



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน  
สำหรับการควบคุมยานพาหนะน้ำหนักเกินพิกัด

บนทางหลวง: กรณีทดสอบภาคสนาม

Development of Bridge Weigh-In-Motion System  
for Overweight Vehicle Control  
on Highway: A Field Testing

พัชรพงษ์ อาสนจินดา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2561A10802069

สัญญาเลขที่ 18/2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน  
สำหรับการควบคุมยานพาหนะน้ำหนักเกินพิกัด

บนทางหลวง: กรณีทดสอบภาคสนาม

Development of Bridge Weigh-In-Motion System  
for Overweight Vehicle Control  
on Highway: A Field Testing

พัชรพงษ์ อาสนจินดา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

มิถุนายน 2562

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 18/2561

## บทคัดย่อ

การทดสอบภาคสนามของระบบหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวิเคราะห์หาน้ำหนักของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ในเส้นทาง ซึ่งแนวคิดนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการใช้คัดกรองเฉพาะรถบรรทุกที่มีแนวโน้มบรรทุกเกินพิกัดให้เข้าช่องที่ด่านชั่งน้ำหนักเท่านั้น จึงเป็นการลดระยะเวลาในการขนส่งและโลจิสติกส์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การศึกษาได้ทำการทดสอบที่สะพานข้ามคลองบางไผ่ บนทางหลวงหมายเลข 304 ช่วงขาเข้า จังหวัดฉะเชิงเทรา โครงสร้างสะพานเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงทาบหน้า ขนาด 2 ช่องจราจร และมีความยาวช่วง 10 เมตร และมีตำแหน่งใกล้กับด่านชั่งน้ำหนักถาวรที่ระยะประมาณ 500 เมตร การทดสอบจะติดตั้งมาตรวัดความเครียดใต้ท้องสะพาน และพิจารณารถบรรทุกที่ได้ผ่านด่านชั่งน้ำหนักเพื่อทราบน้ำหนักจริงของรถบรรทุกและนำไปใช้ในการสร้างเส้นอิทธิพลของสะพานเพื่อใช้คำนวณน้ำหนักต่อไป ผลการศึกษาพบว่าการหาค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ประเภทได้ถูกต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 4.71 และ 16.63 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การหาน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยสะพาน, การทดสอบภาคสนาม, เส้นอิทธิพลของสะพาน, สัญญาณความเครียดของสะพาน

## Abstract

The objective of the research project on field investigation of moving truck weight identification system using bridge strain is to develop the weight identification system of heavy trucks moving on highways. Application based on this concept is to filter only the potential overweight trucks for weigh stations in order to improve effectiveness of transportation or logistics due to travel time reduction. The field test was carried out at the bridge over the Bangphai canal on highway 304, Chachoengsao province. The bridge is prestressed concrete slab with concrete topping. The bridge has two traffic lanes and span length of 10 meters. It is located near to weigh station for 500 meters. The bridge was instrumented with only strain gages beneath the bridge deck. The actual truck weight was monitored from weigh station for extraction of bridge's influence line which will be used in the truck weight identification. Regarding to the test result, it was found that the identification of truck gross weight which is classified its category correctly has average and maximum identification errors of 4.71% and 16.63%, respectively.

Keywords: bridge weigh-in-motion, field test, bridge influence line, bridge strain signal

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาน้ำหนักรถบรรทุก.....	4
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา 6	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 หลักการหาเส้นอิทธิพล.....	7
2.2.2 การหาความเร็ว ตำแหน่งเพลลา ระยะเวลาช่วงเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับ	12
เพลลา	
2.2.3 การหาน้ำหนักรถบรรทุกจากเส้นอิทธิพล.....	18
2.2.4 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว.....	19
บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย.....	20
3.1 สถานที่ศึกษา.....	20
3.2 การเตรียมการทดสอบ.....	22
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	21
3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์และการบันทึกข้อมูล.....	24
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	25
3.4 จำนวนรถบรรทุกทดสอบ.....	32
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	35
3.5.1 การวิเคราะห์การตรวจจับเพลลา ความเร็ว และระยะห่างเพลลา.....	35
3.5.2 การวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพล.....	40
3.5.3 การวิเคราะห์หาหน้าหนักบรรทุก.....	41
3.6 พารามิเตอร์ที่ศึกษา.....	41
บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา.....	45
4.1 ผลการสังเคราะห์เส้นอิทธิพลความเครียดของสะพาน.....	45
4.2 ผลการจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยการระบุเพลลา.....	46
4.3 ผลการวิเคราะห์หาหน้าหนักรวมของรถบรรทุก.....	53
4.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้การวิเคราะห์หาหน้าหนักรวมมีความคลาดเคลื่อนสูง.....	59
4.4.1 ผลจากรระบุเพลลาผิดพลาด.....	59
4.4.2 ความสมบูรณ์ของสัญญาณความเครียดตรวจวัด.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	65
รายงานสรุปการเงิน.....	121
ประวัตินักวิจัย.....	122

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ระดับความถูกต้องของระบบ WIM ตามเกณฑ์ COST 323.....	5
3-1	ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการปรับเทียบ.....	29
3-2	ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการชั่งน้ำหนักรวมที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก.....	33
3-3	ประเภทรถบรรทุกตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวง.....	42
3-4	ข้อบังคับใช้ควบคุมรถบรรทุกตามกฎหมายพระราชบัญญัติทางหลวง.....	43
4-1	ข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา.....	47
4-2	จำนวนกรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้องและคลาดเคลื่อน.....	51
4-3	ผลการวิเคราะห์การหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก และความคลาดเคลื่อน.....	54
4-4	ข้อมูลทางสถิติของผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก.....	56



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน.....	8
2-2 สัญญาณความเครียดของสะพานทางทฤษฎี.....	9
2-3 น้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับสะพานและตำแหน่งของเพลารถ.....	10
2-4 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของสะพาน.....	13
2-5 ระยะห่างระหว่างหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดสองหน้าตัดสำหรับใช้ คำนวณหาความเร็ว	14
2-6 ผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร.....	14
2-7 การปรับปรุงคุณภาพสัญญาณความเครียดระหว่างช่องจราจรในหน้าตัด A และ B... เพื่อใช้หาความเร็ว	15
2-8 สัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์..... สหสัมพันธ์	15
2-9 สัญญาณระบุตำแหน่งเพลารถของรถบรรทุก.....	17
3-1 แผนที่แสดงสถานที่ทดสอบ.....	20
3-2 สะพานข้ามคลองบางไผ่ กิโลเมตรที่ 77+416 บนทางหลวง 304.....	21
3-3 ลักษณะสะพานที่ทำการทดสอบ.....	21
3-4 ลักษณะใต้สะพานที่ทำการทดสอบ.....	21
3-5 ด้านตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกจังหวัดฉะเชิงเทรา.....	21
3-6 มาตรวัดความเครียดสำหรับพื้นผิวคอนกรีต.....	22
3-7 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด.....	22
3-8 อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178.....	23
3-9 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุด้วยแสงและแผ่นสะท้อนแสง.....	23
3-10 หัววัดความเร่ง.....	24
3-11 ภาพด้านข้างแสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ.....	25
3-12 ภาพแปลนแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ.....	25
3-13 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด.....	26
3-14 สัญญาณความเร่งของสะพานจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระด้วยการกระโดด..... ทดสอบ	27
3-15 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระเพื่อระบุความถี่..... ธรรมชาติของสะพาน	27

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3-16	ตราข้งน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกแบบเคลื่อนย้ายได้.....	28
3-17	รถบรรทุกขณะข้งบนตราข้งน้ำหนักเพลลา.....	28
3-18	แถบวัดระยะ.....	30
3-19	การบันทึกภาพนึ่งระยะห่างระหว่างเพลลา ที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก.....	30
3-20	ตัวอย่างภาพที่ได้จากการบันทึกภาพนึ่งของรถบรรทุก ขณะเข้ามาข้งด้านตรวจสอบน้ำหนัก	31
3-21	ตัวอย่างภาพนึ่งที่ได้จากการบันทึกที่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก เพื่อหาระยะห่างระหว่างเพลลาในโปรแกรม AutoCAD	31
3-22	การปฏิบัติงานที่ได้สะพาน.....	32
3-23	ขั้นตอนการวิเคราะห์ของระบบ FAD ที่ใช้.....	35
3-24	สัญญาณความเครียดในช่องจรรยาข้งซ้าย.....	36
3-25	สัญญาณความเครียดในช่องจรรยาข้งขวา.....	36
3-26	สัญญาณความเครียดของช่องจรรยาข้งและขวา.....	37
3-27	สัญญาณความเครียดที่ทำการปรับปรุงแล้ว.....	37
3-28	ตัวอย่างผลต่างของสัญญาณความเครียดที่วัดได้ของรถบรรทุก 6 เพลลา.....	38
3-29	ตัวอย่างสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์..... กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลลา	38
3-30	ตัวอย่างผลการตรวจข้งยอดเพลลาสำหรับหาระยะห่างระหว่างเพลลา.....	39
3-31	ขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นอิทธิพล.....	40
3-32	ขั้นตอนการหาน้ำหนักรถบรรทุกทดสอบด้วยเส้นอิทธิพลที่สังเคราะห์ได้.....	41
4-1	เส้นอิทธิพลของความเครียดสะพานที่สังเคราะห์ได้.....	45
4-2	ตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ใช้หาเพลลาและระยะห่างเพลลา.....	46
4-3	สัญญาณความเครียดเฉลี่ยในหน้าตัดสะพานและผลการระบุจำนวนและตำแหน่ง..... เพลลากรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลลาเคลื่อนที่ผ่าน	52
4-4	ผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกในทุกกรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้อง.....	57
4-5	ความคลาดเคลื่อนของผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ระดับความเร็วรถ..... บรรทุกที่แตกต่างกัน กรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้อง	58
4-6	ความคลาดเคลื่อนของผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ระดับมวลรถบรรทุก..... ที่แตกต่างกัน กรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้อง	58
4-7	ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 5 เพลลา ที่ระบุเพลลาผิดตำแหน่ง.....	59

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-8	ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลา ที่ระบุเพลาผิดตำแหน่งเพลา.....	60
4-9	ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลา ที่ระบุจำนวนเพลาไม่ครบ.....	60
4-10	ตัวอย่างสัญญาณแกนนอนมีค่าไม่คงที่.....	61

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยมีการขนส่งทางบกเพื่อส่งสินค้าทางด้านอุตสาหกรรมมาก โดยส่วนใหญ่เป็นการขนส่งด้วยรถบรรทุก ทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมสภาพของถนนเร็วกว่ากำหนด ซึ่งเกิดจากรถบรรทุกบรรทุกน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด รัฐบาลจึงต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมถนน จากปัญหาดังกล่าวได้มีการจัดตั้งด่านชั่งน้ำหนักถาวรหรือด่านตรวจสอบน้ำหนักขึ้น เพื่อใช้ควบคุมน้ำหนักของรถบรรทุกไม่ให้เกินที่กฎหมายกำหนด โดยด่านชั่งน้ำหนักถาวร (weigh station) เป็นระบบชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะหยุดนิ่ง (static scale) เพื่อควบคุมน้ำหนักรถบรรทุกให้เป็นไปตามกฎหมายกำหนด เนื่องจากระบบนี้เป็นการตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกด้วยการหยุดชั่งจึงสามารถตรวจสอบการบรรทุกเกินพิกัดตามข้อกำหนดได้ แต่ทั้งนี้ในการตรวจวัดจะต้องหยุดรถเพื่อทำการชั่งน้ำหนัก ซึ่งทำให้เกิดการชะลอตัวของกระแสจราจรในเส้นทางจากการเข้าคิวรอชั่งน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อบรรเทาการชะลอตัวของยานระบบด่านชั่งน้ำหนักถาวรที่สมบูรณ์จะต้องสร้างทางเบี่ยงเพื่อให้รถบรรทุกเข้าชั่งที่สถานีที่ปลูกสร้างไว้บริเวณริมเส้นทาง ดังนั้นระบบด่านชั่งน้ำหนักถาวรจึงต้องการงบประมาณในการลงทุนที่สูง สำหรับสร้างสถานีรวมถึงการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าใช้จ่ายสูง 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 ติดตั้งบนผิวทางเป็นแผ่นตาชั่ง (scale) ขนาดใหญ่สำหรับวัดค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุก อย่างไรก็ตามระบบ WIM มีต้นทุนที่สูงมาก และในการซ่อมบำรุงจะต้องลอกผิวทางและยังต้องปิดเส้นทางจราจรระหว่างซ่อมแซมอีกด้วย ทำให้ในปัจจุบันจำนวนด่านชั่งน้ำหนักที่ติดตั้งระบบ WIM ยังมีจำนวนน้อยเนื่องจากต้องใช้งบประมาณสูงมาก

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

Bridge-Weigh-in-Motion เป็นแนวทางหนึ่งในการควบคุมการบรรทุกเกินพิกัด เนื่องจากผู้ขับขี่เปลี่ยนเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจชั่ง การหาน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่ทำให้ได้ข้อมูลของรถบรรทุก โดยที่ผู้ขับขี่ไม่สามารถทราบตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดได้ จึงไม่สามารถเลี่ยงการตรวจวัดได้นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งต่ำกว่าสถานีชั่งน้ำหนักถาวร และทำการบำรุงรักษาได้ง่ายโดยไม่ต้องปิดเส้นทางจราจร

งานวิจัยนี้สนใจการหาน้ำหนักบรรทุกทุกจากการใช้เส้นอิทธิพล จึงเลือกพิจารณาการหาน้ำหนักยานพาหนะประเภท 2 เพลาถึง 6 เพลา ซึ่งมีระยะช่วงเพลา น้ำหนักเพลา และพิกัดน้ำหนักรวมที่แตกต่างกัน ในการวิเคราะห์เพื่อพัฒนาระบบ B-WIM ให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ขณะเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองความเครียดของสะพานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- 2) เพื่อศึกษาระดับความถูกต้องของการคำนวณน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากผลกระทบของประเภทรถ, น้ำหนักรถ และความเร็ว จาการบรรทุกจริงด้วยการทดสอบภาคสนาม

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้พิจารณาการศึกษาด้วยการทดสอบภาคสนามกับโครงสร้างสะพานจริง
- 2) สะพานทดสอบเป็นโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรง มีความยาวช่วง 9 เมตร และมีทิศทางการสัญจรของยานพาหนะไปในทางเดียวกันทุกช่องจราจร
- 3) การวิเคราะห์อาศัยข้อมูลตรวจวัดจากผลตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานเท่านั้น

- 4) การศึกษาวิเคราะห์จากการสำรวจข้อมูลตรวจวัดเหตุการณ์การสัญจรผ่านของรถบรรทุกประเภท 2 เพลาถึง 6 เพลา
- 5) คำนวณน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่นำมาใช้คำนวณระดับความถูกต้อง อ้างอิงจากค่าที่ตรวจวัดได้ ณ ด้านชั่งน้ำหนักบรรทุกถาวร
- 6) การคำนวณค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกพิจารณาเป็นค่าประมาณของน้ำหนักทางสถิติเท่านั้น
- 7) การวิเคราะห์เหตุการณ์ที่สามารถประมาณน้ำหนักรถบรรทุกได้ พิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวเท่านั้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาระบบควบคุมน้ำหนักรถบรรทุกบนสะพานเพื่อให้การจราจรดีขึ้น
- 2) การใช้ระบบ B-WIM จะมาสามารถใช้เป็นระบบคัดกรองรถบรรทุกที่มีแนวโน้มน้ำหนักเกินพิกัดน้ำหนัก เพื่อลดจำนวนการเข้าชั่งในด้านชั่งน้ำหนัก
- 3) เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากระบบ B-WIM เป็นสัญญาณข้อมูล จึงสามารถส่งข้อมูลไปยังสำนักงานใหญ่ โดยไม่ต้องมีสำนักงานย่อยบริเวณนั้น
- 4) ระบบที่นำเสนอสามารถบำรุงซ่อมได้รวดเร็ว และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่ำลง
- 5) ผู้ขับขี่รถบรรทุกไม่สามารถทราบว่ามีรถตรวจสอบน้ำหนักบริเวณใด
- 6) ผู้ขับขี่ไม่จำเป็นต้องหยุดรถเพื่อทำการตรวจสอบน้ำหนัก ให้ลดเวลาเข้าคิวในการรอชั่งน้ำหนักรถบรรทุก
- 7) ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการประมาณน้ำหนักของรถบรรทุกเมื่อนำมาใช้ในการทดสอบจริง

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษางานวิจัยในอดีตและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 2) พัฒนาระเบียบวิธีการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุก
- 3) สำรวจสถานที่สำหรับเลือกทดสอบภาคสนาม
- 4) เตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบภาคสนาม
- 5) ทำการทดสอบภาคสนาม
- 6) วิเคราะห์ผลการทดสอบ
- 7) สรุปผลการศึกษา
- 8) จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการหาคาน้ำหนักรถบรรทุก

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

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 และความคลาดเคลื่อนในการหาคาน้ำหนักเพลาเดี่ยว น้ำหนักเพลาทุกคู่ และน้ำหนักของเพลาในกลุ่ม มีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ถ้าเป็นข้อมูลเดิมที่มีอยู่มาใช้สำหรับปรับเทียบ และคำนวณระดับความแม่นยำ ช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ควรจะถูกคูณด้วย 0.8

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

Type of Measurement	Domain of use	Accuracy Classes:					
		Confidence interval width $\delta$ (%)					
1.		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D(25)	E
2. Gross Weight	Gross weight >3.5 t	5	7	10	15	25	>25
3. Group of axles	Axle Load: Axle load > 1 t	7	10	13	18	28	>28
4. Single axle		8	11	15	20	30	>30
5. Axle of a group		10	15	20	25	35	>35

Chan, Law และ Yung (2000) ศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยการติดตั้งมาตรวัดความเครียด เครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (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 และน้ำหนักที่คำนวณได้ในโดเมนของเวลา มีความแปรปรวนสูงจนไม่น่าเชื่อถือ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำถึงร้อยละ  $\pm 5$  ก็ตาม

Pinkaew (2006) ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง โดยการตัดผลเนื่องจากการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยการคำนวณน้ำหนักจากค่าโมเมนต์ดัดที่หน้าตัดสะพาน และทำการปรับปรุงโดยให้ความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นโดยใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำหรือเรียกว่า Updated Static Component (USC) technique มาใช้ โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิกโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักรถบรรทุกเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องเพิ่มขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรก 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 พบว่าวิธีการนี้ใช้ในการปรับเทียบในการหาเส้นอิทธิพลจากรถ 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 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา

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 โดยคณะกรรมการยุโรปได้ทำการศึกษาถึงดัชนีวัดความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ FAD ของสะพาน โดยได้ทำการทดสอบกับสะพาน Orthotropic จริง ศึกษาผลกระทบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวแปรต่างๆ และได้ทำการทดสอบการหาน้ำหนักทั้งในแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ซึ่งได้ผลการทายน้ำหนักมีความแม่นยำสำหรับแบบจำลอง 1 มิติร้อยละ 20 และความแม่นยำสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ ร้อยละ 15

นิคมเดช (2546) ได้ศึกษาวิธีการหาความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานจากผลตอบสนองของสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ พบว่าการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) หลายตัวโดยกระจายตามตำแหน่งที่เท่ากันในแต่ละหน้าตัดสะพานสามารถนำผลรวมของผลการตอบสนองของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรมาหาผลต่างของการตอบสนอง จะได้ลักษณะสัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้นสามารถบ่งบอกจำนวนและตำแหน่งเพลาของรถบรรทุกได้ จากการศึกษาพบว่า การทดสอบการหาความเร็วและระยะห่างเพลา มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่เกินร้อยละ 10 และร้อยละ 7 ตามลำดับ

Liljenrantz, Karoumi และ Olofsson (2007) ได้ประยุกต์ระบบ B-WIM กับสะพานรางรถไฟ เพื่อตรวจวัดข้อมูลน้ำหนักและตรวจจับเพลาของรถไฟ โดยใช้หลักการหาความเร็วด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างความเครียดบริเวณสองตำแหน่งขั้นตอนในการคำนวณหาความเร็ว ตำแหน่งเพลา ระยะห่างระหว่างเพลา และน้ำหนักเพลา

ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้ 1) ตรวจวัดและเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้ 2) คำนวณหาความเร็วของรถไฟโดยใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และ 3) ตรวจจับจำนวนเพลลาแบบคร่าว ๆ จากตำแหน่งสัญญาณสูงสุด ประกอบกับคำนวณความเร็วและน้ำหนัก หลังจากหาความเร็วด้วยหลักการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วจึงทำการหาตำแหน่งเพลลา จากขั้นตอนก่อนหน้า จากการพัฒนาาระบบ B-WIM มาอย่างต่อเนื่องและได้ทำการทดสอบระบบกับสะพานจริงพบว่าการทำงานของระบบ B-WIM มาใช้กับรางรถไฟได้ผลที่ดี หลักการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดสามารถหาความเร็วได้อย่างรวดเร็วจากการทดสอบพบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยโดยค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว น้ำหนักรวม และน้ำหนักแต่ละโบกมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ร้อยละ 2 และร้อยละ 2.5 ตามลำดับ

ศุภชัย และ พัทธพงษ์ (2558) ได้ทำการศึกษาการหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน จากการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าสามารถหาความเร็วของ การสัญจรได้อย่างถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 สำหรับการหาตำแหน่งเพลลาด้วยหลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ซึ่งทำในลักษณะการคำนวณซ้ำ โดยเริ่มจากการสมมติจำนวนเพลลาจากน้อยไปมาก และประมาณตำแหน่งเพลลาที่เพิ่มเติมจากยอดของส่วนต่างคงค้างของสัญญาณความเครียดพบว่า การหาระยะห่างเพลลาที่มีความคลาดเคลื่อนที่อยู่ อย่างไรก็ตามระบบยังสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้ถูกต้อง

ศุภชัย และ พัทธพงษ์ (2560) ได้พัฒนาระบบการจำแนกประเภทจากการระบุจำนวนและตำแหน่งเพลลาบรรทุกจากสัญญาณความเครียดของสะพานโดยปรับปรุงความชัดเจนของสัญญาณความเครียดสะพานที่ทำให้สามารถระบุเพลลาได้ และใช้ฟังก์ชัน findpeaks ในซอฟต์แวร์ MATLAB ในการระบุตำแหน่งเพลลาเมื่อคำนวณความเร็วรถบรรทุกแล้ว พบว่าการจำแนกประเภทรถบรรทุกสามารถทำได้ถูกต้องในทุกกรณีที่ศึกษาผ่านแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ จากนั้นได้ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน รวมถึงพัฒนาความถูกต้องด้วยเทคนิคปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) ผลการศึกษาพบว่าวิธีการที่เสนอสามารถหาน้ำหนักรถบรรทุกได้มีประสิทธิภาพดี โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 3.75

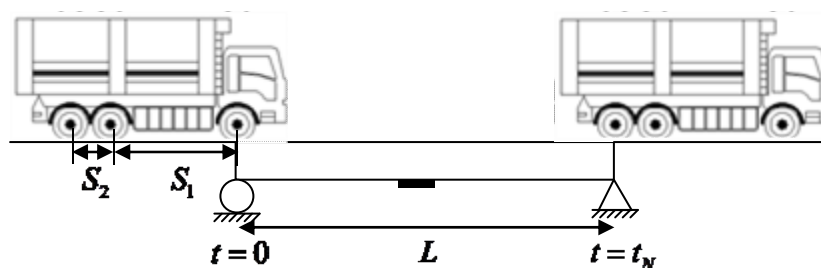
จากงานวิจัยในอดีตทั้งหมดข้างต้น พบว่าวิธีการจำแนกประเภทรถบรรทุกที่ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในรูปแบบของ FAD โดยใช้เพียงสัญญาณความเครียดของสะพานนั้น พบว่าระเบียบวิธีที่เสนอโดย ศุภชัย และ พัทธพงษ์ (2558) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในขณะที่วิธีการวิเคราะห์น้ำหนักรถบรรทุกนั้น หากวิเคราะห์โดยใช้เส้นอิทธิพลนั้นจะทำให้ได้คำตอบอย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องสูงเฉพาะน้ำหนักรวมรถบรรทุกทางสถิติ แต่หากต้องการความ

ถูกต้องของน้ำหนักเพลา และน้ำหนักทางพลศาสตร์ด้วยนั้นควรใช้วิธีที่วิเคราะห์ผ่านพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพาน และงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาการหาน้ำหนักบรรทุกทุกจริงในภาคสนาม จึงมุ่งเน้นที่การประยุกต์ใช้แทนระบบชั่งน้ำหนัก จึงเลือกใช้วิธีการหาน้ำหนักโดยใช้เส้นอิทธิพลตามวิธีการของ O'Brien และคณะ (2006) เพื่อความรวดเร็วและพิจารณาเพียงค่าน้ำหนักรวมทางสถิติ

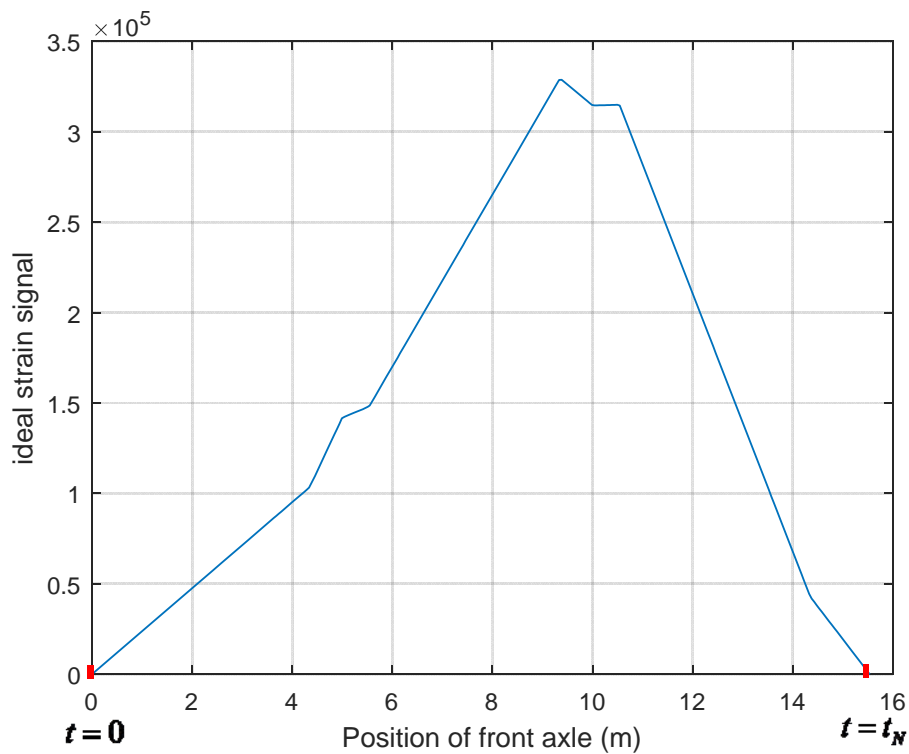
## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 หลักการหาเส้นอิทธิพล (Concept of Influence line extraction)

เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพานจะได้เวลาเริ่มต้นของข้อมูล  $t = 0$  และเมื่อเพลาสุดท้ายออกจากสะพานจะได้เวลาทั้งหมดที่รถเคลื่อนที่บนสะพาน  $t = t_N$  ดังภาพที่ 2-1 จะได้สัญญาณความเครียดที่ติดไว้ที่ใต้ท้องสะพาน ซึ่งสัญญาณความเครียดที่วัดมาได้ตามทฤษฎีจะได้อ้างอิงที่ 2-2 โดยที่  $s_1$  คือ ระยะห่างจากกึ่งกลางเพลาแรก ถึงกึ่งกลางเพลาที่ 2 และ  $s_2$  คือ ระยะห่างจากกึ่งกลางเพลาที่ 2 ถึงกึ่งกลางเพลาที่ 3



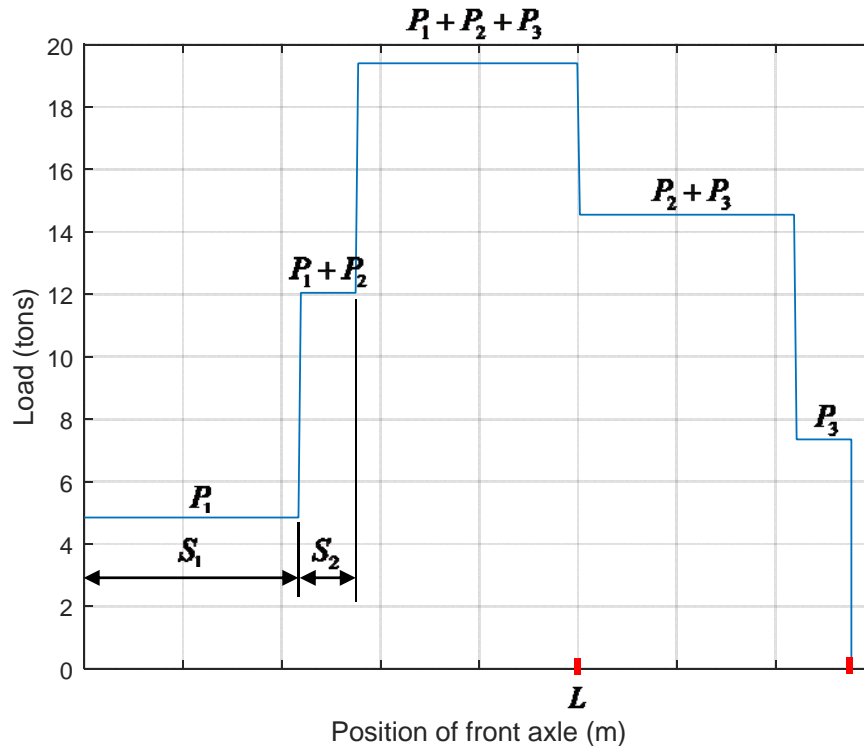
ภาพที่ 2-1 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน



ภาพที่ 2-2 สัญญาณความเครียดของสะพานทางทฤษฎี

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

$$x = vt \quad (2-1)$$



ภาพที่ 2-3 น้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับสะพานและตำแหน่งของเพลารถ

โดยที่  $P_1$ ,  $P_2$  และ  $P_3$  คือ น้ำหนักเพลาคี่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ น้ำหนักรถที่กระทำกับสะพาน จะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของสะพานและระยะห่างเพลาคี่แต่ละเพลาคี่

นำข้อมูลสัญญาณความเครียด ระยะเวลาที่เพลาคี่เคลื่อนที่ผ่านสะพานและน้ำหนักเพลาคี่ไป คำนวณหาเส้นอิทธิพล (influence line) ของสะพานด้วยทฤษฎีของ O'Brien และคณะ (2006) จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นจากรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน คำนวณย้อนกลับ ไปเป็นเส้นอิทธิพลซึ่งต้องทราบขนาดของน้ำหนักเพลาคี่ ระยะห่างของเพลาคี่ และความเร็วในการ เคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก ส่วนความเครียดนั้นได้มาจากติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดไว้ที่ห้อง สะพาน ซึ่งผลความเครียดจากทฤษฎีสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเพลาคี่และความเครียด ตรวจวัดในรูปของเส้นอิทธิพลได้ดังสมการที่ (2-2)

$$Z_k^T = \sum_{i=1}^N A_i I_{(k-C_i)} \quad (2-2)$$

โดยที่  $Z_k^T$  คือ เวกเตอร์ความเครียดทางทฤษฎีที่วัดได้ในครั้งที่  $k$   
 $A_i$  คือ น้ำหนักเพลลา  
 $I$  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 สามารถจัดรูปได้ดังนี้

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

โดยที่  $K$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $E$  คือ จำนวนข้อมูลของเพลลาใดๆที่อยู่ในช่วงของสะพาน

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

โดยที่  $\mathbf{W}_{K,E}$  คือ เมทริกซ์ของน้ำหนักเพลลาในแนวทแยง และตำแหน่งของเพลลาถัดมาจะอยู่ในที่ห่างแถวของน้ำหนักแต่ละเพลลาเท่ากับ  $C_i$

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

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

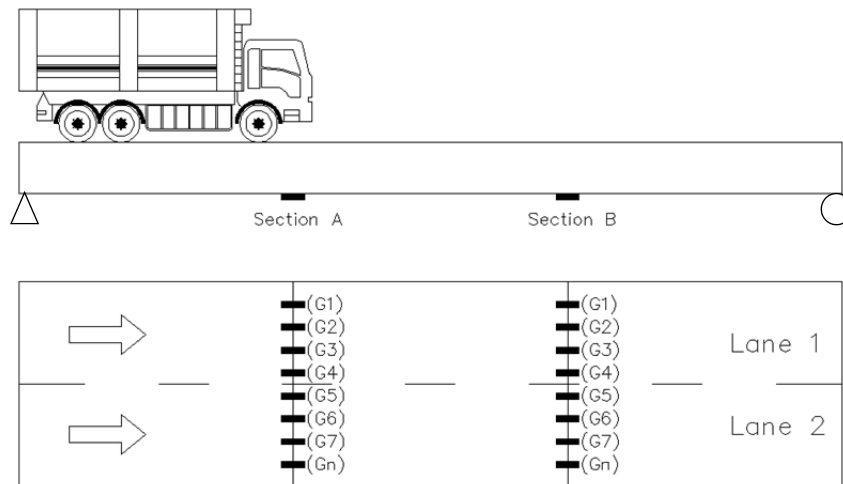
โดยที่  $\mathbf{W}^+ = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T$

## 2.2.2 การหาความเร็ว ตำแหน่งเพลลา ระยะห่างเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (FAD)

### 1) การหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การใช้สัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานทั้งสองหน้าตัดมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความเร็ว จะพบว่าหากสัญญาณความเครียดมีลักษณะความสูงในบริเวณที่ตรวจวัดไม่มาก ทำให้สังเกตเห็นยอดในบริเวณจุดตรวจวัดได้ไม่ชัดเจนนัก จึงคำนวณหาความเร็วไม่ได้ ดังนั้นการปรับปรุงสัญญาณความเครียดให้มีความชัดเจนบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำในการนำไปหาความเร็วรถบรรทุก ทั้งนี้นอกจากจะสามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้แล้วยังสามารถใช้สัญญาณความเครียดดังกล่าวคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกได้ ซึ่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดจะติดตั้งจำนวนหลายตัวในหน้าตัดสะพานเดียวกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงสัญญาณความเครียดในการ

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



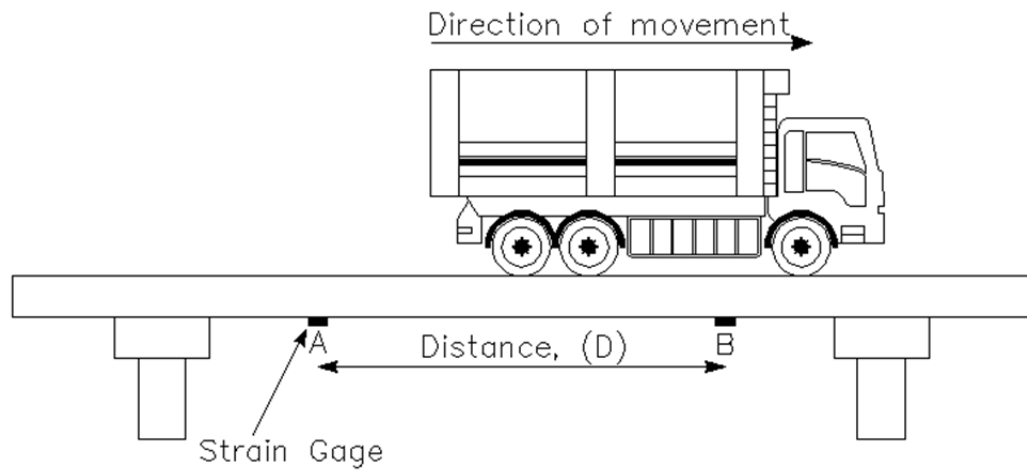
ภาพที่ 2-4 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของสะพาน

$$\mathbf{z}_i = \left| \sum \mathbf{z}_i^{lane1} - \sum \mathbf{z}_i^{lane2} \right| \quad (2-8)$$

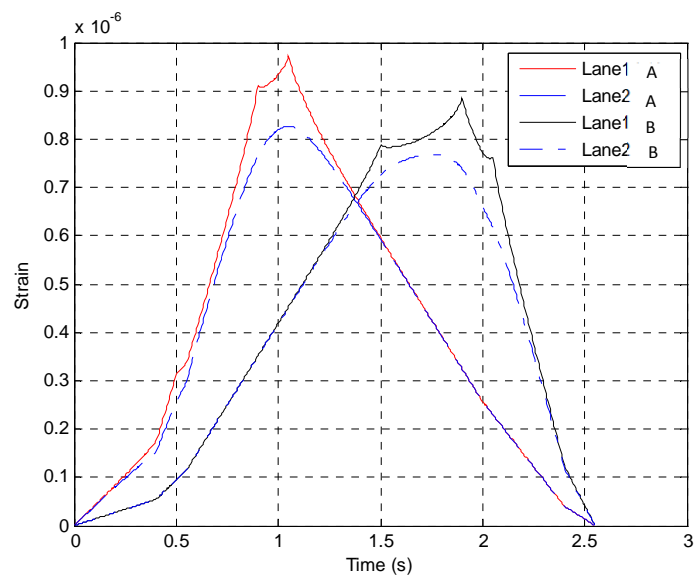
โดยที่  $\mathbf{z}_i$  คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่  $i$  ที่ปรับปรุงค่าแล้ว  
 $\sum \mathbf{z}_i^{lane1}$  คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่  $i$  ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 1  
 $\sum \mathbf{z}_i^{lane2}$  คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่  $i$  ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 2

เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานในช่องจราจรที่ 1 โดยติดมาตรวัดความเครียดที่หน้าตัด A และ B ห่างกันดังภาพที่ 2-5 จะได้สัญญาณความเครียดที่วัดได้ทั้ง 2 หน้าตัด ในแต่ละช่องจราจรจะได้ดังภาพที่ 2-6 และจะถูกนำมาปรับปรุงสัญญาณดังสมการที่ (2-8) เมื่อปรับปรุงสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณความเครียดดังภาพที่ 2-7 ซึ่งจะให้เห็นยอดของสัญญาณชัดเจนมากยิ่งขึ้น หลังจากได้สัญญาณที่ปรับปรุงแล้วจะไปหาความเร็วด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังภาพที่ 2-8

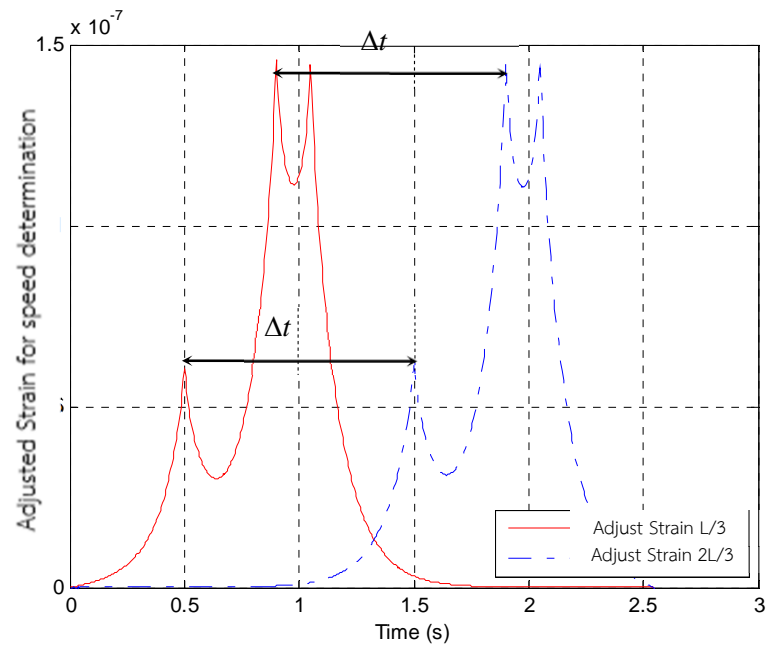




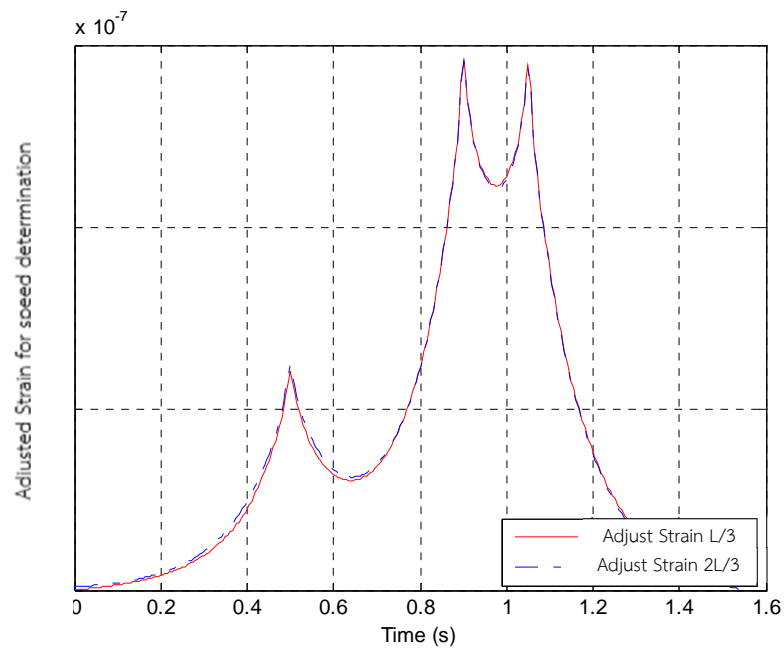
ภาพที่ 2-5 ระยะห่างระหว่างหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดสองหน้าตัดสำหรับใช้  
คำนวณหาความเร็ว



ภาพที่ 2-6 ผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร



ภาพที่ 2-7 การปรับปรุงคุณภาพสัญญาณความเครียดระหว่างช่องจราจร  
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 แสดงถึงความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวของสัญญาณความเครียดคู่่นั้น หากมีค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้ -1 แสดงว่าสัญญาณความเครียดคู่่นั้นมีความสัมพันธ์กันในทิศทางที่ตรงกันข้าม และหากค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าสัญญาณความเครียดคู่่นั้นมีความสัมพันธ์กันน้อยมากหรือแทบไม่มีความสัมพันธ์กัน

$$\text{Correlation Coef.} = \frac{N\mathbf{Z}_A^T\mathbf{Z}_B - \sum\mathbf{Z}_A\sum\mathbf{Z}_B}{\sqrt{[N\sum\mathbf{Z}_A^2 - (\sum\mathbf{Z}_A)^2][N\sum\mathbf{Z}_B^2 - (\sum\mathbf{Z}_B)^2]}} \quad (2-9)$$

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

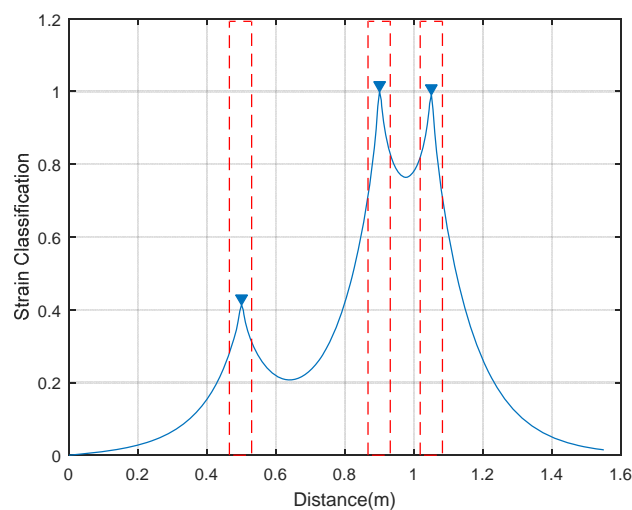
โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับการปรับส่วนต่างของเวลา  $\Delta t$  ระหว่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัด หากสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดซ้อนทับกับพอดี ค่า  $\Delta t$  นั้นจะเป็นค่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงที่สุด (เข้าใกล้ 1 มากที่สุด) ซึ่งค่า  $\Delta t$  นี้จะเป็นเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากบริเวณหน้าตัด 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  
 $\Delta t$  คือ เวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ซึ่งเป็นส่วนต่างเวลาที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่ามากที่สุด

## 2) การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB

การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาจะวิเคราะห์จากลักษณะทางกายภาพของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว โดยเลือกใช้สัญญาณความเครียดบริเวณที่ล้อรถเหยียบในหน้าตัด  $L/2$  เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดการโก่งตัวมากกว่าบริเวณอื่น การหาระยะช่วงเพลลาด้วยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB ตรวจสอบยอดของสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะห่างเพลลาที่มากที่สุดที่คำนวณได้ ดังภาพที่ 2-9 เพื่อให้ได้ยอดสัญญาณที่บ่งบอกตำแหน่งเพลลาครบทุก แล้วจึงคำนวณระยะห่างเพลลาจากตำแหน่งยอดสัญญาณที่ตรวจวัด



ภาพที่ 2-9 สัญญาณระบุตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก

โดยสัญญาณความเครียดที่นำมาใช้ในการหาจำนวนเพลลานั้นจะเป็นค่าความเครียดที่เป็นค่าความเครียดที่ปรับค่า (normalized) ให้เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless) ด้วยการหารค่าสูงสุด เนื่องจากการหาจำนวนเพลลานั้นพิจารณาเพียงรูปร่างของสัญญาณเท่านั้น

### 2.2.3 การหาน้ำหนักบรรทุกทุกจากเส้นอิทธิพล

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 เมทริกซ์ของน้ำหนักเพลาดัง  
 $\mathbf{B}$  คือ เมทริกซ์ของเส้นอิทธิพลตามจำนวนเพลาดัง

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

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

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

ระดับความถูกต้องของน้ำหนักรถบรรทุกที่วิเคราะห์ได้ 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 น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ได้จากด้านชั่งน้ำหนัก

#### 2.2.4 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transformation, FFT)

การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาหรือสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของเวลาให้อยู่ในรูปของสัญญาณในโดเมนความถี่หรือสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าสเปกตรัม (spectrum) ซึ่งผลตอบสนองการสั่นสะเทือนทางพลศาสตร์ของสะพานในโครงการนี้จะทำการสั่นสะเทือนสะพานเพื่อให้สะพานสั่นไหว โดยการกระโดดที่บริเวณกึ่งกลางสะพาน 1 ครั้ง การสั่นไหวจะถูกถ่ายไปยังหัววัดความเร่ง (acceleration) จะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในโดเมนของความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เป็นการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดที่ 1 โดยเมื่อทราบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแล้วจะทำให้ทราบว่า การทดสอบควรใช้ความถี่ในการตรวจวัดข้อมูลที่อัตราเท่าใด โดยปกติในการทดสอบทางพลศาสตร์ จะนิยมตรวจวัดสัญญาณทดสอบที่ความถี่ไม่น้อยกว่าสิบเท่าของความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1

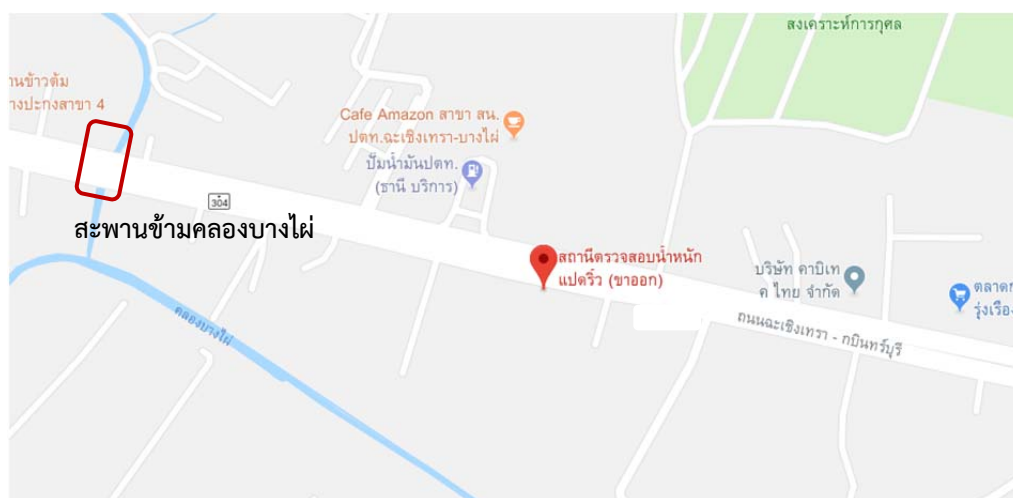
### บทที่ 3

#### วิธีการศึกษาวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการศึกษาวิจัยซึ่งเป็นการศึกษาด้วยการทดสอบภาคสนาม เพื่อสำรวจข้อมูลจากรถบรรทุกจริง และตรวจวัดผลตอบสนองของความเครียดจากโครงสร้างสะพานจริง เพื่อนำมาวิเคราะห์การจำแนกประเภทรถบรรทุกและการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยงานวิจัยนี้เลือกสะพานทดสอบซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับด่านชั่งน้ำหนักถาวร เพื่อสามารถทราบน้ำหนักรถบรรทุกที่แท้จริงจากด่านชั่งน้ำหนัก ทำให้สามารถประเมินระดับความถูกต้องของระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้

#### 3.1 สถานที่ศึกษา

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบจึงเลือกสะพานที่อยู่ใกล้ด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกซึ่งเป็นด่านชั่งน้ำหนักที่ไม่หยุดนิ่ง ตั้งอยู่บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 304 กม.54+700 (ขาเข้า) ตำบลบางไผ่ อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา ดังภาพที่ 3-5 สะพานอยู่บนพิกัด 13.660291N, 101.119360E เป็นสะพานข้ามคลองบางไผ่ ห่างจากด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุก 500 เมตร ตำบลบางไผ่ อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา ดังภาพที่ 3-1 ซึ่งเป็นสะพานคอนกรีตแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงเทห์บหน้า 2 ช่องจราจรที่มีทิศทางการสัญจรของยานพาหนะทิศทางเดียวกัน สะพานมีความกว้าง 12 เมตร ยาว 30 เมตร หนา 50 เซนติเมตร เป็นสะพาน 3 ช่วงโดยมีความยาวช่วงละ 10 เมตร โดยลักษณะของสะพานเป็นไปดังภาพที่ 3-2 ถึง 3-4



ภาพที่ 3-1 แผนที่แสดงสถานที่ทดสอบ



ภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-3 ลักษณะสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-4 ลักษณะใต้สะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-5 ด้านตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกทุกจังหวัดฉะเชิงเทรา



## 3.2 การเตรียมการทดสอบ

### 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

#### 1) มาตรฐานวัดความเครียด (Strain gauge)

มาตรฐานวัดความเครียด คือ มาตรฐานวัดค่าการยืดหรือหดตัวของวัสดุ โดยมาตรฐานจะให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถแปลงเป็นค่าความเครียดได้ โดยมาตรฐานวัดความเครียดที่ใช้เป็นมาตรฐานวัดความเครียดสำหรับติดที่ผิวคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 มาตรฐานวัดความเครียดสำหรับพื้นผิวคอนกรีต

#### 2) ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Signal transformer module)

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



ภาพที่ 3-7 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด

#### 3) อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition unit)

อุปกรณ์รวมสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลจริงในงานวิจัยเพื่อแปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่าน โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้นในลักษณะเวลาจริง โดยการศึกษาที่ใช้

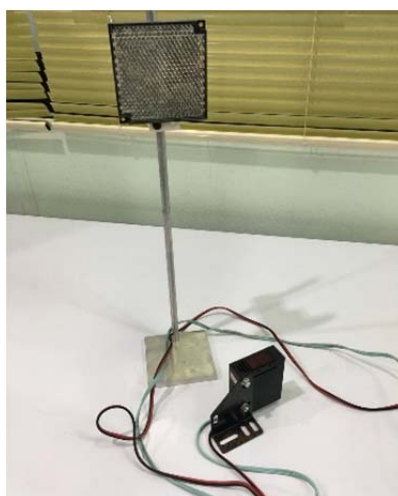
อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178 เพื่อรวมสัญญาณจากชุดแปลงสัญญาณความถี่ขนาด 8 ช่องสัญญาณแปลงข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม NI Signal Express 2013 โดยลักษณะอุปกรณ์รวมสัญญาณที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 อุปกรณ์รวมสัญญาณ ยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178

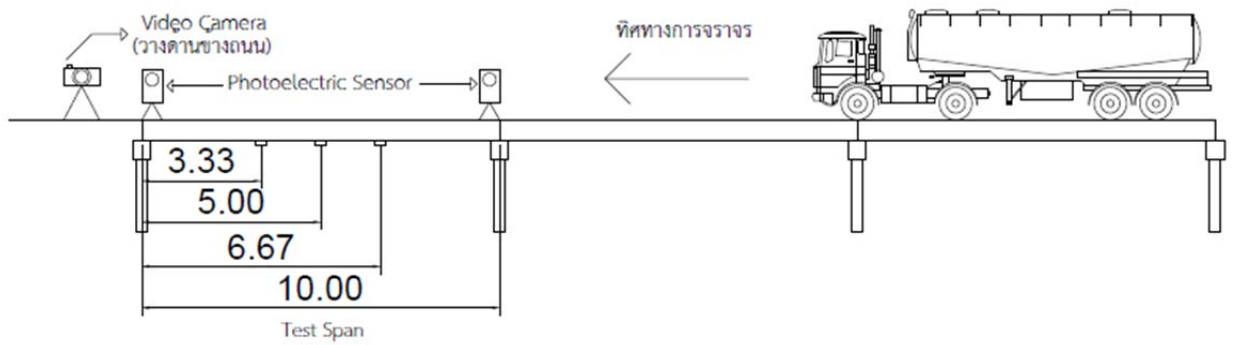
#### 4) เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง (Photoelectric sensor and reflector)

เพื่อให้สามารถทราบตำแหน่งและเวลาที่เพลารถบรรทุกเคลื่อนเข้าเข้าและออกช่วงสะพาน เพื่อใช้ในการประเมินความถูกต้องของการจำแนกประเภทรถบรรทุกจากระยะช่วงเพลลา จึงจำเป็นต้องติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุด้วยเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง โดยอุปกรณ์ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุและแผ่นสะท้อนแสง โดยปกติเมื่อไม่มีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ จะแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าคงที่ แต่เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านทำให้เกิดการสะท้อนแสงกลับหาเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ ซึ่งจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงไป โดยมีลักษณะดังภาพที่ 3-9

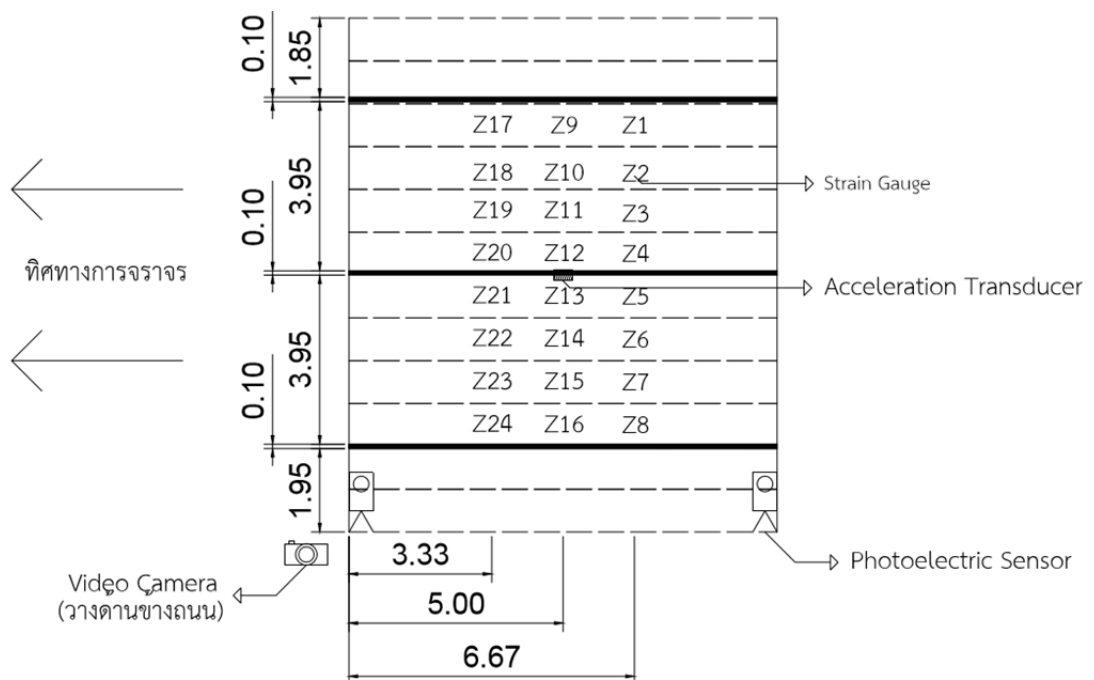


ภาพที่ 3-9 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุด้วยแสงและแผ่นสะท้อนแสง





ภาพที่ 3-11 ภาพด้านข้างแสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-12 ภาพแปลนแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-13 การติดตั้งมาตรฐานวัดความเครียด

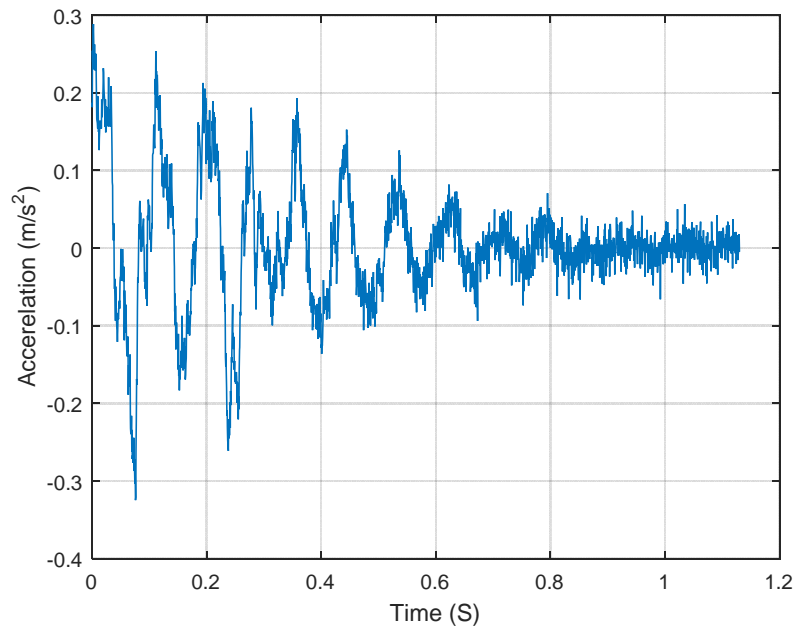
สำหรับอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งบริเวณด้านตรวจสอบน้ำหนักถาวร โดยประกอบไปด้วย

- 1) แถบบอกระยะ เพื่อวัดระยะห่างระหว่างเพลลาของรถบรรทุกที่เข้ามายังด้านตรวจสอบน้ำหนัก ดังภาพที่ 3-18
- 2) กล้องบันทึกภาพนิ่ง เพื่อบันทึกภาพนิ่งของรถบรรทุก นำไปใช้ในการวัดระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก ดังภาพที่ 3-19 ถึง 3-21

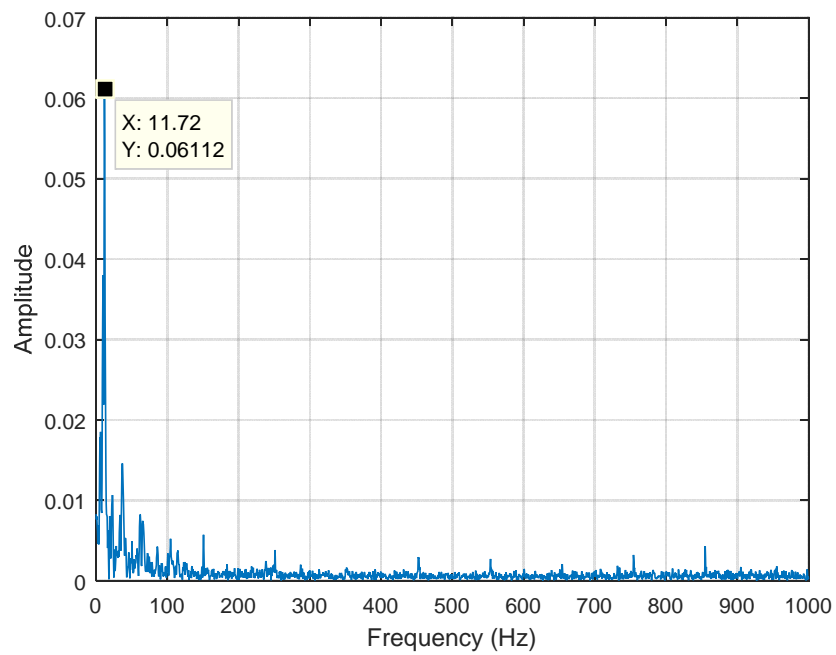
### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน โดยเริ่มจากการขอข้อมูลน้ำหนักของรถบรรทุกที่ผ่านเข้าสู่ด้านตรวจสอบน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการบันทึกผลของความเครียดของสะพานที่ใช้ทำการทดสอบ นำผลของความเครียดที่ได้ไปหาเส้นอิทธิพลทางสถิติด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีการกรองการวัดเส้นอิทธิพล จากการที่ได้ทำการทดสอบในภาคสนามเพื่อที่จะได้ค่าน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่เป็นค่าจริง โดยขั้นตอนและรายละเอียดในการดำเนินการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) หาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยการทดสอบการสั่นไหวแบบอิสระด้วยหัววัดความเร่ง โดยการติดตั้งหัววัดความเร่งไว้ที่กึ่งกลางของสะพาน ทำการกระโดดที่ตำแหน่งหัววัดความเร่ง หัววัดความเร่งจะวัดความสั่นไหวของสะพานออกมาดังภาพที่ 3-14 นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน FFT ในโปรแกรม MATLAB จะได้ค่าแอมพลิจูดและความถี่ธรรมชาติของสะพานดังภาพที่ 3-15 โดยพบว่าสะพานที่ทดสอบนี้มีค่าความถี่ธรรมชาติที่ 11.72 Hz ดังนั้นการตรวจวัดสัญญาณความเครียดจะต้องตรวจวัดที่ความถี่ที่ไม่น้อยกว่า 117.2 Hz อย่างไรก็ตามเครื่องรวมสัญญาณที่ใช้สามารถตรวจวัดได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 2,000 Hz จนถึง 25,000 Hz เลยทีเดียว

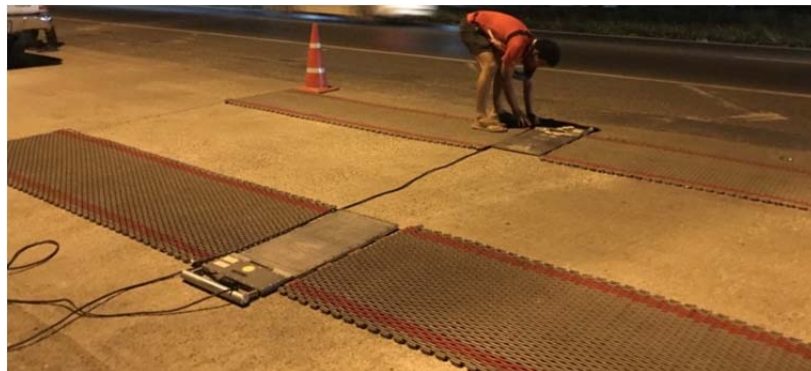


ภาพที่ 3-14 สัญญาณความเร่งของสะพานจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระด้วยการกระโดดทดสอบ



ภาพที่ 3-15 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งจากการทดสอบการสั่นไหวอิสระเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

2) ชั่งน้ำหนักและตรวจวัดขนาดรถบรรทุกที่ใช้ปรับเทียบสำหรับหาเส้นอิทธิพลของสะพานรถบรรทุกที่นำไปทดสอบเพื่อสังเคราะห์เส้นอิทธิพลของสะพานนั้นจำเป็นจะต้องทราบน้ำหนักเพลาลูกก่อน การตรวจวัดน้ำหนักเพลาลูกทำได้โดยนำรถบรรทุกมาจอดชั่งน้ำหนักทางสถิตยบนตราชั่งน้ำหนักเพลาลูกของรถบรรทุกแบบเคลื่อนย้ายได้ (portable axle truck weight scale) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่ประจำด่านตรวจสอบน้ำหนัก โดยภาพที่ 3-16 แสดงลักษณะของตราชั่งน้ำหนักเพลาลูกซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กนำมาติดตั้งบนพื้นถนน และให้เคลื่อนรถบรรทุกมาจอดให้ล้อทั้งสองฝั่งของรถทับบนตราชั่งพอดีและอ่านค่าน้ำหนักเพลาลูกขณะหยุดนิ่งดังภาพที่ 3-17 โดยในขณะที่รถบรรทุกจอดอยู่ นั้น จะทำการตรวจวัดขนาดรถบรรทุกไปพร้อมกันด้วย โดยขนาดที่ต้องทราบได้แก่ ระยะช่วงล้อและระยะช่วงเพลาลูก ซึ่งหลังจากรถบรรทุกทดสอบได้ชั่งน้ำหนักเพลาลูกและวัดขนาดเรียบร้อยแล้ว จะเคลื่อนตัวไปยังสะพานที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ และบันทึกสัญญาณความเครียดเพื่อนำไปใช้สังเคราะห์เส้นอิทธิพลของสะพานต่อไป



ภาพที่ 3-16 ตราชั่งน้ำหนักเพลาลูกของรถบรรทุกแบบเคลื่อนย้ายได้



ภาพที่ 3-17 รถบรรทุกขณะชั่งบนตราชั่งน้ำหนักเพลาลูก

รถบรรทุกทดสอบที่ได้ชั่งน้ำหนักเพลาและวัดขนาด สำหรับใช้สังเคราะห์เส้นอิทธิพลของสะพานมีทั้งหมดจำนวน 6 คัน โดยเป็นรถบรรทุกประเภท 3 เพลา 5 เพลา และ 6 เพลา รายละเอียดดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการเปรียบเทียบ

คันที่	จำนวนเพลา	น้ำหนักเพลา (กิโลกรัม)						ระยะช่วงเพลา (เมตร)					น้ำหนักรวม (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) ตรวจสอบข้อมูลของรถบรรทุกทดสอบการหาน้ำหนัก ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกจริงที่สัญจรตามปกติในเส้นทางหลวงที่ทดสอบนั้น การสำรวจข้อมูลจะประกอบด้วย 1) การบันทึกข้อมูลน้ำหนักรวมและการวัดระยะช่วงเพลาของรถบรรทุก ณ ตำแหน่งน้ำหนักถาวร และ 2) การตรวจวัดสัญญาณความเครียดสำหรับใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากระบบ FAD B-WIM ที่นำเสนอ

โดยในการบันทึกข้อมูลรถบรรทุกที่ด่านชั่งน้ำหนักถาวรมานั้น ผู้สำรวจข้อมูลจำนวน 1 คน จะบันทึกจากหน้าจอของแท่นชั่งน้ำหนักรวมของรถบรรทุกในสถานี ซึ่งควบคุมโดยเจ้าหน้าที่ประจำด่าน ทั้งนี้ข้อมูลน้ำหนักที่ได้จะได้เพียงน้ำหนักรวมโดยประมาณของรถบรรทุกเท่านั้น เนื่องจากรถบรรทุกมิได้หยุดจอดบนแท่นชั่ง แต่เคลื่อนผ่านแท่นชั่งด้วยความเร็วที่ช้ามาก ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการคอยแถวเข้าชั่งที่แท่นชั่งเป็นเวลานานจนเกิดการติดขัดจราจรบนเส้นทางหลัก และเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนออกจากแท่นชั่งแล้ว ผู้สำรวจข้อมูลอีก 1 คนจะบันทึกภาพรถบรรทุกขณะที่ผ่านแถบวัดระยะที่ตั้งไว้สำหรับเทียบสัดส่วนในการประมาณระยะช่วงเพลาจากภาพถ่าย อีกทั้งทำให้ทราบประเภทรถบรรทุกในแต่ละกรณี เพื่อใช้ในการประเมินความถูกต้องของกระบวนการจำแนกประเภทและหาน้ำหนักรถบรรทุกจากสัญญาณความเครียด

ขณะที่รถบรรทุกที่ได้เข้าชั่งน้ำหนักที่ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแล้ว ได้เคลื่อนมาใกล้ถึงสะพาน ผู้สำรวจข้อมูลอีก 2 รายจะเตรียมบันทึกข้อมูลรถบรรทุก บันทึกเวลา บันทึกภาพวิดีโอ และบันทึกสัญญาณความเครียดของสะพานด้วยการประสานงานกับผู้สำรวจข้อมูลที่ถ่ายภาพรถบรรทุก ณ ตำแหน่งด้วยวิทยุสื่อสาร ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีที่นำเสนอในบทที่ 2 ต่อไป โดยในการ



ตรวจวัดสัญญาณความเครียดนั้นจะพิจารณาเฉพาะรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานเพียงคันเดียวเท่านั้น เนื่องจากขอบเขตของวิธีการวิเคราะห์ยังจำกัดที่การหาหน้าหนักรถบรรทุกที่ละคัน สัญญาณความเครียดของสะพานถูกบันทึกที่ความถี่ 2,000 Hz และนำมากรองสัญญาณรบกวนและลดทอนจำนวนข้อมูลในภายหลังด้วยสัดส่วน 10:1 ให้เหลือสัญญาณตรวจวัดที่ความถี่ 200 Hz (มากกว่า 117.2 Hz) ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป สาเหตุที่ไม่ใช้สัญญาณความเครียดที่ความถี่ 2,000 Hz มาใช้ในการวิเคราะห์โดยตรงนั้นเป็นเพราะเพื่อต้องการลดเวลาการคำนวณเชิงตัวเลข และการใช้ข้อมูลที่มากจนเกินไปนั้นก็ได้ช่วยให้ระดับความถูกต้องเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างไร



ภาพที่ 3-18 แถบวัดระยะ



ภาพที่ 3-19 การบันทึกภาพนิ่งระยะห่างระหว่างเพลลา ที่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก



ภาพที่ 3-20 ตัวอย่างภาพที่ได้จากการบันทึกภาพนิ่งของรถบรรทุก  
ขณะเข้ามายังด่านตรวจสอบน้ำหนัก

13\_Part2\_3axle  
0.1312 : 1  
s 1-2 = 4.45 m  
0.1316 : 1  
s 2-3 = 1.60 m



ภาพที่ 3-21 ตัวอย่างภาพนิ่งที่ได้จากการบันทึกที่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก  
เพื่อหาระยะห่างระหว่างเพลานำโปรแกรม AutoCAD



ภาพที่ 3-22 การปฏิบัติงานที่ได้สะพาน

### 3.4 จำนวนรถบรรทุกทดสอบ

การทดสอบพิจารณารถบรรทุกประเภท 2 เพลา จนถึง 6 เพลา ซึ่งได้เข้าช่วงน้ำหนักรถที่ด่าน ชั่งน้ำหนักถาวรและเคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยไม่มียานพาหนะอื่นเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกัน โดยการทดสอบได้สำรวจข้อมูลจำนวน 3 คับ เป็นเวลารวม 12 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงเวลากลางวันนั้นถึงแม้จะมีปริมาณรถบรรทุกมาก แต่จำนวนรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ผ่านสะพานเพียงคันเดียวนั้นพบได้ยาก ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกสำรวจข้อมูลในช่วงเวลากลางคืนซึ่งมีรถบรรทุกที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัด และเคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยไม่มียานพาหนะอื่นเคลื่อนที่พร้อมกัน โดยได้สำรวจและบันทึกข้อมูลรถบรรทุกเป็นจำนวนทั้งหมด 55 คัน ประกอบด้วย รถบรรทุก 2 เพลา จำนวน 12 คัน รถบรรทุก 3 เพลา จำนวน 11 คัน รถบรรทุก 4 เพลา จำนวน 2 คัน รถบรรทุก 5 เพลา จำนวน 9 คัน และรถบรรทุก 6 เพลา จำนวน 21 คัน โดยมีรายละเอียดของน้ำหนักรวมทั้งที่ได้จากด่านชั่งน้ำหนักถาวร และระยะช่วงเพลาที่วัดได้จากภาพถ่าย และความเร็วจนขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน แสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการขนน้ำหนักรวมที่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก

คันที่	จำนวน เพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
1	2	60.597	11,470	5.000				
2	2	52.200	12,060	4.698				
3	2	49.312	12,160	4.181				
4	2	62.946	13,130	5.159				
5	2	45.590	8,430	4.913				
6	2	53.617	13,310	4.837				
7	2	54.497	13,000	5.300				
8	2	69.074	7,900	4.200				
9	2	58.092	10,570	4.200				
10	2	42.988	14,380	4.700				
11	2	47.424	11,280	4.830				
12	2	47.424	10,800	3.260				
13	3	52.163	20,220	4.278	1.075			
14	3	46.756	22,000	3.580	1.140			
15	3	40.577	24,700	3.626	1.084			
16	3	57.908	19,390	4.450	1.600			
17	3	54.537	24,700	3.750	1.050			
18	3	35.459	24,700	3.500	1.200			
19	3	43.998	24,070	3.050	1.050			
20	3	46.282	24,700	3.450	1.200			
21	3	45.111	24,100	3.550	1.150			
22	3	42.963	24,580	3.590	1.100			
23	3	31.760	23,020	3.480	1.020			
24	4	46.253	35,000	3.450	6.150	1.200		
25	4	54.497	27,400	1.650	2.630	1.180		
26	5	38.462	39,050	4.150	1.300	4.650	4.350	
27	5	43.841	27,620	4.090	1.330	4.840	4.330	
28	5	36.907	37,300	4.020	1.330	4.910	4.410	
29	5	41.080	37,600	4.200	1.330	4.710	4.400	
30	5	39.312	43,500	4.060	1.300	4.270	4.350	

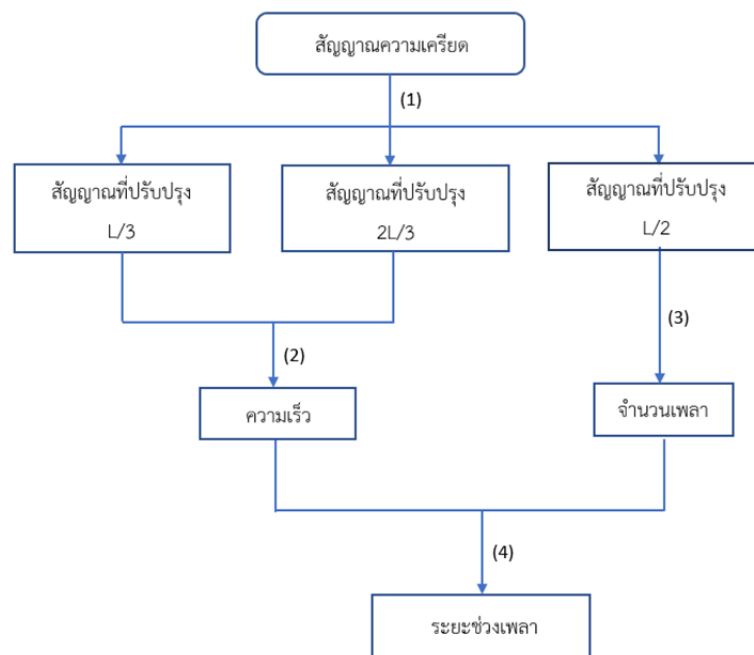
ตารางที่ 3-2 ข้อมูลรถบรรทุกที่ทำการขนน้ำหนักรวมที่ด่านตรวจสอบน้ำหนัก (ต่อ)

คันที่	จำนวน เพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
31	5	43.031	40,000	2.900	1.260	7.840	1.210	
32	5	36.907	19,090	5.260	1.160	9.260	1.210	
33	5	43.474	36,100	3.390	1.350	7.730	1.300	
34	5	52.996	21,000	3.570	1.320	8.870	1.440	
35	6	34.103	46,200	3.400	1.300	7.050	1.300	1.300
36	6	47.484	19,500	3.300	1.300	7.150	1.350	1.350
37	6	45.054	50,500	3.790	1.210	4.370	2.900	1.210
38	6	51.466	50,320	4.020	1.270	5.110	3.780	1.320
39	6	40.133	50,500	3.740	1.210	4.580	3.210	1.210
40	6	41.951	50,500	3.740	1.210	4.210	3.370	1.260
41	6	46.195	47,000	3.210	1.320	6.320	1.840	1.210
42	6	38.441	48,000	1.620	2.870	1.390	4.600	4.590
43	6	39.312	49,700	3.160	1.260	6.470	1.210	1.210
44	6	38.462	49,000	3.390	1.340	7.230	1.400	1.400
45	6	49.378	46,520	3.340	1.300	7.100	1.360	1.420
46	6	42.001	50,500	3.790	1.260	3.680	3.470	1.320
47	6	46.847	50,450	4.000	1.320	4.430	3.520	1.380
48	6	44.024	49,500	1.740	3.160	1.260	4.900	4.260
49	6	50.055	50,500	3.420	1.320	6.470	1.160	1.160
50	6	41.033	50,500	4.080	1.270	4.400	3.240	1.260
51	6	39.696	49,000	3.890	1.260	4.580	3.660	1.330
52	6	42.073	47,380	3.340	1.380	7.010	1.300	1.310
53	6	45.646	49,100	3.430	1.400	7.250	1.370	1.390
54	6	34.817	48,700	3.420	1.320	7.220	1.380	1.340
55	6	36.946	19,600	1.630	2.740	1.260	4.160	3.950

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 3.5.1 การวิเคราะห์การตรวจจับเพลลา ความเร็ว และระยะห่างเพลลา (FAD)

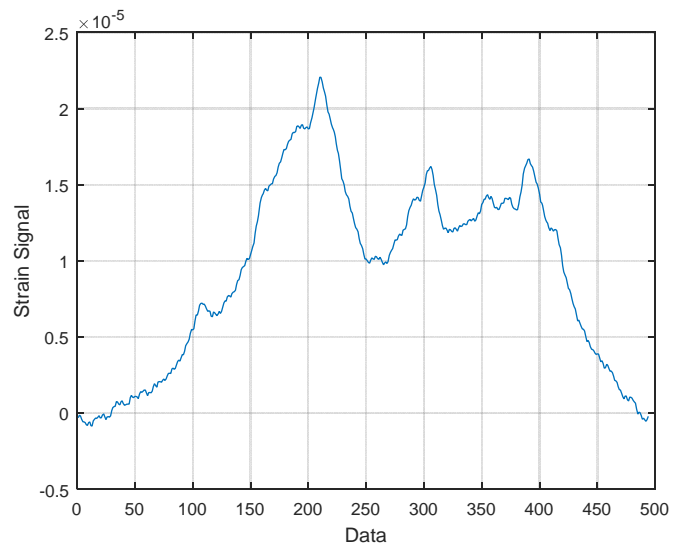
ภาพที่ 3-23 แสดงกระบวนการวิเคราะห์ของระบบ FAD ซึ่งประกอบด้วย การปรับปรุงสัญญาณความเครียด การคำนวณความเร็วรถบรรทุก การระบุจำนวนและตำแหน่งเพลลา และการคำนวณระยะห่างเพลลา



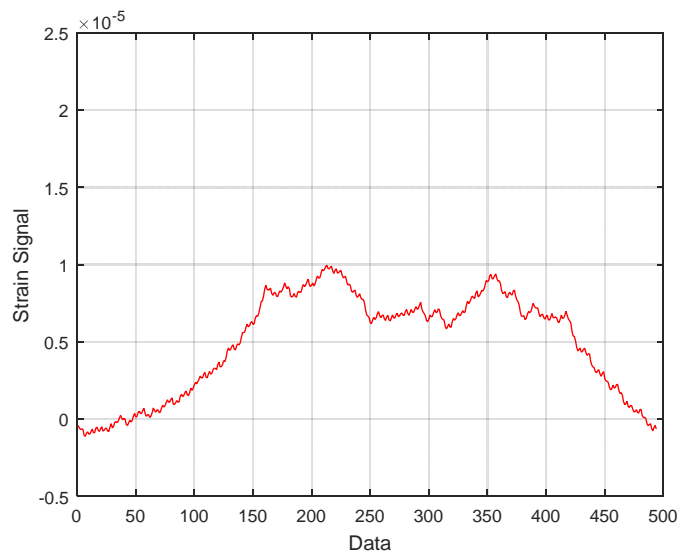
ภาพที่ 3-23 ขั้นตอนการวิเคราะห์ของระบบ FAD ที่ใช้

จากภาพที่ 3-23 กระบวนการในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

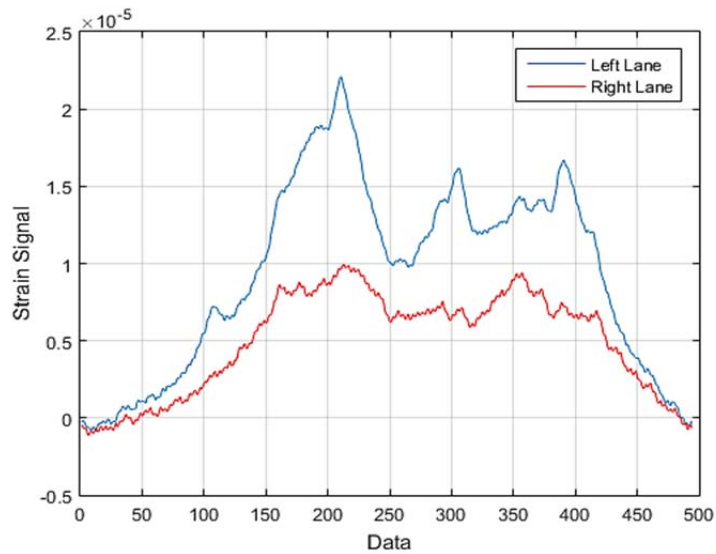
1) ทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อให้มียอดชัดเจนมากยิ่งขึ้น ด้วยการนำผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจรรยาจรรยาหาส่วนต่างดังสมการที่ (2-8) ในแต่ละหน้าตัด ดังภาพที่ 3-24 ถึง 3-27



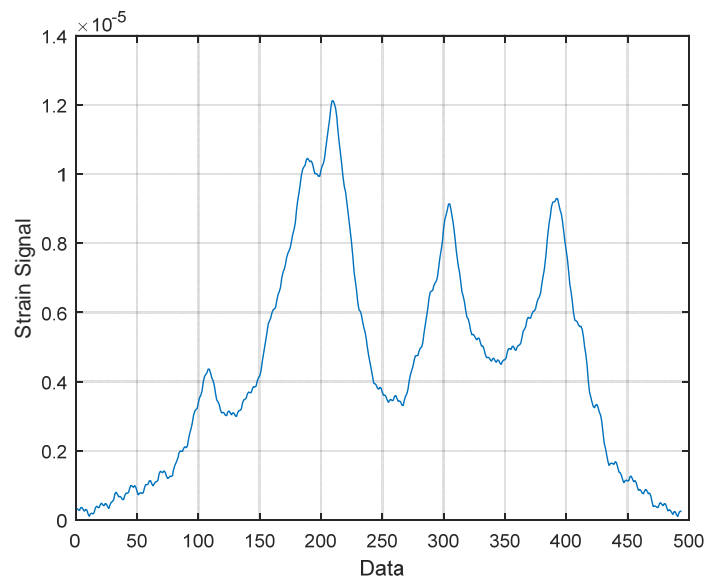
ภาพที่ 3-24 สัญญาณความเครียดในช่องจากรังผึ้งซ้าย



ภาพที่ 3-25 สัญญาณความเครียดในช่องจากรังผึ้งขวา



ภาพที่ 3-26 สัญญาณความเครียดของช่องจราจรซ้ายและขวา

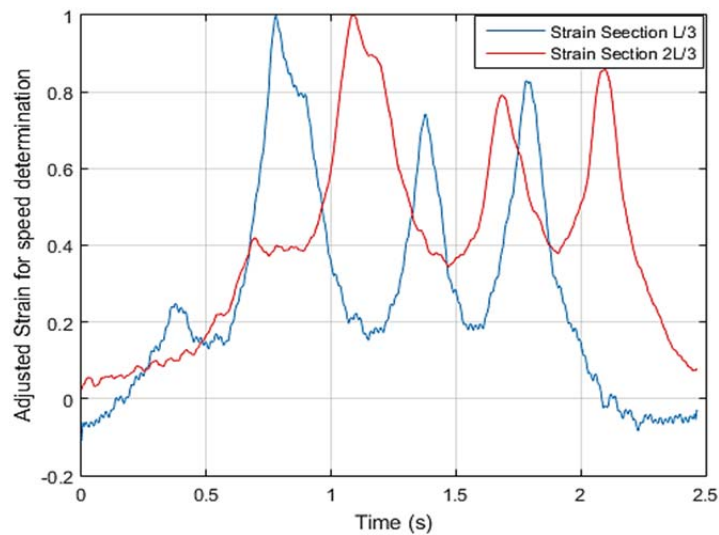


ภาพที่ 3-27 สัญญาณความเครียดที่ทำการปรับปรุ้งแล้ว

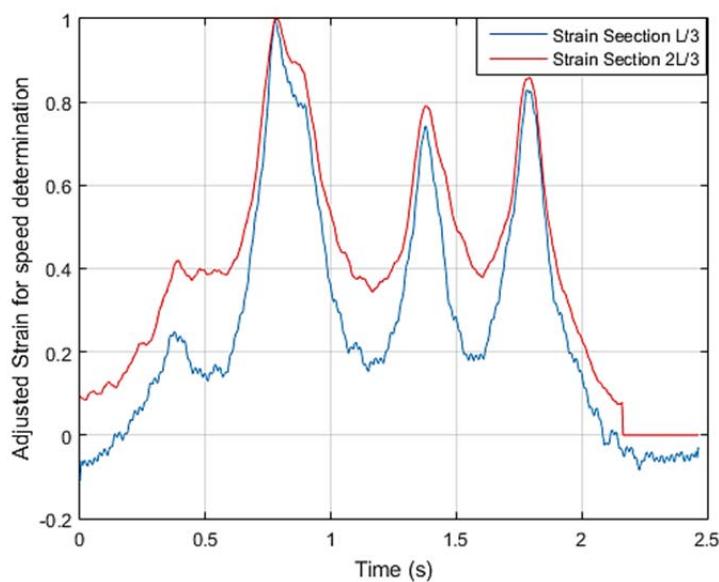
2) นำสัญญาณที่ได้ไปหาความเร็วจาก  $\Delta t$  การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การคำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยการวัดความเครียดจากหน้าตัด 2 หน้าตัด แล้วบันทึกสัญญาณความเครียดที่ได้ พบว่าความเครียดที่ได้ยังไม่มี ความชัดเจนมากพอที่จะบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลาได้ จึงต้องทำการปรับปรุ้งสัญญาณความเครียดก่อน แล้ว



จึงทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยการนำสัญญาณมาซ้อนทับกัน จะได้ตำแหน่งยอดของสัญญาณนั้นตรงกัน และสามารถไปคำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกได้ ดังแสดงในภาพที่ 3-28 และ 3-29 ซึ่งเป็นตัวอย่างของกรณีรถบรรทุก 6 เพลา



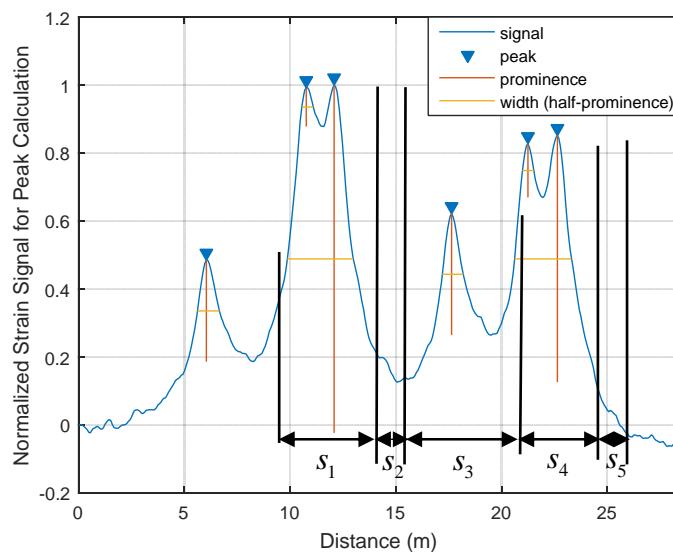
ภาพที่ 3-28 ตัวอย่างผลต่างของสัญญาณความเครียดที่วัดได้ของรถบรรทุก 6 เพลา



ภาพที่ 3-29 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

3) ในส่วนของการวิเคราะห์ระบุจำนวนและตำแหน่งเพลารถ จะเลือกใช้สัญญาณความเครียดที่หน้าตัด  $L/2$  ที่ปรับปรุงสัญญาณแล้วเนื่องจากมีลักษณะที่ชัดเจนที่สุด และอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสะพาน จึงทำให้สามารถพิจารณาตำแหน่งเพลารถได้สะดวกกว่า และใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจจับยอดสัญญาณในกราฟรูปของความเครียดกับระยะเพลารถ ดังภาพที่ 3-30 โดยเลือกค่าที่เกิด peak prominence 0.02 เนื่องจากพิจารณาเป็นร้อยละ 1 ของน้ำหนักบรรทุกที่พิกัดน้ำหนัก 50 ตัน (พิจารณากรณีรถบรรทุกหนักที่สุดคือประเภท 6 เพลารถ) และค่า min peak width พิจารณาเพลารถที่แคบที่สุดสุดประมาณ 1 เมตร ซึ่งจะพิจารณาค้างหนึ่งของความกว้างของยอดสัญญาณที่ติดกันมีค่าประมาณ 0.25 หลังจากได้ตำแหน่งเพลารถ สามารถไปหาระยะห่างเพลารถได้

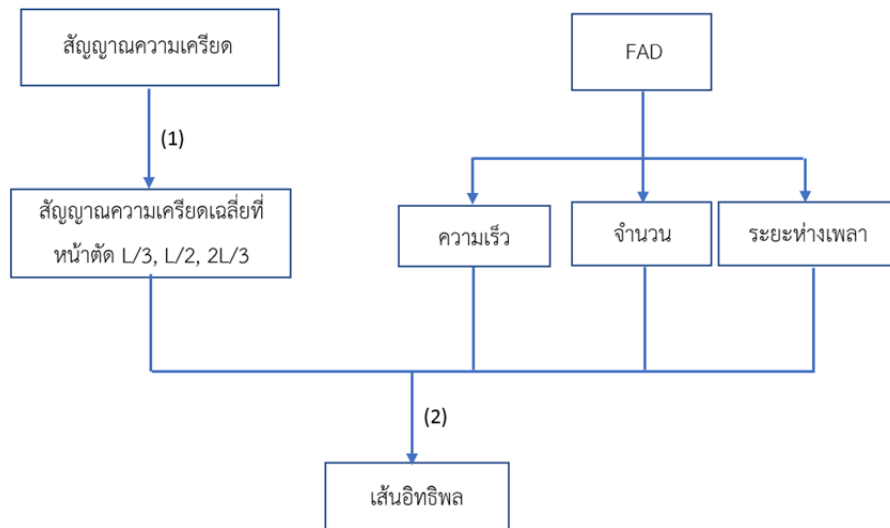
4) จากจำนวนเพลารถและตำแหน่งของเวลาที่ระบุเพลารถบรรทุกได้ตามขั้นตอนที่ 3) เมื่อทราบความเร็วรถบรรทุกที่ได้จากขั้นตอนที่ 2) แล้วจึงสามารถคำนวณหาระยะห่างช่วงเพลารถของรถบรรทุกได้ด้วยสมมติฐานว่ารถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วคงที่



ภาพที่ 3-30 ตัวอย่างผลการตรวจจับยอดเพลารถสำหรับหาระยะห่างระหว่างเพลารถ

### 3.5.2 การวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพล

ภาพที่ 3-31 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นอิทธิพลจากสัญญาณความเครียดของรถบรรทุกเปรียบเทียบซึ่งได้ตรวจวัดน้ำหนักเพลาทงสถิติและทราบระยะช่วงเพลาคงแน่นอนแล้ว โดยใช้วิธีการอินเวอร์สโดยตรงที่เสนอโดย O'Brien และคณะ (2006)



ภาพที่ 3-31 ขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นอิทธิพล

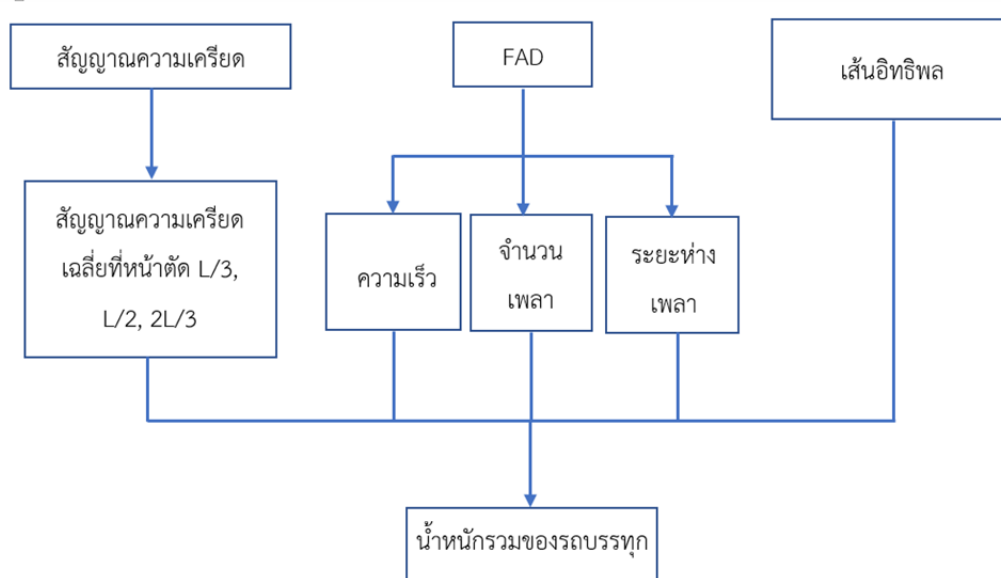
จากภาพที่ 3-31 กระบวนการในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) นำสัญญาณความเครียดของมาตรวัดทุกตัวในหน้าตัดเดียวกันมาหาค่าเฉลี่ย ให้เป็นค่าความเครียดของแต่ละหน้าตัดสะพานเหมือนกัน เนื่องจากเส้นอิทธิพลที่สังเคราะห์อาศัยหลักการวิเคราะห์โครงสร้างคาน

2) ในการเปรียบเทียบจะนำข้อมูลที่ได้จากหัวข้อ 3.5.1 ประกอบไปด้วย จำนวนเพลาคง ความเร็ว และ ระยะห่างระหว่างเพลาคง ไปคำนวณเพื่อสังเคราะห์เส้นอิทธิพล สำหรับนำไปใช้ในขั้นตอนการหาน้ำหนักรถบรรทุกทดสอบจำนวน 55 คันต่อไป

### 3.5.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุก

ภาพที่ 3-32 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุกทดสอบโดยใช้เส้นอิทธิพล ความเครียดของสะพานที่สังเคราะห์ได้ในหัวข้อ 3.5.2



ภาพที่ 3-32 ขั้นตอนการหาน้ำหนักรถบรรทุกทดสอบด้วยเส้นอิทธิพลที่สังเคราะห์ได้

จากเส้นอิทธิพลที่ได้จาก 3.5.2 และนำข้อมูลทั้งหมดจากระบบ FAD ในหัวข้อ 3.5.1 ได้แก่ จำนวนเพลลา ความเร็ว และ ระยะช่วงเพลลา เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำไปคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้จากสัญญาณความเครียดของสะพานที่ตรวจวัดได้ โดยใช้สมการที่ (2-9)

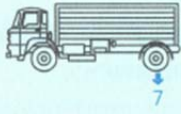



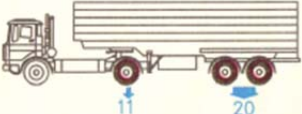
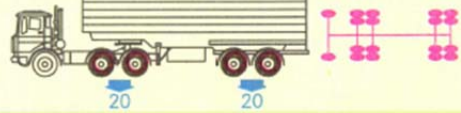
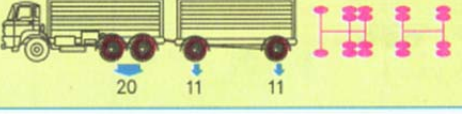
### 3.6 พารามิเตอร์ที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์และปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองของสะพานจากสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ โดยพารามิเตอร์และปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ประเภทของรถบรรทุก อัตราเร็วของรถบรรทุก และน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1) ประเภทรถบรรทุก (truck type)

งานวิจัยนี้อ้างอิงประเภทของรถบรรทุกจากข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวงในประเทศไทย โดยมีรถบรรทุกตั้งแต่ 2 เพลา เป็นต้นไป จนถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลา ซึ่งมีรายละเอียดพิกัดน้ำหนักและลักษณะระยะห่างเพลา ดังตารางที่ 3-3 และ ตารางที่ 3-4 สำหรับประเภทรถบรรทุกที่จะใช้ในการศึกษาจะพิจารณารถบรรทุก 2 เพลา ถึง 6 เพลา

ตารางที่ 3-3 ประเภทรถบรรทุกตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวง

ลำดับ	ในประกาศ	ลักษณะยานพาหนะ Vehicle type	น้ำหนักรถ ( 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	 KING PIN ≥ 8.00 M. รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ	50.5	50.5	-	-
2	19/3(1)	จดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553  KING PIN 7.00 TO < 8.00 M. รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ	50.5	50.5	-	49 ตั้งแต่ 1 ก.ย. 58
3	19/3(2)	จดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553  KING PIN 6.00 TO < 7.00 M. รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ	50.5	50.5	-	47 ตั้งแต่ 1 ก.ย. 58
4	19/3(3)	จดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553  KING PIN 4.50 TO < 6.00 M. รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ	50.5	50.5	-	45 ตั้งแต่ 1 ก.ย. 58
5	19/4	 KING PIN > 8.00 M. รถกึ่งพ่วง 7 เพลา 24 ล้อ	55.5	50.5	-	-
6	20/1	 > 9.75 M. รถพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ	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. รถพ่วง 7 เพลา 24 ล้อ	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. รถพ่วง 6 เพลา 20 ล้อ	52	52	52 (1 ม.ค. 56 - 30 ธ.ค. 57)	50.5 ตั้งแต่ 1 ก.ค. 57
9	20/3	ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (FULL TRAILER) ขบวนรถประเภทที่ต้องขออนุญาตจากผู้อำนวยการทางหลวงฯ - ยานพาหนะที่ขนส่งสิ่งของจำนวนหนึ่งหน่วยต่อเที่ยว ซึ่งโดยสภาพของสิ่งนั้นไม่อาจแยกจากกันได้โดยเป็นการขนส่งเฉพาะภาค - ยานพาหนะที่ติดตั้ง เครื่องจักร เครื่องกล - ยานพาหนะที่โดยสภาพมีลักษณะเป็น เครื่องจักร เครื่องกล	-	53 (1 ก.ค. 52)	50.5	-
หมายเหตุ		- ยานพาหนะชนิดตัวลากจูงและตัวพ่วงหรือตัวกึ่งพ่วง ต้องมีน้ำหนักลงพลา กลุ่มพลา หรือน้ำหนักรวม ไม่เป็นประกาศผู้อำนวยการทางหลวงฯ				

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

2) อัตราเร็วของรถบรรทุก (truck speed)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบรถบรรทุกจริงที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยความเร็วของรถบรรทุกที่สำรวจได้พบว่าอยู่ในช่วงประมาณ 30 – 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

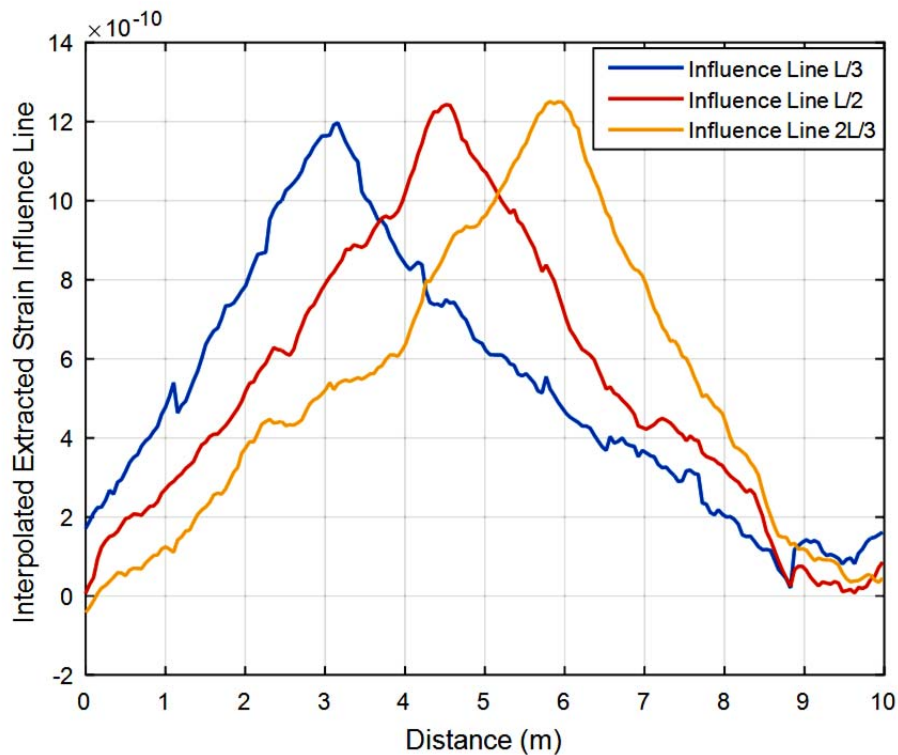
3) น้ำหนักของรถบรรทุก (truck weight)

น้ำหนักของรถบรรทุกที่ได้ทำการทดสอบนั้น เป็นรถที่น้ำหนักหลากหลาย แตกต่างกันไป เพื่อพิจารณาผลกระทบต่อการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

## บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา

### 4.1 ผลการสังเคราะห์เส้นอิทธิพลความเครียดของสะพาน

จากกรณีทดสอบของรถบรรทุกปรับเทียบซึ่งทราบน้ำหนักเพลาทั้ง 6 กรณีดังตารางที่ 3-1 นั้น สัญญาณความเครียดของสะพานที่ตรวจวัดได้ถูกนำมาคำนวณเพื่อสร้างเส้นอิทธิพลของความเครียดสะพาน และเลือกกรณีที่เมื่อนำเส้นอิทธิพลที่สังเคราะห์ได้ไปทำการประมาณค่าในช่วงให้ได้พิกัดที่ทุกระยะ 1 เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาจากทั้ง 6 กรณีแล้วจะทำการเลือกเส้นอิทธิพลที่เมื่อนำไปคำนวณย้อนกลับเป็นน้ำหนักเพลาก็เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งได้ลักษณะของเส้นอิทธิพลความเครียดที่ 3 หน้าตัดสะพานจากกรณีรถบรรทุก 3 เพลา แสดงดังรูปที่ 4-1

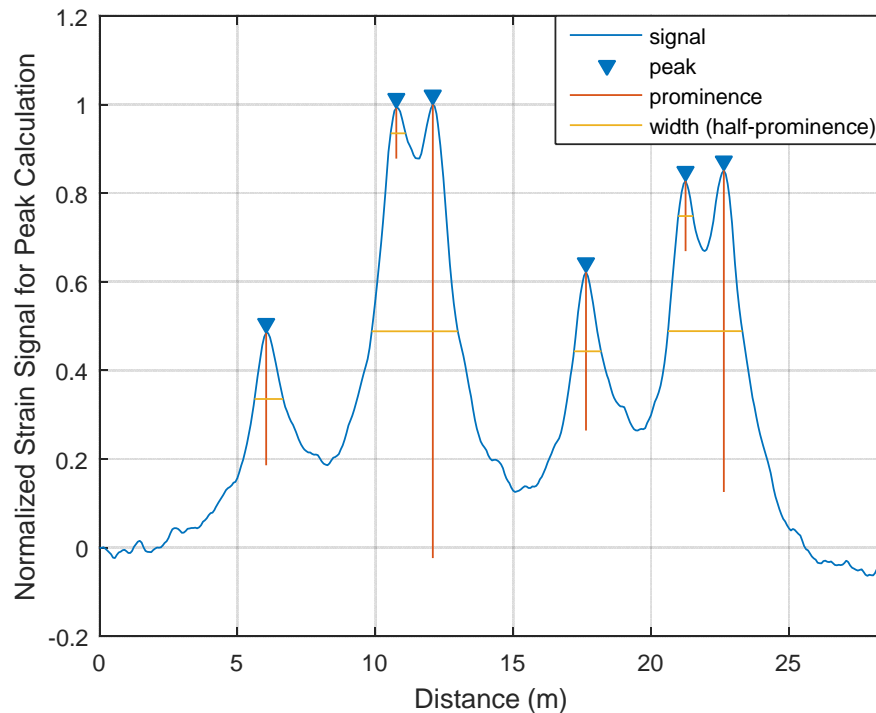


ภาพที่ 4-1 เส้นอิทธิพลของความเครียดสะพานที่สังเคราะห์ได้



## 4.2 ผลการจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยการระบุเพลลา

ผลการตรวจจับเพลลาด้วยระบบ FAD Sensor พบว่าสามารถตรวจจับเพลลาได้ถูกต้อง ดังภาพที่ 4-2 แต่มีบางกรณีที่ตรวจจับเพลลาได้เกินหรือขาดโดยเฉพาะรถบรรทุกประเภทหลายเพลลา โดยข้อมูลการวิเคราะห์หาจำนวนเพลลา ความเร็ว และระยะห่างเพลลา แสดงดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-2 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ใช้หาเพลลาและระยะห่างเพลลา

จากตารางที่ 4-1 พบว่า ผลการตรวจจับเพลลาด้วยระบบ FAD ที่ใช้สามารถระบุจำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกประเภท 2 – 4 เพลลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถระบุเพลลาผิดพลาดเพียงกรณีเดียว ในขณะที่รถบรรทุกประเภท 5 เพลลาและ 6 เพลลานั้นมีบางกรณีที่เกิดความผิดพลาดในการระบุจำนวนและตำแหน่งเพลลา โดยพบทั้งกรณีที่ระบุจำนวนเพลลาไม่ครบ ระบุตำแหน่งเพลลาที่ไม่ถูกต้อง และระบุจำนวนเพลลาได้มากเกินไปจริง โดยจากทั้งหมดจำนวน 55 กรณี มีจำนวนที่สามารถระบุเพลลาและจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้อง 46 กรณี ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 83.64

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

คัน	จำนวนเพลลา	ความเร็วที่วิเคราะห์ได้ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะห่างเพลลาที่วิเคราะห์ได้ (เมตร)					ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนระยะห่างเพลลา (ร้อยละ)						หมายเหตุ	
			S1	S2	S3	S4	S5		S1	S2	S3	S4	S5	ΣS		
1	2	60.597	6.154					-6.652	-6.652						-6.652	
2	2	52.200	5.969					-10.129	-10.129						-10.129	
3	2	49.312	6.014					-8.174	-8.174						-8.174	
4	2	62.946	6.053					-0.173	-0.173						-0.173	
5	2	45.590	5.986					-5.580	-5.580						-5.580	
6	2	53.617	5.736					-2.803	-2.803						-2.803	
7	2	54.497	6.202					-11.139	-11.139						-11.139	
8	2	69.074	5.294					-19.722	-19.722						-19.722	
9	2	58.092	5.263					-19.022	-19.022						-19.022	
10	2	42.988	6.038					-22.024	-22.024						-22.024	
11	2	47.424	5.957					-7.535	-7.535						-7.535	
12	2	47.424	4.348					-16.252	-16.252						-16.252	
13	3	52.163	5.227	1.439				-6.030	-6.030	-16.080					-8.050	
14	3	46.756	4.514	1.250				-9.295	-9.295	4.580					-5.954	
15	3	40.577	4.444	1.235				-6.326	-6.326	1.235					-4.586	

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (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	3	57.908	5.500	1.250				-17.396	-17.396	25.772					-5.982	
17	3	54.537	4.697	0.985				-18.971	-18.971	10.873					-12.444	
18	3	35.459	4.516	1.129				-22.554	-22.554	10.607					-14.090	
19	3	43.998	3.741	1.156				-16.521	-16.521	-4.657					-13.484	
20	3	46.282	4.638	1.232				-27.689	-27.689	2.464					-19.909	
21	3	45.111	4.295	1.282				-5.396	-5.396	2.875					-3.372	
22	3	42.963	4.510	1.373				-10.670	-10.670	-3.981					-9.033	
23	3	31.760	4.461	1.176				-11.659	-11.659	-0.467					-9.122	
24	4	46.253	4.082	7.959	1.497			-18.308	-18.308	-29.418	-24.717				-19.063	ระบุเพลลาเกิน
25	4	54.497	2.250	3.167	1.250			-18.796	-18.796	-4.891	7.749				-6.360	
26	5	40.000	4.278	1.167	5.056	4.667		-3.996	-3.079	10.256	-8.722	-7.280			-4.960	
27	5	47.059	3.922	0.980	8.170	1.046		-7.344	4.118	26.286	-68.800	75.859			3.238	
28	5	39.344	4.426	1.148	5.191	4.754		-6.598	-10.105	13.719	-5.728	-7.803			-5.788	
29	5	44.446	4.753	0.926	5.185	4.444		-8.192	-13.169	30.382	-10.089	-1.010			-4.567	
30	5	42.106	4.444	1.345	4.620	4.737		-7.107	-9.469	-3.463	-8.194	-8.893			-8.342	

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (ต่อ)

คัน	จำนวนเพลลา	ความเร็วที่วิเคราะห์ได้ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะห่างเพลลาที่วิเคราะห์ได้ (เมตร)					ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนระยะห่างเพลลา (ร้อยละ)						หมายเหตุ
			S1	S2	S3	S4	S5		S1	S2	S3	S4	S5	ΣS	
31	5	47.059	3.464	1.307	9.477	1.372		-9.405	-19.450	-3.745	-20.882	-13.434		-18.251	
32	5	40.000	6.222	12.667	1.000	N/A		-8.374	N/A	N/A	N/A	N/A		17.755	ระบุเพลลาไม่ครบ
33	5	48.978	3.810	1.360	8.707	1.088		-12.664	-12.375	-0.781	-12.645	16.274		-8.685	
34	5	58.536	3.577	5.691	5.122	1.301		-10.457	-0.203	-331.141	42.255	9.666		-3.230	ระบุตำแหน่งเพลลาผิด
35	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	
36	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	
37	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	
38	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	
39	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	
40	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	
41	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	ระบุเพลลาไม่ครบ
42	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	
43	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	
44	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	
45	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	

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (ต่อ)

คัน	จำนวนเพลลา	ความเร็วที่วิเคราะห์ได้ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะห่างเพลลาที่วิเคราะห์ได้ (เมตร)					ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนระยะห่างเพลลา (ร้อยละ)						หมายเหตุ
			S1	S2	S3	S4	S5		S1	S2	S3	S4	S5	ΣS	
46	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	ระบุเพลลาไม่ครบ
47	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	
48	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	
49	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	ระบุตำแหน่งเพลลาผิด
50	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	
51	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	
52	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	ระบุเพลลาไม่ครบ
53	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	ระบุเพลลาไม่ครบ
54	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	
55	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	ระบุเพลลาเกิน

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4-1 มาสรุปจำนวนกรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้องและระบุเพลลาได้คลาดเคลื่อนตามแต่ละประเภทรถบรรทุก จะได้ข้อมูลสรุปดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 จำนวนกรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้องและคลาดเคลื่อน

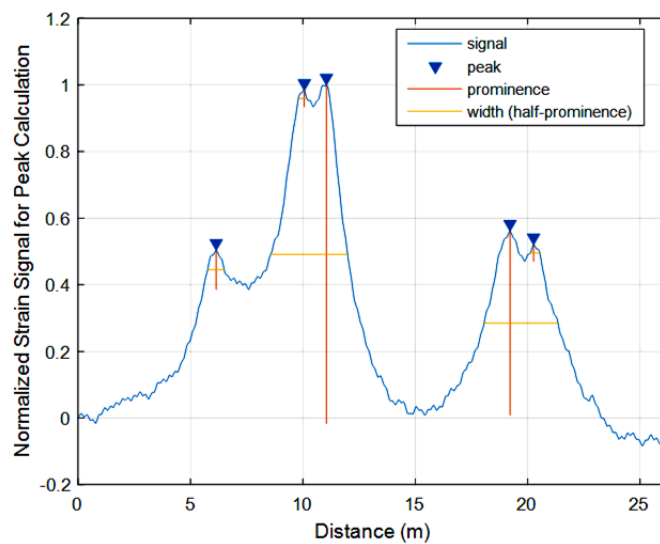
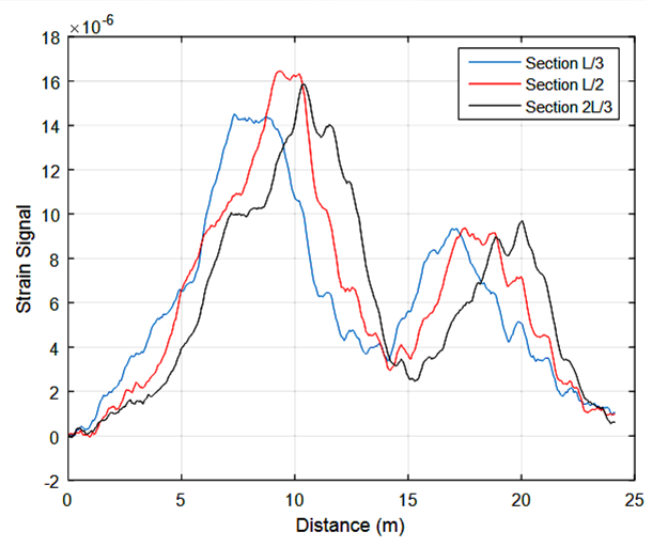
ประเภท	จำนวนที่ระบุเพลลาถูกต้อง (คัน)	จำนวนที่ระบุเพลลาไม่ถูกต้อง (คัน)	ลักษณะผิดพลาด (จำนวน)
2 เพลลา	12	-	-
3 เพลลา	11	-	-
4 เพลลา	1	1	ตรวจจับเพลลาเกิน
5 เพลลา	7	2	ตรวจจับเพลลาไม่ครบ (1) ตำแหน่งเพลลาผิด (1)
6 เพลลา	15	6	ตรวจจับเพลลาไม่ครบ (4) ตรวจจับเพลลาเกิน (1) ตำแหน่งเพลลาผิด (1)

จากวิธีการระบุจำนวนเพลลา ตำแหน่งเพลลาและระยะช่วงเพลลาที่ใช้ ภาพที่ 4-3 แสดงตัวอย่างของสัญญาณความเครียดเฉลี่ยของสะพานที่ และกราฟสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วสำหรับหาความเร็วและระบุจำนวนเพลลาและตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลลา ซึ่งระบุเพลลาได้ถูกต้อง

อย่างไรก็ตามจากกรณีทดสอบทั้งหมด 55 กรณี ดังตารางที่ 2 พบว่าวิธีการที่ใช้สามารถระบุเพลลาของรถบรรทุกได้ถูกต้องจำนวน 46 กรณี ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 83.64 และระบุเพลลาไม่ถูกต้องจำนวน 9 กรณี ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 16.46 โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าอัตราความผิดพลาดในการระบุเพลลาจะมากขึ้นตามจำนวนเพลลาของรถบรรทุก โดยรถบรรทุกประเภท 2 เพลลาและ 3 เพลลาสามารถระบุจำนวนเพลลาและประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องทั้งหมด

ทั้งนี้สาเหตุที่เกิดความผิดพลาดนั้นเป็นเพราะการระบุจำนวนเพลลาโดยใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB นั้นจะต้องกำหนดค่าความสูงของยอดสัญญาณ (prominence) ซึ่งหากกำหนดความสูงยอดมากเกินไปจะทำให้ตรวจจับเพลลาได้ไม่ครบ ในขณะที่หากกำหนดความสูงยอดน้อยเกินไปจะทำให้ตรวจจับเพลลาได้เกิน ซึ่งกรณีรถบรรทุกที่มีเพลลาคลุมใกล้เคียงกันจะมีลักษณะสัญญาณความเครียดที่สังเกตเห็นยอดเพลลาได้ยาก โดยเฉพาะหากรถบรรทุกเคลื่อนที่และเกิดการสั่นไหวมาก เช่นกรณีรถเคลื่อนที่ข้ามสะพานความเร็วสูง ซึ่งทำให้สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้มีผลทางพลศาสตร์ของรถบรรทุกและสะพานมากและจำนวนข้อมูลของสัญญาณ จะน้อยกว่ากรณีนี้

รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ จึงเป็นเหตุให้หลายกรณีพบว่ายอดสัญญาณที่สามารถระบุเพลารถของเพลากลุ่มนั้นมีจำนวนยอดน้อยกว่าจำนวนเพลลา ทำให้ผลการระบุจำนวนเพลลาผิดพลาด



ภาพที่ 4-3 สัญญาณความเครียดเฉลี่ยในหน้าตัดสะพานและผลการระบุจำนวนและตำแหน่งเพลากรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลลาเคลื่อนที่ผ่าน

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

ในการทดสอบภาคสนามที่ศึกษาจะ สามารถวิเคราะห์ความถูกต้องได้เฉพาะผลของค่าน้ำหนักรวมเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกที่สำรวจ ณ ด้านซิ่งน้ำหนักถาวรนั้นมีเฉพาะค่าน้ำหนักรวม ทั้งนี้เป็นเพราะรถบรรทุกที่เคลื่อนที่เข้าด้านซิ่งนั้นไม่ได้หยุดสนิทเพื่อจอดซิ่งน้ำหนักเพลลา แต่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่ำผ่านแท่นซิ่งเพื่อลดปัญหาการจราจรที่ติดขัดบริเวณด้านๆ จึงทำให้ค่าน้ำหนักที่บันทึกนั้นได้จากการสังเกตค่าน้ำหนักรวมสูงสุดที่แสดงในหน้าจอของระบบของด้านซิ่ง โดยความถูกต้องของการหาน้ำหนักรวมของระบบจะพิจารณาจากร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของน้ำหนักรวม (relative percentage error of gross vehicle weight,  $RPE_{GVW}$ ) ดังสมการที่ (4-1)

$$RPE_{GVW} = \frac{GVW_{Actual} - GVW_{Identified}}{GVW_{Actual}} \times 100 (\%) \quad (4-1)$$

ในที่นี้ถึงแม้จะทราบจากหัวข้อก่อนหน้าแล้วว่า มีกรณีที่ระบบตรวจจับเพลลาระบุจำนวนหรือตำแหน่งเพลลาได้ผิดพลาดก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติแล้วซึ่งระบบจะต้องเป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์น้ำหนักรถบรรทุกต่อไปในทุกกรณี เนื่องจากไม่ทราบข้อมูลของจำนวนเพลลาและประเภทรถบรรทุกจริง ดังนั้นรถบรรทุกในทุกกรณีในตารางที่ 4-1 จะถูกนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมต่อไป ด้วยกระบวนการในหัวข้อ 3.5.3 โดยผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมในแต่ละกรณีมีค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 4-3

จากตารางที่ 4-3 พบว่ามี 3 กรณีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าร้อยละ 40 ซึ่งเมื่อได้พิจารณาจากขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้นั้น สันนิษฐานว่าค่าความคลาดที่สูงผิดปกตินี้จะมาจากการบันทึกข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุก ณ ด้านซิ่งน้ำหนักถาวรที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากรถบรรทุกมิได้จอดนิ่งในขณะที่ซิ่ง แต่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำผ่านแท่นซิ่ง และค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่ได้จะมาจากการสังเกตหน้าจอแสดงผลน้ำหนักดิจิทัลด้วยสายตา ซึ่งค่าน้ำหนักที่แสดงนั้นมีค่าแปรปรวน ไม่คงที่เนื่องจากรถบรรทุกมิได้จอดนิ่ง จึงอาจเป็นเหตุให้บางกรณีอาจสังเกตค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้คลาดเคลื่อนจากการสังเกตด้วยตาเปล่า



ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์การหาน้ำหนักรวมของระบบรถทุก และความคลาดเคลื่อน

คัน	จำนวน เพลลา	น้ำหนักรวมของ รถบรรทุก (กิโลกรัม)	น้ำหนักรวมรถบรรทุกที่ วิเคราะห์ได้ (กิโลกรัม)	ความคลาด เคลื่อนน้ำหนัก รวม (ร้อยละ)	หมายเหตุ
1	2	11,470	10,410.041	9.241	
2	2	12,060	11,568.866	4.072	
3	2	12,160	12,209.444	-0.406	
4	2	13,130	12,110.889	7.762	
5	2	8,430	8,979.437	-6.518	
6	2	13,310	11,779.587	11.521	
7	2	13,000	11,730.956	9.762	
8	2	7,900	7,681.013	2.772	
9	2	10,570	9,845.400	6.855	
10	2	14,380	13,330.027	7.302	
11	2	11,280	10,399.470	7.806	
12	2	10,800	10,179.052	5.749	
13	3	20,220	19,139.948	5.342	
14	3	22,000	21,421.697	2.628	
15	3	24,700	23,546.085	4.672	
16	3	19,390	19,916.450	-2.715	
17	3	24,700	23,107.644	6.447	
18	3	24,700	24,230.777	1.900	
19	3	24,070	23,367.523	2.918	
20	3	24,700	22,547.183	8.716	
21	3	24,100	24,982.129	-3.660	
22	3	24,580	23,891.101	2.803	
23	3	23,020	22,713.069	1.333	
24*	4	35,000	19,509.099	44.260	ระบุเพลลาเกิน
25	4	27,400	26,622.541	4.579	
26	5	39,050.000	41,880.975	-7.250	
27	5	27,620.000	29,282.395	-6.019	
28	5	37,300.000	38,014.278	-1.915	
29	5	37,600.000	37,377.946	0.590	
30	5	43,500.000	45,237.256	-3.994	

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์การหาน้ำหนักรวมของระบบรถทุก และความคลาดเคลื่อน (ต่อ)

คัน	จำนวน เพลลา	น้ำหนักรวมของ รถบรรทุก (กิโลกรัม)	น้ำหนักรวมรถบรรทุกที่ วิเคราะห์ได้ (กิโลกรัม)	ความคลาด เคลื่อนน้ำหนัก รวม (ร้อยละ)	หมายเหตุ
31	5	40,000.000	40,684.084	-1.710	
32*	5	19,090.000	29,647.877	-55.306	ระบุเพลลาไม่ครบ
33	5	36,100.000	37,642.614	-4.273	
34	5	21,000.000	23,544.318	-12.116	ระบุตำแหน่งเพลลาผิด
35	6	46,200.000	50,024.761	-8.279	
36	6	19,500.000	22,743.824	-16.635	
37	6	50,500.000	51,143.765	-1.275	
38	6	50,320.000	54,610.754	-8.527	
39	6	50,500.000	50,892.302	-0.777	
40	6	50,500.000	51,586.355	-2.151	
41	6	47,000.000	43,818.448	6.769	ระบุเพลลาไม่ครบ
42	6	48,000.000	50,057.447	-4.286	
43	6	49,700.000	49,351.509	0.701	
44	6	49,000.000	49,905.335	-1.847	
45	6	46,520.000	44,438.389	4.474	
46	6	50,500.000	48,521.212	3.918	ระบุเพลลาไม่ครบ
47	6	50,450.000	49,764.403	1.359	
48	6	49,500.000	48,166.762	2.693	
49*	6	50,500.000	20,562.269	59.283	ระบุตำแหน่งเพลลาผิด
50	6	50,500.000	53,581.372	-6.102	
51	6	49,000.000	49,095.865	-0.196	
52	6	47,380.000	47,455.615	-0.160	ระบุเพลลาไม่ครบ
53	6	49,100.000	36,621.406	25.415	ระบุเพลลาไม่ครบ
54	6	48,700.000	50,614.904	-3.932	
55	6	19,000.000	19,982.561	-1.952	ระบุเพลลาเกิน

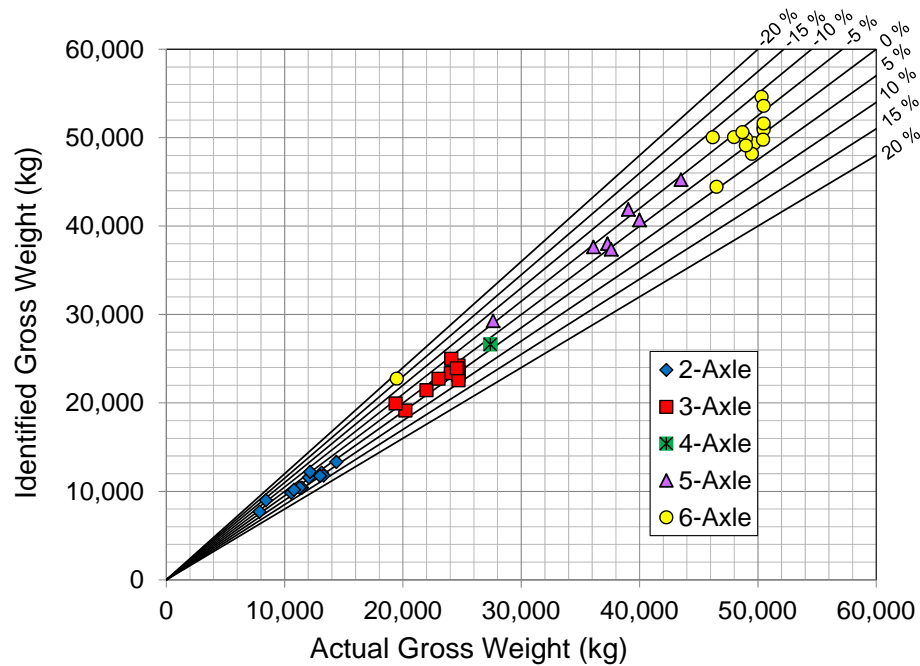
หมายเหตุ: \* กรณีที่แรงามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงผิดปกติ อาจเกิดจากการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก  
รถบรรทุก ณ ตำแหน่งน้ำหนักถาวรผิดพลาด

จากกรณีทดสอบทั้งหมด 55 กรณี ซึ่งแบ่งเป็นกรณีที่ระบุเพลลาถูกต้อง 46 กรณี และระบุเพลลาผิดพลาด 9 กรณี หากนำทุกกรณีมาวิเคราะห์หาหน้าหนักรวมของรถบรรทุก ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-3 และนำมาแยกเป็นข้อมูลสรุปเชิงสถิติตามกลุ่มของรถบรรทุกที่ระบุเพลลาถูกต้องกับระบุเพลลาผิดพลาดดังตารางที่ 4-4 จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของกรณีรถบรรทุกระบุเพลลาได้ถูกต้องนั้นมีค่าเพียงร้อยละ 4.71 และร้อยละ 16.63 ตามลำดับ

เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบการประมาณน้ำหนักรถบรรทุกให้ชัดเจนถึงแนวโน้มเนื่องจากปัจจัยของมวลรถบรรทุกและความเร็วรถบรรทุก เฉพาะข้อมูลของกรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้อง จะถูกนำมาแสดงผลด้วยกราฟในภาพที่ 4-4 ถึง ภาพที่ 4-6 โดยจากภาพที่ 4-4 ซึ่งแสดงระดับความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักรวมของรถทุกประเภทที่สามารถระบุเพลลาได้ถูกต้อง จะสังเกตเห็นได้ว่ามีจำนวน 45 กรณีจากทั้งหมด 46 (คิดเป็นร้อยละ 97.8) มีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมไม่เกินร้อยละ 10

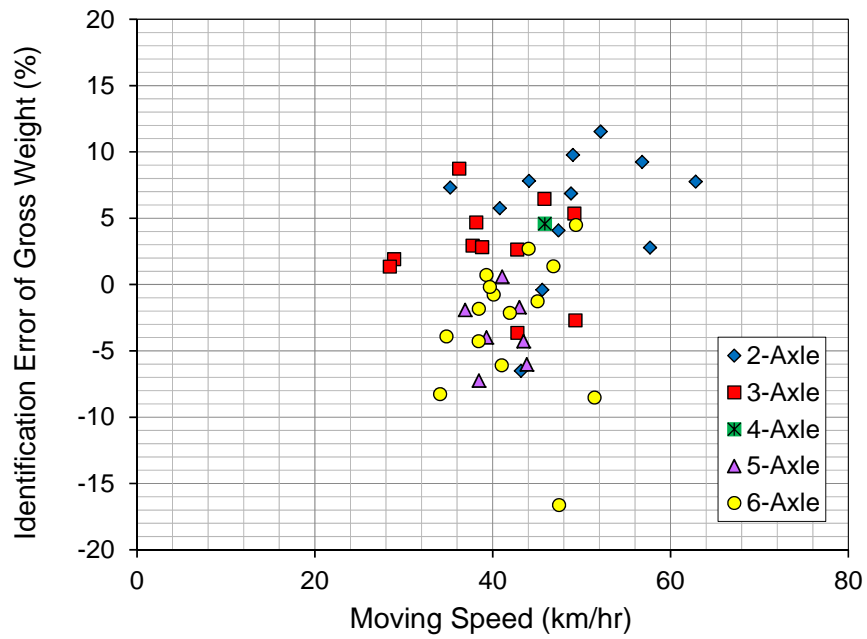
ตารางที่ 4-4 ข้อมูลทางสถิติของผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

ประเภท	กรณีระบุเพลลาถูกต้อง		กรณีระบุเพลลาไม่ถูกต้อง	
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนสูงสุด (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ร้อยละ)	ความคลาดเคลื่อนสูงสุด (ร้อยละ)
2 เพลลา	6.65	11.52	-	-
3 เพลลา	3.92	8.72	-	-
4 เพลลา	4.58	4.58	44.26	44.26
5 เพลลา	3.67	6.02	33.71	55.31
6 เพลลา	4.22	16.63	16.25	59.28
รวม	4.71	16.63	23.24	59.28

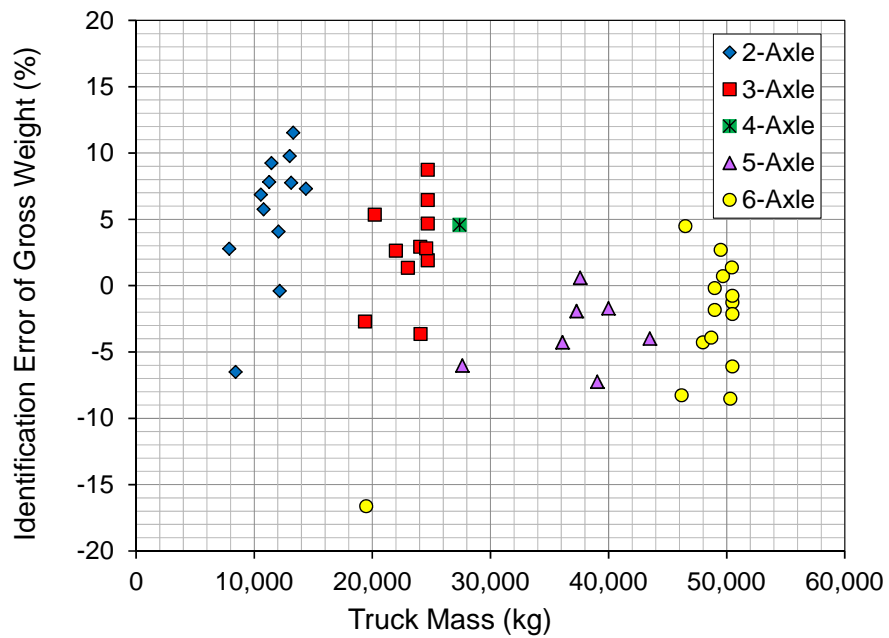


ภาพที่ 4-4 ผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกในทุกกรณีที่ระบุเพลลาได้ถูกต้อง

เพื่อพิจารณาผลของปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการหาน้ำหนักรวมรถบรรทุก ภาพที่ 4-5 และภาพที่ 4-6 แสดงผลของความเร็วและมวลของรถบรรทุกต่อความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมตามลำดับ จากภาพที่ 4-5 จะสังเกตเห็นได้ว่าความเร็วของรถบรรทุกที่สูงขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมรถบรรทุกที่หาได้มีความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้น และหากพิจารณา รถบรรทุกแต่ละประเภทนั้นพบว่ารถบรรทุกที่มีจำนวนเพลลามาก มีแนวโน้มที่จะหาน้ำหนักรวมได้มากกว่าน้ำหนักที่แท้จริง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากรถบรรทุกที่มีจำนวนเพลลามากนั้นจะมีความยาวรถที่มาก ทำให้ผลทางพลศาสตร์ของสะพานที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลารถเคลื่อนเข้าผ่านรอยต่อสะพานมีมากกว่าและยาวนานกว่ารถที่มีความยาวสั้น ทำให้น้ำหนักเพลลาที่คำนวณได้มีแนวโน้มสูงกว่าค่าน้ำหนักเพลลาจริง จึงทำให้น้ำหนักรวมที่คำนวณได้มีค่ามาก และทำให้ได้ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มีค่าเป็นลบในจำนวนที่มากกว่ารถบรรทุกที่มีจำนวนเพลลานั้น สำหรับผลของมวลรถบรรทุก จากภาพที่ 4-6 นั้นพบว่าไม่มีผลต่อความแปรปรวนของระดับความถูกต้องของการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4-5 ความคลาดเคลื่อนของผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ระดับความเร็วรถบรรทุกที่แตกต่างกัน กรณีที่ระบุเพลาได้ถูกต้อง

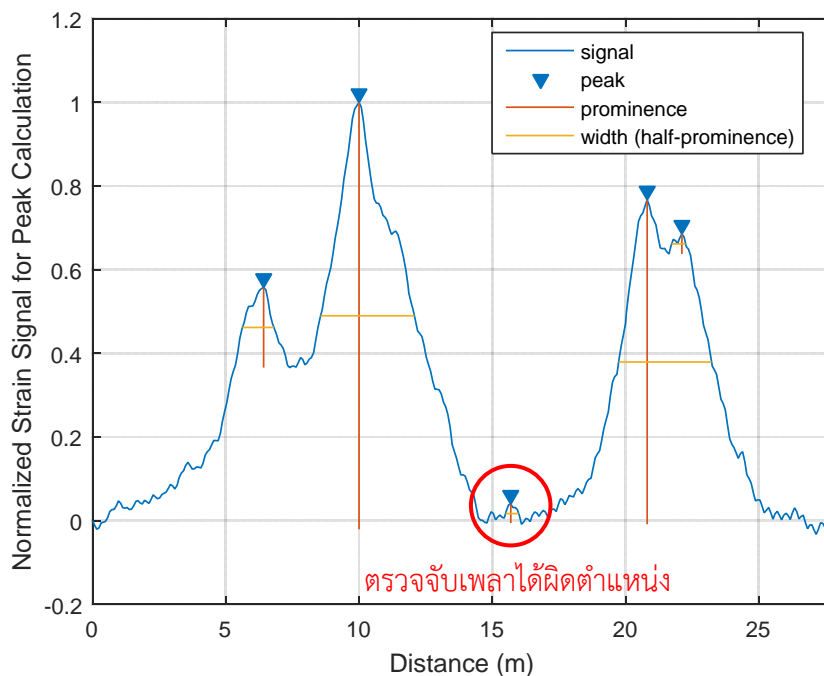


ภาพที่ 4-6 ความคลาดเคลื่อนของผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ระดับมวลรถบรรทุกที่แตกต่างกัน กรณีที่ระบุเพลาได้ถูกต้อง

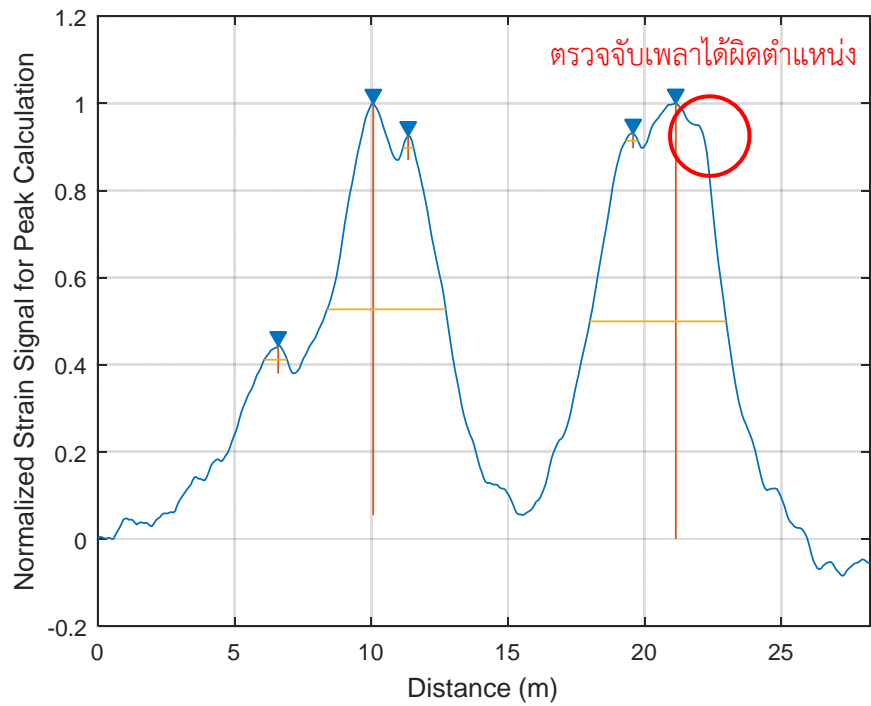
#### 4.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้การวิเคราะห์น้ำหนักรวมมีความคลาดเคลื่อนสูง

##### 4.4.1 ผลจากการตรวจระบุเพลลาผิดพลาด

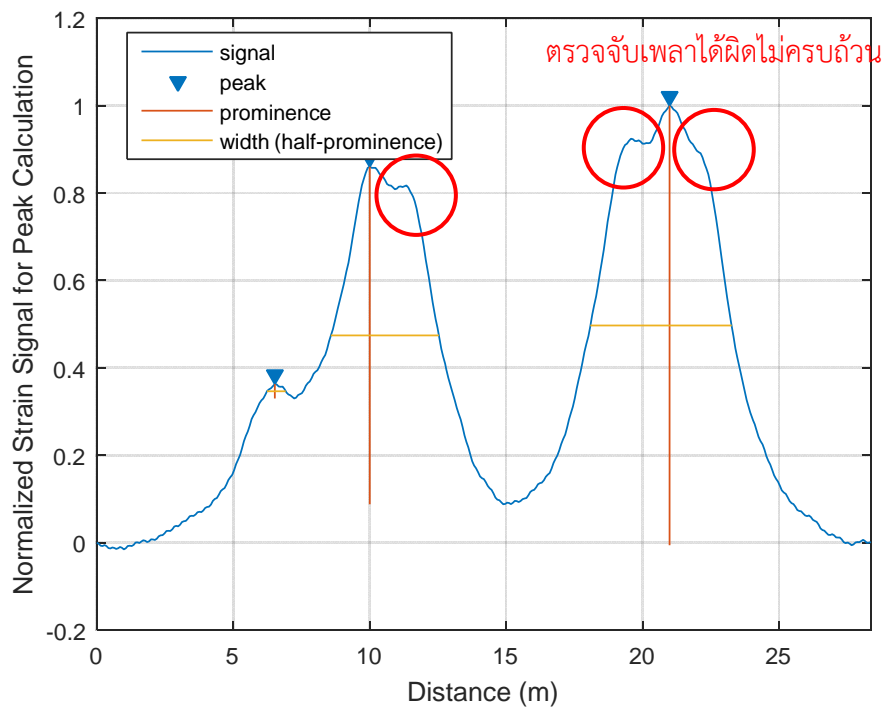
การวิเคราะห์การหาเพลลาและระยะห่างเพลลาจากระบบตรวจจับเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจวัด ตรวจจับเพลลาได้ผิดพลาดตำแหน่งหรือจำนวนเพลลาขาดไป ดังภาพที่ 4-7 ซึ่งเป็นสัญญาณความเครียดของรถบรรทุกประเภท 5 เพลลา แต่ตรวจจับเพลลาที่ 2 ได้ผิดพลาดตำแหน่ง และเมื่อนำข้อมูลความเร็วและระยะห่างเพลลาวิเคราะห์หาน้ำหนักรวมพบว่า ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเป็นร้อยละ 12.116 และเช่นเดียวกันกับกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลลา แต่ในการวิเคราะห์การหาเพลลาและระยะห่างเพลลาจากระบบตรวจจับเพลลาโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจวัด ตรวจจับเพลลาได้เพียง 5 เพลลา ดังภาพที่ 4-8 แต่ได้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเป็นร้อยละ 6.769 จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่า เมื่อตรวจจับเพลลาและหาระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกขาดไป 1 เพลลาหรือมากเกินไป ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์หาน้ำหนักรวม แต่เมื่อระบบ FAD ตรวจจับเพลลาได้ขาดมากเกินไป ดังภาพที่ 4-9 ซึ่งเป็นรถ 6 เพลลา แต่วิเคราะห์ได้เพียง 3 เพลลาจะทำให้การวิเคราะห์หาน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 25.415 ทำให้เห็นว่าหากระบบ FAD ตรวจจับข้อมูลได้ผิดปกติ ทำให้การวิเคราะห์หาน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนสูงด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4-7 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 5 เพลลา ที่ระบุเพลลาผิดพลาดตำแหน่ง



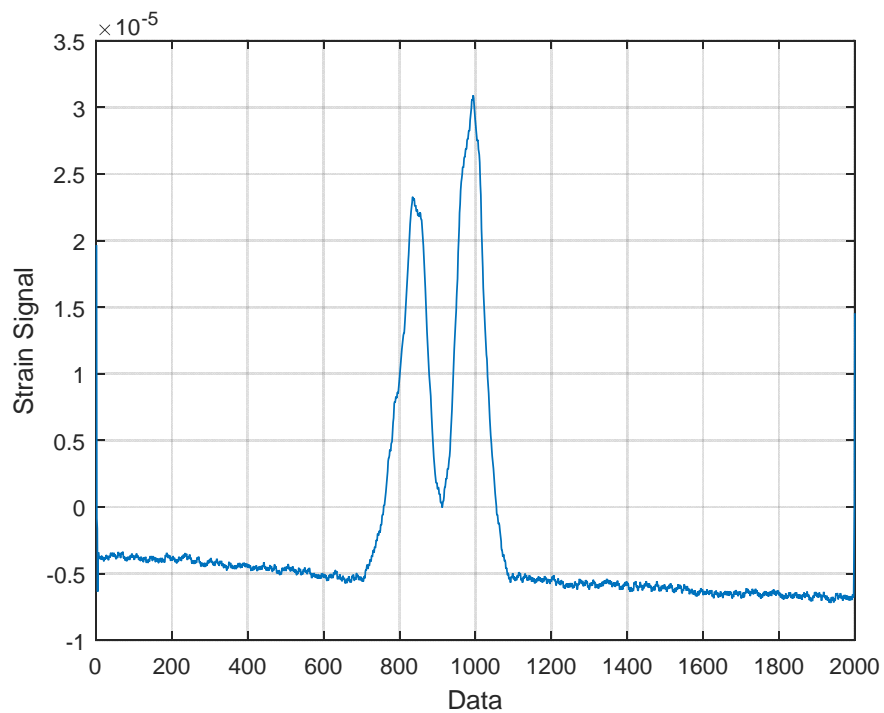
ภาพที่ 4-8 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลลา ที่ระบุเพลลาผิดตำแหน่งเพลลา



ภาพที่ 4-9 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถ 6 เพลลา ที่ระบุจำนวนเพลลาไม่ครบ

#### 4.4.2 ความสมบูรณ์ของสัญญาณความเครียดตรวจวัด

สิ่งที่ทำให้การวิเคราะห์น้ำหนักรวมมีความคลาดเคลื่อนเกิดจากผลกระทบเนื่องจากความไม่เสถียรของอุปกรณ์รวมสัญญาณ ซึ่งอาจเกิดได้จากอุณหภูมิ หรือความไวในการตรวจวัดของอุปกรณ์ ทำให้สัญญาณความเครียดเบี่ยงเบนไปจากแนวปกติ ดังภาพที่ 4-10 ซึ่งเป็นสัญญาณของรถบรรทุกประเภท 6 เพลา จากที่แนวแกนนอนของสัญญาณความเครียดไม่คงที่จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 25.415



ภาพที่ 4-10 ตัวอย่างสัญญาณแกนนอนมีค่าไม่คงที่



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบภาคสนามของระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน ด้วยการสังเคราะห์เส้นอิทธิพลความเครียดจากรถบรรทุกปรับเทียบและจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยระบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจวัดเพลลา (FAD) และวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุกที่สัญจรในเส้นทางจริงด้วยเส้นอิทธิพลความเครียดที่สังเคราะห์นั้น พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกที่มีจำนวนเพลลาไม่เกิน 3 เพลลาได้ถูกต้องในทุกกรณีทดสอบจำนวน 23 กรณี ในขณะที่รถบรรทุกประเภท 4 – 6 เพลลานั้นมีบางกรณีที่ตรวจจับเพลลาได้ไม่ครบหรือเกินจำนวน หรือตรวจจับเพลลาได้ถูกจำนวนแต่ตำแหน่งเพลลาไม่สมเหตุสมผลอยู่ จำนวน 9 กรณี จากจำนวน 32 กรณี ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 28.12 โดยการจำแนกประเภทที่คลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากการระบุเพลลาที่ผิดพลาดซึ่งขึ้นกับการกำหนดค่าความสูง (prominence) ของยอดสัญญาณความเครียดซึ่งหากกำหนดไว้ต่ำเกินไปจะทำให้ได้จำนวนเพลลาที่มากเกินไป และหากกำหนดไว้มากเกินไปจะทำให้ได้จำนวนเพลลาที่น้อยเกินไป ซึ่งแสดงว่าในการปฏิบัติแล้วอาจต้องมีการวิเคราะห์การเลือกใช้ค่าความสูงของยอดสัญญาณที่เหมาะสมของสะพานที่เลือกใช้ต่อไป เพื่อพัฒนาให้ระบบการจำแนกประเภทมีความถูกต้องมากขึ้น

ความถูกต้องของการประมาณน้ำหนักรถบรรทุกนั้นพบว่า หากระบบสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องแล้ว การหาค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ โดยมีความเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าน้ำหนักรวมเท่ากับร้อยละ 4.71 เท่านั้น ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 16.63 โดยหากพิจารณากรณีที่จำแนกประเภทได้ถูกต้องซึ่งมีจำนวน 46 คันแล้ว พบว่ามีรถบรรทุกเพียงสองคันเท่านั้นที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าน้ำหนักรวมสูงกว่าร้อยละ 10

ผลกระทบของปัจจัยของรถบรรทุก เช่น ความเร็ว และระดับของมวลรถบรรทุก พบว่าหากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วสูงหรือมีการสั่นไหวทางพลศาสตร์มาก อาจทำให้การจำแนกประเภททำได้ลำบากขึ้น แต่ทั้งนี้หากระบบสามารถจำแนกประเภทได้ถูกต้องแล้วความเร็วและมวลของรถบรรทุกนั้นไม่มีผลต่อระดับความถูกต้องของการหาค่าน้ำหนักรวมอย่างมีนัยสำคัญ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีกรณีศึกษาเพิ่มมากขึ้นเพื่อวิเคราะห์ผล และปัจจัยอื่นๆ ได้มากยิ่งขึ้น
- 2) นวัตกรรมที่ใช้ในการเปรียบเทียบที่เหมาะสมควรเป็นนวัตกรรมที่ได้จากการจดซึ่ง
- 3) เนื่องจากสัญญาณความเครียดที่ใช้ในการหานวัตกรรมนั้นใช้เพียงแค่น้ำตดที่อยู่กึ่งกลางสะพานจึงสามารถลดจำนวนของมาตรวัดความเครียดในน้ำตดอื่นๆ ได้
- 4) หากใช้สะพานต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล ควรติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในสะพานช่วงแรก เพื่อลดผลทางพลศาสตร์และผลการโก่งตัวของสะพานต่อเนื่อง
- 5) ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงผลจากการที่รถเคลื่อนที่ในกรณีความเร็วไม่คงที่
- 6) ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงกรณีที่มีรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่บนสะพาน
- 7) ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในลักษณะการบันทึกข้อมูลเป็นระยะเวลาต่อเนื่องที่ยาวนานให้ได้ปริมาณรถที่มากในทางสถิติ จะทำให้มีความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริง

## บรรณานุกรม

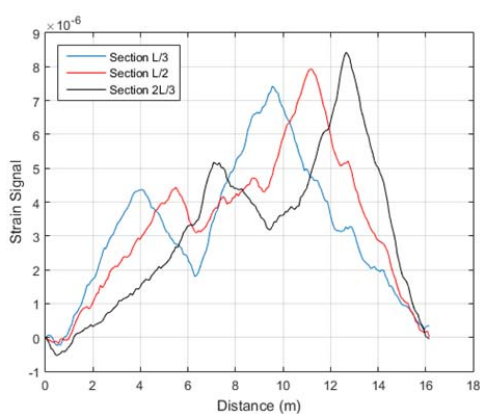
- นิคมเดช วีระฉันทชาติ. (2545) การหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของยานพาหนะบนสะพานจากสัญญาณความเครียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศุภชัย เชื้อเกตุ และ พัชรพงษ์ อาสนจินดา. (2558). การหาความเร็วและระยะช่วงเพลลาของยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน, 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 4<sup>th</sup> 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. 35<sup>th</sup> Annual Symposium of IABSE
- Zhao H. and Uddin N. (2011). Innovative Bridge Weigh-in-motion System for Enforcement Application. 35<sup>th</sup> Annual Symposium of IABSE

ภาคผนวก

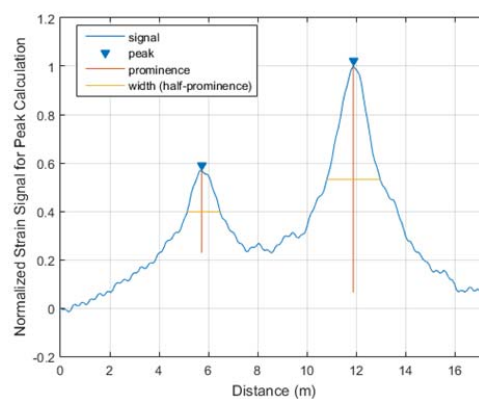
ผ.1 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 1



ภาพที่ ผ.1-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 1



ภาพที่ ผ.1-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 1



ภาพที่ ผ.1-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 1

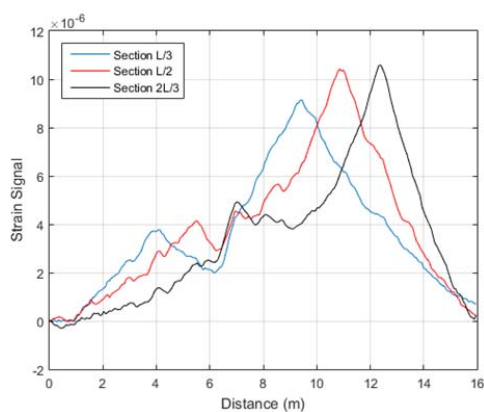
ตารางที่ ผ.1 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 1

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
1	2	60.597	11,470	5.00		

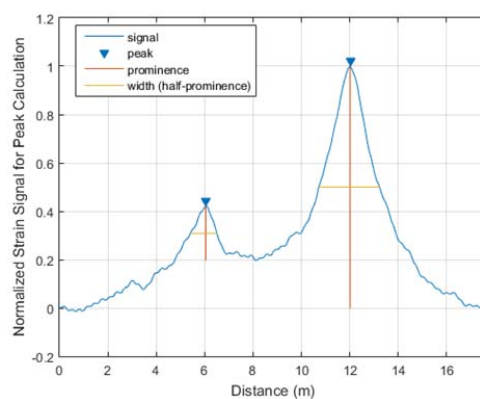
## ผ.2 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 2



ภาพที่ ผ.2-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 2



ภาพที่ ผ.2-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 2



ภาพที่ ผ.2-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 2

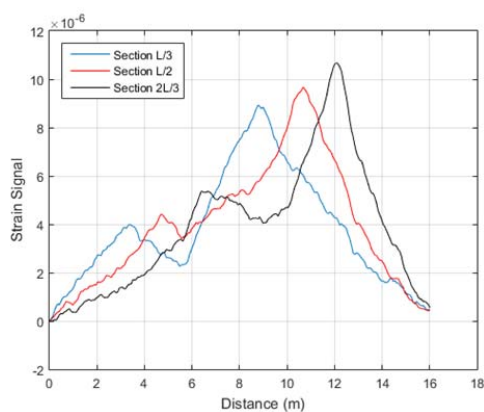
### ตารางที่ ผ.2 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 2

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
2	2	52.2	12,060	4.698		

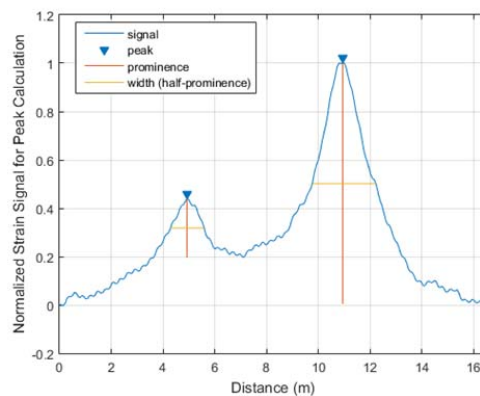
### ผ.3 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 3



ภาพที่ ผ.3-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 3



ภาพที่ ผ.3-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 3

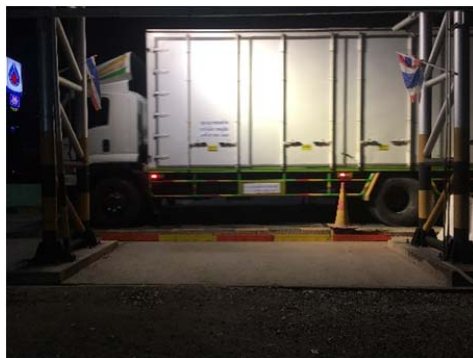


ภาพที่ ผ.3-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 3

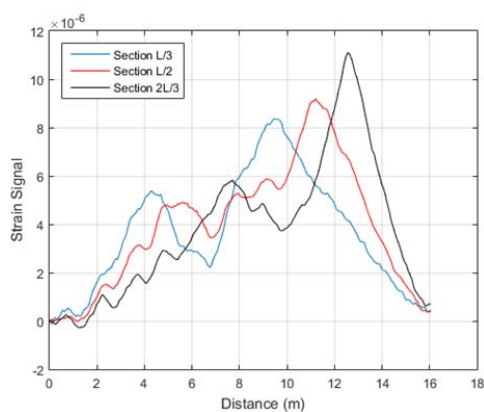
### ตารางที่ ผ.3 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 3

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
3	2	49.31	12160	4.181		

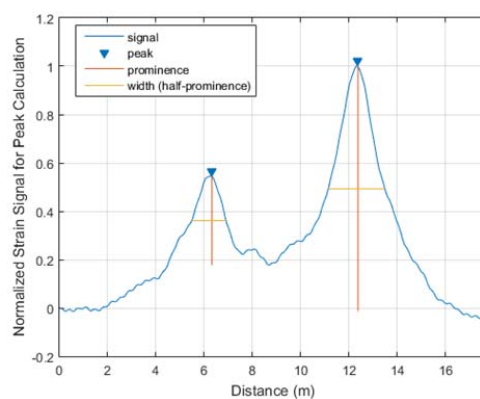
#### ผ.4 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 4



ภาพที่ ผ.4-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 4



ภาพที่ ผ.4-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 4



ภาพที่ ผ.4-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 4

#### ตารางที่ ผ.4 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 4

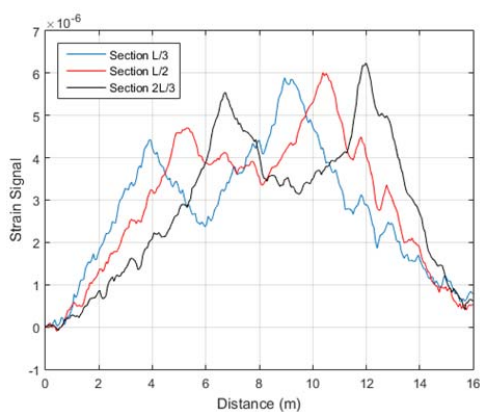
คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
4	2	62.95	13,130	5.159		



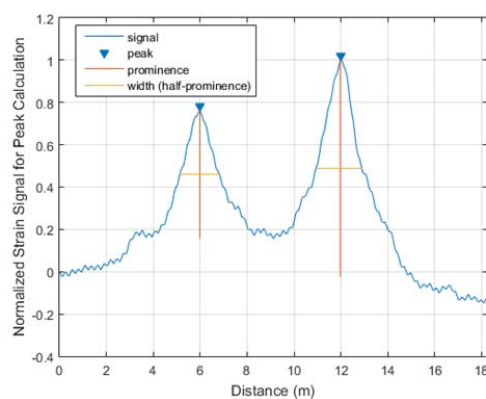
### ผ.5 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 5



ภาพที่ ผ.5-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 5



ภาพที่ ผ.5-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 5

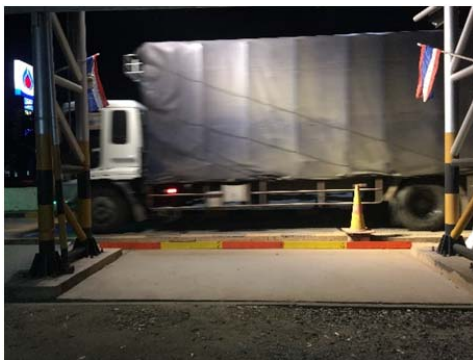


ภาพที่ ผ.5-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 5

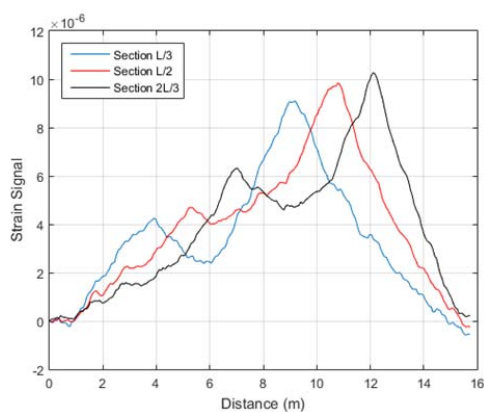
### ตารางที่ ผ.5 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 5

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
5	2	45.59	8,430	4.913		

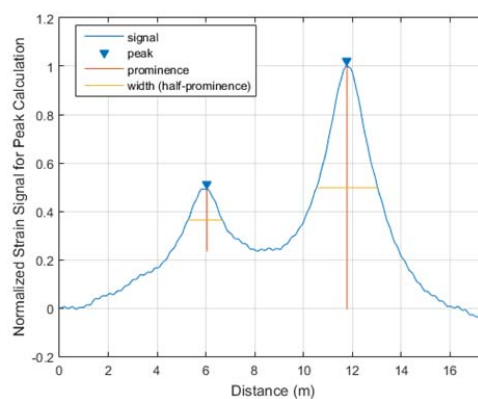
ผ.6 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 6



ภาพที่ ผ.6-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 6



ภาพที่ ผ.6-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 6



ภาพที่ ผ.6-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 6

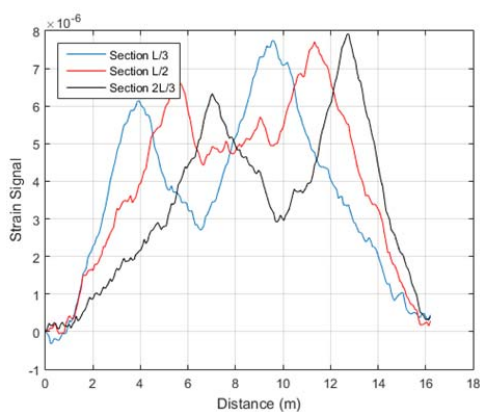
ตารางที่ ผ.6 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 6

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
6	2	53.62	13,310	4.837		

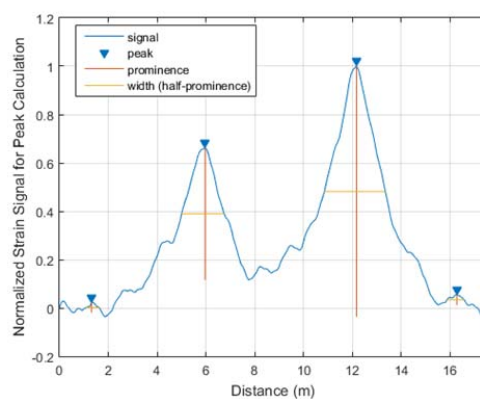
ผ7. ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 7



ภาพที่ ผ.7-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 7



ภาพที่ ผ.7-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 7



ภาพที่ ผ.7-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 7

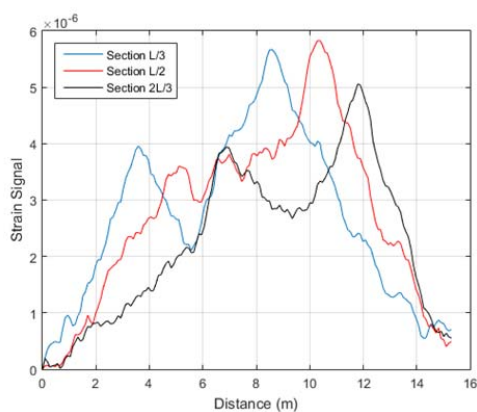
ตารางที่ ผ.7 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 7

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
7	2	54.50	13,000	5.300		

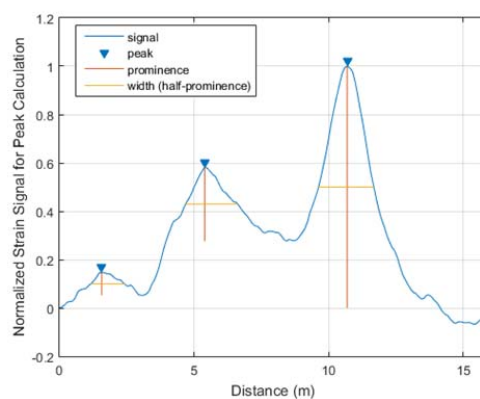
ผ.8 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 8



ภาพที่ ผ.8-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 8



ภาพที่ ผ.8-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 8



ภาพที่ ผ.8-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 8

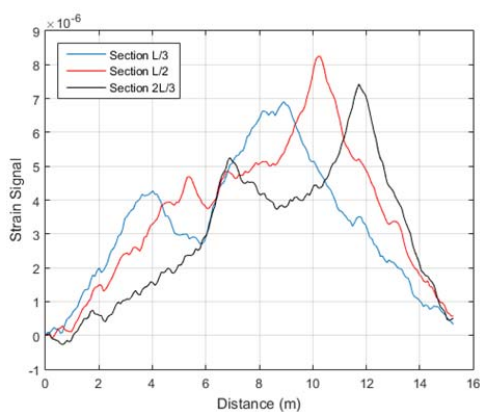
ตารางที่ ผ.8 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 8

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
8	2	69.07	7,900	4.200		

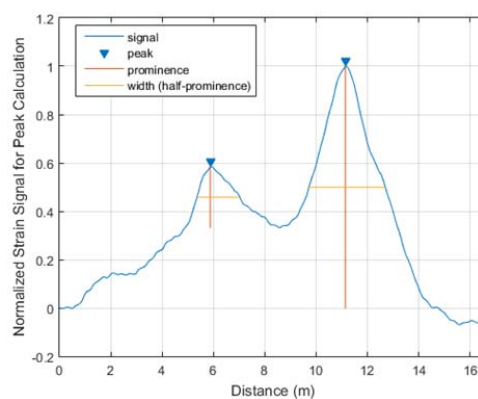
ผ.9 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 9



ภาพที่ ผ.9-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 9



ภาพที่ ผ.9-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 9



ภาพที่ ผ.9-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 9

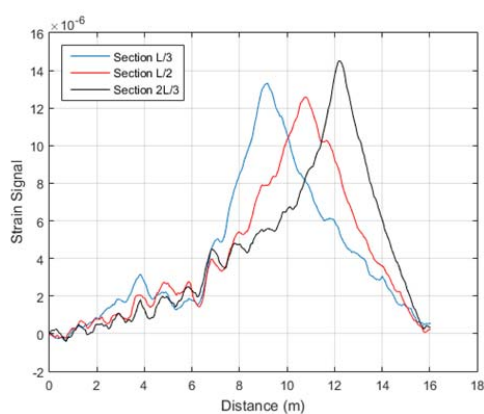
ตารางที่ ผ.9 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 9

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
9	2	58.09	10,570	4.200		

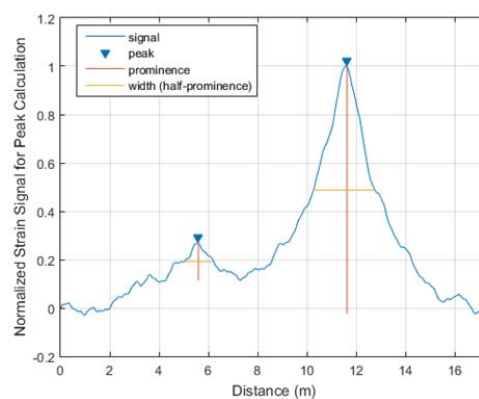
ผ.10 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 10



ภาพที่ ผ.10-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 10



ภาพที่ ผ.10-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 10



ภาพที่ ผ.10-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 10

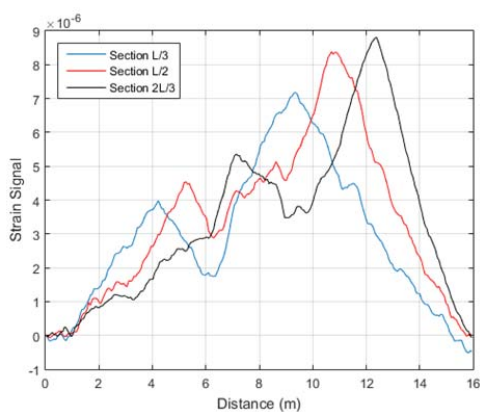
ตารางที่ ผ.10 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 10

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
10	2	42.99	14,380	4.700		

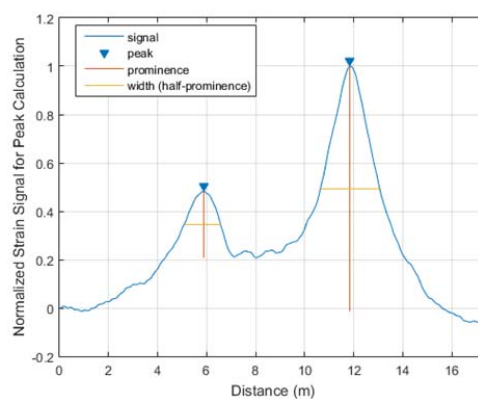
ผ.11 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 11



ภาพที่ ผ.11-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 11



ภาพที่ ผ.11-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 11



ภาพที่ ผ.11-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 11

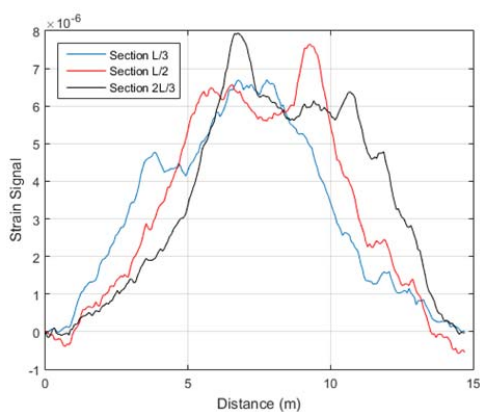
ตารางที่ ผ.11 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 11

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
11	2	47.42	11,280	4.830		

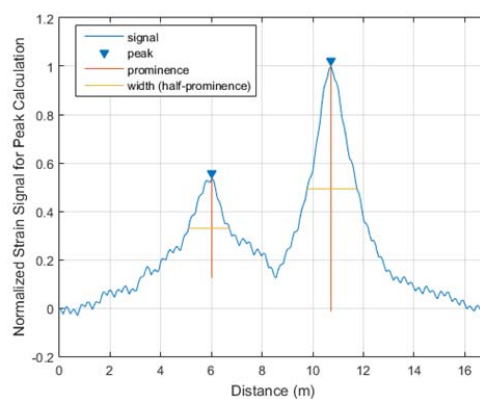
ผ.12 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 12



ภาพที่ ผ.12-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 12



ภาพที่ ผ.12-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 12



ภาพที่ ผ.12-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 12

ตารางที่ ผ.12 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 12

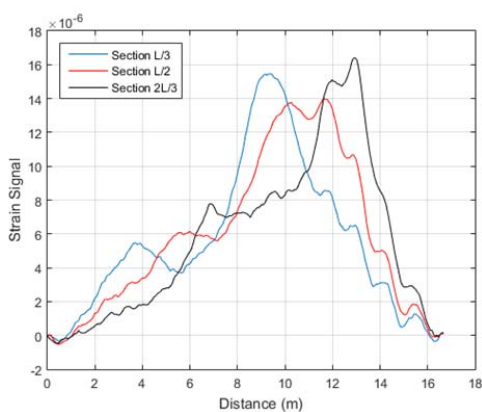
คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
12	2	47.42	10,800	3.260		



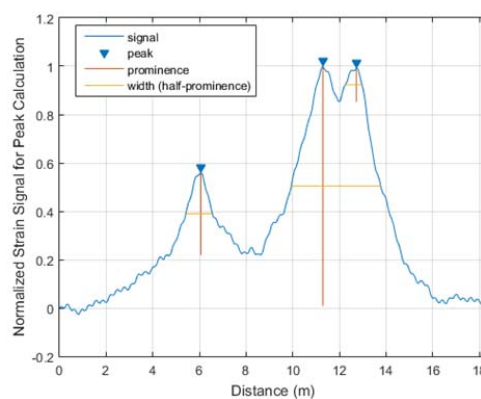
ผ.13 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 13



ภาพที่ ผ.13-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 13



ภาพที่ ผ.13-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 13



ภาพที่ ผ.13-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 13

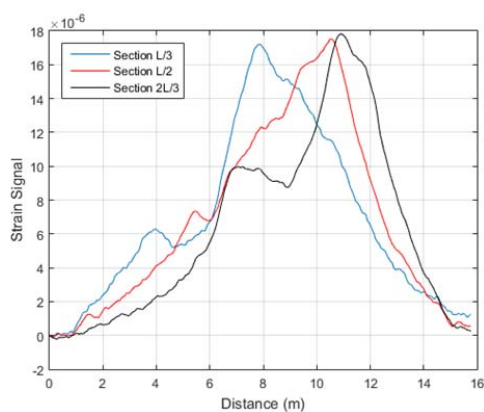
ตารางที่ ผ.13 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 13

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
13	3	52.16	20,200	4.278	1.075	

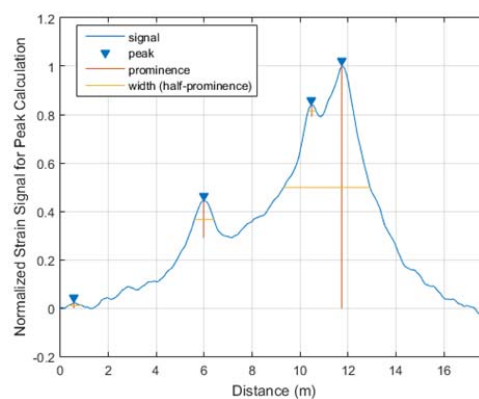
ผ.14 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่14



ภาพที่ ผ.14-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 14



ภาพที่ ผ.14-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 14



ภาพที่ ผ.14-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 14

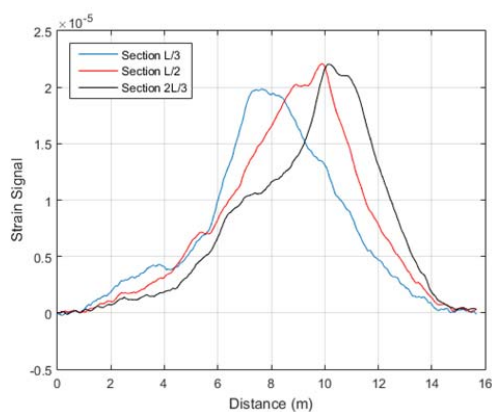
ตารางที่ ผ.14 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 14

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
14	3	46.76	22,000	3.580	1.140	

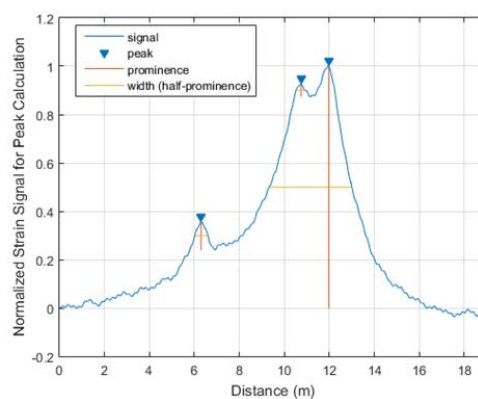
ผ.15 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 15



ภาพที่ ผ.15-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 15



ภาพที่ ผ.15-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 15



ภาพที่ ผ.15-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 15

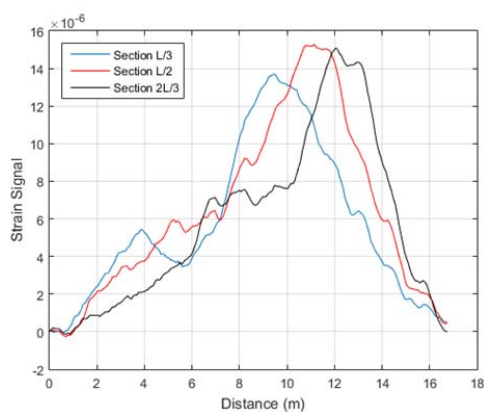
ตารางที่ ผ.15 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 15

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
15	3	40.58	24,700	3.626	1.084	

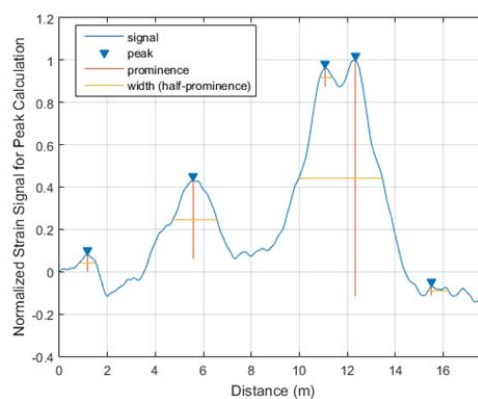
ผ.16 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 16



ภาพที่ ผ.16-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 16



ภาพที่ ผ.16-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 16



ภาพที่ ผ.16-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 16

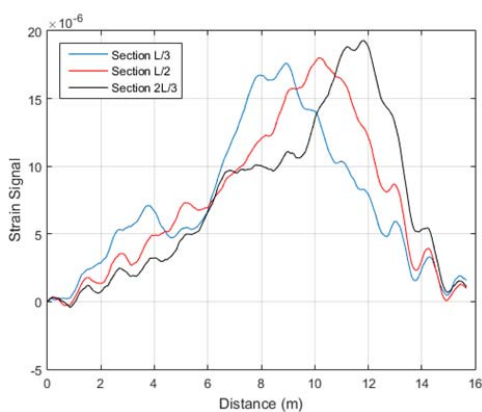
ตารางที่ ผ.16 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 16

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
16	3	57.91	19,390	4.450	1.600	

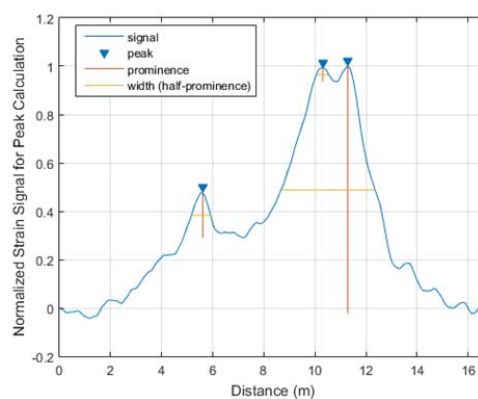
ผ.17 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 17



ภาพที่ ผ.17-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 17



ภาพที่ ผ.17-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 17



ภาพที่ ผ.17-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 17

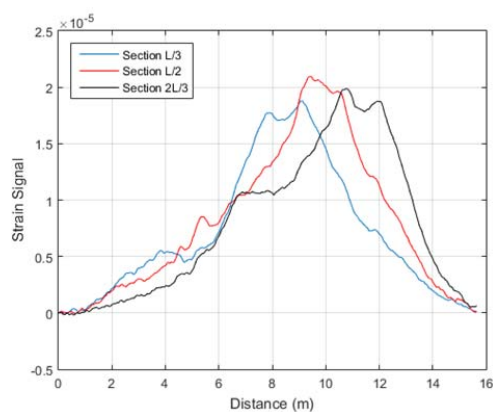
ตารางที่ ผ.17 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 17

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
17	3	54.54	24.700	3.750	1.050	

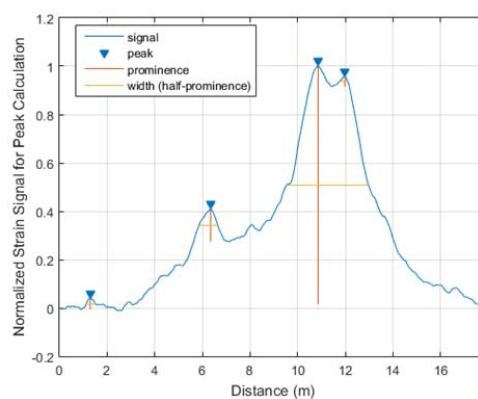
ผ.18 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 18



ภาพที่ ผ.18-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 18



ภาพที่ ผ.18-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 18



ภาพที่ ผ.18-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 18

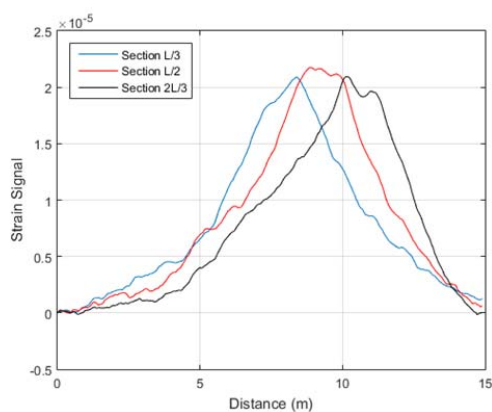
ตารางที่ ผ.18 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 18

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
18	3	35.46	24,700	3.500	1.200	

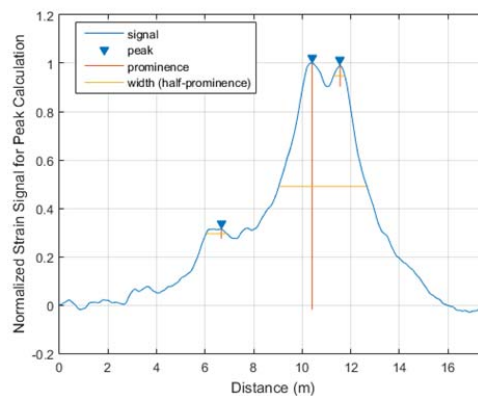
ผ.19 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 19



ภาพที่ ผ.19-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 19



ภาพที่ ผ.19-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 19



ภาพที่ ผ.19-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 19

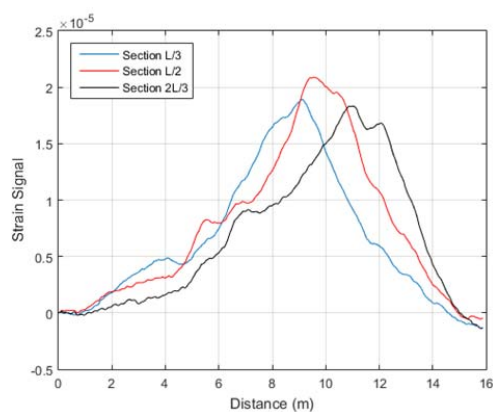
ตารางที่ ผ.19 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 19

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
19	3	44.00	24,070	3.050	1.050	

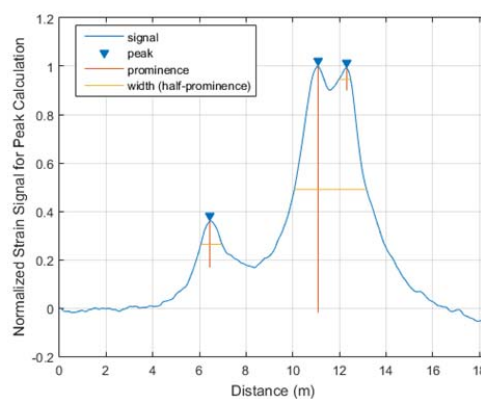
ผ.20 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 20



ภาพที่ ผ.20-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 20



ภาพที่ ผ.20-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 20



ภาพที่ ผ.20-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 20

ตารางที่ ผ.20 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 20

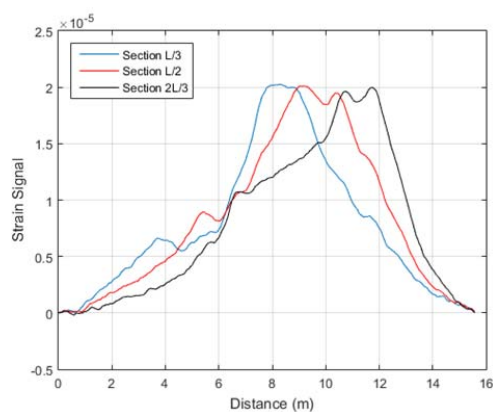
คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
20	3	46.28	24,700	3.450	1.200	



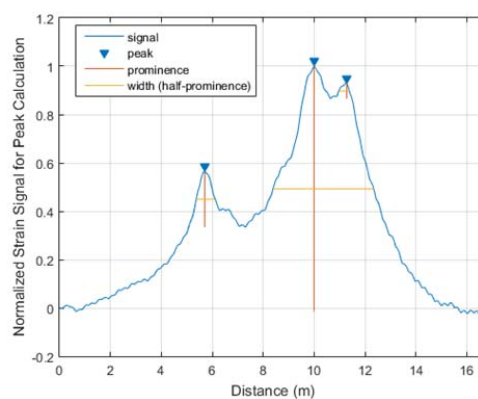
ผ.21 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 21



ภาพที่ ผ.21-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 21



ภาพที่ ผ.21-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 21



ภาพที่ ผ.21-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 21

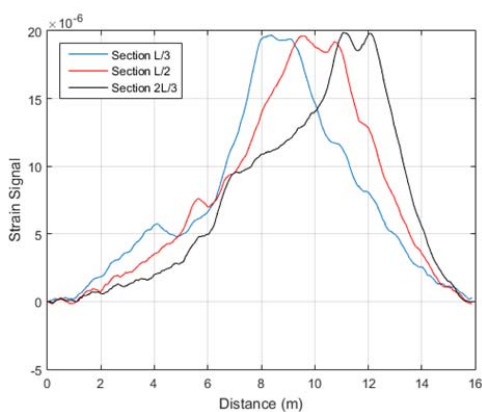
ตารางที่ ผ.21 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 21

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
21	3	45.11	24,100	3.550	1.150	

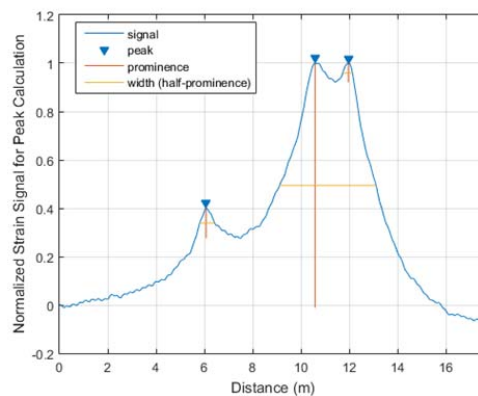
ผ.22 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 22



ภาพที่ ผ.22-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 22



ภาพที่ ผ.22-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 22



ภาพที่ ผ.22-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 22

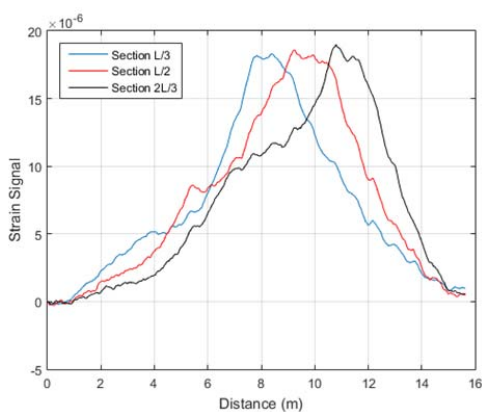
ตารางที่ ผ.22 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 22

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
22	3	42.96	24,580	3.590	1.100	

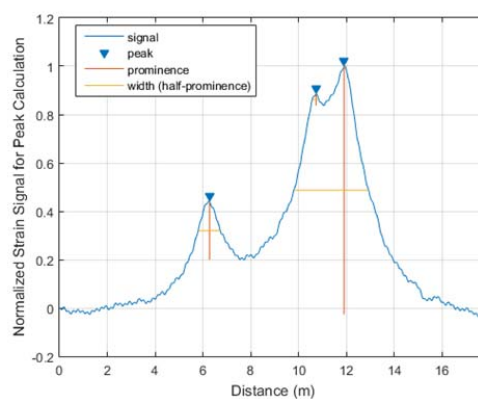
ผ.23 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 23



ภาพที่ ผ.23-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 23



ภาพที่ ผ.23-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 1

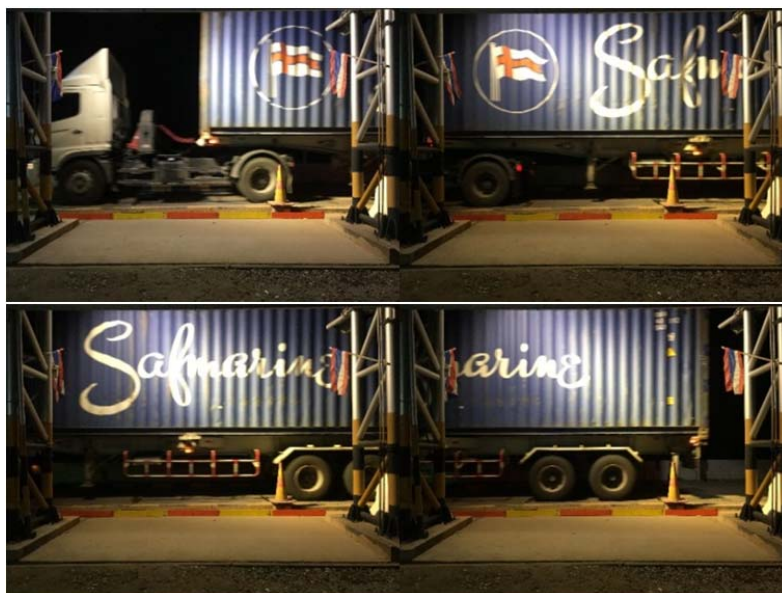


ภาพที่ ผ.23-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 23

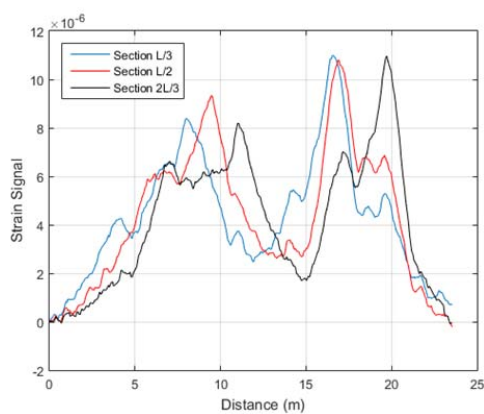
ตารางที่ ผ.23 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 23

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
23	3	31.76	23,020	3.480	1.020	

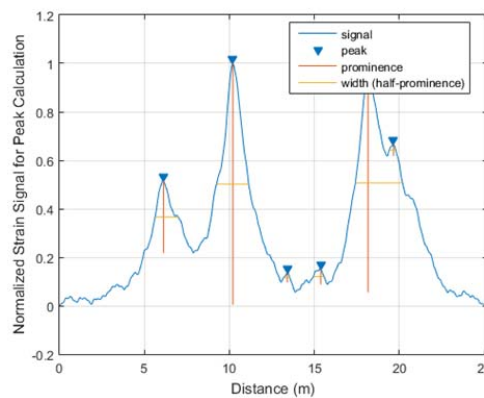
ผ.24 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 24



ภาพที่ ผ.24-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 24



ภาพที่ ผ.24-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 24



ภาพที่ ผ.24-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 24

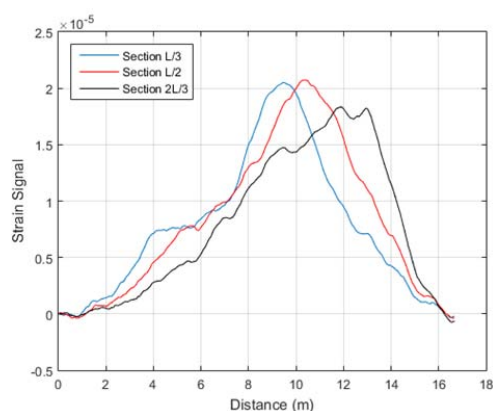
ตารางที่ ผ.24 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 24

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
		(km/h)		S1	S2	S3
24	4	46.25	35,000	3.450	6.150	1.200

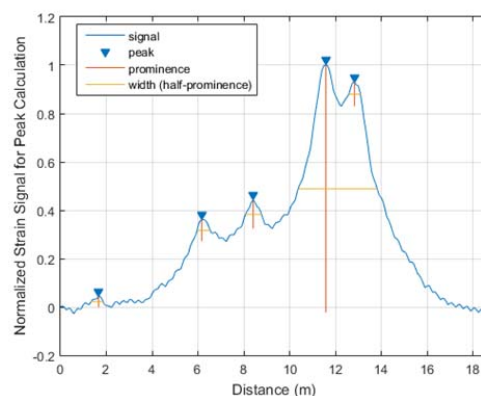
ผ.25 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 25



ภาพที่ ผ.25-1 ลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกคันที่ 25



ภาพที่ ผ.25-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 25

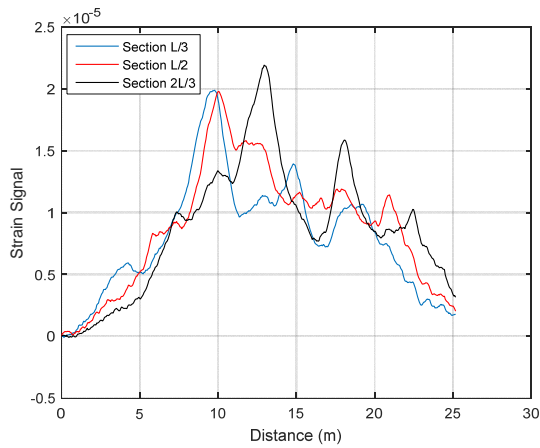


ภาพที่ ผ.25-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถบรรทุกคันที่ 25

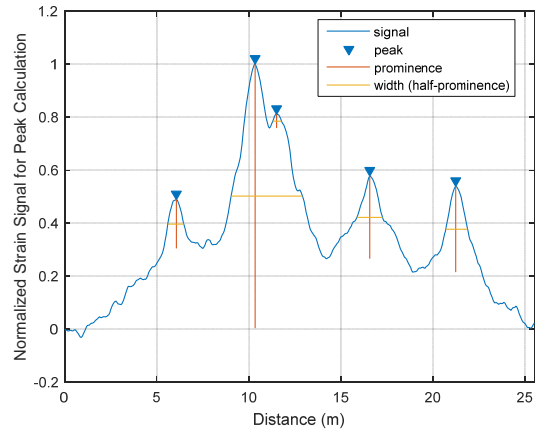
ตารางที่ ผ.25 ตารางข้อมูลรถบรรทุกคันที่ 25

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (km/h)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างระหว่างเพลลา (เมตร)		
				S1	S2	S3
25	4	54.50	27,400	1.650	2.630	1.180

ผ.26 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 26



ภาพที่ ผ.26-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 26



ภาพที่ ผ.26-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 26

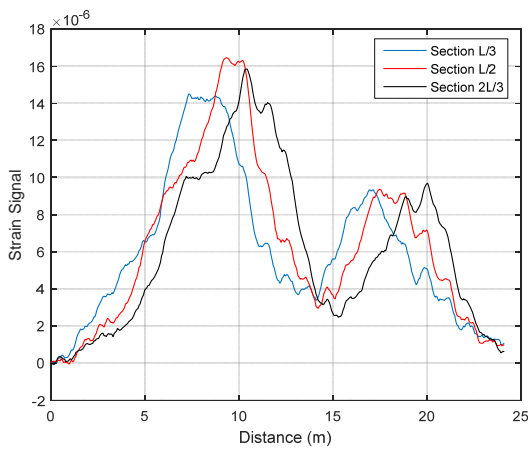
ตารางที่ ผ.26 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 26

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
26	5	38.462	39,050	4.150	1.300	4.650	4.350	

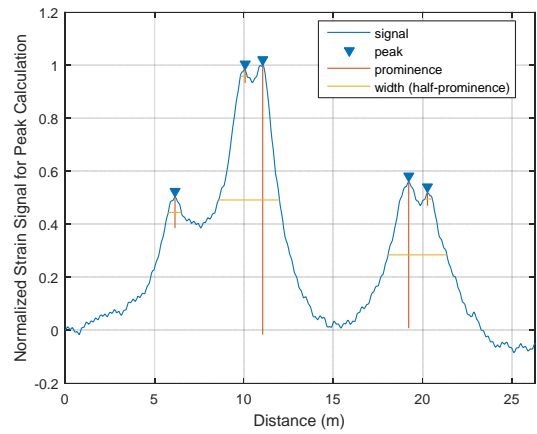
ผ.27 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 27



ภาพที่ ผ.27-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 27



ภาพที่ ผ.27-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 27



ภาพที่ ผ.27-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 27

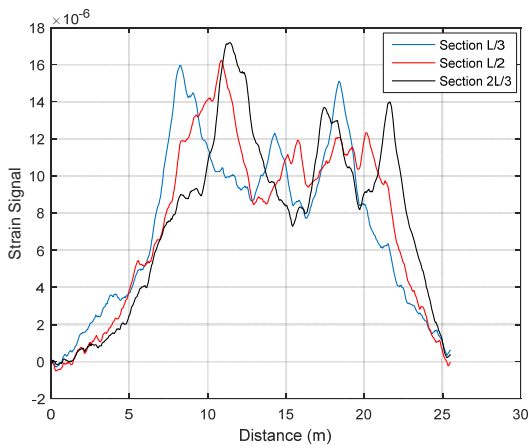
ตารางที่ ผ.27 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 27

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

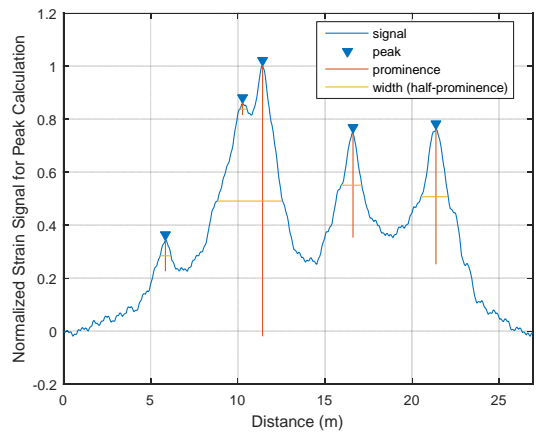
ผ.28 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเวลาของรถคันที่ 28



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

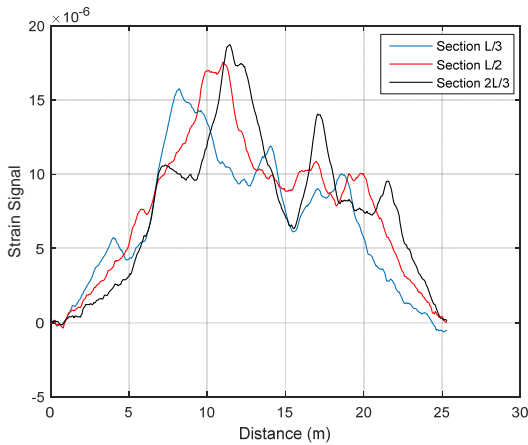
คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
28	5	36.907	37,300	4.020	1.330	4.910	4.410	



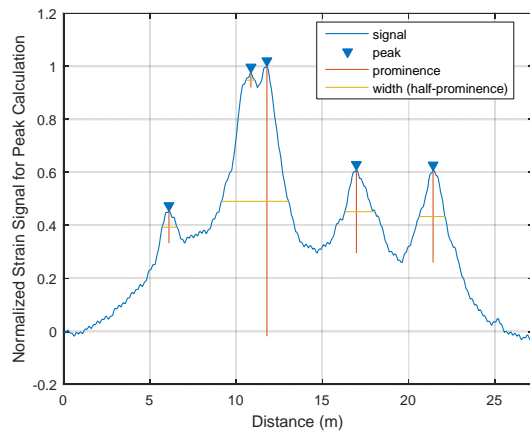
ผ.29 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเวลาของรถคันที่ 29



ภาพที่ ผ.29-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 29



ภาพที่ ผ.29-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 29



ภาพที่ ผ.29-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 29

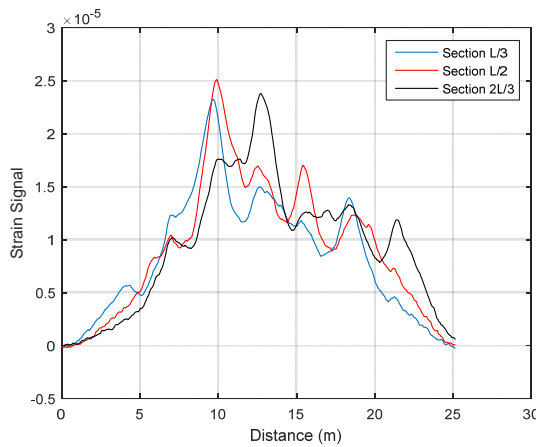
ตารางที่ ผ.29 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 29

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
29	5	41.080	37,600	4.200	1.330	4.710	4.400	

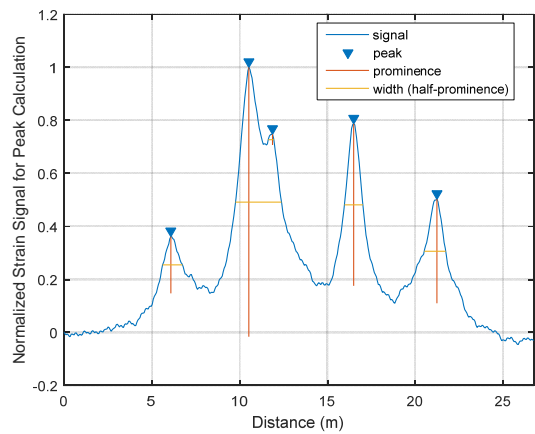
ผ.30 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 30



ภาพที่ ผ.30-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 30



ภาพที่ ผ.30-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 30



ภาพที่ ผ.30-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 30

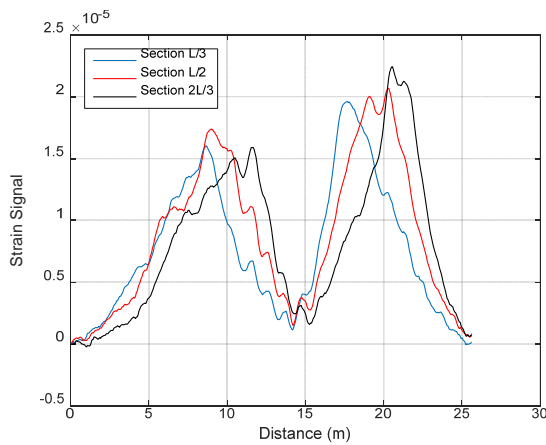
ตารางที่ ผ.30 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 30

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
30	5	39.312	43,500	4.060	1.300	4.270	4.350	

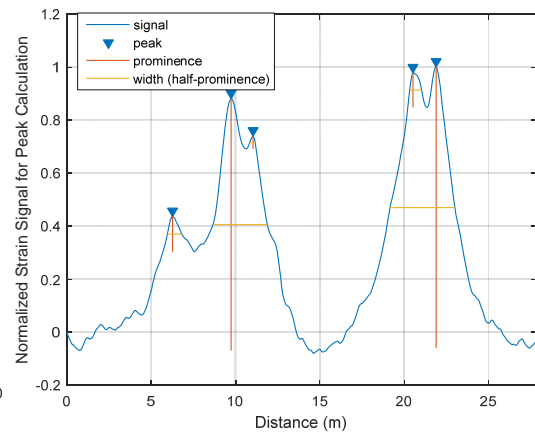
ผ.31 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 31



ภาพที่ ผ.31-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 31



ภาพที่ ผ.31-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 31



ภาพที่ ผ.31-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 31

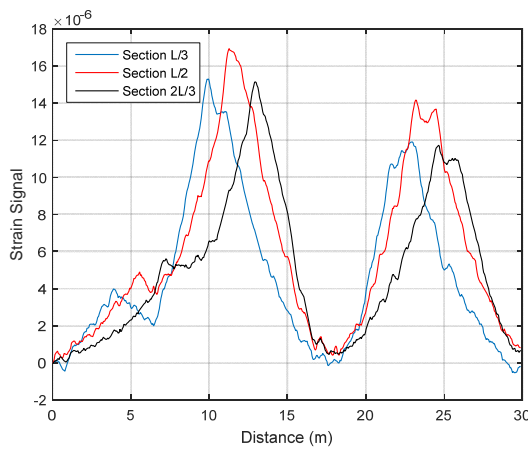
ตารางที่ ผ.31 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 6

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
31	5	43.031	40,000	2.900	1.260	7.840	1.210	

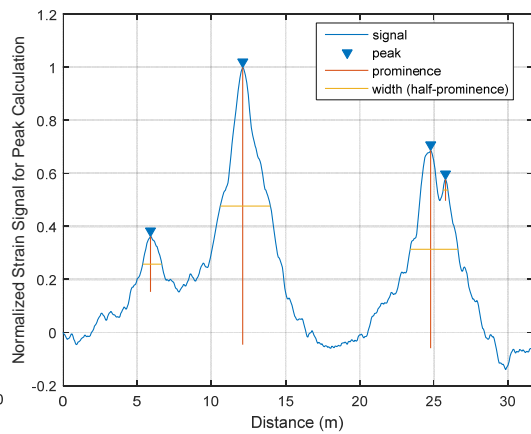
ผ.32 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 32



ภาพที่ ผ.32-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 32



ภาพที่ ผ.32-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 32

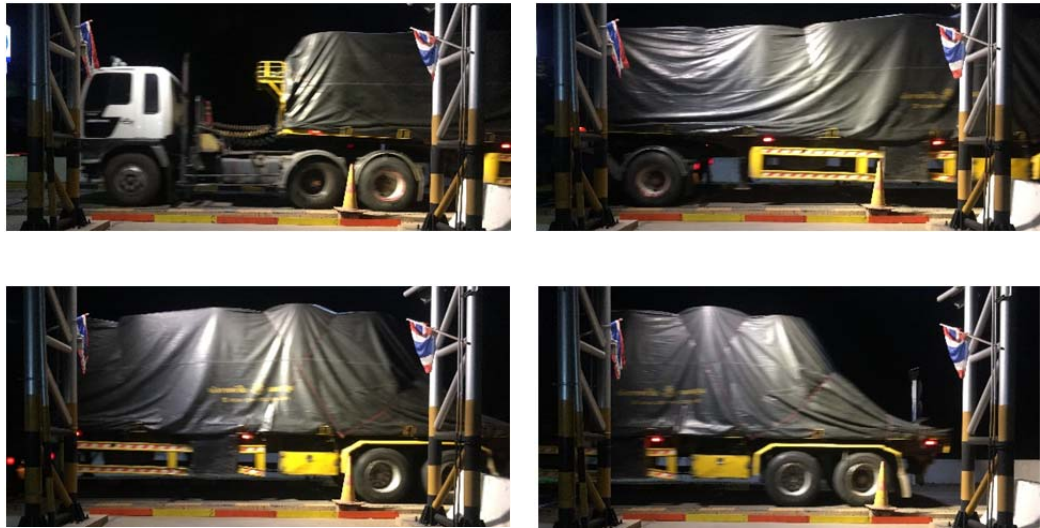


ภาพที่ ผ.32-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 32

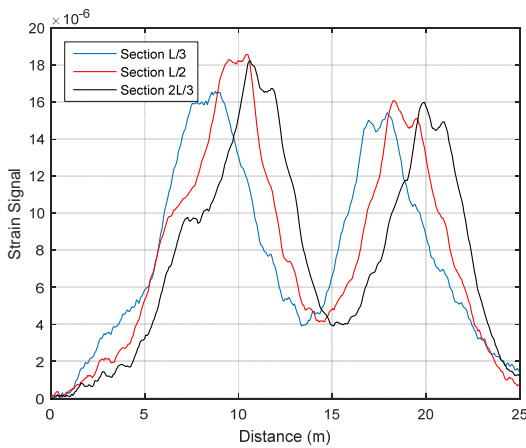
ตารางที่ ผ.32 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 32

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
32	5	36.907	19,090	5.260	1.160	9.260	1.210	

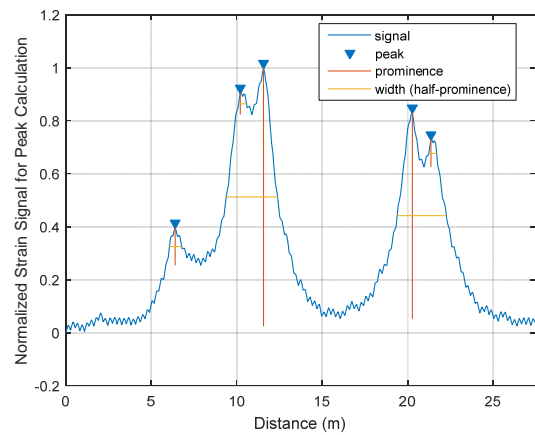
ผ.33 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 33



ภาพที่ ผ.33-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 33



ภาพที่ ผ.33-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 33



ภาพที่ ผ.33-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 33

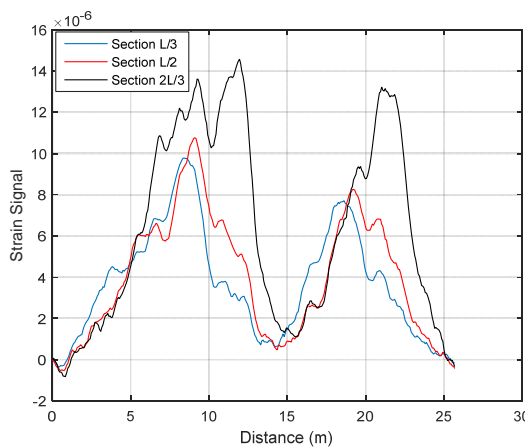
ตารางที่ ผ.33 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 33

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
33	5	43.474	36,100	3.390	1.350	7.730	1.300	

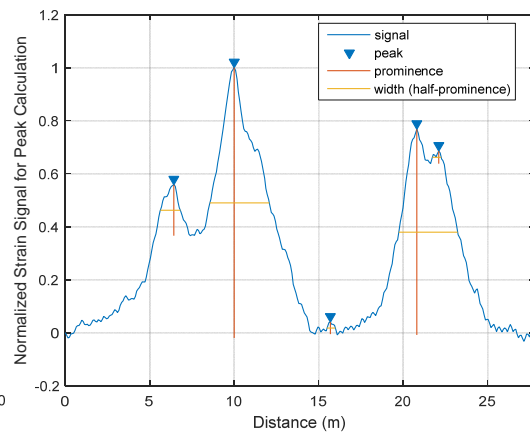
ผ.34 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเวลาของรถคันที่ 34



ภาพที่ ผ.34-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 34



ภาพที่ ผ.34-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 34

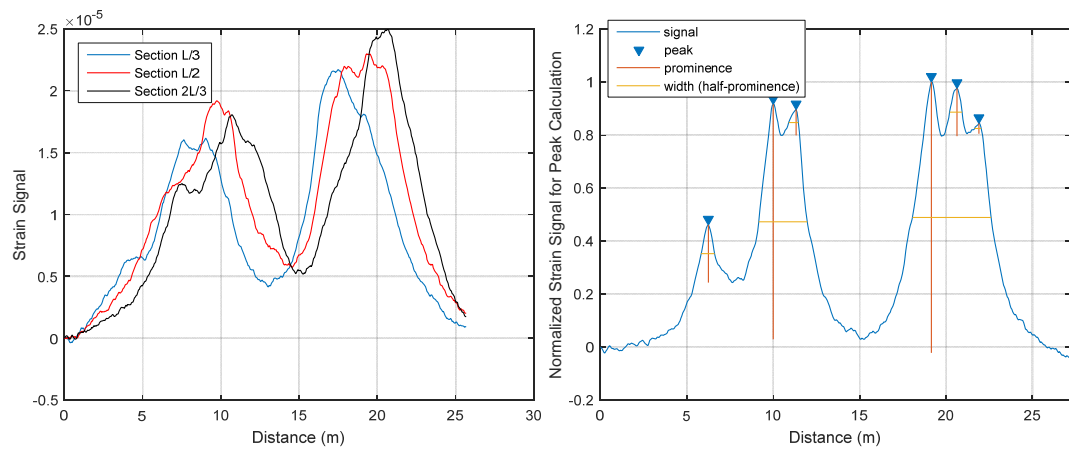


ภาพที่ ผ.34-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 34

ตารางที่ ผ.34 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 34

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
34	5	52.996	21,000	3.570	1.320	8.870	1.440	

### ผ.35 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 35



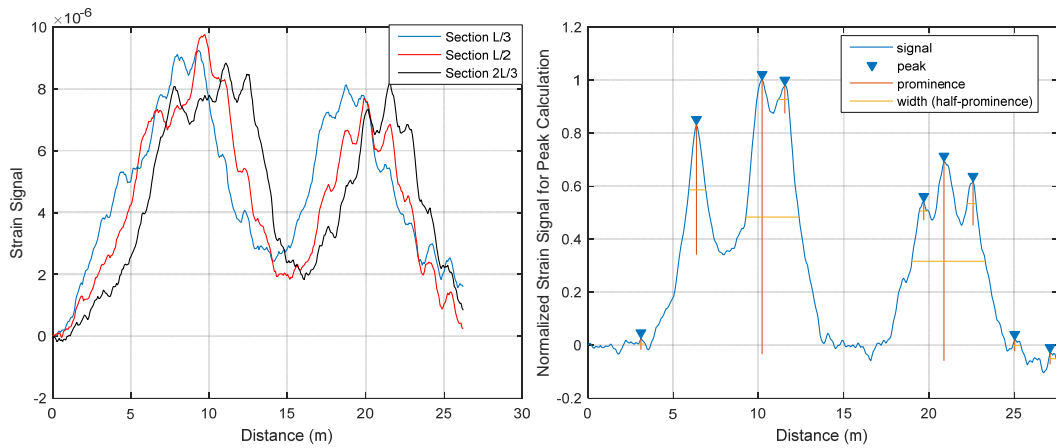
ภาพที่ ผ.35-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 35

ภาพที่ ผ.35-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 35

### ตารางที่ ผ.35 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 35

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
35	6	34.103	46,200	3.400	1.300	7.050	1.300	1.300

ผ.36 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 36



ภาพที่ ผ.36-1 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 36

ภาพที่ ผ.36-2 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 36

ตารางที่ ผ.36 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 36

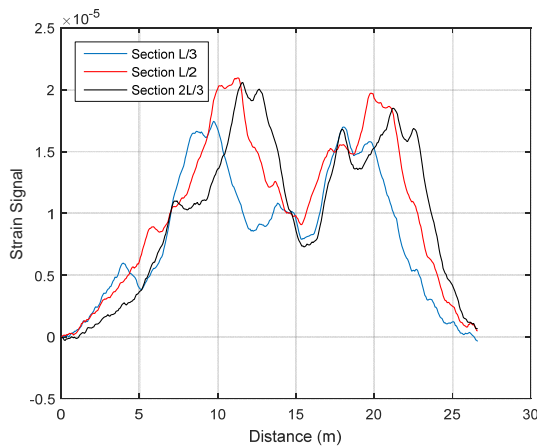
คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
36	6	47.484	19,500	3.300	1.300	7.150	1.350	1.350



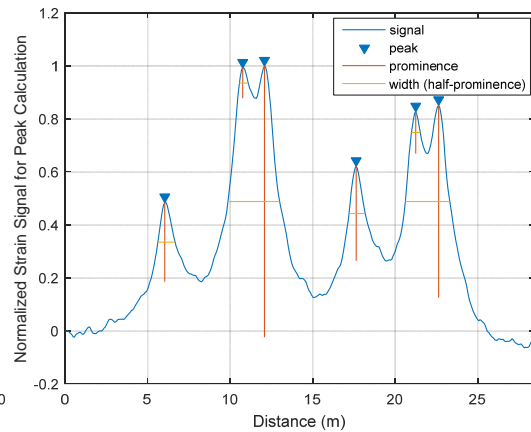
ผ.37 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 37



ภาพที่ ผ.37-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 37



ภาพที่ ผ.37-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 37



ภาพที่ ผ.37-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 37

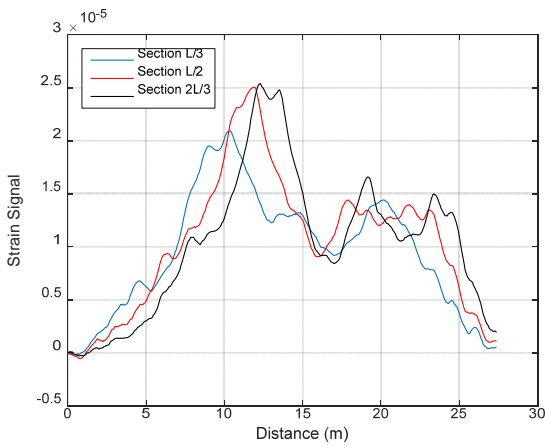
ตารางที่ ผ.37 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 37

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
37	6	45.054	50,500	3.790	1.210	4.370	2.900	1.210

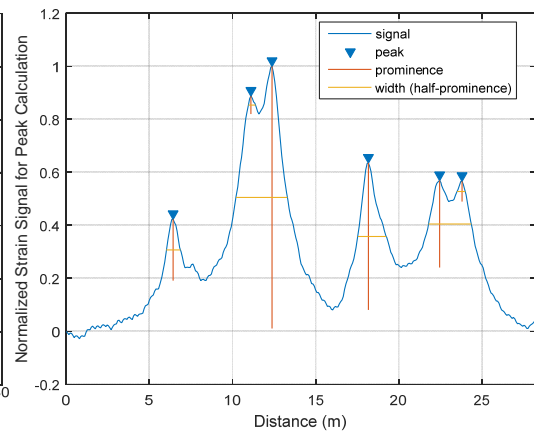
ผ.38 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 38



ภาพที่ ผ.38-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 38



ภาพที่ ผ.38-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 38



ภาพที่ ผ.38-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 38

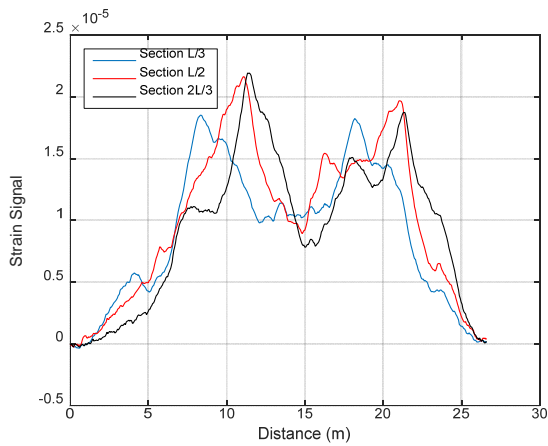
ตารางที่ ผ.38 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 38

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
38	6	51.466	50,320	4.020	1.270	5.110	3.780	1.320

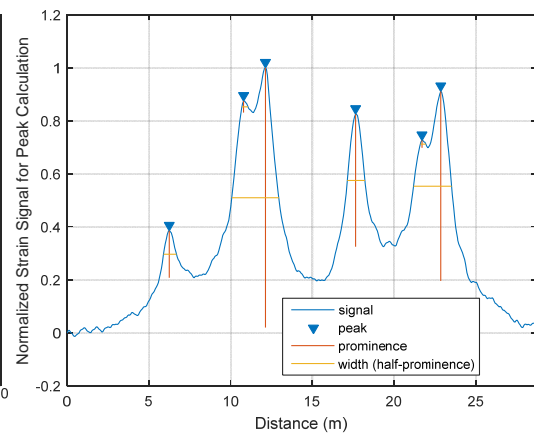
ผ.39 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 39



ภาพที่ ผ.39-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 39



ภาพที่ ผ.39-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 39



ภาพที่ ผ.39-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 39

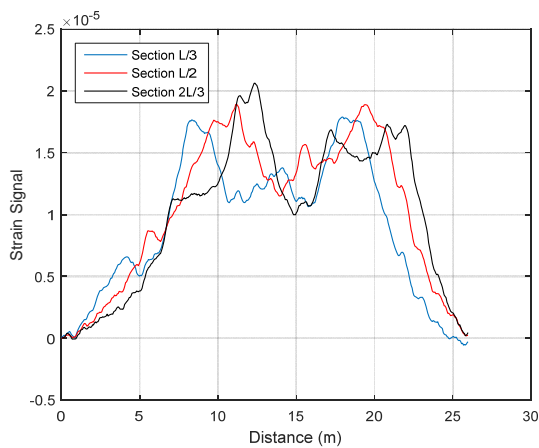
ตารางที่ ผ.39 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 39

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
39	6	40.133	50,500	3.740	1.210	4.580	3.210	1.210

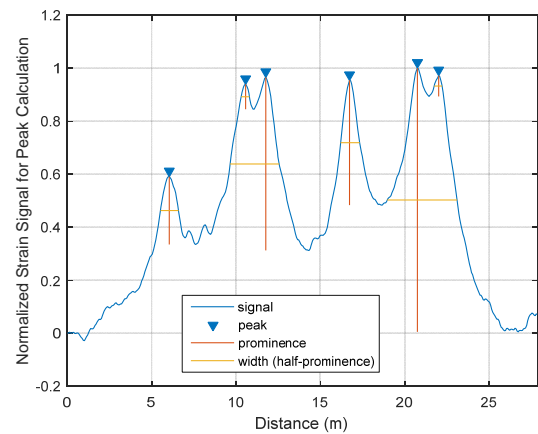
ผ.40 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 40



ภาพที่ ผ.40-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 40



ภาพที่ ผ.40-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 40



ภาพที่ ผ.40-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 40

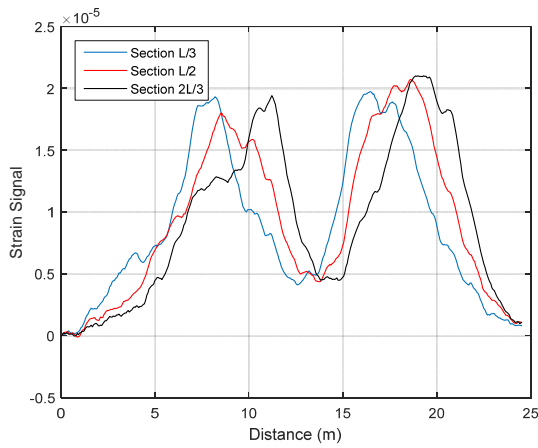
ตารางที่ ผ.40 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 40

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
40	6	41.951	50,500	3.740	1.210	4.210	3.370	1.260

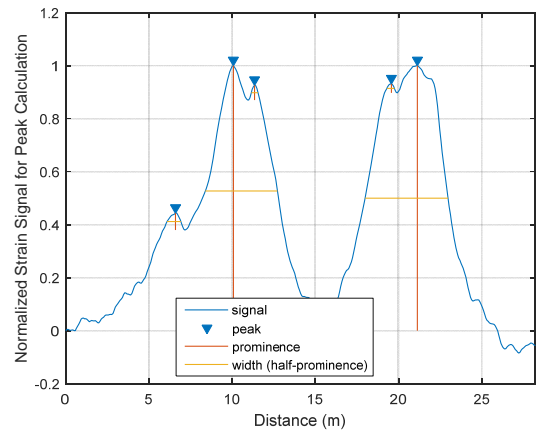
ผ.41 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 41



ภาพที่ ผ.41-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 41



ภาพที่ ผ.41-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 41



ภาพที่ ผ.41-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 41

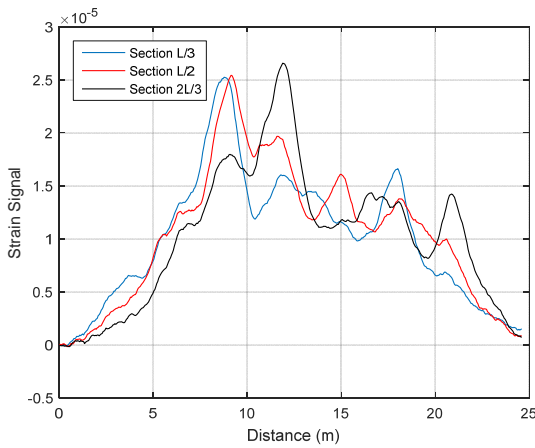
ตารางที่ ผ.41 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 41

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
41	6	46.195	47,000	3.210	1.320	6.320	1.840	1.210

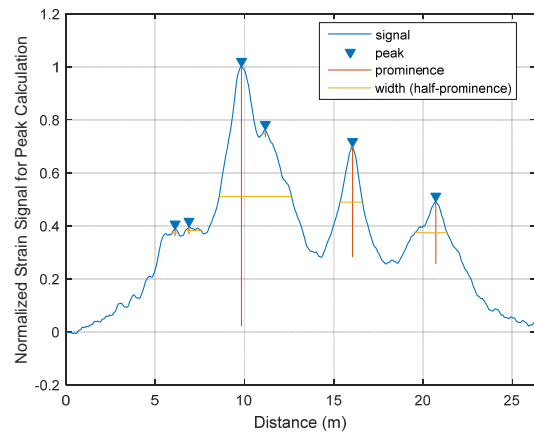
ผ.42 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเวลาของรถคันที่ 42



ภาพที่ ผ.42-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 42



ภาพที่ ผ.42-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 42



ภาพที่ ผ.42-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 42

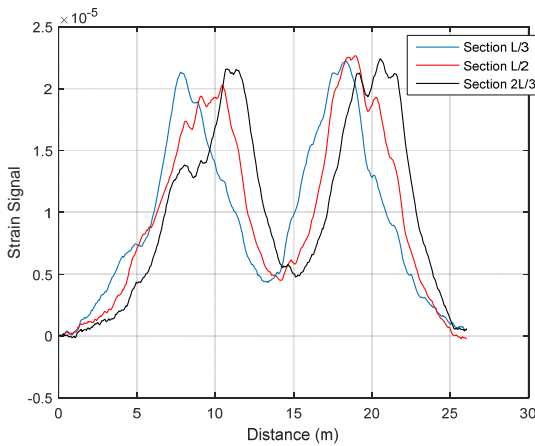
ตารางที่ ผ.42 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 42

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
42	6	38.441	48,000	1.620	2.870	1.390	4.600	4.590

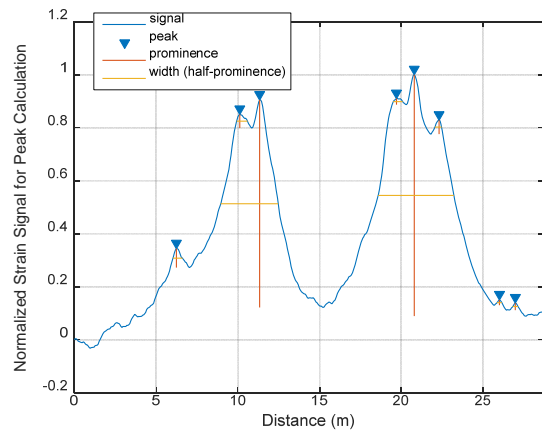
ผ.43 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 43



ภาพที่ ผ.43-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 43



ภาพที่ ผ.43-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 43



ภาพที่ ผ.43-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 43

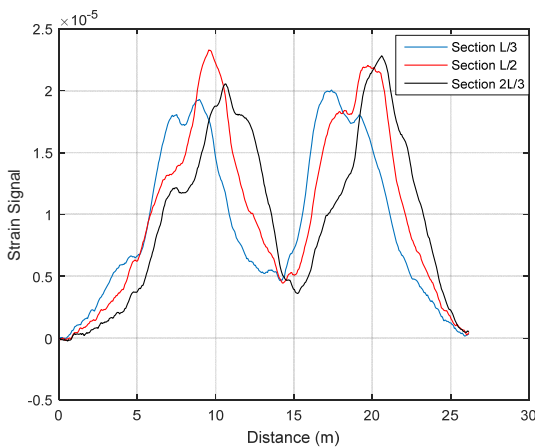
ตารางที่ ผ.43 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 43

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
43	6	39.312	49,700	3.160	1.260	6.470	1.210	1.210

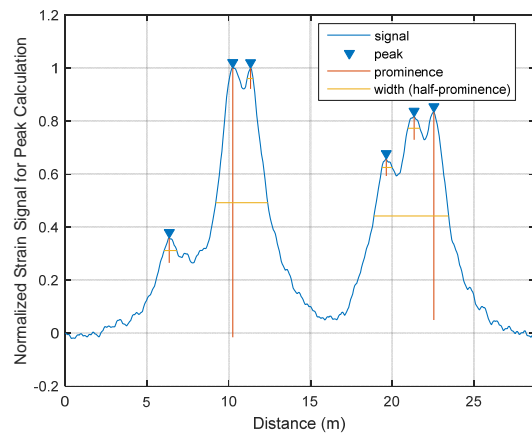
ผ.44 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 44



ภาพที่ ผ.44-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 44



ภาพที่ ผ.44-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 44



ภาพที่ ผ.44-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 44

ตารางที่ ผ.44 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 44

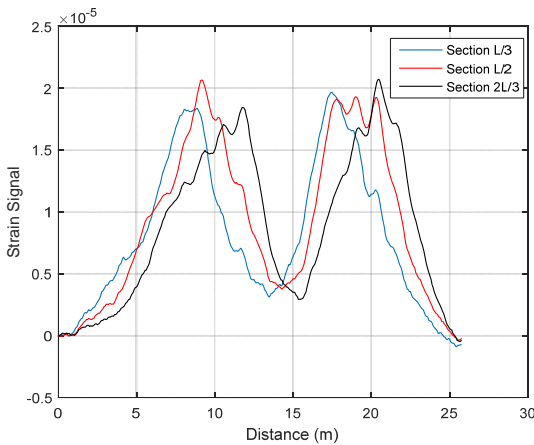
คัน ที่	จำนวน เพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
44	6	38.462	49,000	3.390	1.340	7.230	1.400	1.400



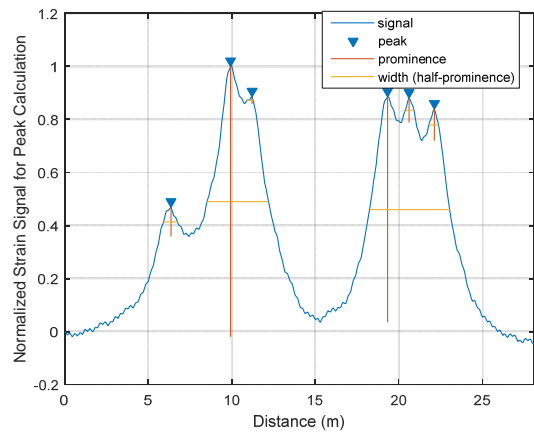
ผ.45 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 45



ภาพที่ ผ.45-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 45



ภาพที่ ผ.45-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 45



ภาพที่ ผ.45-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 45

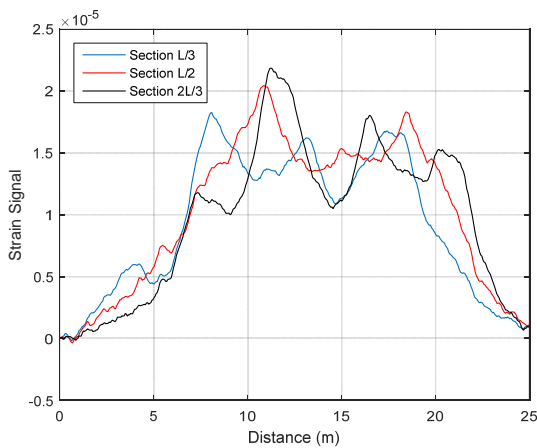
ตารางที่ ผ.45 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 45

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
45	6	49.378	46,520	3.340	1.300	7.100	1.360	1.420

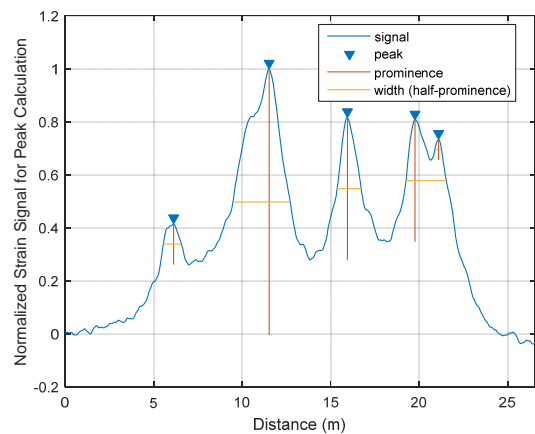
ผ.46 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจนับเพลลาของรถคันที่ 46



ภาพที่ ผ.46-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 46



ภาพที่ ผ.46-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 46



ภาพที่ ผ.46-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 46

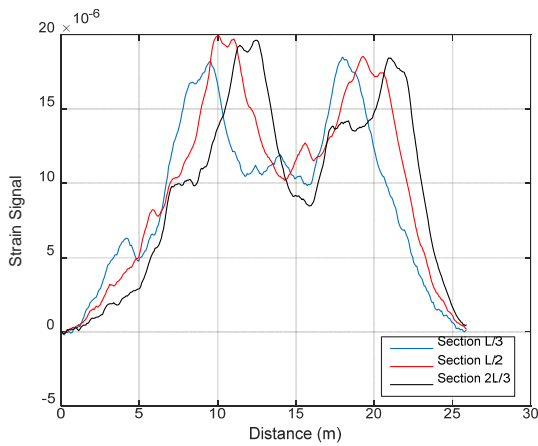
ตารางที่ ผ.46 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 46

คัน ที่	จำนวน เพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
46	6	42.001	50,500	3.790	1.260	3.680	3.470	1.320

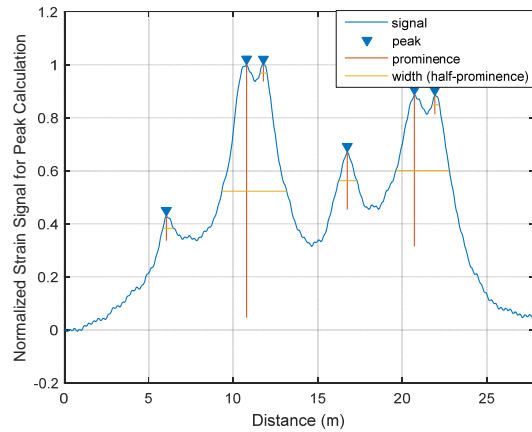
ผ.4 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 47



ภาพที่ ผ.47-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 47



ภาพที่ ผ.47-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 47



ภาพที่ ผ.47-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 47

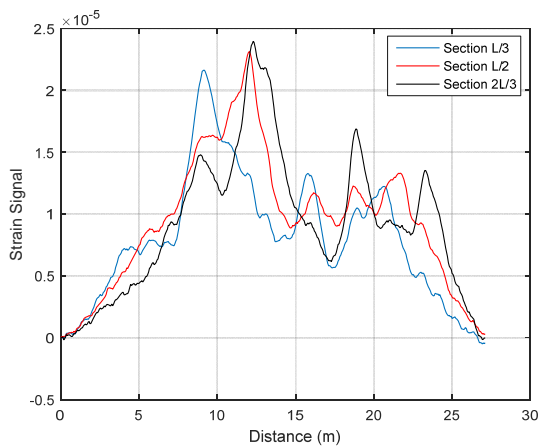
ตารางที่ ผ.47 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 47

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
47	6	46.847	50,450	4.000	1.320	4.430	3.520	1.380

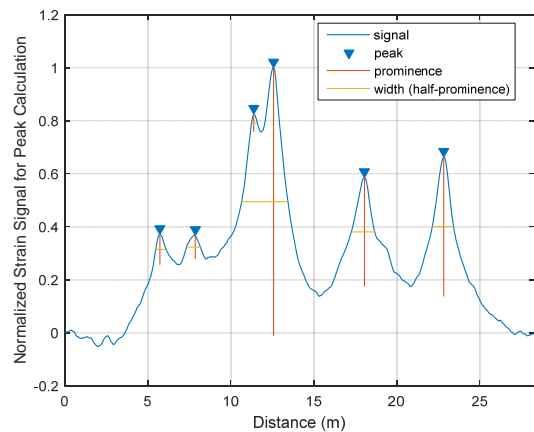
ผ.48 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 48



ภาพที่ ผ.48-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 48



ภาพที่ ผ.48-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 48



ภาพที่ ผ.48-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 48

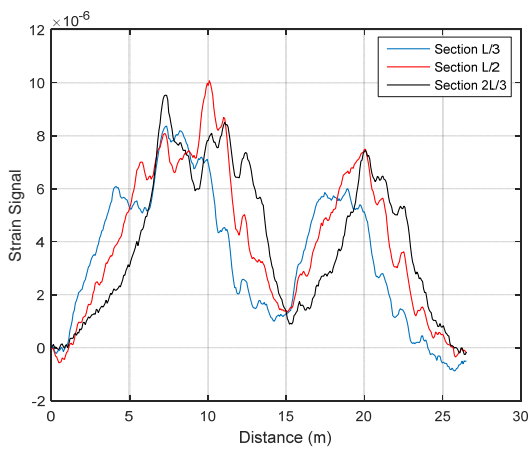
ตารางที่ ผ.48 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 48

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
48	6	44.024	49,500	1.740	3.160	1.260	4.900	4.260

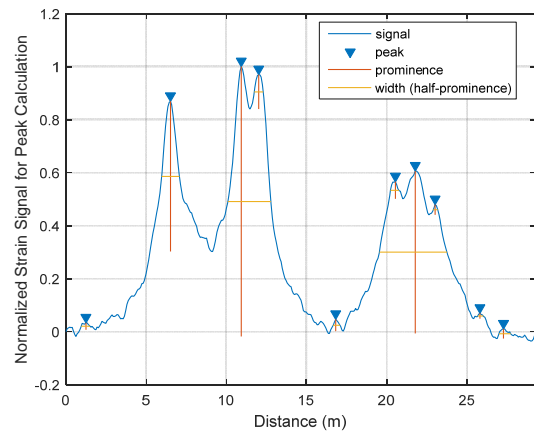
ผ.49 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 49



ภาพที่ ผ.49-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 49



ภาพที่ ผ.49-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 49



ภาพที่ ผ.49-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 49

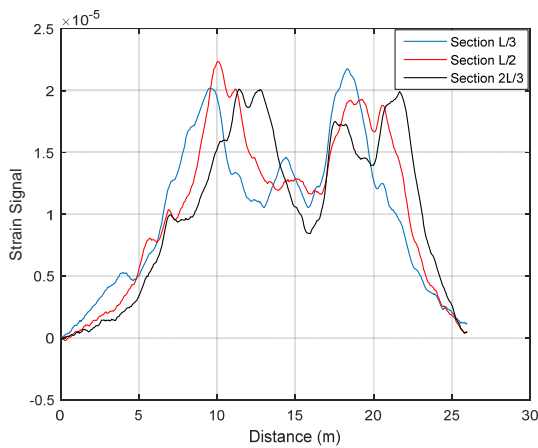
ตารางที่ ผ.49 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 49

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
49	6	50.055	50,500	3.420	1.320	6.470	1.160	1.160

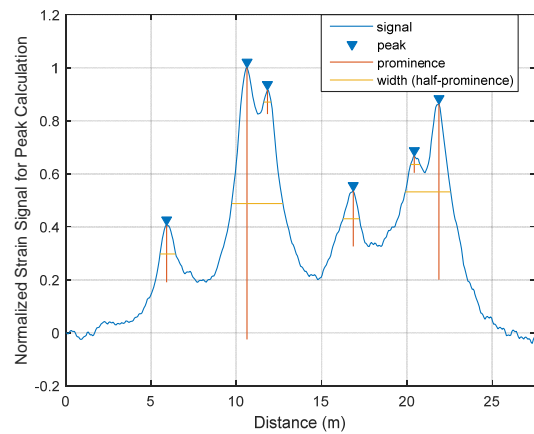
ผ.50 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 50



ภาพที่ ผ.50-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 50



ภาพที่ ผ.50-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 50



ภาพที่ ผ.50-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 50

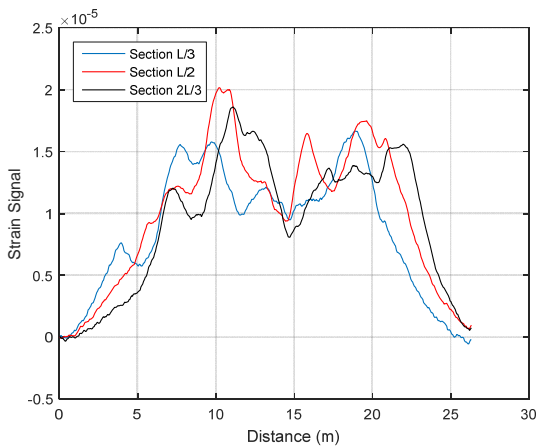
ตารางที่ ผ.50 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 50

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

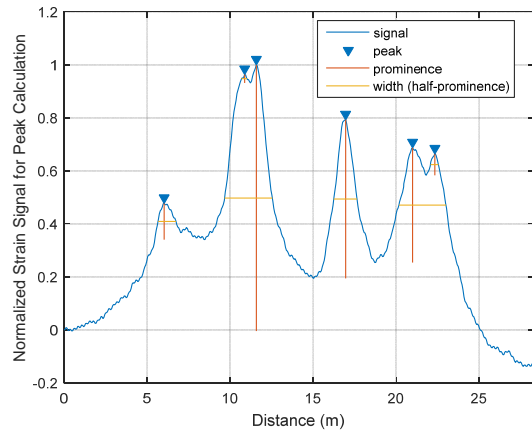
ผ.51 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 51



ภาพที่ ผ.51-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 51



ภาพที่ ผ.51-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 51



ภาพที่ ผ.51-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 51

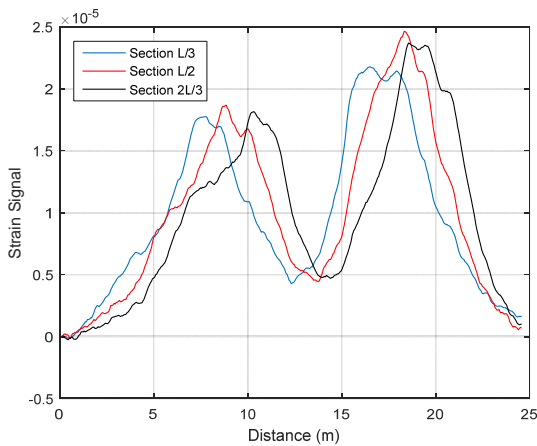
ตารางที่ ผ.51 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 51

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
51	6	39.696	49,000	3.890	1.260	4.580	3.660	1.330

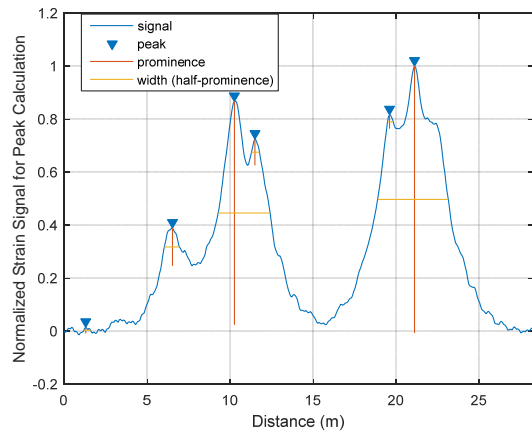
ผ.52 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 52



ภาพที่ ผ.52-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 52



ภาพที่ ผ.52-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 52



ภาพที่ ผ.52-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 52

ตารางที่ ผ.52 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 52

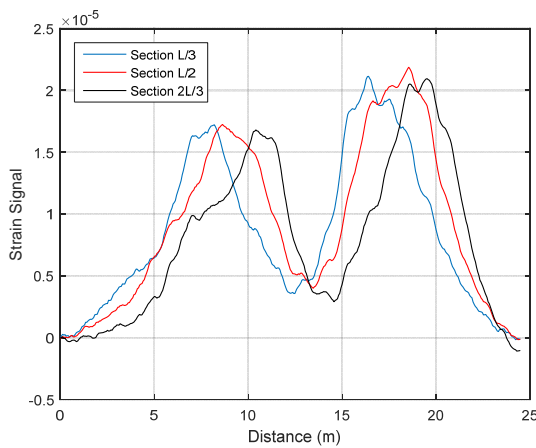
คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
52	6	42.073	47,380	3.340	1.380	7.010	1.300	1.310



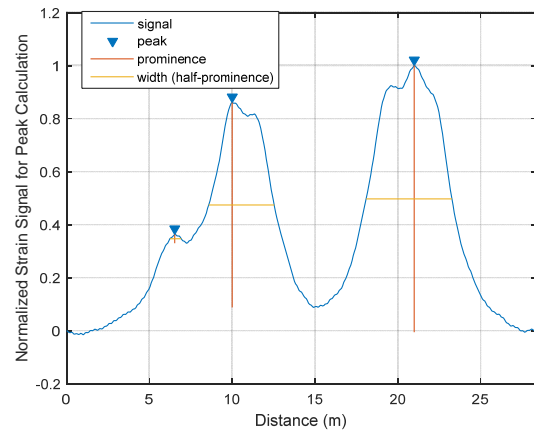
ผ.53 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 53



ภาพที่ ผ.53-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 53



ภาพที่ ผ.53-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 53



ภาพที่ ผ.53-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 53

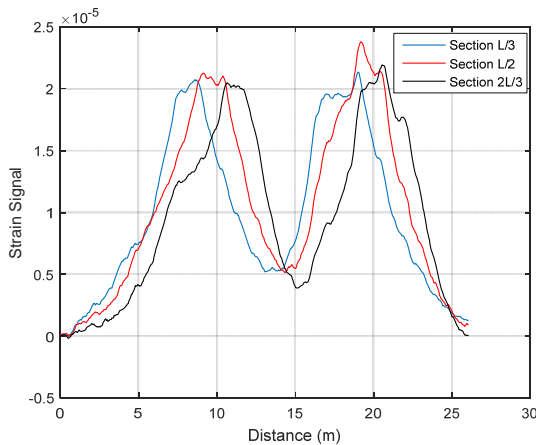
ตารางที่ ผ.53 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 53

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
53	6	45.646	49,100	3.430	1.400	7.250	1.370	1.390

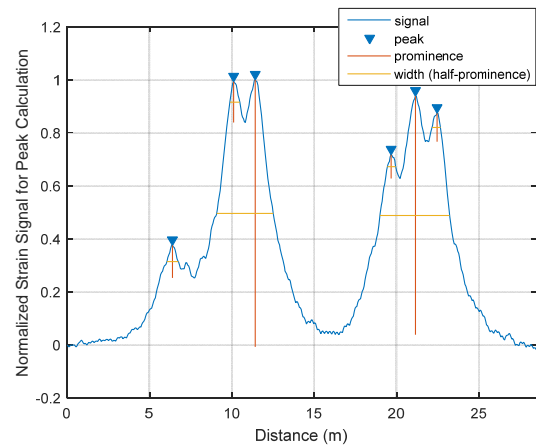
ผ.54 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 54



ภาพที่ ผ.54-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 54



ภาพที่ ผ.54-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 54



ภาพที่ ผ.54-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 54

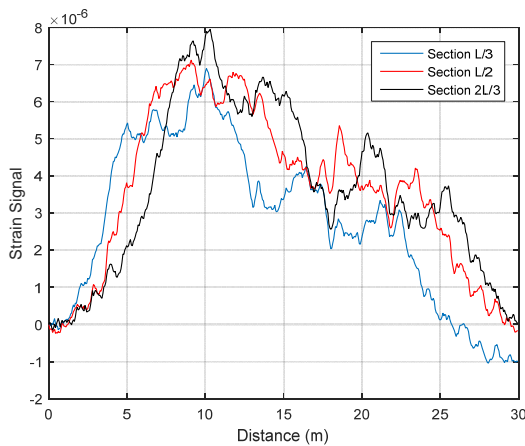
ตารางที่ ผ.54 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 54

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
54	6	34.817	48,700	3.420	1.320	7.220	1.380	1.340

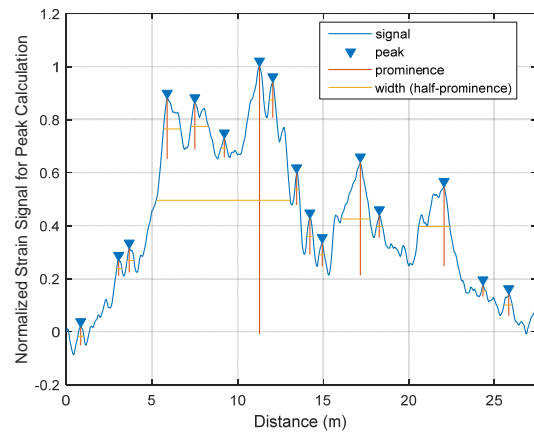
ผ.55 ภาพถ่าย สัญญาณความเครียด และผลการตรวจจับเพลลาของรถคันที่ 55



ภาพที่ ผ.55-1 ลักษณะทางกายภาพของรถคันที่ 55



ภาพที่ ผ.55-2 สัญญาณความเครียดของรถคันที่ 55



ภาพที่ ผ.55-3 จำนวนเพลลาที่ได้จากระบบ FAD ของรถคันที่ 55

ตารางที่ ผ.55 ข้อมูลของรถบรรทุกคันที่ 55

คันที่	จำนวนเพลลา	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะห่างเพลลา (เมตร)				
				S1	S2	S3	S4	S5
55	6	36.946	19,600	1.630	2.740	1.260	4.160	3.950

## รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRMS 13 หลัก) 2561A10802069 สัญญาเลขที่ 18/2561

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ.....การพัฒนาระบบขังน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพานสำหรับการควบคุมยานพาหนะน้ำหนักเกิน

พิกัดบนทางหลวง: กรณีทดสอบภาคสนาม

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน.....ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560.....ถึงวันที่ 30 กันยายน 2561.....

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560.....

### รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) ..... 190,000 บาท เมื่อ ธันวาคม 2560.....

งวดที่ 2 (40%) ..... 152,000 บาท เมื่อ มกราคม 2561.....

งวดที่ 3 (10%) ..... 38,000 บาท เมื่อ -.....

รวม ..... 380,000 บาท.....

### รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	30,000	30,000	-
2. ค่าจ้าง	144,000	90,000	54,000
3. ค่าวัสดุ	90,000	126,850	-36,850
4. ค่าใช้สอย	78,000	97,500	-19,500
5. ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
6. ค่าสาธารณูปโภค (ค่าธรรมเนียมอุดหนุน สถาบัน)	38,000	38,000	-
รวม	380,000	382,350	-2,350

(.....)

ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน