

การทดสอบภาคสนามของระบบหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่
โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน กรณีศึกษาการบรรทุกประเภทห้ำเพลาขึ้นไป

เกรียงศักดิ์ สามสมจิตต์

จิตามณี อัดแสง

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2560

FIELD STUDY OF TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION SYSTEM
USING BRIDGE STRAIN SIGNALS : A CASE STUDY OF TRUCK WITH AT LEAST 5 AXLES

KRIANGSAK SASOMCHIT

THIDAMANEE AITSEANG

AN ENGINEERING PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING

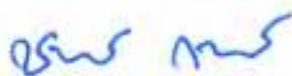
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

BURAPHA UNIVERSITY

2017

หัวข้อโครงการ การทดสอบภาคสนามของระบบหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่
 โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน กรณีศึกษาการบรรทุกทุกประเภทห้าเพลารั้งไป
 (Field Study of Truck Weight Identification System Using Bridge
 Strain Signals : A Case Study of Truck with at least 5 Axles)
 โดย นายเกรียงศักดิ์ สามสมจิตต์, นางสาวธิดาณิ อัดแสง
 ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
 ปีการศึกษา 2560
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พัทธพงษ์ อาสนจินดา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทางวิศวกรรมโยธา
 ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา



..... หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
 (ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)



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

คณะกรรมการร่วมประเมินโครงการ



..... ประธานกรรมการ
 (ดร.พัทธพงษ์ อาสนจินดา)



..... กรรมการ
 (ผศ.ดร.สุรเมศวร์ พริยะวัฒน์)



..... กรรมการ
 (ดร.ศิริสุณี วุฒิวงศ์โยธิน)

บทคัดย่อ

เกรียงศักดิ์ สาสมจิตต์ และ ชิตามณี อัดแสง: การทดสอบภาคสนามของระบบหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน กรณีศึกษาการบรรทุกประเภทห้าเพลารขึ้นไป: ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา, 84 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบภาคสนามของระบบหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้สัญญาณความเครียดของโครงสร้างสะพานที่มีอยู่แล้วในเส้นทาง เนื่องจากการใช้ด้านข้างน้ำหนักถาวรเกิดความล่าช้าของการขนส่งจราจร และใช้งบประมาณในการดำเนินการที่สูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยใช้ผลตอบสนองความเครียดของสะพานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ระบบหาน้ำหนักที่นำเสนอในการคัดกรองรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินพิกัดได้ต่อไป

การศึกษาด้วยการทดสอบภาคสนาม ได้ดำเนินการ ณ สะพานข้ามคลองบางไผ่ ทางหลวงหมายเลข 304 ขาเข้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งมีที่ตั้งอยู่ใกล้กับด้านข้างน้ำหนักถาวร (ด้านฉะเชิงเทรา ขาเข้า) โครงสร้างสะพานเป็นสะพานคอนกรีตแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงเทพื้นหน้า ขนาด 2 ช่องจราจรที่มีทิศทางการสัญจรทางเดียว ช่วงสะพานยาว 10 เมตร การทดสอบพิจารณาการบรรทุกที่ผ่านด้านข้างน้ำหนักถาวรเพื่อทราบค่าน้ำหนักรถบรรทุกและใช้ในการสร้างเส้นอิทธิพลของสะพาน และใช้ประเมินประสิทธิภาพของระบบหาน้ำหนัก โดยการวิเคราะห์จะใช้เพียงสัญญาณความเครียดที่ติดตั้งใต้ท้องสะพานจำนวน 3 หน้าตัดด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด การทดสอบพิจารณาการบรรทุกทั้งหมดจำนวน 30 คันประกอบด้วยรถประเภท 5 เพลาและ 6 เพลาในจำนวน 9 คันและ 21 คันตามลำดับ โดยมีอัตราเร็วอยู่ในช่วง 34 – 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่า การหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยใช้เส้นอิทธิพลความเครียดของสะพานที่นำเสนอ ทั้งหมด 30 กรณีมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 4.976 และ 25.415 ตามลำดับ โดยประเภทรถบรรทุกไม่มีผลต่อระดับความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของความเร็วพบว่ารถบรรทุกทดสอบมีช่วงความเร็วที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ทำให้พิจารณาได้ว่าไม่ส่งผลต่อระดับความถูกต้องของการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับผลของระดับน้ำหนักบรรทุกที่ไม่สัมพันธ์กับระดับความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์

คำสำคัญ: ระบบหาน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน การทดสอบภาคสนาม เส้นอิทธิพลของสะพาน ระบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา สัญญาณความเครียดของสะพาน

Abstract

Mr.Kriangsak Sasomchit and Miss.Thidamanee Aitseang: Field study of truck weight identification system using bridge strain signal: a case study of truck with at least 5 axles. Project Adviser: Dr.Pattarapong Asnachinda, 84 pp.

This research studied truck weight identification system using bridge strain signal of existing bridge in highway. This is because using weigh stations produce transportation delay and also requires very high budget for operation. The objectives of this research were to develop calculation method and to increase performance of weigh-in-motion using bridge strain signal in order to study possibility in application the proposed system for overweight truck filtering.

The study was experimentally carried out at the bridge over the Bang-Phai canal on highway 304 (arrival) in Chachoengsao province located near to the Chachoengsao weigh station (arrival). The bridge structure is prestressed concrete slab with concrete topping. The bridge span length is 10 meter and two lanes width for single direction traffic. The test considered trucks passing through the weigh station to know their gross weights which were used to form the influence line of the bridge and for effectiveness evaluation of the system. Analysis only utilized strain signal installed beneath the bridge deck at 3 sections with least square method. Thirty trucks in total were considered in the test consisting of nine 5-axle trucks and twenty one 6-axle trucks passing the bridge with moving speed between 34-54 km./hr.

Regarding to the obtained results, it was indicated that truck weight identification using bridge influence line for 30 cases in total, allowed the average and maximum relative identification errors of 4.976% and 25.415%, respectively. Effect of truck type did not relative to the identification error, significantly. Effect of moving speed was considered as no significant to the level of accuracy since the tested vehicles passing the bridge with different speed in the small range. Similarly, effect of truck weight was not relative to identification error of system analysis.

Keyword: bridge weigh-in-motion, field test, influence line of the bridge, free axle detector, strain signal of the bridge

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิศวกรรมฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางผู้ศึกษาโครงการขอขอบพระคุณ ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ที่เป็นความรู้แนวคิดที่เป็นประโยชน์ ให้ความดูแลเอาใจใส่ ตลอดจนได้ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งการศึกษาค้นคว้านี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณสำนักงานควบคุมน้ำหนัทยานพาหนะ กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบภาคสนาม ขอขอบพระคุณด่านซังน้ำหนักบรรทุกจังหวัดฉะเชิงเทรา(ขาเข้า) และเจ้าหน้าที่ประจำสถานี ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการบันทึกข้อมูล ขอขอบพระคุณแขวงทางหลวงฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์อนุญาตให้ใช้สะพานในการทำ การทดสอบ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์ และ ดร.ศรีสุณี วุฒิวงศ์โยธินคณะกรรม การคุมสอบโครงการ ผู้ให้ข้อเสนอและแนะนำแนวทางทางวิชาการตลอดการศึกษาโครงการ ขอขอบคุณ คุณอานนท์ นิยมสุข นิสิตรุ่นพี่ (ศิษย์เก่า) ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำและฝึกสอนเกี่ยวกับโครงการนี้ ผู้ ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ พงศกร พิริยพจน์ต์ และธนันต์ บุญเจริญพันธ์ทวี นิสิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ร่วมแรงช่วยขนย้ายและติดตั้งอุปกรณ์ไปยังสถานที่ทำการทดสอบที่ ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา รวมถึงช่วยเหลือตลอดทำการทดสอบด้วย สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นแรงผลักดันที่สำคัญ ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา คุณประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากโครงการวิศวกรรมฉบับนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่าน ทางผู้ศึกษาขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านด้วยความเคารพ อย่างสูง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
 บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา.....	3
 บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการหาน้ำหนักบรรทุก.....	4
2.1.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบปราศจาก.....	6
อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา	
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 หลักการหาเส้นอิทธิพล (influence line extraction).....	7
2.2.2 การหาความเร็ว ตำแหน่งเพลลา ระยะห่างเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์.....	11
ตรวจจับเพลลา (FAD)	
2.2.3 การหาน้ำหนักบรรทุกจากเส้นอิทธิพล.....	17
2.2.4 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (fast fourier transform,FFT).....	18
 บทที่ 3 วิธีการศึกษา	
3.1 สถานที่ศึกษา.....	19
3.2 เตรียมการทดสอบ.....	21
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์และบันทึกข้อมูล.....	23
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	25
3.3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	25
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	31
3.4.1 การวิเคราะห์การตรวจจับเพลลา ความเร็ว และระยะห่างเพลลา (FAD).....	31
3.4.2 การวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพล.....	36
3.4.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุก.....	37
3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา.....	37
บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา	
4.1 ผลการตรวจจับเพลลา.....	41
4.2 ผลการวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพล.....	44
4.3 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม.....	44
4.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้การวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมมีความคลาดเคลื่อนสูง.....	48
4.4.1 ผลการตรวจจับเพลลาผิดพลาด.....	48
4.4.2 ความสมบูรณ์ของสัญญาณ.....	50
4.4.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดจากการทดสอบภาคสนาม.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ระดับความถูกต้องของระบบ WIM ตามเกณฑ์ COST 323.....	5
3-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการเปรียบเทียบ.....	27
3-2 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการชั่งน้ำหนักรวมที่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก.....	30
3-3 ประเภทรถบรรทุกตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวง.....	38
3-4 ข้อบังคับใช้ควบคุมรถบรรทุกตามกฎหมายพระราชบัญญัติทางหลวง.....	39
4-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา.....	42
4-2 ข้อมูลน้ำหนักรวม น้ำหนักรวมที่วิเคราะห์ และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม..	45
5-1 สรุปผลการศึกษา.....	51
ผ.1 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 1.....	54
ผ.2 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 2.....	55
ผ.3 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 3.....	56
ผ.4 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 4.....	57
ผ.5 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 5.....	58
ผ.6 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 6.....	59
ผ.7 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 7.....	60
ผ.8 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 8.....	61
ผ.9 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 9.....	62
ผ.10 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 10.....	63
ผ.11 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 11.....	64
ผ.12 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 12.....	65
ผ.13 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 13.....	66
ผ.14 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 14.....	67
ผ.15 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 15.....	68
ผ.16 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 16.....	69
ผ.17 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 17.....	70
ผ.18 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 18.....	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.19 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 19.....	72
ผ.20 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 20.....	73
ผ.21 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 21.....	74
ผ.22 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 22.....	75
ผ.23 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 23.....	76
ผ.24 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 24.....	77
ผ.25 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 25.....	78
ผ.26 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 26.....	79
ผ.27 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 27.....	80
ผ.28 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 28.....	81
ผ.29 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 29.....	82
ผ.30 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 30.....	83

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน.....	8
2-2 สัญญาณความเครียดทางทฤษฎี.....	8
2-3 น้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับสะพานและตำแหน่งของเพลารถ.....	9
2-4 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของสะพาน.....	12
2-5 ระยะห่างระหว่างหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดสองหน้าตัด..... สำหรับใช้คำนวณหาความเร็ว	13
2-6 ผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร.....	13
2-7 ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณความเครียดระหว่างช่องจราจรในหน้าตัด A และ B..... เพื่อใช้หาความเร็ว	14
2-8 สัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์..... สหสัมพันธ์	14
2-9 สัญญาณระบุตำแหน่งเพลารถบรรทุก.....	16
3-1 แผนที่แสดงสถานที่ทดสอบ.....	19
3-2 ชื่อคลองที่ทำการทดสอบ.....	20
3-3 ลักษณะสะพานที่ทำการทดสอบ.....	20
3-4 ลักษณะใต้สะพานที่ทำการทดสอบ.....	20
3-5 ด้านตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกทุกจังหวัดฉะเชิงเทรา.....	20
3-6 มาตรวัดความเครียด (strain gauge).....	21
3-7 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด (strain gauge transformer module).....	21
3-8 อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178.....	22
3-9 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง (photoelectric sensor และ reflector).....	22
3-10 หัววัดความเร่ง (acceleration transducer).....	23
3-11 ภาพด้านข้างแสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ.....	23
3-12 ภาพแปลนแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ.....	24
3-13 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด.....	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-14 สัญญาณความเร่งของสะพานจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระด้วย..... การกระโดดทดสอบ	25
3-15 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระเพื่อระบุ..... ความถี่ธรรมชาติของสะพาน	26
3-16 อุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักเพลลา.....	26
3-17 รถบรรทุกขณะขึ้นบนอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา.....	27
3-18 แถบวัดระยะ.....	28
3-19 บันทึกภาพหนึ่งระยะห่างระหว่างเพลลา ที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก.....	28
3-20 ตัวอย่างที่ได้จากการบันทึกภาพหนึ่งของรถบรรทุก ขณะเข้ามายังด้าน..... ตรวจสอบน้ำหนัก	28
3-21 ตัวอย่างภาพหนึ่งที่ได้จากการบันทึกที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก เพื่อหาระยะห่าง..... ระหว่างเพลลาในโปรแกรม AutoCAD	29
3-22 การปฏิบัติงานที่ได้สะพาน.....	29
3-23 สัญญาณความเครียดในช่องจราจรฝั่งซ้าย.....	31
3-24 สัญญาณความเครียดในช่องจราจรฝั่งขวา.....	32
3-25 สัญญาณความเครียดของช่องจราจรซ้ายและขวา.....	32
3-26 สัญญาณความเครียดที่ทำการปรับปรุงแล้ว.....	33
3-27 ตัวอย่างและผลต่างของสัญญาณความเครียดที่วัดได้ของรถบรรทุก 6 เพลลา.....	34
3-28 ตัวอย่างสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์..... กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลลา	34
3-29 ตรวจจับยอดเพลลาสำหรับหาระยะห่างระหว่างเพลลา.....	35
4-1 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ใช้หาเพลลาและระยะห่างเพลลา.....	41
4-2 เส้นอิทธิพลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุก.....	44
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมกับ..... น้ำหนักรวมของรถบรรทุก	47
4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม..... กับความเร็วในขณะการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก	47
4-5 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 5 เพลลา (กรณี 9).....	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-6 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลา (กรณีที่ 16).....	49
4-7 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลา (กรณีที่ 28).....	49
4-8 ตัวอย่างสัญญาณที่เหวี่ยงของรถกรณีที่ 28.....	50
ผ.1-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 1.....	54
ผ.1-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 1.....	54
ผ.2-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 2.....	55
ผ.2-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 2.....	55
ผ.2-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 2.....	55
ผ.3-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 3.....	56
ผ.3-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 3.....	56
ผ.3-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 3.....	56
ผ.4-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 4.....	57
ผ.4-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 4.....	57
ผ.4-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 4.....	57
ผ.5-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 5.....	58
ผ.5-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 5.....	58
ผ.5-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 5.....	58
ผ.6-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 6.....	59
ผ.6-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 6.....	59
ผ.6-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 6.....	59
ผ.7-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 7.....	60
ผ.7-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 7.....	60
ผ.7-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 7.....	60
ผ.8-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 8.....	61
ผ.8-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 8.....	61
ผ.8-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 8.....	61
ผ.9-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 9.....	62
ผ.9-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 9.....	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ผ.9-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 9.....	62
ผ.10-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 10.....	63
ผ.10-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 10.....	63
ผ.11-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 11.....	64
ผ.11-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 11.....	64
ผ.12-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 12.....	65
ผ.12-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 12.....	65
ผ.12-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 12.....	65
ผ.13-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 13.....	66
ผ.13-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 13.....	66
ผ.13-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 13.....	66
ผ.14-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 14.....	67
ผ.14-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 14.....	67
ผ.14-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 14.....	67
ผ.15-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 15.....	68
ผ.15-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 15.....	68
ผ.15-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 15.....	68
ผ.16-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 16.....	69
ผ.16-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 16.....	69
ผ.16-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 16.....	69
ผ.17-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 17.....	70
ผ.17-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 17.....	70
ผ.17-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 17.....	70
ผ.18-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 18.....	71
ผ.18-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 18.....	71
ผ.18-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 18.....	71
ผ.19-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 19.....	72
ผ.19-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 19.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ผ.19-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 19.....	72
ผ.20-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 20.....	73
ผ.20-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 20.....	73
ผ.20-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 20.....	73
ผ.21-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 21.....	74
ผ.21-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 21.....	74
ผ.21-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 21.....	74
ผ.22-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 22.....	75
ผ.22-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 22.....	75
ผ.22-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 22.....	75
ผ.23-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 23.....	76
ผ.23-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 23.....	76
ผ.23-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 23.....	76
ผ.24-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 24.....	77
ผ.24-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 24.....	77
ผ.24-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถที่ 24.....	77
ผ.25-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 25.....	78
ผ.25-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 25.....	78
ผ.25-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 25.....	78
ผ.26-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 26.....	79
ผ.26-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 26.....	79
ผ.26-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 26.....	79
ผ.27-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 27.....	80
ผ.27-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 27.....	80
ผ.27-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 27.....	80
ผ.28-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 28.....	81
ผ.28-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 28.....	81
ผ.28-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 28.....	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ผ.29-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 29.....	82
ผ.29-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 29.....	82
ผ.29-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 29.....	82
ผ.30-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 30.....	83
ผ.30-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 30.....	83
ผ.30-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 30.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีการขนส่งทางบกเพื่อส่งสินค้าทางด้านการเกษตรมาก โดยส่วนใหญ่เป็นการขนส่งด้วยรถบรรทุก ทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมสภาพของถนนเร็วกว่ากำหนด ซึ่งเกิดจากรถบรรทุกบรรทุกน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด รัฐบาลจึงต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมถนน จากปัญหาดังกล่าวได้มีการจัดตั้งด่านชั่งน้ำหนักถาวรหรือด่านตรวจสอบน้ำหนักขึ้น เพื่อใช้ควบคุมน้ำหนักของรถบรรทุกไม่ให้เกินที่กฎหมายกำหนด โดยด่านชั่งน้ำหนักถาวร (weigh station) เป็นระบบชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะหยุดนิ่ง (static scale) เพื่อควบคุมน้ำหนักรถบรรทุกให้เป็นไปตามกฎหมายกำหนด เนื่องจากระบบนี้เป็นการตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกด้วยการหยุดชั่งจึงสามารถตรวจสอบการบรรทุกเกินพิกัดตามข้อกำหนดได้ แต่ทั้งนี้ในการตรวจวัดจะต้องหยุดรถเพื่อทำการชั่งน้ำหนัก ซึ่งทำให้เกิดการชะลอตัวของกระแสจราจรในเส้นทางจากการเข้าคิวรอชั่งน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อบรรเทาการชะลอตัวของยานยนต์ระบบด่านชั่งน้ำหนักถาวรที่สมบูรณ์จะต้องสร้างทางเบี่ยงเพื่อให้รถบรรทุกเข้าชั่งที่สถานที่ที่ปลูกสร้างไว้บริเวณริมเส้นทาง ดังนั้นระบบด่านชั่งน้ำหนักถาวรจึงต้องการงบประมาณในการลงทุนที่สูง สำหรับสร้างสถานารวมถึงการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดถูกติดตั้งโดยตรงบริเวณผิวทาง อย่างไรก็ตามการควบคุมน้ำหนักด้วยระบบนี้อาจไม่สามารถควบคุมน้ำหนักได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น จำนวนด่านที่ยังไม่ครอบคลุมมากพอ ผู้ขับขี่ทราบตำแหน่งของด่านจึงสามารถหลีกเลี่ยงเส้นทางได้ เป็นต้น

ต่อมาจึงมีการพัฒนาระบบตรวจวัดน้ำหนักรถบรรทุกที่เรียกว่า ระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่ (weigh-in-motion, WIM) ซึ่งเป็นระบบตรวจวัดน้ำหนักรถบรรทุกโดยไม่ต้องหยุดชั่ง โดยติดตั้งในช่วงทางก่อนถึงสถานีชั่งน้ำหนักถาวร เพื่อใช้ในการคัดกรองรถบรรทุกที่มีน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ที่อาจมีน้ำหนักเกินพิกัด โดยหากรถบรรทุกมีน้ำหนักน้อย จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านสถานีและกลับเข้าเส้นทางหลักได้โดยไม่ต้องหยุดชั่งน้ำหนัก ในขณะที่รถบรรทุกที่มีน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องตรวจสอบน้ำหนักจากการจอดจะถูกควบคุมให้เข้าจอดชั่ง ณ ด่านชั่งน้ำหนักถาวรอีกครั้ง ระบบ WIM อาศัยเครื่องมือวัดประเภท Load-cell ติดตั้งบนผิวทางเป็นแผ่นตาข่าย (scale) ขนาดใหญ่สำหรับวัดค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุก อย่างไรก็ตามระบบ WIM มีต้นทุนที่สูงมาก และในการซ่อมบำรุงจะต้องลอกผิวทางและยังต้องปิดเส้นทางจราจรระหว่างซ่อมแซมอีกด้วย ทำให้ในปัจจุบันจำนวนด่านชั่งน้ำหนักที่ติดตั้งระบบ WIM ยังมีจำนวนน้อยเนื่องจากต้องใช้งบประมาณสูงมาก

เพื่อพัฒนาระบบชั่งน้ำหนักจากระบบด้านชั่งน้ำหนักถาวร และระบบ WIM ในต่างประเทศจึงมีการพัฒนาระบบ WIM โดยนำมาปรับใช้โครงสร้างกับสะพานที่มีอยู่แล้วในเส้นทาง แทนการติดตั้งเซนเซอร์ที่ผิวทางเหมือนระบบ WIM ทั่วไป ซึ่งต้องสร้างทางเบี่ยงและสถานีชั่งน้ำหนักมารองรับ โดยเรียกระบบนี้ว่าระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน (bridge weigh-in-motion, B-WIM) โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกทุกจากผลตอบสนองของโครงสร้างสะพาน เช่น มาตรการวัดความเครียด (strain gauge) ไปติดตั้งที่ใต้สะพาน และนำข้อมูลที่ได้อิงวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยเรียกระบบนี้ว่า Bridge-Weigh-in-Motion (B-WIM) คือระบบตรวจวัดน้ำหนักจากการเปลี่ยนแปลงค่าผลตอบสนอง โดยติดตั้งมาตรการวัดความเครียด (strain gauge) ไว้ใต้สะพาน แล้วนำค่าความเครียดไปวิเคราะห์หาน้ำหนักเพลาของรถบรรทุก โดยใช้ทฤษฎีเส้นอิทธิพล (influence line)

Bridge-Weigh-in-Motion เป็นแนวทางหนึ่งในการควบคุมการบรรทุกเกินพิกัด เนื่องจากผู้ขับขี่เปลี่ยนเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจชั่ง การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่ทำให้ได้ข้อมูลของรถบรรทุก โดยที่ผู้ขับขี่ไม่สามารถทราบตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดได้ จึงไม่สามารถเลี่ยงการตรวจวัดได้นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งต่ำกว่าสถานีชั่งน้ำหนักถาวร และทำการบำรุงรักษาง่ายโดยไม่ต้องปิดเส้นทางจราจร

โครงการนี้สนใจการหาน้ำหนักบรรทุกจากการใช้เส้นอิทธิพล จึงเลือกพิจารณาการหาน้ำหนักยานพาหนะประเภท 5 เพลาถึง 6 เพลา ซึ่งมีระยะช่วงเพลา น้ำหนักเพลา และพิกัดน้ำหนักรวมที่แตกต่างกัน ในการวิเคราะห์เพื่อพัฒนาระบบ B-WIM ให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ขณะเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองความเครียดของสะพานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. เพื่อศึกษาระดับความถูกต้องของการคำนวณน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากผลกระทบของประเภทรถ, น้ำหนักรถ และความเร็วในช่วง 34-54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. โครงการนี้พิจารณาการศึกษาด้วยการทดสอบภาคสนามกับโครงสร้างสะพานจริง
2. เลือกทดสอบด้วยโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรง จำนวน 1 แห่ง ที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 10 เมตร และมีทิศทางการสัญจรของยานพาหนะไปในทางเดียวกันทุกช่องจราจร
3. การวิเคราะห์อาศัยข้อมูลตรวจวัดจากผลตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานเท่านั้น

4. การศึกษาวิเคราะห์จากการสำรวจข้อมูลตรวจวัดเหตุการณ์การสัญจรผ่านของรถบรรทุก 5 และ 6 เพลาทั้งหมดจำนวน 30 คัน

5. คำนวณน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่นำมาใช้คำนวณระดับความถูกต้องอ้างอิงจากค่าที่ตรวจวัดได้ ณ ด้านซ้่งน้ำหนักบรรทุกถาวร

6. การคำนวณค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกพิจารณาเป็นค่าประมาณของน้ำหนักทางสถิตย่เท่านั้น

7. การวิเคราะห์เหตุการณ์ที่สามารถประมาณน้ำหนักรถบรรทุกได้ พิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาระบบควบคุมน้ำหนักรถบรรทุกบนสะพานเพื่อให้การจราจรดีขึ้น
2. การใช้ระบบ B-WIM จะมาสามารถใช้เป็นระบบคัดกรองรถบรรทุกที่มีแนวโน้มน้ำหนักเกินพิกัดน้ำหนัก เพื่อลดจำนวนการเข้าซ้่งในด้านซ้่งน้ำหนัก
3. เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากระบบ B-WIM เป็นสัญญาณข้อมูล จึงสามารถส่งข้อมูลไปยังสำนักงานใหญ่ โดยไม่ต้องมีสำนักงานย่อยบริเวณนั้น
4. ระบบที่นำเสนอสามารถบำรุงซ่อมได้รวดเร็ว และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่ำลง
5. ผู้ซ้่งรถบรรทุกไม่สามารถทราบว่ามีรถตรวจสอบน้ำหนักบริเวณใด
6. ผู้ซ้่งไม่จำเป็นต้องหยุดรถเพื่อทำการตรวจสอบน้ำหนัก ให้เกิดแถวคอยในการรอซ้่งน้ำหนักรถบรรทุก
7. ทราบถึงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์น้ำหนักของรถบรรทุก

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. พัฒนาระเบียบวิธีการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุก
3. สำรวจสถานที่สำหรับเลือกทดสอบภาคสนาม
4. เตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบภาคสนาม พร้อมทั้งศึกษาวิธีการใช้งาน
5. ทำการทดสอบภาคสนาม
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
7. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา
8. จัดเตรียมรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

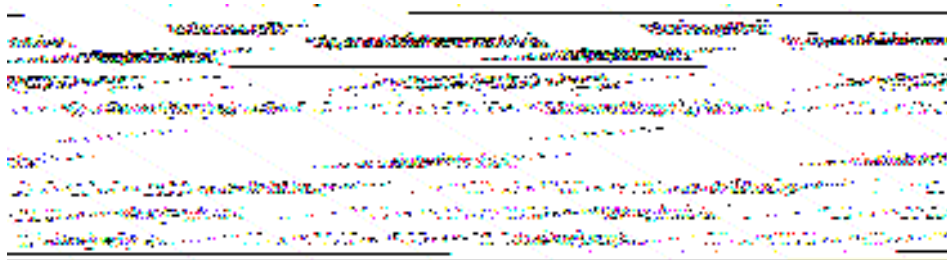
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการหาน้ำหนักบรรทุก

Moses (1979) ได้พัฒนาระเบียบวิธีใช้ในการประมาณน้ำหนักเพลาจากความเครียดที่วัดได้เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยการหาผลกลับของผลตอบสนองทางโครงสร้างจากน้ำหนักไปหาเส้นอิทธิพลของสะพานซึ่งถูกปรับเทียบจากรถที่ทราบน้ำหนักเพลาด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดย Moses ใช้สะพาน 3 ช่วง เป็นคานต่อเนื่อง และเป็นแบบคานพื้น (slab girder) ในการทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ในสะพานช่วงแรกเท่านั้น สอบเทียบโดยรถแทรกเตอร์ผ่านสะพาน 13 ครั้ง สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของน้ำหนักรวมคือ 5% และของเพลาคู่ 10.1% Moses แนะนำให้ใช้สะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงน้อยกว่า 60ft จะเหมาะสมที่สุดในการทำนายน้ำหนักเพลา ในขณะที่สะพานที่มีความยาวช่วงมากกว่า 80ft จะเหมาะในการหาน้ำหนักรวม

Jacob และ O'Brien (2002) ได้พัฒนาโปรแกรม COST 323 คือกรอบการทำงานของกลุ่มความร่วมมือรัฐบาลยุโรปในด้านวิทยาศาสตร์และเทคนิคงานวิจัย เพื่อชี้แจงระดับความถูกต้อง ความแม่นยำ และประสิทธิภาพ การทำงานของระบบต่างๆ ของ WIM ท้ายยุโรป ได้กำหนดข้อจำกัดในการพัฒนา WIM โดย Jacob และคณะ (2000) ไว้ใน COST 323 เปรียบเทียบทางสถิติระหว่างน้ำหนักที่ถูกคำนวณได้จากระบบ WIM และการชั่งน้ำหนักเพลาแบบหยุดนิ่ง เป็นคำอธิบายได้ดีเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้องของ WIM ในภาคสนามและตัวอย่างการจัดประเภทความแม่นยำโดยใช้ข้อมูลจริงของระบบ WIM กำหนดโดย Jacob และคณะ (2000) มี 6 ระดับที่กำหนดความแม่นยำ ตามตารางที่ 2-1 : A(5) , B+(7) , B(10) , C(15) , D+(20) , D(25) และ E Cost 323 (1999) แบ่งเพิ่มเติม : E(35), E(40) ฯลฯ ตัวเลขในวงเล็บแสดงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ ในการใช้ WIM หาน้ำหนักรวม และความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักเพลาเดี่ยว น้ำหนักเพลา กลุ่ม และน้ำหนักของเพลาในกลุ่ม มีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ถ้าเป็นข้อมูลเดิมที่มีอยู่มาใช้สำหรับเปรียบเทียบ และคำนวณระดับความแม่นยำ ช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ควรจะถูกด้วย 0.8

ตารางที่ 2-1 ระดับความถูกต้องของระบบ WIM ตามเกณฑ์ COST 323 Jacob และคณะ (2000)



Chan, Law และ Yung (2000) ศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่ โดยการติดตั้งมาตรวัดความเครียด เครื่องตรวจวัดความแรงที่คาน (girder) และเครื่องตรวจนับจำนวนเพลลา (axle sensors) ที่ผิวของสะพานคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) ใช้รถบรรทุกประเภท 2 เพลลาในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม ใช้วิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ในการหาน้ำหนักเพลลาทางพลศาสตร์ การหาน้ำหนักรวมจะใช้ผลรวมในแต่ละเพลลา และหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถบรรทุกโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนความถี่ (frequency domain) โดยใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (fourier transform) แต่พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักใช้เวลามากถึง 30 นาที เมื่อใช้ CPU รุ่น Pentium II 300MHz และ น้ำหนักที่คำนวณได้ในโดเมนของเวลามีความแปรปรวนสูงจนไม่น่าเชื่อถือซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำถึงร้อยละ ± 5 ก็ตาม

Pinkaew (2006) ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักรถบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิ่ง โดยการตัดผลเนื่องจากการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยการคำนวณน้ำหนักจากค่าโมเมนต์ดัดที่หน้าตัดสะพาน และทำการปรับปรุงโดยให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นโดยใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำหรือเรียกว่า Updated Static Component (USC) technique มาใช้ โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิคโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักรถบรรทุกกลุ่มเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องเพิ่มขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรก ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่หาได้มีความถูกต้องแม่นยำสูงมาก มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 5 แต่ยังใช้เวลาในการคำนวณมาก

O'Brien และคณะ (2006) ได้พัฒนาระบบการหาเส้นอิทธิพลต่อจาก Moses โดยใช้รถบรรทุก 3 เพลลาในการหาเส้นอิทธิพลของสะพาน โดยทดสอบภาคสนามที่เป็นสะพานแบบ integral frame ณ ประเทศสวีเดน โดยติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ที่กึ่งกลางของช่วงสะพาน โดยใช้ความถี่ในการบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 1,024 Hz พบว่าวิธีการนี้ใช้ในการเปรียบเทียบในการหาเส้นอิทธิพลจากรถ 2-3 เพลลาได้ดี

Zhao และ Uddin (2011) ได้ใช้วิธีการคำนวณหาเส้นอิทธิพลคล้ายคลึงกับ O'Brien (2006) โดยติตมาตรวัดความเครียดเพียง 4 ตัว และ FAD Sensor 4 ตัวแต่ทำการหาเส้นอิทธิพลจากรถบรรทุกขนาด 5 เพลา แล้วนำเส้นอิทธิพลที่ได้ไปคำนวณย้อนกลับไปหาน้ำหนักเพลาของรถบรรทุก 3, 4 และ 5 เพลา จำนวน 20 คัน พบว่าความเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัดน้ำหนักรวมมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 12.5% และมีความเคลื่อนในการวัดน้ำหนักเพลามากที่สุดอยู่ที่ 41.6%

2.1.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา

คณะกรรมการยุโรป (2001) ได้เริ่มพัฒนาระบบ B-WIM แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (free of axle detector) หรือเรียกว่า FAD B-WIM โดยใช้ FAD Sensor ซึ่งติดตั้งบริเวณใต้สะพานแทนการใช้อุปกรณ์แบบเดิมซึ่งต้องติดตั้งบนผิวทาง ทำให้สามารถคำนวณความเร็วรถบรรทุกจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาได้ จากการเทียบสัญญาณความเครียดจาก FAD Sensor ที่ติดตั้ง ณ 2 ตำแหน่งหน้าตัดสะพาน อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ FAD Sensor จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อล้อของรถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่ในแนวที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ติดตั้ง FAD Sensor อีกทั้งจำเป็นต้องเลือกสะพานที่มีความเหมาะสมกับการใช้ FAD Sensor นี้ด้วยเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับความชัดเจนสัญญาณจาก FAD Sensor ส่งผลต่อระดับความถูกต้องของการคำนวณข้อมูลเพลาของรถบรรทุก โดยคณะกรรมการยุโรปได้ทำการศึกษาดังนี้วัดความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ FAD ของสะพาน โดยได้ทำการทดสอบกับสะพาน Orthotropic จริง ศึกษาผลกระทบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวแปรต่างๆ และได้ทำการทดสอบการหาน้ำหนักทั้งในแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ซึ่งได้ผลการหาน้ำหนักมีความแม่นยำสำหรับแบบจำลอง 1 มิตร้อยละ 20 และความแม่นยำสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ ร้อยละ 15

นิคมเดช (2546) ได้ศึกษาวิธีการหาความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานจากผลตอบสนองของสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ พบว่าการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) หลายตัวโดยกระจายตามตำแหน่งที่เท่ากันในแต่ละหน้าตัดสะพานสามารถนำผลรวมของผลการตอบสนองของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรมาหาผลต่างของการตอบสนอง จะได้ลักษณะสัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้นสามารถบ่งบอกจำนวนและตำแหน่งเพลาของรถบรรทุกได้ จากการศึกษาพบว่าการทดสอบการหาความเร็วและระยะห่างเพลาที่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่เกินร้อยละ 10 และร้อยละ 7 ตามลำดับ

Liljencrantz, Karoumi และ Olofsson (2007) ได้ประยุกต์ระบบ B-WIM กับสะพานรางรถไฟ เพื่อตรวจวัดข้อมูลน้ำหนักและตรวจจับเพลาของรถไฟ โดยใช้หลักการหาความเร็วด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างความเครียดบริเวณสองตำแหน่ง

ขั้นตอนในการคำนวณหาความเร็ว ตำแหน่งเพลลา ระยะห่างระหว่างเพลลา และน้ำหนักเพลลา ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตรวจวัดและเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้
2. คำนวณหาความเร็วของรถไฟโดยใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
3. ตรวจจับจำนวนเพลลาแบบคร่าว ๆ จากตำแหน่งสัญญาณสูงสุด ประกอบกับคำนวณความเร็ว และน้ำหนัก

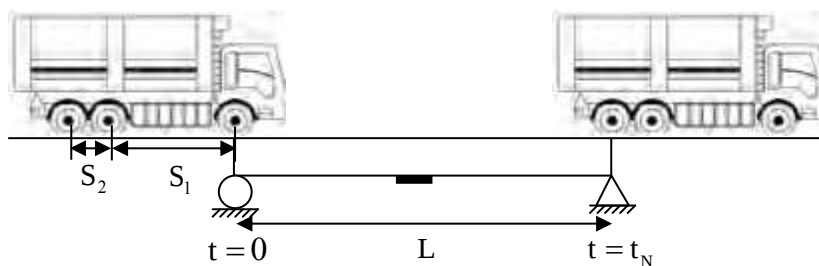
หลังจากหาความเร็วด้วยหลักการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วจึงทำการหาดำแหน่งเพลลา จากขั้นตอนก่อนหน้า จากการพัฒนาระบบ B-WIM มาอย่างต่อเนื่องและได้ทำการทดสอบระบบกับสะพานจริงพบว่าการทำงานของระบบ B-WIM มาใช้กับรางรถไฟได้ผลที่ดี หลักการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดสามารถหาความเร็วได้อย่างรวดเร็ว จากการทดสอบพบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยโดยค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว น้ำหนักรวม และน้ำหนักแต่ละโบกี้มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ร้อยละ 2 และร้อยละ 2.5 ตามลำดับ

ศุภชัย และ พัทธพงษ์ (2558) ได้ทำการศึกษาการหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน จากการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าสามารถหาความเร็วของ การสัญจรได้อย่างถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 สำหรับการหาดำแหน่งเพลลาด้วยหลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ซึ่งทำในลักษณะการคำนวณซ้ำ โดยเริ่มจากการสมมติจำนวนเพลลาจากน้อยไปมาก และประมาณตำแหน่งเพลลาที่เพิ่มเติมจากยอดของส่วนต่างคงค้างของสัญญาณความเครียดพบว่า การหาระยะห่างเพลลาที่มีความคลาดเคลื่อนที่มาก อย่างไรก็ตามยังสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้

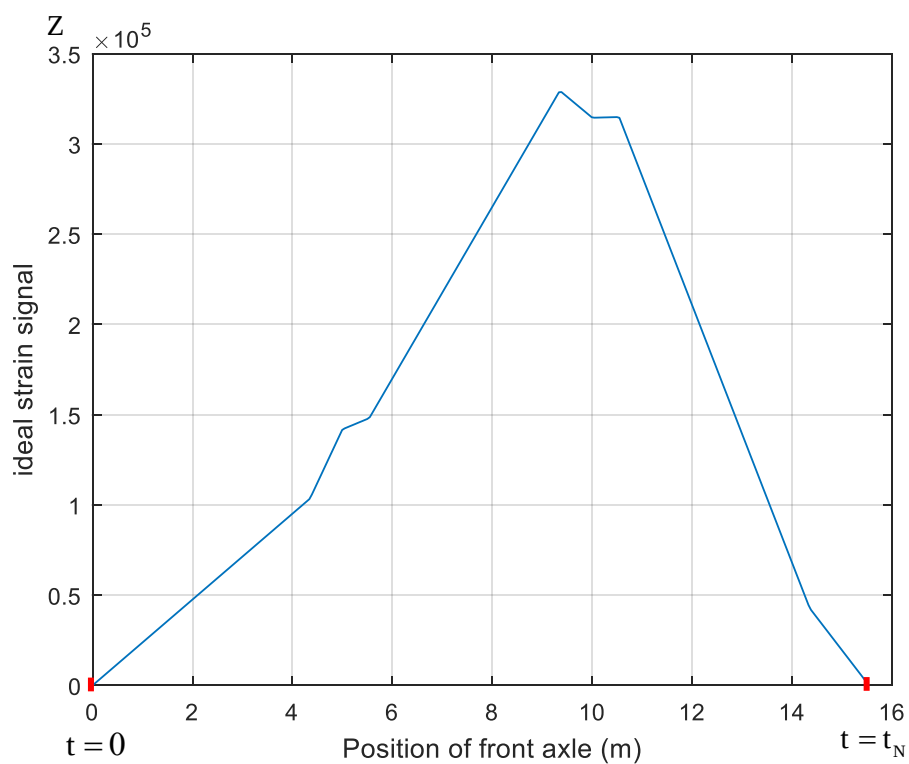
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 หลักการหาเส้นอิทธิพล (influence line extraction)

เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพานจะได้เวลาเริ่มต้นของข้อมูล $t = 0$ และเมื่อเพลลาสุดท้ายออกจากสะพานจะได้เวลาทั้งหมดที่รถเคลื่อนที่บนสะพาน $t = t_N$ จะได้สัญญาณความเครียดที่ติดตั้งไว้ที่ใต้ท้องสะพาน ซึ่งสัญญาณความเครียดที่วัดมาได้ตามทฤษฎีจะได้นิยามภาพที่ 2-2 โดยที่ s_1 คือ ระยะห่างจากกึ่งกลางเพลลาแรก ถึงกึ่งกลางเพลลาที่ 2 และ s_2 คือ ระยะห่างจากกึ่งกลางเพลลาที่ 2 ถึงกึ่งกลางเพลลาที่ 3



ภาพที่ 2-1 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน

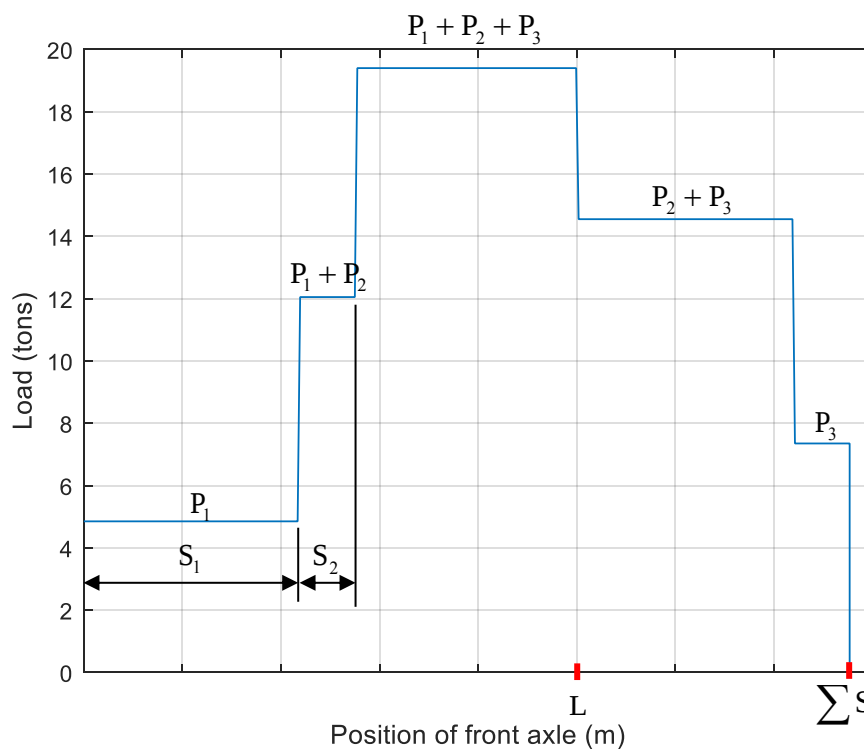


ภาพที่ 2-2 สัญญาณความเครียดตามทฤษฎี

เมื่อนำเวลาที่รถเคลื่อนที่ผ่านสะพานจะได้ระยะห่างเพลาดังสมการที่ (2-1) โดยความเร็ว (v) นั้นได้จากวิธีการหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังหัวข้อที่ 2.2.2 ซึ่งความเร็วที่ได้จะต้องเป็นความเร็วคงที่ และเมื่อนำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับสะพาน และตำแหน่งเพลารถของรถดังภาพที่ 2-3

$$x = vt$$

(2-1)



ภาพที่ 2-3 น้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับสะพานและตำแหน่งของเพลารถ

โดยที่ P_1 , P_2 และ P_3 คือ น้ำหนักเพลารถที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ น้ำหนักรถที่กระทำกับสะพานจะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของสะพานและระยะห่างเพลารถแต่ละเพลารถ

นำข้อมูลสัญญาณความเครียด ระยะเวลาที่เพลารถเคลื่อนที่ผ่านสะพานและน้ำหนักเพลารถไปคำนวณหาเส้นอิทธิพล (influence line) ของสะพานด้วยทฤษฎีของ O'Brien และคณะ (2006) จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นจากรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน คำนวณย้อนกลับไปเป็นเส้นอิทธิพลซึ่งต้องทราบขนาดของน้ำหนักเพลารถ ระยะห่างของเพลารถ และความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก ส่วนความเครียดนั้นได้มาจากติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดไว้ที่ท้องสะพาน ซึ่งผลความเครียดจากทฤษฎีสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเพลารถและความเครียดตรงจุดในรูปของเส้นอิทธิพลได้ดังสมการที่ (2-2) ต้องเป็นไปตามสมการ

$$\mathbf{Z}_k^T = \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_i \mathbf{I}_{(k-C_i)} \quad (2-2)$$

โดยที่ $\mathbf{Z}_k^T$ คือ เวกเตอร์ความเครียดทางทฤษฎีที่วัดได้ในครั้งที่ k
 $\mathbf{A}_i$ คือ น้ำหนักเพลลา
 $\mathbf{I}$ คือ ค่าพิกัดของเส้นอิทธิพล
 N คือ จำนวนเพลลา

$$C_i = \frac{D_i f}{v} \quad (2-3)$$

โดยที่ D_i คือ ระยะห่างระหว่างเพลลาใดๆเทียบกับเพลลาแรก
 f คือ ความถี่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
 v คือ ความเร็วของรถที่วิ่งผ่านสะพาน

จากสมการข้างต้น จัดรูปได้ดังนี้

$$\mathbf{W}_{K,E} \mathbf{I}_{E,1} = \mathbf{Z}_{K,1} \quad (2-4)$$

โดยที่ K คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด
 E คือ จำนวนข้อมูลของเพลลาใดๆที่อยู่ในช่วงของสะพาน

$$\mathbf{W}_{K,E} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & A_1 \\ A_2 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & A_2 \\ A_3 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_3 \end{bmatrix}$$

C_i

โดยที่ $\mathbf{W}_{K,E}$ คือ เมทริกซ์ของน้ำหนักเพลานในแนวทแยง และตำแหน่งของเพลาลัดมาจะอยู่ในที่ห่างแถวของน้ำหนักแต่ละเพลาลเท่ากับ C_i

จากสมการ (2-4) ซึ่งอยู่ในรูป $\mathbf{W}\mathbf{I} = \mathbf{Z}$

เพื่อที่จะหาเวกเตอร์เส้นอิทธิพล $\mathbf{I}$ จะสามารถหาได้โดยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) สมการที่ (2-4) จะสามารถแปลงให้เมทริกซ์สัมประสิทธิ์เป็นเมทริกซ์จัตุรัสได้ ดังสมการที่ (2-5)

$$\mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{I} = \mathbf{W}^T \mathbf{Z} \quad (2-5)$$

จากสมการ (2-5) จะได้เวกเตอร์เส้นอิทธิพล ด้วยการอินเวอร์สเมทริกซ์ด้วยวิธี Pseudo Inverse ดังสมการที่ (2-6)

$$\mathbf{I} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{Z} \quad (2-6)$$

หรือจัดรูปได้ดังนี้

$$\mathbf{I} = \mathbf{W}^+ \mathbf{Z} \quad (2-7)$$

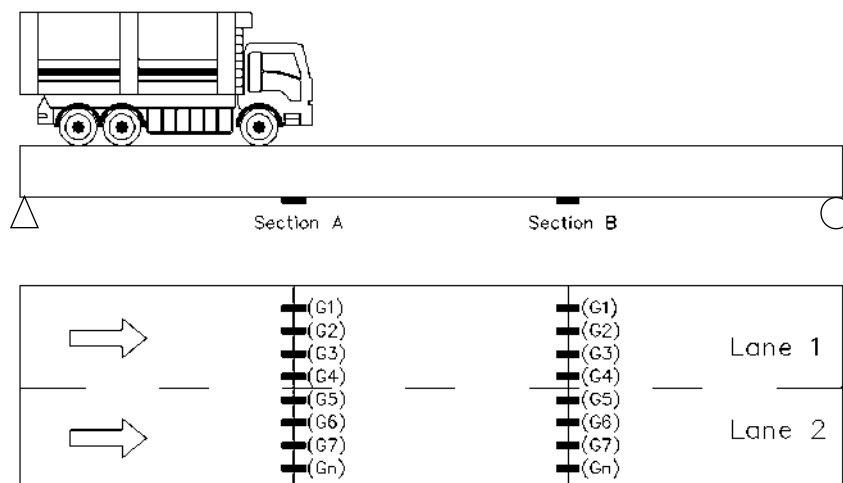
โดยที่ $\mathbf{W}^+ = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T$

2.2.2 การหาความเร็ว ตำแหน่งเพลาล ระยะห่างเพลาลโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลาล (FAD)

1) การหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การใช้สัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานทั้งสองหน้าตัดมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความเร็ว จะพบว่าหากสัญญาณความเครียดมีลักษณะความสูงในบริเวณที่ตรวจวัดไม่มาก ทำให้สังเกตเห็นยอดในบริเวณจุดตรวจวัดได้ไม่ชัดเจนนัก จึงคำนวณหาความเร็วไม่ได้ ดังนั้นการปรับปรุงสัญญาณความเครียดให้มีความชัดเจนบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลาลของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำในการนำไปหาความเร็วรถบรรทุก ทั้งนี้นอกจากจะสามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้แล้วยังสามารถใช้สัญญาณความเครียดดังกล่าวคำนวณหาจำนวนเพลาลและระยะห่างเพลาลของรถบรรทุกได้ ซึ่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดจะติดตั้งจำนวนหลายตัวในหน้าตัดสะพานเดียวกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงสัญญาณความเครียดในการ

จำแนกประเภทรถบรรทุกทุกดังแสดงในภาพที่ 2-4 การปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อจำแนกประเภทของรถบรรทุกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-8) โดยการหาค่าสัมบูรณ์ผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในช่องจราจรที่ 1 กับช่องจราจรที่ 2



ภาพที่ 2-4 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของสะพาน

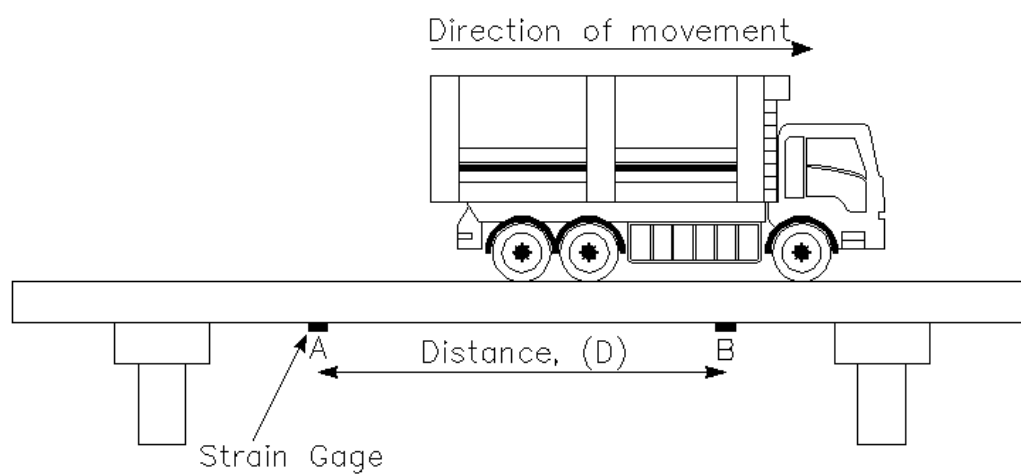
$$Z_i = \left| \sum Z_i^{\text{lane1}} - \sum Z_i^{\text{lane2}} \right| \quad (2-8)$$

โดยที่ Z_i คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ปรับปรุงค่าแล้ว

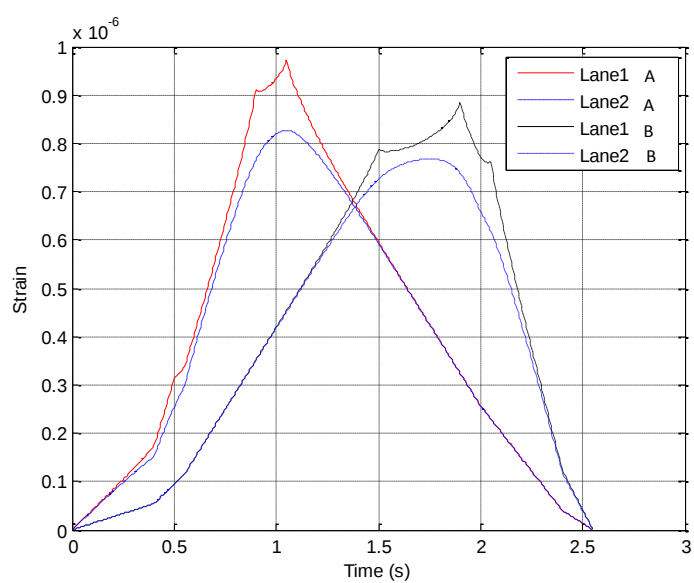
$\sum Z_i^{\text{lane1}}$ คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 1

$\sum Z_i^{\text{lane2}}$ คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 2

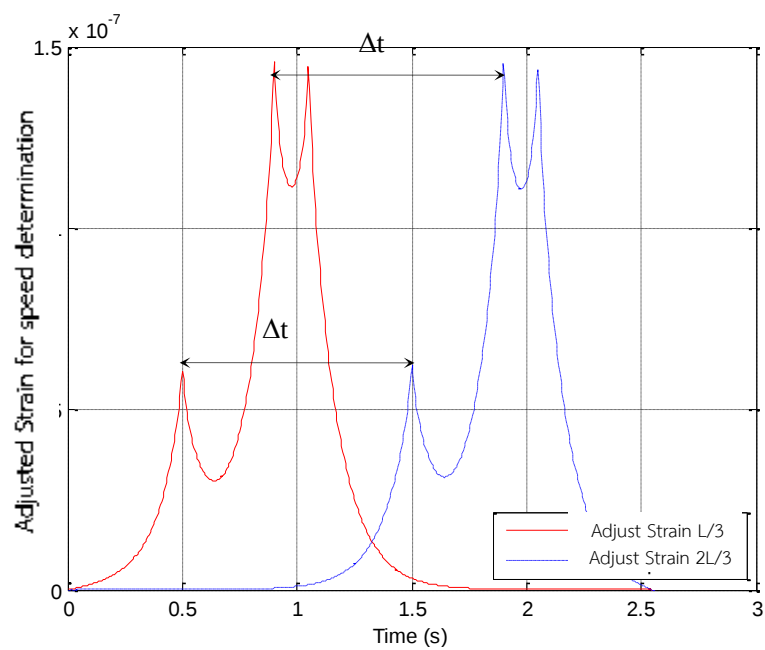
เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานในช่องจราจรที่ 1 สัญญาณความเครียดที่วัดได้ทั้ง 2 หน้าตัด (A และ B) ในแต่ละช่องจราจรจะได้ดังภาพที่ 2-6 และจะถูกนำมาปรับปรุงสัญญาณดังสมการที่ 2-8 เมื่อปรับปรุงสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณความเครียดดังภาพที่ 2-7 ซึ่งจะให้เห็นยอดของสัญญาณชัดเจนมากยิ่งขึ้น หลังจากได้สัญญาณที่ปรับปรุงแล้วจะไปหาความเร็วด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2-8



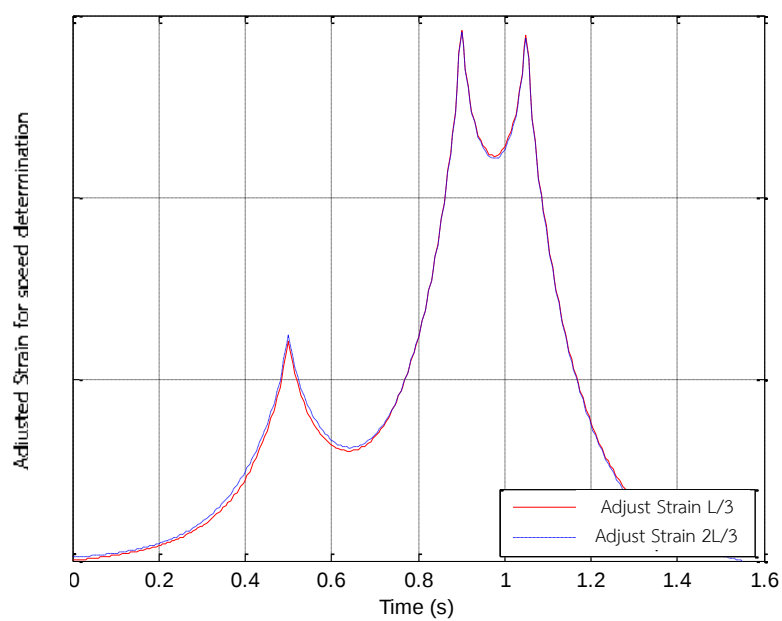
ภาพที่ 2-5 ระยะห่างระหว่างหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดสองหน้าตัดสำหรับใช้
คำนวณหาความเร็ว



ภาพที่ 2-6 ผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร



ภาพที่ 2-7 ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณความเครียดระหว่างช่องจราจร
ในหน้าตัด A และ B เพื่อใช้หาความเร็ว



ภาพที่ 2-8 สัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณเวลาระหว่างสัญญาณความเครียดจากสองหน้าตัด ซึ่งเป็นเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ดังนั้นเมื่อทราบระยะห่างระหว่างหน้าตัดจึงทำให้สามารถคำนวณความเร็วของรถบรรทุกได้จากสมการการเคลื่อนที่ โดยการศึกษาในครั้งนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ ค่าทางสถิติใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูล 2 ชุดข้อมูล สามารถบอกได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด มีความสัมพันธ์กันในระดับใด และมีทิศทางเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-9) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 โดยหากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวของสัญญาณความเครียดคู่หนึ่ง หากมีค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้ -1 แสดงว่าสัญญาณความเครียดคู่หนึ่งมีความสัมพันธ์กันในทิศทางที่ตรงกันข้าม และหากค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าสัญญาณความเครียดคู่หนึ่งมีความสัมพันธ์กันน้อยมากหรือแทบไม่มีความสัมพันธ์กัน

$$\text{Correlation Coef.} = \frac{N\mathbf{Z}_A^T\mathbf{Z}_B - \sum\mathbf{Z}_A\sum\mathbf{Z}_B}{\sqrt{[N\sum\mathbf{Z}_A^2 - (\sum\mathbf{Z}_A)^2][N\sum\mathbf{Z}_B^2 - (\sum\mathbf{Z}_B)^2]}} \quad (2-8)$$

โดยที่ Correlation Coef. คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$\sum\mathbf{Z}_A$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ A ที่ปรับปรุงค่า

$\sum\mathbf{Z}_B$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ B ที่ปรับปรุงค่า

$\sum\mathbf{Z}_A\mathbf{Z}_B$ คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างเวกเตอร์สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่า ณ หน้าตัดที่ A และ B

$\sum\mathbf{Z}_A^2$ คือ ผลรวมกำลังสองของเวกเตอร์สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่า ณ หน้าตัดที่ A

$\sum\mathbf{Z}_B^2$ คือ ผลรวมกำลังสองของเวกเตอร์สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่า ณ หน้าตัดที่ B

N คือ จำนวนข้อมูลของสัญญาณความเครียดที่วัดได้

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับการปรับส่วนต่างของเวลา Δt ระหว่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัด หากสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดซ้อนทับกับพอดี ค่า Δt นั้นจะเป็นค่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงที่สุด (เข้าใกล้ 1 มากที่สุด) ซึ่งค่า Δt นี้จะเป็นเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากบริเวณหน้าตัด A ไปยังบริเวณหน้าตัด B ซึ่งเมื่อทราบระยะห่างระหว่างหน้าตัดทั้งสอง ก็จะสามารถคำนวณความเร็วของรถบรรทุกได้ โดยในการทดสอบจะใช้ที่หน้าตัด L/2 และ 2L/3 และสมมติว่ารถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยคงที่ ดังสมการที่ (2-10)

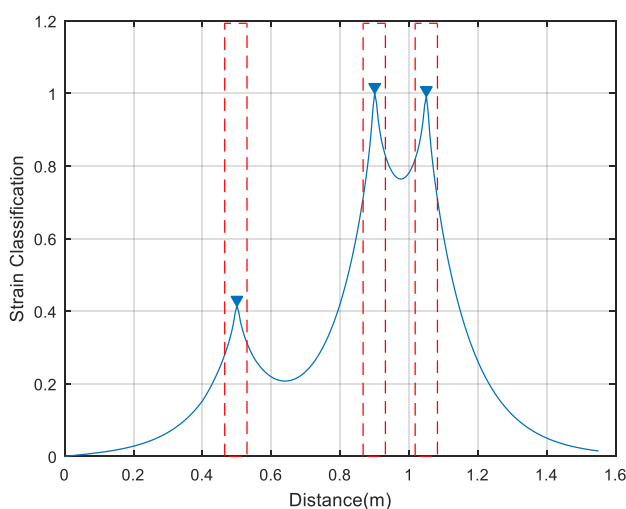
$$v = \frac{D}{\Delta t} \quad (2-10)$$

โดยที่ D คือ ระยะห่างระหว่างจุดตรวจวัดความเครียด A และ B

Δt คือ เวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ซึ่งเป็นส่วนต่างเวลาที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่ามากที่สุด

2) การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB

การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาจะวิเคราะห์จากลักษณะทางกายภาพของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว โดยเลือกใช้สัญญาณความเครียดบริเวณที่ล้อรถเหยียบในหน้าตัด $L/2$ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดการโก่งตัวมากกว่าบริเวณอื่น การหาระยะช่วงเพลลาด้วยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB ตรวจสอบยอดของสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะห่างเพลลาที่มากที่สุดที่คำนวณได้ เพื่อให้ได้ยอดสัญญาณที่บ่งบอกตำแหน่งเพลลาครบถ้วน แล้วจึงคำนวณระยะห่างเพลลาจากตำแหน่งยอดสัญญาณที่ตรวจวัด



ภาพที่ 2-9 สัญญาณระบุตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก

โดยสัญญาณความเครียดที่นำมาใช้ในการหาจำนวนเพลลานั้นจะเป็นค่าความเครียดที่เป็นค่าความเครียดที่ปรับค่า (normalized) ให้เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless) ด้วยการหารค่าสูงสุด เนื่องจากการหาจำนวนเพลลานั้นพิจารณาเพียงรูปร่างของสัญญาณเท่านั้น

2.2.3 การหาน้ำหนักบรรทุกจากเส้นอิทธิพล

จากเส้นอิทธิพลที่สังเคราะห์ได้ตั้งหัวข้อที่ 2.2.1 จะสามารถนำมาใช้น้ำหนักเพลาดังสมการที่ (2-11)

$$\mathbf{B}_{K,i} \mathbf{P}_{i,l} = \mathbf{Z}_{K,l} \quad (2-11)$$

โดยที่ $\mathbf{P}$ คือ เมทริกซ์ของน้ำหนักเพล่า
 $\mathbf{B}$ คือ เมทริกซ์ของเส้นอิทธิพลตามจำนวนเพล่าโดย

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \vdots \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \uparrow \\ C_i \\ \downarrow \end{matrix}$$

โดยที่ ในกรอบ คือเมทริกซ์ของเส้นอิทธิพลที่ได้ในขั้นตอนที่ 2.2.1 และ
 เนื่องจากสัญญาณจะเก็บทั้งหมด 3 หน้าตัด จึงคิดรวมกันทั้ง 3 หน้าตัด

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 \mathbf{P} + \mathbf{B}_2 \mathbf{P} + \mathbf{B}_3 \mathbf{P} &= \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3 \\ (\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \mathbf{B}_3) \mathbf{P} &= \sum \mathbf{Z} \\ \sum \mathbf{B} \mathbf{P} &= \sum \mathbf{Z} \\ (\sum \mathbf{B}^T \sum \mathbf{B}) \mathbf{P} &= \sum \mathbf{B} \sum \mathbf{Z} \\ \mathbf{P} &= (\sum \mathbf{B}^T \sum \mathbf{B})^{-1} \sum \mathbf{B}^T \sum \mathbf{Z} \end{aligned} \quad (2-12)$$

โดยที่ $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$ และ $\mathbf{B}_3$ คือ เมทริกซ์ของเส้นอิทธิพลในแต่ละหน้าตัด
 $\mathbf{Z}_1$, $\mathbf{Z}_2$ และ $\mathbf{Z}_3$ คือ สัญญาณความเครียดในแต่ละหน้าตัด
 และน้ำหนักรวมที่วิเคราะห์ได้จะเท่ากับ

$$GV\hat{W} = \sum_{i=1}^N P \quad (2-13)$$

ระดับความถูกต้องของน้ำหนักบรรทุกทุกที่วิเคราะห์ได้ สามารถพิจารณาได้จากค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวม (relative percentage error, RPE (%)) ดังสมการที่ (2-14)

$$RPE_GVW = \frac{GVW - GV\hat{W}}{GVW} \times 100 \quad (2-14)$$

โดยที่ RPE_GVW คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
 GVW คือ น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ได้จากด้านข้างน้ำหนัก

2.2.4 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (fast fourier transform, FFT)

การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาหรือสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของเวลาให้อยู่ในรูปของสัญญาณในโดเมนความถี่หรือสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าสเปกตรัม (spectrum) ซึ่งผลตอบสนองการสั่นสะเทือนทางพลศาสตร์ของสะพานในโครงการนี้จะทำการสั่นสะเทือนสะพานเพื่อให้สะพานสั่นไหว โดยการกระโดดที่บริเวณกึ่งกลางสะพาน 1 ครั้ง การสั่นไหวจะถูกถ่ายไปยังหัววัดความเร่ง (acceleration) จะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในโดเมนของความถี่ด้วยการแปลงแบบฟูเรียร์เร็ว เป็นการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดที่ 1

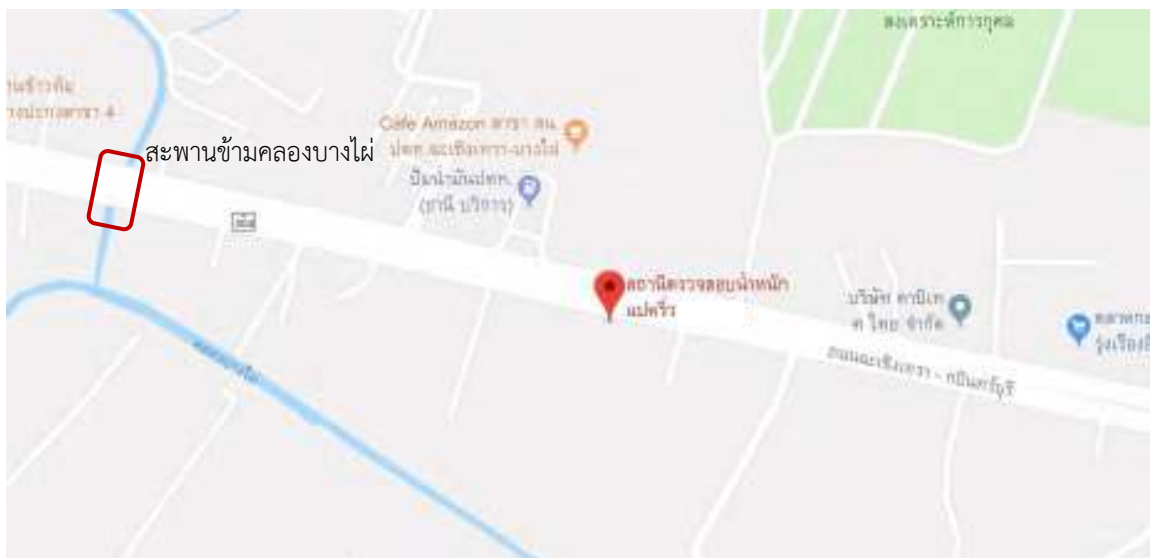
บทที่ 3

วิธีการศึกษา

โครงการนี้เป็นการทดสอบภาคสนาม เพื่อหาน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลาน้ำหนัก ได้ทำการสำรวจสถานที่ที่ทำการทดสอบเตรียมการทดสอบ ทำการทดสอบภาคสนาม และนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผล

3.1 สถานที่ศึกษา

เพื่อให้ง่ายต่อการสอบเทียบจึงเลือกสะพานที่อยู่ใกล้ด้านตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุกซึ่งเป็นด่านซึ่งที่ไม่หยุดนิ่ง ตั้งอยู่บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 304 กม.54+700 (ขาเข้า) ตำบลบางไผ่ อำเภอมะนัง จังหวัดยะลา พิกัด 13.660291N, 101.119360E สะพานข้ามคลองบางไผ่ ห่างจากด้านตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก 500 เมตร ตำบลบางไผ่ อำเภอมะนัง จังหวัดยะลา ซึ่งเป็นสะพานคอนกรีตแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงทาบหน้า 2 ช่องจราจรที่มีทิศทางการสัญจรของยานพาหนะทิศทางเดียวกัน สะพานมีความกว้าง 12 เมตร ยาว 30 เมตร หนา 50 เซนติเมตร เป็นสะพาน 3 ช่วงโดยมีความยาวช่วงละ 10 เมตร



ภาพที่ 3-1 แผนที่แสดงสถานที่ทดสอบ



ภาพที่ 3-2 ชื่อคลองที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-3 ลักษณะสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-4 ลักษณะใต้สะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-5 ด้านตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุกจังหวัดฉะเชิงเทรา

3.2 เตรียมการทดสอบ

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1) มาตรฐานวัดความเครียด (strain gauge)

มาตรฐานวัดความเครียด คือ มาตรฐานวัดค่าการยืดหรือหดตัวของวัสดุ โดยมาตรฐานวัดจะให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถแปลงเป็นค่าความเครียดได้ โดยมาตรฐานวัดความเครียดที่ใช้ แสดงดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 มาตรฐานวัดความเครียด (strain gauge)

2) ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (signal transformer module)

อุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ยี่ห้อ National Instrument ซึ่งเป็นชุดแปลงสัญญาณความเครียดขนาด 8 ช่องสัญญาณ ใช้กับมาตรฐานวัดความเครียด ดังแสดงดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด (strain gauge transformer module)

3) อุปกรณ์รวมสัญญาณ (data acquisition)

อุปกรณ์รวมสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลจริงในงานวิจัยเพื่อแปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่าน โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้นในลักษณะเวลาจริง โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178 เพื่อรวมสัญญาณจากชุดแปลงสัญญาณความเครียดขนาด 8 ช่องสัญญาณแปลงข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม NI Signal Express 2013 โดยลักษณะอุปกรณ์รวมสัญญาณที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 อุปกรณ์รวมสัญญาณ ยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178

4) เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง (photoelectric sensor และ reflector)

เครื่องเซนเซอร์ที่ใช้ลำแสงในการตรวจจับวัตถุโดยไม่ต้องมีการสัมผัส เพื่อตรวจสอบความเร็ว และระยะห่างเพลลาในระยะไกล ในการทดสอบใช้



ภาพที่ 3-9 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง (photoelectric sensor และ reflector)

5) หัววัดความเร่ง (acceleration transducer)

หัววัดความเร่งยี่ห้อ KYOWA รุ่น AS-2GB ซึ่งสามารถวัดค่าความเร่งได้ในช่วง $\pm 2g$ (สองเท่าของความเร่งโน้มถ่วงของโลก)

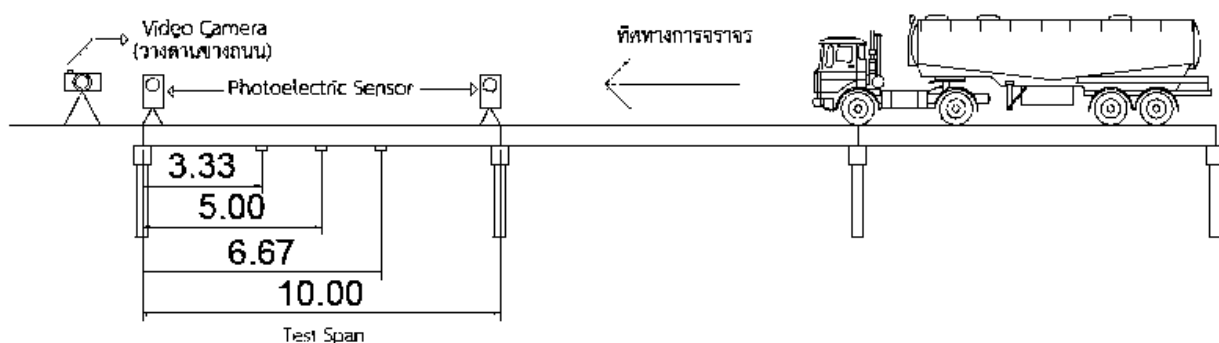


ภาพที่ 3-10 หัววัดความเร่ง (acceleration transducer)

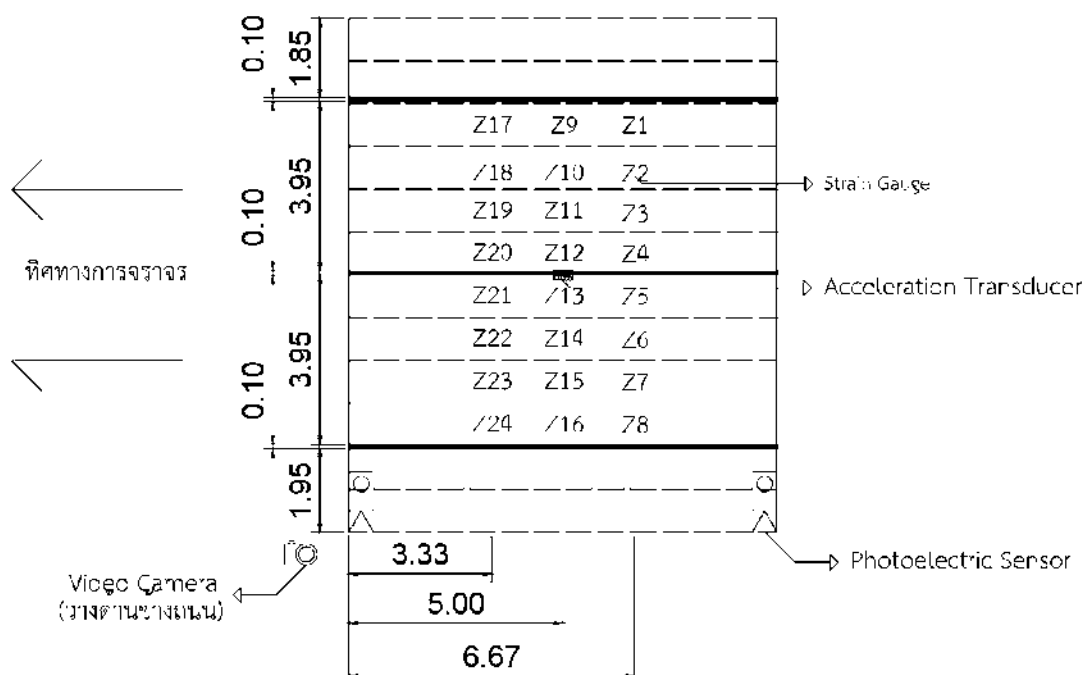
3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์และบันทึกข้อมูล

อุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ จะถูกติดตั้งบนสะพานช่วงสุดท้ายของทิศทางการจราจร โดยประกอบไปด้วย

- 1) มาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ตำแหน่ง 3.33 , 5.00 และ 6.67 เมตร วัดตั้งแต่รอยต่อสะพานกับถนน ติดตั้งตำแหน่งละ 8 ตัว ที่กึ่งกลางความกว้างของพื้นสะพานยกเว้นบริเวณที่เป็นทางเท้า มาตรวัดความเครียดที่ตำแหน่ง 3.33 และ 6.67 เมตร ใช้จับความเร็วและหาจำนวนเพลลา มาตรวัดความเครียดที่ตำแหน่ง 5.00 เมตร ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักและจำนวนเพลลา
- 2) เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง (photoelectric sensor และ reflector) ติดตั้งที่ตำแหน่งขอบของสะพานช่วงที่ทดสอบ เพื่อบอกช่วงเวลาที่รถเข้าและออกสะพาน
- 3) หัววัดความเร่ง (acceleration transducer) ติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานช่วงที่ทดสอบ ติดตั้งก่อนทำการทดสอบเพื่อหาความถี่ธรรมชาติเพียงครั้งเดียว นำความถี่ธรรมชาติมาพิจารณาหาช่วงความถี่ที่ใช้ทำการหาน้ำหนักเพลลา
- 4) กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว (video camera) ติดตั้งริมถนน ณ สะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-11 ภาพด้านข้างแสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-12 ภาพแปลนแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-13 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด

อุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ จะถูกติดตั้งบริเวณด้านตรวจสอบน้ำหนัถาวร โดยประกอบไปด้วย

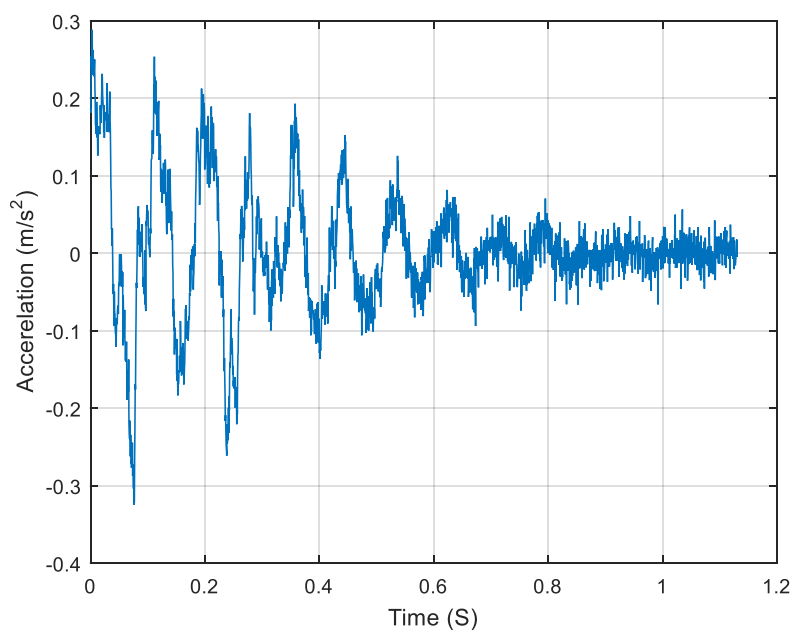
- 1) แถบบอกระยะ เพื่อวัดระยะห่างระหว่างเพลลาของรถบรรทุกที่เข้ามายังด้านตรวจสอบน้ำหนัก
- 2) กล้องบันทึกภาพนิ่ง เพื่อบันทึกภาพนิ่งของรถบรรทุก นำไปใช้ในการวัดระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

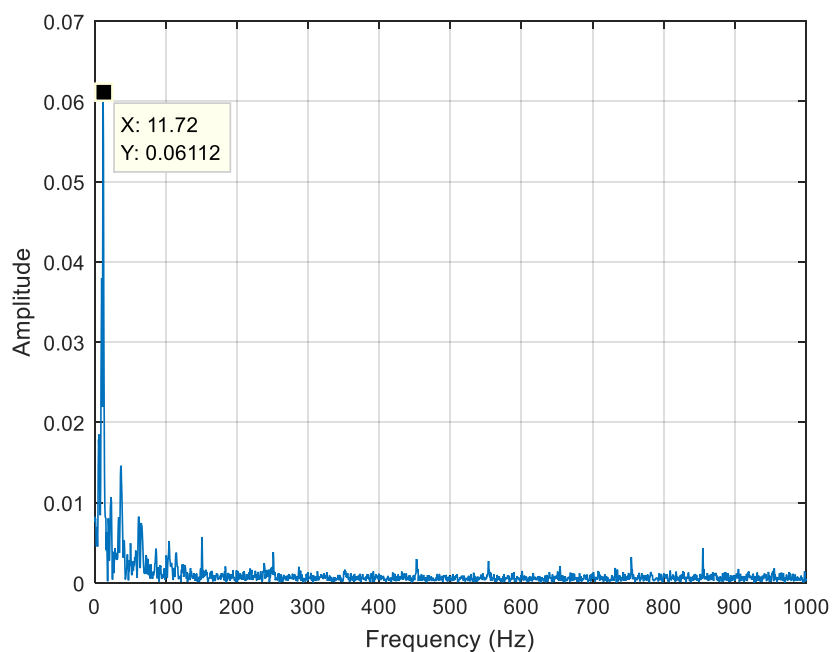
3.3.1 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้ได้นำเสนอวิธีการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน โดยเริ่มจากการขอข้อมูลน้ำหนักของรถบรรทุกที่ผ่านเข้าสู่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการบันทึกผลของความเครียดของสะพานที่ใช้ทำการทดสอบ นำผลของความเครียดที่ได้ไปหาเส้นอิทธิพลทางสถิติด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีการกรองการวัดเส้นอิทธิพล จากการที่ได้ทำการทดสอบในภาคสนามเพื่อที่จะได้ค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่เป็นค่าจริง โดยขั้นตอนและรายละเอียดในการดำเนินการทดสอบดังต่อไปนี้

1) หาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยการทดสอบการสั่นไหวแบบอิสระด้วยหัววัดความเร่ง โดยการติดตั้งหัววัดความเร่งไว้ที่กึ่งกลางของสะพาน ทำการกระโดดที่ตำแหน่งหัววัดความเร่ง หัววัดความเร่งจะวัดความสั่นไหวของสะพานออกมาดังภาพที่ 3-14 นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน *FFT* ในโปรแกรม MATLAB จะได้ค่าแอมพลิจูดและความถี่ธรรมชาติของสะพานดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-14 สัญญาณความเร่งของสะพานจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระ
ด้วยการกระโดดทดสอบ



ภาพที่ 3-15 สเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระ
เพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

2) ปรับเทียบรถบรรทุก โดยนำรถบรรทุกที่ทราบน้ำหนักมาจอดซึ่งน้ำหนักทางสถิติบนตราซึ่งลอยที่ได้ทำการติดตั้งโดยเจ้าหน้าที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก ซึ่งตราซึ่งลอยมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กนำมาติดตั้งบนพื้นถนน ทำการวัดระยะห่างระหว่างเพลารถบรรทุกขณะทำการชั่งน้ำหนัก หลังจากรถบรรทุกชั่งน้ำหนักเพลาริบบร้อย รถบรรทุกจะวิ่งไปยังสะพานที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ บันทึกข้อมูลเป็นสัญญาณความเครียด



ภาพที่ 3-16 ตราชั่งน้ำหนักเพลารถบรรทุกแบบเคลื่อนย้ายได้
(portable axle truck weight scale)



รูปที่ 3-17 รถบรรทุกขณะชั่งบนอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการเปรียบเทียบ

คัน	ประเภท (เพลลา)	น้ำหนักเพลลา (กิโลกรัม)						ระยะห่างเพลลา (เมตร)					น้ำหนัก รวม (กิโลกรัม)
		1	2	3	4	5	6	S1	S2	S3	S4	S5	
1	3	5,900	4,500	4,350				5.000	1.350				14,750
2	3	4,850	7,200	7,350				4.500	1.300				19,400
3	3	5,050	8,750	9,250				3.700	1.300				23,050
4	5	5,800	8,400	8,650	8,950	7,250		4.150	1.300	4.650	1.350		39,050
5	6	6,000	8,300	7,750	9,400	7,350	7,400	3.400	1.300	7.050	1.300	1.300	46,200
6	6	4,500	4,000	3,900	2,000	2,350	2,750	3.300	1.300	7.150	1.350	1.350	19,500

3) ชั่งน้ำหนักรวมของรถบรรทุก แบ่งการเก็บข้อมูลเป็น 2 จุด คือ จุดแรกที่ด่านตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนเข้ามายังด่านตรวจสอบน้ำหนัก และภาพนิ่งของระยะห่างระหว่างเพลลาของรถบรรทุก และอีกจุดหนึ่งคือ ณ สะพานผู้ทดสอบทำการบันทึกข้อมูลขณะที่รถบรรทุกเข้าสะพาน ด้วยการกดบันทึกข้อมูลแบบคันต่อคัน โดยอุปกรณ์ตรวจวัดถูกวัดด้วยความถี่ 2,000 Hz ในการสื่อสารกันระหว่างผู้ที่ทำการบันทึกข้อมูลที่ด่านตรวจสอบน้ำหนักกับผู้บันทึกข้อมูลที่สะพาน ผ่านอุปกรณ์สื่อสาร ทดสอบกับรถบรรทุกเป็นจำนวน 29 คัน แบ่งเป็นรถ 5 เพลลา 9 คันและ รถ 6 เพลลา 20 คัน เก็บข้อมูลทั้งหมด 3 วัน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ขณะทำการทดสอบมีการบันทึกภาพเคลื่อนไหวของรถบรรทุกที่สะพานเพื่อใช้ในการ

ตรวจสอบและพิจารณาประกอบข้อมูล ข้อมูลที่เก็บมาได้ประกอบด้วยสัญญาณความเครียด น้ำหนักรวมของรถบรรทุก ระยะห่างระหว่างเพล



ภาพที่ 3-18 แถบวัดระยะ



ภาพที่ 3-19 บันทึกภาพนิ่งระยะห่างระหว่างเพล ที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก



ภาพที่ 3-20 ตัวอย่างภาพที่ได้จากการบันทึกภาพนิ่งของรถบรรทุก
ขณะเข้ามายังด้านตรวจสอบน้ำหนัก

13_Part2_3axle
 0.1312 : 1
 s 1-2 = 4.45 m
 0.1316 : 1
 s 2-3 = 1.60 m



ภาพที่ 3-21 ตัวอย่างภาพหนึ่งที่ได้จากการบันทึกที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก
 เพื่อหาระยะห่างระหว่างเพลานในโปรแกรม AutoCAD



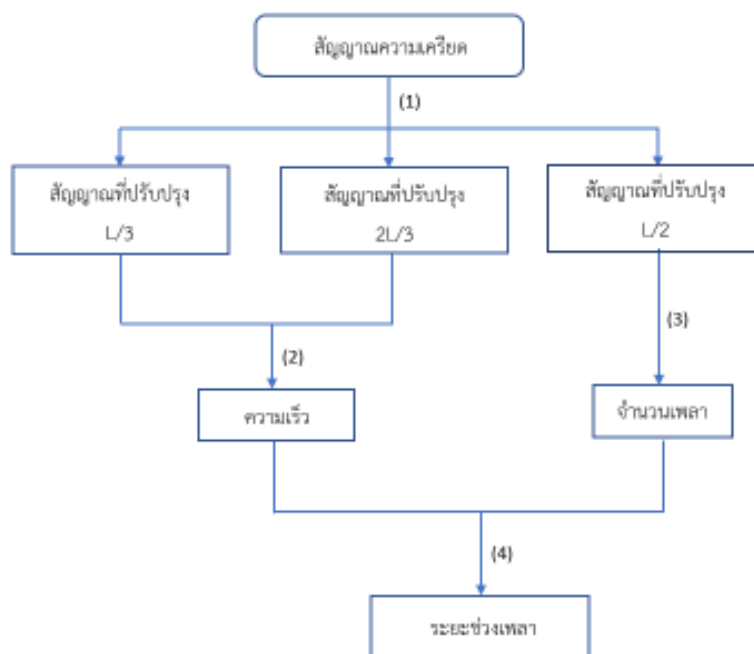
ภาพที่ 3-22 การปฏิบัติงานที่ได้สะพาน

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการขนาน้ำหนักรวมที่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก

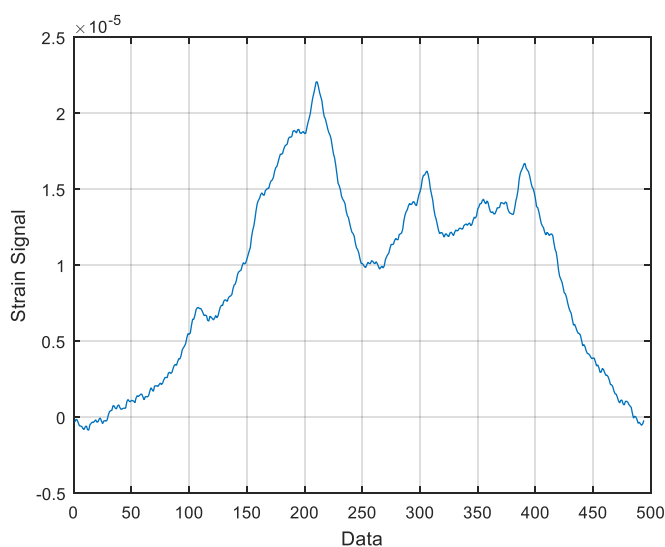
คันที่	จำนวน เพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
1	5	38.462	39,050	4.150	1.300	4.650	4.350	
2	5	43.841	27,620	4.090	1.330	4.840	4.330	
3	5	36.907	37,300	4.020	1.330	4.910	4.410	
4	5	41.080	37,600	4.200	1.330	4.710	4.400	
5	5	39.312	43,500	4.060	1.300	4.270	4.350	
6	5	43.031	40,000	2.900	1.260	7.840	1.210	
7	5	36.907	19,090	5.260	1.160	9.260	1.210	
8	5	43.474	36,100	3.390	1.350	7.730	1.300	
9	5	52.996	21,000	3.570	1.320	8.870	1.440	
10	6	34.103	46,200	3.400	1.300	7.050	1.300	1.300
11	6	47.484	19,500	3.300	1.300	7.150	1.350	1.350
12	6	45.054	50,500	3.790	1.210	4.370	2.900	1.210
13	6	51.466	50,320	4.020	1.270	5.110	3.780	1.320
14	6	40.133	50,500	3.740	1.210	4.580	3.210	1.210
15	6	41.951	50,500	3.740	1.210	4.210	3.370	1.260
16	6	46.195	47,000	3.210	1.320	6.320	1.840	1.210
17	6	38.441	48,000	1.620	2.870	1.390	4.600	4.590
18	6	39.312	49,700	3.160	1.260	6.470	1.210	1.210
19	6	38.462	49,000	3.390	1.340	7.230	1.400	1.400
20	6	49.378	46,520	3.340	1.300	7.100	1.360	1.420
21	6	42.001	50,500	3.790	1.260	3.680	3.470	1.320
22	6	46.847	50,450	4.000	1.320	4.430	3.520	1.380
23	6	44.024	49,500	1.740	3.160	1.260	4.900	4.260
24	6	50.055	50,500	3.420	1.320	6.470	1.160	1.160
25	6	41.033	50,500	4.080	1.270	4.400	3.240	1.260
26	6	39.696	49,000	3.890	1.260	4.580	3.660	1.330
27	6	42.073	47,380	3.340	1.380	7.010	1.300	1.310
28	6	45.646	49,100	3.430	1.400	7.250	1.370	1.390
29	6	34.817	48,700	3.420	1.320	7.220	1.380	1.340
30	6	36.946	19,600	1.630	2.740	1.260	4.160	3.950

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

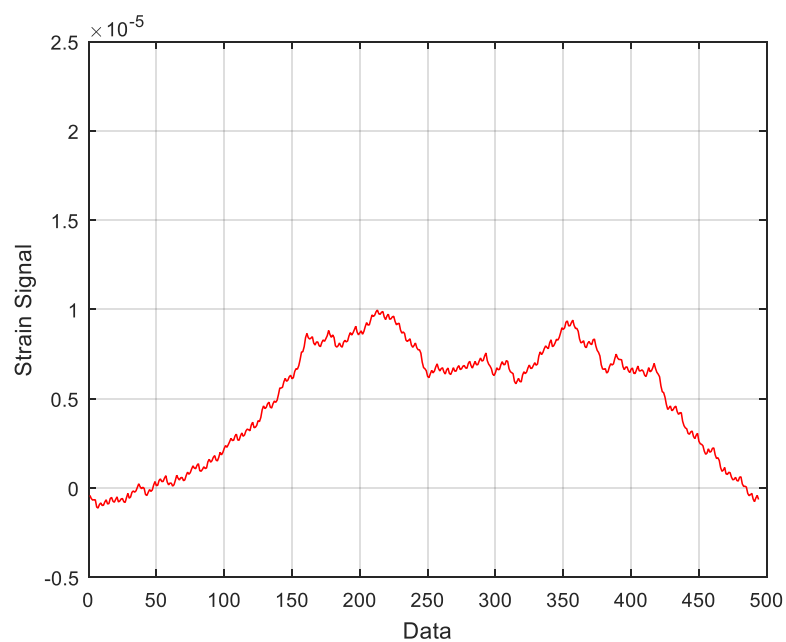
3.4.1 การวิเคราะห์การตรวจจับเพลลา ความเร็ว และระยะห่างเพลลา (FAD)



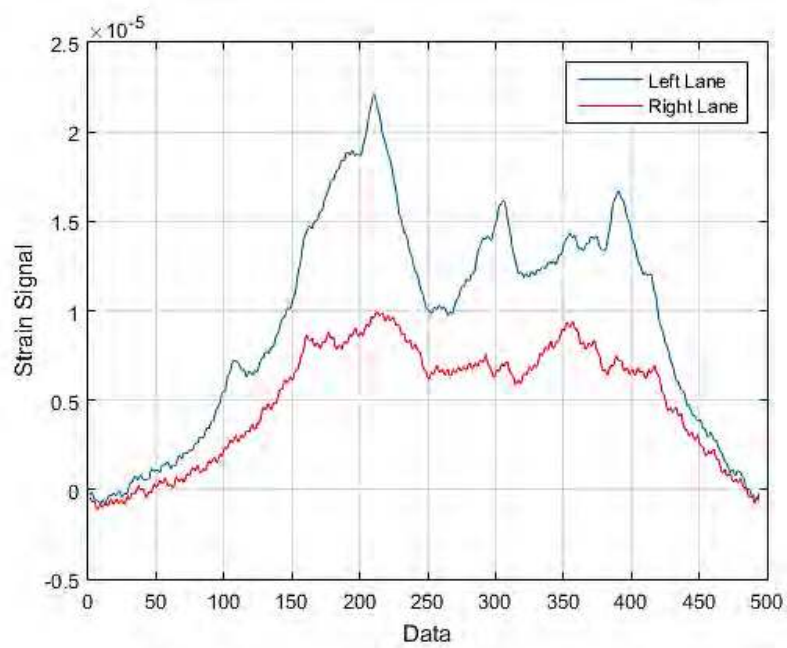
1) ทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อให้มียอดชัดเจนมากยิ่งขึ้น ด้วยการนำผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจากราจรมาหาส่วนต่างดังสมการที่ (2-8) ในแต่ละหน้าต่าง



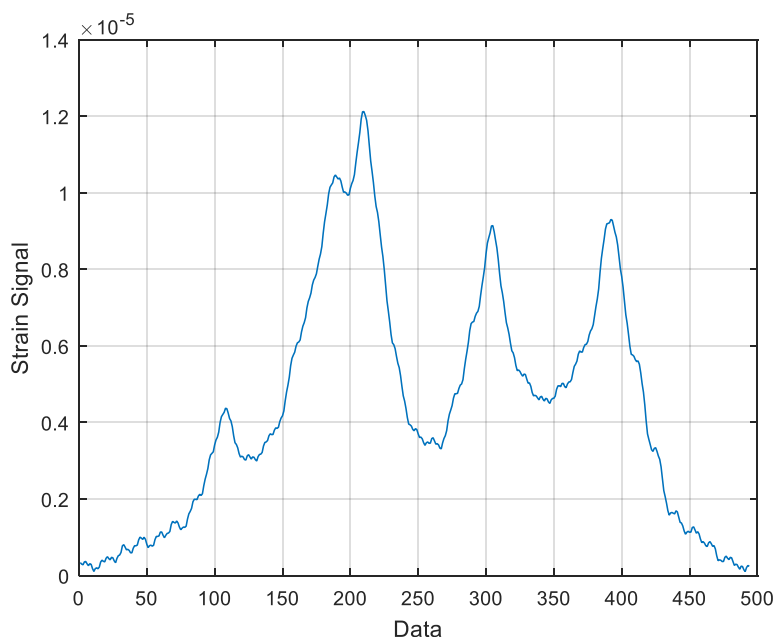
ภาพที่ 3-23 สัญญาณความเครียดในช่องจากราจรฝั่งซ้าย



ภาพที่ 3-24 สัญญาณความเครียดในช่องจราจรฝั่งขวา



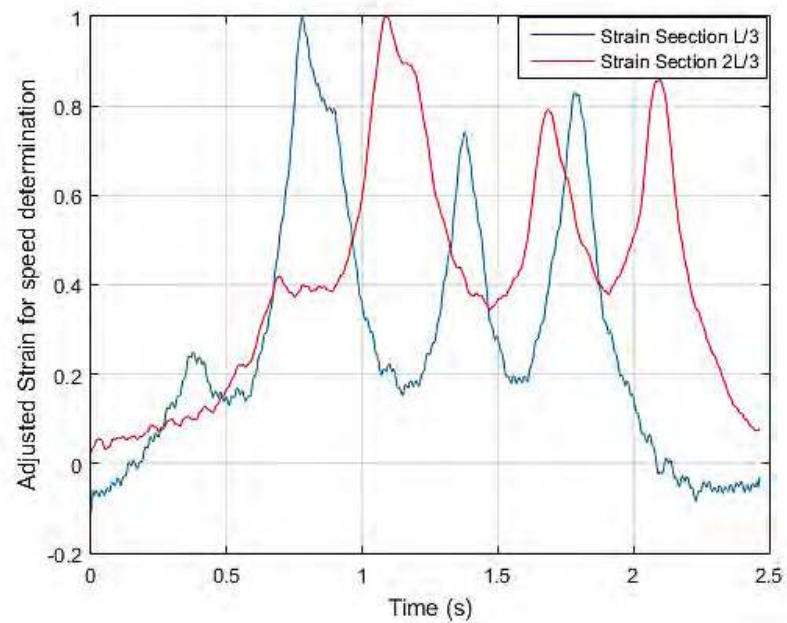
ภาพที่ 3-25 สัญญาณความเครียดของช่องจราจรซ้ายและขวา



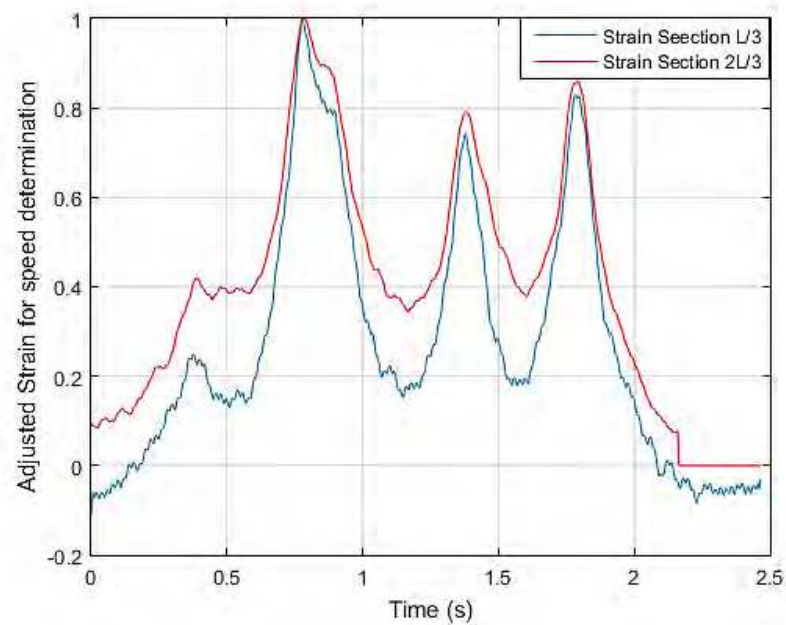
ภาพที่ 3-26 สัญญาณความเครียดที่ทำการปรั้งแล้ว

2) นำสัญญาณที่ได้ไปหาความเร็วจาก Δt การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การคำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ กรณีศึกษาบรรทุกทุกประเภท 5 เพลาขึ้นไป โดยการวัดความเครียดจากหน้าตัด 2 หน้าตัด แล้วบันทึกสัญญาณความเครียดที่ได้ พบว่าความเครียดที่ได้ยังไม่มีค่าชัดเจนมากพอที่จะบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลาคือ จึงต้องทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดก่อน แล้วจึงทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยการนำสัญญาณมาซ้อนทับกัน จะได้ตำแหน่งยอดของสัญญาณนั้นตรงกัน และสามารถไปคำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกได้ ดังแสดงในภาพที่ 3-27 ของกรณี 6 เพลา



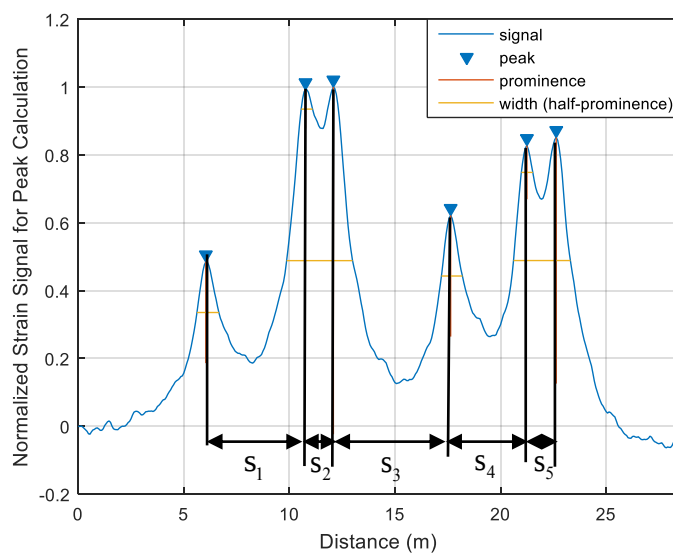
ภาพที่ 3-27 ตัวอย่างผลต่างของสัญญาณความเครียดที่วัดได้ของรถบรรทุก 6 เพลา



ภาพที่ 3-28 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการ
ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

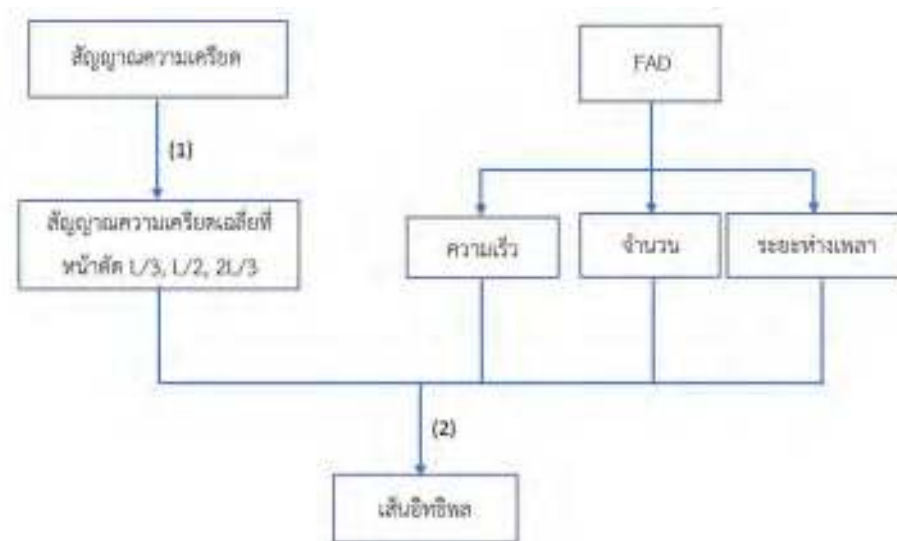
3) ในการหาเพล่าจะใช้สัญญาณความเครียดที่หน้าตัด $L/2$ ที่ปรับปรุงสัญญาณแล้ว

4) ใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจจบบยอดสัญญาณในกราฟรูปของความเครียดกับระยะเพล่า โดยเลือกค่าที่เกิด peak prominence 0.02 เนื่องจากพิจารณาเป็นร้อยละ 1 ของน้ำหนักบรรทุกทุกที่ที่กีดน้ำหนัก 50 ตัน และค่า min peak width พิจารณาเพล่าที่แคบที่สุดประมาณ 1 เมตร ซึ่งจะพิจารณาครึ่งหนึ่งของความกว้างของยอดสัญญาณที่ติดกันมีค่าประมาณ 0.25 หลังจากได้ตำแหน่งเพล่า สามารถไปหาระยะห่างเพล่าได้



ภาพที่ 3-29 ตรวจจบบยอดเพล่าสำหรับหาระยะห่างระหว่างเพล่า

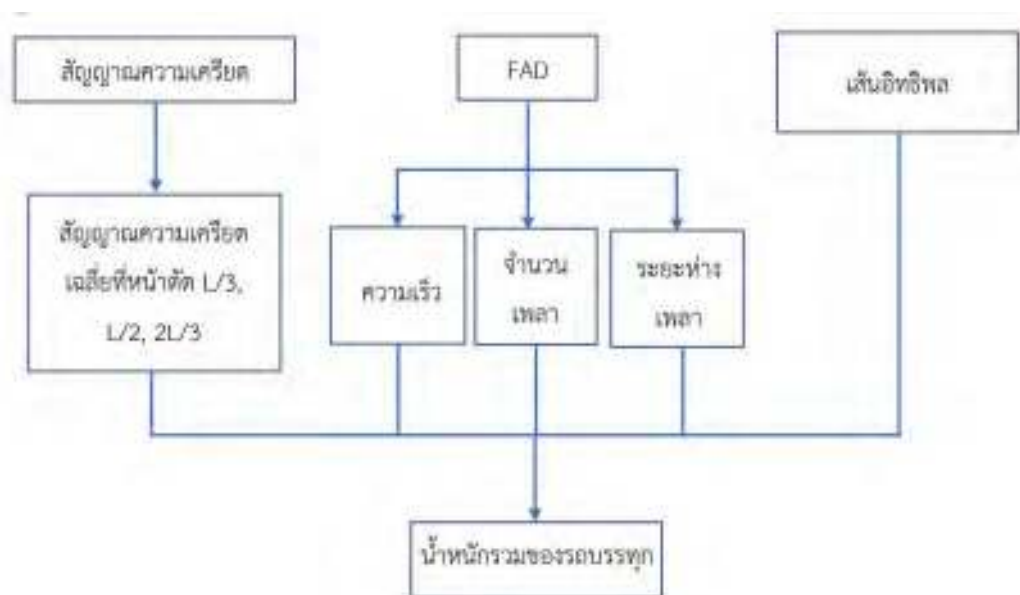
3.4.2 การวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพล



1) นำสัญญาณความเครียดของมาตรวัดทุกตัวในหน้าตัดเดียวกันมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้แต่ละหน้าตัดสามารถพิจารณาค่าความเครียดเพียงเวกเตอร์เดียว

2) ในการเปรียบเทียบจะนำข้อมูลที่ได้จาก 3.4.1 ประกอบไปด้วย จำนวนเพลลา ความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลลา ไปหาเส้นอิทธิพล ตามทฤษฎีของ O'Brien โดยเส้นอิทธิพลที่ดีที่สุดได้มาจากการลองผิดลองถูก เพื่อนำไปหาน้ำหนักรวม

3.4.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุก



จากเส้นอิทธิพลที่ได้จาก 3.4.2 และนำข้อมูลจาก 3.4.1 ประกอบไปด้วยจำนวนเพลลา ความเร็ว และ ระยะห่างระหว่างเพลลา ทั้งหมดมาวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม ดังสมการที่ (2-9)

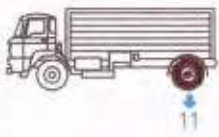
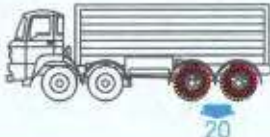
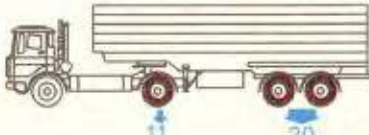
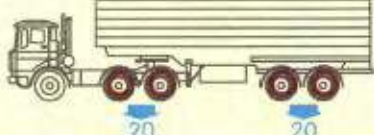
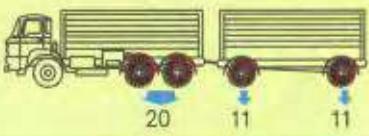
3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์และปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองของสะพานจากสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ โดยพารามิเตอร์และปัจจัยที่ทำการศึกษาในโครงการนี้ได้แก่ ประเภทของรถบรรทุก อัตราเร็วของรถบรรทุก และน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ประเภทรถบรรทุก (truck type)

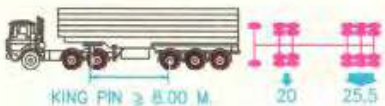
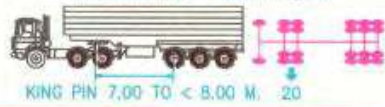
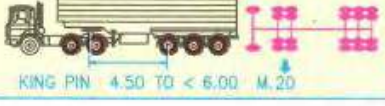
โครงการนี้อ้างอิงประเภทของรถบรรทุกจากข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวงในประเทศไทย โดยมีรถบรรทุกตั้งแต่ 2 เพลลา เป็นต้นไป จนถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา ซึ่งมีรายละเอียดพิคัดน้ำหนักและลักษณะระยะห่างเพลลา ดังตารางที่ 3-3 และ ตารางที่ 3-4 สำหรับประเภทรถบรรทุกที่จะใช้ในการศึกษาจะพิจารณารถบรรทุก 2 เพลลา ถึง 6 เพลลา

ตารางที่ 3-3 ประเภทรถบรรทุกตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวง

ลำดับ	ใบประกาศ	ลักษณะยานพาหนะ Vehicle type	น้ำหนักกรวด (ตัน) Gross Weight (ton)
1	11		2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 4 เส้น (2 เพลา 4 เส้น) 9.50 ตัน
2	12(2)		2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 6 เส้น (2 เพลา 6 เส้น) 15 ตัน
3	15		3 เพลา 6 ล้อ ใช้ยาง 10 เส้น (3 เพลา 10 เส้น) 25 ตัน
4	18		4 เพลา 8 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (4 เพลา 12 เส้น) 30 ตัน
5	12(2) + 19(4)		รถกึ่งพ่วง 2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (4 เพลา 14 เส้น) 35 ตัน
6	15 + 19(4)		รถกึ่งพ่วง 2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (5 เพลา 18 เส้น) 45 ตัน
7	15 + 20(2)		รถพ่วง 2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (5 เพลา 18 เส้น) 47 ตัน

(ที่มา : <http://www.highwayweigh.go.th>)

ตารางที่ 3-4 ข้อบังคับใช้ควบคุมรถบรรทุกตามกฎหมายพระราชบัญญัติทางหลวง

ลำดับ	ในประกาศ	ลักษณะยานพาหนะ Vehicle type	น้ำหนักรถ (ตัน)			
			เริ่มบังคับใช้ 1 ม.ค. 49	เริ่มบังคับใช้ 1 ม.ค. 53	เริ่มบังคับใช้ 1 ม.ค. 56	เริ่มบังคับใช้ 1 ม.ค. 58
1	19/2	 รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ KING PIN ≥ 8.00 M. 20 25.5	50.5	50.5	-	-
2	19/3(1)	 จุดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553 KING PIN 7.00 TO < 8.00 M. 20	50.5	50.5	-	49 ตั้งแต่ 1 ก.ย. 58
3	19/3(2)	 จุดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553 KING PIN 6.00 TO < 7.00 M. 20	50.5	50.5	-	47 ตั้งแต่ 1 ก.ย. 58
4	19/3(3)	 จุดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553 KING PIN 4.50 TO < 6.00 M. 20	50.5	50.5	-	45 ตั้งแต่ 1 ก.ย. 58
5	19/4	 KING PIN ≥ 8.00 M. 20	55.5	50.5	-	-
6	20/1	 ≥ 9.75 M. 20 10 18	53 (ผ่อนผัน)	53 (1 ก.ค. 52)	53 (1 ม.ค. 56 - 30 ธ.ค. 57)	50.5 ตั้งแต่ 1 ก.ค. 57
7	20/2	 ≥ 9.75 M. 20	58 (1 ก.ค. 52 - 31 ธ.ค. 54)	58 (1 ม.ค. 55 - 31 ธ.ค. 55)	58 (1 ม.ค. 56 - 30 ธ.ค. 57)	50.5 ตั้งแต่ 1 ก.ค. 57
8	จากประกาศ (ฉบับที่ 1) 18+20(2)	 ≥ 4.30 M. 20 11 11	52	52	52 (1 ม.ค. 56 - 30 ธ.ค. 57)	50.5 ตั้งแต่ 1 ก.ค. 57
9	20/3	ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (FULL TRAILER) ยกเว้นรถประเภทที่ติดรถบรรทุกจากผู้จำหน่ายรถทางหลวงฯ - ยานพาหนะที่ขนส่งสิ่งของจำนวนหนึ่งหน่วยต่อเนื่อง ซึ่งโดยสภาพของตัวมันไม่สามารถแยกจากกันได้โดยเป็นภาระขนส่งเฉพาะภาค - ยานพาหนะที่ติดตั้ง เครื่องจักร เครื่องชุด - ยานพาหนะที่โดยสภาพมีลักษณะเป็น เครื่องจักร เครื่องชุด	-	53 (1 ก.ค. 52)	50.5	-
หมายเหตุ		- ยานพาหนะชนิดตัวลากจูงและตัวพ่วงหรือตัวกึ่งพ่วง ติดเครื่องยนต์กลองเพลลา กลุ่มเพลลา หรือน้ำหนักรวม ไม่เป็นประกาศผู้จำหน่ายรถทางหลวงฯ				

(ที่มา : <http://www.highwayweigh.go.th>)

2) อัตราเร็วของรถบรรทุก (truck speed)

โครงการนี้ได้ทำการทดสอบรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยความเร็วของรถบรรทุกนั้น จะอยู่ในช่วง 34 – 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) น้ำหนักของรถบรรทุก (truck weight)

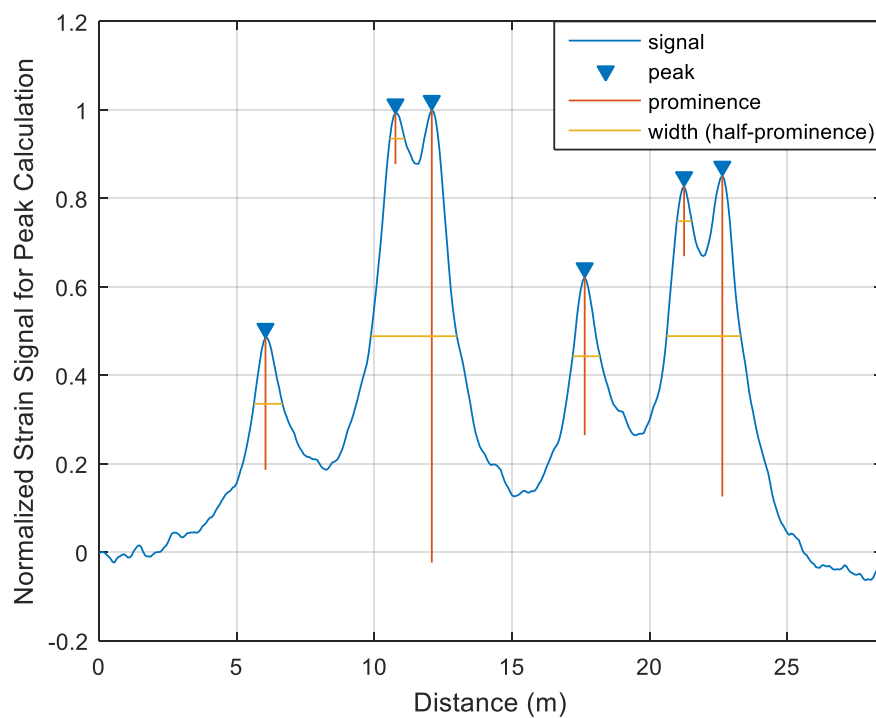
น้ำหนักของรถบรรทุกที่ได้ทำการทดสอบนั้น เป็นรถที่น้ำหนักหลากหลาย แตกต่างกัน เพื่อดู ผลกระทบต่อการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

บทที่ 4

อภิปรายผลการศึกษา

4.1 ผลการตรวจจับเพลลา

ผลการตรวจจับเพลลาด้วยระบบ FAD Sensor พบว่าสามารถตรวจจับเพลลาได้ถูกต้อง แต่มีบางกรณีที่ตรวจจับเพลลาได้เกินหรือขาด แต่ไม่มีผลต่อการคำนวณน้ำหนักบรรทุก โดยข้อมูลการวิเคราะห์หาจำนวนเพลลา ความเร็ว และระยะห่างเพลลาเป็นไปดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ใช้หาเพลลาและระยะห่างเพลลา

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลบรรทุกทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

คัน	จำนวนเพลลา	ความเร็วที่วิเคราะห์ได้ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะห่างเพลลาที่วิเคราะห์ได้ (เมตร)					ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนระยะห่างเพลลา (ร้อยละ)						หมายเหตุ
			S1	S2	S3	S4	S5		S1	S2	S3	S4	S5	ΣS	
1	5	40.000	4.278	1.167	5.056	4.667		-3.996	-3.079	10.256	-8.722	-7.280		-4.960	
2	5	47.059	3.922	0.980	8.170	1.046		-7.344	4.118	26.286	-68.800	75.859		3.238	
3	5	39.344	4.426	1.148	5.191	4.754		-6.598	-10.105	13.719	-5.728	-7.803		-5.788	
4	5	44.446	4.753	0.926	5.185	4.444		-8.192	-13.169	30.382	-10.089	-1.010		-4.567	
5 _z	5	42.106	4.444	1.345	4.620	4.737		-7.107	-9.469	-3.463	-8.194	-8.893		-8.342	
6	5	47.059	3.464	1.307	9.477	1.372		-9.405	-19.450	-3.745	-20.882	-13.434		-18.251	
7*	5	40.000	6.222	12.667	1.000	N/A		-8.374	N/A	N/A	N/A	N/A		17.755	ไม่เจอเพลลาที่ 2
8 _z	5	48.978	3.810	1.360	8.707	1.088		-12.664	-12.375	-0.781	-12.645	16.274		-8.685	
9 _z *	5	58.536	3.577	5.691	5.122	1.301		-10.457	-0.203	-331.141	42.255	9.666		-3.230	เพลลาที่ 2 ผิดตำแหน่ง
10	6	38.095	3.757	1.323	7.831	1.481	1.270	-11.711	-10.489	-1.750	-11.074	-13.960	2.320	-9.139	
11	6	53.334	3.852	1.333	8.148	1.185	1.704	-12.315	-16.723	-2.564	-13.960	12.208	-26.200	-12.264	
12 _z	6	50.000	4.722	1.319	5.556	3.611	1.389	-10.974	-24.597	-9.044	-27.129	-24.521	-14.784	-23.125	
13 _z	6	57.143	4.682	1.270	5.794	4.286	1.349	-11.033	-16.481	0.012	-13.379	-13.379	-2.213	-12.136	
14 _z	6	43.636	4.545	1.333	5.515	4.061	1.152	-8.733	-21.536	-10.193	-20.418	-26.499	4.833	-19.040	
15	6	45.284	4.528	1.195	4.968	4.025	1.258	-7.941	-21.078	1.242	-18.018	-19.441	0.170	-15.844	

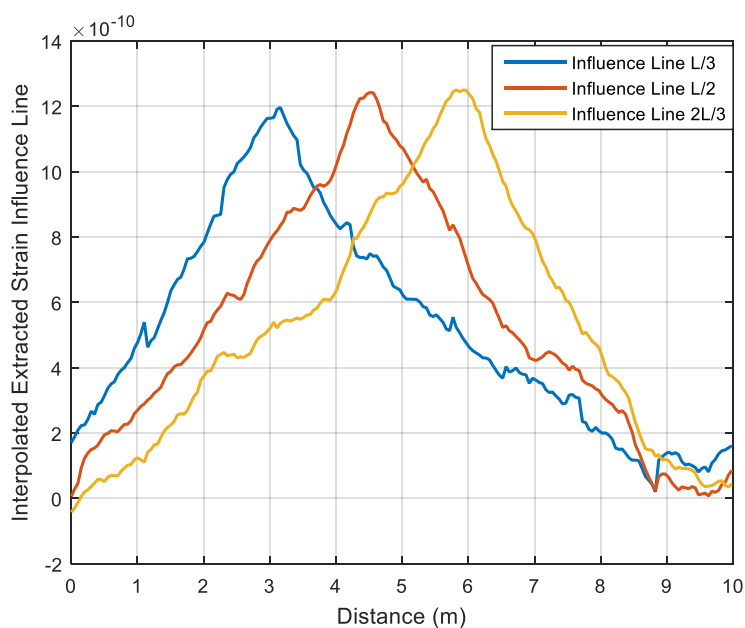
ตารางที่ 4-1 ข้อมูลบรรทุกทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (ต่อ)

คัน	จำนวนเพลลา	ความเร็วที่วิเคราะห์ได้ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะห่างเพลลาที่วิเคราะห์ได้ (เมตร)					ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนระยะห่างเพลลา (ร้อยละ)						หมายเหตุ
			S1	S2	S3	S4	S5		S1	S2	S3	S4	S5	ΣS	
16*	6	46.195	3.475	1.276	8.227	1.560	N/A	-10.540	-8.261	3.288	-30.173	15.202	N/A	-14.570	ไม่เจอเพลลาที่ 6
17	6	40.000	0.778	2.944	1.333	4.889	4.667	-4.050	51.989	-2.594	4.077	-6.280	-1.670	3.045	
18	6	43.636	3.879	1.212	8.364	1.091	1.515	-11.002	-22.746	3.780	-29.268	9.842	-25.219	-20.666	
19 _z	6	43.636	3.879	1.091	8.303	1.697	1.212	-13.450	-14.418	18.589	-14.841	-21.212	13.420	-9.633	
20	6	54.547	3.561	1.288	8.106	1.288	1.515	-10.464	-6.605	0.932	-14.170	5.303	-6.701	-8.523	
21 _z *	6	43.636	5.394	4.424	3.818	1.333	N/A	-3.896	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-10.723	ไม่เจอเพลลาที่ 2
22	6	51.062	4.752	0.993	4.964	3.972	1.206	-9.003	-18.794	24.780	-12.066	-12.830	12.632	-8.440	
23 _z	6	45.317	2.138	3.522	1.195	5.472	4.780	-2.860	-22.894	-11.456	5.161	-11.667	-12.204	-11.664	
24 _z	6	50.054	4.419	1.085	8.527	1.240	1.240	-11.505	-29.199	17.782	-31.795	-6.923	-6.923	-22.037	
25 _z	6	45.284	4.717	1.195	5.031	3.585	1.447	-10.357	-15.612	5.908	-14.351	-10.645	-14.805	-12.104	
26	6	42.105	4.854	0.702	5.380	4.035	1.345	-6.070	-24.776	44.305	-17.470	-10.248	-1.130	-10.841	
27 _z *	6	47.059	3.725	1.242	8.104	1.503	N/A	-11.852	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-1.640	ไม่เจอเพลลาที่ 6
28*	6	51.064	3.475	10.993	N/A	N/A	N/A	-11.868	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2.506	เจอ 3 เพลลา
29 _z	6	39.344	3.716	1.311	8.251	1.475	1.311	-13.004	-8.650	0.646	-14.285	-6.914	2.129	-9.439	
30*	6	40.000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-8.265	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-45.156	เพลลามากผิดปกติ

หมายเหตุ (*) หมายถึงวิเคราะห์หาเพลลาไม่ได้ไม่ครบ, (z) หมายถึงในการหาจำนวนเพลลา ได้ทำการใช้สัญญาณความถี่ 15 และ 11 ในการวิเคราะห์ (Z15-Z11)

4.2 ผลการวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพล

จากข้อมูลรถที่ใช้ในการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 คัน ทำให้ได้เส้นอิทธิพลทั้งหมด 6 เส้น ทำการลองผิดลองถูกด้วยเส้นอิทธิพลทั้งหมด เพื่อหาเส้นอิทธิพลที่ทำให้การวิเคราะห์หาน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ได้เส้นอิทธิพลดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 เส้นอิทธิพลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุก

4.3 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม

การวิเคราะห์การหาน้ำหนักรวมจากเส้นอิทธิพล กรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 5 ถึง 6 เพลา พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนโดยส่วนมากของการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมเมื่อเทียบกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกพบว่า น้ำหนักรถบรรทุกไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม ดังภาพที่ 4-3 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวมกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่มีความเร็วระหว่าง 34-54 กิโลเมตรต่อชั่วโมงนั้น ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม ดังภาพที่ 4-4 โดยค่าความคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวมที่มีค่ามากกว่า ร้อยละ ± 20 นั้น เกิดขึ้นจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับน้ำหนักรวมและความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก

เมื่อตัดผลจากค่าที่มีปัจจัยที่ไม่เหมาะสมออก ได้แก่ กรณีที่ 7 และ 24 เกิดความผิดพลาดจากผู้ทดสอบ ทำให้การทดสอบนี้มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 4.976 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 25.415 ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดร้อยละ 0.160 วิเคราะห์ได้มากกว่าน้ำหนักจริงของรถบรรทุก 20 คัน และน้อยกว่าน้ำหนักจริงของรถบรรทุก 8 คัน มีรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินพิกัดน้ำหนัก 9 คัน ดังตารางที่ 4-2

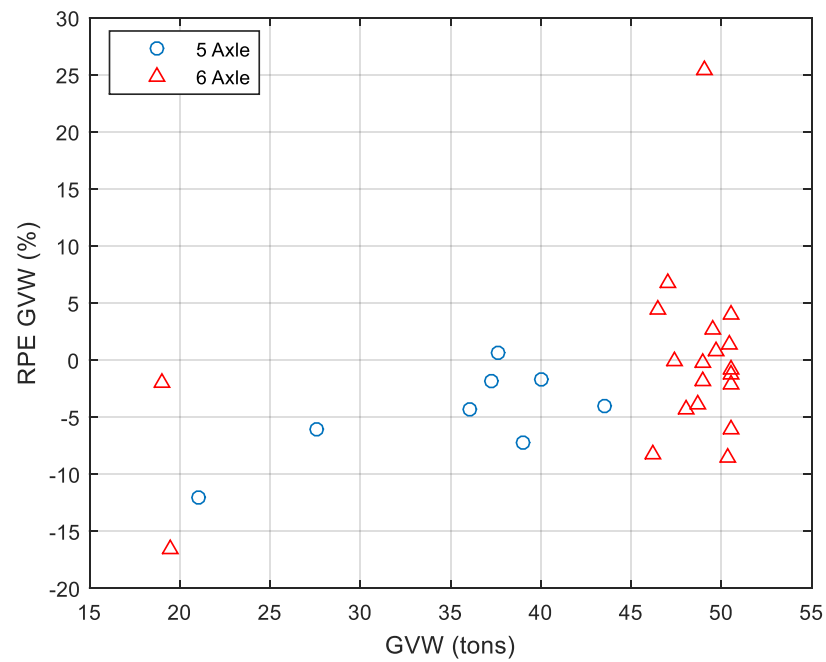
ตารางที่ 4-2 ข้อมูลน้ำหนักรวม น้ำหนักรวมที่วิเคราะห์ และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม

คัน	จำนวน เพล	น้ำหนักรวมของ รถบรรทุก (กิโลกรัม)	น้ำหนักรวมรถบรรทุกที่ วิเคราะห์ได้ (กิโลกรัม)	ความคลาด เคลื่อนน้ำหนัก รวม (ร้อยละ)	ค่าสัมบูรณ์ความ คลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	พิกัดน้ำหนัก บรรทุก (กิโลกรัม)	หมายเหตุ
1	5	39,050.000	41,880.975	-7.250	7.250	47,000.000	
2	5	27,620.000	29,282.395	-6.019	6.019	45,000.000	
3	5	37,300.000	38,014.278	-1.915	1.915	47,000.000	
4	5	37,600.000	37,377.946	0.590	0.590	47,000.000	
5	5	43,500.000	45,237.256	-3.994	3.994	47,000.000	
6	5	40,000.000	40,684.084	-1.710	1.710	45,000.000	
7 _B	5	19,090.000	29,647.877	-55.306	55.306	45,000.000	*อาจเกิดจากการบันทึกค่าน้ำหนักผิดพลาด
8	5	36,100.000	37,642.614	-4.273	4.273	45,000.000	
9	5	21,000.000	23,544.318	-12.116	12.116	45,000.000	
10	6	46,200.000	50,024.761	-8.279	8.279	47,000.000	
11	6	19,500.000	22,743.824	-16.635	16.635	49,000.000	
12	6	50,500.000	51,143.765	-1.275	1.275	50,500.000	
13	6	50,320.000	54,610.754	-8.527	8.527	50,500.000	
14	6	50,500.000	50,892.302	-0.777	0.777	50,500.000	
15	6	50,500.000	51,586.355	-2.151	2.151	50,500.000	
16	6	47,000.000	43,818.448	6.769	6.769	47,000.000	

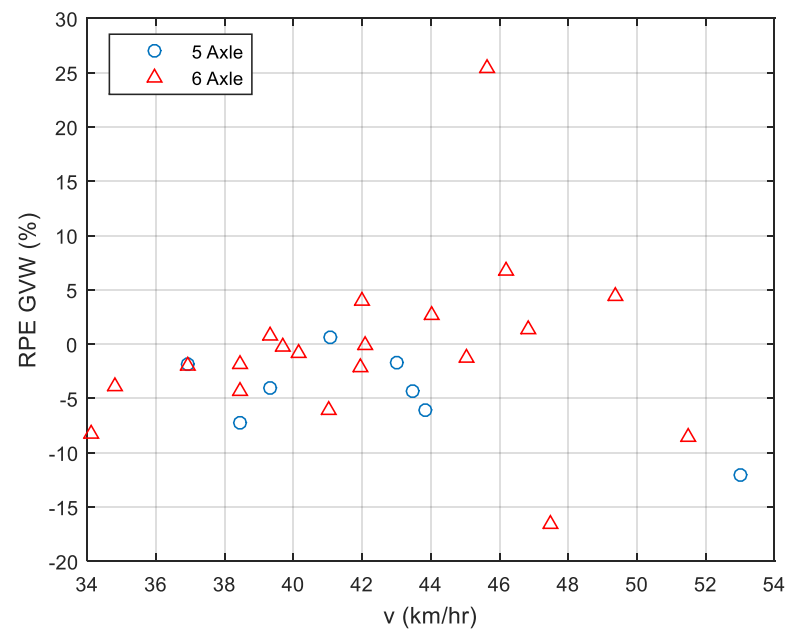
ตารางที่ 4-2 ข้อมูลน้ำหนักรวม น้ำหนักรวมที่วิเคราะห์ และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม

คัน	จำนวน เพล	น้ำหนักรวมของ รถบรรทุก (กิโลกรัม)	น้ำหนักรวมรถบรรทุกที่ วิเคราะห์ได้ (กิโลกรัม)	ความคลาด เคลื่อนน้ำหนัก รวม (ร้อยละ)	ค่าสัมบูรณ์ความ คลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	พิกัดน้ำหนัก บรรทุก (กิโลกรัม)	หมายเหตุ
17	6	48,000.000	50,057.447	-4.286	4.286	50,500.000	
18	6	49,700.000	49,351.509	0.701	0.701	47,000.000	
19	6	49,000.000	49,905.335	-1.847	1.847	49,000.000	
20	6	46,520.000	44,438.389	4.474	4.474	49,000.000	
21	6	50,500.000	48,521.212	3.918	3.918	50,500.000	
22	6	50,450.000	49,764.403	1.359	1.359	50,500.000	
23	6	49,500.000	48,166.762	2.693	2.693	50,500.000	
24 _B	6	50,500.000	20,562.269	59.283	59.283	47,000.000	*อาจเกิดจากการบันทึกค่าน้ำหนักผิดพลาด
25	6	50,500.000	53,581.372	-6.102	6.102	50,500.000	
26	6	49,000.000	49,095.865	-0.196	0.196	50,500.000	
27	6	47,380.000	47,455.615	-0.160	0.160	49,000.000	
28	6	49,100.000	36,621.406	25.415	25.415	49,000.000	
29	6	48,700.000	50,614.904	-3.932	3.932	49,000.000	
30	6	19,000.000	19,982.561	-1.952	1.952	50,500.000	

หมายเหตุ (B) หมายถึงข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกที่บันทึกมาอาจเกิดความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูลภาคสนาม



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกกับ น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก

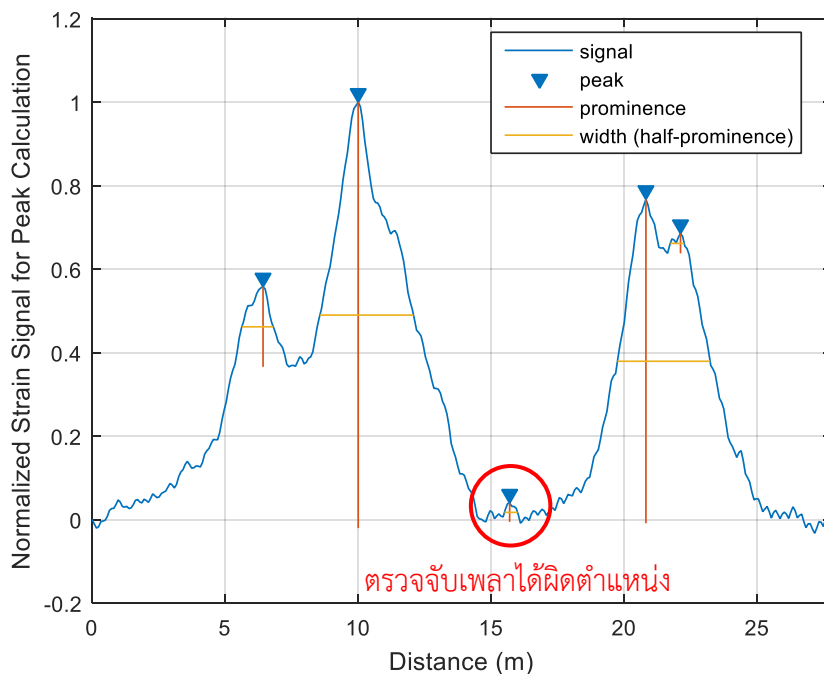


ภาพที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกกับ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก

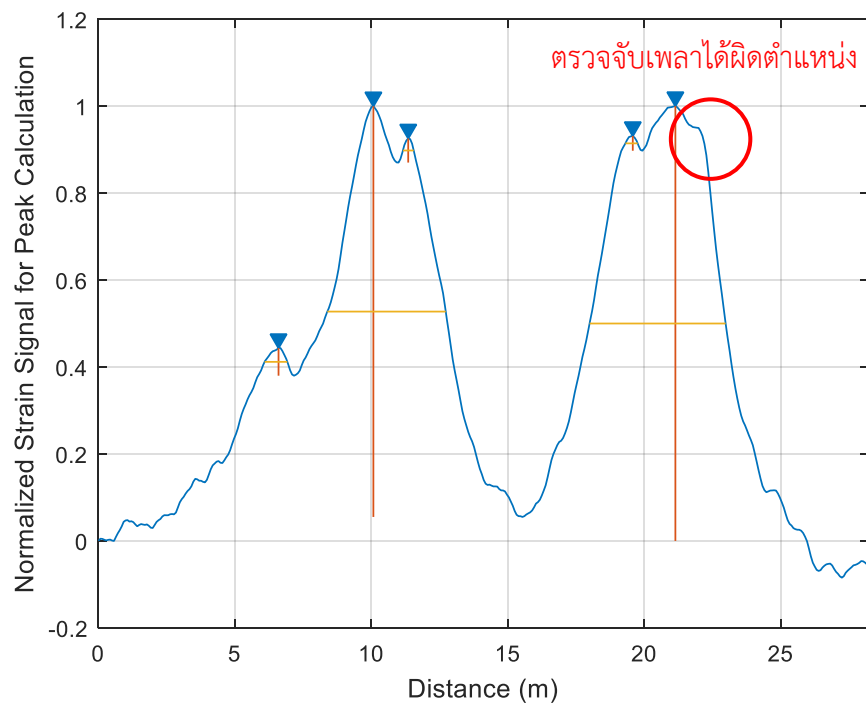
4.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้การวิเคราะห์น้ำหนักรวมมีความคลาดเคลื่อนสูง

4.4.1 ผลจากการตรวจจับเพลลาผิดพลาด

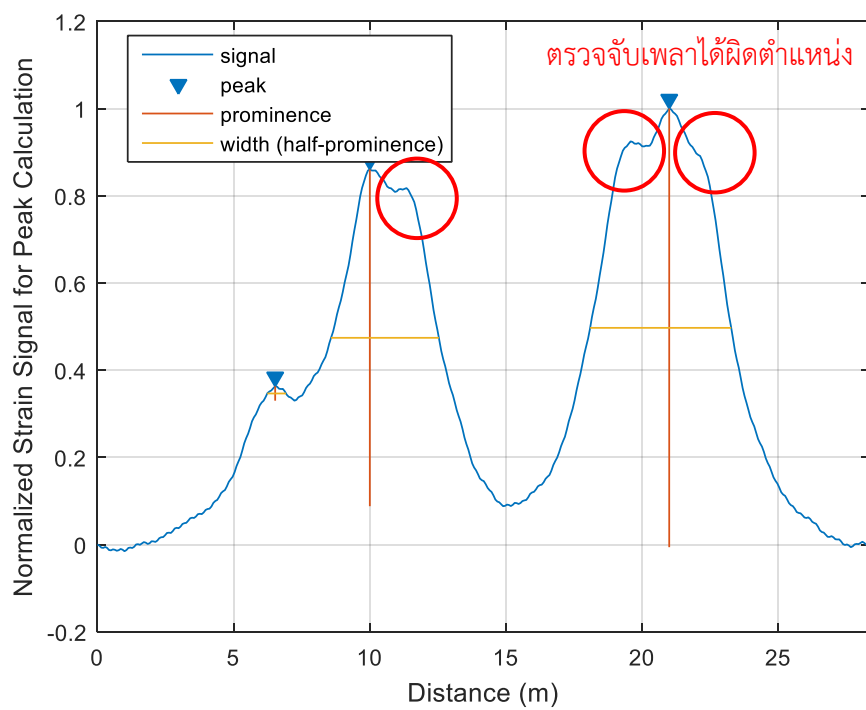
การวิเคราะห์การหาเพลลาและระยะห่างเพลลาจากระบบตรวจจับเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจวัด ตรวจจับเพลลาได้ผิดพลาดตำแหน่งหรือจำนวนเพลลาขาดไป ดังภาพที่ 4-5 ซึ่งเป็นสัญญาณความเครียดของรถกรณีที่ 9 ซึ่งเป็นรถ 5 เพลลา แต่ตรวจจับเพลลาที่ 2 ได้ที่ตำแหน่งอื่น และเมื่อนำข้อมูลความเร็วและระยะห่างเพลลาวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมพบว่า ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเป็นร้อยละ 12.116 และในกรณีที่ 16 ซึ่งเป็นรถ 6 เพลลา แต่ในการวิเคราะห์การหาเพลลาและระยะห่างเพลลาจากระบบตรวจจับเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจวัด ตรวจจับเพลลาได้เพียง 5 เพลลา ดังภาพที่ 4-6 แต่ได้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเป็นร้อยละ 6.769 จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่า เมื่อตรวจจับเพลลาและหาระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกทุกชนิดไป 1 เพลลาหรือเกินมา 1 เพลลา ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม แต่เมื่อระบบ FAD ตรวจจับเพลลาได้ขาดมากเกินไป ดังภาพที่ 4-7 ซึ่งเป็นรถ 6 เพลลา แต่วิเคราะห์ได้เพียง 3 เพลลาจะทำให้การวิเคราะห์หาน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 25.415 ทำให้เห็นว่าหากระบบ FAD ตรวจจับข้อมูลได้ผิดปกติ ทำให้การวิเคราะห์หาน้ำหนักมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4-5 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 5 เพลลา (กรณีที่ 9)



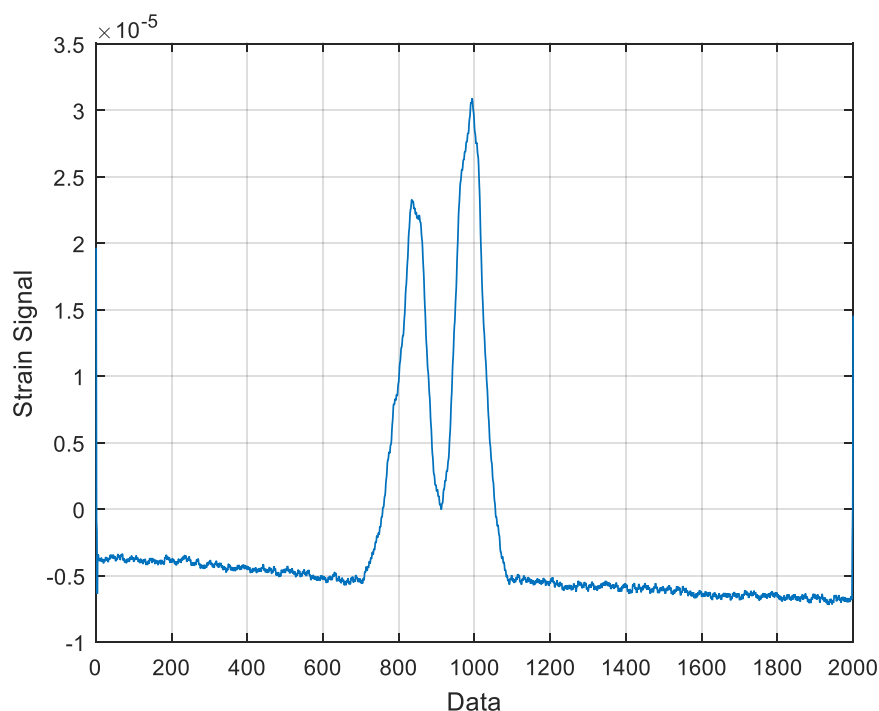
ภาพที่ 4-6 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลลา (กรณีที่ 16)



ภาพที่ 4-7 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลลา (กรณีที่ 28)

4.4.2 ความสมบูรณ์ของสัญญาณ

สิ่งที่ทำให้การวิเคราะห์น้ำหนักรวมมีความคลาดเคลื่อนเกิดจากผลกระทบเนื่องจากความไม่เสถียรของอุปกรณ์รวมสัญญาณ ซึ่งอาจเกิดได้จากอุณหภูมิ หรือความไวในการตรวจวัดของอุปกรณ์ ทำให้สัญญาณความเครียดเบี่ยงเบนไปจากแนวปกติ ดังภาพที่ 4-8 เป็นกรณีที่ 28 ซึ่งเป็นรถ 6 เพลา จากที่สัญญาณความเครียดเหวี่ยงจึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 25.415



ภาพที่ 4-8 ตัวอย่างสัญญาณที่เหวี่ยงของรถกรณีที่ 28

4.4.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบภาคสนาม

- 1) ความผิดพลาดจากผู้ทดสอบในการบันทึกข้อมูล
- 2) ความผิดพลาดจากการสื่อสารระหว่างผู้ทดสอบที่ด้านชั่งน้ำหนัก และที่สะพาน
- 3) เนื่องจากการบันทึกสัญญาณความเครียดเป็นการบันทึกแบบคั่นต่อคั่น อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

- 1) จากการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกโดยใช้เส้นอิทธิพล มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 4.976 ซึ่งมีระดับความถูกต้องอยู่ใน class A และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดและต่ำสุด ดังตารางที่ 5-1
- 2) จากการทดสอบจำนวน 30 คันมีรถบรรทุกที่วิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกเกินพิกัดน้ำหนักทั้งหมด 9 คัน ดังตารางที่ 5-1
- 3) จากการทดสอบพบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านสะพานในช่วง 34 – 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และน้ำหนักของรถบรรทุกไม่มีผลต่อการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5-1 สรุปผลการศึกษา

รายการ	5 เพลา	6 เพลา	รวม
จำนวนรถบรรทุก (คัน)	9	21	30
ความเร็วสูงสุด (กม./ชม.)	58.536	57.143	58.536
ความเร็วต่ำสุด (กม./ชม.)	39.344	38.095	38.095
ร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงสุดของน้ำหนักรวม (ร้อยละ)	12.116	25.415	25.415
ร้อยละความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของน้ำหนักรวม (ร้อยละ)	0.590	0.160	0.160
น้ำหนักรถเกินพิกัดบรรทุก (คัน)	-	9	9
น้ำหนักรถเกินพิกัดบรรทุก (ร้อยละ)	0	42.857	30.000

5.2 ข้อเสนอแนะ

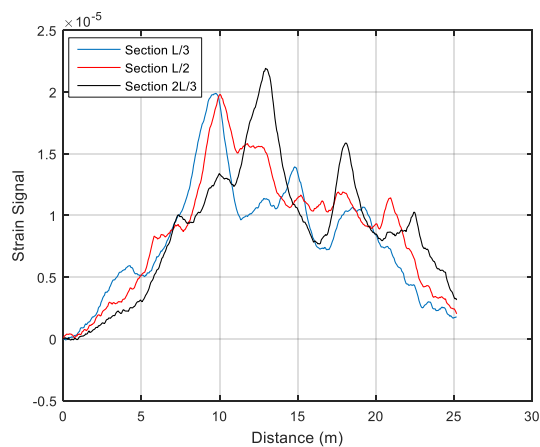
- 1) ควรมีกรณีศึกษาเพิ่มมากขึ้นเพื่อวิเคราะห์ผล และปัจจัยอื่นๆ ได้มากยิ่งขึ้น
- 2) น้ำหนักรวมที่ใช้ในการเปรียบเทียบควรเป็นน้ำหนักที่ได้จากการจอดชั่ง
- 3) เนื่องจากสัญญาณความเครียดที่ใช้ในการหาน้ำหนักรวมนั้นใช้เพียงแค่น้ำตดที่อยู่กึ่งกลางสะพาน จึงสามารถลดจำนวนของมาตรวัดความเครียดในหน้าตดอื่นๆ ได้
- 4) หากใช้สะพานต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล ควรติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในสะพานช่วงแรก เพื่อลดผลทางพลศาสตร์และผลการโก่งตัวของสะพานต่อเนื่อง
- 5) ควรศึกษาผลจากการที่รถเคลื่อนที่ในกรณีความเร็วไม่คงที่
- 6) ควรศึกษาในกรณีที่มีรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่บนสะพาน

บรรณานุกรม

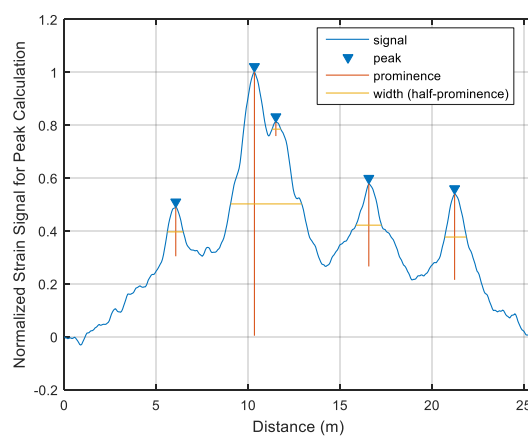
- นิคมเดช วีระฉันทชาติ. (2545) การหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของยานพาหนะบนสะพานจากสัญญาณความเครียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศุภชัย เชื้อเกตุ และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา. (2558). การหาความเร็วและระยะช่วงเพลลาของยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน, ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, (หน้า 1-8). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- Chan T.H.T., Law S.S., and Yung T.H. (2000). Moving Force Identification Using an Existing Prestressed Concrete Bridge. *Engineering Structures*. 22, 1261-1270.
- European Commission 4th Framework Programme Transport. (2001). Weighing-in-motion of Axle and Vehicle for Europe (WAVE) – Bridge WIM system (B-WIM), University College Dublin.
- Jacob B., O'Brien E. J., and Jehaes S. (Eds.) (2002). COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicles final report, LCPC Publications, Paris, 538 pp.
- Liljencrantz A., Karoumi R. and Olofsson P. (2007). Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic, *Journal of Computers and Structures*. 85, 80-88.
- Moses F. (1979). Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 105, TE3, pp. 233-249.
- O'Brien E. J., Quilligan M. and Karoumi R. (2006). Calculating an Influence Line from Direct Measurements. *Bridge Engineering*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 159 (BE1), 31-34
- Pinkaew T. (2006). Identification of Vehicle axle loads from bridge responses using update static component technique. *Journal of Engineering Structures*. 28(11), 1599-1609
- Zhao H. and Uddin N. (2010). Influence Line Calculation of Existing Bridges in BWIM System. 35th Annual Symposium of IABSE
- Zhao H. and Uddin N. (2011). Innovative Bridge Weigh-in-motion System for Enforcement Application. 35th Annual Symposium of IABSE

ภาคผนวก

ผ.1 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 1



ภาพที่ ผ.1-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 1



ภาพที่ ผ.1-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 1

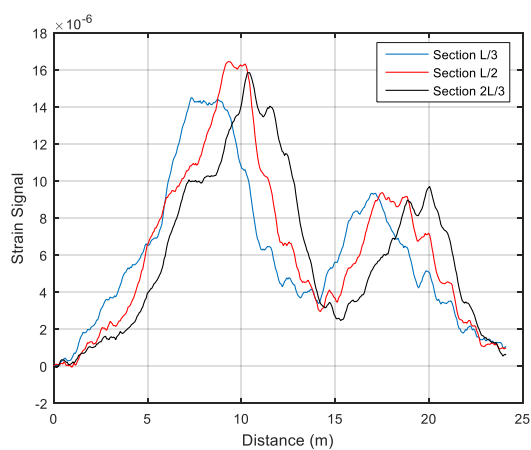
ตารางที่ ผ.1 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 1

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
1	5	38.462	39,050	4.150	1.300	4.650	4.350	

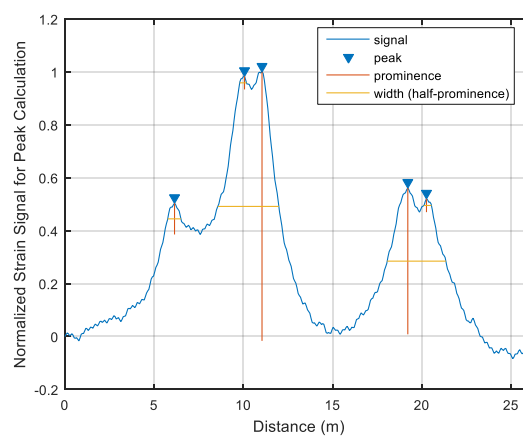
ผ.2 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 2



ภาพที่ ผ.2-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 2



ภาพที่ ผ.2-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 2



ภาพที่ ผ.2-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD
ของรถคันที่ 2

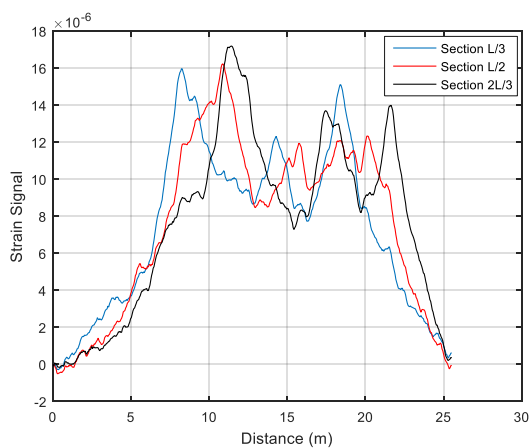
ตารางที่ ผ.2 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 2

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
2	5	43.841	27,620	4.090	1.330	4.840	4.330	

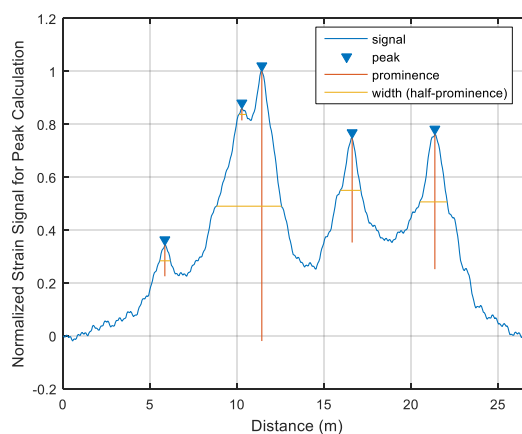
ผ.3 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 3



ภาพที่ ผ.3-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 3



ภาพที่ ผ.3-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 3

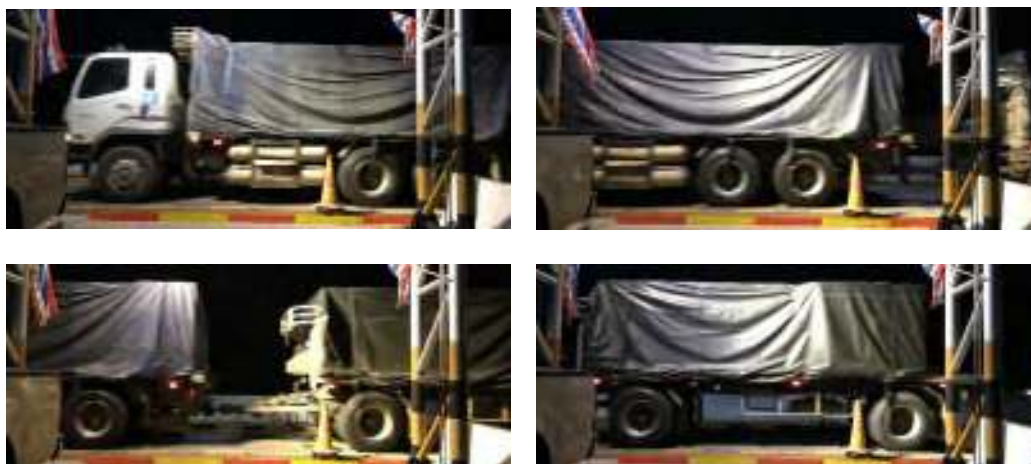


ภาพที่ ผ.3-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 3

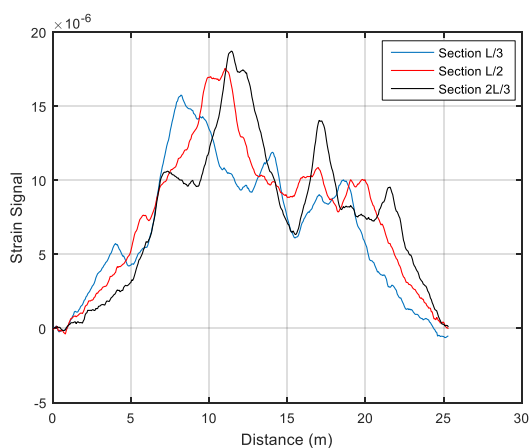
ตารางที่ ผ.3 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 3

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
3	5	36.907	37,300	4.020	1.330	4.910	4.410	

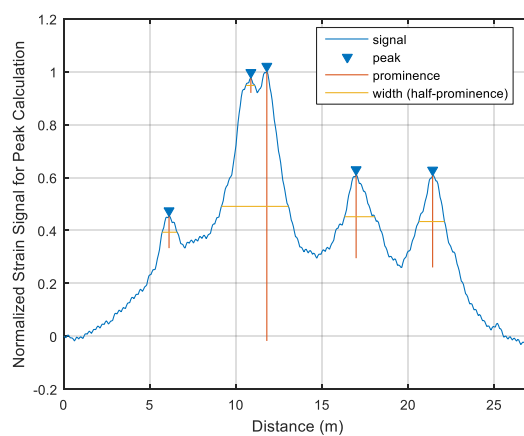
ผ.4 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 4



ภาพที่ ผ.4-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 4



ภาพที่ ผ.4-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 4



ภาพที่ ผ.4-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 4

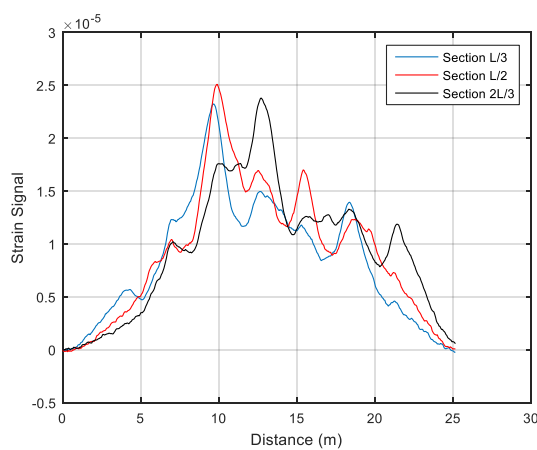
ตารางที่ ผ.4 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 4

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
4	5	41.080	37,600	4.200	1.330	4.710	4.400	

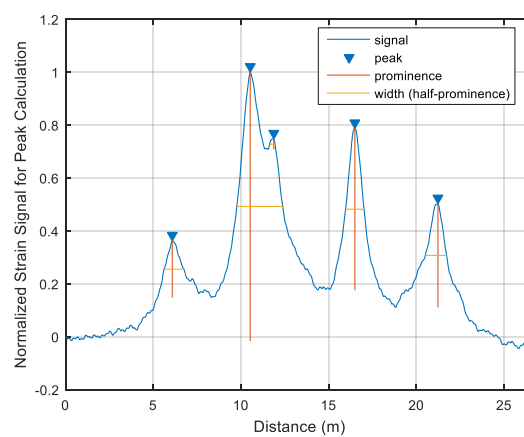
ผ.5 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเวลาของรถคันที่ 5



ภาพที่ ผ.5-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 5



ภาพที่ ผ.5-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 5



ภาพที่ ผ.5-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD
ของรถคันที่ 5

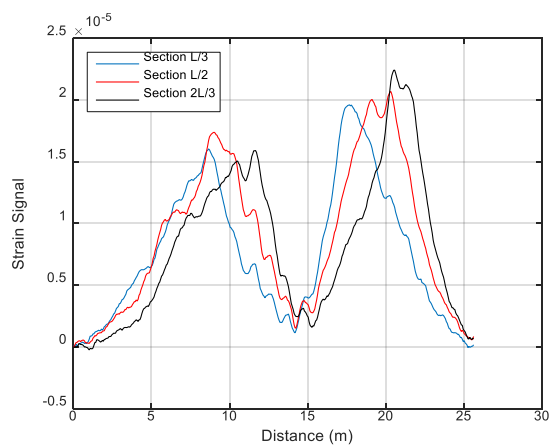
ตารางที่ ผ.5 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 5

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
5	5	39.312	43,500	4.060	1.300	4.270	4.350	

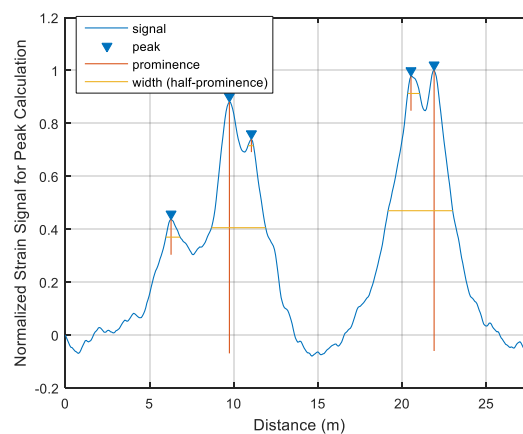
ผ.6 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 6



ภาพที่ ผ.6-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 6



ภาพที่ ผ.6-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 6



ภาพที่ ผ.6-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 6

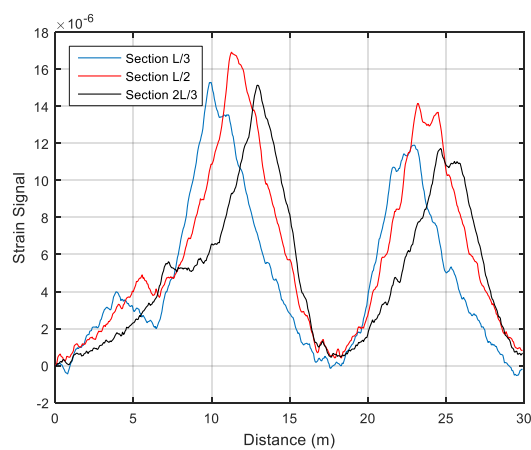
ตารางที่ ผ.6 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 6

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
6	5	43.031	40,000	2.900	1.260	7.840	1.210	

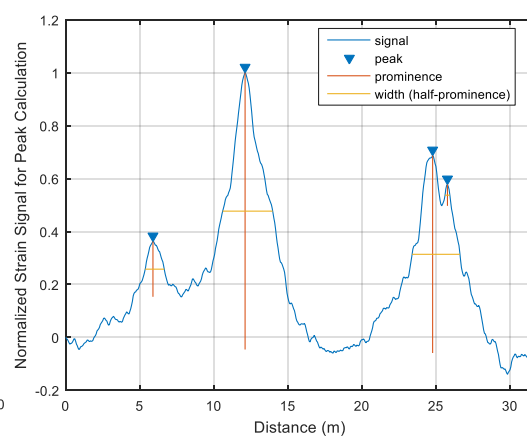
ผ.7 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 7



ภาพที่ ผ.7-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 7



ภาพที่ ผ.7-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 7



ภาพที่ ผ.7-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 7

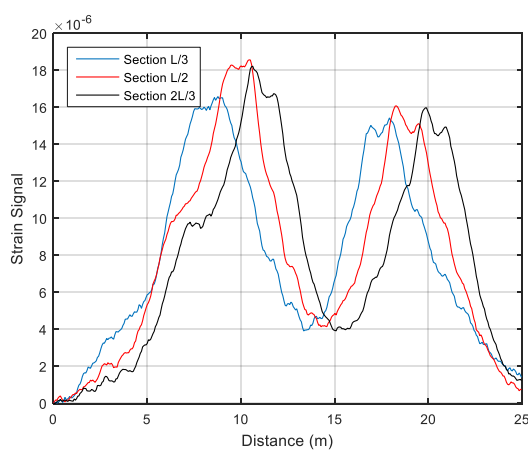
ตารางที่ ผ.7 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 7

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
7	5	36.907	19,090	5.260	1.160	9.260	1.210	

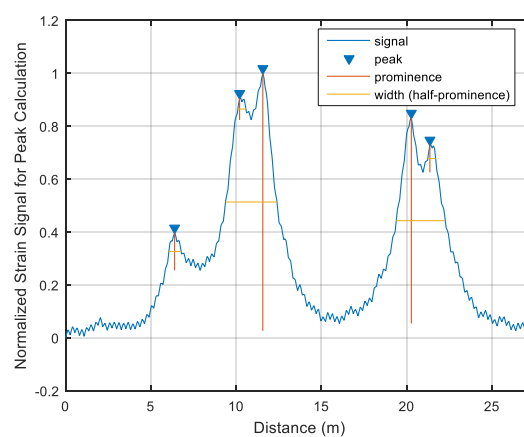
ผ.8 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 8



ภาพที่ ผ.8-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 8



ภาพที่ ผ.8-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 8



ภาพที่ ผ.8-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 8

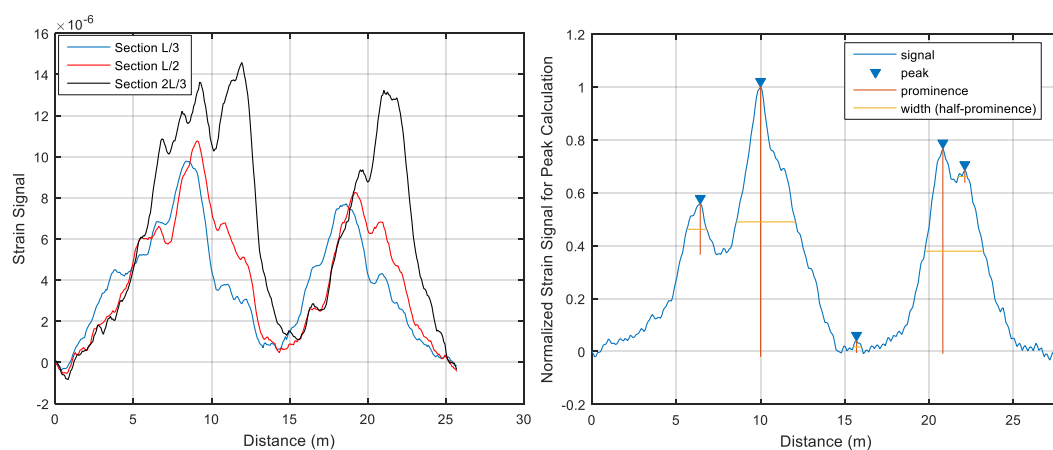
ตารางที่ ผ.8 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 8

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
8	5	43.474	36,100	3.390	1.350	7.730	1.300	

ผ.9 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 9



ภาพที่ ผ.9-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 9



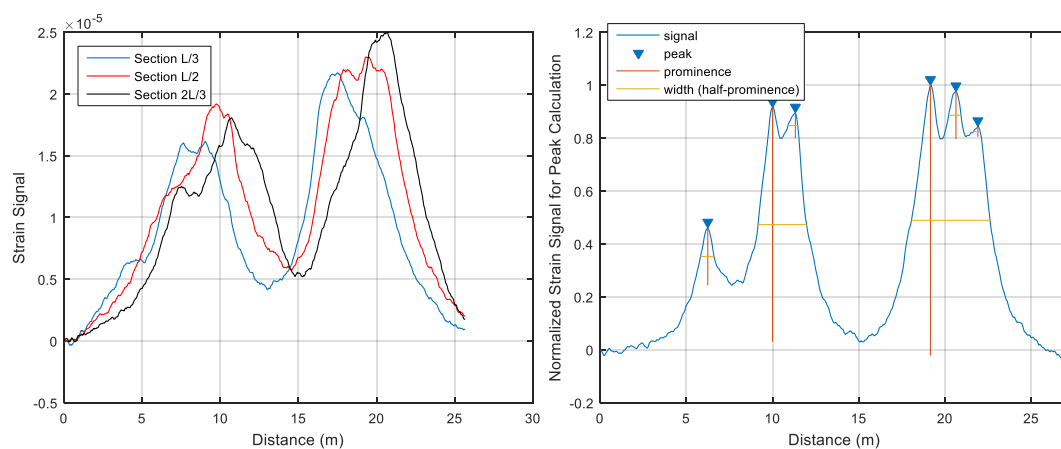
ภาพที่ ผ.9-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 9

ภาพที่ ผ.9-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 9

ตารางที่ ผ.9 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 9

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
9	5	52.996	21,000	3.570	1.320	8.870	1.440	

ผ.10 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 10



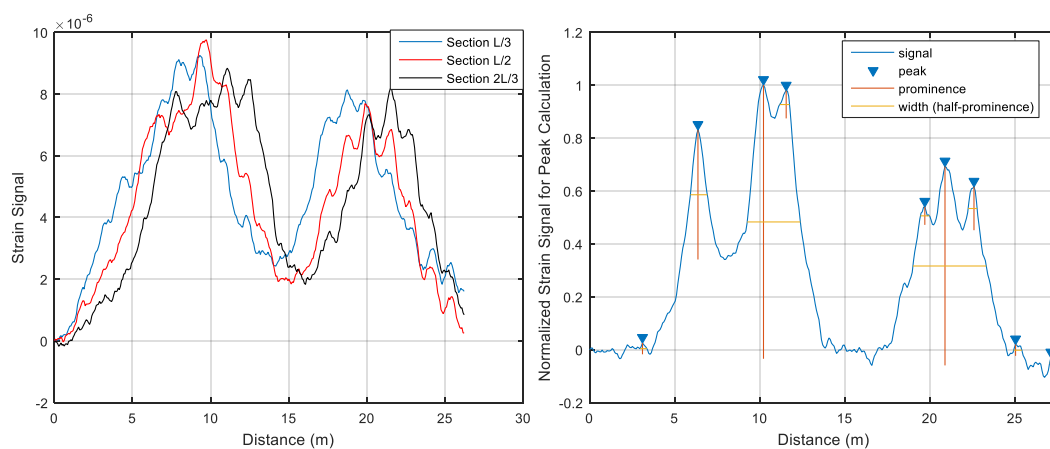
ภาพที่ ผ.10-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 10 ภาพที่ ผ.10-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 10

ตารางที่ ผ.10 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 10

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
10	6	34.103	46,200	3.400	1.300	7.050	1.300	1.300

ผ.11 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 11



ภาพที่ ผ.11-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 11 ภาพที่ ผ.11-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 11

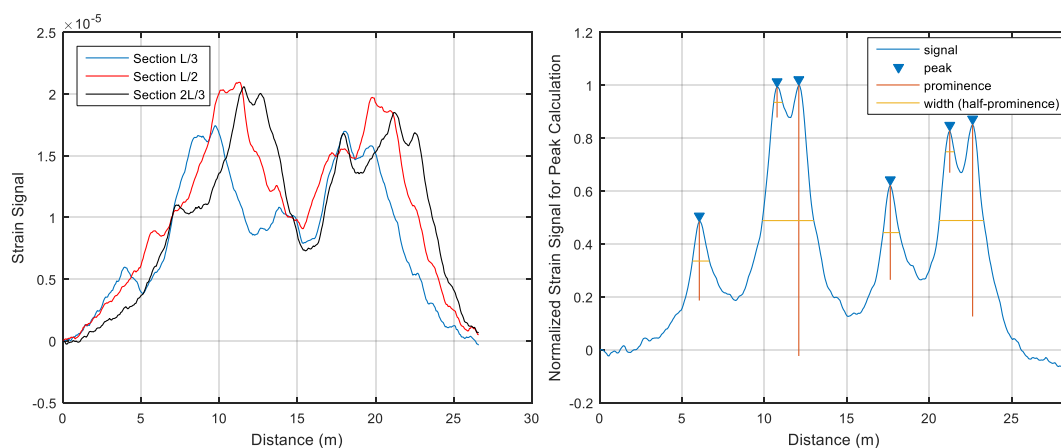
ตารางที่ ผ.11 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 11

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
11	6	47.484	19,500	3.300	1.300	7.150	1.350	1.350

ผ.12 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 12



ภาพที่ ผ.12-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 12



ภาพที่ ผ.12-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 12

ภาพที่ ผ.12-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 12

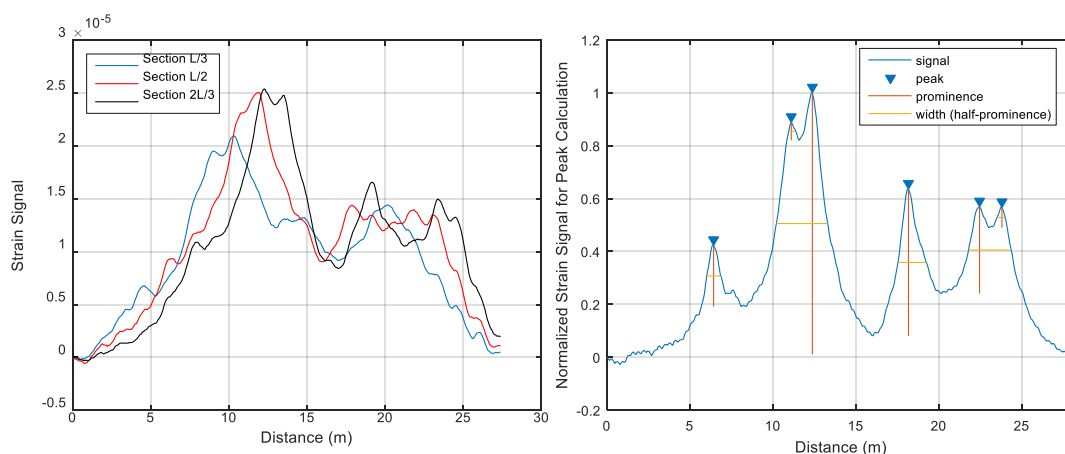
ตารางที่ ผ.12 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 12

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
12	6	45.054	50,500	3.790	1.210	4.370	2.900	1.210

ผ.13 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 13



ภาพที่ ผ.13-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 13



ภาพที่ ผ.13-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 13

ภาพที่ ผ.13-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 13

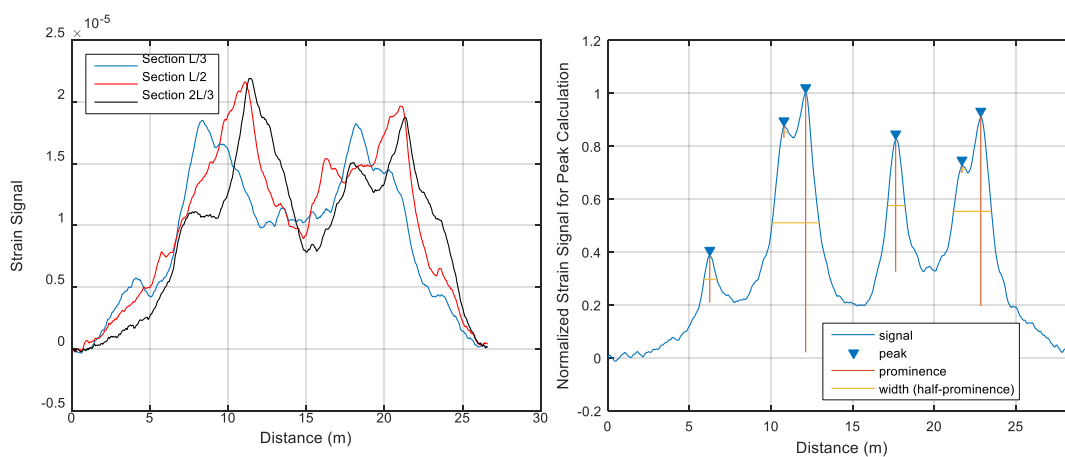
ตารางที่ ผ.13 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 13

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
13	6	51.466	50,320	4.020	1.270	5.110	3.780	1.320

ผ.14 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 14



ภาพที่ ผ.14-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 14



ภาพที่ ผ.14-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 14

ภาพที่ ผ.14-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 14

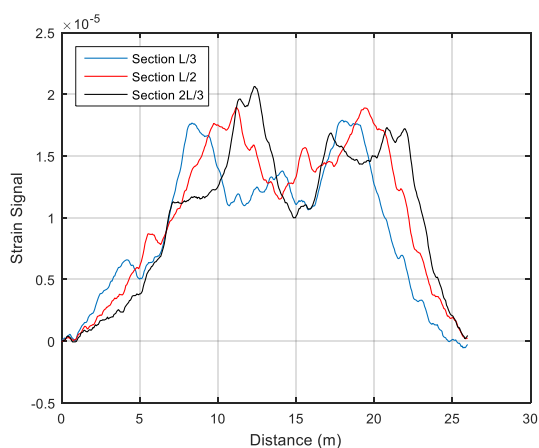
ตารางที่ ผ.14 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 14

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
14	6	40.133	50,500	3.740	1.210	4.580	3.210	1.210

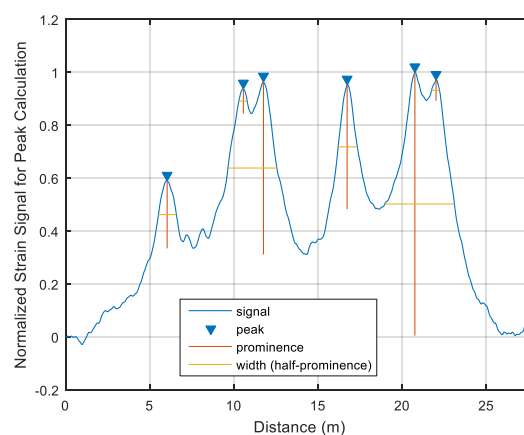
ผ.15 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 15



ภาพที่ ผ.15-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 15



ภาพที่ ผ.15-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 15



ภาพที่ ผ.15-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 15

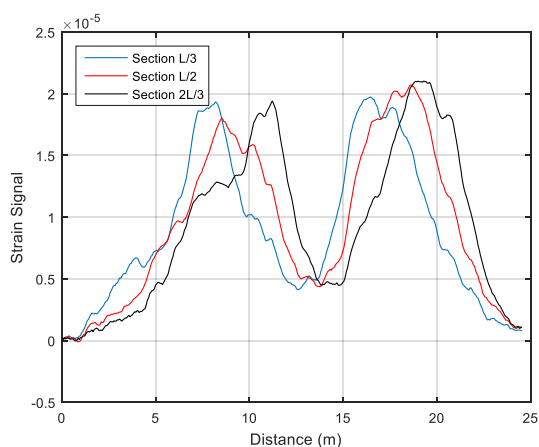
ตารางที่ ผ.15 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 15

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
15	6	41.951	50,500	3.740	1.210	4.210	3.370	1.260

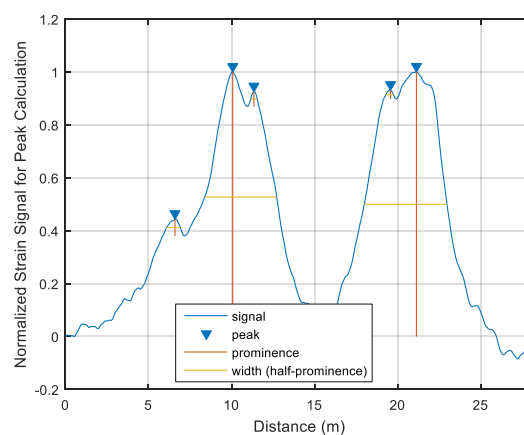
ผ.16 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 16



ภาพที่ ผ.16-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 16



ภาพที่ ผ.16-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 16



ภาพที่ ผ.16-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 16

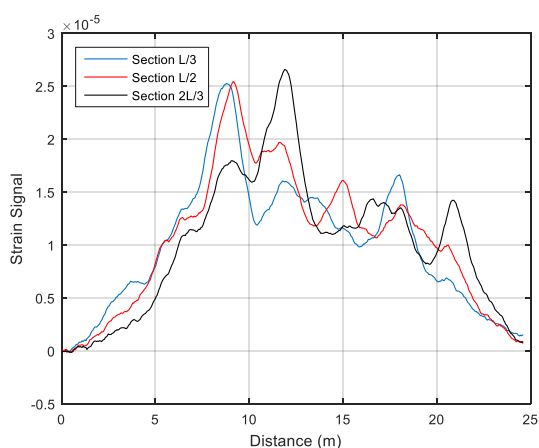
ตารางที่ ผ.16 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 16

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
16	6	46.195	47,000	3.210	1.320	6.320	1.840	1.210

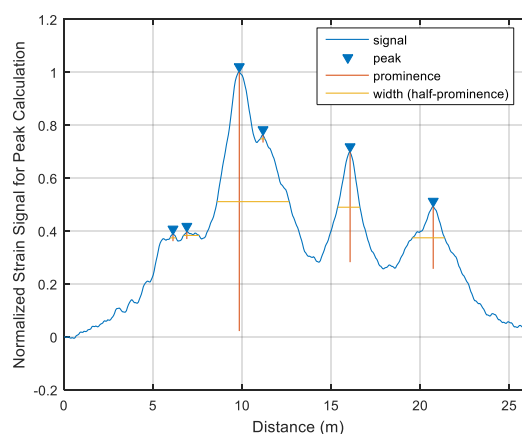
ผ.17 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 17



ภาพที่ ผ.17-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 17



ภาพที่ ผ.17-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 17



ภาพที่ ผ.17-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 17

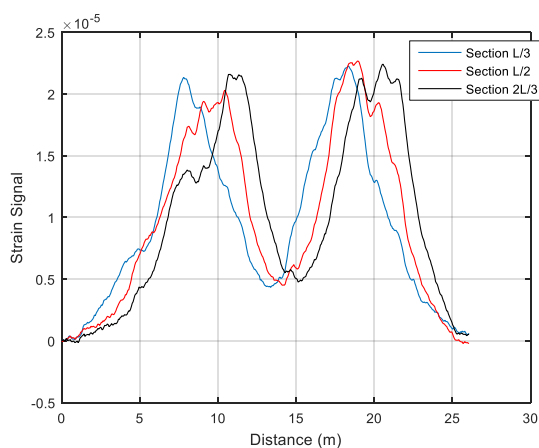
ตารางที่ ผ.17 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 17

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
17	6	38.441	48,000	1.620	2.870	1.390	4.600	4.590

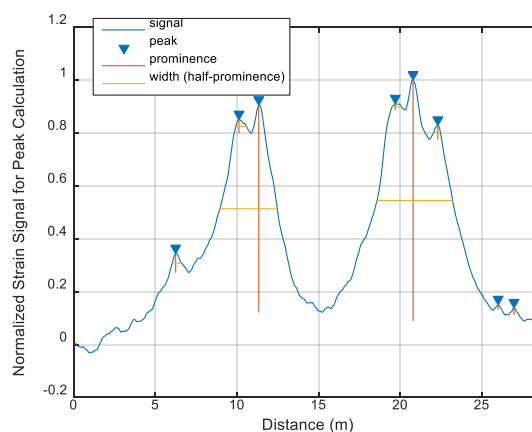
ผ.18 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 18



ภาพที่ ผ.18-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 18



ภาพที่ ผ.18-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 18



ภาพที่ ผ.18-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 18

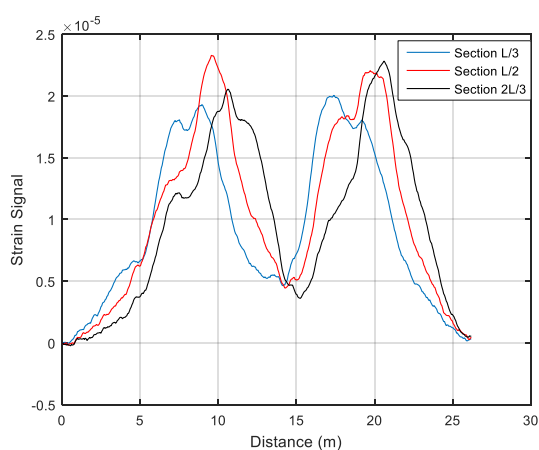
ตารางที่ ผ.18 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 18

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
18	6	39.312	49,700	3.160	1.260	6.470	1.210	1.210

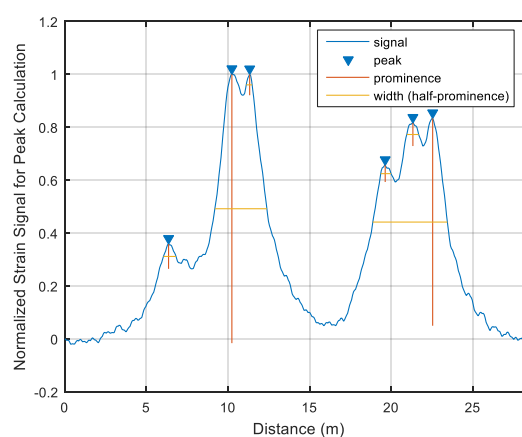
ผ.19 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 19



ภาพที่ ผ.19-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 19



ภาพที่ ผ.19-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 19



ภาพที่ ผ.19-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 19

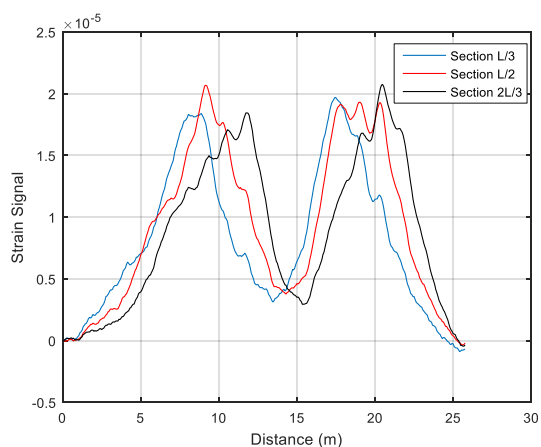
ตารางที่ ผ.19 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 19

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
19	6	38.462	49,000	3.390	1.340	7.230	1.400	1.400

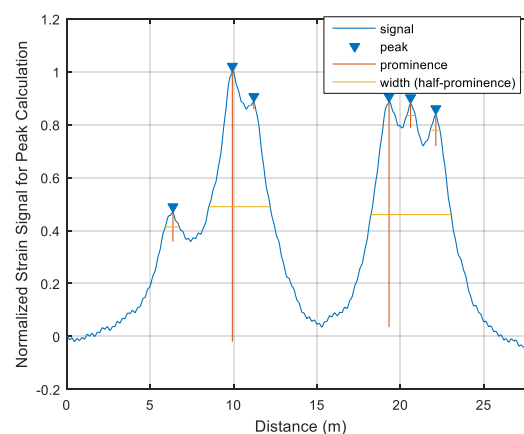
ผ.20 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 20



ภาพที่ ผ.20-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 20



ภาพที่ ผ.20-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 20

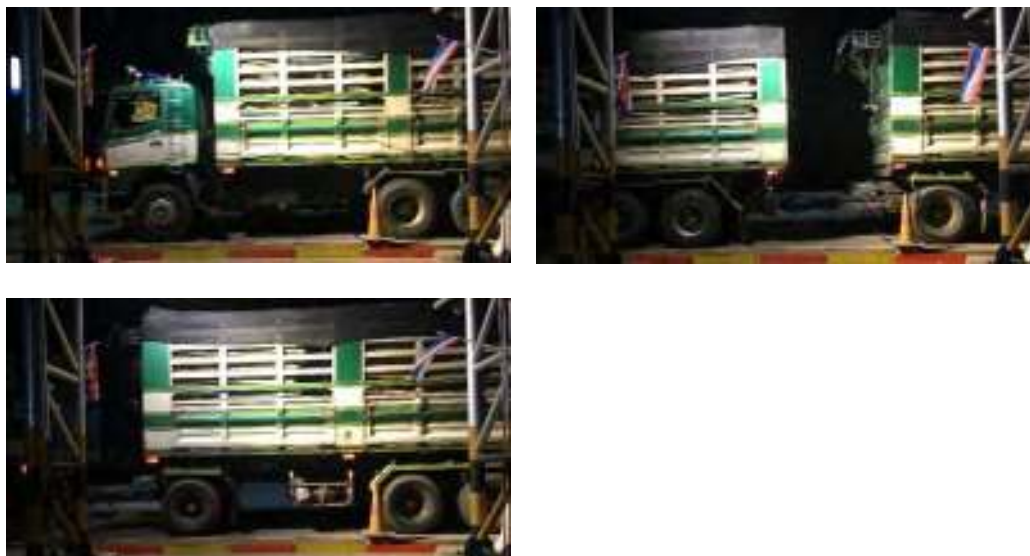


ภาพที่ ผ.20-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 20

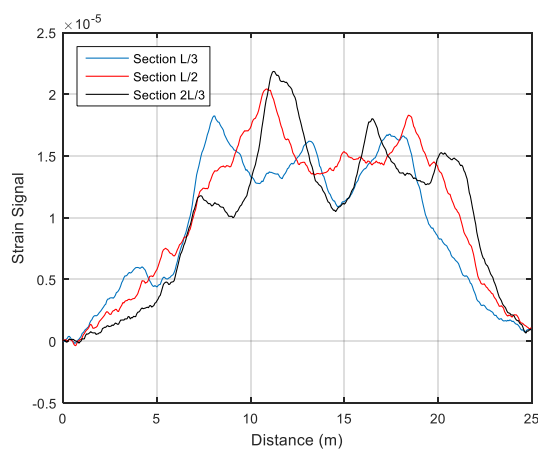
ตารางที่ ผ.20 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 20

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
20	6	49.378	46,520	3.340	1.300	7.100	1.360	1.420

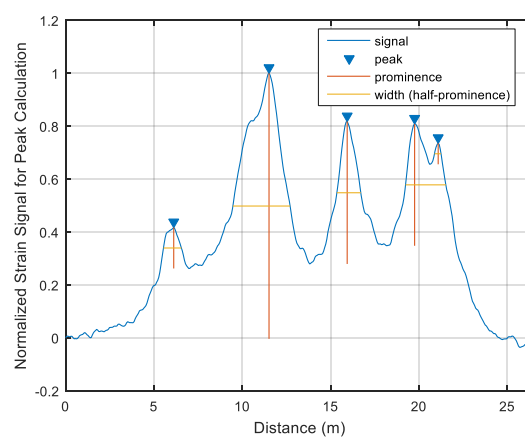
ผ.21 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 21



ภาพที่ ผ.21-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 21



ภาพที่ ผ.21-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 21



ภาพที่ ผ.21-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 21

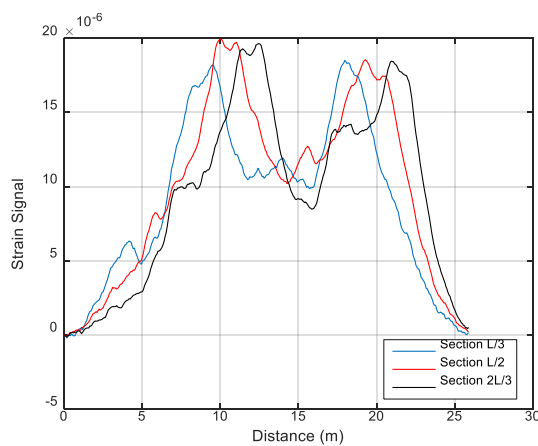
ตารางที่ ผ.21 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 21

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
21	6	42.001	50,500	3.790	1.260	3.680	3.470	1.320

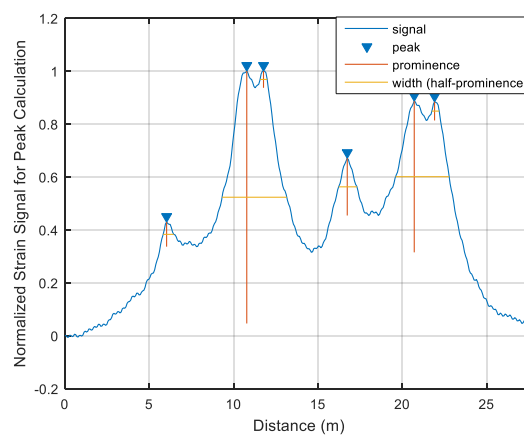
ผ.22 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 22



ภาพที่ ผ.22-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 22



ภาพที่ ผ.22-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 22



ภาพที่ ผ.22-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 22

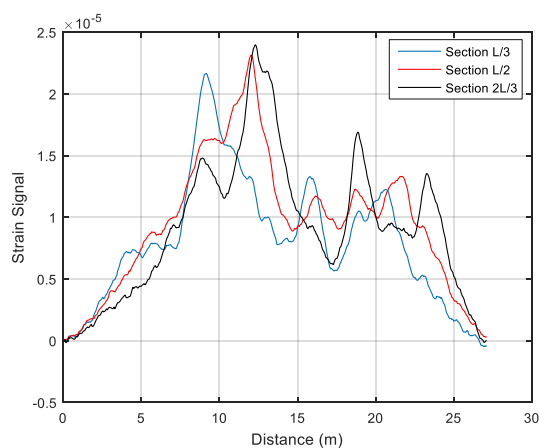
ตารางที่ ผ.22 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 22

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
22	6	46.847	50,450	4.000	1.320	4.430	3.520	1.380

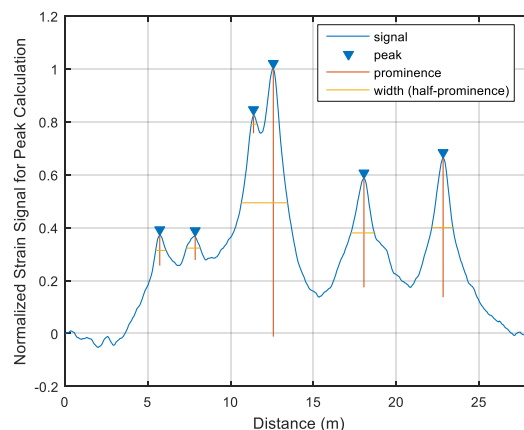
ผ.23 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 23



ภาพที่ ผ.23-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 23



ภาพที่ ผ.23-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 23



ภาพที่ ผ.23-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 23

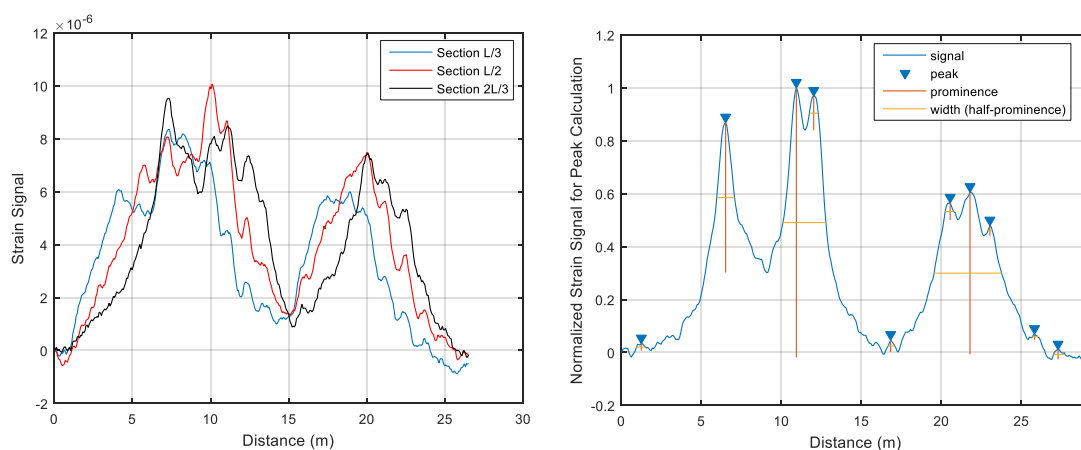
ตารางที่ ผ.23 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 23

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
23	6	44.024	49,500	1.740	3.160	1.260	4.900	4.260

ผ.24 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 24



ภาพที่ ผ.24-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 24



ภาพที่ ผ.24-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 24

ภาพที่ ผ.24-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 24

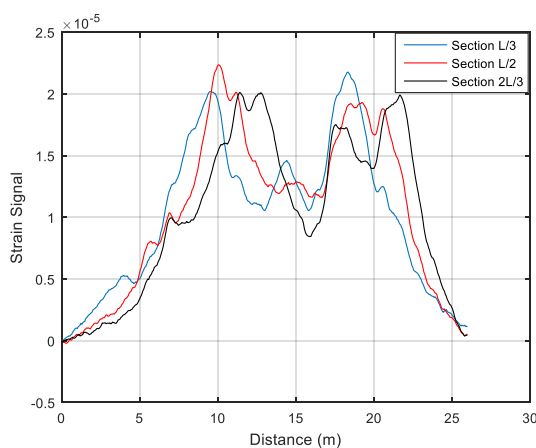
ตารางที่ ผ.24 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 24

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
24	6	50.055	50,500	3.420	1.320	6.470	1.160	1.160

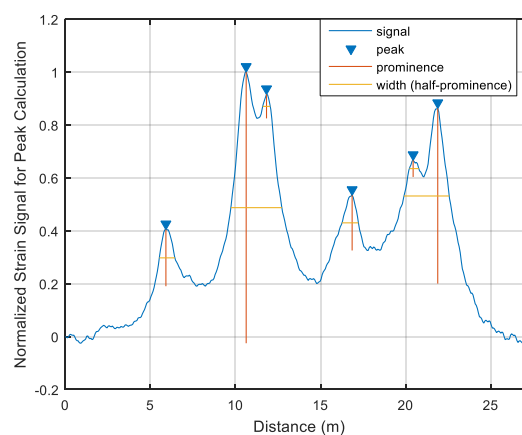
ผ.25 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 25



ภาพที่ ผ.25-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 25



ภาพที่ ผ.25-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 25



ภาพที่ ผ.25-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 25

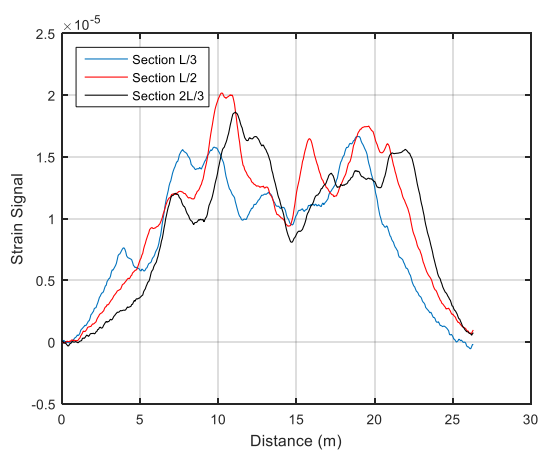
ตารางที่ ผ.25 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 25

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
25	6	41.033	50,500	4.080	1.270	4.400	3.240	1.260

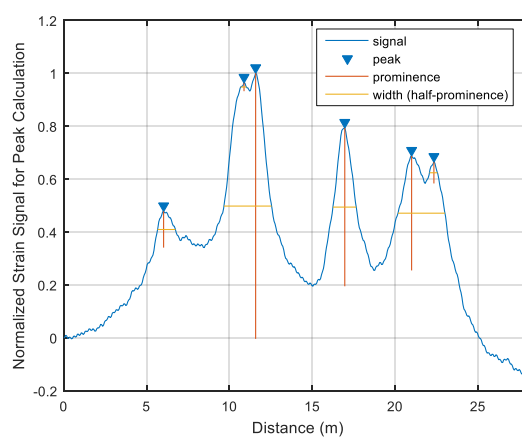
ผ.26 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 26



ภาพที่ ผ.26-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 26



ภาพที่ ผ.26-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 26



ภาพที่ ผ.26-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 26

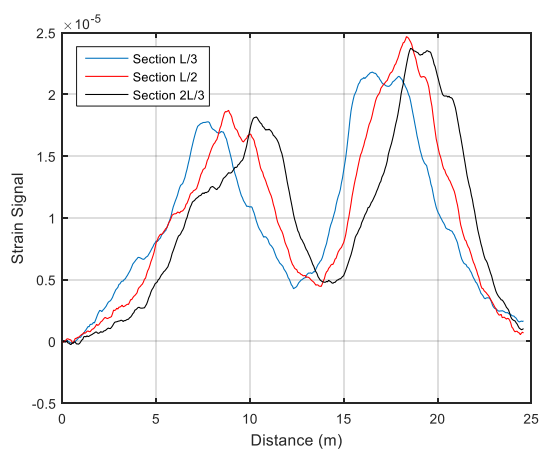
ตารางที่ ผ.26 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 26

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
26	6	39.696	49,000	3.890	1.260	4.580	3.660	1.330

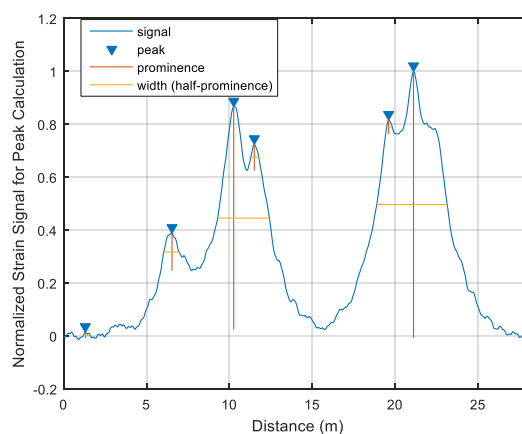
ผ.27 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 27



ภาพที่ ผ.27-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 27



ภาพที่ ผ.27-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 27



ภาพที่ ผ.27-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 27

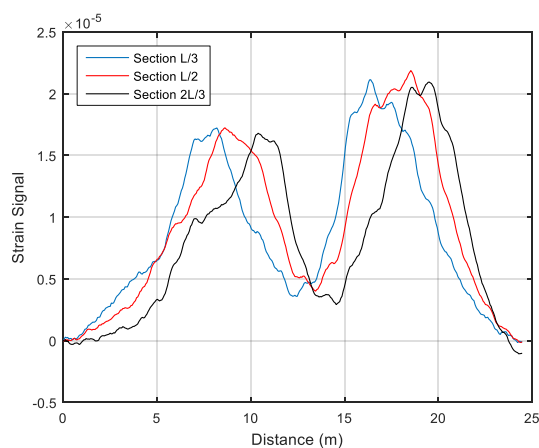
ตารางที่ ผ.27 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 27

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
27	6	42.073	47,380	3.340	1.380	7.010	1.300	1.310

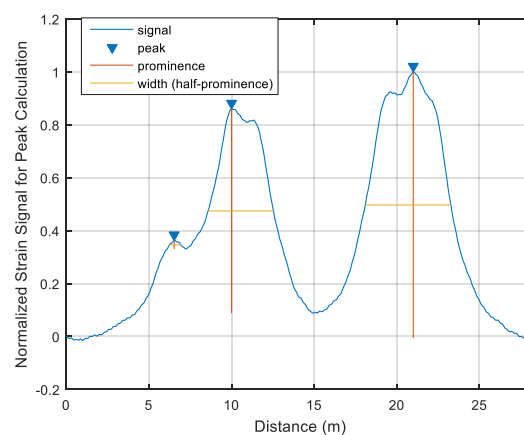
ผ.28 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 28



ภาพที่ ผ.28-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 28



ภาพที่ ผ.28-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 28



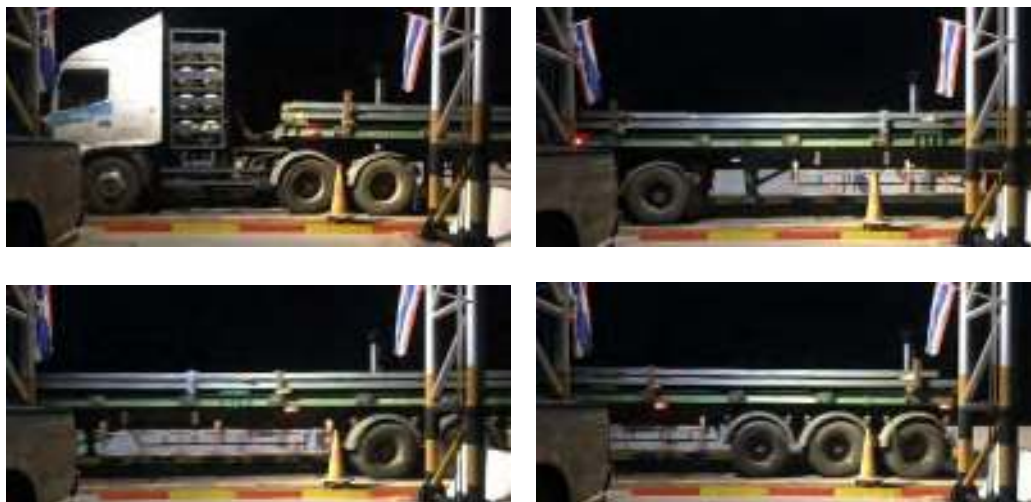
ภาพที่ ผ.28-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 28

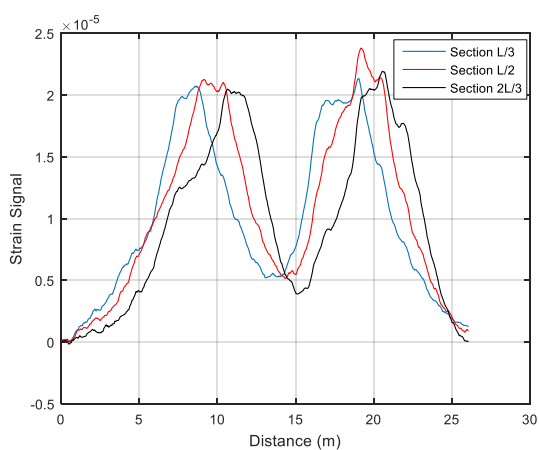
ตารางที่ ผ.28 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 28

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
28	6	45.646	49,100	3.430	1.400	7.250	1.370	1.390

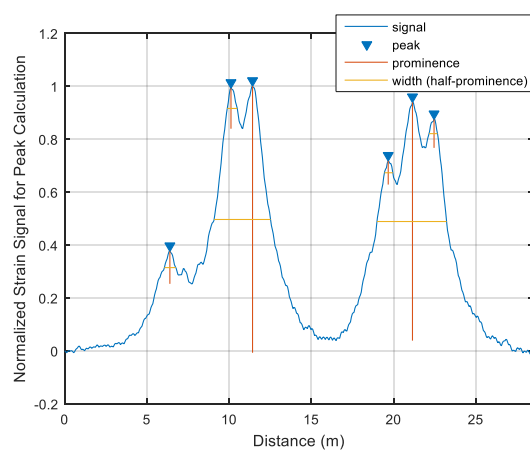
ผ.29 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 29



ภาพที่ ผ.29-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 29



ภาพที่ ผ.29-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 29



ภาพที่ ผ.29-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 29

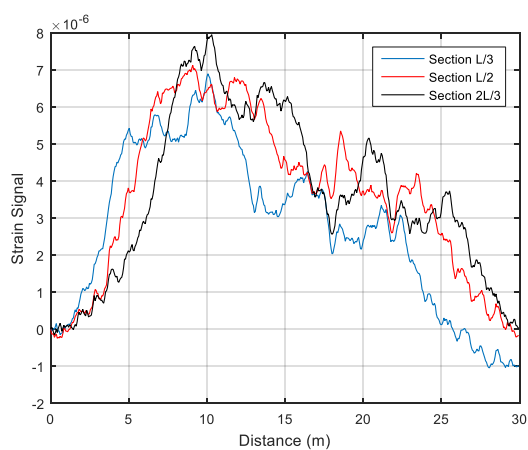
ตารางที่ ผ.29 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 29

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
29	6	34.817	48,700	3.420	1.320	7.220	1.380	1.340

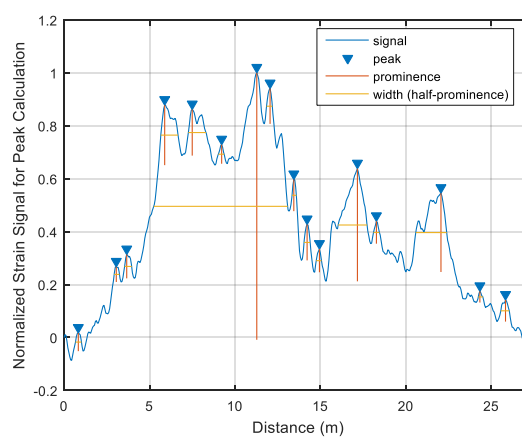
ผ.30 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 30



ภาพที่ ผ.30-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 30



ภาพที่ ผ.30-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 30



ภาพที่ ผ.30-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD

ของรถคันที่ 30

ตารางที่ ผ.30 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 30

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
30	6	36.946	19,600	1.630	2.740	1.260	4.160	3.950

ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	นาย เกรียงศักดิ์ สามสมจิตต์
วัน เดือน ปีเกิด	9 ธันวาคม พ.ศ.2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	106/6 หมู่ที่ 2 ต.พลองตาเอี่ยม อ.วังจันทร์ จ.ระยอง 21210
ประวัติการศึกษา	- ระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านเขาตลาด - ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมกุฎเมืองราชวิทยาลัย - ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมกุฎเมืองราชวิทยาลัย - การศึกษาปัจจุบัน นิสิตชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
ชื่อ-สกุล	นางสาว ธิตามณี อัดแสง
วัน เดือน ปีเกิด	27 มกราคม พ.ศ.2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	31-33 ถ.ธนเจริญ ต.บางพระ อ.เมือง จ.ตราด 23000
ประวัติการศึกษา	- ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลตราด - ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีประเสริฐศิลป์ - ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีประเสริฐศิลป์ - การศึกษาปัจจุบัน นิสิตชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา