุดอ้างอิงบนตัวรถ โดยการวัดความเร่งของมวลของตัวรถ
2. Sensor วัดการกระจัด ซึ่งมีหน้าที่ระบุตำแหน่งถนนเทียบกับจุดอ้างอิง
3. อุปกรณ์สำหรับวัดระยะทาง หรือ ความเร็วที่รถเคลื่อนที่ ใช้ระบุความเร็วรถในขณะที่ทำการวัดเพื่อจะนำมาใช้ในการคำนวณลักษณะของถนน



รูปที่ 2-24 ภาพวิธีการวัดแบบ Inertial Profiler และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ [6]

ซึ่งสามารถคำนวณความสูงที่ห่างจากพื้นถนนด้วยสมการ 2-53 และดังรูปที่ 2-25

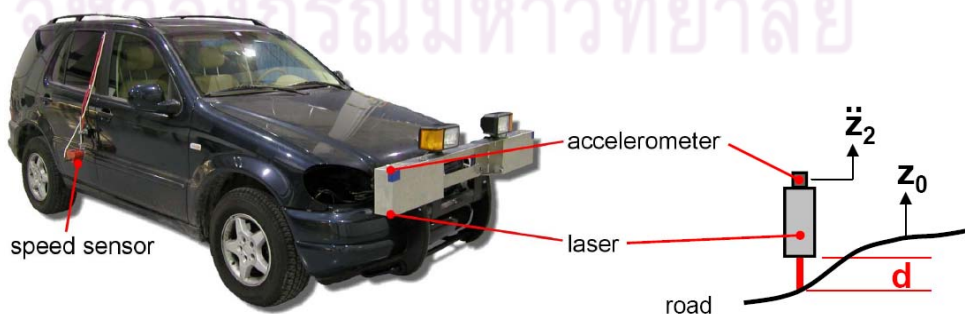
$$z_o = \iint \ddot{z}_2 dt - d \quad (2-53)$$

โดยที่ค่า

$z_o$  = ความสูงของผิวถนน

$\ddot{z}_2$  = ความเร่งที่ได้จาก Accelerometer

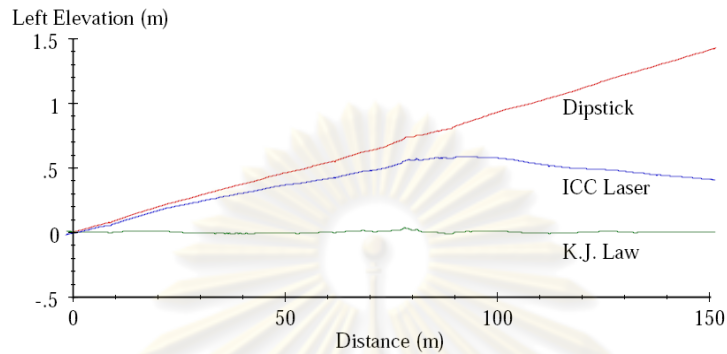
$d$  = ระยะที่เลเซอร์วัดได้



รูปที่ 2-25 การทำงานของวิธีการวัดแบบ Inertial Profiler [8]



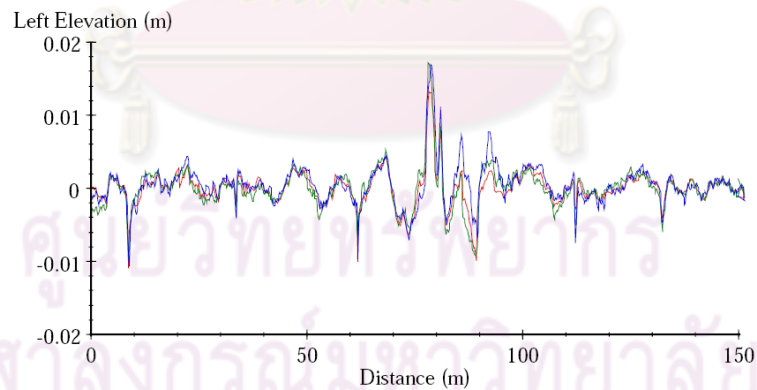
โดยปกติแล้วการวัดวิธีนี้จะใช้ความเร็วที่ใช้วัดในช่วง 15 – 100 km/h ถึงแม้จะเป็นวิธีการที่รวดเร็วแต่ข้อเสียที่สำคัญ คือ ผลที่ได้จากการวัดหากไม่มีการกรองความถี่ต่ำจะนำมาเปรียบเทียบกับวิธีอื่นไม่ได้เช่น Rod and Level method หรือ แม้กระทั่งวัดด้วยวิธีเดียวกันแต่ต่างยี่ห้อ ดังรูปที่ 2-26



Three profiles measured with different devices.

รูปที่ 2-26 ผลการวัดระหว่าง วิธี Dipstick และ วิธี Inertial Profiler 2 ยี่ห้อที่ยังไม่ได้กรองความถี่ต่ำ แกนตั้ง คือ ความสูงเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง แกนนอน คือ ระยะทางที่ทำการวัด

แต่อย่างไรก็ตามในการวัดลักษณะของถนนนั้นจะสนใจคลื่นถนนที่มีความถี่ช่วงที่ต้องการ ดังนั้นหากทำการกรองความถี่ต่ำออกไปค่าที่ได้จะใกล้เคียงกันดังรูปที่ 2-27 วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

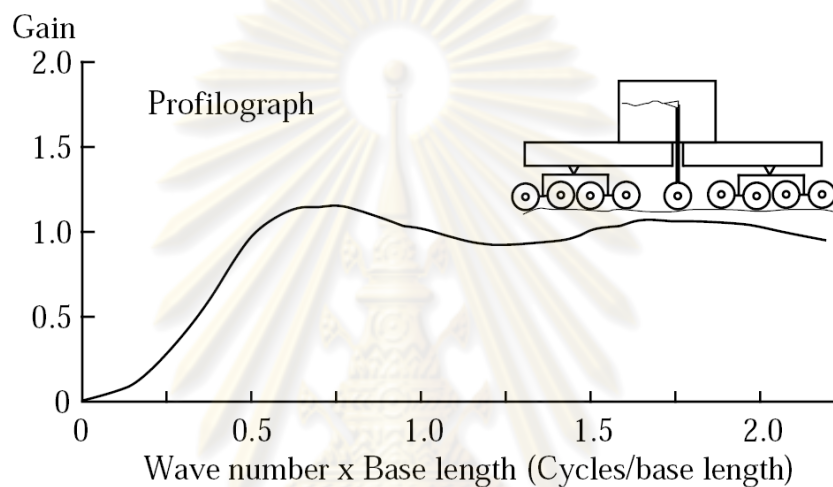


The same profiles after filtering.

รูปที่ 2-27 ผลการวัดระหว่าง วิธี Dipstick และ Inertial Profiler 2 ยี่ห้อ ที่ผ่านการกรองความถี่ต่ำแล้ว แกนตั้ง คือ ความสูงเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง แกนนอน คือ ระยะทางที่ทำการวัด

### 2.3.4 Profilograph [6]

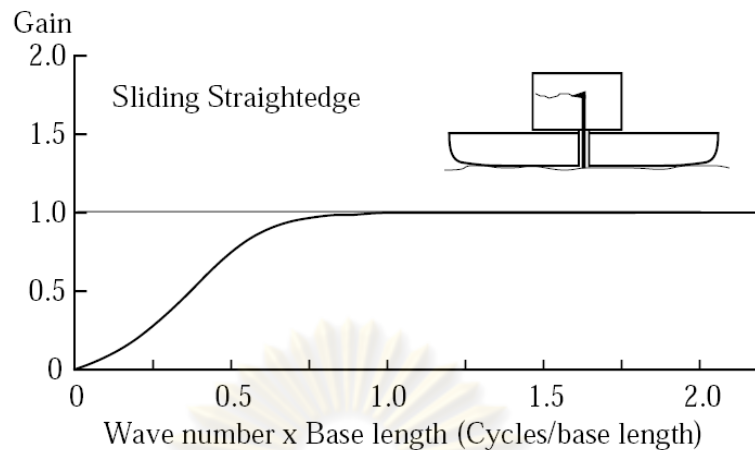
เป็นวิธีที่ใช้ในยุคแรกๆ ของการวัดลักษณะถนน ซึ่งการวัดด้วย Profilograph จะวัดขนาดของความสูงของถนนที่โดเมนความถี่เชิงระยะทางต่างๆ แทนที่จะวัดลักษณะถนนบนโดเมนระยะทางโดยตรง อุปกรณ์นี้จะทำตัวเป็นอุปกรณ์ในการกรองความถี่ต่ำอย่างหนึ่ง สำหรับฟังก์ชันขยาย (Gain) จากถนนถึงล้อตรงกลางของอุปกรณ์นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของฐานแสดงไว้ในรูปที่ 2-28 ดังนั้นสัญญาณที่วัดได้จากล้อตรงกลางจะต้องทำการหารด้วยค่าฟังก์ชันขยายนี้ก่อนจึงจะเป็นความถี่เชิงระยะทางของถนน



รูปที่ 2-28 ฟังก์ชันขยายของ Profilograph เทียบกับขนาดของฐาน [6]

### 2.3.5 Sliding Straightedges [6]

วิธี Sliding Straightedges เป็นวิธีที่ใช้หลักการงานเช่นเดียวกับ Profilograph พัฒนาขึ้นเพื่อให้มีฟังก์ชันขยายที่ราบเรียบมากขึ้น แต่เหมาะกับการวัดระยะทางที่ไม่ยาวมาก สำหรับฟังก์ชันขยาย (Gain) จากถนนถึงล้อตรงกลางของอุปกรณ์นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของฐานแสดงไว้ในรูปที่ 2-29 ดังนั้นสัญญาณที่วัดได้จากล้อตรงกลางจะต้องทำการหารด้วยค่าฟังก์ชันขยายนี้ก่อนจึงจะเป็นความถี่เชิงระยะทางของถนน



รูปที่ 2-29 ฟังก์ชันขยายของ Sliding Straightedges เทียบกับขนาดของฐาน [6]

### 2.3.6 Rolling Straightedges [6]

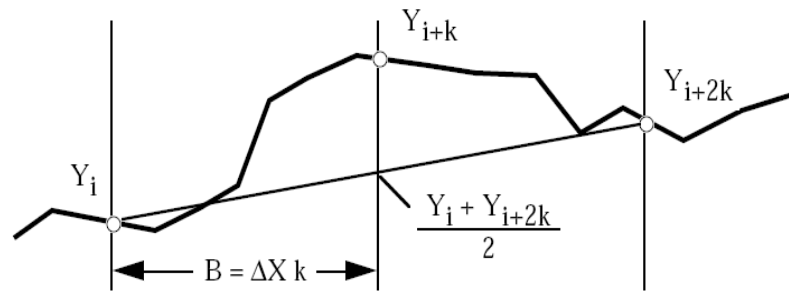
เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวัดความขรุขระในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างไม่ซับซ้อนและประกอบด้วยล้อ 2 ล้อ โดยใช้วัดความสูงที่อยู่ตรงกลางของฐานเทียบกับล้อปลายทั้ง 2 จุด ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของส่วนต่างๆ ได้ดังสมการที่ 2-54 และ รูปที่ 2-30 ฟังก์ชันขยาย (Gain) จากถนนถึงล้อตรงกลางของอุปกรณ์นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของฐานแสดงไว้ในรูปที่ 2-31 ดังนั้นสัญญาณที่วัดได้จากล้อตรงกลางจะต้องทำการหารด้วยค่าฟังก์ชันขยายนี้ก่อนจึงจะเป็นความถี่เชิงระยะทางของถนน

$$SE_i = \frac{1}{2}(Y_i - 2Y_{i+k} + Y_{i+2k}) \quad (2-54)$$

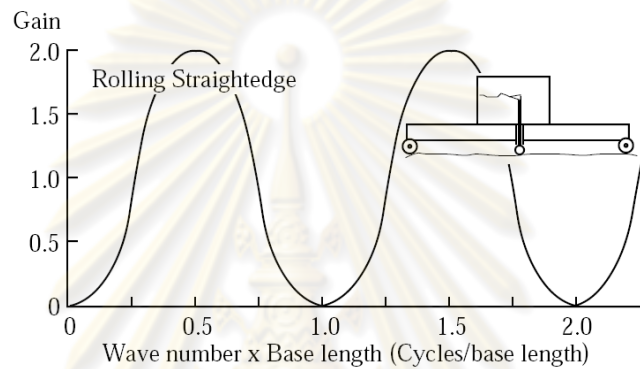
$SE_i$  คือ ผลต่างของระยะทางที่ล้อตรงกลางเคลื่อนที่กับส่วนของฐาน

$Y_i$  คือ ค่าความสูงของถนนที่ตำแหน่งใดๆ

k คือ ระยะวัดจุดต่างๆของถนน



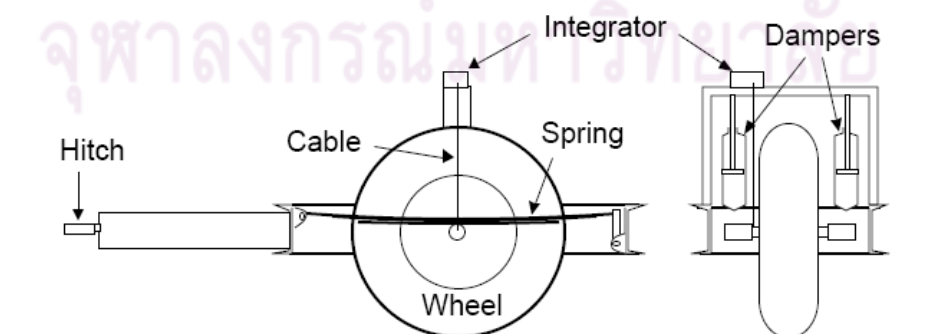
รูปที่ 2-30 ตัวแปรที่จะใช้คำนวณความขรุขระของถนนของสมการที่ 2-54 [6]



รูปที่ 2-31 ฟังก์ชันขยายของ Rolling Straightedges เทียบกับขนาดของฐาน [6]

### 2.3.7 The BPR Roughometer [9]

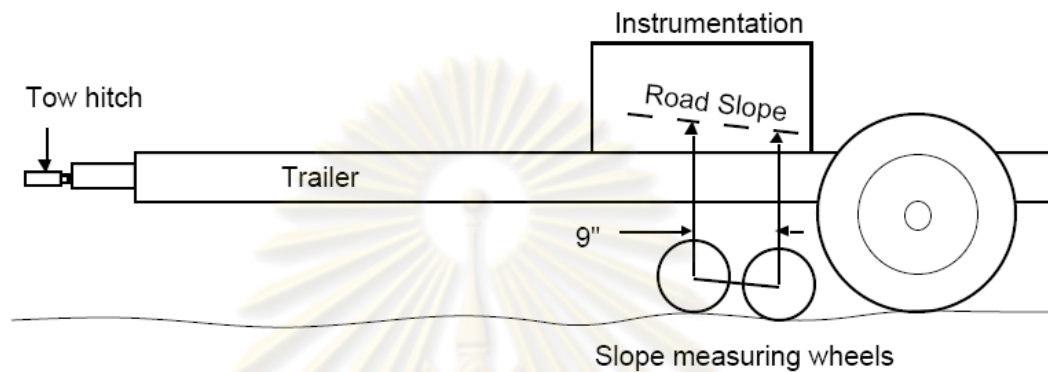
ต่อมาในปี ค.ศ. 1941 ได้มีการสร้างอุปกรณ์การวัดที่เรียกว่า The BPR Roughometer ขึ้นมาซึ่งมีลักษณะเป็นล้อติดตั้งอยู่บนรางยาวใช้สำหรับลาก ดังรูปที่ 2-32 โดยมีการกำหนด ขนาด มวล ชนิดของยางและระบบรองรับเพื่อให้เป็นมาตรฐานของอุปกรณ์ชนิดนี้ รูปแบบของการวัดจะ วัดผลรวมของการเคลื่อนที่ของระบบรองรับเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวราบที่ได้ ค่าที่ได้จะ อยู่ในหน่วย inches/mile, m/km หรือ counts/mile



รูปที่ 2-32 ภาพของ BPR Roughometer และ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง [9]

### 2.3.8 CHLOE [9]

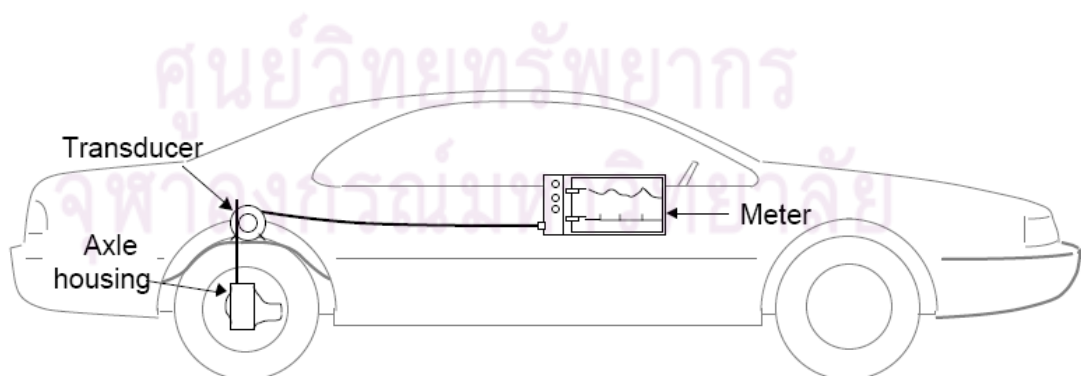
เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยรางยาวมีล้อขนาด 9 นิ้ว 2 ตัว ติดตั้งอยู่ ผลต่างของล้อทั้ง 2 นั้นจะบอกถึงความชันของถนนที่เกิดขึ้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2-33 สัญญาณที่ถูกเก็บจากการวัดจะอยู่ในรูปค่าความแปรปรวนความชันของถนนเมื่อเทียบกับระยะทางในแนวราบที่เกิดจากการวิ่งในอดีตเป็นที่แพร่หลายมากในหมู่วิศวกรโยธาสำหรับงานทำทางด่วน แต่ปัจจุบันเลิกใช้กันไปแล้ว



รูปที่ 2-33 ภาพของ CHLOE และ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง [9]

### 2.3.9 Road meter [9]

ในปี ค.ศ. 1960 ได้มีความพยายามที่จะนำพาหนะในการขับขี่มาใช้ในการวัดความขรุขระของถนน โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะทางในส่วนของตัวถังรถเพื่อวัดระยะทางของแกนเพลาล้อเทียบกับตัวถังรถยนต์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-34 ซึ่งค่าที่วัดอยู่ในหน่วย inches/mile m/km หรือ counts/mile เช่นกัน บางครั้งอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกเรียกว่า Response-Type Road Roughness Measurement Systems (RTRRMS)



รูปที่ 2-34 ภาพของ RTRRMS และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ถูกต้อง [9]



## 2.4 การประเมินความสะอึกสะอื้นจากการขับขี่ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 [10]

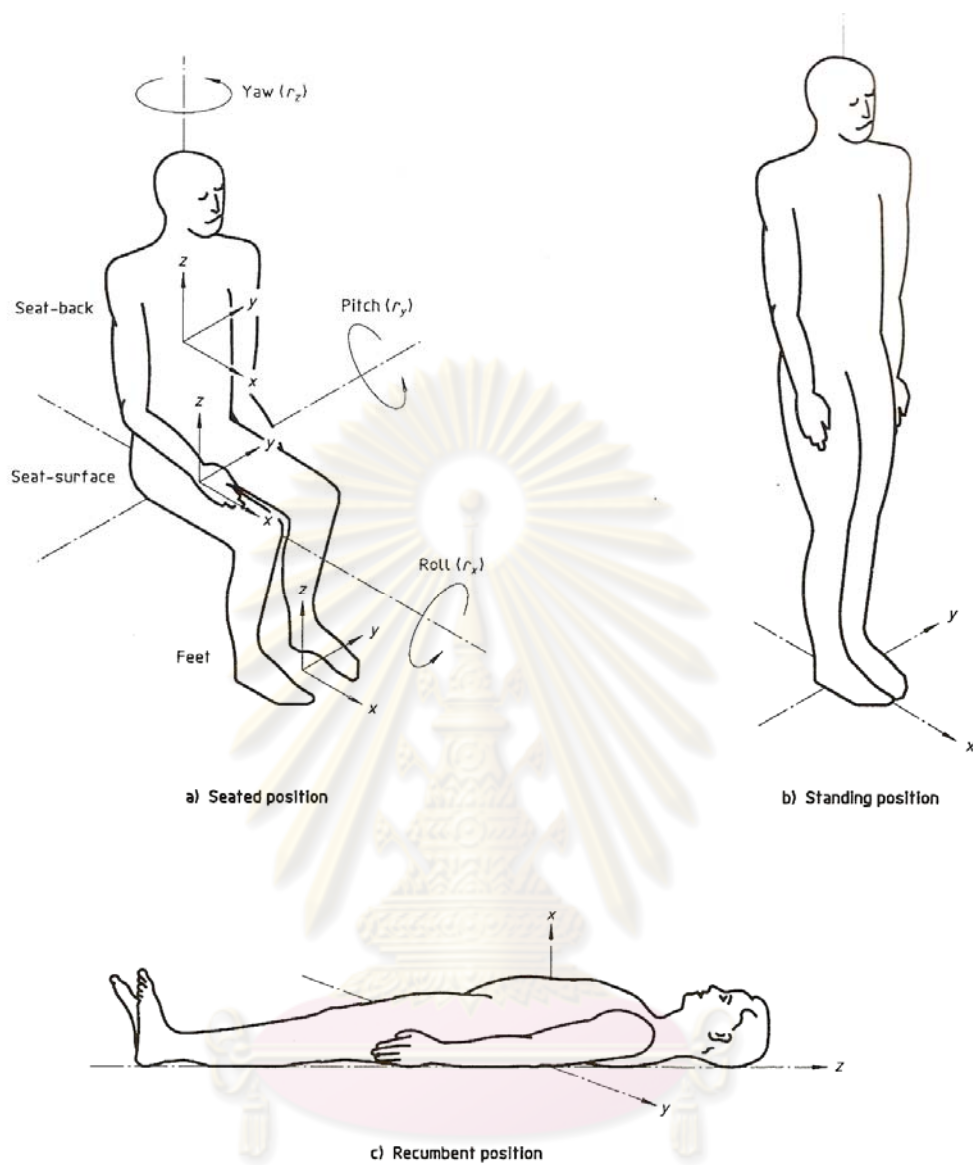
### 2.4.1 ขอบเขต

เนื้อหาใน ISO 2631-1 บอกถึงวิธีการสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่างๆ ที่เข้าสู่ตัวมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นท่าทางการนั่ง ยืน หรือนอนราบ ซึ่งจะพบในการขับขี่ยานพาหนะ การใช้เครื่องจักร หรืออยู่ในที่พักอาศัย และบอกถึงการคำนวณดัชนีชี้วัดที่ระบุถึงระดับการสั่นสะเทือนที่สามารถยอมรับได้ ในแง่ของสุขภาพ ความสะอึกสะอื้น การรับรู้ หรือการเกิดอาการคลื่นไส้ ซึ่งความถี่ที่พิจารณาอยู่ในช่วง 0.5 Hz – 80 Hz

อย่างไรก็ตามมาตรฐานนี้ไม่ได้ครอบคลุมถึงการประเมินค่าการสั่นสะเทือนแบบรุนแรง หรือการกระแทกเพียงครั้งเดียว เช่น การเกิดอุบัติเหตุของยานพาหนะ

### 2.4.2 Frequency weightings และ การใช้งาน

เนื่องจากมนุษย์นั้นมีความสามารถในการรับรู้แต่ละความถี่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีค่าน้ำหนักในการคำนวณในแต่ละความถี่ด้วย เรียกค่านี้อันว่า Frequency weightings ซึ่งประกอบด้วยค่า  $W_k$ ,  $W_d$ ,  $W_f$ ,  $W_c$ ,  $W_e$ ,  $W_j$  ซึ่งการใช้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งแกนของการสั่นสะเทือน ในมาตรฐานนี้แกนของการสั่นสะเทือนจะระบุไว้ดังรูปที่ 2-35 ค่า Frequency weightings ที่ใช้ในแต่ละแกนอ้างอิงเป็นดัง ตารางที่ 2-3 และตารางที่ 2-4



รูปที่ 2-35 แกนอ้างอิงของมนุษย์ที่ใช้ในการคำนวณ [10]

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-3 ค่า Frequency weightings  $W_k$ ,  $W_d$ ,  $W_f$  ที่ใช้ในแกนอ้างอิงต่างๆ [10]

Frequency weighting	Health	Comfort	Perception	Motion sickness
$W_k$	z-axis, seat surface	z-axis, seat surface x,y,z -axes, feet(sitting)	z-axis, seat surface	-
$W_d$	x,y – seat surface	x ,y seat surface y,x seat-back	x,y seat surface	-
$W_f$	-	-	-	vertical

ตารางที่ 2-4 ค่า Frequency weightings  $W_c$ ,  $W_e$ ,  $W_j$  ที่ใช้ในแกนอ้างอิงต่างๆ [10]

Frequency weighting	Health	Comfort	Perception	Motion sickness
$W_c$	z-axis, seat surface	x-axis, seat-back	x-axis, seat-back	-
$W_e$	-	$r_x, r_y, r_z$ - axes seat surface	$r_x, r_y, r_z$ - axes seat surface	-
$W_j$	-	-	-	-

### 2.4.3 การคำนวณค่า Frequency weightings

ค่า Frequency weightings เป็นฟังก์ชันของความถี่ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันขยายได้ ให้ฟังก์ชันขยายนั้นเรียกว่า  $H(p)$

$$\text{โดยที่ } H(p) = H_h(p) \cdot H_l(p) \cdot H_t(p) \cdot H_s(p)$$

ค่าฟังก์ชันขยายของแต่ละตัวแปร มีดังนี้

พจน์  $H_h(p)$  มีชื่อเรียกว่า High pass filter

$$|H_h(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}\omega_1/p + (\omega_1/p)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}}$$

โดยที่

$$\omega_1 = 2\pi f_1$$

พจน์  $H_l(p)$  มีชื่อเรียกว่า Low pass filter

$$|H_l(p)| = \left| \frac{1}{1 + p/\sqrt{2}\omega_2 + (p/\omega_2)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}}$$

โดยที่

$$\omega_2 = 2\pi f_2$$

พจน์  $H_t(p)$  มีชื่อเรียกว่า Acceleration-velocity transition

$$|H_t(p)| = \left| \frac{1 + p/\omega_3}{1 + p/(Q_4\omega_4) + (p/\omega_4)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f_4^4 \cdot Q_4^2}{f^4 \cdot Q_4^2 + f^2 \cdot f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 \cdot Q_4^2}}$$

โดยที่

$$\omega_3 = 2\pi f_3$$

$$\omega_4 = 2\pi f_4$$

พจน์  $H_s(p)$  มีชื่อเรียกว่า Upward step

$$|H_s(p)| = \left| \frac{1 + p/(Q_5\omega_5) + (p/\omega_5)^2}{1 + p/(Q_6\omega_6) + (p/\omega_6)^2} \cdot \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2 \right| = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_5^2 + f^2 \cdot f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 \cdot Q_5^2}{f^4 \cdot Q_6^2 + f^2 \cdot f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 \cdot Q_6^2}}$$

โดยที่

$$\omega_5 = 2\pi f_5$$

$$\omega_6 = 2\pi f_6$$

ในกรณีของ

$W_j$  ค่า  $|H_l(p)|$  เป็น 1

$W_c, W_d, W_e$  ค่า  $|H_s(p)|$  เป็น 1

ส่วนค่า  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, Q_4, Q_5, Q_6$  แสดงไว้ใน ตารางที่ 2-5 และ ตารางที่ 2-6

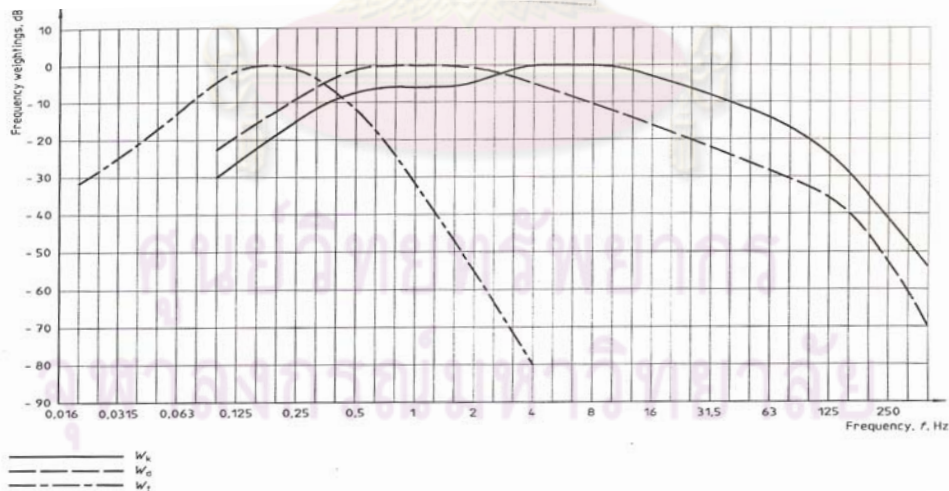
ตารางที่ 2-5 ค่า  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, Q_4, Q_5, Q_6$  สำหรับค่า  $W_k, W_d, W_f$  [10]

Weighting	Band - limiting		a - v transition			Upward step			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$Q_4$	$f_5$	$Q_5$	$f_6$	$Q_6$
$W_k$	0.4	100	12.5	12.5	0.63	2.37	0.91	3.35	0.91
$W_d$	0.4	100	2.0	2.0	0.63	$\infty$	-	$\infty$	-
$W_f$	0.08	0.63	$\infty$	0.25	0.86	0.0625	0.8	0.1	0.8

ตารางที่ 2-6 ค่า  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, Q_4, Q_5, Q_6$  สำหรับค่า  $W_c, W_e, W_j$  [10]

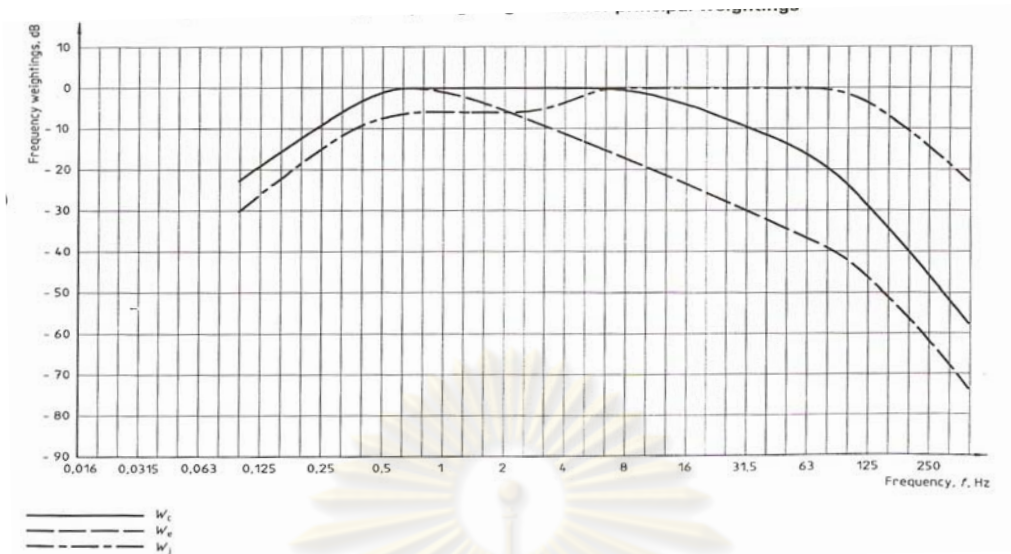
Weighting	Band - limiting		a - v transition			Upward step			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$Q_4$	$f_5$	$Q_5$	$f_6$	$Q_6$
$W_k$	0.4	100	8.0	8.0	0.63	$\infty$	-	$\infty$	-
$W_d$	0.4	100	1.0	1.0	0.63	$\infty$	-	$\infty$	-
$W_f$	0.4	100	$\infty$	$\infty$	-	3.75	0.91	5.32	0.91

เมื่อแทนค่าตาม ตารางที่ 2-5 และ ตารางที่ 2-6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency weightings กับ ความถี่ (f) ดังรูปที่ 2-36 และ รูปที่ 2-37



รูปที่ 2-36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Frequency weightings  $W_k, W_d, W_f$  กับความถี่ (f) [10]





รูปที่ 2-37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Frequency weightings  $W_c$  ,  $W_e$  ,  $W_j$  กับความถี่(f) [10]

#### 2.4.4 การคำนวณความเสถียรจากการขยับและการประเมินผล

ในกรณีการคำนวณความเสถียรจากการขยับนั้น จะต้องนำค่าของสัญญาณความเร่งบนโดเมนความถี่ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่สนใจมาหาค่าถ่วงน้ำหนัก โดยนำมาคูณกับค่า Frequency weightings ตามหัวข้อที่ 2.4.3 และรวมเป็นค่าความเร่งประสิทธิผลรวมดังสมการที่ 2-55

$$a_w = \left[ \sum (W_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2-55}$$

เมื่อ

$a_w$  คือ ค่าประสิทธิผลของความเร่งรวมที่คูณด้วยค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักแล้ว ( $m/s^2$ )

$W_i$  คือ ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักที่ความถี่นั้นๆ โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 2-36 และ

รูปที่ 2-37

$a_i$  คือ ค่าประสิทธิผลของความเร่งในความถี่ใดๆ ( $m/s^2$ )

ในกรณีที่มีการคำนวณหลายทิศทางให้รวมค่าความเร่งตามสมการที่ 2-56

$$a_v = (k_w^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)^{\frac{1}{2}} \tag{2-56}$$

โดยที่

$a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$  คือ ค่าประสิทธิผลที่ผ่านการคูณด้วยค่า Frequency weightings

$k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  คือ ค่าคูณที่ถูกกำหนดไว้ในกรณีของท่าทางกำหนดค่า k ต่างๆไว้ดังนี้

- แกน x บริเวณที่นิ่ง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_d$  และค่าคูณ  $k = 1$   
 แกน y บริเวณที่นิ่ง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_d$  และค่าคูณ  $k = 1$   
 แกน z บริเวณที่นิ่ง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  และค่าคูณ  $k = 1$   
 แกน  $r_x$  บริเวณที่นิ่ง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_e$  และค่าคูณ  $k = 0.63 \text{ m/rad}$   
 แกน  $r_y$  บริเวณที่นิ่ง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_e$  และค่าคูณ  $k = 0.4 \text{ m/rad}$   
 แกน  $r_z$  บริเวณที่นิ่ง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_e$  และค่าคูณ  $k = 0.2 \text{ m/rad}$   
 แกน x บริเวณที่พนักพิง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_d$  และค่าคูณ  $k = 0.8$   
 แกน y บริเวณที่พนักพิง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_d$  และค่าคูณ  $k = 0.5$   
 แกน z บริเวณที่พนักพิง ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  และค่าคูณ  $k = 0.4$   
 แกน x บริเวณที่เท้า ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  และค่าคูณ  $k = 0.25$   
 แกน y บริเวณที่เท้า ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  และค่าคูณ  $k = 0.25$   
 แกน z บริเวณที่เท้า ใช้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  และค่าคูณ  $k = 0.4$

นำค่า  $a_v$  ที่ได้มาประเมินความสะดวกสบายจากการขับที่ต่อไป ขนาดของความเร่งที่กล่าวมานี้สามารถให้นิยามความสะดวกสบายจากการขับที่ดังต่อไปนี้

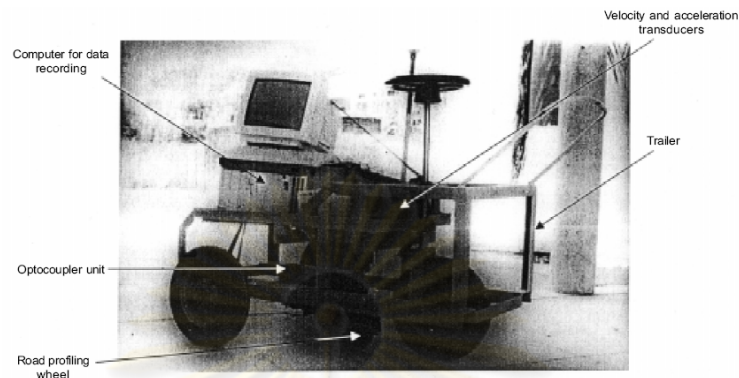
น้อยกว่า $0.315 \text{ m/s}^2$	อยู่ในระดับ สะดวกสบาย
$0.315 \text{ m/s}^2$ ถึง $0.63 \text{ m/s}^2$	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายเล็กน้อย
$0.5 \text{ m/s}^2$ ถึง $0.1 \text{ m/s}^2$	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้
$0.8 \text{ m/s}^2$ ถึง $1.6 \text{ m/s}^2$	ไม่สะดวกสบาย
$1.25 \text{ m/s}^2$ ถึง $2.5 \text{ m/s}^2$	ไม่สะดวกสบายมาก
มากกว่า $2 \text{ m/s}^2$	ไม่สะดวกสบายรุนแรง

## 2.5 ทบทวนวรรณกรรม

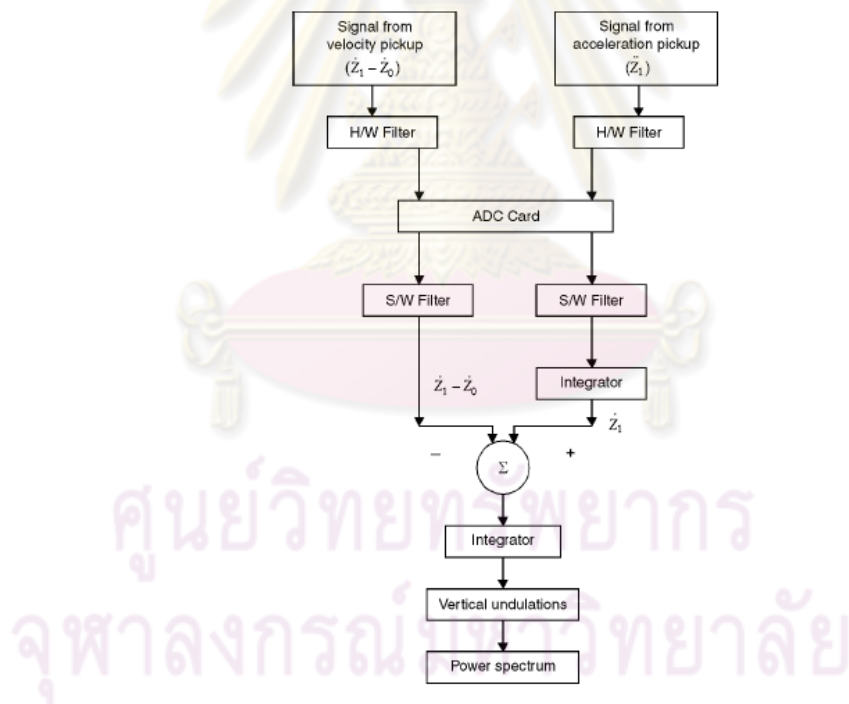
จากที่ได้ศึกษา มีวิจัยที่ศึกษาทางด้านการวัดลักษณะถนนและศึกษาทางด้านความสะดวกสบายขณะการขับที่ดังนี้

ในปี 2004 K Ramji [11] และคณะได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์วัดลักษณะถนนที่มีชื่อว่า Road Profilometer ดังรูปที่ 2-38 ซึ่งมีหลักการคล้ายกับ Inertial Profiler ในหัวข้อที่ 2.3.3 ซึ่งประกอบด้วยล้อ 3 ล้อ ล้อตรงกลางเป็นล้อยางตันแข็งสำหรับวัดลักษณะของถนนซึ่งจะติดกับถนนตลอดเวลาด้วยสปริง ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วสัมพัทธ์เพื่อวัดการเคลื่อนที่ระหว่างล้อตรงกลางและโครงสร้าง และมีการติดตั้ง accelerometer เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในแนวตั้ง จากนั้นนำความเร่งที่ได้มาทำปฏิยานุพันธ์เป็นความเร็ว และนำไปลบออกจากสัญญาณที่ได้จาก

อุปกรณ์วัดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างกับล้อตรงกลางค่าที่ได้จะเป็นความเร็วของล้อตรงกลางซึ่งจะนำมาทำปฏิกิริยาอนุพันธ์ต่อไป เป็นการกระจัดของล้อตรงกลางจากนั้นนำมาคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัด ดังแผนภูมิในรูปที่ 2-39



รูปที่ 2-38 อุปกรณ์และการติดตั้งของ Road profilometer [11]



รูปที่ 2-39 แผนภูมิแสดงการคำนวณของ Road profilometer [11]

ในปี 2006 Peter Andren [12] ได้มีการเปรียบเทียบผลการค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนในแบบต่างๆ ที่เคยมีการอ้างอิงถึงตารางที่ 2-7 เพื่อดูว่าสมการใดมีความใกล้เคียงกับถนนจริงในสวีเดนมากที่สุด ซึ่งพบว่าสมการลักษณะถนนที่ใกล้เคียงในถนนใน

ประเทศสวีเดนมากที่สุดมี 4 อันดับ โดยพิจารณาจากความผิดพลาดเมื่อวัดเทียบกับถนนจริง สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด คือ สมการแบบ Two Split รองลงมา คือ สมการแบบ BSI(1972), Sayers และ ISO 8608(1995-09-01)

ตารางที่ 2-7 สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนในแบบต่างๆ [12]

Name	PSD approximation	Wavenumber
ISO (1995-09-01)	$G_d(n) = Cn^{-w}$	$0 \leq n \leq \infty$
BSI (1972)	$G_d(n) = \begin{cases} Cn^{-w_1} \\ Cn^{-w_2} \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_0$ $n_0 \leq n \leq \infty$
Two Split	$G_d(n) = \begin{cases} Cn^{-w_1} \\ Cn^{-w_2} \\ Cn^{-w_3} \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_1$ $n_1 \leq n \leq n_2$ $n_2 \leq n \leq \infty$
Sayers (1986)	$G_d(n) = C_1/n^4 + C_2/n^2 + C_3$	$0 \leq n \leq \infty$
Gillespie (1985)	$G_d(n) = C(1 + (0.066/n)^2)/n^2$	$0 \leq n \leq \infty$
Marcondes et al. (1991)	$G_d(n) = \begin{cases} C_1 \exp(-kn^p) \\ C_2(n - n_0)^q \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_0$ $n_0 \leq n \leq \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C}{\alpha^2 + n^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Macvean (1980)	$G_d(n) = \frac{C}{(\alpha^2 + n^2)^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C(n^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{(n^2 + \alpha^2 + \beta^2)^2 + 4n^2\alpha^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Xu et al. (1992)	$G_d(n) = A/2a \exp(-n^2/(2a^2))$	$0 \leq n \leq \infty$
Kozin and Bogdanoff (1961)	$G_d(n) = A/a \exp(-n^2/a^2)$	$0 \leq n \leq \infty$

ในปี 2004 P.S. Els [13] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบมาตรฐานต่างๆเกี่ยวกับความ สะดวกสบายจากการขับขี่ เพื่อศึกษาว่ามาตรฐานใดมีความเหมาะสมมากที่สุดในการขับขี่ บนรถออฟโรด และหาค่าความสัมพันธ์ของแต่ละมาตรฐาน โดยมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบก็คือ ISO 2631-1 VDI 2057 BS 6841 และ Average absorbed power สำหรับรถที่ใช้ในการทดลองนี้ จะใช้รถหุ้มเกราะลำเลียงพลของทหาร โดยคัดอาสาสมัครนั่งตำแหน่งต่างๆ ของตัวรถและให้ทำ แบบสอบถามเกี่ยวกับความรู้สึกขณะนั่ง โดยมีการวัดความเร่งที่เข้าสู่ตัวผู้โดยสารควบคู่กันไปด้วย จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดความเร่งเข้าสู่กระบวนการตามมาตรฐาน 4 มาตรฐาน ได้แก่ ISO 2631-1, VDI 2057, BS 6841 และ Average absorbed power เพื่อประเมินความ สะดวกสบาย ขณะขับขี่และเปรียบเทียบกับแบบสอบถามของอาสาสมัคร ผลจากการทดลองพบว่ามาตรฐานทั้ง

4 มาตรฐานต่างมีความเหมาะสมในการประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ได้ใกล้เคียงกัน และทิศทางความเร่งที่ส่งผลต่อผู้โดยสารมากที่สุด คือ ทิศในแนวตั้ง อีกทั้งพบว่าในกรณีที่ขับขึ้นบน รถออฟโรดค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักแต่ละมาตรฐานมีผลน้อยในการประเมินความ สะดวกสบายจากการขับขี่

ในปี 2006 P.E. Uys [14] และคณะ ได้มีงานวิจัยศึกษาผลกระทบของระบบรองรับกับ ความสะดวกสบายขณะขับขี่ของรถออฟโรด ที่มีความขรุขระและความเร็วในการวิ่งต่างๆกัน โดยใช้รถ Land Rover Defender 110 (1992 model) และใช้ระบบรองรับแบบ semi-active hydro-pneumatic spring dumper ในการปรับค่าตัวแปรของระบบรองรับ ส่วนการเปลี่ยนค่าความ ขรุขระของถนนนั้นทำได้โดยเลือกวิ่งบนถนนที่มีวัสดุต่างกัน ดังต่อไปนี้ Belgian paving Measured, ถนนที่มีกรวดเป็นส่วนผสม, หญ้า, พื้นที่มีการไถพรวน, ถนนแบบลูมในสนาม ทดสอบ และ ความเร็วในการวิ่งอยู่ที่ 0 – 60 km/h พบว่า การปรับค่าตัวแปรของระบบรองรับให้มีความ สะดวกสบายมากที่สุดจะส่งผลให้เกิดความสะดวกสบายมากขึ้น ด้วยที่ตัวแปรถนนเดียวกัน แต่ที่ความเร็วรถต่างออกไป และยังส่งผลให้เกิดความสะดวกสบายมากขึ้น ด้วยหากมีการเปลี่ยน ค่าความขรุขระของถนน ถึงแม้จะไม่ส่งผลมากเท่ากับการเปลี่ยนความเร็วแต่ถนนเดียวกัน อีกทั้ง พบว่าผลของระบบรองรับด้านหลังมีผลต่อความสะดวกสบายจากการขับขี่ของผู้ขับและผู้โดยสาร รวมกัน มากกว่าระบบรองรับด้านหน้า

ในปี 2006 P.S. Els [15] และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของความสะดวกสบายของการขับขี่ ควบคู่กับผลของควบคุมการขับขี่ของรถออฟโรด โดยมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรของระบบรองรับเพื่อ ศึกษาผลด้วย โดยความสะดวกสบายจากการขับขี้นั้นจะใช้ค่าประสิทธิผลของความเร่งในแนวตั้ง ของผู้โดยสารเป็นเกณฑ์ชี้วัด ส่วนในเรื่องของการควบคุมการขับขี่(handling) ใช้ดัชนีชี้วัดเป็นมุม การโคลง (Roll angle) ของตัวรถเป็นเกณฑ์ ผลการทดลองพบว่าการปรับตัวแปรของระบบรองรับ ให้มีความสะดวกสบายขึ้นจะทำให้การควบคุมการขับขี่ไม่ดีและเช่นเดียวกันหากออกแบบให้มีการ ควบคุมการขับขี่ที่ดีก็จะให้ผลของความสะดวกสบายไม่ดี

ในปี 2006 Alberto Duria [16] และคณะ ได้นำวิธีการประเมินความสะดวกสบายมาใช้ใน รถจักรยานยนต์ โดยใช้มาตรฐาน ISO 2631-1 มาใช้ประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ โดยใช้วิธีการจำลองการขับขี่ และมีการเปลี่ยนตัวแปรของระบบรองรับเพื่อให้ได้ค่าที่มีการ สั่นสะเทือนเข้าสู่ตัวมนุษย์น้อยที่สุด พบว่า ในกรณีของรถจักรยานยนต์ที่มีการกำหนดค่าความแข็ง สปริงของระบบรองรับด้านหน้าและระบบรองรับด้านหลังตามมาตรฐานเดิมก่อนการปรับปรุง คือ มีค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับเท่ากับ 17650 และ 16000 N/m ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับหน้าจะส่งผลต่อความสะดวกสบายจากการขับขี่



มากกว่าผลของสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับหลัง และทำการปรับปรุงโดยลดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับหน้าลง จะทำให้มีความสะดวกสบายจากการขับขี่มากขึ้น

ส่วนในกรณีที่มีการกำหนดสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับหน้าและระบบรองรับหลังตามมาตรฐานเดิมก่อนการปรับปรุง คือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับหน้าและระบบรองรับเท่ากับ 750 N-s/m และ 1350 N-s/m ตามลำดับ พบว่าหากมีการลดค่าความแข็งสปริงระบบรองรับด้านหน้าลงจะทำให้มีความสะดวกสบายจากการขับขี่มากขึ้น ส่วนค่าความแข็งสปริงระบบรองรับด้านหลังมีค่าเหมาะสมอยู่แล้ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ภาพรวมและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ภาพรวมในการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานไว้ดังรูปที่ 3-1 โดยเริ่มจากการศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งาน รวมถึงศึกษาคุณสมบัติของระบบรองรับ เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยและตัวแปรที่ต้องควบคุมในแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริงมากที่สุด จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองของรถกอล์ฟสำหรับใช้ในการศึกษา และหาข้อมูลของลักษณะถนนที่เป็นตัวแทนลักษณะสภาพถนนของสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล เพื่อกำหนดเป็นข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับ ขั้นตอนต่อไป คือ การจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับที่ได้มาให้กับแบบจำลองรถกอล์ฟ นำข้อมูลความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้มาวิเคราะห์และประเมินระดับของความสะดวกสบายโดยใช้มาตรฐาน ISO 2631-1 ทำการทวนสอบแบบจำลองรถกอล์ฟกับการขับที่จริงบนถนนในสนามกอล์ฟ และสาธิตการประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบรองรับ ต่อไป



รูปที่ 3-1 แผนภูมิขั้นตอนการทำงานวิจัย

### 3.2 รายละเอียดแต่ละขั้นตอนโดยสังเขป

#### 3.2.1 การศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งาน และคุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ

ในการวิจัยจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการทำงานของรถกอล์ฟ เพื่อให้รู้ถึงปัจจัยและตัวแปรที่ต้องควบคุมให้เหมือนในสภาพการทำงานจริงเพื่อใช้ในงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป อันได้แก่ ลักษณะและประเภทของระบบรองรับ ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวของรถกอล์ฟ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรด้านลักษณะการใช้งานรถกอล์ฟ ได้แก่ ความเร็ว น้ำหนัก และการกระจายของน้ำหนัก ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้ได้มาจากการสังเกตการใช้งานจริงของรถกอล์ฟในสนามกอล์ฟ

ในด้านการศึกษาคูสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ เพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองรถกอล์ฟในขั้นตอนถัดไป ทำได้โดยหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

- ค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง หาได้โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงที่ทำให้ยางยุบตัวกับระยะยุบตัวของยาง
- ค่าความแข็งสปริงของแหนบ หาได้โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงที่ทำให้แหนบยุบตัวกับระยะยุบตัวของแหนบ
- มวลสปริงไม่ได้อรับ ทำโดยการชั่งมวลในส่วนที่อยู่ใต้ระบบสปริง
- มวลสปริงรองรับ หาได้จากการนำน้ำหนักของมวลทั้งหมดที่ได้จากการชั่งลบด้วยมวลสปริงไม่ได้อรับ
- ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน(Shock Absorber) ทำได้โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงกดที่กระทำต่อ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน
- ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของยางในที่นี้ไม่ได้มีการศึกษา เพราะถือว่าส่งผลต่อการศึกษาน้อยมากเมื่อเทียบกับ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน
- ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ เนื่องจากความหน่วงที่เกิดขึ้นในระบบรองรับนั้นไม่จำเป็นต้องมาจาก ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน เพียงอย่างเดียวและเพื่อให้ผลการจำลองมีความแม่นยำจึงต้องศึกษาถึงตัวแปรนี้ด้วยโดยใช้วิธี การลดลงแบบลอกการิทึม

### 3.2.2 การสร้างแบบจำลองรถกอล์ฟด้วยแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่

ในการศึกษาระดับความสะดวกสบายจากการขับขี่ จะต้องคำนวณการเคลื่อนที่ของตัวผู้โดยสาร ซึ่งคิดเป็นส่วนหนึ่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่เกิดขึ้น เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ จึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือนมาช่วยในการคำนวณ

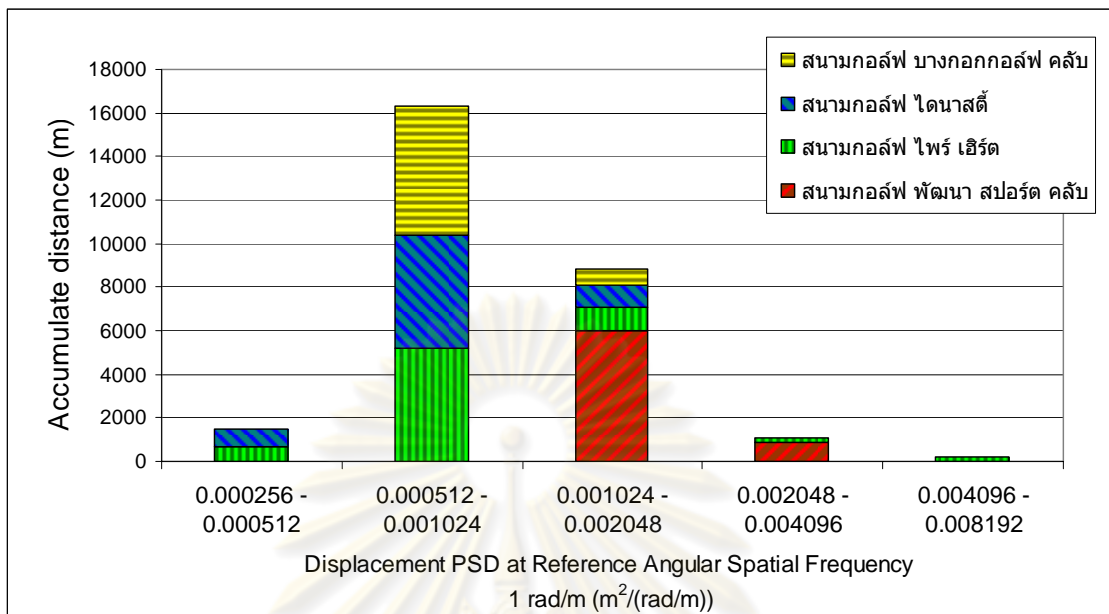
แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ คือ แบบจำลองรถชนิดหนึ่งในสี่ซึ่งเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของมวลมุมใดมุมหนึ่งในตัวรถ มีข้อดี คือ ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน เป็นที่นิยมในงานวิจัยชิ้นอื่นๆ ในลักษณะเดียวกัน และเนื่องจากใช้สมการการเคลื่อนที่เพียง 2 สมการในการสร้างแบบจำลอง จึงสามารถนำตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.1 มาสร้างแบบจำลองได้ทันที

### 3.2.3 การจำลองถนนที่เป็นตัวแทนจากสนามกอล์ฟในกรุงเทพฯและปริมณฑล เพื่อใช้กำหนดลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับ

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ ลักษณะถนนเป็นข้อมูลหนึ่งที่จะต้องนำมาใช้คำนวณในแบบจำลอง ดังนั้นการมีแบบจำลองถนนที่เป็นตัวแทนของถนนในสนามกอล์ฟจะทำให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกกลุ่มสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลมาเป็นกลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลลักษณะถนน

การเก็บข้อมูลลักษณะถนนใช้วิธีและอุปกรณ์ที่เรียกว่า Rolling Straightedge โดยใช้ Accelerometer สำหรับวัดการเคลื่อนที่ตำแหน่งของล้อตรงกลางของ Rolling Straightedge ในการวัดลักษณะของถนน และก่อนจะทำการวัดจริงได้ทำการสอบเทียบกับระดับน้ำซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานเพื่อหาค่าสอบเทียบ (Calibration Factor) เพื่อนำมาคูณกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการ Rolling Straightedge ให้เทียบเท่ากับวิธีมาตรฐาน

วิธีเก็บข้อมูลจะแบ่งถนนเส้นที่วัดออกเป็นช่วงๆ ตามวัสดุที่ใช้ทำถนน ลูกคลื่น หรือเนินที่พบจากนั้นจึงวัดลักษณะถนนช่วงต่างๆ ตามที่แบ่งไว้ข้างต้น ผลลัพธ์จากการวัดจะเข้าสู่กระบวนการใน ISO 8608 เพื่อเปลี่ยนค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปสมการมาตรฐานของถนน จากนั้นทำการแจกแจงความถี่ตามค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิงของสมการมาตรฐานของถนนที่ได้ตามระยะทางที่พบดังตัวอย่างในรูปที่ 3-2 ค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิงของสมการมาตรฐานของถนนที่พบบ่อยที่สุดจะถูกนำไปสร้างสมการมาตรฐานของถนนเป็นตัวแทนของสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลต่อไป สมการที่ได้จะนำมาจำลองเป็นลักษณะถนนที่มีความยาว 100 m เพื่อกำหนดเป็นข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับ แสดงในรูปแบบความสูง ณ จุดต่างๆ เทียบกับระยะทาง ซึ่งจะใช้ในการศึกษาและประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ รายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทที่ 6



รูปที่ 3-2 ตัวอย่างแผนภูมิการแจกแจงข้อมูลเพื่อหาค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิงของถนนที่พบบ่อยที่สุดเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการออกแบบลักษณะถนนจำลอง

### 3.2.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับที่ได้มาใช้กับแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งโนลีสี่

การเคลื่อนที่ของผู้โดยสารบนรถกอล์ฟ ซึ่งคิดเป็นส่วนหนึ่งของมวลส่วนสปริงรองรับนั้น เป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความสะดวกสบายจากการขับขี่ ดังนั้น จึงต้องจำลองการเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับเพื่อหาค่าความเร่งที่เกิดขึ้นบนแกนเวลา โดยใช้โปรแกรม MATLAB & SIMULINK คำนวณการเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับ โดยนำข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับที่ได้ มาจำลองการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 100 m ในแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งโนลีสี่ที่เตรียมไว้

### 3.2.5 การประเมินระดับความสะดวกสบายจากการขับขี่และการวิเคราะห์ผลที่ได้

ความสะดวกสบายจากการขับขี่เป็นปัจจัยที่สำคัญในการวัดคุณภาพของระบบรองรับ จึงต้องมีเกณฑ์การประเมินที่เป็นมาตรฐาน โดยเลือกใช้มาตรฐาน ISO 2631-1 ประเมินระดับความสะดวกสบายจากการขับขี่ จากการแปลงข้อมูลความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ แล้วจึงให้ค่าน้ำหนัก (Weighting factor) แต่ละความถี่ เพื่อนำมาหาผลรวมของค่าประสิทธิภาพของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ถ่วงน้ำหนักแล้ว ซึ่งแสดงถึงระดับความสะดวกสบายของผู้ขับขี่ตามคำแนะนำของมาตรฐาน ISO 2631-1



### 3.2.6 การทวนสอบแบบจำลองรถกอล์ฟด้วยการขับขี่รถกอล์ฟจริงและสถิติการ ประยุกต์ใช้งานข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับและ แบบจำลองรถกอล์ฟ

หลังจากที่ได้แบบจำลองที่ใช้ประเมินระดับความสะดวกสบายของผู้ขับขี่รถกอล์ฟแล้ว จึงมีการทวนสอบแบบจำลองของรถกอล์ฟที่ใช้ โดยการประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่รถกอล์ฟจริง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในนี้มีความถูกต้อง ภายในเงื่อนไขสภาวะการขับขี่เดียวกัน โดยการติด Accelerometer บนมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟ เพื่อศึกษาผลของความเร่งที่เกิดขึ้นในการแล่นบนถนนจริง จากนั้นแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่และให้ค่าน้ำหนักแต่ละความถี่ ตามข้อแนะนำในมาตรฐาน ISO 2631-1 เพื่อประเมินความระดับสะดวกสบายขณะขับขี่ เปรียบเทียบกับผลของการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองรถกอล์ฟ

ในส่วนของการสถิติการประยุกต์ใช้งานข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับและแบบจำลองรถกอล์ฟ จะสถิติการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ทำให้ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับน้อยที่สุด หรือทำให้ผู้ขับขี่สะดวกสบายมากที่สุด ซึ่งสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ ออกแบบระบบรองรับของรถกอล์ฟได้ต่อไป รายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทที่ 9

## บทที่ 4

### การศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งาน และคุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ

บทนี้กล่าวถึงการศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งาน รวมถึงคุณสมบัติของระบบรองรับของรถกอล์ฟ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณลักษณะของรถกอล์ฟและลักษณะการใช้งาน เพื่อให้เข้าใจสภาพการใช้งาน และออกแบบได้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ส่วนที่สองกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของระบบรองรับเพื่อเป็นตัวแปรในการสร้างแบบจำลองของรถกอล์ฟในบทที่ 5

#### 4.1 การศึกษาลักษณะการใช้งานของรถกอล์ฟ

เนื่องจากการวิจัยจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของรถกอล์ฟที่ใช้กันอยู่ภายในประเทศ จึงเลือกใช้ข้อมูลของรถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของ บริษัท ทีเอส วีอีเคิลเทค ซึ่งเป็นรถกอล์ฟรุ่นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย รถกอล์ฟรุ่นดังกล่าวมีคุณลักษณะดังนี้

- ระบบรองรับด้านหลังเป็นแหนบวางตัวตามยาวอยู่ใต้ชุดเฟืองท้าย มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock absorber) วางตัวเกือบ 90 องศา
- ระบบรองรับด้านหน้าเป็นแหนบวางขวาง และมีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน วางตัว 45 องศา
- ล้อรถกอล์ฟมีค่าความดันลมยางที่ 25 lb/in<sup>2</sup>

เห็นได้ว่าระบบรองรับเป็นแหนบทั้งหน้าและหลัง จึงเหมาะสำหรับการบรรเทาผู้โดยสารหรือใช้งานที่ต้องรับภาระน้ำหนักมาก

ส่วนในด้านลักษณะการใช้งานนั้น โดยทั่วไปแล้วการใช้งานรถกอล์ฟขณะขับจะมีผู้โดยสาร 2 คน นั่งอยู่ด้านหน้า ส่วนถุงกอล์ฟ 2 ถุง และแคดดี้ 2 คนยืนอยู่ด้านหลัง แล่นด้วยความเร็วประมาณ 10 – 27 km/h จึงนำลักษณะการใช้งานดังกล่าวมาใช้ศึกษา

ส่วนที่หนึ่งของคนขับจะอยู่ใกล้กับระบบรองรับด้านหลังดังรูปที่ 4-1 จึงเลือกศึกษาคุณสมบัติของระบบรองรับเฉพาะด้านหลัง เพราะมีผลโดยตรงต่อความสะดวกสบายขณะขับที่



รูปที่ 4-1 รถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของ บริษัท ทีเอส วีเคิลเทค

#### 4.2 การศึกษาคุณสมบัติของระบบรองรับ

จากการศึกษาลักษณะการใช้งานของรถกอล์ฟ พบว่าระบบรองรับด้านหลังมีผลโดยตรงต่อความสะดวกสบายในขณะขับขี่มากที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้ว ระบบรองรับด้านหลังของรถกอล์ฟจะมีตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความสะดวกสบายในการขับขี่ ดังนี้

- 1) ค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง
- 2) ค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับ
- 3) มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับด้านหลัง
- 4) มวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง
- 5) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน
- 6) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อและยาง
- 7) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับกรณีไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

ตัวแปรเหล่านี้จำเป็นต้องหาค่าที่แน่นอนเพื่อใช้กำหนดทิศทางในการออกแบบแบบจำลอง เพื่อให้ได้ผลการประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ที่แม่นยำ วิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆ มีดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การหาค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง

###### 4.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง

###### 4.2.1.1.1 เครื่องทดสอบแรงกดยืดหยุ่น Avery Denison รุ่น 7110CCJ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบหาค่าแรงที่กดต่อระยะยุบตัวของวัสดุแต่ในที่นี้จะนำมาใช้กับยางรถกอล์ฟ ดังรูปที่ 4-2 และรายละเอียดเครื่องมือทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-1



รูปที่ 4-2 การทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของ ล้อและยาง

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดของเครื่องทดสอบแรงกดยี่ห้อ Avery Denison รุ่น 7110CCJ

พิกัดแรงในการกด	0-1500 lb
ความละเอียดในการอ่านค่าแรงในการกด	50 lb
พิกัดระยะยุบตัวที่อ่านค่าได้	0-7 in
ความละเอียดในการอ่านค่าระยะยุบตัว	0.01 in
ขนาดเครื่องทดสอบ(กว้างXยาวXสูง)	900X1800X2000 mm <sup>3</sup>

#### 4.2.1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การหาค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง ทำได้โดยการหาค่าความสัมพันธ์ของแรงกดต่อระยะยุบตัวของยาง โดยมีเงื่อนไขที่ยางต้องมีความดันลมยางเท่ากับ 25 lb/in<sup>2</sup> โดยให้เครื่องทดสอบออกแรงกดที่หน้ายางและวัดระยะยุบตัวของยางด้วยช่วงการทดสอบอยู่ที่ 0 – 1000 lb โดยเพิ่มค่าที่ใช้ทดสอบทีละ 200 lb จึงมีจำนวน 5 จุดทดสอบ ทำการวัดค่าจุดทดสอบแต่ละจุดจำนวน 4 ครั้ง นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกัน ค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยาง จะมีค่าเท่ากับค่าความแข็งสปริงของล้อยาง

#### 4.2.1.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งสปริงของล้อและยางมีค่าเท่ากับ 170000 N/m ซึ่งรายละเอียดวิธีการคำนวณจะแสดงอยู่ใน ภาคผนวก จ.3

## 4.2.2 การหาค่าความแข็งแรงสปริงของระบบรองรับ

### 4.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความแข็งแรงสปริงของແໜບ

#### 4.2.2.1.1 เครื่องทดสอบแรงกด ยี่ห้อ Morita

เป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบหาค่าแรงกดต่อระยะยุบตัวของແໜบมีดังแสดงในรูปที่ 4-3 รายละเอียดเครื่องมือทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-2



รูปที่ 4-3 การทดสอบหาค่าความแข็งแรงสปริงของແໜบ

ตารางที่ 4-2 รายละเอียดของเครื่องทดสอบแรงกด ยี่ห้อ Morita

พิกัดแรงในการกด	0-5000 kg-f
ความละเอียดในการอ่านค่าแรงในการกด	1 kg-f
พิกัดระยะยุบตัวที่อ่านค่าได้	0-200 mm
ความละเอียดในการอ่านค่าระยะยุบตัว	1 mm
ขนาดเครื่องทดสอบ(กว้างXยาวXสูง)	1000X2400X2400 mm <sup>3</sup>

#### 4.2.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการทดสอบเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.2.1.2 ด้วยช่วงการทดสอบอยู่ที่ 0 – 300 kg-f โดยเพิ่มค่าที่ใช้ทดสอบทีละ 20 kg-f จึงมีจำนวน 15 จุดทดสอบ ทำการวัดค่าจุดทดสอบแต่ละจุดจำนวน 5 ครั้ง นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกัน ค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของແໜบ จะมีค่าเท่ากับค่าความแข็งแรงสปริงของແໜบ

#### 4.2.2.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงสปริงของແໜบมีค่าเท่ากับ 33000 N/m รายละเอียดวิธีการคำนวณจะแสดงอยู่ในภาคผนวก จ.3



### 4.2.3 การทดสอบหาค่ามวลสปริงไม่ได้รองรับของระบบรองรับด้านหลัง

#### 4.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่ามวลสปริงไม่ได้รองรับของระบบรองรับด้านหลัง

##### 4.2.3.1.1 ตาชั่งสปริง

ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักมวลสปริงไม่ได้รองรับ ได้แก่ ชุดเฟืองท้าย มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง ล้อและยาง เครื่องชั่งที่ใช้เป็นเครื่องชั่งตรา Trade mark รายละเอียดเครื่องมือทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4-3



รูปที่ 4-4 การชั่งมวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดของตาชั่งสปริง ยี่ห้อ Trade mark

พิกัดน้ำหนัก	0-60 kg
ความละเอียดในการอ่านค่า	0.1 kg
ขนาดพื้นที่แท่นชั่ง	300X300 mm <sup>2</sup>
ขนาดของตาชั่ง(กว้างXยาวXสูง)	300X300X450 mm <sup>3</sup>

#### 4.2.3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ชั่งมวลชิ้นส่วนที่ได้รับแรงจากพื้นถนนโดยตรงโดยไม่ได้ผ่านแหนบ ทำการชั่งมวลแต่ละชิ้นส่วนแล้วนำค่าที่ได้มารวมกันมวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ

#### 4.2.3.3 ผลการทดสอบ

มวลส่วนที่สปริงไม่ได้รองรับประกอบด้วยชุดเฟืองท้าย มอเตอร์ไฟฟ้า และล้อรถกอล์ฟ แต่ ละชิ้นส่วนมีมวลดังนี้

ชุดเฟืองท้ายมีมวล	32 kg
มอเตอร์ไฟฟ้ามีมวล	16 kg
ล้อรถกอล์ฟมวล 6 kg ประกอบด้วย 2 ล้อ มวลรวม	<u>12 kg</u>
ดังนั้น น้ำหนักรวมของส่วนมวลสปริงไม่ได้รองรับแต่ละล้อมีค่าเท่ากับ	<u>30 kg</u>

#### 4.2.4 การหาค่ามวลสปริงรองรับของระบบรองรับด้านหลัง

หามวลสปริงรองรับโดยชั่งน้ำหนักรถกอล์ฟตามลักษณะการใช้งานจริง (ผู้โดยสาร 2 คน แคนดี้ 2 คน และถุงกอล์ฟ 2 ถุง) จากนั้นลบออกด้วยมวลที่ส่วนสปริงไม่ได้รองรับ ซึ่งมวลของรถ กอล์ฟในลักษณะการใช้งานจริงของรถกอล์ฟ ประกอบด้วย

มวลตัวรถพร้อมแบตเตอรี่	380 kg
ผู้โดยสาร 2 คน	120 kg
ถุงกอล์ฟ 2 ถุง	30 kg
แคนดี้ 2 คน	<u>120 kg</u>
น้ำหนักรวมของรถกอล์ฟในลักษณะการใช้งานจริง	<u>650 kg</u>

#### 4.2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่ามวลสปริงรองรับ

##### 4.2.4.1.1 ตาชั่งสปริงแบบวางพื้น

ใช้สำหรับชั่งหามวลของรถกอล์ฟโดยใช้ตาชั่งสปริงแบบวางพื้นยี่ห้อ Mimaki ดังแสดงใน รูปที่ 4-5 และรายละเอียดเครื่องมือทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-4



รูปที่ 4-5 การชั่งมวลรถกอล์ฟเพื่อหาค่ามวลส่วนสปริงรองรับ

ตารางที่ 4-4 รายละเอียดของตาชั่งสปริงวางพื้น ยี่ห้อ Mimaki

พิกัดน้ำหนัก	0-140 kg
ความละเอียดในการอ่านค่า	0.5 kg
ขนาดพื้นที่แท่นชั่ง	275X240 mm <sup>2</sup>
ขนาดของตาชั่ง(กว้างXยาวXสูง)	280X250X70 cm <sup>3</sup>

#### 4.2.4.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ชั่งมวลของรถกอล์ฟตามลักษณะการใช้งานจริง คือ มีผู้โดยสารนั่ง 2 คน และใช้ถุงทรายน้ำหนัก 30 kg จำนวน 5 ถุงไว้ส่วนด้านหลังของรถเพื่อแทนน้ำหนักของแคดดี้ 2 คน และ ถุงกอล์ฟ 2 ถุง มวลที่วัดได้ในแต่ละล้อแสดงถึงผลรวมของมวลสปริงรองรับและมวลสปริงไม่ได้รับรองรับของแต่ละล้อ โดยใช้เครื่องชั่งสปริงแบบวางพื้น ซึ่งในส่วนของล้อหน้าจะใช้เครื่องชั่งสปริงข้างล้อ ส่วนด้านหลังจะใช้เครื่องชั่งสปริง 2 เครื่องต่อหนึ่งล้อเนื่องจากมีมวลมากเกินไปที่ตาชั่งหนึ่งอันจะวัดได้จึงต้องนำเครื่องชั่ง 2 เครื่องมารวมกันวัดโดยนำแผ่นเหล็กกว่าบนเครื่องชั่งทั้งสอง เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำหนักจะกระจายตัวเท่ากันทั้งสองอัน ผลรวมของมวลที่เครื่องชั่งทั้งสองอ่านค่าได้ลบด้วยมวลของแผ่นเหล็กจะมีค่าเท่ากับมวลของรถกอล์ฟที่ตกลงจุดนั้นซึ่งเป็นมวลที่สปริงรองรับ

#### 4.2.4.3 ผลการทดสอบ

ผลการชั่งมวลที่ลงในแต่ละล้อแสดงอยู่ในตารางที่ 4-5 ค่ามวลส่วนสปริงรองรับของระบบรองรับด้านหลังหาได้จากมวลที่ตกลงบนล้อหลัง ลบด้วยมวลที่สปริงไม่ได้รับรองรับ ดังนั้นมวลส่วนสปริงรองรับมีค่า  $237 - 30 = 207$  kg

ตารางที่ 4-5 ผลการชั่งหาค่ามวลที่ตกลงแต่ละล้อขณะทำการวัด

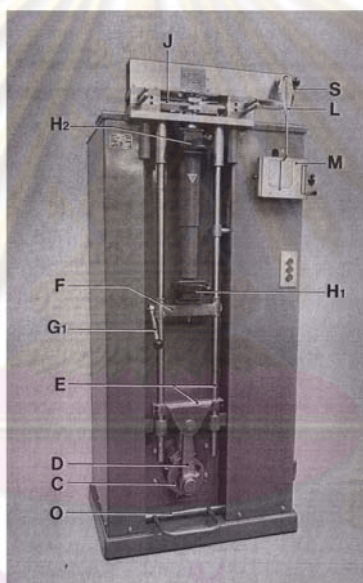
	มวลที่ตกลงบนล้อหน้า	มวลที่ตกลงบนล้อหลัง
กรณีรถเปล่า	70 kg	120 kg
กรณีมีมวลตามลักษณะการใช้งานจริง	88 kg	237 kg

#### 4.2.5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

##### 4.2.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

##### 4.2.5.1.1 เครื่องทดสอบค่าความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน Koni Testing Machine, Model 4423-05

เป็นเครื่องทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงกดที่กระทำต่อตัวหน่วงการสั่นสะเทือน กับความเร็วของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน โดยควบคุมความเร็วให้คงที่แล้วอ่านค่าแรงกด ความเร็วที่ใช้ทดสอบอยู่ที่ 0.22 m/s และ 0.44 m/s ทั้งจิ้งหะยุบตัวและคลายของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน เครื่องทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 4-6 รายละเอียดเครื่องมือทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-6



รูปที่ 4-6 เครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน [18]

ตารางที่ 4-6 รายละเอียดของเครื่องทดสอบแรงกดค่าความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

Koni Testing Machine, Model 4423-05

พิสัยช่วงชักของเครื่องทดสอบ	0 – 100 mm
พิสัยความเร็วในการทดสอบ	0.026-0.880 m/s
พิสัยของแรงกดในการทดสอบ	1000 kg-f
ความละเอียดในการอ่านค่าแรงกด	10 kg-f in
ขนาดของเครื่องทดสอบ(กว้างXยาวXสูง)	900X1800X2300 mm <sup>3</sup>
น้ำหนักเครื่องทดสอบ	1200 kg

#### 4.2.5.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหดและยืดตัวเทียบกับแรงที่กระทำต่อตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงที่กระทำต่อตัวหน่วงการสั่นสะเทือน คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

#### 4.2.5.3 ผลการทดสอบ

ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 3 ตัว ซึ่งทดสอบแล้วได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของ ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน เท่ากับ 445 N-s/m, 612 N-s/m และ 1057 N-s/m ตามลำดับ สามารถดูรายละเอียดวิธีการคำนวณได้ในภาคผนวก จ.1

#### 4.2.6 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อและยาง

งานวิจัยนี้ไม่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อและยาง เนื่องจากปกติมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงอื่น ๆ ของระบบรองรับ [17]

#### 4.2.7 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

เนื่องจากความหน่วงของระบบรองรับไม่ได้มาจากตัวหน่วงการสั่นสะเทือน อย่างเดียวดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับในขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ด้วย ซึ่งในที่นี้จะใช้ทฤษฎีที่เรียกว่า การลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic Decrement) ซึ่งเป็นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจากการวัดขนาดของการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบที่ลดลง ซึ่งทำโดยการทิ้งมวลน้ำหนักประมาณ 30 kg ลงบนที่วางของเหนือระบบรองรับด้านหลังในขณะที่ยอดล้อออกมาแล้ว เพื่อให้ระบบมีระดับขึ้นเสถียรเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจึงเป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่เกิดจากระบบรองรับเท่านั้น และไม่มีผลความหน่วงและค่าความแข็งสปริงของล้อและยางเข้ามาเกี่ยวข้อง



#### 4.2.7.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับโดยไม่มีตัว หน่วงการสั่นสะเทือน

##### 4.2.7.1.1 รถกอล์ฟ

รถกอล์ฟ ที่ใช้งานวิจัยเป็นของ บริษัท ทีเอส วีอีเคิลเทค จำกัด รุ่น Bravo TT-11 ดังรูปที่ 4-1 ความยาวของฐานล้อ 1.8 m ความสูง 2 m ระบบรองรับด้านหลังเป็นแหนบวางตัวตามยาว มีค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับอยู่ที่ 33000 N/m และมีมวลส่วนที่สปริงรองรับขณะไม่มีผู้ขับชั่งอยู่ที่ 90 kg

##### 4.2.7.1.2 Accelerometer

การวัดความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง จะใช้ Accelerometer ของบริษัท Kristler รุ่น K-Beam 8393B10 เป็นชนิด Piezoelectric ลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 3x3x3 cm โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกควอตซ์ ซึ่งจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงมากระทำบนผลึก ประจุที่จ่ายออกมาจะมีค่าแปรตามแรงที่กระทำ หรือ ความเร่งที่เกิดขึ้น ข้อมูลทางเทคนิคดังแสดงในตารางที่ 4-7 สามารถวัดความเร่งได้ 3 แกน และจะถูกนำมาติดไว้ที่โครงสร้างของรถกอล์ฟซึ่งอยู่เหนือ จุดยึดของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ด้านซ้ายของระบบรองรับ ซึ่งเป็นตำแหน่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลทางเทคนิคของ Accelerometer รุ่น K-Beam 8393B10 ยี่ห้อ Kristler

Technical Data	
Type	8393B10
Acceleration Range	$\pm 10$ g
Sensitivity ( $\pm 5\%$ )	200 mv/g
Zero g Output $\pm 30$ mV	0 V
Resolution(Threshold) typ.	2830 $\mu$ g
Resonant Frequency nom.	2.7 kHz
Frequency Response $\pm 5\%$	0-180 Hz
Amplitude Non-linearity	$\pm 0.8$ % FSO
Transverse Sensitivity typ.(max $\pm 3\%$ )	1%
Ground Isolation min,	$> 10^{10}$ $\Omega$
Weight	60 grams

#### 4.2.7.1.3 Data Logger

เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณข้อมูลจากข้อมูลอะนาล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัล Data Logger ที่ใช้เป็น Data Logger 16 Channels ยี่ห้อ Dewetrons รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 สัญญาณที่ได้จะถูกเก็บเข้าคอมพิวเตอร์ต่อไป ภาพ Data Logger แสดงดังรูปที่ 4-8 ส่วนรายละเอียดของเครื่องมือแสดงไว้ในตารางที่ 4-8



รูปที่ 4-8 ภาพแสดง Data Logger และตำแหน่งที่ติดตั้งในรถกอล์ฟ

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลทางเทคนิคของ Data logger รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 ยี่ห้อ

Dewetrons

System specifications	DEWE-BOOK-USB2-DT-16
A/D input channels	16
Slots for DEWE modules	16
Sampling rate	500 kS/s aggregate
A/D resolution standard	16-bit
A/D converter hardware	DT 9834
Power supply	115/230 VAC,50/60 Hz
Dimension(WxDxH)	400x200x140 mm 16.0x7.9x5.5 in
Weight	6 kg (13 lbs)
Supports Microsoft WINDOWS XP operating system and USB interface	

#### 4.2.7.1.4 ถูกราย

ถูกรายใช้ถ่วงน้ำหนักให้รถกอล์ฟมีน้ำหนักตามต้องการ และใช้กระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่แบบอิสระ โดยใช้ถูกราย น้ำหนักถูกละ 30 kg ดังรูปที่ 4-9 (ซ้าย) วางไว้ในส่วนของที่วางของด้านหลังซึ่งปกติจะเป็นที่วางรถกอล์ฟรูปที่ 4-9 (ขวา)

#### 4.2.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการถอดล้อและวางอิฐหนูนกลมล้อให้ล้อมีความสูงเท่าเดิมเพื่อให้ระบบมีระดับชั้นเสริเท่ากับหนึ่ง จากนั้นทำการหึงถูกรายมวล 30 kg ดังรูปที่ 4-9 ลงสู่ที่วางของเหนือระบบรองรับ วัดค่าการลดลงของการสั่นสะเทือนด้วย Accelerometer และ Data Logger จะบันทึกข้อมูลที่ได้เข้าสู่คอมพิวเตอร์ และนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก จ.4) ทำการทดสอบ 3 ชุดการทดสอบด้วยกันทดสอบชุดละ 3 ครั้ง ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ค่าความแข็งสปริงของระบบมีค่า 33000 N/m มวลของระบบ 135 kg

ชุดการทดลองที่ 2 ค่าความแข็งสปริงของระบบมีค่า 33000 N/m มวลของระบบ 150 kg

ชุดการทดลองที่ 3 ค่าความแข็งสปริงของระบบมีค่า 33000 N/m มวลของระบบ 165 kg

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่คำนวณได้ในชุดที่ 1-3 จะนำมาเฉลี่ยกันจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยซึ่งจะนำค่าที่ได้นี้ไปอ้างอิงต่อไป



รูปที่ 4-9 ถุงทรายที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสั่นแบบอิสระ (ซ้าย)

ตำแหน่งการตั้งถุงทรายเพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ระบบรองรับ (ขวา)

#### 4.2.7.3 ผลการทดสอบ

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับในกรณีที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ที่ได้จากการทดลองในข้างต้นมีค่าเท่ากับ  $285.16 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$  จะถูกนำมารวมกันกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบสามารถดูได้จากภาคผนวก จ.4

#### 4.3 สรุปค่าตัวแปรของคุณสมบัติระบบรองรับ

สรุปค่าของตัวแปรต่างๆ ของระบบรองรับที่มีผลต่อการขับขี่ได้ดังตารางที่ 4-3 ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้จะนำไปใช้ในการออกแบบแบบจำลองของรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ต่อไป

ตารางที่ 4-9 สรุปค่าตัวแปรของคุณสมบัติระบบรองรับของรถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของ บริษัท ทีเอส วีอีเคิลเทค

ตัวแปรของคุณสมบัติระบบรองรับ	ค่าที่วัดได้
1. ค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง ( $k_1$ )	170000 N/m
2. ค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับ ( $k_2$ )	33000 N/m
3. มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับด้านหลัง ( $m_1$ )	30 kg
4. มวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง ( $m_2$ )	207 kg
5. ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน	445, 612, และ 1057 N·s/m
6. ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อและยาง ( $c_1$ )	มีค่าน้อยมาก ( $\sim 0 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ )
7. ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับกรณีไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน	285.16 N·s/m

## บทที่ 5

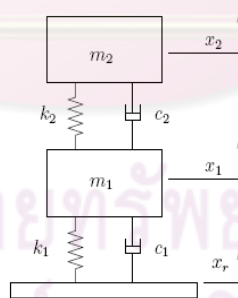
### แบบจำลองรถกอล์ฟด้วยแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่

#### 5.1 ความหมายและนิยามของแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่

แบบจำลองของรถกอล์ฟที่ใช้ในการศึกษา ในที่นี้จะใช้แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่เป็นแบบจำลองรถยนต์ที่พิจารณาการเคลื่อนที่เพียงมุมหนึ่งในสี่มุมของตัวรถ เป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดเนื่องจากมีระดับขั้นเสรีเท่ากับ 2 ซึ่งง่ายต่อการคำนวณ เพราะประกอบด้วยสมการการเคลื่อนที่เพียง 2 สมการ แต่มีข้อด้อยตรงที่ไม่สามารถศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของรถที่มีต่อความสะดวกสบายของผู้โดยสารได้

แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่จะกำหนดให้มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับมีมวลเท่ากับ  $m_1$  ซึ่งประกอบด้วยมวลของล้อ เพลา และมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบการทำงานของยางเสมือนมีสปริงและตัวหน่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งของสปริง และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงเท่ากับ  $k_1$  และ  $c_1$  ตามลำดับ จากนั้นจำลองให้แรงกระทำเนื่องจากมวลส่วนสปริงรองรับมีค่าเท่ากับ  $m_2$  ซึ่งประกอบด้วยมวลของตัวถังรถ ผู้โดยสาร และรถกอล์ฟ โดยเปรียบเทียบการทำงานของระบบรองรับของรถกอล์ฟเสมือนการมีสปริงและตัวหน่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งของสปริง และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงเท่ากับ  $k_2$  และ  $c_2$  ตามลำดับ ดังแสดงด้วยแบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรองรับดังรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรองรับด้วยแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่



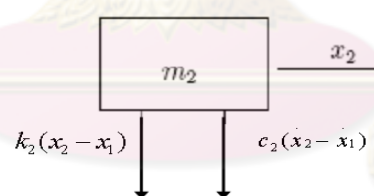
## 5.2 สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ในงานวิจัย

ในการสร้างแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่มีการตั้งสมมติฐานเพื่อใช้ในการคำนวณ ดังนี้

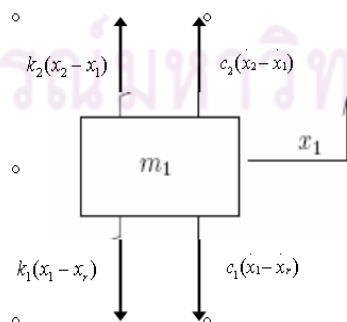
1. เบาะและที่นั่งเป็นวัตถุแข็งเกร็งไม่มีการยุบตัว
2. ระบบรองรับด้านหน้าและหลังเป็นอิสระออกจากกันในขณะที่มีผู้โดยสารขับขี
3. ไม่สนใจการเอียงของรถยนต์ โดยถือว่าแกนอ้างอิงถูกตั้งในแนวตั้งเสมอ
4. ไม่สนใจผลของแรงโน้มถ่วงของโลก
5. ไม่คิดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของยางเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ
6. ไม่มีการสูญเสียของพลังงานของระบบเนื่องจากความร้อนจากการเสียดสี
7. ผู้โดยสารถือเป็นมวลเดียวกับมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง

## 5.3 สมการการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลองรถชนิดหนึ่งในสี่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $m_2$ ) และมวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ ( $m_1$ ) สามารถพิจารณาได้จากการเขียน Free Body Diagram ของมวล  $m_2$  และ  $m_1$  ดังรูปที่ 5-2 และ รูปที่ 5-3 ตามลำดับดังต่อไปนี้



รูปที่ 5-2 Free Body Diagram ของมวล  $m_2$



รูปที่ 5-3 Free Body Diagram ของมวล  $m_1$

จาก Free Body Diagram ในรูปที่ 5-2 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมวล  $m_2$  ได้ดังนี้

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (5-1)$$

จาก Free Body Diagram ในรูปที่ 5-3 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมวล  $m_1$  ได้ดังนี้

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1(x_1 - x_r) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_r) \quad (5-2)$$

ซึ่งจากสมการที่ 5-1 และ 5-2 สามารถเขียนเป็น State Space Equation ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ x_1 - x_2 \\ x_r - x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & 0 \\ \frac{c_2}{m_1} & -\frac{(c_1+c_2)}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ x_1 - x_2 \\ x_r - x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c_1}{m_1} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ x_r \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

โดยที่ค่า

$x_1$  คือ การกระจัดของมวล  $m_1$  (m)

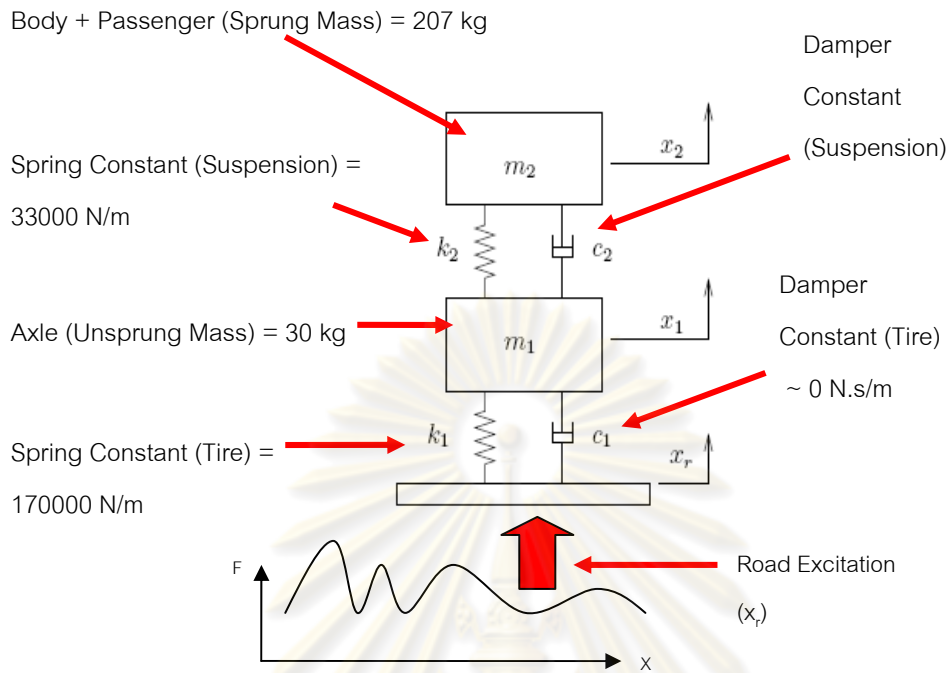
$x_2$  คือ การกระจัดของมวล  $m_2$  (m)

$x_r$  คือ การกระจัดของถนน (การกระจัดขึ้นจากถนน) (m)

เนื่องจากจุดประสงค์ของสร้างแบบจำลอง คือ ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่และแรงที่กระทำต่อผู้โดยสารซึ่งอยู่ติดกับมวลส่วนสปริงรองรับ ดังนั้นตัวแปรสำคัญในการศึกษาคั้งนี้ จึงพิจารณาเลือก  $\ddot{x}_2$  ซึ่งเป็นความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับเป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณาความสะดวกสบาย เนื่องจากตัวแปร  $\ddot{x}_2$  สื่อถึงแรงที่กระทำต่อผู้โดยสารได้

#### 5.4 ปัจจัยและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

จาก State Space Equation ของแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ที่ได้ มีตัวแปรต้น คือ การกระจัดขึ้นจากถนน หรือ Road Excitation ( $x_r$ ) ส่วนตัวแปรตาม คือ ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $\ddot{x}_2$ ) ส่วนตัวแปรควบคุมได้แก่ มวลส่วนสปริงรองรับ ( $m_2$ ) มวลส่วนสปริงไม่ได้อรองรับ ( $m_1$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของยาง ( $c_1$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) ซึ่งเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน(Shock Absorber) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงในกรณีที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ค่าความแข็งสปริงของล้อและยาง ( $k_1$ ) ค่าความแข็งของสปริงของระบบรองรับ ( $k_2$ ) และจากข้อมูลในบทที่ 4 จะสามารถกำหนดตัวแปรต่างๆในการศึกษาได้ดังรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ (Quarter Car Model) ของรถกอล์ฟที่จะนำมาใช้ในการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การจำลองถนนที่เป็นตัวแทนจากสนามกอล์ฟในกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล เพื่อใช้กำหนดลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับ

จากบทที่ 3 ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ คือ การกำหนดข้อมูลแบบจำลองถนน ดังนั้นในบทนี้จึงได้กล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับที่มาและการสร้างแบบจำลองถนนที่เป็นตัวแทนจากสนามกอล์ฟในกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกกล่าวถึงลักษณะถนนและรูปแบบการวัดเพื่อให้เข้าใจขอบเขตของการวิจัย ส่วนที่สองกล่าวถึงการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟเพื่อบอกถึงอุปกรณ์ที่ใช้ รวมทั้งขั้นตอนวิธีในการเก็บค่าและรวบรวมเป็นข้อมูลทางสถิติ จากนั้นจึงเลือกค่าฐานนิยมของข้อมูลมาเพื่อกำหนดสมการของลักษณะถนนที่ใช้เป็นตัวแทนของสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล และส่วนสุดท้าย คือ การกำหนดข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบ จากข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟจริงเพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่

#### 6.1 ลักษณะถนนและรูปแบบการวัด

ในการวัดลักษณะถนนนั้นจะศึกษาคลื่นถนนตามแนวยาว ไม่ได้ศึกษาผลของคลื่นถนนตามแนวขวาง การวัดลักษณะถนนในงานวิจัยนี้ยึดถือตามสมการลักษณะถนนตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ISO 8608 ดังสมการที่ 6-1

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \cdot (\Omega/\Omega_0)^{-w} \quad (6-1)$$

โดยที่

$G_d(\Omega)$  คือ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางของคลื่นถนน ( $m^2/\text{rad}/m$ )

$\Omega_0$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง (Angular spatial frequency) มีค่าเท่ากับ 1 rad/m

$w$  คือ ค่ากำลังในสมการ เป็นอัตราส่วนของขนาดคลื่นความถี่ต่ำต่อคลื่นความถี่สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ISO 8608

ในการวัดลักษณะถนนในครั้งนี้ใช้วิธีการ Rolling Straightedge เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่จัดทำได้ง่ายรูปแบบโครงสร้างไม่ซับซ้อน ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดมากใช้เพียงแค่อุปกรณ์การวัด (sensor) เพียงตัวเดียว และเนื่องจากเป็นวิธีการวัดนี้ที่ไม่ได้เป็นแบบ Static method กล่าวคือ อุปกรณ์จะเคลื่อนที่ไปด้วยขณะทำการวัดจึงช่วยประหยัดระยะเวลาในการวัด จะเห็นได้ว่ามีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยวิธีการดังกล่าวนี้ มุ่งเน้นการวัดสัญญาณในโดเมน

ความถี่เชิงมุม ผลลัพธ์ที่ได้จึงอยู่ในรูปสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ( $G_d(\Omega)$ ) ซึ่งต้องมีการจำลองถนนจากสมการนี้บนโดเมนระยะทางเพื่อการใช้งานต่อไป

อุปกรณ์ Rolling Straightedge จะถูกติดกับรถกอล์ฟให้มีความเร็วเท่ากับรถกอล์ฟ ในขณะที่ทำการวัด ในการวัดครั้งนี้มีการดัดแปลงเล็กน้อยจากวิธีดั้งเดิม คือ จะใช้ Accelerometer วัดการเคลื่อนที่ของล้อตรงกลางของ Rolling Straightedge (รายละเอียดกล่าวไว้ในอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย) แทนที่จะเป็นอุปกรณ์วัดสำหรับวัดการกระจัด (Displacement Sensor) ผลลัพธ์จะอยู่ในรูปสัญญาณความเร่งบนโดเมนเวลา ( $\ddot{h}(t)$ ) และสามารถแปลงเป็นสัญญาณความเร่งบนโดเมนความถี่ ( $\hat{h}(f)$ ) จากนั้นแปลงให้อยู่ในรูปความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกฟังก์ชัน

$$h = \hat{h} \sin(\omega t) , \quad \ddot{h} = -\omega^2 \hat{h} \sin(\omega t) = \hat{h} \sin(\omega t)$$

ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังมีค่าเท่ากับค่ากำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณต่อ

ช่วงกว้างความถี่ [3] (ค่ากำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณรูปไซน์  $= \frac{\text{Amplitude}^2}{2}$ ) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$G_a(\omega) = \frac{\text{Amplitude}^2}{2 \times \text{bandwidth}} = \frac{\omega^4 \hat{h}}{2 \times \text{bandwidth}} = \frac{\hat{h}}{2 \times \text{bandwidth}} \quad (6-2)$$

$$G_d(\omega) = \frac{\text{Amplitude}^2}{2 \times \text{bandwidth}} = \frac{\hat{h}}{2 \times \text{bandwidth}} \quad (6-3)$$

ซึ่งเรียกวิธีการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังแบบนี้ว่า Periodogram

จากสมการที่ 6-2 และ 6-3 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-4 ดังนี้

$$G_a(\omega) = G_d(\omega) \cdot \omega^4 \quad (6-4)$$

โดย

$G_a(\omega)$  คือ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่เชิงมุม

$$\text{ที่ขึ้นกับเวลา} \left( \frac{m^2}{s^4 \cdot (rad/s)} \right)$$

$G_d(\omega)$  คือ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่

$$\text{เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา} \left( \frac{m^2}{rad/s} \right)$$

ในส่วนของแกนความถี่ (f) จะแปลงให้อยู่ในรูปของความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $\omega$ ) โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-5



$$\omega = 2\pi f \quad (6-5)$$

จากที่กล่าวมาสมการที่ 6-2, 6-4 และ 6-5 สัญญาณความเร่งบนโดเมนความถี่ จะสามารถแปลงให้อยู่ในรูปความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) ได้

ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน ( $G_d(\Omega)$ ) ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-6 ส่วนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $\omega$ ) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ( $\Omega$ ) ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-7

$$G_d(\omega) = \frac{1}{v} G_d(\Omega) \quad (6-6)$$

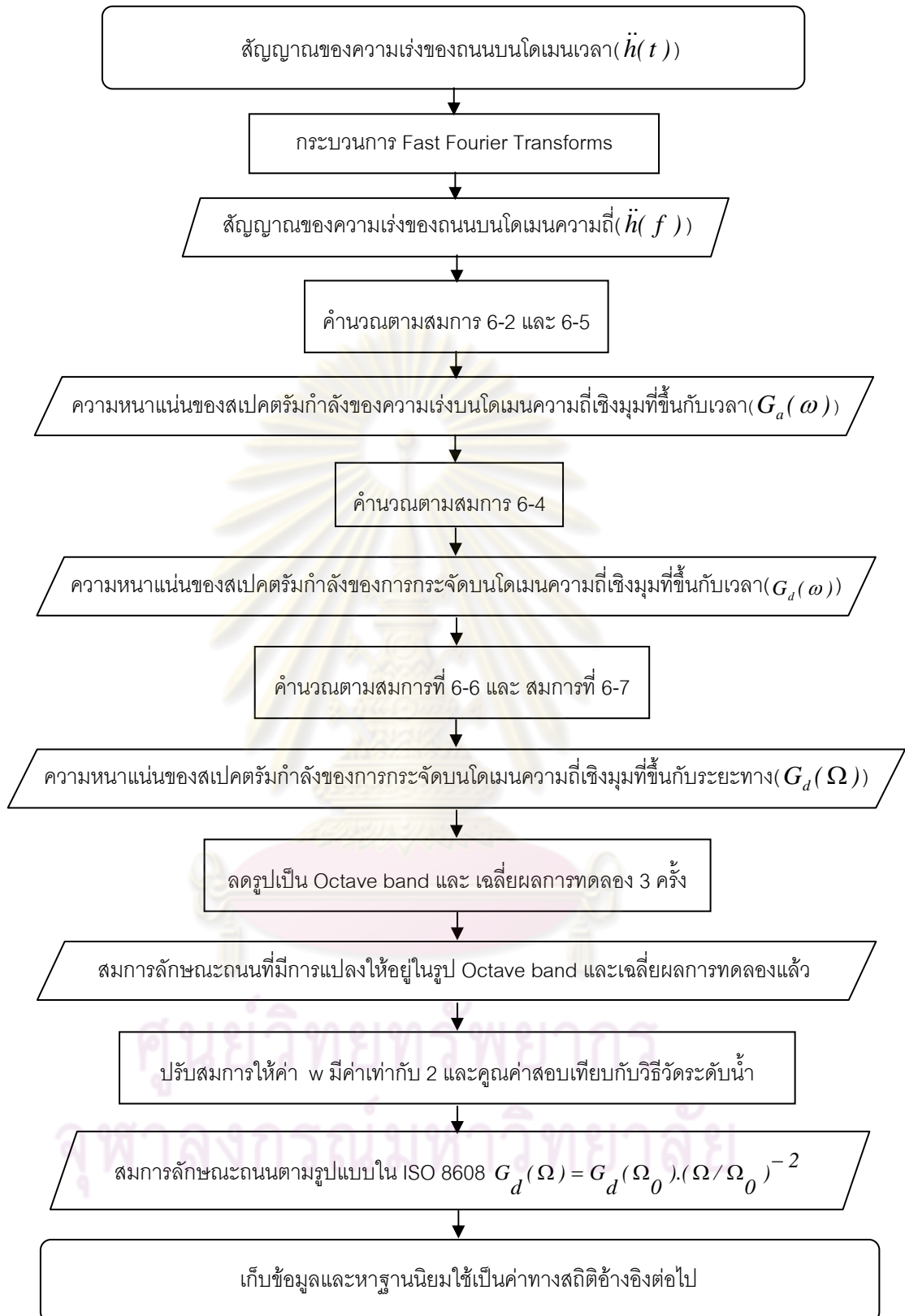
$$\omega = v\Omega = 2\pi \frac{v}{L} \quad (6-7)$$

โดยที่

$v$  คือ ความเร็วขณะทำการวัด ( $m/s$ )

$L$  คือ ความยาวคลื่นของถนน ( $m$ )

สมการลักษณะถนนที่วัดได้จะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในรูป Octave bandwidth และในการทดลองครั้งนี้จะมีการวัดซ้ำบนถนนเส้นเดียวกัน 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จากนั้นเฉลี่ยสัญญาณที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 บนโดเมนความถี่ ซึ่งการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่จะช่วยลดความไม่แน่นอนของสเปกตรัม [19] และขนาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีการเสถียรมากกว่า [20] และปรับสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่ได้ให้ค่า  $w$  มีค่าเท่ากับ 2 และคูณด้วยค่าสอบเทียบกับวิธีวัดระดับน้ำ จากนั้นประเมินลำดับชั้นของถนนโดยอ้างอิงมาตรฐาน ISO 8608 เก็บรวบรวมเป็นค่าทางสถิติเพื่อหาฐานนิยม และใช้ลักษณะถนนที่เป็นฐานนิยมจำลองลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับต่อไป สรุปผังแผนภูมิในรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 แผนภูมิแสดงการคำนวณในกรณีการวัดความสูงของถนนด้วยระดับน้ำเพื่อให้สมการของลักษณะถนนตามมาตรฐาน ISO 8608

## 6.2 การวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ

การวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ ทำเพื่อเก็บค่าลักษณะถนนและรวบรวมเป็นค่าทางสถิติของถนน โดยแบ่งลักษณะของถนนตามค่า  $G_d(\Omega_0)$  ในสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งของถนนที่มีการจัดรูปที่ระบุใน ISO 8608 แล้ว ค่า  $G_d(\Omega_0)$  ของถนนที่พบเป็นระยะทางมากที่สุด จะนำมากำหนดเป็นสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งของถนนที่เป็นตัวแทนในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล จากนั้นนำสมการที่ได้มาจำลองและกำหนดเป็นลักษณะถนนเพื่อใช้เป็นตัวแทนของถนนในสนามกอล์ฟในกรุงเทพฯและ ปริมณฑลต่อไป

### 6.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

#### 6.2.1.1 รถกอล์ฟ

รถกอล์ฟ ที่ใช้งานวิจัยครั้งนี้เป็นของ บริษัท ทีเอส วิถีเคิลเทค จำกัด รุ่น Bravo TT-11 มีน้ำหนักรวมทั้งสิ้น 380 kg โดยไม่ได้รวมคนขับและผู้โดยสาร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 5 แรงม้า ในการขับเคลื่อน ควบคุมความเร็วด้วยกล่องควบคุมความเร็วยี่ห้อ Curtis สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 27 km/h ความยาวของฐานล้อ 1.8 m ความสูง 2 m

รถกอล์ฟดังกล่าวมีหน้าที่ในการลากอุปกรณ์วัดลักษณะถนนที่เรียกว่า Rolling Straightedge เนื่องจากมีชุดกล่องควบคุมความเร็ว ควบคุมให้รถมีความเร็วคงที่จึงเหมาะสำหรับเป็นตัวลากอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งยังเป็นที่ยางของชุดอุปกรณ์อื่นๆ ได้อีก เช่น Data Logger Notebook ลักษณะของรถกอล์ฟที่นำมาใช้งานนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 6-2 (ซ้าย)

ส่วนการติดตั้งกับ Rolling Straightedge นั้นออกแบบให้เป็นหมุดในแนวตั้ง (pin support) ดังรูปที่ 6-2 (ขวา) ทำให้สามารถเลี้ยวได้ขณะทำการวัด ตัวหมุดยึดติดกับ Chasis ของรถกอล์ฟด้วย Bolt M10 4 ตัว เมื่อติดตั้งกับอุปกรณ์ Rolling Straightedge เรียบร้อยแล้วมีอุปกรณ์ยึดไม่ให้จุดยึดหลุดออกจากกันดังรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-2 ภาพรถกอล์ฟที่นำมาใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้และชุดอุปกรณ์สำหรับลาก Rolling Straightedge ด้านหลังรถกอล์ฟ



รูปที่ 6-3 อุปกรณ์ที่ทำสำหรับการยึด Rolling Straightedge กับ รถกอล์ฟ

#### 6.2.1.2 ชุดควบคุมความเร็ว

เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมความเร็วของรถกอล์ฟให้มีความเร็วคงที่ตามต้องการ โดยควบคุมทำความเร็วผ่านกล่องควบคุมให้มอเตอร์ของรถกอล์ฟมีความเร็วรอบความเร็วคงที่ได้ กล่องและชุดควบคุมความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของยี่ห้อ Curtis รายละเอียดระบุไว้ในภาคผนวก ข ในการวิจัยครั้งนี้กำหนดความเร็วไว้ที่ 12 km/h ลักษณะของชุดควบคุมแสดงดังรูปที่ 6-4



รูปที่ 6-4 การทำงานชุดควบคุมความเร็วและการเชื่อมต่อ



### 6.2.1.3 Rolling Straightedge และ ชุดอุปกรณ์การวัด

ชุดอุปกรณ์ Rolling Straightedge มีองค์ประกอบอยู่ 5 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนมีลักษณะและหน้าที่การทำงานดังต่อไปนี้

#### 6.2.1.3.1 Rolling Straightedge

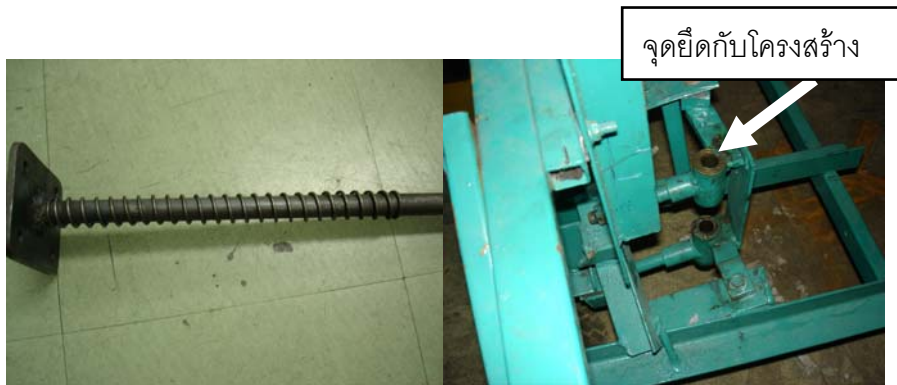
เป็นอุปกรณ์ในการวัดลักษณะถนน ซึ่งเดิมวัดระยะกระจัดกลางเคลื่อนที่ของล้อตรงกลางของฐานเทียบกับล้อปลายทั้ง 2 จุด แต่ในงานวิจัยนี้นำมาประยุกต์ใช้กับ Accelerometer มาวัดการเคลื่อนที่ในรูปแบบความเร่งแทน ตัวโครงสร้างมีความยาวของฐาน 2 m ประกอบด้วยล้อ 5 ล้อ ล้อหน้าทั้ง 2 ล้อเป็นล้อแคสเตอร์เพื่อให้เลี้ยวโค้งไปตามถนนได้ ส่วนล้อหลังทั้ง 2 ล้อเป็นล้อธรรมดา ล้อทั้ง 4 เป็นล้อยูรีเทนซึ่งมีความแข็งแรงและสึกหรอยาก ส่วนล้อที่อยู่ตรงกลางสำหรับวัดลักษณะของถนนนั้นเป็นล้อยางตัน ขนาด 4 นิ้ว ซึ่งมีน้ำหนักเบาทำให้เกาะถนนและวัดความสูงได้แม่นยำกว่า เนื่องจากการใช้งานของอุปกรณ์นี้ในสนามกอล์ฟ ต้องพบเนิน หรือ คลื่นถนนความถี่ต่ำที่มีขนาดสูงและเป็นจำนวนมากจึงต้องมีการออกแบบให้มีความสูงเพียงพอ จึงออกแบบความสูงของตัว Rolling Straightedge อยู่ที่ 70 cm ส่วนความกว้างของฐานมีค่าประมาณ 50 cm เพื่อให้รถมีเสถียรภาพในการวิ่งไม่พลิกคว่ำได้ง่ายโดยความเร็วขณะใช้งานอยู่ที่ 12 km/h



รูปที่ 6-5 Rolling Straightedge และการติดตั้งกับรถกอล์ฟ

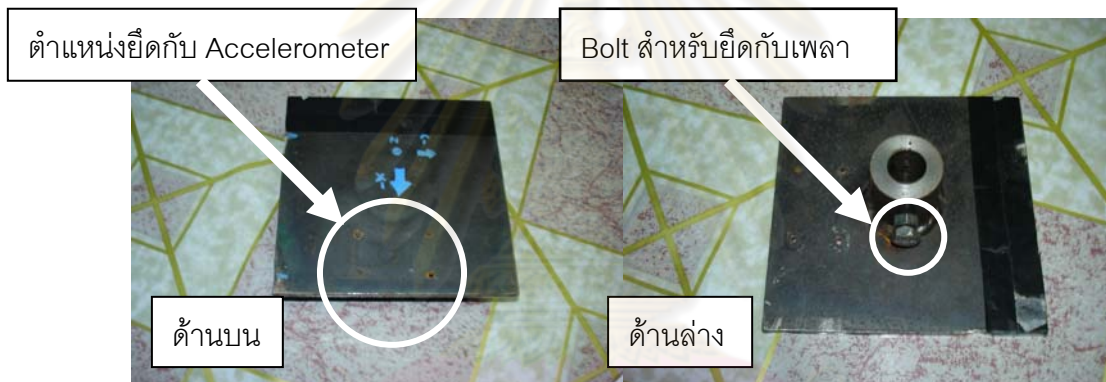
ส่วนล้อตรงกลางสำหรับวัดลักษณะถนนนั้นจะยึดติดกับเพลลาแสดงไว้ในรูปที่ 6-6 (ซ้าย) ซึ่งเป็นเพลลาเหล็กตันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 17 mm สูง 60 cm ในขณะใช้งานจะสวมสปริงที่มีค่าความแข็งสปริง 3400 N/m (การออกแบบและคำนวณค่าความแข็งแสดงในภาคผนวก ง) เมื่อขณะทำการวัด ตัวสปริงจะดันกับโครงสร้าง เพื่อให้ล้อกดพื้นตลอดเวลา ตัวเพลลามีจุดยึดกับตัวโครงสร้าง Rolling Straightedge ดังรูปที่ 6-6 (ขวา) โดยออกแบบให้เพลลาของล้อตรงกลางเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อย่างอิสระในแนวตั้งเท่านั้น ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของเพลลาจะยึดกับฐานรองรับ Accelerometer





รูปที่ 6-6 เพลลาของล้อกลางของ Rolling Straightedge (ซ้าย) และจุดติดตั้ง (ขวา)

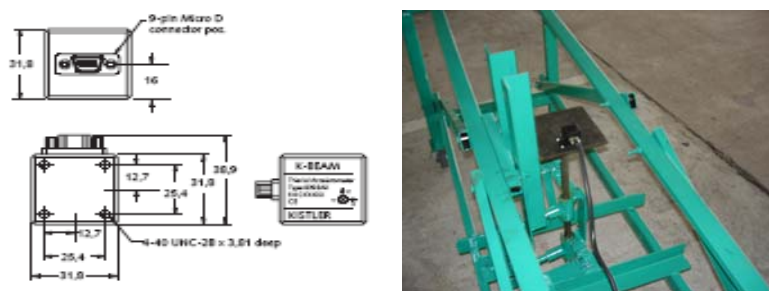
ส่วนฐานรองรับ Accelerometer แสดงไว้ในรูปที่ 6-7 เป็นเหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 20x20 cm มีเหล็กทรงกระบอกเชื่อมติดตรงกลางและมี Bolt M10 เพื่อยึดติดกับส่วนของเพลลา ส่วนฐานรองรับนี้มีการเจาะรูขนาด 3 mm ไว้ 4 รูเพื่อเป็นจุดยึดกับ Accelerometer



รูปที่ 6-7 ส่วนฐานรองรับ Accelerometer ของ Rolling Straightedge

#### 6.2.1.3.2 Accelerometer

การวัดความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง จะใช้ Accelerometer ของบริษัท Kristler รุ่น K-Beam 8393B10 เป็นชนิด Piezoelectric ลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 3x3x3 cm โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกควอทซ์ ซึ่งจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงมากระทำบนผลึก ประจุที่จ่ายออกมาจะมีค่าแปรตามแรงที่กระทำ หรือ ความเร่งที่เกิดขึ้น ข้อมูลทางเทคนิคดังแสดงในตารางที่ 6-1 สามารถวัดความเร่งได้ 3 แกน ซึ่งจะยึดติดกับส่วนฐานรองรับ Accelerometer ดังรูปที่ 6-8



รูปที่ 6-8 Accelerometer และวิธีการติดตั้งกับ Rolling Straightedge

ตารางที่ 6-1 ข้อมูลทางเทคนิคของ Accelerometer รุ่น K-Beam 8393B10 ยี่ห้อ Kristler

Technical Data	
Type	8393B10
Acceleration Range	$\pm 10$ g
Sensitivity ( $\pm 5\%$ )	200 mv/g
Zero g Output $\pm 30$ mV	0 V
Resolution(Threshold) typ.	2830 $\mu$ g
Resonant Frequency nom.	2.7 kHz
Frequency Response $\pm 5\%$	0-180 Hz
Amplitude Non-linearity	$\pm 0.8$ % FSO
Transverse Sensitivity typ.(max $\pm 3\%$ )	1%
Ground Isolation min,	$> 10^{10}$ $\Omega$
Weight	60 grams

### 6.2.1.3.3 Data Logger

เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณข้อมูลจากข้อมูลอะนาล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัล Data Logger ที่ใช้เป็น Data Logger 16 Channels ยี่ห้อ Dewetrons รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 สัญญาณที่ได้จะถูกเก็บเข้าคอมพิวเตอร์ต่อไป ภาพ Data Logger และตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 6-9 ส่วนรายละเอียดของเครื่องมือแสดงไว้ในตารางที่ 6-2



รูปที่ 6-9 ภาพแสดง Data Logger และตำแหน่งที่ติดตั้งในรถกอล์ฟ

ตารางที่ 6-2 ข้อมูลทางเทคนิคของ Data logger รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 ยี่ห้อ

Dewetrons

System specifications	DEWE-BOOK-USB2-DT-16
A/D input channels	16
Slots for DEWE modules	16
Sampling rate	500 kS/s aggregate
A/D resolution standard	16-bit
A/D converter hardware	DT 9834
Power supply	115/230 VAC, 50/60 Hz
Dimension(WxDxH)	400x200x140 mm 16.0x7.9x5.5 in
Weight	6 kg (13 lbs)
Supports Microsoft WINDOWS XP operating system and USB interface	

#### 6.2.1.3.4 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ตะกั่ว ยี่ห้อ Trojan 12 V ให้กำลังไฟฟ้าได้ 150 แอมแปร์ต่อชั่วโมง สามารถใช้งานได้ 20 ชั่วโมง มีขนาด 12.875 x 7.13 x 10.68 นิ้ว น้ำหนัก 36 Kg มีหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้า Data Logger และ คอมพิวเตอร์ในการทำงาน เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่แยกออกจากตัวรถกอล์ฟเอง เพื่อป้องกันปัญหาหาความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าลดลงเนื่องมาจากการขับขี่เป็นเวลานาน ลักษณะภายนอกและการติดตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 6-10



รูปที่ 6-10 แบตเตอรี่และตำแหน่งที่ติดตั้ง

#### 6.2.1.3.5 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้มี 2 ตัว คือ ยี่ห้อ PM และ SKYWISE เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 12 V จึงต้องแปลงเป็นกระแสสลับ 220 V เพื่อใช้งานกับ Data Logger และ Notebook รายละเอียดของหม้อแปลง



รูปที่ 6-11 รูปหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า



ตารางที่ 6-3 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ PM

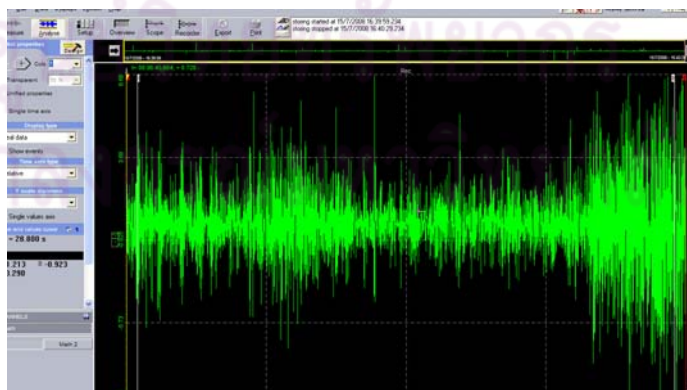
input/output	12 VDC/200 VAC 50 Hz
Power output	500 Watt
Wave form	Modified Sine Wave
System	Switching
Dimension(WxDxH)	95x168x55 mm
Weight	1200 g

ตารางที่ 6-4 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ SKYWISE

input/output	12 VDC/200 VAC 50 Hz
Power output	200 Watt
Wave form	Modified Sine Wave
System	Switching
Dimension(WxDxH)	100x147x45 mm
Weight	645 g

#### 6.2.1.3.6 Computer Notebook และ Software

Computer Notebook สำหรับการแสดงและเก็บข้อมูลที่ได้จาก Data Logger บนจอแสดงผล ส่วนโปรแกรมในการคำนวณวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลใช้โปรแกรม Dewesoft 6.3.3 ซึ่งสามารถสังเกตความเร่งที่เกิดขึ้นขณะวิ่งได้ทันที



รูปที่ 6-12 โปรแกรม Dewesoft 6.3.3



#### 6.2.1.4 การสอบเทียบอุปกรณ์ Rolling Straightedge

ในงานวิจัยนี้ได้สอบเทียบการวัดลักษณะถนนด้วย Rolling straightedge กับวิธีวัดลักษณะถนนด้วยระดับน้ำซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน โดยวิธีนี้ประยุกต์จากวิธี Rod and Level กล่าวคือจะใช้ระดับน้ำวัดความสูงของพื้นถนนเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุดแทนที่จะใช้ กล้องสำรวจที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2.1 และใช้สายดึงระบุตำแหน่งความสูงเทียบกับจุดอ้างอิงแทน

##### 6.2.1.4.1 อุปกรณ์ในการสอบเทียบ ด้วย วิธีระดับน้ำ

###### 6.2.1.4.1.1 ถนน

ถนนที่ใช้ในการสอบเทียบครั้งนี้ได้ใช้ถนนในสนาม พัฒนา สปอร์ต คลับ โซน A หลุม 2 โดยใช้ในการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จาก Rolling Straightedge และการวัดโดยระดับน้ำ มีระยะทางในการสอบเทียบ 100 m ดังแสดงในรูปที่ 6-13



รูปที่ 6-13 ถนนที่ใช้สอบเทียบ

###### 6.2.1.4.1.2 เสาดั่ง

มีหน้าที่กำหนดจุดอ้างอิงในการวัด และเป็นตัวยึดกับสายยางและสายเอ็นสำหรับการวัดระดับน้ำอีกด้วย ความสูงของเสาอยู่ที่ 150 cm ถูกออกแบบให้มีน้ำหนักถ่วงที่ฐานเพื่อไม่ให้เอนที่ผูกกับตัวเสาหย่อน หรือถูกลมพัดล้มได้ง่าย และเจาะรูไว้ที่ปลายบนเพื่อที่จะสามารถยึดกับสายยางไว้ได้ดังรูปที่ 6-14



รูปที่ 6-14 ภาพเสาดั่งสำหรับการตั้งจุดอ้างอิงในการวัดระดับน้ำ

#### 6.2.1.4.1.3 สายยาง

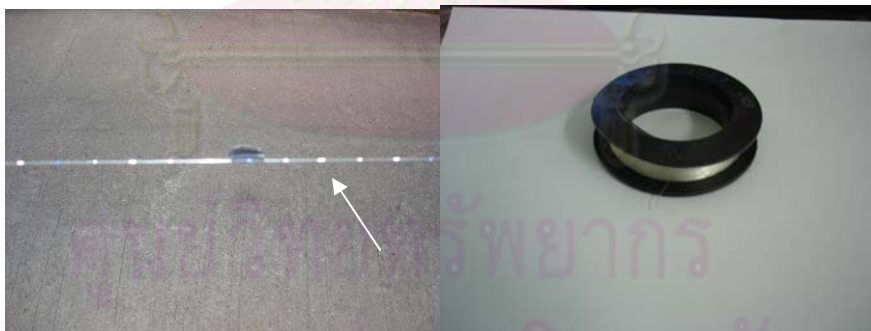
ใช้สำหรับการตั้งให้เอ็นขนานกับพื้นโลกในขณะวัด ภายในจะบรรจุน้ำตลอดไว้สำหรับการตั้งระดับของเอ็น มีขนาดยาว 14 m ดังรูปที่ 6-15



รูปที่ 6-15 ภาพสายยางสำหรับการตั้งระดับน้ำ

#### 6.2.1.4.1.4 สายเอ็น

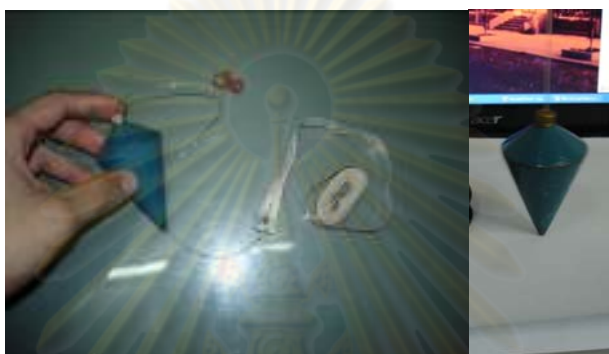
สายเอ็นที่ใช้วัดระดับน้ำมีชื่อ The Bell ใช้สำหรับเป็นจุดอ้างอิงในการวัดระดับน้ำ มีการทำสัญลักษณ์ไว้ช่วงละ 10 cm เพื่อให้สะดวกขณะวัด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm เพื่อที่จะได้มีน้ำหนักเบาและสามารถขึงตึงได้ง่าย มีขนาดความยาวช่วงที่ใช้งาน 10 m ภาพสายเอ็นแสดงไว้ดังรูปที่ 6-16



รูปที่ 6-16 สายเอ็นขณะใช้งานและสัญลักษณ์ที่ทำไว้เพื่อเป็นตัวบ่งจุดที่จะทำการวัด

#### 6.2.1.4.1.5 สายดิ่ง

ใช้สำหรับวัดความสูง ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ลูกดิ่งซึ่งมีน้ำหนัก 350 g และ สายวัดที่มีความยาว 2 m ลูกดิ่งจะผูกเข้ากับสายวัดด้วยเอ็น ความสูงที่สามารถวัดได้จึงอยู่ในช่วงไม่เกิน 2 m ตัวลูกดิ่งนั้นจะทำให้สายวัดตั้งตลอดเวลาและอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นโลกด้วยน้ำหนักของตัวลูกดิ่งเอง โดยทำการวัดในขณะที่ลูกดิ่งสัมผัสพื้นเล็กน้อย เพื่อให้จะให้สายวัดที่ติดกับตัวลูกดิ่งไม่มีการหย่อน



รูปที่ 6-17 สายดิ่งสำหรับการวัดความสูงของผิวถนนเทียบกับจุดอ้างอิง

#### 6.2.1.4.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ ด้วย วิธีระดับน้ำ

ในการสอบเทียบลักษณะถนนจะเปรียบเทียบค่าสมการความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของวิธีการวัดลักษณะถนนด้วยวิธีระดับน้ำ และ Rolling Straightedge บนถนนเส้นเดียวกัน โดยมีขั้นตอนการวัดลักษณะถนนด้วยวิธีระดับน้ำมีดังต่อไปนี้

ขั้นแรกตั้งเสาตั้งจุดแรกของการวัดเป็นจุดอ้างอิงและตั้งเสาถัดไปโดยให้ห่างจากต้นเดิม 10 m ไปในเส้นทางถนนที่ต้องการวัด จากนั้นผูกปลายสายเข้ากับเสาทั้ง 2 ข้าง กรอกรน้ำลงไปน้ำจะรักษาระดับความสูงไว้ นำเอ็นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 mm ผูกไว้กับปลายทั้ง 2 ของเสาด้วยการปรับให้เอ็นตึงโดยมีคนคอยดึงเสาทั้ง 2 ต้นและเลื่อนความสูงเอ็นให้ตรงกับระดับน้ำ เอ็นที่ซึ่งก็ได้ระดับขนานกับพื้นโลก ทำการวัดค่าความสูงแต่ละจุด ตามระยะทางแนวที่ละ 10 cm โดยตัวเอ็นที่นำมาซึ่งนั้นจะถูกทำสัญลักษณ์ไว้ที่เส้นเอ็นแต่ละจุดห่างกัน 10 cm เพื่อให้ง่ายต่อการวัดค่าความสูงและทำการวัดความสูงแต่ละจุดโดยใช้สายดิ่ง ที่เป็นสายวัดผูกด้วยลูกดิ่งซึ่งมีน้ำหนักถ่วง วัดความสูงขณะที่สายดิ่งมีความตึงและลูกดิ่งแตะสัมผัสพื้นในสภาพตั้งตรง วัดค่าความสูงแต่ละจุดจนครบ 10 เมตร จากนั้นย้ายเสาตั้งต้นแรกไปเป็นเสาต้นถัดไป โดยเสาต้นที่สองยังคงอยู่ที่เดิม ทำเช่นเดียวกันกับในตอนแรก วัดระดับน้ำของเสาต้นที่สองเพื่อหาความสัมพันธ์

ระหว่างจุดอ้างอิงเดิมและจุดอ้างอิงใหม่ ทำเช่นนี้จนครบ 100 m และจะใช้ลักษณะถนนที่วัดได้นี้ ในการสอบเทียบอุปกรณ์ Rolling straightedge ที่ได้จัดทำขึ้นต่อไป

จากการวัดที่ละ 10 cm จะให้ความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง (Spatial frequency) มากที่สุดที่สามารถอ่านค่าได้บนโดเมนความถี่อยู่ที่ 5 cycle/m ซึ่งในการทำงานวิจัยครั้งนี้จะสนใจความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางอยู่ที่ 0.011 – 2.83 cycle/m ตามข้อแนะนำใน ISO 8608 ดังนั้นการวัดด้วยระดับน้ำในครั้งนี้ถือว่าครอบคลุมช่วงดังกล่าวแล้วภาพขณะทำการวัดและเส้นถนนที่ใช้ในการสอบเทียบ แสดงไว้ ดังรูปที่ 6-18

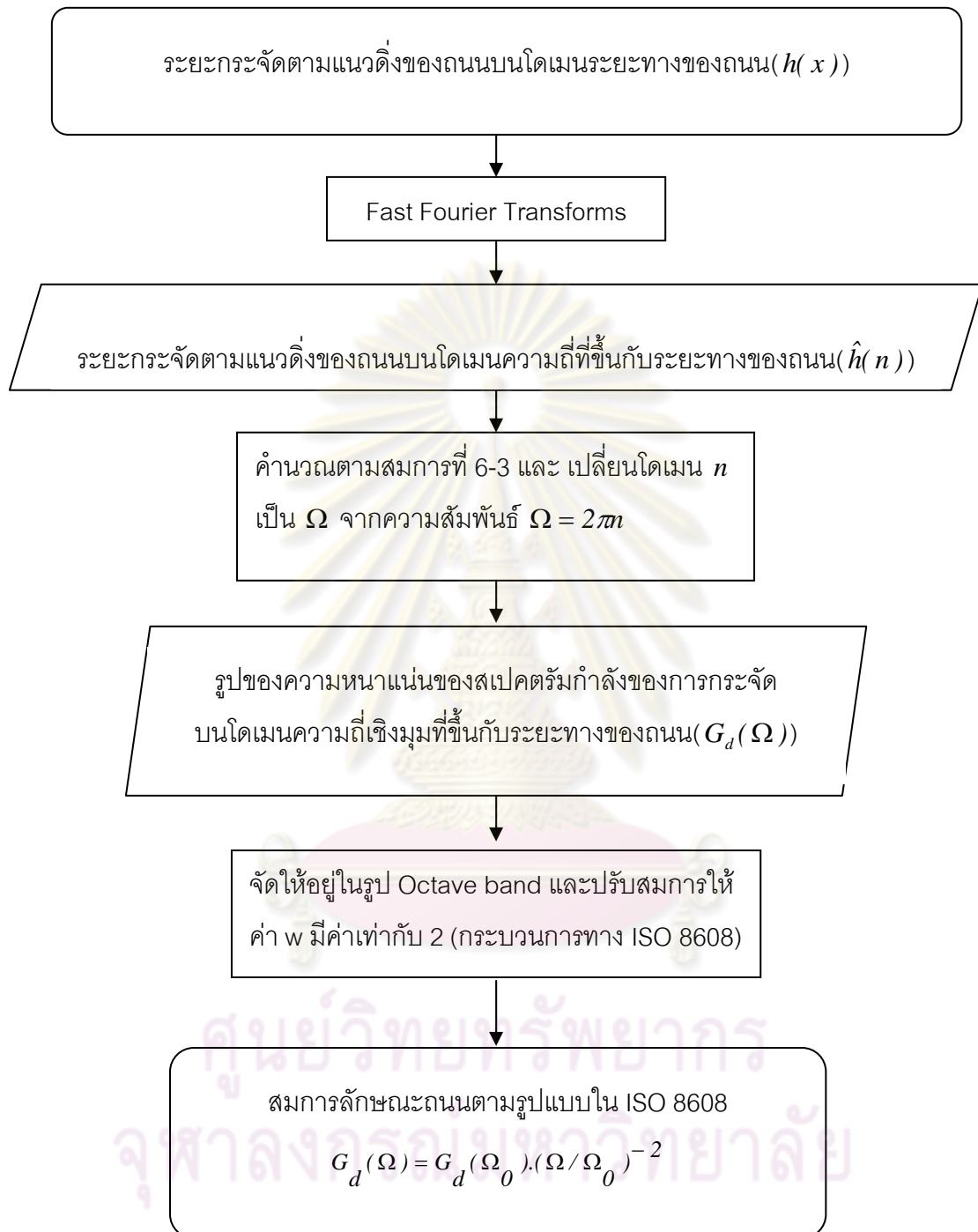


รูปที่ 6-18 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการวัดระดับน้ำ (ซ้าย)

สภาพถนนที่ใช้ในการสอบเทียบ (ขวา)

ผลของการวัดลักษณะถนนที่ได้จะอยู่ในรูปของระยะกระจัดตามแนวตั้งของพื้นถนนบนโดเมนระยะทาง ( $h(x)$ ) จากนั้นกรองความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง (Spatial frequency) ที่สูงกว่าและที่ต่ำกว่าที่ต้องการออก (รายละเอียดจะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 6.2.1.4.3) จากนั้นเปลี่ยนสัญญาณให้อยู่รูประยะกระจัดตามแนวตั้งของพื้นถนนบนโดเมนความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง ( $\hat{h}(n)$ ) และจัดให้อยู่ในรูปแบบของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน ( $G_d(\Omega)$ ) จากนั้นแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูป Octave bandwidth และปรับข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบสมการตาม ISO 8608 จะมีค่าเท่ากับ  $G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \cdot (\Omega/\Omega_0)^{-2}$  โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบกำลัง 2 น้อยสุด สมการที่ได้ คือ สมการของลักษณะถนนของถนนที่ใช้สอบเทียบ ขั้นตอนการวัดแสดงดังแผนภูมิในรูปที่ 6-19 ผลการวัดด้วยวิธีระดับน้ำจะถูกนำไปสอบเทียบผลที่ได้จากวิธีวัดแบบ Rolling Straightedge บนถนนเส้นเดียวกันนี้เพื่อหาความสัมพันธ์และคำนวณหาค่าสอบเทียบ (Calibration Factor) เพื่อใช้ในการปรับค่าที่วัดด้วย Rolling Straightedge ให้เทียบเท่ากับการวัดลักษณะถนนด้วยระดับน้ำซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานต่อไป





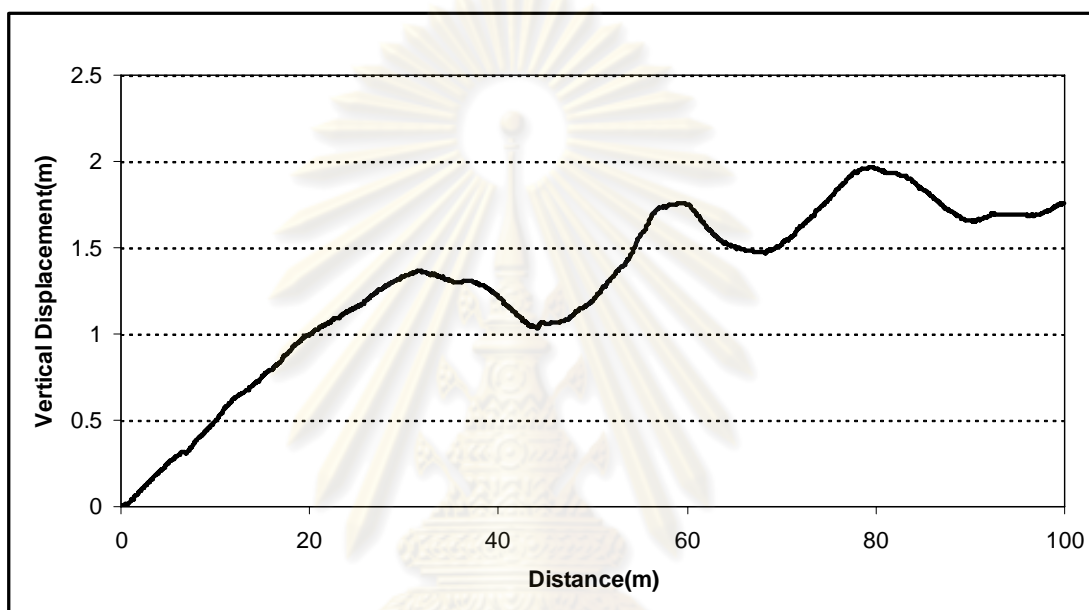
รูปที่ 6-19 แผนภูมิแสดงการคำนวณในกรณีการวัดความสูงของถนนด้วยการวัดระดับน้ำ เพื่อให้ได้สมการของลักษณะถนนตามมาตรฐาน ISO 8608



### 6.2.1.4.3 ผลการสอบเทียบ ด้วย วิธีระดับน้ำ

#### 6.2.1.4.3.1 ผลการวัดลักษณะถนนด้วยวิธีระดับน้ำ

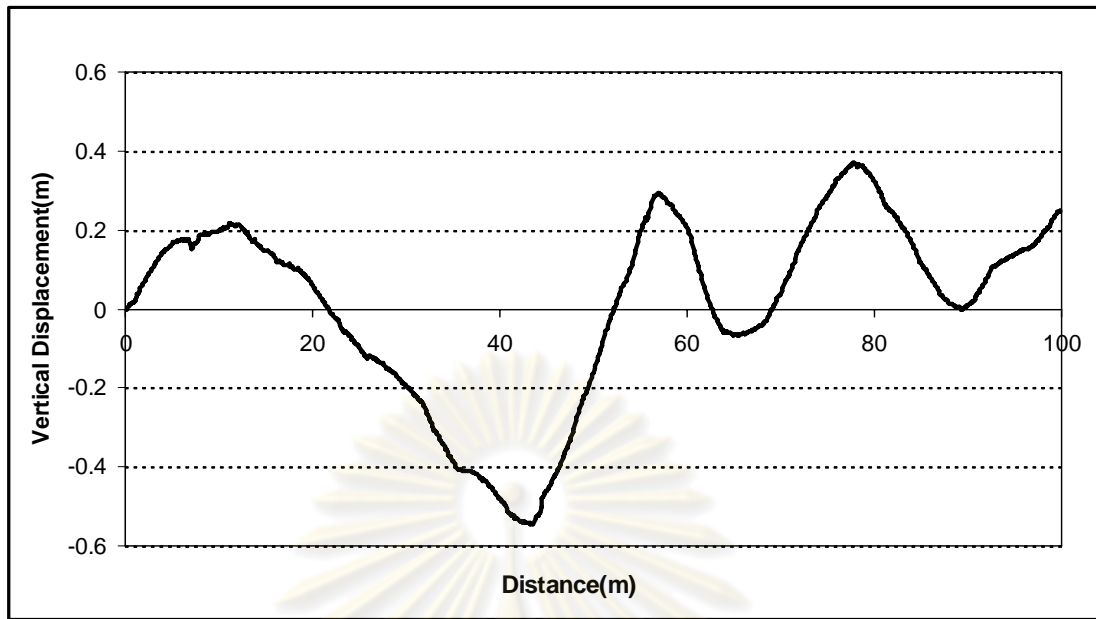
ในการสอบเทียบอุปกรณ์วัดลักษณะถนนนั้น จะสอบเทียบกับวิธีวัดระดับน้ำซึ่งดัดแปลงมาจากวิธี Rod and Level method ในหัวข้อ 2.2.1 โดยถนนที่ใช้สอบเทียบเป็นถนนในสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A หมู่ที่ 2 และผลจากการวัดลักษณะถนนด้วยระดับน้ำแสดงดังรูปที่ 6-20



รูปที่ 6-20 ลักษณะถนนที่ได้จากการวัดระดับน้ำ

จากรูปที่ 6-20 ลักษณะถนนที่ได้จากการวัดจะสังเกตเห็นว่าจะประกอบด้วยคลื่นความถี่ต่ำที่มีขนาดสูงอย่างชัดเจน ซึ่งและในทางทฤษฎีแล้วการแปลงสัญญาณจากโดเมนระยะทางเป็นโดเมนความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางของถนน ไม่นิยมกระทำหากสัญญาณที่ได้มานั้นมีความยาวคลื่นมากกว่าระยะทางที่ทำการวัด อีกทั้งตามมาตรฐาน ISO 8608 นั้นจะประเมินในช่วงความยาวคลื่นของถนนที่ความถี่ 0.011 cycle/m ถึง 2.83 cycle/m ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.353 เมตร ถึง 91 เมตร จึงกรองคลื่นถนนที่มีความยาวคลื่นที่สูงกว่า 250 m ขึ้นไปเพื่อลดผลของคลื่นความถี่ต่ำของถนนที่ไม่ต้องการ และกรองคลื่นถนนที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 0.1 m เพื่อลดผล Aliasing ตามภาคผนวก ข ก่อนแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

การกรองความถี่ที่ใช้เป็นแบบ Butterworth อันดับ 10 มีความถี่ Cut-off 0.004 cycle/m และ 10 cycle/m ซึ่งความถี่ที่กรองออกไปนั้นไม่อยู่ในช่วงที่ใช้ในการประเมินแต่อย่างใด ลักษณะถนนที่ผ่านการกรองจะเป็นไปดังรูปที่ 6-21 ส่วนรายละเอียดในการกรองความถี่แบบ Butterworth filter ดูวิธีการกรองได้ที่ภาคผนวก ก

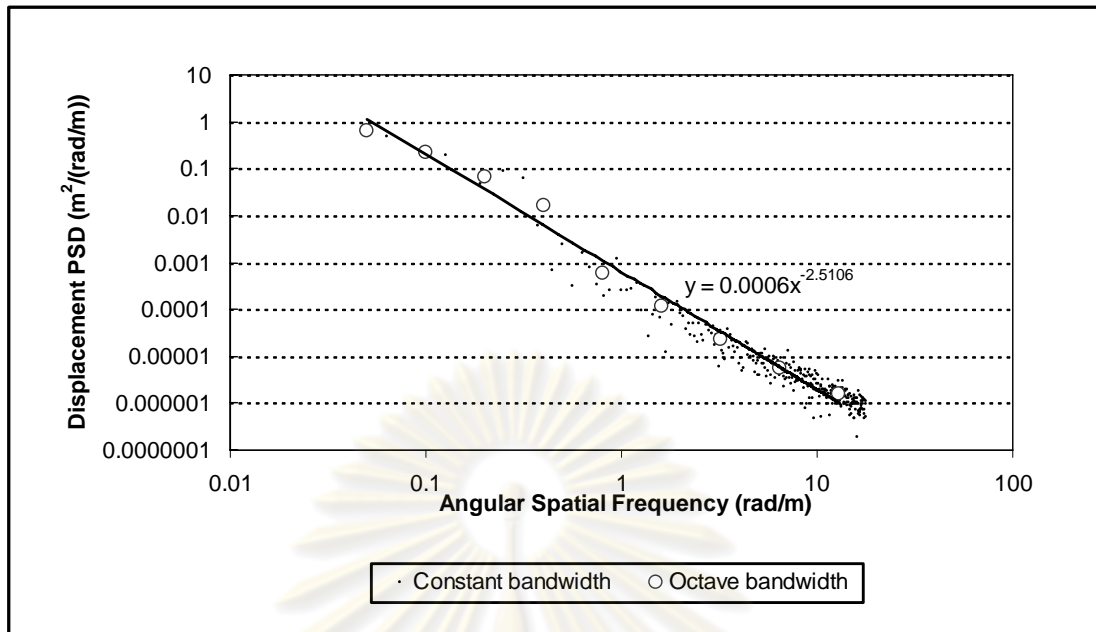


รูปที่ 6-21 ลักษณะถนนที่ผ่านการกรองความถี่ต่ำแล้ว

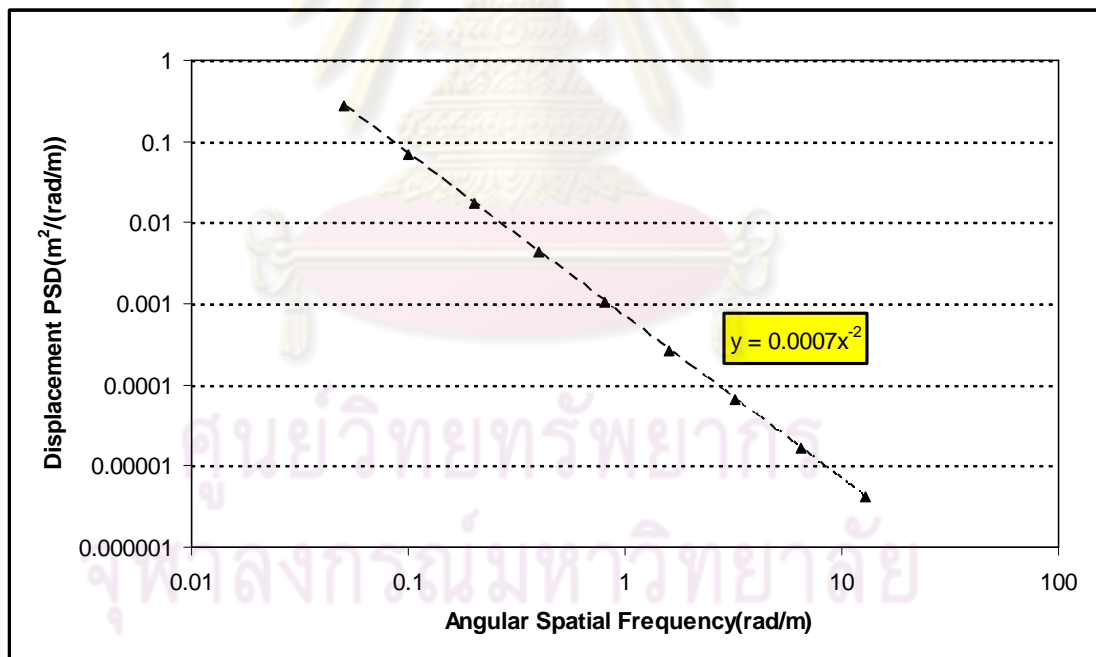
แปลงลักษณะถนนในรูปที่ 6-21 บนโดเมนระยะทางเป็นลักษณะถนนบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน ( $\Omega$ ) ด้วยกระบวนการ Fast Fourier Transforms จัดให้อยู่ในรูป Octave Bandwidth ดังรูปที่ 6-22 ซึ่งได้สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวดิ่งเป็น ดังนี้  $G_d(\Omega) = 0.0006(\Omega/\Omega_0)^{-2.5106}$

จากนั้นปรับสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่ได้ให้มีค่า  $w$  เท่ากับ 2 ตามข้อแนะนำในมาตรฐาน ISO 8608 เพื่อจัดแบ่งประเภทของถนน ผลที่ได้จากการปรับสมการจะได้ผลดังรูปที่ 6-23 จะได้สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวดิ่งของถนนดังนี้  $G_d(\Omega) = 0.0007(\Omega/\Omega_0)^{-2}$  ซึ่งจะใช้ในการสอบเทียบกับวิธีการวัดด้วย Rolling Straightedge ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6-22 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของการวัดลักษณะถนนด้วยระดับน้ำก่อนและหลังปรับให้อยู่ในรูป Octave Bandwidth



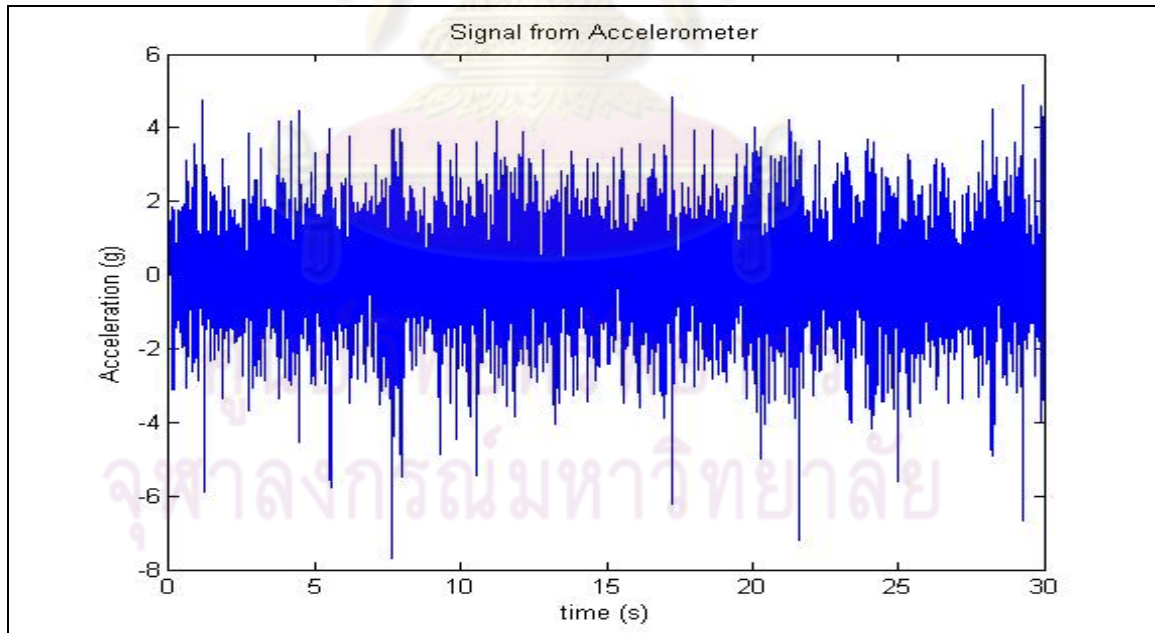
รูปที่ 6-23 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของระดับน้ำเมื่อปรับให้ค่ากำลังของสมการให้มีค่า  $w$  เท่ากับ 2 เพื่อประเมินมาตรฐาน ISO 8608

### 6.2.1.4.3.2 ผลการวัดลักษณะถนนด้วยอุปกรณ์ Rolling Straightedge

ผลการวัดลักษณะถนนด้วยวิธีการ Rolling Straightedge นั้นสัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปของความเร่งเพราะทำการวัดด้วย Accelerometer ขณะทำการวัดจะใช้ความเร็วคงที่ในการวัดอยู่ที่ 12 km/h ซึ่งตามมาตรฐาน ISO 8608 นั้นจะประเมินถนนโดยใช้ข้อมูลช่วงความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง( $\Omega$ )ของถนนอยู่ที่ 0.011 cycle/m ถึง 2.83 cycle/m และเมื่อคำนวณกับความเร็วในการวัด ที่ 12 km/h ช่วงความถี่ที่ต้องการเก็บค่าจึงใช้ช่วงความถี่อยู่ที่ 0.03663 Hz ถึง 9.4236 Hz ซึ่งจะต้องเก็บค่าอย่างน้อย 2 เท่าของความถี่ที่ต้องการมากที่สุดตามทฤษฎี Nyquist criterion [20] จึงควรเก็บที่ความถี่ประมาณ 19 Hz และเพื่อที่จะเห็นความถี่ที่ 0.03663 Hz ควรเก็บเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 27.3 วินาที ดังนั้นการวัดลักษณะถนนด้วยวิธีการ Rolling Straightedge จะวิ่งเก็บค่าเป็นระยะเวลา 30 วินาที ซึ่งเมื่อคำนวณกับความเร็วคิดเป็นระยะทาง 100 เมตร เทียบเท่ากับระดับน้ำ ความถี่ที่ใช้ในการเก็บค่าอยู่ที่ 1000 Hz ซึ่งถือว่าเพียงพอกับการทำงาน

ในขณะเดียวกันเพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ Aliasing จึงกรองความถี่ที่สูงกว่า 45 Hz เป็นต้นไปออกโดย Lowpass filter แบบ Butterworth อันดับที่ 10

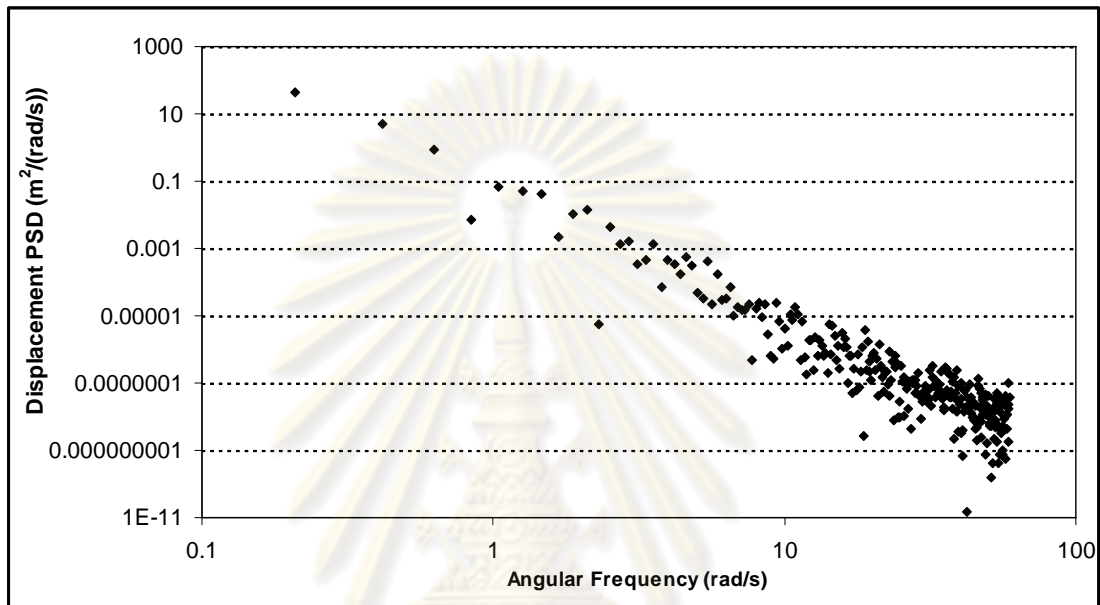
ตัวอย่างสัญญาณความเร่งของ Accelerometer ที่ผ่านการกรองความถี่ที่สูงกว่า 45 Hz แล้วดังแสดงในรูปที่ 6-24



รูปที่ 6-24 ตัวอย่างสัญญาณความเร่งที่ได้จาก Accelerometer

จากนั้นเปลี่ยนลักษณะถนนบนโดเมนเวลาเป็นลักษณะถนนบนโดเมนความถี่ด้วยกระบวนการ Fast Fourier transforms จากนั้นนำสัญญาณที่ได้คำนวณเป็นค่าความหนาแน่นของ

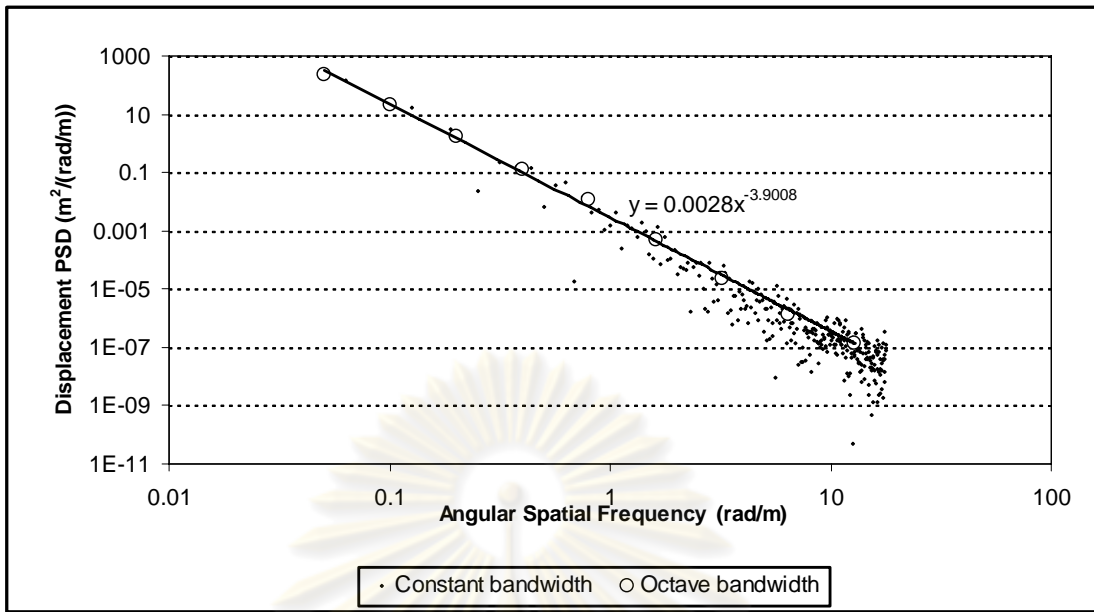
สเปกตรัมกำลังของความเร่ง ( $G_a(\omega)$ ) และทำปฏิกิริยาพันธึนเป็นค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-2 และ 6-4 ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) แสดงดังรูปที่ 6-25



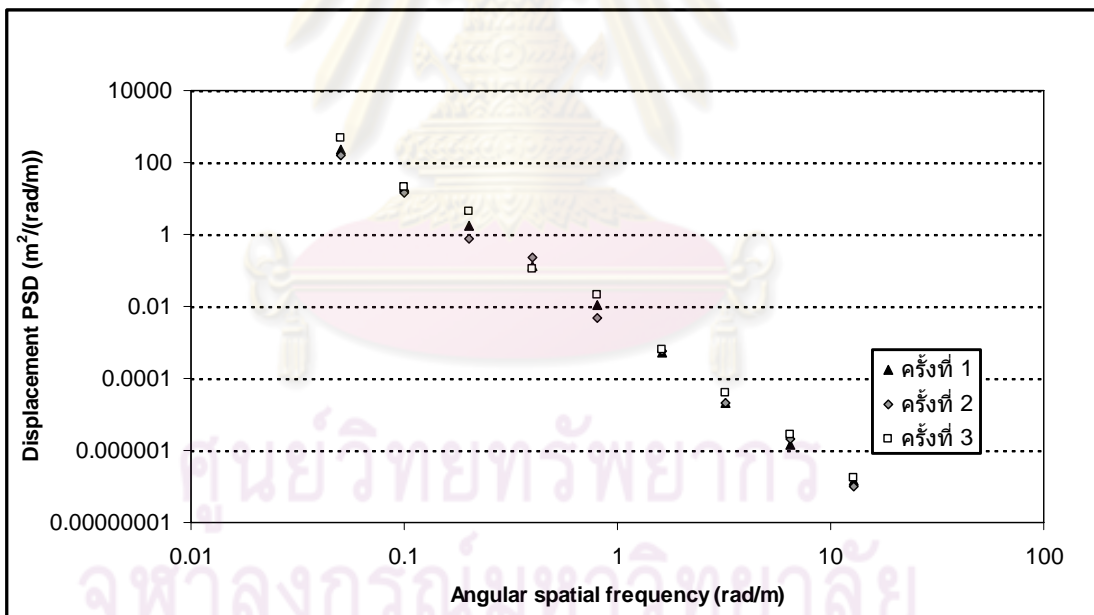
รูปที่ 6-25 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา

ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) ที่ได้ในรูปที่ 6-25 เมื่อคูณด้วยความเร็วรถ ( $v$ ) จะได้ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ( $G_d(\Omega)$ ) ของถนน ส่วนค่าความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $\omega$ ) เมื่อหารด้วยความเร็วรถจะได้ค่าความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ( $\Omega$ ) ดังสมการที่ 6-6 และสมการที่ 6-7 จากนั้นจัดให้อยู่ในรูป Octave Bandwidth ดังรูปที่ 6-26 ทำการวัดทั้งหมดด้วยกัน 3 ครั้ง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 6-27 นำค่าที่ได้จากการวิ่งทั้ง 3 ครั้งนำมาเฉลี่ยกันบนโดเมนความถี่และปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ของสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่ได้ให้มีค่า  $w$  เท่ากับ 2 ตามข้อแนะนำใน ISO 8608 จะได้ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางดังสมการ  $G_d(\Omega) = 0.005(\Omega/\Omega_0)^{-2}$  ดังรูปที่ 6-28

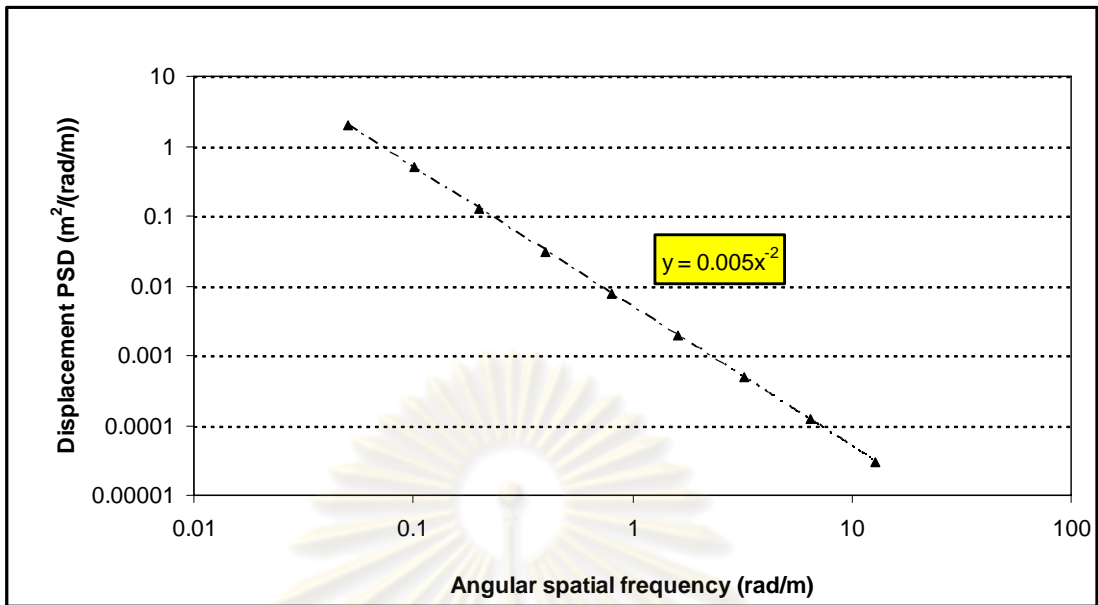




รูปที่ 6-26 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง  $G_d(\Omega)$



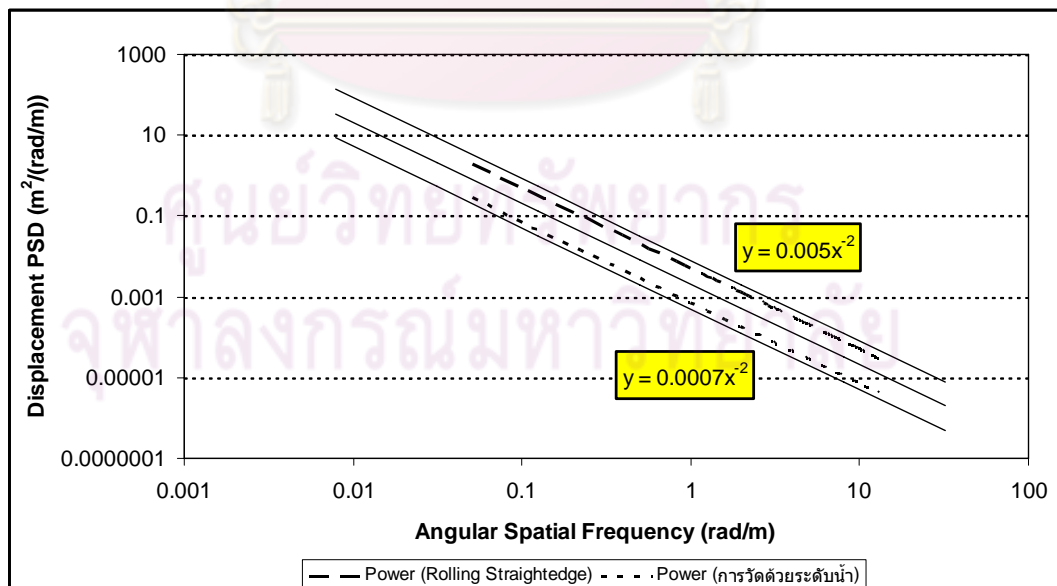
รูปที่ 6-27 ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของผลการวัดด้วย Rolling Straightedge ทั้ง 3 ครั้งในรูป Octave Bandwidth



รูปที่ 6-28 ค่าความหนาแน่นสเปคตรัมกำลังของการกระจัดของการวัดด้วย Rolling Straightedge เมื่อปรับให้สมการความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังมีค่า  $w$  เท่ากับ 2 เพื่อประเมินมาตรฐาน ISO 8608

#### 6.2.1.4.3.3 เปรียบเทียบผลการวัดและการหาค่า Calibration Factor

ผลการเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยอุปกรณ์ Rolling Straightedge ที่ได้กับการวัดลักษณะถนนด้วยระดับน้ำแสดงดังรูปที่ 6-29

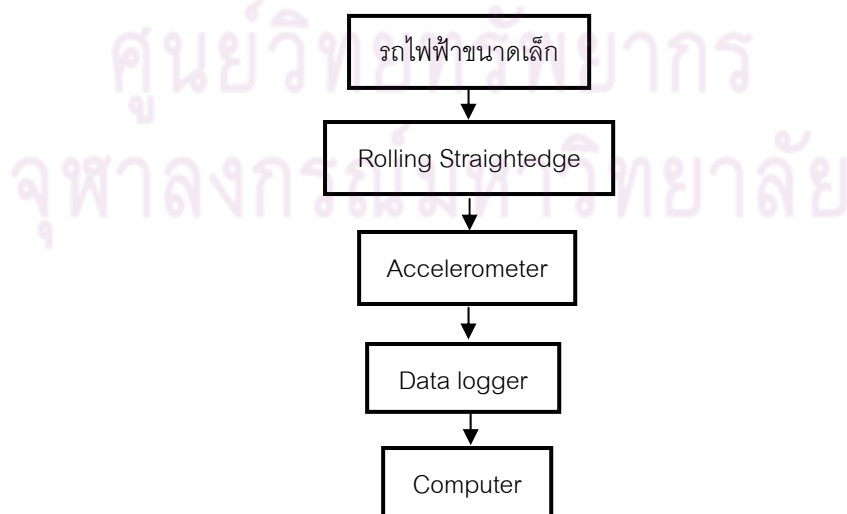


รูปที่ 6-29 เปรียบเทียบผลการวัดค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จาก Rolling Straightedge กับการวัดด้วยระดับน้ำ เส้นสีดำแสดงเส้นแบ่งเกรดของถนนตาม ISO 8608

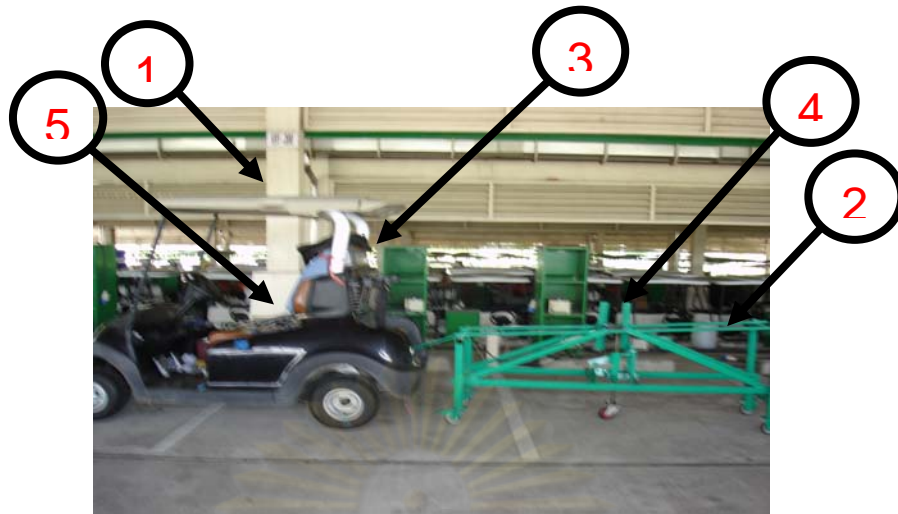
จากรูปที่ 6-29 การทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในการแบ่งประเภทถนนตาม ISO 8608 ค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จาก Rolling Straightedge มีค่ามากกว่าการวัดด้วยระดับน้ำ ประมาณ 1 เกรอดของถนน ดังนั้นเพื่อปรับค่าให้เทียบเท่ากับการวัดลักษณะถนนด้วยระดับน้ำ สมการความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่หาได้จากการวัดด้วย Rolling Straightedge จะคูณด้วยค่า 0.14 ซึ่งมาจากค่าของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังการกระจัดที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่วัดลักษณะถนนด้วยวิธีระดับน้ำหารด้วยค่าของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังการกระจัดที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่วัดด้วย Rolling Straightedge เป็น Calibration Factor เนื่องจากในการประเมิน และแบ่งลำดับชั้นของถนนจะใช้ค่า  $G_d(\Omega_0)$  เป็นเกณฑ์ ส่วนข้อมูลการทดสอบอุปกรณ์ Rolling straightedge ในเส้นทางอื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ซ

### 6.2.2 ขั้นตอนการวัดลักษณะถนนจากสนามกอล์ฟด้วยอุปกรณ์ Rolling Straightedge

ในการวัดลักษณะถนนจากสนามกอล์ฟนั้น จะใช้วิธีการวัดแบบ Rolling Straightedge โดยจะนำมายึดติดกับด้านหลังของรถกอล์ฟเพื่อให้รถกอล์ฟลากไปจึงมีความเร็วเท่ากับรถกอล์ฟ ซึ่งรถกอล์ฟสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ตลอดเวลาเนื่องจากมีกล่องควบคุมความเร็ว จึงทำให้ Rolling Straightedge มีความเร็วคงที่เท่ากับรถกอล์ฟไปด้วย สำหรับการทำให้วัดในครั้งนี้จะกำหนดความเร็วในการวิ่งอยู่ที่ 12 km/h และ ใช้ Accelerometer วัดการเคลื่อนที่ของล้อตรงกลางของ Rolling Straightedge ในรูปของความเร่ง และส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้ามายัง Data Logger ซึ่งจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้ว ส่งข้อมูลผ่านสาย RS-232 มายังตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแผนภูมิในรูปที่ 6-30 ส่วนตำแหน่งของการติดตั้งนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 6-31



รูปที่ 6-30 แผนผังการประกอบอุปกรณ์การเก็บข้อมูลสภาพถนน



รูปที่ 6-31 ภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ 1. รถกอล์ฟ 2. Rolling Straightedge  
3. Data Logger 4. Accelerometer 5. Computer Notebook

วิธีการทดสอบ คือ ขั้นแรกสำรวจสนามกอล์ฟในเส้นทางปกติจากนั้นแบ่งเส้นทางออกเป็น ส่วนๆ ตามที่สังเกตเห็น โดยจะแบ่งเส้นทางตามลักษณะของวัสดุที่ใช้ทำถนน ความเป็นเนินที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนรวมถึงความเก่าของถนน จากนั้นนำรถกอล์ฟที่ติดอุปกรณ์ Rolling Straightedge ขับเข้าไปยังจุดที่ต้องการเก็บสภาพถนนที่ได้แบ่งเป็นช่วงๆ ตามการสังเกตที่ได้กล่าวไปข้างต้น ล้อที่อยู่ตรงกลางจะได้รับแรงกระตุ้นจากพื้นผิวถนน และจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงตามความสูงต่ำของถนน การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในแนวแกนตั้งจะถูกอ่านค่าด้วย Accelerometer ในรูปของความเร่ง โดยใช้ความถี่ในการวัดอยู่ที่ 1000 ครั้งต่อวินาที

รูปแบบของผลการวัดที่ได้จะอยู่ในรูปของความเร่งบนโดเมนเวลาและแปลงให้อยู่ในรูปของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ( $G_d(\Omega)$ ) จากนั้นทำการวัดด้วยกัน 3 ครั้ง นำผลการวัดที่ได้มาจัดให้อยู่ในรูป Octave bandwidth มาเฉลี่ยผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง และเข้าสู่กระบวนการแปลงรูปให้เป็นสมการมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน ISO 8608 และคูณด้วยค่าสอบเทียบเพื่อปรับให้เทียบเท่ากับวิธีที่วัดด้วยระดับน้ำ กระบวนการทั้งหมดนี้ได้สรุปผังแผนภูมิในรูปที่ 6-1 ที่ได้กล่าวไปข้างต้น

### 6.2.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ

ในการผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลต่อไปนี้จะแสดงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่วัดได้ของถนนในสนามกอล์ฟที่ได้แบ่งเป็นช่วงๆตามลักษณะกายภาพจากการสังเกตเบื้องต้นก่อนทำการวัด โดยปรับสมการความหนาแน่นของสเปคตรัมให้ค่ามี  $w$  เท่ากับ 2 ตามข้อแนะนำใน ISO 8608 และได้มีการคูณค่าการสอบเทียบกับระดับน้ำด้วยค่า 0.14 เพื่อปรับให้ค่าที่ได้เทียบเท่ากับผลของการวัดด้วยระดับน้ำ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 6.2.1.4.3) ส่วนภาพของถนนในสนามกอล์ฟในแต่ละช่วงและ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องก่อนการปรับค่า  $w$  ของสมการให้ค่าเท่ากับ 2 และคูณด้วยค่าสอบเทียบจะแสดงไว้ที่ภาคผนวก ค

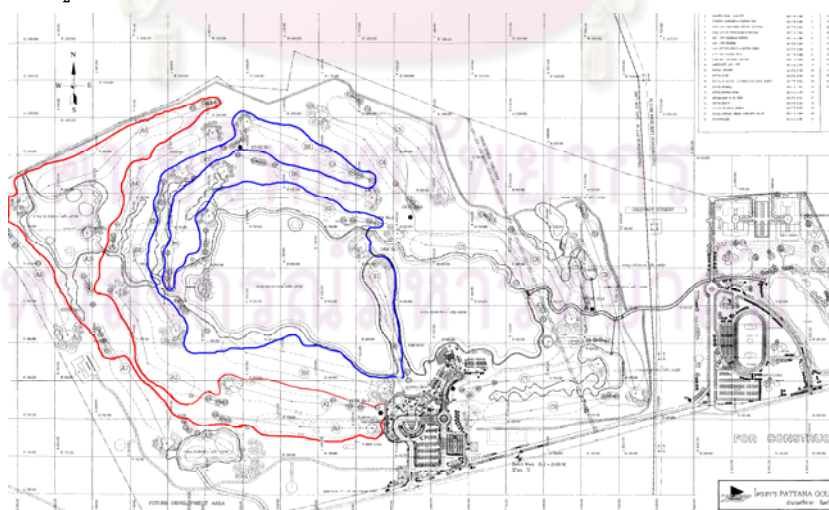
#### 6.2.3.1 ผลลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ไทยพัฒนา สปอร์ต คลับ

##### 6.2.3.1.1 สถานที่ตั้ง

99/89 หมู่ 9 อำเภอ ศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

##### 6.2.3.1.2 สภาพของลักษณะถนนโดยสังเขป

สนามนี้มักใช้ในการแข่งขันระดับใหญ่ๆ ลักษณะจุดเด่นของสนามกอล์ฟแห่งนี้ คือ ถนนในสนามกอล์ฟมีเนินความถี่ต่ำค่อนข้างมาก ถนนส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตไม่ได้มีการลาดยางและมีสภาพค่อนข้างเก่า เส้นทางการเก็บข้อมูลแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ โซน A และ โซน B ส่วนแผนที่ของสนามแสดงไว้ในรูปที่ 6-32



รูปที่ 6-32 ภาพของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ต คลับ



### 6.2.3.1.3 สรุปลักษณะถนนในสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง( $G_d(\Omega_0)$ ) ของสนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้วของพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-5

ตารางที่ 6-5 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่นสเปคตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง(1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 1000 m	1000 m	พบเห็นเนิน และคลื่นความถี่ต่ำชัดเจน ถนนเก่า ขรุขระ	0.00189 m <sup>3</sup>	F
1000 - 1400 m	400 m	พบเห็นเนินบ้างเล็กน้อย ถนนเก่าเห็นรอยแตกเป็นระยะ	0.00162 m <sup>3</sup>	F
1400-1600 m	200 m	พบเห็นเนิน และคลื่นความถี่ต่ำชัดเจน ถนนเก่า ขรุขระ	0.00183 m <sup>3</sup>	F
1600 – 2000 m	400 m	พบเห็นเนินบ้างเล็กน้อย ถนนสภาพค่อนข้างดี	0.00124 m <sup>3</sup>	F
2000 – 2600 m	600 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำชัดเจน ถนนเก่า ขรุขระ	0.00163 m <sup>3</sup>	F
2600 – 2650 m	50 m < 100m	ถนนที่ผิวหน้าเกิดความเสียหาย	ระยะไม่พอวัด	-
2650 – 3450 m	800 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำชัดเจน ถนนเก่า ขรุขระ	0.00202 m <sup>3</sup>	F
3450 -3480 m	400 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำชัดเจน สภาพเก่าและเกิดความเสียหายเนื่องจากรากของต้นไม้ที่ปลูกไว้ 2 ข้างทาง	0.00240 m <sup>3</sup>	G

#### 6.2.3.1.4 สรุปลักษณะถนนในสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ของสนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้วของพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-6

ตารางที่ 6-6 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่นสเปคตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง (1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 450 m	450 m	พบเห็นเนิน และคลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนเก่า ขรุขระ	0.001388 m <sup>3</sup>	F
450 - 550 m	100 m	พบเห็นเนิน และคลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนเก่าเห็นรอยแตกเป็นระยะ ทางลาดขึ้น	0.00139 m <sup>3</sup>	F
550- 650 m	100 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนเก่าเห็นรอยแตกเป็นระยะ	0.00158 m <sup>3</sup>	F
650 – 850 m	200 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำชัดเจน ถนนเก่า ขรุขระ ผิวหน้าถนนหลุดร่อน	0.00215 m <sup>3</sup>	G
850 – 1250 m	400 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนเก่าเห็นรอยถนนค่อนข้างดี	0.0014 m <sup>3</sup>	F

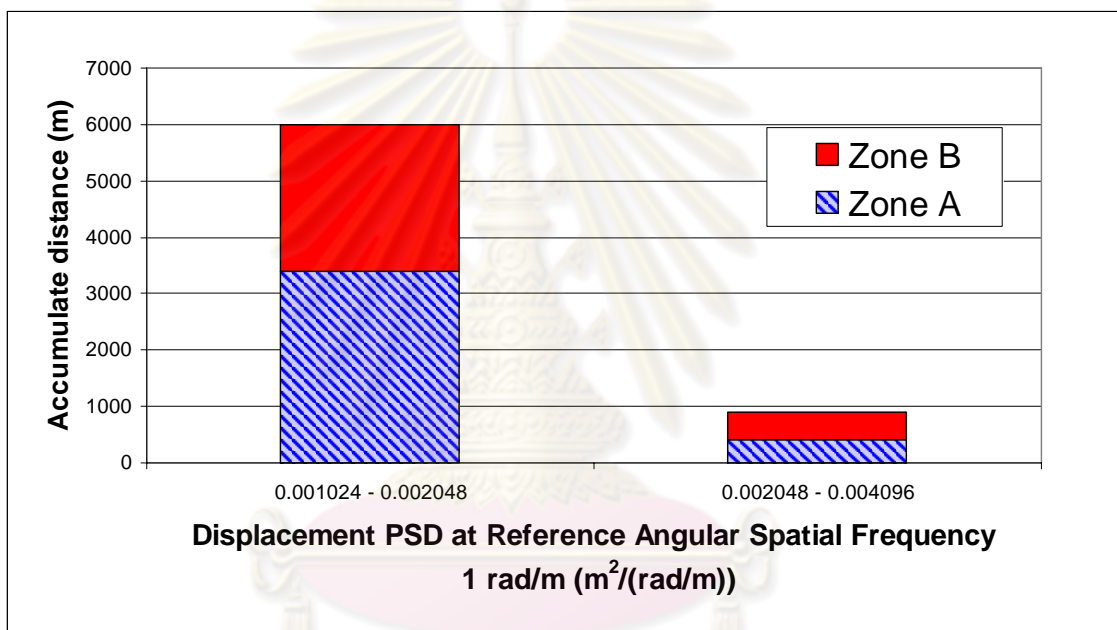
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่น สเปคตรัมกำลังที่ จุดอ้างอิง(1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
850 – 1250 m	400 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนเก่าเห็นรอยถนน ค่อนข้างดี	0.0014 m <sup>3</sup>	F
1350 – 1550 m	500 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนค่อนข้างดี	0.001257 m <sup>3</sup>	F
1550 - 2050 m	1300 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำชัดเจน ถนนเก่า พบเห็นรอยแตกเป็น ระยะ	0.002015 m <sup>3</sup>	F
2050 - 3300 m	1300 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำเล็กน้อย ผิวถนนหลุดร่อนบ้าง	0.00163 m <sup>3</sup>	F

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 6.2.3.1.5 แจกแจงความถี่ของลักษณะถนนที่พบ

สังเกตได้ว่าถนนส่วนใหญ่จะอยู่ในเกรด F ตามมาตรฐาน ISO 8608 เพราะส่วนใหญ่เป็นถนนประเภทเดียวกัน มีพื้นผิววัสดุที่ทำถนนเป็นชนิดเดียวกัน แต่จะต่างกันที่ลักษณะภูมิประเทศ หากบริเวณนั้นสามารถสังเกตความเป็นคลื่นหรือเนินได้ชัดเจนค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังจะมากขึ้นด้วย และถนนที่เก๋ากว่าก็จะมีค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังที่ได้มากขึ้นเช่นกัน เพื่อให้ผลที่ได้มีความละเอียดมากขึ้นจึงได้ขอแบ่งเกรดถนนละเอียดขึ้นไปอีกจากเดิมแต่ละช่วงของเกรดถนนจะห่างกัน 4 เท่าตามมาตรฐาน ISO 8608 ในที่นี้จะขอแบ่งช่วงให้ถี่ขึ้นเป็นที่ละ 2 เท่าในแต่ละช่วงเพื่อให้สามารถแบ่งรายละเอียดได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 6-33



รูปที่ 6-33 ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่ที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสม ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ

ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่พบสามารถคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของระยะทางที่วัดทั้งหมดได้ดังนี้

0.001024 – 0.002048  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 6000 m คิดเป็นร้อยละ 86.96

0.002048 – 0.004096  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 900 m คิดเป็นร้อยละ 13.04

### 6.2.3.2 ผลลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เอิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

#### 6.2.3.2.1 สถานที่ตั้ง

73 ถนน พหลโยธิน กิโลเมตรที่ 37 อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

#### 6.2.3.2.2 สภาพลักษณะถนนโดยสังเขป

สนามนี้เป็นสนามที่สร้างมาเป็นระยะเวลาช้านาน ลักษณะเด่นของสนามกอล์ฟแห่งนี้ คือ ถนนในสนามกอล์ฟเป็นถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยางแต่มีบางส่วนเป็นถนนที่ปูด้วยอิฐหรือมีสะพานไม้สำหรับข้ามน้ำอยู่ ไม่พบเนินหรือคลื่นถนนที่มีความถี่ต่ำเลย เส้นทางการเก็บข้อมูลแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ โซน West และ โซน North ส่วนแผนที่ของสนามแสดงไว้ดังรูปที่ 6-34



รูปที่ 6-34 ภาพสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เอิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 6.2.3.2.3 สรุปลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน West

ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ของสนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้ว ของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน West จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-7

ตารางที่ 6-7 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เฮิร์ด กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน West ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่น สเปคตรัมกำลังที่ จุดอ้างอิง(1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 100 m	100 m	ถนนปูพื้นด้วยอิฐสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่วางตัวสม่ำเสมอ	0.002679 m <sup>3</sup>	G
100 - 3100 m	3000 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000625 m <sup>3</sup>	F
3100 - 3200 m	100 m	ถนนปูพื้นด้วยอิฐสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่วางตัวสม่ำเสมอ	0.001657 m <sup>3</sup>	F
3200 – 3800 m	600 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000471 m <sup>3</sup>	F
3800 – 3900 m	100 m	ถนนปูพื้นด้วยอิฐสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่วางตัวสม่ำเสมอ	0.00265 m <sup>3</sup>	G

ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 6.2.3.2.4 สรุปลักษณะถนนลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เอิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน North

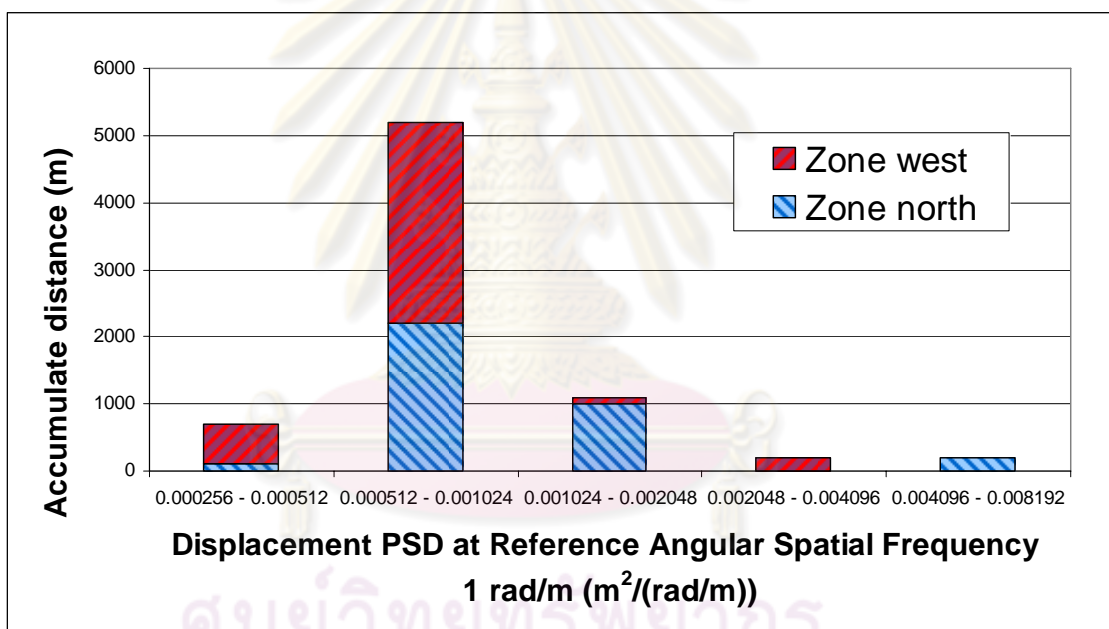
ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ของสนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้ว ของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เอิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน North จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-8

ตารางที่ 6-8 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ชัมมิต ไพร์เอิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน North ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่น สเปคตรัมกำลังที่ จุดอ้างอิง(1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 700 m	700 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000715 m <sup>3</sup>	F
700 - 900 m	200 m	เป็นสะพานไม้วางขวางต่อด้วยเส้นทางที่ปูพื้นด้วยอิฐ	0.001722 m <sup>3</sup>	F
900 - 1000 m	100 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000918 m <sup>3</sup>	F
1000 - 1100 m	100 m	ถนนปูพื้นด้วยอิฐสี่เหลี่ยมตัวหนอนวางตัวไม่สม่ำเสมอ	0.005054 m <sup>3</sup>	G
1100 – 1200 m	100 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.00340 m <sup>3</sup>	E
1200 – 1300 m	100 m	ถนนปูพื้นด้วยอิฐสี่เหลี่ยมตัวหนอนวางตัวไม่สม่ำเสมอ	0.008082 m <sup>3</sup>	G
1300 - 2600 m	1300 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000904 m <sup>3</sup>	F
2600 – 2800 m	200 m	ถนนปูพื้นด้วยอิฐสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่วางตัวสม่ำเสมอ	0.00174 m <sup>3</sup>	F
2800 – 3400 m	600 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.001214 m <sup>3</sup>	F

### 6.2.3.2.5 แจกแจงความถี่ของลักษณะถนนที่พบ

สังเกตได้ว่าถนนส่วนใหญ่ที่จัดเป็นเกรด F ตามมาตรฐาน ISO 8608 เพราะส่วนใหญ่เป็นถนนประเภทเดียวกันมีพื้นผิววัสดุที่ทำถนนเป็นชนิดเดียวกัน คือ เป็นพื้นถนนเทคอนกรีตแต่ไม่ได้ลาดยาง มีบางบริเวณเท่านั้นที่ผิววัสดุทำพื้นเป็นอิฐปูพื้น ซึ่งการวางตัวของอิฐนั้นไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่วัดได้สูงขึ้นไปด้วย สภาพโดยรวมของสนามนี้อยู่ในเขตกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นที่ราบ ผลของภูมิประเทศจึงไม่เห็นเด่นชัด ความแตกต่างของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่ได้จึงขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำถนนมากกว่า เพื่อให้ผลที่ได้มีความละเอียดมากขึ้นจึงจะแบ่งเกรดถนนละเอียดขึ้นไปอีกจากเดิมแต่ละช่วงของเกรดถนนจะห่างกัน 4 เท่าตามมาตรฐาน ISO 8608 ในที่นี้จะขอแบ่งช่วงความถี่เป็นทีละ 2 เท่าในแต่ละช่วงดังรูปที่ 6-35 เพื่อให้สามารถแบ่งรายละเอียดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 6-35 ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสม ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิงที่พบสามารถคิดเป็นร้อยละของระยะทางที่วัดทั้งหมดในสนามนี้ได้ดังนี้

$0.000512 - 0.001024 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  เป็นระยะทาง 5200 m คิดเป็นร้อยละ 71.23

$0.001024 - 0.002048 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  เป็นระยะทาง 1100 m คิดเป็นร้อยละ 15.06

$0.000256 - 0.000512 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  เป็นระยะทาง 700 m คิดเป็นร้อยละ 9.59

$0.002048 - 0.004096 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  เป็นระยะทาง 200 m คิดเป็นร้อยละ 2.74

$0.004096 - 0.008192 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  เป็นระยะทาง 200 m คิดเป็นร้อยละ 2.74

### 6.2.3.3 ผลลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

#### 6.2.3.3.1 สถานที่ตั้ง

99 หมู่ 3 ถนน โพดำริ อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม 73130

#### 6.2.3.3.2 สภาพลักษณะถนนโดยสังเขป

สนามนี้เป็นสนามที่มีการสร้างเป็นเวลานานแล้ว ลักษณะจุดเด่นของสนามกอล์ฟแห่งนี้คือ ถนนเส้นทางเรียบปกติเป็นส่วนใหญ่มีพบบเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถนนส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตไม่ได้มีการลาดยาง แผนที่ของสนามแสดงไว้ดังรูปที่ 6-36



รูปที่ 6-36 ภาพของสนามไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ



### 6.2.3.3.3 สรุปลักษณะถนนในสนามกอล์ฟไดนาสตี

ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ของสนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้ว ของสนามกอล์ฟไดนาสตี จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-9

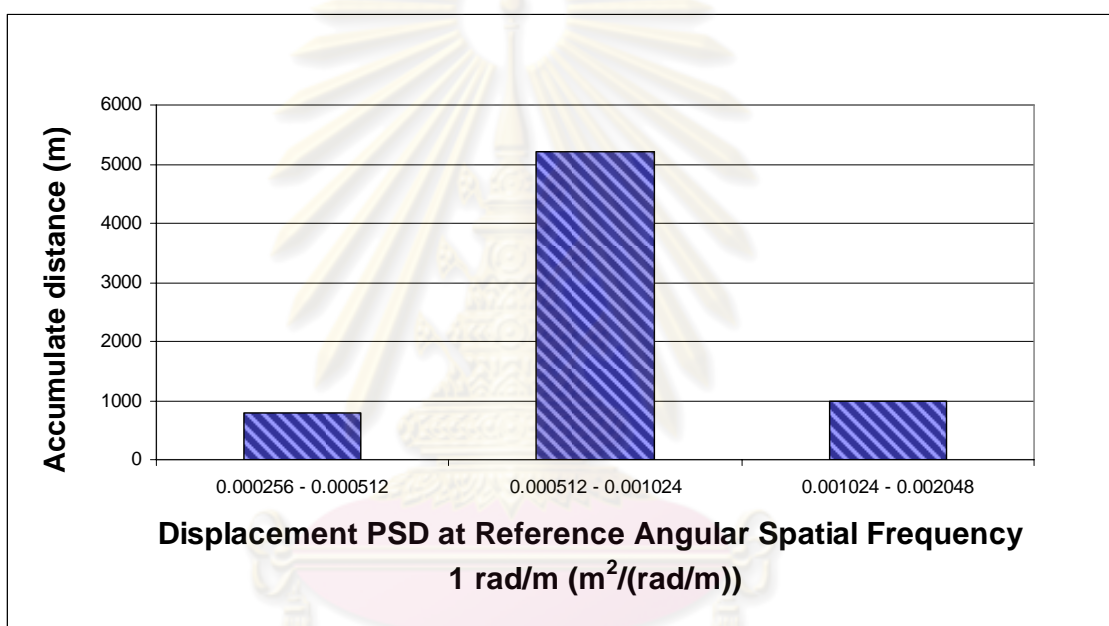
ตารางที่ 6-9 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟไดนาสตี ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง (1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 200 m	200 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000705 m <sup>3</sup>	F
200 - 350 m	150 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก	0.00134 m <sup>3</sup>	F
350 - 2050 m	1700 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000456 m <sup>3</sup>	F
2050 - 2650 m	600 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างเก่า	0.000934 m <sup>3</sup>	F
2650 – 2850 m	200 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000584 m <sup>3</sup>	F
2850 – 3000 m	150 m	ถนนเรียบสังเกตเห็นได้เล็กน้อย สภาพถนนค่อนข้างดี	0.001044 m <sup>3</sup>	F
3000 - 4400 m	1400 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.00073 m <sup>3</sup>	F
4400 – 5100 m	700 m	พบเห็นเนิน คลื่นความถี่ต่ำไม่สูงมากนัก ถนนค่อนข้างเก่า	0.001569 m <sup>3</sup>	F
5100 – 7000 m	1900 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000635 m <sup>3</sup>	F



#### 6.2.3.3.4 แจกแจงความถี่ของลักษณะถนนที่พบ

จะสังเกตเห็นว่าถนนส่วนใหญ่จะอยู่ในเกรด F ตามมาตรฐาน ISO 8608 เพราะส่วนใหญ่เป็นถนนประเภทเดียวกันมีพื้นผิววัสดุที่ทำถนนเป็นชนิดเดียวกัน คือ เป็นพื้นถนนเทคอนกรีตแต่ไม่ได้ลาดยาง บางครั้งจะพบเนินเล็กๆซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้ผลที่ได้มีความละเอียดมากขึ้นจึงแบ่งเกรดถนนละเอียดขึ้นไปอีกจากเดิมแต่ละช่วงของเกรดถนนจะห่างกัน 4 เท่าตามมาตรฐาน ISO 8608 ในที่นี้จะขอแบ่งช่วงความถี่เป็นทีละ 2 เท่าในแต่ละช่วงเพื่อให้สามารถแบ่งรายละเอียดได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 6-37



รูปที่ 6-37 ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสมของสนามกอล์ฟ ไดนาสติก กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่พบสามารถคิดเป็นร้อยละของระยะทางที่วัดทั้งหมดในสนามนี้ได้ดังนี้

0.000512 – 0.001024  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 5200 m คิดเป็นร้อยละ 74.28

0.001024 – 0.002048  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 1000 m คิดเป็นร้อยละ 14.27

0.000256 – 0.000512  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 800 m คิดเป็นร้อยละ 11.43

#### 6.2.3.4 ผลลักษณะถนนสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ

##### 6.2.3.4.1 สถานที่ตั้ง

99 หมู่ 2 ถนนติวานนท์ อำเภอบางกระดี่ จังหวัด ปทุมธานี 12120

##### 6.2.3.4.2 สภาพลักษณะถนนโดยสังเขป

สนามนี้เป็นสนามที่เพิ่งสร้าง ลักษณะจุดเด่นของสนามกอล์ฟแห่งนี้ คือ ถนนในสนามกอล์ฟไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน ถนนส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตไม่ได้มีการลาดยาง เส้นทางการเก็บข้อมูลแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ หลุม 1 - 9 และ หลุม 10 - 18 แผนที่ของสนามแสดงไว้ดังรูปที่ 6-38



รูปที่ 6-38 ภาพสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟ คลับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 6.2.3.4.3 สรุปลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ ในหลุม 1 – 9

ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ของสนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้วของสนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟ ในหลุม 1 – 9 จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-10

ตารางที่ 6-10 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ ในหลุม 1 – 9 ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่น สเปคตรัมกำลังที่ จุดอ้างอิง(1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 500 m	500 m	ถนนเรียบ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000618 m <sup>3</sup>	F
500 - 800 m	300 m	ถนนเรียบ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างเก่า	0.000785 m <sup>3</sup>	F
800 - 1100 m	300 m	ถนนเรียบ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000636 m <sup>3</sup>	F
1100 - 1900 m	800 m	ถนนเรียบ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างเก่า	0.000783 m <sup>3</sup>	F
1900 – 2700 m	800 m	ถนนเรียบ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000680 m <sup>3</sup>	F
2700 – 2900 m	200 m	ถนนเรียบ มีเนินเล็กน้อย สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000946 m <sup>3</sup>	F

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 6.2.3.4.4 สรุปลักษณะถนนสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ ในหลุม 10 – 18

ลักษณะของถนนในแต่ละช่วงที่ทำการวัด ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น และผลของค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิงของ ( $G_d(\Omega_0)$ ) สนามกอล์ฟที่ผ่านกระบวนการจัดรูปสมการตามมาตรฐาน ISO 8608 แล้วของสนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟ ในหลุม 10 – 18 จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6-11

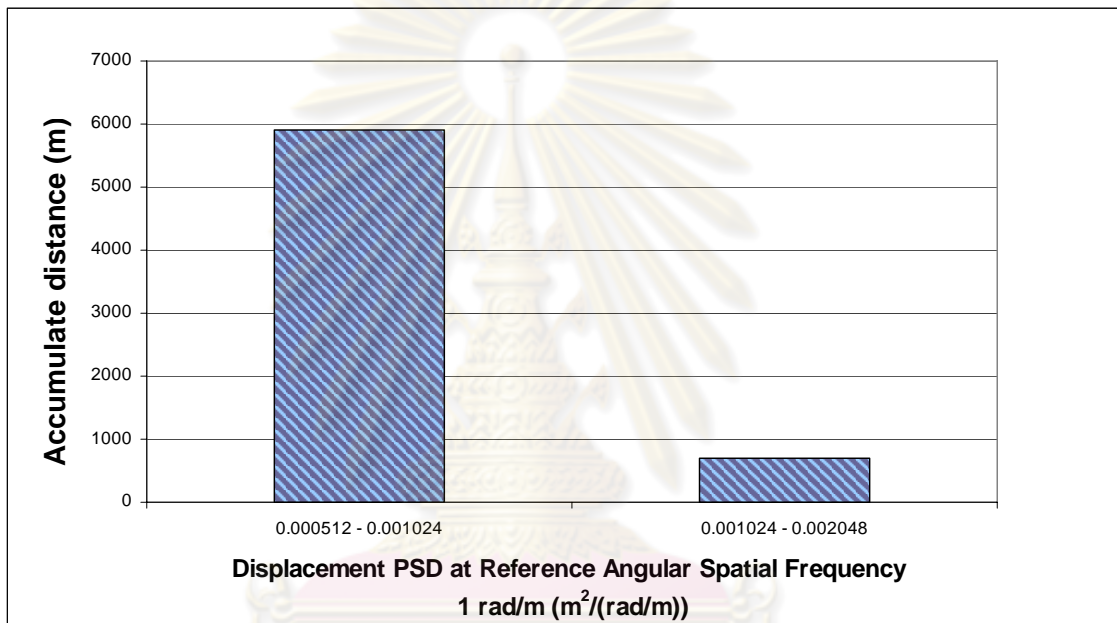
ตารางที่ 6-11 ผลการวัดลักษณะถนนของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ ในหลุม 9 – 18 ในแต่ละช่วง

ช่วงการวัด	ระยะทางที่พบ	ลักษณะที่พบ	ค่าความหนาแน่น สเปคตรัมกำลังที่ จุดอ้างอิง(1 rad/m)	แบ่งเกรดถนนตาม ISO 8608
0 – 200 m	200 m	ถนนเรียบ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000726 m <sup>3</sup>	F
200 - 900 m	700 m	ถนนเรียบ มีเนินเล็กน้อย สภาพถนนค่อนข้างดี	0.00113 m <sup>3</sup>	F
900 - 1900 m	1000 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000767 m <sup>3</sup>	F
1900 - 3100 m	2200 m	ถนนเรียบ มีเนินเล็กน้อย สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000992 m <sup>3</sup>	F
3100 – 3200 m	100 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000662 m <sup>3</sup>	F
3200 – 3300 m	100 m	ถนนเรียบ มีเนินเล็กน้อย สภาพถนนค่อนข้างดี	0.00092 m <sup>3</sup>	F
3300 – 3700 m	200 m	ถนนเรียบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สภาพถนนค่อนข้างดี	0.000609 m <sup>3</sup>	F

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 6.2.3.4.5 แจกแจงความถี่ของลักษณะถนนที่พบ

จะสังเกตได้ว่าถนนส่วนใหญ่จะอยู่ในเกรด F ตามมาตรฐาน ISO 8608 เพราะส่วนใหญ่เป็นถนนประเภทเดียวกันมีพื้นผิววัสดุที่ทำถนนเป็นชนิดเดียวกัน คือ เป็นพื้นถนนเทคอนกรีตไม่ได้ลาดยาง อีกทั้งเป็นที่ราบไม่สามารถสังเกตเนินได้ชัดเจน จึงทำให้ผลที่ได้เกาะกลุ่มกันมาก เพื่อให้ผลที่ได้มีความละเอียดมากขึ้นจึงจะขอแบ่งเกรดถนนละเอียดขึ้นไปอีกจากเดิมแต่ช่วงของเกรดถนนจะห่างกัน 4 เท่าตามมาตรฐาน ISO 8608 ในที่นี้จะขอแบ่งช่วงความถี่เป็นทีละ 2 เท่าในแต่ละช่วงเพื่อให้สามารถแบ่งรายละเอียดได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 6-39



รูปที่ 6-39 ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสมของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ

ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่พบสามารถคิดเป็นร้อยละของระยะทางที่วัดทั้งหมดในสนามนี้ได้ดังนี้

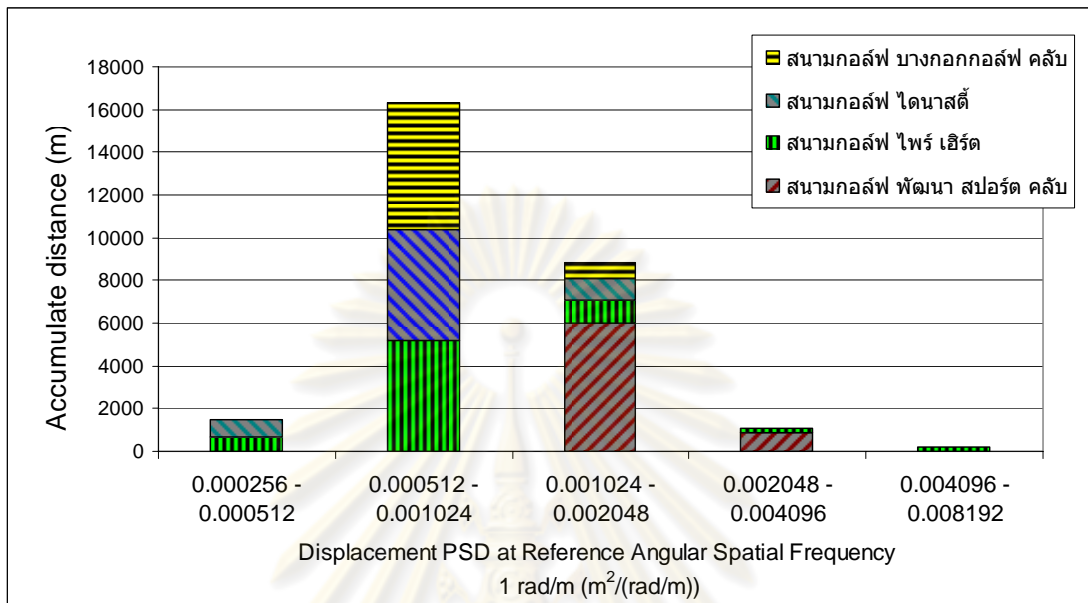
0.000512 – 0.001024  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 5900 m คิดเป็นร้อยละ 89.34

0.001024 – 0.002048  $m^2/(rad/m)$  เป็นระยะทาง 700 m คิดเป็นร้อยละ 10.61



### 6.2.3.5 ผลแจกแจงความถี่ของลักษณะถนนทั้ง 4 สนามโดยแบ่งลักษณะถนนตามค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง

ผลการแจกแจงความถี่รวมทั้ง 4 สนาม ตามระยะทางที่วัดทั้งสิ้น 27900 m ดังในรูปที่ 6-40



รูปที่ 6-40 ผลการแจกแจงค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ตามระยะทางสะสมของสนามกอล์ฟ ทั้ง 4 สนาม

ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่พบสามารถคิดเป็นร้อยละของระยะทางที่วัดทั้งหมด 4 สนามกอล์ฟ ได้ดังนี้

0.000512 – 0.001024  $m^2 / (rad / m)$  พบเป็นระยะทาง 16300 m คิดเป็นร้อยละ 58.43 ซึ่งมีค่ากลางของช่วงนี้อยู่ที่ 0.000724  $m^2 / (rad / m)$

0.001024 – 0.002048  $m^2 / (rad / m)$  พบเป็นระยะทาง 8800 m คิดเป็นร้อยละ 31.54 ซึ่งมีค่ากลางของช่วงนี้อยู่ที่ 0.001448  $m^2 / (rad / m)$

0.000256 – 0.000512  $m^2 / (rad / m)$  พบเป็นระยะทาง 1500 m คิดเป็นร้อยละ 5.38 ซึ่งมีค่ากลางของช่วงนี้อยู่ที่ 0.000362  $m^2 / (rad / m)$

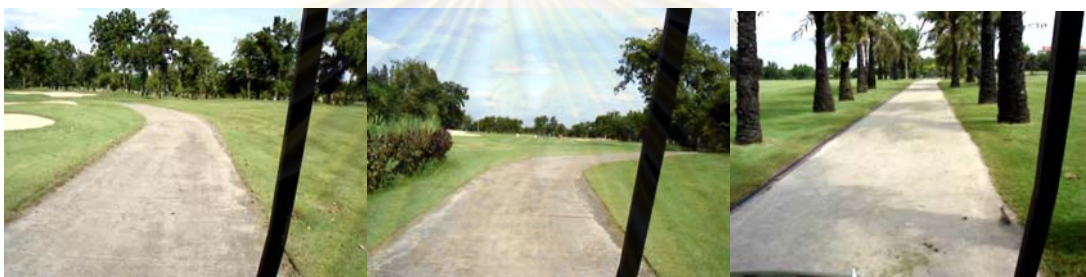
0.002048 – 0.004096  $m^2 / (rad / m)$  พบเป็นระยะทาง 1100 m คิดเป็นร้อยละ 3.94 ซึ่งมีค่ากลางของช่วงนี้อยู่ที่ 0.002896  $m^2 / (rad / m)$

0.004096 – 0.008192  $m^2 / (rad / m)$  พบเป็นระยะทาง 200 m คิดเป็นร้อยละ 0.720 ซึ่งมีค่ากลางของช่วงนี้อยู่ที่ 0.005792  $m^2 / (rad / m)$

### 6.2.3.6 ผลแจกแจงความถี่ของลักษณะถนนทั้ง 4 สนามถนนที่พบโดยแบ่ง ลักษณะถนนจากการสังเกตทางกายภาพ

เนื่องจากเพื่อให้ข้อมูลมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นจึงขอแจกแจงความถี่ของถนนตามการสังเกตร่วมด้วย จากการสำรวจผล 4 สนามสามารถแจกแจงรายละเอียดตามลักษณะถนนทางกายภาพได้ ดังนี้

เขตทางคอนกรีตไม่ได้ลาดยาง ซึ่งไม่สามารถสังเกตคลื่นความถี่ต่ำได้อย่างชัดเจนหรืออาจจะสังเกตได้เล็กน้อยดังรูปที่ 6-41 ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) วัดได้ มีค่าอยู่ระหว่าง  $0.000256 - 0.001214 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  พบเห็นเป็นระยะทาง 18400 เมตร คิดเป็นร้อยละ 64.82 ของที่วัดมาทั้งหมด



รูปที่ 6-41 ลักษณะของถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยางที่ไม่สามารถสังเกตคลื่นความถี่ต่ำได้

เขตทางคอนกรีตไม่ได้ลาดยาง สามารถสังเกตเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำได้ชัดเจน ดังรูปที่ 6-42 ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) วัดได้ อยู่ระหว่าง  $0.001024 - 0.002403 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  พบเห็นเป็นระยะทาง 9100 เมตร คิดเป็นร้อยละ 32 ของที่วัดมาทั้งหมด



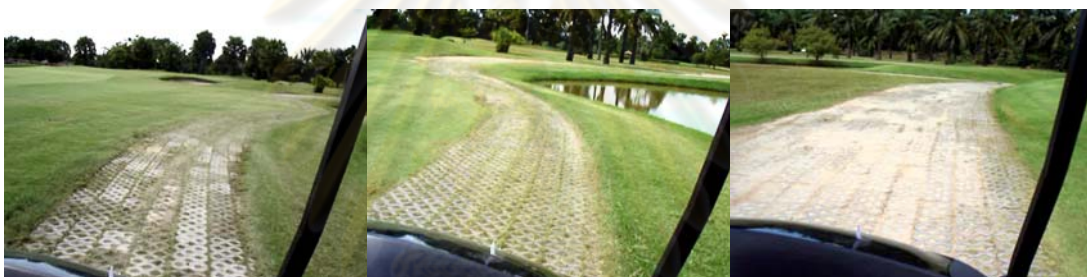
รูปที่ 6-42 ถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยางที่สังเกตคลื่นความถี่ต่ำได้

เขตทางขรุขระ เป็นบริเวณถนนที่ไม่ได้มีการเทคอนกรีตใช้วัสดุพื้นทำทางหรือบริเวณสะพานเป็นไม้วางขวาง ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง  $0.0016 - 0.008151 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  พบเห็นเป็นระยะทาง 850 เมตร คิดเป็นร้อยละ

3.025 ของที่วัดมาทั้งหมด และพบว่าหากวัสดุทำเส้นทางมีขนาดใหญ่รอยต่อน้อย เช่น กรณีวัสดุรูปสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ดังรูปที่ 6-43 ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่วัดได้มีค่าไม่สูงมากอยู่ระหว่าง  $0.001600 - 0.002700 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  ส่วนวัสดุทำเส้นทางมีขนาดเล็กกรวยต่อมาก เช่น กรณีวัสดุตัวหนอนดังรูปที่ 6-44 ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) ที่วัดได้มีค่าสูงมากอยู่ระหว่าง  $0.00500 - 0.009000 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$



รูปที่ 6-43 บริเวณถนนที่ใช้วัสดุสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ปูพื้นทำทาง



รูปที่ 6-44 บริเวณถนนที่ใช้วัสดุตัวหนอนขนาดเล็กปูพื้นทำทาง

#### 6.2.3.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากข้อมูลทางสถิติที่ได้เก็บมาสามารถนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้ดังต่อไปนี้

ในกรณีที่แจกแจงความถี่ของถนนที่พบตามความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) พบว่าฐานนิยมของการเก็บข้อมูลอยู่ที่  $0.000512 - 0.001024 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  ดังนั้นหากจะสร้างสมการลักษณะถนนที่ได้เป็นตัวแทนของถนนในช่วงนี้จึงใช้ค่ากลาง คือ  $0.000724 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้  $G_d(\Omega) = 0.000724 \cdot (\Omega / \Omega_0)^{-2}$  ซึ่งจะนำมาใช้เป็นสมการในการออกแบบจำลองลักษณะถนนต่อไป

ในกรณีที่แจกแจงความถี่ของถนนที่พบจากการสังเกตจะพบว่าเขตทางคอนกรีตไม่ได้ลาดยางซึ่งไม่สามารถเห็นความถี่ต่ำได้ชัดเจนหรือเห็นเพียงเล็กน้อย พบเห็นมากที่สุดซึ่งมี ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) อยู่ระหว่าง  $0.000256 - 0.001214 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$



### 6.3 แบบจำลองลักษณะถนน

ในการจำลองลักษณะถนนในครั้งนี้จะเลือกใช้สมการลักษณะถนนตามข้อกำหนดของ ISO 8608 และจากผลการวัดตามที่ได้กล่าวในข้างต้น พบว่าสนามกอล์ฟส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) อยู่ที่ระหว่าง  $0.000512 - 0.001024 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  จึงจะใช้ค่ากลางระหว่าง 2 ค่านี้ในการแสดงการใช้งานของถนน คือ ค่า  $0.000724 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  ซึ่งเป็นถนนเกรด F ช่วงต้นเขียนเป็นสมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังการกระจัดของถนนได้ดังนี้

$$G_d(\Omega) = 0.000724 \cdot (\Omega / \Omega_0)^{-2}$$

โดยมีขั้นตอนการจำลองดังนี้

#### 6.3.1 กำหนดสภาวะเงื่อนไขในการออกแบบแบบจำลองลักษณะถนนจำลอง

ในการสร้างลักษณะถนนนั้นเบื้องต้นจะต้องรู้ถึงจุดประสงค์ของการใช้งานเพื่อกำหนดลักษณะถนนที่ถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานในการออกแบบได้ ซึ่งในที่นี้จะออกแบบลักษณะถนนเพื่อใช้ประเมินความสะดวกสบายจากการขับขีตาม ISO 2631-1 จะใช้ช่วงความถี่ที่แนะนำอยู่ที่ 1- 80 Hz ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งในการจำลองลักษณะถนน คือ ความเร็วรถกอล์ฟสำหรับจำลองการเคลื่อนที่ ในที่นี้ถูกกำหนดอยู่ที่ความเร็ว 22 km/h (6.111 m/s) เมื่อนำความถี่ที่แนะนำดังกล่าวคำนวณเทียบกับความเร็วรถกอล์ฟ ขอบเขตการจำลองลักษณะถนนจึงควรมีความถี่อยู่ในช่วงความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง (Spatial Frequency) 0.1636 – 13.09 cycle/m ดังนั้นตามทฤษฎี Nyquist criterion [20] จะต้องให้ความถี่ของการจำลองมีมากกว่าค่า 2 เท่าของความถี่สูงสุดที่สนใจ จึงควรจำลองด้วยความถี่อย่างน้อยที่สุด คือ 26.18 cycle/m และเพื่อการสอบเทียบกับการขับขีรถกอล์ฟจริงจึงควรจำลองเป็นระยะทาง 100 m เทียบเท่ากับการทวนสอบจริงในสนามกอล์ฟในบทที่ 9 ต่อไป เนื่องด้วยการจำลองถนนในครั้งนี้จุดประสงค์เพื่อการศึกษาความเร่งของมวลสปริงรองรับในเงื่อนไขที่วิ่งด้วยความเร็ว 22 km/h เมื่อคำนวณกับระยะทางในการจำลองจะพบว่าใช้เวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ทั้งหมด 16.3607 วินาที

ในการจำลองถนนครั้งนี้เพื่อให้ผลที่ได้มีความละเอียดและถูกต้องแม่นยำขึ้น ดังนั้นในการจำลองลักษณะถนนจะใช้สัญญาณที่มีความถี่สูง 100000 Hz จึงมีจำนวนจุดในการจำลองถนนทั้งสิ้น 1636070 จุด บนเส้นทางของถนนจำลอง 100 m เมื่อคำนวณกับความเร็รถกอล์ฟที่ 22 km/h จะได้ความถี่ที่ขึ้นกับระยะทาง ( $n$ ) ในการเก็บอยู่ที่ 16366 cycle/m ซึ่งเพียงพอต่อการจำลองถนนดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

### 6.3.2 กำหนดสมการลักษณะถนนที่จะใช้ในแบบจำลอง

ในการสร้างลักษณะถนนจำลองนั้นมีเงื่อนไขสำคัญ คือ สภาพเส้นทางของถนนที่ต้องการมีสมการความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของถนนเป็นอย่างไรและต้องการให้เป็นหน่วยใด เช่น อยู่ในรูปของความสูงของพื้นเทียบกับระยะทาง ความชันของถนนเทียบกับระยะทาง หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชันของถนนเทียบกับระยะทาง แล้วแต่จุดประสงค์ของการใช้งาน

จากผลการทดลอง ฐานนิยมข้อมูลทางสถิติที่เป็นตัวแทนของสนามในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล มีสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน (Displacement PSD) เป็นดังนี้

$$G_d(\Omega) = 0.000724(\Omega / \Omega_0)^{-2}$$

สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง (Velocity PSD) เป็นดังนี้

$$G_v(\Omega) = 0.000724(\Omega / \Omega_0)$$

สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน (Acceleration PSD) เป็นดังนี้

$$G_a(\Omega) = 0.000724(\Omega / \Omega_0)^2$$

ในงานวิจัยครั้งนี้ต้องการลักษณะถนนที่อยู่ในรูปของความสูงของพื้นเทียบกับระยะทาง เพราะเป็นรูปแบบของลักษณะถนนที่เข้าใจง่ายที่สุด ซึ่งหามาจากสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน (Displacement PSD) และต้องคำนวณมาจากความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของถนน (Velocity PSD) อีกที ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 6.3.3

### 6.3.3 สร้างสัญญาณแบบสุ่มและตัดแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณของถนน

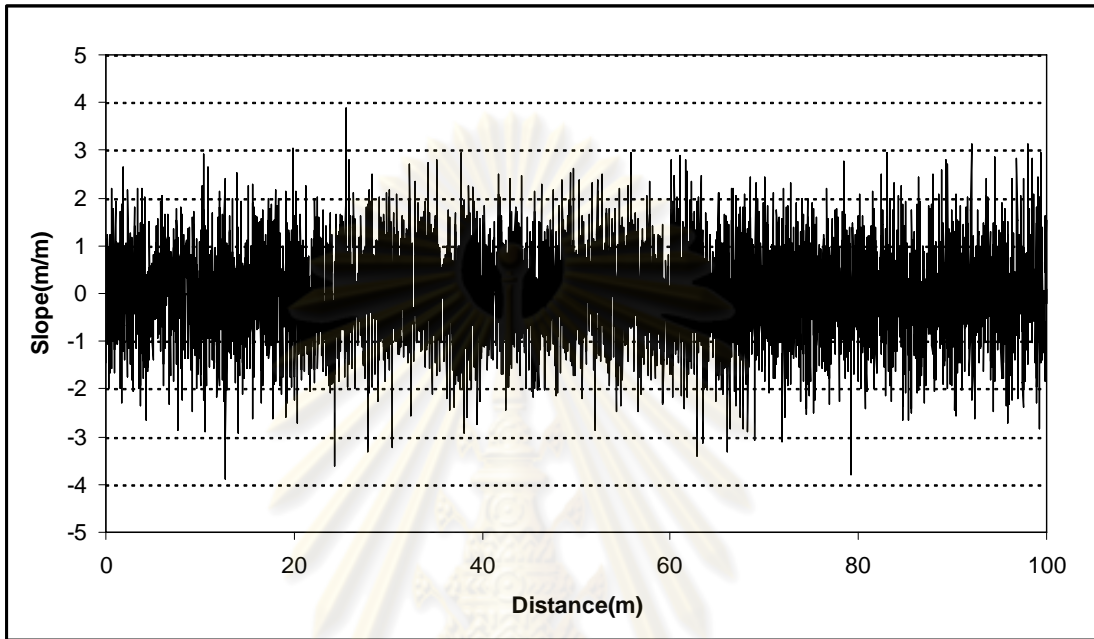
เนื่องจากคลื่นถนนเป็นสัญญาณแบบสุ่มที่มีทุกความถี่ตามที่กล่าวไว้ใน หนังสือ Fundamentals of Vehicle Dynamics [21] ของ Thomas D.Gillespie ว่าลักษณะของถนนจัดเป็นสัญญาณแบบสุ่มที่มีความถี่เป็นช่วงกว้าง (Broad-band Random Signals) ดังนั้นสามารถอธิบายลักษณะของถนนในเชิงทางสถิติศาสตร์ได้

ดังนั้นในการจำลองลักษณะถนนจะเลือกให้ค่าสุ่มทางสถิติที่เรียกว่า White Gaussian Noise ตามวิธีของ Semiha Turkay, Huseyin Akcay [17] ซึ่งเป็นสัญญาณแบบสุ่มที่ให้การกระจายตัวแบบ Gaussian distribution และให้ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่มีขนาดใกล้เคียงกันทุกความถี่ ด้วยค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของสัญญาณที่มีขนาดใกล้เคียง

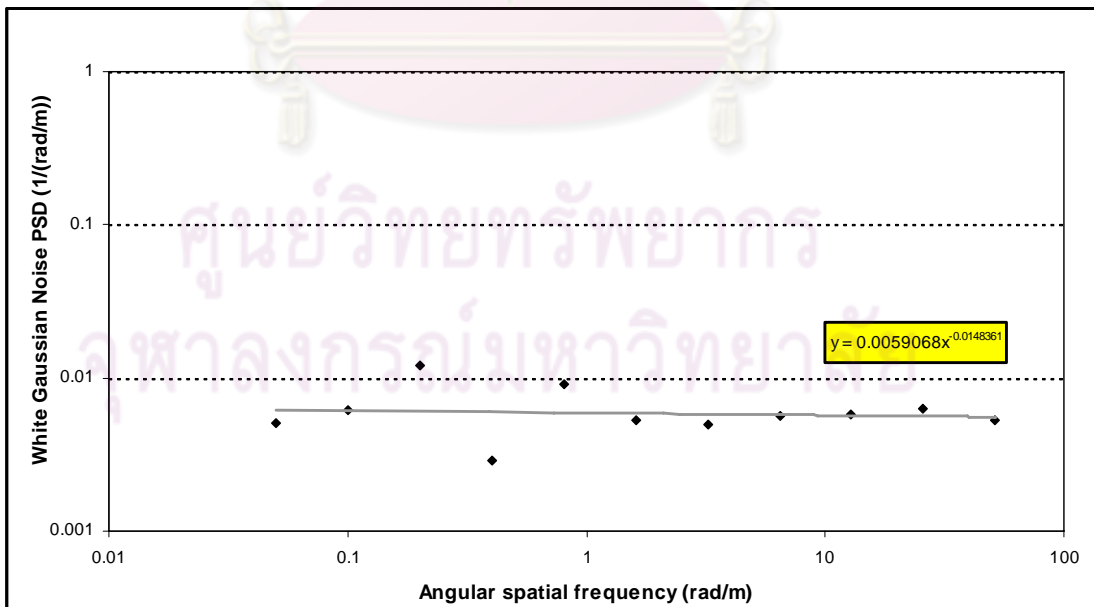


กันทุกความถี่ จึงเหมาะกับการจำลองถนนให้อยู่ในรูปของสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง  $G_v(\Omega)$  มากที่สุด

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในจำลองลักษณะถนนจะใช้สัญญาณ White Gaussian Noise ที่ความถี่ 100000 ครั้งต่อวินาที จึงมีจำนวนจุดทั้งสิ้น 1636070 จุด โดยแสดงในรูปที่ 6-45

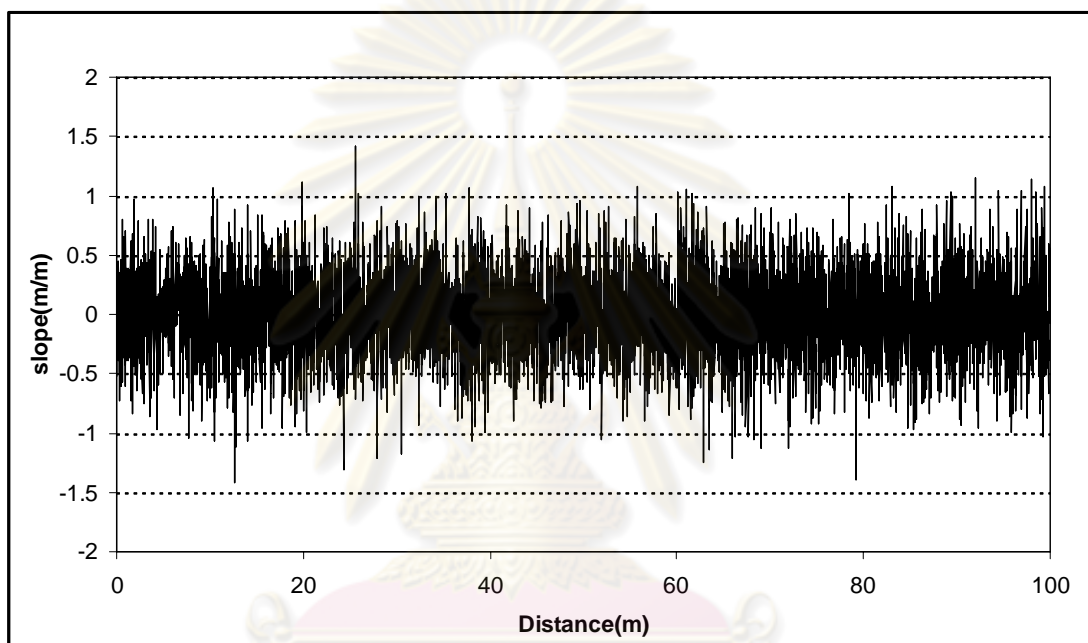


รูปที่ 6-45 สัญญาณ White Gaussian Noise จำนวน 1636070 จุด บนถนนจำลอง 100 m



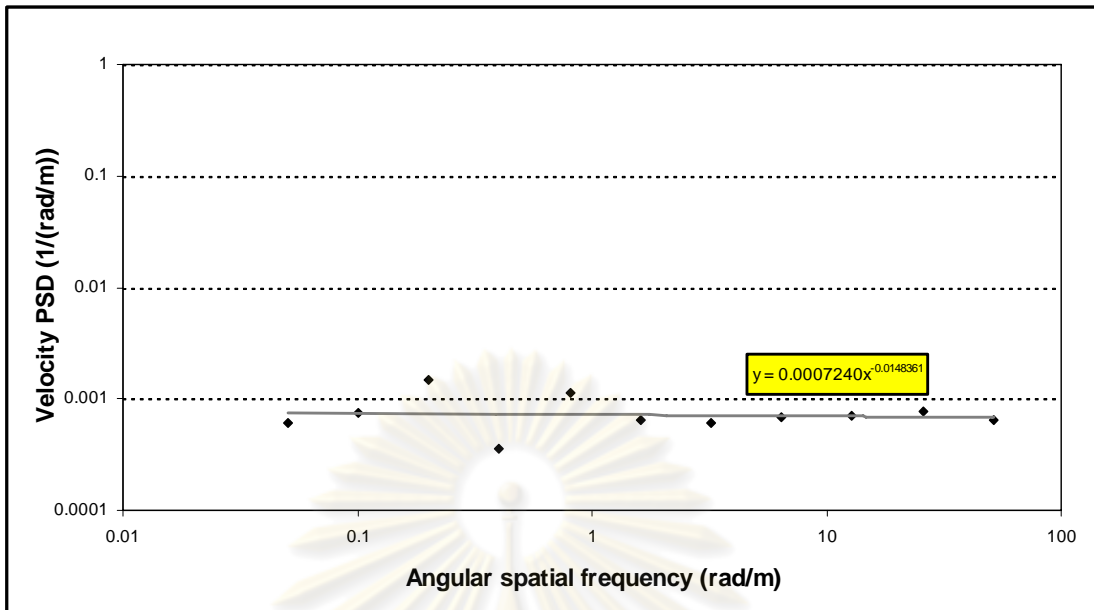
รูปที่ 6-46 ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันของสัญญาณ White Gaussian Noise ในรูป Octave Bandwidth

สัญญาณของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันของถนนในรูป Octave Bandwidth แสดงในรูปที่ 6-46 และมีสมการความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของความชันของถนนเท่ากับ  $G_v(\Omega) = 0.005907 (\Omega/\Omega_0)$  ซึ่งในการสร้างลักษณะจำลองของถนนในครั้งนี้ต้องการสมการความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของความชันของถนน  $G_v(\Omega) = 0.000724 (\Omega/\Omega_0)$  จึงทำการปรับเปลี่ยนโดยหารด้วย 2.8565 (มาจากค่า  $\sqrt{0.005907/0.000724}$ ) เพื่อให้ขนาดของแต่ละความถี่ลดลง สัญญาณใหม่ที่ได้แสดงในรูปที่ 6-47 ส่วนสัญญาณของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันของถนนในรูป Octave Bandwidth แสดงไว้ในรูปที่ 6-48



รูปที่ 6-47 สัญญาณความชันของถนนที่ตำแหน่งต่างๆหลังการปรับเปลี่ยน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

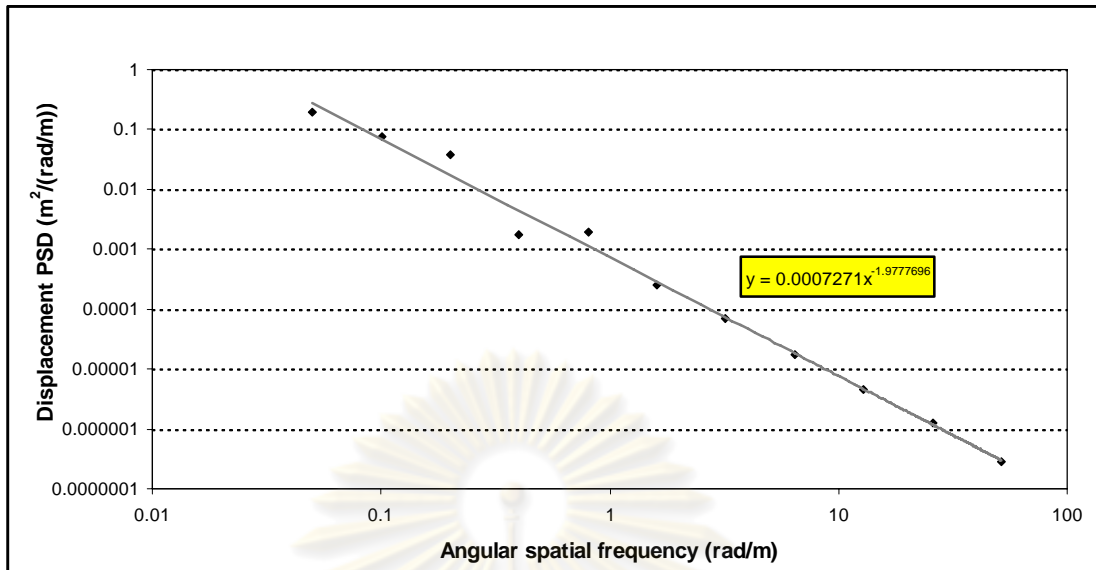


รูปที่ 6-48 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความชันบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของสัญญาณในรูป Octave Bandwidth หลังการปรับเปลี่ยนเป็นความชันของถนน

ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น การใช้ลักษณะถนนในรูปแบบของความสูงของพื้นถนนเทียบกับระยะทาง ให้นำสัญญาณของความชันของถนนที่ตำแหน่งต่างๆ มาทำปฏิยานุพันธ์ สัญญาณใหม่หลังจากการปฏิยานุพันธ์แล้ว แสดงในรูปที่ 6-49 ส่วนสัญญาณของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของถนนในรูป Octave Bandwidth แสดงไว้ในรูปที่ 6-50



รูปที่ 6-49 สัญญาณความสูงของถนนที่ตำแหน่งต่างๆหลังการปรับเปลี่ยน



รูปที่ 6-50 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางของสัญญาณในรูป Octave Bandwidth หลังการปรับเปลี่ยน

สัญญาณในรูปที่ 6-50 จะเห็นได้ว่าสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่ต้องการ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000724(\Omega/\Omega_0)^{-2}$  ส่วนสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่จำลองได้มีค่า  $G_d(\Omega) = 0.0007271(\Omega/\Omega_0)^{-2}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ต้องการเพียงพอแล้วจึงนำสัญญาณนี้ไปใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรองรับต่อไป

#### 6.4 สรุปผลการวัดลักษณะถนน

1. จากการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟทั้ง 4 สนาม ลักษณะถนนที่เป็นตัวแทนของสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลควมมีสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้ง ดังนี้

$$G_d(\Omega) = 0.000724(\Omega/\Omega_0)^{-2}$$

2. จากสมการในข้อที่ 1 สามารถกำหนดแบบจำลองลักษณะถนนในรูปแบบความสูงของพื้นถนนเทียบกับระยะทางได้ดังรูปที่ 6-49

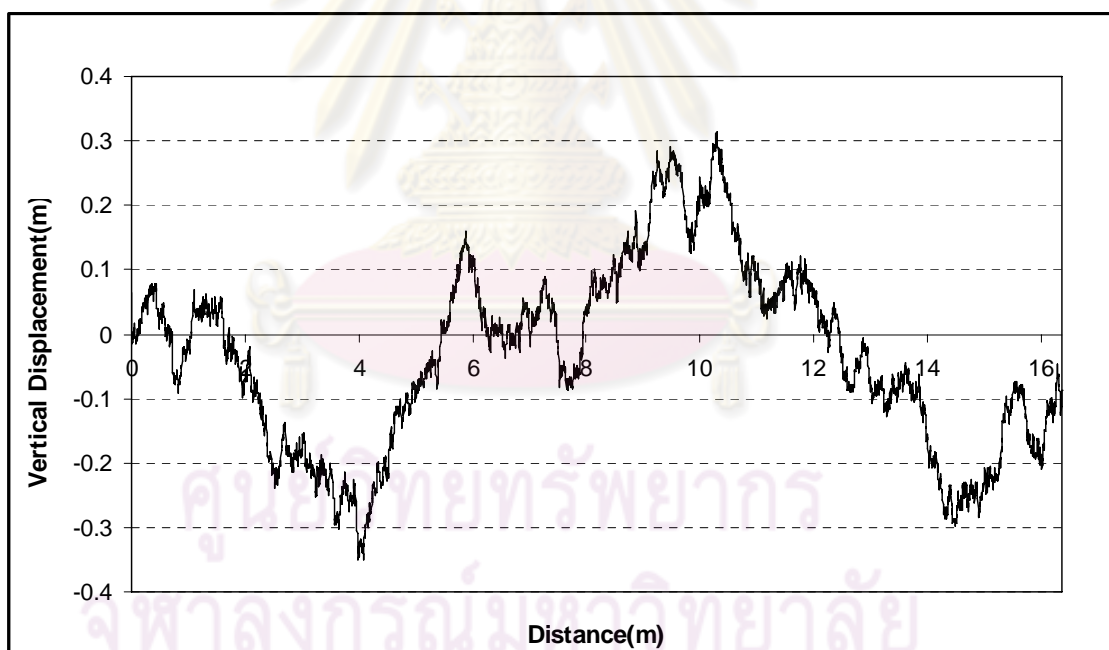
## บทที่ 7

### การจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบระบบรองรับที่ได้มาใช้กับแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่

ในบทนี้กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟโดยใช้ข้อมูลแบบจำลองถนนที่ได้มาใช้กับแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ ซึ่งมาจากแบบจำลองรถกอล์ฟในบทที่ 5 และแบบจำลองถนนในบทที่ 6 นำข้อมูลแบบจำลองถนนที่ได้มาใช้กับแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ เพื่อดูความเร่งของมวลสปริงรองรับ ณ เวลาต่างๆ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งกล่าวถึงเงื่อนไขในการจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อกำหนดขอบเขตในการจำลอง และส่วนที่สองแสดงขั้นตอนการได้มาของความเร่งของมวลสปริงรองรับ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ

#### 7.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่

ในการจำลองการเคลื่อนที่ในงานวิจัยครั้งนี้กำหนดให้รถกอล์ฟมีความเร็ว 22 km/h หรือ 6.111 m/s ดังนั้นจะได้สัญญาณการขจัดของถนนเทียบกับเวลาดังรูปที่ 7-1



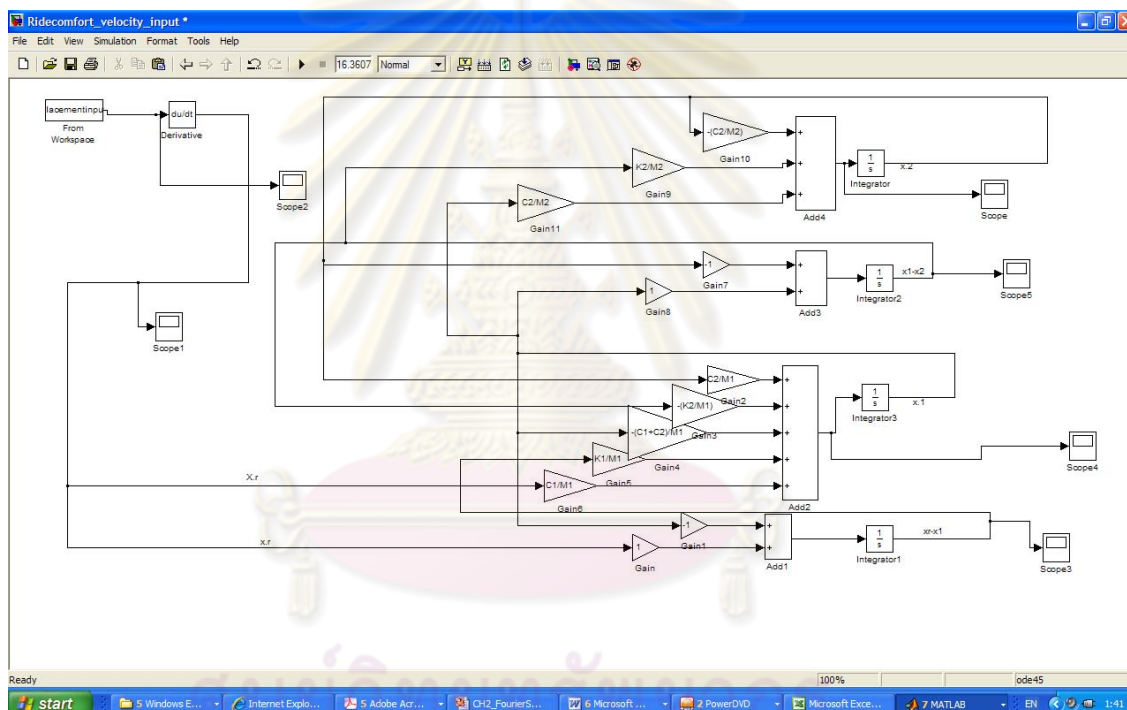
รูปที่ 7-1 สัญญาณที่จะใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ

ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้มาจากสัญญาณสูงของถนนที่ระยะทางต่างๆ คูณกับความเร็วของรถกอล์ฟซึ่งที่นี้กำหนดไว้ที่ 22 km/h ซึ่งระยะทางในแบบจำลองถนนอยู่ที่ 100 m ดังนั้นเวลาในการจำลองจริงอยู่ที่ 16.3067 วินาที ความถี่ในการเก็บค่าอยู่ที่ 100000 ครั้งต่อวินาที ซึ่งความถี่ในการเก็บค่าที่มากจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณมากยิ่งขึ้น



## 7.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับ

สัญญาณที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับในแบบจำลองรถกอล์ฟแบบหนึ่งนั่นก็คือ สัญญาณความสูงของถนน ณ เวลาต่างๆ สัญญาณที่ได้นี้จะนำมาคำนวณตามสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองรถกอล์ฟแบบหนึ่งนั่นที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของความเร่งของมวลสปริงรองรับบนโดเมนเวลา ตามเงื่อนไขตัวแปรสภาวะการทำงานจริงที่กำหนดไว้ในบทที่ 4 โดยใช้ Block diagram model ในโปรแกรม MATLAB & SIMULINK ดังรูปที่ 7-2 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปประเมินความสะดักสวายจากการขับขี่ในบทที่ 8 ต่อไป ขั้นตอนที่กำลังกล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถแสดงในแผนภูมิที่ 7-3



รูปที่ 7-2 ภาพแสดง Block diagram model ในโปรแกรม MATLAB & SIMULINK ที่ได้จัดทำขึ้น



รูปที่ 7-3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ โดยใช้ข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB & SIMULINK

## บทที่ 8

### การประเมินระดับความสะทกสวายจากการซัซซึและการวิเคราะห์ผลที่ได้

ในบทนี้กล่าวถึงการประเมินระดับความสะทกสวายจากการซัซซึและการวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกว่าด้วยการแปลงสัญญาณความเร่งของมวลสปริงรองรับบนโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่เพื่อนำไปใช้ประเมินความสะทกสวายตามมาตรฐาน ISO 2631-1 และส่วนที่สองจะเป็นการนำค่าความเร่งของมวลสปริงรองรับบนโดเมนความถี่ที่ได้จากส่วนที่ 1 มาประเมินความสะทกสวายตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ISO 2631-1

#### 8.1 การแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

สัญญาณที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟจะอยู่ในรูปของสัญญาณความเร่งบนโดเมนเวลา ซึ่งจะถูกรนำมาเปลี่ยนเป็นสัญญาณความเร่งบนโดเมนความถี่โดยกระบวนการ FFT (Fast Fourier Transforms) ด้วยสมการการแปรสัญญาณบนโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังความสัมพันธ์ดังสมการที่ 8-1 ต่อไปนี้

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \text{ และ } x(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (8-1)$$

โดยที่

$$\omega_N = e^{(-2\pi)/N}$$

$X(k)$  เป็นฟังก์ชันของสัญญาณบนโดเมนเวลา

$x(j)$  เป็นฟังก์ชันของสัญญาณบนโดเมนความถี่

สัญญาณความเร่งของมวลสปริงรองรับบนโดเมนความถี่ที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นจะถูกนำไปใช้ประเมินความสะทกสวายจากการซัซซึต่อไป

#### 8.2 วิธีการประเมินความสะทกสวายจากการซัซซึตามมาตรฐาน ISO 2631-1

เนื่องจากมนุษย์นั้นมีการตอบสนองที่ความถี่ที่ต่างกัน ดังนั้นมาตรฐาน ISO 2631-1 จึงมีการกำหนดค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักที่แต่ละความถี่ต่างๆกันด้วย โดยค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักที่เลือกใช้จะเป็นตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก ( $W_k$ ) ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ซึ่งใช้ในการประเมินความเร่งที่เข้าสู่ตัวผู้โดยสารในที่นั่งในกรณีที่แรงกระทำมาจากใต้เบาะ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก ( $W_k$ ) กับความถี่ในกรณีของที่นั่งของผู้โดยสารและค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 8-1 จะนำมาใช้ถ่วงน้ำหนักกับค่าความเร่งของมวลสปริงรองรับหลังจากแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่แล้ว และรวมเป็นค่าประสิทธิผลของความเร่งรวมดังสมการที่ 8-2

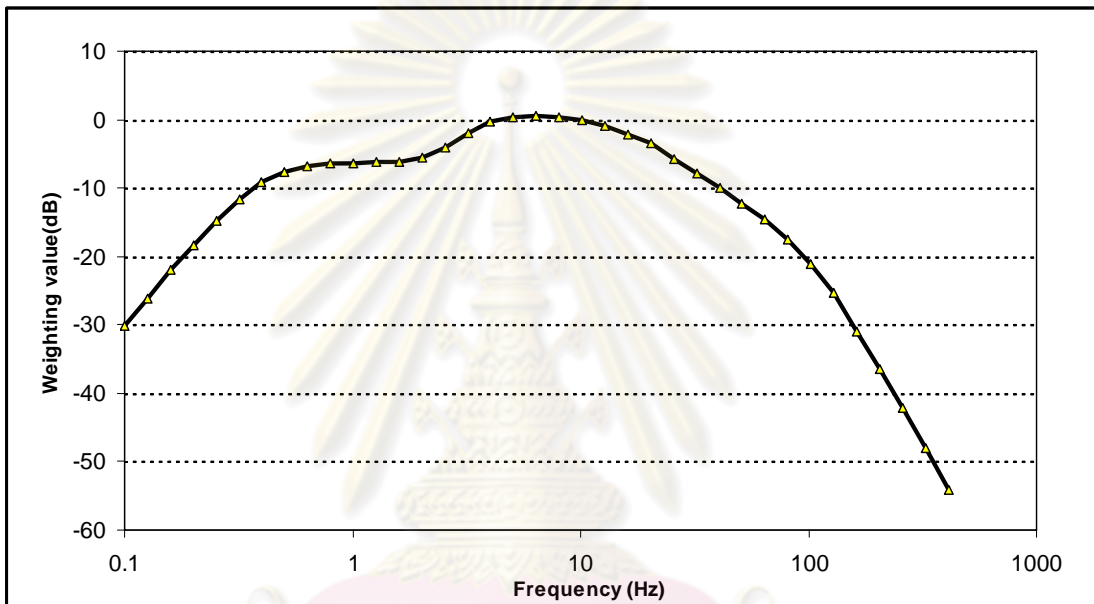
$$a_w = \left[ \sum (W_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8-2)$$

เมื่อ

$a_w$  คือ ค่าประสิทธิผลของความเร่งรวมที่คูณด้วยค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักแล้ว ( $m/s^2$ )

$W_i$  คือ ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักที่ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8-2

$a_i$  คือ ค่าประสิทธิผลของความเร่งในความถี่ใดๆ ( $m/s^2$ )



รูปที่ 8-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก ( $W_k$ ) และความถี่ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ในกรณีของท่าที่นั่งมีแรงกระทำจากใต้เบาะ

โดยค่าความเร่งประสิทธิผลรวมที่ได้จะสามารถนำมาใช้ในการประเมินความสะดวกสบายจากการขับขี่ตามเกณฑ์ที่แนะนำได้ดังนี้

น้อยกว่า $0.315 m/s^2$	อยู่ในระดับไม่รู้สึก ว่าไม่สะดวกสบาย (not uncomfortable)
$0.315 m/s^2$ ถึง $0.63 m/s^2$	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายเล็กน้อย (a little uncomfortable)
$0.5 m/s^2$ ถึง $1.0 m/s^2$	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้ (fairly uncomfortable)
$0.8 m/s^2$ ถึง $1.6 m/s^2$	รู้สึกไม่สะดวกสบาย (uncomfortable)
$1.25 m/s^2$ ถึง $2.5 m/s^2$	รู้สึกไม่สะดวกสบายมาก (very uncomfortable)
มากกว่า $2 m/s^2$	รู้สึกไม่สะดวกสบายอย่างรุนแรง (extremely uncomfortable)

## บทที่ 9

### การทดสอบด้วยการขับช้อรรถกอล์ฟจริง และ สาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ที่ได้ มีความถูกต้องแม่นยำสามารถนำไปใช้ช่วยในการออกแบบระบบรองรับได้จริง ดังนั้นในบทนี้จะแสดงการทดสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ ด้วยการแล่นรถกอล์ฟและเก็บค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับซึ่งเป็นที่อยู่ของผู้โดยสารจริง โดยมีการเปลี่ยนตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock Absorber) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่างๆกัน จากนั้นนำผลที่ได้มาประเมินเปรียบเทียบว่ามีการคลาดเคลื่อนกับผลของแบบจำลองที่ใช้มาน้อยเพียงใด และเหมาะสมในการใช้ออกแบบรถกอล์ฟได้หรือไม่

เมื่อเห็นว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำเมื่อทดสอบด้วยการขับช้อรรถกอล์ฟจริงแล้ว จึงสาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการออกแบบระบบรองรับด้านหลังของรถกอล์ฟโดยหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่เหมาะสม ที่ให้ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังต่ำที่สุดซึ่งทำให้เกิดความสะอวดกสบายจากการขับช้อร (Ride Comfort) ของผู้โดยสารอันเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของระบบรองรับอย่างหนึ่ง

#### 9.1 การทดสอบผลของแบบจำลองด้วยผลที่ได้จากการขับช้อรรถกอล์ฟจริง

เพื่อยืนยันผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้จากการใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่บนโปรแกรม MATLAB & SIMULINK จึงต้องมีการแล่นรถกอล์ฟที่มีคุณสมบัติของระบบรองรับแบบจำลองที่ได้ โดยเลือกศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่อค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆ ทั้ง 4 ค่าได้แก่ 285.16, 730.16, 897.16 และ 1342.16 N-s/m (เป็นค่าผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน) ในหัวข้อนี้จะแบ่งการอธิบายเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้และสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ
- 2) ขั้นตอนและวิธีการทดสอบด้วยการขับช้อรรถกอล์ฟจริง
- 3) ผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับ ทั้งที่ได้จากการแล่นรถกอล์ฟจริง และแบบจำลองการเคลื่อนที่ แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อสรุปผลของการทดสอบที่ได้

## 9.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

### 9.1.1.1 รถกอล์ฟ

รถกอล์ฟ ที่ใช้งานวิจัยครั้งนี้เป็นของ บริษัท ทีเอส วีอีเคิลเทค จำกัด รุ่น Bravo TT-11 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 แรงม้าในการขับเคลื่อน ควบคุมความเร็วด้วยกล่องควบคุมยี่ห้อ Curtis สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 27 km/h ส่วนในงานวิจัยครั้งนี้มีการควบคุมความเร็วรถกอล์ฟที่ 22 km/h มีคุณสมบัติของระบบรองรับเหมือนกับดั่งที่กล่าวไว้ในบทที่ 4

### 9.1.1.2 ชุดควบคุมความเร็ว

เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมความเร็วของรถกอล์ฟให้มีความเร็วคงที่ตามต้องการ โดยควบคุมทำความเร็วผ่านกล่องควบคุมให้มอเตอร์ของรถกอล์ฟมีความเร็วรอบความเร็วคงที่ได้ กล่องและชุดควบคุมความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของยี่ห้อ Curtis รายเอียดระบุไว้ในภาคผนวก ข ในการวิจัยครั้งนี้จะกำหนดความเร็วไว้ที่ 22 km/h ลักษณะของชุดควบคุมแสดงดังรูปที่ 9-1



รูปที่ 9-1 การทำงานชุดควบคุมความเร็วและการเชื่อมต่อ

### 9.1.1.3 Accelerometer

การวัดความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง จะใช้ Accelerometer ของบริษัท Kristler รุ่น K-Beam 8393B10 เป็นชนิด Piezoelectric ลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 3x3x3 cm โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกควอตซ์ ซึ่งจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงกระทำบนผลึก ประจุที่จ่ายออกมาจะมีค่าแปรตามแรงที่กระทำ หรือ ความเร่งที่เกิดขึ้น ข้อมูลทางเทคนิคดังแสดงในตารางที่ 9-1 สามารถวัดความเร่งได้ 3 แกน และจะถูกนำมาติดไว้ที่โครงสร้างของรถกอล์ฟซึ่งอยู่เหนือ จุดยึดของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ด้านซ้ายของระบบรองรับ ซึ่งเป็นตำแหน่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังดังรูปที่ 9-2





รูปที่ 9-2 ตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer

ตารางที่ 9-1 ข้อมูลทางเทคนิคของ Accelerometer รุ่น K-Beam 8393B10 ยี่ห้อ Kristler

Technical Data	
Type	8393B10
Acceleration Range	$\pm 10$ g
Sensitivity ( $\pm 5\%$ )	200 mv/g
Zero g Output $\pm 30$ mV	0 V
Resolution(Threshold) typ.	2830 $\mu$ g
Resonant Frequency nom.	2.7 kHz
Frequency Response $\pm 5\%$	0-180 Hz
Amplitude Non-linearity	$\pm 0.8$ % FSO
Transverse Sensitivity typ.(max $\pm 3\%$ )	1%
Ground Isolation min,	$>10^{10}$ $\Omega$
Weight	60 grams

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 9.1.1.4 Data Logger

เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณข้อมูลจากข้อมูลอะนาล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัล Data Logger ที่ใช้เป็น Data Logger 16 Channels ยี่ห้อ Dewetrons รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 สัญญาณที่ได้จะถูกเก็บเข้าคอมพิวเตอร์ต่อไป ภาพ Data Logger และตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 9-3 ส่วนรายละเอียดของเครื่องมือแสดงไว้ในตารางที่ 9-2



รูปที่ 9-3 Data Logger และตำแหน่งที่ติดตั้งในรถกอล์ฟ

ตารางที่ 9-2 ข้อมูลทางเทคนิคของ Data logger รุ่น DEWE-BOOK-USB2-DT-16 ยี่ห้อ

Dewetrons

System specifications	DEWE-BOOK-USB2-DT-16
A/D input channels	16
Slots for DEWE modules	16
Sampling rate	500 kS/s aggregate
A/D resolution standard	16-bit
A/D converter hardware	DT 9834
Power supply	115/230 VAC, 50/60 Hz
Dimension(WxDxH)	400x200x140 mm 16.0x7.9x5.5 in
Weight	6 kg (13 lbs)
Supports Microsoft WINDOWS XP operating system and USB interface	

#### 9.1.1.5 ถุงทราย

ใช้ถ่วงน้ำหนักให้รถกอล์ฟมีน้ำหนักตามต้องการ ใช้ถุงทรายทั้งหมด 5 ถุง โดยมีน้ำหนักถุงละ 30 kg วางไว้ในบริเวณที่วางของด้านหลัง ซึ่งปกติจะเป็นที่วางถุงกอล์ฟและที่ยื่นของแคดดี้มัดไว้ด้วยเชือกเพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่



รูปที่ 9-4 ถุงทรายที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนัก

#### 9.1.1.6 ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

ในการทวนสอบต้องมีการแปรผันค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลัง ซึ่งทำโดยการแปรผันค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนแทน โดยตัวหน่วงการสั่นสะเทือนในการทำวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนยี่ห้อ PNK ทั้งหมด 3 คู่ แต่ละคู่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 445 N-s/m, 612 N-s/m และ 1057 N-s/m ตามลำดับ ภาพของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ใช้แสดงดังรูปที่ 9-5 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน แสดงในภาคผนวก ข.1



รูปที่ 9-5 ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการทวนสอบ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 445 N-s/m, 612 N-s/m และ 1057 N-s/m จากซ้ายไปขวาตามลำดับ

### 9.1.1.7 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ตะกั่ว ยี่ห้อ Trojan 12 V ให้กำลังไฟฟ้าได้ 150 แอมแปร์ต่อชั่วโมง สามารถใช้งานได้ 20 ชั่วโมง มีขนาด 12.875 x 7.13 x 10.68 นิ้ว น้ำหนัก 36 kg มีหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ Data Logger และ คอมพิวเตอร์ในการทำงาน



รูปที่ 9-6 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบ

### 9.1.1.8 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้มี 2 ตัว คือ ยี่ห้อ PM และ SKYWISE เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 12 V จึงต้องแปลงเป็นกระแสสลับ 220 V เพื่อใช้งานกับ Data Logger และ Notebook



รูปที่ 9-7 รูปหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 9-3 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ PM

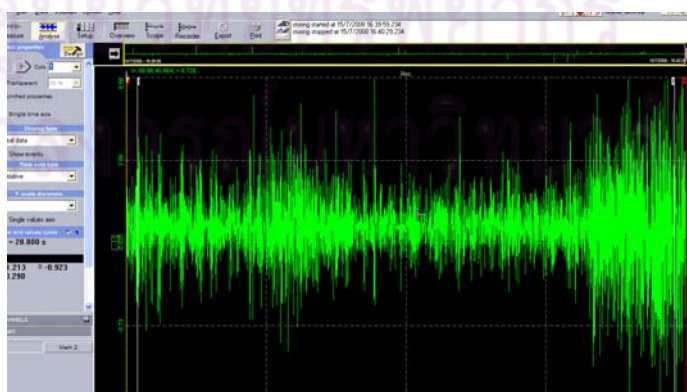
input/output	12 VDC/200 VAC 50 Hz
Power output	500 Watt
Wave form	Modified Sine Wave
System	Switching
Dimension(WxDxH)	95x168x55 mm
Weight	1200 g

ตารางที่ 9-4 ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ SKYWISE

input/output	12 VDC/200 VAC 50 Hz
Power output	200 Watt
Wave form	Modified Sine Wave
System	Switching
Dimension(WxDxH)	100x147x45 mm
Weight	645 g

#### 9.1.1.9 Computer Notebook และ Software

Computer Notebook สำหรับการแสดงและเก็บข้อมูลที่ได้จาก Data Logger บนจอแสดงผล ส่วนโปรแกรมในการคำนวณวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลใช้โปรแกรม Dewesoft 6.3.3 ซึ่งจะทำให้สามารถสังเกตความเร่งที่เกิดขึ้นขณะขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าได้ทันที



รูปที่ 9-8 โปรแกรม Dewesoft 6.3.3



### 9.1.1.10 ถนน

ถนนที่ใช้ในการทวนสอบใช้ถนนในสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ในโซน A หลุมที่ 2 เป็นถนนเส้นเดียวกับที่ใช้สอบเทียบ และมีค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งใกล้เคียงกับแบบจำลองลักษณะถนนที่ได้จำลองไว้ในบทที่ 6 ซึ่งมีระยะทางในการทวนสอบอยู่ที่ 100 m ดังแสดงในรูปที่ 9-9



รูปที่ 9-9 ถนนที่ใช้ในการทวนสอบ

### 9.1.2 วิธีการทวนสอบ

ในการทวนสอบแบบจำลองที่ได้โดยการขับชีรรถกอล์ฟจริงเลือกเล่นบนถนนที่มีสภาพคล้ายคลึงกับถนนของสนามทดสอบระบบรองรับที่ได้จำลองขึ้นในบทที่ 6 และจึงเลือกใช้ช่วงถนนที่ใช้ในการสอบเทียบอุปกรณ์ Rolling Straightedge ก็คือ สนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A หลุม 2 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งของพื้นถนนมีค่าดังสมการ  $G_d(\Omega) = 0.0007(\Omega/\Omega_0)^{-2}$  คล้ายคลึงกับถนนของสนามทดสอบระบบรองรับซึ่งมีสมการ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000724(\Omega/\Omega_0)^{-2}$  จากนั้นทำการวัดเป็นระยะทาง 100 เมตร โดยวัดความเร่งที่เกิดขึ้น ณ จุดที่อยู่เหนือตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ด้านหลังซ้าย ทำการถ่วงน้ำหนักด้วยถุงทรายน้ำหนัก 30 Kg จำนวน 5 ถุง ซึ่งมีน้ำหนักเทียบเท่าแคคตัส 2 คน และถุงกอล์ฟ 2 ถุง ที่บริเวณที่วางถุงกอล์ฟด้านหลังรถกอล์ฟซึ่งเป็นตำแหน่งที่วางถุงกอล์ฟและที่ยืนของแคคตัส

จากนั้นเล่นรถกอล์ฟบนเส้นทางนี้ 10 เทียวต่อการแปรผันค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน แต่ละค่า จากนั้นนำมาเฉลี่ยค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนความถี่ ( $G_d(f)$ ) เพื่อนำมาใช้ประเมินความสะดวกสบายจากการขับชี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ต่อไป

ทำการทวนสอบทั้งหมด 4 ชุด ได้แก่ การเล่นรถกอล์ฟขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน และการเล่นรถกอล์ฟที่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ

445 N-s/m, 612 N-s/m และ 1057 N-s/m ตามลำดับ แสดงรายละเอียดของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ในการทดสอบแต่ละชุดดังตารางที่ 9-5 และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ต่อไป

ตารางที่ 9-5 ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบชุดที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับที่ไม่ใช้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลัง
1	285.16 N-s/m	ไม่ใช้	285.16 N-s/m
2	285.16 N-s/m	445 N-s/m	730.16 N-s/m
3	285.16 N-s/m	612 N-s/m	897.16 N-s/m
4	285.16 N-s/m	1057 N-s/m	1342.16 N-s/m

### 9.1.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้จะขอแบ่งการอธิบายรายละเอียดของผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบเป็น 3 ส่วนดังนี้

1) ผลของสัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนเวลา และ ผลการคำนวณค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนความถี่ที่ได้จากแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ที่ได้ศึกษา เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) กับค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ )

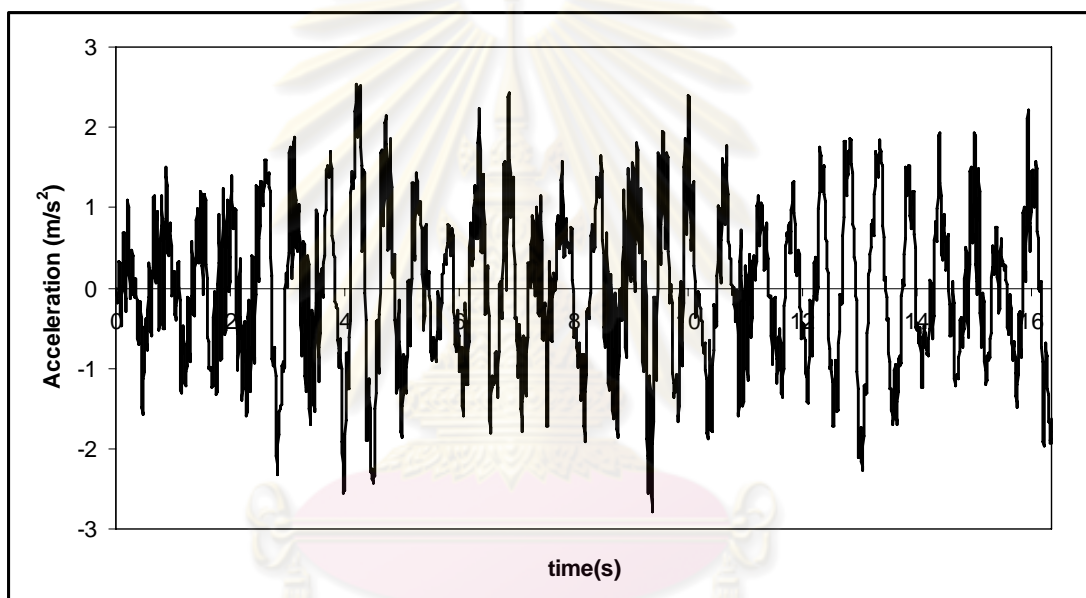
2) ผลการวัดสัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนเวลาที่ได้จากการเล่นรถกอล์ฟในสนามกอล์ฟ และผลของความเร่งมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้จากการเล่นรถกอล์ฟในสนามกอล์ฟจริงบนโดเมนความถี่ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) ต่อค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ )

3) ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้ง 2 ส่วนที่ได้กล่าวไปแล้วว่ามีจุดที่เหมือนและแตกต่างกันอย่างไรและสามารถนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งานจริงได้หรือไม่

### 9.1.3.1 ผลการคำนวณค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ศึกษาได้

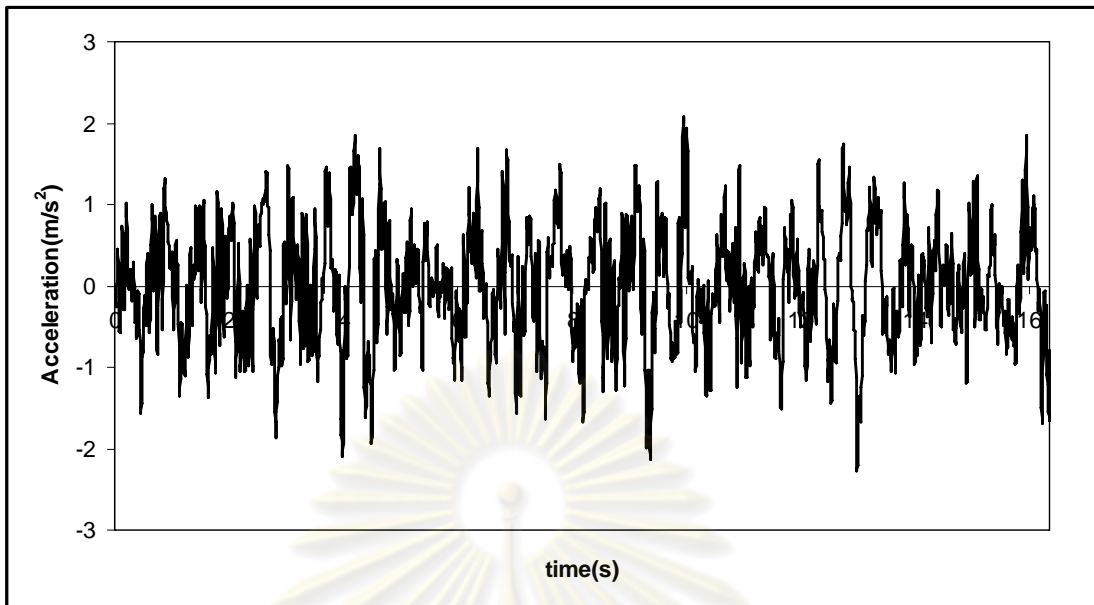
ในการทวนสอบจะเลือกค่าในการจำลองการเคลื่อนที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ 285.16, 730.16, 897.16 และ 1342.16 N-s/m ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใช้ในการทวนสอบกับการขับรถกอล์ฟจริงในสนามกอล์ฟ

ผลการคำนวณที่ได้จากการใช้แบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB & SIMULINK แสดงอยู่ในรูปของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนเวลา ( $a(t)$ ) ที่สัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16, 730.16, 897.16, และ 1342.16 N-s/m แสดงไว้ในรูปที่ 9-10 รูปที่ 9-11 รูปที่ 9-12 รูปที่ 9-13 ตามลำดับ

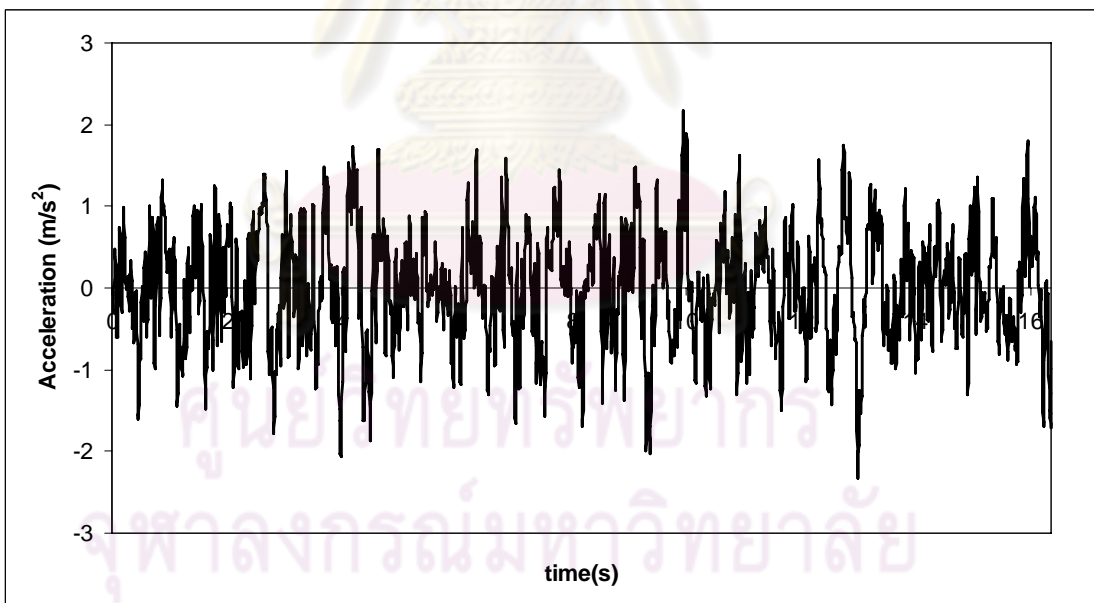


รูปที่ 9-10 ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ ( $a(t)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16 N-s/m

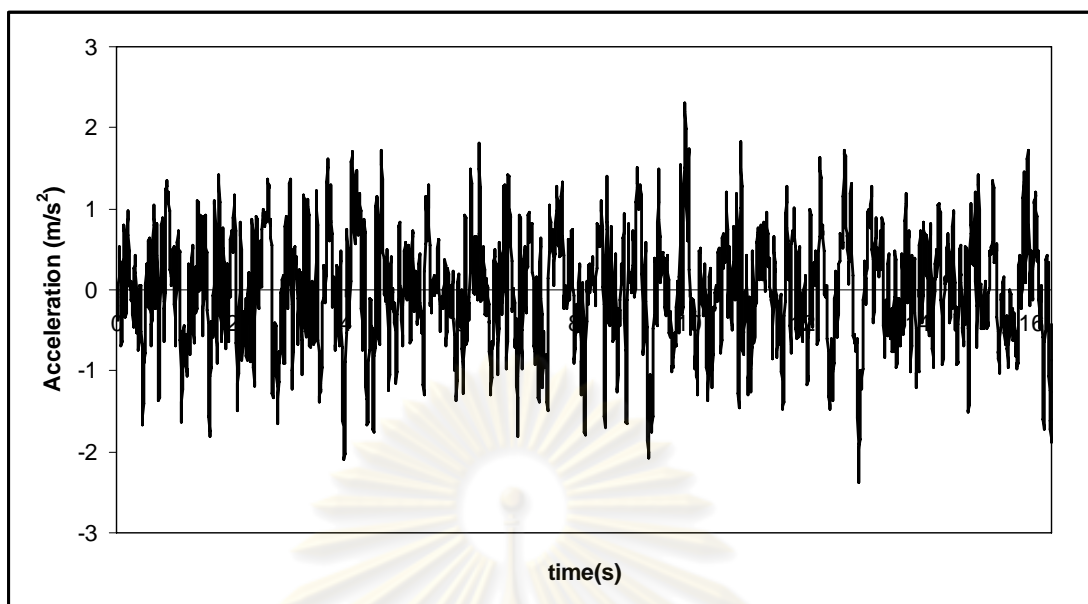
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 9-11 ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ ( $a(t)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 730.16 N-s/m



รูปที่ 9-12 ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ ( $a(t)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 897.16 N-s/m

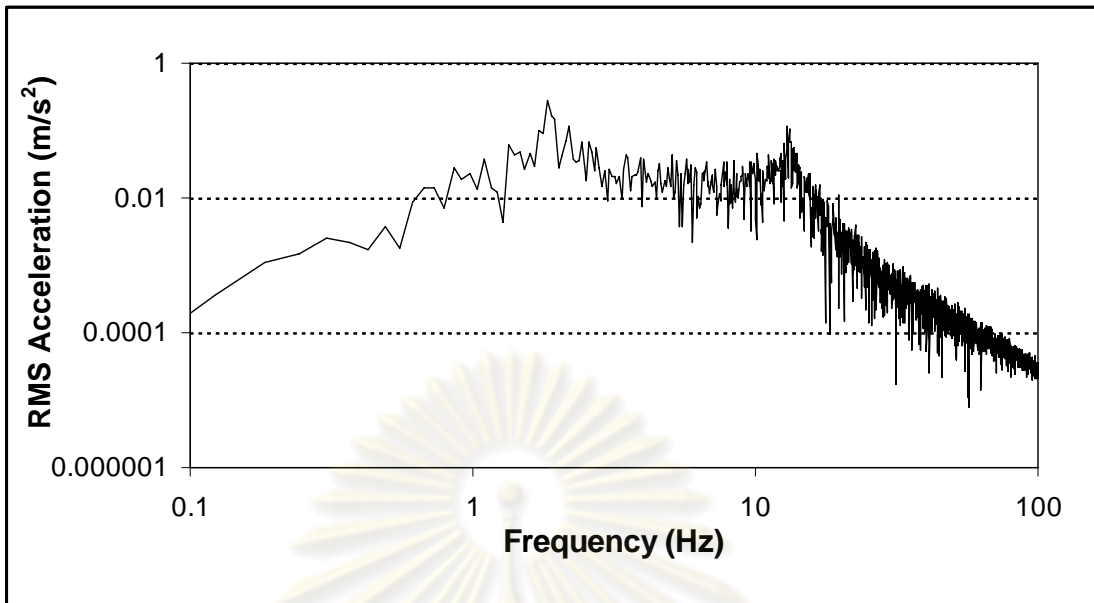


รูปที่ 9-13 ค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟ( $a(t)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_1$ ) เท่ากับ 1342.16 N-s/m

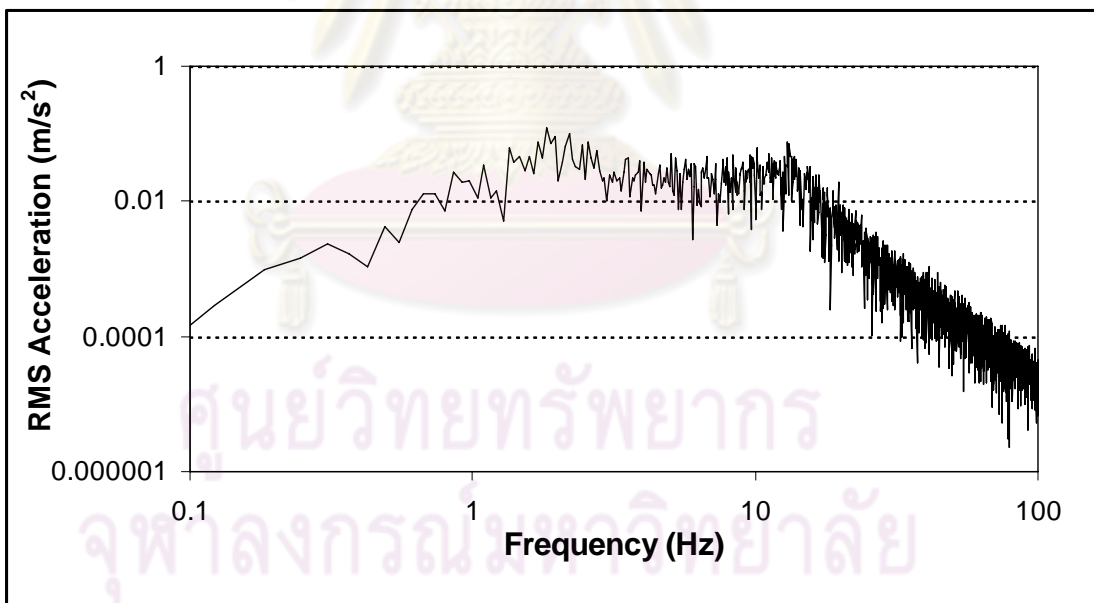
ผลการคำนวณที่ได้จากการใช้แบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB & SIMULINK แสดงอยู่ในรูปของค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วบนโดเมนความถี่( $\tilde{a}_w(f)$ )ที่สัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ( $c_2$ )เท่ากับ 285.16, 730.16, 897.16, และ 1342.16 N-s/m ดังรูปที่ 9-14 รูปที่ 9-15 รูปที่ 9-16 และ รูปที่ 9-17 ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบบนกราฟเดียวกันดังรูปที่ 9-18 ซึ่งใช้การแสดงผลในรูปของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่( $G_a(f)$ )ที่สัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆ ( $c_2$ ) ทำให้สังเกตเห็นความแตกต่างบนโดเมนความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่างๆได้ชัดเจน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

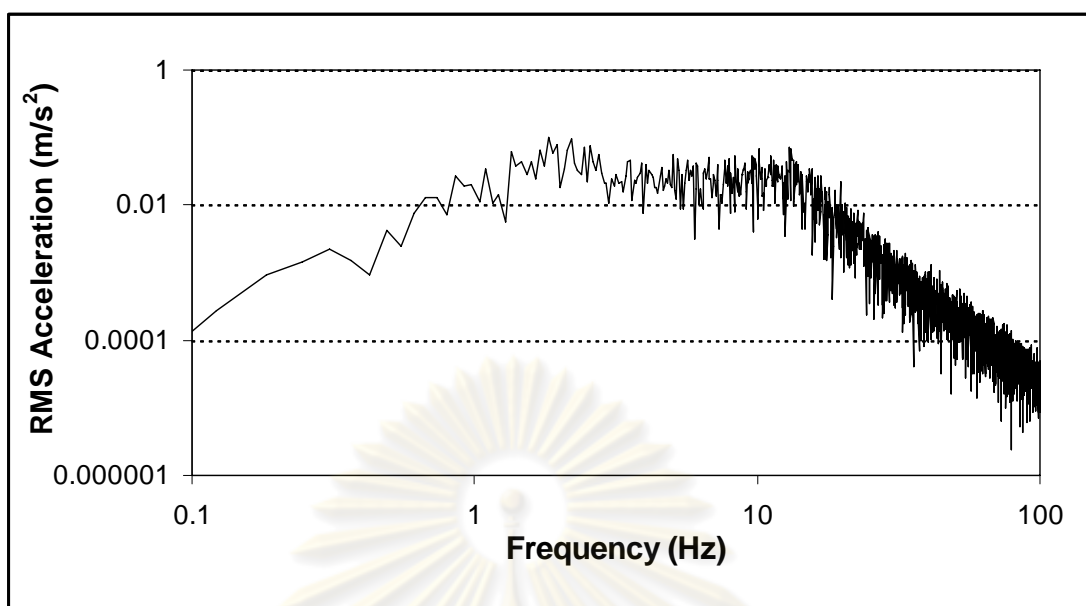




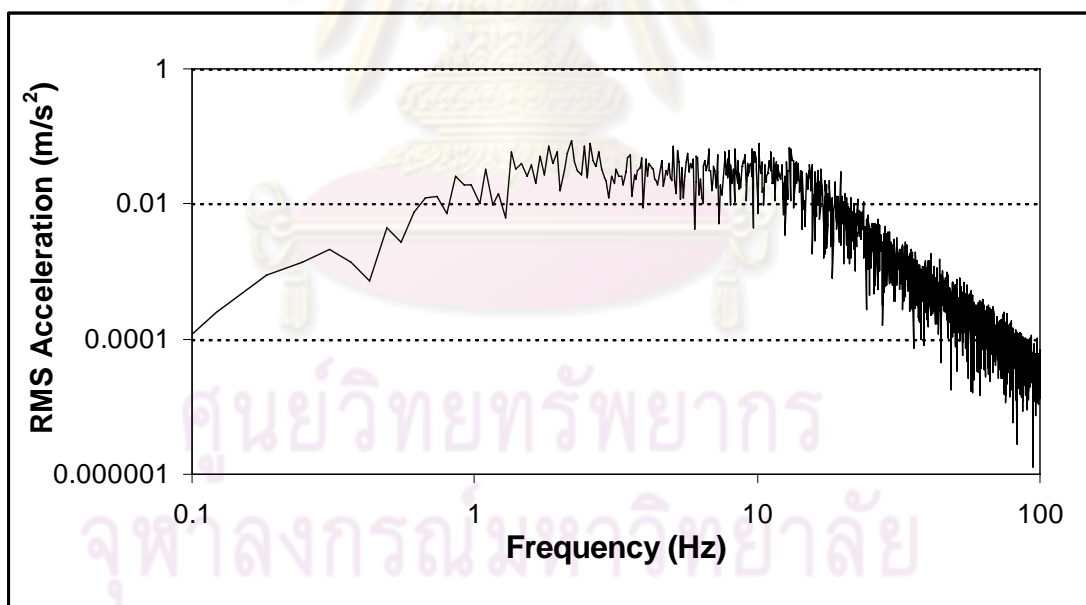
รูปที่ 9-14 ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16 N-s/m



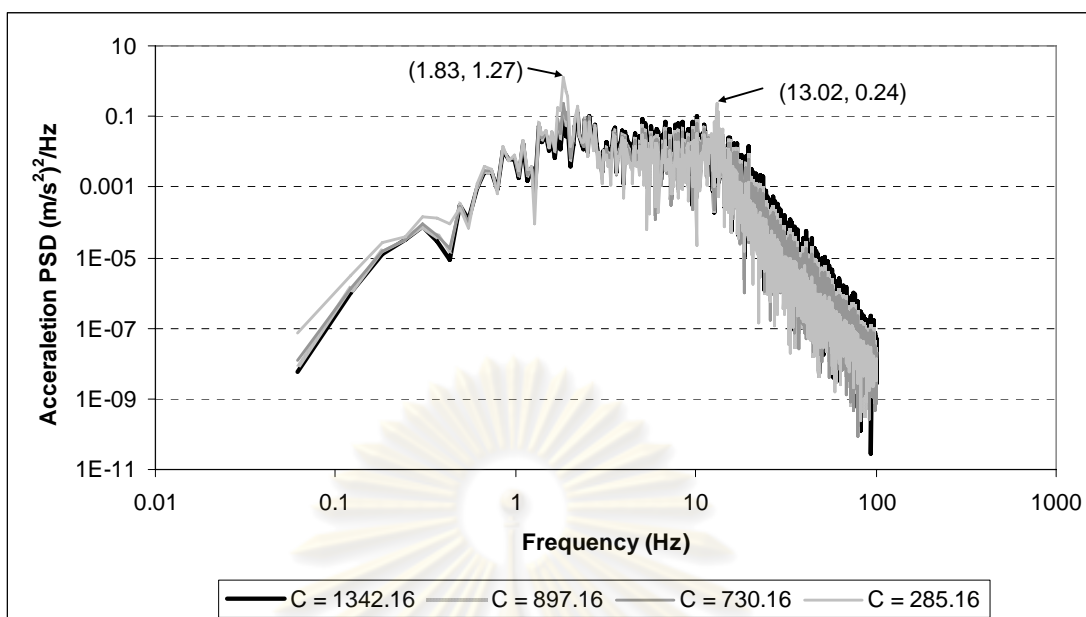
รูปที่ 9-15 ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 730.16 N-s/m



รูปที่ 9-16 ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับเท่ากับ ( $c_2$ ) 897.16 N-s/m



รูปที่ 9-17 ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากแบบจำลองที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับเท่ากับ ( $c_2$ ) 1342.16 N-s/m



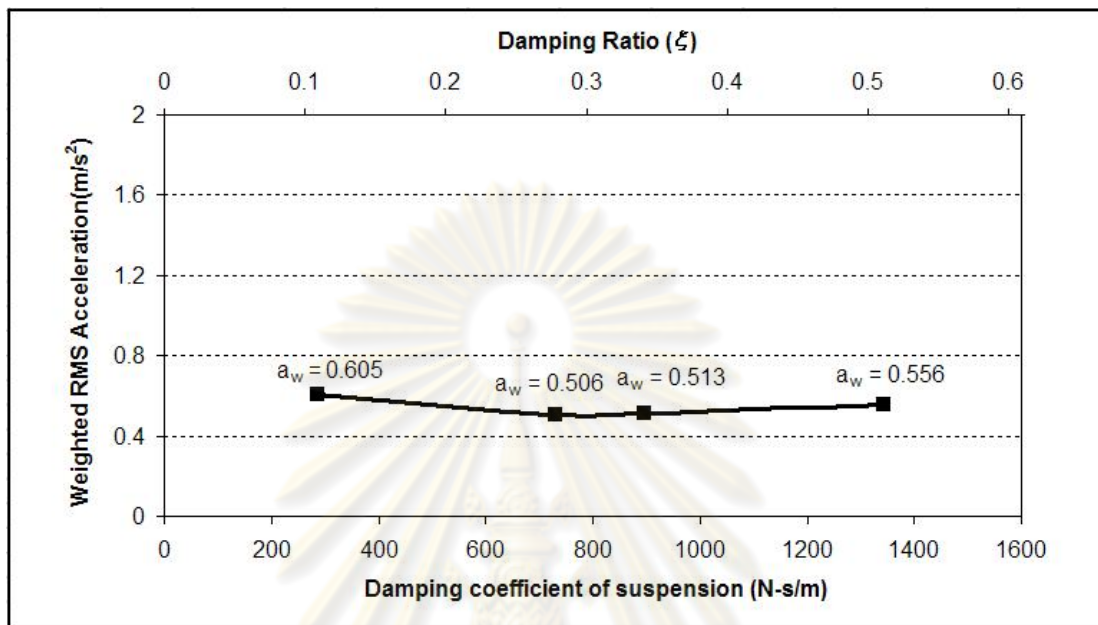
รูปที่ 9-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่ ( $G_a(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) ต่างๆ

จากรูปที่ 9-18 จะพบว่าขนาดของค่าประสิทธิผลของความเร่งบนโดเมนความถี่ ( $\tilde{a}_w(f)$ ) จะมีจุดสูงสุดสัมพันธ์ 2 จุด จุดแรกอยู่ที่ค่าความถี่ประมาณ 1.833 Hz ซึ่งเกิดจากผลของการสั่นพ้องของมวลส่วนสปริงรองรับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับ จุดสูงสุดหลังอยู่ที่ประมาณ 13.02 Hz ซึ่งเกิดจากการสั่นพ้องของล้อและยางซึ่งมีค่าใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของล้อและยาง (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ฉ)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 9-18 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) บริเวณตำแหน่งที่เกิดการสั่นพ้องของระบบรองรับด้านหลังที่ค่าประมาณ 1.833 Hz และตำแหน่งที่เกิดการสั่นพ้องของยางและล้อที่ค่าประมาณ 13.02 Hz จะลดลงเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) มากขึ้น ส่วนในย่านความถี่อื่นๆที่ไม่ใช่ความถี่ธรรมชาติ เช่น 2.5 – 11 Hz หรือ 13 – 100 Hz ค่าสัมประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีกล่าวคือ หากมีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) มากขึ้นจะลดขนาดการสั่นสะเทือนที่ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบลง แต่จะทำให้ขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ย่านอื่น ๆ มีค่าสูงขึ้น [22]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนัก ( $a_w$ ) แล้วของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลัง ( $c_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 9-19

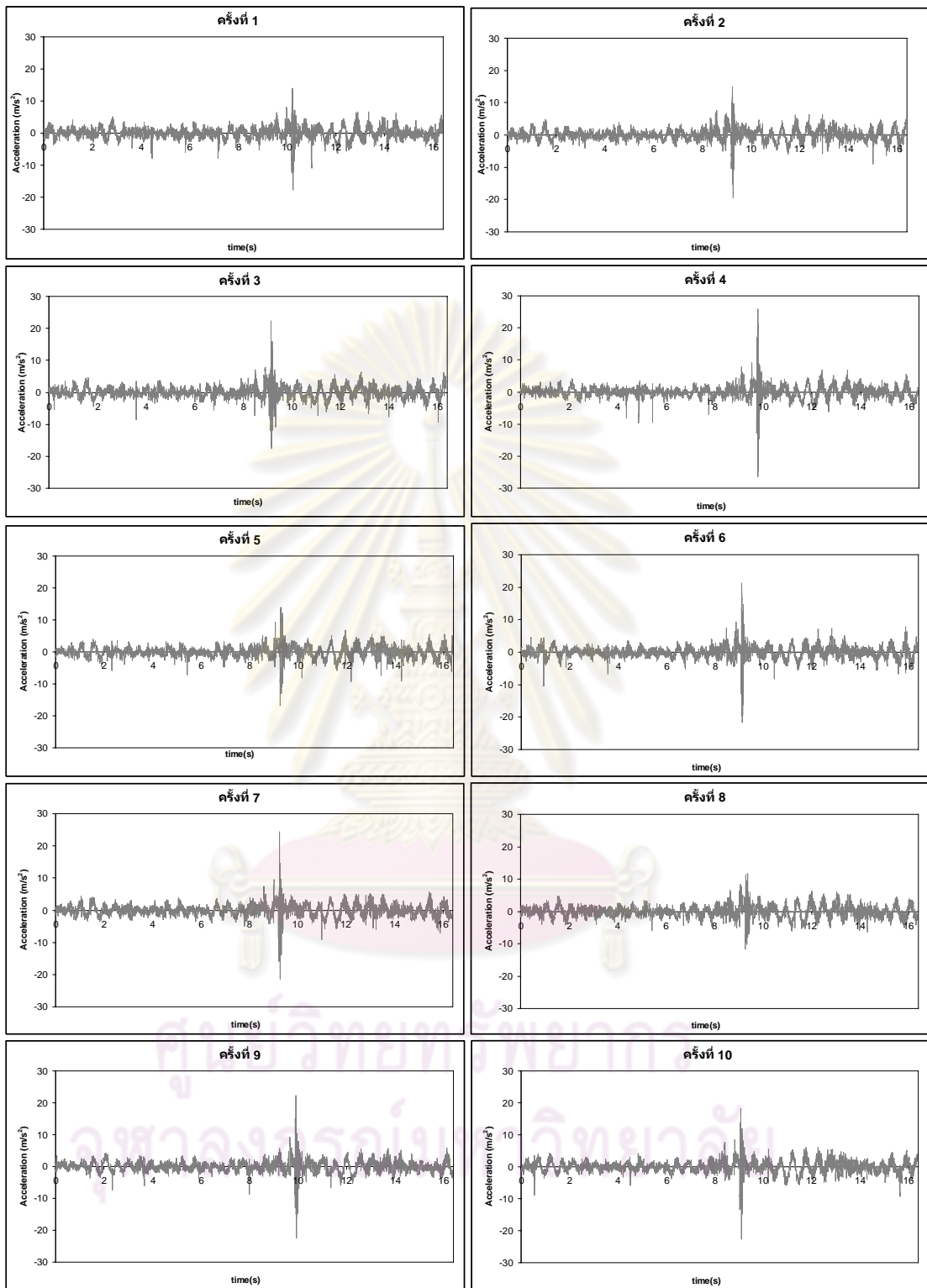
จากข้อมูลดังกล่าวนี้พบว่าคุณค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง สอดคล้องกับทางทฤษฎีทั้งในเรื่องของความสัมพันธ์และผลของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เพิ่มขึ้นของระบบรองรับต่อความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ



รูปที่ 9-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งประสิทธิภาพที่ได้ให้น้ำหนักแล้วของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับ ( $\xi$ ) ต่างๆ

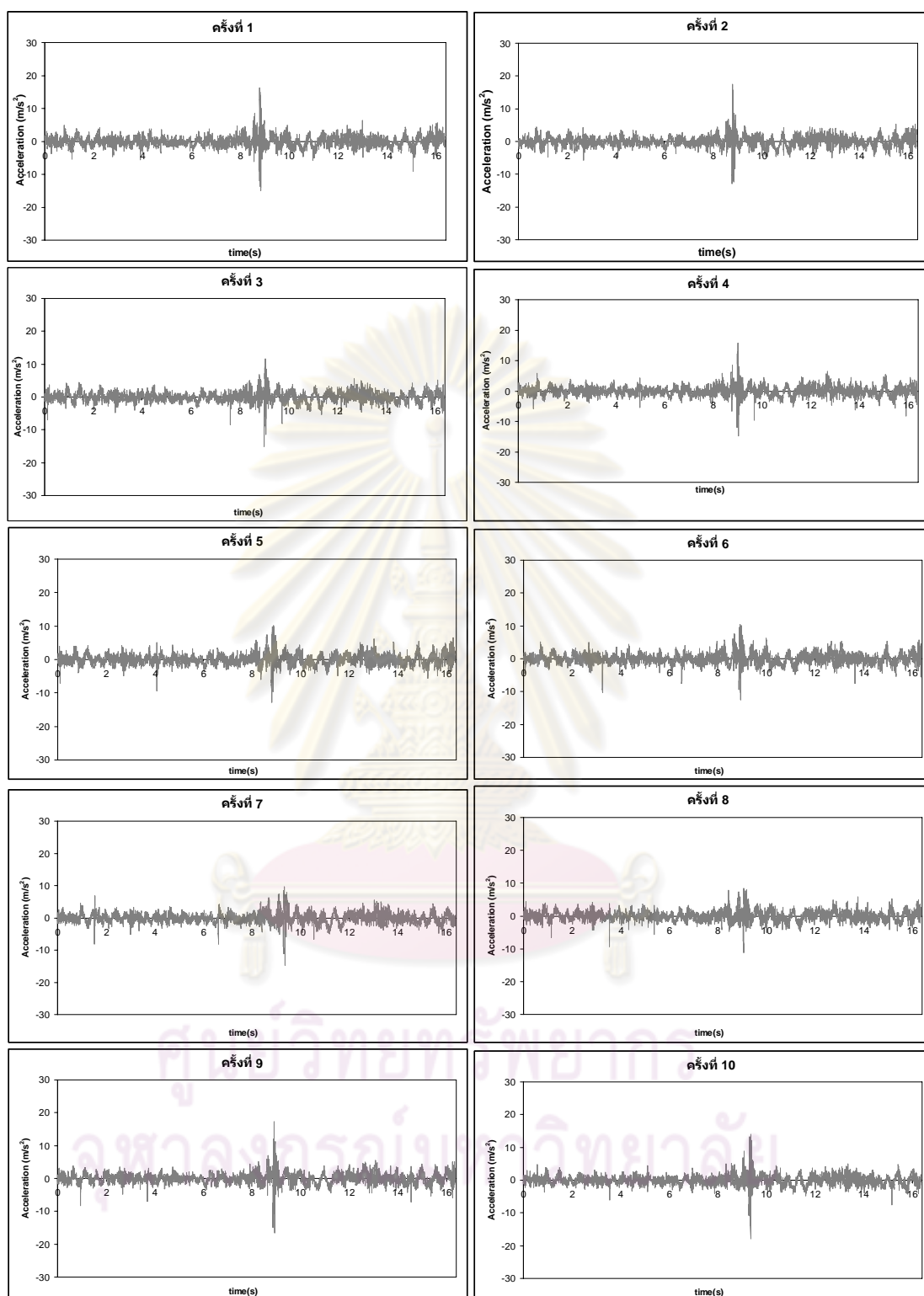
### 9.1.3.2 ผลการเก็บค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับของรถกอล์ฟในสนามกอล์ฟจริง

ผลการวัดค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับของการขับขีรถกอล์ฟในสนามกอล์ฟจริง แสดงอยู่ในรูปของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนเวลา ( $a(t)$ ) ที่สัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16, 730.16, 897.16, และ 1342.16 N-s/m (ผลรวมของสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน) ดังรูปที่ 9-20, รูปที่ 9-21, รูปที่ 9-22 และ รูปที่ 9-23 ตามลำดับ

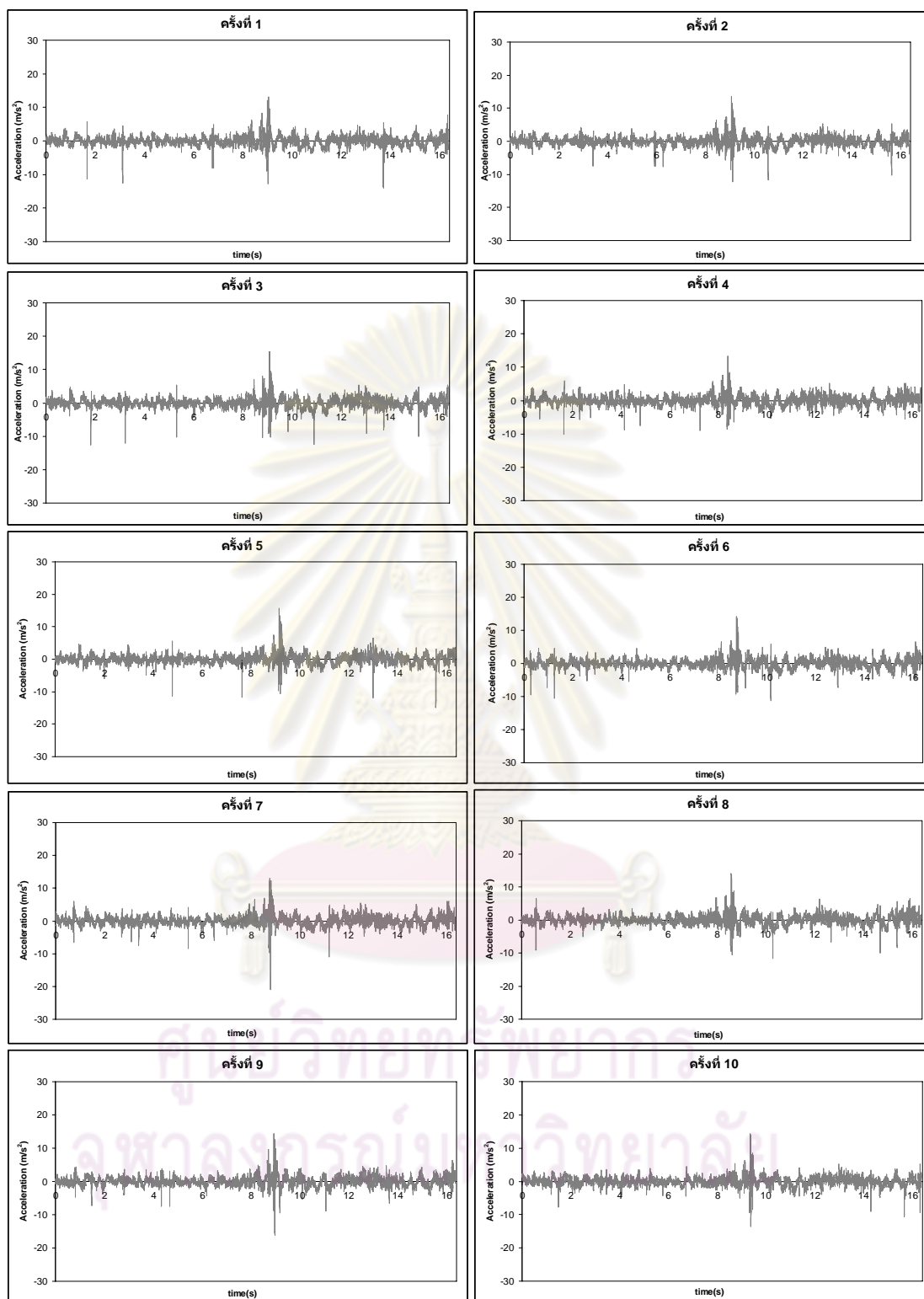


รูปที่ 9-20 สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16 N-s/m

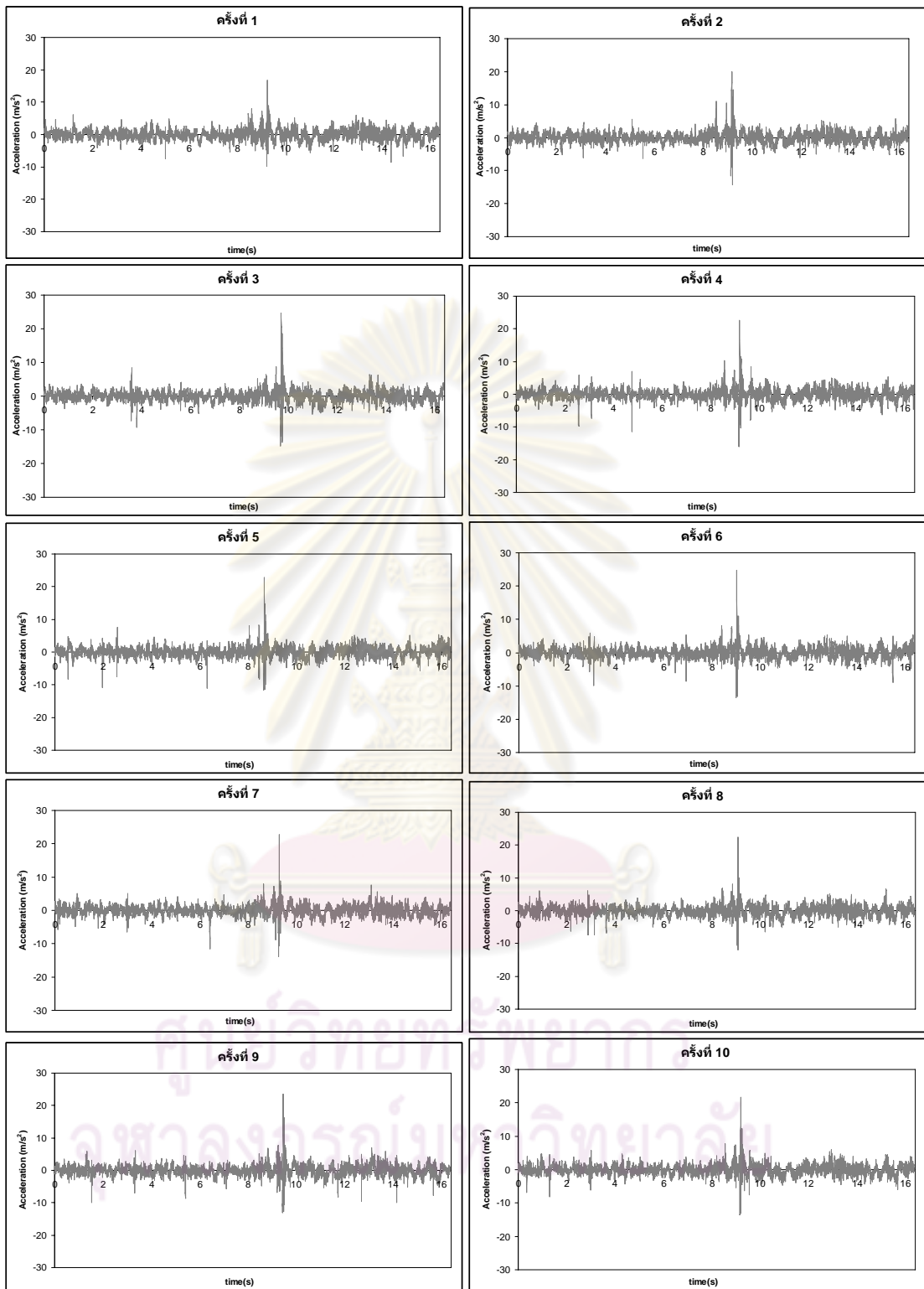




รูปที่ 9-21 สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 730.16 N-s/m

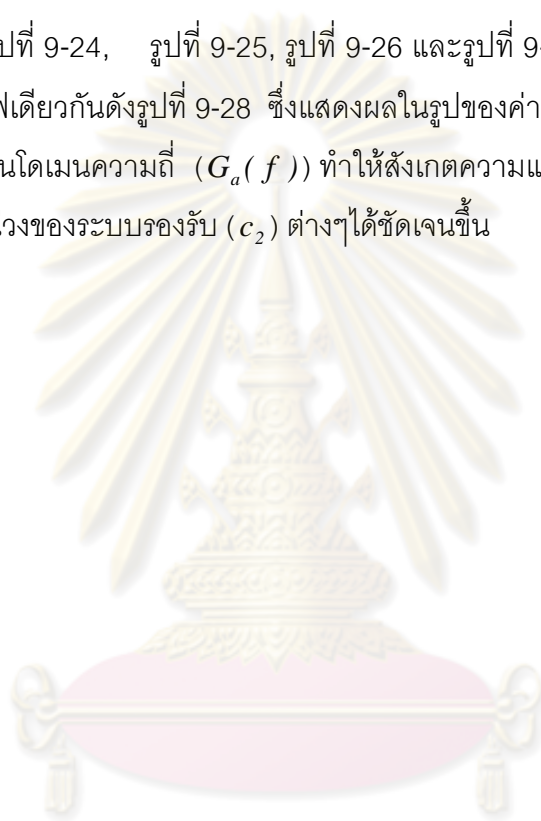


รูปที่ 9-22 สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้ง ที่ค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 897.16 N-s/m

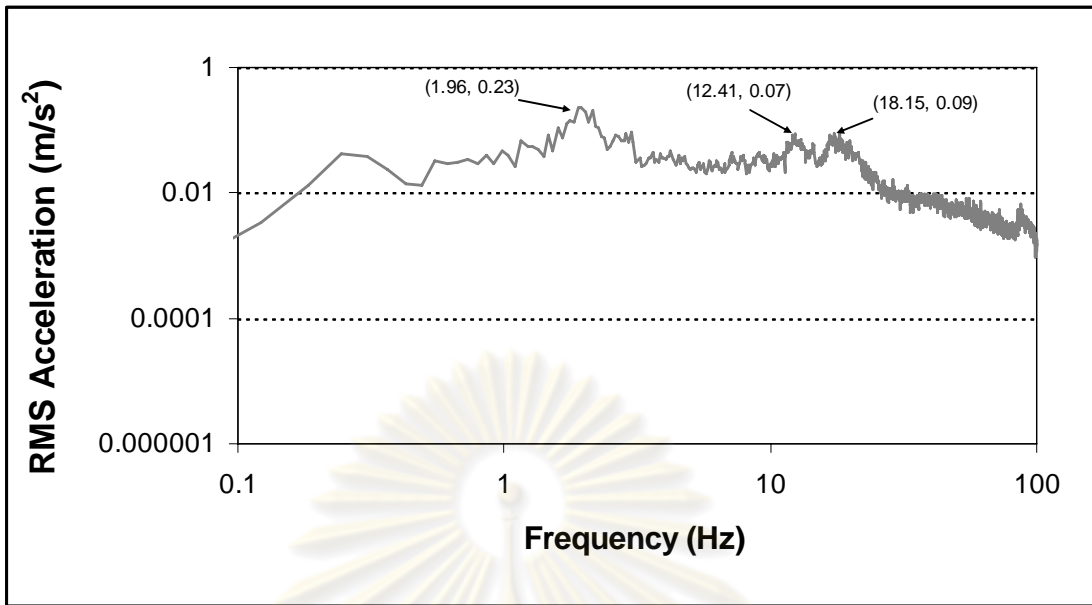


รูปที่ 9-23 สัญญาณความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a(t)$ ) ทั้ง 10 ครั้ง ที่ค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 1342.16 N-s/m

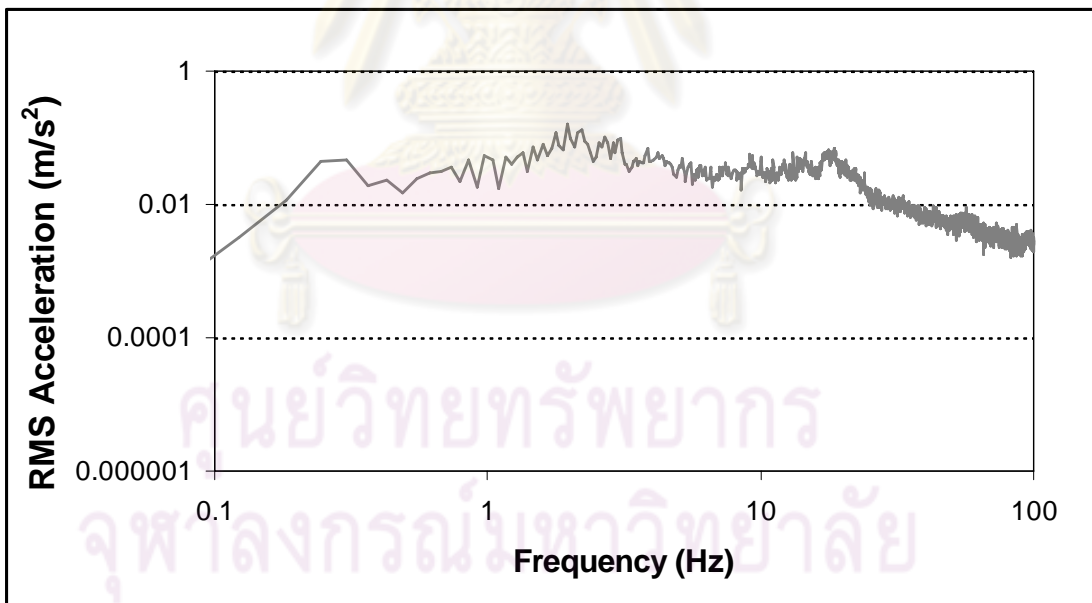
ผลการแปลงค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับของการขับเคลื่อนในสนามกอล์ฟจริงบนโดเมนเวลา  $(a(t))$  ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วบนโดเมนความถี่  $(\tilde{a}_w(f))$  ที่มีการเฉลี่ยค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการขับเคลื่อนทั้งหมด 10 ครั้งบนโดเมนความถี่แล้ว ที่สัมพันธ์กับความถี่ของระบบรองรับเท่ากับ 285.16 ,730.16 ,897.16,และ 1342.16 N-s/m (ผลรวมของสัมประสิทธิ์ความถี่ของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน กับค่าสัมประสิทธิ์ความถี่ของระบบรองรับ ขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน) ดังรูปที่ 9-24, รูปที่ 9-25, รูปที่ 9-26 และรูปที่ 9-27 ตามลำดับ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบบนกราฟเดียวกันดังรูปที่ 9-28 ซึ่งแสดงผลในรูปของค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่  $(G_a(f))$  ทำให้สังเกตเห็นความแตกต่างบนโดเมนความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความถี่ของระบบรองรับ  $(c_2)$  ต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

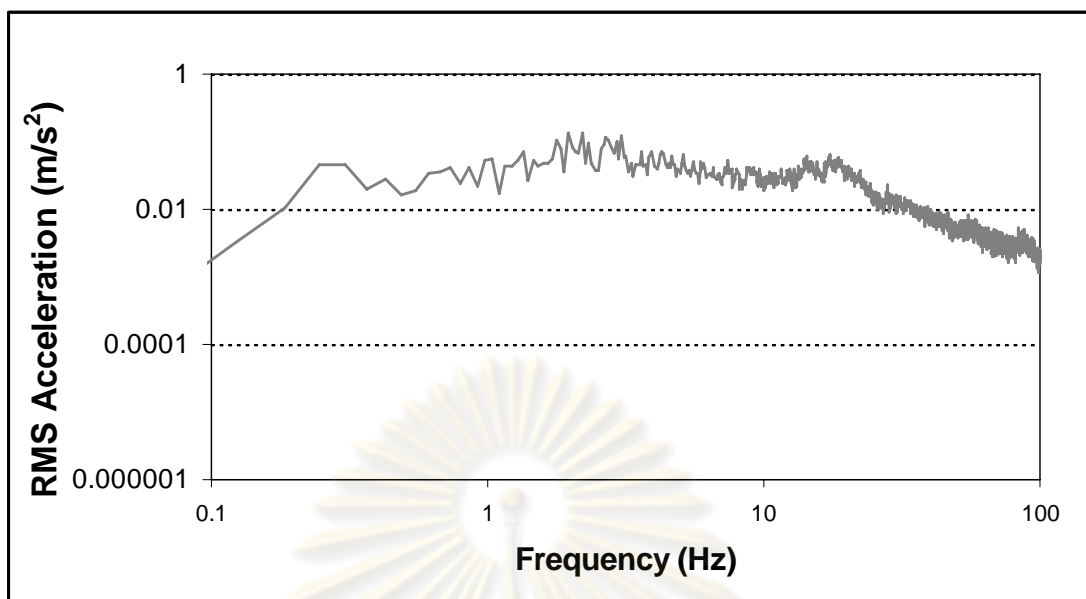


รูปที่ 9-24 ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีร็อกอล์ฟจริงที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 285.16 N-s/m

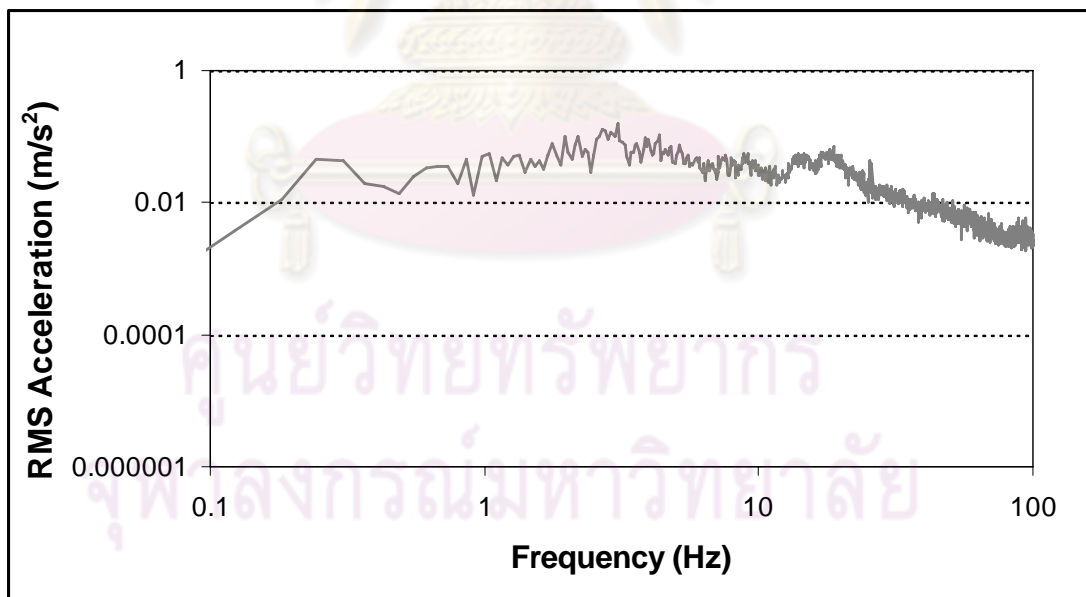


รูปที่ 9-25 ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีร็อกอล์ฟจริงที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 730.16 N-s/m

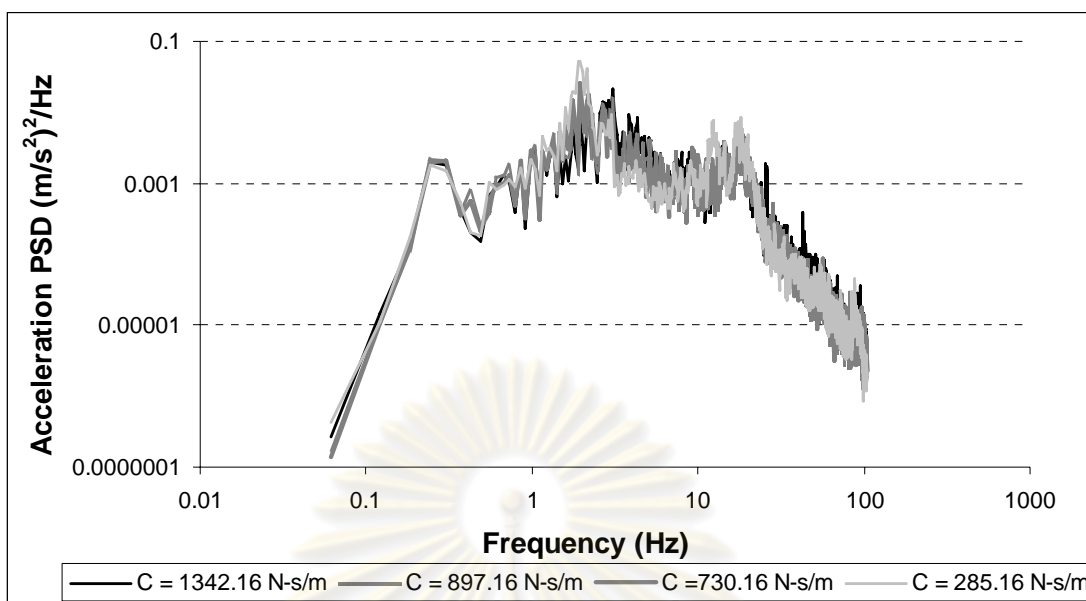




รูปที่ 9-26 ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีโรกอล์ฟจริงที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 897.16 N-s/m



รูปที่ 9-27 ค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับจากการขับซีโรกอล์ฟจริงที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) เท่ากับ 1342.16 N-s/m



รูปที่ 9-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้น้ำหนักแล้วบนโดเมนความถี่ ( $G_a(f)$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) ต่างๆ

จากผลที่ได้พบว่ามีข้อแตกต่างจากทฤษฎีบางส่วน คือ พบการสั่นพ้อง 3 จุด อยู่ที่ความถี่ประมาณ 1.96, 12.41 และ 18.15 Hz ตามลำดับสามารถเห็นได้ชัดเจนจากผลของความเร่งที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 285.16 N-s/m เนื่องจากมวลส่วนสปริงรองรับจะมีขนาดของการสั่นพ้องมากขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับมีค่าน้อยลง และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับมีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับที่คำนวณในภาคผนวก ข จะได้ผลวิเคราะห์ดังนี้

บริเวณความถี่ 1.96 Hz คาดว่าเกิดจากการสั่นพ้องของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง เพราะค่านี้มีค่าใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง (1.95 Hz)

บริเวณความถี่ 12.41 Hz คาดว่าเกิดจากการสั่นพ้องของมวลส่วนสปริงไม่ได้อรองรับด้านหลังเพราะมีค่าใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของมวลสปริงไม่ได้อรองรับ (11.98 Hz)

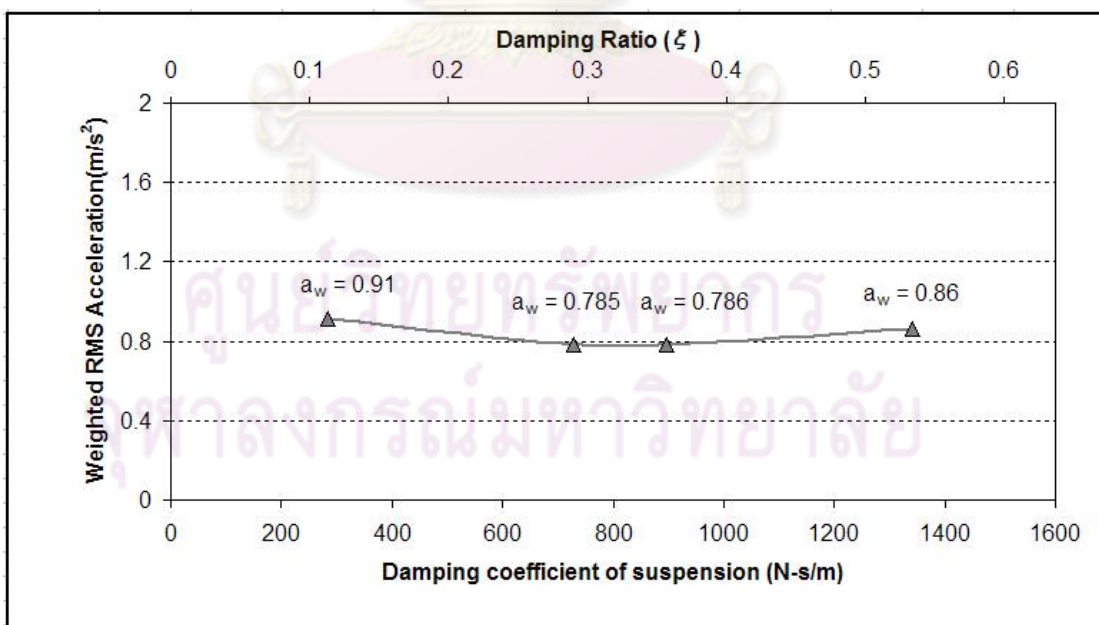
บริเวณความถี่ 18.15 Hz คาดว่าเกิดจากการสั่นพ้องของมวลส่วนสปริงไม่ได้อรองรับด้านหน้าเพราะมีค่าใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของมวลส่วนสปริงไม่ได้อรองรับด้านหน้า (20.75 Hz) เนื่องจากในความเป็นจริงการสั่นสะเทือนของระบบรองรับด้านหน้าอาจมีผลเข้ามาสู่การสั่นสะเทือนของระบบรองรับด้านหลังได้

ในส่วนที่ไม่สามารถเห็นการสั่นพ้องของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหน้าได้เพราะความถี่ธรรมชาติของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหน้า(1.95 Hz) มีค่าใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง (1.998 Hz) ดังนั้นการสั่นพ้องที่เกิดขึ้นที่ บริเวณ 1.96 Hz จึงอาจมีผลของการสั่นพ้องของมวลส่วนสปริงรองรับหน้ารวมอยู่ด้วย

ในรูปที่ 9-28 เมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับมากขึ้นขนาดของการสั่นพ้องทั้ง 3 จุด จะมีแนวโน้มลดลง แต่ขนาดของค่าประสิทธิผลของความเร่งในความถี่ส่วนที่ไม่ใช่ความถี่ธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้น เช่น ที่ความถี่ 2.5 – 11 Hz, 14 – 17 Hz และที่ความถี่ 19 – 100 Hz ซึ่งสอดคล้องกับผลทางทฤษฎีกล่าวคือ หากมีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมากขึ้นจะลดขนาดของการสั่นสะเทือนที่ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบลง แต่จะทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่อื่น ๆ มีค่าสูงขึ้น [22]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง ( $a_w$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลัง ( $c_2$ ) แสดงดังรูปที่ 9-29

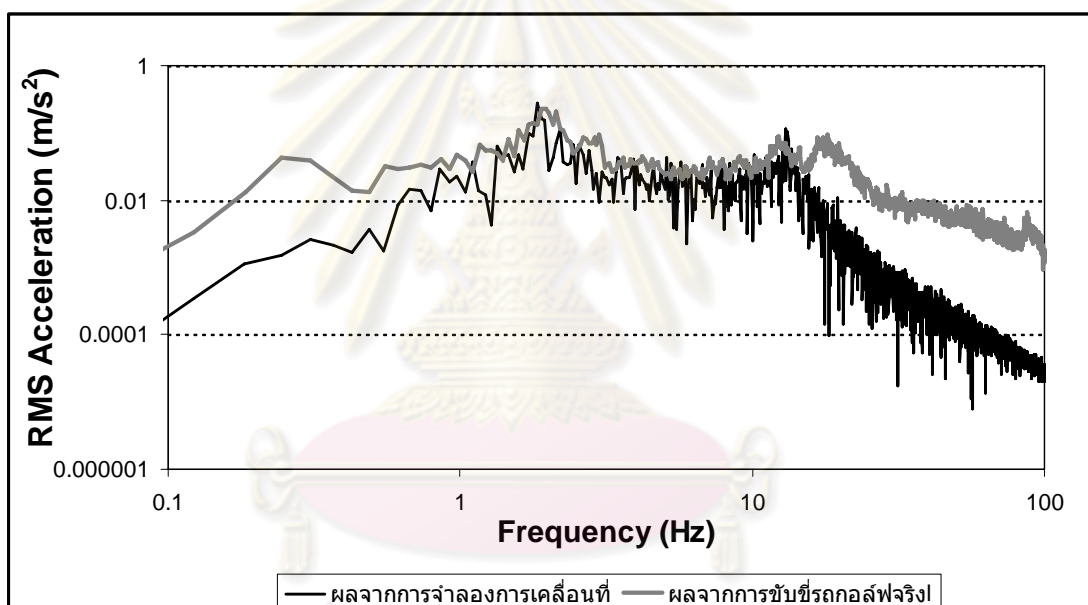
จากข้อมูลดังกล่าว พบว่าค่าความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้จากการขับซีร็อกอล์ฟจริงสอดคล้องกับทางทฤษฎีทั้งในเรื่องของความถี่ธรรมชาติและผลของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เพิ่มขึ้นของระบบรองรับต่อความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับ



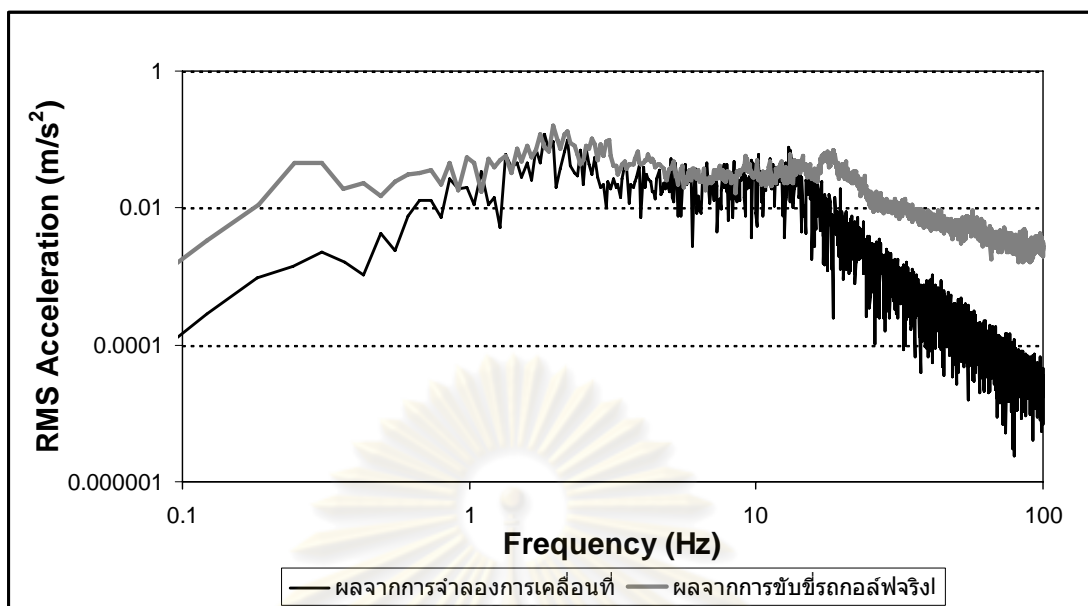
รูปที่ 9-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $a_w$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับ ( $\xi$ ) ต่างๆ

### 9.1.3.3 ผลการทวนสอบค่าที่คำนวณได้จากการใช้แบบจำลอง เปรียบเทียบกับค่าที่เก็บได้จากการแล่นรถกอล์ฟจริง

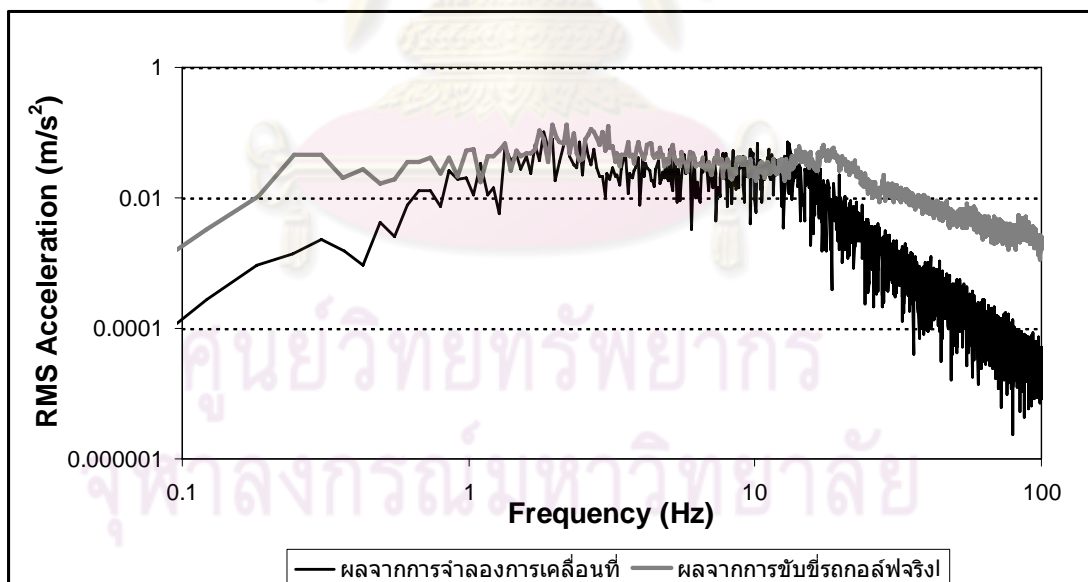
ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้วของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่บนโปรแกรม MATLAB & SIMULINK และข้อมูลที่เก็บได้จากการขับชี่รถกอล์ฟจริง โดยแสดงอยู่ในรูปค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับบนโดเมนความถี่ ( $\ddot{a}_w(f)$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลังที่สัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับเท่ากับ 285.16, 730.16, 897.16 และ 1342.16 N-s/m แสดงดังรูปที่ 9-30 รูปที่ 9-31 รูปที่ 9-32 และ รูปที่ 9-33 ตามลำดับ



รูปที่ 9-30 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักบนโดเมนความถี่ ( $\ddot{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับชี่รถกอล์ฟจริงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 285.16 N-s/m

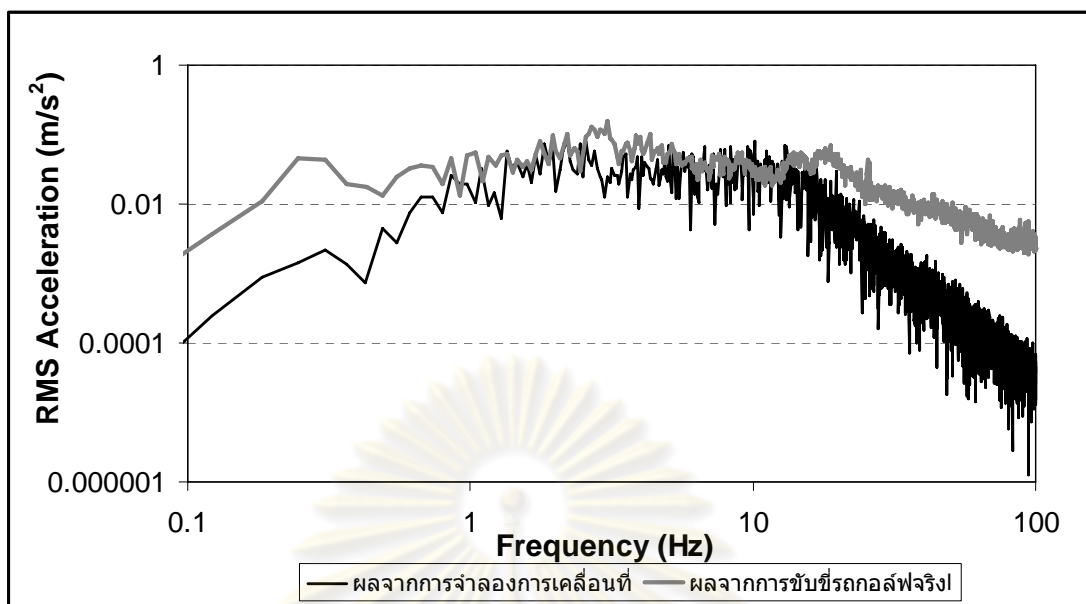


รูปที่ 9-31 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับซีรอกอล์ฟจริง บนโดเมนความถี่ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 730.16 N-s/m



รูปที่ 9-32 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับซีรอกอล์ฟจริง บนโดเมนความถี่ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 897.16 N-s/m





รูปที่ 9-33 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของความเร็วของมวลส่วนสปริงรองรับที่ให้ค่านำหนักแล้ว ( $\tilde{a}_w(f)$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่กับค่าที่ได้จากการขับช้อรคกอล์ฟจริง บนโดเมนความถี่ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) 1342.16 N-s/m

จากรูปที่ 9-30 รูปที่ 9-31 รูปที่ 9-32 และรูปที่ 9-33 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิผลของความเร็วของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $\tilde{a}_w(f)$ ) คำนวณได้จากแบบจำลองด้วยการใช้โปรแกรม MATLAB & SIMULINK มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เก็บได้จากการแล่นรถกอล์ฟจริงในช่วง 1 – 20 Hz และเนื่องจากระบบรองรับด้านหน้าของรถกอล์ฟไม่ได้อิสระจากระบบรองรับด้านหลังโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงพบการสั่นพ้องที่ความถี่ที่ 18 Hz ซึ่งใกล้กับความถี่ธรรมชาติของล้อและยางของระบบรองรับด้านหน้า (ดูภาคผนวก ฉ) และในส่วนของช่วงความถี่ตั้งแต่ 18 – 100 Hz จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิผลของความเร็วที่ได้จากการขับช้อรคกอล์ฟจริงมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ คาดว่าน่าจะเป็นเพราะสภาวะการทำงานจริงของรถกอล์ฟนั้นเป็นระบบที่มีระดับขั้นเสรีมากกว่าสอง ซึ่งในระบบอาจมีการสั่นสะเทือนภายในมากมาย เช่น การสั่นของชุดเฟืองท้าย ความไม่สมดุลของเพลลา ซึ่งในที่นี้ไม่ได้มีการศึกษา เป็นต้น แต่เนื่องจากค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ตั้งแต่ความถี่ 25 Hz เป็นต้นไปจะมีค่าน้อยมาก ความถี่ช่วงดังกล่าวจึงมีผลน้อยมากในการประเมินความสะดวกสบายจากการขับช้อรคกอล์ฟโดยสสาร

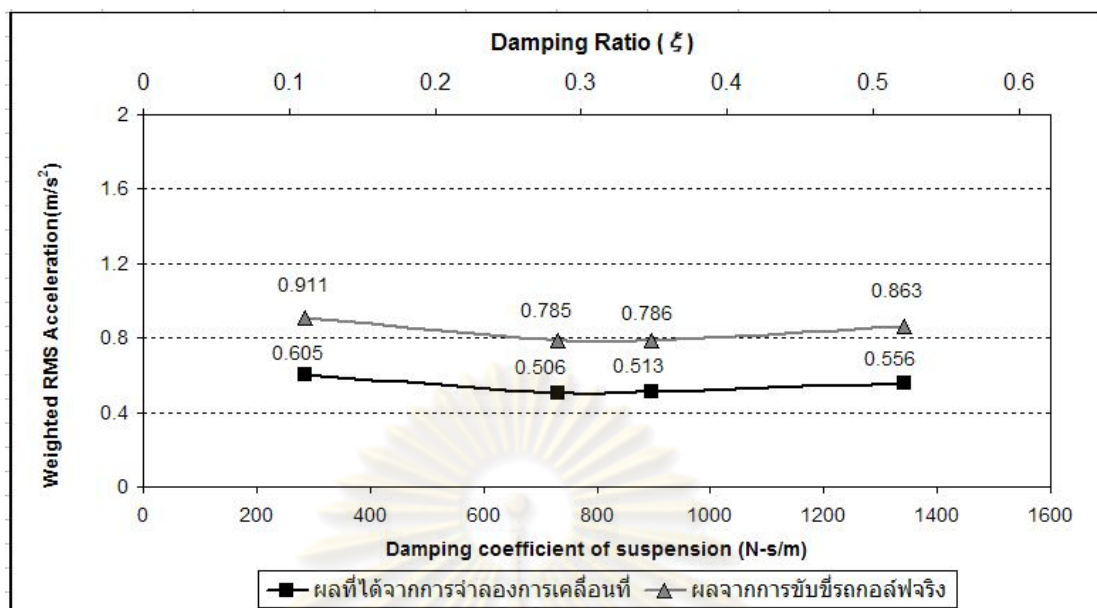
และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร็วรวมของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง ( $a_w$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่จะให้ค่าประสิทธิผลรวมของความเร็วของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) น้อยกว่าการขับช้อรคกอล์ฟจริงประมาณ 0.3  $m/s^2$  ดังรูปที่ 9-34 คาดว่าน่าจะเป็นเพราะสภาวะการ

ทำงานจริงของรถกอล์ฟนั้นเป็นระบบที่มีระดับขั้นเสรีเมากว่าสอง ซึ่งในระบบอาจมีการสั่นสะเทือนภายในมากมาย เช่น การสั่นของชุดเฟืองท้าย ความไม่สมดุลของเพลลา เป็นต้น จึงทำให้ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้จากการทำซ้ำที่รถกอล์ฟจริงค่ามากกว่าผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ ถึงแม้ว่าค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับของการซ้ำที่จริงจะมีค่ามากกว่า แต่ทั้งผลการจำลองการเคลื่อนที่และการซ้ำที่จริงอยู่ในระดับขั้นของความสบายเดียวกันตาม ISO 2631-1 ดังตารางที่ 9-6 จึงถือว่าแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งนั้นสามารถใช้ศึกษาในเรื่องของความสะดวกสบายจากการซ้ำที่ได้

ตารางที่ 9-6 ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลสปริงรองรับ และการประเมินความสะดวกสบายจากการซ้ำที่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับต่างๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างการจำลองการเคลื่อนที่การซ้ำที่รถกอล์ฟจริง

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ	ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่		ผลจากการซ้ำที่รถกอล์ฟจริง	
	ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลสปริงรองรับ	ระดับความสบายตามมาตรฐาน ISO 2631-1	ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งของมวลสปริงรองรับ	ระดับความสบายตามมาตรฐาน ISO 2631-1
285.16 N-s/m	0.605 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้	0.911 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้
730.16 N-s/m	0.506 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้	0.785 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้
897.16 N-s/m	0.513 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้	0.786 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้
1342.16 N-s/m	0.556 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้	0.863 m/s <sup>2</sup>	รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบายได้

ในแง่ของการออกแบบ จะเห็นได้ว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $a_w$ ) กับค่าความสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) ระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการแล่นรถกอล์ฟจริงมีแนวโน้มเดียวกัน ดังรูปที่ 9-34 จึงถือได้ว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถนำมาช่วยในการออกแบบระบบรองรับในการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนได้



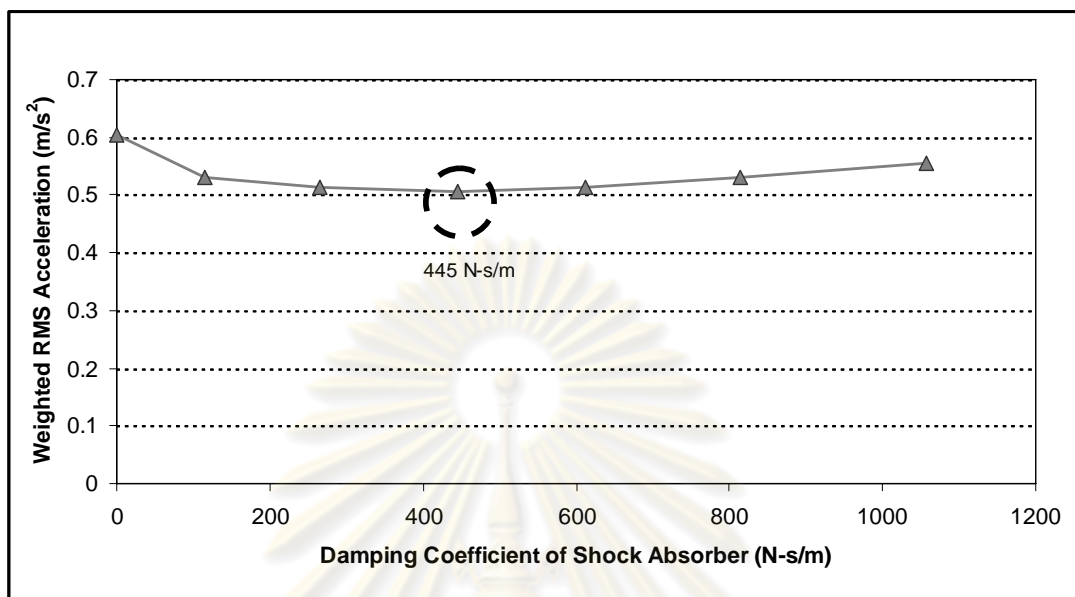
รูปที่ 9-34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับหลังให้ค่าน้ำหนักแล้ว ( $a_w$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_2$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับ ( $\xi$ ) ต่างๆ

ดังนั้นจึงถือได้ว่าการจำลองการเคลื่อนที่บนโปรแกรม MATLAB & SIMULINK ของมวลส่วนสปริงรองรับนั้นด้วยการใช้แบบจำลองรถชนิดหนึ่งในสี่ และให้ข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบ มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ออกแบบระบบรองรับในการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนให้เกิดความสะควกสบายมากที่สุด ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไปในเรื่องของการสาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

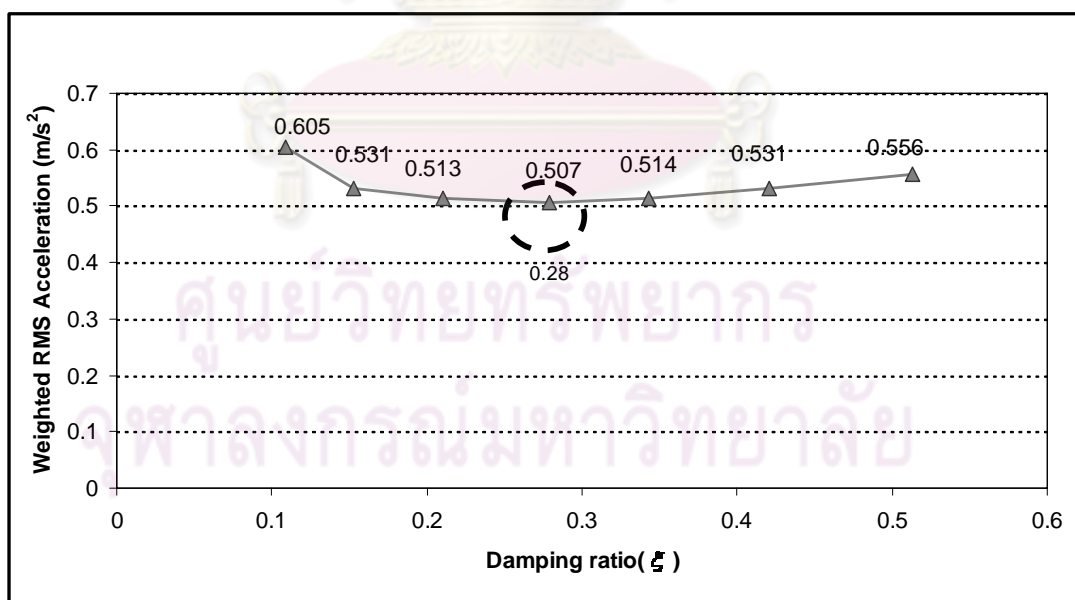
## 9.2 การสาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

ในการสาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการออกแบบระบบรองรับของรถกอล์ฟในครั้งนี้ จะสาธิตการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนของรถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของ บริษัท ทีเอส วีซีเคิลเทค ที่ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังต่ำที่สุด โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะของรถกอล์ฟดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 และข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบที่กล่าวไว้ในบทที่ 6 จำลองการเคลื่อนที่ของรถกอล์ฟบนข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบโดยมีการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ค่าต่างๆ เพื่อศึกษาผลของค่าประสิทธิภาพผลของความเร่งของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง ซึ่งได้ผลการจำลองดังรูปที่ 9-35 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เหมาะสมอยู่ที่ค่า 445 N-s/m และมีค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) ของระบบรองรับอยู่ที่ 0.28

ดังรูปที่ 9-36 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบระบบรองรับโดยทั่วไปของรถยนต์ที่จะให้อัตราส่วนความหน่วงของระบบรองรับอยู่ที่ 0.3 [22]



รูปที่ 9-35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนต่างๆ ( $c_s$ )



รูปที่ 9-36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของความเร่งที่ให้ค่าน้ำหนัก  $W_k$  ตาม ISO 2631-1 ของมวลส่วนสปริงรองรับ ( $a_w$ ) เทียบกับค่าอัตราส่วนความหน่วง ( $\xi$ ) ของระบบรองรับต่างๆ

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 10.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการวัดลักษณะถนนและเก็บข้อมูลลักษณะถนนที่เป็นตัวแทนของถนนสนามกอล์ฟในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดลักษณะถนนของสนามทดสอบในการทดสอบระบบรองรับของรถกอล์ฟ และแสดงการใช้งานลักษณะถนนของสนามทดสอบที่ได้ ซึ่งผลสรุปมีดังนี้

#### 10.1.1 การเก็บข้อมูลสภาพถนนในสนามกอล์ฟ

1. สภาพถนนส่วนใหญ่ในสนามกอล์ฟที่ได้ทำการสำรวจเป็นถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยาง
2. จากผลการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟพบว่า ร้อยละ 58.43 ของระยะทางที่วัดทั้งหมด มีค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) อยู่ที่  $0.000512 - 0.001024 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  และ รองลงมาร้อยละ 31.54 มีค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) อยู่ที่  $0.001024 - 0.002048 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{m})$  ซึ่งทั้งคู่จัดเป็นถนนเกรด F ตามมาตรฐาน ISO 2631-1
3. ผลจากการสำรวจสนามกอล์ฟพบว่าควรจะใช้ค่าความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งที่จุดอ้างอิง ( $G_d(\Omega_0)$ ) อยู่ที่  $0.00072 \text{ m}^3$  นำมากำหนดข้อมูลลักษณะถนนของสนามทดสอบ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของการกระจัดในแนวตั้งได้ดังนี้  $G_d(\Omega) = 0.00072 \cdot (\Omega)^{-2}$

#### 10.1.2 การทวนสอบด้วยการขับชี้รถกอล์ฟจริง และ สถิติการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

1. จากผลการทวนสอบแบบจำลองด้วยการขับชี้รถกอล์ฟจริง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับ ( $c_1$ ) กับค่าประสิทธิผลความเร่งประสิทธิผลรวมของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลัง ( $a_w$ ) พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่จะให้ค่าประสิทธิผลรวมของความเร่งน้อยกว่าการขับชี้ในสนามกอล์ฟจริง ประมาณ  $0.3 \text{ m/s}^2$  สำหรับทุกค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเมื่อประเมินความเสถียรภาพจากการขับชี้ตามข้อแนะนำใน ISO 2631-1 แล้วทั้งสองค่าต่างอยู่ในระดับความเสถียรภาพเดียวกัน และกราฟของทั้งสองค่ามีแนวโน้มของ



ความสัมพันธ์เป็นไปในทางเดียวกัน จึงถือว่าแบบจำลองรถกอล์ฟชนิดหนึ่งในสี่ที่ใช้สามารถนำมาช่วยในการออกแบบระบบรองรับได้จริง

2. การสาธิตการประยุกต์ใช้ลักษณะถนนของสนามทดสอบในการออกแบบระบบรองรับของรถกอล์ฟ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนของรถกอล์ฟที่เหมาะสม โดยใช้ข้อมูลของรถกอล์ฟรุ่น Bravo TT-11 ของบริษัท ที เอส วิเคิล ที่สภาวะการใช้งานจริงและใช้แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ของรถกอล์ฟในการคำนวณ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock Absorber) ที่ค่า 445 N-s/m จะให้ค่าประสิทธิผลของความเร่งรวมของมวลส่วนสปริงรองรับด้านหลังซึ่งเป็นที่อยู่ของผู้โดยสารเป็นเกณฑ์บอกถึงความสะดวกสบายขณะขับที่มีค่าน้อยสุดเท่ากับ  $0.507 \text{ m/s}^2$

## 10.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

งานวิจัยครั้งนี้แสดงการใช้งานลักษณะถนนเพื่อประเมินความสะดวกสบายจากการขับซึ่งในความเป็นจริงแล้วดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของระบบรองรับยังมีอีกมาก อาทิ ด้านความปลอดภัยจากการขับช้ำ หรือ ความทนทานของชิ้นส่วน ตัวแทนลักษณะถนนที่ได้มานั้นยังเป็นประโยชน์ต่อการประเมินดัชนีชี้วัดของระบบรองรับได้อีกด้วย ซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาเป็นงานวิจัยอื่นต่อไปได้

ส่วนการเก็บค่าสถิติของลักษณะถนนในสนามกอล์ฟนั้น ควรลองเปลี่ยนวิธีวัดลักษณะถนนแบบอื่น และนำมาเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาการวัดลักษณะถนนให้มีแนวทางหลากหลายมากขึ้น และหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการวัดลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ

ในด้านการสาธิตการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนเพื่อประเมินความสะดวกสบายจากการขับช้ำ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาทิศทาง การเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่เข้าสู่ตัวมนุษย์ในท่านั่งเท่านั้น ดังนั้นจึงควรศึกษาทิศทาง การเคลื่อนที่ในแนวแกนนอนๆ ด้วย เพื่อให้มีข้อมูลมากขึ้นในการออกแบบระบบรองรับให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด

## รายการอ้างอิง

- [1] ฉัตรชัย หงษ์อุเทน. กลศาสตร์ยานยนต์ 2. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] Herbert Schlitt. System theorie für regellose Vorgänge Statistische Verfahren für die Nachrichten- und Regelungstechnik. Germany :Springer\_verlag, 1960
- [3] Cyril M. Harris, Allan G.Piersol, Harris' shock and vibration handbook. United States of America : McGraw-Hill, 2002
- [4] ก่อเกียรติ บุญชูกุล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนการเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา. พิมพ์ครั้งที่ 1: ดวงกลมสมัย, 2540.
- [5] International Standards Organization. Mechanical vibration-Road surface profiles- Reporting of measured data. ISO 8608; 1995.
- [6] Michael W.S., Steven M.K. The Little Book of Profiling. University of Michigan, 1998.
- [7] American Society for Testing and Materials Standard. Standard Test Method for Measureing Road Roughness by Static Rod and Level Method, ASTM E1364, 1996.
- [8] K. Martin Saeger, John B. Ferris. Plausibility Checking of Road Profile Measurements[Online]. Available from : [www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/2003/01-0669/SAE2003-01.pdf](http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/2003/01-0669/SAE2003-01.pdf), [2003]
- [9] Thomas D. Gillespie. Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask!. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1992.
- [10] International Standards Organization. Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole body vibration. ISO 2631-1, 1997-05-01.
- [11] K Ramji, A Gupta, V H Saran, Prof V K Goel, Prof V Kumar. Road Roughness Measurement using PSD Approach. Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division 85 (2004) : 193 - 201
- [12] Peter Andren. Power spectral density approximation of longitudinal road profiles. Int. J. Vehicle Design 40 (2006) : 2 – 14

- [13] P.S. Els. The applicability of ride comfort standard to off-road vehicle. Journal of Terramechanics 42 (2004) : 47 – 64
- [14] P.E. Uys , P.S. Els, M. Thoresson. Suspension settings for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds. Journal of Terramechanics 44 (2007) : 163 – 175
- [15] P.S. Els, N.J. Theron, P.E. Uys, M.J. Thoresson. The ride comfort vs handling compromise for off-road vehicle. Journal of Terramechanics 44 (2004) : 303 – 317
- [16] Alberto doria, Vittore cossalter, Stefano garbin, Roberto lot, Frequency-domain method for evaluating the ride comfort of a motorcycle. Vehicle System Dynamics 44 (2006) : 339 – 335
- [17] Semiha Turkey, Huseyin Akcay. A Study of random vibration characteristics of the quarter-car model. Journal of sound and vibration 282 (2005) : 111-124
- [18] International Import & export Ltd.,Part. Koni testing machine model 4422 for shocks absorbers with diagrams 1 (2004) : 2-3
- [19] เฉษฐา เตชัสหงส์, ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของคู่เฟืองตรงที่มีการสึกหรอ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, หน้า 1 – 7. 18 – 20 ตุลาคม 2547 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [20] Victor Wowk. Machinery Vibration Measurement and analysis. United States of America : McGraw-Hill, 1991
- [21] Thomas D. Gillespie. Fundamentals of vehicle Dynamics. The United States of America: Society of Automotive Engineer, 1992
- [22] Julian Happian-Smith, An Introduction to Modern Vehicle Design. India :Butterworth-Heinemann, 2001
- [23] Wikipedia the free encyclopedia. Butterworth filter[Online]. Available from : [http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter), [2008, September 15]
- [24] Wikipedia the free encyclopedia. Aliasing[Online] Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Aliasing>, [2008, September 15]
- [25] สมยศ จันเกษม. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล. พิมพ์ครั้งที่ 3: ดวงกลมสมัย, 2546

- [26] Cutis instrument. 50003\_1221C-1231C\_RevD[1][Online]. Available from :  
<http://www.curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=cProducts.dspProductCategory&catID=9>, [2009, April 29]
- [27] Cutis instrument. 50084\_1311\_RevC[1][Online]. Available from :  
<http://curtisinst.com/index.cfm?fuseaction=Industry.LightOnRoad>,  
 [2009, April 29]
- [28] คณิต วัฒนวิเชียร, อนวัช คงสุริยะภิญโญ. การจำลองลักษณะถนน เพื่อใช้ในการออกแบบรถ  
 กอล์ฟ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22,  
 หน้า 248 – 253.15 ตุลาคม 2551 ณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต  
 จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
- [29] คณิต วัฒนวิเชียร, อนวัช คงสุริยะภิญโญ. การศึกษาความเสถียรของรถ  
 กอล์ฟ. Proceedings งานประชุม “ศรีนครินทร์วิโรฒวิชาการ” ครั้งที่ 3, หน้า 245 - 255.  
 22 มกราคม 2552 ณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ จังหวัดกรุงเทพมหานคร.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บรรณานุกรม

- [1] ฉัตรชัย หงษ์อุเทน. กลศาสตร์ยานยนต์ 2. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] International Standards Organization. Mechanical vibration-Road surface profiles-Reporting of measured data. ISO 8608; 1995.
- [3] International Standards Organization. Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole body vibration. ISO 2631-1, 1997-05-01.
- [4] Michael W.S., Steven M.K. The Little Book of Profiling. University of Michigan, 1998.
- [5] American Society for Testing and Materials Standard. Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Rod and Level Method, ASTM E1364, 1996.
- [6] ก่อเกียรติ บุญชูกุล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนการเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา. พิมพ์ครั้งที่ 1: ดวงกลมสมัย, 2540.
- [7] Thomas D. Gillespie. Fundamentals of vehicle Dynamics. The United States of America: Society of Automotive Engineer, 1992
- [8] Victor Wowk. Machinery Vibration Measurement and analysis. United States of America : McGraw-Hill, 1991

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

การกรองความถี่แบบ Butterworth Filter

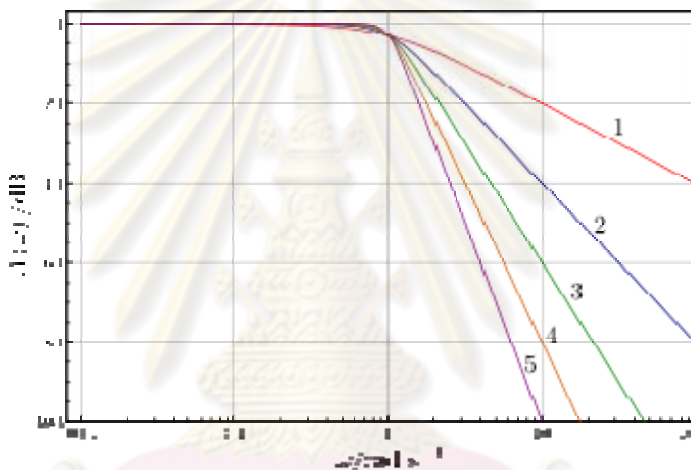
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การกรองความถี่แบบ Butterworth filter

Butterworth filter เป็นวิธีการกรองความถี่ที่ถูกออกแบบ ให้มีความถี่ช่วงใช้งานเป็นฟังก์ชันขยายที่เรียบส่วนความถี่ในช่วงที่ไม่ได้ใช้งานจะลู่เข้าสู่ศูนย์บางครั้งจึงมีอีกชื่อหนึ่งว่า maximally flat magnitude filters

การกรองถี่แบบ Butterworth filter หากเป็นอันดับที่หนึ่งจะมีค่าความชันของการลดลงของช่วงที่ไม่ได้ใช้งานอยู่ที่  $-6$  dB ต่อ octave หรือ  $-20$  dB ต่อ decade ส่วนอันดับสองและสาม จะเพิ่มขึ้นเป็น  $-12$  dB ต่อ octave หรือ  $-40$  dB ต่อ decade และ  $-18$  dB ต่อ octave หรือ  $-60$  dB ต่อ decade ดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 การกรองความถี่แบบ Butterworth filter ในอันดับต่างๆ [23]

ในการออกแบบสมการในการกรองความถี่ทั่วไปสมการต้นแบบจะเป็น lowpass filter จากนั้นพัฒนาไปสู่ Highpass filter และเมื่อนำ lowpass filter และ Highpass filter ใช้ร่วมกันจะประยุกต์ใช้เป็นการกรองแบบ band-pass และ band-stop filters ต่อไป

ฟังก์ชันขยายของ Butterworth lowpass filter อันดับที่  $n$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันขยาย  $H(s)$  ได้ดังนี้

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (\text{ก-1})$$

โดยที่

- $n$  คือ อันดับในการกรองความถี่
- $\omega_c$  คือ ค่าความถี่ cut-off ความถี่ที่มีขนาดลดลง  $-3$  dB
- $G_0$  คือ ค่ากำลังขยาย

ในบางครั้งเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ Pole และ Zero ได้ดังสมการ

$$H(s) = \frac{G_0}{\prod_{k=1}^n (s - s_k / \omega_c)} \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่  $s_k = \omega_c e^{\frac{j(2k+n-1)\pi}{2n}}$   $k = 1, 2, \dots, n$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

การเกิดปรากฏการณ์ Aliasing

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

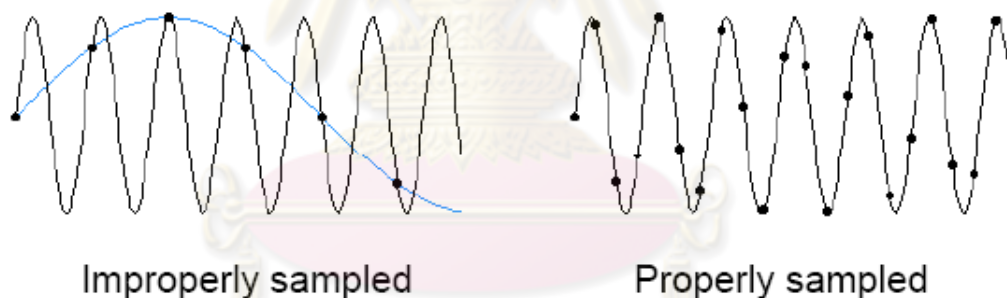


## ภาคผนวก ข

### การเกิดปรากฏการณ์ Aliasing

โดยปกติแล้วในการเก็บข้อมูลสัญญาณจะต้องเก็บข้อมูลอย่างน้อย 2 เท่าของความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัดเช่น ในกรณีวัดคลื่นความสั่นสะเทือนของเสียงที่คนได้ยินจะมีความถี่อยู่ที่ 20 - 20000 Hz ในการเก็บสัญญาณเสียงจะต้องเก็บอย่างน้อย 40000 Hz ถึงจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ 20000 Hz ตามกฎของ Nyquist criterion

นอกจากนี้หากสัญญาณที่ได้มีความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่สามารถวัดได้จะเกิดการซ้อนทับของขนาดของสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าช่วงที่วัดได้ เข้ามาปนกับขนาดของสัญญาณที่มีความถี่ในช่วงที่วัดได้เราเรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า Aliasing จะขอยกตัวอย่างดังรูปที่ ข-1 ภาพทางซ้ายจะเห็นว่าสัญญาณที่ต้องการ (เส้นสีดำ) มีความถี่สูงกว่าความถี่ที่ใช้ในการเก็บสัญญาณ (จุดสีดำ) จะทำให้ความถี่ที่อ่านค่าได้เป็นสัญญาณความถี่ต่ำเกิดขึ้นแทน (เส้นสีฟ้า) ในขณะที่ภาพทางขวามีความถี่ที่ใช้ในการเก็บสัญญาณมากกว่า 2 เท่าของสัญญาณที่ต้องการวัดจะไม่เกิดปรากฏการณ์ Aliasing



รูปที่ ข-1 ภาพแสดงการเก็บสัญญาณด้านซ้าย ไม่เป็นไปตามกฎของ Nyquist criterion ด้านขวา เป็นการเก็บสัญญาณที่เป็นไปตามกฎ Nyquist criterion [24]

ในการเก็บข้อมูลสามารถป้องกันหรือลดการเกิด Aliasing ได้ 2 วิธี คือ

1. ในกรณีที่รู้ความถี่ของของสัญญาณที่เข้ามาให้เก็บข้อมูลสัญญาณที่เข้ามาด้วยความถี่ที่มากกว่า 2 เท่าของความถี่สูงสุด ของสัญญาณที่วัด
2. ในกรณีที่ไม่รู้ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัด ให้กรองความถี่ที่สูงกว่าสัญญาณที่ต้องการวัดทิ้งไปเพื่อใหขนาดของสัญญาณที่ความถี่สูงกว่าสัญญาณที่ต้องการมีขนาดลดน้อยลงจนไม่มีผลต่อสัญญาณความถี่ต่ำที่สนใจ ซึ่งบางครั้งอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล (Data logger) มีระบบการกรองสัญญาณแบบนี้ในตัวและเรียกว่า Antialias filter



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการวัดลักษณะถนนที่สนามต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลการวัดลักษณะถนนที่สนามต่างๆ

รายละเอียดในภาคผนวกนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 จะแสดงภาพของเส้นทางถนนในสนามกอล์ฟที่ได้ทำการวัด และสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่จัดรูปตามมาตรฐาน ISO 8608 ที่คำนวณได้หลังจากคูณด้วยค่าสอบเทียบ (Calibration factor) แล้ว ของถนนเส้นทางนั้น โดยจะแบ่งเป็นช่วงๆ ตามลักษณะกายภาพที่สังเกตเห็นได้ ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 6

ส่วนที่ 2 จะแสดงตารางผลการวัดลักษณะถนนในช่วงต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 ที่อยู่ในรูปความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ความถี่ต่างๆ บน Octave bandwidth ของการวัดลักษณะถนน 3 ครั้ง การเฉลี่ยผลการวัดทั้ง 3 ครั้งบนโดเมนความถี่ และ เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการมาตรฐานตาม ISO 8608 กล่าวคือ ปรับให้สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดมีค่า  $w$  เท่ากับ 2 ที่คูณด้วยค่าสอบเทียบแล้ว

ส่วนรูปที่แสดง

- ด้านบน คือ ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางในรูป Octave bandwidth ของการวัดทั้ง 3 ครั้ง
- ด้านล่าง คือ ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางในรูป Octave bandwidth ของผลการเฉลี่ยการวัดทั้ง 3 ครั้ง และ สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ก่อนการจัดรูปให้อยู่ในรูปมาตรฐานตามกระบวนการใน ISO 8608

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการสังเกตถนนในช่วงต่างๆ และสมการความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ตามกระบวนการในมาตรฐาน ISO 8608

ค.1.1 สนามลักษณะถนนในสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A ในแต่ละช่วง

ช่วง 0 – 1000 เมตร แรกนับจากจุดเริ่มตีที่หลุม 1

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในช่วง 0 – 1000 เมตรแรกนับจากจุดเริ่มตีกอล์ฟที่หลุม 1 แสดงไว้ในรูปที่ ค-1



รูปที่ ค-1 แสดงลักษณะถนนในช่วง 0 – 1000 เมตรแรกนับจากจุดเริ่มตีกอล์ฟที่หลุม 1 ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ต คลับ โซน A

สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00189 \cdot (\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1400 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A**

ถนนในช่วงนี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในระยะตั้งแต่ 1000 – 1400 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-2



รูปที่ ค-2 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1400 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00162(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

**ช่วงระยะตั้งแต่ 1400 – 1600 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A**

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในระยะตั้งแต่ 1400 – 1600 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-3



รูปที่ ค-3 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1400 – 1600 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00183(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



**ช่วงระยะตั้งแต่ 1600 – 2000 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A**

ถนนในช่วงนี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก สภาพถนนในช่วงนี้ผิวถนนค่อนข้างดีไม่ค่อยพบเห็นรอยแตก ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1600 – 2000 เมตร แสดงไว้ในรูปที่

ค-4



รูปที่ ค-4 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1600 – 2000 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ โชน A

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00124(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

**ระยะตั้งแต่ 2000 – 2600 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A**

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2000 – 2600 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-5



รูปที่ ค-5 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2000 – 2600 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ โชน A

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00163(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 3450 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจนและพบเห็นอย่างต่อเนื่อง ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 3450 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-6



รูปที่ ค-6 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 3450 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00202(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 3450 – 3850 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากการปลูกไม้ยืนต้นไว้สองข้างทางรากของต้นไม้จึงสร้างความเสียหายให้กับถนน ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3450 – 3850 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-7



รูปที่ ค-7 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3450 – 3850 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00240(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

### ค.1.2 สนามลักษณะถนนในสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B ในแต่ละช่วง

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 450 เมตรแรก

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่อนความถี่ต่ำของถนนได้ความสูงไม่มากนัก ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระเพราะผิวหน้าคอนกรีตหลุดร่อนจนสังเกตเห็นได้ชัดเจน ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 450 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-8



รูปที่ ค-8 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 450 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่ได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.001388(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 450 – 550 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ถนนในช่วงนี้เป็นถนนที่ลาดชันขึ้นและไม่พบเนินหรือคลื่อนความถี่ต่ำ สภาพถนนค่อนข้างเก่าและขรุขระเพราะผิวหน้าคอนกรีตหลุดร่อนจนสังเกตเห็นได้ชัดเจน ภาพถนนในช่วง 450 – 550 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-9



รูปที่ ค-9 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 450 – 550 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00139(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



### ช่วงระยะตั้งแต่ 550 – 650 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน B

ถนนในช่วงนี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่า และขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 550 – 650 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-10



รูปที่ ค-10 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 550 – 650 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ โชน B

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00158(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 650 – 850 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน B

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระเพราะผิวหน้าคอนกรีตหลุดร่อนจนสังเกตเห็นได้ชัดเจน ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 650 – 850 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-11



รูปที่ ค-11 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 650 – 850 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ โชน B

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00215(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

ช่วงระยะตั้งแต่ 850 – 1250 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ถนนในช่วงระยะตั้งแต่นี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก สภาพถนนในช่วงนี้ผิวถนนค่อนข้างดีไม่ค่อยพบเห็นรอยแตก ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 850 – 1250 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-12



รูปที่ ค-12 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 850 – 1250 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.0014(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

ช่วงระยะตั้งแต่ 1250 – 1350 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจนและพบเห็นอย่างต่อเนื่อง ถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่า ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1250 – 1350 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-13



รูปที่ ค-13 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1250 – 1350 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00175(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



ช่วงระยะตั้งแต่ 1350 – 1550 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ถนนในช่วงนี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก สภาพถนนในช่วงนี้ผิวถนนค่อนข้างดีไม่ค่อยพบเห็นรอยแตก ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1350 – 1550 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-14



รูปที่ ค-14 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1350 – 1550 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.001257(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

ช่วงระยะตั้งแต่ 1550 – 2050 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างเก่าและขรุขระพบเห็นรอยแตกของผิวถนนได้เป็นระยะๆ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1550 – 2050 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-15



รูปที่ ค-15 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1550 – 2050 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00215(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

ช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 3300 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B ถนนในช่วงนี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีพบเห็นถนนที่ผิวหน้าคอนกรีตหลุดร่อนอยู่บ้างแต่ไม่มาก ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 3300 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-16



รูปที่ ค-16 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 2150 เมตร ของสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ต คลับ โซน B

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00163(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ค.1.3 ลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ต กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน West ในแต่ละช่วง

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 100 เมตร แรก

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวางตัวของอิฐค่อนข้างสม่ำเสมอ มีสะพานไม้สำหรับข้ามน้ำอยู่ด้วย ถนนในช่วงนี้ทั้งช่วงมีการปูด้วยยางบางๆ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 100 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-17



รูปที่ ค-17 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน West

สมการของความหนาแน่นของสเปคตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.002679(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

### ช่วงระยะตั้งแต่ 100 – 3100 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 100 – 3100 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-18



รูปที่ ค-18 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 100 – 3100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน West

สมการของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000625(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวางตัวของอิฐค่อนข้างสม่ำเสมอ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-19



รูปที่ ค-19 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน West

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000471(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด E



### ช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3800 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3800 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-20



รูปที่ ค-20 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3800 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน West

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.001657(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

### ช่วงระยะตั้งแต่ 3800 – 3900 เมตร

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวางตัวของอิฐค่อนข้างสม่ำเสมอ ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3800 – 3900 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-21



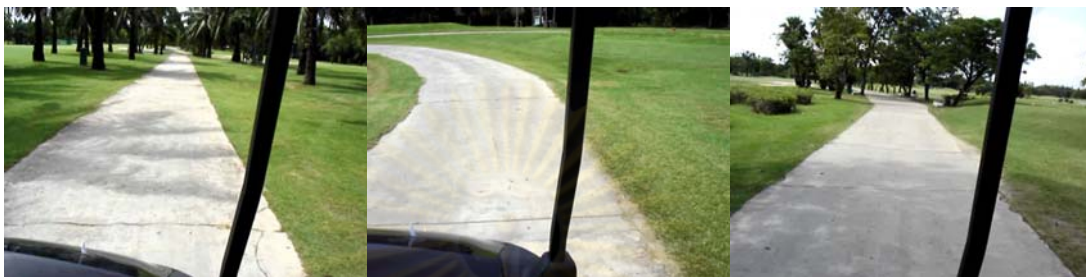
รูปที่ ค-21 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3800 – 3900 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน West

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00265(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

#### ค.1.4 ลักษณะถนนในสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในโซน North ในแต่ละช่วง

##### ช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 700 เมตรแรก

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีสภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 700 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-22



รูปที่ ค-22 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 700 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท แอน คันทรี คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000715(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

##### ช่วงระยะตั้งแต่ 700 – 900 เมตร

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวางตัวของอิฐค่อนข้างสม่ำเสมอ มีสะพานไม้สำหรับข้ามน้ำอยู่ด้วยสภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 700 – 900 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-23



รูปที่ ค-23 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 700 – 900 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท แอน คันทรี คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.001722(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G



### ช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1000 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1000 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-24



รูปที่ ค-24 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1000 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี่ คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000918(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1100 เมตร

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปตัวหนอน การวางตัวของอิฐไม่สม่ำเสมอ มีสะพานไม้สำหรับข้ามน้ำที่มีการปูด้วยยางอยู่ด้วย ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1100 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-25



รูปที่ ค-25 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1000 – 1100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี่ คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.005054(\Omega)^{-2}$

ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

### ช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1200 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1200 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-26

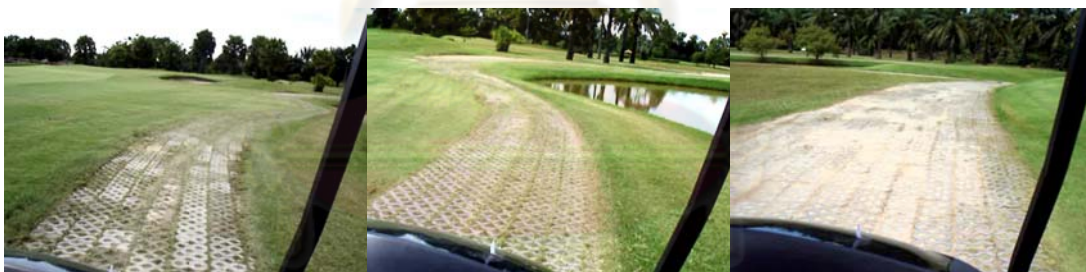


รูปที่ ค-26 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1200 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000349\Omega^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด E

### ช่วงระยะตั้งแต่ 1200 – 1300 เมตร

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปตัวหนอน การวางตัวของอิฐไม่สม่ำเสมอภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1200 – 1300 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-27



รูปที่ ค-27 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1200 – 1300 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.008082\Omega^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด G

### ช่วงระยะตั้งแต่ 1300 – 2600 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1300 – 2600 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-28



รูปที่ ค-28 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1300 – 2600 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000904(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 2600 – 2800 เมตร

ถนนในช่วงนี้ไม่ได้เป็นถนนคอนกรีตแต่เป็นการปูพื้นด้วยอิฐรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวางตัวของอิฐค่อนข้างสม่ำเสมอภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2600 – 2800 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-29



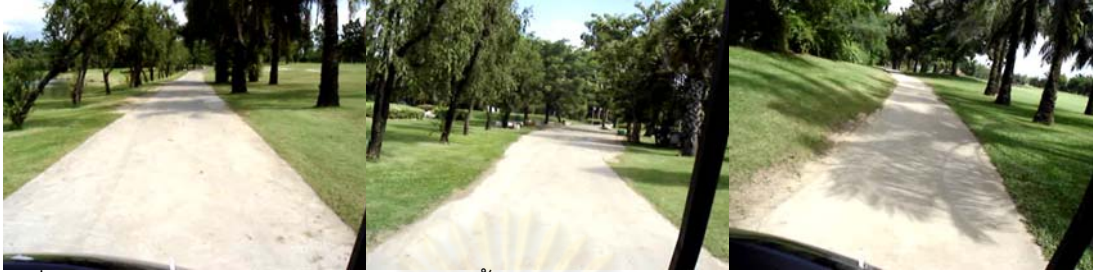
รูปที่ ค-29 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2600 – 2800 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โซน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00174(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



### ช่วงระยะตั้งแต่ 2800 – 3400 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2800 – 3400 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-30



รูปที่ ค-30 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2800 – 3400 เมตร ของสนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์ เอิร์ต แอน คันทรี คลับ โชน North

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.001214(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ค.1.5 ลักษณะถนนในสนามกอล์ฟไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ ในแต่ละช่วง

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตรแรก

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-31

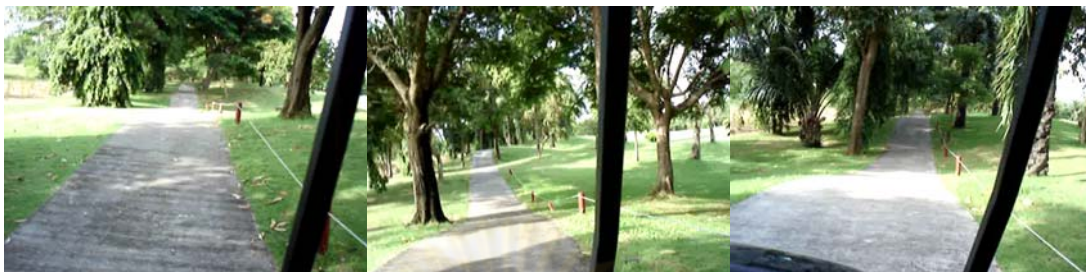


รูปที่ ค-31 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000705(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 350 เมตร

ถนนในช่วงนี้จะสามารถสังเกตเห็นหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้ชัดเจน ภาพถนนในช่วง 200 – 350 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-32



รูปที่ ค-32 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 350 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00134(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 350 – 2050 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 350 – 2050 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-33



รูปที่ ค-33 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 350 – 450 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี่ คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000456(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด E



### ช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 2650 เมตร

ถนนในช่วงนี้เป็นเส้นทางเรียบเป็นส่วนใหญ่ พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเห็นได้ไม่ชัดเจนไม่บ่อยแต่สภาพถนนค่อนข้างเก่าพบเห็นรอยแตกของถนน ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 2650 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-34



รูปที่ ค-34 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2050 – 2650 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอนด์ คันทรี่ คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000934(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 2850 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 2850 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-35



รูปที่ ค-35 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2650 – 2850 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอนด์ คันทรี่ คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000584(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 2850 – 3000 เมตร

ถนนในช่วงนี้เป็นเส้นทางเรียบเป็นส่วนใหญ่ พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำของถนนได้บ้าง แต่เห็นได้ไม่ชัดเจน ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2850 – 3000 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-36



รูปที่ ค-36 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2850 – 3000 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอนด์ คันทรี่ คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.001044(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 3000 – 4400 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3000 – 4400 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-37

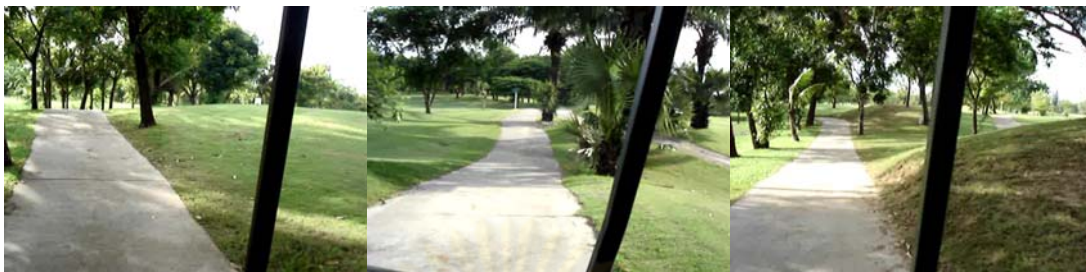


รูปที่ ค-37 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3000 – 4400 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอนด์ คันทรี่ คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00073(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 4400 – 5100 เมตร

ถนนในช่วงนี้จะพบเห็นเนินอยู่บ้างเล็กน้อยและความสูงไม่มาก สภาพถนนในช่วงนี้ค่อนข้างดีภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 4400 – 5100 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-38



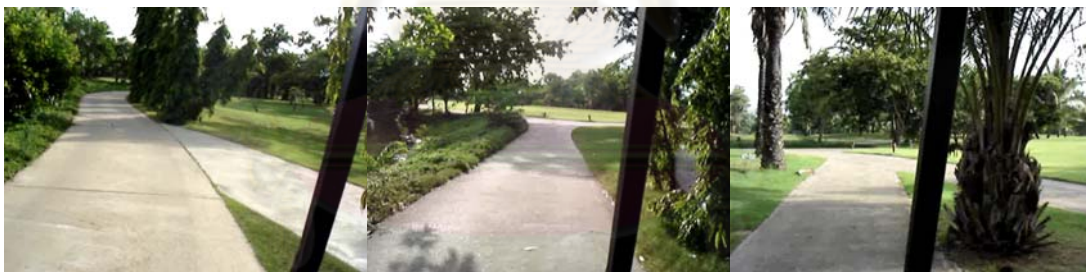
รูปที่ ค-38 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 4400 – 5100 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ

$$G_d(\Omega) = 0.001569 \cdot (\Omega)^{-2} \text{ ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F}$$

### ช่วงระยะตั้งแต่ 5100 – 7000 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 5100 – 7000 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-39



รูปที่ ค-39 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 5100 – 7000 เมตร ของสนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000635 \cdot (\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



### ค.1.6 ลักษณะถนนในสนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับในหลุม 1 – 9

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 500 เมตร แรก

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 500 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-40



รูปที่ ค-40 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 500 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 1-9

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000618(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 500 – 800 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย แต่สภาพถนนดูเก่าและขรุขระกว่าช่วงแรกเล็กน้อย ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 500 – 800 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-41



รูปที่ ค-41 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 500 – 800 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 1-9

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000785(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 800 – 1100 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 800 – 1100 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-42



รูปที่ ค-42 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 800 – 1100 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 1-9

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00063(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1900 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย แต่สภาพถนนดูเก่าขรุขระเล็กน้อย มีอุปสรรคพื้นวางทำทางอยู่ 2 - 3 จุด ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1900 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-43



รูปที่ ค-43 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1100 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 1-9

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00078(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



### ช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 2700 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 2700 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-44

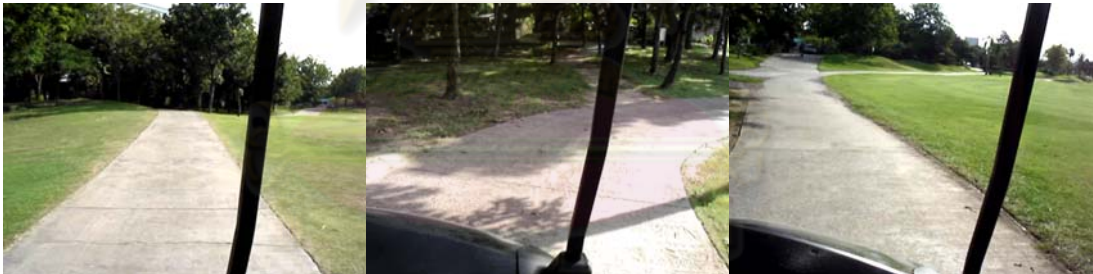


รูปที่ ค-44 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 2700 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 1-9

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00068(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 2700 – 2900 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบตรงพบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำบ้างแต่ความสูงไม่มากนัก และ สภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2700 – 2900 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-45



รูปที่ ค-45 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 2700 – 2900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 1-9

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000946(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ค.1.7 ลักษณะถนนในสนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับในหลุม 10 – 18

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร แรก

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-46



รูปที่ ค-46 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 0 – 200 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000726(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

#### ช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 900 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบตรงพบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำบ้างแต่ความสูงไม่มากนัก ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 900 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-47



รูปที่ ค-47 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 200 – 900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00113(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1900 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1900 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-48



รูปที่ ค-48 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 900 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ

$$G_d(\Omega) = 0.000767 \cdot (\Omega)^{-2} \text{ ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F}$$

### ช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 3100 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบตรงพบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำบ้างแต่ความสูงไม่มากนัก ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 3100 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-49



รูปที่ ค-49 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 1900 – 3100 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000992 \Omega^{-2}$

ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F



### ช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-50



รูปที่ ค-50 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3100 – 3200 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000662(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3300 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย แต่สภาพถนนขรุขระเล็กน้อยเนื่องจากผิวหน้าของคอนกรีตหลุดร่อนออกไปภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3300 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-51



รูปที่ ค-51 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3200 – 3300 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.00092(\Omega)^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

### ช่วงระยะตั้งแต่ 3300 – 3700 เมตร

ถนนในช่วงนี้เส้นทางเรียบไม่พบเห็นเนินหรือคลื่นความถี่ต่ำเลย และสภาพถนนค่อนข้างดี ภาพถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3300 – 3700 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ ค-52



รูปที่ ค-52 แสดงลักษณะถนนในช่วงระยะตั้งแต่ 3300 – 3700 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอก กอล์ฟคลับ หลุม 10-18

สมการของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของถนนที่วัดได้ คือ  $G_d(\Omega) = 0.000609\Omega^{-2}$  ซึ่งจัดเป็นถนนเกรด F

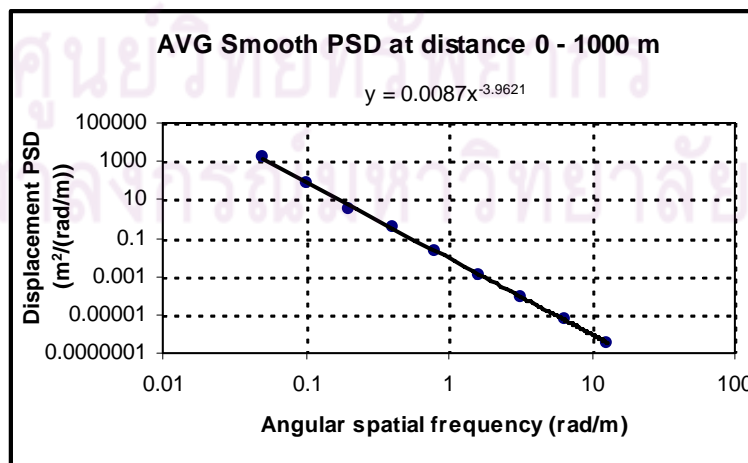
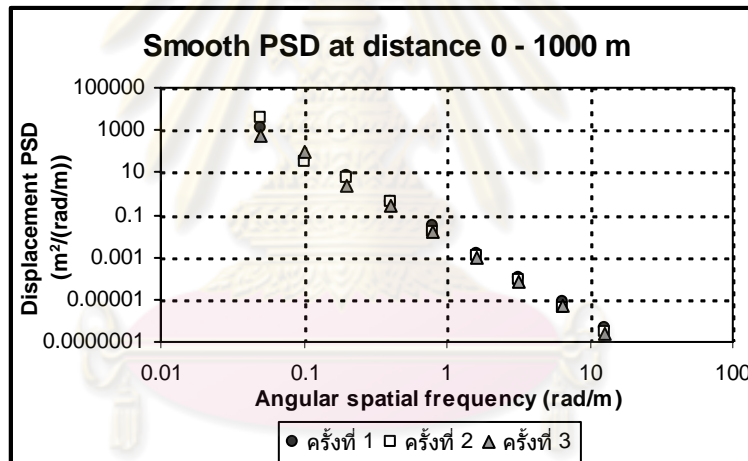
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค.2 แสดงข้อมูลผลการวัดลักษณะถนนหลังจากแปลงให้อยู่ในรูปความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของการกระจัดและอยู่ในรูป Octave band แล้ว

ตารางที่ ค-1 ความหนาแน่นของค่าสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ช่วง 0 - 1000 เมตรของสนามกอล์ฟ พัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

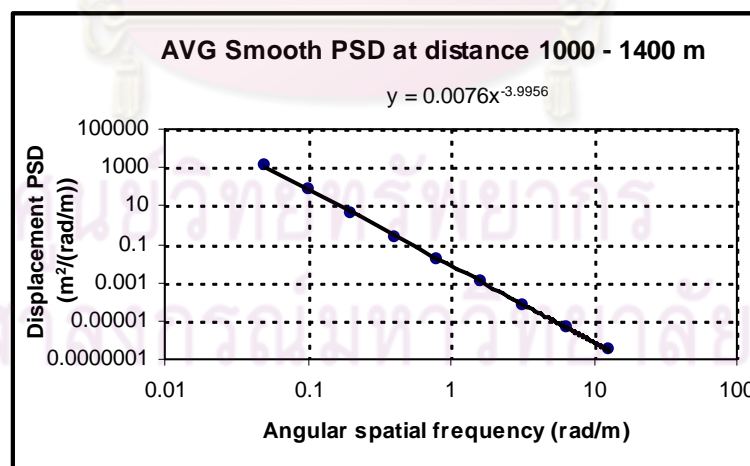
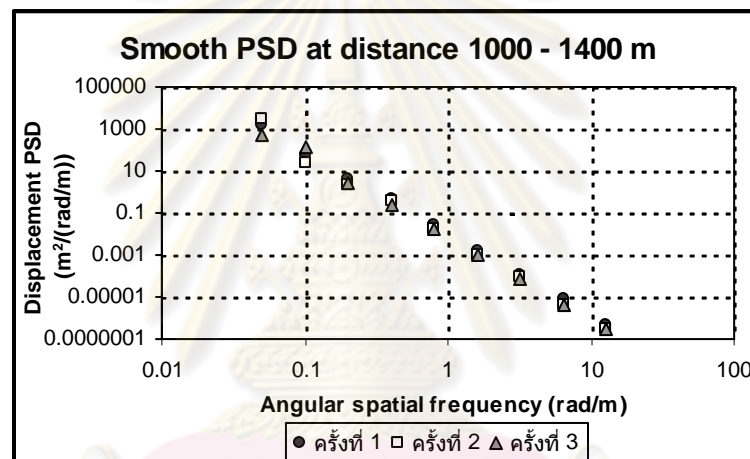
ความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/แปลงสมการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1414.505	4050.288	507.9474	1990.913	5.390605
0.100530965	40.30668	30.67149	104.3238	58.43399	1.347651
0.20106193	6.434708	5.733594	2.609233	4.925845	0.336913
0.40212386	0.447613	0.38017	0.254893	0.360892	0.084228
0.804247719	0.027911	0.017468	0.015996	0.020458	0.021057
1.608495439	0.001593	0.001073	0.000981	0.001216	0.005264
3.216990877	0.000106	8.25E-05	7.2E-05	8.69E-05	0.001316
6.433981755	7.53E-06	4.48E-06	4.56E-06	5.52E-06	0.000329
12.86796351	4.25E-07	3.01E-07	2.63E-07	3.3E-07	8.23E-05



รูปที่ ค-53 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 - 1000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน A

ตารางที่ ค-2 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ช่วง 1000 – 1400 เมตร ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	3223.906	624.1177	463.4405	1437.155	4.63905
0.100530965	52.13714	51.52502	112.8738	72.17867	1.159762
0.20106193	3.068491	5.639349	3.067421	3.925087	0.289941
0.40212386	0.399431	0.276071	0.093195	0.256232	0.072485
0.804247719	0.031268	0.012747	0.010033	0.018016	0.018121
1.608495439	0.002078	0.000968	0.000588	0.001212	0.00453
3.216990877	0.000118	5.37E-05	3.03E-05	6.74E-05	0.001133
6.433981755	7.34E-06	3.89E-06	2.41E-06	4.55E-06	0.000283
12.86796351	4.57E-07	2.6E-07	1.89E-07	3.02E-07	7.08E-05

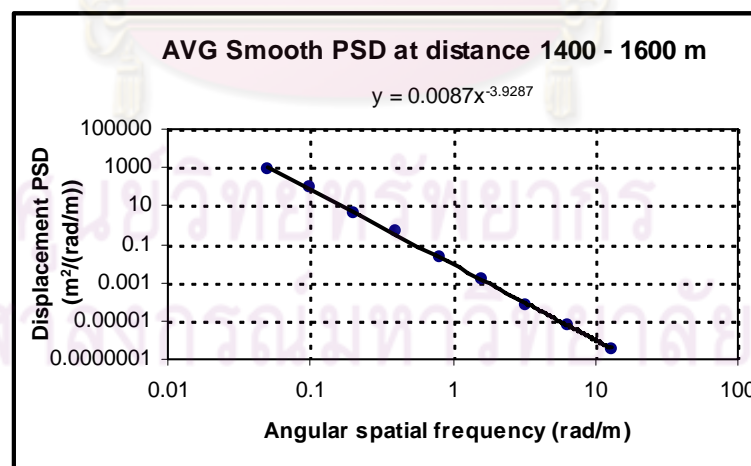
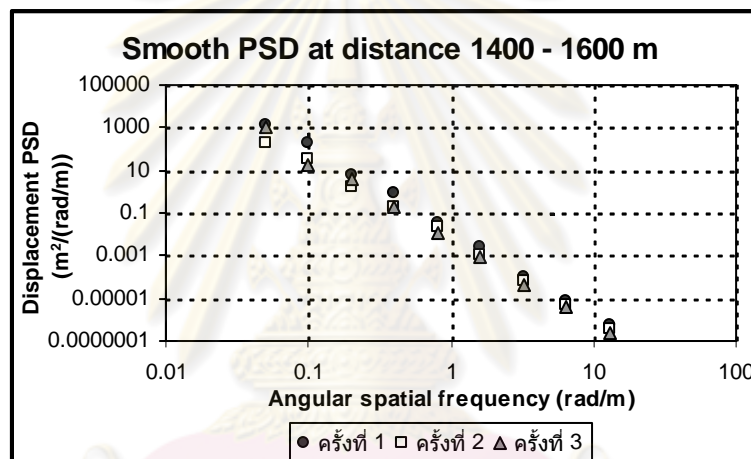


รูปที่ ค-54 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1000 – 1400 ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ โซน A

ตารางที่ ค-3 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 1400 – 1600 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1329.871	211.7937	1015.329	852.331	5.216638
0.100530965	202.6359	31.04614	17.6677	83.78325	1.304159
0.20106193	5.838517	1.770614	3.705371	3.771501	0.32604
0.40212386	0.963522	0.180551	0.202724	0.448933	0.08151
0.804247719	0.032366	0.023499	0.012467	0.022777	0.020377
1.608495439	0.002805	0.001056	0.000796	0.001552	0.005094
3.216990877	0.000111	6.66E-05	4.33E-05	7.35E-05	0.001274
6.433981755	7.42E-06	4.94E-06	3.6E-06	5.32E-06	0.000318
12.86796351	5.11E-07	3.49E-07	2.28E-07	3.62E-07	7.96E-05



รูปที่ ค-55 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

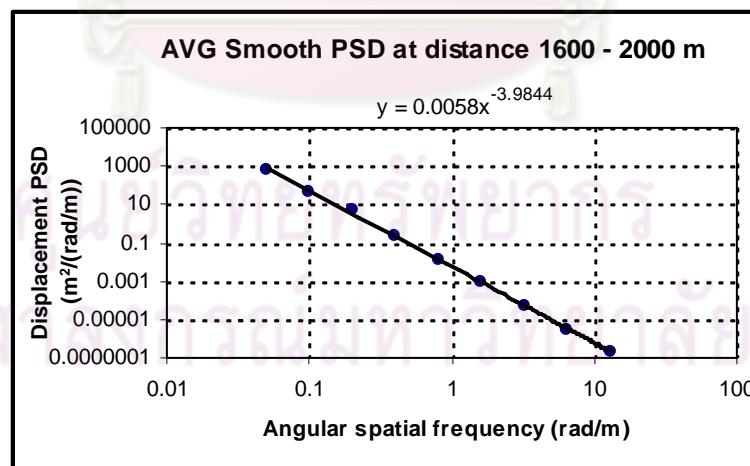
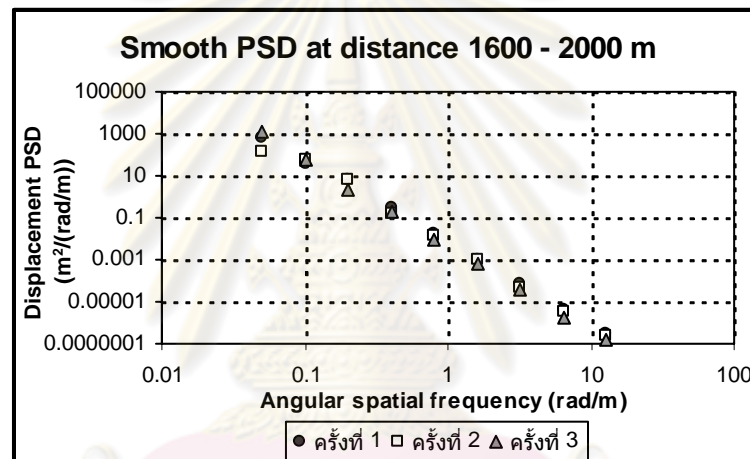
และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1400 – 1600 ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ

โซน A

ตารางที่ ค-4 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 1600 – 2000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	646.5443	128.6532	1306.087	693.7615	3.5368724
0.100530965	39.9544	54.30417	55.77525	50.01128	0.8842181
0.20106193	6.226043	6.849724	2.179352	5.085039	0.2210545
0.40212386	0.313789	0.1667	0.203288	0.227926	0.0552636
0.804247719	0.018775	0.014938	0.009122	0.014278	0.0138159
1.608495439	0.001051	0.000979	0.000609	0.00088	0.003454
3.216990877	7.22E-05	4.25E-05	3.9E-05	5.12E-05	0.0008635
6.433981755	4.22E-06	3.37E-06	1.87E-06	3.15E-06	0.0002159
12.86796351	2.92E-07	2.19E-07	1.63E-07	2.25E-07	5.397E-05



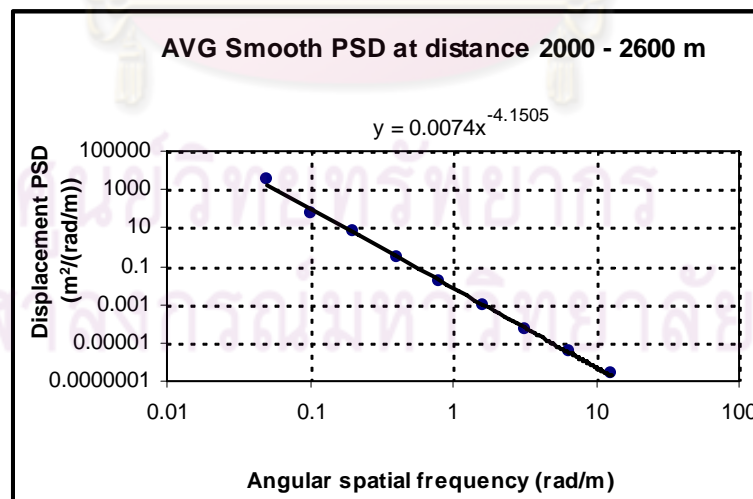
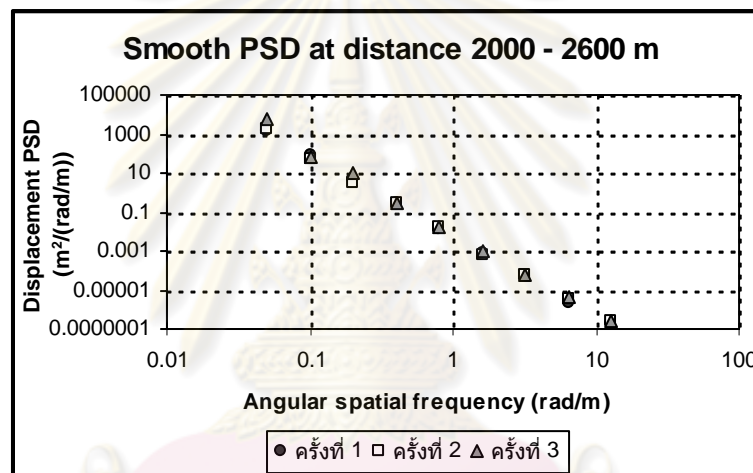
รูปที่ ค-56 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1600 – 2000 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ

โซน A

ตารางที่ ค-5 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2000 – 2600 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1382.892	1883.627	6228.872	3165.13041	4.648988
0.100530965	78.52062	55.51213	61.94685	65.3265323	1.162247
0.20106193	4.521284	3.194437	10.34783	6.02118389	0.290562
0.40212386	0.281525	0.297937	0.304166	0.29454276	0.07264
0.804247719	0.014515	0.015704	0.015467	0.01522867	0.01816
1.608495439	0.000851	0.000674	0.001098	0.00087422	0.00454
3.216990877	4.27E-05	5.46E-05	6.37E-05	5.3667E-05	0.001135
6.433981755	2.42E-06	3.46E-06	4.68E-06	3.5215E-06	0.000284
12.86796351	1.85E-07	2.46E-07	2.67E-07	2.3283E-07	7.09E-05



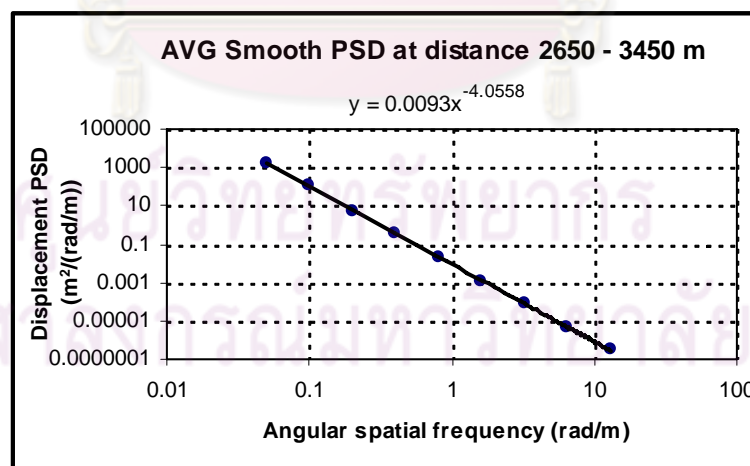
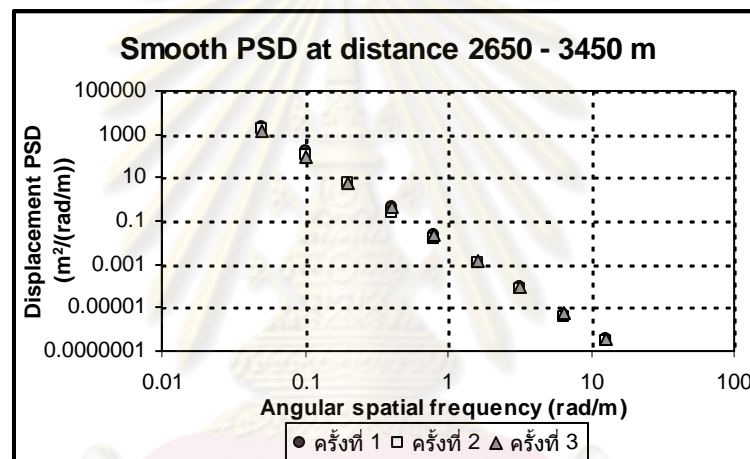
รูปที่ ค-57 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2000 – 2600 ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ โซน A



ตารางที่ ค-6 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 2650 – 3450 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	2378.447	1670.573	1377.427	1808.816	5.76584
0.100530965	187.7757	101.0747	93.1652	127.3385	1.44146
0.20106193	5.182696	5.232015	5.236991	5.217234	0.360365
0.40212386	0.405256	0.247906	0.402826	0.351996	0.090091
0.804247719	0.024136	0.016416	0.023698	0.021416	0.022523
1.608495439	0.001146	0.001202	0.001359	0.001236	0.005631
3.216990877	8.47E-05	7.64E-05	8.88E-05	8.33E-05	0.001408
6.433981755	5.04E-06	3.92E-06	5.34E-06	4.77E-06	0.000352
12.86796351	3.4E-07	2.85E-07	3.82E-07	3.36E-07	8.8E-05



รูปที่ ค-58 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

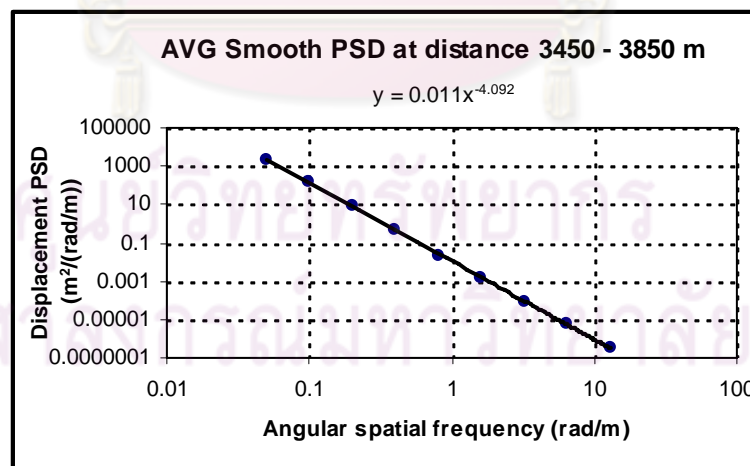
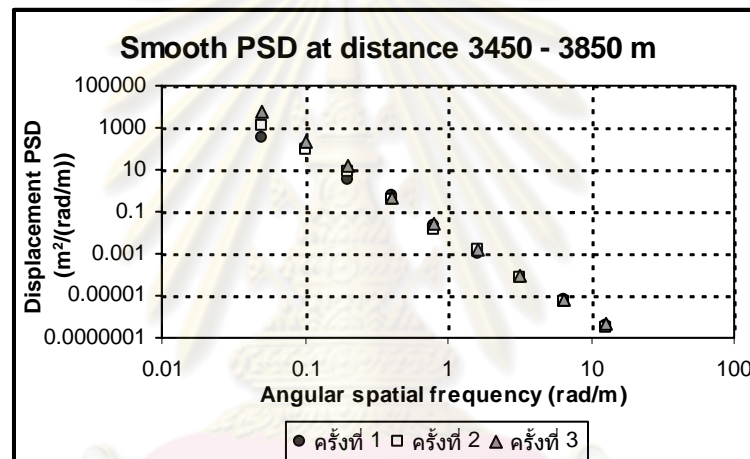
และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2650 – 3450 ของสนามกอล์ฟ พัฒนา สปอร์ตคลับ

โซน A

ตารางที่ ค-7 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 3450 – 3850 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน A

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	317.29	1249.957	5376.198	2314.482	6.852711
0.100530965	121.6246	81.97166	212.2562	138.6175	1.713178
0.20106193	3.16621	7.677222	15.74737	8.863601	0.428294
0.40212386	0.621497	0.373385	0.492402	0.495761	0.107074
0.804247719	0.022078	0.01334	0.025046	0.020155	0.026768
1.608495439	0.00102	0.001453	0.001654	0.001375	0.006692
3.216990877	7.66E-05	7.6E-05	9.51E-05	8.25E-05	0.001673
6.433981755	5.95E-06	5.28E-06	6.34E-06	5.85E-06	0.000418
12.86796351	3.78E-07	3.26E-07	4.17E-07	3.74E-07	0.000105



รูปที่ ค-59 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

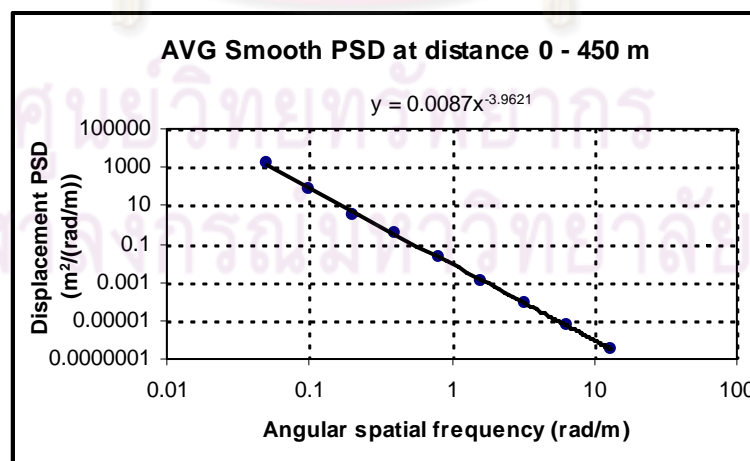
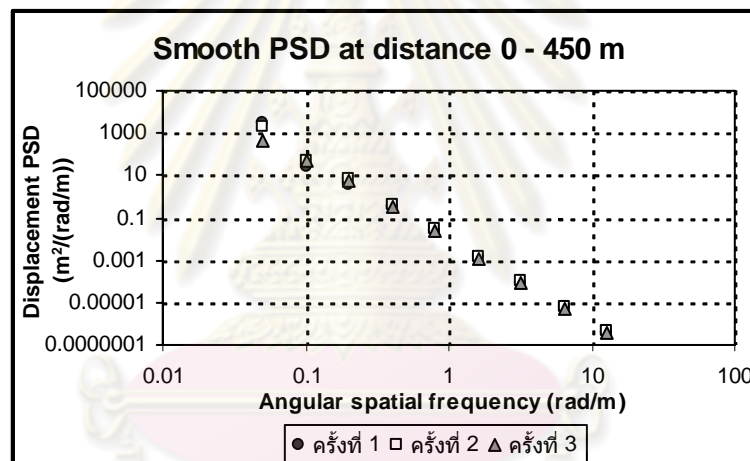
และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3450 – 3850 ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ

โซน A

ตารางที่ ค-8 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 0 – 450 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	3273.676	2137.883	457.0458	1956.202	0.77663333
0.100530965	28.58415	46.39867	50.4685	41.81711	0.194158332
0.20106193	3.916687	6.257407	5.700157	5.291417	0.048539583
0.40212386	0.310751	0.413097	0.305679	0.343176	0.012134896
0.804247719	0.024684	0.028849	0.025612	0.026382	0.003033724
1.608495439	0.001469	0.00143	0.001192	0.001364	0.000758431
3.216990877	9.18E-05	9.96E-05	8.41E-05	9.18E-05	0.000189608
6.433981755	5.85E-06	6.03E-06	5.46E-06	5.78E-06	4.74019E-05
12.86796351	4E-07	4.34E-07	3.69E-07	4.01E-07	1.18505E-05



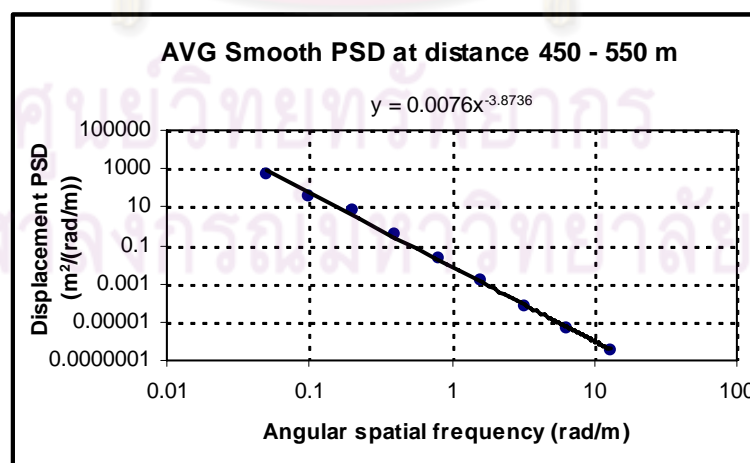
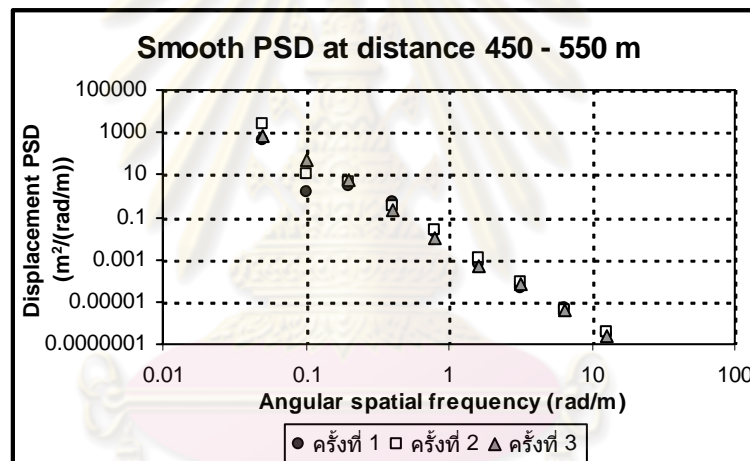
รูปที่ ค-60 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 450 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ตารางที่ ค-9 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 450 – 550 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD( $m^2/(rad/m)$ )				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	428.2722	2460.864	608.0836	1165.74	0.532036393
0.100530965	1.471745	9.87094	52.28651	21.20973	0.133009098
0.20106193	2.945942	4.723173	5.172155	4.280423	0.033252275
0.40212386	0.497779	0.352533	0.219584	0.356632	0.008313069
0.804247719	0.018809	0.023106	0.01021	0.017375	0.002078267
1.608495439	0.000603	0.001162	0.000457	0.000741	0.000519567
3.216990877	4.42E-05	7.84E-05	6.96E-05	6.41E-05	0.000129892
6.433981755	4.8E-06	3.99E-06	3.72E-06	4.17E-06	3.24729E-05
12.86796351	3.05E-07	3.35E-07	2.35E-07	2.92E-07	8.11823E-06



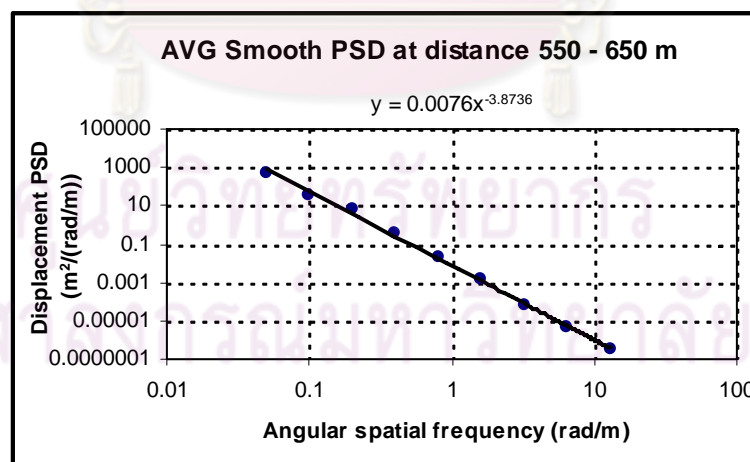
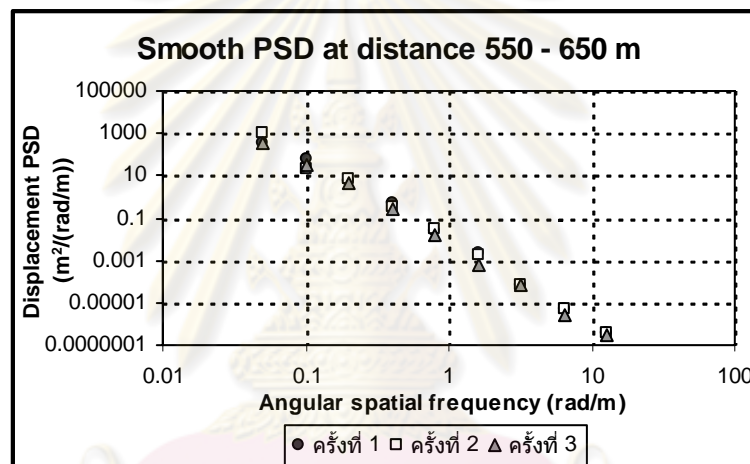
รูปที่ ค-61 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 450 – 550 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน B

ตารางที่ ค-10 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 550 – 650 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	314.687	1016.379	362.4631	564.5098	0.624929354
0.100530965	62.77998	22.07229	31.41449	38.75559	0.156232338
0.20106193	5.423092	7.487151	4.945172	5.951805	0.039058085
0.40212386	0.485953	0.344184	0.242793	0.357643	0.009764521
0.804247719	0.026391	0.027576	0.014592	0.022853	0.00244113
1.608495439	0.002027	0.001726	0.000575	0.001442	0.000610283
3.216990877	6.48E-05	7.59E-05	6.64E-05	6.9E-05	0.000152571
6.433981755	5.12E-06	5.45E-06	2.91E-06	4.5E-06	3.81427E-05
12.86796351	3.62E-07	3.73E-07	2.78E-07	3.38E-07	9.53567E-06



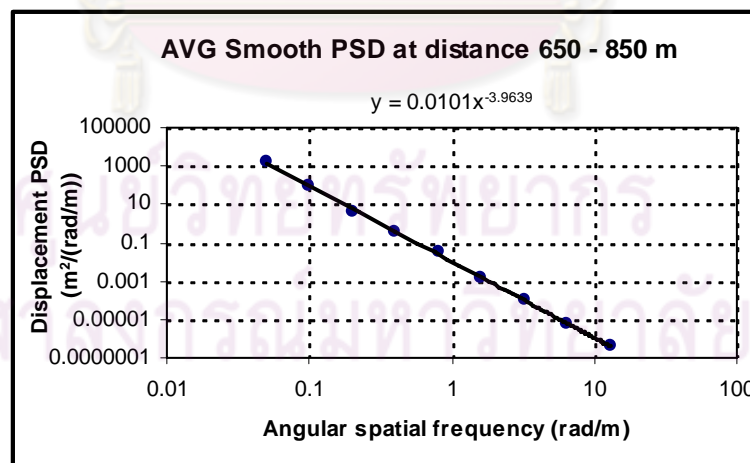
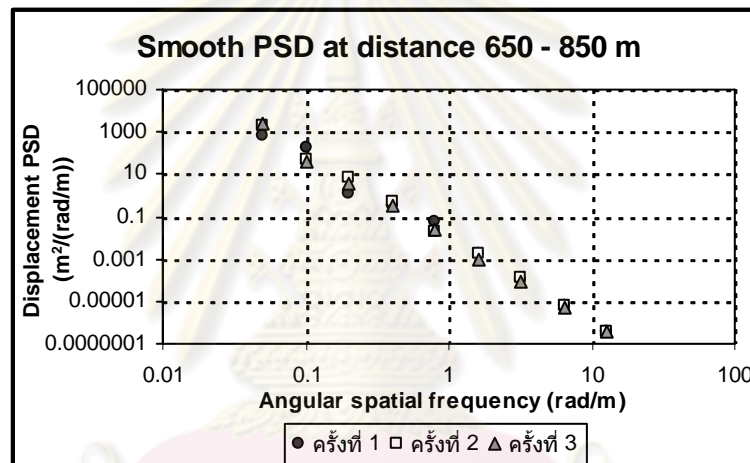
รูปที่ ค-62 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 550 – 650 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B



ตารางที่ ค-11 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 650 – 850 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบและ เข้ากระบวนการ ตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	690.4308	2101.953	2421.657	1738.014	0.852490098
0.100530965	164.0352	49.30958	39.98387	84.44288	0.213122524
0.20106193	1.281353	6.561173	3.353958	3.732161	0.053280631
0.40212386	0.339091	0.523813	0.299577	0.387494	0.013320158
0.804247719	0.060862	0.019295	0.022782	0.034313	0.003330039
1.608495439	0.001804	0.001879	0.0009	0.001527	0.00083251
3.216990877	9.71E-05	0.00013	8.51E-05	0.000104	0.000208127
6.433981755	6.22E-06	6.85E-06	4.58E-06	5.88E-06	5.20319E-05
12.86796351	4.05E-07	4.03E-07	3.53E-07	3.87E-07	1.3008E-05

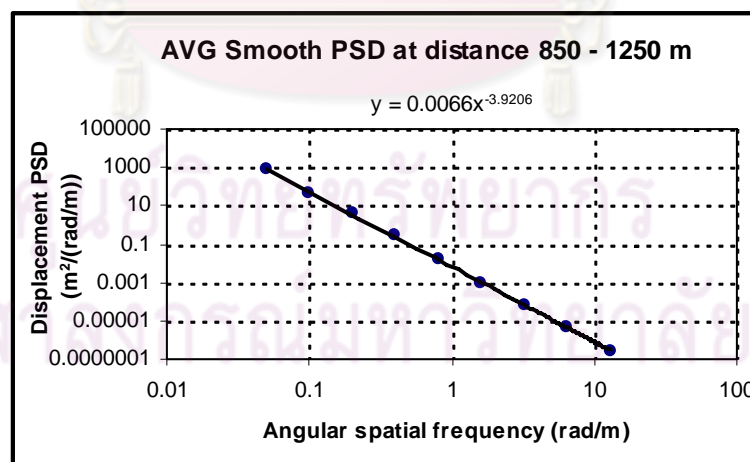
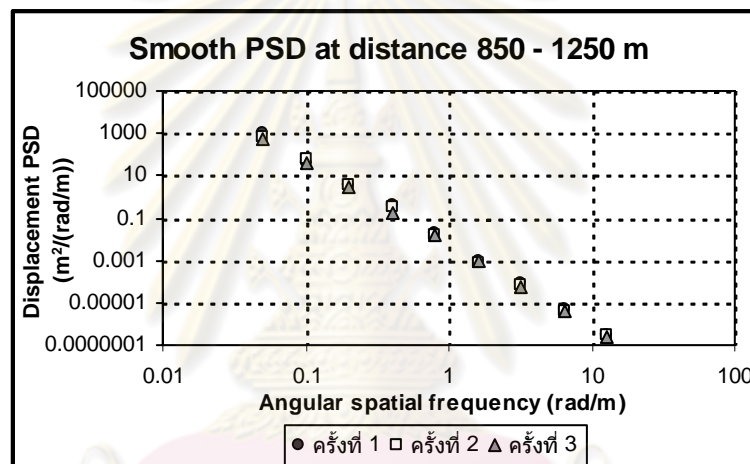


รูปที่ ค-63 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 650 – 850 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ตารางที่ ค-12 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 850 – 1250 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1002.477	730.538	544.6836	759.2328	0.552255316
0.100530965	38.81307	62.64203	40.04532	47.1668	0.138063829
0.20106193	4.038899	4.035484	3.058385	3.710923	0.034515957
0.40212386	0.417115	0.322272	0.182201	0.307196	0.008628989
0.804247719	0.018962	0.016724	0.015828	0.017171	0.002157247
1.608495439	0.001029	0.000696	0.000906	0.000877	0.000539312
3.216990877	8.29E-05	7.49E-05	5.44E-05	7.07E-05	0.000134828
6.433981755	4.62E-06	4.37E-06	3.76E-06	4.25E-06	3.3707E-05
12.86796351	3.19E-07	2.77E-07	2.63E-07	2.86E-07	8.42675E-06

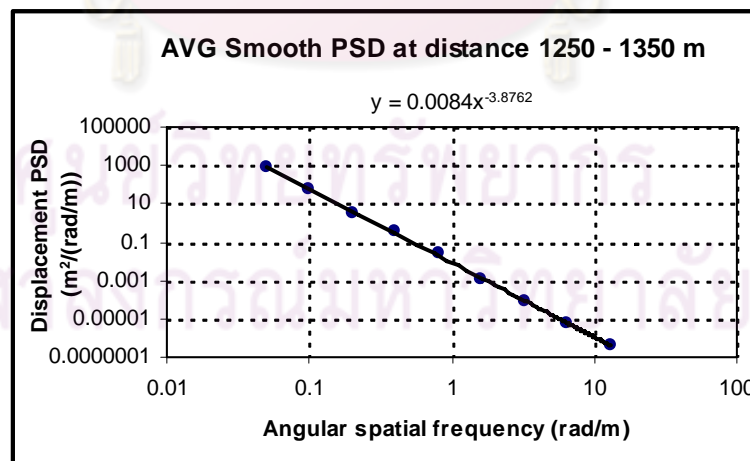
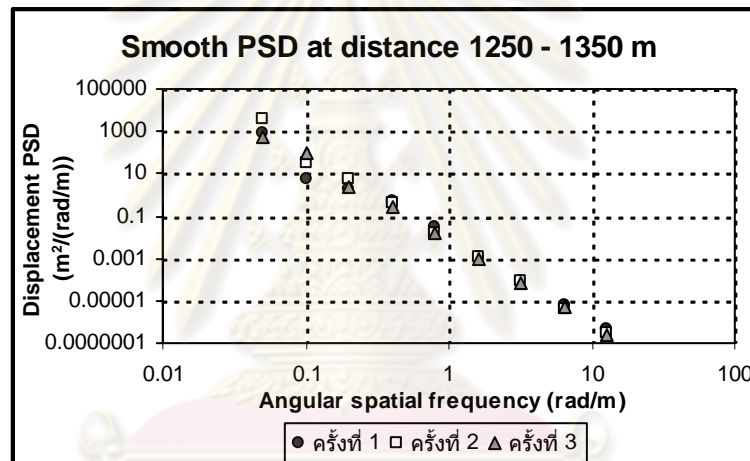


รูปที่ ค-64 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 850 – 1250 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ตารางที่ ค-13 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1250 – 1350 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	914.2872	857.8273	590.4794	787.5313	0.693743913
0.100530965	5.566241	164.8678	18.46826	62.96743	0.173435978
0.20106193	1.846533	6.787714	2.209453	3.614567	0.043358995
0.40212386	0.519178	0.351246	0.196891	0.355771	0.010839749
0.804247719	0.027368	0.024518	0.033081	0.028322	0.002709937
1.608495439	0.001282	0.000911	0.001224	0.001139	0.000677484
3.216990877	8.3E-05	4.93E-05	0.000124	8.56E-05	0.000169371
6.433981755	6.69E-06	5E-06	5.59E-06	5.76E-06	4.23428E-05
12.86796351	4.21E-07	4.23E-07	3.76E-07	4.06E-07	1.05857E-05

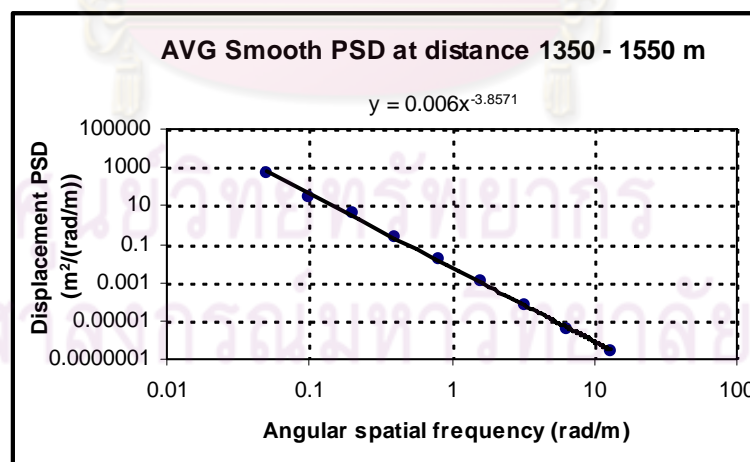
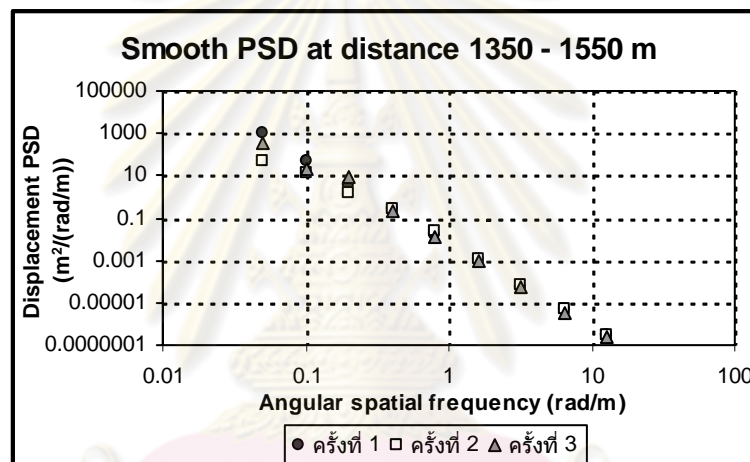


รูปที่ ค-65 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1250 – 1350 ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ โซน B

ตารางที่ ค-14 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 1350 – 1550 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1079.348	50.69973	339.9936	490.0139	0.49749804
0.100530965	54.62243	13.75467	21.75124	30.04278	0.12437451
0.20106193	3.751239	1.402782	7.974838	4.376286	0.031093627
0.40212386	0.240305	0.279317	0.21077	0.243464	0.007773407
0.804247719	0.017231	0.022896	0.01258	0.017569	0.001943352
1.608495439	0.001257	0.001159	0.000914	0.00111	0.000485838
3.216990877	5.87E-05	6.84E-05	5.47E-05	6.06E-05	0.000121459
6.433981755	4.51E-06	4.59E-06	2.92E-06	4E-06	3.03649E-05
12.86796351	2.78E-07	2.92E-07	2.65E-07	2.78E-07	7.59122E-06



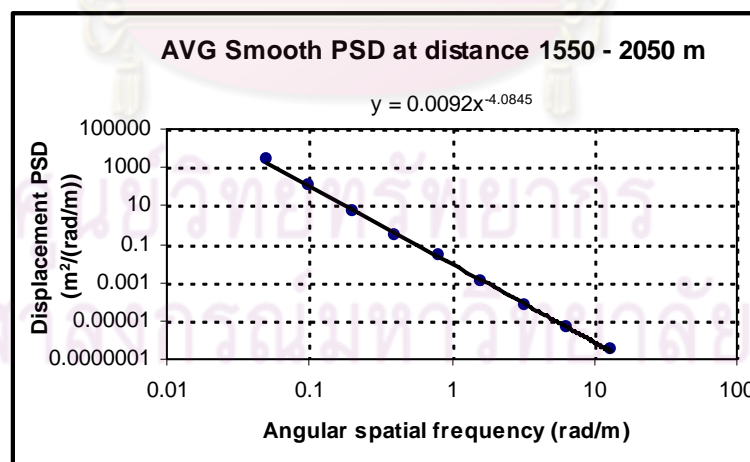
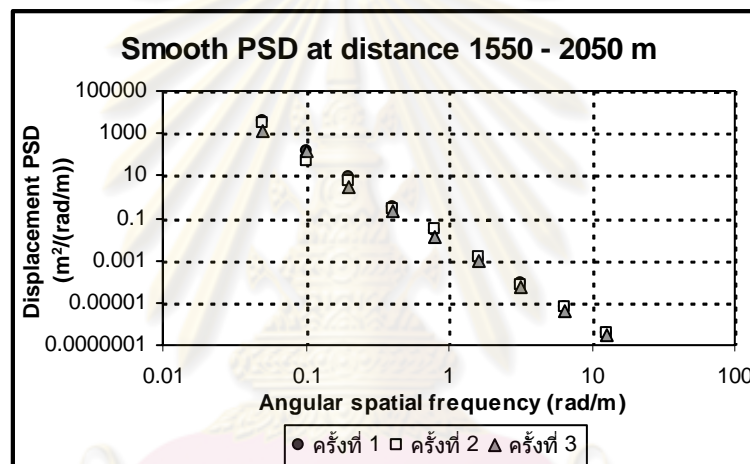
รูปที่ ค-66 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1350 – 1550 ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ

โซน B

ตารางที่ ค-15 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1550 – 2050 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โชน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	3957.811	3028.242	1391.037	2792.363	0.797346153
0.100530965	136.2339	45.59153	45.59153	111.556	0.199336538
0.20106193	7.904978	5.171318	5.171318	5.265858	0.049834135
0.40212386	0.307847	0.281171	0.281171	0.261796	0.012458534
0.804247719	0.024613	0.033021	0.033021	0.02385	0.003114633
1.608495439	0.001135	0.001295	0.001295	0.001123	0.000778658
3.216990877	7.97E-05	7.48E-05	7.48E-05	7.17E-05	0.000194665
6.433981755	5.91E-06	5.7E-06	5.7E-06	5.24E-06	4.86661E-05
12.86796351	3.69E-07	3.64E-07	3.64E-07	3.34E-07	1.21665E-05



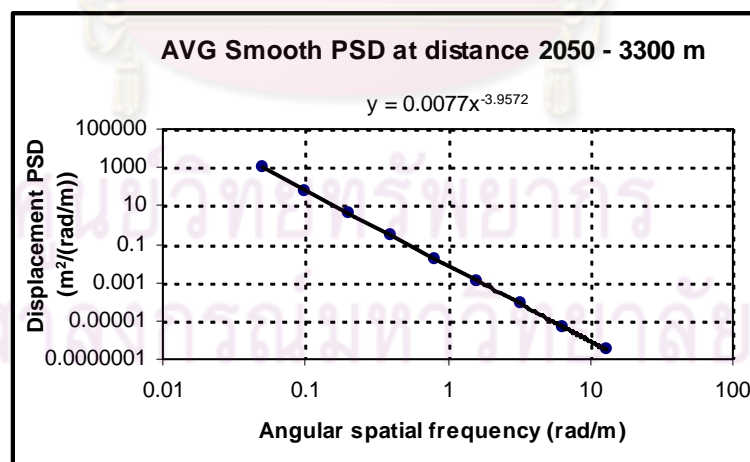
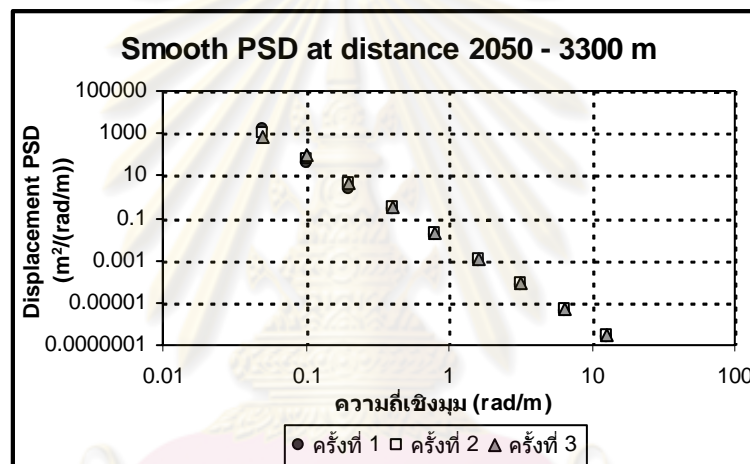
รูปที่ ค-67 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1550 – 2050 ของสนามกอล์ฟพัฒนา สปอร์ตคลับ โชน B



ตารางที่ ค-16 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป

Octave band ในช่วง 2050 – 3300 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ โซน B

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1581.683	1100.207	667.3494	1116.413	0.644884876
0.100530965	40.37684	67.69843	87.30046	65.12524	0.161221219
0.20106193	2.436278	4.419836	4.869621	3.908578	0.040305305
0.40212386	0.267281	0.313122	0.345951	0.308785	0.010076326
0.804247719	0.016883	0.019779	0.018317	0.018326	0.002519082
1.608495439	0.000891	0.001232	0.001285	0.001136	0.00062977
3.216990877	6.66E-05	8.63E-05	8.7E-05	8E-05	0.000157443
6.433981755	4.03E-06	5.31E-06	5.31E-06	4.89E-06	3.93606E-05
12.86796351	2.65E-07	3.16E-07	3.17E-07	2.99E-07	9.84016E-06



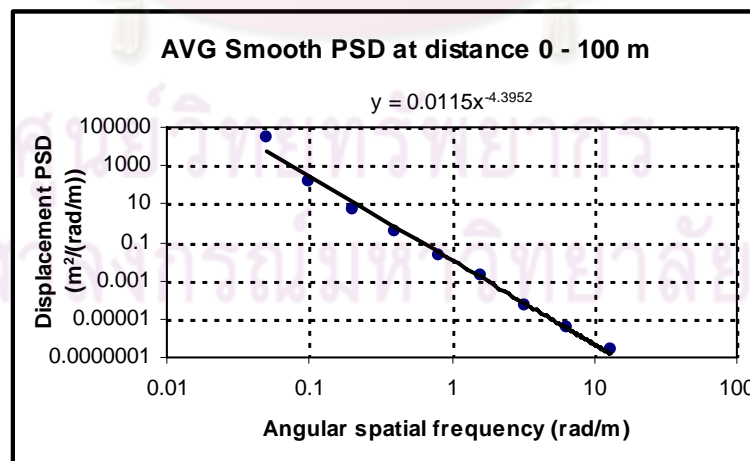
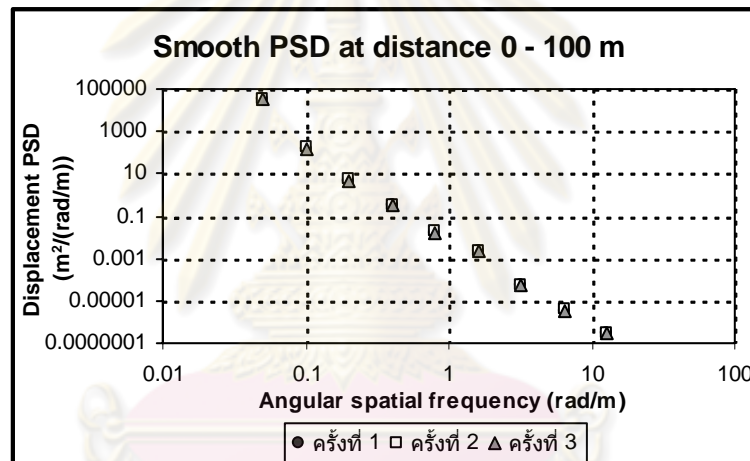
รูปที่ ค-68 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน)

และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2050 – 3300 ของสนามกอล์ฟพัฒนาสปอร์ตคลับ

โซน B

ตารางที่ ค-17 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 100 สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน west

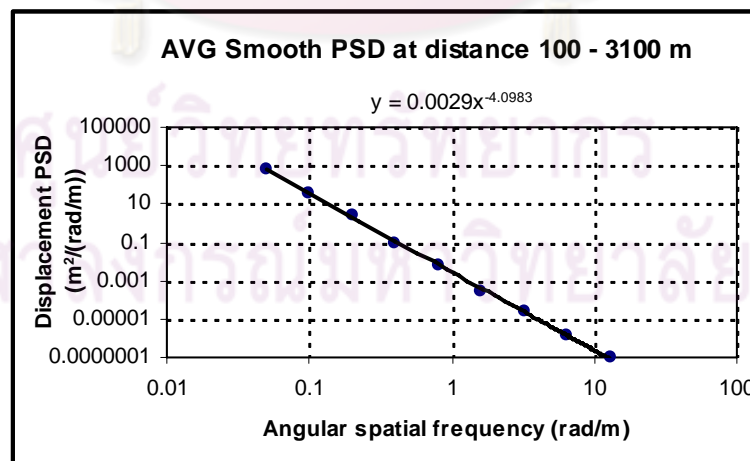
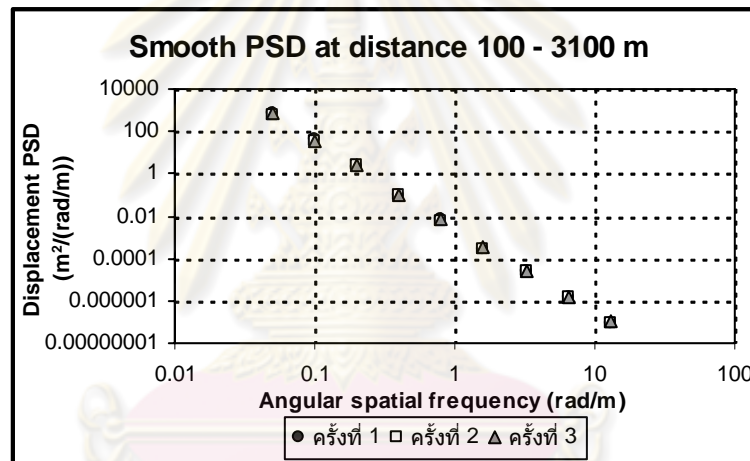
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	30653.15	33347.5	30653.15	31551.27	1.060449352
0.100530965	162.1329	179.0102	162.1329	167.7587	0.265112338
0.20106193	4.655645	5.309588	4.655645	4.873626	0.066278085
0.40212386	0.360209	0.340396	0.360209	0.353604	0.016569521
0.804247719	0.017213	0.021745	0.017213	0.018724	0.00414238
1.608495439	0.001993	0.002303	0.001993	0.002097	0.001035595
3.216990877	5.11E-05	5.88E-05	5.11E-05	5.37E-05	0.000258899
6.433981755	3.22E-06	3.76E-06	3.22E-06	3.4E-06	6.47247E-05
12.86796351	2.77E-07	3.09E-07	2.77E-07	2.87E-07	1.61812E-05



รูปที่ ค-69 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน west

ตารางที่ ค-18 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัด จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 100 – 3100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน west

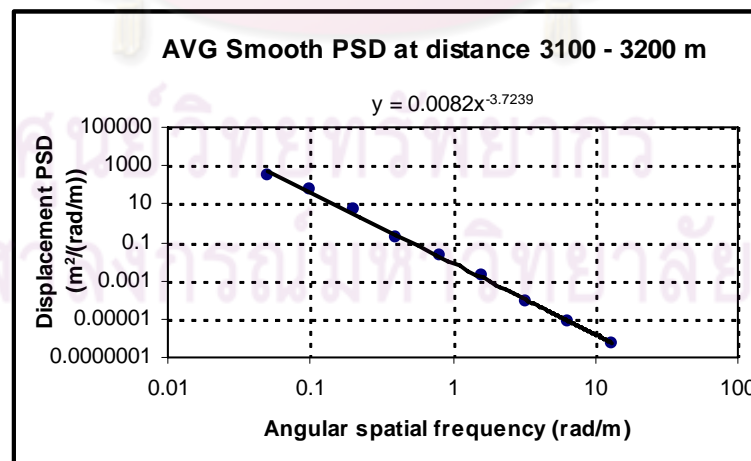
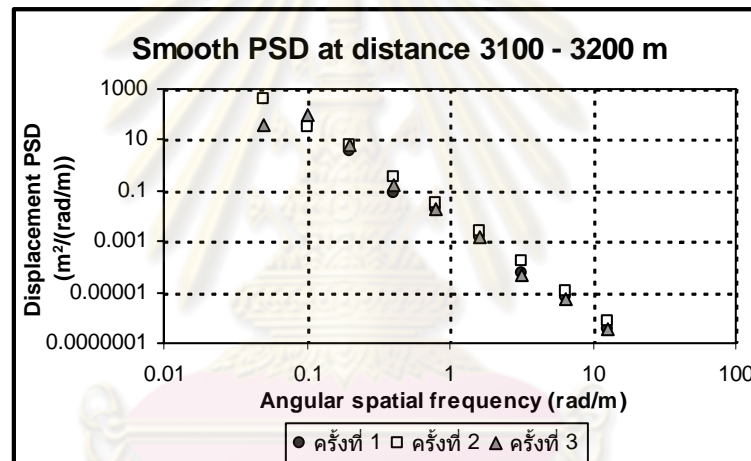
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	672.6009	588.888	701.9757	654.4882	0.247479844
0.100530965	44.25329	32.13195	35.61669	37.33398	0.061869961
0.20106193	2.081125	2.366274	2.688021	2.378473	0.01546749
0.40212386	0.105917	0.090985	0.093011	0.096638	0.003866873
0.804247719	0.006497	0.006026	0.006911	0.006478	0.000966718
1.608495439	0.000302	0.000297	0.000317	0.000305	0.00024168
3.216990877	2.52E-05	2.34E-05	2.56E-05	2.47E-05	6.04199E-05
6.433981755	1.45E-06	1.38E-06	1.56E-06	1.46E-06	1.5105E-05
12.86796351	9.55E-08	9.21E-08	1.01E-07	9.6E-08	3.77624E-06



รูปที่ ค-70 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 100 – 3100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน west

ตารางที่ ค-19 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัด ซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3100 – 3200 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับไซน west

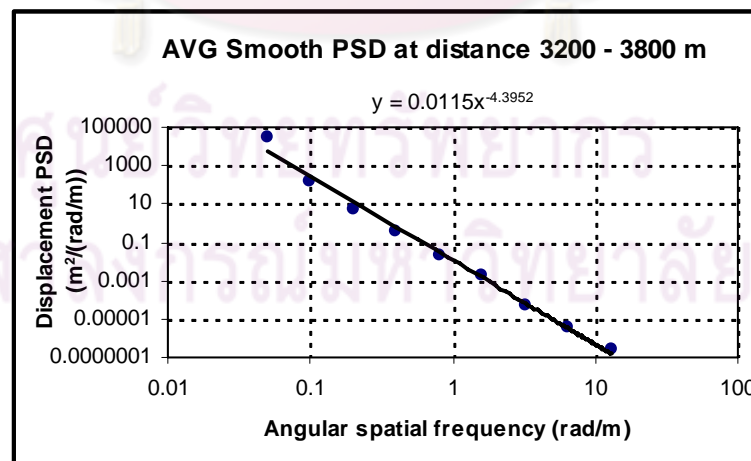
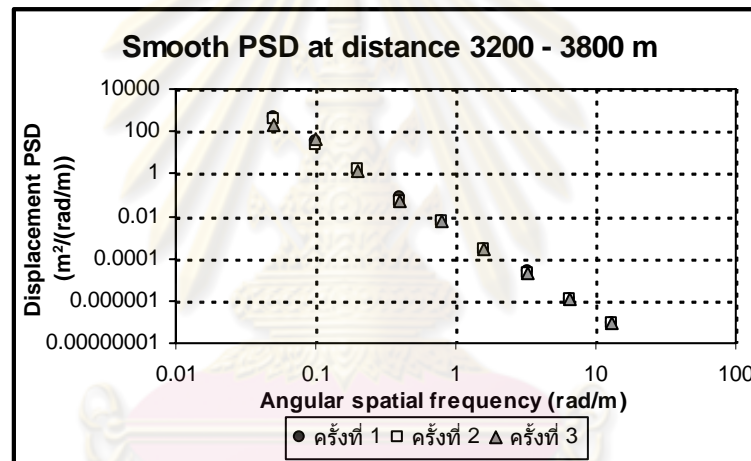
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	397.7944	437.2819	35.16394	290.0801	0.655957073
0.100530965	41.86036	34.08291	95.74274	57.22867	0.163989268
0.20106193	3.683639	5.925016	6.727813	5.445489	0.040997317
0.40212386	0.080992	0.330285	0.166794	0.192691	0.010249329
0.804247719	0.018624	0.030058	0.019192	0.022625	0.002562332
1.608495439	0.001393	0.002559	0.001564	0.001839	0.000640583
3.216990877	5.41E-05	0.000163	4.39E-05	8.71E-05	0.000160146
6.433981755	6.74E-06	1.2E-05	5.64E-06	8.12E-06	4.00364E-05
12.86796351	3.44E-07	7.69E-07	3.44E-07	4.86E-07	1.00091E-05



รูปที่ ค-71 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3100 – 3200 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับไซน west

ตารางที่ ค-20 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3200 – 3800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน west

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	204.6344	144.5495	4527.708	1625.631	0.688664864
0.100530965	69.23227	21.79688	124.8367	71.95528	0.172166216
0.20106193	3.484605	6.190949	14.76151	8.145687	0.043041554
0.40212386	0.186435	0.271451	0.287939	0.248608	0.010760388
0.804247719	0.016922	0.023697	0.022916	0.021178	0.002690097
1.608495439	0.00066	0.000596	0.001559	0.000938	0.000672524
3.216990877	3.61E-05	5.43E-05	7.47E-05	5.5E-05	0.000168131
6.433981755	3.73E-06	4.09E-06	5.84E-06	4.55E-06	4.20328E-05
12.86796351	2.75E-07	3.12E-07	3.94E-07	3.27E-07	1.05082E-05

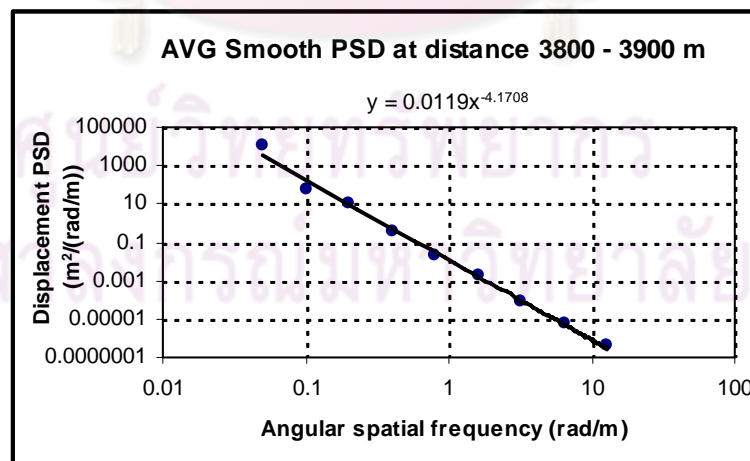
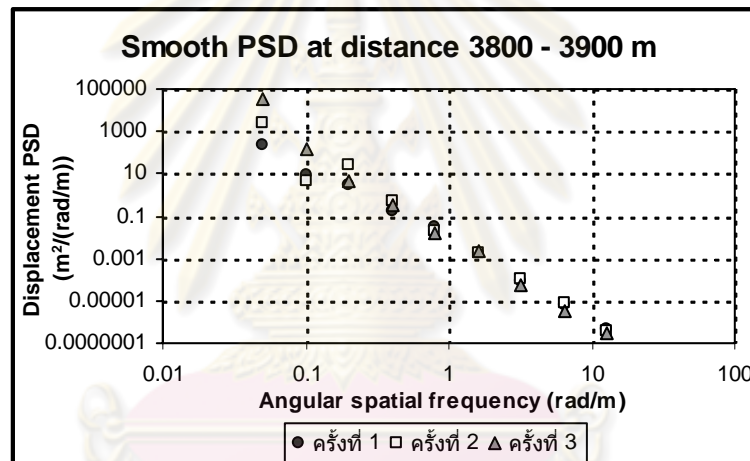


รูปที่ ค-72 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3200 – 3800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน west



ตารางที่ ค-21 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3800 – 3900 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน west

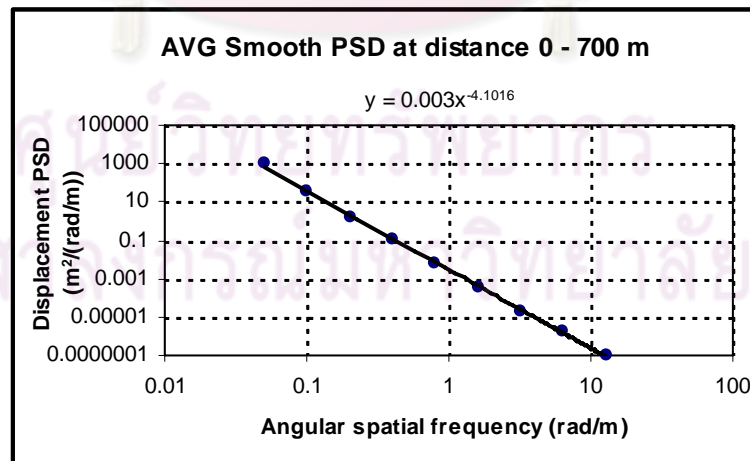
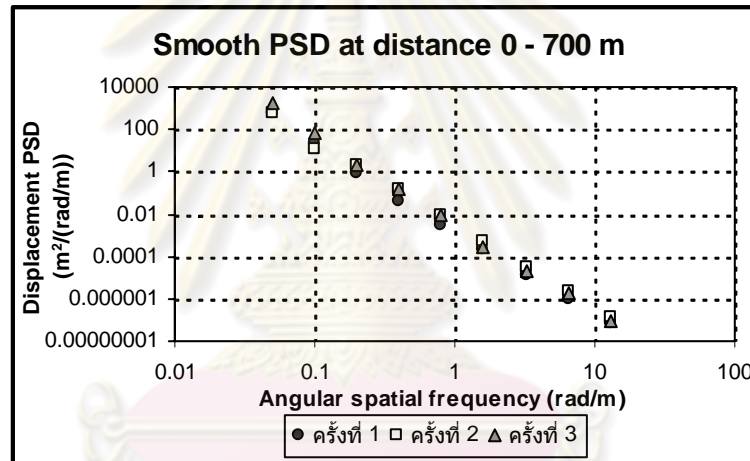
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	453.5665	2437.391	2093.68	1661.546	0.480446187
0.100530965	28.88239	136.6561	143.4399	102.9928	0.120111547
0.20106193	1.775609	7.643881	2.457971	3.959154	0.030027887
0.40212386	0.116365	0.227826	0.244223	0.196138	0.007506972
0.804247719	0.009935	0.018437	0.013492	0.013955	0.001876743
1.608495439	0.000521	0.000742	0.000515	0.000593	0.000469186
3.216990877	3.89E-05	4.71E-05	3.1E-05	3.9E-05	0.000117296
6.433981755	2.34E-06	2.5E-06	2.08E-06	2.31E-06	2.93241E-05
12.86796351	1.5E-07	1.73E-07	1.35E-07	1.53E-07	7.33103E-06



รูปที่ ค-73 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3800 – 3900 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน west

ตารางที่ ค-22 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 700 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

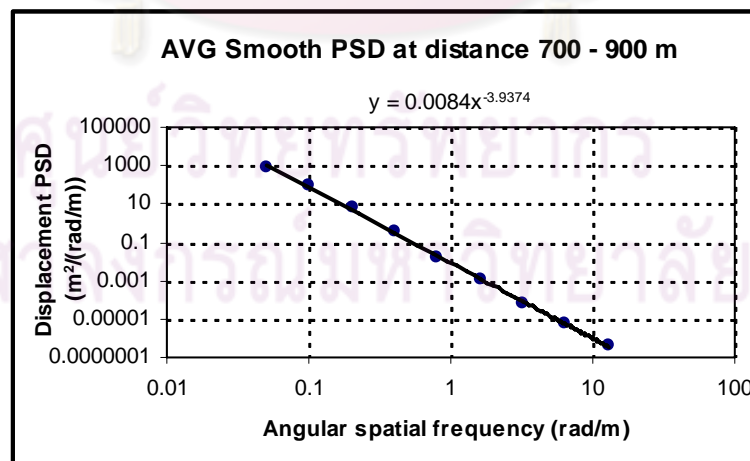
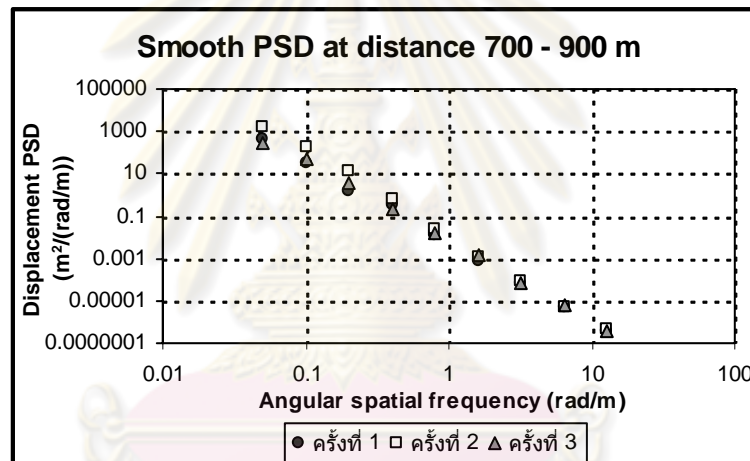
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	551.2373	551.2373	551.1952	1685.159	929.1971
0.100530965	24.65453	24.65453	11.70559	68.09652	34.81888
0.20106193	0.842725	0.842725	1.876609	2.206084	1.641806
0.40212386	0.039787	0.039787	0.157086	0.159049	0.118641
0.804247719	0.002922	0.002922	0.008978	0.008417	0.006772
1.608495439	0.000203	0.000203	0.000581	0.000289	0.000358
3.216990877	1.37E-05	1.37E-05	3.19E-05	2E-05	2.19E-05
6.433981755	9.91E-07	9.91E-07	2.16E-06	1.67E-06	1.61E-06
12.86796351	7.35E-08	7.35E-08	1.46E-07	9.26E-08	1.04E-07



รูปที่ ค-74 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 700 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เฮิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ตารางที่ ค-23 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 700 – 900 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North

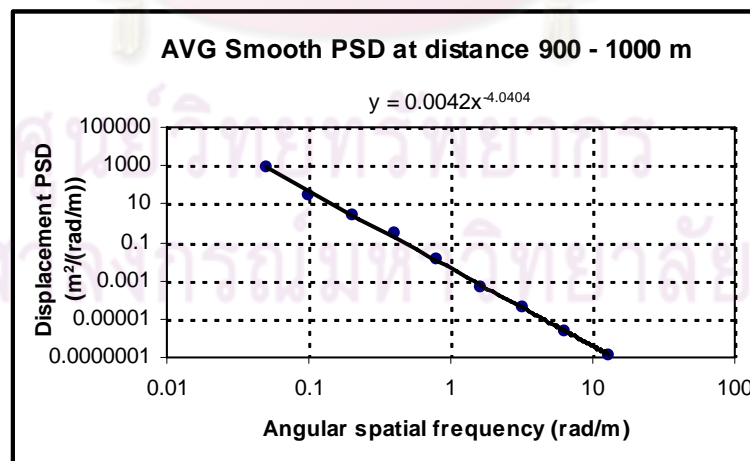
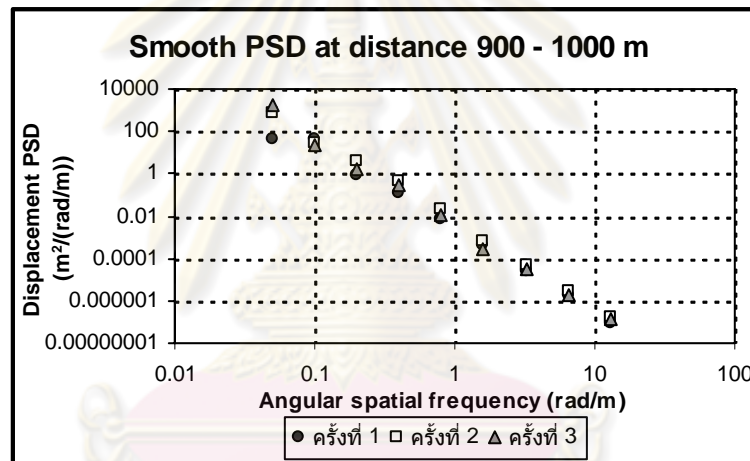
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	396.2411	1667.88	253.9716	772.6975	0.701389482
0.100530965	34.6154	178.6886	47.3892	86.89773	0.17534737
0.20106193	1.586493	12.91383	3.952798	6.151041	0.043836843
0.40212386	0.306319	0.571879	0.196505	0.358234	0.010959211
0.804247719	0.01285	0.025456	0.015132	0.017813	0.002739803
1.608495439	0.00072	0.001259	0.001303	0.001094	0.000684951
3.216990877	6.3E-05	8.08E-05	6.65E-05	7.01E-05	0.000171238
6.433981755	5.55E-06	4.94E-06	6.59E-06	5.69E-06	4.28094E-05
12.86796351	3.47E-07	4.34E-07	4.06E-07	3.96E-07	1.07024E-05



รูปที่ ค-75 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 700 – 900 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North

ตารางที่ ค-24 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 900 – 1000 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North

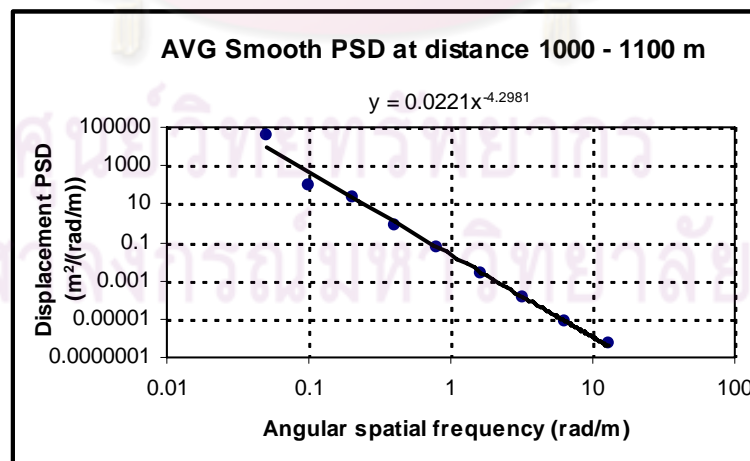
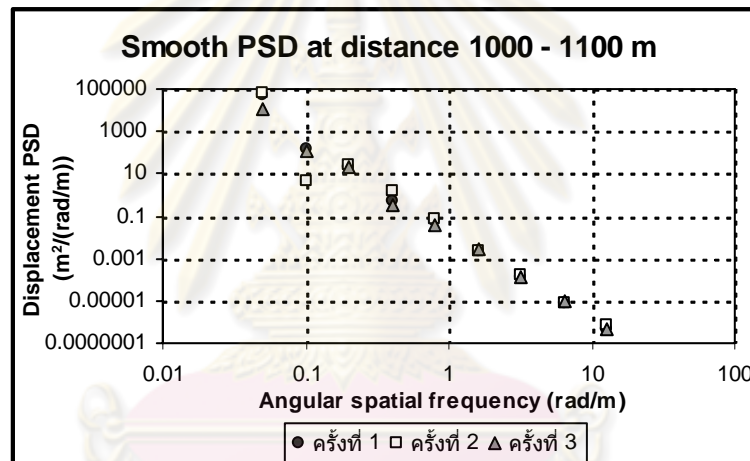
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	46.28036	802.8244	1584.419	811.1746	0.363168501
0.100530965	43.5775	28.0544	23.62191	31.75127	0.090792125
0.20106193	0.863918	4.335532	1.638883	2.279444	0.022698031
0.40212386	0.123596	0.446276	0.321992	0.297288	0.005674508
0.804247719	0.007485	0.022397	0.010858	0.01358	0.001418627
1.608495439	0.000437	0.0007	0.000277	0.000472	0.000354657
3.216990877	2.8E-05	4.77E-05	3.41E-05	3.66E-05	8.86642E-05
6.433981755	1.82E-06	2.9E-06	1.85E-06	2.19E-06	2.2166E-05
12.86796351	9.81E-08	1.75E-07	1.34E-07	1.36E-07	5.54151E-06



รูปที่ ค-76 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 900 – 1000 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โซน North

ตารางที่ ค-25 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1000 – 1100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	47204.34	71194.72	10612.92	43003.99	2.000349973
0.100530965	159.5958	4.714677	124.2121	96.17419	0.500087493
0.20106193	18.60745	23.98418	19.35118	20.6476	0.125021873
0.40212386	0.536911	1.564749	0.334703	0.812121	0.031255468
0.804247719	0.052661	0.066436	0.040768	0.053288	0.007813867
1.608495439	0.002093	0.002472	0.002776	0.002447	0.001953467
3.216990877	0.000124	0.000155	0.000135	0.000138	0.000488367
6.433981755	7.06E-06	8.07E-06	9.22E-06	8.12E-06	0.000122092
12.86796351	4.62E-07	7.8E-07	4.41E-07	5.61E-07	3.05229E-05

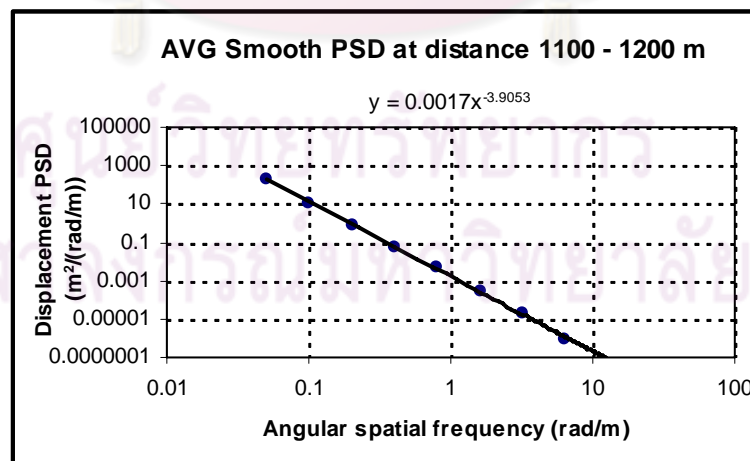
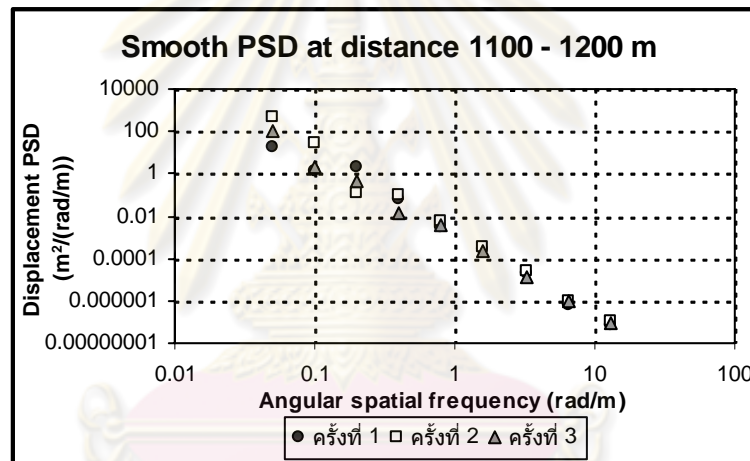


รูปที่ ค-77 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1000 – 1100 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North



ตารางที่ ค-26 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1100 – 1200 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

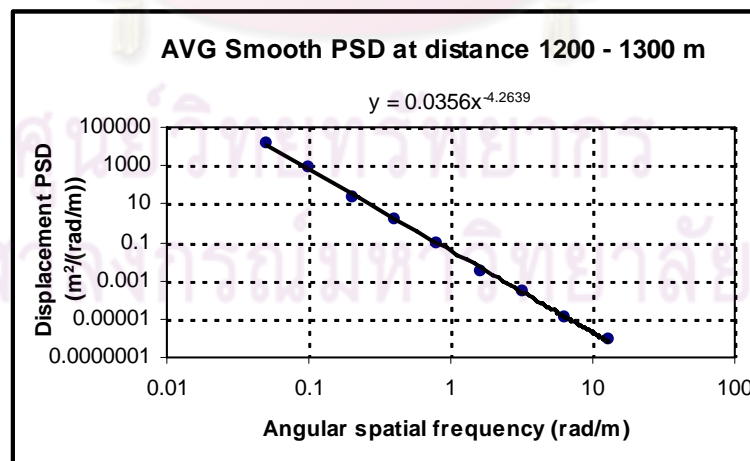
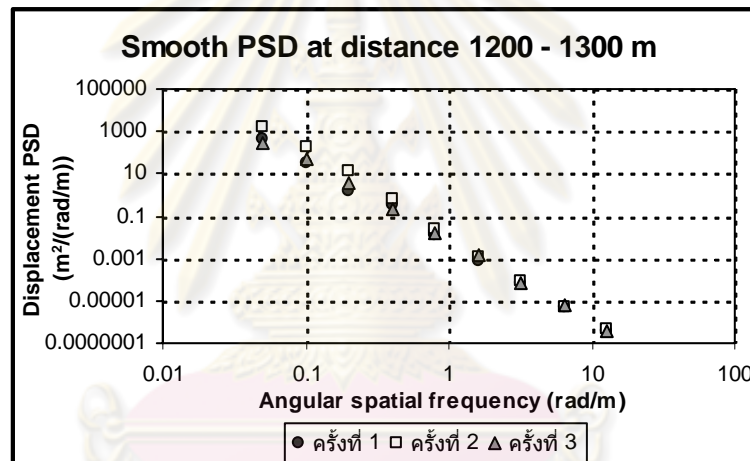
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	16.78303	522.1582	97.83112	212.2574	0.138213155
0.100530965	1.433098	30.06054	2.212103	11.23525	0.034553289
0.20106193	1.912696	0.11367	0.457701	0.828022	0.008638322
0.40212386	0.065201	0.101572	0.013486	0.060086	0.002159581
0.804247719	0.003366	0.006365	0.003827	0.004519	0.000539895
1.608495439	0.000263	0.000309	0.000242	0.000271	0.000134974
3.216990877	1.97E-05	2.42E-05	1.22E-05	1.87E-05	3.37434E-05
6.433981755	6.46E-07	1.04E-06	9.15E-07	8.67E-07	8.43586E-06
12.86796351	7.21E-08	1.03E-07	8.38E-08	8.64E-08	2.10897E-06



รูปที่ ค-78 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1100 – 1200 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ตารางที่ ค-27 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1200 – 1300 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

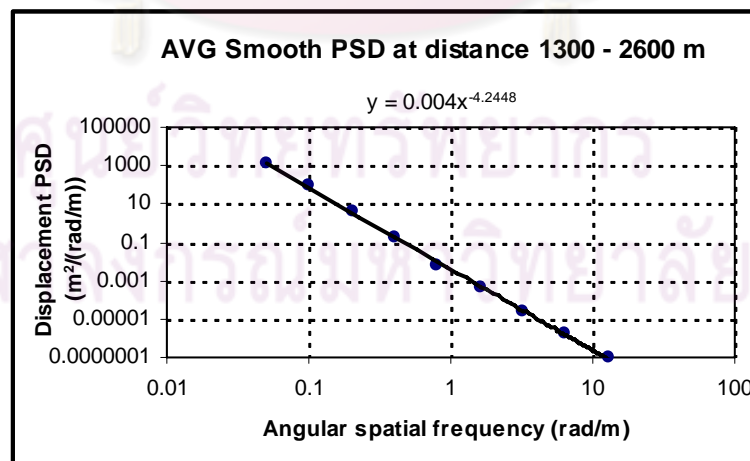
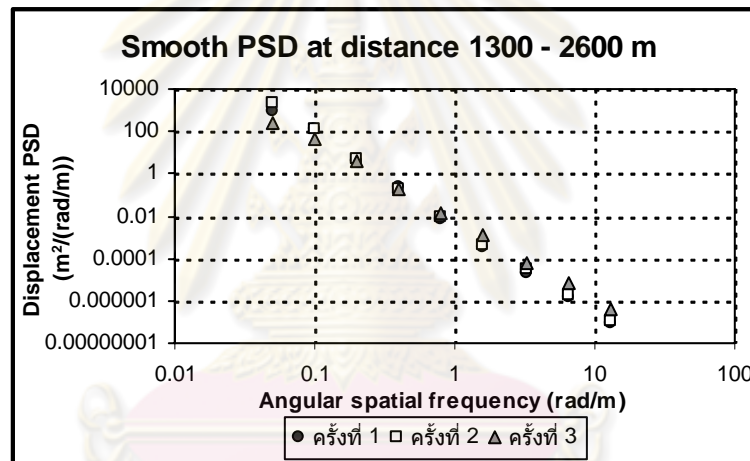
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	43853.13	2155.287	3091.079	16366.5	3.198545886
0.100530965	2074.727	96.18143	97.81015	756.2396	0.799636471
0.20106193	28.43236	28.23487	7.543876	21.4037	0.199909118
0.40212386	2.323757	2.027907	0.746539	1.699401	0.049977279
0.804247719	0.113012	0.102578	0.045821	0.087137	0.01249432
1.608495439	0.004848	0.002284	0.002925	0.003352	0.00312358
3.216990877	0.000379	0.000262	0.000241	0.000294	0.000780895
6.433981755	1.56E-05	1.14E-05	1.06E-05	1.25E-05	0.000195224
12.86796351	7.12E-07	1.04E-06	6.48E-07	8E-07	4.88059E-05



รูปที่ ค-79 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1200 – 1300 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ตารางที่ ค-28 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1300 – 2600 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

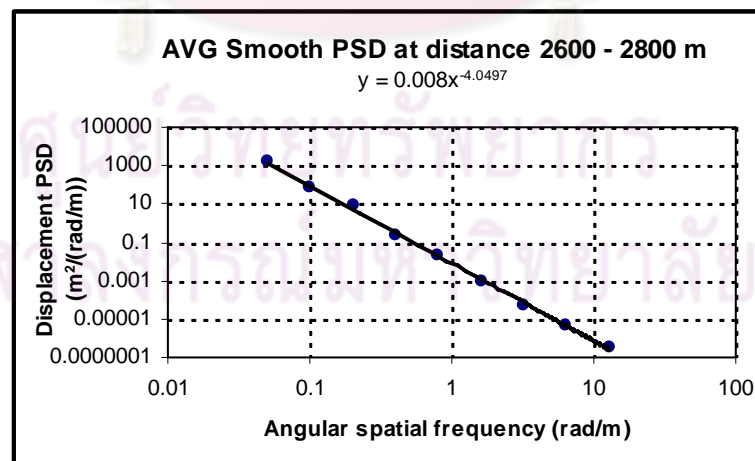
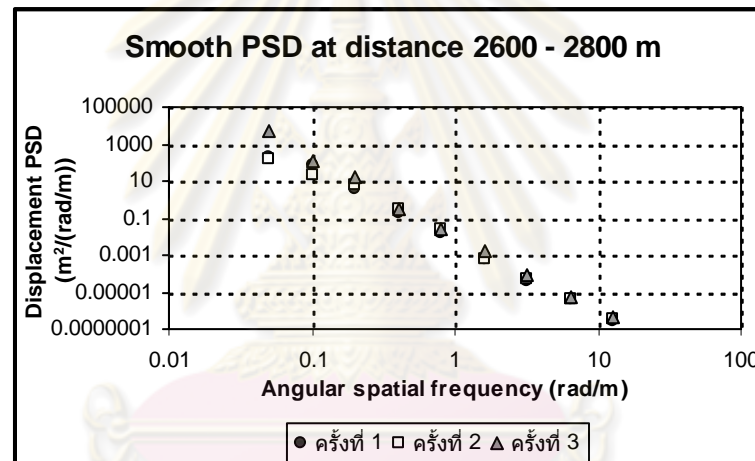
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	880.9934	2144.132	555.8947	1193.673	0.357798097
0.100530965	117.1807	121.8336	44.89817	94.6375	0.089449524
0.20106193	3.903101	5.208961	2.801552	3.971205	0.022362381
0.40212386	0.218463	0.195849	0.183655	0.199322	0.005590595
0.804247719	0.006534	0.00927	0.005058	0.006954	0.001397649
1.608495439	0.000358	0.000452	0.000416	0.000408	0.000349412
3.216990877	2.2E-05	2.87E-05	2.61E-05	2.56E-05	8.73531E-05
6.433981755	1.52E-06	1.93E-06	1.52E-06	1.66E-06	2.18383E-05
12.86796351	9.15E-08	1.13E-07	9.21E-08	9.87E-08	5.45957E-06



รูปที่ ค-80 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1300 – 2600 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ตารางที่ ค-29 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2600 – 2800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

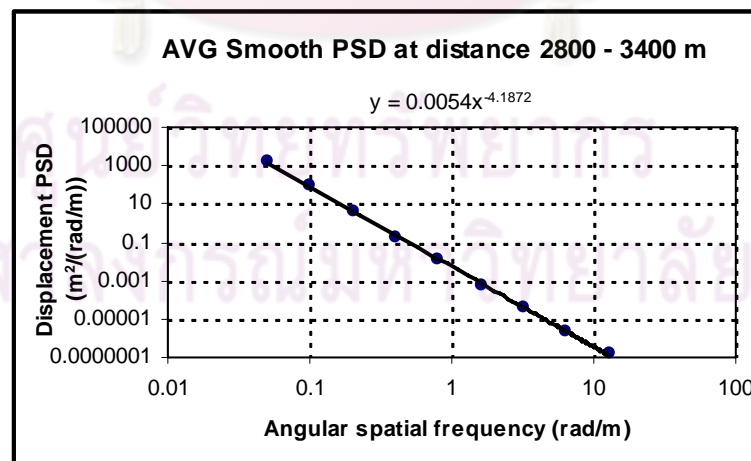
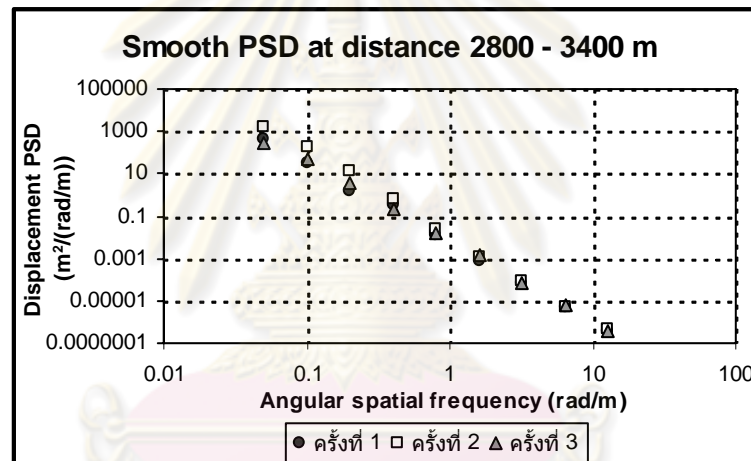
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	204.6344	144.5495	4527.708	1625.631	0.688664864
0.100530965	69.23227	21.79688	124.8367	71.95528	0.172166216
0.20106193	3.484605	6.190949	14.76151	8.145687	0.043041554
0.40212386	0.186435	0.271451	0.287939	0.248608	0.010760388
0.804247719	0.016922	0.023697	0.022916	0.021178	0.002690097
1.608495439	0.00066	0.000596	0.001559	0.000938	0.000672524
3.216990877	3.61E-05	5.43E-05	7.47E-05	5.5E-05	0.000168131
6.433981755	3.73E-06	4.09E-06	5.84E-06	4.55E-06	4.20328E-05
12.86796351	2.75E-07	3.12E-07	3.94E-07	3.27E-07	1.05082E-05



รูปที่ ค-81 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2600 – 2800 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ตารางที่ ค-30 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2800 – 3400 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	453.5665	2437.391	2093.68	1661.546	0.480446187
0.100530965	28.88239	136.6561	143.4399	102.9928	0.120111547
0.20106193	1.775609	7.643881	2.457971	3.959154	0.030027887
0.40212386	0.116365	0.227826	0.244223	0.196138	0.007506972
0.804247719	0.009935	0.018437	0.013492	0.013955	0.001876743
1.608495439	0.000521	0.000742	0.000515	0.000593	0.000469186
3.216990877	3.89E-05	4.71E-05	3.1E-05	3.9E-05	0.000117296
6.433981755	2.34E-06	2.5E-06	2.08E-06	2.31E-06	2.93241E-05
12.86796351	1.5E-07	1.73E-07	1.35E-07	1.53E-07	7.33103E-06

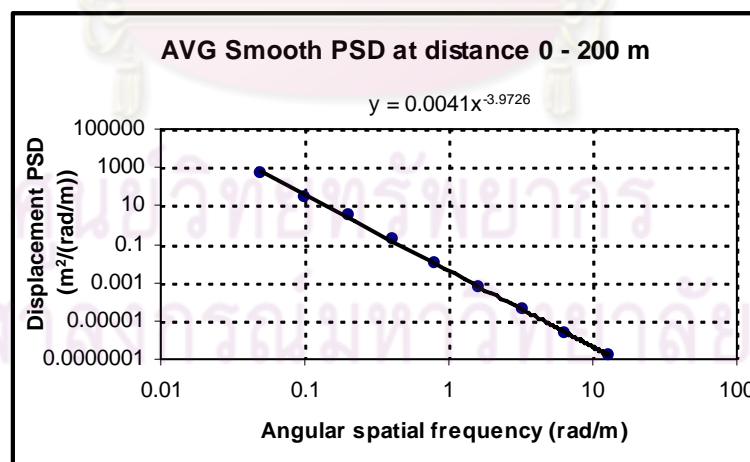
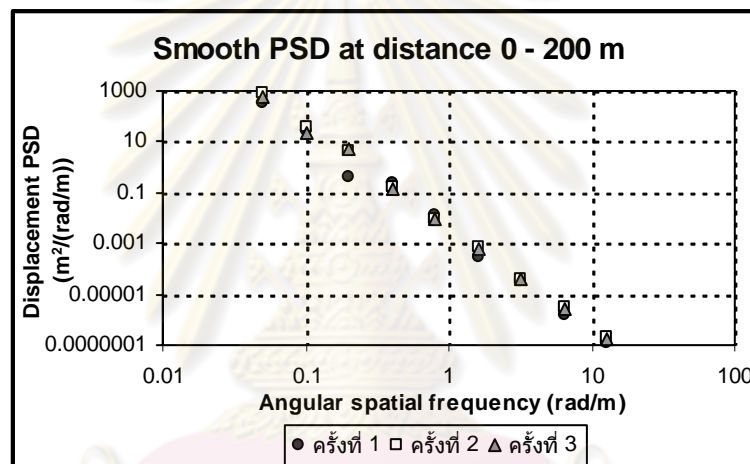


รูปที่ ค-82 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2800 – 3400 ของ สนามกอล์ฟ ชัมมิท ไพร์เอิร์ท กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ โชน North



ตารางที่ ค-31 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 200 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

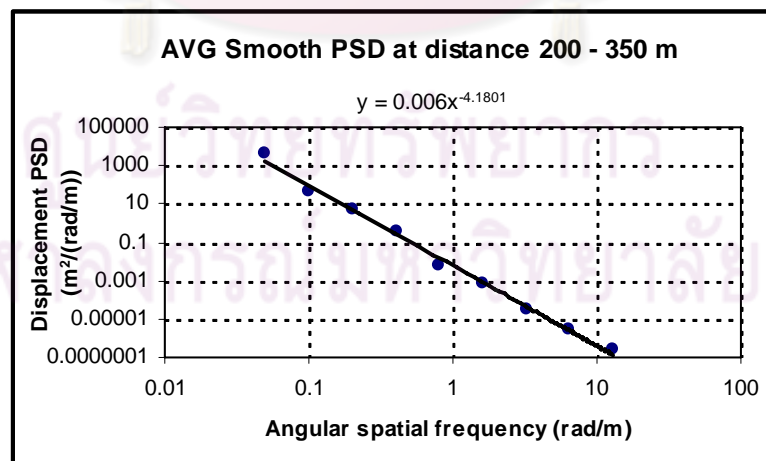
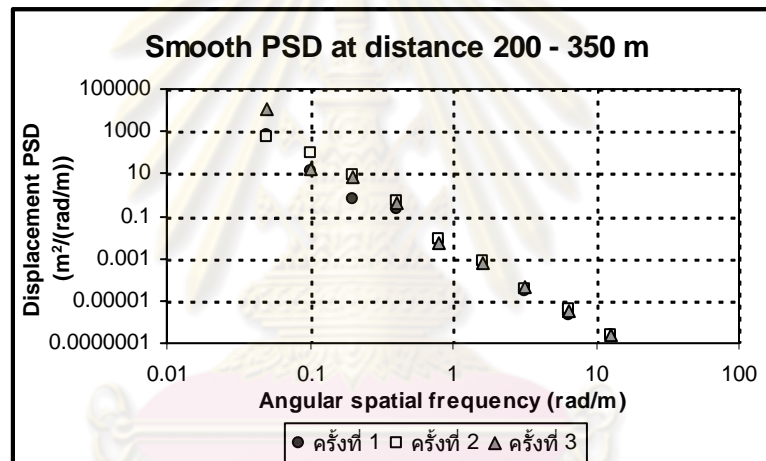
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	322.3892	791.6502	578.5557	564.1984	0.346671226
0.100530965	27.93469	35.90599	23.35003	29.06357	0.086667806
0.20106193	0.437912	4.33808	5.00645	3.260814	0.021666952
0.40212386	0.220565	0.163923	0.133951	0.172813	0.005416738
0.804247719	0.013608	0.009536	0.008848	0.010664	0.001354184
1.608495439	0.000289	0.000726	0.000611	0.000542	0.000338546
3.216990877	3.2E-05	4.14E-05	3.82E-05	3.72E-05	8.46365E-05
6.433981755	1.48E-06	3.18E-06	2.67E-06	2.45E-06	2.11591E-05
12.86796351	1.18E-07	2.06E-07	1.7E-07	1.65E-07	5.28978E-06



รูปที่ ค-83 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 200 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-32 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 200 – 350 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

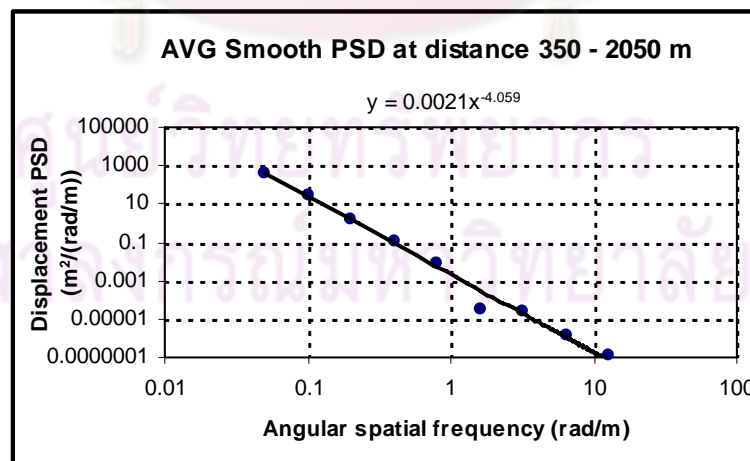
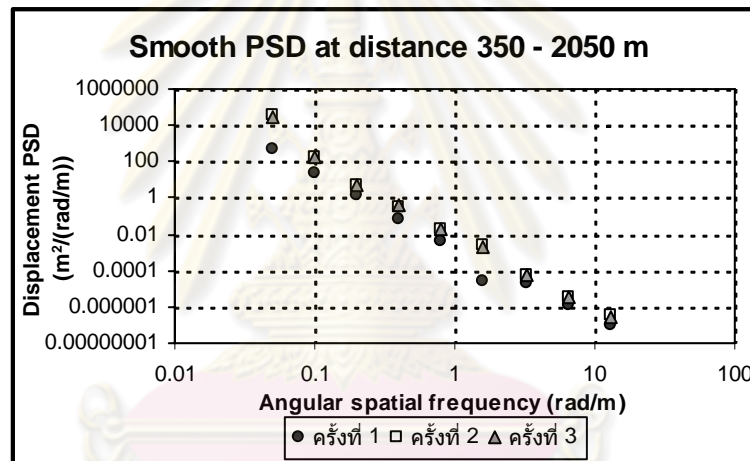
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	724.558	526.6462	10651.15	3967.452	0.531483948
0.100530965	13.39444	99.99071	18.31204	43.89906	0.132870987
0.20106193	0.575268	7.983675	6.634024	5.064322	0.033217747
0.40212386	0.193648	0.566457	0.426736	0.395614	0.008304437
0.804247719	0.006013	0.00872	0.004885	0.006539	0.002076109
1.608495439	0.000605	0.000767	0.000656	0.000676	0.000519027
3.216990877	2.64E-05	3.76E-05	4E-05	3.47E-05	0.000129757
6.433981755	2.07E-06	3.66E-06	3.01E-06	2.92E-06	3.24392E-05
12.86796351	2.28E-07	2.42E-07	2.51E-07	2.4E-07	8.1098E-06



รูปที่ ค-84 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 200 – 350 ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-33 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 350 – 2050 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

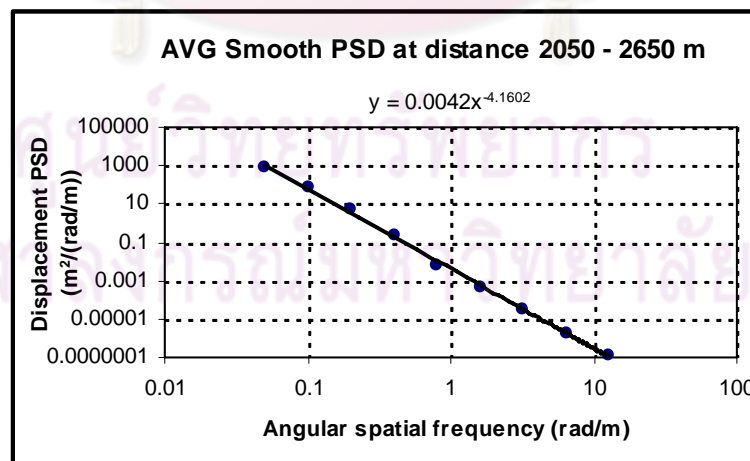
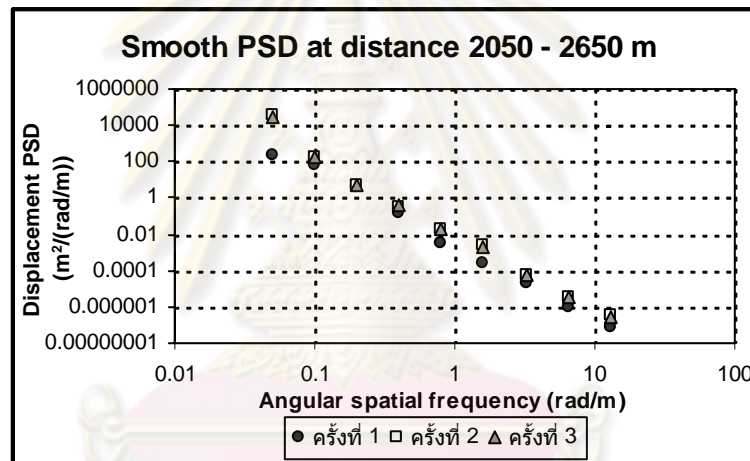
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	457.8853	379.0018	433.9161	423.6011	0.180334747
0.100530965	22.30613	33.16656	38.19713	31.22327	0.045083687
0.20106193	1.413995	1.339405	1.535629	1.429676	0.011270922
0.40212386	0.065382	0.135175	0.16354	0.121366	0.00281773
0.804247719	0.004666	0.006857	0.009966	0.007163	0.000704433
1.608495439	2.47E-05	3.22E-05	3.64E-05	3.11E-05	0.000176108
3.216990877	1.89E-05	2.51E-05	3.12E-05	2.51E-05	4.4027E-05
6.433981755	1.34E-06	1.45E-06	1.8E-06	1.53E-06	1.10068E-05
12.86796351	9.99E-08	1.09E-07	1.33E-07	1.14E-07	2.75169E-06



รูปที่ ค-85 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 350 – 2050 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-34 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2050 – 2650 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

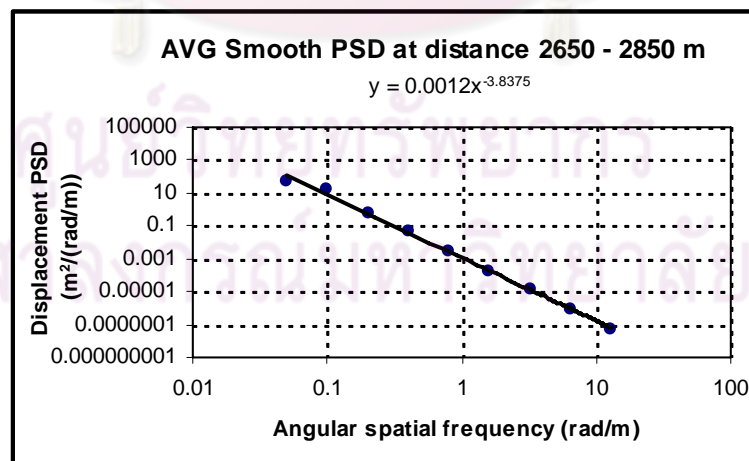
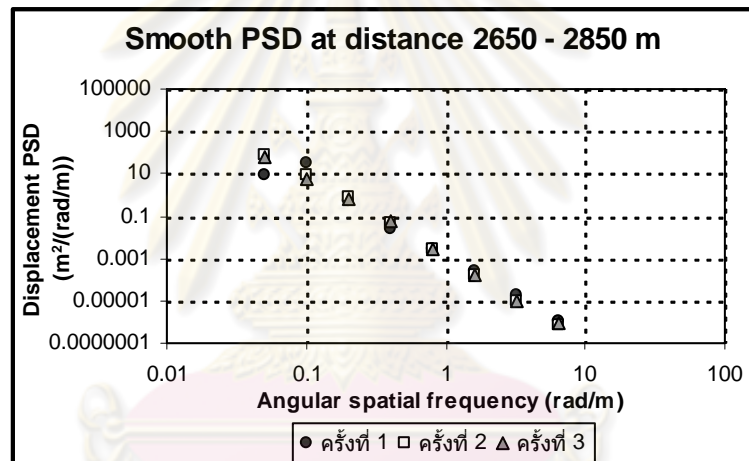
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	207.3315	1745.427	414.6605	789.1396	0.369573208
0.100530965	68.01222	29.23249	136.0246	77.75643	0.092393302
0.20106193	3.948829	3.311717	7.897651	5.052732	0.023098326
0.40212386	0.138296	0.235868	0.276593	0.216919	0.005774581
0.804247719	0.003185	0.009233	0.00637	0.006262	0.001443645
1.608495439	0.000267	0.000567	0.000534	0.000456	0.000360911
3.216990877	2.14E-05	3.48E-05	4.28E-05	3.3E-05	9.02278E-05
6.433981755	1.04E-06	2.11E-06	2.07E-06	1.74E-06	2.2557E-05
12.86796351	7.59E-08	1.6E-07	1.52E-07	1.29E-07	5.63924E-06



รูปที่ ค-86 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2050 – 2650 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-35 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2650 – 2850 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	8.918319	78.31716	56.65494	47.96347	0.228945673
0.100530965	32.90713	9.530433	5.101917	15.84649	0.057236418
0.20106193	0.520176	0.836203	0.653133	0.669837	0.014309105
0.40212386	0.023327	0.050054	0.064379	0.04592	0.003577276
0.804247719	0.002935	0.002821	0.002825	0.00286	0.000894319
1.608495439	0.000229	0.000178	0.000163	0.00019	0.00022358
3.216990877	1.84E-05	1.04E-05	1.05E-05	1.31E-05	5.58949E-05
6.433981755	1.1E-06	7.08E-07	7.91E-07	8.65E-07	1.39737E-05
12.86796351	7.67E-08	4.49E-08	4.72E-08	5.63E-08	3.49343E-06

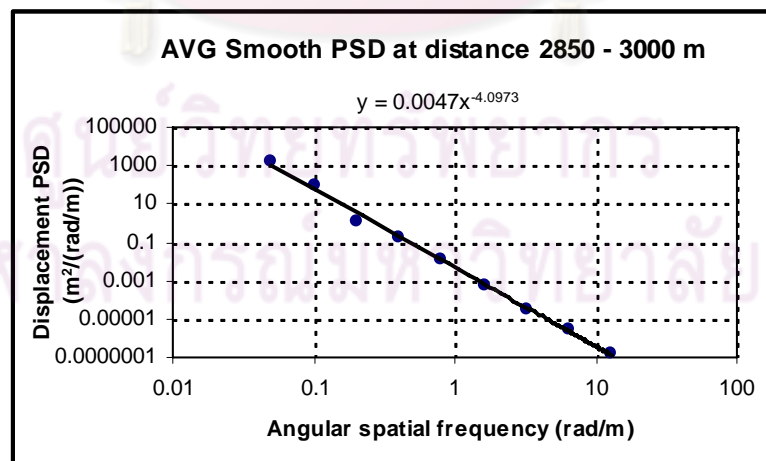
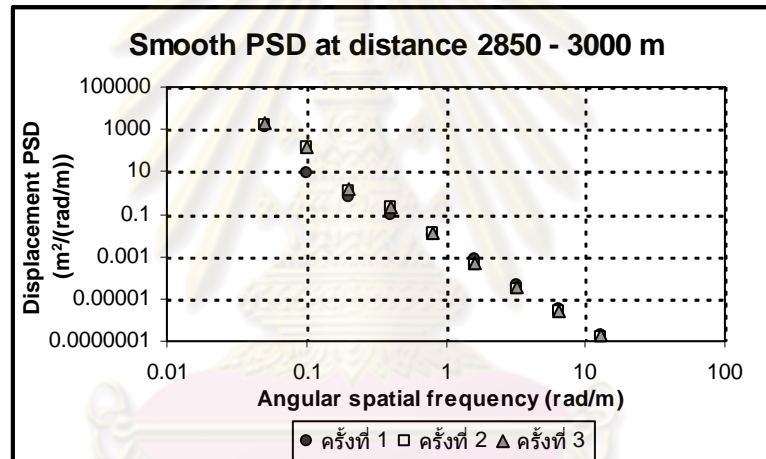


รูปที่ ค-87 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2650 – 2850 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ



ตารางที่ ค-36 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2850 – 3000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

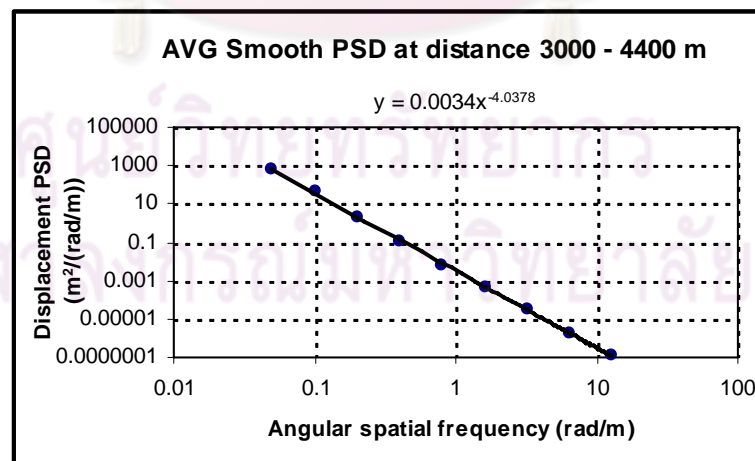
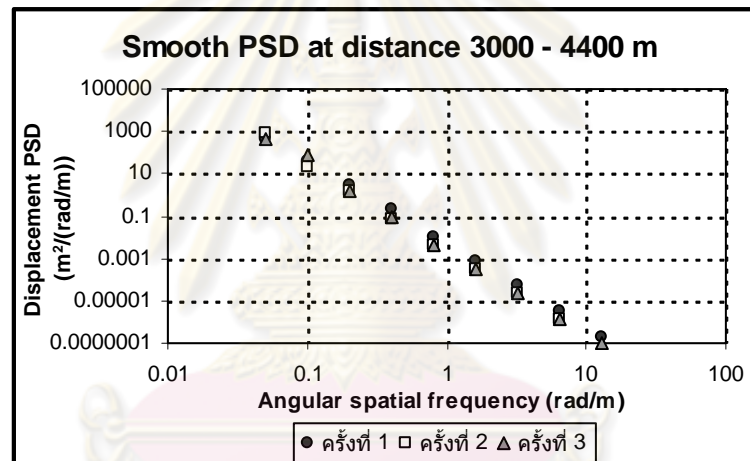
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1199.129	1689.435	1876.612	1588.392	0.380734333
0.100530965	9.412059	152.1722	137.0292	99.53781	0.095183583
0.20106193	0.597815	1.35819	1.507219	1.154408	0.023795896
0.40212386	0.098229	0.20538	0.207376	0.170329	0.005948974
0.804247719	0.011201	0.012163	0.013727	0.012363	0.001487243
1.608495439	0.000763	0.000404	0.000497	0.000555	0.000371811
3.216990877	4.1E-05	3.12E-05	3.54E-05	3.59E-05	9.29527E-05
6.433981755	3.04E-06	2.46E-06	2.4E-06	2.63E-06	2.32382E-05
12.86796351	2.02E-07	1.59E-07	1.83E-07	1.81E-07	5.80954E-06



รูปที่ ค-88 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2850 – 3000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-37 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3000 – 4400 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

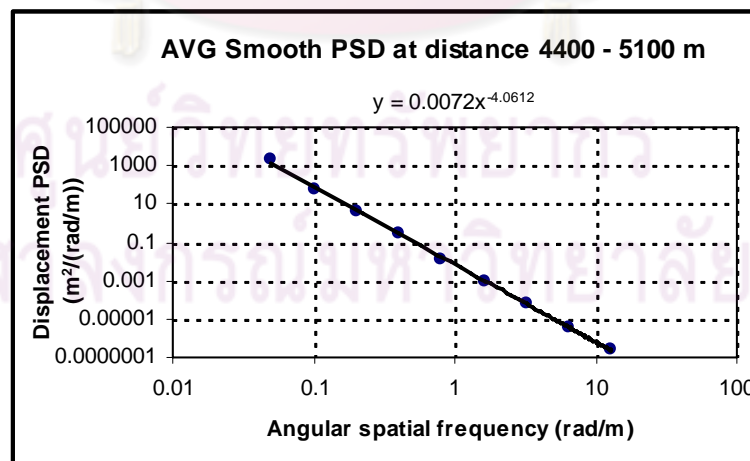
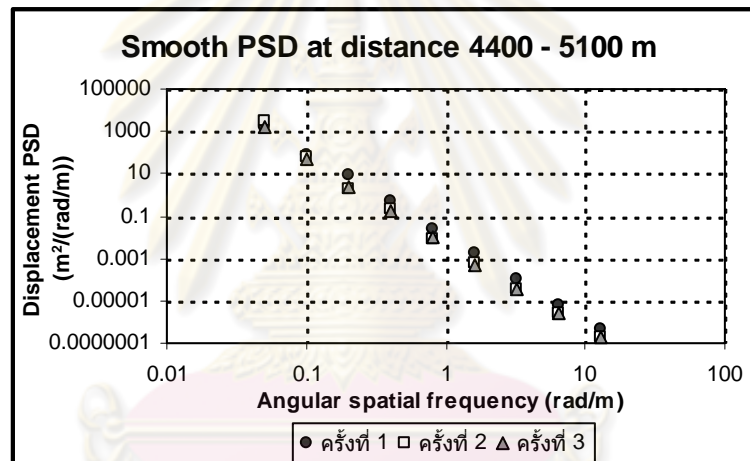
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	441.7519	818.5319	477.9284	579.404	0.288819252
0.100530965	43.5871	20.46795	78.94273	47.66593	0.072204813
0.20106193	2.972936	1.543711	1.595032	2.037226	0.018051203
0.40212386	0.192347	0.072285	0.089195	0.117943	0.004512801
0.804247719	0.010935	0.004091	0.004748	0.006591	0.0011282
1.608495439	0.000794	0.000323	0.000347	0.000488	0.00028205
3.216990877	5.01E-05	2.17E-05	2.37E-05	3.18E-05	7.05125E-05
6.433981755	2.97E-06	1.3E-06	1.45E-06	1.91E-06	1.76281E-05
12.86796351	1.85E-07	8.15E-08	9.21E-08	1.2E-07	4.40703E-06



รูปที่ ค-89 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3000 – 4400 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-38 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 4400 – 5100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

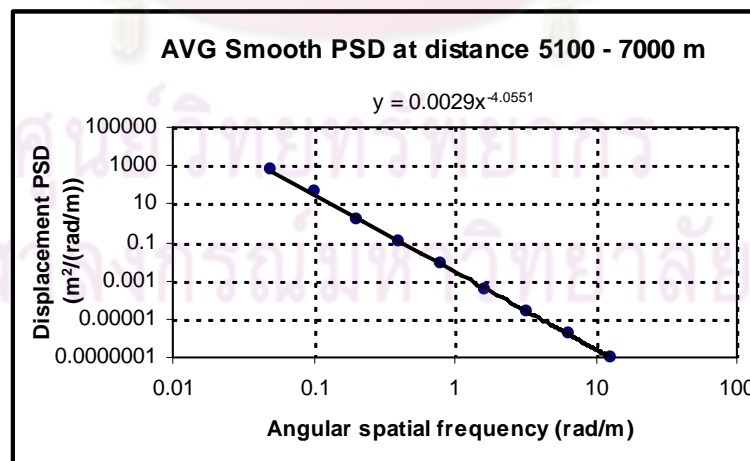
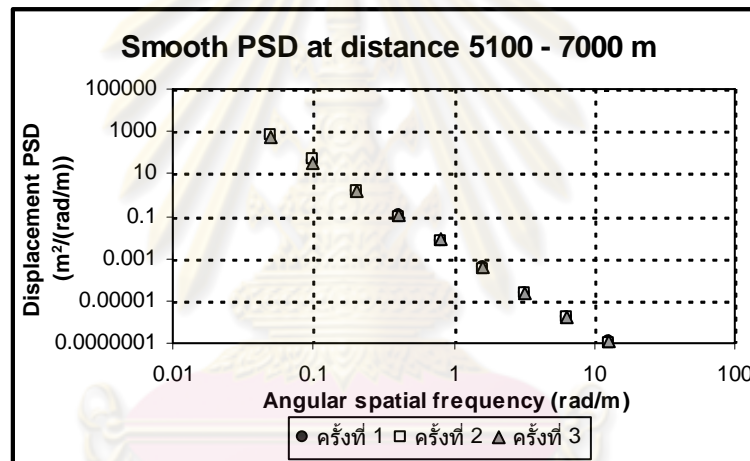
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1718.205	3181.265	1554.126	2151.199	0.621148003
0.100530965	84.14342	56.1663	49.64067	63.3168	0.155287001
0.20106193	7.877599	1.939859	2.538426	4.118628	0.03882175
0.40212386	0.557439	0.205086	0.17384	0.312122	0.009705438
0.804247719	0.022262	0.009007	0.010771	0.014013	0.002426359
1.608495439	0.001751	0.000543	0.000485	0.000926	0.00060659
3.216990877	0.000107	3.73E-05	3.8E-05	6.08E-05	0.000151647
6.433981755	6.9E-06	2.49E-06	2.51E-06	3.97E-06	3.79119E-05
12.86796351	4.72E-07	1.79E-07	1.84E-07	2.78E-07	9.47797E-06



รูปที่ ค-90 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 4400 – 5100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-39 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 5100 – 7000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

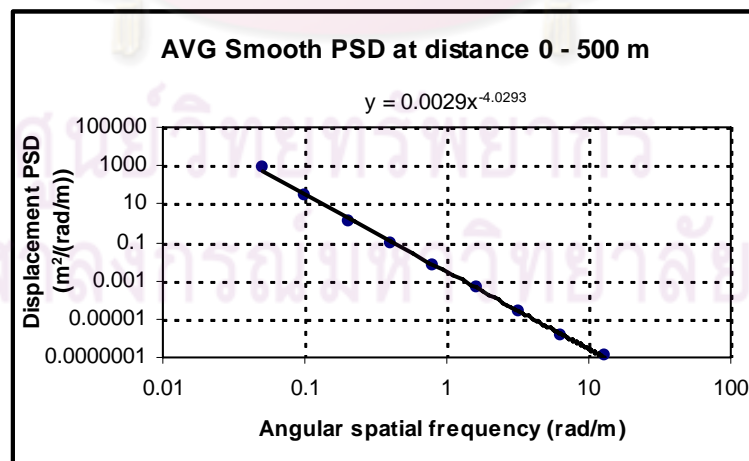
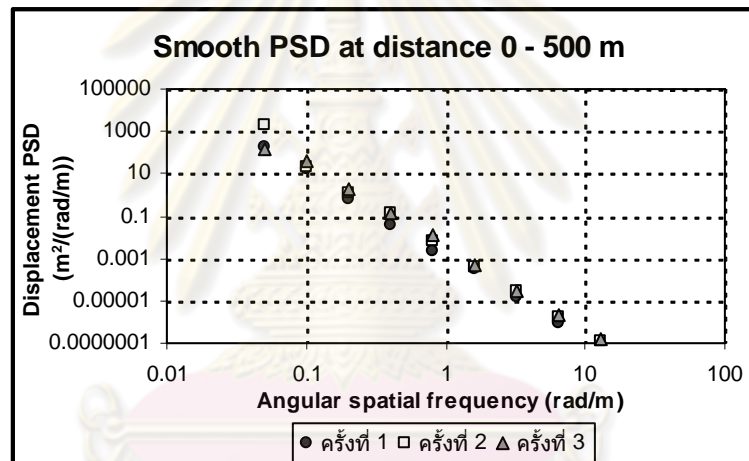
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	567.2576	678.981	508.7652	585.0013	0.251288219
0.100530965	43.40334	51.08773	35.52342	43.33817	0.062822055
0.20106193	1.547678	1.392377	1.604633	1.514896	0.015705514
0.40212386	0.106853	0.093776	0.117978	0.106202	0.003926378
0.804247719	0.007278	0.007187	0.007399	0.007288	0.000981595
1.608495439	0.000365	0.00033	0.000356	0.00035	0.000245399
3.216990877	2.23E-05	2.28E-05	2.3E-05	2.27E-05	6.13497E-05
6.433981755	1.68E-06	1.59E-06	1.73E-06	1.67E-06	1.53374E-05
12.86796351	1.12E-07	1.09E-07	1.16E-07	1.12E-07	3.83435E-06



รูปที่ ค-91 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 5100 – 7000 เมตร ของ สนามกอล์ฟ ไดนาสตี กอล์ฟ แอน คันทรี คลับ

ตารางที่ ค-40 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 500 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	182.3132	1933.975	134.1007	750.1296	0.24452
0.100531	16.2282	22.47963	42.43872	27.04885	0.06113
0.201062	0.60349	1.333171	2.085131	1.340597	0.015283
0.402124	0.03648	0.126076	0.131998	0.098185	0.003821
0.804248	0.002433	0.006549	0.01144	0.006808	0.000955
1.608495	0.000298	0.000422	0.000524	0.000415	0.000239
3.216991	1.57E-05	2.9E-05	3.12E-05	2.53E-05	5.97E-05
6.433982	8.11E-07	1.77E-06	2.09E-06	1.56E-06	1.49E-05
12.86796	7.48E-08	1.16E-07	1.58E-07	1.16E-07	3.73E-06

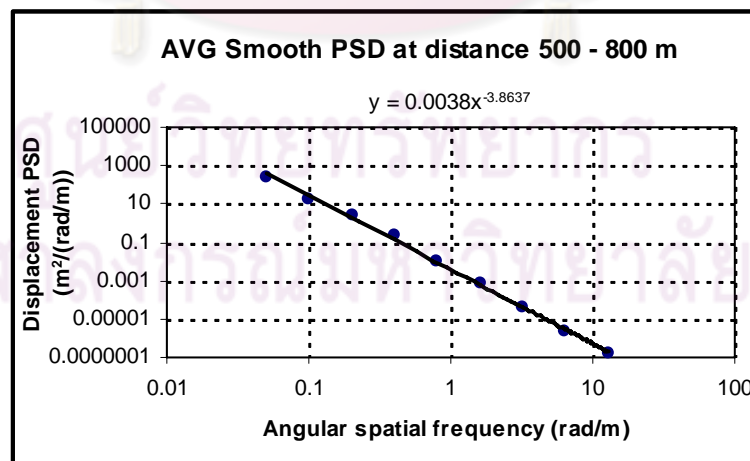
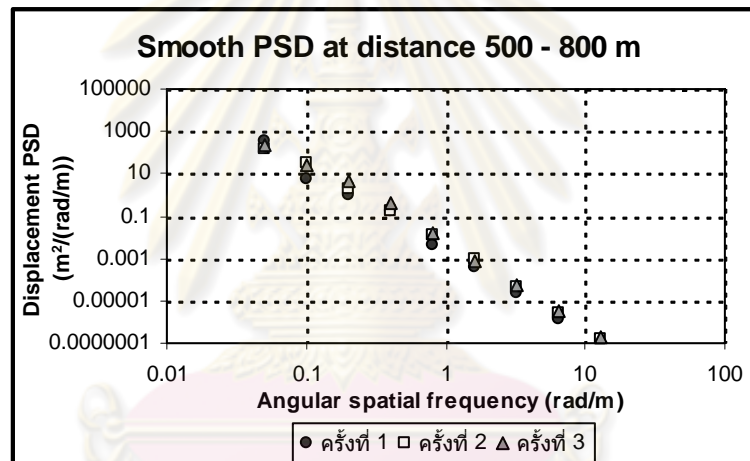


รูปที่ ค-92 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 500 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1- 9



ตารางที่ ค-41 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 500 – 800 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1-9

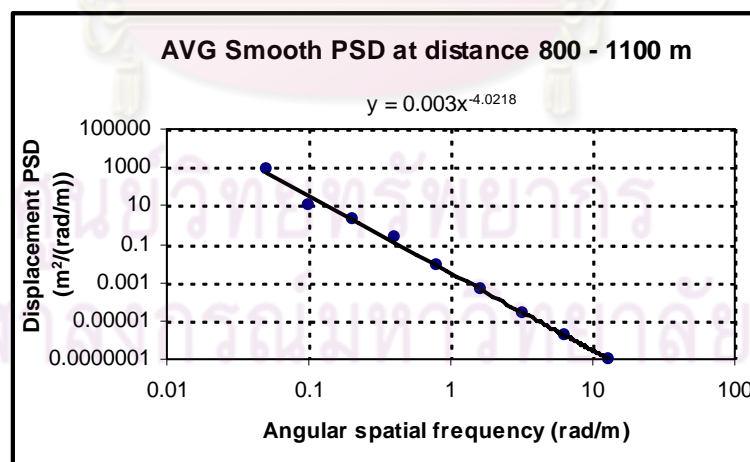
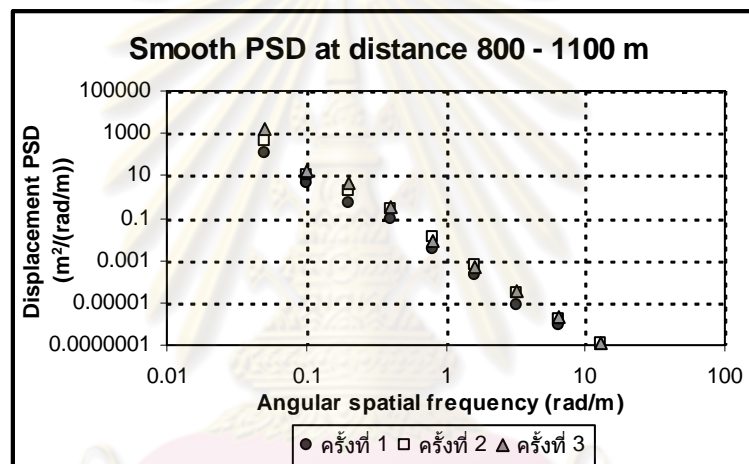
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	384.1035	162.7283	217.8001	254.8773	0.310759
0.100531	5.390049	28.77379	23.03682	19.06689	0.07769
0.201062	1.031083	1.9147	4.183671	2.376485	0.019422
0.402124	0.176233	0.180801	0.402535	0.25319	0.004856
0.804248	0.004266	0.013753	0.014776	0.010932	0.001214
1.608495	0.000423	0.000865	0.000711	0.000666	0.000303
3.216991	2.07E-05	4.23E-05	5.54E-05	3.95E-05	7.59E-05
6.433982	1.41E-06	2.75E-06	3.14E-06	2.43E-06	1.9E-05
12.86796	8.86E-08	1.56E-07	1.94E-07	1.46E-07	4.74E-06



รูปที่ ค-93 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 500 – 800 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1-9

ตารางที่ ค-42 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 800 – 1100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1 – 9

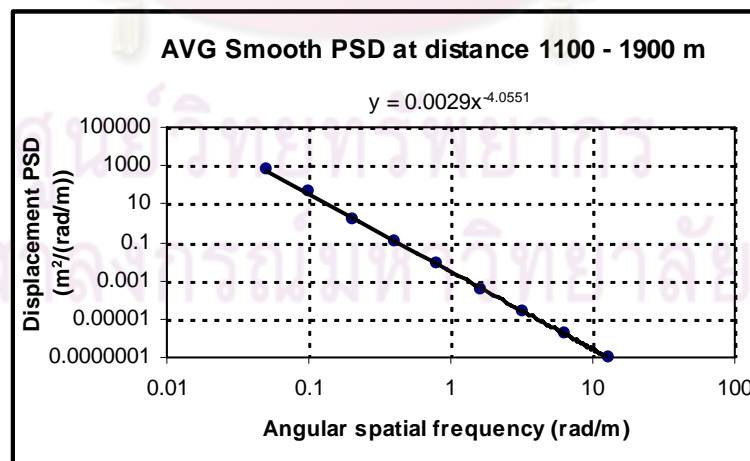
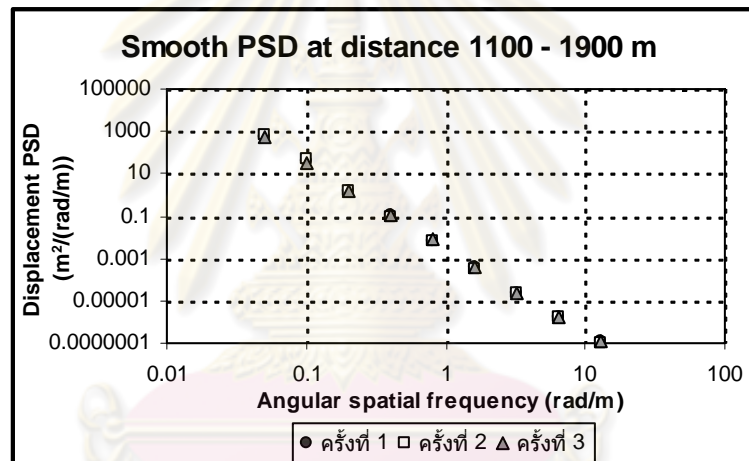
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	119.0729	463.3596	1648.566	743.6661	0.251886
0.100531	4.534454	9.694785	17.5039	10.57771	0.062972
0.201062	0.568738	1.742853	4.080313	2.130635	0.015743
0.402124	0.082005	0.249548	0.35361	0.228388	0.003936
0.804248	0.003309	0.01174	0.007557	0.007535	0.000984
1.608495	0.000215	0.000578	0.000528	0.000441	0.000246
3.216991	7.61E-06	2.72E-05	3.27E-05	2.25E-05	6.15E-05
6.433982	8.36E-07	1.79E-06	2.24E-06	1.62E-06	1.54E-05
12.86796	4.58E-08	1.18E-07	1.28E-07	9.73E-08	3.84E-06



รูปที่ ค-94 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 800 – 1100 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ

ตารางที่ ค-43 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1100 – 1900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ  
กลุ่ม 1-9

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	376.8583	1940.967	874.1544	1063.993	0.313005
0.100531	32.36926	46.93384	38.92848	39.41053	0.078251
0.201062	1.640487	1.649091	2.473839	1.921139	0.019563
0.402124	0.090747	0.134479	0.116036	0.113754	0.004891
0.804248	0.005432	0.008757	0.011826	0.008672	0.001223
1.608495	0.000374	0.000665	0.000464	0.000501	0.000306
3.216991	2.28E-05	4.73E-05	3.05E-05	3.35E-05	7.64E-05
6.433982	1.31E-06	2.2E-06	1.71E-06	1.74E-06	1.91E-05
12.86796	9.95E-08	1.81E-07	1.31E-07	1.37E-07	4.78E-06

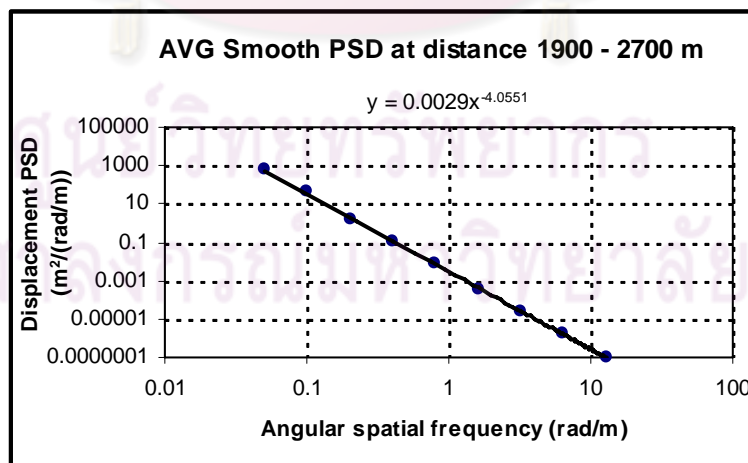
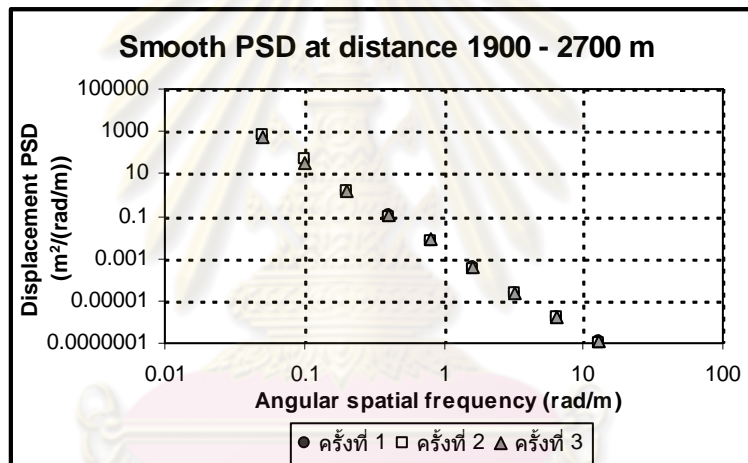


รูปที่ ค-95 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1100 – 1900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ

กลุ่ม 1-9

ตารางที่ ค-44 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1900 – 2700 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1-9

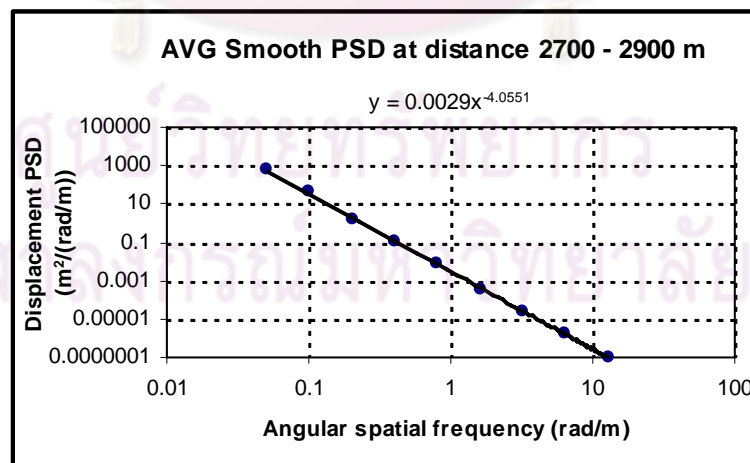
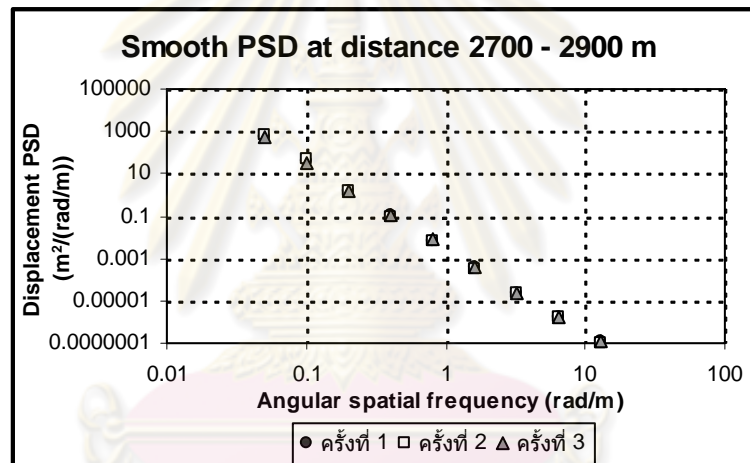
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	606.3629	843.7145	1009.948	820.0086	0.269327
0.100531	10.92396	54.31701	31.48724	32.24274	0.067332
0.201062	1.009502	2.681584	1.94065	1.877245	0.016833
0.402124	0.067798	0.169573	0.112941	0.116771	0.004208
0.804248	0.005301	0.009109	0.007054	0.007155	0.001052
1.608495	0.000274	0.000596	0.000463	0.000444	0.000263
3.216991	1.97E-05	3.46E-05	2.69E-05	2.71E-05	6.58E-05
6.433982	1.11E-06	1.93E-06	1.68E-06	1.57E-06	1.64E-05
12.86796	7.61E-08	1.3E-07	1.09E-07	1.05E-07	4.11E-06



รูปที่ ค-96 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1900 – 2700 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1-9

ตารางที่ ค-45 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 2700 – 2900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1-9

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	1001.309744	193.5948812	939.5561	711.4869	0.374325
0.100530965	36.266431	36.383927	17.88298	30.17778	0.093581
0.20106193	0.729052769	1.143655467	2.588174	1.486961	0.023395
0.40212386	0.102854676	0.235959161	0.392246	0.243687	0.005849
0.804247719	0.006821581	0.015271698	0.012665	0.011586	0.001462
1.608495439	0.00065043	0.00058402	0.001143	0.000793	0.000366
3.216990877	3.09176E-05	4.24571E-05	4.82E-05	4.05E-05	9.14E-05
6.433981755	1.79486E-06	3.24036E-06	3.66E-06	2.9E-06	2.28E-05
12.86796351	1.45086E-07	2.06864E-07	2.2E-07	1.91E-07	5.71E-06

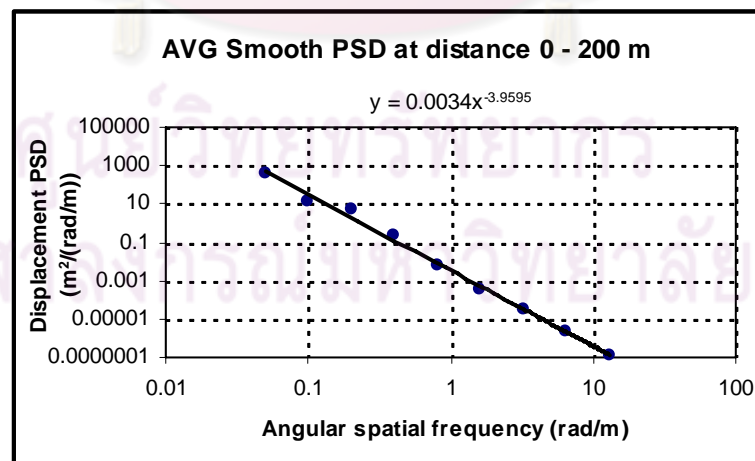
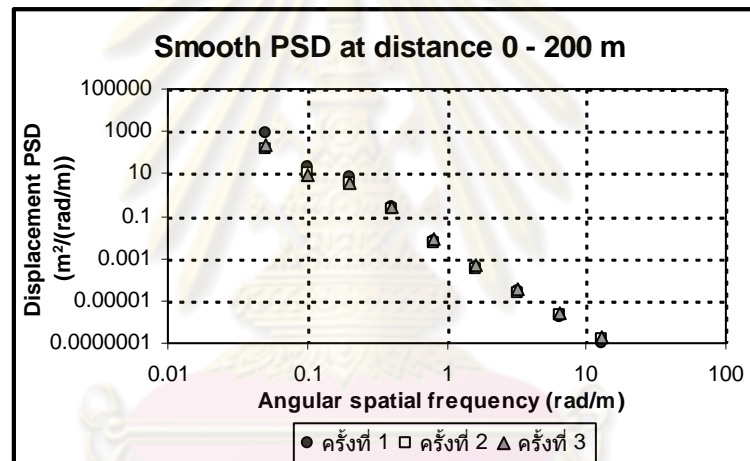


รูปที่ ค-97 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 2700 – 2900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 1-9



ตารางที่ ค-46 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 0 – 200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 10 – 18

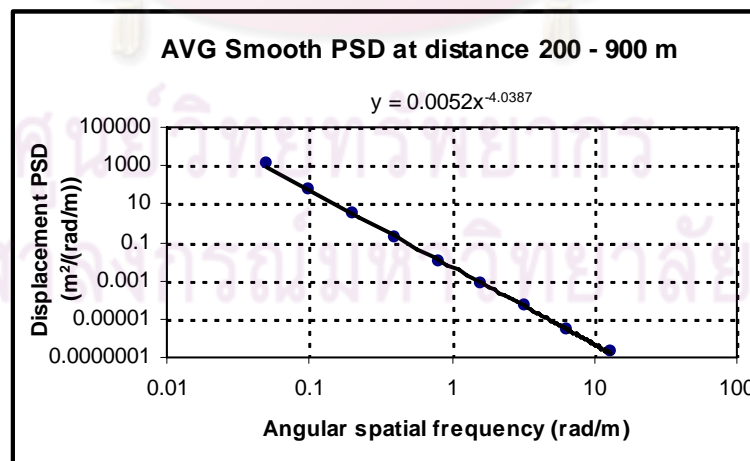
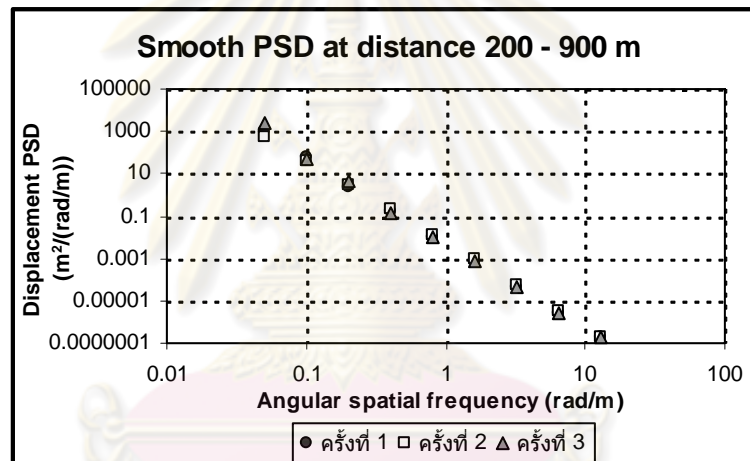
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265482	827.6601	144.8891	227.3756	399.9749	0.287508
0.100530965	21.20829	10.55775	8.82003	13.52869	0.071877
0.20106193	7.391942	3.988024	3.643771	5.007912	0.017969
0.40212386	0.255837	0.224917	0.273017	0.251257	0.004492
0.804247719	0.006973	0.004899	0.0077	0.006524	0.001123
1.608495439	0.000387	0.000327	0.00045	0.000388	0.000281
3.216990877	2.84E-05	2.51E-05	3.3E-05	2.88E-05	7.02E-05
6.433981755	1.79E-06	1.91E-06	2.66E-06	2.12E-06	1.75E-05
12.86796351	1.03E-07	1.42E-07	1.79E-07	1.41E-07	4.39E-06



รูปที่ ค-98 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 0 – 200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 10 – 18

ตารางที่ ค-47 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 200 – 900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 10 - 18

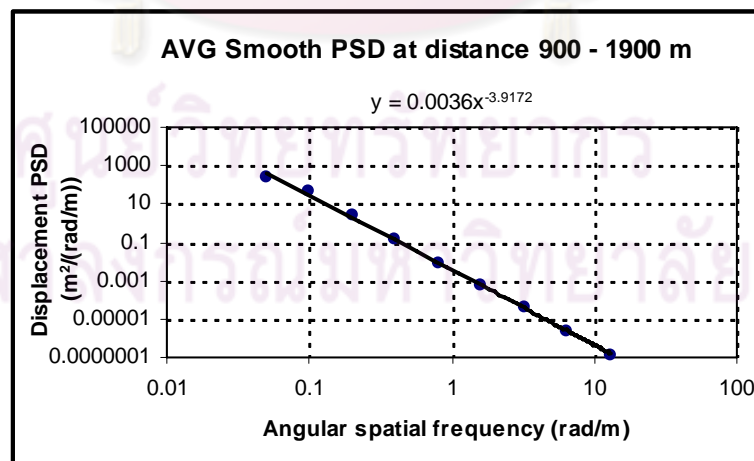
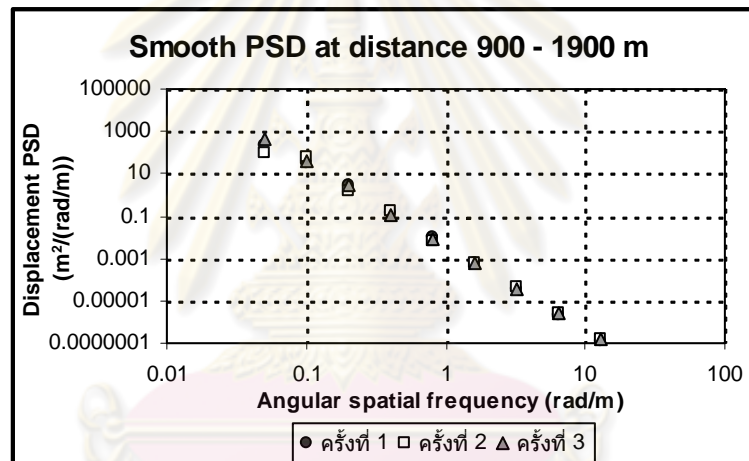
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	1078.42	532.2445	2237.433	1282.699	0.449447
0.100531	67.64914	41.84591	47.67099	52.38868	0.112362
0.201062	2.266741	2.652788	4.33078	3.083436	0.02809
0.402124	0.157829	0.233265	0.12714	0.172745	0.007023
0.804248	0.010844	0.011866	0.00984	0.01085	0.001756
1.608495	0.000718	0.000864	0.000687	0.000756	0.000439
3.216991	4.67E-05	5.23E-05	4.21E-05	4.7E-05	0.00011
6.433982	2.8E-06	3.37E-06	2.81E-06	2.99E-06	2.74E-05
12.86796	1.93E-07	2.11E-07	1.97E-07	2E-07	6.86E-06



รูปที่ ค-99 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 200 – 900 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟ คลับ หลุม 10 - 18

ตารางที่ ค-48 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 900 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18

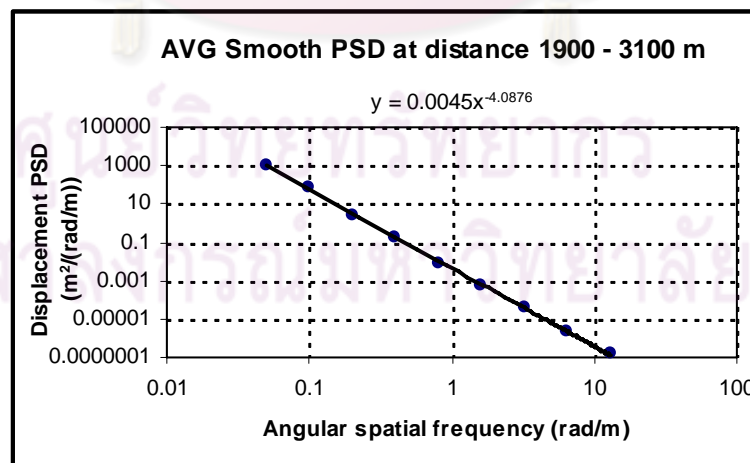
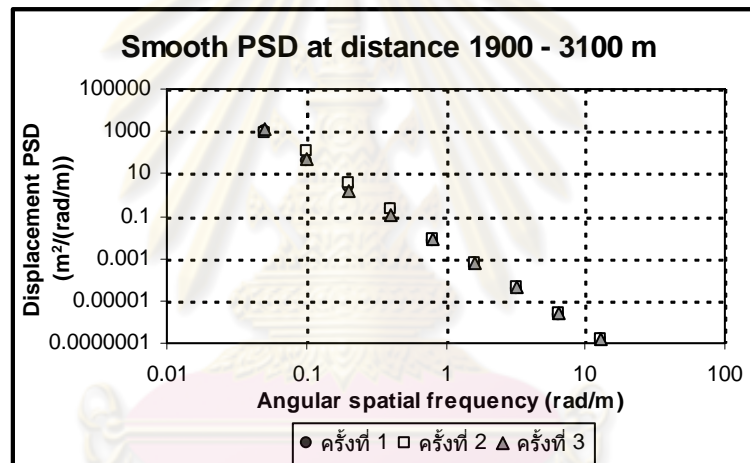
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	205.0412	85.47048	442.6283	244.38	0.303591
0.100531	34.53016	61.02007	41.7344	45.76154	0.075898
0.201062	2.751612	1.527555	2.848598	2.375922	0.018974
0.402124	0.147168	0.175818	0.103905	0.142297	0.004744
0.804248	0.009322	0.006727	0.008519	0.00819	0.001186
1.608495	0.000627	0.000595	0.0006	0.000607	0.000296
3.216991	3.41E-05	4.4E-05	3.72E-05	3.84E-05	7.41E-05
6.433982	2.2E-06	2.44E-06	2.41E-06	2.35E-06	1.85E-05
12.86796	1.24E-07	1.45E-07	1.6E-07	1.43E-07	4.63E-06



รูปที่ ค-100 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 900 – 1900 เมตร ของสนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18

ตารางที่ ค-49 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 1900 – 3100 เมตรของ สนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18

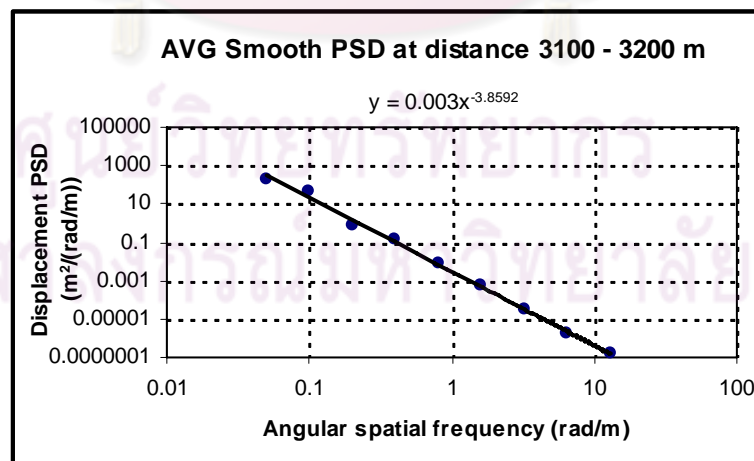
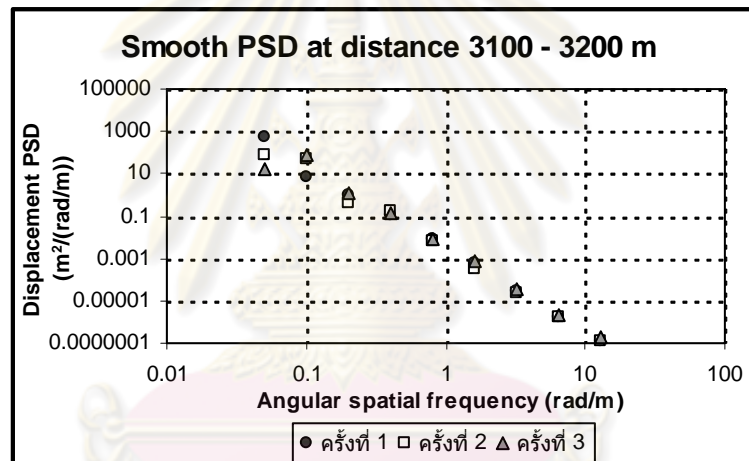
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	1061.144	877.4061	1213.117	1050.556	0.39265
0.100531	36.94826	122.2037	45.88275	68.34491	0.098163
0.201062	2.425552	3.889063	1.498314	2.60431	0.024541
0.402124	0.228655	0.226617	0.104144	0.186472	0.006135
0.804248	0.007143	0.008631	0.008064	0.007946	0.001534
1.608495	0.000621	0.000619	0.000606	0.000615	0.000383
3.216991	3.56E-05	4E-05	4.03E-05	3.86E-05	9.59E-05
6.433982	2.2E-06	2.52E-06	2.62E-06	2.45E-06	2.4E-05
12.86796	1.43E-07	1.6E-07	1.54E-07	1.53E-07	5.99E-06



รูปที่ ค-101 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 1900 – 3100 เมตรของ สนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18

ตารางที่ ค-50 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3100 – 3200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	495.6616	75.60377	16.14795	195.8044	0.24616
0.100531	7.396937	44.46965	74.641	42.16919	0.06154
0.201062	1.002316	0.431446	1.142357	0.858706	0.015385
0.402124	0.101537	0.16887	0.140936	0.137115	0.003846
0.804248	0.007621	0.006544	0.007872	0.007346	0.000962
1.608495	0.000645	0.000328	0.000708	0.000561	0.00024
3.216991	2.87E-05	2.41E-05	3.93E-05	3.07E-05	6.01E-05
6.433982	1.72E-06	1.87E-06	2.17E-06	1.92E-06	1.5E-05
12.86796	1.36E-07	1.31E-07	1.99E-07	1.56E-07	3.76E-06

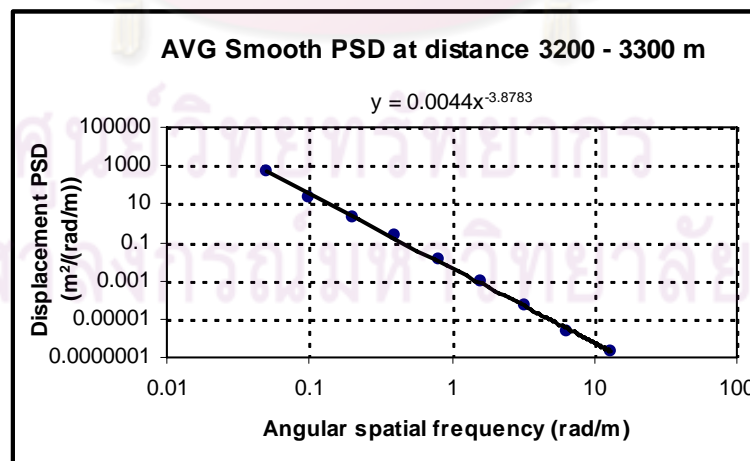
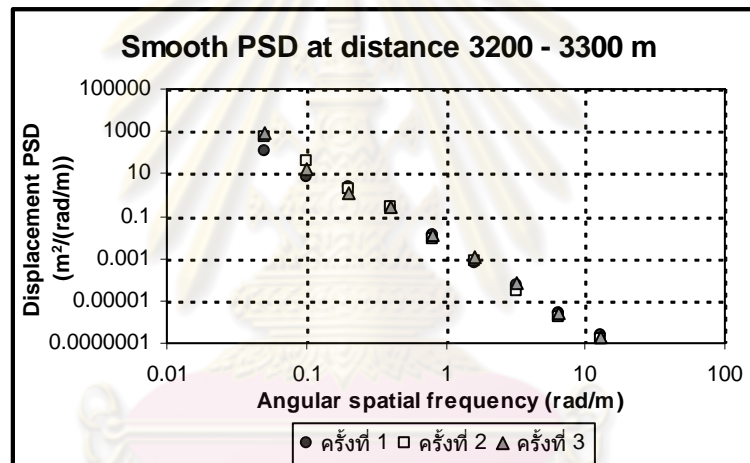


รูปที่ ค-102 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3100 – 3200 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18



ตารางที่ ค-51 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3200 – 3300 เมตร ของ สนามกอล์ฟบางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18

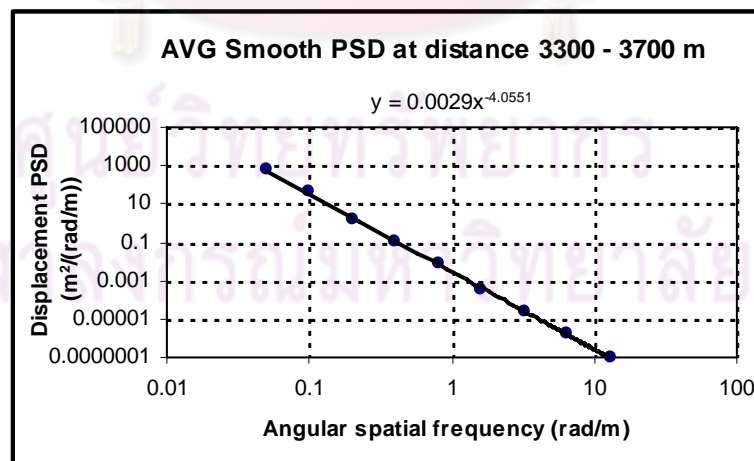
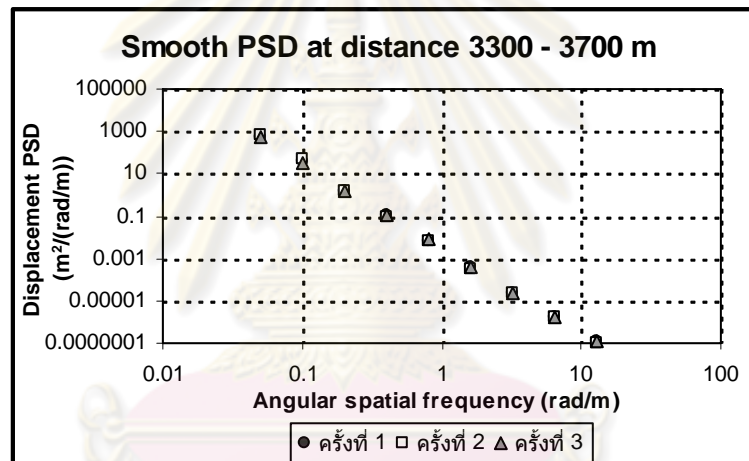
ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	108.4927	493.3531	852.897	484.9143	0.364312
0.100531	7.634365	41.41391	16.74477	21.93102	0.091078
0.201062	2.494558	1.852052	1.279626	1.875412	0.02277
0.402124	0.255277	0.253816	0.257848	0.255647	0.005692
0.804248	0.014079	0.008967	0.011683	0.011576	0.001423
1.608495	0.000664	0.000791	0.001132	0.000862	0.000356
3.216991	5.76E-05	2.88E-05	6.94E-05	5.19E-05	8.89E-05
6.433982	2.9E-06	1.87E-06	2.72E-06	2.5E-06	2.22E-05
12.86796	2.14E-07	1.52E-07	2.03E-07	1.9E-07	5.56E-06



รูปที่ ค-103 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3200 – 3300 เมตร ของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 - 18

ตารางที่ ค-52 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงอยู่ในรูป Octave band ในช่วง 3300 – 3700 เมตรของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18

ความถี่เชิงมุมที่ ขึ้นกับระยะทาง (rad/m)	PSD(m <sup>2</sup> /(rad/m))				สอบเทียบ/เข้า กระบวนการตาม ISO 8608
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.050265	106.9649	197.747	686.563	330.425	0.24107
0.100531	11.16863	17.8411	21.25553	16.75509	0.060268
0.201062	1.521782	1.743631	3.117601	2.127671	0.015067
0.402124	0.084103	0.14953	0.113918	0.11585	0.003767
0.804248	0.005981	0.006461	0.006201	0.006214	0.000942
1.608495	0.000435	0.000613	0.000365	0.000471	0.000235
3.216991	3E-05	2.65E-05	3.09E-05	2.91E-05	5.89E-05
6.433982	1.91E-06	1.86E-06	2.02E-06	1.93E-06	1.47E-05
12.86796	1.27E-07	1.46E-07	1.34E-07	1.36E-07	3.68E-06



รูปที่ ค-104 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (บน) และค่าเฉลี่ยที่ได้ (ล่าง) ในช่วง 3300 – 3700 เมตรของ สนามกอล์ฟ บางกอกกอล์ฟคลับ หลุม 10 – 18



ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความแข็งสปริงเพื่อใช้กับ Rolling Straightedge

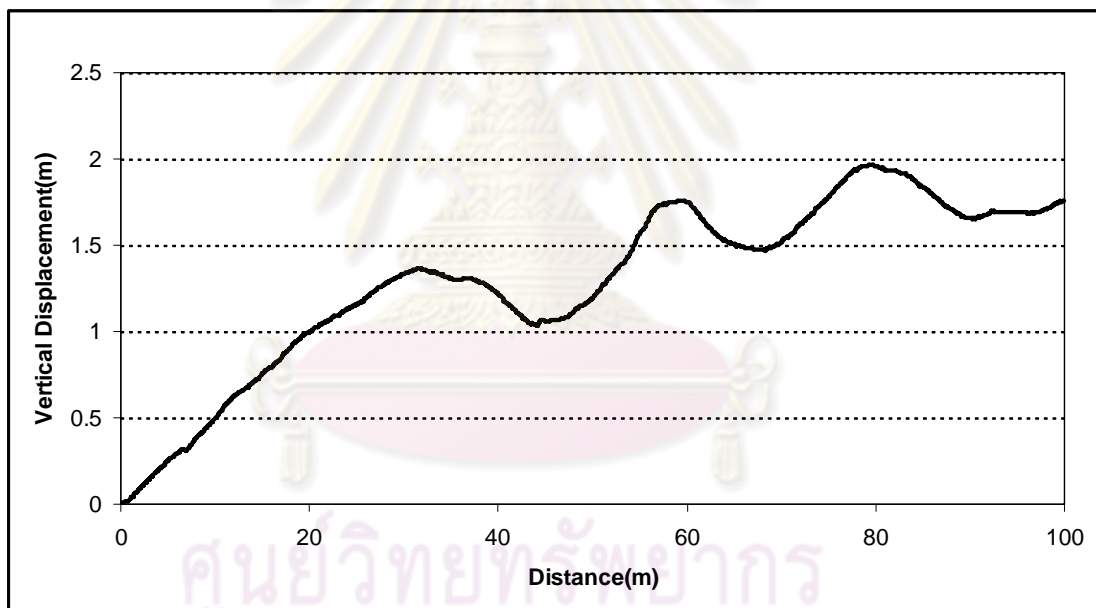
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การคำนวณค่าความแข็งสปริงเพื่อใช้กับ Rolling Straightedge

ในการออกแบบค่าความแข็งของสปริงเพื่อใช้กับ Rolling Straightedge มีจุดประสงค์เพื่อให้ล้อสำหรับวัดลักษณะถนนเกาะถนนตลอดเวลาในขณะที่ทำการวัดเพื่อให้การวัดได้ค่าที่ถูกต้องเหมาะสม

ในสนามกอล์ฟนั้นส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตไม่ได้ลาดยางซึ่งมีความคล้ายคลึงกับจุดที่ทำการสอบเทียบ ดังนั้นจะใช้ข้อมูลของลักษณะถนนจุดที่ทำการสอบเทียบเป็นข้อเงื่อนไขในการออกแบบ และทำการการออกแบบเผื่อในเส้นทางอื่นๆ ต่อไป กล่าวคือ ค่าความแข็งของสปริงที่เหมาะสมจะต้องมากพอที่จะไม่ให้ล้อสำหรับวัดถนนยกลอยในเส้นทางที่สอบเทียบ และเลือกค่าความแข็งสปริงที่แข็งกว่าที่คำนวณได้ในเส้นทางที่สอบเทียบประมาณ 3-4 เท่า ซึ่งลักษณะถนนจุดที่ทำการสอบเทียบเป็นดังรูปที่ ง-1



รูปที่ ง-1 ลักษณะถนนที่ได้จากการวัดระดับน้ำ

สปริงที่ใช้งานต้องมีการออกแบบให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. สปริงทำงานตลอดเวลาขณะทำการวัด

ในขณะที่ทำการวัดสปริงต้องยาวเพียงพอทำให้ล้อสำหรับวัดลักษณะถนนของ Rolling Straightedge กดพื้นตลอดเวลา ยกตัวอย่างเช่น ล้อสำหรับวัดลักษณะถนนเคลื่อนที่ในจังหวะลง มีค่ามากกว่าระยะสปริง ล้อจะตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีแรงสปริงมากระทำ อาจทำให้ล้อไม่ได้สัมผัสพื้นได้ ดังนั้นในการออกแบบนี้เบื้องต้นจะต้องหา ก่อนว่าล้อสำหรับวัดลักษณะถนนว่าระยะขึ้นลงมีค่าเท่าไร และเลือกความยาวสปริงให้มากกว่าค่านั้น เมื่อพิจารณา

จากถนนในรูปที่ ง-1 และ จากสมการการเคลื่อนที่ของล้อกลางของ Rolling Straightedge [6] ดังสมการที่ ง-1

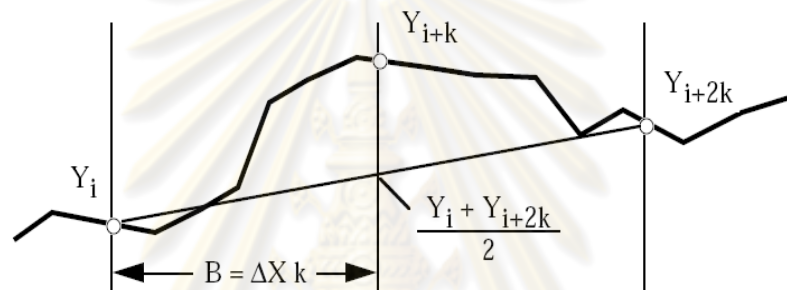
$$SE_i = \frac{1}{2}(Y_i - 2Y_{i+k} + Y_{i+2k}) \quad (\text{ง-1})$$

$SE_i$  คือ ผลต่างของระยะทางระหว่างล้อสำหรับวัดลักษณะถนนกับส่วนของฐานในแนวตั้ง

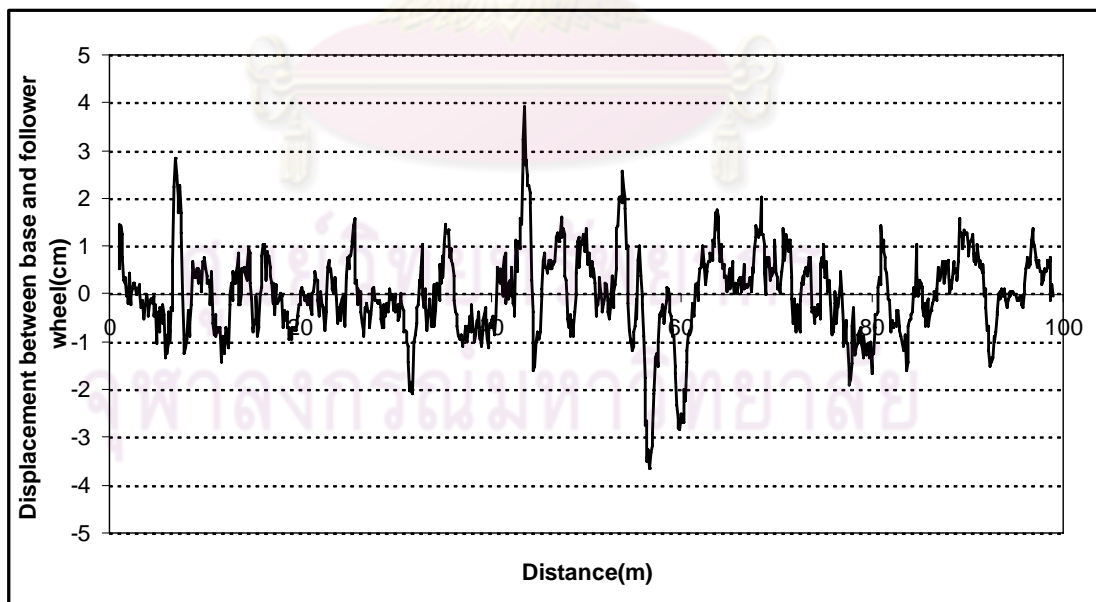
$Y_i$  คือ ค่าความสูงของถนนที่ตำแหน่งใดๆ

$k$  คือ ดัชนีวัดจุดต่างๆของถนน

ซึ่งจะได้การเคลื่อนที่ของล้อกลาง ณ ตำแหน่งๆต่าง ดังรูปที่ ง-2



รูปที่ ง-2 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณของสมการ ง-1



รูปที่ ง-3 ผลต่างของระยะทางระหว่างล้อสำหรับวัดลักษณะถนนกับส่วนของฐานในแนวตั้ง

จากการคำนวณตามสมการ ง-1 เห็นได้ว่ามีค่าสูงสุดต่ำสุดไม่เกิน 4 cm เทียบกับผลต่างของระยะทางที่ล้อกลางเคลื่อนที่กับส่วนของฐานในแนวตั้งดังรูปที่ ง-3 ดังนั้นในการออกแบบครั้งนี้



ได้เลือกความยาวของสปริง 30 cm โดยเมื่อประกอบแล้วจะมีระยะให้เคลื่อนขึ้นสูงสุดได้ 18 cm เทียบกับฐาน และสปริงสามารถทำงานได้เมื่อล้อสำหรับวัดลักษณะถนนเคลื่อนที่ลงต่ำสุด 12 cm ดังรูปที่ ง-4 ดังนั้นเส้นทางนี้สปริงจะมีจุดที่สปริงหดตัวมากที่สุด ที่ความยาวสปริงอยู่ที่ 14 cm และจุดที่สปริงขยายตัวมากที่สุดสปริงจะมีความยาว 22 cm ซึ่งถือได้ว่าระยะสปริงเพียงพอแล้ว

## 2. ค่าความแข็งสปริงมีค่ามากพอที่ทำให้ล้อกลางกดพื้นตลอดเวลา

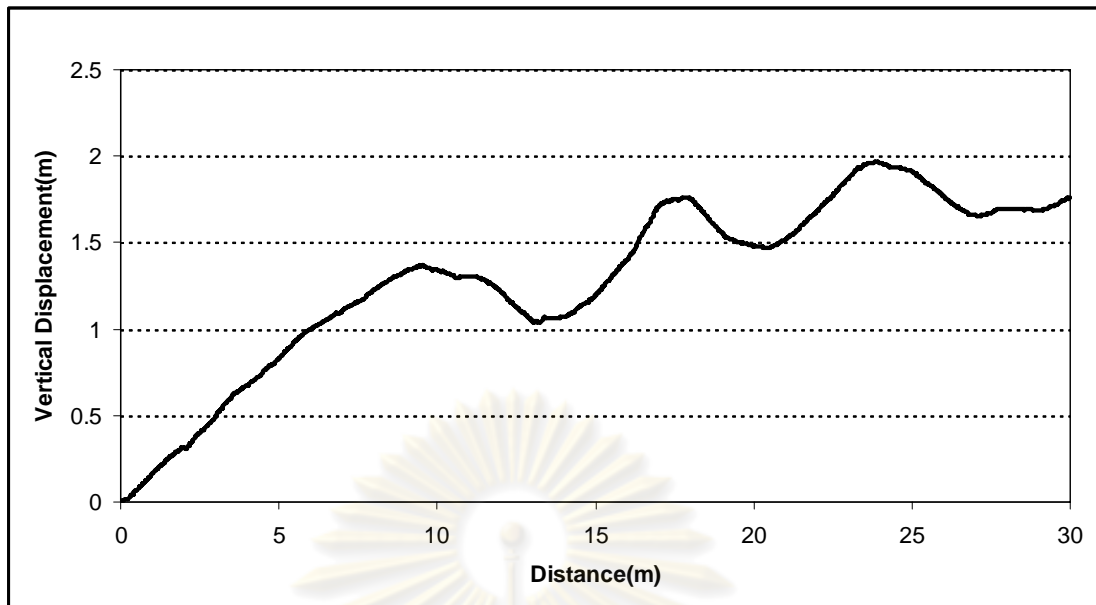
ล้อสำหรับวัดลักษณะถนนจะต้องติดพื้นตลอดเวลาโดยการเคลื่อนที่จะสัมพันธ์กับความสูงต่ำของลักษณะถนน และเมื่อคำนวณตามความเร็วในขณะทำการวัดที่ 12 km/h (3.333 m/s) ตามความสูงต่ำของถนนที่สอบเทียบจะพบว่าล้อสำหรับวัดลักษณะถนนจะมีการเคลื่อนที่ตามเวลา ดังรูปที่ ง-5 ซึ่งเมื่อทำการอนุพันธ์สองครั้งเพื่อดูความเร่งที่เกิดขึ้นที่ล้อสำหรับวัดลักษณะถนน พบว่าความเร่งที่เกิดขึ้นสูงสุดอยู่ที่ความเร่งในทิศขึ้น  $20 \text{ m/s}^2$  และทิศลง  $20 \text{ m/s}^2$  ด้วยเหตุนี้ค่าความแข็งของสปริงจะต้องให้ความเร่งที่เกิดขึ้นที่ล้อสำหรับวัดลักษณะถนนไม่ควรต่ำกว่า  $20 \text{ m/s}^2$

ซึ่งเมื่อคำนวณกับมวลของล้อสำหรับวัดลักษณะถนนซึ่งมีน้ำหนัก 4 kg แล้วพบว่าสปริงจะต้องให้แรงกดพื้นอยู่ที่  $4 \times 20 = 80$  นิวตัน ( $F = ma$ ) เป็นอย่างน้อยตลอดเวลา

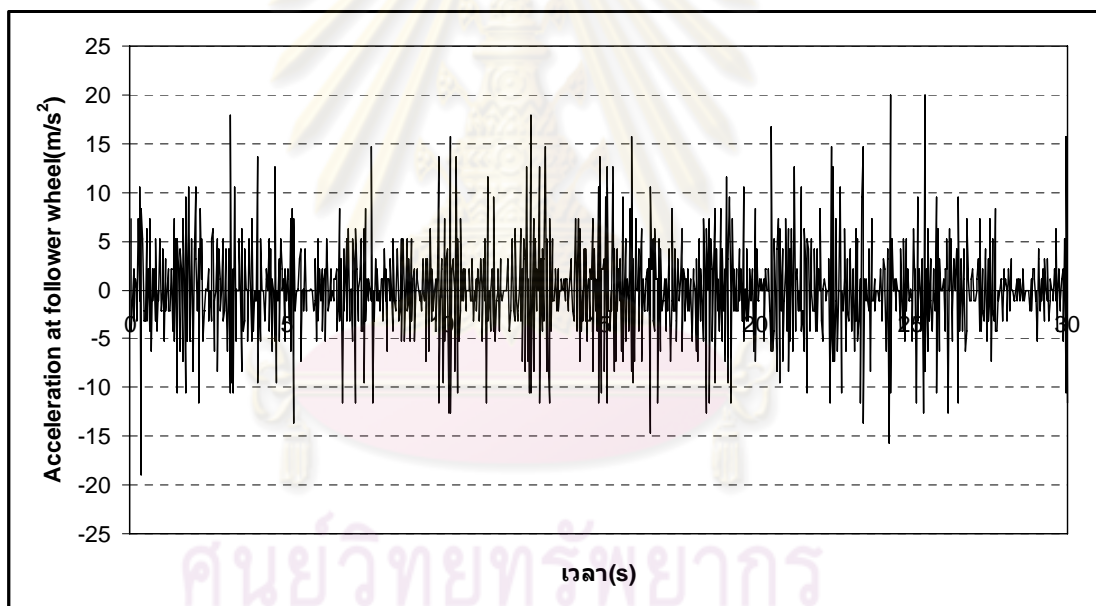


รูปที่ ง-4 ระยะการทำงานและการติดตั้งของสปริง

ศูนย์ปริทัศน์ทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง-5 การเคลื่อนที่ของล้อกลางสำหรับวัดลักษณะถนนที่เวลาต่างๆ



รูปที่ ง-6 ความเร่งของล้อกลางกรณีล้อติดกับถนนตลอดเวลาในเส้นทางที่สอบเทียบ

จากคุณสมบัติของสปริงในข้อที่ 1 ขณะทำการวัดจุดที่สปริงขยายตัวมากที่สุดสปริงจะมีความยาว 22 cm ซึ่งแสดงว่าสปริงยุบตัวไป 8 cm เป็นจุดที่ค่าแรงสปริงน้อยที่สุดในช่วงการทำงานทั้งหมด ดังนั้นหากจุดนี้แรงสปริงมีค่าเกิน 80 N จะเป็นการยืนยันได้ว่าตลอดเวลาในการวัดจะมีแรงสปริงจะเกิน 80 N ตลอดเวลาทำการวัด ซึ่งทำให้ล้อไม่ยกลอยจากพื้น

จากสมการกฎของนิวตันและสมการแรงของสปริง  $F = kx$

โดยที่

$F$  คือ แรงที่สปริงกดพื้นต้องการอย่างน้อย 80 N จากคุณสมบัติสปริงข้อ 2

$k$  คือ ค่าความแข็งของสปริงที่ต้องใช้

$x$  คือ ระยะยุบตัวของสปริง(8 cm)

จะคำนวณค่า  $K$  ได้ 1000 N/m ซึ่งในการทำงานครั้งนี้ได้มีการเผื่อค่าไว้ที่ 3400 N/m หรือคิดเป็น 0.3464 kg/mm ค่าความแข็งของสปริงมีค่ามากเพียงพอในการแล่นเส้นทางอื่นๆ

จากสมการคำนวณหาค่าความแข็งของสปริงขด [25]

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3}$$

โดยที่

$k$  คือ ค่าความแข็งของสปริง 0.3464 kg/mm

$G$  คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉือนของวัสดุ (เหล็กสปริง = 8000 kg/mm<sup>2</sup>)

$d$  คือ ค่าขนาดของเส้นลวดกำหนดไว้ที่ค่า 2.7 mm

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริงกำหนดไว้ที่ 18 mm เพื่อให้สวมกับเพลลาพอดี

$n$  คือ จำนวนขดสปริง

ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ค่า  $n$  อยู่ที่ 26 ขด

ดังนั้นข้อสรุปของสปริงที่มาใช้งานดังนี้

1. ขนาดความยาว 30 cm
2. ใช้เหล็กทำสปริง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 mm
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสปริง 18 mm
4. จำนวนขดลวดเท่ากับ 26



ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบหาค่าตัวแปรของระบบรองรับต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### ผลการทดสอบหาค่าตัวแปรของระบบรองรับต่าง ๆ

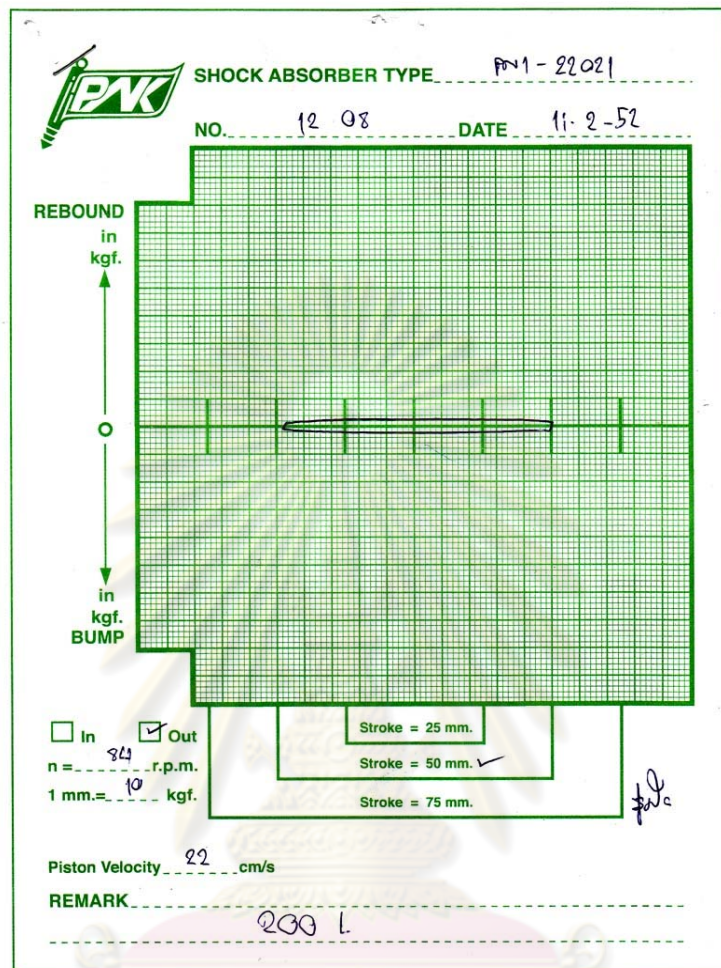
#### จ.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Shock Absorber) จะใช้เครื่องทดสอบ Koni Testing Machine, Model 4423-05 ในการทดสอบ ดังรูปที่ จ-1 ซึ่งสามารถอ่านค่าแรงที่ใช้ในการกดในช่วงจังหวะขยายและอัดของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ที่ความเร็วที่กำหนด การแสดงผลจะแสดงในกระดาษกราฟดังรูปที่ จ-2 จะเห็นได้ว่ากระดาษกราฟแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ด้านบน คือ จังหวะขยาย ด้านล่าง คือ จังหวะอัด จุดสูงสุดด้านบนและด้านล่างของกราฟ คือ แรงที่ใช้ในการทำให้เกิดความเร็วที่กำหนดไว้ ระยะทางในกระดาษกราฟ 1 mm เทียบเท่ากับแรง 10 kg-f ดังนั้นหากดูตัวอย่างในรูปที่ จ-2 จะเห็นได้ว่าใช้แรงกดและแรงดึงเท่ากันที่ 10 kg-f เพื่อให้ได้ความเร็ว 0.22 m/s โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่นำมาใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ จะเป็นผลเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความหน่วงในจังหวะขยายและอัด



รูปที่ จ-1 ภาพเครื่องทดสอบ Koni Testing Machine, Model 4423-05

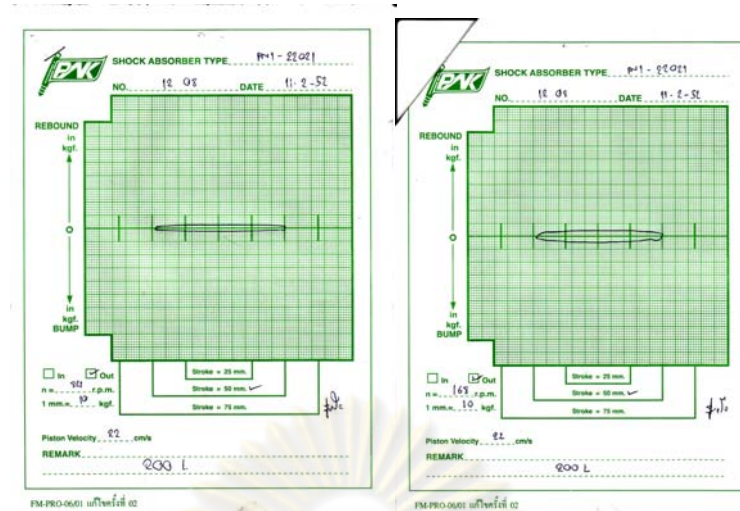




FM-PRO-06/01 แก๊วครั้งที่ 02

รูปที่ ๑-2 ตัวอย่างกระดาษกราฟผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือน โดยใช้ Koni Testing Machine, Model 4423-05

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการออกแบบและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน 3 ค่าที่ใช้ในงานวิจัยได้ผลดังนี้



รูปที่ จ-3 กระดาษกราฟผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 445.45 N-s/m

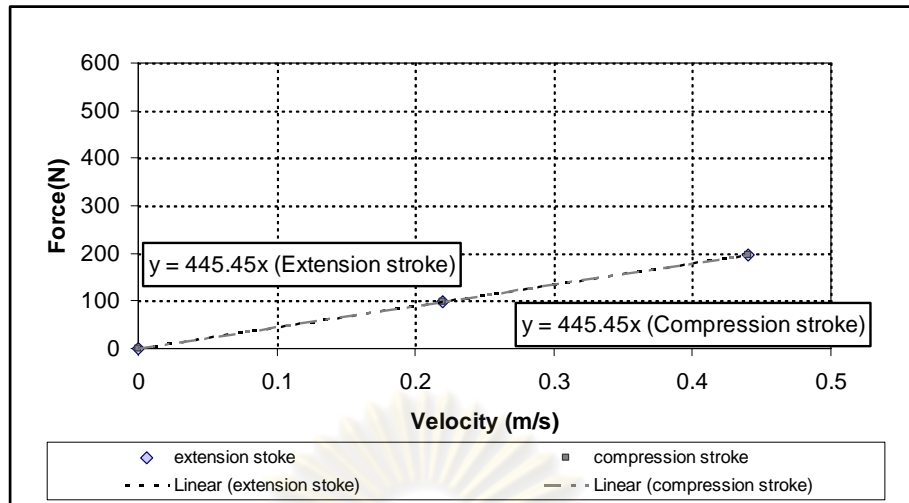
จากผลการทดลองในรูปที่ จ-3 สามารถแปลงข้อมูลได้ดังตารางที่ จ-1

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 445.45 N-s/m

ความเร็ว (m/s)	จังหวะขยาย		จังหวะอัด	
	แรง(kgf)	แรง(N)	แรง(kgf)	แรง(N)
0	0	0	0	0
0.22	10	98	10	98
0.44	20	196	20	196

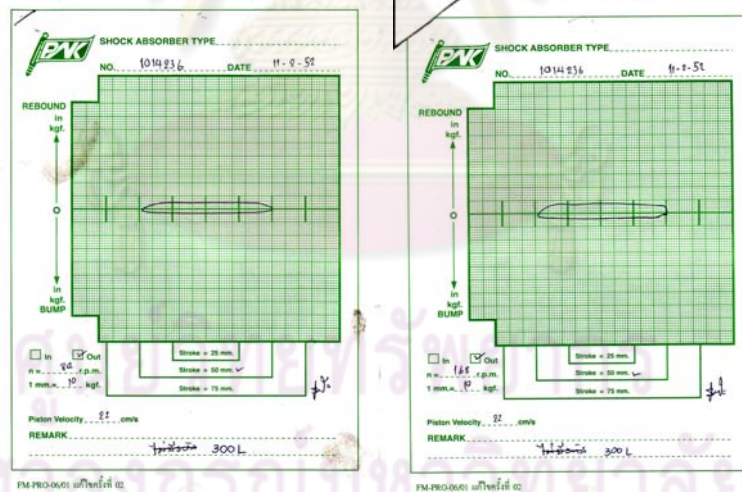
จากข้อมูลในตารางที่ จ-1 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเร็วจึงหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยในจังหวะอัดและขยายดังรูปที่ จ-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็วที่เกิดขึ้นของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนในจังหวะอัดและขยายของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 445.45 N-s/m

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงตอนจังหวะอัดมีค่าเท่ากับ 445 N-s/m และ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงตอนจังหวะขยายมีค่าเท่ากับ 445 N-s/m ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 445 N-s/m



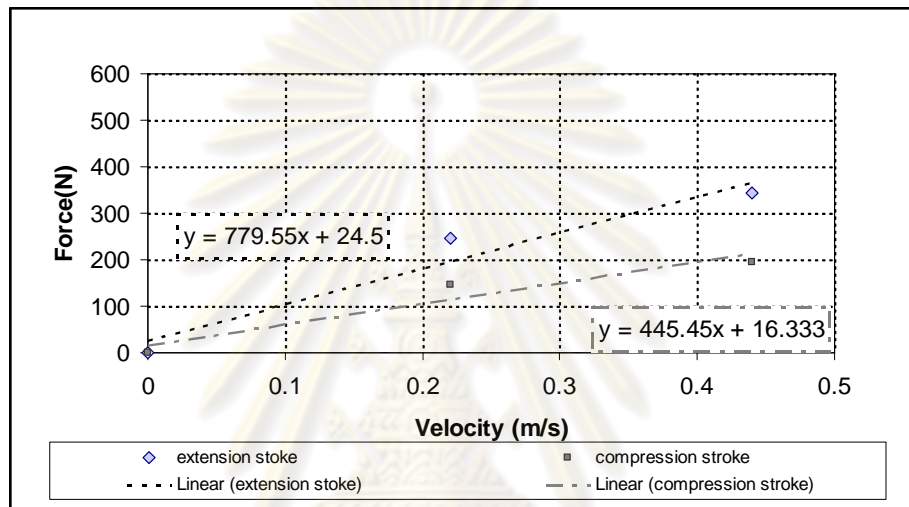
รูปที่ ๑-5 กระดาษกราฟผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 612.5 N-s/m

จากผลการทดลองในรูปที่ ๑-5 สามารถแปลงข้อมูลได้ดังตารางที่ ๑-2

ตารางที่ ๑-2 ข้อมูลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 612.5 N-s/m

ความเร็ว (m/s)	จังหวะขยาย		จังหวะอัด	
	แรง(kgf)	แรง(N)	แรง(kgf)	แรง(N)
0	0	0	0	0
0.22	25	245	15	147
0.44	35	343	20	196

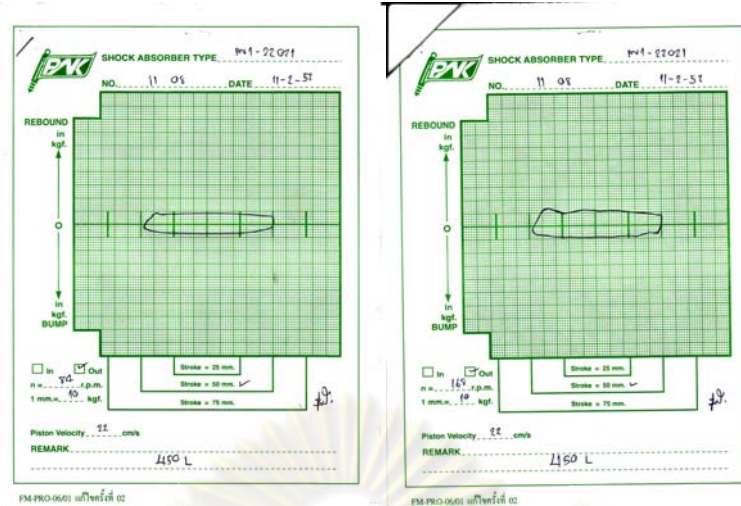
จากข้อมูลในตารางที่ ๑-2 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเร็วและหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยในจังหวะอัดและขยายดังรูปที่ ๑-6



รูปที่ ๑-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็วที่เกิดขึ้นของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนในจังหวะอัดและขยายของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 612.5 N-s/m

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงตอนจังหวะอัดมีค่าเท่ากับ 780 N-s/m และ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงตอนจังหวะขยายมีค่าเท่ากับ 445 N-s/m ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 612.5 N-s/m





รูปที่ จ-7 กระดาษกราฟผลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 1057.5 N-s/m

จากผลการทดลองในรูปที่ จ-7 สามารถแปลงข้อมูลได้ดังตารางที่ จ-3

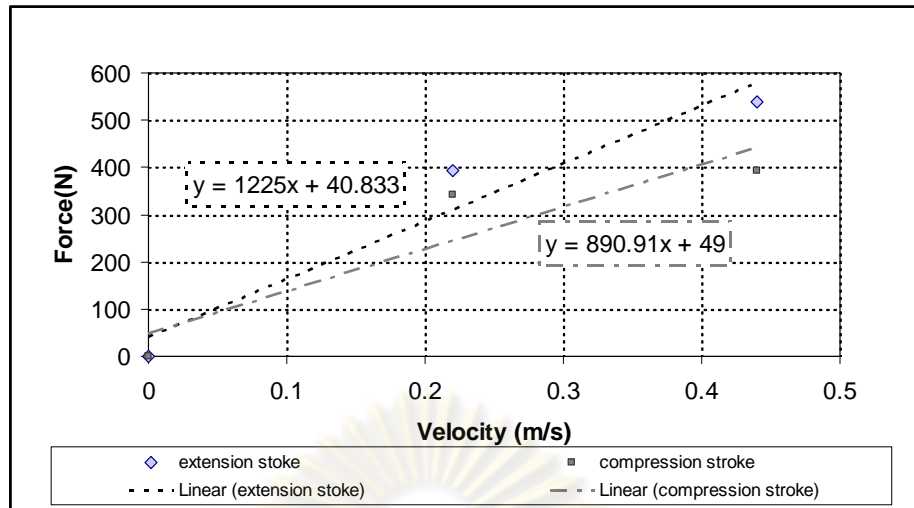
ตารางที่ จ-3 ข้อมูลการทดสอบตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 1057.5 N-s/m

ความเร็ว (m/s)	จังหวะขยาย		จังหวะอัด	
	แรง(kgf)	แรง(N)	แรง(kgf)	แรง(N)
0	0	0	0	0
0.22	40	392	35	343
0.44	55	539	40	392

จากข้อมูลในตารางที่ จ-3 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเร็วจึงหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยในจังหวะอัดและขยายดังรูปที่ จ-8

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ๑-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็วที่เกิดขึ้นของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนในจังหวะอัดและขยายตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 1057.5 N-s/m

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงตอนจังหวะอัดมีค่าเท่ากับ 1225 N-s/m และ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงตอนจังหวะขยายมีค่าเท่ากับ 890 N-s/m ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 1057.5 N-s/m

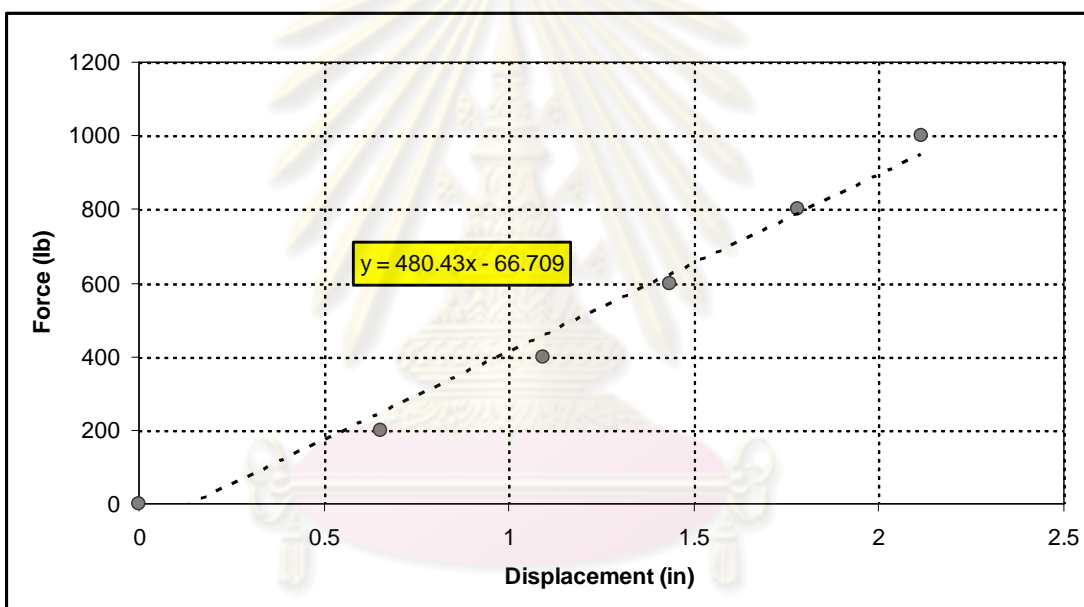
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## จ.2 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของล้อยและยาง

วัดค่าความแข็งสปริงของยางโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวดังตารางที่ จ-4 ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยางได้ดังรูปที่ จ-9

ตารางที่ จ-4 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของล้อยและยาง

IB	ระยะยุบตัวของยาง(mm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
0	0	0	0	0	0
200	0.58	0.71	0.61	0.72	0.655
400	1.02	1.16	1.02	1.17	1.0925
600	1.37	1.51	1.35	1.51	1.435
800	1.72	1.84	1.72	1.84	1.78
1000	2.13	2.13	2.1	2.1	2.115



รูปที่ จ-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยาง

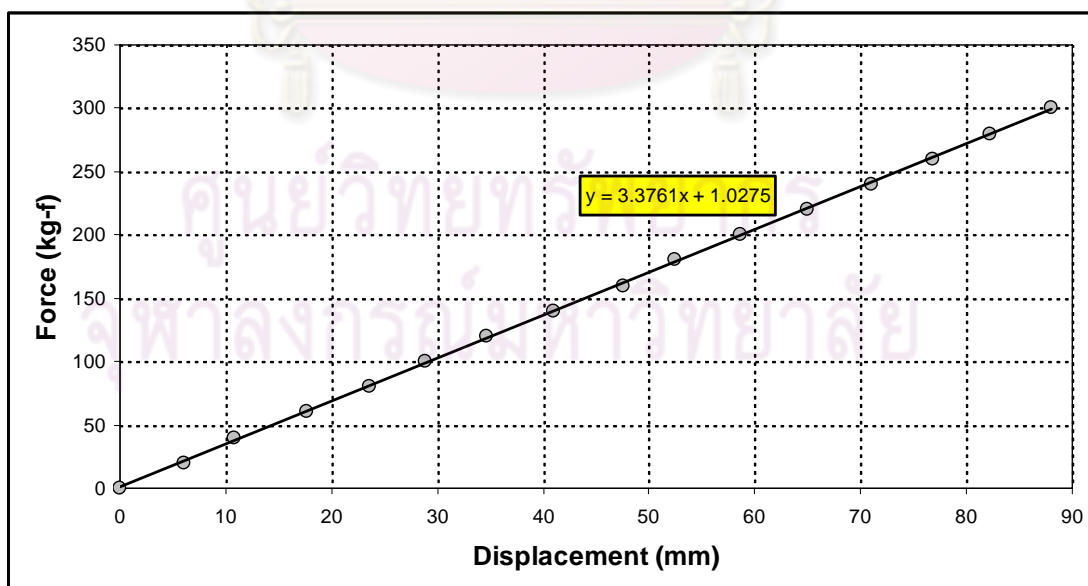
จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งสปริงของล้อยและยางอยู่ที่ 480.43 lb/mm แต่เนื่องจากการกดโดนเนื้อยางทั้ง 2 ด้านซึ่งจะให้ค่าความแข็งสปริงน้อยลงกว่าปกติ 2 เท่า แต่ในการขับขึ้นถนนจะสัมผัสกับยางด้านเดียวค่าความแข็งสปริงที่ต้องใช้คำนวณจึงควรเป็น 960.86 lb/mm หรือ 168150 N/m (มีค่าประมาณ 170000 N/m)

### ๑.3 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับด้านหลัง

วัดค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับด้านหลังโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวของแหงบดงตารางที่ ๑-5 ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของแหงบ (ระบบรองรับด้านหลัง) ได้ดังรูปที่ ๑-9 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งสปริงของแหงบอยู่ที่ 3.3761 kg-f/mm หรือ 33085.78 N/m

ตารางที่ ๑-5 ข้อมูลการทดสอบค่าความแข็งสปริงของแหงบด้านหลัง

Load (kg-f)	ระยะยุบตัวของแหงบ(mm)					เฉลี่ย
	SET#1	SET#2	SET#3	SET#4	SET#5	
0	0	0	0	0	0	0
23	7	7	5	6	5	6
40	11	12	10	10	11	10.8
60	19	17	18	17	17	17.6
80	24	25	24	23	22	23.6
100	29	29	29	29	28	28.8
120	34	36	35	33	35	34.6
140	40	43	41	39	42	41
160	47	49	48	47	47	47.6
180	52	54	52	52	52	52.4
200	58	61	59	57	58	58.6
220	64	66	65	65	65	65
240	70	72	70	72	71	71
260	76	78	77	77	76	76.8
280	81	83	82	83	82	82.2
300	86	89	89	88	88	88



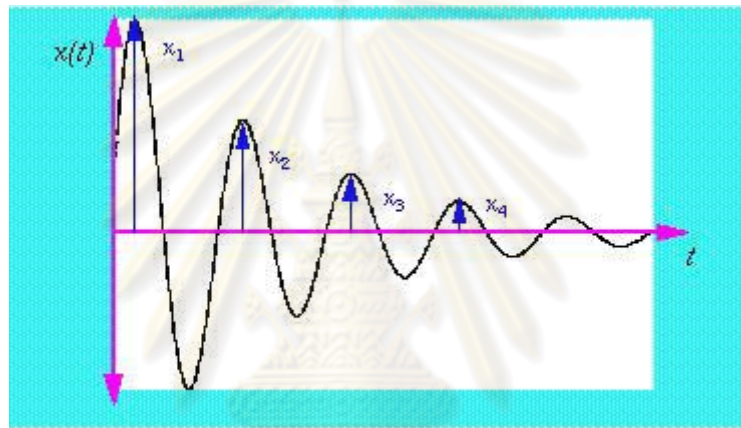
รูปที่ ๑-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของแหงบ

#### ๑.4 ข้อมูลผลการทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับในกรณีที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

##### การลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic Decrement) [4]

ในระบบของการทำงานจริงนั้นเรามักไม่ทราบค่าความหน่วงของระบบจึงจำเป็นต้องคำนวณหาค่าความหน่วงจากการวัดขนาดของการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบที่ลดลงโดยเมื่อพิจารณาจากกราฟการสั่นสะเทือนในรูปที่ ๑-11 ค่าลอการิทึมของอัตราส่วนของขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละคาบที่อยู่ติดกันไปนั้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\delta = \ln \left[ \frac{X_1}{X_2} \right] \quad (๑-1)$$



รูปที่ ๑-11 การลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic Decrement)

ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่จะหาความหน่วงโดยวิธีนี้จะต้องเป็นกรณีที่มีการเคลื่อนที่แบบความหน่วงน้อย (Underdamped Motion) ซึ่งจะมีผลเฉลยของสมการดังนี้

$$x = e^{-\xi\omega_n t} [D \sin(\omega_d t + \phi)] \quad (๑-2)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ มุมเฟส (Phase Angle)

$D$  เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากเงื่อนไขเริ่มต้น

$\xi$  คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) =  $c/c_c$

$c_c$  เป็นค่าความหน่วงวิกฤติ (Critical Damping) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\sqrt{km}$

$\omega_n$  เป็นค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{\frac{k}{m}}$

$\omega_d$  เป็นค่าความถี่ของระบบซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\omega_n \sqrt{1-\xi^2}$

จากสมการ ๑-1 และสมการ ๑-2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\delta = \ln \frac{e^{-\xi\omega_n t} [D \sin(\omega_d t + \phi)]}{e^{-\xi\omega_n (t+\tau_d)} [D \sin(\omega_d (t+\tau_d) + \phi)]} \quad (๑-3)$$

โดยที่  $\tau_d$  คือ คาบ(Period) ในการสั่นสะเทือน

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (จ-4)$$

$$\sin(\omega_d t + \phi) = \sin(\omega_d(t + \tau_d) + \phi)$$

$$\delta = \ln \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{e^{-\xi\omega_n(t+\tau_d)}} = \ln e^{\xi\omega_n \tau_d}$$

$$\delta = \xi\omega_n \tau_d$$

แทนค่า  $\tau_d$  จากสมการ จ-3 จะได้

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (จ-5)$$

จัดรูปเพื่อหา Damping ratio

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + (\delta)^2}} \quad (จ-6)$$

จัดรูปเพื่อหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบ จาก  $\xi = c/c_c$  และ  $c_c = 2\sqrt{km}$

$$c = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + (\delta)^2}} \times 2\sqrt{km}$$

ดังนั้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของແນบจึงทำได้โดยการทดลองทั้งมวลลงระบบรองรับด้านหลังเพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ และทำการกรองความถี่สูงออกไปด้วยการกรองแบบ Butterworth ที่มีความถี่ Cut-off 5 Hz เนื่องจากระบบรองรับมีความถี่อยู่ในช่วง 2-3 Hz การกรองนี้จึงจะช่วยให้สัญญาณมีความชัดเจนยิ่งขึ้น โดยค่า  $\delta$  จะใช้เฉลี่ยค่าลอการิทึมของอัตราส่วนของขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละคาบที่อยู่ติดกันใน 3 ครั้งแรก ซึ่งก็คือ  $\ln\left[\frac{X_1}{X_2}\right]$ ,  $\ln\left[\frac{X_2}{X_3}\right]$  และ  $\ln\left[\frac{X_3}{X_4}\right]$  นำมาเฉลี่ยกันเพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในทางสถิติ ส่วนการแกว่งที่เกิดขึ้นหลังจาก 3 ครั้งนี้จะมีขนาดของการสั่นน้อยและจึงมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้สูงจึงไม่นำมาใช้ในการคำนวณ

ในการทดลองจะแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลองทดลองชุดละ 3 ครั้งโดยที่ชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 จะมีการเปลี่ยนมวลของระบบเป็น 135 kg 150 kg และ 165 kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 1 ค่าความแข็งสปริงของระบบมีค่า 33000 N/m มวลของระบบ 135 kg มีการเคลื่อนที่ของระบบหลังจากถูกกระตุ้นให้เป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระดังรูปที่ จ-12

ชุดการทดลองที่ 2 ค่าความแข็งสปริงของระบบมีค่า 33000 N/m มวลของระบบ 150 kg มีการเคลื่อนที่ของระบบหลังจากถูกกระตุ้นให้เป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระดังรูปที่ จ-13

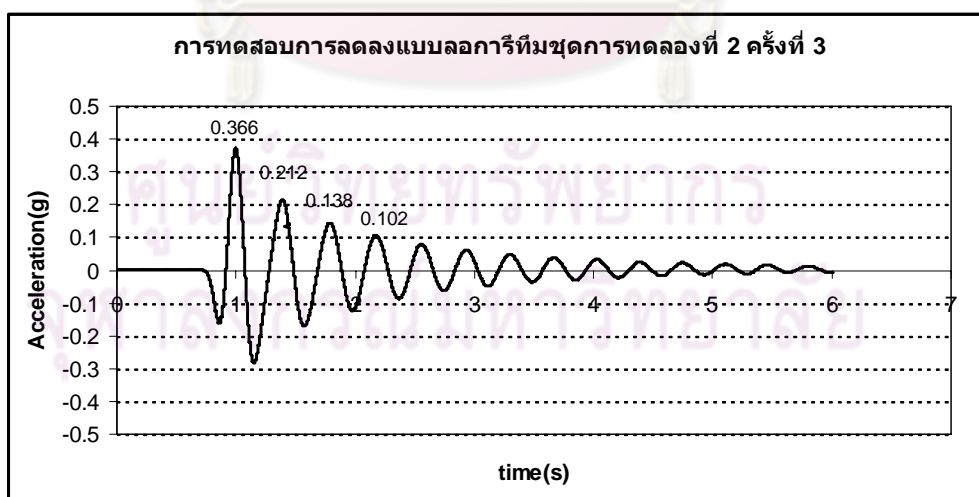
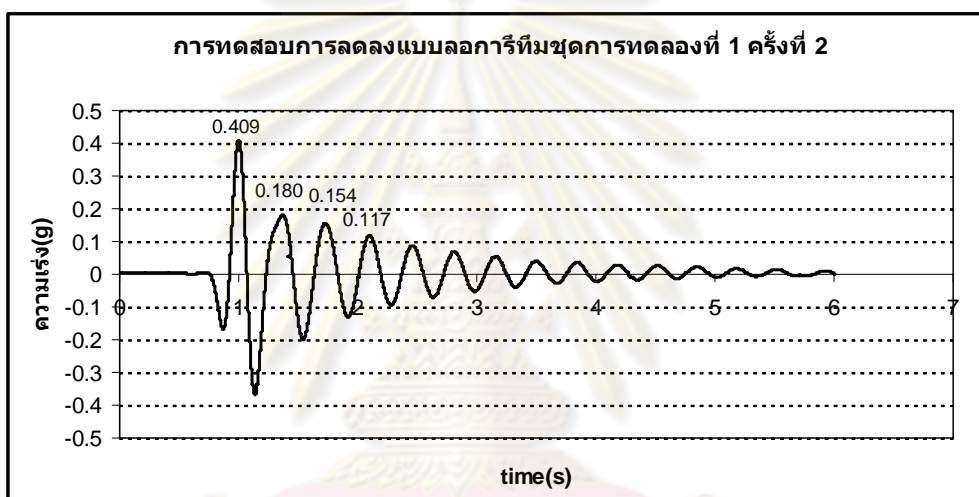
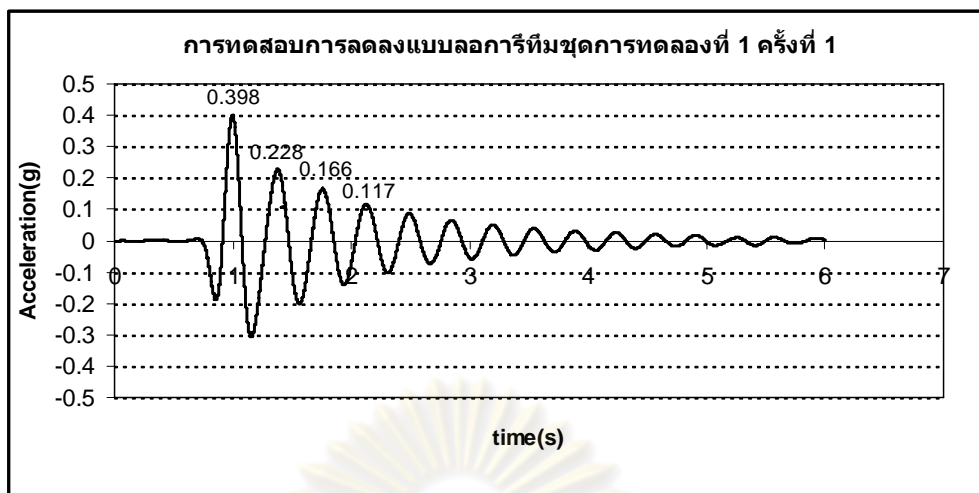


ชุดการทดลองที่ 3 ค่าความแข็งสปริงของระบบมีค่า 33000 N/m มวลของระบบ 165 kg มีการเคลื่อนที่ของระบบหลังจากถูกกระตุ้นให้เป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระดังรูปที่ จ-14

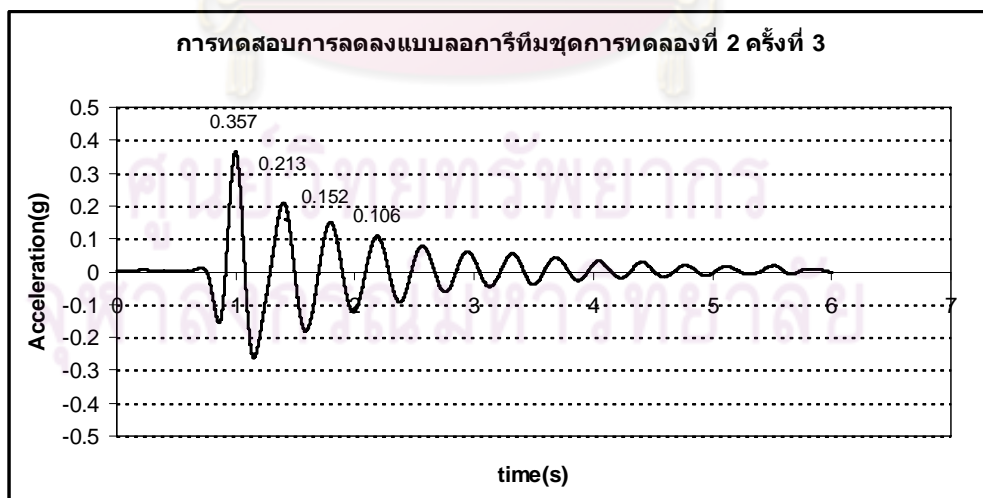
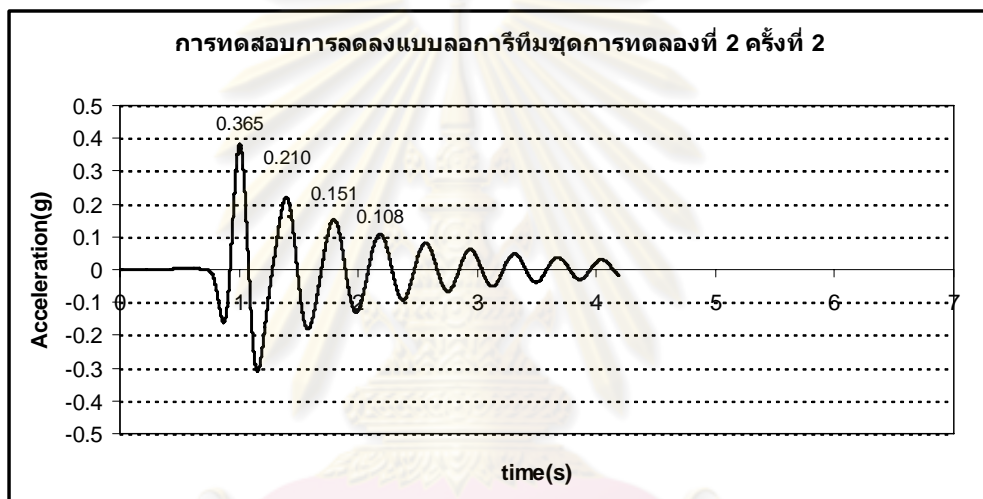
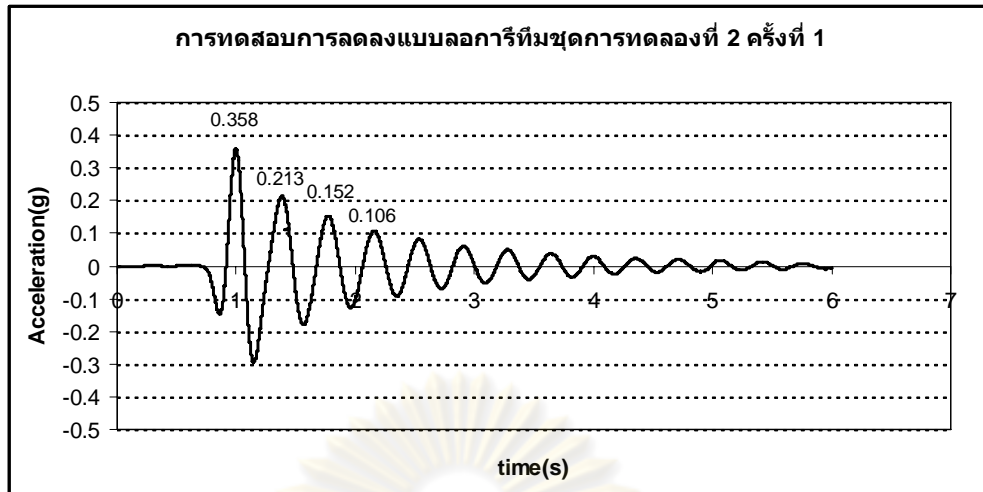
สรุปผล ชุดการทดลองทั้ง 3 ครั้งแสดงไว้ในรูปที่ จ-6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 273 -290 N-s/m และเมื่อเฉลี่ยทั้ง 9 ค่า จะสรุปค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงได้ คือ 285.16 N-s/m



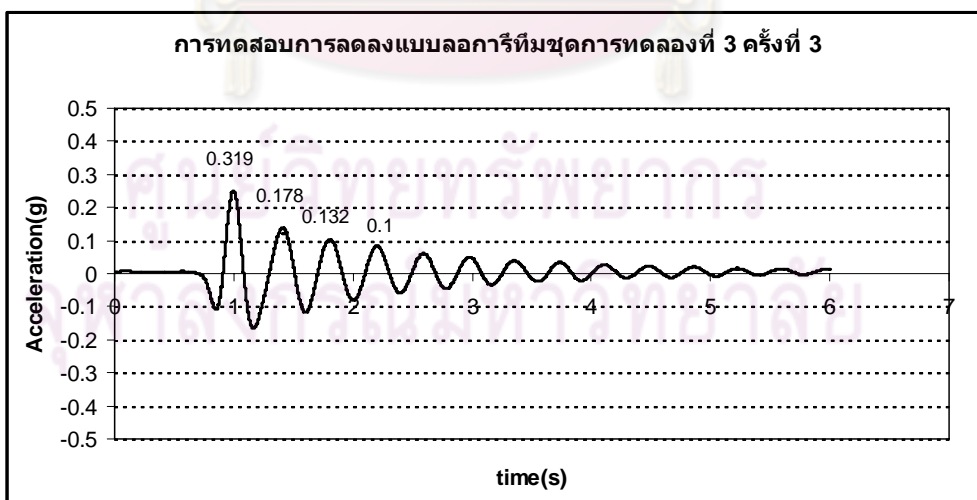
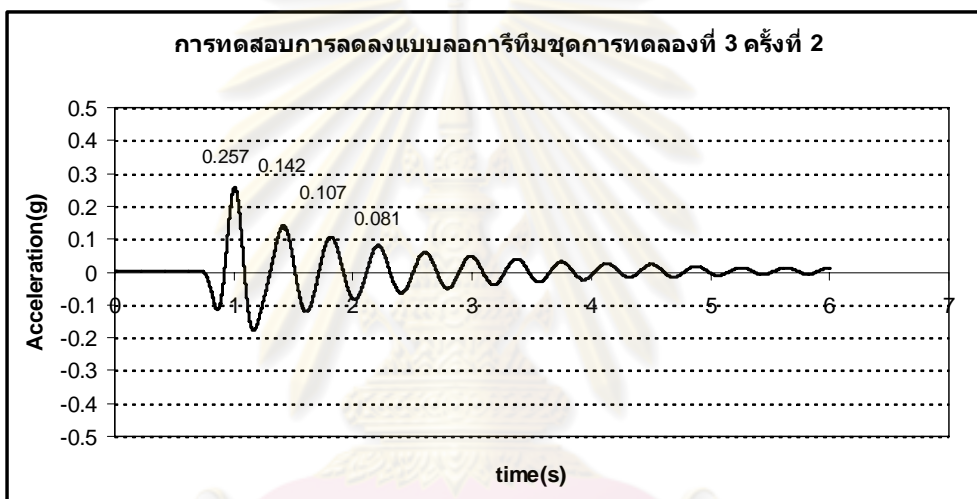
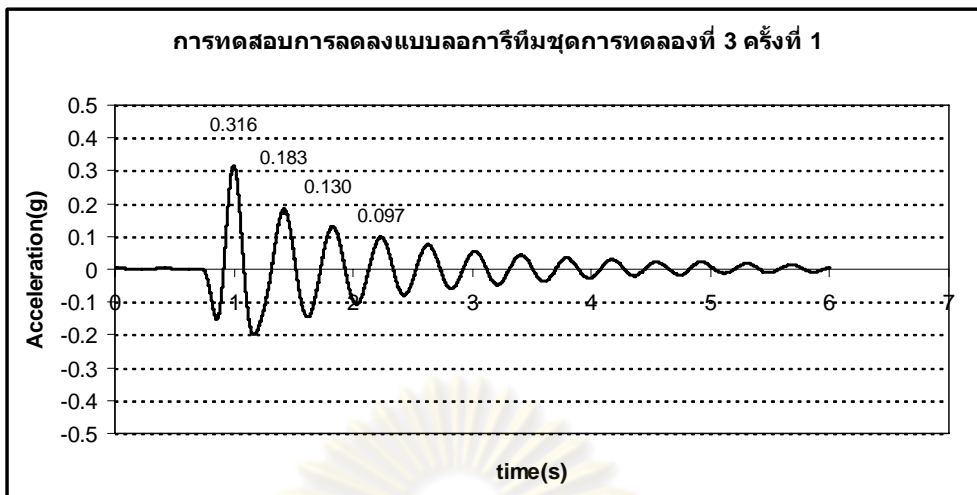
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑-12 การเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟหลังจากได้รับแรงกระตุ้นในกรณีที่มีมวลของระบบ 135 kg มีค่าความแข็งสปริง 33000 N/m ตัวเลขที่แสดงในกราฟขนาดของการสั่นสะท้อนของจุดสูงสุดสัมพัทธ์ 4 ค่าแรก



รูปที่ ๑-13 การเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟหลังจากได้รับแรงกระตุ้นในกรณีที่มีมวลของระบบ 150 kg มีค่าความแข็งสปริง 33000 N/m ตัวเลขที่แสดงในกราฟขนาดของการสั่นสะเทือนของจุดสูงสุดสัมพัทธ์ 4 ค่าแรก



รูปที่ ๑-14 การเคลื่อนที่ของมวลสปริงรองรับของรถกอล์ฟหลังจากได้รับแรงกระตุ้นในกรณีที่มีมวลของระบบ 165 kg มีค่าความแข็งสปริง 33000 N/m ตัวเลขที่แสดงในกราฟขนาดของการสั่นสะเทือนของจุดสูงสุดสัมพัทธ์ 4 ค่าแรก

ตารางที่ จ-6 ผลการทดสอบและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับด้านหลังขณะไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

	ชุดการทดสอบที่ 1			ชุดการทดสอบที่ 2			ชุดการทดสอบที่ 3		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
$\ln \left[ \frac{X_1}{X_2} \right]$	0.557	0.820	0.546	0.516	0.545	0.552	0.546	0.593	0.583
$\ln \left[ \frac{X_2}{X_3} \right]$	0.317	0.156	0.429	0.337	0.347	0.329	0.341	0.282	0.298
$\ln \left[ \frac{X_3}{X_4} \right]$	0.349	0.274	0.302	0.360	0.340	0.335	0.292	0.278	0.277
เฉลี่ยค่า $\delta$	0.408	0.417	0.425	0.404	0.4119	0.405	0.393	0.384	0.386
ค่า c	273.60	279.66	285.47	286.01	290.61	286.87	291.83	285.33	286.66

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

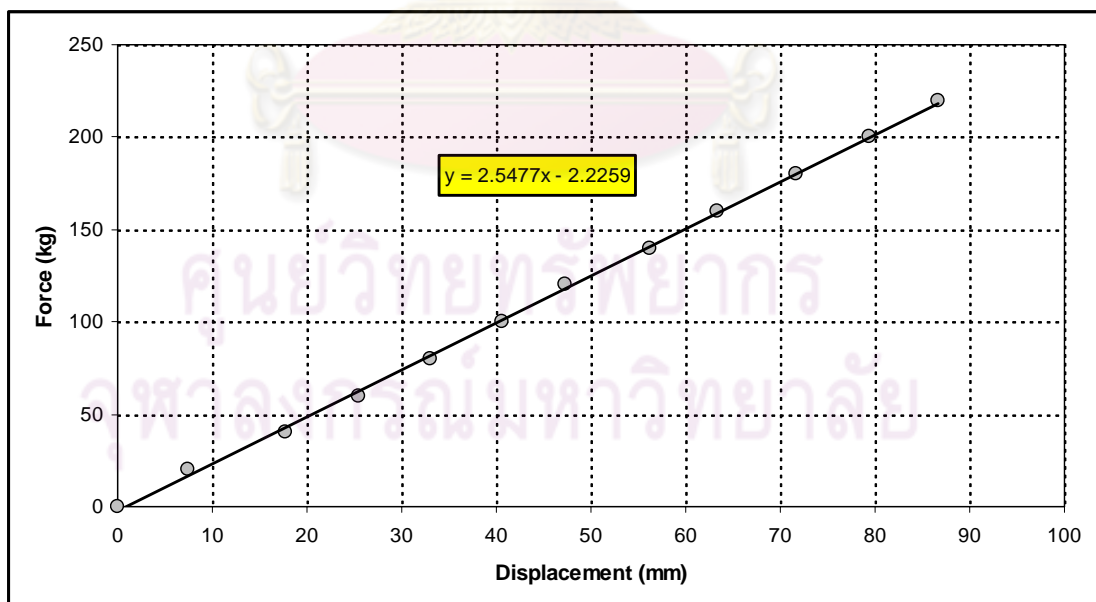


### จ.5 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับด้านหน้า

วัดค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับด้านหน้าโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวของแหนบดังตารางที่ จ-7 ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยางได้ดังรูปที่ จ-15 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งสปริงของล้อและยางอยู่ที่ 2.5477 kg-f/mm หรือ 24967.46 N/m

ตารางที่ จ-7 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งสปริงของแหนบด้านหน้า

Load (kg-f)	ระยะยุบตัวของแหนบ(mm)					
	SET#1	SET#2	SET#3	SET#4	SET#5	AVG
0	0	0	0	0	0	0
20	7	7	9	8	6	71
40	18	18	18	18	17	60.6
60	26	25	26	25	25	53
80	34	33	33	32	33	45.4
100	41	40	41	40	41	37.8
120	49	42	49	47	49	31.2
140	57	56	56	56	56	22.2
160	63	64	64	63	63	15
180	72	72	71	72	71	6.8
200	80	79	80	78	80	-1
220	87	86	87	86	87	-8.2



รูปที่ จ-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของยาง

#### จ.6 ข้อมูลการชั่งมวลสปริงไม้ได้รองรับด้านหน้า

เนื่องจากมวลด้านหน้ามีแค่ส่วนของล้อ ยางและมวลของดุมล้อซึ่งมีน้ำหนัก ดังนี้

- มวลของล้อและยางมีน้ำหนัก 6 kg ต่อล้อ จากการชั่งหามวลของล้อและยางในบทที่ 4
- มวลของดุมล้อ มีน้ำหนัก 4 kg ต่อล้อ

ดังนั้นมวลสปริงไม้ได้รองรับมีค่า 10 kg ต่อล้อ



รูปที่ จ-16 การชั่งหามวลส่วนที่เป็นดุมล้อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฉ

ผลการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับหน้าและหลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### ผลการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับหน้าและหลัง

#### จ.1 การคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับ

ในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

เมื่อ

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

$$c_c = 2\sqrt{k \cdot m}$$

$$\xi = c / c_c$$

#### คุณลักษณะของระบบรองรับด้านหลัง

ค่าความแข็งสปริงของແໜບ 33000 N/m

ค่าความแข็งสปริงของຍາງ 170000 N/m

มวลส่วนสปริงรองรับ 207 kg

มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ 30 kg

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของຍາງ ให้มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับมีค่าต่างๆ ดังนี้

285.16 Ns/m , 685.16 Ns/m 885.16 Ns/m 1185.16 Ns/m

ตารางที่ จ-1 ความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับด้านหลังที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่างๆ

	ความถี่ธรรมชาติของระบบ
มวลส่วนสปริงรองรับที่ค่าสัมประสิทธิ์ ความหน่วง 285.16 Ns/m	2.00 Hz
มวลส่วนสปริงรองรับที่ค่าสัมประสิทธิ์ ความหน่วง 685.16 Ns/m	1.99 Hz
มวลส่วนสปริงรองรับที่ค่าสัมประสิทธิ์ ความหน่วง 885.16 Ns/m	1.97 Hz
มวลส่วนสปริงรองรับที่ค่าสัมประสิทธิ์ ความหน่วง 1185.16 Ns/m	1.94 Hz
มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ	11.98 Hz

### คุณลักษณะของระบบรองรับด้านหน้า



รูปที่ ๑-1 ระบบรองรับด้านหน้าเป็นแขนบวางขวาง

ค่าความแข็งสปริงของแหนบ	24967 N/m
ค่าความแข็งสปริงของแหนบเมื่อคึดข้างเดียว	12483 N/m
ค่าความแข็งสปริงของยาง	170000 N/m
มวลส่วนสปริงรองรับ	78 kg
มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ	10 kg
ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของยาง	ให้มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้
ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของระบบรองรับหน้า	350 Ns/m

ตารางที่ ๑-2 ความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับด้านหน้า

	ความถี่ธรรมชาติของระบบ
มวลส่วนสปริงรองรับ	1.95 Hz
มวลส่วนสปริงไม่ได้รองรับ	20.75 Hz

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ซ

ข้อมูลรายละเอียดกล่องควบคุมความเร็วมอเตอร์และชุดควบคุมความเร็ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช

ข้อมูลรายละเอียดกล่องควบคุมความเร็วมอเตอร์และชุดควบคุมความเร็ว

ช.1 ข้อมูลรายละเอียดกล่องควบคุมความเร็วมอเตอร์[26]

## SEPARATELY EXCITED ELECTRONIC MOTOR SPEED CONTROLLER

MODEL 1266 SepEx®



CURTIS



### FEATURES

#### Smooth and Secure Control

- Power MOSFET technology provides smooth, silent, efficient, and cost-effective operation.
- Adjustable parameters enable custom optimization of speed, torque, and braking control.
- Half bridge armature and full bridge field provides regenerative braking down to near zero speed.
- Rugged package rated at IP5X.
- Overspeed braking (regenerative) limits speed while driving downhill.
- WalkAway™ braking feature limits any stopped or key-off rolling to very low speed. (Optional)
- System uses Hall effect speed sensor on motor or drive train to control vehicle speed.
- Tow switch enables free rolling for towing of vehicle.
- Anti-rollback function provides improved control when throttle is released on hills.
- Anti-stall function helps prevent motor commutator damage.
- Controller drives warning buzzer – steady in reverse; intermittent during WalkAway™ braking.
- MultiMode™ input provides for two speed and power modes of operation.
- Timed shutdown of main contactor after pedal is released and vehicle has stopped.
- LED status indicator.
- Fully compatible with 1311, 1314 and 1307 Programmers for parametric adjustment, tuning, test, and diagnostics.
- Extensive fault detection and diagnostic reporting using a Curtis Programmer including (partial list):
  - Main contactor weld check and driver check
  - Throttle and wiring faults
  - Open or shorted motor field winding
  - Open motor armature winding
  - Over-temperature
  - Missing or failed speed sensor
  - Armature drive failure.

### DESCRIPTION

Curtis PMC Model 1266 SepEx® controllers are programmable and microprocessor based, with an advanced MOSFET power section for smooth and seamless control of separately excited motors.

### APPLICATION

Curtis PMC 1266 SepEx® controllers are designed for use in two passenger golf/utility vehicles.

[www.curtisinstruments.com](http://www.curtisinstruments.com)

รูปที่ ช-1 ข้อมูลทั่วไปของกล่องควบคุมความเร็ว Curtis PMC Model 1266 SepEx®[26]

**MODEL 1266 SepEx®**

**FEATURES continued**

- Extensive system monitor capabilities using a Curtis Programmer, including (partial list):
  - Battery voltage
  - Throttle input
  - Direction and throttle switch operation
  - Motor field and armature currents
  - Controller heatsink temperature.

**OPTIONS**

- E/M brake.
- WalkAway™ braking feature to slow vehicle during key-off.
- 5K 3-wire, 0-5V, or ITS throttle.

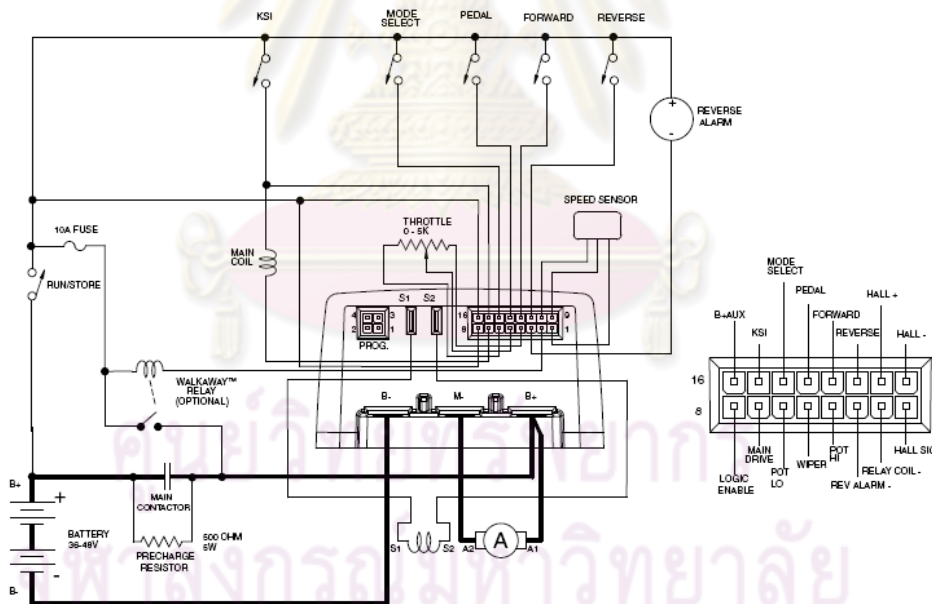
**Meets or complies with relevant US and International Regulations**

- Manufactured under ISO 9001 certified Quality Management System.
- UL Recognized Component Status.

**MODEL CHART**

Curtis PMC Model	Voltage (V)	Armature Rating (Amp) 2 Minute	Field Rating (Amp) 2 Minute
1266-52xx	36-48	275	20

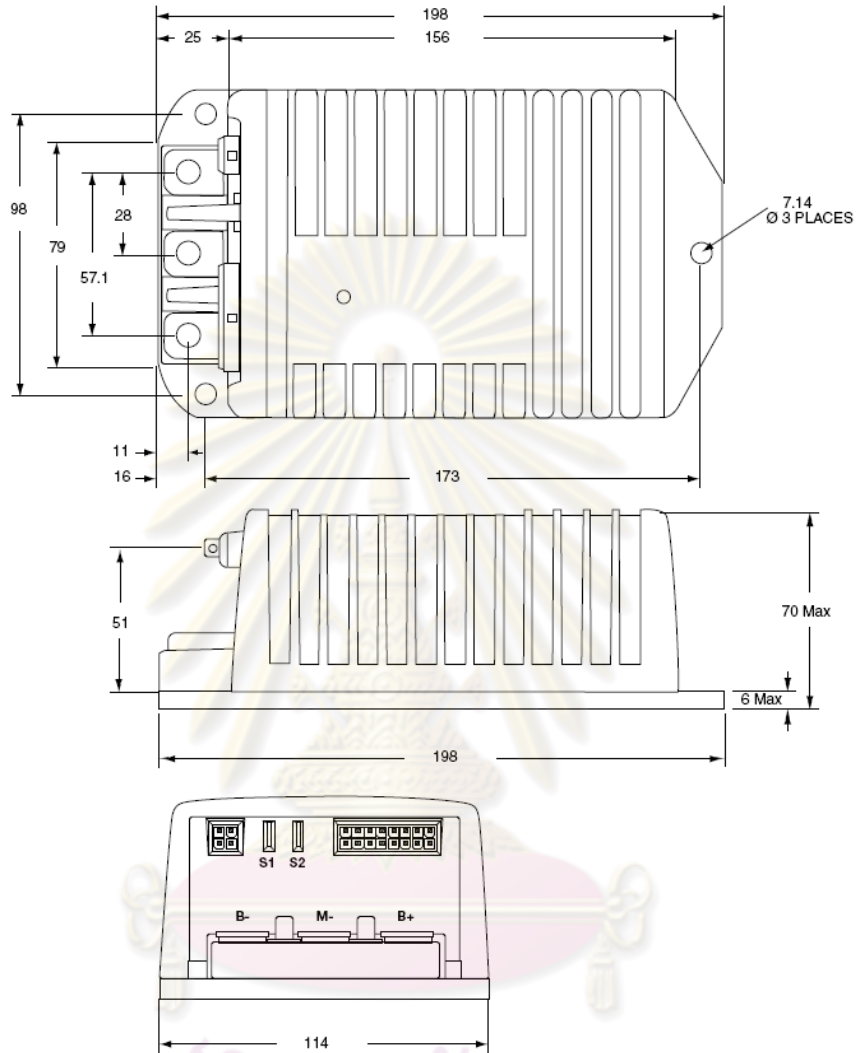
**TYPICAL WIRING DIAGRAM**



รูปที่ ๗-2 วงจรไฟฟ้าภายในกล่องควบคุมความเร็ว Curtis PMC Model 1266 SepEx® [26]

**MODEL 1266 SepEx®**

**DIMENSIONS mm**



**WARRANTY** Two year limited warranty from time of delivery.



is a trademark of Curtis Instruments, Inc.

Specifications subject to change without notice

©2008 Curtis Instruments, Inc.

50145 REV E 10/08

รูปที่ ๗-3 ขนาดของกล่องควบคุมความเร็ว Curtis PMC Model 1266 SepEx® [26]

## ซ.2 รายละเอียดชุดควบคุมความเร็ว[27]

**HANDHELD  
PROGRAMMER**

**MODEL 1311 LP**



**CURTIS**



**DESCRIPTION**

The Curtis Model 1311 LP Handheld Programmer simplifies the programming, testing and diagnosing of Curtis Speed Controllers and Auxiliary Devices.

**APPLICATION**

The Curtis Model 1311 LP Handheld Programmer provides a simple and intuitive interface to Curtis products for testing, diagnostics and parameter adjustments.

**FEATURES**

- Compatible with all Curtis speed controllers and auxiliary devices.
- Backward compatible to the Curtis Model 1307 Programmer.
- Easy menu navigation with clear and intuitive parameter organization.
- Inc/dec key for real-time adjustment of parameters.
- Read and clear fault history, monitor real-time data and perform tests.
- Bookmark keys facilitate fast swapping between three user selected menus.
- Detail Screen shows units, min/max ranges and bargraph.
- Allows cloning of parameter settings between controllers.
- Graphic LCD can display up to seven lines of information.
- Restricted data is controlled by four access levels: OEM, Dealer, Service and User.
- Cable options to interface with all Curtis controllers: Molex, Conxall and RJ11.

**NOTE:** The low power enhancements to the Curtis model 1311 LP reduces its power consumption and improves connection to Curtis 1214/15/19 and 1207 controllers.

ศูนย์วิทยุสื่อสาร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[www.curtisinstruments.com](http://www.curtisinstruments.com)

รูปที่ ซ-4 ข้อมูลทั่วไปของชุดควบคุมความเร็ว Model 113 LP [27]



## MODEL 1311 LP

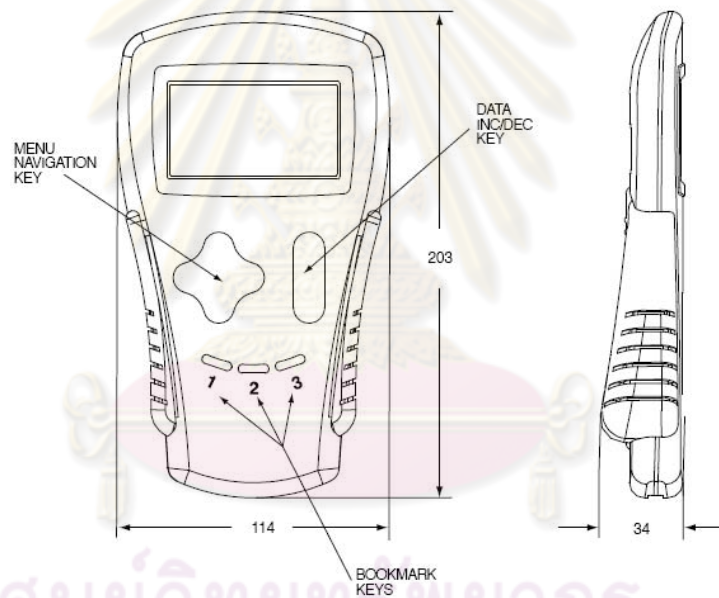
### ORDER CODES

Model No.	Access rights
1311-4401	OEM
1311-3301	Dealer
1311-2201	Service
1311-1101	User

Cable	Part No.
Conxall (MC-2 and 1288)	36378001
RJ11 (for the 1207 only)	36378002
Molex	36378003

(all other controllers and battery chargers)

### DIMENSIONS mm



**WARRANTY** Two year limited warranty from time of delivery.



is a trademark of Curtis Instruments, Inc.

Specifications subject to change without notice

©2008 Curtis Instruments, Inc.

50048 REV C 10/08

รูปที่ ซ-5 รายละเอียดของชุดควบคุมความเร็วและขนาด ของ Model 113 LP [27]



ภาคผนวก ซ

ผลการทดสอบอุปกรณ์การวัด Rolling Straightedge บนทางเรียบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

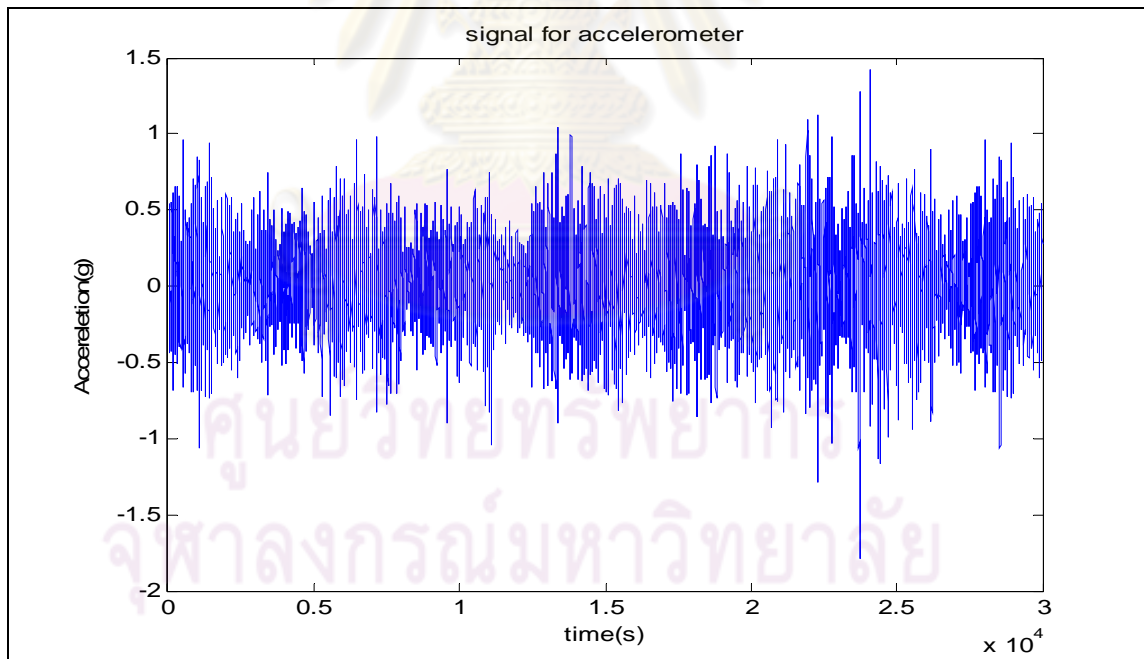
## ภาคผนวก ซ

### ผลการทดสอบอุปกรณ์การวัด Rolling straightedge บนทางเรียบ

เพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนของการสอบเทียบอุปกรณ์ Rolling Straightedge ดังนั้นจึงทำการทดสอบเส้นทางอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อดูผลที่ได้จากการวัดว่ามีความสมเหตุสมผลหรือไม่ เส้นทางที่ได้ทำการทดสอบในครั้งนี้ได้เลือกเส้นทางการเดินทางของในโรงงานซึ่งมีความเรียบค่อนข้างมากดังรูปที่ ซ-1 ได้ทำการทดสอบเป็นระยะทาง 100 เมตร ด้วยความเร็ว 12 km/h เป็นเวลา 30 วินาทีซึ่งได้สัญญาณของความเร่งของล้อตรงกลางของ Rolling Straightedge บนโดเมนเวลา ดังรูปที่ ซ-2

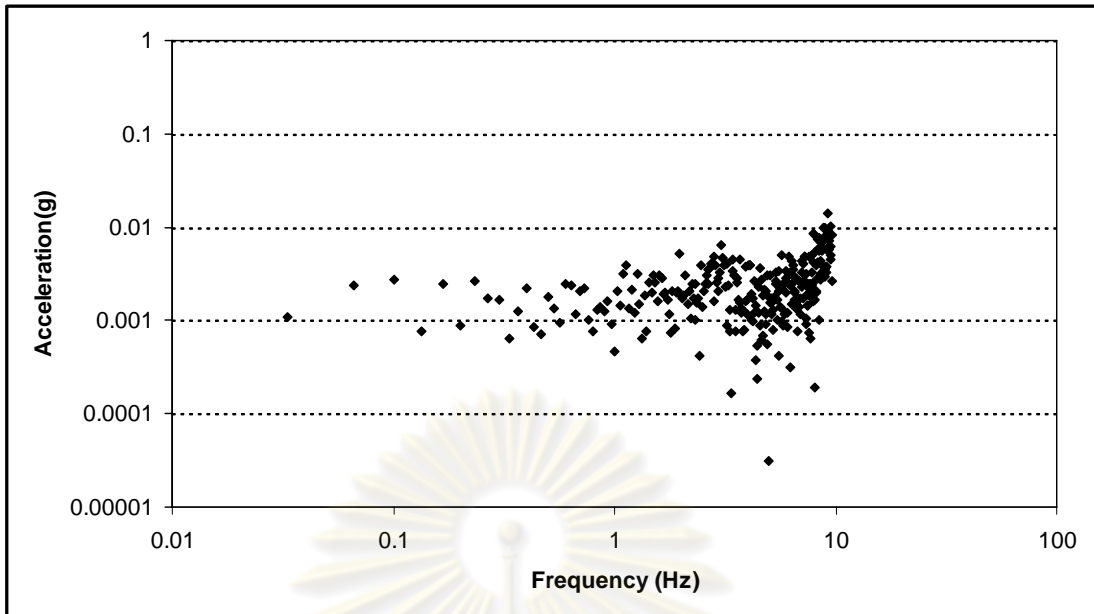


รูปที่ ซ-1 เส้นทางถนนที่ใช้ในการทดสอบ



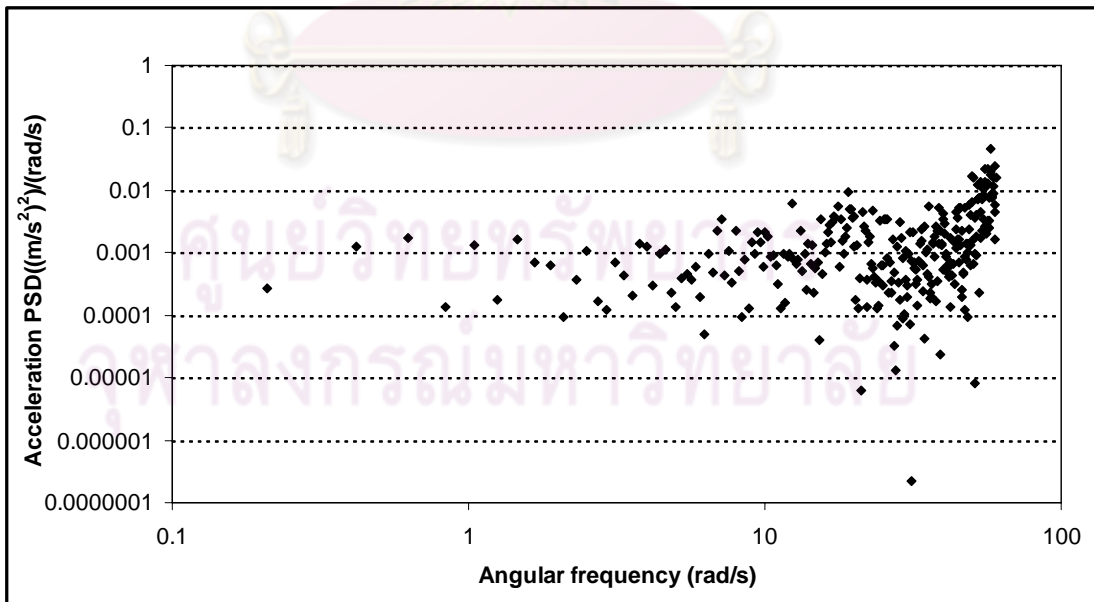
รูปที่ ซ-2 สัญญาณความเร่งบนโดเมนเวลาที่ได้จาก Accelerometer

แปลงสัญญาณความเร่งบนโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ โดยกระบวนการ FFT  
สัญญาณบนโดเมนความถี่ที่ได้ดังรูปที่ ซ-3



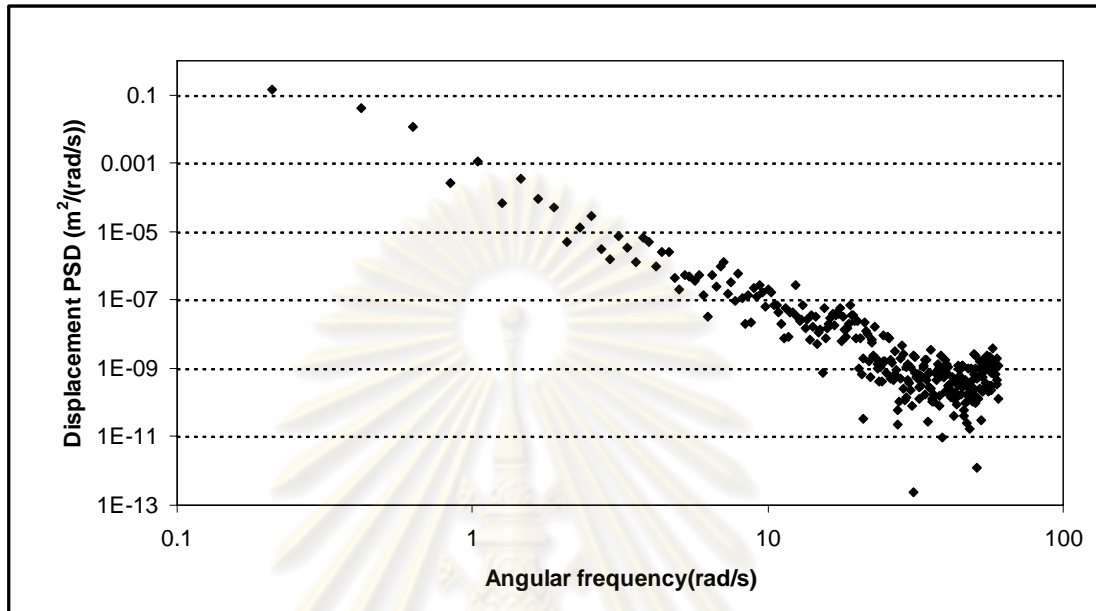
รูปที่ ๓-3 สัญญาณความเร่งบนโดเมนความถี่

แปลงสัญญาณความเร่งในรูปที่ ๓-3 ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง  $G_d(\omega)$  โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-2 และแปลงโดเมนความถี่ (f) ให้อยู่ในรูปความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $\omega$ ) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-5



รูปที่ ๓-4 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร่งบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา

จากนั้นเปลี่ยนความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความเร็วบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลาเป็นความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลาได้ดังสมการที่ 6-4 ดังแสดงในรูปที่ ๕-5

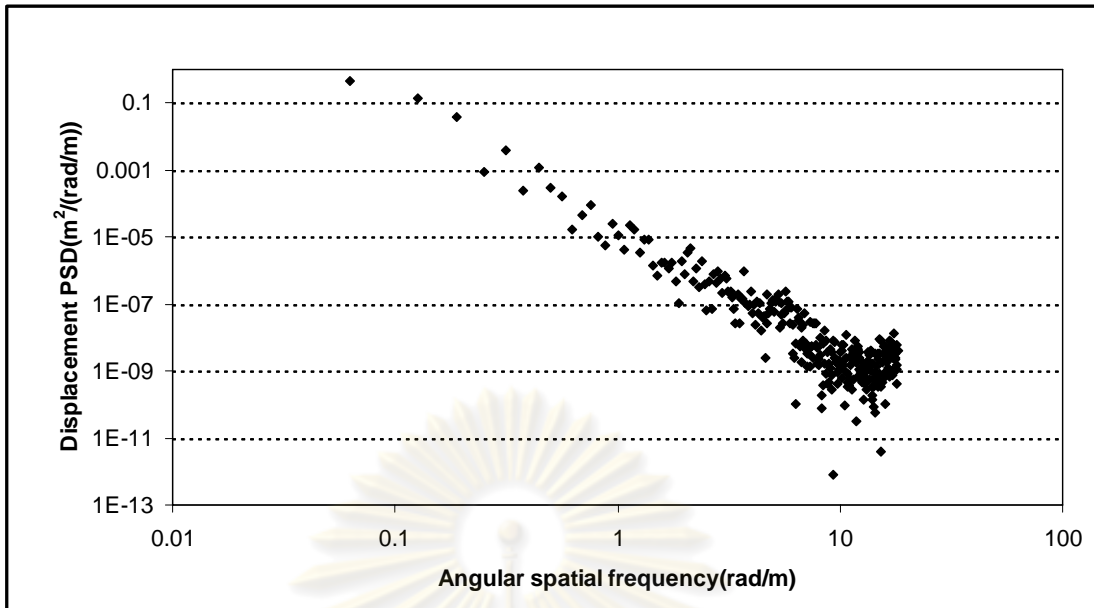


รูปที่ ๕-5 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา

จากนั้นแปลงค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $G_d(\omega)$ ) เป็นความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทางถนน ( $G_d(\Omega)$ ) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-6 และแปลงค่าความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับเวลา ( $\omega$ ) เป็นความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง ( $\Omega$ ) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-7 ดังรูปที่ ๕-6

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

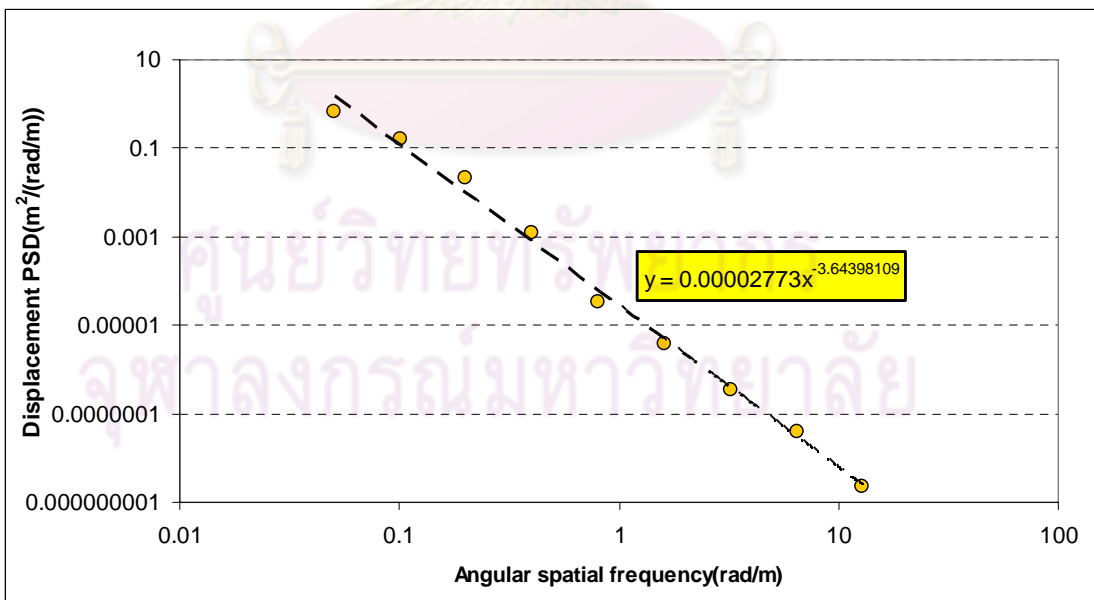




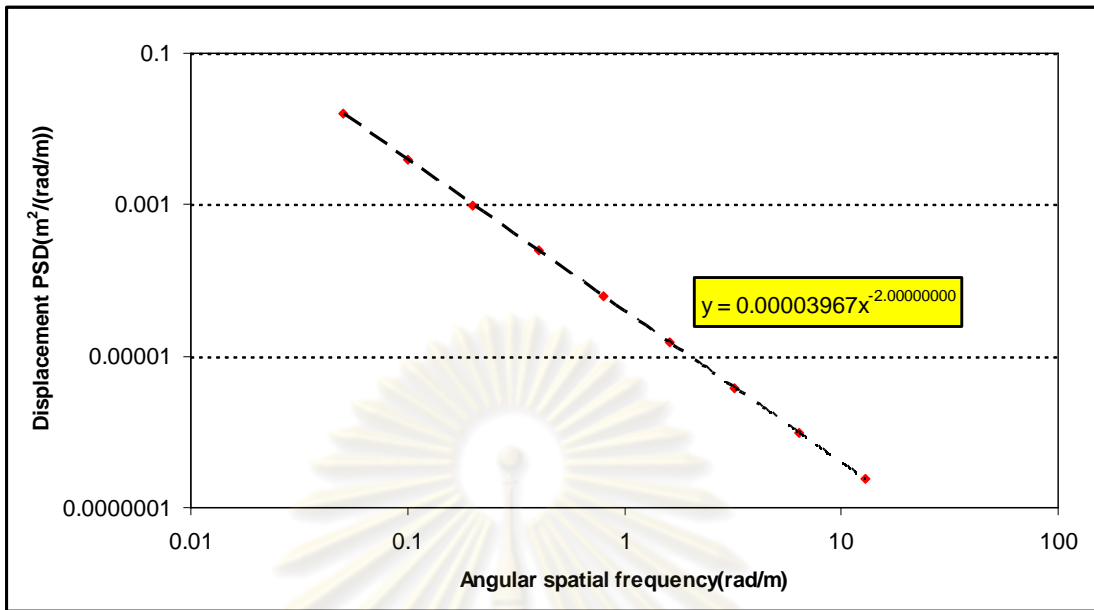
รูปที่ ๕-6 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนโดเมนความถี่เชิงมุมที่ขึ้นกับระยะทาง

เข้าสู่กระบวนการแปลงผล ISO 8608 คือ แปลงให้อยู่ในรูป Octave bandwidth ดังรูปที่ ๕-7 ปรับสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังให้มีค่า  $w$  เท่ากับ 2 ด้วยวิธีการระเบียบวิธีกำลัง 2 น้อยสุด จะได้สมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของถนน

$$G_d(\Omega) = 0.00003967 \cdot (\Omega)^{-2} \text{ ดังแสดงในรูปที่ ๕-8}$$



รูปที่ ๕-7 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมในรูป Octave bandwidth



รูปที่ ๗-8 ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดบนแกนความถี่เชิงมุมที่จัดอยู่ในรูปสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่มีค่า  $w = 2$  ตาม ISO 8608 แล้ว

จากนั้นคูณด้วยค่าสอบเทียบกับวิธีวัดระดับน้ำที่กล่าวไปในบทที่ 4 โดยการคูณค่า 0.14 จะได้สมการความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของการกระจัดลักษณะถนน ดังต่อไปนี้

$$G_d(\Omega) = 0.000005538.(\Omega)^{-2}$$

สรุปการทดลองได้ว่าสมการความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดของถนนที่ผ่านการสอบเทียบจากระดับน้ำแล้วมีค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของการกระจัดที่จุดอ้างอิง(1 rad/m) เท่ากับ 0.000005538  $m^3$  หรือ 5.538  $cm^3$  จัดว่าเป็นถนนเกรด B ตามมาตรฐาน ISO 8608 ซึ่งค่อนข้างสมเหตุสมผลเพราะว่าพื้นถนนค่อนข้างเรียบมากเพราะเป็นเส้นทางในการขนส่งของในโรงงาน จึงเป็นข้อมูลในการยืนยันว่าอุปกรณ์การวัด Rolling Straightedge สามารถใช้งานได้และผลที่ได้หลังจากคูณสอบเทียบแล้วมีค่าใกล้เคียงความจริง

ข้อเสนอนี้

จะเห็นได้ว่าสภาพถนนบนทางเรียบที่วัดได้เป็นถนนเกรด B ซึ่งน่าจะเป็นถนนเกรด A คาดว่ามาจากล้อที่วัดลักษณะนั้นมีสภาพที่ไม่ได้กลมทุกจุดอีกทั้งการทำงานของลูกปืนล้อเมื่อมีการหมุนเกิดขึ้นย่อมทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอยู่แล้วการสั่นสะเทือนนี้จึงทำให้เกิดการกระจัดที่ล้อสำหรับวัดลักษณะถนนมากกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย



ภาคผนวก ฅ

ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ฅ

### ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง

ในหัวข้อ 2.3 ได้กล่าวถึงค่าทางสถิติที่สำคัญและค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของปริมาณ  $q(t)$  ใดๆ ที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม สำหรับขนาดของปริมาณดังกล่าว ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะไม่มีน้ำหนักเพียงพอที่จะใช้อธิบายถึงผลที่เกิดขึ้น ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลโดยรวมจึงต้องอาศัยค่าทางสถิติมาช่วย และค่าสถิติที่ใช้ในที่นี้ก็คือ ค่าประสิทธิผล (Effective value)  $\tilde{q}$

$$\tilde{q} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt} \quad (\text{ฅ-1})$$

สำหรับฟังก์ชัน  $q(t)$  อาศัยฟูเรียร์ทรานฟอร์มเมชัน (Fourier-transformation) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้:

$$q(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{q}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{ฅ-2})$$

เมื่อแทนสมการ 2-24 ลงในสมการ 2-26 และจะได้ค่าประสิทธิผลกำลังสอง

$$\tilde{q}^2 = \int_0^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{q}_T(\omega))^2 d\omega = \int_0^{\infty} G_q(\omega) d\omega \quad (\text{ฅ-3})$$

โดย  $G_q(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{q}_T(\omega))^2$  และเรียกค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของฟังก์ชัน  $q(t)$  ซึ่งการพิสูจน์สมการ ฅ-3 ได้ดังนี้

สมมติให้  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม เมื่อใช้ฟูเรียร์ทรานฟอร์มเมชันจะได้สเปกตรัมต่อเนื่องดังนี้

$$F\{x(t)\} = \hat{a}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$F\{y(t)\} = \hat{b}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt$$

เมื่อนำกระแสทั้งสองมาคำนวณ เช่นเดียวกับการคำนวณพลังงานที่ได้จากกระแสไหลผ่านความต้านทาน  $R$  จะได้

$$J = R \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) y(t) dt$$

เมื่อแทนฟังก์ชัน  $y(t)$  ด้วยตัวผกผันของฟูเรียร์ทรานฟอร์มเมชัน (Inverse Fourier-transformation) จะได้

$$J = \frac{R}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{b}(\omega) e^{j\omega t} d\omega dt$$

จากการสลับลำดับของการอินทิเกรตจะได้

$$J = \frac{R}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{b}(\omega) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{j\omega t} dt d\omega$$

ผลของการอินทิเกรตจะมีหน่วยเป็นหน่วยพลังงาน และสำหรับเทอมของอินทิเกรตเทอมท้ายจะได้

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{j\omega t} dt = \sqrt{2\pi} \cdot \hat{a}(-\omega)$$

เมื่อให้  $x(t)$  เป็นฟังก์ชันค่าจริง ผลของการอินทิเกรตจะได้  $\hat{a}(-\omega)$  และเขียนแทนด้วย  $\hat{a}^*(\omega)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันเลขเชิงซ้อนที่เป็นคู่สังยุคของ  $\hat{a}(\omega)$  หรือสังยุค (conjugate) กับ  $\hat{a}(\omega)$  ดังนั้นจะได้

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot y(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{a}^*(\omega) \cdot \hat{b}(\omega) d\omega \quad \text{หรือ} \quad = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{b}^*(\omega) \cdot \hat{a}(\omega) d\omega$$

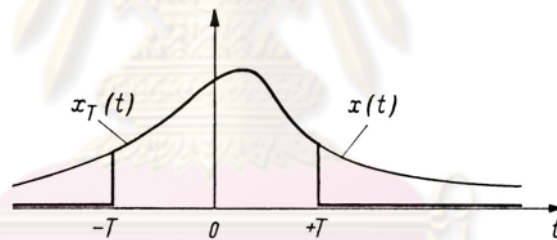
เมื่อให้กระแสไฟฟ้า  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน  $x(t) = y(t)$  จะได้

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{a}(\omega)|^2 d\omega$$

และเป็นพลังงานจากกระแสไฟฟ้า  $x(t)$  ไหลผ่านความต้านทาน  $R = I \Omega$  เนื่องจากค่าสัมบูรณ์ของ  $\hat{a}(\omega)^2$  คือ  $|\hat{a}(\omega)|^2 = \hat{a}(\omega) \cdot \hat{a}^*(\omega)$  เป็นฟังก์ชันคู่ (Even function) จะได้

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt = 2 \cdot \int_0^{+\infty} |\hat{a}(\omega)|^2 d\omega \quad \text{โดยเรียกเทอม } 2 \cdot \int_0^{+\infty} |\hat{a}(\omega)|^2 d\omega \text{ ว่า ความหนาแน่นสเปกตรัมพลังงาน}$$

ในทางปฏิบัติเราจะสนใจผลจากปรากฏการณ์ในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น และนอกเหนือจากช่วงเวลาดังกล่าวจะสมมติให้มีค่าเป็นศูนย์ เช่น กระแสไฟฟ้า  $x(t)$  ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงเวลา  $-\infty < t < +\infty$  เมื่อสนใจผลของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา  $-T < t < +T$  เราจะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่พิจารณาเป็น  $x_T(t)$  และมีความสัมพันธ์ดังนี้ สำหรับ  $-T < t < +T$  จะได้  $x_T(t) = x(t)$  และสำหรับเวลา  $t > T$  และ  $t < -T$  จะได้  $x_T(t) = 0$  ดังแสดงในรูป ฟังก์ชัน  $x(t)$  นี้เมื่อขยายช่วงเวลาที่พิจารณาออกไปไม่มีขีดจำกัด  $T \rightarrow \infty$  ก็จะได้  $\lim_{T \rightarrow \infty} x_T(t) = x(t)$



รูปที่ ๑-1 กระแสไฟฟ้า  $x(t)$  และ  $x_T(t)$

เมื่อใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มเมชันกับกระแส  $x_T(t)$  จะได้

$$F\{x_T(t)\} = \hat{a}_T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-T}^{+T} x_T(t) e^{-j\omega t} dt$$

และจากสมการก่อนหน้านี้จะได้งานจากกระแสไฟฟ้า  $x_T(t)$  ที่ไหลผ่านตัวนำที่มีความต้านทาน  $R = I \Omega$  ดังนี้

$$\int_{-T}^{+T} x_T^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{a}_T(\omega)|^2 d\omega$$

เมื่อคูณสมการบนตลอดด้วย  $1/2T$  และให้  $T \rightarrow \infty$  จะได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของกระแสที่ผ่านความต้านทาน

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_T^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} \frac{|\hat{a}_T(\omega)|^2}{T} d\omega$$

เมื่อ  $|\hat{a}(\omega)|^2$  เป็นฟังก์ชันคู่ (Even function) และจะได้ค่ากำลังสองเฉลี่ย (mean square)



$$\overline{x^2(t)} = \int_0^\infty \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|\hat{a}_T(\omega)|^2}{T} d\omega$$

หรือค่าประสิทธิผลยกกำลังสองคือ

$$\tilde{x}^2 = \int_0^\infty \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |\hat{a}_T(\omega)|^2 d\omega$$

และเรียกเทอมที่อยู่ในเครื่องหมายอินทิเกรตว่าค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของกระแสไฟฟ้า  $x(t)$

เขียนแทนด้วย  $G_x(\omega)$

$$G_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |\hat{a}_T(\omega)|^2 \quad \text{หรือ} \quad = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (\hat{a}_T(\omega))^2$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนวัช คงสุริยะภิญโญ เกิดเมื่อวันที่ 15 เดือน ตุลาคม พุทธศักราช 2527 ที่โรงพยาบาลหัวเฉียว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย