

การหาแรงพลศาสตร์ของเพลลาของรถขณะเคลื่อนที่ด้วยแทนซึ่งนำหนักชนิดคานต่อเนื่อง



นายวิษณุตร์ อารยโกศล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

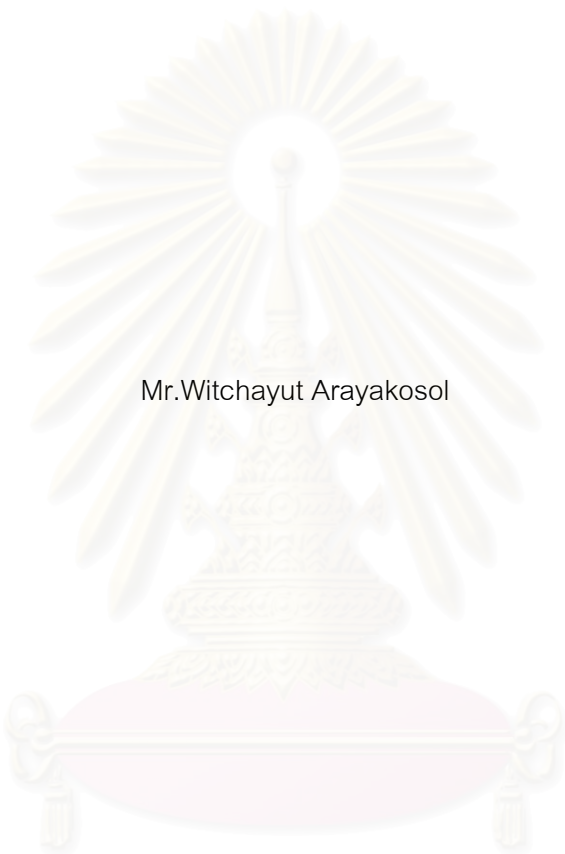
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IDENTIFICATION OF DYNAMIC AXLE LOADS OF MOVING VEHICLES USING  
A CONTINUOUS BEAM TYPE WEIGHT SCALE



Mr.Witchayut Arayakosol

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University



ง

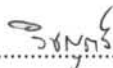

วิทยุตร์ อารยโกศล : การหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถขณะเคลื่อนที่ด้วยแท่นชั่งน้ำหนักชนิดคาน  
ต่อเนื่อง (IDENTIFICATION OF DYNAMIC AXLE LOADS OF MOVING VEHICLES USING A  
CONTINUOUS BEAM TYPE WEIGHT SCALE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 101 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้ เป็นการคำนวณหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถขณะเคลื่อนที่บนแท่นชั่งน้ำหนักชนิดคาน  
ต่อเนื่อง โดยใช้ค่าแรงที่ฐานรองรับและความเร่งที่กึ่งกลางช่วงเป็นข้อมูลในการคำนวณน้ำหนักบรรทุก ใน  
การศึกษาได้ทำการออกแบบแท่นชั่งน้ำหนักชนิดคานต่อเนื่องมีความยาวทั้งหมด 10.00 เมตรแบ่งเป็น 20 ช่วงๆ  
ละ 0.50 เมตร และค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 3,000 เมตร<sup>4</sup> ข้อมูลสำหรับการคำนวณหาแรงในเพลารถ  
จะถูกส่งวิเคราะห์ขึ้นจากแบบจำลองปฏิกิริยาตอบสนองของระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักกับรถภายใต้การเคลื่อนที่ผ่าน  
ของรถในคอมพิวเตอร์ โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุก  
เช่น แรงที่ฐานรองรับ การแอ่นตัว ความเร็วและความเร่ง ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน จากนั้นจึงนำข้อมูล ณ  
ตำแหน่งที่กำหนดมาใช้คำนวณหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถและน้ำหนักบรรทุก โดยอาศัยหลักการยกกำลังสองน้อย  
ที่สุด (Least square) และวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular value decomposition) โดยศึกษาว่า  
ความเร็วรถ น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก และความคลาดเคลื่อนในการวัดสัญญาณว่ามีผลต่อการหาแรงในเพลารถ  
และน้ำหนักบรรทุกมากน้อยเพียงใด

จากผลการศึกษาพบว่าสัญญาณแรงที่ฐานรองรับมีผลในการคำนวณหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถเป็นสัดส่วน  
กว่าร้อยละ 99 ส่วนสัญญาณความเร่งและความเร็วนั้นมีผลในการคำนวณหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุกเป็น  
สัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 1

จากการทดสอบโดยสุ่มแบบจำลองรถบรรทุก 1,000 คันวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก พบว่า การคำนวณน้ำหนัก  
เชิงสถิตรถบรรทุกจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลารถโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินร้อยละ 19 ซึ่ง  
ค่อนข้างสูง แต่ผลการทายนน้ำหนักสถิตในเพลากลางมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 ค่าความคลาด  
เคลื่อนในการทายนน้ำหนักสถิตในเพลาลงมีค่าไม่เกินร้อยละ 8 และไม่เกินร้อยละ 10 สำหรับการทายนน้ำหนัก  
สถิตรวมของรถบรรทุก ส่วนความคลาดเคลื่อนในการทายนน้ำหนักพลศาสตร์ในเพลาทันหมดของรถบรรทุกมีค่า  
ไม่เกินร้อยละ 6.5 ซึ่งการคำนวณน้ำหนักบรรทุกพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการหาแรงและ  
น้ำหนักบรรทุกมากที่สุดคือ ความเร็วรถและการสั่นตัวในสภาวะเริ่มต้นของรถบรรทุก

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....  
ปีการศึกษา..... 2550.....

ลายมือชื่อนิสิต..... .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... .....

## 4870465521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : WEIGH IN MOTION / DYNAMIC LOAD IDENTIFICATION / WEIGHT SCALE

WITCHAYUT ARAYAKOSOL : IDENTIFICATION OF DYNAMIC AXLE LOADS OF MOVING VEHICLES USING A CONTINUOUS BEAM TYPE WEIGHT SCALE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, Ph.D., 101 pp.

This research studies the dynamic axle loads identification of moving vehicles on a continuous beam type weight scale from reactions and accelerations at mid-span of the weight scale. The weight scale is designed to be a continuous beam having 10 m long with 20 spans of 0.50 m span length and moment of inertia of  $3,000 \text{ m}^4$ . To identify the axle loads of a vehicle, the reactions and acceleration signals of the weight scale under a passage of the vehicle are both simulated from the vehicle and weight scale interaction model in computer. Employing the finite element analysis, the weight scale's reaction, deflection, velocity and acceleration are numerically simulated and are input for the axle loads identification. Using the least square method with algorithm of singular value decomposition, the dynamic axle loads and the weight of the vehicle are obtained. The effects of identification method, truck speed, truck weight, and error in the measured signals on the accuracy of axle loads and weight identifications are investigated.

The results obtained from computer simulation reveal that the dynamic axle loads identification is almost by reactions of the weight scale. A portion of more than 99% is observed from the reactions, while a portion of less than 1% is observed from both accelerations and velocity of the weight scale.

Based on the 1,000 random cases of different truck models moving on the weight scale, it is founded that the identification errors of the static axle weight of the front axle are within the range of  $\pm 19\%$  which is relatively high. However, the errors of the middle axle, rear axle and the total weight are found to be only  $\pm 10\%$ ,  $\pm 8\%$  and  $\pm 10\%$ , respectively. For the dynamic axle loads identification, the obtained results indicate that the identification errors within  $\pm 6.5\%$  can be achieved for each axle and the total load. It is also found that the accuracy of load and weight identifications greatly depend on speed and initial vibration of the moving truck.

Department .....	Civil Engineering .....	Student's Signature .....	<i>Witchayut</i>
Field of study .....	Civil Engineering .....	Advisor's Signature .....	<i>Tospol Pinkaew</i>
Academic year .....	2007 .....		

## กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ๆ และครูบาอาจารย์กระผมที่อบรม สั่งสอน ให้การอุปถัมภ์จนกระผมมีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงาน โอกาสทางสังคมตลอดจนอบรมด้านคุณธรรมจริยธรรม

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้วิชาพื้นฐานภาคทฤษฎีก่อนทำงานวิจัย หากปราศจากความกรุณาต้อนรับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนอจันทร์ฉวีไชย และปราศจากการให้คำปรึกษา แนะนำการแก้ปัญหาและจุดประกายความคิดโดยอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว และความกรุณาต้อนรับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติมา จินตนาวัน

หน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและหน่วยงานบัณฑิตภาควิศวกรรมโยธาตลอดจน อธิการภาคและบุคลากรประจำห้องปฏิบัติการที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ตลอดจนระเบียบดำเนินงานวิจัย

กระผมซาบซึ้งและขอเป็นอย่างยี่งสำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือ จากรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนร่วมรุ่นตลอดจนเพื่อนนักเรียนต่างประเทศที่ร่วมหัวจมท้ายเรียนด้วยกันมาจนสำเร็จการศึกษา ทั้งที่กำลังศึกษาและยังไม่สำเร็จการศึกษาก็ตาม

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้สนใจศึกษาและเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป กระผมขอขอบพระคุณและยินดีกับทุกท่านที่ตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจสร้างกุศลนี้โดยที่มีส่วนสร้างการศึกษาทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ขออัญเชิญอนุภาควคุณพระศรีรัตนตรัย โปรดอภิบาล ดลบันดาลให้ท่านและครอบครัวผู้สร้างกุศลนี้เจริญด้วยจตุรพิธพรชัย ปฏิภาณบพิวาร ธนสาร สมบัติ สุขภาพแข็งแรงและประสบแต่สิ่งที่เป็นมงคลเทอญ...

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	9
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	10
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	10
1.6 การดำเนินงานวิจัย.....	10
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 การหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถจากการวัดผลตอบสนองของแท่นชั่งน้ำหนัก.....	11
2.2 การจำลองพฤติกรรมของแท่นชั่งน้ำหนักภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถ.....	13
2.2.1 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของแท่นชั่งน้ำหนัก.....	13
2.2.2 การหาเมตริกซ์ความหน่วง (damping matrix) ของระบบแท่นชั่งน้ำหนัก.....	16
2.2.3 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของรถ.....	18
2.2.4 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของปฏิกริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักกับรถ.....	22
2.2.5 การหาคำตอบด้วยวิธีนิวมาร์คเบต้า (Newmark's method).....	24
2.2.6 การหาแรงที่ฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนัก.....	26
2.3 การหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก.....	26
2.3.1 การแก้สมการด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD).....	28
2.3.2 การหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถโดยทราบสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ.....	29
2.3.3 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ของเพลารถ.....	31
3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและพฤติกรรมแท่นชั่งน้ำหนัก.....	32
3.1 การตรวจสอบการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนัก.....	33
3.1.1 การตรวจสอบการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนักเชิงสถิต.....	33
3.1.2 การตรวจสอบการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนักเชิงพลศาสตร์.....	35

บทที่		
3.1.2.1	พิจารณาผลการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับเนื่องมาจากความขรุขระของผิวแทนซึ่งน้ำหนัก .....	35
3.1.2.2	พิจารณาผลการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับเนื่องมาจากความเร็วของรถ .....	38
3.2	การตรวจสอบการสั่นไหวของรถ .....	43
4	การหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านแทนซึ่งน้ำหนัก .....	44
4.1	การออกแบบแทนซึ่งน้ำหนัก .....	44
4.1.1	ออกแบบค่าความยาวระหว่างฐานรองรับและความยาวทั้งหมดที่เหมาะสมสำหรับแทนซึ่งน้ำหนัก .....	44
4.1.2	ออกแบบค่าคุณสมบัติหน้าตัดที่เหมาะสมสำหรับแทนซึ่งน้ำหนัก .....	49
4.2	พิจารณาขนาดความขรุขระ .....	51
4.3	การหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านบนแทนซึ่งน้ำหนัก .....	53
4.3.1	การหาน้ำหนักรถแบบทราบข้อมูลทั้งหมด .....	53
4.3.2	อิทธิพลเนื่องจากสัญญาณต่างๆที่มีผลต่อการหาแรงพลศาสตร์ของเพลาน้ำหนักรถ .....	59
4.3.3	หาน้ำหนักรถแบบทราบข้อมูลความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ .....	68
5	การหาน้ำหนักรถโดยมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าสัญญาณ .....	75
5.1	การประมาณน้ำหนักรถโดยมีสัญญาณรบกวน (noise) .....	75
5.2	การประมาณน้ำหนักรถโดยมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเพลารถ .....	80
6	การหาน้ำหนักรถจากการสุ่มตัวอย่างรถบรรทุก .....	82
6.1	การสร้างสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ .....	82
6.2	การหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการสุ่มแบบจำลองรถบรรทุก .....	83
7	บทสรุป .....	96
	รายการอ้างอิง .....	99
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	101



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 4.1 คุณสมบัติของแบบจำลองรถบรรทุก.....	45
ตาราง 4.2 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักรวม ( $\hat{W}_R$ ) จากแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )....	54
ตาราง 4.3 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักรวม ( $\hat{W}_T$ ) จากแรงพลศาสตร์ ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ ).....	54
ตาราง 4.4 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลาน้ำจากแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )...55	55
ตาราง 4.5 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลาน้ำจากแรงพลศาสตร์ ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ ).....	55
ตาราง 4.6 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลากลางจากแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )...56	56
ตาราง 4.7 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลากลางจากแรงพลศาสตร์ ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ ).....	56
ตาราง 4.8 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลาลังจากแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )...57	57
ตาราง 4.9 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลาลังจากแรงพลศาสตร์ ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ ).....	57
ตาราง 4.10 สัดส่วนแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำของรถบรรทุก ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับ ความเร่ง และความเร่ง.....	64
ตาราง 4.11 สัดส่วนแรงพลศาสตร์ในเพลากลางของรถบรรทุก ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับ ความเร่ง และความเร่ง.....	65
ตาราง 4.12 สัดส่วนแรงพลศาสตร์ในเพลาลังของรถบรรทุก ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับ ความเร่ง และความเร่ง.....	66
ตาราง 4.13 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก.....	68
ตาราง 4.14 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำรถบรรทุก.....	68
ตาราง 4.15 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางรถบรรทุก.....	69
ตาราง 4.16 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังรถบรรทุก.....	69
ตาราง 4.17 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำรถบรรทุก.....	70
ตาราง 4.18 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลากลางรถบรรทุก.....	70
ตาราง 4.19 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาลังรถบรรทุก.....	71
ตาราง 6.1 คุณสมบัติของแบบจำลองรถบรรทุก.....	83
ตาราง 6.2 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมรถบรรทุกสูงสุด 20 อันดับแรก.....	90
ตาราง 6.3 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ.....	91



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของแท่นซึ่งน้ำหนักบนทางเบี่ยง.....	9
รูปที่ 2.1 รูปแบบจำลองระหว่างแท่นซึ่งน้ำหนักกับรถ .....	11
รูปที่ 2.2 แบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนัก.....	13
รูปที่ 2.3 แบบจำลองชิ้นส่วนของแท่นซึ่งน้ำหนัก.....	13
รูปที่ 2.4 แบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนักโดยมีแรงมากกระทำ.....	17
รูปที่ 2.5 การแปลงแรงไปกระทำที่หัวของชิ้นส่วนแท่นซึ่งน้ำหนัก.....	17
รูปที่ 2.6 รูปแบบจำลองของรถบรรทุก.....	20
รูปที่ 3.1 แบบจำลองรถบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	32
รูปที่ 3.2 แบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนักที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	33
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบสัญญาณแรงที่ฐานรองรับเนื่องจากรถถูกวางที่ตำแหน่งต่างๆ กับ รถที่วิ่งด้วยความเร็ว 0.10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (0.02778 เมตรต่อวินาที).....	34
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนักเนื่องจากรถถูกวางที่ ตำแหน่งต่างๆ กับ รถที่วิ่งด้วยความเร็ว 0.10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (0.02778 เมตรต่อวินาที).....	35
รูปที่ 3.5 ลักษณะความขรุขระ.....	36
รูปที่ 3.6 การโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนัก ที่ความขรุขระขนาดต่างๆ.....	36
รูปที่ 3.7 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับขณะรถวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนัก ที่ขนาดความขรุขระต่างๆ.....	37
รูปที่ 3.8 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 1 ที่ความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 38	38
รูปที่ 3.9 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 2 ที่ความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 39	39
รูปที่ 3.10 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 3 ที่ความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 39	39
รูปที่ 3.11 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 4 ที่ความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 40	40
รูปที่ 3.12 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 1 โดยรถมีความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 40	40
รูปที่ 3.13 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 2 โดยรถมีความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 41	41
รูปที่ 3.14 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 3 โดยรถมีความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 41	41
รูปที่ 3.15 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 4 โดยรถมีความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 42	42
รูปที่ 3.16 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 5 โดยรถมีความความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง... 42	42
รูปที่ 3.17 แสดงการกระจัดของเพลาดังกล่าวเปรียบเทียบกับลักษณะหน้าข้างของความขรุขระที่ตำแหน่ง เดียวกัน.....	43
รูปที่ 4.1 แบบจำลองรถบรรทุก.....	45
รูปที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก 5 ตัน.....	46
รูปที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหนักของรถบรรทุก 5 ตัน.....	46
รูปที่ 4.4 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุก 5 ตัน.....	46
รูปที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังของรถบรรทุก 5 ตัน.....	46
รูปที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก 25 ตัน.....	47

	หน้า
รูปที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถบรรทุก 25 ตัน.....	47
รูปที่ 4.8 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุก 25 ตัน.....	47
รูปที่ 4.9 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังของรถบรรทุก 25 ตัน.....	47
รูปที่ 4.10 แรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลารถบรรทุกน้ำหนัก 5 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักความยาว 12 เมตร.....	48
รูปที่ 4.11 แรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลารถบรรทุกน้ำหนัก 25 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักความยาว 12 เมตร.....	48
รูปที่ 4.12 แรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลารถบรรทุกน้ำหนัก 25 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักความยาว 15 เมตร.....	48
รูปที่ 4.13 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถที่ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.14 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลารถ 5 ตันที่ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.15 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลารถ 25 ตัน ที่ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.16 ความขรุขระบนแท่นชั่งน้ำหนักระยะ 10 เมตร โดยสมมติขนาดความขรุขระมีค่าเท่ากับ 1 มม. ....	51
รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งที่ไม่มีความขรุขระ.....	52
รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งที่มีความขรุขระขนาด 1 มิลลิเมตร.....	52
รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งที่มีความขรุขระขนาด 2 มิลลิเมตร.....	52
รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งที่มีความขรุขระขนาด 3 มิลลิเมตร.....	53
รูปที่ 4.21 ความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถ.....	58
รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุก 5 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วต่างๆ.....	60
รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุก 25 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุก 55 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.25 แรงพลศาสตร์ของแบบจำลองรถบรรทุก 10 ตันวิ่งด้วยความเร็ว 125 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เทียบกับแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณมาจากค่าสัญญาณต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.26 ความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถบรรทุก.....	71
รูปที่ 4.27 ความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการทลายแรงพลศาสตร์ในเพลารถต่างๆของรถบรรทุก.....	72
รูปที่ 4.28 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุก 15 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักด้วยความเร็วต่างๆ โดยมีการเปรียบเทียบสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณกับสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง.....	73
รูปที่ 4.29 ค่าอันธรมของผลต่างระหว่างแรงพลศาสตร์ในเพลารถที่ได้จากการประมาณกับค่าจริง เมื่อรถมีน้ำหนักและความเร็ว.....	74
รูปที่ 5.1 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน.....	76

รูปที่ 5.2	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน.....	76
รูปที่ 5.3	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน.....	77
รูปที่ 5.4	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน.....	77
รูปที่ 5.5	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน.....	78
รูปที่ 5.6	ความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถ.....	80
รูปที่ 5.7	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักของรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถ.....	81
รูปที่ 5.8	ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถ.....	81
รูปที่ 6.1	แบบจำลองรถบรรทุก.....	83
รูปที่ 6.2	เปรียบเทียบน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ได้จากการประมาณกับค่าจริง.....	84
รูปที่ 6.3	เปรียบเทียบน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถบรรทุกที่ประมาณได้กับค่าจริง.....	84
รูปที่ 6.4	เปรียบเทียบน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุกที่ประมาณได้กับค่าจริง.....	85
รูปที่ 6.5	เปรียบเทียบน้ำหนักในเพลาลังของรถบรรทุกที่ประมาณได้กับค่าจริง.....	85
รูปที่ 6.6	ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมและน้ำหนักในเพลารถของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ความเร็วต่างๆ.....	86
รูปที่ 6.7	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถ โดยพิจารณาผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ความเร็วต่างๆ.....	87
รูปที่ 6.8	การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก.....	87
รูปที่ 6.9	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่การยุบตัวค่าต่างๆในสภาวะเริ่มต้นก่อนเข้าแทนชั่งน้ำหนักของรถบรรทุก.....	88
รูปที่ 6.10	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของความเร็วที่การยุบตัวค่าต่างๆในสภาวะเริ่มต้นก่อนเข้าแทนชั่งน้ำหนักของรถบรรทุก.....	88
รูปที่ 6.11	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของความเร็วที่น้ำหนักบรรทุกค่าต่างๆ.....	88
รูปที่ 6.12	ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถ โดยพิจารณาผลของการยุบตัวของรถบรรทุกในสภาวะเริ่มต้นที่ความเร็วต่างๆ.....	89

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา

น้ำหนักบรรทุกทุกและการกระจายน้ำหนักเป็นข้อมูลที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของน้ำหนักบรรทุกและความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนเส้นทางคมนาคม (ถนนและสะพาน) ข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างตลอดจนการบำรุงรักษาถนนและสะพานอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการบังคับใช้กฎหมายเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก น้ำหนักบรรทุกที่มีความถูกต้องนั้นมีความสำคัญต่อการวางแผนด้านนโยบายการขนส่งและการจราจร เพื่อที่จะได้มาถึงข้อมูลดังกล่าวนั้น ระบบ weigh-in-motion (WIM) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

ระบบ WIM คือ วิธีการหาข้อมูลต่าง ๆ เช่น น้ำหนักเพลา ระยะห่างระหว่างเพลา จำนวนเพลาของยวดยานพาหนะ ขณะที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือสะพาน ซึ่งโดยปกติยวดยานพาหนะดังกล่าว มักจะเป็นรถที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุก รถพ่วง เพราะรถกลุ่มดังกล่าวจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างถนนและสะพาน

ในต่างประเทศ เช่น แคนาดา อเมริกา ฮอังกง ใต้หวัน และออสเตรเลีย ได้มีการนำระบบ WIM มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบ WIM สามารถใช้ได้ทั้งกับผิวทาง (ถนน) หรือ สะพาน ในกรณีที่ใช้กับผิวทาง อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คอนกรีตหน้าตัดรูปกล่องสี่เหลี่ยม (culvert) ซึ่งจะวางอยู่ใต้ถนนโดยที่ภายใน culvert นี้จะมีมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ติดตั้งอยู่ การใช้แผ่นโลหะติดตั้งอยู่บนผิวถนนโดยที่แผ่นโลหะดังกล่าวจะถูกรองรับด้วยตัวเซลล์น้ำหนัก (load cell) การใช้มาตรวัดความเครียดแนวตั้ง (vertical strain transducer) ผังไว้ใต้ผิวทาง หรือการใช้พิโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ผังไว้ที่ผิวทาง แต่เนื่องจากระบบนี้มีข้อเสียคือ มีความคลาดเคลื่อนสูง และเมื่อต้องการที่จะซ่อมบำรุง จะต้องทำการลอกผิวทางออก อีกทั้งอาจต้องทำการปิดเส้นทางจราจรระหว่างดำเนินการติดตั้งระบบ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงเป็นระบบที่ใช้กับสะพาน ซึ่งจะเป็นการนำตัวเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น มาตรวัดความเครียด (strain gauge) เครื่องตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) ไปติดตั้งที่คาน (girder) ได้สะพาน ข้อมูลที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ดังกล่าวสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักของรถที่วิ่งผ่านบนถนนหรือสะพานได้ แต่ระบบนี้ยังมีข้อจำกัด คือ ในการตรวจวัดน้ำหนักจำเป็นต้องไม่มีรถคันอื่นอยู่บนสะพานในขณะที่ทำการตรวจวัดน้ำหนัก อีกทั้งยังต้องอาศัยพารามิเตอร์ของหน้าตัดสะพานในการคำนวณหาค่าน้ำหนักรถ แต่เนื่องด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งสะพาน และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาน้ำหนักรถ

ในการศึกษานี้จึงเสนอระบบการตรวจวัดหาน้ำหนักรถที่หลีกเลี่ยงปัญหาทางด้านพารามิเตอร์ของหน้าตัดสะพาน และผลกระทบจากรถคันอื่นขณะทำการตรวจวัด โดยทำการออกแบบแทนซึ่งน้ำหนักมีลักษณะเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วง ซึ่งมีหน้าตัดสม่ำเสมอตลอดทั้งแทน โดยจะติดตั้งแทนซึ่งน้ำหนักบนบริเวณทางเบี่ยงช่องทางเดียว ซึ่งถูกสร้างมาโดยเฉพาะเพื่อเป็นการลดผลกระทบจากรถคันอื่นในขณะที่ตรวจวัดน้ำหนักรถ

สำหรับประเทศไทย การศึกษาในเรื่อง WIM ในอดีตที่ผ่านมา มีค่อนข้างน้อย การเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกจะเก็บจากการที่ให้อัตราขึ้นซึ่งน้ำหนักบนตราซั่ง แม้ในปัจจุบันจะเริ่มมีการใช้ระบบชั่งน้ำหนักที่มีความรวดเร็ว แต่ก็ยังต้องใช้เวลาพอสมควรในการที่รถต้องชะลอความเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางการจราจร นอกจากนั้นยังพบว่ามีปัญหาเรื่องการโกงน้ำหนัก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อถนนและสะพาน ดังนั้นจึงน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่จะได้พัฒนาระบบชั่งน้ำหนักแบบ WIM ขึ้นมาเพื่อให้ได้ระบบการชั่งน้ำหนักที่มีความถูกต้องสูง โดยที่รถไม่ต้องชะลอความเร็ว เข้ามาใช้ในการเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกในประเทศไทย เพื่อที่จะได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบการรับน้ำหนักจร (live load) และการวางแผนบำรุงรักษาถนนและสะพาน อีกด้านหนึ่งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมการบรรทุกน้ำหนักเกินของรถบรรทุกได้ด้วย

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

Lamann และ Novak (1996) จากประเทศอเมริกา ได้นำระบบ WIM มาทำการวัดกับสะพานที่ประกอบด้วยคาน (girder) เหล็ก 5 อัน เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความถี่ ความเครียดจะถูกวัดภายใต้การจราจรปกติ โดยวิธีการของเรนโฟล (rainflow) ข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บรวบรวมและถูกบันทึกด้วยการใช้เครื่องมือ 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ระบบการวัดความเค้น (Stress Measuring System; SMS) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมความเครียดในอดีตที่ผ่านมา ภายใต้การจราจรปกติและทำการรวบรวมเข้ากับแผนภูมิแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธีเรนโฟล rainflow และโดยวิธีอื่นๆ ชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Weighing System, TWS) ทำการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกและน้ำหนักเพลจากจากความเครียดในอดีต โดยการใช้เส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ (Influence line) ของสะพาน องค์ประกอบต่างๆของรถบรรทุกสามารถหาได้ โดยการใช้ตัวเซนเซอร์ 2 ตัวติดตั้งขนานกันไว้กับผิวทาง แบบเตอร์ที่ใช้สำหรับทำการศึกษาของ Lamann และ Novak สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องถึง 3 สัปดาห์

Thater G., Chang P., Schelling D.R. และ Fu C.C. (1998) ได้นำระบบ WIM มาใช้ในการทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของรถขณะเคลื่อนที่โดยทำการจำลองในคอมพิวเตอร์แล้วทำการแยกผลทางพลศาสตร์ออกเพื่อหาน้ำหนักทางสถิต ด้วยการใช้นิยามการกรองผลทางพลศาสตร์เทียบเท่า (Equivalent Dynamic Filter Technique, EDFT) แยกแรงออกเป็นแรงทางพลศาสตร์และผลตอบสนองเสมือนทางสถิต (pseudo static response) โดยใช้วิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fast Fourier Transform) เทียบผลจากการแอนตัวเป็นสัดส่วน เรียกว่าอัตราส่วนการกรองเทียบเท่า (Equivalent filtering ratio, EFR) ผลที่ได้พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณ และให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำนายน้ำหนักรถได้ถึง  $\pm 5\%$  ในขณะที่ใช้ระบบ WIM ที่มีอยู่เดิมให้ความถูกต้องแม่นยำในช่วง  $\pm 10\%$  เท่านั้น แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถหาน้ำหนักในแต่ละเพลได้ และไม่ได้นำคุณสมบัติของสะพานจริงมาพิจารณา

Chan T.H.T., Law S.S., Yung T.H. และ Yuan X.R. (1999) ได้ทำการหาค่าหน้าหนักโดยการใช้อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) เพื่อใช้ในการหาค่าหน้าหนักของสะพาน รูปแบบของคำตอบที่แน่นอน (closed-form solution) สามารถหาได้เพื่อใช้ในการหาค่าหน้าหนักของคานที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) จะถูกนำมาใช้หาค่าหน้าหนักที่เคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้จะอยู่บนพื้นฐานของสมการของออยเลอร์ (Euler's equation) ของคาน และแบบจำลองของรถที่ใช้ในการสร้างปฏิริยาตอบสนองจะพิจารณาเป็น 2 เพลลา

Zhu X.Q., Law S.S. (1999) ได้ทำการจำลองรูปแบบสะพานเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วงคาน ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ พฤติกรรมการสั่นไหวของคานภายใต้ค่าน้ำหนักที่เคลื่อนที่จะถูกวิเคราะห์โดยหลักการของ Hamilton โดยจุดรองรับภายในจะถูกแทนด้วยสปริงที่มีความแข็งมาก วิธีการหาค่าน้ำหนักจะใช้หลักการของซูเปอร์โพสิชันเชิงโหมด (modal superposition) และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งน้ำหนักที่หาได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา

Law S.S., Chan T.H.T. และ Zeng Q.H. (1999) ได้ทำการหาค่าน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยการทดสอบจากแบบจำลอง ใช้ข้อมูลของปฏิริยาตอบสนองของการสั่นไหวของสะพานเพียงอย่างเดียวในรูปของ Frequency - Time domain โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งรถจะถูกจำลองให้มีรูปแบบเป็น 1 เพลลา และ 2 เพลลา (กำหนดระยะห่างระหว่างเพลลาไว้คงที่) เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาและมีค่าความหน่วง (viscous damping) สมการการเคลื่อนที่ของคานสามารถหาได้โดยผ่านการแปลงพิกัดเชิงโหมด (modal coordinate) ผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับฟูริเยร์ทรานส์-ฟอร์ม (Fourier transforms) และน้ำหนักของรถจะถูกแปลงกลับไปสู่โดเมนของเวลา (time domain) ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะถูกตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกันระหว่างปฏิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิริยาตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้ ด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาจะสามารถทำนายน้ำหนักของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งน้ำหนักของรถได้จากการเฉลี่ยค่าแรงที่หาได้ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้ให้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง 20% อีกทั้งการเฉลี่ยค่าแรงนี้ เมื่อพิจารณาจากแรงที่ได้จริงพบว่าลักษณะของแรงมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง คือมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจนมีค่าลบในบางช่วง ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ไม่มีความเชื่อถือ จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน

Chan T.H.T., Law S.S. และ Yung T.H. (2000) ได้ทำการหาค่าน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่ โดยการใส่สะพานที่เป็นคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) โดยได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดและเครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (girder) ของสะพานตลอดจนเครื่องตรวจนับจำนวนเพลลา (axle sensors) ที่ผิวของทางของสะพาน รถบรรทุก 2 เพลลาได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม น้ำหนักที่เพลลาทางพลศาสตร์สามารถหาได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถสามารถหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการใช้ฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาค่าน้ำหนักใช้เวลานานมากถึง 30 นาทีเมื่อใช้ CPU รุ่น Pentium II 300MHz และน้ำหนักที่หาได้ในโดเมนของเวลาที่มีความแปรปรวนสูงมากจนไม่สามารถเชื่อถือได้ซึ่ง



เกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) แม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำถึง  $\pm 5\%$  ก็ตาม

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ จะถูกวิเคราะห์โดยการใช้ทฤษฎีของแผ่นบาง (orthotropic rectangular theory) และหลักการของซูเปอร์โพสิชันที่เชิงโหมด (modal superposition principle) ซึ่งสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา (time domain) โดยน้ำหนักที่หาได้จากวิธีการจำลองรูปแบบเป็นคานากับวิธีการจำลองรูปแบบเป็นแผ่นบางจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน รวมทั้งทำการทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วน ผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดคือ ไม่เกิน 5% ในระดับสัญญาณรบกวนที่ต่ำมาก (1%) แต่เวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักจะต้องใช้เวลานานมากเพราะต้องมีการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสมในการคำนวณแต่ละครั้งอีกทั้งค่าพารามิเตอร์  $\lambda$  มีผลต่อการถายน้ำหนักค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานและการหาน้ำหนักด้วยการใช้ความเร่งให้ผลที่ดีกว่าการใช้ความเครียด และพบว่าการใช้วิธีของซูเปอร์โพสิชันมีความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

Law S.S., Chan T.H.T. และ Zeng Q.H. (2001) ได้พบว่า การหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ที่มีความคลาดเคลื่อนสูง ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่าสภาวะบกพร่อง (ill-conditioned) ดังนั้น Law S.S. และคณะ จึงได้เพิ่มวิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะทำการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่หาได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์  $\lambda$  ที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเทียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณที่นานและสิ้นเปลือง อีกทั้งค่าที่เหมาะสมนี้ยังขึ้นกับลักษณะของตัวรถอีกด้วย

Law S.S. และ Fang Y.L. (2001) ได้ทำการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่จากแบบจำลองย่อส่วน โดยการใช้เทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบของสเตตสเปซ (state-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูลา (recursive formula) บนพื้นฐานของการใช้ตัวเซ็นเซอร์หลายๆตัวในการวัดปฏิริยาตอบสนองของสะพาน ซึ่งการคำนวณด้วยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูลานี้ใช้เวลาที่น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ และความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับการใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์เช่นกันและไม่สามารถละทิ้งพารามิเตอร์นี้ได้ ซึ่งการใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่ามาก

คณะกรรมการการยุโรป (2001) ได้ทำการพัฒนาระบบ WIM ด้วยการใส่สะพานเป็นหลักเรียกว่า Bridge WIM หรือ B-WIM โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จะคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบพร้อม ๆ กันเพื่อให้ได้ทั้งความเร็ว จำนวนเพลลา ระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวม และทำการพัฒนาการวิเคราะห์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็น 2 มิติ เพื่อคำนึงผลของตำแหน่งที่เอียงศูนย์ตามแนวขวาง และตรวจสอบโดยทำการทดลองในสนามจริง โดยใช้สะพานที่มีลักษณะแบบ orthotropic deck และยังคำนึงถึงพารามิเตอร์จากสิ่งแวดล้อมเช่น ผลของอุณหภูมิจากฤดูกาล และความชันตามแนวขวางของผิวทาง และยังทดสอบกับสะพานที่เป็นสะพานช่วงเดียวหรือหลายช่วง เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง มาตราวัดความเครียด ซึ่งระบบการหาน้ำหนักในกายวิจันี้มีผลคลาดเคลื่อนจากความเร็วและระยะห่างเพลลาจากการทำนายพร้อมกัน พบว่าการวิเคราะห์แบบ 2 มิติสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำได้จากเดิมที่วิเคราะห์แบบมิติเดียว แต่ผลการหาแรงทางพลศาสตร์ยังไม่ดีพอเนื่องจากยังมีความแปรปรวนของข้อมูลที่สูง สำหรับผลการหาน้ำหนักรวมทางสถิติพบว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2002) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีโดเมนของเวลา (time domain method) ด้วยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองแบบคานต่อเนื่อง โดยการใช้ความเครียดและความเร่งที่วัดได้ขณะเคลื่อนที่ของรถและ รวมทั้งใช้วิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) ในการคำนวณเพื่อเพิ่มขอบเขตในการแก้ปัญหาและลดเวลาในการคำนวณ จากผลการทดลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขสามารถหาค่าพารามิเตอร์  $\lambda$  ที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก (noise) ได้ และพบว่าการใช้ความเร่งเป็นพารามิเตอร์ในการหาน้ำหนักแทนการใช้ความเครียด จะต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นในการวิเคราะห์ และวิธีการนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้ทั้งวิธีการหาน้ำหนักแบบวิธีโดเมนของเวลาและวิธีโดเมนของความถี่และเวลา โดยการแก้ปัญหาใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD) และให้ความคลาดเคลื่อนที่มาน้อยตามระดับของสัญญาณรบกวน โดยให้ความแม่นยำสูงสุดถึง 4% แต่ใช้เวลานานในการคำนวณที่นานเนื่องจากขนาดของเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่มาก และยังใช้เวลานานมากในการหาเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสมที่สุดเช่นกันจึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน

Yu L. และ Chan T.H.T. (2002) ได้ทำการทดสอบหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วนโดยการใช้ผลตอบสนองของสะพานด้วยโมเมนต์ตัด โดยวิธีที่นำมาใช้ได้แก่วิธีโดเมนของเวลา (Time Domain Method, TDM) และวิธีโดเมนของความถี่และเวลา (Frequency Time Domain Method, FTDM) และทำการเปรียบเทียบเทคนิคการแก้ระบบสมการเชิงเส้นสองวิธีได้แก่ เทคนิคการใช้ซูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ (Pseudo-Inverse matrix; PI) และวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD) รวมทั้งศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ความถี่ที่เลือกใช้ จำนวนโหมดทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถขณะเคลื่อนที่ จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ในการวัด ผลการทายน้ำหนักที่ได้พบว่าการใช้เทคนิคซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชันสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำทั้งในวิธี TDM และ FTDM โดยเฉพาะในกรณีวิธี FTDM สามารถขจัดปัญหาสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ได้ดีกว่าการใช้เทคนิคซูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ และความคลาดเคลื่อนที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบาย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ถือว่าดีคืออยู่ในช่วงไม่เกิน 5-10% แต่ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) มีผลในการหาน้ำหนักค่อนข้างมากในแต่ละกรณีกล่าวคือต้องหาค่า  $\lambda$  ค่าที่เหมาะสมที่สุดตลอดการคำนวณนั้นๆจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

Sarah K. Leming and Harold L. Stalford (2002) ได้ทำการศึกษหาพารามิเตอร์ของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยคำนวณจากค่าการแอ่นตัวของสะพานที่ตำแหน่งกลางสะพานบนโดเมนเวลา พารามิเตอร์ที่คำนวณหาคือ น้ำหนักสถิตล้อหน้าและล้อหลัง น้ำหนักรวม ระยะเพลและความเร็วของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยพิจารณาคานและน้ำหนักสถิตเคลื่อนที่เท่านั้น ไม่พิจารณาน้ำหนักทางจลศาสตร์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและมวลของสะพาน โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการแอ่นตัวที่วัดได้และค่าการแอ่นตัวจากการคำนวณ ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จะคำนวณค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตบนและล่างของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของอนุพันธ์ของการแอ่นตัว (ที่ตำแหน่งล้อเข้า-ออก และที่ตำแหน่งกลางสะพาน) จากนั้นได้ทำการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนค่าการแอ่นตัวที่วัดมาได้โดยใช้ที่เวลาต่างๆกัน อย่างสุ่ม (random sampling) จะให้ผลค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ลดลงมาก (น้อยกว่า 1%) และเมื่อมีการพิจารณาสัญญาณรบกวนในการคำนวณด้วยแล้ว ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% จนกระทั่งสัญญาณรบกวนมากกว่า 10% จะให้ค่าคลาดเคลื่อนระยะเพล 5% ค่าคลาดเคลื่อนความเร็ว 1% ค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักล้อหน้า 5% ค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักล้อหลัง 7.9% และค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวม 1% แต่เนื่องจากการกำหนดขอบเขตของคำตอบ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถ้าค่าจริงไม่ได้อยู่ในช่วง

Sarah K. Leming and Harold L. Stalford (2003) ได้ทำการศึกษหาพารามิเตอร์ของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยคำนวณจากค่าการแอ่นตัวของสะพานที่ตำแหน่ง 3/4 ของความยาวสะพาน กลางสะพานและ 1/4 ของความยาวสะพาน บนโดเมนเวลา พารามิเตอร์ที่คำนวณหาคือ น้ำหนักสถิตล้อหน้าและล้อหลัง น้ำหนักรวม ระยะเพลและความเร็วของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยพิจารณาน้ำหนักพลศาสตร์เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและค่าสติเฟนสและค่าความหน่วงของรถบรรทุก โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการแอ่นตัวที่วัดได้และค่าการแอ่นตัวจากการคำนวณ ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จะคำนวณค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตบนและล่างของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะให้ผลค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ต่ำ (น้อยกว่า 1%) และเมื่อมีการพิจารณาสัญญาณรบกวนในการคำนวณด้วยแล้ว (1.5%-5%) ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนในระดับเดียวกับไม่มีสัญญาณรบกวนอย่างใดก็ตามค่าประมาณความถี่ธรรมชาติจะมีแนวโน้มความถูกต้องลดลงเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากขึ้น แต่เนื่องจากการกำหนดขอบเขตของคำตอบ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถ้าค่าจริงไม่ได้อยู่ในช่วง

R. J. Jiang, F. T. K. Au and Y. K. Cheung (2003) ได้ทำการศึกษหาพารามิเตอร์ของยานพาหนะขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้แก่ มวลของตัวรถช่วงบนและล่าง ค่าความหน่วงของรถ ค่าสติเฟนส สปริงระหว่างมวลทั้งสอง และค่าสติเฟนสสปริงอีกค่าสำหรับผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับผิวสะพาน โดยทำการหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้พร้อม ๆ กันโดยใช้อัลกอริทึมที่เชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) โดยจำลองผลตอบแทนของสะพานขึ้น และใช้ความเร่งของการสั่นไหวของสะพานในขั้นตอนหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งให้ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของในส่วนของมวลรถที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ ขณะที่พารามิเตอร์ตัวอื่นมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง และการที่จำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำนั้นต้องการจำนวนตำแหน่งของการเก็บข้อมูล (station) หลายตำแหน่ง และการคำนวณใช้เวลาที่นานมากเนื่องจากระบบการคำนวณใช้วิธีการค้นหาข้อมูล (search) ที่เหมาะสมที่สุดจากขอบเขต (limits) ที่กำหนด

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2003) ได้ทำการศึกษาการหาแรงขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยข้อมูลความเร็วรถที่ไม่คงที่ โดยทำการศึกษารูปแบบการวัดสัญญาณที่ต่างกัน ได้แก่ การใช้สัญญาณความเร่งของการสั่นไหวของสะพาน และการใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน โดยทั้งสองวิธีทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์โดยตรง (exact solution) ร่วมกับวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดและเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชันเช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้น โดยทำการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ขณะที่การทดสอบด้วยแบบจำลองย่อยส่วนนั้นทำการศึกษาโดยใช้สัญญาณความเครียดเท่านั้น โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยของรถในช่วงการเคลื่อนที่บนสะพานมาวิเคราะห์แทนความเร็วจริงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากชะลอรถเพื่อให้มีความเร็วไม่คงที่ และยังพิจารณาผลของความขรุขระและระดับของสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การหาแรงโดยการใช้น้ำหนักสัญญาณความเร่งนั้นให้ผลที่แม่นยำกับแรงทางสถิติมากกว่าการใช้สัญญาณความเครียดซึ่งมีความแปรปรวนสูง (แรงที่หาได้มีการกวัดแกว่งที่สูง) โดยเฉพาะกับรถที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังทำการจำลองรูปแบบสะพานแบบคานต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าแรงที่คำนวณได้บริเวณที่รถผ่านจุดรองรับนั้นจะเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากจะเกิดสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ที่ตำแหน่งเข้าใกล้จุดรองรับ ซึ่งต้องการค่าพารามิเตอร์ในการเรกูลาร์ไรเซชันที่มีค่าน้อยที่ตำแหน่งเวลาที่รถเข้าใกล้จุดรองรับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น และยังพบว่าในการวิเคราะห์สะพานแบบต่อเนื่องนั้น ระดับสัญญาณรบกวนจะมีผลมากต่อการหาแรงเมื่อเทียบกับสะพานแบบช่วงเดียวปกติ

Phonkrit Phanapavudhikun (2003) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถบนสะพานเพื่อหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (dynamic programming) ซึ่งได้พิจารณาผลของการบิดโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) และได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการหาน้ำหนักเนื่องจากความเร็วและความขรุขระ พบว่าผลของการหาน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับเลือกใช้เรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) และค่าน้ำหนักที่หายได้มาจากการเฉลี่ยแรงในช่วงกลางของเวลาที่รถวิ่งบนสะพานทั้งสองเพลลา ซึ่งเป็นการจำกัดการนำไปใช้งานและไม่สามารถให้แม่นยำของแรงในเพลลาได้สูงพอ และเนื่องจากมีการใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางซึ่งจะทำให้มีจำนวนระดับชั้นความเสีร้มาก ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถนานมาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

Thawat Akarawittayapoom (2003) ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง โดยตัดผลของการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยโมเมนต์ตัดของหน้าตัด และทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration Technique) โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิกโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ค่าน้ำหนักรถเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรกของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง ผลที่ได้พบว่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ที่หายได้มีความถูกต้องและแม่นยำสูงมาก มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คืออยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  และได้ทำการยืนยันข้อมูลด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อยส่วน แต่ยังคงขาดการทดลองเพื่อพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยสำคัญหลายปัจจัย เช่น ผลของตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางในช่องจราจร ผลของความขรุขระ จำนวนเพลลาที่มากขึ้น และผลของสภาพจุดรองรับของสะพาน เป็นต้น

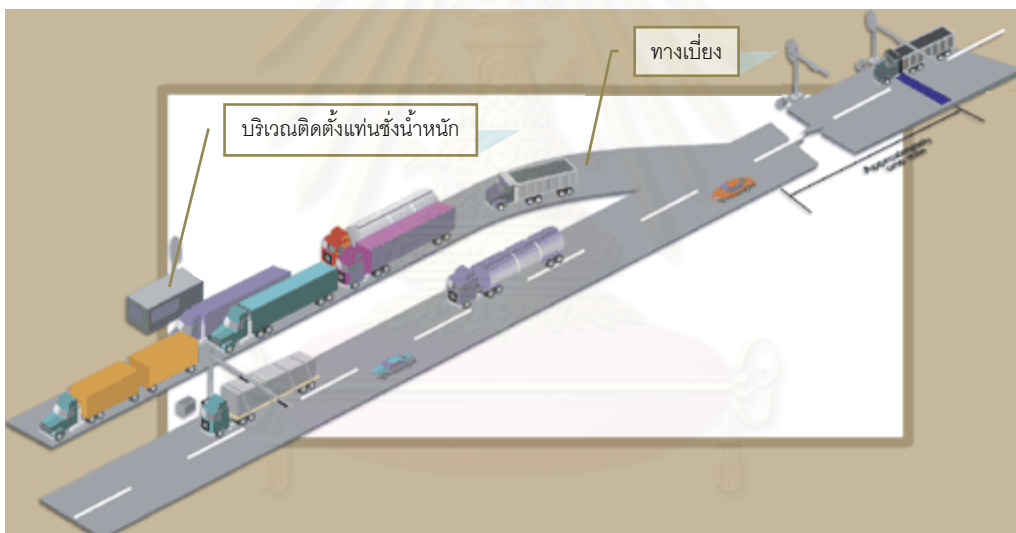
Zhu X.Q. และ Law S.S. (2004) ได้ทำการศึกษาการหาแรงขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบจากแบบจำลองโดยใช้สัญญาณการสั่นไหวจากโมเมนต์ดัดของสะพาน โดยวิธีที่นำมาศึกษานั้นประกอบด้วย 2 วิธี โดยวิธีแรกใช้พื้นฐานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์โดยตรง (exact solution) ซึ่งจะหาแรงในลักษณะแยกเป็นเพลลา (axle load) และอีกวิธีใช้พื้นฐานทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM solution) ซึ่งจะหาแรงได้ในรูปแบบของแรงในล้อ (wheel load) ซึ่งอิสระต่อกัน โดยทั้งสองวิธีนั้นได้ทำการแก้ปัญหาด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดประกอบกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าทั้งสองวิธีนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันนักสำหรับแรงที่เคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยวิธีแรก (exact solution) นั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าสำหรับการเคลื่อนที่ในตำแหน่งที่เยื้องจากกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะแปรปรวนไวมากต่อตำแหน่งของจุดวัดสัญญาณ แต่ทั้งนี้ยังขึ้นกับจำนวนและรูปแบบตำแหน่งของการติดตั้งจุดวัดสัญญาณความเครียดที่ท้องสะพานอีกด้วย ส่วนจำนวนโหมดการสั่นไหวของสะพานนั้นมีผลน้อยต่อการหาแรง แต่การใช้จำนวนโหมดที่มากย่อมให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้จำนวนโหมดที่น้อย และยังพบว่าการหาแรงในลักษณะแบบเป็นเพลลานั้นให้ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าการหาแรงในลักษณะแยกล้อซึ่งกันและกัน ซึ่งผลการทดสอบโดยรวมแล้วยังพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูง และการอ้างอิงผลที่ได้ด้วยการใช้ตัวคูณปฏิสัมพันธ์ (correlation factor) นั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

Pattarapong Asnachinda (2004) ได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน โดยพิจารณาถึงปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำนายน้ำหนักของรถบรรทุก อันได้แก่ ผลของความขรุขระ การบิดในสะพาน เนื่องจากตำแหน่งตามแนวขวางของการวิ่งในช่องจราจรช่องซ้ายหรือขวา ผลของจำนวนเพลลาที่เพิ่มขึ้นจากเพลลาหลังที่เป็นเพลลาเดี่ยวเป็นเพลลาคู่ และผลของสภาพของจุดรองรับ (support condition) หรือรูปแบบสะพานแบบหลายช่วง รวมทั้งจะทำการศึกษาถึงแรงในล้อรถขณะเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาน้ำหนักทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น จากการทดสอบทั้งหมด 540 การทดสอบพบว่า การนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำการเฉลี่ยและนำไปทำนายน้ำหนักจะสามารถลดผลของการบิดตัวของสะพานซึ่งเกิดจากตำแหน่งของรถตามแนวขวางได้ดี และรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่ดีกว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตามระดับของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน รูปแบบของฐานรองรับของสะพานนั้นมีผลต่อการทำนายน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ โดยสะพานแบบช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะให้ผลการทำนายน้ำหนักที่ดีกว่าสะพานแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้พบว่ากรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิวไม่มีความขรุขระนั้นให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ส่วนผลการทดสอบกรณีรูปแบบสะพานเป็นแบบต่อเนื่องและกรณีที่รถบรรทุกมีจำนวนเพลลาเพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสูงสุด  $\pm 20\%$

Panu Foongsook (2005) ได้ทำการทดสอบภาคสนาม โดยการทดสอบได้มีการติดตามวัดความเครียดสำหรับวัดผลตอบสนองของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเช่นกันโดยจะทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ได้สะพาน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการนำไปงานจริง แล้วจะพบว่ามาตรวัดความเครียดสำหรับติดคอนกรีตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันไม่สะดวกในการติดตั้งได้สะพานเท่าที่ควร ตลอดจนค่าความเครียดที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ขณะใช้งาน เช่น เมื่อเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตเกิดปัญหาของฟองอากาศขนาดเล็กภายในมาตรวัดความเครียด ผลการทดสอบทั้ง 51 การทดสอบ โดยในกรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรกลาง 23

การทดสอบ ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำโดยส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกิน  $\pm 50\%$  ผลการทายน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$  สำหรับน้ำหนักเพลาลัง และไม่เกิน  $\pm 6\%$  สำหรับน้ำหนักรวม กรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรซ้ายทั้ง 24 การทดสอบ ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำโดยส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกิน  $\pm 50\%$  การทายน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$  สำหรับน้ำหนักเพลาลัง และไม่เกิน  $\pm 6\%$  สำหรับน้ำหนักรวม เมื่อพิจารณาผลของการกระแทกของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งข้ามสะพานกรณีวิ่งช่องจราจรซ้ายทั้ง 2 กรณี คือ ผลของการกระแทกก่อนเข้าสะพานและผลของการกระแทกช่วงกลางสะพาน ซึ่งทำการทดสอบ จำนวน 4 การทดสอบ พบว่าผลการทายน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$  สำหรับน้ำหนักรวม

จากงานวิจัยในอดีตจะใช้อุปกรณ์ไปติดตั้งที่สะพานเพื่อวัดค่าการโก่ง (deflection) ความเครียด (strain) หรือความเร่ง (acceleration) ของสะพาน แต่ในการศึกษานี้จะใช้แทนที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อทำหน้าที่เป็นแทนชั่งน้ำหนัก ซึ่งแทนนี้จะติดตั้งบริเวณทางเบี่ยงสำหรับรถที่จะชั่งน้ำหนักดังรูปที่ 1.1 โดยการกระทำเช่นนี้ คาดว่าจะสามารถหาค่าแรงในเพลารถได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยรถไม่ต้องชะลอความเร็ว



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของแทนชั่งน้ำหนักบนทางเบี่ยง

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ฐานรองรับของแทนชั่งน้ำหนักและความเร่งของแทนชั่งกับแรงพลศาสตร์ในเพลารถในขณะที่ยากำลังเคลื่อนที่ผ่านแทนชั่งน้ำหนัก
2. เพื่อเสนอวิธีการประมาณในการหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถจากข้อมูลแรงที่ฐานรองรับและสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางช่วงของแทนชั่งน้ำหนัก
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถ เพื่อใช้ในการออกแบบแทนชั่งน้ำหนักแบบคนต่อเนื่องหลายช่วง

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. การวิเคราะห์จะพิจารณาแท่นซึ่งน้ำหนักเป็นคานหลายช่วงแบบต่อเนื่อง (continuous beam) ในระนาบ 2 มิติ
2. พิจารณาโครงสร้างของแท่นซึ่งน้ำหนักมีพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้น (linear elastic) โดยมีการกระจายมวล และสติฟเนสที่สม่ำเสมอตลอดทั้งแท่นซึ่งน้ำหนัก
3. พิจารณาแรงในเพลลาของรถเป็นแบบจุด
4. พิจารณาผลของความเร็วยาน ความขรุขระของผิวทาง สภาวะเริ่มต้นของรถก่อนเข้าแท่นซึ่งน้ำหนัก และความคลาดเคลื่อนในการวัดสัญญาณต่างๆ เนื่องจากสัญญาณรบกวน
5. ในการคำนวณหาแรงพลศาสตร์ของเพลลาจะสมมติว่า ทราบตำแหน่งของเพลลาตลอดเวลาที่รถเคลื่อนอยู่บนแท่นซึ่งน้ำหนัก

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงค่าแรงพลศาสตร์ของเพลลา (dynamic axle loads) ของรถที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนแท่นซึ่งน้ำหนัก
2. ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) และน้ำหนักเพลลาทางสถิต (static axle weight) ของรถที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน
3. ทำให้ไม่ต้องมีการหยุดรถเพื่อขึ้นซึ่งน้ำหนักซึ่งเป็นการประหยัดเวลาของผู้ขับขี่
4. ทำให้ทราบถึงระดับความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
5. ทำให้ทราบว่าหลักการหาน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ มีความคลาดเคลื่อนและมีความเป็นไปได้เพียงพอที่จะนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่
6. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริง

#### 1.6 การดำเนินงานวิจัย

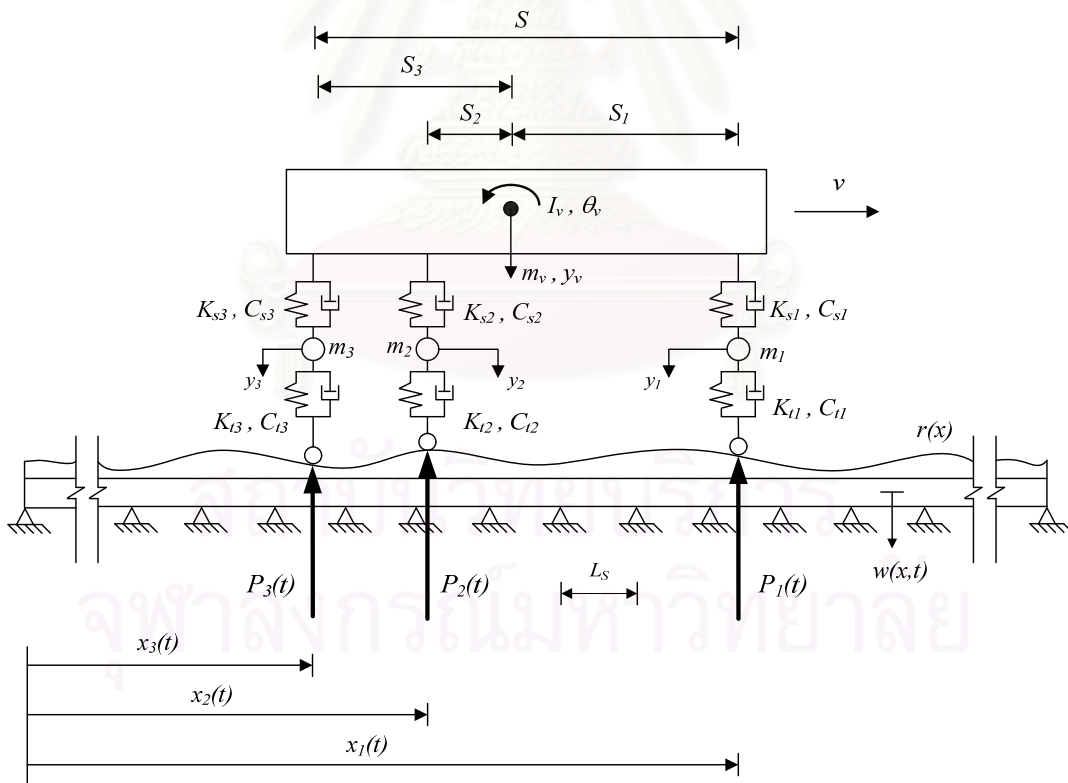
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการวิจัยที่ผ่านมา
3. ศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อวิทยานิพนธ์
4. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
5. จัดทำแบบจำลองคอมพิวเตอร์และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
6. ศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างแรงพื้นฐานรองรับและความเร่งที่กึ่งกลางช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนักกับแรงพลศาสตร์ในเพลลาขณะที่ยานกำลังเคลื่อนที่ผ่านแท่นซึ่ง
7. เสนอวิธีและศึกษาประสิทธิภาพการหาแรงพลศาสตร์ของเพลลา
8. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการศึกษา
9. จัดทำวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงที่ยานพาหนะกระทำต่อสะพานเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบสะพาน เพราะจะนำมาใช้ในการพิจารณาน้ำหนักจร (live load) ที่ใช้ในมาตรฐานของการออกแบบสะพาน การวัดแรงดังกล่าวโดยตรงด้วยการใช้เครื่องมือที่ติดตั้งไว้กับรถจะเสียค่าใช้จ่ายสูงและมีความเอนเอียง (bias) ในการเก็บข้อมูล ในขณะที่ผลที่ได้จากการคำนวณจากการจำลองรูปแบบสามารถทำได้สะดวกกว่า

### 2.1 การหาแรงพลศาสตร์ของเพลารถจากการวัดผลตอบสนองของแท่นชั่งน้ำหนัก

เมื่อรถเคลื่อนที่ผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก รถจะเกิดการสั่นไหวส่งผลให้แท่นชั่งน้ำหนักมีการแอ่นตัวและเกิดความเร่งขึ้น โดยค่าการแอ่นตัวและค่าความเร่งนี้เกิดจากปฏิกิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักกับรถ โดยมีความขรุขระของผิวทางบนแท่นชั่งน้ำหนักเป็นปัจจัยหลักทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในตัวรถแล้วส่งผลต่อแรงในเพลารถที่กระทำต่อตัวแท่นชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 2.1 รูปแบบจำลองระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักกับรถ



เมื่อพิจารณารถเคลื่อนที่บนแท่นชั่งน้ำหนักดั่งแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแท่นชั่งน้ำหนักจะถูกจำลองเป็นคานหลายช่วงแบบต่อเนื่องในระนาบ 2 มิติ  $L_s$  คือ ความยาวในแต่ละช่วงของแท่นชั่งน้ำหนัก การสั่นไหว ณ ตำแหน่งต่างของแท่นชั่งน้ำหนักสามารถเขียนได้เป็น  $w(x, t)$  และ ความขรุขระบนผิวแท่นชั่งน้ำหนักแทนด้วย  $r(x)$

แบบจำลองรถจะพิจารณาเป็นลักษณะของรถบรรทุกที่มี 5 องศาอิสระ (degree of freedom) ซึ่งแทนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและเชิงมุมของรถ และการเคลื่อนที่แนวตั้งของเพลารถ โดย  $M_v$  และ  $I_v$  แทนมวลในแนวตั้งและเชิงมุมของรถตามลำดับ  $m_f$  แทนมวลของเพลารถ โดยระบบการสั่นไหวของเพลารถ และยางรถสามารถแทนได้ด้วยชุดของความหน่วงและสปริง โดยมีสมมติฐานว่ามีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น ซึ่งค่าความหน่วงและค่าสติเฟนสของสปริงสมมติให้เป็นค่าคงที่

จากรูปที่ 2.1 จะแสดงระยะต่าง ๆ ของรถ โดยที่  $S$  คือ ระยะระหว่างเพลาน้ำและเพลาลัง  $S_1$  คือ ระยะจากศูนย์กลางมวลของรถถึงเพลาน้ำของรถ  $S_2$  คือ ระยะจากศูนย์กลางมวลของรถถึงเพลากลางของรถ  $S_3$  คือ ระยะจากศูนย์กลางมวลของรถถึงเพลาลังของรถ  $K_s$  และ  $K_f$  คือ สติเฟนสที่เพลาน้ำและยางรถตามลำดับ  $C_s$  และ  $C_f$  คือ ความหน่วงที่เพลาน้ำและยางรถตามลำดับ

การคำนวณน้ำหนักรถที่เคลื่อนที่โดยพิจารณาจากสัญญาณความเครียดมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ สะพานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น สะพานเกิดการโก่งตัว สะพานมีรอยแตกร้าวทำให้หน้าตัดของสะพานเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งตำแหน่งที่ติดตั้งเหล็กสำหรับวัดความเครียดห้ามมีรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตมิฉะนั้นจะไม่สามารถวัดความเครียดได้ถูกต้อง การตรวจสอบดูแลแผ่นเหล็กวัดความเครียดต้องทำอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากสกรูยึดคานตัวจำเป็นต้องทำการยึดซ้ำ ความยุ่งยากในการติดตั้งเนื่องจากเดือยที่ใช้ยึดต้องตั้งฉากกับผิวคอนกรีตเพื่อให้แผ่นเหล็กแนบสนิทกับผิวคอนกรีตและรูสำหรับยึดแผ่นเหล็กกับขนาดของเดือยยึดต้องใกล้เคียงกันมากเพื่อลดการเลื่อนไถลระหว่างผิวคอนกรีตกับแผ่นเหล็กเพื่อให้ค่าความเครียดที่วัดได้ผิดพลาดน้อยที่สุด เป็นต้น

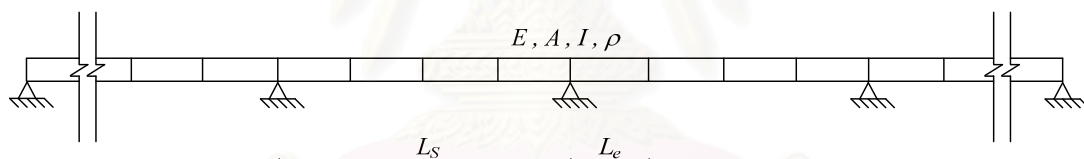
ดังนั้นในการศึกษานี้จะคำนวณน้ำหนักรถที่เคลื่อนที่โดยพิจารณาจากสัญญาณแรงที่วัดได้จากฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนักร่วมกับความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ โดยวิธีนี้จะมีการใช้สัญญาณแรงที่ฐานรองรับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและหน้าตัดของแท่นชั่งน้ำหนักเมื่อใช้ไปนานๆ

## 2.2 การจำลองพฤติกรรมของแท่งซึ่งน้ำหนักภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถ

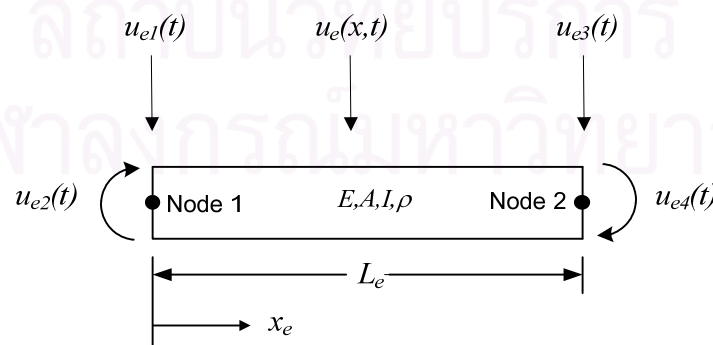
การสร้างแบบจำลองปฏิกิริยาตอบสนองของระหว่างแท่งซึ่งน้ำหนักกับรถเริ่มต้นจากจำลองรูปแบบแท่งซึ่งน้ำหนัก และจำลองรูปแบบรถโดยพิจารณาแยกกัน ต่อมานำแบบจำลองทั้งสองมาพิจารณาร่วมกันโดยมีผลของความขรุขระของผิวทางรวมอยู่ในการพิจารณาด้วย ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้สมการของลากรางจ์ (Lagrange's equation) ในการสร้างสมการการกระจัดของแบบจำลอง

### 2.2.1 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของแท่งซึ่งน้ำหนัก

วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ถูกนำมาในการสร้างแบบจำลองแท่งซึ่งน้ำหนัก โดยแท่งซึ่งจะถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ประกอบกัน แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยที่  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน  $E$  คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน  $\rho$  คือ มวลต่อหน่วยความยาวของคาน  $L_e$  คือ ความยาวของชิ้นส่วนย่อยของคาน  $L_s$  คือ ความยาวระหว่างฐานรองรับ โดยพิจารณาค่า  $E, A, I$  และ  $\rho$  มีค่าคงที่ตลอดทั้งหน้าตัดของแท่งซึ่งน้ำหนัก ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนย่อยของคานจะประกอบด้วย 2 ขั้ว (node) และแต่ละขั้วของชิ้นส่วนคานจะมี 2 องศาความอิสระคือ การแอ่นตัวในแนวตั้ง และการแอ่นตัวในการหมุน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองแท่งซึ่งน้ำหนัก



รูปที่ 2.3 แบบจำลองชิ้นส่วนของแท่งซึ่งน้ำหนัก

การแอ่นตัวในแนวตั้งของชิ้นส่วนคานที่ระยะทาง  $x_e$  (local coordinate) และเวลา  $t$  ใดๆ จะต้องสอดคล้องตามสมการ (2.1)

$$\frac{\partial^2}{\partial x_e^2} \left[ EI \frac{\partial^2 u_e(x_e, t)}{\partial x_e^2} \right] = 0 \quad (2.1)$$

สำหรับในกรณี  $EI$  มีค่าคงที่ สมการ (2.1) จะกลายเป็น  $\frac{\partial^4 u_e(x_e, t)}{\partial x_e^4} = 0$  ซึ่งสามารถอินทิเกรตได้เป็น

$$u_e(x_e, t) = c_1(t)x_e^3 + c_2(t)x_e^2 + c_3(t)x_e + c_4(t) \quad (2.2)$$

โดยที่  $c_i(t)$  คือ ค่าคงที่ของการอินทิเกรต

สมการ (2.2) สามารถใช้ในการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้งของชิ้นส่วนคานได้ ซึ่งมีเงื่อนไขที่ขอบ (boundary condition) ดังนี้

$$\begin{aligned} u_e(0, t) &= u_{e1}(t) & u_e(L_e, t) &= u_{e3}(t) \\ \frac{\partial u_e(0, t)}{\partial x_e} &= u_{e2}(t) & \frac{\partial u_e(L_e, t)}{\partial x_e} &= u_{e4}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้น เมื่อแทนลงในสมการ (2.1) จะสามารถหาค่าคงที่ของการอินทิเกรตได้ คือ

$$c_4(t) = u_{e1}(t) \quad (2.4a)$$

$$c_3(t) = u_{e2}(t) \quad (2.4b)$$

$$c_2(t) = \frac{1}{L_e^2} [3(u_{e3} - u_{e1}) - L_e(2u_{e2} - u_{e4})] \quad (2.4c)$$

$$c_1(t) = \frac{1}{L_e^3} [2(u_{e1} - u_{e3}) - L_e(u_{e2} + u_{e4})] \quad (2.4d)$$

แทนสมการ (2.4) ลงในสมการ (2.2) และทำการจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของการแอ่นตัวเชิงขั้ว (nodal displacement) จะได้สมการการแอ่นตัวของชิ้นส่วนคานที่ระยะ  $x_e$  และเวลา  $t$  ใดๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} u_e(x_e, t) &= \left[ 1 - \frac{3x_e^2}{L_e^2} + \frac{2x_e^3}{L_e^3} \right] u_{e1}(t) + L_e \left[ \frac{x_e}{L_e} - \frac{2x_e^2}{L_e^2} + \frac{x_e^3}{L_e^3} \right] u_{e2}(t) \\ &+ \left[ \frac{3x_e^2}{L_e^2} - \frac{2x_e^3}{L_e^3} \right] u_{e3}(t) + L_e \left[ -\frac{x_e^2}{L_e^2} + \frac{x_e^3}{L_e^3} \right] u_{e4}(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ที่อยู่ข้างหน้า  $u_{ei}(t)$  คือฟังก์ชันพื้นฐาน (shape function) ของการแอ่นตัวของชิ้นส่วนคาน

เมตริกซ์มวล (mass matrix) ของชิ้นส่วนคานสามารถคำนวณได้จากการแทนสมการ (2.5) ลงไปในสมการของพลังงานจลน์

$$T_e(t) = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \rho A \left[ \frac{\partial u_e(x_e, t)}{\partial t} \right]^2 dx_e \quad (2.6)$$

และสมการ (2.6) สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ คือ

$$T_e(t) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}_e^T \mathbf{M}_e \dot{\mathbf{u}}_e \quad (2.7)$$

โดยที่  $\mathbf{M}_e$  คือ เมตริกซ์มวล (mass matrix) และเวกเตอร์  $\dot{\mathbf{u}}_e$  คือ อนุพันธ์ของเวกเตอร์  $\mathbf{u}_e(t)$  เทียบกับเวลาซึ่งเวกเตอร์  $\mathbf{u}_e(t)$  สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\mathbf{u}_e(t) = \begin{bmatrix} u_{e1}(t) \\ u_{e2}(t) \\ u_{e3}(t) \\ u_{e4}(t) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

หลังจากทำการอินทิเกรตและจัดรูปแบบเวกเตอร์ของการแ่นตัวที่ขั้ว (nodal displacement) จะได้เมตริกซ์มวลสำหรับชิ้นส่วนคานดังนี้

$$\mathbf{M}_e = \frac{\rho A L_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L_e & 54 & -13L_e \\ 22L_e & 4L_e^2 & 13L_e & -3L_e^2 \\ 54 & 13L_e & 156 & -22L_e \\ -13L_e & -3L_e^2 & -22L_e & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถหาเมตริกซ์สติฟเนส (stiffness matrix) ได้จากการแทนสมการ (2.5) ลงในสมการพลังงานความเครียด (strain energy) ซึ่งกำหนดโดย

$$V_e(t) = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} EI \left[ \frac{\partial^2 u_e(x_e, t)}{\partial x_e^2} \right]^2 dx_e \quad (2.10)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบ

$$V_e(t) = \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}_e \quad (2.11)$$

โดยที่  $\mathbf{u}_e$  ได้กำหนดไว้ข้างต้น ดังนั้นเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนคาน คือ

$$\mathbf{K}_e = \frac{EI}{L_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_e & -12 & 6L_e \\ 6L_e & 4L_e^2 & -6L_e & 2L_e^2 \\ -12 & -6L_e & 12 & -6L_e \\ 6L_e & 2L_e^2 & -6L_e & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อเราได้เมตริกซ์มวล ( $\mathbf{M}_e$ ) และเมตริกซ์สติฟเนส ( $\mathbf{K}_e$ ) ของแต่ละชิ้นส่วนคานแล้ว เราจะรวม (assembly) ชิ้นส่วนคานแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันตามองศาความอิสระที่ตรงกัน ซึ่งจะได้เมตริกซ์มวล ( $\mathbf{M}_b$ ) และเมตริกซ์สติฟเนส ( $\mathbf{K}_b$ ) ของระบบแทนซึ่งนำหนักทั้งหมด

## 2.2.2 การหาเมตริกซ์ความหน่วง (damping matrix) ของระบบแทนซึ่งนำหนัก

พิจารณาสมการทั่วไปของการเคลื่อนที่อิสระ

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อเรานำ  $\mathbf{M}^{-1}$  คูณตลอดสมการ (2.13) จะได้

$$\ddot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u} = 0 \quad (2.14)$$

โดยที่  $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$$

กำหนดให้  $\mathbf{u} = \mathbf{V}\mathbf{q}$  (2.15)

โดยที่  $\mathbf{V}$  คือ โยเกนเวคเตอร์ (eigenvector) ของเมตริกซ์  $\bar{\mathbf{K}}$

แทนสมการ (2.15) ลงใน (2.14) และคูณตลอดด้วย  $\mathbf{V}^{-1}$  จะได้

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{C}}\mathbf{V}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{K}}\mathbf{V}\mathbf{q} = 0 \quad (2.16)$$

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^*\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*\mathbf{q} = 0 \quad (2.17)$$

โดยที่  $\mathbf{K}^* = \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{K}}\mathbf{V}$

$$= \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ซึ่งหากสมมติให้มีคุณสมบัติ orthogonality เช่นเดียวกับ  $\mathbf{K}^*$  จะได้

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{V}^{-1} \bar{\mathbf{C}} \mathbf{V}$$

$$= \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\xi_2 \omega_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 2\xi_n \omega_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

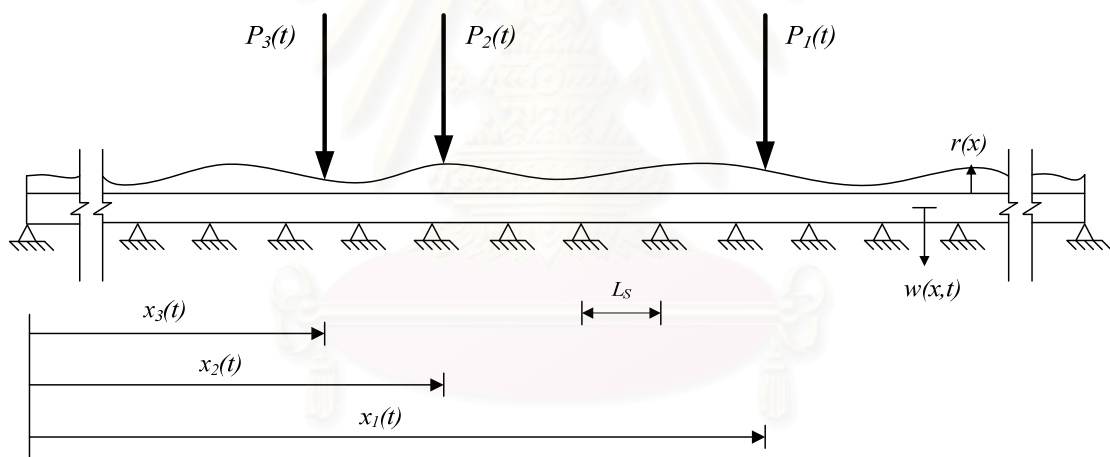
$\xi_i$  คือ สัดส่วนความหน่วง (damping ratio) ของโหมดที่  $i$

$\omega_i$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของโหมดที่  $i$

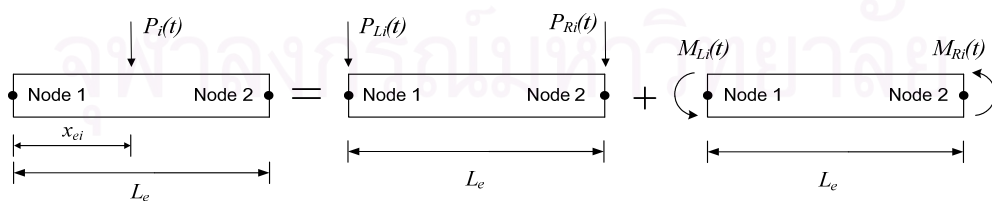
เมื่อเราทราบค่า  $\xi_i$  และ  $\omega_i$  แล้ว ก็จะสามารถหาเมตริกซ์  $\bar{\mathbf{C}}$  และ  $\mathbf{C}^*$  ได้ ดังนี้

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{V} \mathbf{C}^* \mathbf{V}^{-1} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{M} \bar{\mathbf{C}} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.4 แบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนักโดยมีแรงมากระทำ



รูปที่ 2.5 การแปลงแรงไปกระทำที่ขั้วของชิ้นส่วนแท่นซึ่งน้ำหนัก

เมื่อมีแรงมากระทำกับแท่นซึ่งน้ำหนัก แรงจะมีการกระจายเป็นแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ที่ขั้วของชิ้นส่วนย่อยของคานดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแรงเหล่านี้จะมีผลต่อการสั่นตัวของแท่นซึ่งน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อแรงเคลื่อนที่เข้าไปใกล้ฐานรองรับจะมีการกระจายเป็นแรงแนวตั้งกระทำที่ฐานรองรับ ซึ่งแรงแนวตั้งดังกล่าวจะไม่มีผล

ต่อการสั่นตัวของแท่นซึ่งน้ำหนัก ดังนั้นในการพิจารณาสมการการสั่นของแท่นซึ่งน้ำหนักจึงไม่คิดองศาอิสระแนวตั้งที่ฐานรองรับ เมื่อลดองศาอิสระแนวตั้งที่ฐานรองรับใน  $\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b$  และ  $\mathbf{K}_b$  จะได้  $\mathbf{M}_{b,M}, \mathbf{C}_{b,M}$  และ  $\mathbf{K}_{b,M}$  ดังนั้นสมการการสั่นของแท่นซึ่งน้ำหนักสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{M}_{b,M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{b,M} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{b,M} \mathbf{u} = \mathbf{P}_M \quad (2.22)$$

โดยที่  $\mathbf{P}_M = \mathbf{H}_{c,M} \mathbf{P}_{\text{int}}$

$$\mathbf{P}_{\text{int}} = \begin{Bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{Bmatrix} \quad \mathbf{H}_{c,M} = \begin{Bmatrix} 0 \cdots 0 \cdots 0 \cdots \mathbf{H}_{1,M} \cdots 0 \\ 0 \cdots 0 \cdots \mathbf{H}_{2,M} \cdots 0 \cdots 0 \\ 0 \cdots \mathbf{H}_{3,M} \cdots 0 \cdots 0 \cdots 0 \end{Bmatrix}^T$$

$$\mathbf{H}_{i,M} = \begin{Bmatrix} 1 - \frac{3x_{ei}^2}{L_e^2} + \frac{2x_{ei}^3}{L_e^3} \\ L \left( \frac{x_{ei}}{L_e} - \frac{2x_{ei}^2}{L_e^2} + \frac{x_{ei}^3}{L_e^3} \right) \\ \frac{3x_{ei}^2}{L_e^2} - \frac{2x_{ei}^3}{L_e^3} \\ L \left( -\frac{x_{ei}^2}{L_e^2} + \frac{x_{ei}^3}{L_e^3} \right) \end{Bmatrix}$$

$\mathbf{P}_M$  คือ เวกเตอร์แรงที่ข้อซึ่งถูกแปลงมาจากแรงปฏิกิริยา

$\mathbf{P}_{\text{int}}$  คือ เวกเตอร์แรงปฏิกิริยาระหว่างรถกับแท่นซึ่งน้ำหนัก

$\mathbf{H}_{c,M}$  คือ เมตริกซ์แปลงแรงปฏิกิริยา ณ จุดใดๆ เป็นแรงที่ข้อของชิ้นส่วนย่อยของแท่นซึ่งน้ำหนัก โดยไม่พิจารณาแรงแนวตั้งที่กระทำต่อฐานรองรับ

$x_{ei}$  คือ ระยะระหว่างแรง  $i$  กับข้อที่ 1 ของชิ้นส่วนแท่นซึ่งน้ำหนักซึ่งถูกแรง  $P_i$  กระทำ

$i = 1, 2$  และ  $3$

$\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}$  และ  $\ddot{\mathbf{u}}$  คือ การกระจัด ความเร็ว และความเร่งขององศาความอิสระของแท่นซึ่งน้ำหนัก

ตามลำดับ

### 2.2.3 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของรถ

เราจะพิจารณารูปแบบของรถให้อยู่ในระนาบ โดยมี 5 ระดับชั้นความเสรี ซึ่งระดับชั้นความเสรีแรกเป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของศูนย์กลางมวลของรถ ( $y_v$ ) ระดับชั้นความเสรีที่สองเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมของศูนย์กลางมวลของรถ ( $\theta_v$ ) ระดับชั้นความเสรีที่สามเป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเพลาด้านหน้าของรถ ( $y_1$ ) ระดับชั้นความเสรีที่สี่เป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเพลาด้านหน้าของรถ ( $y_2$ ) ระดับชั้นความเสรีที่ห้าเป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเพลาด้านหน้าของรถ ( $y_3$ ) ซึ่งลักษณะแบบจำลองของรถ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6

ระบบการสั่นไหวของเพลารถและยางรถสามารถแทนได้ด้วยชุดของความหน่วงและสปริง โดยมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น ค่าสถิติเนสของสปริงสมมติให้เป็นค่าคงที่ การจำลองรูปแบบมวลของรถจะแบ่งเป็น 2 แบบคือ ส่วนที่เป็นมวลของรถแนวตั้ง ( $M_v$ ) และส่วนที่เป็นมวลของรถเชิงมุม ( $I_v$ )

เราสามารถอธิบายการสั่นไหวของตัวรถได้ โดยผ่านสมการการเคลื่อนที่ของลากรานจ์ (Lagrange's equation) พลังงานและงานเนื่องจากแรงไม่อนุรักษ์ (nonconservative force) จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดทั่วไป (generalized coordinate) และอนุพันธ์ของตัวแปรเทียบกับเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดัง สมการ

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.23)$$

โดยที่

$T$	คือ พลังงานจลน์ทั้งหมดของระบบ
$V$	คือ พลังงานศักย์ทั้งหมดของระบบ
$q_i$	คือ พิกัดทั่วไป (generalized coordinates)
$Q_i$	คือ แรงทั่วไป (generalized force) ที่สอดคล้องกับ $q_i$

จากสมมติฐานว่าตัวรถสั่นไหวในทิศทางในแนวตั้งและไม่มีการกระจัดในแนวราบ เมื่อเกิดการสั่นไหวอย่างอิสระ พลังงานจลน์ของตัวรถสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$T = \frac{1}{2} m_v \dot{y}_v^2 + \frac{1}{2} I_v \dot{\theta}_v^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2 \quad (2.24)$$

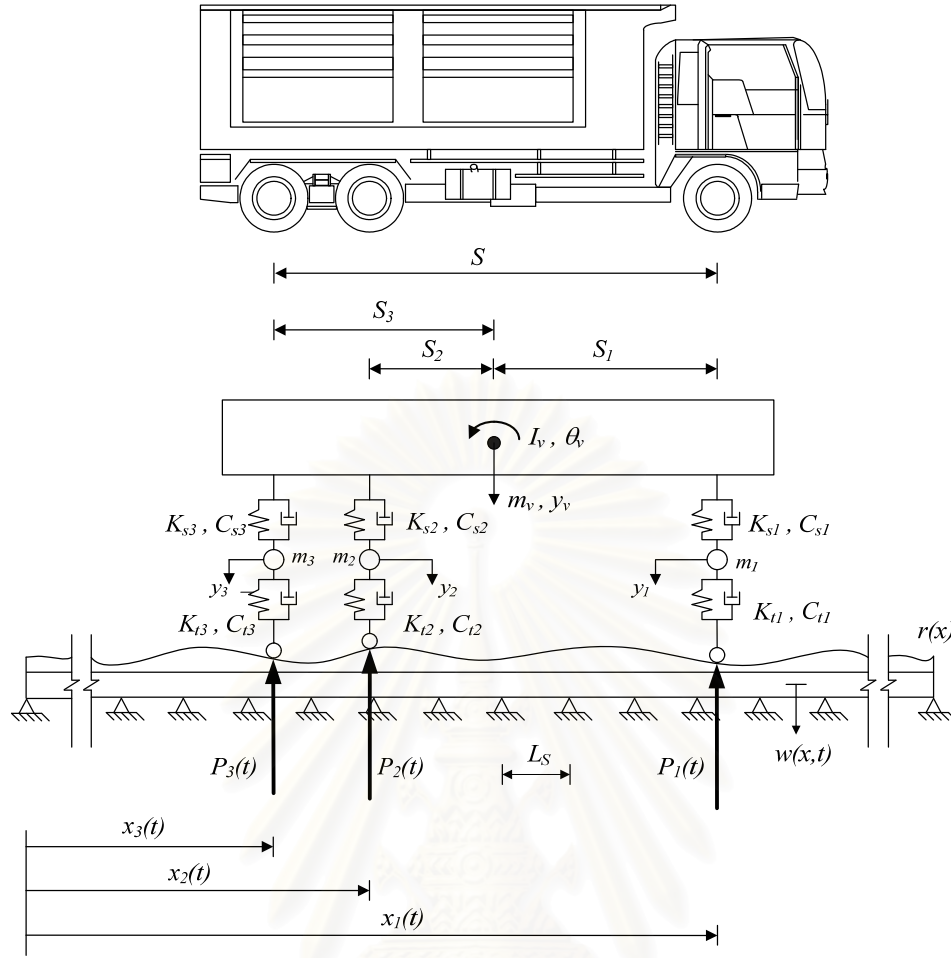
ในขณะที่ยังมีการสั่นไหวขึ้นลงในแนวตั้ง สปริงจะเกิดการยืดและหด ซึ่งสิ่งนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ยืดหยุ่นที่เก็บสะสมอยู่ในสปริง และเมื่อรวมผลของพลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของมวลแข็งเกร็งของตัวรถ เราสามารถเขียนพลังงานศักย์ทั้งหมดของระบบได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} K_{t1} (y_1 - w(x_1(t), t) - r(x_1(t)))^2 + \frac{1}{2} K_{t2} (y_2 - w(x_2(t), t) - r(x_2(t)))^2 \\ & + \frac{1}{2} K_{t3} (y_3 - w(x_3(t), t) - r(x_3(t)))^2 + \frac{1}{2} K_{s1} (y_v - S_1 \theta_v - y_1)^2 \\ & + \frac{1}{2} K_{s2} (y_v + S_2 \theta_v - y_2)^2 + \frac{1}{2} K_{s3} (y_v + S_3 \theta_v - y_3)^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากหลักการงานสมมติ (virtual work) ถ้าที่เวลา  $t$  ใดๆ เรากำหนดให้ความหน่วงของรถมีการกระจัดสมมติ งานสมมติของแรงไม่อนุรักษ์เนื่องจากความหน่วง (nonconservative damping force) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \delta W = & C_{t1} (\dot{y}_1 - \dot{w}(x_1(t), t) - \dot{r}(x_1(t))) \delta (y_1 - w(x_1(t), t) - r(x_1(t))) \\ & + C_{t2} (\dot{y}_2 - \dot{w}(x_2(t), t) - \dot{r}(x_2(t))) \delta (y_2 - w(x_2(t), t) - r(x_2(t))) \\ & + C_{t3} (\dot{y}_3 - \dot{w}(x_3(t), t) - \dot{r}(x_3(t))) \delta (y_3 - w(x_3(t), t) - r(x_3(t))) \\ & + C_{s1} (\dot{y}_v - S_1 \dot{\theta}_v - \dot{y}_1) \delta (y_v - S_1 \theta_v - y_1) \\ & + C_{s2} (\dot{y}_v + S_2 \dot{\theta}_v - \dot{y}_2) \delta (y_v + S_2 \theta_v - y_2) \\ & + C_{s3} (\dot{y}_v + S_3 \dot{\theta}_v - \dot{y}_3) \delta (y_v + S_3 \theta_v - y_3) \end{aligned} \quad (2.26)$$





รูปที่ 2.6 รูปแบบจำลองของรถบรรทุก

โดยทั่วไป งานสมมติจะเขียนอยู่ในรูปแบบของแรงไม่อนุรักษ์ (nonconservative force) และการกระจัดสมมติ (virtual displacement) ดังสมการ

$$\delta W = Q_1 \delta y_v + Q_2 \delta \theta_v + Q_3 \delta y_1 + Q_4 \delta y_2 + Q_5 \delta y_3 \quad (2.27)$$

จากการจัดรูปแบบสมการ (2.26) ตามสมการ (2.27) จะได้แรงทั่วไป (generalized force) ดังสมการ

$$Q_1 = [C_{s1}(\dot{y}_v - S_1 \dot{\theta}_v - \dot{y}_1) + C_{s2}(\dot{y}_v + S_2 \dot{\theta}_v - \dot{y}_2) + C_{s3}(\dot{y}_v + S_3 \dot{\theta}_v - \dot{y}_3)] \quad (2.28a)$$

$$Q_2 = [-S_1 C_{s1}(\dot{y}_v - S_1 \dot{\theta}_v - \dot{y}_1) + S_2 C_{s2}(\dot{y}_v + S_2 \dot{\theta}_v - \dot{y}_2) + S_3 C_{s3}(\dot{y}_v + S_3 \dot{\theta}_v - \dot{y}_3)] \quad (2.28b)$$

$$Q_3 = [C_{t1}(\dot{y}_1 - \dot{w}(x_1(t), t)) - C_{s1}(\dot{y}_v - S_1 \dot{\theta}_v - \dot{y}_1)] \quad (2.28c)$$

$$Q_4 = [C_{t2}(\dot{y}_2 - \dot{w}(x_2(t), t)) - C_{s2}(\dot{y}_v + S_2 \dot{\theta}_v - \dot{y}_2)] \quad (2.28d)$$

$$Q_5 = [C_{t3}(\dot{y}_3 - \dot{w}(x_3(t), t)) - C_{s3}(\dot{y}_v + S_3 \dot{\theta}_v - \dot{y}_3)] \quad (2.28e)$$

โดยการแทนสมการ (2.24), (2.25) และ (2.28) ลงในสมการ (2.23) จะได้สมการการกระจัดซึ่งอธิบายถึงลักษณะของการสั่นไหวของรถ สมการการกระจัดสามารถจัดในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังแสดง

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{Y}}_v \\ \ddot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_v \\ \dot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_v \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{\text{int}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{11} &= \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & I_v \end{bmatrix} & \mathbf{M}_{22} &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{11} &= \begin{bmatrix} (C_{s1} + C_{s2} + C_{s3}) & (-S_1 C_{s1} + S_2 C_{s2} + S_3 C_{s3}) \\ (-S_1 C_{s1} + S_2 C_{s2} + S_3 C_{s3}) & (S_1^2 C_{s1} + S_2^2 C_{s2} + S_3^2 C_{s3}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{12} = \mathbf{C}_{21}^T &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & -C_{s2} & -C_{s3} \\ S_1 C_{s1} & -S_2 C_{s2} & -S_3 C_{s3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{22} &= \begin{bmatrix} C_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{s3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_{11} &= \begin{bmatrix} (K_{s1} + K_{s2} + K_{s3}) & (-S_1 K_{s1} + S_2 K_{s2} + S_3 K_{s3}) \\ (-S_1 K_{s1} + S_2 K_{s2} + S_3 K_{s3}) & (S_1^2 K_{s1} + S_2^2 K_{s2} + S_3^2 K_{s3}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_{12} = \mathbf{K}_{21}^T &= \begin{bmatrix} -K_{s1} & -K_{s2} & -K_{s3} \\ S_1 K_{s1} & -S_2 K_{s2} & -S_3 K_{s3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_{22} &= \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{s3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y}_v &= \begin{Bmatrix} y_v \\ \theta_v \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_s = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{P}_{\text{int}} = \begin{Bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{M}_s = \begin{Bmatrix} (m_1 + a_1 m_v)g \\ (m_2 + a_2 m_v)g \\ (m_3 + a_3 m_v)g \end{Bmatrix} \\ a_1 &= \frac{k_1(k_2 S_2(S_1 + S_2) + k_3 S_3 S)}{k_1 k_2 (S_1 + S_2)^2 + k_2 k_3 (S_3 - S_2)^2 + k_1 k_3 S^2} \\ a_2 &= \frac{S_3 - a_1 S}{S_3 - S_2} \\ a_3 &= \frac{(S_1 + S_2)a_1 - S_2}{S_3 - S_2} \\ k_i &= \frac{k_{ii} k_{si}}{k_{ii} + k_{si}} \quad ; \quad i = 1, 2 \text{ และ } 3 \end{aligned}$$

## 2.2.4 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของปฏิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักกับรถ

แบบจำลองของแท่นชั่งน้ำหนักกับรถที่ได้กล่าวมาแล้ว จะถูกนำมาพิจารณาร่วมกัน นอกจากนี้เพื่อที่จะทำให้อุปปฏิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักกับรถมีความใกล้เคียงกับความจริงมากขึ้น ความขรุขระของผิวถนนบนแท่นชั่งน้ำหนักจึงถูกนำมาพิจารณาด้วย

จากการศึกษาพบว่าความขรุขระของผิวถนนบนแท่นชั่งน้ำหนักเป็นสาเหตุหลักที่มีอิทธิพลต่อปฏิริยาตอบสนองการสั่นไหวของแท่นชั่งน้ำหนักและรถ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สมการที่ใช้ในการหาความขรุขระของผิวถนนบนแท่นชั่งน้ำหนักประเภท B โดยใช้มาตรฐาน ISO 8606 (ISO, 1995)

$$S_d(f) = S_d(f_0) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha}, \quad f_0 = 0.1, \quad \alpha = 2 \quad (2.30)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ของความขรุขระ (รอบ/เมตร)

จากสมการ 2.30 เราสามารถนำมาใช้เพื่อจำลองหน้าข้างความขรุขระของแท่นชั่งน้ำหนัก (roughness profile) ได้โดยทำการเขียนกราฟระหว่าง  $S_d$  กับ  $f$  ซึ่งระดับของความขรุขระบนแท่นชั่งน้ำหนักที่ระยะ  $x$  ใดๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$r(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4S(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i x + R_i) \quad (2.31)$$

$$f_i = i\Delta f$$

โดยที่  $r(x)$  คือ ระดับของความขรุขระบนแท่นชั่งน้ำหนักที่ระยะ  $x$  ใดๆ

$f_i$  คือ ค่า  $f$  ที่จุดกึ่งกลางของช่วงที่  $i$

$R_i$  คือ ค่าตัวเลขสุ่ม (random number) ของช่วงที่  $i$

สมการแรงปฏิริยาระหว่างรถกับแท่นชั่งน้ำหนักเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{P}_{\text{int}} = \begin{cases} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{cases} = \begin{cases} K_{t1}(y_1 - w(x_1(t), t) - r(x_1(t))) + C_{t1}(\dot{y}_1 - \dot{w}(x_1(t), t)) + (m_1 + a_1 m_v)g \\ K_{t2}(y_2 - w(x_2(t), t) - r(x_2(t))) + C_{t2}(\dot{y}_2 - \dot{w}(x_2(t), t)) + (m_2 + a_2 m_v)g \\ K_{t3}(y_3 - w(x_3(t), t) - r(x_3(t))) + C_{t3}(\dot{y}_3 - \dot{w}(x_3(t), t)) + (m_3 + a_3 m_v)g \end{cases}$$

หรือ

$$\mathbf{P}_{\text{int}} = \mathbf{K}_t \mathbf{Y}_s + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{Y}}_s - \mathbf{K}_t (\mathbf{w}(x, t) + \mathbf{r}(x)) - \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{w}}(x, t) + \mathbf{M}_s \quad (2.32)$$

โดยที่  $\mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{t2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{t3} \end{bmatrix}$   $\mathbf{C}_t = \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{t2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{t3} \end{bmatrix}$

$$\mathbf{w}(x,t) = \begin{cases} w(x_1(t),t) \\ w(x_2(t),t) \\ w(x_3(t),t) \end{cases} \quad \mathbf{r}(x) = \begin{cases} r(x_1(t)) \\ r(x_2(t)) \\ r(x_3(t)) \end{cases}$$

$w(x_i(t),t)$  คือ การโก่งตัวของแท่งซึ่งน้ำหนัก ณ ตำแหน่งที่แรง  $P_i(t)$  กระทำ ที่เวลา  $t$  ใดๆ

$\dot{w}(x_i(t),t)$  คือ ความเร็วในการโก่งตัวของแท่งซึ่งน้ำหนัก ณ ตำแหน่งที่แรง  $P_i(t)$  กระทำ ที่เวลา  $t$  ใดๆ

จัดรูป  $w(x_i(t),t)$  ใหม่ได้ดังนี้

$$\mathbf{w}(x,t) = \mathbf{H}_{c,M}^T(x) \cdot \mathbf{u}(t)$$

$$\dot{\mathbf{w}}(x,t) = \mathbf{H}_{c,M}^T(x) \cdot \dot{\mathbf{u}}(t)$$

โดยที่  $\mathbf{u}$  คือการกระจัดขององศาความอิสระของแท่งซึ่งน้ำหนัก

$$\mathbf{H}_{c,M} = \begin{cases} 0 \cdots 0 \cdots 0 \cdots \mathbf{H}_{1,M} \cdots 0 \\ 0 \cdots 0 \cdots \mathbf{H}_{2,M} \cdots 0 \cdots 0 \\ 0 \cdots \mathbf{H}_{3,M} \cdots 0 \cdots 0 \cdots 0 \end{cases}^T$$

$$\mathbf{H}_{i,M} = \begin{cases} 1 - \frac{3x_{ei}^2}{L_e^2} + \frac{2x_{ei}^3}{L_e^3} \\ L \left( \frac{x_{ei}}{L_e} - \frac{2x_{ei}^2}{L_e^2} + \frac{x_{ei}^3}{L_e^3} \right) \\ \frac{3x_{ei}^2}{L_e^2} - \frac{2x_{ei}^3}{L_e^3} \\ L \left( -\frac{x_{ei}^2}{L_e^2} + \frac{x_{ei}^3}{L_e^3} \right) \end{cases} \quad i = 1, 2 \text{ และ } 3$$

ดังนั้น

$$\mathbf{P}_{\text{int}} = \mathbf{K}_t \mathbf{Y}_s + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{Y}}_s - \mathbf{K}_t (\mathbf{H}_{c,M}^T \mathbf{u} + \mathbf{r}(x)) - \mathbf{C}_t \mathbf{H}_{c,M}^T \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{M}_s \quad (2.33)$$

จากสมการ(2.22) สามารถจัดรูปสมการการกระจัดของแท่งซึ่งน้ำหนักให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}_{b,M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{b,M} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{b,M} \mathbf{u} = \mathbf{H}_{c,M} \mathbf{P}_{\text{int}}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{b,M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{Y}}_v \\ \ddot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{C}_{b,M} + \mathbf{H}_{c,M} \mathbf{C}_t \mathbf{H}_{c,M}^T) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}_{c,M} \mathbf{C}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{Y}}_v \\ \dot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{K}_{b,M} + \mathbf{H}_{c,M} \mathbf{K}_t \mathbf{H}_{c,M}^T) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}_{c,M} \mathbf{K}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{Y}_v \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{c,M} (\mathbf{M}_s - \mathbf{K}_t \mathbf{r}(x)) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

จากสมการ(2.29) สามารถจัดรูปสมการการกระจัดของรถใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{Y}}_v \\ \ddot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_v \\ \dot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_v \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} = -\begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{int} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s \end{Bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{Y}}_v \\ \ddot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ -\mathbf{C}_t \mathbf{H}_{c,M}^T & \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{Y}}_v \\ \dot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ -\mathbf{K}_t \mathbf{H}_{c,M}^T & \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{Y}_v \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.35)$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของแท่นซึ่งน้ำหนักและรถรวมกัน โดยการรวมสมการ (2.34) และ (2.35) ทำให้ได้สมการการกระจัดของทั้งระบบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{b,M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{Y}}_v \\ \ddot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{C}_{b,M} + \mathbf{H}_{c,M} \mathbf{C}_t \mathbf{H}_{c,M}^T) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}_{c,M} \mathbf{C}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ -\mathbf{C}_t \mathbf{H}_{c,M}^T & \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{Y}}_v \\ \dot{\mathbf{Y}}_s \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} (\mathbf{K}_{b,M} + \mathbf{H}_{c,M} \mathbf{K}_t \mathbf{H}_{c,M}^T) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}_{c,M} \mathbf{K}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ -\mathbf{K}_t \mathbf{H}_{c,M}^T & \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{Y}_v \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{H}_{c,M} (\mathbf{M}_s - \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x)) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.36)$$

### 2.2.5 การหาคำตอบด้วยวิธีนิวมาร์คเบต้า (Newmark's $\beta$ method)

ปัญหาทางพลศาสตร์จะอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่สองโดยขึ้นอยู่กับเวลา ในการวิเคราะห์ปัญหาจะพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาจาก  $t$  ไป  $t + \Delta t$  โดยที่  $\Delta t$  เป็นการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่น้อยมาก สมการต่อไปนี้จะแสดงการเคลื่อนที่ทั่วไปของโครงสร้าง ณ เวลา  $t + \Delta t$

$$[M]\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} + [K]\{U\}_{t+\Delta t} = \{P\}_{t+\Delta t} \quad (2.37)$$

โดยที่  $[M]$ ,  $[C]$  และ  $[K]$  คือ เมตริกซ์ของมวล, เมตริกซ์ความหน่วง และเมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้าง

$\{U\}$  คือ การกระจัดของโครงสร้าง

$\{P\}$  คือ แรงที่มากระทำต่อโครงสร้าง

Newmark ได้เสนอวิธีแก้ปัญหาลักษณะทางพลศาสตร์ ซึ่งพิจารณาเป็นช่วงของเวลา โดยต้องทราบข้อมูลของระบบที่เวลา  $t$  ในการวิเคราะห์ Newmark เสนอสมการพื้นฐานเพื่อใช้ในการหาความเร็ว และการกระจัดของระบบที่เวลา  $t + \Delta t$

$$\begin{aligned}\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} &= \{\dot{U}\}_t + [(1-\gamma)\{\ddot{U}\}_t + \gamma\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}] \cdot \Delta t \\ \{U\}_{t+\Delta t} &= \{U\}_t + \{\dot{U}\}_t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\{\ddot{U}\}_t + \beta\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}\right] \cdot (\Delta t)^2\end{aligned}\quad (2.38)$$

ตัวแปร  $\beta$  เป็นความผันแปรของความเร่งในการเปลี่ยนเวลา  $t$  ไป  $t + \Delta t$  ส่วนตัวแปร  $\gamma$  ซึ่งความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของความหน่วงเชิงตัวเลข (property of numerical damping) โดยค่า  $\gamma$  ได้มาจากการพิจารณาในช่วงของเวลา สำหรับการศึกษานี้จะใช้วิธีค่าความเร่งเฉลี่ยคงที่ (constant average acceleration method) โดยที่ตัวแปร  $\beta$ ,  $\gamma$  มีค่าเท่ากับ  $1/4$  และ  $1/2$  ตามลำดับ

ตามสมการ (2.38) ค่าความเร่ง และความเร็ว ที่เวลา  $t + \Delta t$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} &= a_0(\{U\}_{t+\Delta t} - \{U\}_t) - a_2\{\dot{U}\}_t - a_3\{\ddot{U}\}_t \\ \{\dot{U}\}_{t+\Delta t} &= \{\dot{U}\}_t + a_6\{\dot{U}\}_t + a_7\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}\end{aligned}\quad (2.39)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}a_0 &= \frac{1}{\beta\Delta t^2}, & a_1 &= \frac{\gamma}{\beta\Delta t}, & a_2 &= \frac{1}{\beta\Delta t}, \\ a_3 &= \frac{1}{2\beta} - 1, & a_4 &= \frac{\gamma}{\beta} - 1, & a_5 &= \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\gamma}{\beta} - 2\right), \\ a_6 &= \Delta t(1 - \gamma), & a_7 &= \gamma\Delta t.\end{aligned}\quad (2.40)$$

แทนค่าตัวแปรในสมการที่ (2.39) ลงไปในสมการที่ (2.37) และจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$[K_{eff}]\{U\}_{t+\Delta t} = \{P_{eff}\}_{t+\Delta t}\quad (2.41)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}[K_{eff}] &= a_0[M] + a_1[C] + [K], \\ \{P_{eff}\}_{t+\Delta t} &= \{P\}_{t+\Delta t} + [M](a_0\{U\}_t + a_2\{\dot{U}\}_t + a_3\{\ddot{U}\}_t) \\ &\quad + [C](a_1\{U\}_t + a_4\{\dot{U}\}_t + a_5\{\ddot{U}\}_t)\end{aligned}\quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.41) การกระจัดของโครงสร้าง  $\{U\}$  ที่เวลา  $t + \Delta t$  สามารถหาได้โดยการคูณด้วยเมตริกซ์อินเวอร์สของ  $[K_{eff}]$

$$\{U\}_{t+\Delta t} = [K_{eff}]^{-1} \{P_{eff}\}_{t+\Delta t} \quad (2.43)$$

เมื่อทราบการกระจัดของโครงสร้างที่เวลา  $t + \Delta t$  ดังนั้นความเร็วและความเร่งที่เวลา  $t + \Delta t$  สามารถหาได้จากสมการ (2.39) เมื่อทราบการกระจัด ความเร็ว และความเร่งที่เวลา  $t + \Delta t$  เราก็สามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อหาข้อมูลในเวลาถัดไป โดยทำตามกระบวนการข้างต้นก็จะได้ข้อมูลของโครงสร้างที่เวลาต่างๆ

## 2.2.6 การหาแรงพื้นฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนัก

การหาแรงพื้นฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนักขณะรถวิ่งผ่าน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\mathbf{R}(t) = -\mathbf{K}_{b,P} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{H}_{c,P}(t) \cdot \mathbf{P}_{int}(t) \quad (2.44)$$

โดยที่  $\mathbf{R}(t)$  คือ เวกเตอร์แรงพื้นฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนักที่เวลา  $t$  ใดๆ

$\mathbf{K}_{b,P}$  คือ เมตริกซ์สติฟเนสซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างองศาความอิสระของแท่นชั่งน้ำหนักและแรงแนวตั้งที่ตำแหน่งฐานรองรับ

$\mathbf{H}_{c,P}$  คือ เมตริกซ์แปลงแรงปฏิกริยา ณ จุดใดๆ เป็นแรงแนวตั้ง ณ ฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนัก

$\mathbf{P}_{int}(t)$  คือ เวกเตอร์แรงปฏิกริยาระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักและรถที่เวลา  $t$  ใดๆ

$\mathbf{u}(t)$  คือ เวกเตอร์การกระจัดของแท่นชั่งน้ำหนักที่เวลา  $t$  ใดๆ

ซึ่งค่าการกระจัดของแท่นชั่งน้ำหนัก  $\mathbf{u}(t)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.43) และแรงปฏิกริยาระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักและรถ  $\mathbf{P}_{int}(t)$  คำนวณได้จากสมการที่ (2.33) ดังนั้น เมื่อนำค่า  $\mathbf{u}(t)$  และ  $\mathbf{P}_{int}(t)$  แทนในสมการที่ (2.44) ก็จะได้ค่าแรงพื้นฐานรองรับของแท่นชั่งน้ำหนักขณะรถวิ่งผ่าน

## 2.3 การหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเทคนิคการหาแรงที่กำลังเคลื่อนที่โดยการใช้หลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของระบบ เช่น สติฟเนส, ความหน่วง (damping) และมวล ภายใต้แรงภายนอกจะไม่นำมาพิจารณา
2. สมมติว่าทราบตำแหน่งของแรง
3. สมมติคุณสมบัติหน้าตัดของแท่นชั่งน้ำหนักมีคงเท่ากันตลอดทั้งแท่นชั่ง

จุดประสงค์ของปัญหานี้คือ การหาแรง  $\hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t)$  ซึ่งทำให้สมการที่ (2.44) มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดมาได้มากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถที่จะวัดได้ทั้งหมด ซึ่งจะมีแค่บางตำแหน่งเท่านั้นที่เราสามารถวัดได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการวัดสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\hat{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t) \quad (2.45)$$

โดยที่  $\hat{\mathbf{R}}(t)$  คือ เวกเตอร์ของการวัดสัญญาณ ณ เวลาใดๆ

$\mathbf{T}(t)$  คือ เมตริกซ์ที่ถูกเลือกเพื่อเชื่อมโยงระหว่างการวัดกับตัวแปร ณ เวลาใดๆ

$\hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t)$  คือ เวกเตอร์ของแรงปฏิกริยาระหว่างเพลากับแท่นชั่งน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ

ปัญหาการวิเคราะห์ระบบสมการในการหาแรงนั้น สามารถนำสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัด มาแสดงให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.45) ซึ่งได้จากการดัดแปลงมาจากสมการที่ (2.44)

$$\mathbf{R}(t) = -\mathbf{K}_{b,p} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{H}_{c,p}(t) \cdot \mathbf{P}_{\text{int}}(t) \quad (2.46)$$

จากสมการการเคลื่อนที่ของแท่นชั่ง สมการที่ (2.22) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_{b,m}^{-1} (\mathbf{P}_M - \mathbf{M}_{b,m} \ddot{\mathbf{u}}(t) - \mathbf{C}_{b,m} \dot{\mathbf{u}}(t)) \quad (2.47)$$

นำ  $\mathbf{u}(t)$  มาแทนในสมการแรงที่ฐานรองรับ

$$\mathbf{R}(t) - \mathbf{K}_{b,p} \cdot \mathbf{K}_{b,m}^{-1} (\mathbf{M}_{b,m} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}_{b,m} \dot{\mathbf{u}}(t)) = (\mathbf{H}_{c,p}(t) - \mathbf{K}_{b,p} \cdot \mathbf{K}_{b,m}^{-1} \cdot \mathbf{H}_{c,m}(t)) \cdot \mathbf{P}_{\text{int}}(t)$$

หรือ 
$$\hat{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t) \quad (2.48)$$

โดยที่ 
$$\mathbf{T}(t) = \mathbf{H}_{c,p}(t) - \mathbf{K}_{b,p} \cdot \mathbf{K}_{b,m}^{-1} \cdot \mathbf{H}_{c,m}(t)$$

$$\hat{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{R}(t) - \mathbf{K}_{b,p} \cdot \mathbf{K}_{b,m}^{-1} (\mathbf{M}_{b,m} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}_{b,m} \dot{\mathbf{u}}(t))$$

จากสมการการทายน้ำหนักจะเห็นได้ว่าการใช้ข้อมูลสองช่วงเวลาคือ ณ เวลาที่ทำการทายและเวลาก่อนหน้าการทายหนึ่งขั้นตอน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในช่วงเวลาที่เริ่มทายในขั้นตอนแรกสุดจะไม่มีข้อมูลก่อนหน้า ดังนั้น จึงสมมติให้สภาวะของแท่นชั่งน้ำหนัก ณ เวลาเริ่มการทายน้ำหนักมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือมีความหมายว่าแท่นชั่งหยุดนิ่งไม่มีการสั่นนั่นเอง

แรง  $\hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t)$  ที่ได้จากการประมาณย่อมมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดจะมีสิ่งรบกวนรวมอยู่ด้วย ซึ่งจากวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) โดยค่าความคลาดเคลื่อน  $\mathbf{E}(t)$  เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{E}(t) = (\hat{\mathbf{R}}(t) - \mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t))^T (\hat{\mathbf{R}}(t) - \mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t))$$

$$\therefore \mathbf{E}(t) = \hat{\mathbf{R}}^T(t) \hat{\mathbf{R}}(t) - 2(\mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t))^T \hat{\mathbf{R}}(t) + (\mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t))^T (\mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t)) \quad (2.49)$$



การหาค่า  $\hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t)$  ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุด สามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับ  $\hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t)$  โดยให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}} &= -2\mathbf{T}^T(t) \cdot \hat{\mathbf{R}}(t) + 2\mathbf{T}^T(t) \cdot \mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t) \\ 0 &= -2\mathbf{T}^T(t) \cdot \hat{\mathbf{R}}(t) + 2\mathbf{T}^T(t) \cdot \mathbf{T}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t) \\ \therefore \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}(t) &= (\mathbf{T}^T(t) \cdot \mathbf{T}(t))^{-1} \mathbf{T}^T(t) \cdot \hat{\mathbf{R}}(t)\end{aligned}\quad (2.50)$$

### 2.3.1 การแก้สมการด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD)

จากสมการที่ (2.48) ระบบสมการเชิงเส้น  $[\mathbf{T}]_{k \times n} \left\{ \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}} \right\}_{n \times 1} = \left\{ \hat{\mathbf{R}} \right\}_{k \times 1}$  เมื่อ  $n \leq k$  สามารถแปลงเมตริกซ์  $\mathbf{T}$  ด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD) ได้ดังนี้

$$[\mathbf{T}]_{k \times n} = [\mathbf{U}]_{k \times k} [\mathbf{S}]_{k \times n} [\mathbf{V}]_{n \times n}^T \quad (2.51)$$

โดยที่เมตริกซ์จัตุรัส  $\mathbf{U}$  มีมิติ  $k \times k$  และมีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์ตั้งฉาก (orthogonal matrix) มีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1k} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{kk} \end{bmatrix}_{k \times k} \quad (2.52)$$

เขียนในรูปของเวกเตอร์ได้เป็น

$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_k \end{Bmatrix}_{k \times k} \quad (2.53)$$

เมื่อ  $\mathbf{u}_i = [u_{i1} \ u_{i2} \ \cdots \ u_{ik}]_{1 \times k}$  โดย  $i = 1, 2, \dots, k$

เมตริกซ์จัตุรัส  $\mathbf{V}$  มีมิติ  $n \times n$  และมีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์ตั้งฉาก (orthogonal matrix) มีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.54)$$

เขียนในรูปของเวกเตอร์ได้เป็น

$$\mathbf{V} = \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_n \end{Bmatrix}_{n \times n} \quad (2.55)$$

เมื่อ  $\mathbf{v}_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \cdots \ v_{in}]_{1 \times n}$  โดย  $i = 1, 2, \dots, k$

และ  $\mathbf{S}$  เป็นเมตริกซ์ทแยง (diagonal matrix) มีมิติ  $k \times n$  มีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_n \end{bmatrix}_{k \times n} \quad (2.56)$$

โดยที่  $\sigma_i$  คือค่าซิงกูลาร์ (singular value) และมีคุณสมบัติคือ  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots, \sigma_n \geq 0$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.51) สามารถแปลงเมตริกซ์  $\mathbf{T}$  ให้อยู่ในรูปของซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันแล้วจึงนำค่า  $\mathbf{T}$  ไปแทนในสมการที่ (2.50) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{\text{int}} &= \left( (\mathbf{USV}^T)^T \cdot (\mathbf{USV}^T) \right)^{-1} (\mathbf{USV}^T)^T \cdot \hat{\mathbf{R}} \\ &= (\mathbf{VS}^T \mathbf{SV}^T)^{-1} (\mathbf{VS}^T \mathbf{U}^T) \cdot \hat{\mathbf{R}} \\ &= (\mathbf{S}^T \mathbf{SV}^T)^{-1} (\mathbf{S}^T \mathbf{U}^T) \cdot \hat{\mathbf{R}} \end{aligned} \quad (2.57)$$

น้ำหนักในเพลาารถสามารถหาได้จากการเฉลี่ยแรงพลศาสตร์ในเพลาารถ แล้วนำน้ำหนักในแต่ละเพลาคำนวณได้มารวมกันก็จะได้น้ำหนักรวมของรถ ซึ่งในการศึกษานี้ จะพิจารณาน้ำหนัก  $\mathbf{P}_S$  ที่ได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{\text{int}}$ ) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.33) และน้ำหนัก  $\hat{\mathbf{P}}_S$  ที่ได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{\text{int}}$ ) ซึ่งได้จากการแก้สมการที่ (2.57)

### 2.3.2 การหาแรงพลศาสตร์ของเพลาารถโดยทราบสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ

การหาแรงพลศาสตร์ของเพลาารถจำเป็นต้องทราบค่าสัญญาณต่างๆ ซึ่งได้แก่ สัญญาณแรงที่ฐานรองรับ ความเร็วและความเร่งที่องศาอิสระต่างๆของแท่นชั่งน้ำหนัก ในทางปฏิบัติการวัดค่าสัญญาณแรงที่ฐานรองรับในทุกฐานรองรับสามารถทำได้ แต่ในการวัดสัญญาณความเร็วและความเร่งไม่สามารถวัดค่าสัญญาณได้ทุกองศาอิสระ ดังนั้นจึงทำการวัดสัญญาณความเร่งที่องศาอิสระแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับในทุกช่วงของแท่นชั่งน้ำหนัก แล้วนำค่าสัญญาณความเร่งที่เก็บวัดมาได้ไปทำการประมาณความเร็วและความเร่งทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการหาน้ำหนักรถ โดยการประมาณความเร็วและความเร่งในองศาอิสระทั้งหมดจากสัญญาณความเร่งที่องศาอิสระแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับสามารถทำได้พิจารณาสมการที่ (2.15)

$$\{\mathbf{u}(t)\}_{n \times 1} = [\mathbf{V}]_{n \times n} \{\mathbf{q}(t)\}_{n \times 1}$$

จะได้ 
$$\{\ddot{\mathbf{u}}(t)\}_{n \times 1} = [\mathbf{V}]_{n \times n} \{\ddot{\mathbf{q}}(t)\}_{n \times 1} \quad (2.58)$$

โดยที่  $n$  คือจำนวนองศาอิสระ (degree of freedom) ของแท่นซึ่งน้ำหนัก

จัดเวกเตอร์  $\ddot{\mathbf{u}}$  ในสมการที่ (2.58) ให้แยกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรก  $\{\ddot{\mathbf{u}}_{mid}\}$  คือองศาอิสระแนวตั้งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ และส่วนที่สอง  $\{\ddot{\mathbf{u}}_2\}$  คือองศาอิสระที่เหลือ

$$\begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{u}}_{mid}\}_{p \times 1} \\ \{\ddot{\mathbf{u}}_2\}_{(n-p) \times 1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{V}_{11}]_{p \times p} & [\mathbf{V}_{12}]_{p \times (n-p)} \\ [\mathbf{V}_{21}]_{(n-p) \times p} & [\mathbf{V}_{22}]_{(n-p) \times (n-p)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{q}}_1\}_{p \times 1} \\ \{\ddot{\mathbf{q}}_2\}_{(n-p) \times 1} \end{Bmatrix} \quad (2.59)$$

โดยที่  $\ddot{\mathbf{q}}_1$  คือ เวกเตอร์ความเร่งเชิงโหมด ในโหมดการสั่นของแท่นซึ่งน้ำหนัก  $p$  โหมดแรก

$\ddot{\mathbf{q}}_2$  คือ เวกเตอร์ความเร่งเชิงโหมด ในโหมดการสั่นของแท่นซึ่งน้ำหนักที่มีลำดับมากกว่าโหมดที่  $p$

$p$  คือ จำนวนช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนัก

การประมาณความเร่งที่องศาอิสระอื่นๆบนแท่นซึ่งน้ำหนัก จะสมมติให้ค่า  $\ddot{\mathbf{q}}_2$  มีผลต่อเวกเตอร์  $\ddot{\mathbf{u}}$  น้อยมากเมื่อเทียบกับ  $\ddot{\mathbf{q}}_1$  ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{u}}_{mid}\}_{p \times 1} \\ \{\ddot{\mathbf{u}}_2\}_{(n-p) \times 1} \end{Bmatrix} \approx \begin{bmatrix} [\mathbf{V}_{11}]_{p \times p} \\ [\mathbf{V}_{21}]_{(n-p) \times p} \end{bmatrix} \{\ddot{\mathbf{q}}_1\}_{p \times 1} \quad (2.60)$$

เมื่อทราบค่า  $\ddot{\mathbf{u}}_{mid}$  ทำให้สามารถค่า  $\ddot{\mathbf{q}}_1$  ได้ดังนี้

$$\ddot{\mathbf{q}}_1 \approx \mathbf{V}_{11}^{-1} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_{mid} \quad (2.61)$$

ดังนั้นการประมาณความเร่งที่องศาอิสระอื่นๆ สามารถทำได้ดังนี้

$$\ddot{\mathbf{u}}_2 \approx \mathbf{V}_{21} \cdot \mathbf{V}_{11}^{-1} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_{mid} \quad (2.62)$$

ค่าที่ได้จากการประมาณสัญญาณความเร่ง ณ องศาอิสระต่างๆ บนแท่นซึ่ง สามารถนำไปประมาณความเร็วของแท่นซึ่งได้โดยคำนวณจากสมการที่ (2.39)

### 2.3.3 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ของเพลารถ

การตรวจสอบประสิทธิภาพในการประมาณน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลารถจะพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลารถ โดยความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักของรถสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{SR} = \frac{|W - \hat{W}_R|}{W} \times 100 \quad (2.63)$$

$$E_{ST} = \frac{|W - \hat{W}_T|}{W} \times 100 \quad (2.64)$$

- โดยที่  $E_{SR}$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักของรถ ( $\hat{W}_R$ ) ที่หาได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )
- $E_{ST}$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักของรถ ( $\hat{W}_T$ ) ที่หาได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ )
- $W$  คือ น้ำหนักของรถซึ่งได้จากการชั่งน้ำหนักในสภาวะหยุดนิ่ง
- $\hat{W}_R$  คือ น้ำหนักของรถที่ได้จากการประมาณ ซึ่งหาได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{P}_{int}(t) dt$
- $\hat{W}_T$  คือ น้ำหนักของรถที่ได้จากการประมาณ ซึ่งหาได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{P}}_{int}(t) dt$
- $T$  คือ เวลาทั้งหมดที่รถวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก

ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถสามารถคำนวณได้ดังนี้

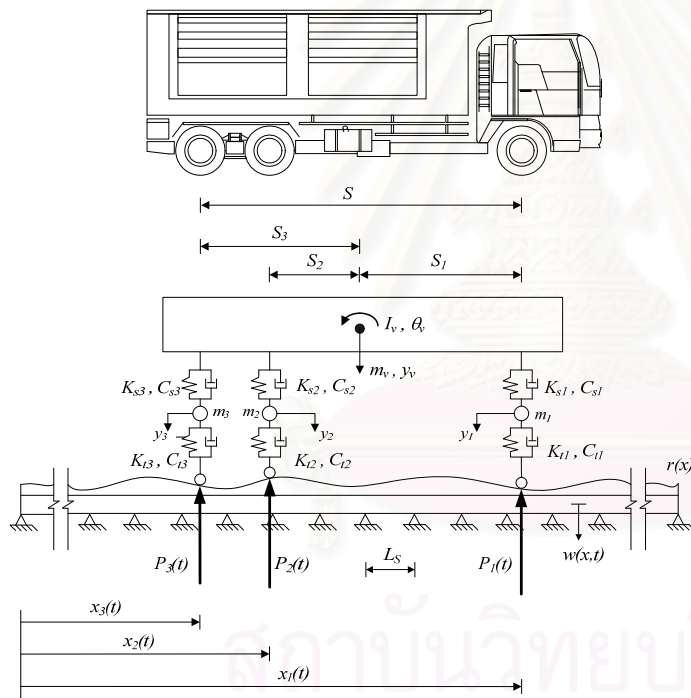
$$E_D = \frac{\|\mathbf{P}_{int} - \hat{\mathbf{P}}_{int}\|}{\|\mathbf{P}_{int}\|} \times 100 \quad (2.65)$$

- โดยที่  $E_D$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถ
- $\mathbf{P}_{int}$  คือ สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถที่เกิดขึ้นจริง
- $\hat{\mathbf{P}}_{int}$  คือ สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถที่ได้จากการประมาณ
- $\|x\|$  คือ นอร์มของเวกเตอร์  $x$

### บทที่ 3

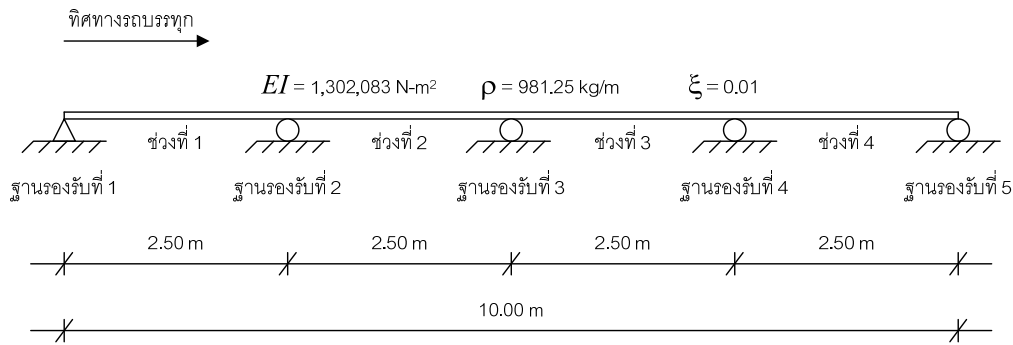
#### การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและพฤติกรรมแท่นซึ่งน้ำหนัก

ในบทนี้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้จากบทที่ 2 โดยทำการตรวจสอบการโก่งตัวของแท่นซึ่งน้ำหนัก ตรวจสอบสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับ และตรวจสอบการสั่นไหวของรถ ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะสมมติให้แท่นซึ่งน้ำหนักทำจากแผ่นเหล็ก ( $E = 2 \times 10^{11}$  นิวตันต่อเมตร<sup>2</sup>, ความหนาแน่นเท่ากับ 7.85 ตันต่อเมตร<sup>3</sup>) หนา 25 มิลลิเมตร กว้าง 5.00 เมตร ความยาวทั้งหมดเท่ากับ 10.00 เมตร โดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วงๆละ 2.50 เมตร น้ำหนักเท่ากับ 981.25 กิโลกรัมต่อเมตร  $EI = 1,302,083$  นิวตัน-เมตร<sup>2</sup> ค่าสัดส่วนความหน่วง (damping ratio) เท่ากับ 0.01 แบบจำลองรถที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวม 25 ตัน และมีคุณสมบัติต่างๆดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองรถบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองรถบรรทุก 25 ตัน	
$m_1$ ; kg	996
$m_2$ ; kg	712
$m_3$ ; kg	712
$m_v$ ; kg	22,580
น้ำหนักเพลาด้านหน้า ; kN	51.66
น้ำหนักเพลากลาง ; kN	90.47
น้ำหนักเพลาด้านหลัง ; kN	103.13
$I_v$ ; kg-m <sup>2</sup>	222,662
$S_1$ ; m	3.808
$S_2$ ; m	0.192
$S_3$ ; m	1.492
$S$ ; m	5.300
$K_{s1}$ ; kN/m	9,497
$K_{s2}, K_{s3}$ ; kN/m	8,487
$K_{t1}$ ; kN/m	5,381
$K_{t2}, K_{t3}$ ; kN/m	6,408
$C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}, C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}$ ; kN-s/m	40.00



รูปที่ 3.2 แบบจำลองแท่นซึ่งนำหนักที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

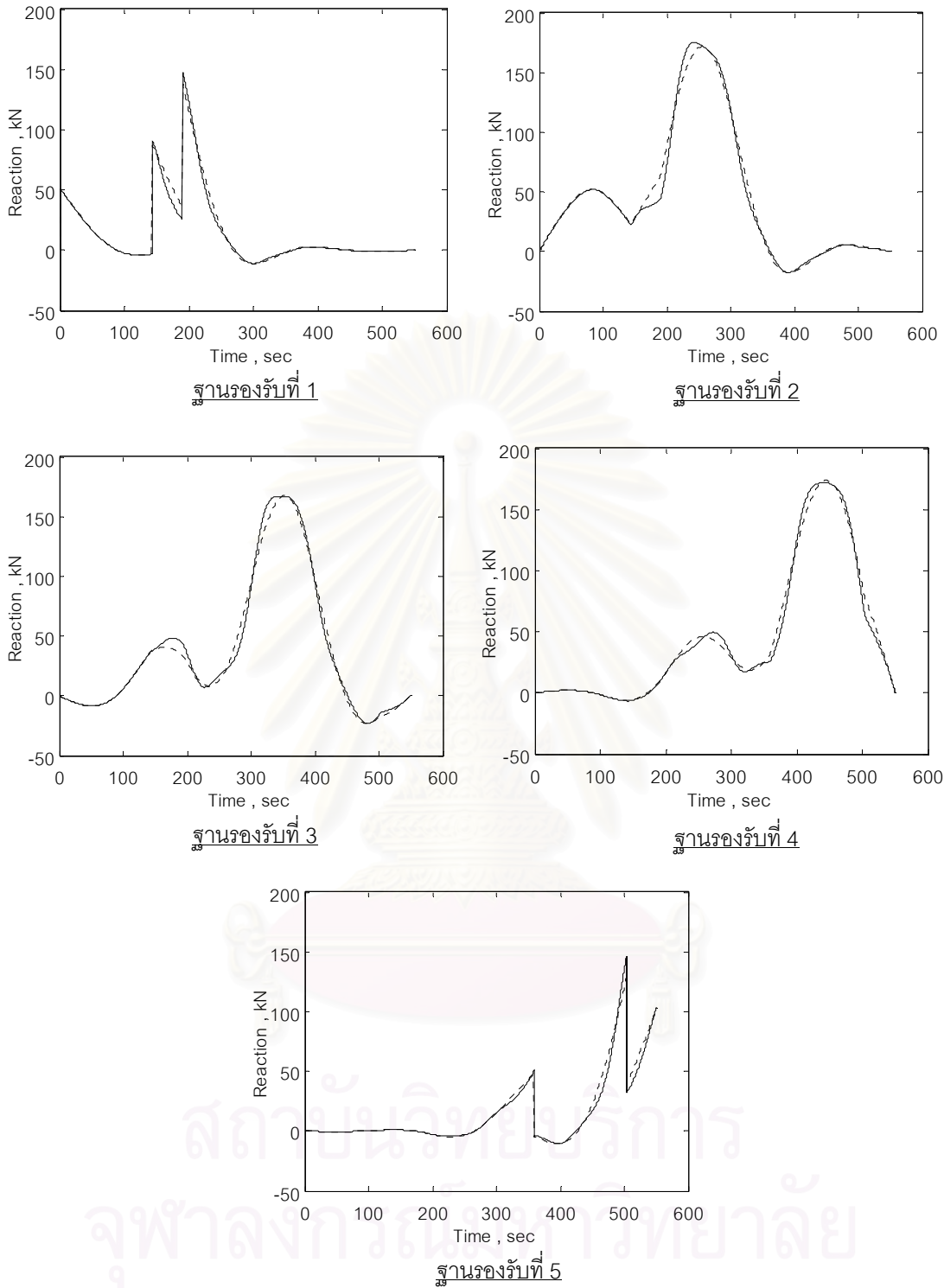
### 3.1 การตรวจสอบการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับของแท่นซึ่งนำหนัก

ซึ่งการตรวจสอบแบ่งออกเป็น การตรวจสอบเชิงสถิต และการตรวจสอบเชิงพลศาสตร์ โดยที่การตรวจสอบเชิงพลศาสตร์จะพิจารณาผลความขรุขระของผิวบนแท่นซึ่งนำหนัก และความเร็วของรถ

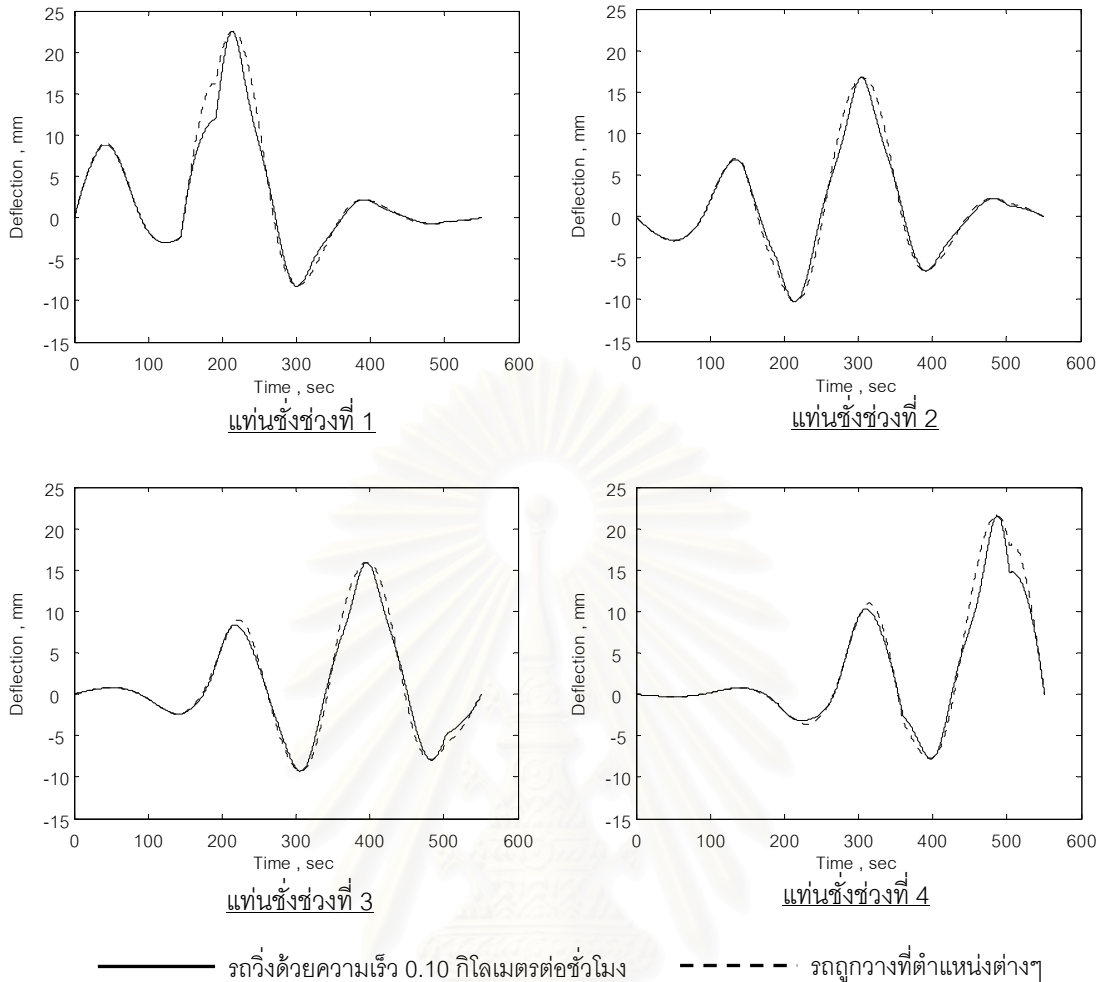
#### 3.1.1 การตรวจสอบการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับของแท่นซึ่งนำหนักเชิงสถิต

จากแบบจำลองที่ได้นำเสนอขึ้นมา นั้น เราจะกำหนดให้รถมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่น้อยมาก ผลที่ได้จากแบบจำลองก็จะเปรียบเสมือนการนำรถไปวางไว้ยังจุดต่างๆบนแท่นซึ่งนำหนักในทางสถิต โดยเราจะทำการตรวจสอบการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางในแต่ละช่วง และสัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่เวลาต่างๆ โดยกำหนดให้รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (0.028 เมตรต่อวินาที) บนแท่นซึ่งนำหนักที่มีผิวเรียบโดยไม่มี ความขรุขระเพื่อลดผลของพลศาสตร์

จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะเห็นได้ว่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางในแต่ละช่วง และสัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่เวลาต่างๆ มีความใกล้เคียงกันมากกับสัญญาณที่เกิดจากการนำรถในสภาวะหยุดนิ่งไปวางไว้ยังตำแหน่งต่างๆบนแท่นซึ่งนำหนัก แต่สัญญาณยังคงมีส่วนที่ทับกันไม่สนิท โดยจะเกิดขึ้นเมื่อเพลากลางและเพลาลังเริ่มเข้าและออกจากแท่นซึ่งนำหนัก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงที่กระทำต่อแท่นซึ่งนำหนักกระทันหัน อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เสนอขึ้นมา มีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบสัญญาณแรงที่ฐานรองรับเนื่องจากรถถูกวางที่ตำแหน่งต่างๆ กับ รถที่วิ่งด้วยความเร็ว 0.10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (0.028 เมตรต่อวินาที)



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนักเนื่องจากรถถูกวางที่ตำแหน่งต่างๆ กับ รถที่วิ่งด้วยความเร็ว 0.10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (0.028 เมตรต่อวินาที)

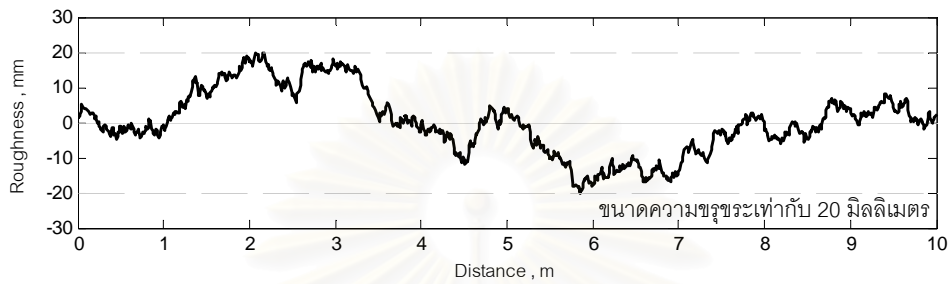
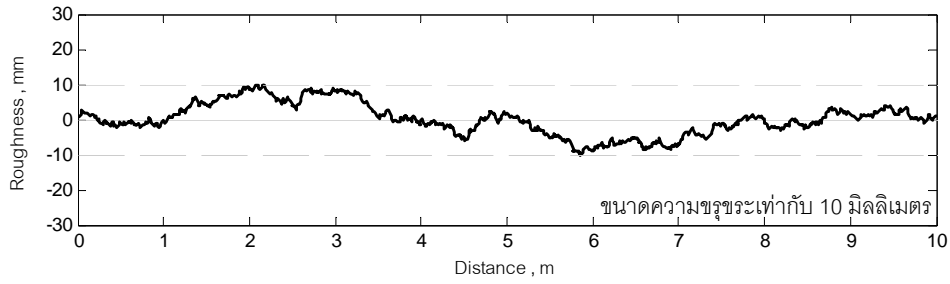
### 3.1.2 การตรวจสอบการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับของแท่นซึ่งน้ำหนักเชิงพลศาสตร์

จะทำการศึกษาผลของความขรุขระของผิวทางบนแท่นซึ่งน้ำหนัก และความเร็วของรถ ว่าจะมีผลต่อการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วง และแรงที่ฐานรองรับอย่างไร

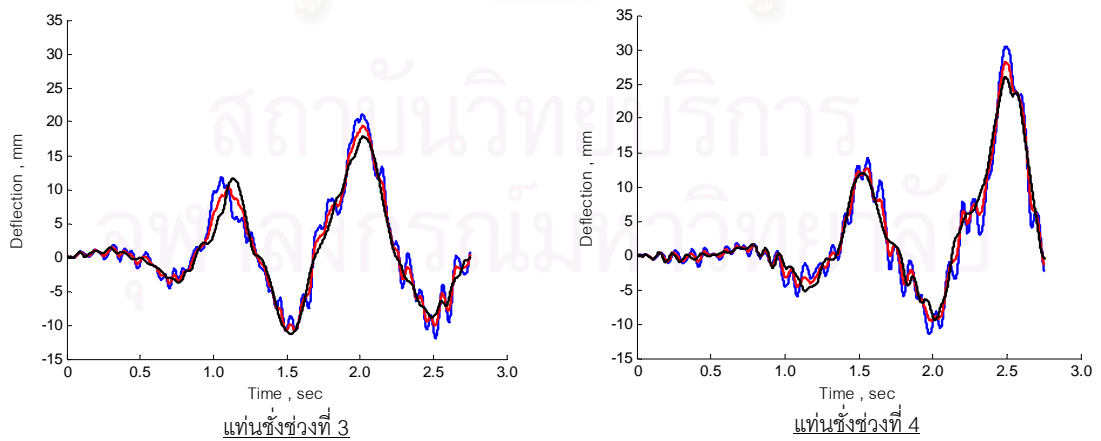
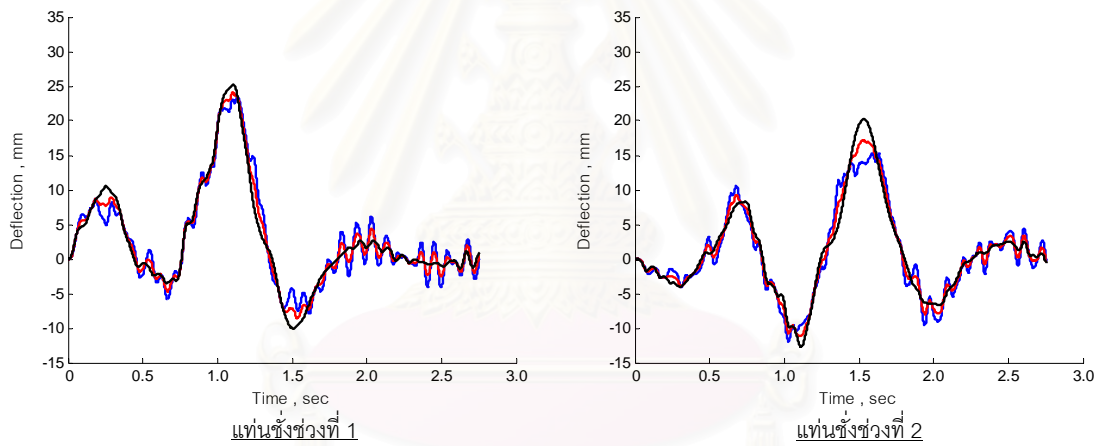
#### 3.1.2.1 พิจารณาผลการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับเนื่องมาจากความขรุขระของผิวแท่นซึ่งน้ำหนัก

กำหนดให้รถบรรทุก 25 ตันเคลื่อนที่ผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีความขรุขระบนผิวทางขนาดต่างๆ โดยลักษณะความขรุขระมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ในการตรวจสอบจะพิจารณาขนาดความขรุขระเท่ากับ 20, 10 มิลลิเมตร และไม่มี ความขรุขระเลย จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อความขรุขระมีขนาดเพิ่มมากขึ้นทำให้สัญญาณแรงที่ฐานรองรับและการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงจะมีความแปรปรวนมากขึ้น ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เสนอขึ้นมานี้มีความน่าเชื่อถือ



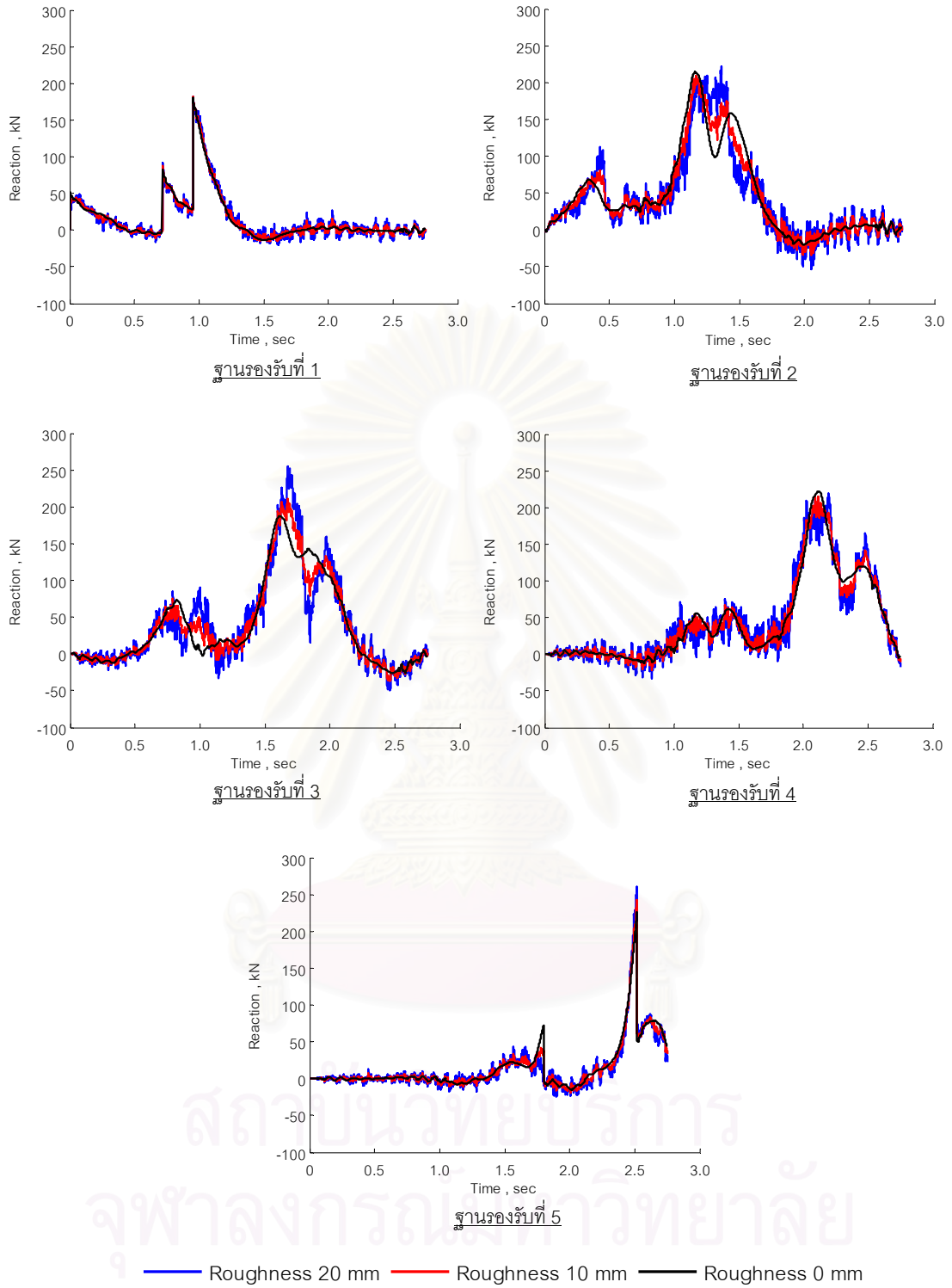


รูปที่ 3.5 ลักษณะความขรุขระ



— Roughness 20 mm — Roughness 10 mm — Roughness 0 mm

รูปที่ 3.6 การโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนัก ที่ความขรุขระขนาดต่างๆ

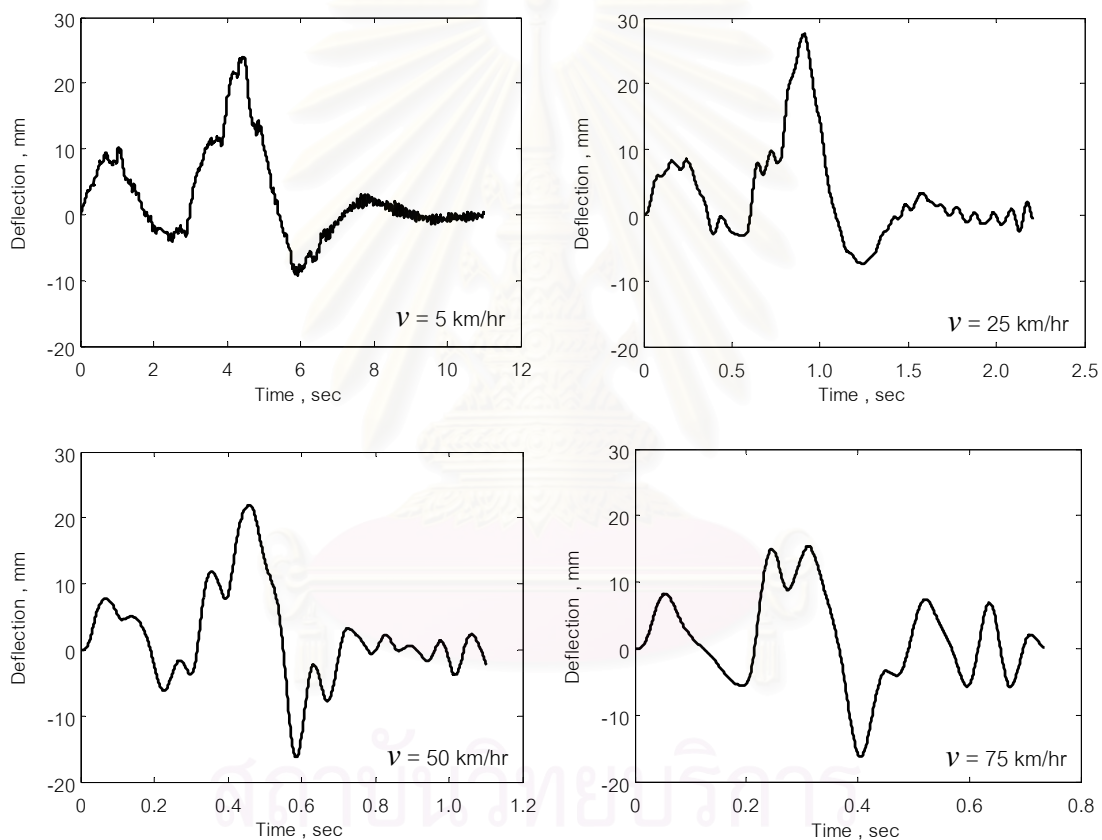


รูปที่ 3.7 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับขณะรถวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนัก ที่ขนาดความขรุขระต่างๆ

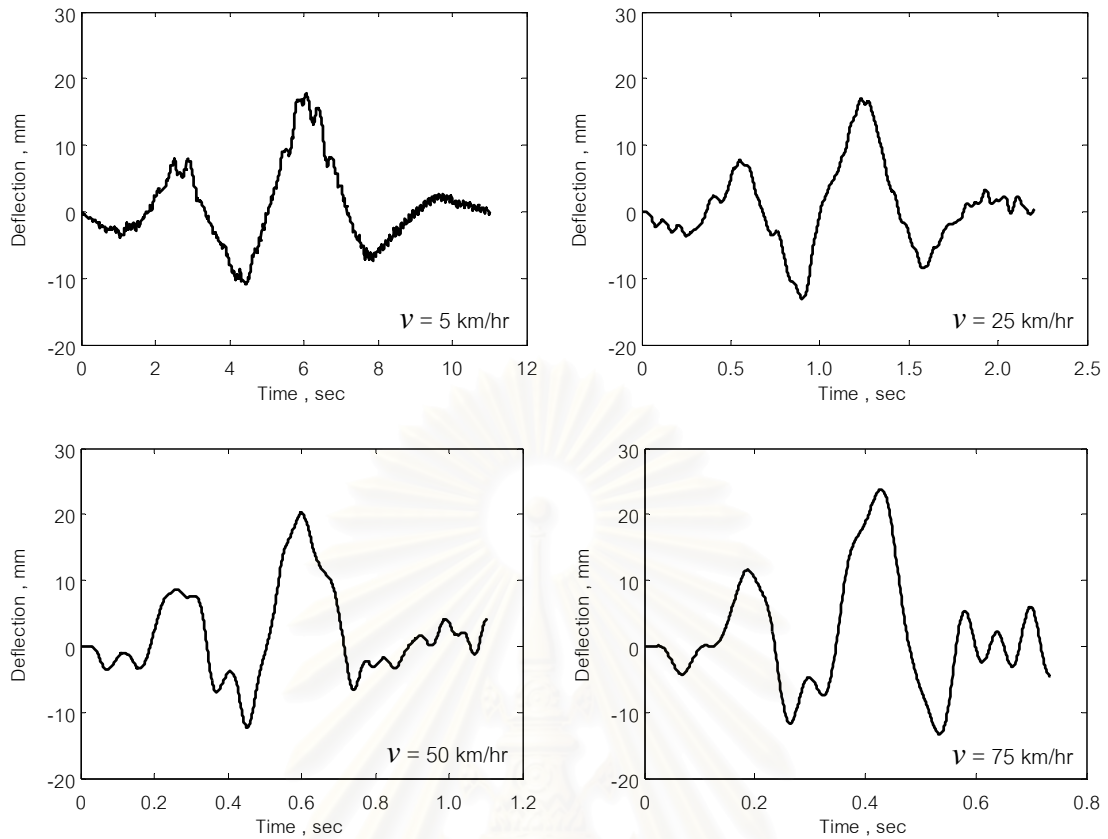
### 3.1.2.2 พิจารณาผลการโก่งตัวและแรงที่ฐานรองรับเนื่องมาจากความเร็วของรถ

กำหนดให้รถบรรทุก 25 ตันวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักด้วยความเร็วต่างๆกันคือ 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยแท่นซึ่งน้ำหนักมีขนาดความขรุขระบนผิวทางเท่ากับ 10 มิลลิเมตรตามรูปที่ 3.5

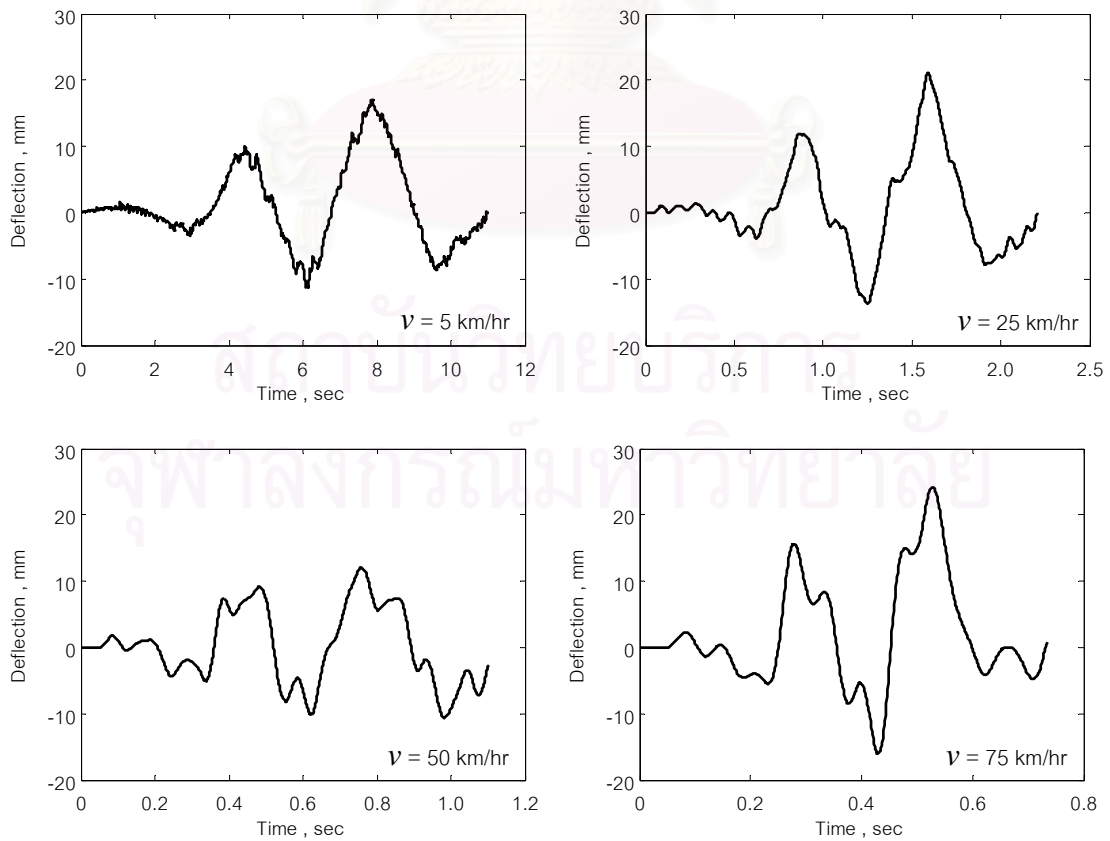
จากรูปที่ 3.8 – 3.16 จะเห็นได้ว่า การสั่นไหว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของแท่นซึ่งน้ำหนักและสัญญาณแรงที่ฐานรองรับของรถที่มีความเร็วสูงสัญญาณจะแปรปรวนมากกว่ารถที่มีความเร็วต่ำ เนื่องจากรถที่มีความเร็วสูงจะทำให้แรงที่กระทำต่อแท่นซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดผลทางพลศาสตร์มากกว่ารถที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เสนอขึ้นมาที่มีความน่าเชื่อถือ



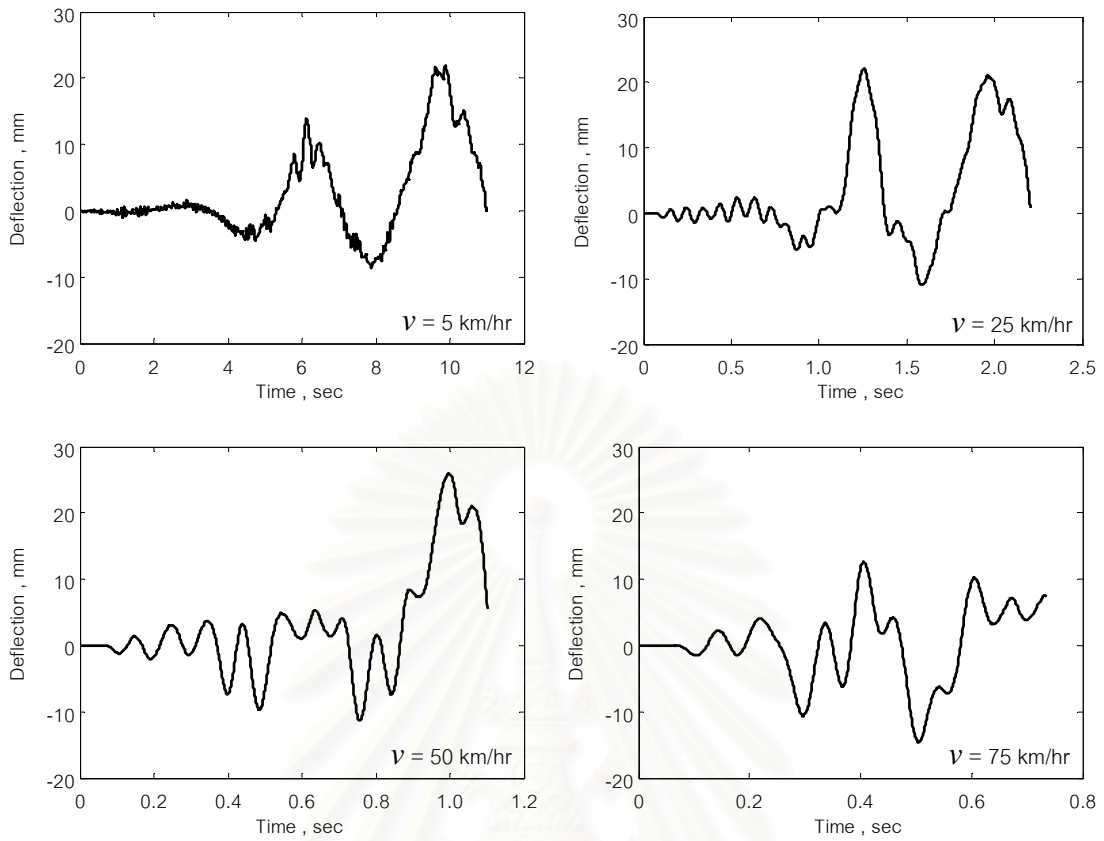
รูปที่ 3.8 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 1 ที่มีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



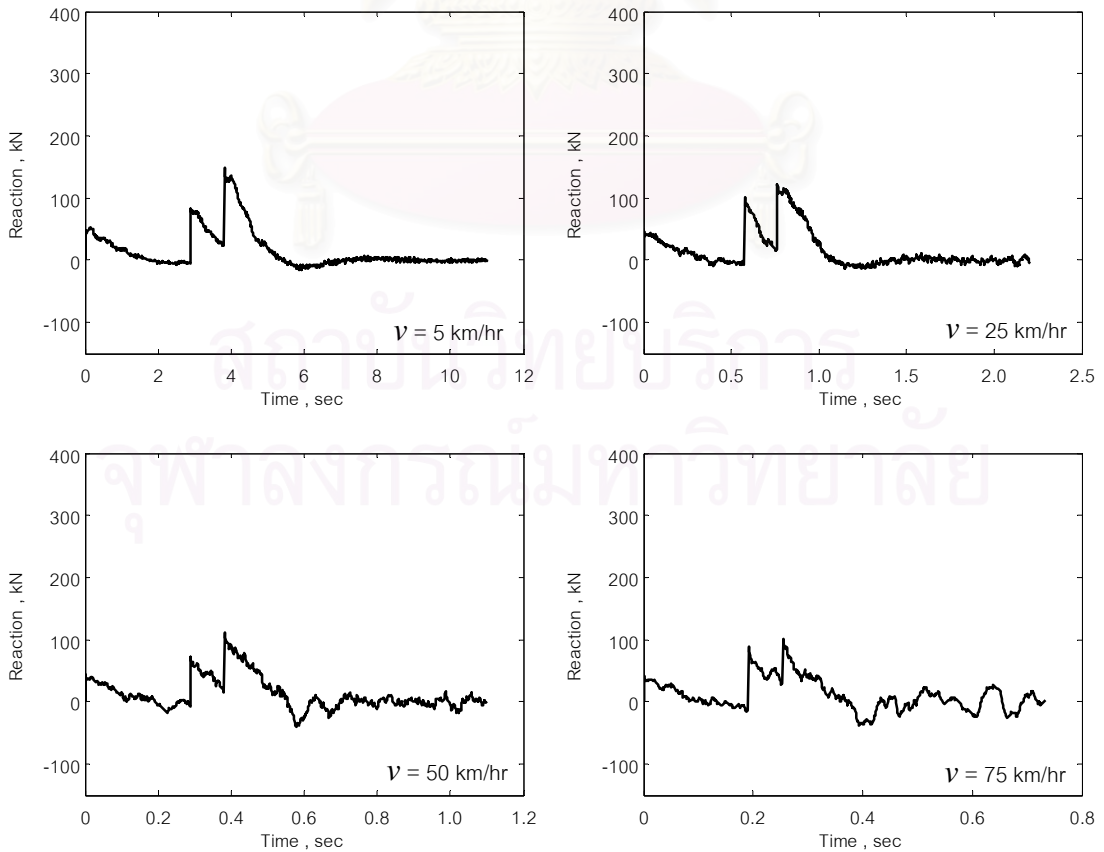
รูปที่ 3.9 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 2 ที่มีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



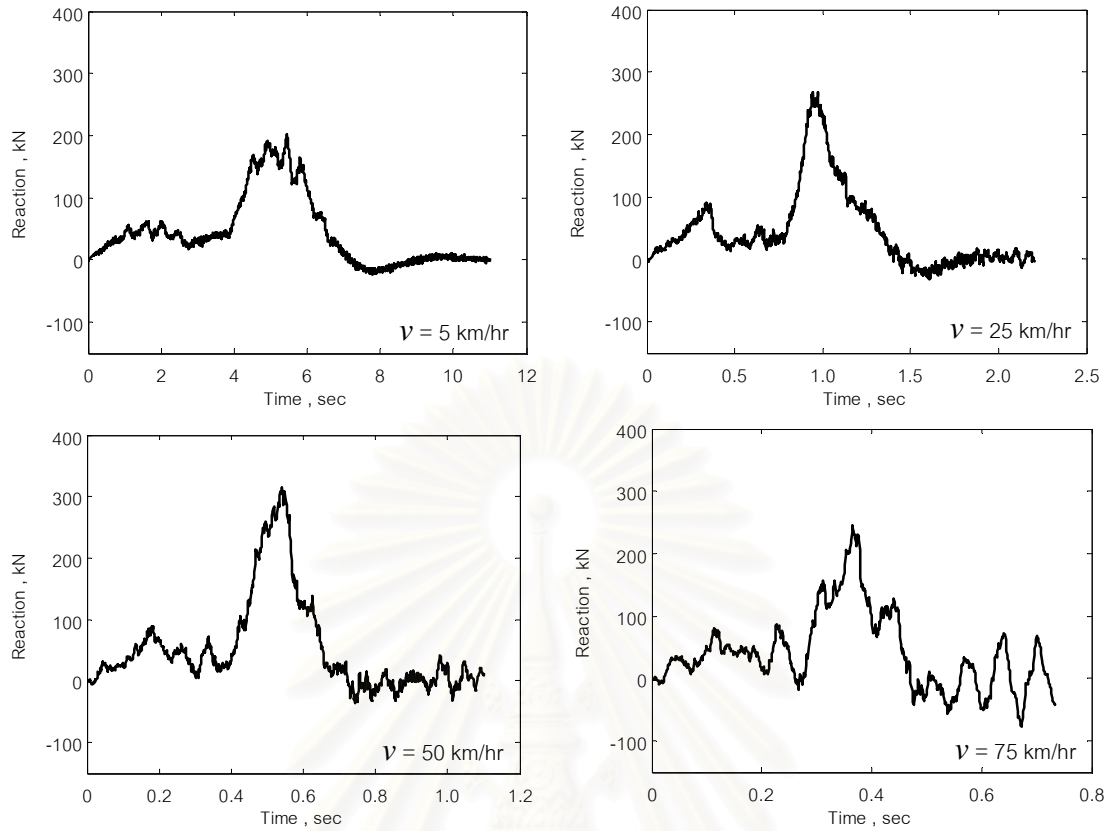
รูปที่ 3.10 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 3 ที่มีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



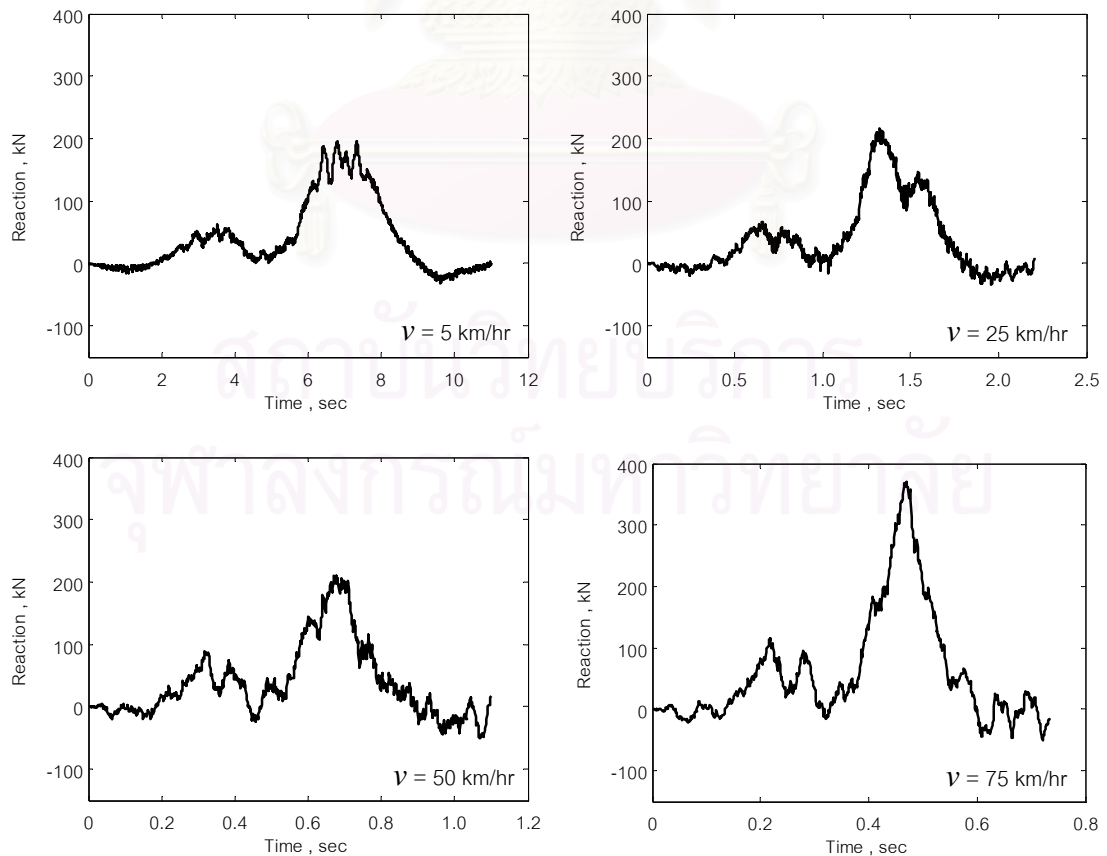
รูปที่ 3.11 การโก่งตัวของแท่นซึ่งที่กึ่งกลางช่วงที่ 4 ที่มีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



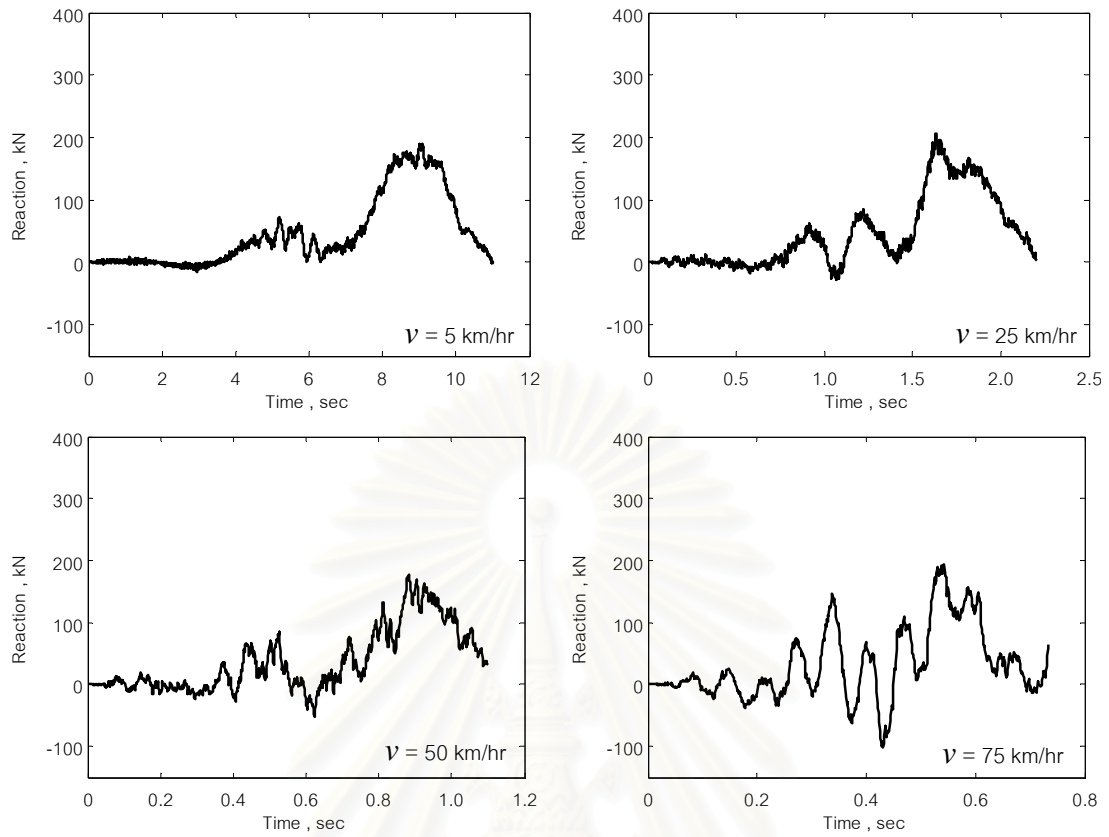
รูปที่ 3.12 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 1 โดยรถมีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



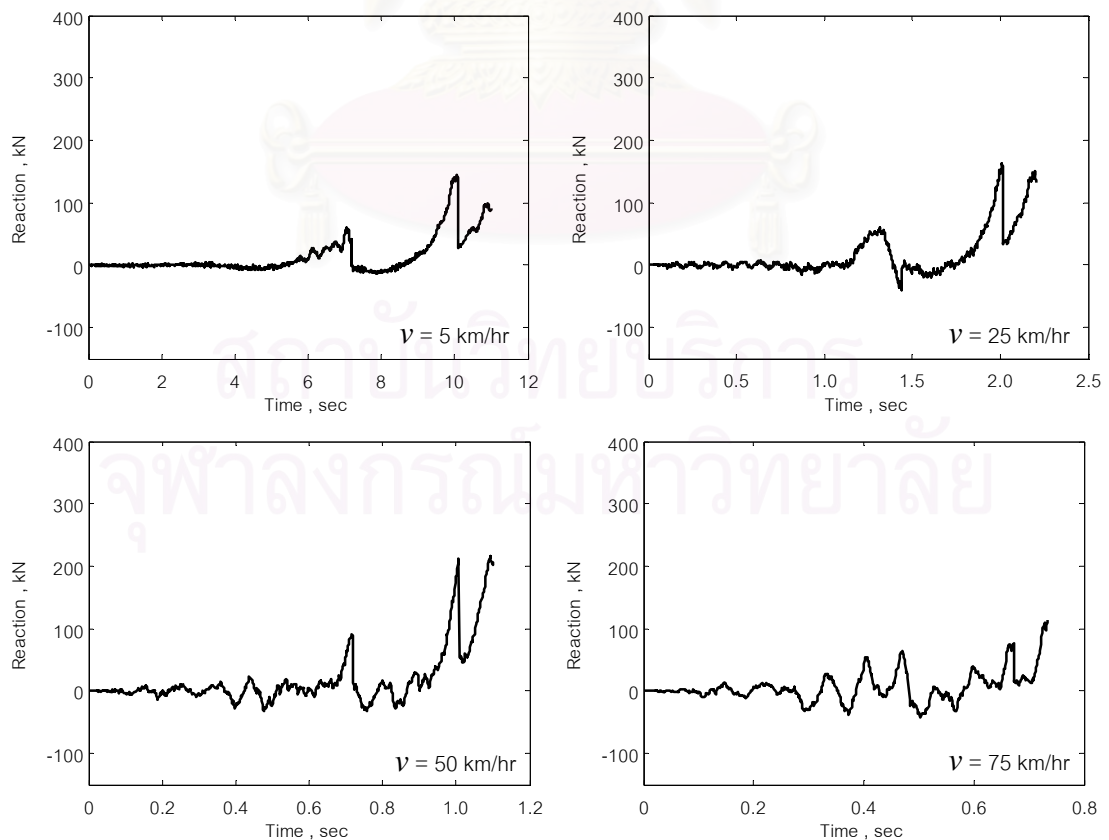
รูปที่ 3.13 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 2 โดยรถมีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.14 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 3 โดยรถมีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.15 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 4 โดยรถมีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.16 สัญญาณแรงที่ฐานรองรับที่ 5 โดยรถมีความเร็ว 5, 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

### 3.2 การตรวจสอบการสั่นไหวของรถ

เราจะศึกษาความขรุขระของผิวบนสะพานและระบบเพลลาของรถ ที่มีผลต่อการกระจัดของรถ เมื่อกำหนดให้ค่าสติเฟนส์และค่าความหน่วงของยางรถและแท่นชั่งน้ำหนักมีค่าสูงมาก ดังนั้นเมื่อรถวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักที่มีผิวขรุขระ การสั่นไหวของเพลลาที่ควรจะมีลักษณะรูปร่างคล้ายกับหน้าข้างของความขรุขระของผิวแท่นชั่งน้ำหนัก ซึ่งกำหนดให้ แท่นชั่งน้ำหนักทำจากแผ่นเหล็กหนา 0.30 เมตร, ค่า  $K_{t1} = K_{t2} = K_{t3} = 10^{15}$  นิวตันต่อเมตร,  $C_{t1} = C_{t2} = C_{t3} = 10^{12}$  นิวตัน-วินาทีต่อเมตร และรถมีความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าการกระจัดของเพลลาต่างๆมีลักษณะคล้ายกับหน้าข้างของความขรุขระของผิวแท่นชั่งน้ำหนักมาก ซึ่งความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเพลลากับความขรุขระมีค่าไม่เกิน 1.02 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เสนอขึ้นมาี้มีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 3.17 แสดงการกระจัดของเพลลาต่างๆเปรียบเทียบกับลักษณะหน้าข้างของความขรุขระที่ตำแหน่งเดียวกัน



## บทที่ 4

### การหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก

#### 4.1 การออกแบบแท่นชั่งน้ำหนัก

ลักษณะต่างๆของแท่นชั่งน้ำหนัก เช่น ความขรุขระบนผิวแท่นชั่งน้ำหนัก ความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งน้ำหนัก ความยาวช่วงระหว่างฐานรองรับ ค่าสตีเฟนของแท่นชั่ง ล้วนมีผลต่อความแม่นยำในการหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบแท่นชั่งน้ำหนักให้มีความแม่นยำในการวัดน้ำหนักมากที่สุด แต่เนื่องด้วยความขรุขระของผิวแท่นชั่งน้ำหนักเป็นสิ่งที่จัดการได้ยาก ซึ่งในขั้นต้นจะสมมติว่าแท่นชั่งไม่มีความขรุขระเพื่อความสะดวกในการออกแบบ โดยการออกแบบขั้นต้นมีขั้นตอนดังนี้

1. ออกแบบค่าความยาวระหว่างฐานรองรับและความยาวทั้งหมดที่เหมาะสมสำหรับแท่นชั่งน้ำหนัก
2. ออกแบบค่าคุณสมบัติหน้าตัดที่เหมาะสมสำหรับแท่นชั่งน้ำหนัก

เมื่อได้ลักษณะที่เหมาะสมของแท่นชั่งน้ำหนักจากการออกแบบขั้นต้นแล้ว จึงพิจารณาผลของความขรุขระ

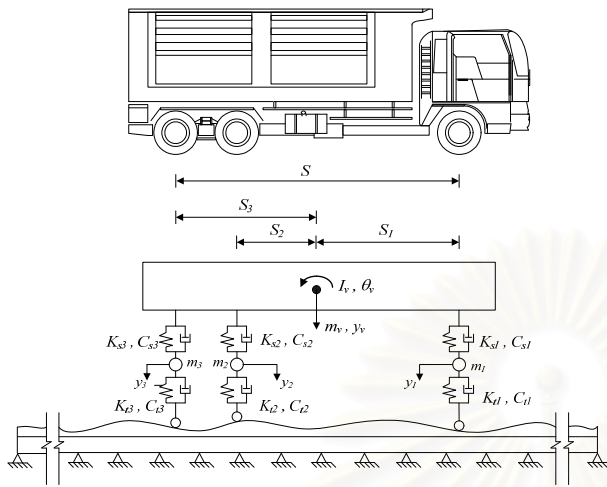
#### 4.1.1 ออกแบบค่าความยาวระหว่างฐานรองรับและความยาวทั้งหมดที่เหมาะสมสำหรับแท่นชั่งน้ำหนัก

สมมติให้แท่นชั่งทำจากแผ่นเหล็ก ( $E=2 \times 10^{11}$  Pa, density =  $7850$  kg/m<sup>3</sup>) หนา 15 มิลลิเมตร กว้าง 5.00 เมตร และ ค่าสัดส่วนความหน่วง (damping ratio) เท่ากับ 0.01 การออกแบบจะพิจารณาแท่นชั่งน้ำหนักให้มีความยาวระหว่างฐานรองรับ (span length,  $L_s$ ) มีค่าเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงความยาวทั้งหมดของแท่นชั่ง โดยสำหรับแท่นชั่งน้ำหนักที่มีค่าความยาวระหว่างฐานรองรับ เท่ากับ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตร จะพิจารณาความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งน้ำหนักเริ่มต้นที่ 5.00 เมตร แล้วค่อยๆเพิ่มความยาวทีละ 1 เมตร จนถึงความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งมีค่าเท่ากับ 35.00 เมตร ส่วนแท่นชั่งที่มีความยาวระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 0.75 เมตร จะพิจารณาความยาวเริ่มต้นเท่ากับ 5.25 เมตร แล้วเพิ่มความยาวทีละ 0.75 เมตร จนถึง 35.25 เมตร การวิเคราะห์ปัญหาทำโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ แท่นชั่งน้ำหนักจะประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อย (element) โดยความยาวของชิ้นส่วนย่อยมีค่าเท่ากับ 0.125 เมตรในทุกกรณี

แบบจำลองรถที่ใช้ทดสอบในการออกแบบแท่นชั่งน้ำหนักจะมีอยู่สองแบบ คือ รถบรรทุกที่มีน้ำหนักเท่ากับ 5 ตัน และ รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 25 ตัน โดยใช้ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในการวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก และรถบรรทุกมีคุณสมบัติต่างๆตามตารางที่ 4.1 การสังเคราะห์สัญญาณต่างๆเมื่อรถวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักทำได้โดยการแก้สมการการกระจัดของระบบสมการที่ (2.36) ด้วยหลักการนิวมาร์คคั้งสมการที่ (2.43) ทำให้ได้การกระจัด ความเร็ว และความเร่งที่เวลาต่างๆ ต่อจากนั้นจึงคำนวณแรงปฏิกิริยาระหว่างรถและแท่นชั่ง ( $\mathbf{P}_{int}$ ) ด้วยสมการที่ (2.33) นำค่า  $\mathbf{P}_{int}$  มาเฉลี่ยเพื่อประมาณน้ำหนักของรถ  $\hat{W}_R$

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของแบบจำลองรถบรรทุก

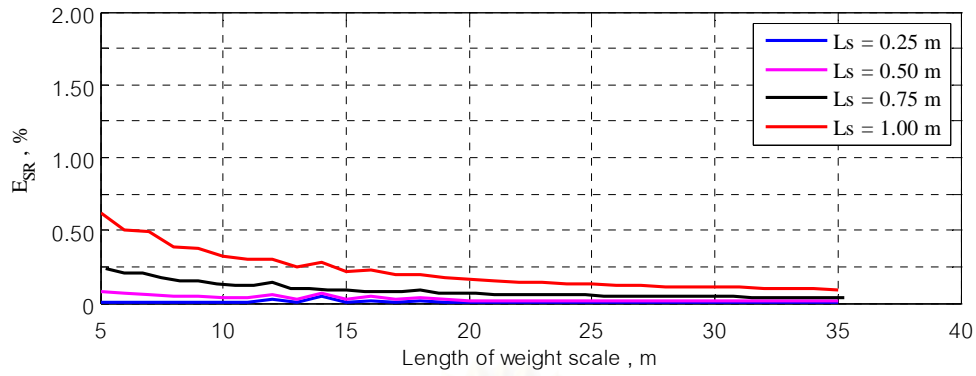
	แบบจำลองรถบรรทุก	
	5 ตัน	25 ตัน
$m_1$ ; kg	996	996
$m_2$ ; kg	712	712
$m_3$ ; kg	712	712
$m_v$ ; kg	2,580	22,580
น้ำหนักเพลาน้ำ ; kN	18.22	51.66
น้ำหนักเพลากลาง ; kN	15.49	90.47
น้ำหนักเพลาลัง ; kN	15.34	103.13
$I_v$ ; kg-m <sup>2</sup>	9,470	222,662
$S_1$ ; m	3.094	3.808
$S_2$ ; m	0.906	0.192
$S_3$ ; m	2.206	1.492
$S$ ; m	5.300	5.300
$K_{s1}$ ; kN/m	9,497	9,497
$K_{s2}, K_{s3}$ ; kN/m	8,487	8,487
$K_{t1}$ ; kN/m	5,381	5,381
$K_{t2}, K_{t3}$ ; kN/m	6,408	6,408
$C_{s1}, C_{s2}, C_{s3},$ $C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}$ ; kN-s/m	40.00	40.00



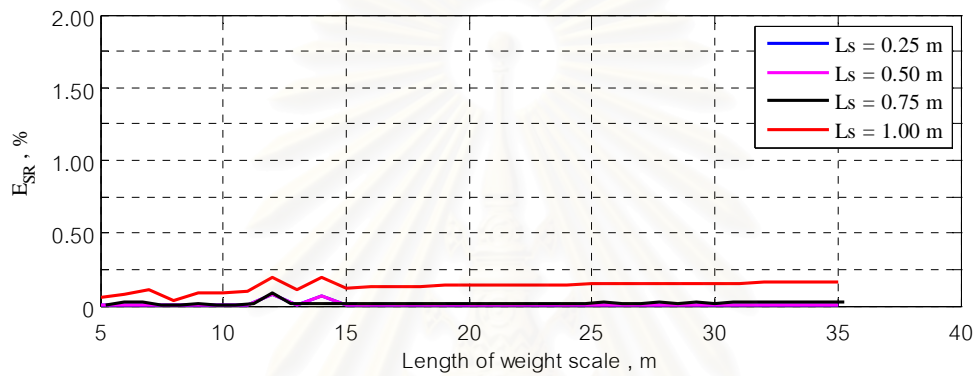
รูปที่ 4.1 แบบจำลองรถบรรทุก

การออกแบบแท่นซึ่งน้ำหนักจะพิจารณาประสิทธิภาพในการประมาณน้ำหนักของรถ ( $\hat{W}_R$ ) ซึ่งได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ ) โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถ ( $\hat{W}_R$ ) ที่หาได้จากการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.63)

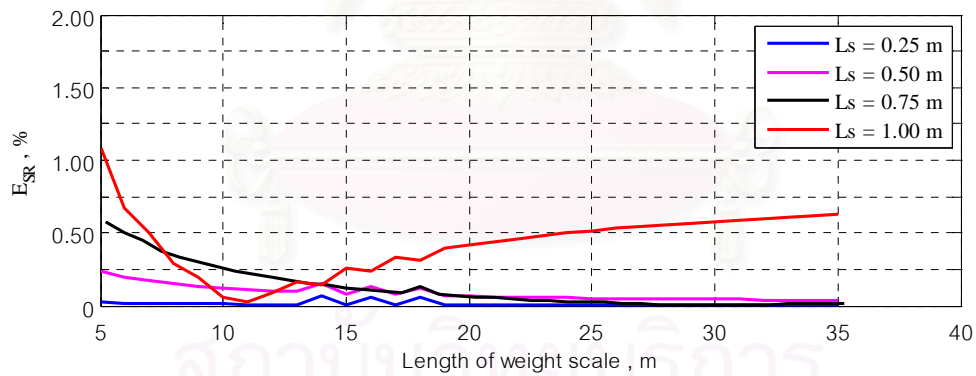
จากรูปที่ 4.2 - 4.9 จะเห็นได้ว่าความยาวระหว่างฐานรองรับมีผลต่อการประมาณน้ำหนักของรถ เมื่อความยาวระหว่างฐานรองรับมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ความคลาดเคลื่อนในการทายน้ำหนักรถก็จะมีค่ามากขึ้นไปด้วย ถ้าความยาวระหว่างฐานรองรับมีค่าลดลงก็จะทำให้ความคลาดเคลื่อนในการทายน้ำหนักลดลง เนื่องด้วยความยาวระหว่างฐานรองรับมีผลต่อการแอ่นตัวของแท่นซึ่งน้ำหนัก ถ้าความยาวระหว่างฐานรองรับมีมากก็จะทำให้เกิดการแอ่นตัวของแท่นซึ่งมีค่ามากขึ้นไปด้วย ซึ่งการแอ่นตัวของแท่นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกลั่นและลักษณะของสัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถ ดังรูปที่ 4.10-4.12 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงพลศาสตร์ของรถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักที่มีความยาวระหว่างฐานรองรับมากกว่าจะทำให้สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลามีความแปรปรวนมากกว่า ดังนั้นการเฉลี่ยหาน้ำหนักในเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งที่มีความยาวระหว่างฐานรองรับน้อยจะได้ค่าน้ำหนักที่มีความถูกต้องมากกว่า เพราะว่าสัญญาณแรงพลศาสตร์ไม่ค่อยมีการกระจายตัวมากนัก



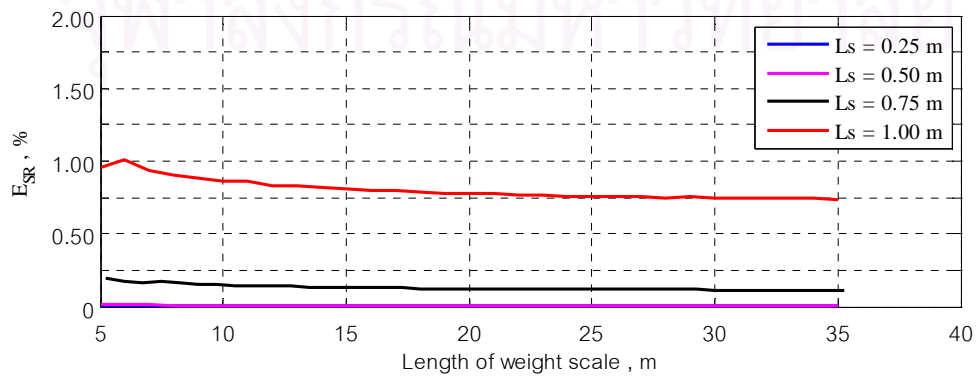
รูปที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก 5 ตัน



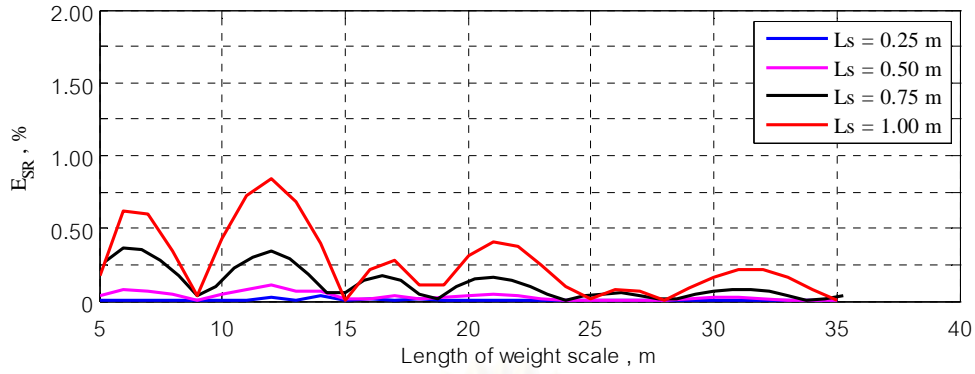
รูปที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลหน้าของรถบรรทุก 5 ตัน



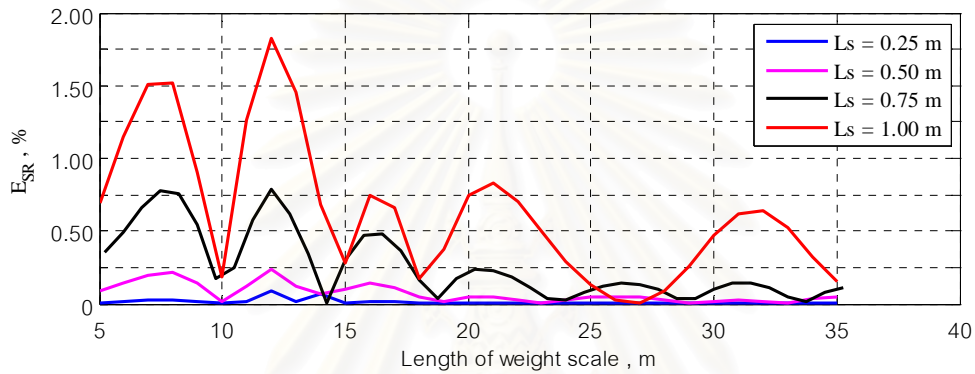
รูปที่ 4.4 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลกลางของรถบรรทุก 5 ตัน



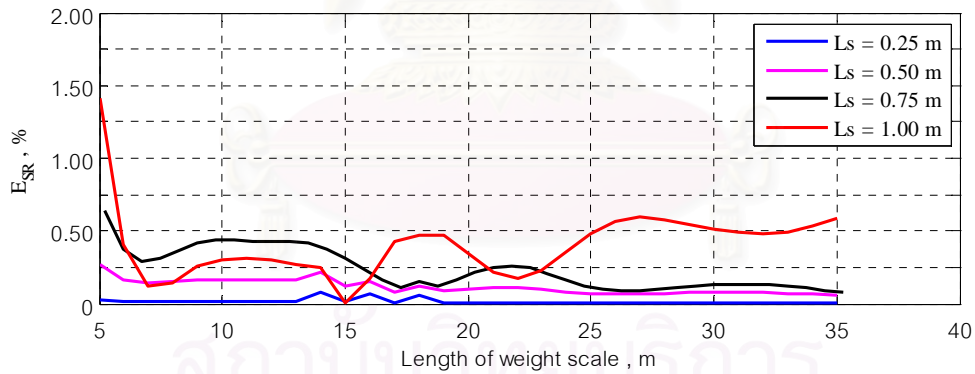
รูปที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลหลังของรถบรรทุก 5 ตัน



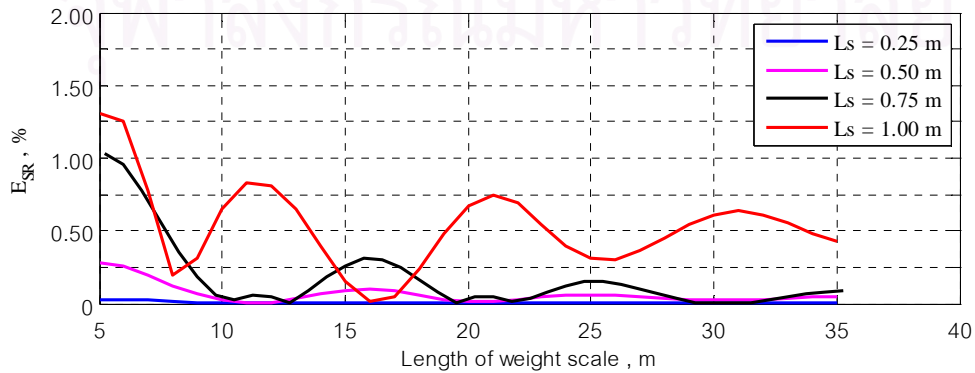
รูปที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก 25 ตัน



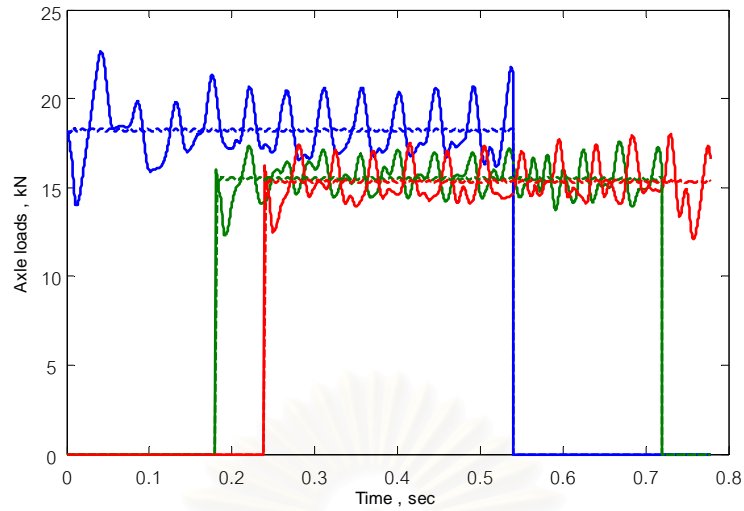
รูปที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถบรรทุก 25 ตัน



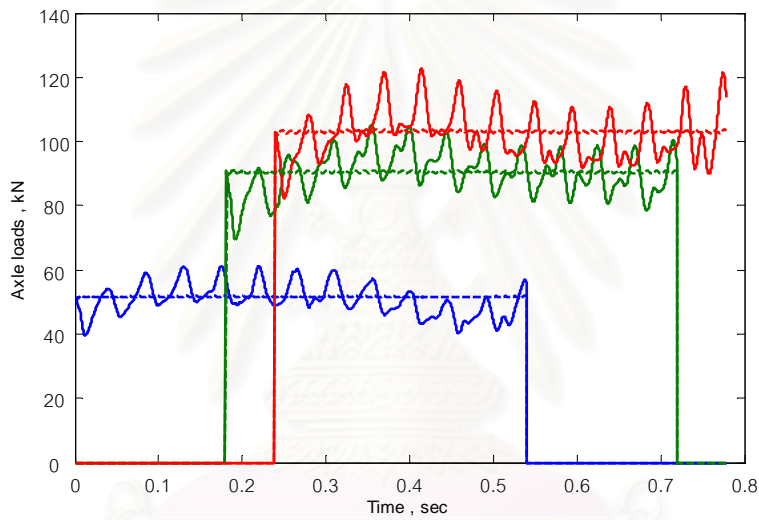
รูปที่ 4.8 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุก 25 ตัน



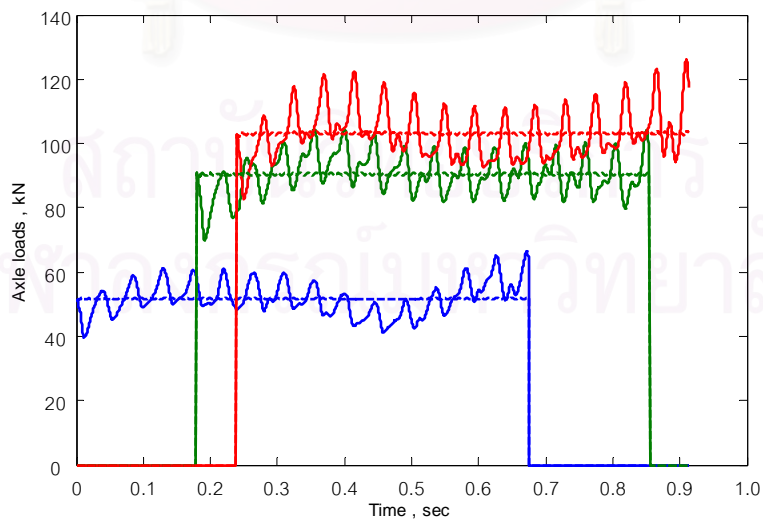
รูปที่ 4.9 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาดังของรถบรรทุก 25 ตัน



รูปที่ 4.10 แรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลลาของรถบรรทุกน้ำหนัก 5 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งความยาว 12 เมตร



รูปที่ 4.11 แรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลลาของรถบรรทุกน้ำหนัก 25 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งความยาว 12 เมตร



รูปที่ 4.12 แรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลลาของรถบรรทุกน้ำหนัก 25 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งความยาว 15 เมตร

- Front axle ( $L_s = 1.00 \text{ m}$ )    — Middle axle ( $L_s = 1.00 \text{ m}$ )    — Rear axle ( $L_s = 1.00 \text{ m}$ )
- - - Front axle ( $L_s = 0.25 \text{ m}$ )    - - - Middle axle ( $L_s = 0.25 \text{ m}$ )    - - - Rear axle ( $L_s = 0.25 \text{ m}$ )

การหาน้ำหนักรถทำได้โดยการเฉลี่ยจากสัญญาณแรงพลศาสตร์ของรถ จำนวนสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ใช้ในการเฉลี่ยเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแม่นยำในการประมาณน้ำหนักรถ จากรูปที่ 4.2 - 4.9 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงพลศาสตร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรถมีค่าลดลง ในทางกลับกัน เมื่อความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งน้ำหนักลดลง ก็จะทำให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรถมีค่าเพิ่มมากขึ้น

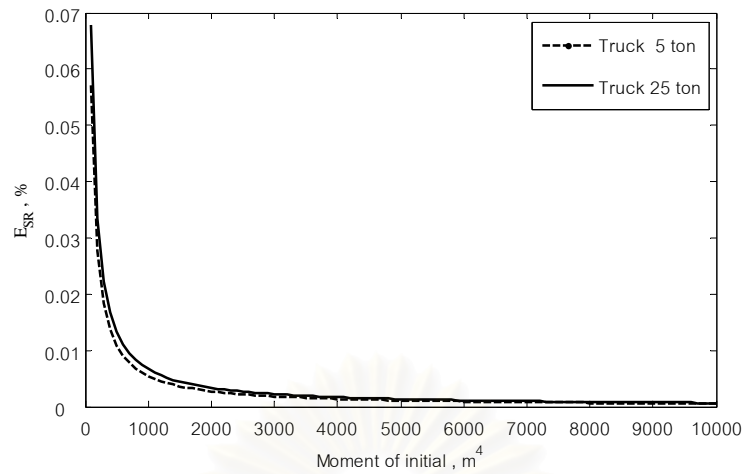
ลักษณะกราฟความคลาดเคลื่อนในการทายน้ำหนักของแบบจำลองรถในรูปที่ 4.2 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อความยาวของแท่นชั่งน้ำหนักมีค่ามากขึ้น ลักษณะกราฟความคลาดเคลื่อนของรถบรรทุก 5 ตันมีแนวโน้มการลดลงอย่างชัดเจน แต่ลักษณะกราฟความคลาดเคลื่อนของรถบรรทุก 25 ตันมีลักษณะลดลงเป็นแบบคลื่น พิจารณาจากรูปที่ 4.10 - 4.12 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักรถส่งผลต่อคาบการสั่นของรถ ถ้ารถมีน้ำหนักมากก็จะทำให้คาบการสั่นของรถมีค่ามากขึ้นไปด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้ค่าสัญญาณแรงพลศาสตร์ จึงทำให้การประมาณน้ำหนักรถมีความผันผวนมากกว่าแบบจำลองรถที่มีน้ำหนักน้อยกว่า

ความยาวระหว่างฐานรองรับที่เหมาะสมสำหรับแท่นชั่งน้ำหนักควรมีค่าเท่ากับ 0.50 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับแท่นชั่งที่มีความยาวระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 0.75 และ 1.00 เมตร จะเห็นได้ว่า ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรถมีค่าลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าสัดส่วนทางด้านค่าใช้จ่ายในการสร้างแท่นชั่งน้ำหนัก ส่วนแท่นชั่งน้ำหนักที่มีความยาวระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 0.25 เมตรถึงแม้จะมีความแม่นยำมากกว่า แต่เนื่องด้วยแท่นชั่งน้ำหนักที่มีความยาวระหว่างฐานรองรับ 0.50 และ 0.25 เมตรมีความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.08 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายอีกสองเท่าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 0.08 ในการหาน้ำหนักรถ เมื่อทราบความยาวระหว่างฐานรองรับที่เหมาะสมแล้วจะทำการพิจารณาความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งน้ำหนักโดยสังเกตจากรูปความคลาดเคลื่อน จะเห็นได้ว่าคลาดเคลื่อนมีการลดลงในอัตราที่ต่ำลงและเริ่มคงที่ที่ความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 10 เมตร ดังนั้นความยาวทั้งหมดของแท่นชั่งน้ำหนักที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 10 เมตร

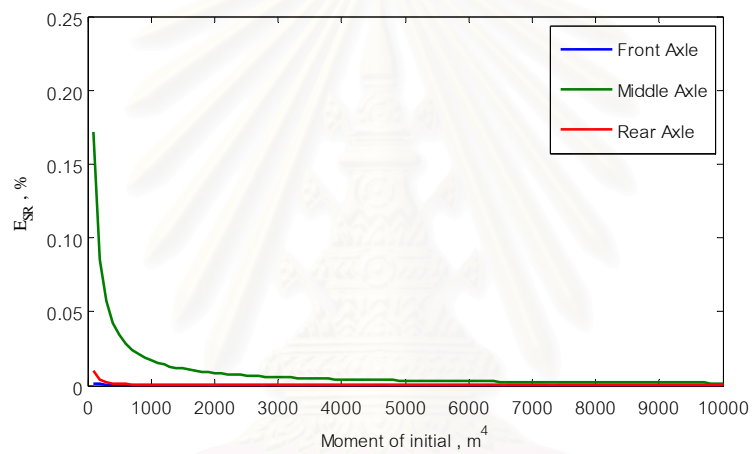
#### 4.1.2 ออกแบบค่าคุณสมบัติหน้าตัดที่เหมาะสมสำหรับแท่นชั่งน้ำหนัก

การออกแบบคุณสมบัติหน้าตัดของแท่นชั่งน้ำหนัก จะพิจารณาจากค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อย (moment of initial) เท่านั้น โดยทำการเปลี่ยนค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยจาก 100 ถึง 10,000 เมตร<sup>4</sup> แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ณ ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ

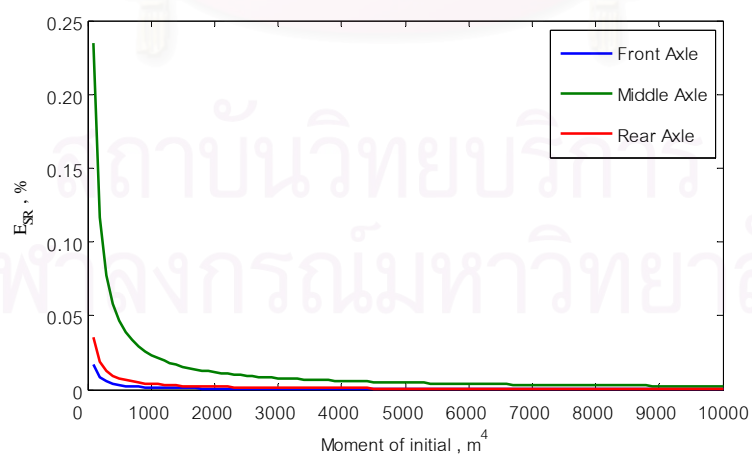
จากการวิเคราะห์แบบจำลองโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อย จะเห็นได้ว่ามีค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยมีค่าเพิ่มมากขึ้นความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรถมีค่าลดลง โดยจะมีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เมื่อค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยมีค่ามากขึ้นอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนก็ลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องด้วยค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยมีผลต่อการกระจัดของแท่นชั่งน้ำหนัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อารสั่นและแรงพลศาสตร์ในเพลารถ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 3,000 เมตร<sup>4</sup> ความคลาดเคลื่อนลดลงในอัตราที่น้อยลงและเริ่มมีค่าคงที่ ดังนั้น ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยที่เหมาะสมควรมีค่าเท่ากับ 3,000 เมตร<sup>4</sup> สำหรับแท่นชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 4.13 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถที่ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ



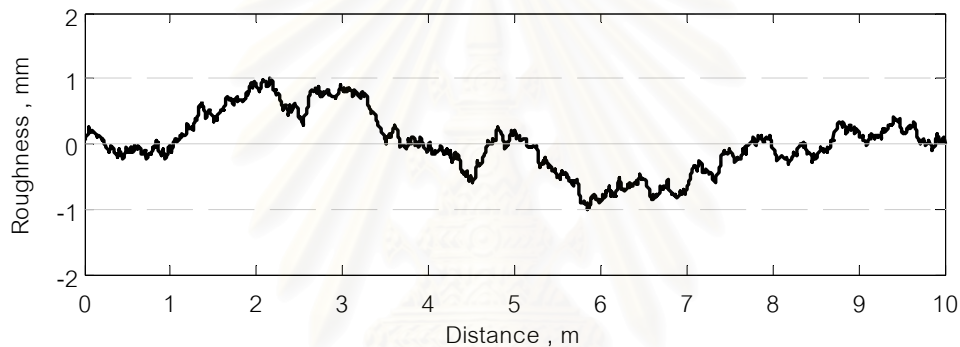
รูปที่ 4.14 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลลาของรถ 5 ตันที่ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ



รูปที่ 4.15 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลลาของรถ 25 ตัน ที่ค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยต่างๆ

#### 4.2 พิจารณาขนาดความขรุขระ

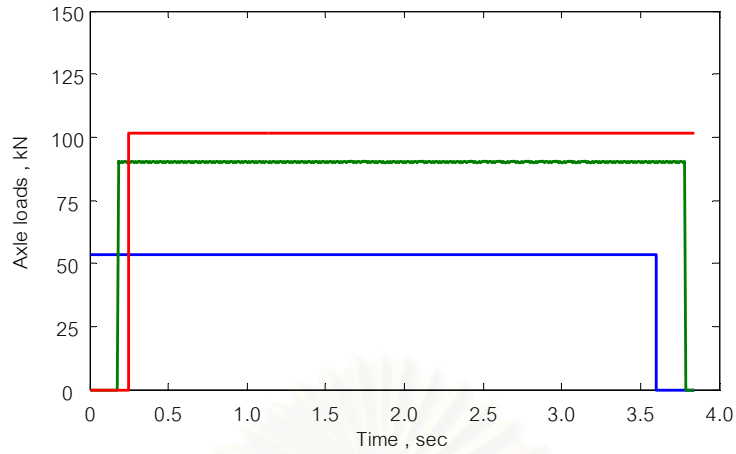
การออกแบบในช่วงแรกไม่ได้พิจารณาถึงความขรุขระบนผิวของแท่นซึ่งน้ำหนัก แต่ในความจริงแล้วความขรุขระมีผลต่อแรงพลศาสตร์ในเพลารถ ซึ่งส่งผลต่อการประมาณค่าน้ำหนักรถอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถกำหนดลักษณะความขรุขระที่แน่นอนได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จึงสมมติลักษณะความขรุขระตาม ISO 8606 (ISO, 1995) ส่วนขนาดความสูงของความขรุขระหาโดยใช้แบบจำลองรถบรรทุกที่มีน้ำหนักบรรทุกรวม 25 ตัน ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ตามหัวข้อ 4.1 วิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักที่มีลักษณะความขรุขระดังรูปที่ 4.16 โดยกำหนดค่าความสูงของความขรุขระมีค่าต่างๆ ซึ่งเท่ากับ 0 , 1 , 2 และ 3 มิลลิเมตร แล้วพิจารณาความเป็นไปได้ในการเกิดความเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในเพลาดังกล่าว โดยเปรียบเทียบเป็นร้อยละเทียบกับน้ำหนักในเพลานั้นๆ ซึ่งจะกำหนดความยาวของแท่นซึ่งทั้งหมดเท่ากับ 80 เมตร โดยมีลักษณะความขรุขระเหมือนกันทุกๆ 10 เมตร เพื่อจะให้เห็นสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่เกิดจากผลของความขรุขระได้อย่างชัดเจน



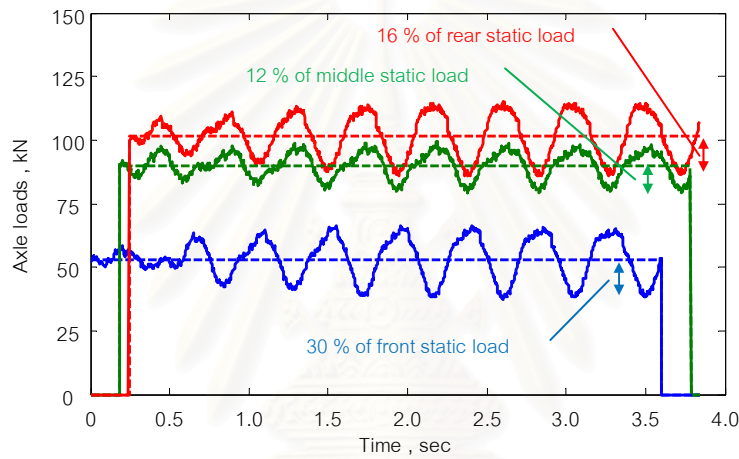
รูปที่ 4.16 ความขรุขระบนแท่นซึ่งน้ำหนักระยะ 10 เมตร โดยสมมติขนาดความขรุขระมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.17 – 4.20 จะเห็นว่าแบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนักที่มีขนาดความขรุขระ 3 มิลลิเมตร สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำหนักของรถมีการเปลี่ยนแปลงไปจากน้ำหนักในเพลารถมากถึงร้อยละ 90 ซึ่งถือว่าค่าที่มาก แต่เนื่องด้วยแท่นซึ่งน้ำหนักถูกออกแบบให้มีผิวทางที่เรียบลดผลทางพลศาสตร์ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำแบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนักที่มีขนาดความขรุขระ 3 มิลลิเมตรมาใช้ในการศึกษานี้ ส่วนแบบจำลองแท่นซึ่งน้ำหนักที่มีขนาดความขรุขระ 2 มิลลิเมตร แรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากน้ำหนักในเพลาน้ำหนักร้อยละ 60 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการสันของรถที่ใช้ในการศึกษาการหาน้ำหนักรถด้วยแท่นซึ่งน้ำหนัก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดให้แท่นซึ่งมีขนาดความขรุขระเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดความขรุขระที่เหมาะสมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแรงพลศาสตร์ที่มีค่าที่เหมาะสม

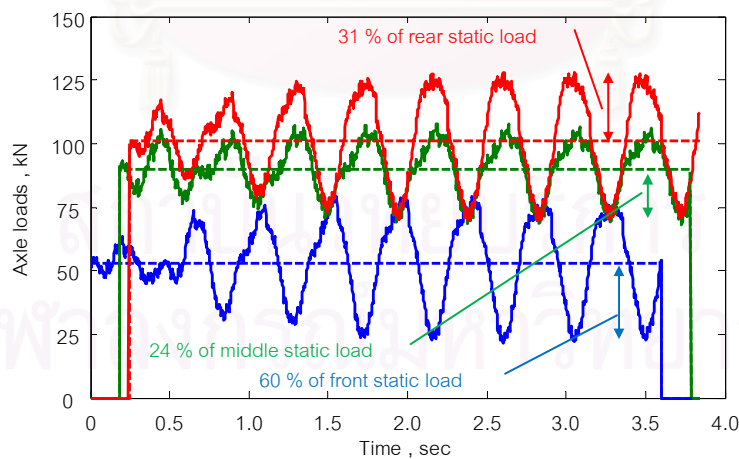




รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งที่ไม่มีความขรุขระ

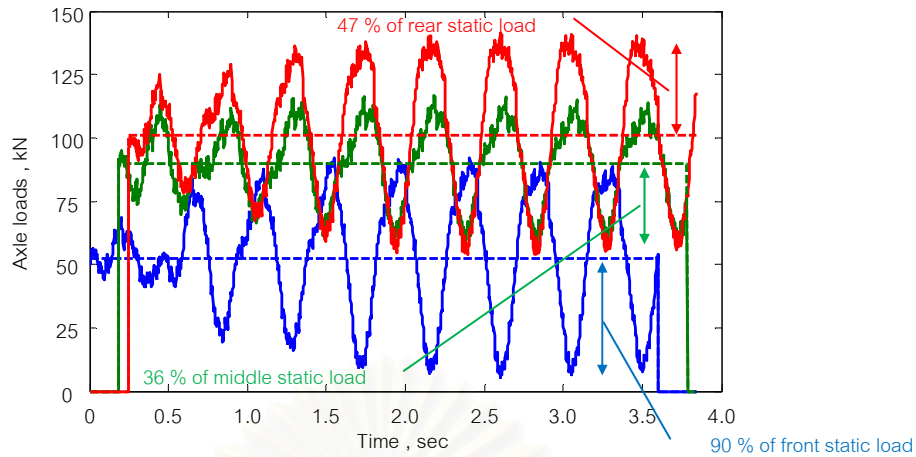


รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งที่มีความขรุขระขนาด 1 มิลลิเมตร

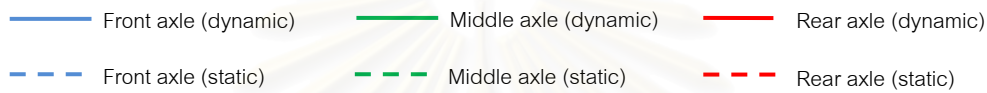


รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งที่มีความขรุขระขนาด 2 มิลลิเมตร

- 
- 
- 
- Front axle (dynamic)
- Middle axle (dynamic)
- Rear axle (dynamic)
- 
- 
- 
- Front axle (static)
- Middle axle (static)
- Rear axle (static)



รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งที่มีความขรุขระขนาด 3 มิลลิเมตร



#### 4.3 การหาน้ำหนักรถขณะวิ่งผ่านบนแท่นซึ่งน้ำหนัก

พฤติกรรมของรถขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนัก เช่น น้ำหนักของรถ และความเร็วขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนัก มีผลต่อการประมาณน้ำหนักรถ เพื่อศึกษาปัจจัยทั้งสองตัวนี้ จึงจำลองรถให้มีค่าน้ำหนักบรรทุกและความเร็วมีค่าต่างๆ โดยพิจารณาจากรถบรรทุกมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 10 – 55 ตัน ซึ่งน้ำหนักของรถในแต่ละแบบจำลองจะแตกต่างกัน 5 ตัน ส่วนความเร็วของรถมีค่าตั้งแต่ 5 – 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยความเร็วมีการเพิ่มทีละ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กำหนดให้คุณสมบัติช่วงล่างของรถบรรทุกมีค่าตามตารางที่ 4.1 ระยะระหว่างเพลาน้ำกับเพลากลางมีค่าเท่ากับ 4.00 เมตร ระยะระหว่างเพลาน้ำและหลังมีค่าเท่ากับ 5.30 เมตร และสถานะการสั่นของรถขณะเริ่มเข้าแท่นซึ่งน้ำหนัก (initial condition) มีค่าเป็นศูนย์ ทำการจำลองให้รถบรรทุกวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักซึ่งมีลักษณะตามที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น และพิจารณาความขรุขระของผิวแท่นซึ่งน้ำหนักมีขนาดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์แบบจำลองก็จะได้ข้อมูลต่างๆที่จะนำไปใช้ในการศึกษาผลกระทบเนื่องจากความเร็วและน้ำหนักของรถที่มีผลต่อการประมาณน้ำหนักรถ

##### 4.3.1 การหาน้ำหนักรถแบบทราบข้อมูลทั้งหมด

ข้อมูลที่สำคัญในการประมาณสัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถได้แก่ สัญญาณความเร่ง สัญญาณความเร็ว สัญญาณแรงที่ฐานรองรับของแท่นน้ำหนัก และตำแหน่งเพลลาของรถ การทดสอบความแม่นยำในการประมาณน้ำหนักรถทำโดยนำสัญญาณต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.3 มาแทนในสมการที่ (2.57) เพื่อประมาณแรงพลศาสตร์ ( $\hat{P}_{int}$ ) ในเพลารถและทำการเฉลี่ยเพื่อหาน้ำหนักของรถ ( $\hat{W}_T$ ) จากนั้นทำตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆในการคำนวณหาน้ำหนักของรถด้วยสมการที่ (2.63) ถึง (2.65)

ตารางที่ 4.2 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักรวม ( $\hat{W}_R$ ) จากแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.131	0.100	0.074	0.072	0.044	0.043	0.021	0.016	0.019	0.010
20	0.117	0.117	0.032	0.111	0.091	0.008	0.018	0.006	0.042	0.087
35	0.119	0.008	0.133	0.072	0.044	0.052	0.037	0.003	0.061	0.119
50	0.105	0.071	0.013	0.121	0.304	0.486	0.633	0.721	0.742	0.705
65	0.070	0.020	0.433	0.930	1.115	1.006	0.760	0.499	0.278	0.112
80	0.162	0.880	1.701	1.461	0.892	0.421	0.123	0.041	0.119	0.149
95	0.223	2.129	1.523	0.546	0.010	0.245	0.320	0.326	0.309	0.285
110	1.691	2.158	0.546	0.200	0.411	0.431	0.398	0.360	0.326	0.300
125	3.413	1.361	0.052	0.362	0.365	0.313	0.265	0.228	0.200	0.178
140	3.266	0.113	0.650	0.664	0.580	0.509	0.457	0.418	0.386	0.359

ตารางที่ 4.3 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักรวม ( $\hat{W}_T$ ) จากแรงพลศาสตร์ที่ได้จาก  
ประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.131	0.100	0.074	0.072	0.044	0.043	0.021	0.016	0.019	0.010
20	0.117	0.117	0.032	0.111	0.091	0.008	0.018	0.006	0.042	0.087
35	0.119	0.008	0.133	0.072	0.044	0.052	0.037	0.003	0.061	0.119
50	0.105	0.071	0.013	0.121	0.304	0.486	0.633	0.721	0.742	0.705
65	0.070	0.020	0.433	0.930	1.115	1.006	0.760	0.499	0.278	0.112
80	0.162	0.880	1.701	1.461	0.892	0.421	0.123	0.041	0.119	0.149
95	0.223	2.129	1.523	0.546	0.010	0.245	0.320	0.326	0.309	0.285
110	1.691	2.158	0.546	0.200	0.411	0.431	0.398	0.360	0.326	0.300
125	3.413	1.361	0.052	0.362	0.365	0.313	0.265	0.228	0.200	0.178
140	3.266	0.113	0.650	0.664	0.580	0.509	0.457	0.418	0.386	0.359

หมายเหตุ : ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 2

ตารางที่ 4.4 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลาน้ำจากแรงพลศาสตร์จริง ( $\mathbf{P}_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.016	0.042	0.047	0.060	0.006	0.025	0.016	0.029	0.001	0.018
20	0.058	0.241	0.088	0.122	0.112	0.156	0.195	0.057	0.125	0.285
35	0.133	0.410	0.327	0.425	0.099	0.131	0.367	0.561	0.637	0.618
50	0.188	0.636	0.786	1.239	1.205	1.005	0.849	0.766	0.730	0.713
65	0.370	0.952	1.080	0.846	0.736	0.682	0.616	0.523	0.412	0.297
80	1.212	1.765	1.620	1.471	1.256	0.999	0.747	0.528	0.350	0.212
95	1.251	1.619	1.292	0.801	0.330	0.045	0.314	0.495	0.611	0.680
110	1.998	1.782	0.894	0.139	0.367	0.669	0.833	0.909	0.932	0.923
125	3.278	2.004	0.766	0.046	0.310	0.454	0.486	0.459	0.404	0.337
140	2.623	0.498	0.742	1.270	1.436	1.436	1.364	1.265	1.160	1.058

ตารางที่ 4.5 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลาน้ำจากแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\mathbf{P}}_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.016	0.042	0.047	0.060	0.006	0.025	0.016	0.029	0.001	0.018
20	0.058	0.241	0.088	0.122	0.112	0.156	0.195	0.057	0.125	0.285
35	0.133	0.410	0.327	0.425	0.099	0.131	0.367	0.561	0.637	0.618
50	0.188	0.636	0.786	1.239	1.205	1.005	0.849	0.766	0.730	0.713
65	0.370	0.952	1.080	0.846	0.736	0.682	0.616	0.523	0.412	0.297
80	1.212	1.765	1.620	1.471	1.256	0.999	0.747	0.528	0.350	0.212
95	1.251	1.619	1.292	0.801	0.330	0.045	0.314	0.495	0.611	0.680
110	1.998	1.782	0.894	0.139	0.367	0.669	0.833	0.909	0.932	0.923
125	3.278	2.004	0.766	0.046	0.310	0.454	0.486	0.459	0.404	0.337
140	2.623	0.498	0.742	1.270	1.436	1.436	1.364	1.265	1.160	1.058

- หมายเหตุ :
- ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 3
  - ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 3
  - ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 2

ตารางที่ 4.6 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลากลางจากแรงพลศาสตร์จริง ( $P_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.670	0.451	0.331	0.258	0.214	0.178	0.160	0.151	0.131	0.123
20	0.651	0.380	0.229	0.197	0.247	0.095	0.042	0.123	0.158	0.124
35	0.618	0.231	0.316	0.180	0.271	0.215	0.214	0.282	0.341	0.369
50	0.535	0.445	0.414	0.563	0.681	0.785	0.866	0.873	0.799	0.669
65	0.749	0.799	1.148	1.447	1.347	0.979	0.575	0.253	0.036	0.091
80	1.046	1.800	2.003	1.182	0.405	0.039	0.226	0.271	0.253	0.213
95	1.628	2.652	1.081	0.023	0.328	0.360	0.295	0.219	0.159	0.117
110	3.323	1.718	0.052	0.440	0.385	0.268	0.182	0.131	0.107	0.097
125	3.851	0.299	0.554	0.456	0.294	0.200	0.159	0.146	0.146	0.150
140	2.789	0.486	0.563	0.342	0.229	0.192	0.187	0.192	0.197	0.201

ตารางที่ 4.7 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักในเพลากลางจากแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{P}_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.670	0.451	0.331	0.258	0.214	0.178	0.160	0.151	0.131	0.123
20	0.651	0.380	0.229	0.197	0.247	0.095	0.042	0.123	0.158	0.124
35	0.618	0.231	0.316	0.180	0.271	0.215	0.214	0.282	0.341	0.369
50	0.535	0.445	0.414	0.563	0.681	0.785	0.866	0.873	0.799	0.669
65	0.749	0.799	1.148	1.447	1.347	0.979	0.575	0.253	0.036	0.091
80	1.046	1.800	2.003	1.182	0.405	0.039	0.226	0.271	0.253	0.213
95	1.628	2.652	1.081	0.023	0.328	0.360	0.295	0.219	0.159	0.117
110	3.323	1.718	0.052	0.440	0.385	0.268	0.182	0.131	0.107	0.097
125	3.851	0.299	0.554	0.456	0.294	0.200	0.159	0.146	0.146	0.150
140	2.789	0.486	0.563	0.342	0.229	0.192	0.187	0.192	0.197	0.201

หมายเหตุ : ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 2

ตารางที่ 4.8 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการหาน้ำหนักในเฟลาหลังจากแรงพลศาสตร์จริง ( $P_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.284	0.182	0.141	0.087	0.080	0.068	0.083	0.082	0.069	0.075
20	0.333	0.198	0.176	0.029	0.059	0.013	0.015	0.095	0.098	0.037
35	0.159	0.022	0.139	0.210	0.392	0.375	0.450	0.502	0.450	0.328
50	0.355	0.615	0.775	0.858	0.482	0.031	0.325	0.566	0.697	0.732
65	0.780	1.256	0.565	0.516	1.101	1.188	0.992	0.704	0.428	0.206
80	1.431	0.495	1.477	1.702	1.138	0.543	0.130	0.105	0.218	0.258
95	1.838	1.971	2.045	0.875	0.100	0.243	0.345	0.341	0.300	0.251
110	0.049	2.787	0.885	0.165	0.456	0.457	0.381	0.302	0.238	0.192
125	3.106	1.925	0.060	0.494	0.455	0.344	0.252	0.191	0.153	0.130
140	4.183	0.416	0.676	0.630	0.459	0.335	0.261	0.218	0.193	0.177

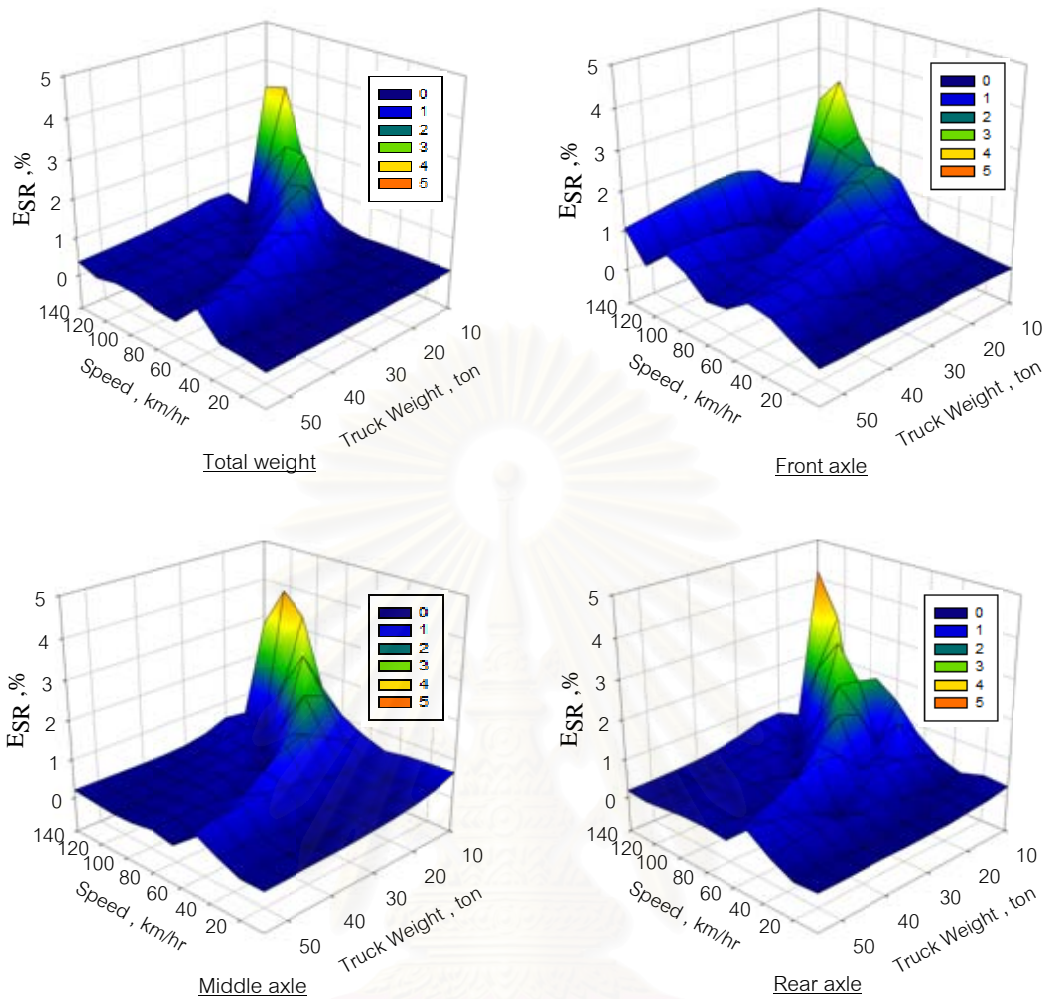
ตารางที่ 4.9 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการหาน้ำหนักในเฟลาหลังจากแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $P_{int}$ )

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.284	0.182	0.141	0.087	0.080	0.068	0.083	0.082	0.069	0.075
20	0.333	0.198	0.176	0.029	0.059	0.013	0.015	0.095	0.098	0.037
35	0.159	0.022	0.139	0.210	0.392	0.375	0.450	0.502	0.450	0.328
50	0.355	0.615	0.775	0.858	0.482	0.031	0.325	0.566	0.697	0.732
65	0.780	1.256	0.565	0.516	1.101	1.188	0.992	0.704	0.428	0.206
80	1.431	0.495	1.477	1.702	1.138	0.543	0.130	0.105	0.218	0.258
95	1.838	1.971	2.045	0.875	0.100	0.243	0.345	0.341	0.300	0.251
110	0.049	2.787	0.885	0.165	0.456	0.457	0.381	0.302	0.238	0.192
125	3.106	1.925	0.060	0.494	0.455	0.344	0.252	0.191	0.153	0.130
140	4.183	0.416	0.676	0.630	0.459	0.335	0.261	0.218	0.193	0.177

หมายเหตุ : ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 2



รูปที่ 4.21 ความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถ

การประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถเมื่อทราบสัญญาณที่จำเป็นทั้งหมดโดยใช้สมการที่ (2.57) จะได้ว่าแรงพลศาสตร์จากการประมาณมีค่าเท่ากับแรงพลศาสตร์จริง โดยความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ ( $E_D$ ) ตามสมการ (2.65) มีค่าเท่ากับศูนย์ จากตารางที่ 4.2 – 4.9 จะเห็นได้ว่าในในความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถด้วยสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง ( $P_{int}$ ) กับความคลาดเคลื่อน ( $E_{SR}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถจากสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{P}_{int}$ ) มีค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประมาณแรงพลศาสตร์มีความแม่นยำสูงมากถ้าทราบสัญญาณที่จำเป็นทั้งหมด

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า เมื่อรถมีน้ำหนักคงที่ ความคลาดเคลื่อนมีลักษณะขึ้นลงเมื่อรถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22-4.24 จะได้ว่า เมื่อรถมีความเร็วสูงขึ้น สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถจะมีความแปรปรวนมากขึ้น ซึ่งการประมาณน้ำหนักรถทำได้โดยการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถ ทำให้ลักษณะของสัญญาณแรงพลศาสตร์มีผลต่อการเฉลี่ยหาค่าน้ำหนักรถ ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถหน้าของรถบรรทุก 25 ตันที่มีความเร็ว 80 และ 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสัญญาณแรงพลศาสตร์มีค่าแอมพลิจูดใกล้เคียงกัน แต่มีลักษณะสัญญาณแตกต่างกัน ทำให้การประมาณน้ำหนักในเพลารถ

หน้าของรถมีค่าที่แตกต่างกัน โดยความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถที่มีความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.47 แต่ความคลาดเคลื่อนในรถที่มีความเร็ว 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.27 ซึ่งจะได้ว่าการประมาณในรถที่มีความเร็ว 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักจริงมากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากสัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำหน้าของรถที่มีความเร็ว 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมงมีลักษณะเป็นคลื่นที่ครบหนึ่งรอบทำให้ค่าน้ำหนักที่ได้จากเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าในรถที่มีความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งมีลักษณะสัญญาณแรงพลศาสตร์เป็นคลื่นที่ไม่ครบรอบ

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่ากราฟความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีลักษณะคล้ายกราฟความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางและหลังของรถบรรทุก ทั้งนี้ เนื่องจากรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษานี้ น้ำหนักของตัวรถมีการกระจายน้ำหนักไปยังเพลาคู่หลังมากกว่าเพลาน้ำหน้า ทำให้การประมาณน้ำหนักในเพลาคู่หลังมีอิทธิพลต่อการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเป็นอย่างมาก จึงทำให้ลักษณะความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีลักษณะคล้ายกับความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาคู่หลัง

#### 4.3.2 อิทธิพลเนื่องจากสัญญาณต่างๆที่มีผลต่อการหาแรงพลศาสตร์ของเพลาน้ำหน้ารถ

ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาว่าสัญญาณแรงที่ฐานรองรับของแท่งน้ำหนัก ความเร่ง และความเร็ว มีผลต่ออิทธิพลต่อการประมาณน้ำหนักอย่างไร จากสมการที่ (2.50) สามารถแบ่งแรงพลศาสตร์ได้เป็น 3 ส่วน โดยแต่ละส่วนเป็นผลมาจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับของแท่งน้ำหนัก ความเร่ง และความเร็ว

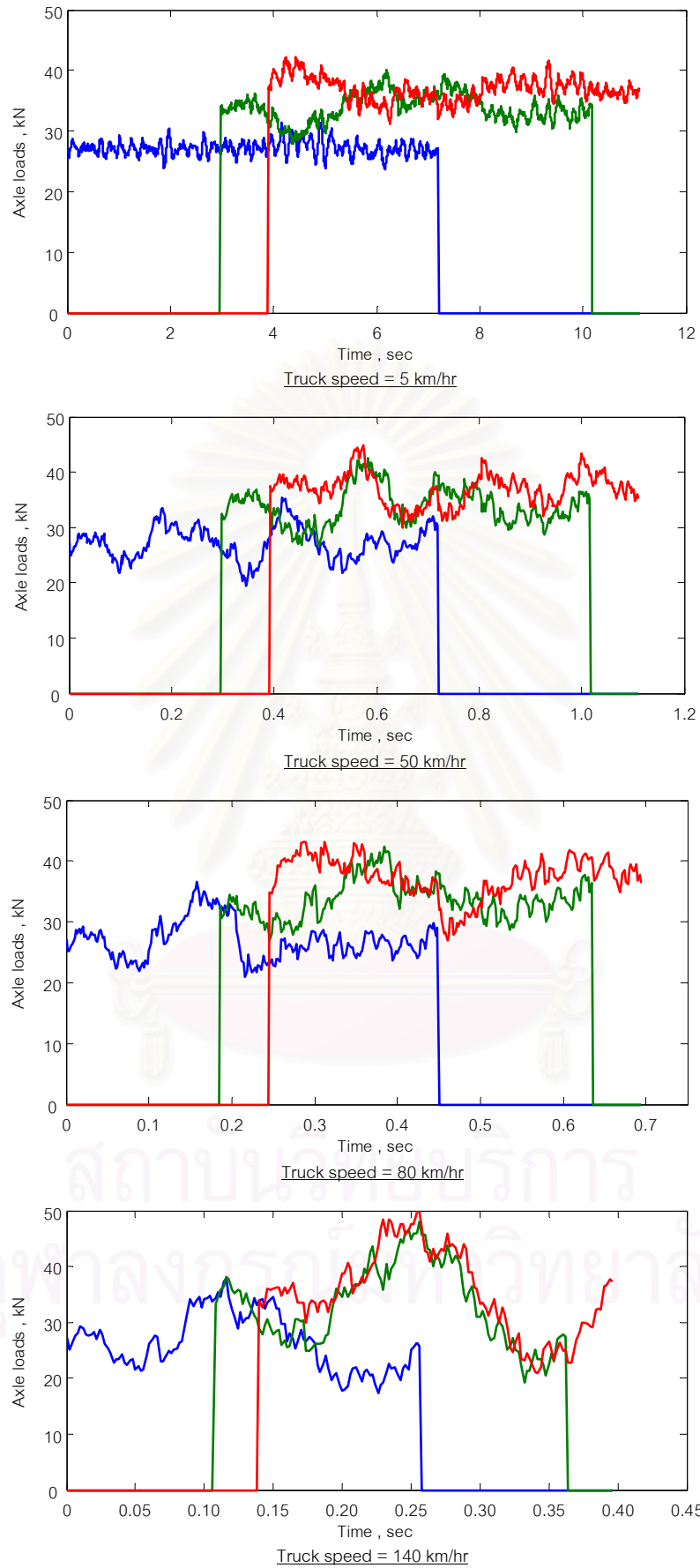
$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{int},R} = (\mathbf{T}^T \cdot \mathbf{T})^{-1} \cdot \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{R} \quad (4.01a)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{int},\ddot{u}} = -(\mathbf{T}^T \cdot \mathbf{T})^{-1} \cdot \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{K}_{b,P} \cdot \mathbf{K}_{b,M}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{b,M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} \quad (4.01b)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{int},\dot{u}} = -(\mathbf{T}^T \cdot \mathbf{T})^{-1} \cdot \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{K}_{b,P} \cdot \mathbf{K}_{b,M}^{-1} \cdot \mathbf{C}_{b,M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \quad (4.01c)$$

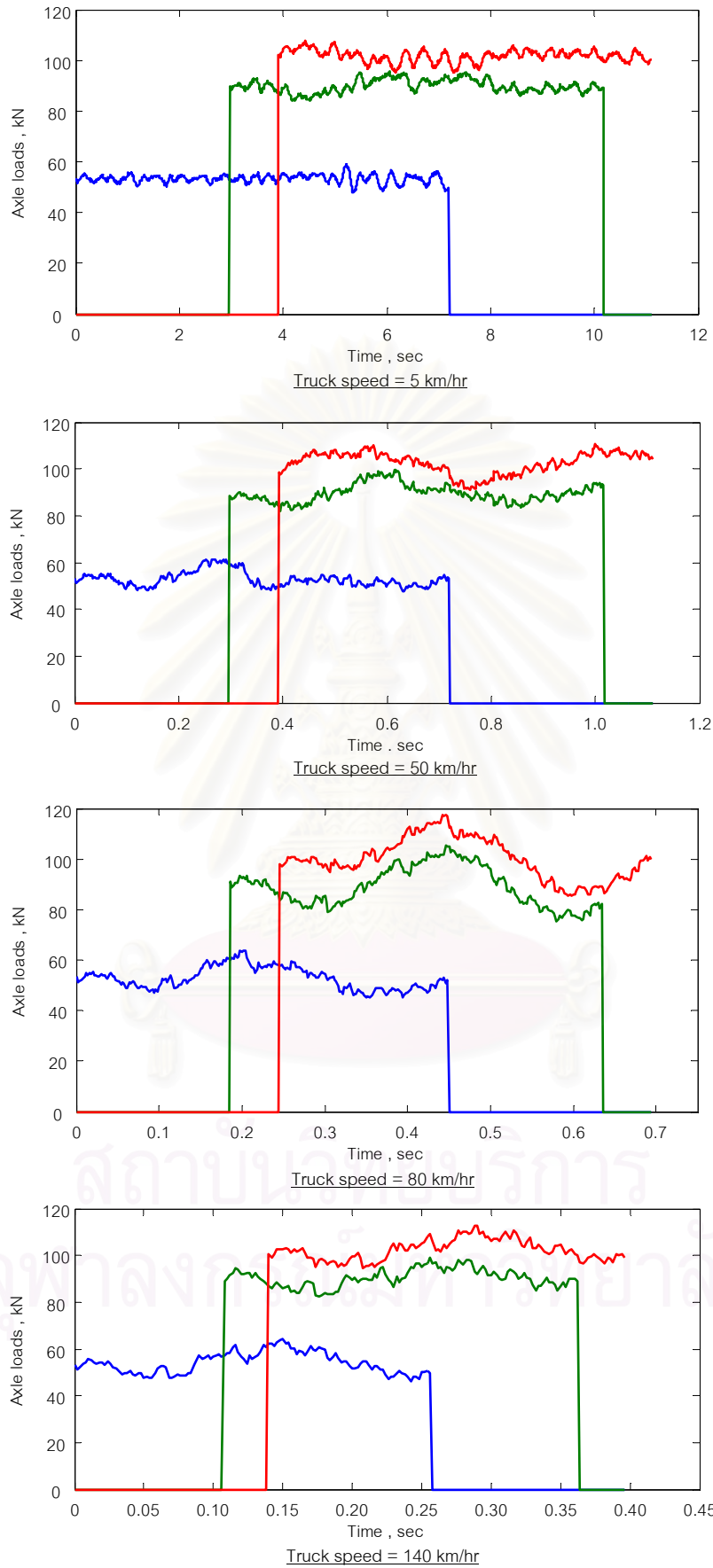
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





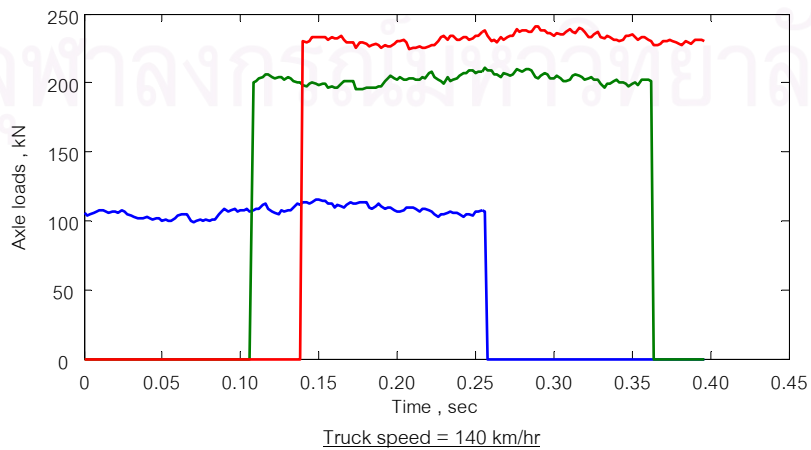
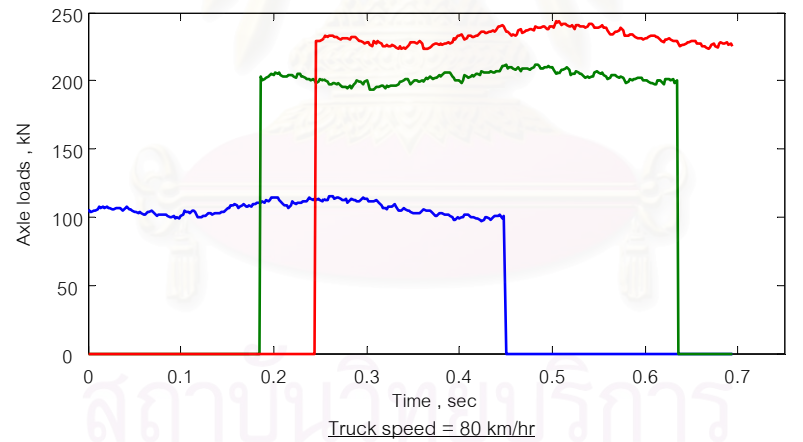
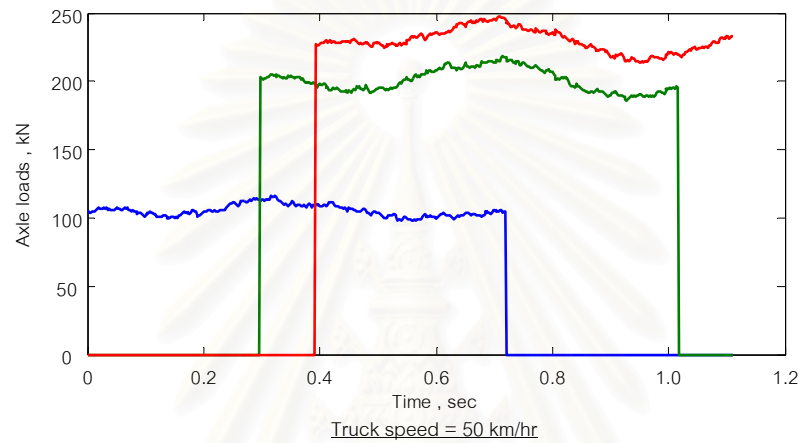
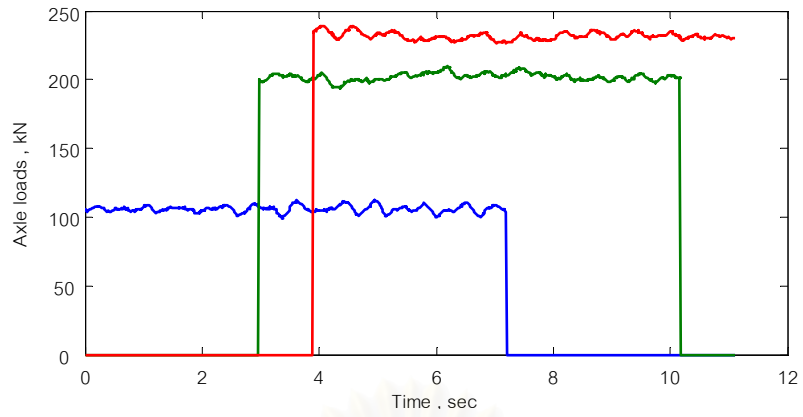
รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถบรรทุก 5 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วต่างๆ

— Front axle      — Middle axle      — Rear axle



รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถบรรทุก 25 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วต่างๆ

— Front axle      — Middle axle      — Rear axle



รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถบรรทุก 55 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วต่างๆ

— Front axle      — Middle axle      — Rear axle

สัดส่วนแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณโดยสัญญาณต่างๆในแรงพลศาสตร์จริงคำนวณได้ดังนี้

$$\alpha_{ii} = \frac{\|\hat{\mathbf{P}}_{int,ii}\|}{\sqrt{n} \cdot P_{static}} \quad (4.02a)$$

$$\alpha_i = \frac{\|\hat{\mathbf{P}}_{int,i}\|}{\sqrt{n} \cdot P_{static}} \quad (4.02b)$$

$$\alpha_R = 1 - \alpha_{ii} - \alpha_i \quad (4.02c)$$

โดยที่ $\alpha_{ii}$	คือ สัดส่วนของแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้สัญญาณความเร่งเพียงอย่างเดียวในแรงพลศาสตร์จริง
$\alpha_i$	คือ สัดส่วนของแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้สัญญาณความเร็วเพียงอย่างเดียวในแรงพลศาสตร์จริง
$\alpha_R$	คือ สัดส่วนของแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้สัญญาณแรงพื้นฐานรองรับเพียงอย่างเดียวในแรงพลศาสตร์จริง
$\ x\ $	คือ นอร์ม $x$
$P_{static}$	คือ ค่าแรงของรถซึ่งได้จากการชั่งน้ำหนักในสภาวะหยุดนิ่ง
$n$	คือ จำนวนสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ใช้ในคำนวณสัดส่วนในแรงพลศาสตร์

การศึกษาสัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับของแท่งน้ำหนัก ความเร่ง และความเร็ว ทำได้โดยนำข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.3.1 มาใช้ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.10 – 4.12 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับมีอิทธิพลเป็นอย่างมากในการหาแรงพลศาสตร์ของรถ โดยมีสัดส่วนในแรงพลศาสตร์เป็นร้อยละ 98.13 ถึง 99.99 ส่วนสัญญาณความเร่งมีค่าสัดส่วนในแรงพลศาสตร์ร้อยละ 0.003 ถึง 1.81 และสัญญาณความเร็วมีค่าสัดส่วนในแรงพลศาสตร์คิดเป็นร้อยละ 0.002 ถึง 0.06

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 สัดส่วนแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำของรถบรรทุก ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ  
ความเร่ง และความเร็ว

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุก, ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	99.982	99.986	99.988	99.990	99.991	99.991	99.992	99.992	99.993	99.993
	<u>0.016</u>	<u>0.012</u>	<u>0.010</u>	<u>0.009</u>	<u>0.008</u>	<u>0.007</u>	<u>0.006</u>	<u>0.006</u>	<u>0.006</u>	<u>0.005</u>
	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>
20	99.895	99.918	99.931	99.940	99.946	99.951	99.954	99.956	99.958	99.960
	<u>0.098</u>	<u>0.075</u>	<u>0.062</u>	<u>0.053</u>	<u>0.047</u>	<u>0.042</u>	<u>0.039</u>	<u>0.037</u>	<u>0.035</u>	<u>0.033</u>
	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>
35	99.752	99.807	99.840	99.862	99.877	99.888	99.897	99.903	99.909	99.913
	<u>0.235</u>	<u>0.180</u>	<u>0.147</u>	<u>0.126</u>	<u>0.111</u>	<u>0.100</u>	<u>0.091</u>	<u>0.085</u>	<u>0.079</u>	<u>0.075</u>
	<u>0.014</u>	<u>0.013</u>	<u>0.013</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>
50	99.537	99.639	99.699	99.738	99.764	99.783	99.798	99.809	99.817	99.824
	<u>0.443</u>	<u>0.343</u>	<u>0.283</u>	<u>0.245</u>	<u>0.218</u>	<u>0.199</u>	<u>0.185</u>	<u>0.174</u>	<u>0.166</u>	<u>0.159</u>
	<u>0.020</u>	<u>0.019</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.017</u>	<u>0.017</u>	<u>0.017</u>	<u>0.017</u>
65	99.305	99.464	99.559	99.622	99.666	99.698	99.723	99.742	99.757	99.770
	<u>0.667</u>	<u>0.510</u>	<u>0.416</u>	<u>0.354</u>	<u>0.311</u>	<u>0.279</u>	<u>0.254</u>	<u>0.235</u>	<u>0.220</u>	<u>0.207</u>
	<u>0.028</u>	<u>0.026</u>	<u>0.025</u>	<u>0.024</u>	<u>0.024</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>
80	98.959	99.199	99.341	99.432	99.494	99.539	99.572	99.597	99.616	99.631
	<u>1.008</u>	<u>0.770</u>	<u>0.630</u>	<u>0.540</u>	<u>0.478</u>	<u>0.433</u>	<u>0.400</u>	<u>0.375</u>	<u>0.356</u>	<u>0.341</u>
	<u>0.033</u>	<u>0.031</u>	<u>0.030</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>
95	98.833	99.103	99.263	99.367	99.440	99.493	99.533	99.564	99.588	99.608
	<u>1.128</u>	<u>0.861</u>	<u>0.702</u>	<u>0.598</u>	<u>0.526</u>	<u>0.473</u>	<u>0.433</u>	<u>0.403</u>	<u>0.378</u>	<u>0.359</u>
	<u>0.039</u>	<u>0.036</u>	<u>0.035</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>
110	98.657	98.970	99.157	99.279	99.365	99.427	99.474	99.511	99.540	99.563
	<u>1.293</u>	<u>0.985</u>	<u>0.800</u>	<u>0.679</u>	<u>0.594</u>	<u>0.532</u>	<u>0.485</u>	<u>0.449</u>	<u>0.420</u>	<u>0.397</u>
	<u>0.049</u>	<u>0.045</u>	<u>0.043</u>	<u>0.042</u>	<u>0.041</u>	<u>0.041</u>	<u>0.041</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>
125	98.541	98.847	99.024	99.137	99.213	99.268	99.308	99.338	99.361	99.380
	<u>1.405</u>	<u>1.104</u>	<u>0.929</u>	<u>0.817</u>	<u>0.741</u>	<u>0.687</u>	<u>0.647</u>	<u>0.618</u>	<u>0.595</u>	<u>0.576</u>
	<u>0.054</u>	<u>0.049</u>	<u>0.047</u>	<u>0.046</u>	<u>0.046</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.044</u>	<u>0.044</u>
140	98.128	98.543	98.790	98.952	99.066	99.149	99.211	99.260	99.299	99.331
	<u>1.813</u>	<u>1.401</u>	<u>1.156</u>	<u>0.995</u>	<u>0.882</u>	<u>0.800</u>	<u>0.737</u>	<u>0.688</u>	<u>0.650</u>	<u>0.619</u>
	<u>0.059</u>	<u>0.056</u>	<u>0.054</u>	<u>0.053</u>	<u>0.052</u>	<u>0.052</u>	<u>0.052</u>	<u>0.051</u>	<u>0.051</u>	<u>0.051</u>

(คิดเป็นร้อยละ ; ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ, ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์  
เนื่องจากสัญญาณความเร่ง และ ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณความเร็ว)

ตารางที่ 4.11 สัดส่วนแรงพลศาสตร์ในเพลากลางของรถบรรทุก ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ  
ความเร่ง และความเร็ว

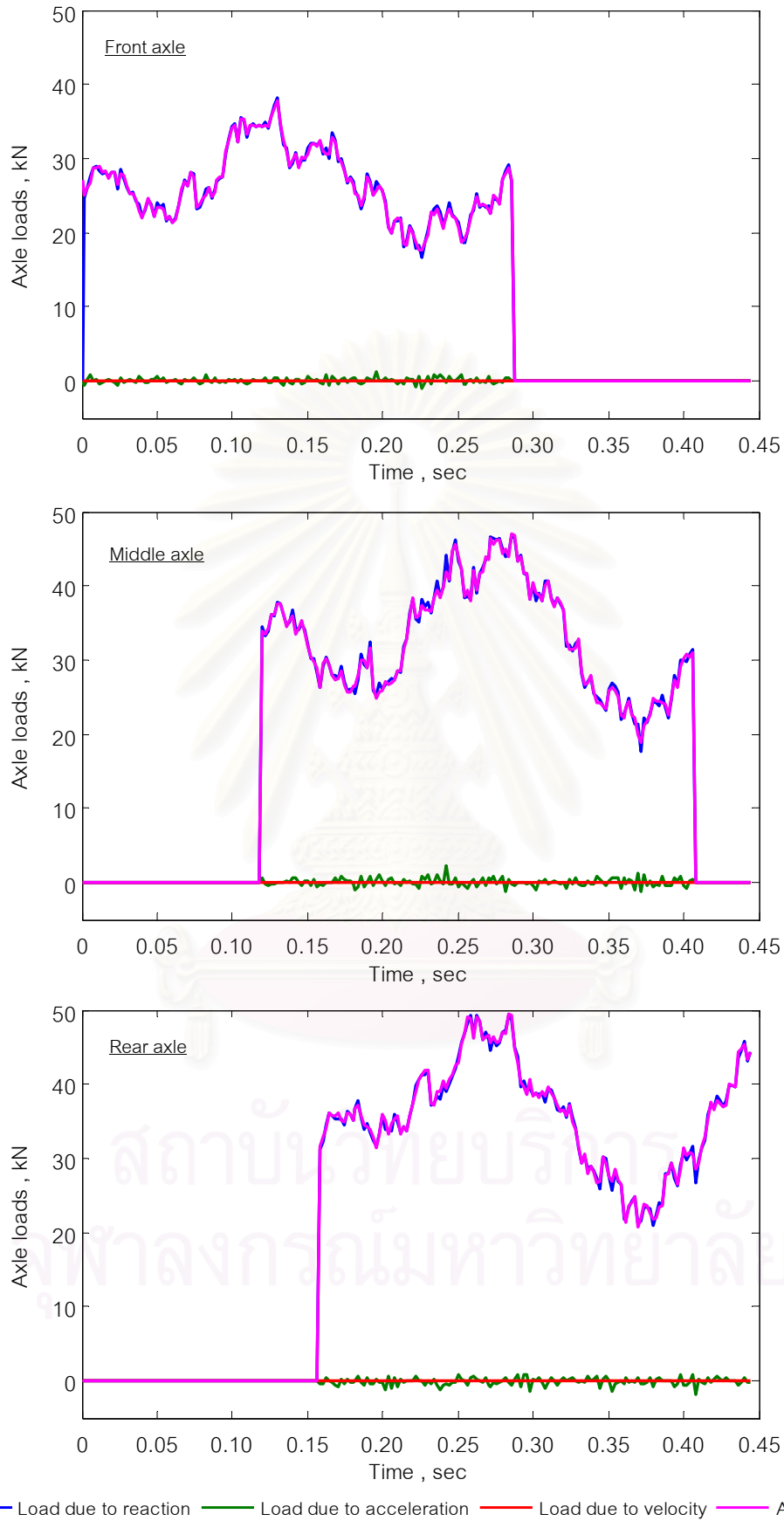
ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักบรรทุกทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	99.982	99.988	99.990	99.992	99.993	99.993	99.994	99.994	99.994	99.994
	<u>0.016</u>	<u>0.011</u>	<u>0.008</u>	<u>0.007</u>	<u>0.006</u>	<u>0.005</u>	<u>0.005</u>	<u>0.004</u>	<u>0.004</u>	<u>0.004</u>
	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>
20	99.896	99.929	99.945	99.954	99.960	99.963	99.966	99.968	99.970	99.971
	<u>0.097</u>	<u>0.063</u>	<u>0.048</u>	<u>0.039</u>	<u>0.033</u>	<u>0.030</u>	<u>0.027</u>	<u>0.025</u>	<u>0.023</u>	<u>0.022</u>
	<u>0.008</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>
35	99.760	99.836	99.871	99.891	99.903	99.912	99.918	99.922	99.926	99.928
	<u>0.227</u>	<u>0.152</u>	<u>0.117</u>	<u>0.097</u>	<u>0.084</u>	<u>0.076</u>	<u>0.070</u>	<u>0.066</u>	<u>0.062</u>	<u>0.060</u>
	<u>0.013</u>	<u>0.013</u>	<u>0.013</u>	<u>0.013</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>
50	99.572	99.714	99.780	99.818	99.842	99.859	99.871	99.880	99.886	99.892
	<u>0.407</u>	<u>0.267</u>	<u>0.202</u>	<u>0.164</u>	<u>0.140</u>	<u>0.124</u>	<u>0.112</u>	<u>0.103</u>	<u>0.096</u>	<u>0.091</u>
	<u>0.021</u>	<u>0.019</u>	<u>0.019</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>
65	99.283	99.521	99.633	99.696	99.736	99.764	99.784	99.799	99.810	99.819
	<u>0.689</u>	<u>0.453</u>	<u>0.343</u>	<u>0.280</u>	<u>0.240</u>	<u>0.213</u>	<u>0.193</u>	<u>0.178</u>	<u>0.167</u>	<u>0.158</u>
	<u>0.028</u>	<u>0.026</u>	<u>0.025</u>	<u>0.024</u>	<u>0.024</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>
80	98.964	99.317	99.482	99.578	99.639	99.681	99.712	99.735	99.753	99.767
	<u>1.002</u>	<u>0.653</u>	<u>0.488</u>	<u>0.394</u>	<u>0.332</u>	<u>0.290</u>	<u>0.259</u>	<u>0.236</u>	<u>0.218</u>	<u>0.204</u>
	<u>0.034</u>	<u>0.031</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>	<u>0.029</u>
95	98.809	99.217	99.407	99.517	99.588	99.637	99.672	99.699	99.720	99.736
	<u>1.150</u>	<u>0.747</u>	<u>0.558</u>	<u>0.449</u>	<u>0.378</u>	<u>0.329</u>	<u>0.294</u>	<u>0.267</u>	<u>0.247</u>	<u>0.230</u>
	<u>0.042</u>	<u>0.036</u>	<u>0.035</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>
110	98.603	99.074	99.295	99.421	99.502	99.558	99.598	99.628	99.651	99.668
	<u>1.354</u>	<u>0.886</u>	<u>0.666</u>	<u>0.540</u>	<u>0.459</u>	<u>0.403</u>	<u>0.363</u>	<u>0.334</u>	<u>0.311</u>	<u>0.293</u>
	<u>0.043</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>	<u>0.039</u>	<u>0.039</u>	<u>0.039</u>	<u>0.039</u>	<u>0.039</u>	<u>0.039</u>	<u>0.039</u>
125	98.390	98.930	99.182	99.326	99.418	99.480	99.525	99.558	99.583	99.603
	<u>1.557</u>	<u>1.022</u>	<u>0.771</u>	<u>0.628</u>	<u>0.537</u>	<u>0.475</u>	<u>0.430</u>	<u>0.398</u>	<u>0.372</u>	<u>0.353</u>
	<u>0.053</u>	<u>0.048</u>	<u>0.047</u>	<u>0.046</u>	<u>0.046</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>
140	98.388	98.910	99.153	99.290	99.377	99.435	99.477	99.508	99.532	99.550
	<u>1.555</u>	<u>1.037</u>	<u>0.796</u>	<u>0.660</u>	<u>0.573</u>	<u>0.515</u>	<u>0.473</u>	<u>0.443</u>	<u>0.419</u>	<u>0.401</u>
	<u>0.057</u>	<u>0.053</u>	<u>0.051</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.049</u>	<u>0.049</u>

(คิดเป็นร้อยละ ; ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ, ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์  
เนื่องจากสัญญาณความเร่ง และ ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณความเร็ว)

ตารางที่ 4.12 สัดส่วนแรงพลศาสตร์ในเพลาลังของรถบรรทุก ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ  
ความเร่ง และความเร็ว

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	99.984	99.989	99.991	99.993	99.993	99.994	99.994	99.994	99.995	99.995
	<u>0.015</u>	<u>0.009</u>	<u>0.007</u>	<u>0.006</u>	<u>0.005</u>	<u>0.004</u>	<u>0.004</u>	<u>0.004</u>	<u>0.004</u>	<u>0.003</u>
	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>
20	99.907	99.938	99.952	99.959	99.964	99.968	99.970	99.971	99.973	99.974
	<u>0.086</u>	<u>0.055</u>	<u>0.041</u>	<u>0.034</u>	<u>0.029</u>	<u>0.025</u>	<u>0.023</u>	<u>0.022</u>	<u>0.020</u>	<u>0.019</u>
	<u>0.008</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>	<u>0.007</u>
35	99.788	99.861	99.893	99.912	99.924	99.932	99.938	99.942	99.946	99.948
	<u>0.199</u>	<u>0.127</u>	<u>0.094</u>	<u>0.076</u>	<u>0.064</u>	<u>0.056</u>	<u>0.050</u>	<u>0.046</u>	<u>0.042</u>	<u>0.040</u>
	<u>0.013</u>	<u>0.013</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>	<u>0.012</u>
50	99.586	99.727	99.791	99.827	99.850	99.866	99.877	99.885	99.892	99.897
	<u>0.394</u>	<u>0.254</u>	<u>0.191</u>	<u>0.155</u>	<u>0.132</u>	<u>0.116</u>	<u>0.105</u>	<u>0.097</u>	<u>0.091</u>	<u>0.086</u>
	<u>0.020</u>	<u>0.019</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>	<u>0.018</u>
65	99.390	99.605	99.702	99.756	99.791	99.814	99.830	99.842	99.851	99.857
	<u>0.584</u>	<u>0.370</u>	<u>0.274</u>	<u>0.221</u>	<u>0.187</u>	<u>0.164</u>	<u>0.147</u>	<u>0.135</u>	<u>0.127</u>	<u>0.120</u>
	<u>0.027</u>	<u>0.024</u>	<u>0.024</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>	<u>0.023</u>
80	99.187	99.475	99.607	99.680	99.727	99.759	99.782	99.799	99.813	99.823
	<u>0.779</u>	<u>0.494</u>	<u>0.365</u>	<u>0.291</u>	<u>0.245</u>	<u>0.213</u>	<u>0.190</u>	<u>0.173</u>	<u>0.159</u>	<u>0.149</u>
	<u>0.034</u>	<u>0.031</u>	<u>0.029</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>	<u>0.028</u>
95	98.922	99.299	99.468	99.559	99.615	99.653	99.679	99.699	99.714	99.726
	<u>1.036</u>	<u>0.665</u>	<u>0.497</u>	<u>0.407</u>	<u>0.351</u>	<u>0.313</u>	<u>0.287</u>	<u>0.267</u>	<u>0.252</u>	<u>0.241</u>
	<u>0.042</u>	<u>0.036</u>	<u>0.035</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>	<u>0.034</u>
110	98.731	99.167	99.354	99.455	99.519	99.562	99.593	99.615	99.632	99.646
	<u>1.219</u>	<u>0.790</u>	<u>0.605</u>	<u>0.504</u>	<u>0.441</u>	<u>0.398</u>	<u>0.368</u>	<u>0.345</u>	<u>0.328</u>	<u>0.315</u>
	<u>0.050</u>	<u>0.043</u>	<u>0.042</u>	<u>0.041</u>	<u>0.041</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>	<u>0.040</u>
125	98.598	99.079	99.286	99.402	99.476	99.526	99.562	99.588	99.608	99.624
	<u>1.351</u>	<u>0.875</u>	<u>0.668</u>	<u>0.553</u>	<u>0.479</u>	<u>0.430</u>	<u>0.394</u>	<u>0.368</u>	<u>0.348</u>	<u>0.332</u>
	<u>0.052</u>	<u>0.047</u>	<u>0.046</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.045</u>	<u>0.044</u>	<u>0.044</u>	<u>0.044</u>
140	98.643	99.095	99.289	99.394	99.456	99.497	99.524	99.543	99.557	99.567
	<u>1.297</u>	<u>0.851</u>	<u>0.658</u>	<u>0.554</u>	<u>0.493</u>	<u>0.453</u>	<u>0.426</u>	<u>0.407</u>	<u>0.393</u>	<u>0.383</u>
	<u>0.060</u>	<u>0.055</u>	<u>0.053</u>	<u>0.052</u>	<u>0.051</u>	<u>0.051</u>	<u>0.051</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>

(คิดเป็นร้อยละ ; ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ, ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์  
เนื่องจากสัญญาณความเร่ง และ ### สัดส่วนแรงพลศาสตร์เนื่องจากสัญญาณความเร็ว)



รูปที่ 4.25 แรงพลศาสตร์ของแบบจำลองรถบรรทุก 10 ตันวิ่งด้วยความเร็ว 125 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เทียบกับแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณมาจากค่าสัญญาณต่างๆ



#### 4.3.3 น้ำน้หนักกรแบบทราบข้อมูลความเร่งที่กลางกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ

ในทางปฏิบัติการวัดสัญญาณความเร็วและความเร่งไม่สามารถวัดค่าสัญญาณได้ทุกองศาอิสระ ดังนั้นจึงทำการวัดสัญญาณความเร่งที่องศาอิสระแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับในทุกช่วงของแท่นซึ่งนำหนักแล้วนำค่าสัญญาณความเร่งที่เก็บวัดมาได้ไปทำการประมาณความเร่งที่ตำแหน่งอื่นๆตามสมการที่ (2.62) และหาความเร็วได้ด้วยสมการที่ (2.42) เมื่อทราบสัญญาณต่างๆ จึงทำการหาแรงพลศาสตร์ของรถด้วยสมการที่ (2.57) เพื่อเป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการประมาณน้ำน้หนักรถ จึงนำวิธีการนี้ไปใช้ในการหาน้ำน้หนักรถในหัวข้อ 4.3 แล้วพิจารณาความคลาดเคลื่อนซึ่งคำนวณด้วยสมการที่ (2.64) - (2.65)

ตารางที่ 4.13 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำน้หนักรวมของรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำน้หนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.142	0.105	0.076	0.072	0.044	0.041	0.019	0.013	0.016	0.007
20	0.113	0.115	0.032	0.113	0.094	0.012	0.014	0.002	0.046	0.091
35	0.252	0.082	0.201	0.127	0.003	0.011	0.001	0.035	0.090	0.146
50	0.079	0.063	0.015	0.128	0.314	0.499	0.648	0.738	0.759	0.723
65	0.006	0.027	0.402	0.907	1.099	0.994	0.752	0.493	0.274	0.110
80	0.105	0.831	1.659	1.423	0.857	0.387	0.089	0.073	0.151	0.181
95	0.219	2.121	1.511	0.535	0.022	0.257	0.332	0.339	0.321	0.297
110	1.768	2.220	0.600	0.150	0.363	0.384	0.353	0.316	0.283	0.257
125	3.377	1.336	0.071	0.379	0.379	0.326	0.276	0.238	0.209	0.187
140	3.478	0.257	0.538	0.571	0.501	0.440	0.395	0.361	0.333	0.309

ตารางที่ 4.14 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำน้หนักในเพลาน้ันรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำน้หนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.011	0.037	0.041	0.054	0.013	0.018	0.022	0.036	0.008	0.025
20	0.034	0.223	0.074	0.111	0.103	0.164	0.202	0.063	0.120	0.281
35	0.057	0.352	0.375	0.466	0.134	0.162	0.395	0.587	0.661	0.640
50	0.177	0.630	0.783	1.238	1.205	1.007	0.852	0.770	0.734	0.717
65	0.477	1.036	1.149	0.906	0.790	0.731	0.660	0.564	0.450	0.333
80	1.163	1.734	1.601	1.460	1.250	0.997	0.748	0.532	0.356	0.219
95	1.307	1.651	1.309	0.809	0.330	0.049	0.322	0.507	0.625	0.696
110	1.799	1.653	0.808	0.082	0.403	0.690	0.842	0.908	0.923	0.908
125	3.196	1.947	0.725	0.015	0.333	0.472	0.499	0.469	0.411	0.341
140	2.981	0.782	0.503	1.061	1.249	1.266	1.207	1.118	1.021	0.926

ตารางที่ 4.15 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.683	0.457	0.334	0.259	0.214	0.177	0.158	0.149	0.128	0.120
20	0.632	0.367	0.220	0.191	0.242	0.091	0.038	0.120	0.155	0.122
35	0.784	0.339	0.395	0.242	0.323	0.260	0.253	0.316	0.372	0.397
50	0.493	0.428	0.407	0.563	0.685	0.792	0.876	0.885	0.812	0.683
65	0.697	0.772	1.134	1.440	1.344	0.980	0.578	0.258	0.043	0.083
80	1.062	1.798	1.993	1.167	0.387	0.059	0.247	0.294	0.277	0.237
95	1.791	2.757	1.158	0.084	0.278	0.317	0.258	0.186	0.130	0.091
110	3.404	1.788	0.013	0.379	0.325	0.210	0.124	0.074	0.050	0.040
125	3.699	0.191	0.641	0.530	0.360	0.260	0.215	0.199	0.196	0.198
140	2.840	0.469	0.560	0.347	0.239	0.206	0.204	0.211	0.218	0.223

ตารางที่ 4.16 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.263	0.171	0.135	0.083	0.077	0.067	0.083	0.083	0.070	0.076
20	0.309	0.179	0.158	0.046	0.042	0.028	0.030	0.080	0.083	0.023
35	0.013	0.117	0.069	0.154	0.345	0.334	0.413	0.469	0.420	0.300
50	0.377	0.615	0.764	0.841	0.461	0.007	0.351	0.594	0.725	0.761
65	1.015	1.401	0.668	0.436	1.037	1.135	0.948	0.666	0.395	0.177
80	1.562	0.596	1.395	1.630	1.073	0.480	0.070	0.164	0.275	0.314
95	2.040	1.835	1.940	0.789	0.027	0.306	0.402	0.393	0.347	0.295
110	0.230	2.958	1.009	0.069	0.376	0.389	0.322	0.249	0.191	0.149
125	3.212	1.996	0.007	0.451	0.419	0.311	0.223	0.164	0.128	0.106
140	4.436	0.589	0.538	0.513	0.356	0.241	0.174	0.137	0.116	0.103

หมายเหตุ : ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 2

ตารางที่ 4.17 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.110	0.074	0.055	0.045	0.041	0.040	0.040	0.041	0.043	0.044
20	0.160	0.138	0.126	0.120	0.116	0.112	0.109	0.107	0.105	0.104
35	0.156	0.123	0.107	0.097	0.090	0.086	0.083	0.082	0.081	0.080
50	0.394	0.282	0.223	0.189	0.168	0.156	0.150	0.148	0.148	0.149
65	0.535	0.407	0.335	0.293	0.269	0.255	0.246	0.241	0.239	0.237
80	1.249	0.918	0.712	0.574	0.477	0.405	0.350	0.307	0.274	0.248
95	1.458	1.029	0.767	0.597	0.481	0.401	0.345	0.307	0.281	0.266
110	0.985	0.789	0.674	0.603	0.556	0.525	0.503	0.487	0.476	0.467
125	1.177	0.839	0.648	0.535	0.466	0.425	0.400	0.386	0.379	0.377
140	2.579	1.974	1.619	1.391	1.233	1.117	1.029	0.960	0.904	0.858

ตารางที่ 4.18 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลากลางรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.173	0.100	0.067	0.049	0.039	0.033	0.031	0.030	0.029	0.030
20	0.113	0.073	0.058	0.052	0.050	0.049	0.049	0.050	0.050	0.050
35	0.257	0.177	0.141	0.117	0.104	0.095	0.088	0.083	0.078	0.075
50	0.445	0.301	0.237	0.203	0.183	0.171	0.163	0.158	0.154	0.152
65	0.667	0.426	0.329	0.287	0.268	0.259	0.255	0.253	0.253	0.254
80	0.865	0.544	0.397	0.314	0.266	0.236	0.217	0.205	0.197	0.193
95	1.569	1.079	0.835	0.699	0.615	0.559	0.519	0.489	0.466	0.448
110	1.116	0.763	0.600	0.513	0.462	0.429	0.406	0.390	0.378	0.368
125	2.191	1.319	0.924	0.703	0.564	0.471	0.408	0.365	0.335	0.315
140	1.959	1.275	0.972	0.801	0.690	0.614	0.558	0.517	0.484	0.459

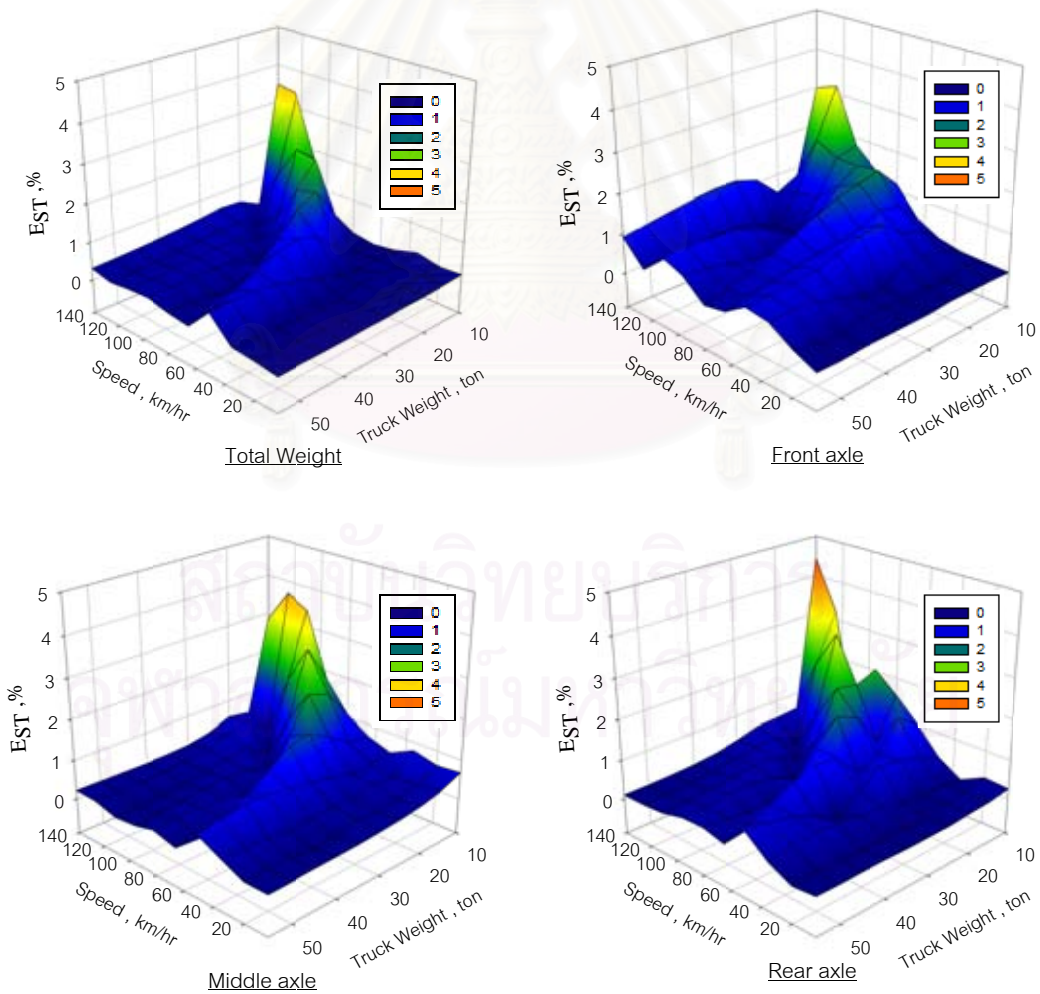
หมายเหตุ : ### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 3

### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 3

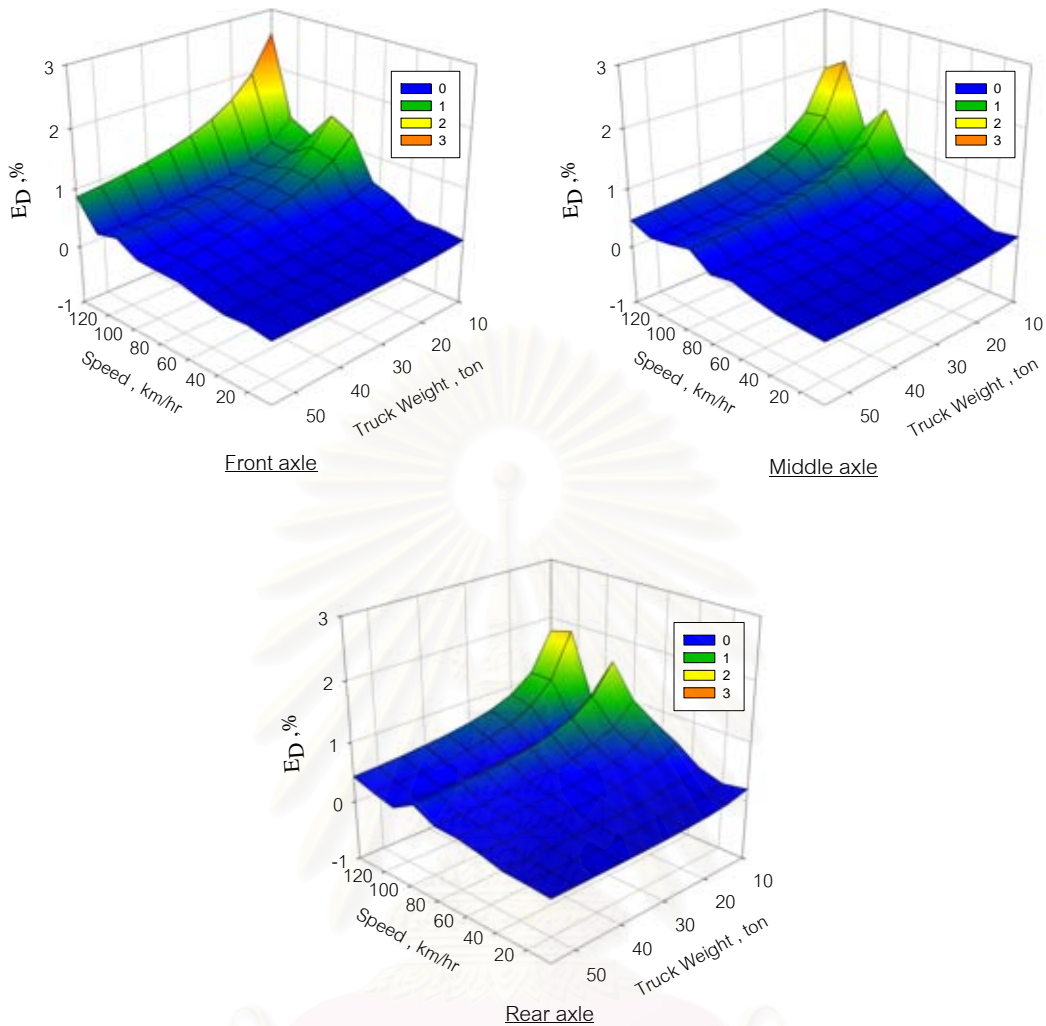
### คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 2

ตารางที่ 4.19 ร้อยละความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาลังรถบรรทุก

ความเร็ว กม./ชม.	น้ำหนักรถบรรทุก , ตัน									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	0.213	0.120	0.079	0.057	0.044	0.036	0.032	0.030	0.030	0.030
20	0.148	0.099	0.081	0.073	0.068	0.065	0.063	0.062	0.061	0.061
35	0.271	0.185	0.147	0.122	0.107	0.097	0.090	0.084	0.079	0.075
50	0.550	0.366	0.285	0.242	0.218	0.204	0.194	0.187	0.182	0.178
65	0.763	0.477	0.361	0.307	0.279	0.263	0.253	0.248	0.245	0.243
80	1.021	0.677	0.519	0.425	0.366	0.328	0.301	0.282	0.267	0.256
95	1.571	1.088	0.847	0.703	0.613	0.553	0.511	0.480	0.456	0.437
110	0.844	0.561	0.416	0.340	0.296	0.269	0.252	0.240	0.231	0.225
125	1.862	1.123	0.781	0.599	0.491	0.421	0.376	0.345	0.325	0.312
140	1.761	1.128	0.857	0.710	0.618	0.555	0.510	0.476	0.450	0.429



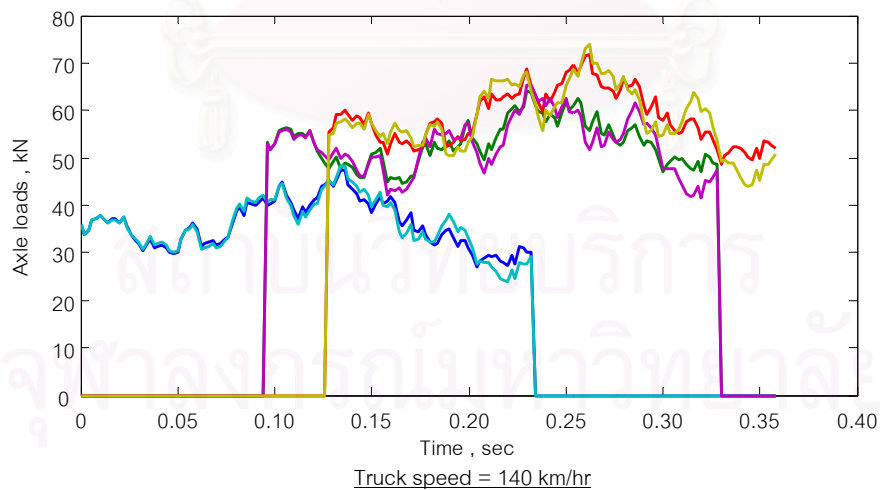
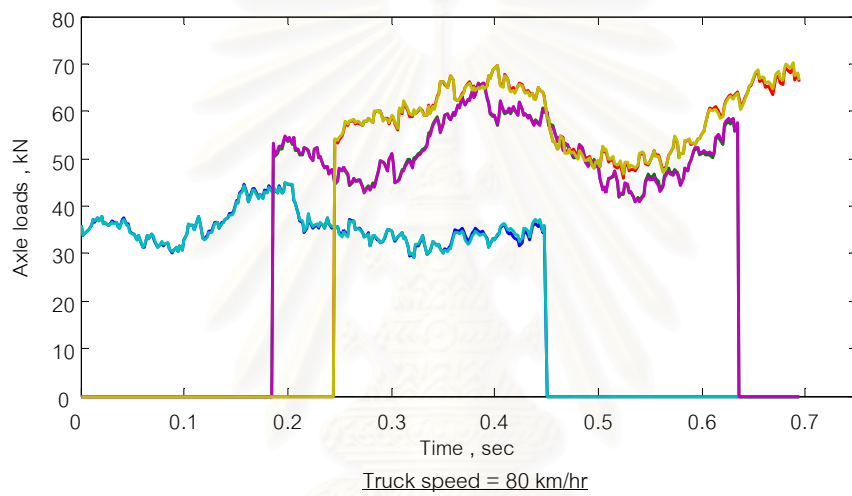
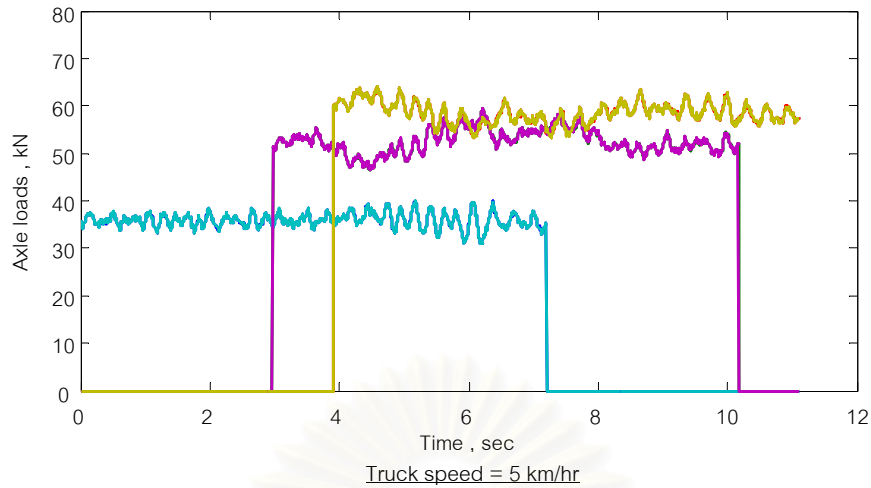
รูปที่ 4.26 ความคลาดเคลื่อน ( $E_{ST}$ ) ในการประมาณน้ำหนักของรถบรรทุก



รูปที่ 4.27 ความคลาดเคลื่อน ( $E_D$ ) ในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลลาต่างๆของรถบรรทุก

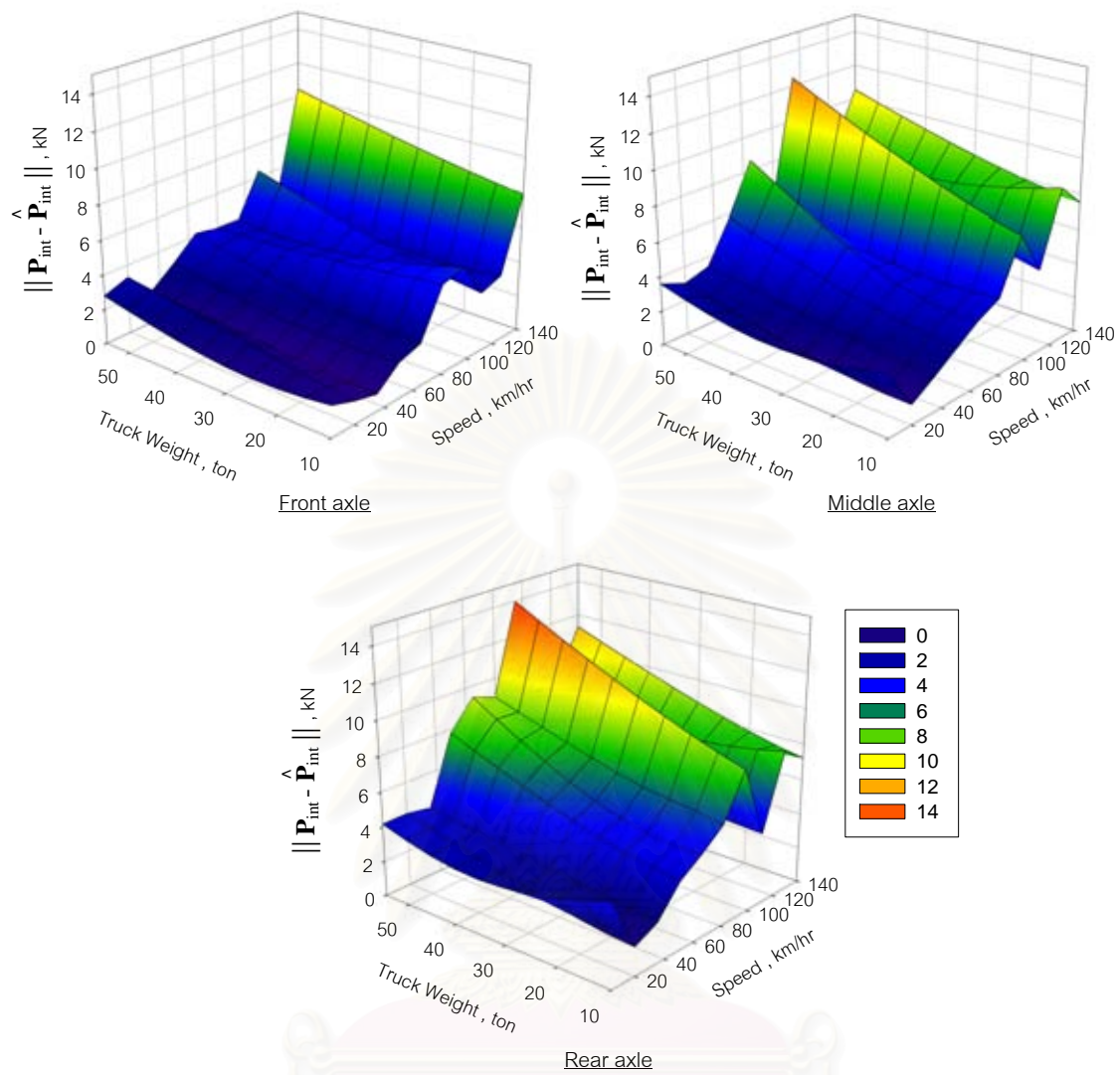
จากรูปที่ 4.27 ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์มีแนวโน้มที่ชัดเจน กล่าวคือ ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์จะสูงขึ้นเมื่อรถวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักด้วยความเร็วสูงและรถมีน้ำหนักน้อย พิจารณาจากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อรถมีความเร็วต่ำ การหาแรงพลศาสตร์จะมีความแม่นยำมาก เมื่อรถมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นการประมาณแรงพลศาสตร์ก็จะมีประสิทธิภาพต่ำลง ซึ่งความแตกต่างระหว่างแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณกับค่าจริงจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น

จากรูปที่ 4.29 ค่าอนุกรมของผลต่างระหว่างสัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าจริงจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อรถมีน้ำหนักมากขึ้น แต่ในการคำนวณความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลลานั้นมีการเทียบกับน้ำหนักในเพลลาด้วย ถึงแม้รถที่น้ำหนักมากจะมีความแตกต่างระหว่างแรงพลศาสตร์มากก็ตาม แต่ด้วยค่าน้ำหนักในเพลลาที่นำมาเทียบมีค่ามาก จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์มีค่าน้อย ส่วนรถที่มีน้ำหนักน้อยมีความแตกต่างระหว่างแรงพลศาสตร์น้อย แต่น้ำหนักในเพลลาที่นำมาเทียบมีค่าน้อย ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์มีค่ามาก



— Front axle (actual)      — Middle axle (actual)      — Rear axle (actual)  
— Front axle (identified)      — Middle axle (identified)      — Rear axle (identified)

รูปที่ 4.28 สัญญาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถบรรทุก 15 ตันขณะวิ่งผ่านแท่นซึ่งด้วยความเร็วต่างๆ โดยมี การเปรียบเทียบสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณกับสัญญาณแรงพลศาสตร์จริง



รูปที่ 4.29 ค่า norm ของผลต่างระหว่างแรงพลศาสตร์ในเพลลาที่ได้จากการประมาณกับค่าจริง เมื่อรถมีน้ำหนักและความเร็วต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การหาน้ำหนักรถโดยมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าสัญญาณ

แทนซึ่งน้ำหนักยานพาหนะขณะกำลังเคลื่อนที่จะมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ พื้นผิว คานรับแรง ฐานรองรับ และอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณต่างๆ ประสิทธิภาพการประมาณน้ำหนักของแทนซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของแทนซึ่งและความถูกต้องในการตรวจวัดสัญญาณต่างๆ โดยปัจจัยทางด้านลักษณะของแทนซึ่งได้กล่าวไว้ในกรอกแบบแทนซึ่งแล้ว ส่วนในบทนี้จะกล่าวถึงประสิทธิภาพการประมาณน้ำหนักเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าสัญญาณ

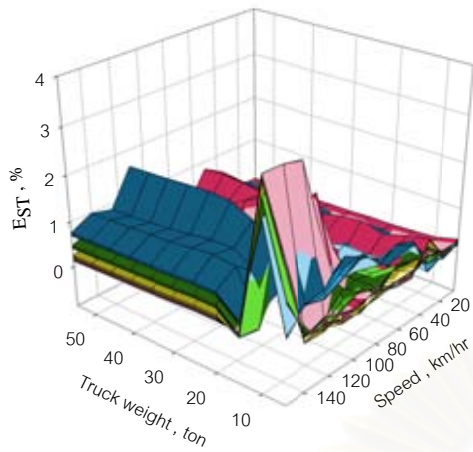
ค่าสัญญาณที่ใช้ในการประมาณน้ำหนัก ได้แก่ สัญญาณแรงที่ฐานรองรับ ตำแหน่งเพลลา และความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ โดยปกติแล้ว การวัดสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและสัญญาณความเร่งมักมีสัญญาณรบกวนอยู่เสมอ และการวัดสัญญาณบอกตำแหน่งเพลลาของรถมีความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่ง ดังนั้นจึงทำการศึกษาจะสมมติระดับความคลาดเคลื่อนแบบต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพในการประมาณค่าน้ำหนักรถ

ค่าสัญญาณที่ใช้ในการประมาณน้ำหนัก ได้แก่ สัญญาณแรงที่ฐานรองรับ ตำแหน่งเพลลา และความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ โดยปกติแล้ว การวัดสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและสัญญาณความเร่งมักมีสัญญาณรบกวนอยู่เสมอ และการวัดสัญญาณบอกตำแหน่งเพลลาของรถมีความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการประมาณค่าน้ำหนักรถเมื่อสัญญาณที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน จึงทำการสมมติความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในสัญญาณแบบต่างๆ

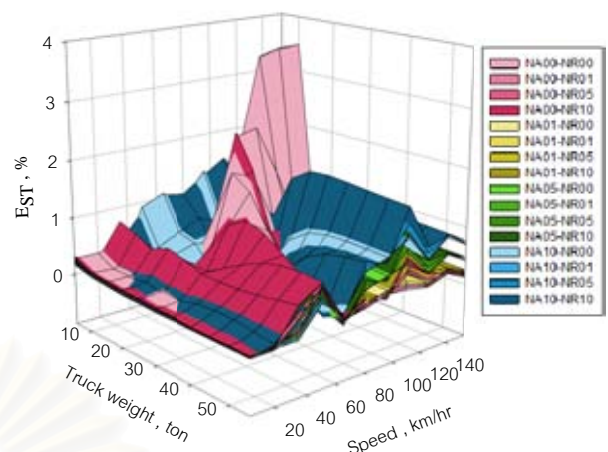
#### 5.1 การประมาณน้ำหนักรถโดยมีสัญญาณรบกวน (noise)

สัญญาณรบกวน (noise) เกิดขึ้นในการตรวจวัดสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและความเร่ง ซึ่งสัญญาณรบกวนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการประมาณน้ำหนักรถลดลง ซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณาผลความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ การสร้างสัญญาณรบกวนทำได้โดยการสุ่มสัญญาณแบบสม่ำเสมอ (uniform random) มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 แล้วคูณด้วยระดับของสัญญาณรบกวน โดยสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณแรงที่ฐานรองรับมีค่าเป็นร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยเทียบกับน้ำหนักที่มากที่สุดที่เพลลา ส่วนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณความเร่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับมีค่าเท่ากับร้อยละ 1, 5 และ 10 เทียบกับค่ามากที่สุดของสัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับใดๆ ขณะเวลาวิ่งผ่าน นำสัญญาณรบกวนที่ได้ไปบวกกับสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและความเร่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับซึ่งได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.3 นำสัญญาณที่รวมสัญญาณรบกวนมาทำการประมาณน้ำหนักรถ ซึ่งความคลาดเคลื่อนต่างๆในการประมาณน้ำหนักรถแสดงดังรูปที่ 5.1 - 5.5



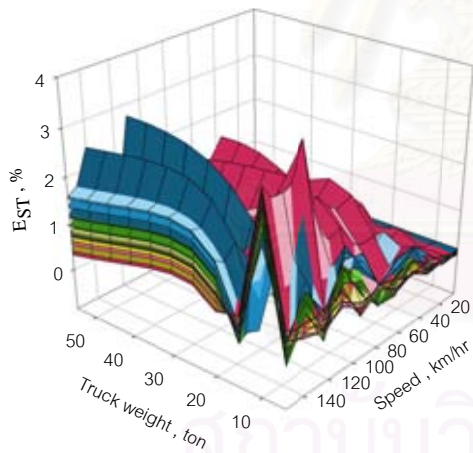


มุมมองที่ 1

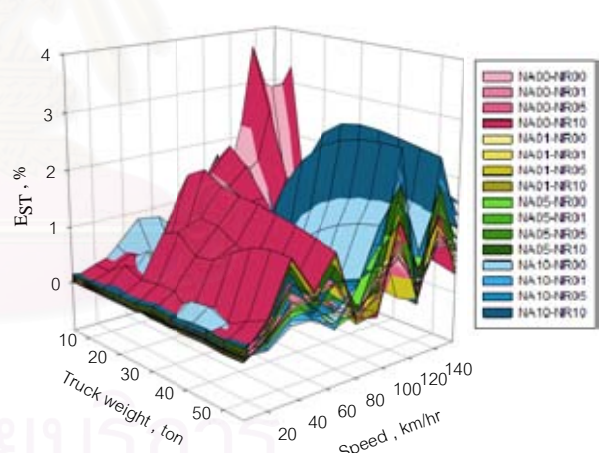


มุมมองที่ 2

รูปที่ 5.1 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน



มุมมองที่ 1

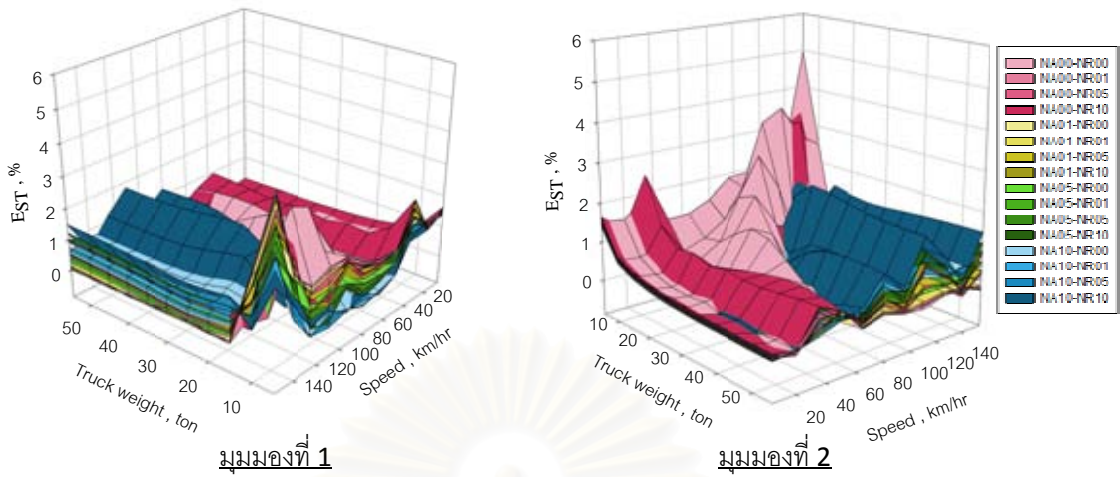


มุมมองที่ 2

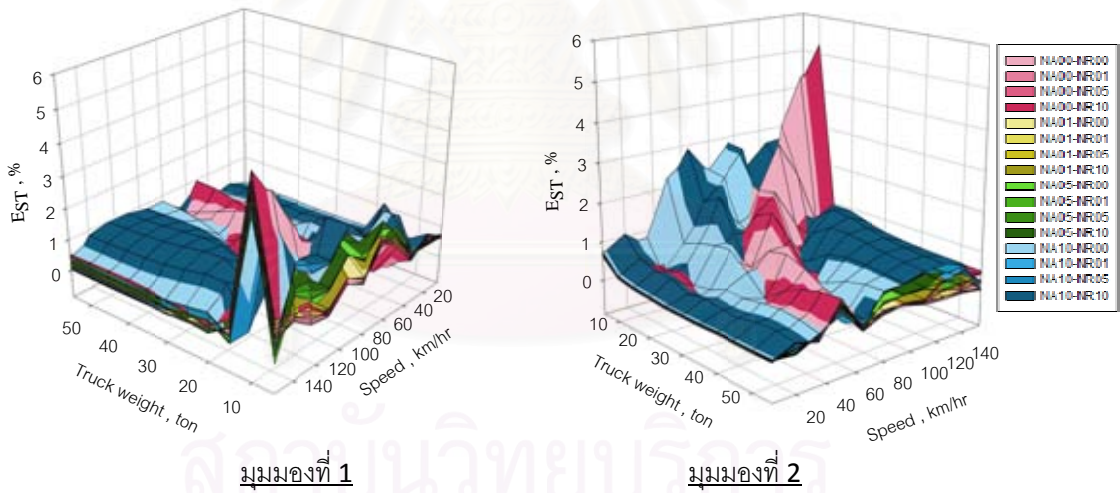
รูปที่ 5.2 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน

หมายเหตุ : NAxx คือ สัญญาณรบกวนในสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับร้อยละ xx

NRxx คือ สัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงที่ฐานรองรับร้อยละ xx

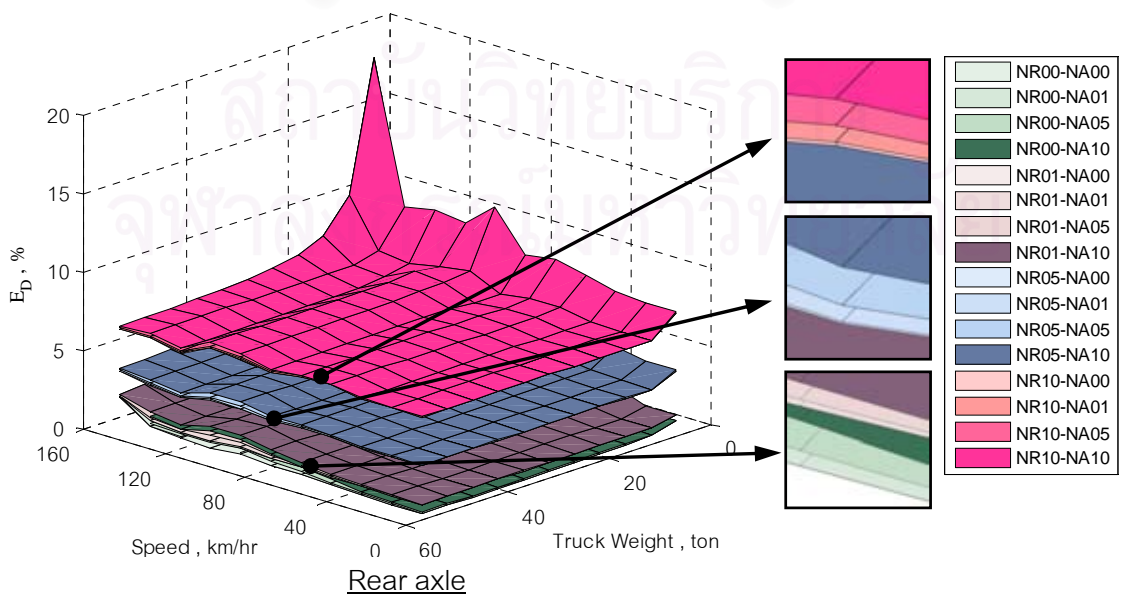
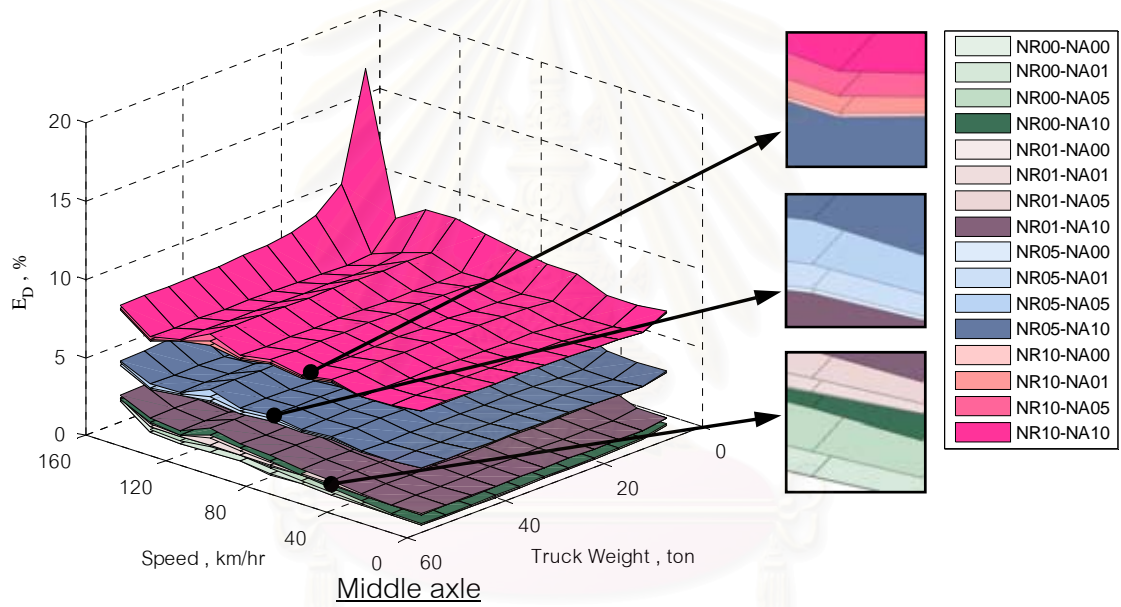
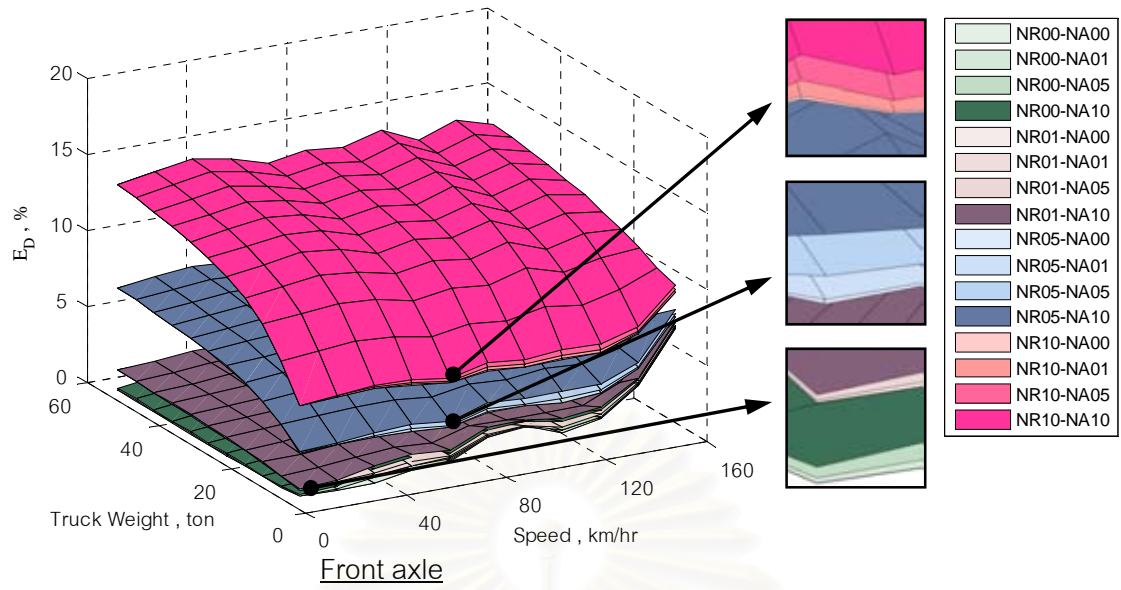


รูปที่ 5.3 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.4 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน

หมายเหตุ : NAxx คือ สัญญาณรบกวนในสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับร้อยละ xx  
 NRxx คือ สัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงที่ฐานรองรับร้อยละ xx



รูปที่ 5.5 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลลาของรถ โดยมีผลของสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 5.1 - 5.4 จะเห็นว่าสัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับและสัญญาณรบกวนในความเร่งจะส่งผลกระทบต่อการประมาณน้ำหนักกรณีโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วรถมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มดังกล่าวยังไม่มีความชัดเจนมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณน้ำหนักกรณีต้องทำการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ ดังนั้นการประมาณน้ำหนักกรณีจึงขึ้นอยู่กับลักษณะสัญญาณแรงพลศาสตร์ในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบต่อการประมาณแรงพลศาสตร์ ทำให้ลักษณะสัญญาณแรงพลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักกรณีมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน

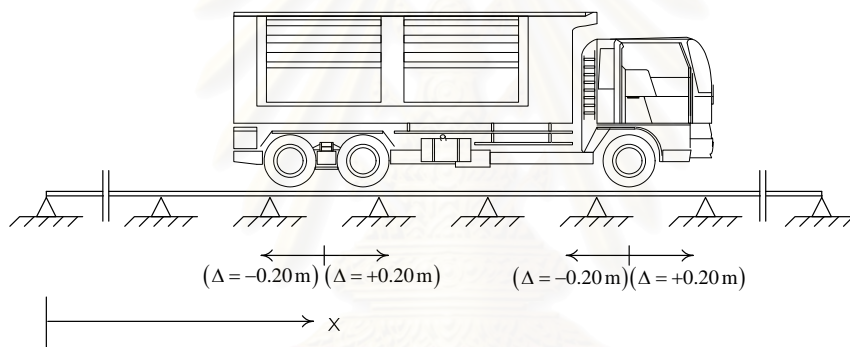
จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนแยกออกเป็นสี่ส่วนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในแต่ละส่วนมีระดับสัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานเท่ากัน โดยส่วนที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือส่วนที่ไม่มีสัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานเลย เมื่อสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วน ในแต่ละระดับของสัญญาณรบกวนในแรงพื้นฐานรองรับจะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนแยกเป็นสี่ชั้นโดยเรียงตามระดับสัญญาณรบกวนในความเร่ง ดังนั้น สัญญาณรบกวนในสัญญาณความเร่งมีผลต่อการประมาณแรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลารถน้อยมาก แต่สัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับมีผลต่อการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้จากสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการหาแรงพลศาสตร์ เมื่อมีสัญญาณแรงพื้นฐานมีความผิดพลาดไปก็จะส่งผลให้การหาแรงพลศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนไปด้วย ส่วนสัญญาณความเร่งมีความสำคัญต่อการหาแรงพลศาสตร์น้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับ เมื่อเกิดความผิดพลาดในสัญญาณความเร่งจึงทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการหาแรงพลศาสตร์อย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลากลางและหลัง จะเห็นได้ว่ารถที่มีน้ำหนักน้อยและมีความเร็วสูงมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเหตุผลได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.3

จากรูปที่ 5.5 สังเกตได้ว่าแนวโน้มความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีสัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับมีค่ามากขึ้น เมื่อมีสัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานรองรับมีค่าน้อย ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อรถมีน้ำหนักน้อยและมีความเร็วสูง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่เกิดในเพลากลางและหลัง แต่ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำหนักเมื่อมีสัญญาณรบกวนในสัญญาณแรงพื้นฐานมากขึ้น ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อรถมีน้ำหนักมากขึ้น เนื่องด้วยในการศึกษานี้สัญญาณรบกวนจะคิดเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักที่มากที่สุดในเพลาน้ำหนักในเพลาน้ำหนักที่มากที่สุดมักอยู่ที่เพลากลางและหลัง ส่วนแรงในเพลาน้ำหนักจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเพลากลางและหลัง ดังนั้นเมื่อน้ำหนักรวมของรถมีค่ามากขึ้น สัญญาณรบกวนจึงมีค่ามากขึ้นไปด้วย โดยเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับเพลาคู่หลัง ในเมื่อแรงในเพลาน้ำหนักมีค่าน้อยกว่า จึงส่งผลให้การประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำหนักมีประสิทธิภาพลดลงมากกว่าในเพลาคู่หลัง

## 5.2 การประมาณน้ำหนักรถโดยมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเพลารถ

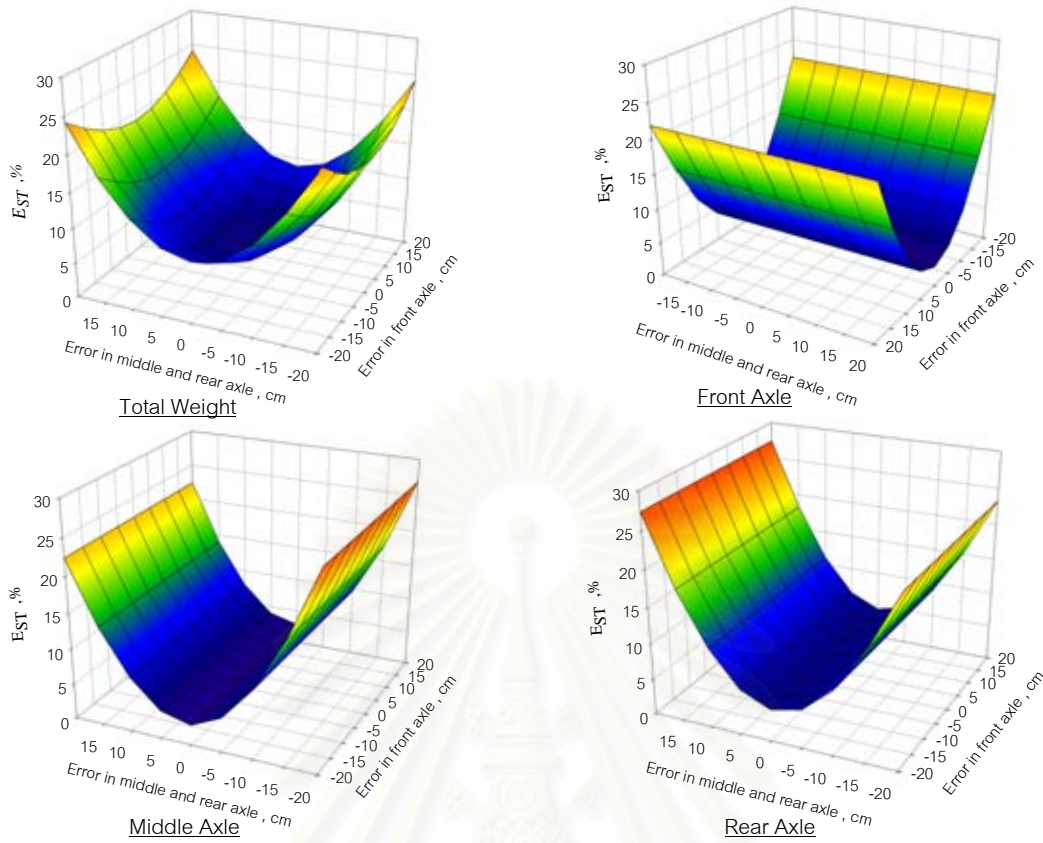
ข้อมูลตำแหน่งเพลารถที่เวลาต่างๆ เป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการหาน้ำหนักรถเป็นอย่างมาก เนื่องด้วยในทางปฏิบัติข้อมูลตำแหน่งเพลารถที่เก็บวัดมาย่อมมีความคลาดเคลื่อนได้ ในการศึกษาประสิทธิภาพของแท่นชั่งน้ำหนักจึงมีการสมมติความคลาดเคลื่อนตำแหน่งเพลารถ ซึ่งปกติรถบรรทุกมีระยะห่างระหว่างเพลากลางและเพลาคู่หลังคงที่ ดังนั้นในการศึกษานี้จะมีการสมมติให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารหน้าและเพลาคู่หลัง ความคลาดเคลื่อนจะมีค่า  $\pm 0.20$  เมตร โดยในการศึกษานี้จะใช้รถบรรทุก 10 ตันซึ่งมีค่า  $m_1 = 996$  กิโลกรัม,  $m_2 = m_3 = 712$  กิโลกรัม,  $m_v = 7,580$  กิโลกรัม,  $I_v = 67,955$  กิโลกรัม-เมตร<sup>2</sup>,  $S_1 = 3.685$  เมตร,  $S_2 = 0.445$  เมตร,  $S_3 = 1.745$  เมตร,  $S = 5.430$  เมตร,  $K_{S1} = 9,497$  กิโลนิวตันต่อเมตร,  $K_{S2} = K_{S3} = 8,487$  กิโลนิวตันต่อเมตร,  $K_{I1} = 5,381$  กิโลนิวตันต่อเมตร,  $K_{I2} = K_{I3} = 6,408$  กิโลนิวตันต่อเมตร,  $C_{S1} = C_{S2} = C_{S3} = C_{I1} = C_{I2} = C_{I3} = 40.00$  กิโลนิวตัน-วินาทีต่อเมตร และวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักด้วยความเร็ว 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



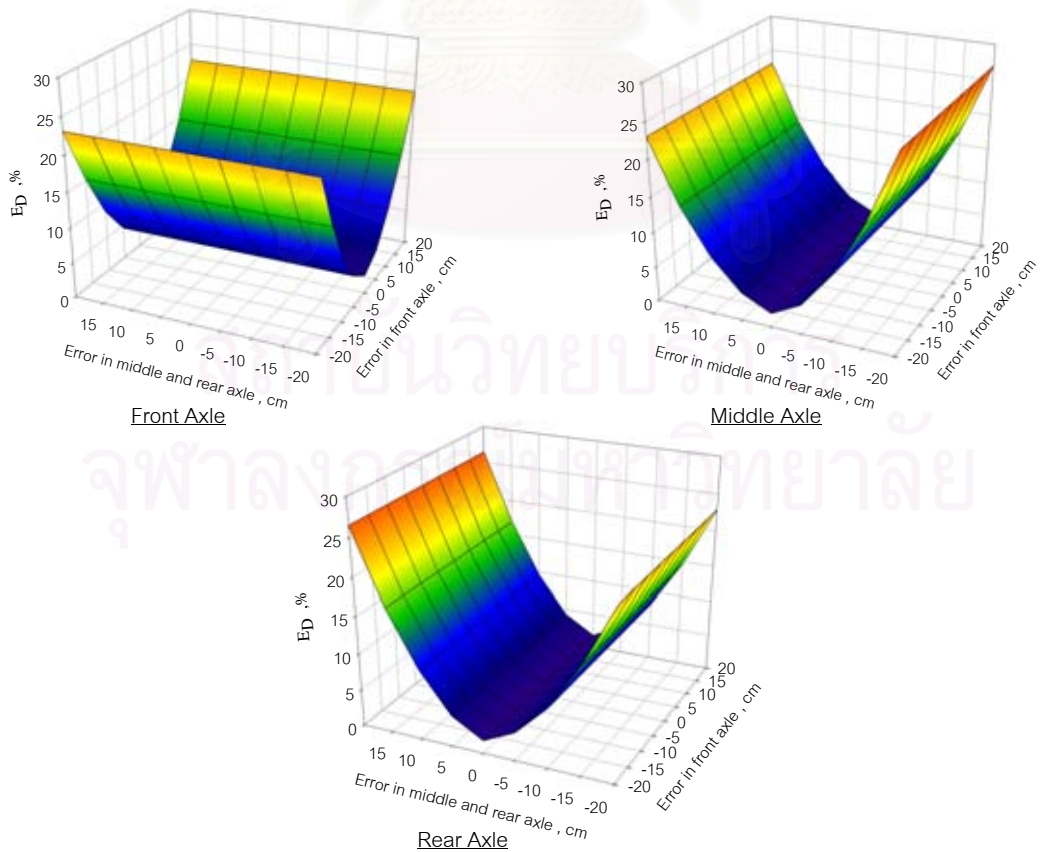
รูปที่ 5.6 ความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถ

จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า เมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถจะส่งผลต่อการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลานั้นๆ แต่จะส่งผลต่อการประมาณน้ำหนักในเพลาคู่หน้าเล็กน้อยมาก กล่าวคือ เมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารหน้าก็จะทำให้ความแม่นยำในการประมาณน้ำหนักเพลารหน้าลดลง แต่ในการประมาณน้ำหนักเพลาคู่หลังยังคงมีประสิทธิภาพเท่าเดิม และเมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลากลางและหลัง ความแม่นยำในการประมาณน้ำหนักเพลารทั้งสองก็จะลดลง แต่การประมาณน้ำหนักเพลารหน้ายังคงมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างไปจากเดิมมากนัก

ความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถไม่ว่าจะเกิดขึ้นในเพลาคู่หน้าหรือเพลาคู่หลังจะส่งผลต่อการประมาณน้ำหนักของรถ จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลาคู่หลังจะส่งผลต่อการประมาณน้ำหนักรถเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารหน้า ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเพลาคู่หลังทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณน้ำหนักถึงสองเพลาร ส่วนการเกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในเพลารหน้าจะทำให้เกิดความผิดพลาดเฉพาะในการประมาณน้ำหนักในเพลารหน้าเท่านั้น



รูปที่ 5.7 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักของรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลา



รูปที่ 5.8 ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลา

## บทที่ 6

### การหาน้ำหนักรถจากการสั่นตัวอย่างรถบรรทุก

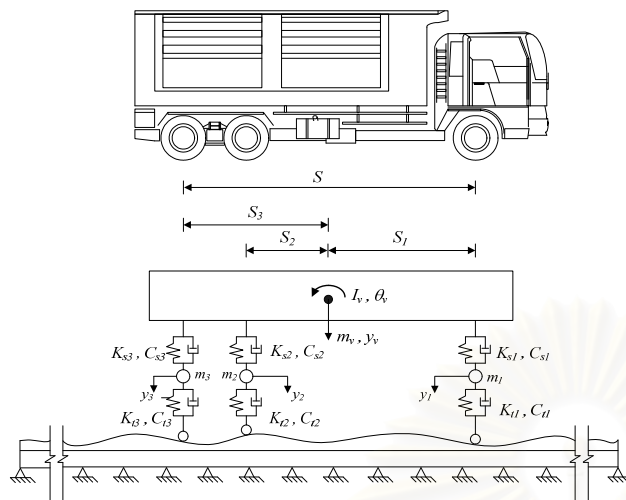
ในบทนี้จะทำการสั่นตัวอย่างแบบจำลองรถบรรทุก 1,000 คัน เพื่อศึกษาถึงผลของน้ำหนักรวม ความเร็ว ระยะระหว่างเพลาน้ำกับเพลาคู่หลัง การยุบตัวในสภาวะเริ่มแรกของรถบรรทุก และระบบช่วงล่างของรถบรรทุก ไปพร้อมๆกัน นำแบบจำลองรถบรรทุก 1,000 คันวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักเพื่อสร้างสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการประมาณน้ำหนักรถบรรทุก หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 6.1 การสร้างสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ

ให้แบบจำลองรถบรรทุก 1,000 คันวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักแบบคานต่อเนื่องหลายช่วงมีความยาวทั้งหมด 10 เมตร มีจำนวนช่วงเท่ากับ 20 ช่วงๆละ 0.50 เมตร,  $EI = 6.00 \times 10^6$  นิวตัน-เมตร<sup>2</sup>, ค่าสัดส่วนความหน่วง (damping ratio) เท่ากับ 0.01,  $\rho = 658.75$  กิโลกรัมต่อเมตร และขนาดความขรุขระเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ในการวิเคราะห์แบบจำลองใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ โดยแท่นซึ่งน้ำหนักจะประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อย (element) ซึ่งความยาวของแต่ละชิ้นส่วนย่อยเท่ากับ 0.125 เมตร ในแต่ละช่วงของแท่นซึ่งจะประกอบด้วยสี่ชิ้นส่วนย่อย

คุณสมบัติของแบบจำลองรถบรรทุก 1,000 คัน ได้จากการสุ่มค่าแบบสม่ำเสมอ (uniformly random) เพื่อหาค่าน้ำหนักรวม ความเร็ว ระยะระหว่างเพลาน้ำกับเพลาคู่หลัง การยุบตัวในสภาวะเริ่มแรกของรถบรรทุก และระบบช่วงล่างของรถบรรทุก คุณสมบัติของแบบจำลองรถบรรทุกมีค่าเป็นช่วงต่างๆไว้ในตารางที่ 6.1 โดยที่ค่า  $I_v$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ได้จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากการสั่นระยะระหว่างเพลาน้ำกับเพลากลางซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.7 – 5.7 เมตรและระยะระหว่างเพลากลางและเพลาคู่หลังมีค่าคงที่เท่ากับ 1.30 เมตร ส่วนการยุบตัวในสภาวะเริ่มแรกจะสุ่มจากตั้งแต่ศูนย์จนถึงการยุบตัวเนื่องจากแรงกดร้อยละ 30 ของน้ำหนักรถบรรทุก และคุณสมบัติที่เหลือกำหนดให้มีค่าคงที่  $m_1 = 996$  กิโลกรัม,  $m_2 = 712$  กิโลกรัม และ  $m_3 = 712$  กิโลกรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 แบบจำลองรถบรรทุก

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของแบบจำลองรถบรรทุก

$m_v$	; ton	10 – 60
Speed	; km/hr	5 – 140
$I_v$	; kg-m <sup>2</sup>	44,397 – 844,748
$S_1$	; m	2.97 – 4.59
$S_2$	; m	(-0.41) – 1.32
$S_3$	; m	0.89 – 2.62
$K_{s1}$	; kN/m	9,497 ± 30%
$K_{s2}, K_{s3}$	; kN/m	8,487 ± 30%
$K_{t1}$	; kN/m	5,381 ± 30%
$K_{t2}, K_{t3}$	; kN/m	6,408 ± 30%
$C_{s1}, C_{s2}, C_{s3},$ $C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}$	; kN-s/m	40.00 ± 30%

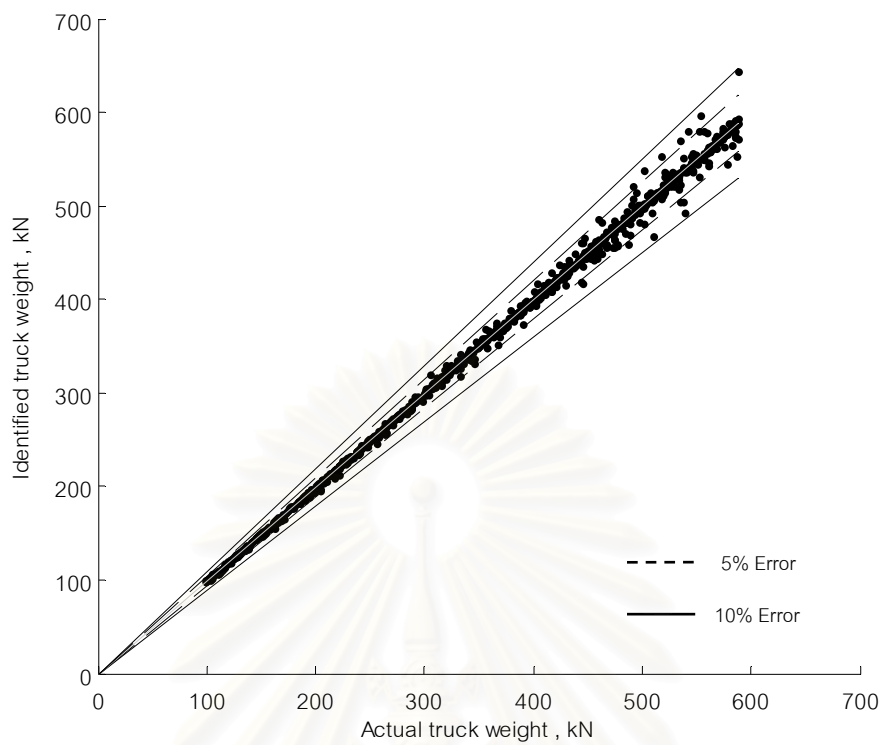
## 6.2 การหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการสุมแบบจำลองรถบรรทุก

หลังจากได้ข้อมูลสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางช่วงและแรงที่ฐานรองรับของแท่นซึ่งน้ำหนักในหัวข้อ 6.1 แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยใช้หลักการในหัวข้อที่ 2.3

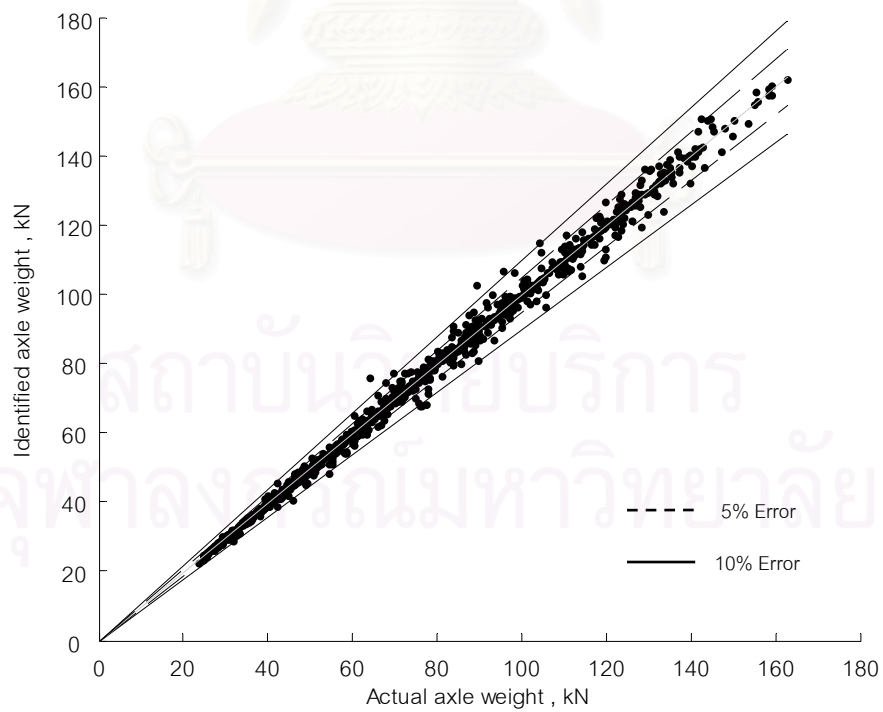
ความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเท่ากับร้อยละ 9.62 และจากแบบจำลองรถบรรทุก 1,000 คัน มีเพียง 18 คันที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 5 มี 122 คันที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 2 และมี 269 คันที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 1 จากรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่า ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงและมีการยุบตัวในสภาวะเริ่มต้นมาก เนื่องด้วยการยุบตัวในสภาวะเริ่มต้นของรถบรรทุกถูกกำหนดด้วยน้ำหนักรถบรรทุกทำให้ความคลาดเคลื่อนในรูปที่ 6.6 มีค่าสูงเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงและมีน้ำหนักมาก แต่อย่างไรก็ตามยังมีบางกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วสูงและมีน้ำหนักมากแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนน้อย ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถจะมีความสูงก็ต่อเมื่อรถมีการยุบตัวมากในสภาวะเริ่มต้นก่อนเข้าแท่นซึ่งน้ำหนัก และวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนักด้วยความเร็วสูง จากรูปที่ 6.8 แสดงการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 1.47

จากรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อรถบรรทุกมีน้ำหนักน้อยจะทำให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุกมีค่ามาก และยิ่งความเร็วของรถบรรทุกมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นไปด้วย จากรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าการยุบตัวของรถบรรทุกในสภาวะเริ่มต้นของรถบรรทุกไม่มีผลต่อการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุก

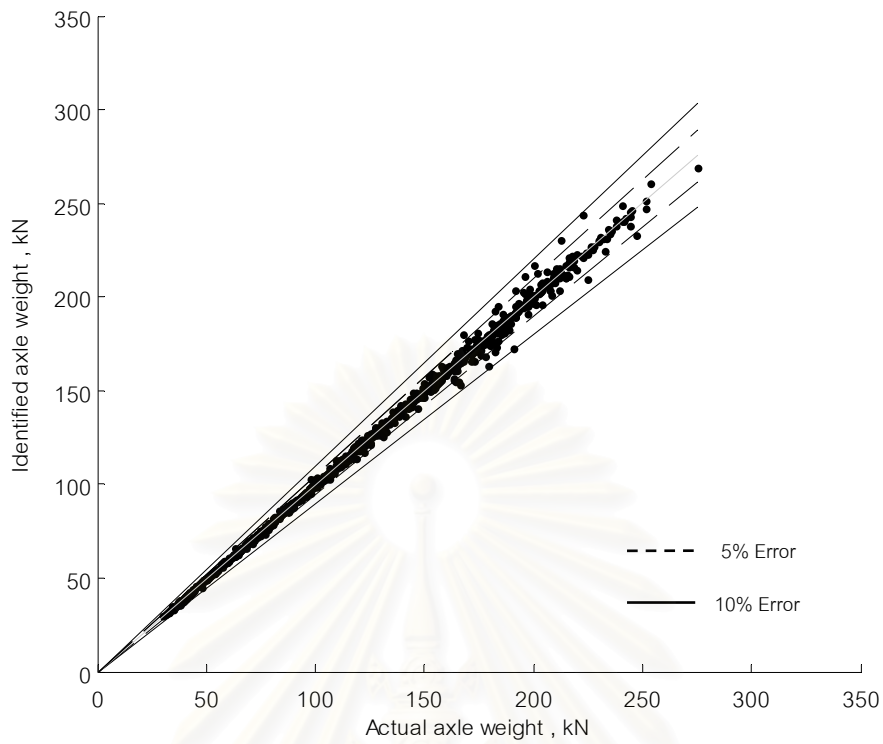




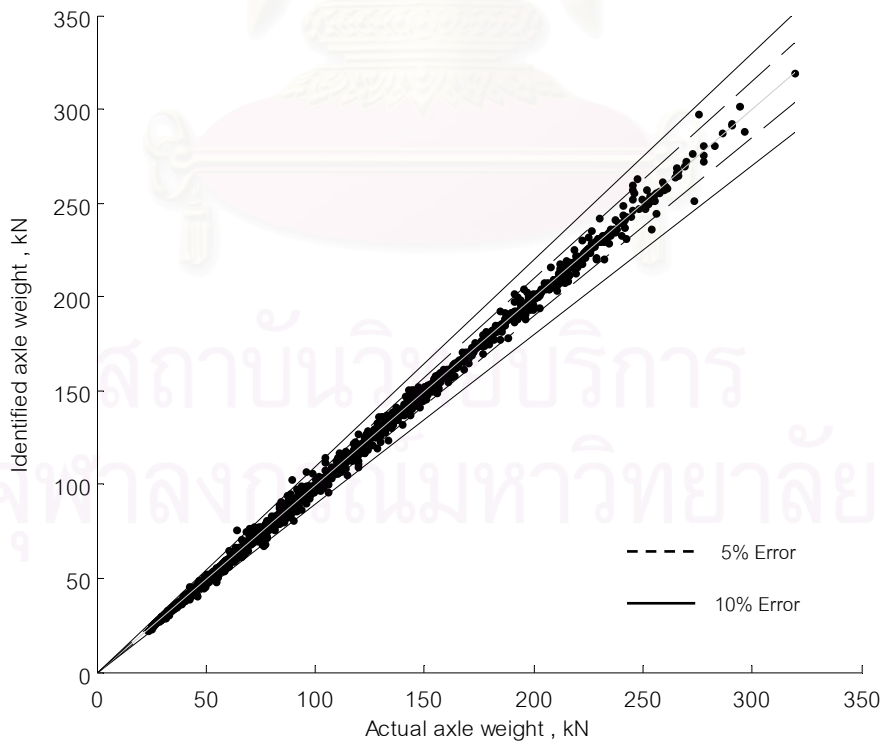
รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ได้จากการประมาณกับค่าจริง



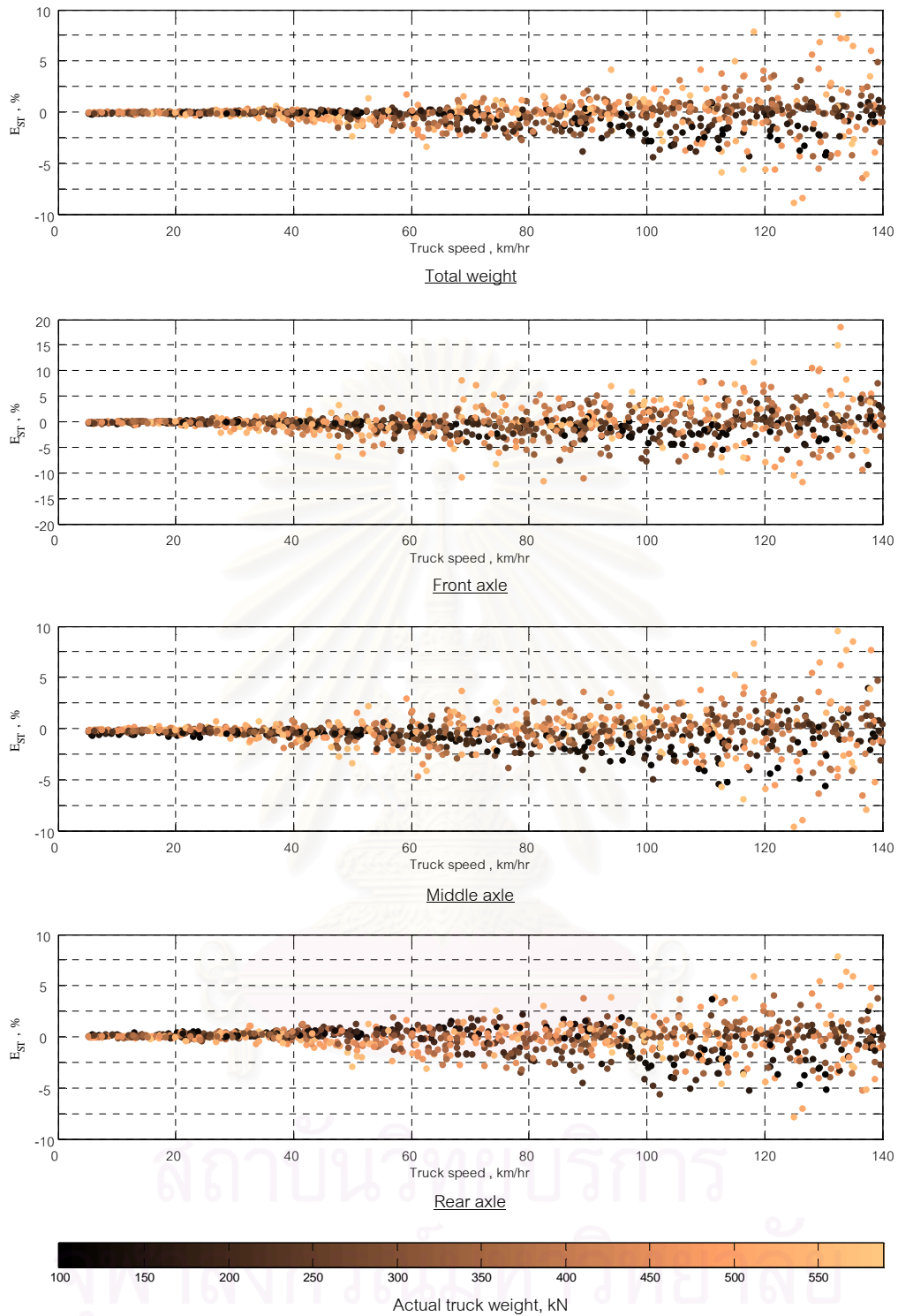
รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบน้ำหนักในเพลาน้ำหนักหน้าของรถบรรทุกที่ประมาณได้กับค่าจริง



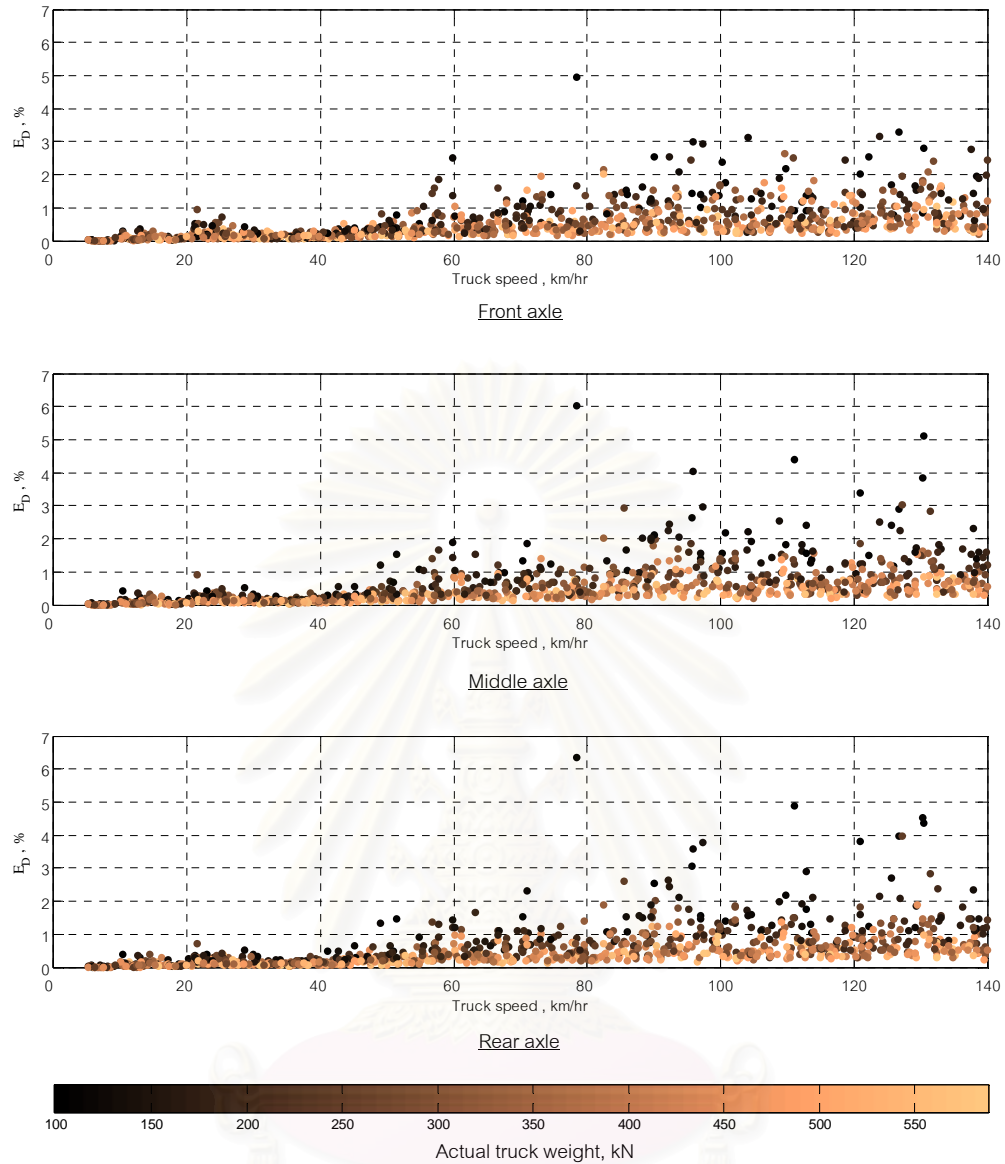
รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุกที่ประมาณได้กับค่าจริง



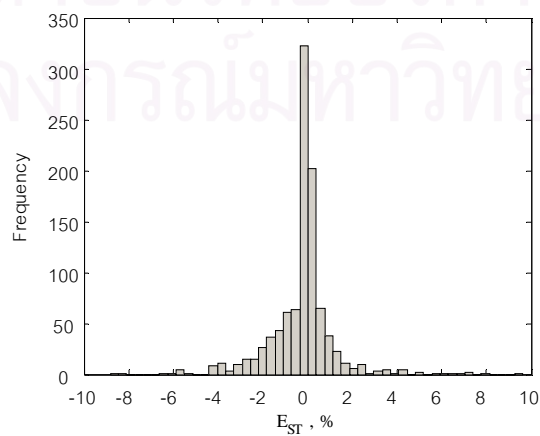
รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบน้ำหนักในเพลาลงของรถบรรทุกที่ประมาณได้กับค่าจริง



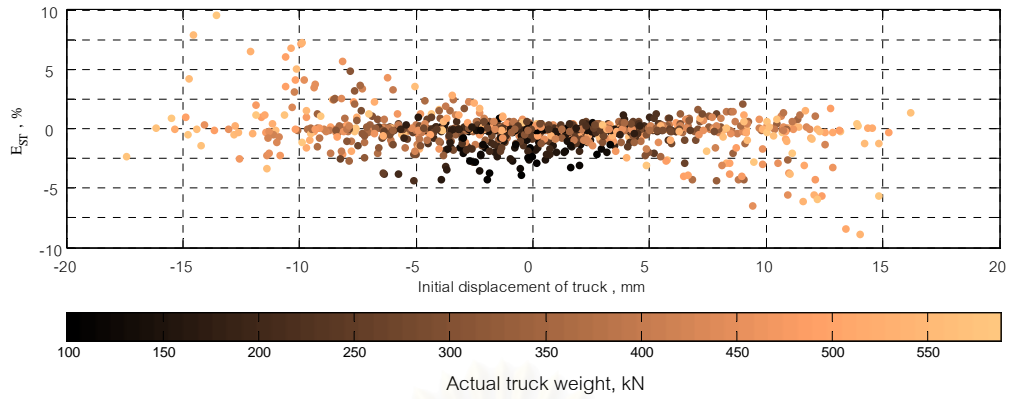
รูปที่ 6.6 ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมและน้ำหนักในเพลลาของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ความเร็วต่างๆ



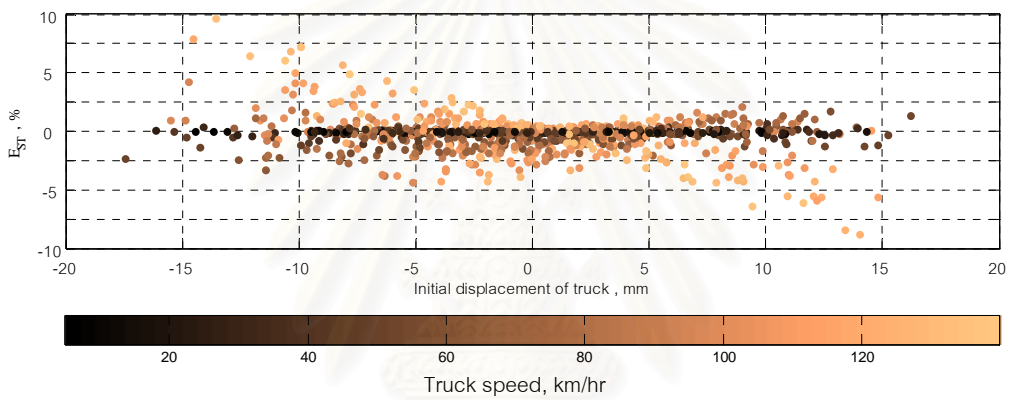
รูปที่ 6.7 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลลา โดยพิจารณาผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ความเร็วต่างๆ



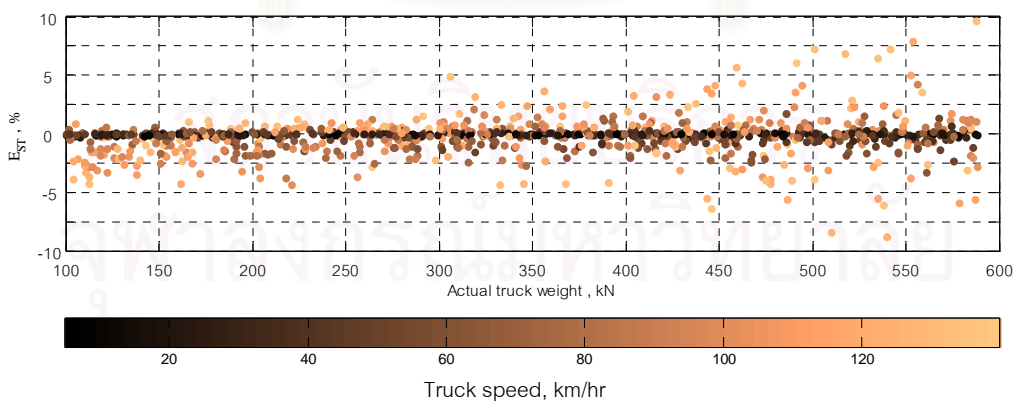
รูปที่ 6.8 การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก



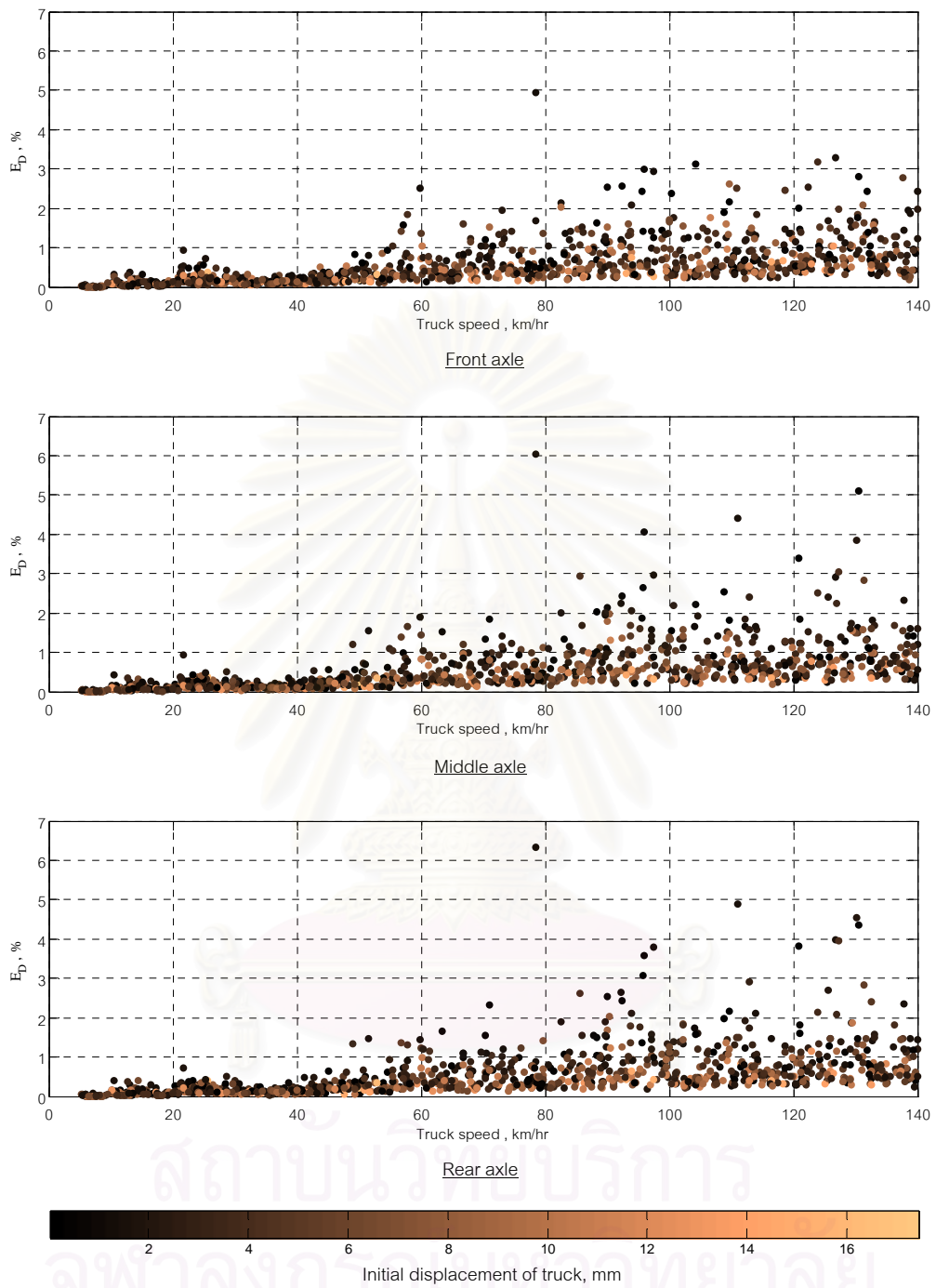
รูปที่ 6.9 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่การยุบตัวค่าต่างๆในสภาวะเริ่มต้นก่อนเข้าแท่นชั่งน้ำหนักของรถบรรทุก



รูปที่ 6.10 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของความเร็วที่การยุบตัวค่าต่างๆ ในสภาวะเริ่มต้นก่อนเข้าแท่นชั่งน้ำหนักของรถบรรทุก



รูปที่ 6.11 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลของความเร็วที่น้ำหนักรถบรรทุกค่าต่างๆ



รูปที่ 6.12 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถ โดยพิจารณาผลของการยุบตัวของรถบรรทุกใน  
สภาวะเริ่มต้นที่ความเร็วต่างๆ

ตารางที่ 6.2 ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกสูงสุด 20 อันดับแรก

น้ำหนักรวม กิโลนิวตัน	ความเร็ว กม./ชม.	ระยะระหว่างเพลาน้ำหนัก กับเพลากลาง , เมตร	การยุบตัวในสภาวะ เริ่มต้น , เมตร	ความคลาดเคลื่อน เชิงสถิติ , ร้อยละ
588	132.39	3.19	-0.0136	9.62
540	124.92	2.93	0.0140	-8.82
510	126.33	3.04	0.0134	-8.38
554	118.12	3.48	-0.0146	7.92
542	133.84	3.52	-0.0099	7.24
501	132.81	2.87	-0.0099	7.23
517	129.29	3.79	-0.0104	6.84
535	134.88	5.44	-0.0121	6.52
446	136.60	3.47	0.0094	-6.41
538	137.12	4.83	0.0116	-6.06
491	137.95	5.04	-0.0106	6.04
579	112.68	3.40	0.0122	-5.85
459	127.91	3.19	-0.0082	5.72
587	116.32	4.46	0.0148	-5.62
486	121.71	4.12	0.0124	-5.60
535	120.11	3.81	0.0120	-5.54
443	129.14	3.99	0.0109	-5.49
552	114.81	3.65	-0.0102	5.06
306	139.14	3.68	-0.0079	4.92
332	131.06	3.24	0.0079	-4.35

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การข้อมูลข้างต้น จะได้ว่าความเร็วของรถมีผลต่อการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำหนักของรถเป็นอย่างมาก โดยประสิทธิภาพในการประมาณน้ำหนักรถจะลดลงเมื่อรถมีความเร็วสูง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักของรถควรมีการควบคุมความเร็วของรถขณะอยู่บนแท่นชั่งน้ำหนัก ซึ่งพิจารณาโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักของรถบรรทุก 1,000 คันเมื่อมีการควบคุมความเร็ว จะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.3 – 6.16

ตารางที่ 6.3 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	730	663	586	493	398	275	113
ร้อยละ 1 - 2	148	123	97	57	18	1	0
ร้อยละ 2 - 3	60	41	21	12	1	0	0
ร้อยละ 3 - 4	31	19	2	1	0	0	0
ร้อยละ 4 - 5	13	5	1	0	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	18	4	0	0	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.4 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	73.0	77.5	82.9	87.6	95.4	99.6	100
ร้อยละ 0 - 2	87.8	91.9	96.6	97.7	99.8	100	100
ร้อยละ 0 - 3	93.8	96.7	99.6	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 4	96.9	99.0	99.9	100	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	98.2	99.5	100	100	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	1.8	0.5	0	0	0	0	0



ตารางที่ 6.5 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	823	729	637	529	405	273	113
ร้อยละ 1 - 2	58	45	26	17	9	3	0
ร้อยละ 2 - 3	37	28	15	9	2	0	0
ร้อยละ 3 - 4	32	24	16	3	1	0	0
ร้อยละ 4 - 5	20	13	6	2	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	30	16	7	3	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.6 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	895	785	666	545	412	276	113
ร้อยละ 1 - 2	57	41	25	14	3	0	0
ร้อยละ 2 - 3	24	17	11	2	1	0	0
ร้อยละ 3 - 4	12	9	5	2	1	0	0
ร้อยละ 4 - 5	3	1	0	0	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	9	2	0	0	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.7 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	882	769	649	530	406	274	113
ร้อยละ 1 - 2	82	67	52	31	11	2	0
ร้อยละ 2 - 3	13	8	3	2	0	0	0
ร้อยละ 3 - 4	14	10	3	0	0	0	0
ร้อยละ 4 - 5	3	0	0	0	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	6	1	0	0	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.8 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาน้ำหน้าของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	82.3	85.3	90.1	94.0	97.1	98.9	100
ร้อยละ 0 - 2	88.1	90.5	93.8	97.0	99.3	100	100
ร้อยละ 0 - 3	91.8	93.8	95.9	98.6	99.8	100	100
ร้อยละ 0 - 4	95.0	96.6	98.2	99.1	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	97.0	98.1	99.0	99.5	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	3.0	1.9	1.0	0.5	0	0	0

ตารางที่ 6.9 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลากลางของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	89.5	91.8	94.2	96.8	98.8	100	100
ร้อยละ 0 - 2	95.2	96.6	97.7	99.3	99.5	100	100
ร้อยละ 0 - 3	97.6	98.6	99.3	99.6	99.8	100	100
ร้อยละ 0 - 4	98.8	99.7	100	100	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	99.1	99.8	100	100	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	0.9	0.2	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.10 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้ำหนักในเพลาลังของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	88.2	89.9	91.8	94.1	97.4	99.3	100
ร้อยละ 0 - 2	96.4	97.8	99.2	99.6	100	100	100
ร้อยละ 0 - 3	97.7	98.7	99.6	100	100	100	100
ร้อยละ 0 - 4	99.1	99.9	100	100	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	99.4	99.9	100	100	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	0.6	0.1	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.11 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	842	750	637	539	410	276	113
ร้อยละ 1 - 2	133	89	60	22	6	0	0
ร้อยละ 2 - 3	20	13	8	1	1	0	0
ร้อยละ 3 - 4	4	2	1	0	0	0	0
ร้อยละ 4 - 5	1	1	1	1	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	0	0	0	0	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.12 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลากลางของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	848	753	641	540	408	276	113
ร้อยละ 1 - 2	125	85	54	22	9	0	0
ร้อยละ 2 - 3	20	14	10	0	0	0	0
ร้อยละ 3 - 4	3	0	0	0	0	0	0
ร้อยละ 4 - 5	2	2	1	0	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	2	1	1	1	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.13 การกระจายตัวของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาลังของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	840	748	642	540	410	276	113
ร้อยละ 1 - 2	134	92	54	21	7	0	0
ร้อยละ 2 - 3	16	10	7	1	0	0	0
ร้อยละ 3 - 4	6	3	3	0	0	0	0
ร้อยละ 4 - 5	3	1	0	0	0	0	0
ร้อยละ 5 - 100	1	1	1	1	0	0	0
รวม	1000	855	707	563	417	276	113

ตารางที่ 6.14 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำ  
ของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	84.2	87.7	90.1	95.7	98.3	100	100
ร้อยละ 0 - 2	97.5	98.1	98.6	99.6	99.8	100	100
ร้อยละ 0 - 3	99.5	99.7	99.7	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 4	99.9	99.9	99.9	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	100	100	100	100	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.15 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลากลาง  
ของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	84.8	88.1	90.7	95.9	97.8	100	100
ร้อยละ 0 - 2	97.3	98.0	98.3	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 3	99.3	99.7	99.7	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 4	99.6	99.7	99.7	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	99.8	99.9	99.9	99.8	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	0.2	0.1	0.1	0.2	0	0	0

ตารางที่ 6.16 ร้อยละความน่าจะเป็นของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนในการประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลาลัง  
ของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกในช่วงต่างๆ

ความคลาดเคลื่อน	ความเร็วของรถบรรทุก , กิโลเมตรต่อชั่วโมง						
	0 - 140	0 - 120	0 - 100	0 - 80	0 - 60	0 - 40	0 - 20
ร้อยละ 0 - 1	84.0	87.5	90.8	95.9	98.3	100	100
ร้อยละ 0 - 2	97.4	98.3	98.4	99.6	100	100	100
ร้อยละ 0 - 3	99.0	99.4	99.4	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 4	99.6	99.8	99.9	99.8	100	100	100
ร้อยละ 0 - 5	99.9	99.9	99.9	99.8	100	100	100
ร้อยละ 5 - 100	0.1	0.1	0.1	0.2	0	0	0

## บทที่ 7

### บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ประมาณแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะเคลื่อนที่ด้วยแท่นชั่งน้ำหนักแบบคานต่อเนื่องชนิดหลายช่วงบนแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการที่มีความสัมพันธ์ของแรงปฏิกิริยาระหว่างรถและแท่นชั่งน้ำหนัก แรงที่ฐานรองรับ และการโก่งตัวของแท่นชั่งน้ำหนัก ซึ่งการโก่งตัวของแท่นชั่งน้ำหนักหาได้โดยการแปลงมาจากสัญญาณความเร่งโดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของแท่นชั่ง ดังนั้นในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถจำเป็นต้องทราบสัญญาณความเร่งและสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ โดยสมมติว่าทราบตำแหน่งของเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก แต่เป็นการยากที่จะทราบสัญญาณความเร่งในแต่ละหน้าตัดของแท่นชั่งน้ำหนัก จึงใช้สัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางระหว่างฐานรองรับในแต่ละช่วงของแท่นชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาสัญญาณความเร่งที่ตำแหน่งอื่นๆ

การออกแบบแท่นชั่งน้ำหนักแบบคานต่อเนื่องชนิดหลายช่วงที่ใช้ในการหาแรงในเพลาน้ำหนักรถควรมีจำนวนช่วงของแท่นชั่งมากโดยความยาวในแต่ละช่วงควรมีค่าน้อย และค่าสตีเฟนสของแท่นชั่งน้ำหนักควรมีค่ามาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าแท่นชั่งน้ำหนักที่มีประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักรถนั้นควรมีคุณสมบัติเพื่อลดการสั่นตัวของแท่นชั่งน้ำหนัก ซึ่งทำให้ผลทางพลศาสตร์ของแรงปฏิกิริยาระหว่างแท่นชั่งน้ำหนักและรถลดลง โดยในการศึกษานี้ได้ออกแบบแท่นชั่งน้ำหนักมีความยาวทั้งหมด 10.00 เมตร แบ่งออกเป็น 20 ช่วงๆละ 0.50 เมตร และมีค่าโมเมนต์แห่งความเฉื่อยเท่ากับ 3,000 เมตร<sup>4</sup>

จากการศึกษาโดยให้รถบรรทุกวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักจะเห็นได้ว่าการคำนวณหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุกขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักมีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนที่คำนวณจากสัญญาณแรงที่ฐานรองรับ สัญญาณความเร่ง และสัญญาณความเร็ว โดยสัญญาณแรงที่ฐานรองรับพบว่ามีสัดส่วนในแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุกมากที่สุด คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 99 และขณะที่สัดส่วนในแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุกที่เกิดจากสัญญาณความเร่งและความเร็วมีค่าเพียงร้อยละ 1 ซึ่งหากสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในสัญญาณแรงที่ฐานรองรับก็จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาแรงพลศาสตร์อย่างมาก แต่สัญญาณรบกวนในการวัดสัญญาณความเร่งจะส่งผลกระทบต่อการศึกษาประมาณแรงพลศาสตร์น้อยมาก ดังนั้นในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถควรให้ความสำคัญต่อความถูกต้องของสัญญาณแรงที่ฐานรองรับเป็นอย่างมาก

การหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนักแบบคานต่อเนื่องชนิดหลายช่วง หากทราบข้อมูลสัญญาณที่จำเป็นทั้งหมด แรงพลศาสตร์ในเพลารถที่ได้จากการประมาณจะมีค่าเท่ากับค่าจริง แต่ถ้าทราบเพียงสัญญาณแรงที่ฐานรองรับและสัญญาณความเร่งที่กึ่งกลางในแต่ละช่วงของแท่นชั่งน้ำหนัก ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อรถมีน้ำหนักน้อยและมีความเร็วสูงขณะวิ่งผ่านแท่นชั่งน้ำหนัก เนื่องจากการคำนวณความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างแรงพลศาสตร์จริงกับค่าที่ประมาณได้เทียบกับน้ำหนัก ซึ่งความคลาดเคลื่อนสูงนั้นเกิดจากน้ำหนักที่นำมาเทียบมีค่าน้อย

การหาน้ำหนักกรวดทำได้โดยการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ในแต่ละเพลารถแล้วนำมารวมกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักกรวดจะขึ้นอยู่กับจำนวนและลักษณะของสัญญาณแรงพลศาสตร์ที่นำมาเฉลี่ย โดยในกรณีที่น้ำหนักกรวดที่ได้จากการประมาณมีความคลาดเคลื่อนสูง สัญญาณแรงพลศาสตร์จะมีลักษณะไม่ครบรอบหรือมีจำนวนรอบน้อยมาก อาจทำให้ผลเฉลี่ยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงได้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักกรวดอาจมีการพัฒนาวิธีการเฉลี่ยสัญญาณแรงพลศาสตร์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ตำแหน่งของเพลารถขณะวิ่งบนแท่นซึ่งน้ำหนักถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญมากในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถ จากการศึกษาความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดตำแหน่งของเพลารถ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถจะส่งผลต่อการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลานั้นๆ แต่จะส่งผลต่อการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลาน้อยมาก กล่าวคือ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลารถจะทำให้ความแม่นยำในการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำตาลดลง แต่ในการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลาคู่หลังยังคงมีประสิทธิภาพเท่าเดิม และเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งเพลาคู่หลังก็จะทำให้การหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลาคู่หลังมีประสิทธิภาพลดลง แต่ในการหาน้ำหนักและแรงพลศาสตร์ในเพลาน้ำตาลยังคงมีประสิทธิภาพเท่าเดิม

จากการสุ่มรถบรรทุก 1,000 คันซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันวิ่งผ่านแท่นซึ่งน้ำหนัก จะเห็นได้ว่า ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักของรถบรรทุกจะมีค่าสูง เมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงและมีการยุบตัวในสภาวะเริ่มต้นมาก ความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถบรรทุกจะมีค่ามาก ก็ต่อเมื่อรถบรรทุกมีน้ำหนักน้อยและมีความเร็วสูง โดยการยุบตัวในสภาวะเริ่มต้นของรถบรรทุกไม่มีผลต่อการหาแรงพลศาสตร์แต่อย่างใด

จากผลการศึกษาที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ มีข้อเสนอแนะทั้งในการประยุกต์ใช้จริงและการวิจัยเพิ่มเติมดังนี้

#### ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้จริง

- ระบบการหาตำแหน่งของรถต้องมีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งควรมีความผิดพลาดในการตรวจวัดไม่เกิน  $\pm 5$  เซนติเมตร ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวทำให้ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักของเพลารถและน้ำหนักรวมมีค่าเพิ่มขึ้นอีกมากกว่าร้อยละ 2.50
- ผิวบนแท่นซึ่งน้ำหนักและผิวทางก่อนเข้าแท่นซึ่งน้ำหนักควรมีผิวเรียบเพื่อลดการสั่นตัวของรถขณะวิ่งอยู่บนแท่นซึ่งน้ำหนักและการสั่นของรถในสภาวะเริ่มต้นก่อนเข้าแท่นซึ่งน้ำหนัก
- อุปกรณ์ที่ใช้เก็บวัดข้อมูลควรมีระบบป้องกันสัญญาณรบกวนที่ดีพอสมควร
- ควรมีการจำกัดความเร็วของรถเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถและน้ำหนักกรวด ซึ่งถ้าต้องการความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถและน้ำหนักกรวดไม่เกินร้อยละ 5 ควรจำกัดความเร็วรถไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 และถ้าต้องการความคลาดเคลื่อนในการหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถและน้ำหนักกรวดไม่เกินร้อยละ 1 ควรจำกัดความเร็วรถไม่เกิน 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99
- การหาแรงพลศาสตร์ในเพลารถอาจเลือกตรวจวัดเฉพาะสัญญาณแรงที่ฐานรองรับเท่านั้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและประหยัดเวลาที่ใช้คำนวณน้ำหนัก

### ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

- ควรมีการศึกษาและทดสอบกับแบบจำลองที่หลากหลายและมีความสมจริงมากขึ้น
- ควรมีการศึกษาและทดสอบการหาน้ำหนักรถหลายคัน
- ควรมีการทดสอบในภาคสนามเพิ่มเติม
- ควรมีการศึกษาและทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกหลายเพลลา
- ควรมีการศึกษาวิธีเฉลี่ยสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักรถ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- Anil K. Chopra. Dynamics of Structures. New Jersey : Prentice-Hall, 1995.
- Jiang R.J., Au F.T.K. and Cheung Y.K. Parameter identification of vehicles moving on continuous bridges. Journal of Sound and Vibration (2004): 91-111.
- Chan T.H.T., Law S.S., Yung T.H. and Yuan X.R. An Interpretive Method for Moving Force Identification. Journal of Sound and Vibration (1999): 503-524.
- Chan T.H.T., Law S.S. และ Yung T.H. Moving Force Identification Using an Existing Prestressed Concrete Bridge. Engineering Structures (2000): 1261-1270.
- Daniel J.I. Engineering Vibration. New Jersey : Prentice-Hall, 1996.
- European Commission 4<sup>th</sup> Framework Programme Transport. Weighing-In-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE) – Bridge WIM systems (B-WIM). University College Dublin, June 2001.
- Gary C. Hart, Kevin Structural Dynamics for Structural Engineers. New York : John Wiley & Sons, 1999.
- Law S.S., Chan T.H.T., and Zeng Q.H. Moving Force Identification a Frequency and Time Domains Analysis. Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control (Sep.1999): 394-401.
- Law S.S., and Fang Y.L. Moving Force Identification : Optimal State Estimation Approach. Journal of Sound and Vibration (2001): 233-254.
- Law S.S., J.Q. Bu, X.Q. Zhu and S.L. Chan. Vehicle Axle Loads Identification Using Finite Element Method. Journal of Engineering Structures (2004): 1143-1153.
- Panu Foongsook, Study of Moving Truck Weight Identification by Field. Master's Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Chulalongkorn University, 2005.
- Pattarapong Asnachinda, Moving Truck Weight Identification by A Scale-Down Model. Master's Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Chulalongkorn University, 2004.
- Polakit Phanapavudhikul, Weight Identification for Moving Trucks on Bridges. Master's Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Chulalongkorn University, 2003.
- Sarah K. Leming and Harold L. Stalford, Bridge Weight-In-Motion System Development Using Static Truck/Bridge Models. Proceedings of the American Control Conference. 2002.
- Sarah K. Leming and Harold L. Stalford, Bridge Weight-In-Motion System Development Using Superposition of Dynamic Truck/Static Bridge Interaction. Proceedings of the American Control Conference. 2003.
- Thater G., Chang P., Schelling D.R. and Fu C.C. Estimation of Bridge Static Response and Vehicle Weights by Frequency Response Analysis. Canada Journal of Civil Engineering (1998): 631-639.



Thawat Akarawittayapoom, Accuracy Improvement of a Moving Truck Identification by Iteration Method. Master's Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Chulalongkorn University, 2003.

Yu L. and Chan T.H.T. Moving Force Identification from Bending Moment Response of Bridge. Journal of Structural Engineering and Mechanics (2002): 151-170.

Zhu X.Q., Law S.S. Moving Forces Identification on a Multi-Span Continuous Bridge. Journal of Sound and Vibration (1999): 377-396.

Zhu X.Q. and Law S.S. Identification of Vehicle Axle Loads From Bridge Dynamic Responses. Journal of Sound and Vibration (2000): 705-724.

Zhu X.Q., and Law S.S. Moving Loads Identification Through Regularization. Journal of Engineering Mechanics, ASCE (2002): 989-1000.

Zhu X.Q., and Law S.S. Identification of Moving Interaction Forces with Incomplete Velocity Information. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (2003): 1349-1366.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิษณุตร์ อารยโกศล เกิดวันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เมื่อ พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย