

การพัฒนาการหาน้ำหนักเพลาของยานพาหนะหนักจากผลการตอบสนองความเครียดทาง  
พลศาสตร์ของสะพานที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา

ศุภชัย เชื้อเกตุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
มกราคม 2560  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ ศุภชัย เชื้อเกตุ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)



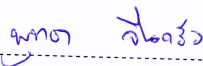
.....กรรมการ

(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)



.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว)



.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พุทธา จินคร้ว)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดิพัฒนา)

วันที่ 6 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาจาก ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งจำเป็นต้องใช้หลักวิชาการด้านพลศาสตร์และคณิตศาสตร์รวมถึงทักษะในการเขียนโปรแกรม การใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดข้อมูล และการใช้เครื่องมือต่าง ๆ สำหรับการเก็บข้อมูลตลอดจนการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล ทั้งนี้ยังเอาใจใส่และให้โอกาสผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ คุณวินัย มะโนนิน ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบและสร้างแบบจำลองย่อส่วน จนผู้วิจัยสามารถนำมาใช้ทดสอบได้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้มอบทุนผู้ช่วยสอนระดับบัณฑิตศึกษา โครงการส่งเสริมนิสิตเรียนดีเข้าเรียนระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2556 ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้ารับการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 107/2558

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแก่บิดาและมารดา บิดาจารย์ และผู้มีอุปการคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่มีส่วนสนับสนุนให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาตราบนานเท่าทุกวันนี้

ศุภชัย เชื้อเกตุ

56910172: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม., (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: การจำแนกประเภทรถบรรทุก/ น้ำหนัก/ รถบรรทุก/ สัญญาณความเครียดทาง  
พลศาสตร์/ การหาน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน

สุภชัย เชื้อเกตุ: การพัฒนาการหาน้ำหนักเพลลาของยานพาหนะหนักจากผลการ  
ตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

(A DEVELOPMENT OF HEAVY VEHICLE'S AXLE LOADS IDENTIFICATION FROM  
BRIDGE DYNAMIC STRAIN RESPONSE WITHOUT USING AXLE DETECTOR)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: พัทธพงษ์ อาสนจินดา, ปร.ด., 165 หน้า.ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการจำแนกประเภทพร้อมการหาน้ำหนักของ  
รถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยใช้เพียงผลตอบสนองความเครียดของโครงสร้างสะพาน เพื่อให้ระบบ  
หาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ใช้อุปกรณ์ที่น้อยลง ซึ่งสามารถลดต้นทุนของระบบและลด  
ความซับซ้อนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลตอบสนองตรวจวัดจากอุปกรณ์หลายประเภท เช่น  
อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา โดยระบบจะทำการจำแนกประเภทของรถบรรทุกจากการหาจำนวนเพลลา  
และระยะห่างเพลลา ก่อนทำการวิเคราะห์น้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุก เพื่อเพิ่ม  
ความถูกต้องในการคำนวณสัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานจะถูกปรับค่าให้มียอดของ  
สัญญาณความเครียดที่ชัดเจนขึ้น ความเร็วของรถบรรทุกคำนวณได้จากสมมติฐานความเร็วคงที่  
โดยหาเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ระหว่างตำแหน่งตรวจวัดสองจุด ด้วยการเทียบค่าสัมประสิทธิ์  
สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียด วิธีการจำแนกประเภทรถบรรทุกสามารถทำได้สองแนวทางที่  
แตกต่างกันสำหรับการหาตำแหน่งเพลลา ได้แก่ 1) การใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของเส้นอิทธิพล  
ทางสถิติของสัญญาณความเครียด และ 2) การใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่ง  
พบว่าวิธีการที่สองมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีแรก สำหรับน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของ  
รถบรรทุกคำนวณได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ปัญหาแบบย้อนกลับของความสัมพันธ์ระหว่าง  
แรงกระทำเคลื่อนที่กับผลตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยวิธียกกำลังสองน้อย  
ที่สุดร่วมกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน และได้เพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเทคนิค  
การปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ งานวิจัยได้ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ โดย  
พิจารณารถบรรทุกประเภท 2-7 เพลลา จากผลการศึกษาพบว่าระบบที่นำเสนอสามารถจำแนก  
ประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องในทุกกรณี และสามารถคำนวณหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้  
ดี โดยมีระดับความถูกต้องของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทุกประเภทร้อยละ 88.36 ที่ระดับ  
ความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และระดับความถูกต้องร้อยละ 91.42 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



56910172: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: TRUCK CLASSIFICATION/ LOAD/ TRUCKS/ DYNAMIC STRAIN/  
BRIDGE WEIGH-IN-MOTION (B-WIM)

SUPACHAI CHUAKET: A DEVELOPMENT OF HEAVY VEHICLE'S AXLE  
LOADS IDENTIFICATION FROM BRIDGE DYNAMIC STRAIN RESPONSE WITHOUT  
USING AXLE DETECTOR. ADVISORY COMMITTEE: PATTARAPONG ASNACHINDA,  
Ph.D. 165 P. 2016.

This research aimed to develop the classification and weight determination of moving truck by using only bridge strain response. This was to reduce the cost and complexity of data analysis due to many types of measurement sensors such as axle detector by decreasing unnecessary instruments in the truck load identification system. The proposed system firstly classified the vehicle configuration by identification of amount of axles and the corresponding axle spacings. The axle weight and gross weight of the truck were determined in the second process of calculation. To improve the accuracy of computation, the strain signals in each bridge section were modified to enhance the clear peak of strain signals. Moving speed of the truck was calculated based on assumption of constant speed by determining the time that the truck traveled between two measurement locations from comparison of correlation coefficient of those strain signals. The classification can be calculated by two different methods of axle identification i.e. 1) using Least Squares of Influence line of bridge strain signals and 2) using Findpeaks function in MATLAB software. It was found that the second approach was more efficient than the first one. Axle weight and gross weight identification were analyzed based on inverse problem of moving load and bridge dynamic response relationship by employing the regularization least squares method. Moreover, the Updated Static Component (USC) technique was also employed to improve accuracy of truck weight identification. Trucks having number of axle from 2 to 7 axles were considered and experimentally studied in the laboratory. Regarding to the result of study, it was indicated that the proposed system can successfully classify the truck configuration for all cases. The truck gross weight was identified with the accuracy of 88.36% at confidence level of 100% and the accuracy of 91.42% at confidence level of 95%

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
การดำเนินการศึกษา .....	3
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่.....	4
งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา .....	13
3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	18
การหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ .....	18
การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยหลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด .....	23
การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยการใช้ฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> ในซอฟต์แวร์ MATLAB.....	25
การหาน้ำหนักเพลลาขณะเคลื่อนที่จากผลการตอบสนองสะพาน .....	26
การลดตัวแปรของจำนวนเพลลาในการวิเคราะห์ .....	40
4 วิธีการศึกษา.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 ผลการศึกษา .....	67
ผลการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	67
ผลการจำแนกประเภทถาวรทุกด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด .....	84
ผลการจำแนกประเภทถาวรทุกด้วยการใช้ฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> ในซอฟต์แวร์ MATLAB.....	86
ผลการหาน้ำหนักถาวรทุกด้วยผลการตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของ สะพาน .....	90
6 สรุปผลการศึกษา.....	139
การหาความเร็วถาวรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ .....	139
การจำแนกประเภทถาวรทุก .....	139
การคำนวณหาน้ำหนักถาวรทุกขณะเคลื่อนที่.....	140
เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	140
ข้อเสนอแนะ.....	141
บรรณานุกรม .....	142
ภาคผนวก .....	146
ภาคผนวก ก.....	147
ภาคผนวก ข.....	150
ภาคผนวก ค .....	157
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	165

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1	เงื่อนไขการจำแนกประเภทรถบรรทุก ..... 26
3-2	รูปแบบการลดตัวแปรของจำนวนเพลลาในการวิเคราะห์ ..... 41
3-3	จุดตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล..... 42
4-1	ค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบในแบบจำลอง $\alpha$ ..... 56
4-2	ประเภทรถบรรทุกตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวง ..... 58
4-3	ระยะห่างเพลลาแบบจำลองรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ ..... 59
4-4	ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ ..... 59
4-5	การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลลา 6 ล้อ น้ำหนักรวม 15 ตัน..... 61
4-6	การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลลา 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน..... 61
4-7	การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลลา 12 ล้อ น้ำหนักรวม 30 ตัน..... 62
4-8	การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลลา 18 ล้อ น้ำหนักรวม 47 ตัน..... 62
4-9	การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลลา 20 ล้อ น้ำหนักรวม 52 ตัน..... 63
4-10	การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา 24 ล้อ น้ำหนักรวม 58 ตัน..... 63
5-1	ค่าระดับความเชื่อมั่นและระดับความถูกต้องในการคำนวณความเร็วรถบรรทุก ..... 80
5-2	ค่าความคลาดเคลื่อนการคำนวณหาระยะห่างเพลลาและน้ำหนัก..... 85
5-3	ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 2 เพลลา และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ..... 107
5-4	ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 3 เพลลา และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ..... 109
5-5	ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 4 เพลลาและค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ ..... 111
5-6	ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 5 เพลลาและค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ ..... 113
5-7	ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 6 เพลลาและค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ ..... 116
5-8	ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 7 เพลลาและค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ ..... 119

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5-9 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 2 เพลา .....	127
5-10 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 3 เพลา .....	128
5-11 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 4 เพลา .....	129
5-12 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 5 เพลา .....	130
5-13 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 6 เพลา .....	131
5-14 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 7 เพลา .....	132
5-15 ระดับความเชื่อมั่นและค่าความถูกต้องในการคำนวณหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก .....	137
5-16 ระยะเวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก .....	138
6-1 ระดับความเชื่อมั่นและค่าความถูกต้องในการคำนวณหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก .....	140

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา.....	13
3-1 กระบวนการหาความเร็ว ระยะห่างเพลลา และการหาน้ำหนัก .....	18
3-2 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของสะพาน .....	19
3-3 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน .....	20
3-4 ผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร .....	20
3-5 ผลต่างของสัญญาณความเครียดระหว่างช่องจราจร ในหน้าตัด $A$ และ $B$ สำหรับใช้หา ความเร็ว .....	21
3-6 สัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการ ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ .....	21
3-7 แผนผังการคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลา .....	24
3-8 สัญญาณระบุตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก .....	25
3-9 ลักษณะโครงสร้างสะพานที่รับแรงกระทำแบบจุด .....	27
3-10 แบบจำลองคานของออยเลอร์-เบอร์นูลี .....	27
3-11 แบบจำลองชิ้นส่วนของคาน .....	27
3-12 แรงที่ขั้วเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ .....	30
3-13 วิธีการคำนวณหาน้ำหนักด้วยเรกูลาร์ไรเซชันกับเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบ ทางสถิติ .....	39
4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงสะพาน .....	44
4-2 ชุดสะพานจำลองย่อส่วน .....	46
4-3 รถบรรทุกจำลองประเภท 2-7 เพลลา .....	47
4-4 แบบจำลองแรงกระทำแบบจุดที่เกิดขึ้นในคานทั่วไป .....	48
4-5 แบบจำลองโมเมนต์คัตเมื่อมีแรง $P$ มากระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน .....	48
4-6 มาตรวัดความเครียด .....	49
4-7 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด .....	50
4-8 อุปกรณ์รวมสัญญาณ ยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178 .....	50
4-9 อุปกรณ์ชั่งถากรถบรรทุกจำลองและชุดควบคุมความเร็ว .....	51
4-10 ผังตำแหน่งมาตรวัดความเครียดของแบบจำลองย่อส่วนสะพาน .....	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-11 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด.....	52
4-12 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด L/4.....	54
4-13 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด L/3.....	54
4-14 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด L/2.....	55
4-15 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด 2L/3.....	55
4-16 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด 3L/4.....	56
4-17 กรณีการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน .....	64
5-1 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณี รถบรรทุกประเภท 2 เพลา.....	68
5-2 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา .....	68
5-3 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุก ประเภท 2 เพลา.....	69
5-4 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณี รถบรรทุกประเภท 3 เพลา.....	70
5-5 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา .....	70
5-6 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุก ประเภท 3 เพลา.....	71
5-7 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณี รถบรรทุกประเภท 4 เพลา .....	72
5-8 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา .....	72
5-9 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุก ประเภท 4 เพลา.....	73
5-10 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณี รถบรรทุกประเภท 5 เพลา.....	74

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-11 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา .....	74
5-12 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา.....	75
5-13 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจราจรสำหรับใช้หาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา.....	76
5-14 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา .....	76
5-15 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา.....	77
5-16 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจราจรสำหรับใช้หาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา.....	78
5-17 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา .....	78
5-18 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา.....	79
5-19 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2 ถึงประเภท 7 เพลา .....	80
5-20 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา .....	81
5-21 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา .....	81
5-22 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา .....	82
5-23 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา .....	82



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-24 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณี รถบรรทุกประเภท 6 เพลา .....	83
5-25 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณี รถบรรทุกประเภท 7 เพลา .....	83
5-26 สัญญาณ โมเมนต์ที่ได้จากการวัด สัญญาณ โมเมนต์ที่สร้างขึ้น และสัญญาณ โมเมนต์ คงค้าง.....	84
5-27 การหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาด้วยฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา .....	87
5-28 การหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาด้วยฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา .....	87
5-29 การหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาด้วยฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา .....	88
5-30 การหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาด้วยฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา .....	88
5-31 การหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาด้วยฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา .....	89
5-32 การหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาด้วยฟังก์ชัน <i>Findpeaks</i> กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา .....	89
5-33 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน กรณีรถบรรทุก 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตร/ ชั่วโมง .....	91
5-34 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา.....	92
5-35 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา.....	92
5-36 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา.....	93
5-37 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา.....	94
5-38 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา.....	95
5-39 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา.....	96



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-53 ค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา.....	105
5-54 ค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา.....	105
5-55 ค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา.....	106
5-56 ค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา.....	106
5-57 ค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา.....	107
5-58 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 2 เพลา.....	122
5-59 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม ทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 3 เพลา.....	123
5-60 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม ทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 4 เพลา.....	123
5-61 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม ทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 5 เพลา.....	124
5-62 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม ทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 6 เพลา.....	125
5-63 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม ทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 7 เพลา.....	125
5-64 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา.....	133
5-65 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา.....	134

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-66 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา.....	134
5-67 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา.....	135
5-68 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา.....	135
5-69 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา.....	136
5-70 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลาถึง 7 เพลา.....	136
5-71 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2-7 เพลา.....	138

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาการขนส่งภาคอุตสาหกรรมจึงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาประเทศ ในปัจจุบันการขนส่งทางบกเพื่อส่งสินค้าอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นการขนส่งด้วยรถบรรทุก ดังนั้นจึงเกิดปัญหาการบรรทุกน้ำหนักเกินกว่ากฎหมายกำหนด ส่งผลให้ทางหลวงได้รับความเสียหาย เสื่อมสภาพเร็วกว่ากำหนด รัฐบาลจึงต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาทางหลวง ดังนั้นรัฐบาลจำเป็นต้องใช้มาตรการในการควบคุมน้ำหนักบรรทุกทั่วประเทศโดยการบังคับใช้กฎหมาย การจัดตั้งด่านชั่งน้ำหนักถาวร หรือ สถานีตรวจวัดน้ำหนักขึ้นทั่วประเทศจึงเป็นมาตรการสำคัญในการแก้ปัญหา

ด่านชั่งน้ำหนักถาวร (Weigh station) เป็นระบบชั่งน้ำหนักบรรทุกขณะหยุดนิ่ง (Static scale) เพื่อดำเนินการควบคุมน้ำหนักบรรทุกให้เป็นไปตามกฎหมายกำหนดเนื่องจากระบบนี้มีความแม่นยำสูงจึงสามารถนำมาบังคับใช้ตามกฎหมายได้ ในการตรวจชั่งจะต้องหยุดรถบรรทุกเพื่อชั่งน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดการชะลอตัวของกระแสจราจรในเส้นทางนั้น ๆ อีกทั้งการติดตั้งและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ตรวจชั่งกระทำได้ยาก การซ่อมแซมแต่ละครั้งต้องใช้งบประมาณจำนวนมาก แม้ว่าจะมีการบังคับใช้กฎหมายเพื่อควบคุมพิกัดน้ำหนักบรรทุก แต่ก็ยังไม่สามารถควบคุมน้ำหนักได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากผู้ขับขี่รถบรรทุกเลือกเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงสถานีตรวจชั่ง ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเส้นทางจราจร อันได้แก่ ถนน และสะพาน ต่อมามีการพัฒนาระบบตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกโดยเรียกว่าระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้หาข้อมูล ได้แก่ ความเร็ว ระยะห่างเพลลา จำนวนเพลลา และ น้ำหนักเพลลา ขณะเคลื่อนที่อยู่บนถนน หรือ สะพาน ทำหน้าที่คัดแยกรถบรรทุกเข้าสู่ระบบชั่งน้ำหนักแบบถาวรเพื่อตรวจสอบน้ำหนัก ระบบ WIM สามารถติดตั้งไว้บนผิวทาง และ สะพาน เนื่องจากระบบนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ในการซ่อมบำรุงจะต้องลอกผิวทาง ทั้งนี้ยังต้องปิดเส้นทางจราจรทุกครั้งระหว่างการดำเนินงาน

ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบที่สามารถใช้ได้กับสะพาน โดยการนำเซนเซอร์ เช่น มาตรการวัดความเครียด (Strain gauge) หรือ เครื่องตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ไปติดตั้งไว้ที่กานใต้สะพาน ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกขณะที่วิ่งผ่านสะพานได้ โดยเรียกระบบนี้ว่า Bridge-Weigh-in-Motion (B-WIM) หรือ สะพานชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ คือ ระบบตรวจวัดน้ำหนักจากการแปลงค่าผลตอบสนอง โดยการติดตั้งมาตรการวัดความเครียด (Strain gauge)

ไว้ได้สะพาน เพื่อวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์และนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักของรถบรรทุก ในช่วงการเริ่มต้นการพัฒนา ระบบ B-WIM จะต้องติดตั้งเครื่องมือตรวจจับเพลลา (Axle detector) เพื่อหาความเร็ว ระยะห่างเพลลา และจำนวนเพลลาของรถบรรทุก จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จาก มาตรวัดความเร็วและเครื่องตรวจจับเพลลาไปคำนวณหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุก

การหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่จากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน หรือระบบ Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM) เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาการควบคุม การบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดเนื่องจากผู้ขับขี่รถบรรทุกเปลี่ยนเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจชั่ง การหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ กระทำได้โดยการติดตั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์ไว้ บริเวณใต้สะพาน แล้วเก็บข้อมูลผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานที่เกิดขึ้นจากการสัญจร ของรถบรรทุก ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานได้ โดยที่ผู้ขับขี่รถบรรทุกจะไม่สามารถทราบตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด จึงไม่สามารถ หลีกเลี่ยงการตรวจวัดได้ นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งยังต่ำกว่าสถานีชั่งน้ำหนักแบบถาวร ในการบำรุงรักษาก็กระทำได้ง่ายโดยไม่ต้องปิดเส้นทางจราจร

### วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธีการจำแนกประเภทรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้ สัญญาณความเร็วทางพลศาสตร์
2. เพื่อพัฒนาระบบ Bridge weigh-in-motion (B-WIM) แบบปราศจากอุปกรณ์ ตรวจจับเพลลา (Free of axle detector หรือ FAD) ให้สามารถหาน้ำหนักรถบรรทุกได้อย่างมี ประสิทธิภาพ

### ขอบเขตของการศึกษา

1. พิจารณาโครงสร้างสะพานแบบช่วงเดียว มีจุดรองรับแบบธรรมดา (Simple support) ที่มีพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบอิลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic)
2. พิจารณาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกเป็นแบบจุด
3. การวิเคราะห์จะสมมติให้ล้อรถบรรทุกกดติดอยู่กับสะพานตลอดเวลา
4. ในการวิเคราะห์จะพิจารณารถบรรทุกวิ่งบนสะพานเพียงคันเดียว และมีสมมติฐานว่า รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วคงที่
5. ในการทดสอบจะทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้เพียงผลตอบสนองสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์
2. เพื่อให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิตย์ (Static gross weight) และน้ำหนักเพลาทงสถิตย์ (Static axle weight) ของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน
3. ไม่ต้องหยุดรถบรรทุกเพื่อขึ้นชั่งน้ำหนักซึ่งเป็นการลดการติดขัดของกระแสจราจรประหยัดเวลาของผู้ขับขี่ และป้องกันการหลีกเลี่ยงค่าน้ำหนัก
4. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของหลักการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพล่าว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะนำไปใช้งานจริง
5. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริง
6. สามารถใช้ระบบ B-WIM ในการหาน้ำหนักทางพลศาสตร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสำรวจและออกแบบถนน หรือสะพานได้

## การดำเนินการศึกษา

1. ทบทวนงานวิจัยในอดีตและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. จัดทำชุดทดสอบการจำแนกประเภทรถบรรทุก การหาน้ำหนักเพล่าและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วน
3. ทำการทดสอบการหาความเร็วของรถบรรทุก พร้อมกับศึกษาความเป็นไปได้ในการหาค่าระยะห่างเพล่าและจำนวนเพล่าเพื่อจำแนกประเภทโดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพล่า
4. วิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลการทดสอบเบื้องต้น
5. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
6. ทำการทดสอบระบบ FAD B-WIM เพื่อหาน้ำหนักเพล่าและน้ำหนักรวม
7. ทำการทดสอบการจำแนกประเภทรถบรรทุก การหาน้ำหนักเพล่าและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วนเพิ่มเติม
8. ทำการวิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด
9. สรุปผลการศึกษา
10. จัดทำวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้นำเสนองานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาระบบการหาความเร็ว จำนวนเพลาและระยะห่างเพลา โดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (FAD) จากนั้นจึงทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลา และไม่ใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลา โดยแสดงไว้ในหัวข้อต่อไปนี้

#### งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่

Laman and Nowak (1996) ได้พัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรถบรรทุกกับความเค้นด้วยการนำระบบ WIM มาใช้กับสะพานที่ประกอบด้วยคาน (Girder) เหล็ก 5 ตัว โดยการใช้วิธีของเรนโพล (Rainflow) วัดความเค้นภายใต้การจราจรปกติโดยมีอุปกรณ์ 2 ชุด สำหรับใช้ในการเก็บและบันทึกข้อมูล โดยที่เครื่องมือชุดที่ 1 คือ ระบบการตรวจวัดความเค้น (Stress measuring system; SMS) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลความเค้นในอดีตที่ผ่านภายใต้การจราจรปกติและรวบรวมข้อมูลเข้ากับแผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธีเรนโพล และวิธีอื่น ๆ เครื่องมือชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก (Truck weighting system; TWS) ทำหน้าที่คำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกและน้ำหนักเพลาจากความเครียด โดยการใช้เส้นอิทธิพล (Influence line) ของสะพาน องค์ประกอบต่าง ๆ ของรถบรรทุกสามารถหาได้โดยการใช้เซนเซอร์ 2 ตัวติดขนานกับผิวทาง

Thater, Chang, Schelling and Fu (1998) ได้นำระบบ WIM มาใช้ทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของรถบรรทุกเคลื่อนที่ โดยการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วแยกผลทางพลศาสตร์จากนั้นจึงหาน้ำหนักทางสถิตย์ โดยการใช้เทคนิคการกรองผลทางพลศาสตร์เทียบเท่า (Equivalent dynamic filter technique, EDFT) แยกแรงออกเป็นแรงทางพลศาสตร์และผลตอบสนองเสมือนทางสถิตย์ (Pseudo static response) โดยใช้วิธีฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์มเทียบผลจากการแอนตัวเป็นสัดส่วนเรียกว่าอัตราส่วนการกรองเทียบเท่า (Equivalent filtering ratio, EFT) จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณ และให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำนายน้ำหนักรถได้ถึงร้อยละ  $\pm 5$  ในขณะที่ใช้ระบบ WIM ที่มีอยู่เดิมให้ความถูกต้องแม่นยำในช่วงร้อยละ  $\pm 10$  เท่านั้น แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถหาน้ำหนักเพลา และไม่สามารถนำคุณสมบัติสะพานจริงมาพิจารณาได้



Chan, Law, Yung and Yuan (1999) สามารถหารูปแบบของคำตอบที่แน่นอน (Closed-form solution) ได้จากการหาน้ำหนักจากปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักคงที่ในขณะที่เคลื่อนที่ โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) คำนวณน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time domain) โดยใช้พื้นฐานของสมการออยเลอร์ (Euler's equation) ของคาน และจำลองรถบรรทุกสำหรับสร้างปฏิกิริยาตอบสนองเป็นแบบ 2 เพลลา

Zhu and Law (1999) ได้จำลองรูปแบบสะพานเป็นแบบต่อเนื่องหลายช่วงและมีคุณสมบัติของน้ำคดไม่คงที่ โดยใช้หลักการของ Hamilton วิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นไหวของคานสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ จุติรองรับภายในแทนที่ด้วยสปริงที่มีความแข็งมาก วิธีการหาน้ำหนักจะใช้หลักการซูเปอร์โพสิชันเชิงโหมด (Modal superposition) และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) น้ำหนักที่คำนวณได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา (Time domain) จากการศึกษาพบว่าการคำนวณน้ำหนักมีความน่าเชื่อถืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยที่จำนวนของจุดตรวจวัดต้องไม่น้อยกว่าจำนวนโหมดการสั่นของสะพาน และคำตอบที่ได้จากวิธีผลต่างกำลังสองที่มีการเพิ่มเทอมความราบเรียบ (Smoothing term) จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีหาผลต่างกำลังสองที่ไม่เพิ่มเทอมความราบเรียบ

Law, Chan and Zeng (1999) ได้ศึกษาการหาค่าน้ำหนักของรถบรรทุกเคลื่อนที่โดยการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน ใช้ข้อมูลจากผลการตอบสนองการสั่นไหวของสะพานในรูปแบบ Frequency-time domain โดยปราศจากข้อมูลลักษณะรถบรรทุก ซึ่งจำลองรถบรรทุกให้เป็นแบบ 1 เพลลา และ 2 เพลลา โดยมีระยะห่างเพลลาคงที่ เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุติรองรับแบบธรรมดา (Simple beam) และมีความหน่วง (Viscous damping) ผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fourier transform) และแปลงน้ำหนักของรถบรรทุกกลับไปสู่โดเมนของเวลา (Time domain) ความถูกต้องในการคำนวณน้ำหนักจะตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากการคำนวณน้ำหนักกับปฏิกิริยาตอบสนองที่ตรวจวัด วิธีการดังกล่าวสามารถคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถบรรทุก น้ำหนักของรถบรรทุกนั้นจะได้จากค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่คำนวณได้ โดยค่าเฉลี่ยนี้ให้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึงร้อยละ 20 อีกทั้งการเฉลี่ยน้ำหนักเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับน้ำหนักจริงพบว่าลักษณะของน้ำหนักที่คำนวณได้มีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (Ill-condition) ทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ไม่มีความน่าเชื่อถือ จึงไม่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้

Chan, Law and Yung (2000) ศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยการติดตั้งมาตรวัดความเครียด เครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (Girder) และเครื่องตรวจนับจำนวนเพลลา

(Axle sensors) ที่ผิวของสะพานคอนกรีตอัดแรง (Prestressed concrete bridge) ใช้รถบรรทุกประเภท 2 เพลาในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม ใช้วิธีการโดเมนของเวลา (Time domain) ในการหาน้ำหนักเพลาทางพลศาสตร์ การหาน้ำหนักรวมจะใช้ผลรวมในแต่ละเพลาและความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency) ของรถบรรทุกโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) แต่พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักใช้เวลามากถึง 30 นาที เมื่อใช้ CPU รุ่น Pentium II 300MHz และน้ำหนักที่คำนวณได้ในโดเมนของเวลา มีความแปรปรวนสูงจนไม่น่าเชื่อถือซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากสภาวะบกพร่อง (Ill-condition) ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำถึงร้อยละ  $\pm 5$  ก็ตาม

Zhu and Law (2000) ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานโดยจำลองสะพานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบแผ่นบาง (Orthotropic rectangular plate) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้น้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่โดยใช้ทฤษฎีของแผ่นบาง (Orthotropic rectangular theory) และหลักการของซูเปอร์โพสิชันเชิงโหมด (Modal superposition principle) ซึ่งสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา (Time domain) โดยจะเปรียบเทียบน้ำหนักที่หาได้จากวิธีการจำลองรูปแบบเป็นคานากับวิธีการจำลองรูปแบบเป็นแผ่นบาง รวมทั้งการทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วน ผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 5$  ในระดับสัญญาณรบกวนที่ต่ำมาก (ร้อยละ 1) แต่จะต้องใช้ระยะเวลาในการหาน้ำหนักมากเพราะต้องหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งอีกทั้งค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์มีผลต่อการคำนวณน้ำหนักค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน การหาน้ำหนักโดยการใช้ความเร่งให้ผลที่ดีกว่าการใช้ค่าความเครียด และยังพบว่าการเชื่อมศูนย์ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น

Law, Chan and Zeng (2001) พบว่า การหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่จะมีความคลาดเคลื่อนสูง ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา เรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่าสภาวะบกพร่อง (Ill condition) ดังนั้น จึงได้เพิ่มวิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization) เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ค่าความคลาดเคลื่อนที่หาได้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักจริงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก นั่นคือ ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะต้องใช้เวลานาน อีกทั้งค่าที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวรถ จึงทำให้การนำไปประยุกต์ใช้ได้ลำบาก

Law and Fang (2001) ใช้เทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic programming) ศึกษาการหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่จากแบบจำลองย่อยส่วน ซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิริยาตอบสนองที่คำนวณขึ้นจากการคำนวณน้ำหนักมีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบของสเตตสเปซ (State-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูล่า (Recursive formula) บนพื้นฐานของการใช้เซ็นเซอร์หลาย ๆ ตัว ในการวัดปฏิริยาตอบสนองของสะพาน การคำนวณโดยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูล่าจะใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ และไม่สามารถละทิ้งพารามิเตอร์นี้ได้ การใช้เรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนมาก

Zhu and Law (2002) ศึกษาการหาน้ำหนักโดยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีโดเมนของเวลา (Time domain method) ด้วยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองย่อยส่วนแบบต่อเนื่อง โดยการใช้ความเครียดและความเร่งที่วัดได้จากบรรทุกขณะเคลื่อนที่ รวมทั้งการใช้วิธีเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization) ในการคำนวณเพื่อเพิ่มขอบเขตในการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาในการคำนวณ จากการทดลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก (Noise) ได้ และยังพบว่าพารามิเตอร์ความเร่งสามารถใช้หาน้ำหนักแทนการใช้ความเครียดแต่จะต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นในการวิเคราะห์วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งวิธีการหาน้ำหนักแบบวิธีโดเมนของเวลาและวิธีโดเมนของความถี่และเวลาโดยการแก้ปัญหาด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular value decomposition, SVD) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากน้อยตามระดับของสัญญาณรบกวน สามารถให้ความแม่นยำสูงสุดถึงร้อยละ 4 แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเนื่องจากขนาดของเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่ และยังใช้เวลานานมากในการหาเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมที่สุด จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

Yu and Chan (2002) ได้ทำการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกด้วยแบบจำลองย่อยส่วน โดยการใช้ผลตอบสนองโมเมนต์คดของสะพาน ใช้วิธีโดเมนของเวลา (Time domain method) และวิธีโดเมนของความถี่และเวลา (Frequency and time domain method) และเปรียบเทียบเทคนิคการแก้ระบบสมการเชิงเส้น ได้แก่ เทคนิคการใช้สตูโดอินเวอร์สมเมตริกซ์ (Pseudo-inverse matrix; PI) และวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular value decomposition, SVD) รวมทั้งการศึกษาผลของพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การเลือกใช้ความถี่ จำนวนโหมดทางพลศาสตร์ ความเร็ว จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ในการวัด ผลการคำนวณน้ำหนักพบว่าการใช้เทคนิคซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันสามารถเพิ่มความถูกต้องทั้งในวิธี TDM และ FTDM โดยเฉพาะ

ในกรณีวิธี FTDM สามารถขจัดปัญหาสถานะบกพร่อง (Ill-condition) ได้ดีกว่าการใช้เทคนิค  
 สตูไดอินเวอร์สเมตริกซ์ และความคลาดเคลื่อนที่ได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงไม่เกิน  
 ร้อยละ 5-10 แต่ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ส่งผลต่อการหาน้ำหนักค่อนข้างมากในแต่ละกรณี  
 ดังนั้นจะต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณในแต่ละกรณี จึงไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

Jiang, Au and Cheung (2003) ศึกษาหาพารามิเตอร์ของรถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพาน  
 ได้แก่ มวลของตัวรถช่วงบนและล่าง ค่าความหน่วงของรถ ค่าสติเฟเนสสปริงระหว่างมวลทั้งสอง  
 และค่าสติเฟเนสสปริงสำหรับผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับผิวสะพาน โดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่  
 ได้กล่าวมาพร้อม ๆ กัน จากการใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (General algorithm) โดยการจำลอง  
 ผลตอบสนองของสะพาน จากนั้นใช้ค่าความเร่งการสั่นไหวของสะพานในขั้นตอนหาค่าที่  
 เหมาะสมที่สุด (Optimization) ผลการหาค่าพารามิเตอร์มวลพบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำ ขณะที่  
 พารามิเตอร์อื่นมีความคลาดเคลื่อนสูง และต้องมีจำนวนตำแหน่งการเก็บข้อมูลหลายตำแหน่ง  
 เพื่อให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำ เนื่องจากระบบการคำนวณใช้วิธีการค้นหาข้อมูล (Search) ที่  
 เหมาะสมที่สุดจากขอบเขต (Limits) ที่กำหนด จึงส่งผลให้ต้องใช้เวลานานมากในการคำนวณ

Zhu and Law (2003a) ได้ศึกษาการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน  
 ด้วยข้อมูลความเร็วรถบรรทุกแบบไม่คงที่ โดยศึกษารูปแบบการวัดสัญญาณที่แตกต่างกัน ได้แก่  
 การใช้สัญญาณความเร่งจากการสั่นไหวของสะพาน และการใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน  
 โดยทั้งสองวิธีทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์โดยตรง (Exact solution) ร่วมกับวิธียกกำลังสองน้อย  
 ที่สุดและเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน ด้วยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ในการทดสอบด้วย  
 แบบจำลองแบบย่อส่วนจะทำการศึกษาโดยใช้ค่าความเครียดเท่านั้น ใช้ความเร็วเฉลี่ยของ  
 รถบรรทุกในช่วงการเคลื่อนที่บนสะพานพิจารณาผลของความขรุขระและระดับของสัญญาณ  
 รบกวน (Noise) จากผลการศึกษาพบว่าการหาน้ำหนักโดยการใช้สัญญาณความเร่งนั้นให้ผลที่  
 แม่นยำกับแรงทางสถิติมากกว่าการใช้สัญญาณความเครียดซึ่งมีความแปรปรวนสูง โดยเฉพาะกับ  
 รถที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังจำลองรูปแบบสะพานแบบคาน  
 ต่อเนื่อง พบว่าน้ำหนักที่คำนวณได้บริเวณที่รถผ่านจุดรองรับนั้นจะเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากเกิด  
 สถานะบกพร่อง (Ill-condition) ที่ตำแหน่งเข้าใกล้จุดรองรับ ซึ่งต้องหาค่าพารามิเตอร์  
 ในการเรกูลาร์ไรเซชันที่มีค่าน้อย ณ ตำแหน่งเวลาที่รถเข้าใกล้จุดรองรับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่  
 เกิดขึ้น และยังพบว่าในการวิเคราะห์ระบบสะพานแบบต่อเนื่องนั้น ระดับสัญญาณรบกวนจะมีผล  
 มากต่อการหาน้ำหนักเมื่อเทียบกับสะพานแบบช่วงเดียว

พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล (2545) ได้ศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วย  
 เทคนิคไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic programming) โดยการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ

รถบรรทุกบนสะพาน ซึ่งพิจารณาผลของการบิดจากการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Orthotropic rectangular plate) และทำการศึกษาผลกระทบในการหาค่าน้ำหนักเนื่องจากผลของความเร็วและความขรุขระ จากการศึกษาพบว่าความคลาดเคลื่อนจากการหาค่าน้ำหนักขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ และน้ำหนักที่หาค่าได้จากค่าเฉลี่ยน้ำหนักในช่วงกลางของเวลาที่รถวิ่งผ่านสะพานทั้งสองเพลลา ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับการนำไปใช้งานและไม่สามารถให้ค่าน้ำหนักเพลลาที่แม่นยำได้ เนื่องจากมีการใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแบบแผ่นบางซึ่งจะทำให้มีจำนวนระดับชั้นความเสถียรมาก ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่มากตามไปด้วย จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

รัช อัครวิทยานุมิ (2545) ได้นำเทคนิคการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคไดนามิกโปรแกรมมิ่ง โดยการตัดผลการบิดของสะพานด้วยการหาค่าความเครียดเฉลี่ยในหน้าสะพาน จากนั้นจึงคำนวณน้ำหนักจากค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัด แล้วทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iterative technique) โดยการนำเอาความเครียดจากผลทางพลศาสตร์มาคำนวณด้วยวิธีการไดนามิกโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ค่าน้ำหนักรถคู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักรถบรรทุกที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำสูง มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 5$  และยืนยันข้อมูลจากการทดสอบในแบบจำลองย่อส่วน แต่ยังคงขาดการทดลองเพื่อพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น ผลของตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางในช่องจราจร ผลของความขรุขระ จำนวนเพลลาที่เพิ่มขึ้น และผลของลักษณะจตุรกรงรับของสะพาน

Zhu and Law (2003) ศึกษาการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานโดยการทดสอบจากแบบจำลองจากสัญญาณโมเมนต์ดัดของสะพาน วิธีที่ศึกษานั้นมี 2 วิธี วิธีแรกใช้พื้นฐานการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์โดยตรง (Exact solution) ซึ่งจะหาแรงในลักษณะแยกเป็นเพลลา (Axle load) วิธีที่สองใช้พื้นฐานทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM solution) จะหาแรงในรูปแบบแรงในล้อ (Wheel load) ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน ทั้งสองวิธีจะทำการแก้ปัญหาด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ประกอบกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน ผลการทดสอบพบว่าทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันมากสำหรับน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยวิธีแรกนั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าสำหรับการเคลื่อนที่ในตำแหน่งที่เอียงจากกึ่งกลางสะพานเนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะแปรปรวนไว้มากต่อตำแหน่งของจุดวัดสัญญาณ ทั้งนี้ยังขึ้นกับจำนวนและรูปแบบตำแหน่งการติดตั้งจุดวัดสัญญาณความเครียดที่ท้องสะพาน ส่วนจำนวนโหนดการสั้นไหวของสะพานนั้นมีผลน้อยมากต่อการหาค่าน้ำหนัก อย่างไรก็ตามการใช้จำนวนโหนดที่มากย่อมให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้จำนวนโหนดที่น้อย และยังพบว่าการหาค่าน้ำหนักเพลลามีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการหาค่าน้ำหนักล้อ

แต่ผลการทดสอบโดยรวมนั้นพบว่ายังมีค่าคลาดเคลื่อนสูง และการอ้างอิงผลที่ได้ด้วยการใช้ตัวคูณ  
 ปฏิสัมพันธ์ (Correlation factor) นั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

ภาณุ ฟูงสุข (2547) ได้ทำการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่ใน  
 ภาคสนาม โดยการทดสอบจะติดมาตรวัดความเครียดไว้บริเวณใต้สะพานเพื่อวัดผลการตอบสนอง  
 ของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุก เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานจริงพบว่า  
 มาตรวัดความเครียดสำหรับติดคอนกรีตที่ใ้ช้อยู่ในปัจจุบันไม่สะดวกสำหรับการติดตั้งกับสะพาน  
 ค่าความเครียดที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ขณะใช้งาน เช่น เมื่อเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวของ  
 คอนกรีตจะเกิดปัญหาของฟองอากาศขนาดเล็กภายในมาตรวัดความเครียด ผลการทดสอบทั้ง 51  
 การทดสอบ แบ่งออกเป็นกรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรกลาง 23 การทดสอบ  
 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินร้อยละ  $\pm 50$  ผลการคำนวณ  
 น้ำหนักส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับน้ำหนักเพลาลังไม่เกินร้อยละ  $\pm 10$  และสำหรับ  
 น้ำหนักรวมไม่เกินร้อยละ  $\pm 6$  กรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรทางซ้าย 24 การทดสอบ  
 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินร้อยละ  $\pm 50$  การทนาย  
 น้ำหนักเพลาลังโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 10$  และน้ำหนักรวมไม่เกิน  
 ร้อยละ  $\pm 6$  เมื่อพิจารณาผลกระทบจากการกระแทกของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งข้าม  
 สะพานกรณีวิ่งช่องจราจรซ้ายทั้ง 2 กรณี คือ ผลของการกระแทกก่อนเข้าสะพานและผลของ  
 การกระแทกช่วงกลางสะพาน ทำการทดสอบจำนวน 4 การทดสอบพบว่า ผลการคำนวณน้ำหนัก  
 สำหรับน้ำหนักรวมส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 10$

Pinkaew, (2006) ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วย  
 เทคนิคของไดนามิก โพรแกรมมิ่ง โดยการตัดผลเนื่องจากการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วย  
 การคำนวณน้ำหนักจากค่าโมเมนต์ตัดที่หน้าตัดสะพาน และทำการปรับปรุงโดยให้มีความแม่นยำ  
 เพิ่มมากขึ้น โดยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำหรือเรียกว่า Updated Static Component (USC)  
 technique มาใช้ โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณใน  
 ไดนามิก โพรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกคู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องเพิ่มขึ้นกว่าการ  
 คำนวณครั้งแรก ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่หาได้มีความถูกต้องแม่นยำสูงมาก  
 มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 5 และได้ทำการ  
 ยืนยันข้อมูลด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน แต่ยังคงขาดการทดลองเพื่อพิจารณาผลกระทบ  
 จากปัจจัย เช่น ผลของตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางในช่องจราจร ผลของความขรุขระจำนวนเพลาน้ำ  
 ที่มากขึ้น และผลของสภาพจราจรรับของสะพาน เป็นต้น

พัทรพงษ์ อาสนจินดา (2546) ได้ทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน พิจารณา ปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการหาน้ำหนักของรถบรรทุก อันได้แก่ ผลของความขรุขระ การบิดใน สะพานเนื่องจากตำแหน่งตามแนวขวางของการวิ่งในช่องจราจรช่องซ้ายและขวา รวมทั้ง ทำการศึกษาถึงแรงในล้อรถขณะเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาน้ำหนักทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น จากการ ทดสอบพบว่า การนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำการเฉลี่ยและนำไปทายน้ำหนัก จะสามารถลดผลของการบิดตัวของสะพานซึ่งเกิดจากตำแหน่งของรถตามแนวขวางได้ดี และ รถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการหาน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่ดีกว่า รถบรรทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตามระดับ ของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน รูปแบบของฐานรองรับของสะพานนั้นมีผลต่อการทายน้ำหนัก อย่างมีนัยสำคัญ โดยสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะให้ผลการทายน้ำหนักที่ดีกว่า สะพานแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้พบว่า กรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิว ไม่มีความขรุขระนั้นให้ผลการทายน้ำหนักรวมที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 5$  ส่วนผล การทดสอบกรณีรูปแบบสะพานเป็นแบบต่อเนื่องและกรณีที่รถบรรทุกมีจำนวนเพลาเพิ่มขึ้น พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสูงสุดร้อยละ  $\pm 20$

Asnachinda, Pinkaew, and Laman. (2008) ศึกษาการหาน้ำหนักเพลาทางพลศาสตร์และ น้ำหนักรวมของรถบรรทุกจำนวนหลายคันที่เคลื่อนที่บนสะพานต่อเนื่อง โดยอาศัยการคำนวณ น้ำหนักเพลาของรถบรรทุกโดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดด้วยการย่อเมตริกซ์แบบ ซิงกูลาร์แวลู และเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาด้วยเทคนิคปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ หรือ Updated Static Component (USC) โดยศึกษาด้วยผ่านแบบจำลองย่อส่วนของรถบรรทุกและ สะพานซึ่งมีพฤติกรรมและสัญญาณที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างสะพานจริง และศึกษารูปแบบการ สัมผัสของรถบรรทุกสามรูปแบบ ได้แก่ การเคลื่อนที่ตามกัน การเคลื่อนที่คู่ขนานกัน และการ เคลื่อนที่แซงกัน จากผลการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้เทคนิค USC สามารถแก้ปัญหาค่าเกิด ความคลาดเคลื่อนสูงบริเวณจุดรองรับภายในระหว่างช่วงสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกกรณี การสัมพัทธ์ของรถบรรทุกหลายคัน และวิธีที่นำเสนอมีความคงทนในการคำนวณอีกทั้งสามารถ เลือกใช้พารามิเตอร์เรกูลาไรชันได้ในช่วงที่กว้าง ทำให้วิธีการหาน้ำหนักที่นำเสนอสามารถ นำไปใช้ในการหาน้ำหนักเพลาของรถบรรทุกที่มีหลายคันหรือหลายเพลาได้ โดยมีค่า ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาทางพลศาสตร์อยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 13

ปิยรัตน์ อุลหัสสา (2553) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ถึงประสิทธิภาพของการหาน้ำหนัก และระยะห่างเพลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยใช้ผลตอบสนองโมเมนต์คัตทางพลศาสตร์ของ สะพานในการคำนวณน้ำหนักเพลาทางสถิติและระยะห่างเพลาของรถบรรทุก โดยได้ทำการ

เปรียบเทียบสัญญาณความเครียดของสะพานจากการจำลองน้ำหนักเพลารถบรรทุกด้วย แรงกระทำแบบจุดซึ่งมีค่าคงที่และแปรผันกับเวลา เทียบกับผลตอบสนองตรวจวัดของสะพานซึ่ง สมมติด้วยการจำลองจากปฏิกิริยาของรถบรรทุกและสะพานที่กระทำระหว่างกัน และได้ ทำการศึกษาเชิงตัวแปรเพื่อประเมินความถูกต้องของการหาน้ำหนักเพลลา และระยะห่างเพลลา โดย วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุดของผลต่างระหว่างโมเมนต์คัตที่ ตรวจวัดได้และโมเมนต์คัตทางทฤษฎี ซึ่งทำการกำหนดขอบเขตของคำตอบร่วมกับเทคนิค เรกูลาร์ไรเซชัน จากผลการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ พบว่าการหาน้ำหนักเพลลาหน้า เพลลาหลัง น้ำหนักรวมและระยะห่างเพลลา โดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติไม่เกิน ร้อยละ 2.60 ร้อยละ 3.51 ร้อยละ 1.71 และร้อยละ 6.23 ตามลำดับ ซึ่งอาจมีบางกรณีเพิ่มสูงถึง ร้อยละ 15.40 ร้อยละ 23.38 ร้อยละ 4.29 และร้อยละ 42.90 ตามลำดับ และผลการทดสอบด้วย แบบจำลองย่อส่วนพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักเพลลาหน้า เพลลาหลัง น้ำหนักรวม และระยะห่างเพลลา โดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินร้อยละ 11.38 ร้อยละ 13.33 ร้อยละ 9.58 และร้อยละ 7.12 ตามลำดับ และอาจมากถึงร้อยละ 16.03 ร้อยละ 41.10 ร้อยละ 19.02 และร้อยละ 31.12 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุมาจากความเร็วระดับสูงมากของรถบรรทุก พื้นผิวมีความขรุขระสูง และ น้ำหนักเพลลาหน้าที่มีมากกว่าน้ำหนักเพลลาหลัง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนยังมีความแปรปรวนไม่คงที่ และยังมีค่าที่สูงอยู่ จึงต้องมีการพัฒนาต่อไป

สมพล มาทวิโชติกุล ชีระชัย ดิสมสุข และ ทศพล ปิ่นแก้ว (2559) ทำการพัฒนาปรับปรุง ระบบชั่งน้ำหนักรถบรรทุกชนิดติดตั้งได้สะพานและจำแนกประเภทรถบรรทุกให้สามารถทำงาน แบบอัตโนมัติ ระบบจำแนกประเภทรถบรรทุกใช้การวิเคราะห์ผลต่างสัมบูรณ์ (Absolute difference) ของข้อมูลตำแหน่งล้อที่วัดด้วยอุปกรณ์เลเซอร์ 2 ตำแหน่ง เพื่อคำนวณหาความเร็ว ระยะห่างเพลลา จำนวนเพลลา และประเภทรถบรรทุก แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวม รถบรรทุกโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ด้วยเมตริกซ์ผกผันเทียม (Pseudo inverse matrix) ด้วยวิธีการ ยกกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) จากผลการทดสอบในภาคสนามพบว่า ระบบสามารถทำการ ตรวจชั่งน้ำหนักรถบรรทุกแบบอัตโนมัติได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของจำนวนขบวนรถบรรทุก ทั้งหมด โดยมีความถูกต้องในการจำแนกประเภทมากกว่าร้อยละ 95 และค่าความคลาดเคลื่อนของ น้ำหนักรวมน้อยกว่าร้อยละ 10

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบ ใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาซึ่งได้รับการพัฒนาโดยตลอด พบว่าสามารถหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ยังมีการศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ สามารถนำไปใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมายังพบข้อจำกัดที่สำคัญ คือ จะต้องใช้



อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งรถ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ต้องติดตั้งไว้บนผิวทาง เมื่อรถวิ่งผ่านเป็นประจำจะเกิดการเสื่อมคุณภาพได้ง่าย หากจะต้องทำการปรับปรุงซ่อมแซมจะต้องทำการปิดถนนส่งผลให้เกิดการติดขัดทางจราจร อีกทั้งยังไม่สะดวกในการนำไปใช้งานจริง

## งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาตำแหน่งรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

คณะกรรมการการยุโรป หรือ European Commission 4th Framework Programme Transport (2001) ได้เริ่มพัฒนาระบบ B-WIM แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (Free of axle detector) หรือเรียกว่า FAD B-WIM โดยใช้ FAD Sensor ซึ่งติดตั้งบริเวณใต้สะพานแทนการใช้ อุปกรณ์แบบเดิมซึ่งต้องติดตั้งบนผิวทาง ทำให้สามารถคำนวณความเร็วรถบรรทุก จำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาได้ จากการเทียบสัญญาณความถี่จาก FAD Sensor ที่ติดตั้ง ณ 2 ตำแหน่งหน้าตัดสะพาน อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ FAD Sensor จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อล้อของรถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่ในแนวที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ติดตั้ง FAD Sensor อีกทั้งจำเป็นต้องเลือกสะพานที่มีความเหมาะสมกับการใช้ FAD Sensor นี้ด้วยเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับความชัดเจนสัญญาณจาก FAD Sensor ส่งผลต่อระดับความถูกต้องของการคำนวณข้อมูลเพลลารถบรรทุก โดยคณะกรรมการการยุโรปได้ทำการศึกษาถึงดัชนีวัดความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ FAD ของสะพาน โดยได้ทำการทดสอบกับสะพาน Orthotropic จริง ศึกษาผลกระทบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวแปรต่าง ๆ และได้ทำการทดสอบการหาตำแหน่งรถบรรทุกในแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ซึ่งได้ผลการทำนายน้ำหนักมีความแม่นยำสำหรับแบบจำลอง 1 มิตร้อยละ 20 และความแม่นยำสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ ร้อยละ 15



ภาพที่ 2-1 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (European Commission 4th Framework Programme Transport, 2001)

Dempsey, O'Brien, and O'Connor. (1995) ศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ WIM สำหรับสะพาน Orthotropic ในเวลาต่อมาได้พิจารณาการใช้ระบบ WIM สำหรับ สะพานแผ่นพื้นช่วงสั้น (Short slab bridge) จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าสะพานที่มีช่วงสะพานสั้น สามารถตรวจจับเพลลาได้ง่ายกว่าสะพานที่มีช่วงสะพานยาว และยังขึ้นกับตัวแปรอื่น ๆ จึงสามารถ สรุปเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FAD โดยที่สะพานนั้นจะสามารถใช้ระบบ FAD ได้อย่างเหมาะสมเมื่อ ค่าสัมประสิทธิ์ FAD มีค่าน้อยกว่า 2 ซึ่งในหลักการหาค่าความเร็ว จำนวนเพลลา และระยะเพลลา นั้นมีขั้นตอนดังนี้ 1). หาค่าความเร็วจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของผลต่าง เวลาระหว่างมาตรวัดความเครียด 2 มาตรวัด 2). หาจำนวนเพลลาจากการหาค่าแห่งสูงสุดสัมพัทธ์ (Peak) ของความเครียดที่วัดได้ 3). หาค่าระยะเพลลาโดยความเร็ว และจำนวนเพลลา จากนั้นจึงหาค่า น้ำหนักเพลลา และค่าน้ำหนักรถบรรทุก โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ผลการศึกษา พบว่าระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลานั้นสามารถใช้ได้ โดย รถบรรทุกเปล่าที่มีระยะเพลลาใกล้เคียงมาก และค่าความเร็วมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 ค่า ระยะห่างระหว่างเพลลาไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ค่าน้ำหนักสำหรับแบบจำลองรถบรรทุก 1 มิติ ที่ คำนวณได้มีความแม่นยำอยู่ในช่วงร้อยละ 20 และค่าน้ำหนักสำหรับแบบจำลองรถบรรทุก 2 มิติ ที่ คำนวณได้มีความแม่นยำอยู่ในช่วงร้อยละ 15

Leming and Stalford (2002) ได้ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ ผ่านสะพานโดยคำนวณจากค่าการแอ่นตัวของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานบนโดเมนเวลา พารามิเตอร์ที่คำนวณหา คือ น้ำหนักสถิตย์ล้อหน้าและล้อหลัง น้ำหนักรวม ระยะห่างระหว่างเพลลา และความเร็วของรถบรรทุก โดยพิจารณาคานและน้ำหนักสถิตย์เคลื่อนที่เท่านั้น ไม่พิจารณา น้ำหนักทางพลศาสตร์ โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสม ที่สุด (Optimization) จะคำนวณค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตบนและล่างอนุพันธ์ของการแอ่นตัว จากนั้นปรับปรุงโดยการเปลี่ยนค่าการแอ่นตัวที่วัดมาได้โดยใช้ที่เวลาที่ต่างกันอย่างสุ่ม ซึ่งจะให้ผล ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ลดลงมาก (น้อยกว่าร้อยละ 1) และเมื่อมีการ พิจารณาสัญญารอบกวนในการคำนวณด้วยแล้วค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ร้อยละ 1 จนกระทั่งสัญญาณรบกวนมากกว่าร้อยละ 10 จะให้ค่าคลาดเคลื่อนระยะเพลลาร้อยละ 5 ค่าคลาดเคลื่อนความเร็วร้อยละ 1 ค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักล้อหน้าร้อยละ 5 ค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนัก ล้อหลังร้อยละ 7.9 และค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวมร้อยละ 1 แต่เนื่องจากต้องกำหนดขอบเขตของ ค่าตอบ ดังนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ถ้าค่าที่กำหนดไม่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

Leming and Stalford (2003) ศึกษาการหาน้ำหนักสถิตย์ล้อหน้า ล้อหลัง น้ำหนักรวม ระยะห่างเพลลาและความเร็วของรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยพิจารณาสะพานจาก

แบบจำลองทางสถิติ ในส่วนการพิจารณารถบรรทุกจะใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ และใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการแอ่นตัวที่วัดได้และค่าการแอ่นตัวจากการคำนวณ โดยใช้ตำแหน่งวัดการแอ่นตัว 3 ตำแหน่ง ได้แก่  $3L/4$ ,  $L/2$  และ  $L/4$  โดยที่  $L$  คือความยาวของสะพาน วิธีการคำนวณจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าสตีเฟนสของเพลารถมวลของเพลารถ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นข้อมูลที่ใช้ในการหาน้ำหนัก ความเร็ว และระยะห่างเพลาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตบนและล่างของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 1) เมื่อมีการพิจารณาสัญญาณรบกวนในการคำนวณด้วยแล้วจะเกิดความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.5 ถึงร้อยละ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนในระดับเดียวกับไม่มีสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามค่าประมาณความถี่ธรรมชาติจะมีแนวโน้มความถูกต้องลดลงเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากขึ้น

นิคมเดช วีระนันทะชาติ (2546) ได้ศึกษาวิธีการหาความเร็วและระยะห่างเพลารถของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานจากผลตอบสนองของสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ พบว่าการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gage) หลายตัวโดยกระจายตามตำแหน่งที่เท่ากันในแต่ละหน้าตัดสะพาน สามารถนำผลรวมของผลการตอบสนองของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรมาหาผลต่างของการตอบสนอง จะได้ลักษณะสัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้นสามารถบ่งบอกจำนวนและตำแหน่งเพลารถของรถบรรทุกได้ จากการศึกษาพบว่าการทดสอบการหาความเร็วและระยะห่างเพลามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่เกินร้อยละ 10 และร้อยละ 7 ตามลำดับ

ปาลพิพัฒน์ แสงชูวงศ์ (2550) ศึกษาความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานแบบปราศจากข้อมูลระยะห่างเพลารถและข้อมูลความเร็วรถ และได้เสนอวิธีการหาน้ำหนักรถโดยจะใช้เพียงข้อมูลความเครียดของสะพานขณะที่รถบรรทุกแล่นผ่านซึ่งถูกติดตั้งไว้ได้สะพาน งานวิจัยได้เสนอการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของรถบรรทุกผ่านวิธีการหาค่าต่ำที่สุด (Minimization) ของผลต่างกำลังสองระหว่างค่าโมเมนต์ค้ำของสะพานที่ตรวจวัดจริงกับค่าโมเมนต์ที่คำนวณขึ้นจากฟังก์ชันของเส้นอิทธิพล (Influence line) จากการศึกษาโดยอาศัยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์พบว่ามีความเป็นไปได้โดยมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักถึงร้อยละ 98 และมีความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมของรถไม่เกินร้อยละ  $\pm 15$  สำหรับกรณีสะพานไม่มีความขรุขระ และร้อยละ 30-40 สำหรับกรณีสะพานมีความขรุขระ และจากการศึกษาโดยอาศัยการทดสอบทางภาคสนามพบว่าวิธีการหาน้ำหนักที่ใช้สามารถหาน้ำหนักได้ทั้งหมด และได้ความถูกต้องของน้ำหนักรวม ระยะห่างระหว่างเพลารถ และความเร็วรถบรรทุกอยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 15$  ร้อยละ  $\pm 20$  และร้อยละ  $\pm 10$  ตามลำดับ

Liljencrantz, Karoumi and Olofsson. (2007) ได้ประยุกต์ระบบ B-WIM กับสะพานรางรถไฟ เพื่อตรวจวัดข้อมูลน้ำหนักและตรวจจับเพลลาของรถไฟ โดยใช้หลักการหาความเร็วด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ระหว่างความเครียดบริเวณสองตำแหน่ง เช่นเดียวกับหลักการของ WAVE ขั้นตอนในการคำนวณหาความเร็ว ตำแหน่งเพลลา ระยะห่างระหว่างเพลลา และน้ำหนักเพลลา ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตรวจวัดและเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้
2. คำนวณหาความเร็วของรถไฟโดยใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
3. ตรวจจับจำนวนเพลลาแบบคร่าว ๆ จากตำแหน่งสัญญาณสูงสุด ประกอบกับคำนวณความเร็ว และน้ำหนัก
4. คำนวณปรับแก้ตำแหน่งเพลลา น้ำหนักเพลลา และความเร็ว จากค่าที่เหมาะสมที่สุด ระหว่างสัญญาณความเครียดจริงกับสัญญาณความเครียดทางทฤษฎี

หลังจากหาความเร็วด้วยหลักการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วจึงทำการหาตำแหน่งเพลลาโดยละเอียดด้วยหลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) ซึ่งทำในลักษณะการคำนวณซ้ำ โดยเริ่มจากการสมมติจำนวนเพลลาจากน้อยไปมาก และประมาณตำแหน่งเพลลาที่เพิ่มเติมจากยอดของส่วนต่างคงค้างของสัญญาณความเครียด (Residual strain signal) จากขั้นตอนก่อนหน้า จากการพัฒนาระบบ B-WIM มาอย่างต่อเนื่องและได้ทำการทดสอบระบบกับสะพานจริงพบว่า การนำระบบ B-WIM มาใช้กับรางรถไฟได้ผลที่ดี หลักการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดสามารถหาความเร็วได้อย่างรวดเร็ว จากการทดสอบพบว่า เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยโดยค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว น้ำหนักรวม และน้ำหนักแต่ละโบกมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ร้อยละ 2 และร้อยละ 2.5 ตามลำดับ

ศุภชัย เชื้อเกตุ และพัชรพงษ์ อาสนจินดา (2558) ได้ทำการศึกษาการหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน จากการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าสามารถหาความเร็วของการสัญจรได้อย่างถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 สำหรับการหาตำแหน่งเพลลาด้วยหลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) ซึ่งทำในลักษณะการคำนวณซ้ำ โดยเริ่มจากการสมมติจำนวนเพลลาจากน้อยไปมาก และประมาณตำแหน่งเพลลาที่เพิ่มเติมจากยอดของส่วนต่างคงค้างของสัญญาณความเครียดพบว่า การหาระยะห่างเพลลาที่มีความคลาดเคลื่อนที่มาก อย่างไรก็ตามยังสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้

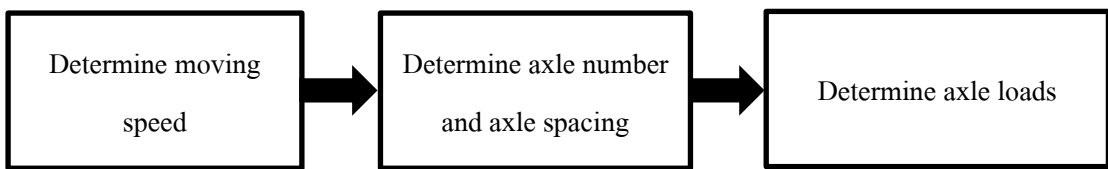
จากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา พบว่าสามารถหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ถูกต้องแม่นยำไม่มากนัก

เนื่องจากระบบต้องทราบข้อมูลด้านความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลลาที่ถูกต้องจึงจะนำไป  
คำนวณหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกได้อย่างถูกต้อง ที่ผ่านมาพบว่าการทายน้ำหนักรถบรรทุกขณะ  
เคลื่อนที่ที่มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้นจะต้องคำนวณน้ำหนักที่กึ่งกลางสะพานซึ่งไม่  
สอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาระบบ FAD B-WIM ให้มีความแม่นยำมากขึ้น  
โดยเริ่มจากการพัฒนาระบบ FAD ให้คำนวณข้อมูลในส่วนของความเร็วย ระยะห่างเพลลา และ  
จำนวนเพลลา ให้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้โดยสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุก  
ได้ และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกเป็นลำดับถัดไป

### บทที่ 3

## หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจำแนกประเภท และการหาน้ำหนักของรถบรรทุกจากผลตอบสนองสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การหาความเร็ว 2) การวิเคราะห์หาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลา และ 3) การคำนวณน้ำหนัก จากขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองเมื่อสามารถคำนวณหาความเร็วและสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ ก็จะสามารถนำข้อมูลที่คำนวณได้ในเบื้องต้นไปใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้ โดยขั้นตอนหลัก ๆ มีอยู่ 3 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 3-1 และมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

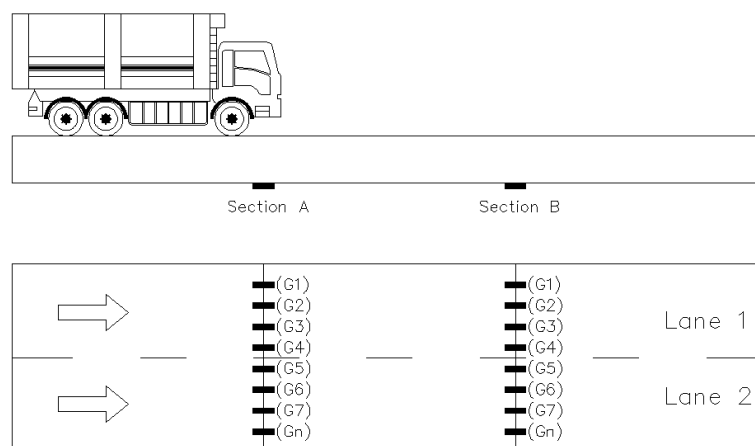


ภาพที่ 3-1 กระบวนการหาความเร็ว ระยะห่างเพลลา และการหาน้ำหนัก

### การหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การใช้สัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานทั้งสองหน้าตัดมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความเร็ว จะพบว่าหากสัญญาณความเครียดมีลักษณะความสูงในบริเวณที่ตรวจวัดไม่มาก หรือไม่สามารสังเกตเห็นยอดของความเครียดบริเวณจุดตรวจวัดได้อย่างชัดเจน จะทำให้ไม่สามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้ ดังนั้นการปรับปรุงสัญญาณความเครียดให้มีความชัดเจนบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดจะช่วยให้สามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้ ทั้งนี้นอกจากจะสามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้แล้วยังสามารถใช้สัญญาณความเครียดดังกล่าวคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกได้ จากข้อมูลทางด้านความเร็ว จำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกทำให้สามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้ ซึ่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดจะติดตั้งจำนวนหลายตัวในหน้าตัดสะพานเดียวกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงสัญญาณความเครียดในการจำแนกประเภทรถบรรทุกดังแสดงในภาพที่ 3-2 การปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อจำแนกประเภทของ

รถบรรทุกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-1 โดยการหาค่าสัมบูรณ์ผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในช่องจราจรที่ 1 กับช่องจราจรที่ 2



ภาพที่ 3-2 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของสะพาน

$$\tilde{\epsilon}_i = \left| \sum \epsilon_i^{lane1} - \sum \epsilon_i^{lane2} \right| \quad (3-1)$$

โดยที่

$\tilde{\epsilon}_i$  คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่  $i$  ที่ปรับปรุงค่าแล้ว

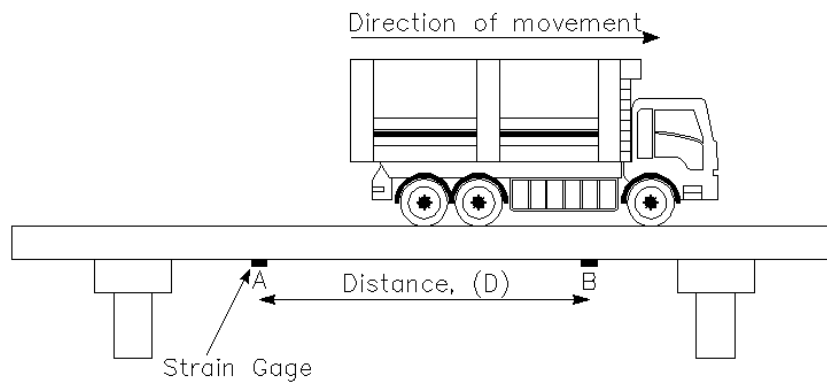
$\sum \epsilon_i^{lane1}$  คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่  $i$  ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 1

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

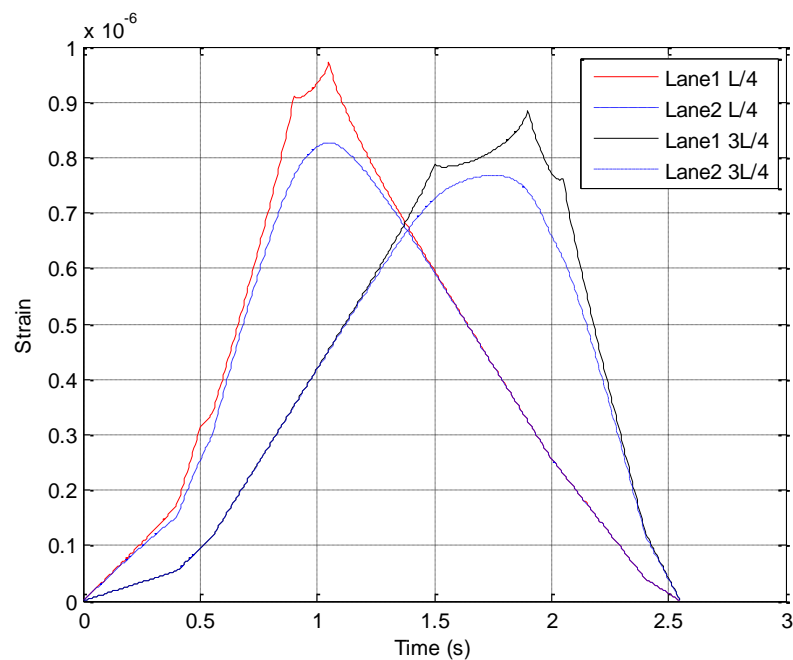
จากสมการที่ 3-1 พบว่ารถบรรทุกสามารถสัญจรบนช่องจราจรใดก็ได้ เนื่องจากพิจารณาเฉพาะรูปร่างของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วเท่านั้น จึงสามารถพิจารณาค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างผลรวมของสัญญาณความเครียดระหว่างสองช่องจราจรเพื่อนำไปใช้ในการจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ต่อไป ลักษณะผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรดังแสดงในภาพที่ 3-4 และลักษณะสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วดังแสดงในภาพที่ 3-5

การหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดภายใต้สมมติฐานรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

(Correlation coefficient) จากข้อมูลสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วทั้ง 2 หน้าตัดสะพานจากจุด A ไปยังจุด B ที่บริเวณหน้าตัด  $L/3$  และ  $2L/3$  ตามลำดับ โดยมีระยะห่างของจุด 2 จุดเท่ากับ  $D$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $L/3$  ดังแสดงในภาพที่ 3-3 โดยก่อนที่จะใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์คำนวณหาความเร็วรถบรรทุกต้องทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดสำหรับจำแนกประเภทรถบรรทุกก่อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-1 จะได้สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วที่มีค่า  $\tilde{\epsilon}_A$  และ  $\tilde{\epsilon}_B$  ที่บริเวณหน้า  $L/3$  และ  $2L/3$  ตามลำดับ

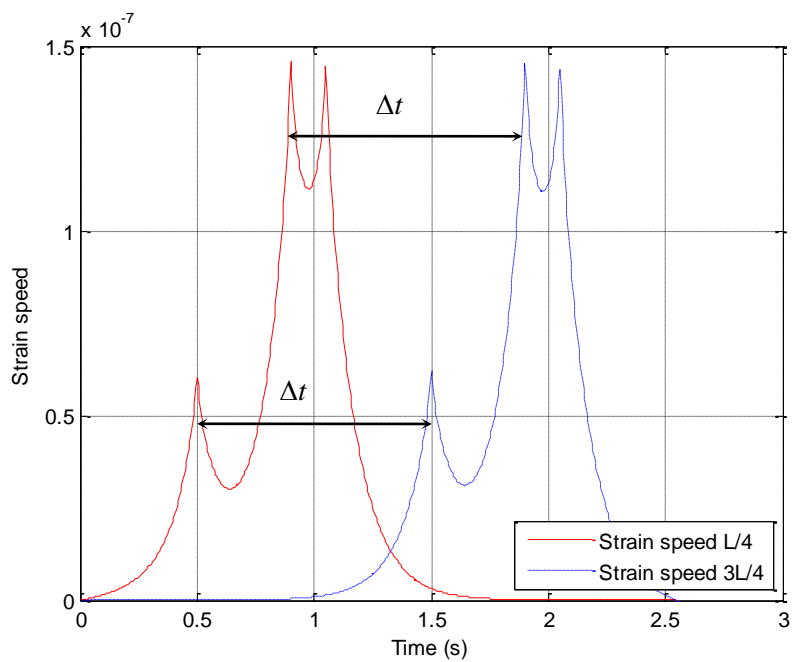


ภาพที่ 3-3 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน

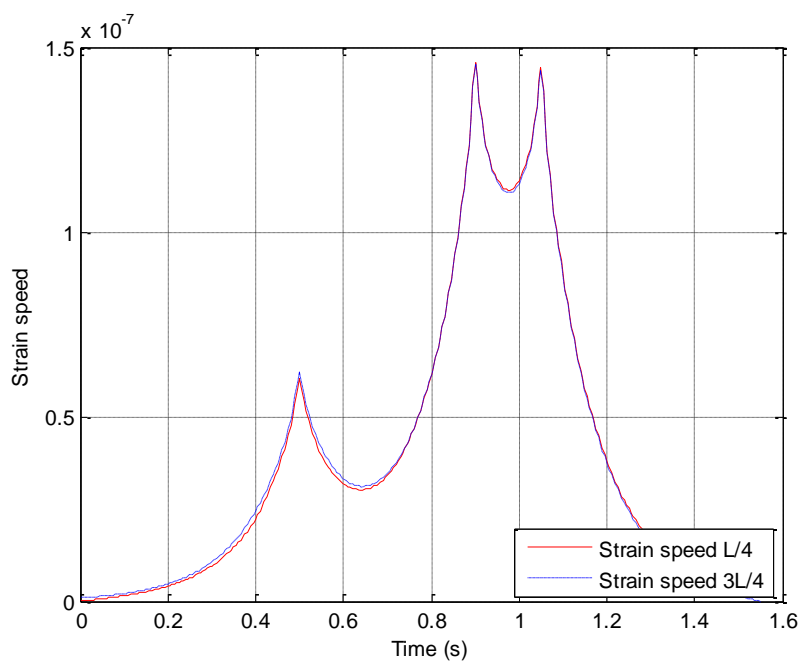


ภาพที่ 3-4 ผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร





ภาพที่ 3-5 ผลต่างของสัญญาณความเครียดระหว่างช่องจรรยา ในหน้าตัด A และ B สำหรับใช้หาความเร็ว



ภาพที่ 3-6 สัญญาณความเครียดสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณเวลาระหว่างสัญญาณความเครียดจากสองหน้าตัด ซึ่งเป็นเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ดังนั้นเมื่อทราบระยะห่างระหว่างหน้าตัดจึงทำให้สามารถคำนวณความเร็วของรถบรรทุกได้จากสมการการเคลื่อนที่ โดยการศึกษาในครั้งนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ ค่าทางสถิติใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูล 2 ชุดข้อมูล สามารถบอกได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด มีความสัมพันธ์กันในระดับใด และมีทิศทางเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 โดยหากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวของสัญญาณความเครียดคู่ นั้น หากมีค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้ -1 แสดงว่าสัญญาณความเครียดคู่ นั้นมีความสัมพันธ์กันในทิศทางที่ตรงกันข้าม และหากค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าสัญญาณความเครียดคู่ นั้นมีความสัมพันธ์กันน้อยมากหรือแทบไม่มีความสัมพันธ์กัน

$$\text{Correlation Coef.} = \frac{N \sum \varepsilon_A \varepsilon_B - \sum \varepsilon_A \sum \varepsilon_B}{\sqrt{[N \sum \varepsilon_A^2 - (\sum \varepsilon_A)^2][N \sum \varepsilon_B^2 - (\sum \varepsilon_B)^2]}} \quad (3-2)$$

โดยที่

*Correlation Coef.* คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$\sum \varepsilon_A$  คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ A ที่ปรับปรุงค่า

$\sum \varepsilon_B$  คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ B ที่ปรับปรุงค่า

$\sum \varepsilon_A \varepsilon_B$  คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างเวกเตอร์สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่า ณ หน้าตัดที่ A และ B

$\sum \varepsilon_A^2$  คือ ผลรวมกำลังสองของเวกเตอร์สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่า ณ หน้าตัดที่ A

$\sum \varepsilon_B^2$  คือ ผลรวมกำลังสองของเวกเตอร์สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่า ณ หน้าตัดที่ B

$N$  คือ จำนวนข้อมูลของสัญญาณความเครียดที่วัดได้

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับการปรับส่วนต่างของเวลา  $\Delta t$  ระหว่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัด หากสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดซ้อนทับกับพอดี ค่า  $\Delta t$  นั้นจะเป็นค่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงที่สุด (เข้าใกล้ 1 มากที่สุด) ซึ่งค่า  $\Delta t$  นี้จะเป็น

เวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากบริเวณหน้าตัด A ไปยังบริเวณหน้าตัด B ซึ่งเมื่อทราบระยะห่างระหว่างหน้าตัดทั้งสอง ก็จะสามารถคำนวณความเร็วของรถบรรทุกได้ จากการสมมติว่ารถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยคงที่ ดังสมการที่ 3-3

$$v = \frac{D}{\Delta t} \quad (3-3)$$

โดยที่

$D$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดตรวจวัดความเครียด A และ B

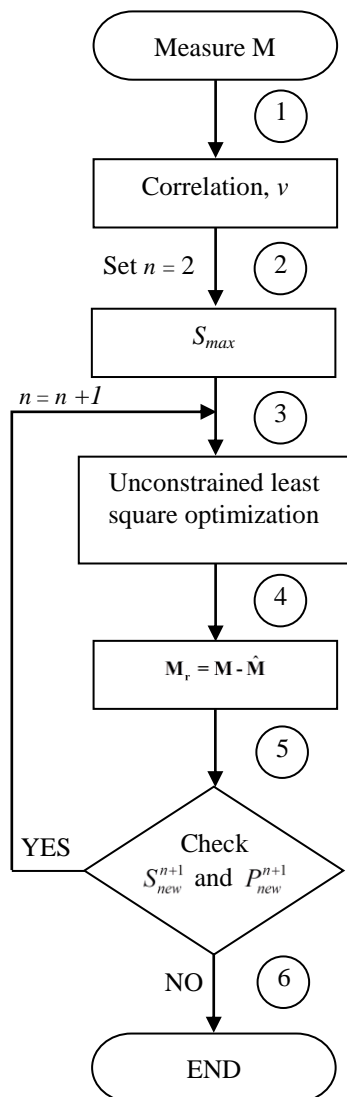
$\Delta t$  คือ เวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ซึ่งเป็นส่วนต่างเวลาที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่ามากที่สุด

จากสมการที่ 3-2 และสมการที่ 3-3 จะสามารถคำนวณหาความเร็วในการสัญจรได้ โดยภาพที่ 3-6 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเครียดของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันเป็นช่วงเวลาส่วนต่าง  $\Delta t$  ซึ่งคำนวณได้จากหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

### การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยหลักการยกกำลังสองน้อยที่สุด

จากหลักการหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาที่ประยุกต์จากการศึกษาของ Liljencrantz et al (2007) การวิเคราะห์จะเริ่มจากการสมมติจำนวนเพลลาเริ่มต้นด้วยรถบรรทุกแบบ 2 เพลลา จากนั้นจะใช้หลักการยกกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาค่าระยะห่างเพลลาและน้ำหนักรถบรรทุกที่สมมติขึ้น แล้วนำน้ำหนักรถบรรทุกและระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้ไปสร้างสัญญาณความโมเมนต์ดัดของหน้าตัดสะพาน  $\hat{M}$  (Reconstructed bending moment) ซึ่งสัญญาณที่สร้างขึ้นนี้จะถูกนำไปหักลบออกจากสัญญาณโมเมนต์ดัดที่ได้จากสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ และโมเมนต์ดัดคงค้าง  $M_r$  (Residual bending moment) หรือส่วนต่างของสัญญาณโมเมนต์ดัดนี้ จะสามารถบ่งชี้ได้ว่ามีนัยสำคัญของเพลลาบรรทุกเพิ่มเติมหรือไม่ โดยพิจารณาจากตำแหน่งของค่าสูงสุด (Peak) ของโมเมนต์ดัดคงค้าง หากพบว่าขนาดของโมเมนต์ดัดคงค้างสูงสุดมีนัยสำคัญที่สามารถเปลี่ยนเพลลาบรรทุกที่เพิ่มเติมขึ้นได้ จะทำให้ทราบถึงจำนวนเพลลาและตำแหน่งเพลลาที่เพิ่มเติมขึ้น จากนั้นจะใช้หลักการนี้ในลักษณะการคำนวณซ้ำ (Iteration) เพื่อหาจำนวนเพลลาและตำแหน่งเพลลาที่เพิ่มเติมจนกว่าค่าโมเมนต์ดัดคงค้างมีค่าที่น้อยจนไม่มีนัยสำคัญเพียงพอที่จะเป็นเพลลาบรรทุกเพิ่มเติมได้ โดยพิจารณาจากระยะห่างเพลลาและน้ำหนักรถบรรทุกเพิ่มเติมที่คำนวณได้ จะต้องมีค่าที่สมเหตุสมผล และมีน้ำหนักไม่น้อยกว่าค่าน้ำหนักรถบรรทุกต่ำสุดที่กำหนดไว้ ทั้งนี้

ในแต่ละรอบของการคำนวณจะมีการปรับแก้ค่าระยะห่างเพลาน้ำหนักเพลาทันทีในขั้นตอนของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีขอบเขตด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Unconstrained least square optimization) โดยกระบวนการคำนวณจำนวนเพลาน้ำหนักและระยะห่างเพลาน้ำหนักแสดงได้ดังภาพที่ 3-7



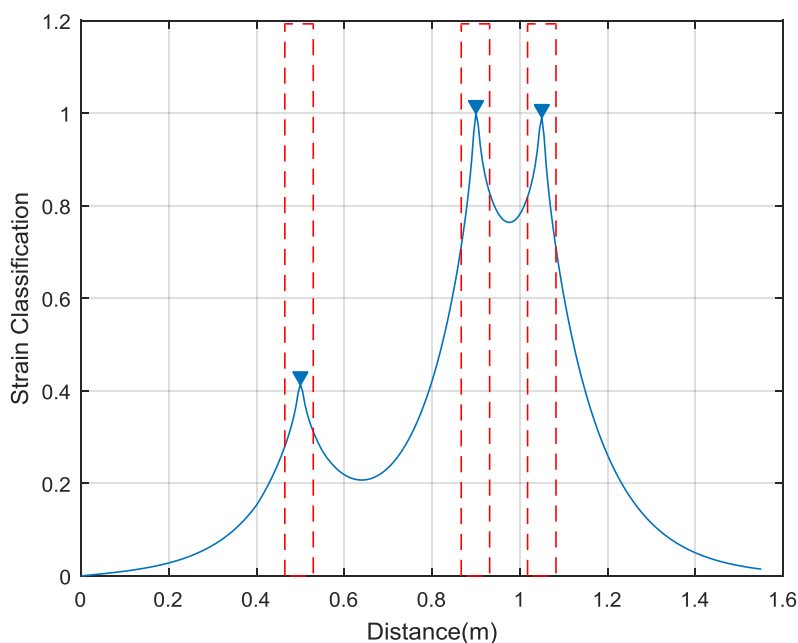
1. กำหนดหาความเร็วด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัญญาณโมเมนต์ 2 หน้าตัด
2. หา ระยะห่างเพลาน้ำหนักของรถบรรทุกทุกสมมติเริ่มต้นประเภท 2 เพลาน้ำหนัก จะได้ค่าระยะห่างเพลาน้ำหนักมากที่สุด,  $S_{max}$
3. กำหนดหาน้ำหนักและระยะห่างเพลาน้ำหนักด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีขอบเขตด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดระหว่างสัญญาณโมเมนต์ตัดตรวจวัดกับสัญญาณโมเมนต์ตัดที่สร้างจากเส้นอิทธิพลทางสถิติ
4. สร้างสัญญาณ โมเมนต์  $\hat{M}$  จากการประมาณน้ำหนักและระยะห่างเพลาน้ำหนักด้วยหลักการเส้นอิทธิพลทางสถิติที่ จากนั้นคำนวณหาสัญญาณ โมเมนต์คงค้าง  $M_r$  จากสมการ  $M_r = M - \hat{M}$
5. พิจารณาตำแหน่งสูงสุดของโมเมนต์คงค้างเป็นตำแหน่งของเพลาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยการตรวจสอบเงื่อนไขระยะห่างเพลาน้ำหนัก หรือ ค่าโมเมนต์ โดยค่าต้องไม่มากกว่าขอบเขตที่กำหนด หากพบว่ามีเงื่อนไขใดถูกต้องแสดงว่าตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ถูกต้อง
6. หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข การคำนวณจะสิ้นสุดและส่งคำตอบ ระยะห่างเพลาน้ำหนักและน้ำหนักเพลาน้ำหนัก

ภาพที่ 3-7 แผนผังการคำนวณหาจำนวนเพลาน้ำหนักและระยะห่างเพลาน้ำหนัก

## การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์

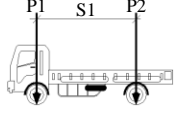
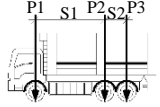
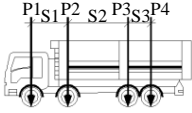
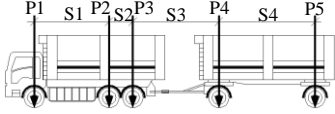
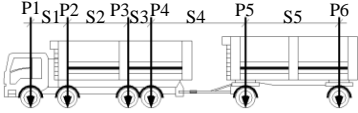
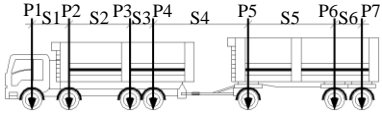
### MATLAB

การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาจะวิเคราะห์จากลักษณะทางกายภาพของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว โดยเลือกใช้สัญญาณความเครียดบริเวณหน้าตัด  $L/2$  เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดการโก่งตัวมากกว่าบริเวณอื่น เมื่อทำการปรับปรุงความเครียดด้วยสมการที่ 3-1 แล้ว จะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจน บ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลา การพิจารณายอดของสัญญาณที่ปรับปรุงแล้วในช่วงระหว่างเพลลาหน้าถึงเพลลาหลังที่มีนัยสำคัญบ่งบอกถึงลักษณะและตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกในแต่ละประเภทในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดที่ได้ติดตั้งไว้บริเวณใต้ท้องสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 3-8 การหาระยะห่างเพลลาโดยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB ตรวจสอบยอดของสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะห่างเพลลาที่มากที่สุดที่คำนวณได้ เพื่อให้ได้ยอดสัญญาณที่บ่งบอกตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก แล้วจึงคำนวณระยะห่างเพลลาจากตำแหน่งยอดสัญญาณที่ตรวจวัด จากนั้นจึงแยกประเภทรถบรรทุกจากลักษณะทางกายภาพตามเงื่อนไขของระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาที่คำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 3-1 โดยที่  $a$  และ  $b$  คือ ค่าระยะห่างเพลลาของกลุ่มที่มากที่สุดใช้เป็นเงื่อนไขในการจำแนกโดยมีค่า 1.5 และ 2.0



ภาพที่ 3-8 สัญญาณระบุตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก

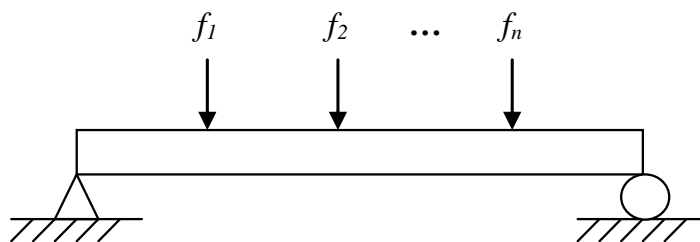
ตารางที่ 3-1 เส้นใยการจำแนกประเภทรถบรรทุก

ประเภทรถบรรทุก	เส้นใย	
	จำนวนเพลลา	ระยะห่างเพลลา
	2	$S1 < a$
	3	$S1 > S2$ $S2 < b$
	4	$S1 < S2 > S3$ $S3 < a$
	5	$S1 > S2$ $S2 < a$ $S3 < S4$
	6	$S1 < S2 > S3$ $S3 < a$ $S4 < S5$
	7	$S1 < S2 > S3$ $S3 < a$ $S4 < S5, S6 < b$

### การหาน้ำหนักเพลลาขณะเคลื่อนที่จากผลการตอบสนองสะพาน

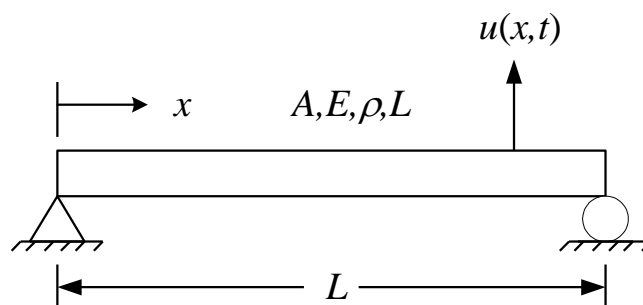
#### 1. การสั่นไหวของสะพานภายใต้แรงกระทำแบบเคลื่อนที่

การหาผลตอบสนองของสะพานโดยพิจารณาโครงสร้างสะพานรับแรงกระทำแบบจุด (Point load) เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสะพาน โดยจะวิเคราะห์การสั่นไหวของสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จากนั้นทำการวิเคราะห์รูปแบบของสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปของสเตตสเปซ (State-space representation) และแก้ปัญหาด้วยการใช้ทรานซิชันเมตริกซ์ (Transition matrix) ในขณะที่แรงจากเพลลาของรถบรรทุกที่กระทำต่อสะพานจะมีลักษณะแบบจุด (Point load) ตามจำนวนเพลลาของรถบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 3-9

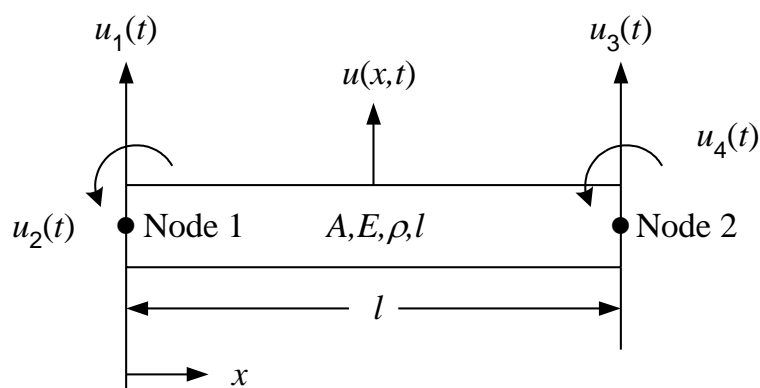


ภาพที่ 3-9 ลักษณะโครงสร้างสะพานที่รับแรงกระทำแบบจุด

### 1.1 การจำลองสะพานด้วยชิ้นส่วนคาน



ภาพที่ 3-10 แบบจำลองคานของออยเลอร์-เบอร์นูลี



ภาพที่ 3-11 แบบจำลองชิ้นส่วนของคาน

การพิจารณาแบบจำลองโดยใช้แบบจำลองคานของออยเลอร์-เบอร์นูลี ดังแสดงในภาพที่ 3-10 และใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองรูปแบบคาน ดังแสดงในภาพที่ 3-11 โดยที่  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน  $E$  คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน  $\rho$  คือ มวลต่อหน่วยความยาว

ของคาน  $l$  คือ ความยาวของชิ้นส่วนคาน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนของคานจะประกอบด้วย 2 ข้อ (Node) และแต่ละข้อของชิ้นส่วนคานจะมี 2 ระดับชั้นความอิสระ ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้ง และการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการหมุน

การเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของชิ้นส่วนคานที่ระยะทาง  $x$  และเวลา  $t$  ใด ๆ จะต้องสอดคล้องตามสมการที่ 3-4

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (3-4)$$

ในกรณี  $EI$  เป็นค่าคงที่ สมการที่ 3-4 จะมีค่า  $\frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = 0$  ซึ่งสามารถอินทิเกรตได้เป็นสมการที่ 3-5

$$u(x,t) = c_1(t)x^3 + c_2(t)x^2 + c_3(t)x + c_4(t) \quad (3-5)$$

โดยที่  $c_i(t)$  คือ ค่าคงที่ของการอินทิเกรต

ซึ่งสมการที่ 3-5 สามารถใช้ในการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้งของชิ้นส่วนคาน โดยมีเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary condition) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(0,t) &= u_1(t) & u(l,t) &= u_3(t) \\ \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} &= u_2(t) & \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} &= u_4(t) \end{aligned} \quad (3-6)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-6 นำไปแทนลงในสมการที่ 3-5 จะได้ค่าคงที่ของการอินทิเกรต คือ

$$\begin{aligned} c_4(t) &= u_1(t) \\ c_3(t) &= u_2(t) \\ c_2(t) &= \frac{1}{l^2} [3(u_3 - u_1) - l(2u_2 + u_4)] \\ c_1(t) &= \frac{1}{l^3} [2(u_1 - u_3) - l(u_2 + u_4)] \end{aligned} \quad (3-7)$$

ทำการแทนสมการที่ 3-7 ลงในสมการที่ 3-5 และจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงข้อ (Nodal displacement) จะได้สมการการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นส่วนคานที่ระยะ  $x$  และเวลา  $t$  ใด ๆ ดังนี้



$$\begin{aligned}
 u(x,t) = & \left[ 1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \right] u_1(t) + l \left[ \frac{x}{l} - \frac{2x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right] u_2(t) \\
 & + \left[ \frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \right] u_3(t) + l \left[ -\frac{x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right] u_4(t)
 \end{aligned}
 \tag{3-8}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ที่อยู่ข้างหน้า  $u_i(t)$  คือ ฟังก์ชันประมาณ (Shape function) ของการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นส่วนคาน

เมตริกซ์มวล (Mass matrix) ของชิ้นส่วนคานสามารถคำนวณได้จากการแทนสมการที่ 3-8 ลงในสมการของพลังงานจลน์แล้วทำการอินทิเกรตและจัดรูปแบบเวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่งที่ขั้ว (Nodal displacement) จะได้เมตริกซ์มวลสำหรับชิ้นส่วนคานดังต่อไปนี้

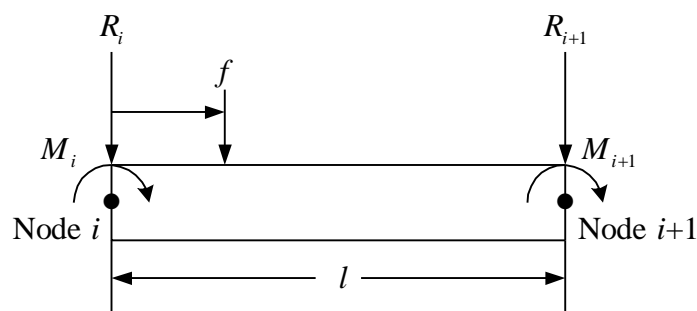
$$\mathbf{M} = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}
 \tag{3-9}$$

ในทำนองเดียวกันสามารถหาเมตริกซ์สติฟเนส (Stiffness matrix) ได้จากการแทนสมการที่ 3-8 ลงในสมการพลังงานความเครียด (Strain energy) ซึ่งจะได้เมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนคาน

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix}
 \tag{3-10}$$

เมื่อได้เมตริกซ์มวลและเมตริกซ์สติฟเนสของแต่ละชิ้นส่วนคานแล้วจึงรวม (Assembly) ชิ้นส่วนคานแต่ละชิ้นเข้าด้วยกันตามองศาความอิสระที่ตรงกัน ซึ่งจะได้เมตริกซ์มวลและเมตริกซ์สติฟเนสของระบบ

### 1.2 การหาแรงที่ข้อจากแรงภายนอกที่มากระทำ



ภาพที่ 3-12 แรงที่ข้อเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ

เมื่อมีแรงภายนอก  $f$  มากระทำบนชิ้นส่วนคาน 2 มิติ ที่มีความยาวเท่ากับ  $l$  ระหว่างข้อที่  $i$  กับข้อที่  $i+1$  ที่ระยะ  $x$  จากปลายชิ้นส่วนคานด้านซ้าย แรงที่ข้อที่แต่ละปลายของชิ้นส่วนคานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-11

$$\begin{aligned} R_i &= \left(1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3}\right) f & M_i &= \left(x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}\right) f \\ R_{i+1} &= \left(\frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3}\right) f & M_{i+1} &= \left(\frac{x^3}{l^2} - \frac{x^2}{l}\right) f \end{aligned} \quad (3-11)$$

โดยที่

$R_i, R_{i+1}$  คือ แรงที่ข้อในแนวตั้ง ของข้อที่  $i$  และ  $i+1$  ของโครงสร้างตามลำดับ

$M_i, M_{i+1}$  คือ โมเมนต์ดัด ของข้อที่  $i$  และ  $i+1$  ของโครงสร้างตามลำดับ

แรงที่ข้อดังกล่าวสามารถจัดให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของแรงโกลบอล (global force vector)

ได้ คือ

$$\mathbf{P} = \mathbf{Y}(x) \cdot \mathbf{f}_1 \quad (3-12)$$

โดยที่

$\mathbf{P}$  คือ เวกเตอร์ของแรงที่ข้อ (Nodal force vector)

$\mathbf{Y}(x)$  คือ เวกเตอร์ที่แปลงแรงกระทำภายนอกสู่ระบบแรงที่ข้อ (Shape function)

ในกรณีของแรงภายนอกจำนวนหลายแรงที่กระทำบนชิ้นส่วนคานเวกเตอร์ของแรงโกลบอล (Global force vector) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่  $i$  สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{Y}(x_i) \cdot f_i \quad (3-13)$$

### 1.3 สมการการเคลื่อนที่

ไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบทางพลศาสตร์ที่มี  $n$  องศาของความอิสระ จะเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P} \quad (3-14)$$

โดยที่

$\mathbf{u}$  คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลอง

$\dot{\mathbf{u}}$  คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ  $\mathbf{u}$  เทียบกับเวลา  $t$

$\mathbf{M}$  คือ เมตริกซ์มวลของระบบ (System mass matrix)

$\mathbf{C}$  คือ เมตริกซ์ความหน่วงของระบบ (System damping matrix)

$\mathbf{K}$  คือ เมตริกซ์สติฟเนสของระบบ (System stiffness matrix)

$\mathbf{P}$  คือ แรงซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและขนาดของแรงภายนอกที่มากระทำ

การใช้สมการสเตตสเปซ (State-space formulation) สมการที่ 3-14 จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งดังแสดงในสมการที่ 3-15

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{f} \quad (3-15)$$

เมื่อ

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (3-16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y} \end{bmatrix}_{2n \times n_f}$$

โดยที่

$\mathbf{X}$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปร (State variables) ที่มีมิติเท่ากับ  $2n$  ซึ่งประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั่วและความเร็วที่ชั่ว

$n_f$  คือ จำนวนของแรงภายนอกที่กระทำ

$\mathbf{f}$  คือ แรงภายนอกที่ไม่ทราบค่ามีมิติเท่ากับ  $n_f \times 1$

สมการอนุพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของสมการไม่ต่อเนื่อง (Discrete equation) โดยการใช้ เอกซ์โพเนนเชียล เมตริกซ์ (Exponential matrix) เข้ามาจัดรูปสมการ จะได้

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_j + \bar{\mathbf{G}}_{j+1}\mathbf{B}_j\mathbf{f}_j \quad (3-17)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{e}^{\mathbf{A}h} \quad (3-18)$$

$$\bar{\mathbf{G}} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{I}) \quad (3-19)$$

โดยที่

$\mathbf{F}$  คือ เอกซ์โพเนนเชียลเมตริกซ์ (Exponential matrix)

$\bar{\mathbf{G}}$  คือ เมตริกซ์ที่เชื่อมโยงระหว่างแรงกับระบบ

$j+1$  หมายถึง การคำนวณในช่วงเวลาที่  $j+1$

$h$  คือ ผลต่างของเวลาในการคำนวณตัวแปร (Variable state) ระหว่าง  $\mathbf{X}_j$  และ  $\mathbf{X}_{j+1}$

ทำการแทนสมการที่ 3-16 และสมการที่ 3-19 ลงไปในสมการที่ 3-17 จะได้

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_j + \mathbf{G}_{j+1}\mathbf{f}_j \quad (3-20)$$

โดยที่

$$\mathbf{G} = \bar{\mathbf{G}}_{2n \times 2n} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y} \end{bmatrix}_{2n \times n_f} \quad (3-21)$$

#### 1.4 วิธีการหาเมตริกซ์ $\mathbf{F}$

$$\mathbf{e}^{\mathbf{A}h} = \mathbf{I} + h\mathbf{A} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{A}^2 + \frac{h^3}{3!}\mathbf{A}^3 + \dots \quad (3-22)$$

และ

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}\mathbf{V}\mathbf{D}^{-1} \quad (3-23)$$

โดยที่

$\mathbf{V}$  คือ เมตริกซ์ไอเกนแวลู (Eigenvalue) ของเมตริกซ์  $\mathbf{A}$

$\mathbf{D}$  คือ เมตริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ (Eigenvector) ของเมตริกซ์  $\mathbf{A}$

ทำการแทนสมการที่ 3-23 ลงในสมการที่ 3-22 จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{A h} &= \mathbf{D}\mathbf{D}^{-1} + h\mathbf{D}\mathbf{V}\mathbf{D}^{-1} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{D}\mathbf{V}^2\mathbf{D}^{-1} + \frac{h^3}{3!}\mathbf{D}\mathbf{V}^3\mathbf{D}^{-1} + \dots \\ &= \mathbf{D}\left(\mathbf{I} + h\mathbf{V} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{V}^2 + \frac{h^3}{3!}\mathbf{V}^3 + \dots\right)\mathbf{D}^{-1} \\ &= \mathbf{D}\mathbf{e}^{A h}\mathbf{D}^{-1} \end{aligned} \quad (3-24)$$

2. การหาแรงขณะเคลื่อนที่ จากผลการตอบสนองของสะพาน

จากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการหาน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่ สามารถสรุปวิธีการหลัก ๆ ได้ 3 วิธี คือ 1) วิธีโดเมนของเวลา (Time domain method) 2) วิธีโดเมนของความถี่และเวลา (Frequency and time domain method) และ 3) วิธีโดเมนของความถี่และเวลา โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. วิธีโดเมนของเวลา (Time domain method) เป็นการจำลองรูปแบบโครงสร้างและแรงด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง โดยที่แรงจะถูกจำลองให้เป็นฟังก์ชันที่เป็นช่วง (Step functions) ในช่วงเวลาสั้น ๆ และแก้สมการในโดเมนของเวลา

2. วิธีโดเมนของความถี่และเวลา (Frequency and time domain method) จะทำฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transforms) ในสมการการเคลื่อนที่ในรูปแบบของพิกัดเชิงโหมด เช่นเดียวกัน ฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มของปฏิกิริยาตอบสนองและของแรงจะถูกเชื่อมโยงอยู่ในโดเมนของความถี่ (Frequency domain) และแกนเวลา (Time histories) ของแรงจะสามารถหาได้โดยตรงโดยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares method)

3. วิธีเชิงโหมด (Modal approach) เป็นการหาแรงในพิกัดเชิงโหมด การเปลี่ยนตำแหน่งที่วัดได้จะถูกเปลี่ยนเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงโหมด (Modal displacement) โดยทำการสมมติฟังก์ชันประมาณ (Shape function) ซึ่งความเร็วเชิงโหมด (Modal velocities) และความเร่งเชิงโหมด (Modal acceleration) สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงโหมด หลังจากนั้นจะหาแรงโดยทำการแก้สมการ (Uncoupled equation) ใน พิกัดเชิงโหมด

ทั้ง 3 วิธีที่กล่าวถึงจะต้องทำการคำนวณเกี่ยวกับอินเวอร์สของเมตริกซ์ ซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณนานและเกิดสภาวะบกพร่อง (Ill-conditioned) ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา การคำนวณหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกจากระยะการ โกงตัวของสะพานสามารถคำนวณด้วยกฎของฮุก (Hooke's law) แต่ในทางปฏิบัตินั้น การหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกจากระยะ โกงตัวของสะพานเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์วัดการแอ่นตัวได้ของสะพาน ซึ่งมีความยุ่งยากในการติดตั้ง จึงได้ใช้วิธีการหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกจากค่าความเครียดหรือโมเมนต์คัตแทน โดยการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) ไว้บริเวณใต้สะพานเพื่อวัดค่าความเครียดเนื่องจากแรงที่กระทำกับสะพาน ดังนั้นข้อมูลสัญญาณความเครียดหรือ โมเมนต์คัตที่ได้จากการวัดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-25 สำหรับการหาน้ำหนักเพลลาสามารถหาได้จากการแก้ระบบสมการในรูปแบบสมการที่ 3-25 เพียงแต่วิธีที่ใช้ในการหาน้ำหนักเพลลาจะมีเงื่อนไขและวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีที่จะนำมาใช้ในครั้งนี คือ การหาคำตอบโดยใช้การแก้ระบบสมการโดยตรง คือ ซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular value decomposition, SVD)

$$\mathbf{Z} = \mathbf{TX} \quad (3-25)$$

โดยที่

$\mathbf{Z}$  คือ เมตริกซ์ของการวัดมีขนาด  $k \times n$  เมื่อ  $k$  คือ จำนวนตำแหน่งของการวัด และ  $n$  คือ จำนวนข้อมูล

$\mathbf{T}$  คือ เมตริกซ์เชื่อมโยงระหว่างเมตริกซ์การวัดกับตัวแปร (State variables) มีขนาด  $k \cdot n \times n \cdot n_p$  เมื่อ  $n_p$  คือ จำนวนเพลลา

$\mathbf{X}$  คือ ตัวแปร State variables

## 2.1 การหาน้ำหนักเพลลาโดยตรงจากการแก้ระบบสมการ

หลักการวิเคราะห์ระบบสมการสำหรับการคำนวณหาน้ำหนัก สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในสมการที่ 3-25 มาเชื่อมโยงกับแรงภายนอกด้วยสมการสเตทสเปซ ซึ่งจาก

สมการสเตตสเปซ (State-space formulation) เมื่อกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้น  $\mathbf{X}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\mathbf{X}_0 = 0$ ) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  $\mathbf{X}$  และแรงภายนอกของ  $\mathbf{f}$  ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_n \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{F}\mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{F}^2\mathbf{G}_1 & \mathbf{F}\mathbf{G}_2 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{G}_{n-1} & 0 \\ \mathbf{F}^{n-1}\mathbf{G}_1 & \mathbf{F}^{n-2}\mathbf{G}_2 & \cdots & \mathbf{F}\mathbf{G}_{n-1} & \mathbf{G}_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{N}} \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_0 \\ \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (3-26)$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้เป็น

$$\mathbf{X} = \mathbf{N}\mathbf{f} \quad (3-27)$$

โดยที่

$\mathbf{N}$  คือ เมตริกซ์เชื่อมโยงระหว่างการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความเร็วกับแรงภายนอก

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3-26 และสมการที่ 3-27 สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 3-28

$$\mathbf{Z} = \mathbf{T}\mathbf{N}\mathbf{f} \quad (3-28)$$

จากสมการที่ 3-28 พบว่าในการคำนวณจะต้องมีจำนวนเมตริกซ์ของการวัดที่ไม่น้อยกว่าแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างสะพานจึงจะสามารถคำนวณหาหน้าหนักเพลลาของรถบรรทุกได้ ดังนั้นเมื่อจำนวนเพลลาของรถบรรทุกมากกว่าจำนวนเมตริกซ์ของการวัดจึงไม่สามารถคำนวณหาหน้าหนักของรถบรรทุกได้ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำได้โดยการสมมติให้เพลลาที่มีจำนวนแรงกระทำ 2 แรง ให้เหลือแรงกระทำเพียงแรงเดียว ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถลดตัวแปรลงได้ และสามารถคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกได้ในกรณีที่เมตริกซ์ของการวัดน้อยกว่าแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างสะพาน ดังแสดงในสมการที่ 3-29

$$\hat{\mathbf{Z}} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{f}} \quad (3-29)$$

โดยที่

$\mathbf{f}$  คือ เวกเตอร์ของแรงที่จะกระทำการหา มิมิตี  $n \times 1$  และ  $k \geq n$

$$\text{เมื่อ} \quad \mathbf{B} = \mathbf{T}\mathbf{N}\mathbf{Q} \quad (3-30)$$

โดยที่

$\mathbf{Q}$  คือ เมตริกซ์แปลงแรงระหว่างเมตริกซ์เชื่อมโยงกับแรงภายนอกที่กระทำกับสะพาน มีขนาด  $n_p \cdot n \times n \cdot k$

เมื่อมีน้ำหนักเพลลาที่ไม่ทราบค่า  $\mathbf{f}$  รวมอยู่ในสมการ การที่ข้อมูลจากแบบจำลองจะเหมือนกับข้อมูลจากการวัดจริงเป็นไปได้ และเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดจะมีสัญญาณรบกวนอยู่ด้วย ดังนั้นวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) จะหาค่าความคลาดเคลื่อน  $E$  ดังสมการที่ 3-31

$$E(\mathbf{f}) = \left[ (\mathbf{Z} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{f}})^T (\mathbf{Z} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{f}}) \right] \quad (3-31)$$

เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดจากวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดไม่เพียงพอต่อความถูกต้องเนื่องจากการแก้ปัญหาก็จะเกิดสภาวะบัพพร้อม III-condition ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดปลายของตำแหน่งที่มีการเข้าออกของเพลลาซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดสาเหตุดังกล่าวนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเพิ่มเทอมความราบเรียบ (Smoothing term) เข้าไปในสมการที่ 3-31 จะได้สมการที่เพิ่มเทอมความราบเรียบดังแสดงในสมการที่ 3-32

$$E(\mathbf{f}, \lambda) = \left[ (\mathbf{Z} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{f}})^T (\mathbf{Z} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{f}}) \right] + \lambda (\hat{\mathbf{f}}^T, \hat{\mathbf{f}}) \quad (3-32)$$

เมื่อเทอมที่เพิ่มเข้าไป คือ Regularization parameter โดยเรียกวิธีการดังกล่าวเรียกว่า Tikhonov method โดยค่า  $\lambda$  จะมีผลต่อความราบเรียบของแรงที่คำนวณได้ หากค่า  $\lambda$  มีค่าน้อย จะทำให้คำตอบมีความใกล้เคียงกับข้อมูลแต่มีความแปรปรวนสูง หากค่า  $\lambda$  มีค่ามาก แรงที่หาได้จะมี



ความราบเรียบแต่จะไม่ใกล้เคียงกับข้อมูล และหากค่า  $\lambda$  มีค่าเท่ากับศูนย์ การแก้ปัญหาจะไม่ต่างจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) จากวิธีการออปติไมเซชัน (Optimization) พบว่าสามารถหาแรง  $\mathbf{f}$  ที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดได้ด้วยการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับ  $\mathbf{f}$  แล้วจับเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้ค่าแรง  $\mathbf{f}$  ที่เหมาะสมที่สุดและทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดดังสมการ

$$\mathbf{f} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B} + \lambda)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Z} \quad (3-33)$$

2.2 การแก้สมการด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD)

$$\text{จากรูปแบบของสมการเชิงเส้น } [A]_{k \times n} \{x\}_{n \times 1} = \{b\}_{n \times 1} \quad \text{เมื่อ } k \geq n \quad (3-34)$$

ซึ่งสามารถแปลงเมตริกซ์  $A$  ด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular value decomposition) ได้ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$[A]_{k \times n} = [U]_{k \times k} [\Sigma]_{k \times n} [V]^T_{n \times n} \quad (3-35)$$

โดยที่

$U$  คือ เมตริกซ์จัตุรัส มีมิติ  $k \times k$  และมีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์ตั้งฉาก (Orthogonal matrix)

$V$  คือ เมตริกซ์จัตุรัส มีมิติ  $n \times n$  และมีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์ตั้งฉาก (Orthogonal matrix)

$\Sigma$  คือ เมตริกซ์ทแยง (Diagonal matrix) มีมิติ  $k \times n$

ดังนั้น จากสมการที่ 3-33 สามารถแปลงเมตริกซ์  $\mathbf{B}$  ให้อยู่ในรูปของซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular value decomposition) ได้ดังนี้

$$\{\mathbf{Z}\} = [U][\Sigma][V]^T \{\mathbf{f}\} \quad (3-36)$$

$$[U]^T \{Z\} = [\Sigma][V]^T \{f\} \quad (3-37)$$

จากวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) และวิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization) สามารถเขียนสมการเพื่อใช้ในการหาแรงได้ดังนี้

$$E(\lambda, \mathbf{f}) = [\Sigma V^T \mathbf{f} - U^T \mathbf{Z}, \Sigma V^T \mathbf{f} - U^T \mathbf{Z}] + \lambda(\mathbf{f}, \mathbf{f}) \quad (3-38)$$

เนื่องจากวิธีการออปติไมเซชัน (Optimization) สามารถหาแรง  $\mathbf{f}$  ที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดได้ ดังนั้น ค่าแรง  $\mathbf{f}$  ที่เหมาะสมที่สุดและทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดสามารถหาได้จากสมการที่ 3-39

$$\mathbf{f} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{(\sigma_i^2 + \lambda)} (u_i^T \mathbf{Z}) v_i \quad (3-39)$$

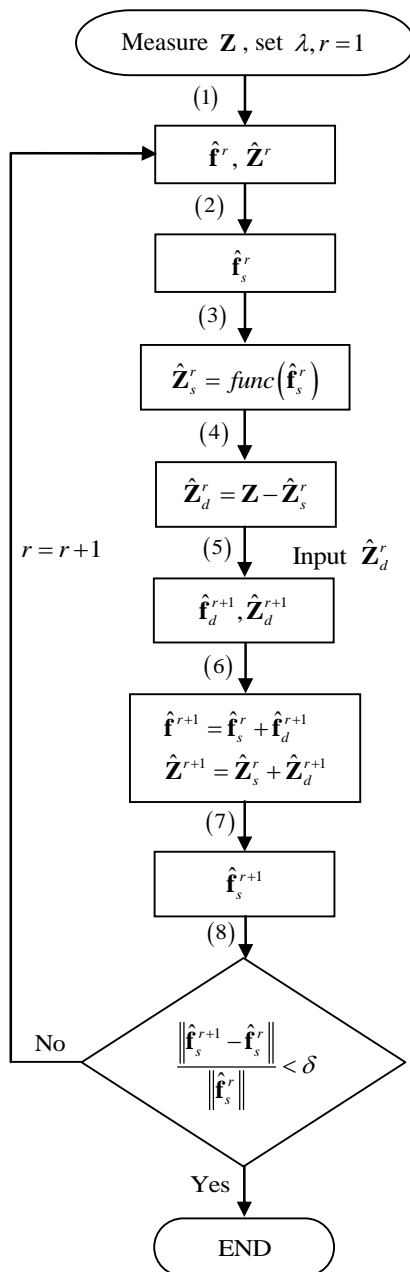
โดยที่

$\sigma_i$  คือ ค่าซิงกูลาร์ (Singular value) และมีคุณสมบัติ คือ  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$

### 2.3 เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย์ (USC Technique)

จากการใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization technique) พบว่าจะต้องใช้เรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสมจึงจะทำให้การคำนวณหาน้ำหนักเพลามีค่าตอบที่ถูกต้อง ซึ่งการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้นกระทำได้ยากเนื่องจากต้องกำหนดค่าความเร็วและน้ำหนักเพลารเริ่มต้นที่มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง และเนื่องจากผลตอบสนองสะพานมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ องค์ประกอบทางสถิตย์ (Quasi-static components) และองค์ประกอบทางพลศาสตร์ (Dynamic components) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ที่ได้จากทฤษฎีที่แตกต่างกันตามความเหมาะสม ดังนั้นในปี ค.ศ. 2006 ทศพล ปิ่นแก้ว ได้พัฒนาเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย์ (USC Technique) เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน ซึ่งสามารถเพิ่มความถูกต้องให้กับผลตอบสนองสะพานได้ โดยที่องค์ประกอบทางสถิตย์สามารถหาได้จากการหาค่าตอบโดยใช้วิธีเรกูลาร์ไรเซชัน แต่ยังเหลือองค์ประกอบพลศาสตร์ ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณซ้ำเพื่อให้คำตอบเข้าใกล้ความเป็นจริงมากที่สุด โดยแผนภาพเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย์

ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-13 สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเพื่อให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุดลงได้แสดงไว้ดังสมการที่ 3-40



Step of computation for USC technique

- (1) Load identification using optimization
- (2) Load decomposition to obtain the static component (quasi-static) by time-averaging.
- (3) Calculate the corresponding static strain component.
- (4) Compute the remaining dynamic strain component.
- (5) Repeat the load identification using optimization as in step (1) by inputting only dynamic strain component from step (4)
- (6) Update the identified result from the combination of the previous and the latest identified results.
- (7) Load decomposition to obtain the update static component (quasi-static) by time-averaging.
- (8) Determine the rate of convergence of the update results.

ภาพที่ 3-13 วิธีการคำนวณหาน้ำหนักด้วยเรกูลาร์ไรเซชันกับเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC technique) (Pinkaw, 2006)

$$\delta = \frac{\hat{f}_{static}^i - \hat{f}_{static}^{i-1}}{\hat{f}_{static}^{i-1}} \times 100\% \quad (3-40)$$

โดยที่

$\hat{f}_{static}^i$  และ  $\hat{f}_{static}^{i-1}$  คือ น้ำหนักเพลลาทางสถิติที่คำนวณได้ในขั้นตอนปัจจุบัน และขั้นตอนก่อนหน้า

$\delta$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เพื่อเปรียบเทียบค่าของแต่ละรอบจากการทำซ้ำ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดไว้เท่ากับร้อยละ 1

### การลดตัวแปรของจำนวนเพลลาในการวิเคราะห์

การหาน้ำหนักโดยการแก้ปัญหาแบบหลายตัวแปรจะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ซึ่งในการคำนวณจะต้องมีตัวแปรของการวัดมากกว่าตัวแปรที่จะทำการคำนวณ การศึกษานี้ได้ศึกษาการหาน้ำหนักของรถบรรทุกประเภท 2 เพลลาถึงประเภท 7 เพลลา จึงทำให้ต้องมีจำนวนจุดตรวจวัดถึง 7 จุดด้วยกัน แต่ในความเป็นจริงการติดตั้งอุปกรณ์จำนวนมากจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการลดตัวแปรในการวิเคราะห์ข้อมูลจะช่วยให้ลดความซับซ้อนในการคำนวณลงได้ อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและลดระยะเวลาในการคำนวณลงได้

#### 1. การลดตัวแปรของจำนวนเพลลาของรถบรรทุกในแต่ละประเภท

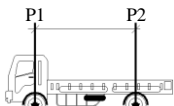
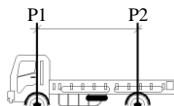
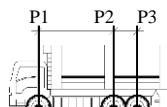
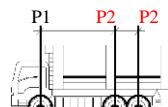
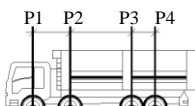
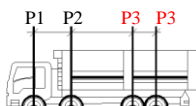
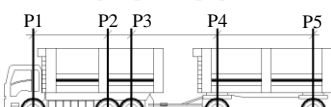
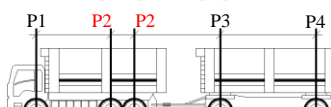
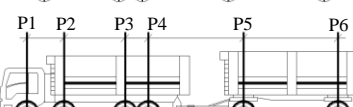

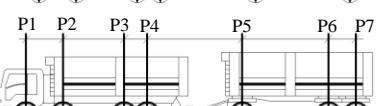

ในการคำนวณจะต้องมีจำนวนเมตริกซ์ของการวัดที่ไม่น้อยกว่าแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างสะพานจึงจะสามารถคำนวณหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกได้ เมื่อจำนวนเพลลาของรถบรรทุกมากกว่าจำนวนเมตริกซ์ของการวัดจึงไม่สามารถคำนวณหาน้ำหนักของรถบรรทุกได้ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำได้โดยการสมมติให้เพลลาที่มีจำนวนแรงกระทำ 2 แรงให้เหลือแรงกระทำเพียงแรงเดียว ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถลดตัวแปรลงได้และสามารถคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ในกรณีที่เมตริกซ์ของการวัดน้อยกว่าแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างสะพานรูปแบบการลดตัวแปรของจำนวนเพลลาดังแสดงในตารางที่ 3-2

#### 2. การเลือกจุดตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทำการลดตัวแปรของจำนวนเพลลาในการวิเคราะห์แล้ว จะทำการเลือกจุดตรวจวัดที่จะใช้ในการคำนวณให้สอดคล้องกับจำนวนตัวแปรที่จะทำการคำนวณ โดยจะเริ่มจากการเลือกจุดตรวจที่อยู่บริเวณกึ่งกลางสะพานเนื่องจากในการศึกษาที่ผ่านมามีจุดตรวจวัดตรงกึ่งกลางสะพานจะให้คำตอบที่มีความถูกต้องมากกว่าจุดตรวจวัดบริเวณอื่น เพราะบริเวณดังกล่าวจะเกิดค่าการโก่งตัว

มากที่สุด ดังนั้นรายละเอียดการเลือกจุดตรวจวัดสำหรับเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกในแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 รูปแบบการลดตัวแปรของจำนวนเพลลาในการวิเคราะห์

ประเภทรถบรรทุก	ลักษณะตัวแปรในการวิเคราะห์ก่อนลด	ลักษณะตัวแปรในการวิเคราะห์หลังลด
2 เพลลา		
3 เพลลา		
4 เพลลา		
5 เพลลา		
6 เพลลา		
7 เพลลา		

จากหลักการและทฤษฎีที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น การศึกษานี้จะทำการคำนวณความเร็วในการสัญจรของรถบรรทุกเป็นลำดับแรกด้วยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัญญาณความเครียดสองจุดของสะพาน จากนั้นจะทำการคำนวณจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาเพื่อจำแนกประเภทรถบรรทุก แล้วจึงวิเคราะห์น้ำหนักเป็นลำดับสุดท้าย การคำนวณน้ำหนักเพลลาอาศัยหลักการการวิเคราะห์ปัญหาแบบย้อนกลับโดยการแปลงสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ให้ย้อนกลับเป็นแรงที่กระทำแบบจุดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถหาคำตอบได้โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน และใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) เพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลลาที่คำนวณได้

ตารางที่ 3-3 จุดตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

ประเภท รถบรรทุก	ตำแหน่งจุดตรวจวัด				
	L/4	L/3	L/2	2L/3	3L/4
2 เพลา	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3 เพลา	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4 เพลา	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5 เพลา	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6 เพลา	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7 เพลา	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## บทที่ 4

### วิธีการศึกษา

การศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน หากทำการศึกษาด้วยโครงสร้างสะพานและบรรทุกจริงจะต้องใช้งบประมาณมากสำหรับการทดสอบ อีกทั้งยังไม่ทราบด้วยว่าวิธีการที่นำเสนอ นั้นมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปทดสอบจริงได้หรือไม่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาในแบบจำลองย่อส่วน ซึ่งเป็นการศึกษาที่ใช้งบประมาณน้อยและสามารถศึกษาประสิทธิภาพของพารามิเตอร์จากวิธีที่นำเสนอได้ โดยการจำลองระบบสะพานและบรรทุกให้มีสัดส่วนที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับสะพานและบรรทุกในสภาพการใช้งานจริงเพื่อให้แบบจำลองย่อส่วนมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ผลการศึกษาจะช่วยยืนยันความเป็นไปได้ของวิธีการที่นำเสนอ รวมถึงถึงความเหมาะสมและประสิทธิภาพของวิธีการที่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้

การเตรียมการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน โดยใช้แบบจำลองย่อส่วนเพื่อให้มีค่าพารามิเตอร์คงที่ และมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง จึงออกแบบแบบจำลองย่อส่วนให้อยู่ในอัตราส่วนเทียบเท่าสะพานและบรรทุกจริง และเพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งในห้องปฏิบัติการเนื่องจากมีขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วน 1 ต่อ 10 ซึ่งหมายถึงการจำลองสะพานและบรรทุกให้มีขนาดที่เล็กกว่าขนาดจริง 10 เท่า ด้วยการใชห้ลักรูปพรรณจำลองเป็นสะพาน โดยกำหนดให้สะพานจำลองมีความถี่ของตัวสะพานใกล้เคียงกับความถี่ของโครงสร้างสะพานจริง และแบบจำลองบรรทุกจะใช้อลูมิเนียมค้ำขึ้นรูป สามารถจำลองในสถานการณ์ที่บรรทุกมีน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่ากักบรรทุกตามกฎหมายจนถึงมีน้ำหนักบรรทุกมากกว่ากฎหมายได้ โดยขนาดย่อส่วนเทียบเท่ากับบรรทุกจริงตามข้อกำหนด ในพระราชบัญญัติทางหลวง สามารถปรับเปลี่ยนน้ำหนักของบรรทุกได้ โดยที่น้ำหนักของบรรทุกที่ใช้จะออกแบบให้เป็นไปตามค่าความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างสะพานกับน้ำหนักของบรรทุก โดยการพิจารณาแรงที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานซึ่งจะให้ค่าความเครียดสูงสุด

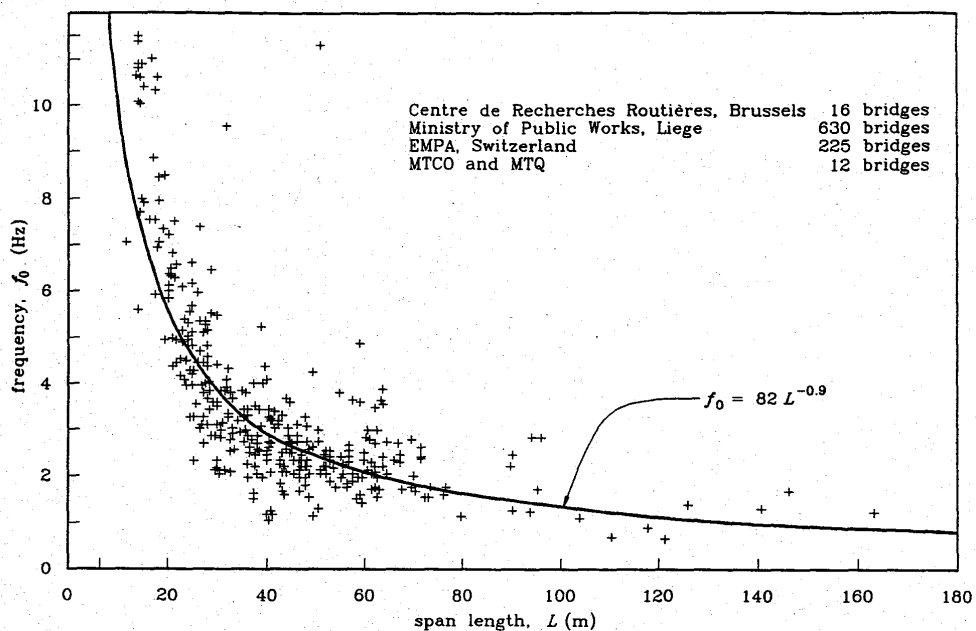
ในบทนี้ได้อธิบายถึงหลักการออกแบบแบบจำลองย่อส่วนและอุปกรณ์ตรวจวัดที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แบบจำลองสะพาน แบบจำลองบรรทุก และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและการบันทึกข้อมูล การเปรียบเทียบแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา อธิบายรูปแบบการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการดำเนินการทดสอบ เป็นต้น

## การออกแบบแบบจำลองย่อส่วน

การออกแบบแบบจำลองย่อส่วนจะออกแบบให้มีขนาดและสัดส่วนใกล้เคียงกับโครงสร้างสะพานและรถบรรทุกจริงโดยมีอัตราส่วน 1 ต่อ 10 โดยการทดสอบจะต้องทำให้การตรวจวัดผลการตอบสนองของแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมของโครงสร้างจริง โดยการออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ แบบจำลองสะพาน และแบบจำลองรถบรรทุก โดยมีรายละเอียดในการออกแบบแบบจำลองดังหัวข้อต่อไปนี้

### 1. แบบจำลองสะพาน

การออกแบบแบบจำลองสะพานจะออกแบบให้สะพานมีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานจริง โดยใช้หลักการรูปพรรณในการออกแบบสะพานจำลองเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีหน้าตัดคงที่และมีพฤติกรรมที่อยู่ในช่วงอิลาสติกเชิงเส้นมากกว่าวัสดุอื่น ซึ่งการศึกษานี้จะพิจารณาสะพานช่วงเดียว (Simple beam) ที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (Simple support) ดังนั้นเพื่อให้การจำลองสะพานย่อส่วนมีพฤติกรรมที่คล้ายกับสะพานจริงจึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความยาวช่วงสะพานจากงานศึกษาของ Tilly (1986)



ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงสะพาน (Tilly, 1986)



$$f_0 = 82L^{-0.9} \quad (4-1)$$

โดยที่

$f_0$  คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน

$L$  คือ ความยาวช่วงสะพาน

จากสมการ

$$\omega_{b,n} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}_b}} \quad (4-2)$$

เมื่อ

$\omega_{b,n}$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ณ โหมดที่  $n$

จากสมการที่ 4-2 เมื่อทำการแปลงความถี่เชิงมุมให้อยู่ในรูปแบบของความถี่ จะสามารถเชื่อมความสัมพันธ์กับสมการที่ 4-1 ได้ เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการที่ 4-3

$$f_n = \frac{\omega_{b,n}}{2\pi} = \frac{n^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}_b}} \quad (4-3)$$

เมื่อสะพานจำลองย่อส่วนมีลักษณะเป็นคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ สามารถคำนวณคุณสมบัติของหน้าตัดได้จากสมการที่ 4-4

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \quad (4-4)$$

$$\bar{m}_b = A\gamma \quad (4-5)$$

โดยที่

$b$  คือ ความกว้างของสะพาน

$h$  คือ ความหนาสะพาน

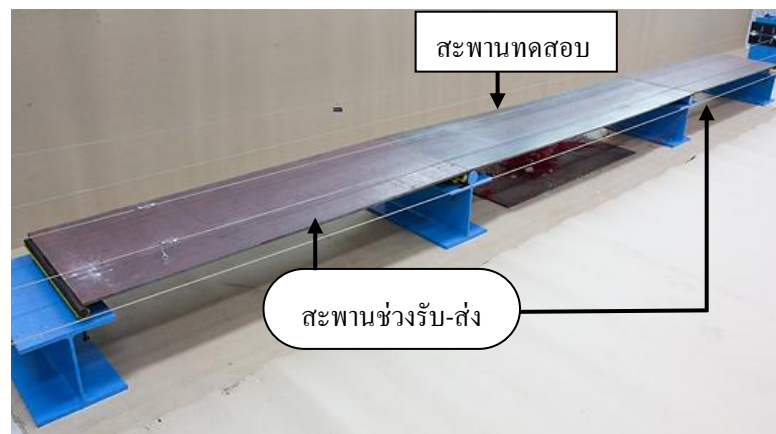
$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของสะพาน

$\gamma$  คือ หน่วยน้ำหนักของวัสดุโครงสร้างสะพาน

เมื่อแก้สมการที่ 4-3 ถึงสมการที่ 4-5 เพื่อหาความหนาของสะพาน จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4-6

$$h = \frac{2f_n L^2}{n^2 \pi} \sqrt{\frac{12\gamma}{E}} \quad (4-6)$$

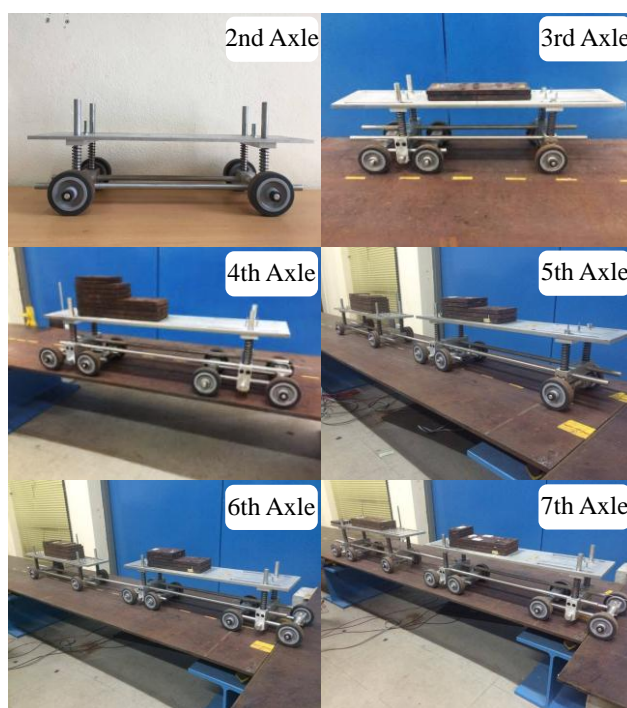
จากการพิจารณาสะพานจริงที่มีความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงสะพานจะได้ว่า สะพานจริงที่มีความยาวช่วง 20 เมตร มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 5.53 เฮิรตซ์ และเมื่อพิจารณาสะพานจำลอง ที่จำลองด้วยเหล็กรูปพรรณ โดยมีหน่วยน้ำหนัก  $\gamma$  เท่ากับ 7,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก  $E$  เท่ากับ  $2.04 \times 10^6$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความยาวช่วงสะพาน 2 เมตร ทำให้ได้ความหนาสะพานจำลองย่อส่วนที่ใช้อยู่ที่ 1 เซนติเมตร โดยกำหนดความกว้างของสะพานให้มีขนาดเท่ากับ 50 เซนติเมตร เมื่อแทนค่าคุณสมบัติของสะพานจำลองลงในสมการที่ 4-6 จะได้ความถี่ธรรมชาติของสะพานจำลองในโหมดที่ 1 เท่ากับ 5.78 เฮิรตซ์ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพานจริงที่ โดยชุดสะพานจำลองได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ชุดสะพานจำลองย่อส่วน

## 2. แบบจำลองรถบรรทุก

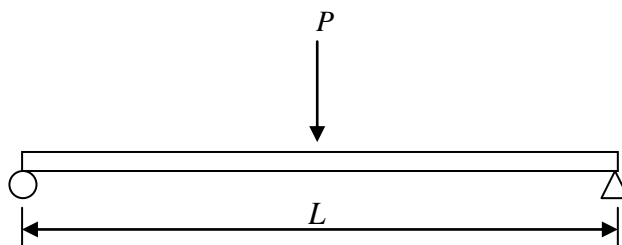
รถบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบ จะออกแบบให้มีพฤติกรรมคล้ายกับรถบรรทุกจริง มีแรงกระทำกับสะพานเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านแบบจำลองสะพาน ในการจำลองรถบรรทุกจะจำลองด้วยวัสดุอลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถตัดตามแบบเป็นส่วนประกอบของแบบจำลองได้ง่าย สามารถเพิ่มน้ำหนักได้หลายระดับตั้งแต่ระดับน้ำหนักน้อยกว่าพิกัดจนถึงมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมายกำหนด ในการออกแบบรถบรรทุกจำลองจะออกแบบรถบรรทุกตั้งแต่ประเภท 2 เพลา จนถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลา โดยเป็นรถบรรทุกตามข้อกำหนดในพระราชบัญญัติทางหลวงดังแสดงในภาพที่ 4-3 โดยเทียบเคียงขนาดย่อส่วนกับรถบรรทุกจริงที่ใช้งานบนทางหลวง ทั้ง 6 ประเภท ในการจำลองรถบรรทุกจะจำลองในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 ตามอัตราการย่อส่วนสะพาน



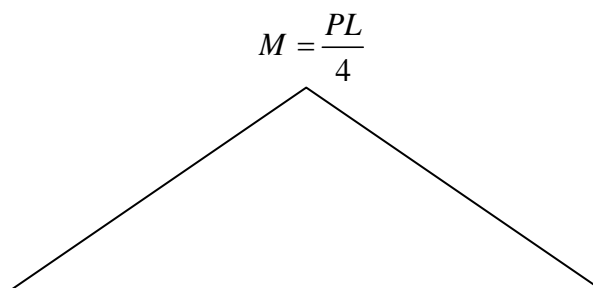
ภาพที่ 4-3 รถบรรทุกจำลองประเภท 2-7 เพลา

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักให้กับรถบรรทุกจำลอง โดยการจำลองน้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับสะพานจำลองให้เกิดความเครียด (Strain) จากการตัด ณ จุดกึ่งกลางสะพาน ให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับสะพานจริง โดยสมมติให้น้ำหนักของรถบรรทุกเป็นแรงที่

กระทำแบบจุดที่กระทำ ณ กึ่งกลางคาน ซึ่งจะให้ค่าความเครียดสูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-4 และภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-4 แบบจำลองแรงกระทำแบบจุดที่เกิดขึ้นในคานทั่วไป



ภาพที่ 4-5 แบบจำลองโมเมนต์คัตเมื่อมีแรง  $P$  มากระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน

จากแรง  $P$  ที่กระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานทำให้ได้ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด  $M$  เท่ากับ

$$M = \frac{PL}{4} \quad (4-7)$$

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นกับคาน ในช่วงอีลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic) ดังสมการที่ 4-8 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรง เนื่องจากน้ำหนักที่กระทำกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับคาน ดังสมการที่ 4-9

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = E\varepsilon \quad (4-8)$$

$$P = \frac{4EI\varepsilon}{cL} \quad (4-9)$$

โดยที่

$P$  คือ แรงกระทำแบบจุดเนื่องจากน้ำหนักของรถบรรทุก

$E$  คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

$\varepsilon$  คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคาน

$c$  คือ ระยะที่วัดจากแกนสะเทินของหน้าตัดคานถึงขอบของหน้าตัดคาน

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน

จากสมการที่ 4-9 สามารถคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกจำลองได้ โดยพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่าง รถบรรทุกจำลองกับสะพานจำลอง ให้เทียบเท่ากับ น้ำหนักของรถบรรทุกจริงที่กระทำกับโครงสร้างสะพานคอนกรีตจริง

### 3. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.1 มาตรฐานวัดความเครียด (Strain gauge)

มาตรฐานวัดความเครียด คือ มาตรฐานค่าการยืดหรือหดตัวของวัสดุ โดยมาตรฐานจะให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถแปลงเป็นค่าความเครียดได้ โดยมาตรฐานวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบเป็นรุ่น KFG-10-120-C1-11L2M2R ของบริษัท KYOWA แสดงดังภาพที่ 4-6

KYOWA		MADE IN JAPAN		
TYPE	KFG-10-120-C1-11L2M2R			
GAGE FACTOR (24°C, 50%RH)	2.08 ± 1.0%	LOT No.	Y3455S	BATCH 047C S12
GAGE LENGTH	10 mm	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	+0.008 %/°C	
GAGE RESISTANCE(24°C, 50%RH)	120.0 ± 0.8 Ω	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A , EP-34B	
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7 PPM/°C	QUANTITY	10	



ภาพที่ 4-6 มาตรฐานวัดความเครียด (Strain gauge)

#### 3.2 ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Signal transformer module)

อุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ยี่ห้อ National Instrument ซึ่งเป็นชุดแปลงสัญญาณความเครียดขนาด 8 ช่องสัญญาณ ใช้กับมาตรฐานวัดความเครียด ดังแสดงดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด (Strain gauge transformer module)

### 3.3 อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition)

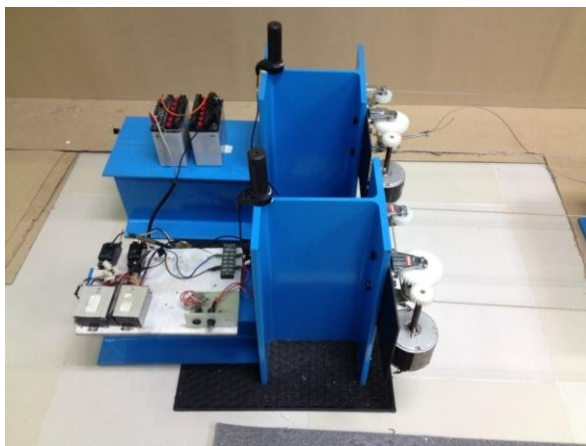
อุปกรณ์รวมสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลจริงในงานวิจัยเพื่อแปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้นในลักษณะเวลาจริง โดยการศึกษาใช้อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178 เพื่อรวมสัญญาณจากชุดแปลงสัญญาณความเครียดขนาด 8 ช่องสัญญาณแปลงข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม NI Signal Express 2013 โดยลักษณะอุปกรณ์รวมสัญญาณที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 อุปกรณ์รวมสัญญาณ ยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178

### 3.4 อุปกรณ์ร่วมสัญญาณ (Data acquisition)

อุปกรณ์การชั่งลากรถบรรทุกจำลองนี้เป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าพร้อมชุดควบคุมความเร็ว โดยสามารถควบคุมช่วงความเร็วได้ตั้งแต่ 10 ถึง 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในการใช้งานบนจักรยานไฟฟ้าจริง โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่กระแสตรง 24 โวลต์ ดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 อุปกรณ์ชั่งลากรถบรรทุกจำลองและชุดควบคุมความเร็ว

### การติดตั้งอุปกรณ์และการบันทึกข้อมูล

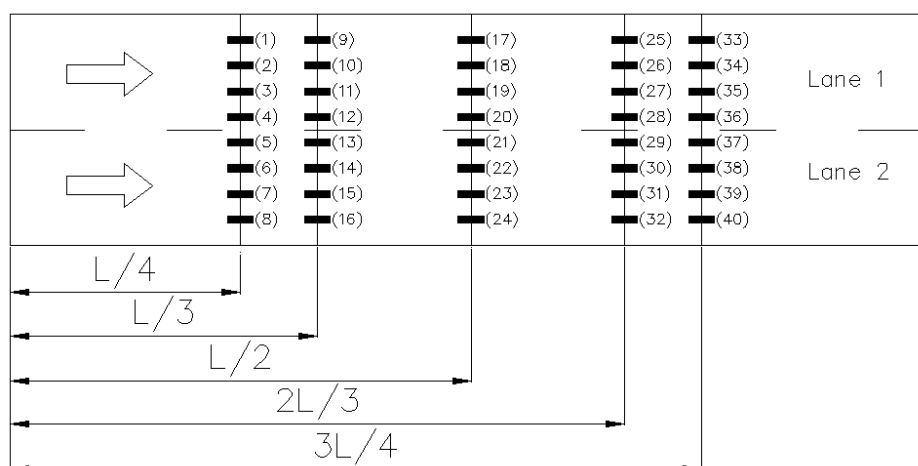
#### 1. การติดตั้งชุดทดสอบแบบจำลองย่อส่วน

ชุดอุปกรณ์ทดสอบย่อส่วนถูกติดตั้งในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิภายในห้องที่คงที่ ซึ่งตัวสะพานทดสอบจะถูกติดตั้งไว้บนจตุรรองรับที่เป็นเหล็กรูปพรรณ โดยให้มีรูปแบบพฤติกรรมของสะพานแบบคานอย่างง่าย โดยแบ่งสะพานออกเป็น 3 ส่วน คือ สะพานช่วงส่ง สะพานช่วงรับ และสะพานทดสอบ โดยสะพานช่วงส่งและช่วงรับจะถูกติดตั้งไว้เป็นช่วงต่อที่หัวและท้ายของสะพานทดสอบที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลาง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-2 ในการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกที่ถูกติดตั้งไว้บนสะพานช่วงส่ง แล้วจึงถูกลากด้วยอุปกรณ์ชั่งลากให้เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพานทดสอบด้วยความเร็วที่ต้องการ เมื่อรถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพานทดสอบแล้วจะถูกทำให้หยุดการเคลื่อนที่บนสะพานช่วงรับ

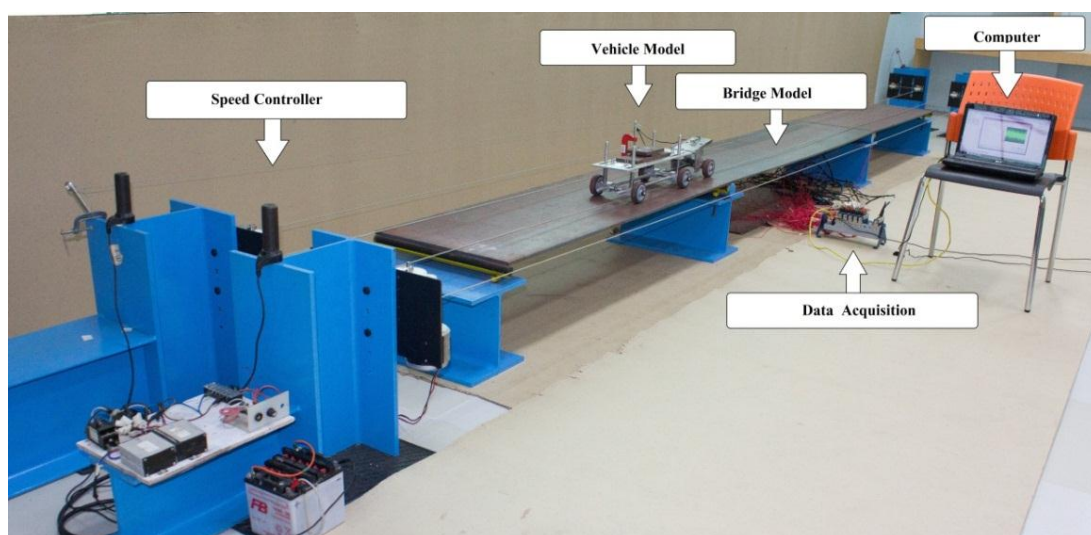
#### 2. การติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ตรวจวัด

การทดสอบจะทำการติดตั้งด้วยมาตรวัดความเครียดทั้ง 5 หน้าตัด หน้าตัดละ 8 ตัว โดยติดตั้งมาตรวัดความเครียดในหน้าตัดที่มีระยะห่างเท่า ๆ กัน ติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ระยะ  $L/4$   $L/3$   $L/2$   $2L/3$  และ  $3L/4$  ดังแสดงในภาพที่ 4-10 และติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ตำแหน่งหัว-ท้าย

สะพานทดสอบด้านละ 1 ตัว เพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสัญญาณความเครียดเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าและออกจากสะพาน จากนั้นทำการต่อรวมอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าไปยังอุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด (Strain gauge transformer module) เพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition) ที่มีหน้าที่รวมและส่งถ่ายสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป โดยตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-10 ฟังตำแหน่งมาตรวัดความเครียดของแบบจำลองย่อส่วนสะพาน



ภาพที่ 4-11 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด



## การเปรียบเทียบแบบจำลอง

การหาหน้าหนักบรรทุกสามารถคำนวณจากค่าที่วัดได้  $z$  ของสะพาน ซึ่งเป็นค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดของสะพานตามตำแหน่งที่ได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ ซึ่งค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดจะมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของสะพาน  $x$

(การเปลี่ยนตำแหน่งและความเร็วของการสั่นไหว) ดังสมการที่ 3-25 โดยค่าที่ตรวจวัดกับผลตอบสนองของสะพานจะเชื่อมโยงด้วยเมตริกซ์  $T$  เปรียบเสมือนค่าสตีเฟนสของสะพาน ประกอบด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพาน ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และความยาวของสะพาน

ดังนั้นก่อนที่จะทดสอบ จำเป็นต้องเปรียบเทียบแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองย่อส่วนสะพานที่ใช้ในการทดสอบ และสะพานที่จะทำการทดสอบในงานจริงนั้น ค่าสตีเฟนสของสะพานอาจมีค่าไม่คงที่หรือมีค่าไม่เป็นไปตามทฤษฎีเนื่องจากผลของคุณสมบัติของวัสดุ (ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก) ผลของความไม่สม่ำเสมอของหน้าตัด (ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย) และความไม่คงที่ของตำแหน่งที่ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียด จึงต้องทำการเปรียบเทียบมาตรวัดความเครียดในแต่ละหน้าตัดโดยการหาค่าพารามิเตอร์มาปรับเทียบค่าสตีเฟนส โดยนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปคูณกับเมตริกซ์ของการวัดก่อนจะนำไปคำนวณหน้าหนักดังแสดงในสมการที่ 4-10 เพื่อให้ค่าที่ตรวจวัดมีความถูกต้องก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการหาหน้าหนักต่อไป

$$Z_{input} = \alpha Z_{measured} \quad (4-10)$$

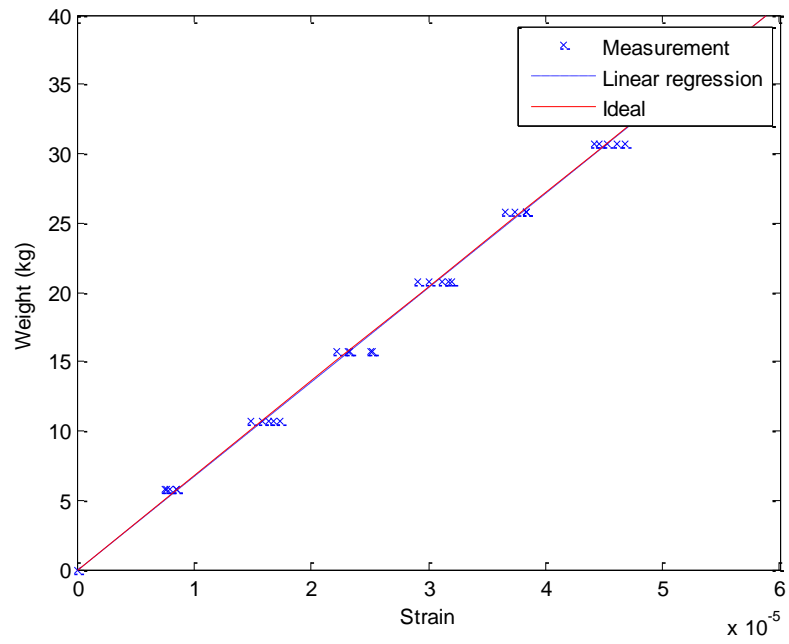
โดยที่

$Z_{measured}$  คือ เมตริกซ์ของการวัด

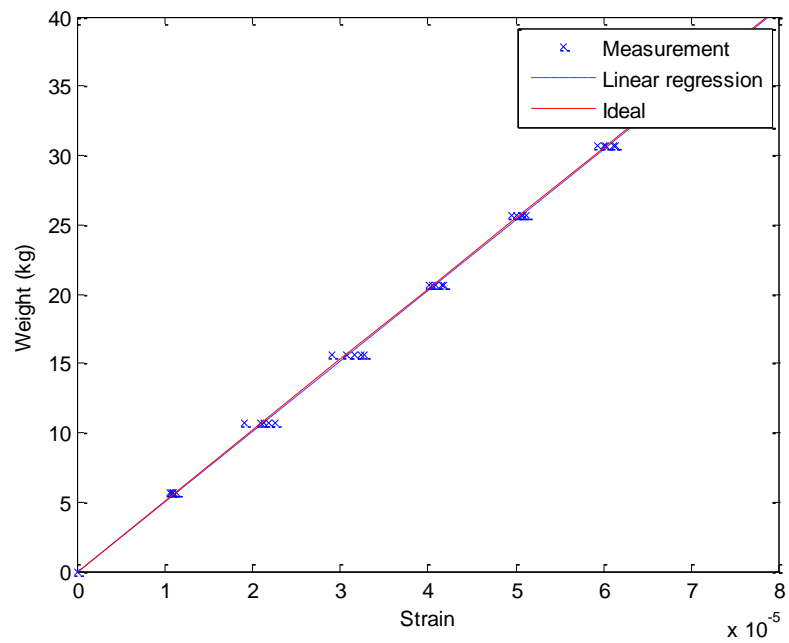
$Z_{input}$  คือ เมตริกซ์ของการวัดหลังจากผ่านการปรับเทียบแล้ว

$\alpha$  คือ พารามิเตอร์ค่าปรับเทียบ

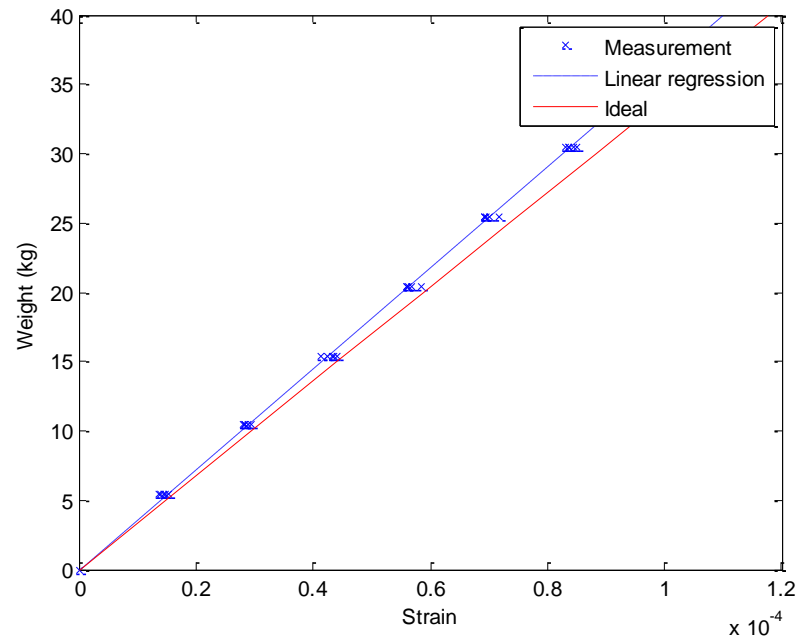
การเปรียบเทียบมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้กับสะพานเพื่อให้อ่านค่าได้อย่างถูกต้อง และสามารถนำไปอ้างอิงกับการคำนวณหาหน้าหนักเพลาทงพลศาสตร์ได้ โดยปรับเทียบด้วยการเพิ่มน้ำหนักทางสถิตย์ที่กระทำกับสะพานบริเวณกึ่งกลางสะพาน จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนักและค่าความเครียดที่ติดตั้งในทุกหน้าตัดสะพาน แล้วจึงนำค่าน้ำหนักและค่าความเครียดที่วัดได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเครียดกับน้ำหนัก และหาฟังก์ชันของเส้นกราฟตัวอย่างของสมการที่ใช้ในการปรับเทียบแสดงไว้ในภาพที่ 4-12 ถึงภาพที่ 4-16



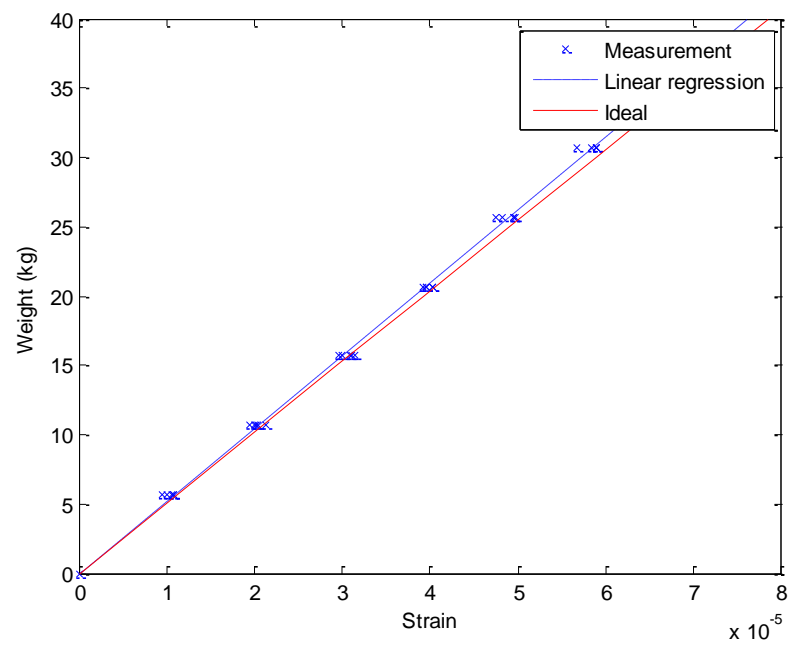
ภาพที่ 4-12 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด L/4



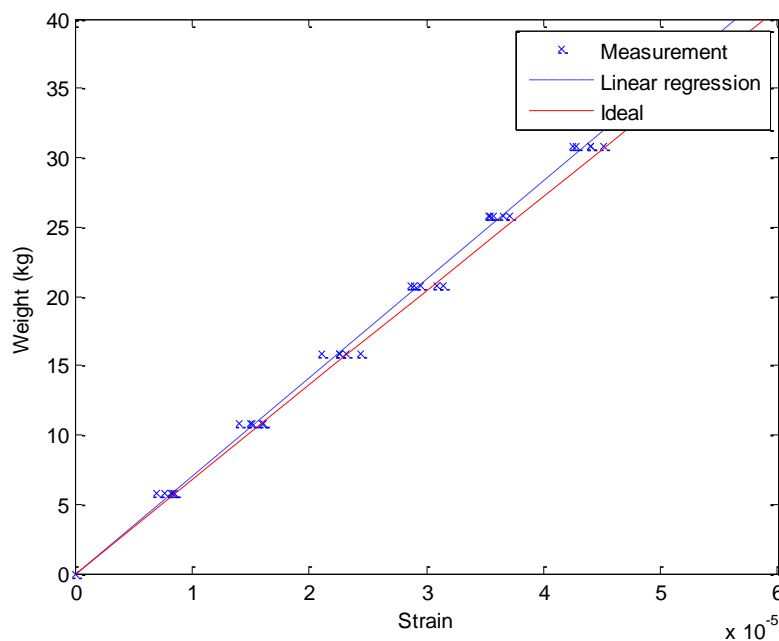
ภาพที่ 4-13 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด L/3



ภาพที่ 4-14 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด  $L/2$



ภาพที่ 4-15 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด  $2L/3$



ภาพที่ 4-16 กราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อหาแรงทางพลศาสตร์บริเวณหน้าตัด 3L/4

จากภาพที่ 4-12 ถึงภาพที่ 4-16 พบว่าฟังก์ชันระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่วัดได้จากหน้าตัด L/4 L/3 L/2 2L/3 และ 3L/4 มีความชันไม่เท่ากับฟังก์ชันที่คำนวณได้เนื่องจากค่าสตีเฟนสของสะพานมีความไม่คงที่หรือมีค่าไม่เป็นไปตามทฤษฎีจากผลของคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบ  $\alpha$  มีค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งจะต้องนำค่าพารามิเตอร์นี้ไปคูณปรับเทียบกับค่าสตีเฟนสของหน้าตัดสะพานก่อนนำไปคำนวณเพื่อให้ได้น้ำหนักที่มีความถูกต้องมากที่สุด

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบในแบบจำลอง  $\alpha$

ตำแหน่งตรวจวัด	$\alpha$
L/4	1.0007
L/3	1.0033
L/2	0.9349
2L/3	0.9683
3L/4	0.9589

## พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์และปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการหาน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลาน้ำหนักโดยใช้ผลตอบสนองของสะพานจากสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์เท่านั้น โดยพารามิเตอร์และปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ประเภทของรถบรรทุก น้ำหนักของรถบรรทุกจำลอง และความเร็วของรถบรรทุก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. ประเภทรถบรรทุก (Truck types)


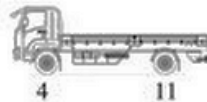
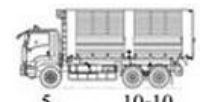
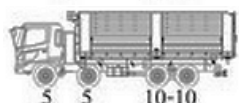

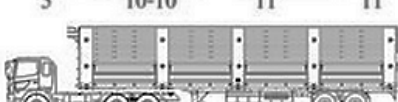
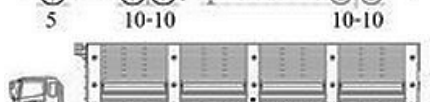

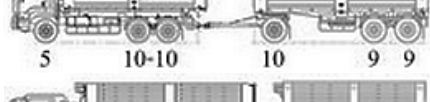
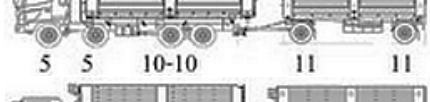
งานวิจัยนี้อ้างอิงประเภทของรถบรรทุกจากข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวงในประเทศไทย โดยมีรถบรรทุกตั้งแต่ 2 เพลา เป็นต้นไป จนถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลา ซึ่งมีรายละเอียดพิกัดน้ำหนักและลักษณะระยะห่างเพลาดังตารางที่ 4-2 สำหรับประเภทรถบรรทุกที่จะใช้ในการศึกษาจะพิจารณารถบรรทุกในสัญลักษณ์ 2B 3A 4A 5A 6C และ 7A การพิจารณาแบบรถบรรทุกที่จะใช้ในการทดสอบจะพิจารณาจากลักษณะของรถในแต่ละประเภท กรณีพิจารณาเลือกรถบรรทุกประเภท 2 เพลา สัญลักษณ์ 2B เนื่องจากเป็นรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากกว่าสัญลักษณ์ 2B ซึ่งการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการพิจารณารถบรรทุกหนักที่มีโอกาสบรรทุกน้ำหนักเกินกว่ากฎหมายกำหนด กรณีรถบรรทุกสัญลักษณ์ 3A และ 4A เป็นรถบรรทุกที่มีลักษณะเดียว ดังนั้นจึงได้เลือกพิจารณาจากรูปแบบที่กำหนดไว้ กรณีพิจารณารถบรรทุกสัญลักษณ์ 5A 6C และ 7A ได้พิจารณาจากลักษณะของเพลาน้ำหนักที่มีจำนวนเพลามากกว่ารถบรรทุกแบบอื่นเมื่อทำการจัดกลุ่มเพลาน้ำหนักแล้ว ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนรถบรรทุกในลักษณะต่าง ๆ ได้ โดยมีระยะห่างเพลาน้ำหนักเมื่อทำการย่อส่วนแล้วดังแสดงในตารางที่ 4-3

### 2. น้ำหนักรถบรรทุก (Truck weights)

น้ำหนักของรถบรรทุกมีผลโดยตรงต่อขนาดของค่าการโก่งตัว ความเครียด และโมเมนต์ดัดของโครงสร้างสะพาน และมีผลต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของน้ำหนักเพลาน้ำหนัก ส่งผลให้ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดจากรถบรรทุกที่มีมวลไม่เท่ากันนั้นมีความแตกต่างกัน การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาแบบจำลองรถบรรทุกที่มีน้ำหนักบรรทุกแตกต่างกัน 3 กรณี ได้แก่

- 2.1 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมเบาว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุก (เบาว่าพิกัดร้อยละ 30)
- 2.2 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมเท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุก
- 2.3 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุก (มากกว่าพิกัดร้อยละ 30)

ตารางที่ 4-2 ประเภทรถบรรทุกตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติทางหลวง

ลำดับที่	ลักษณะการกระจายน้ำหนัก	รายละเอียด	สัญลักษณ์
1		รถบรรทุก 2 เพลา 4 ล้อ น้ำหนักรวม 9.5 ตัน	2A
2		รถบรรทุก 2 เพลา 6 ล้อ น้ำหนักรวม 15 ตัน	2B
3		รถบรรทุก 3 เพลา 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน	3A
4		รถบรรทุก 4 เพลา 12 ล้อ น้ำหนักรวม 30 ตัน	4A
5		รถบรรทุก 5 เพลา 18 ล้อ น้ำหนักรวม 47 ตัน	5A
6		รถบรรทุก 5 เพลา 18 ล้อ น้ำหนักรวม 45 ตัน	5B
7		รถบรรทุก 6 เพลา 22 ล้อ น้ำหนักรวม 50.5 ตัน	6A
8		รถบรรทุก 6 เพลา 22 ล้อ น้ำหนักรวม 53 ตัน	6B
9		รถบรรทุก 6 เพลา 20 ล้อ น้ำหนักรวม 52 ตัน	6C
10		รถบรรทุก 7 เพลา 24 ล้อ น้ำหนักรวม 58 ตัน	7A

ตารางที่ 4-3 ระยะห่างเพลลาแบบจำลองรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

ประเภทรถบรรทุก	ระยะห่างเพลลา (เมตร)					
	ระยะ	ระยะ	ระยะ	ระยะ	ระยะ	ระยะ
	เพลลา 1	เพลลา 2	เพลลา 3	เพลลา 4	เพลลา 5	เพลลา 6
2-Axle (2B)	0.420					
3-Axle (3A)	0.415	0.130				
4-Axle (4A)	0.180	0.350	0.130			
5-Axle (5A)	0.415	0.130	0.365	0.425		
6-Axle (6C)	0.180	0.350	0.130	0.365	0.425	
7-Axle (7A)	0.180	0.350	0.130	0.307	0.315	0.150

### 3. ความเร็วของรถบรรทุก (Truck speeds)

ความเร็วของรถบรรทุกจำลองที่ใช้ในการศึกษา เป็นความเร็วที่จำลองให้เทียบเท่ากับความเร็วของรถบรรทุกจริงที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยพิจารณาจากระยะเวลาทั้งหมดที่รถบรรทุกเคลื่อนอยู่บนสะพานที่ความเร็วใด ๆ ซึ่งระยะเวลาที่ได้ก็จะเป็นตัวกำหนดจำนวนข้อมูลที่ทำการบันทึกให้เทียบเท่ากับพฤติกรรมจริง โดยการศึกษานี้ได้ศึกษาผลของความเร็ว โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ความเร็วต่ำ (Low speed) ประมาณ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วปานกลาง (Moderate speed) ประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วสูง (High speed) ประมาณ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อเทียบกับความเร็วจริงของรถบรรทุก โดยแสดงความเร็วไว้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ

ระดับความเร็ว	รถบรรทุกจริง (km/hr)	ระยะเวลาที่ อยู่บนสะพาน (s)	รถบรรทุก ทดสอบ (km/hr)	ความเร็วใน ห้องทดสอบ (m/s)
ความเร็วต่ำ	20	3.60	20	0.56
ความเร็วปานกลาง	40	1.80	40	1.11
ความเร็วสูง	60	1.20	60	1.67

## รูปแบบการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุก โดยขั้นตอนแรกจะทำการหาความเร็วของรถบรรทุกด้วยเทคนิคการปรับปรุงสัญญาณความเครียดให้มียอดของสัญญาณ ในขณะที่เพลาารถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น ก่อนนำไปคำนวณหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเครียดบริเวณสองหน้าตัดสะพาน การจำแนกประเภทประเภทรถบรรทุกด้วยวิธีการตรวจจับยอดของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าสามารถหาจำนวนเพลาและระยะห่างเพลาเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจำแนกประเภท จากนั้นจึงทำการหาน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบน้ำหนักทางสถิติ ซึ่งก่อนที่จะนำวิธีการที่นำเสนอไปทดสอบจริงจากการทดสอบในภาคสนาม จะต้องทำการทดสอบด้วยข้อมูลจากแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการก่อนเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ของวิธีการที่นำเสนอ จากนั้นจึงทดสอบด้วยข้อมูลจริงทางภาคสนามเป็นขั้นตอนในการศึกษาในลำดับต่อไป

1. การทดสอบการหาความเร็ว จำนวนเพลา ระยะห่างเพลา และน้ำหนักเพลา โดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา กรณีการทดสอบในแบบจำลองย่อส่วน

การทดสอบการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา คือ การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็ว จำนวนเพลา ระยะห่างเพลา น้ำหนักรวมและน้ำหนักเพลาจากสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัดเพียงอย่างเดียว โดยให้รถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนช่องจราจรเพียงคันเดียวและเคลื่อนที่ในช่องจราจรเพียงช่องเดียวจากช่องจราจรทั้งหมด 2 ช่องจราจร รถบรรทุกที่ใช้ทดสอบแบ่งออกเป็น 6 รูปแบบ ได้แก่ รถบรรทุกประเภท 2 เพลา 3 เพลา 4 เพลา 5 เพลา 6 เพลา และ 7 เพลา โดยกำหนดให้มีน้ำหนัก 3 ระดับ คือ ที่พิกัดน้ำหนักบรรทุกมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 เท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุก และน้อยกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 โดยเคลื่อนที่โดยใช้ความเร็ว 3 ระดับ คือ ความเร็วต่ำ ความเร็วปานกลาง และความเร็วสูง โดยมีความเร็ว 1.20 1.80 และ 3.60 เมตรต่อวินาที เทียบเท่า 20 40 และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยแสดงดังตารางที่ 4-5 ถึง ตารางที่ 4-10



ตารางที่ 4-5 การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เฟลา 6 ล้อ น้ำหนักรวม 15 ตัน

กรณี	น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (kg)	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)
1	6.50	1.20
2	6.50	1.80
3	6.50	3.60
4	9.25	1.20
5	9.25	1.80
6	9.25	3.60
7	12.00	1.20
8	12.00	1.80
9	12.00	3.60

ตารางที่ 4-6 การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 3 เฟลา 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน

กรณี	น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (kg)	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)
1	10.80	1.20
2	10.80	1.80
3	10.80	3.60
4	15.40	1.20
5	15.40	1.80
6	15.40	3.60
7	20.00	1.20
8	20.00	1.80
9	20.00	3.60

ตารางที่ 4-7 การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา 12 ล้อ น้ำหนักรวม 30 ตัน

กรณี	น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (kg)	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)
1	13.00	1.20
2	13.00	1.80
3	13.00	3.60
4	18.50	1.20
5	18.50	1.80
6	18.50	3.60
7	24.00	1.20
8	24.00	1.80
9	24.00	3.60

ตารางที่ 4-8 การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา 18 ล้อ น้ำหนักรวม 47 ตัน

กรณี	น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (kg)	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)
1	20.30	1.20
2	20.30	1.80
3	20.30	3.60
4	29.00	1.20
5	29.00	1.80
6	29.00	3.60
7	37.70	1.20
8	37.70	1.80
9	37.70	3.60

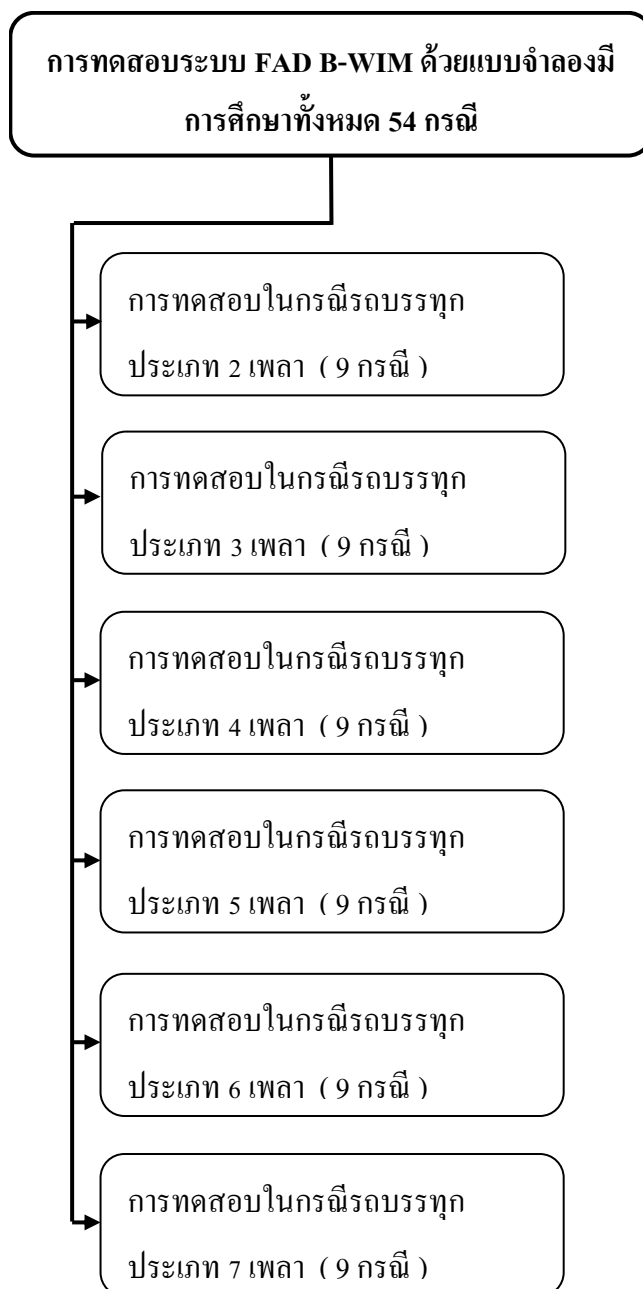
ตารางที่ 4-9 การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา 20 ล้อ น้ำหนักรวม 52 ตัน

กรณีที่	น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (kg)	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)
1	22.50	1.20
2	22.50	1.80
3	22.50	3.60
4	32.00	1.20
5	32.00	1.80
6	32.00	3.60
7	41.70	1.20
8	41.70	1.80
9	41.70	3.60

ตารางที่ 4-10 การทดสอบในกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา 24 ล้อ น้ำหนักรวม 58 ตัน

กรณีที่	น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (kg)	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)
1	25.00	1.20
2	25.00	1.80
3	25.00	3.60
4	35.80	1.20
5	35.80	1.80
6	35.80	3.60
7	46.50	1.20
8	46.50	1.80
9	46.50	3.60

2. สรุปการทดสอบการหาความเร็ว จำนวนเพลลา ระยะห่างเพลลา น้ำหนักเพลลา และ น้ำหนักรวมของรถบรรทุกหนักขณะเคลื่อนที่บนสะพาน



ภาพที่ 4-17 กรณีการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อยส่วน

## การดำเนินการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน จากสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดด้วยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดในการดำเนินการทดสอบดังต่อไปนี้

### 1. การเตรียมการทดสอบ (Experimental setup)

ก่อนที่จะเริ่มต้นทำการทดสอบ จำเป็นต้องเตรียมความพร้อมแบบจำลองและอุปกรณ์ตรวจวัดให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทดสอบ โดยนำรถบรรทุกทดสอบที่มีการเพิ่มน้ำหนักตามที่ได้ออกแบบไว้ไปติดตั้งที่สะพานช่วงส่งในช่องจราจรที่ทำการทดสอบ และจึงตรวจสอบอุปกรณ์ตรวจวัดให้อยู่ในสถานะพร้อมเก็บข้อมูล ซึ่งก่อนที่จะทำการทดสอบจริงทุกครั้งจะมีการทำการทดสอบเบื้องต้นก่อนเพื่อยืนยันความพร้อมของอุปกรณ์ทั้งระบบแล้วจึงทำการทดสอบ

### 2. การทดสอบ (Testing)

ในการทดสอบจริงได้เริ่มต้นการปรับชุดควบคุมความเร็วให้มีความเร็วตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วจึงทำการเปิดให้อุปกรณ์ตรวจวัดให้เริ่มต้นการบันทึกข้อมูล หลังจากที่เริ่มบันทึกข้อมูลแล้วจึงทำการเปิดอุปกรณ์ชั่งกลากเพื่อให้รถบรรทุกทดสอบที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านสะพานทดสอบ ซึ่งเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพานทดสอบแล้วจึงทำการปิดชุดอุปกรณ์ชั่งกลากและหยุดการบันทึกข้อมูล

### 3. ผลการทดสอบ (Experimental result)

ผลการทดสอบที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบของสัญญาณความเครียด ซึ่งสัญญาณความเครียดนี้จะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการตัดสัญญาณ เพื่อต้องการเก็บเฉพาะสัญญาณความเครียดขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานเท่านั้น ซึ่งการตัดสัญญาณนั้นได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผล โดยตัดสัญญาณจากการดูช่วงเวลาที่รถบรรทุกเข้าและออกสะพาน จากสัญญาณความเครียดที่ติดตั้งไว้บริเวณขาเข้าและขาออกของสะพาน ซึ่งสัญญาณที่ผ่านกระบวนการตัดสัญญาณเรียบร้อยแล้วจะถูกบันทึกเป็นสัญญาณตัวใหม่เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนต่อไป

### 4. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ (Analysis result)

เมื่อทำการบันทึกสัญญาณความเครียดที่ทำการทดสอบแล้วจึงทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การจำแนกประเภทของรถบรรทุก และ 2) การหาน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

##### 5. การหาความคลาดเคลื่อนของการตรวจวัด

หลังจากผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบแล้ว จะทำให้ทราบความเร็ว จำนวนเพลต ระยะห่างเพลต น้ำหนักเพลต และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ดังนั้นเพื่อที่จะตรวจสอบ ประสิทธิภาพของการทดสอบ จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ กับข้อมูลจริง โดยแสดงผลการเปรียบเทียบเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (% Error)

## บทที่ 5

### ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับวิธีการหาความเร็วของรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (Free of axle detector, FAD) การหาจำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลา (Axle spacing) ของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้เพียงผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสัญญาณความเครียดที่ติดตั้งได้สะพาน ด้วยแบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุก และสะพาน ซึ่งรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วผ่านแบบจำลองสะพานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (Simple support) และมีพื้นผิวที่เรียบ (Smooth pavement) โดยสมมุติให้เป็นไปตามทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli และได้ทำการศึกษาค้นหาความเร็ว ระยะช่วงเพลลา และน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การหาความเร็วของการสัญจร โดยใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 2) การจำแนกประเภทรถบรรทุก และ 3) การหาน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

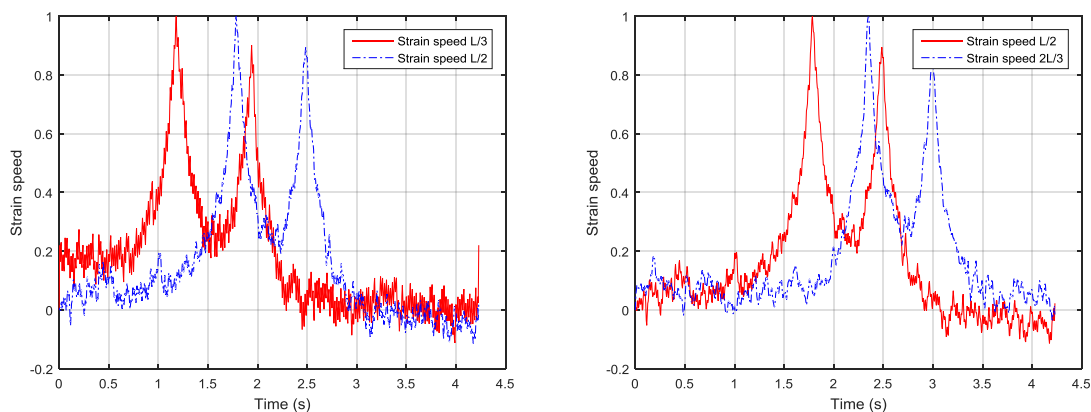
#### ผลการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การคำนวณความเร็วรถบรรทุกโดยการใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีศึกษารถบรรทุกประเภท 2 เพลลา ถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา โดยเริ่มจากการวัดสัญญาณความเครียดบริเวณหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดแล้วทำการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณความเครียด จากการตรวจวัดพบว่าสัญญาณความเครียดตรวจวัดยังไม่มี ความชัดเจนเพียงพอที่จะบ่งบอกถึงจำนวนเพลลาและตำแหน่งเพลลาที่เพลลาของรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัด ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้สัญญาณความเครียดมีความชัดเจนมากขึ้นจะต้องทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดด้วยวิธีการหาผลต่างของผลรวมความเครียดในแต่ละช่องจราจรแล้วจึงทำการหาความเร็วในการสัญจรด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยรายละเอียดการคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

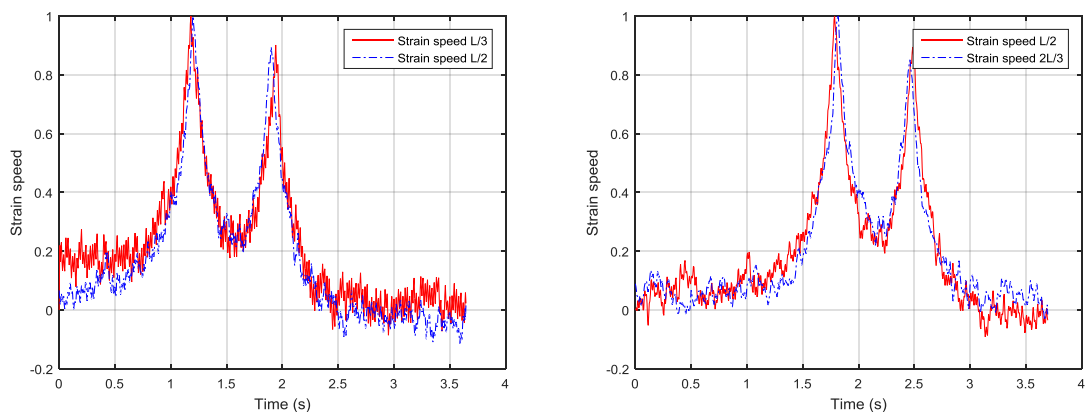
##### 1. การหาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลลา

การหาความเร็วรถบรรทุกเริ่มจากการหาผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงสัญญาณความเครียดจากการหาผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร เมื่อทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดแล้วจะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้น สามารถระบุตำแหน่งเพลลาและระยะห่างเพลลาของ

รถบรรทุกได้ดังแสดงในภาพที่ 5-1 จากนั้นนำสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วมาทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษาพบว่าสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดซ้อนทับกันได้ดี สามารถหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดได้ ตัวอย่างของสัญญาณที่ซ้อนทับกันดังแสดงในภาพที่ 5-2



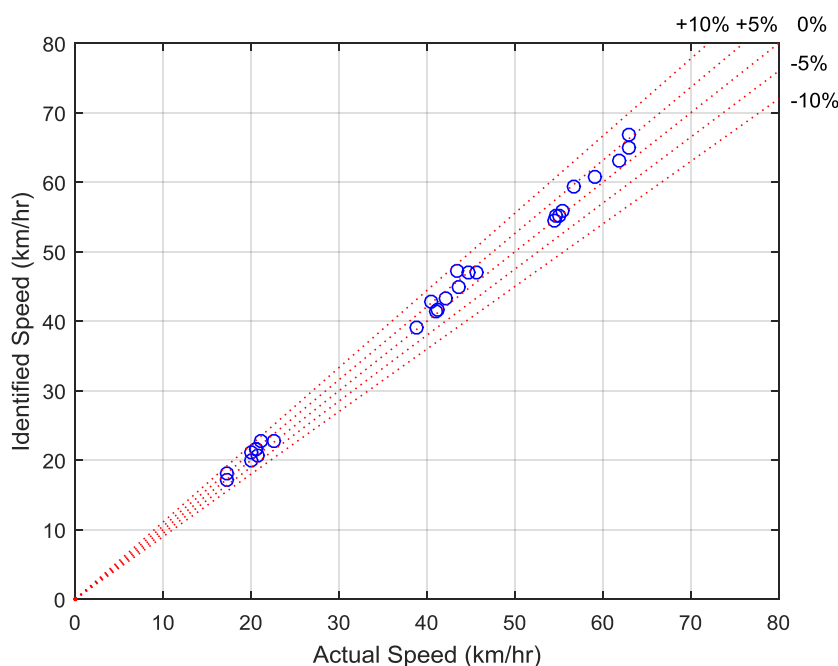
ภาพที่ 5-1 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจราจรสำหรับใช้หาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา



ภาพที่ 5-2 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา



จากการศึกษาการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  
กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ  
91.26 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.17 และที่ระดับความเชื่อมั่น  
ร้อยละ 90 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 94.20 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง  
ความเร็วจริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-3

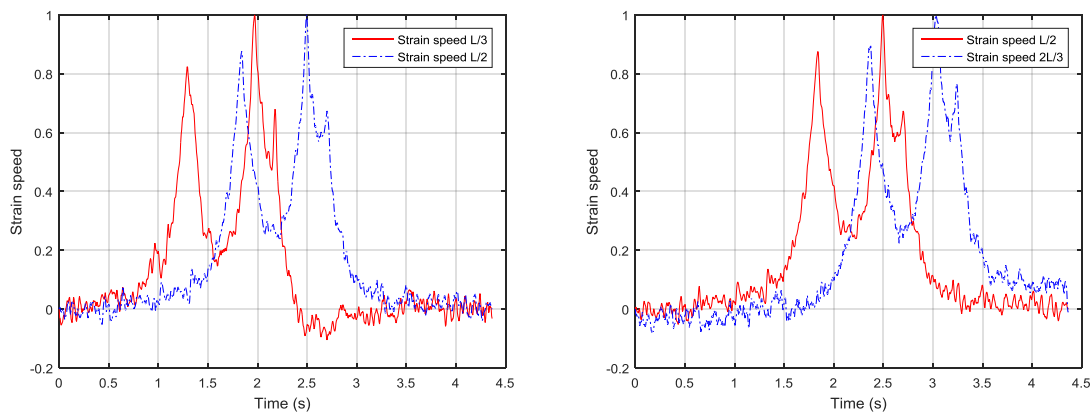


ภาพที่ 5-3 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุก  
ประเภท 2 เพลา

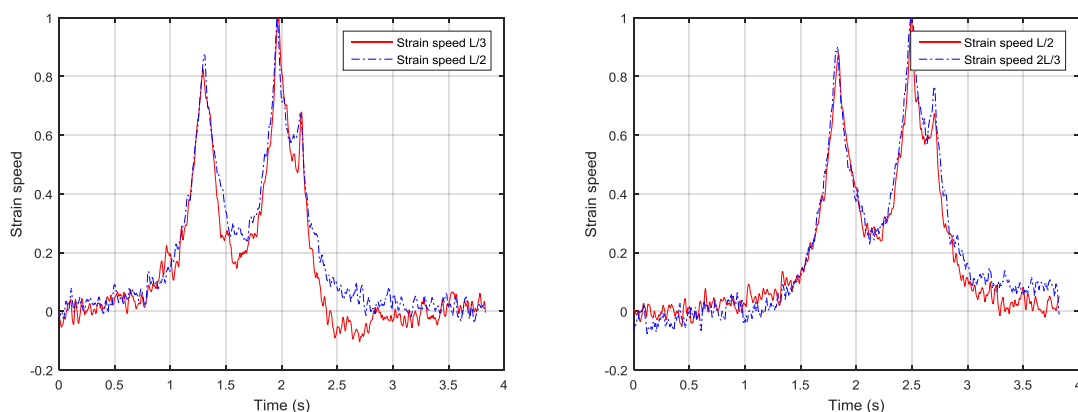
## 2. การหาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา

การหาความเร็วรถบรรทุกเริ่มจากการหาผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่อง  
จราจรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงสัญญาณความเครียดจากการหาผลต่างของผลรวม  
สัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร เมื่อทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดแล้วจะได้  
สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้น สามารถระบุตำแหน่งเพลาและระยะห่างเพลาของ  
รถบรรทุกได้ดังแสดงในภาพที่ 5-4 จากนั้นนำสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วมาทำการหา  
ความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษาพบว่าสัญญาณความเครียดทั้ง 2

หน้าตัดซ้อนทับกันได้ดี สามารถหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้ง  
มาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัด ได้ตัวอย่างของสัญญาณที่ซ้อนทับกันดังแสดงในภาพที่ 5-5



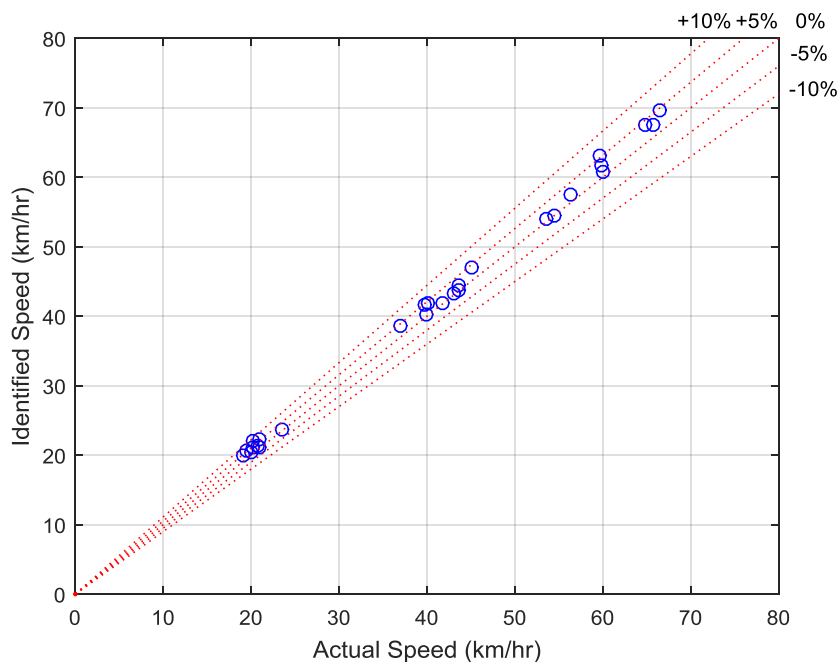
ภาพที่ 5-4 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจราจรสำหรับใช้หาความเร็ว  
กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา



ภาพที่ 5-5 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่า  
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา

จากการศึกษาการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  
กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลาพบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ  
91.04 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 93.64 และที่ระดับความเชื่อมั่น

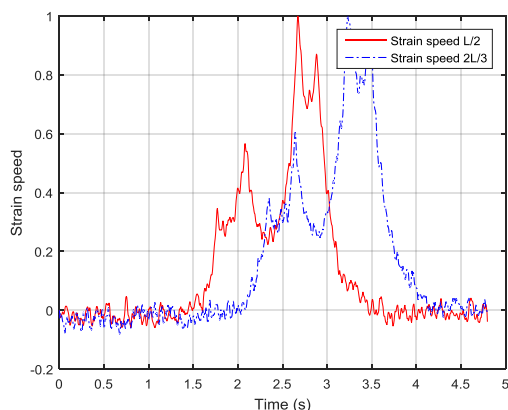
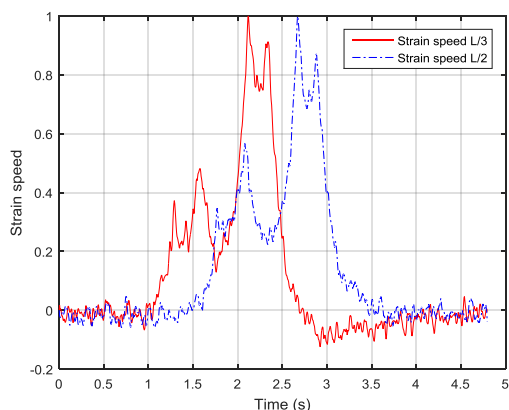
ร้อยละ 90 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.61 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-6



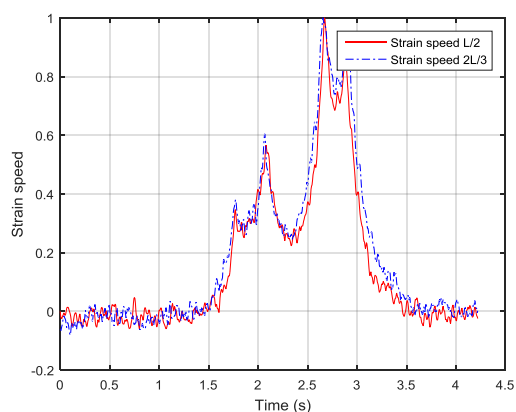
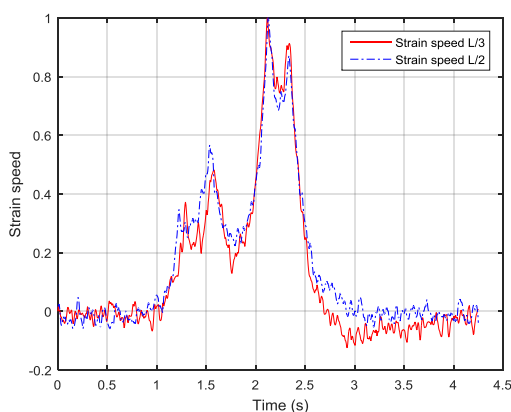
ภาพที่ 5-6 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา

### 3. การหาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา

การหาความเร็วรถบรรทุกเริ่มจากการหาผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงสัญญาณความเครียดจากการหาผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร เมื่อทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดแล้วจะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้น สามารถระบุตำแหน่งเพลาและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกได้ดังแสดงในภาพที่ 5-7 จากนั้นนำสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วมาทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษาพบว่าสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดซ้อนทับกันได้ดี สามารถหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดได้ ตัวอย่างของสัญญาณที่ซ้อนทับกันดังแสดงในภาพที่ 5-8

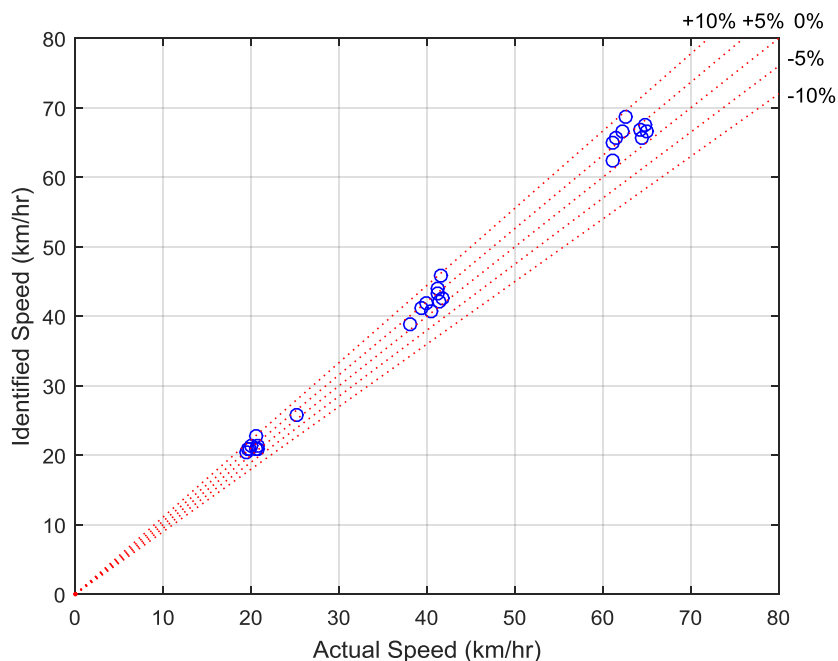


ภาพที่ 5-7 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็ว  
กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



ภาพที่ 5-8 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่า  
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา

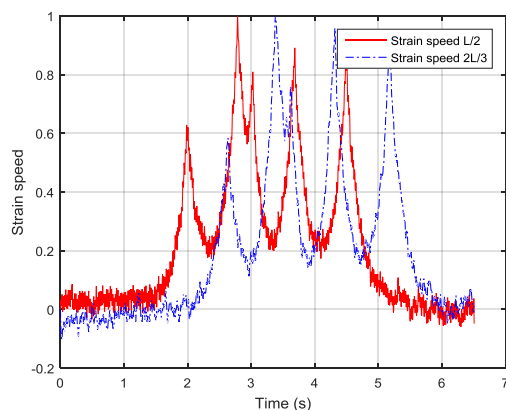
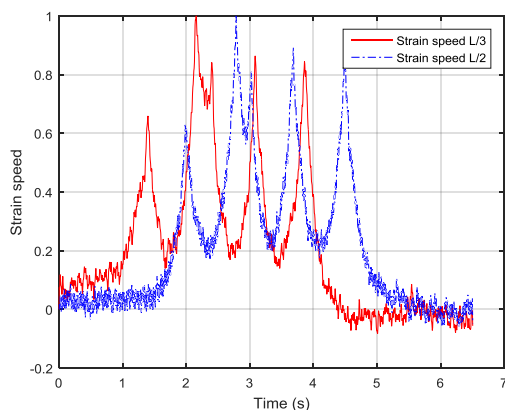
จากการศึกษาการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  
กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ  
89.38 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 90.19 และที่ระดับความเชื่อมั่น  
ร้อยละ 90 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.61 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็ว  
จริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-9



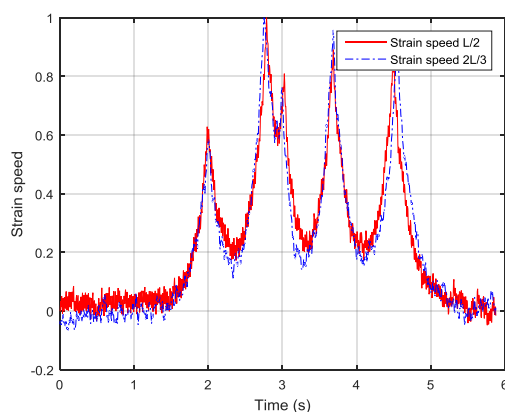
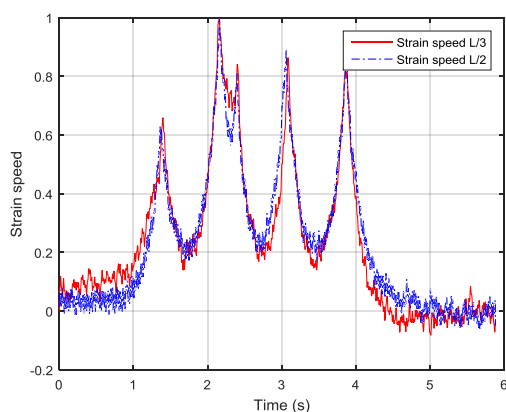
ภาพที่ 5-9 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา

#### 4. การหาความเร็วรถบรรทุกประเภท 5 เพลา

การหาความเร็วรถบรรทุกเริ่มจากการหาผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงสัญญาณความเครียดจากการหาผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร เมื่อทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดแล้วจะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้น สามารถระบุตำแหน่งเพลาและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกได้ดังแสดงในภาพที่ 5-10 จากนั้นนำสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วมาทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษพบว่าสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดซ้อนทับกันได้ดี สามารถหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดได้ ตัวอย่างของสัญญาณที่ซ้อนทับกันดังแสดงในภาพที่ 5-11

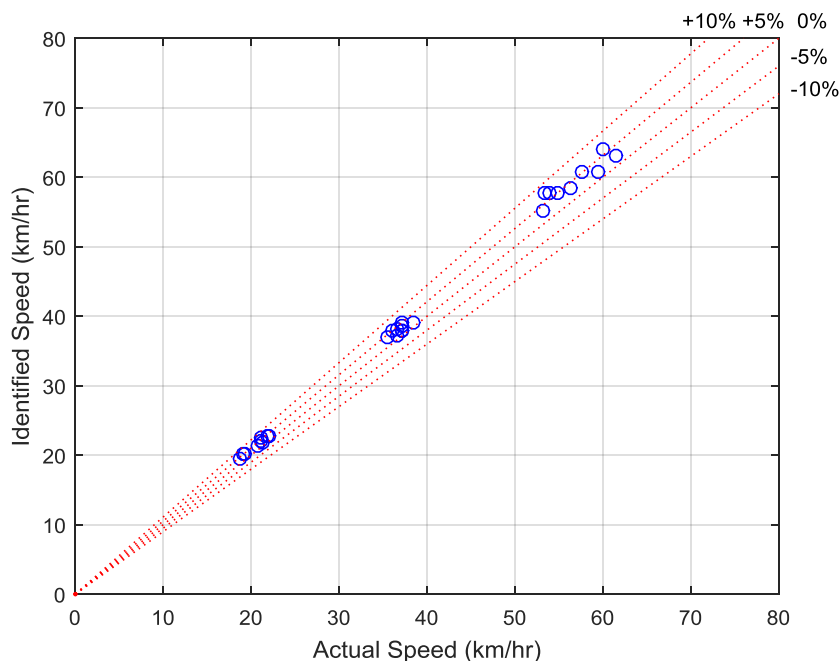


ภาพที่ 5-10 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



ภาพที่ 5-11 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา

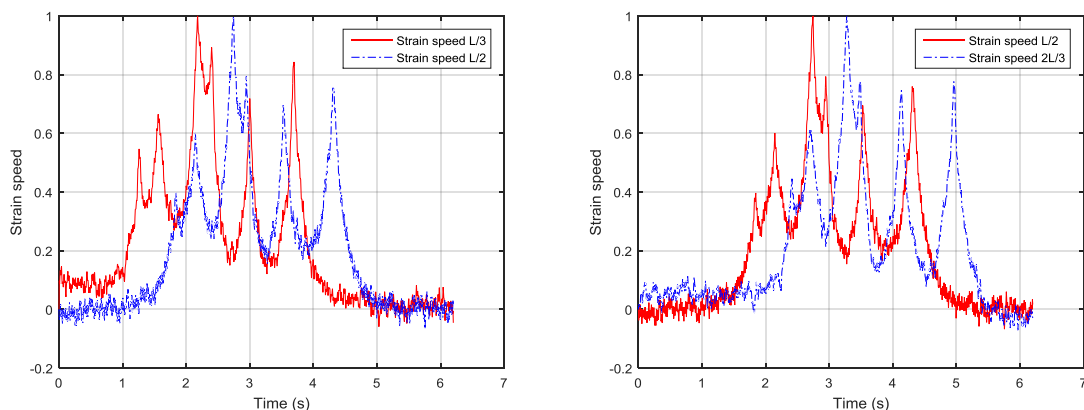
จากการศึกษาการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.60 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.81 และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 93.57 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-12



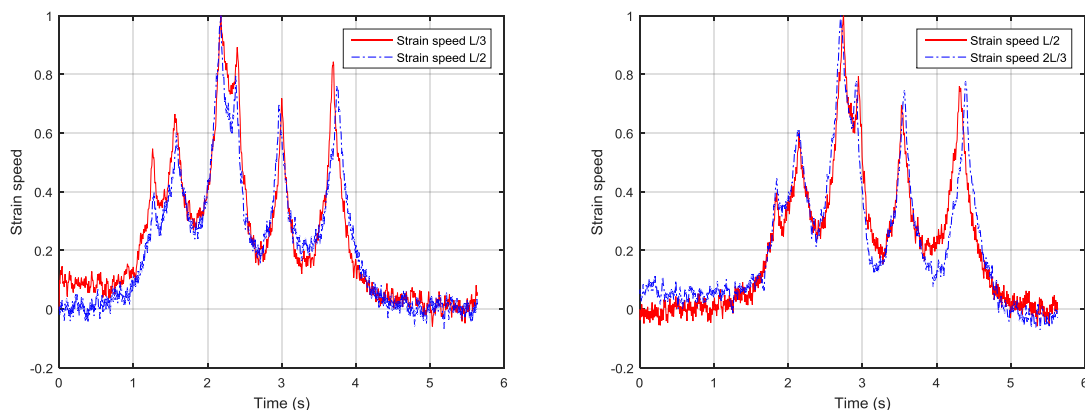
ภาพที่ 5-12 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา

#### 5. การหาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

การหาความเร็วรถบรรทุกเริ่มจากการหาผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงสัญญาณความเครียดจากการหาผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร เมื่อทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดแล้วจะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้น สามารถระบุตำแหน่งเพลาและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกได้ดังแสดงในภาพที่ 5-13 จากนั้นนำสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วมาทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษพบว่าสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดซ้อนทับกันได้ดี สามารถหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดได้ ตัวอย่างของสัญญาณที่ซ้อนทับกันดังแสดงในภาพที่ 5-14



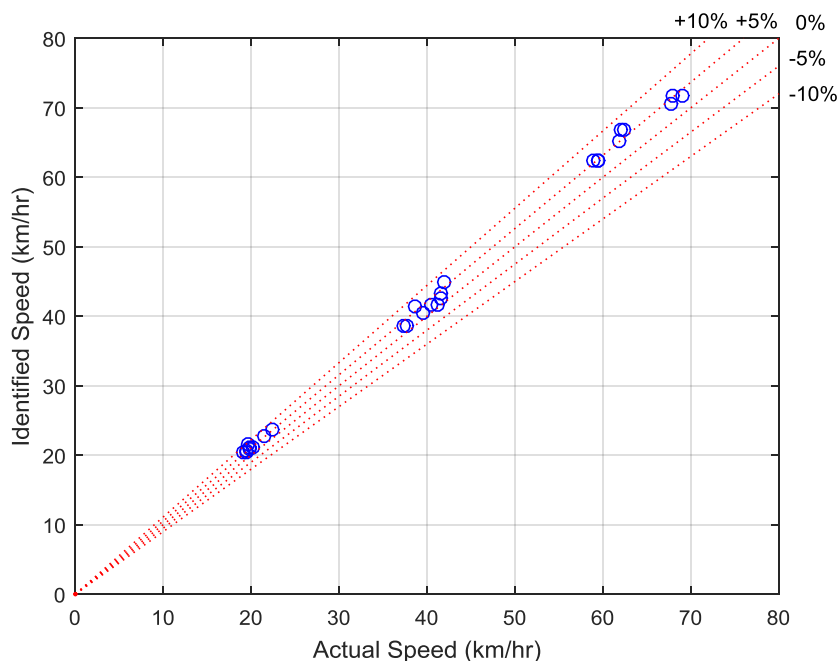
ภาพที่ 5-13 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา



ภาพที่ 5-14 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

จากการศึกษาการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 90.19 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.50 และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 89.37 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-15

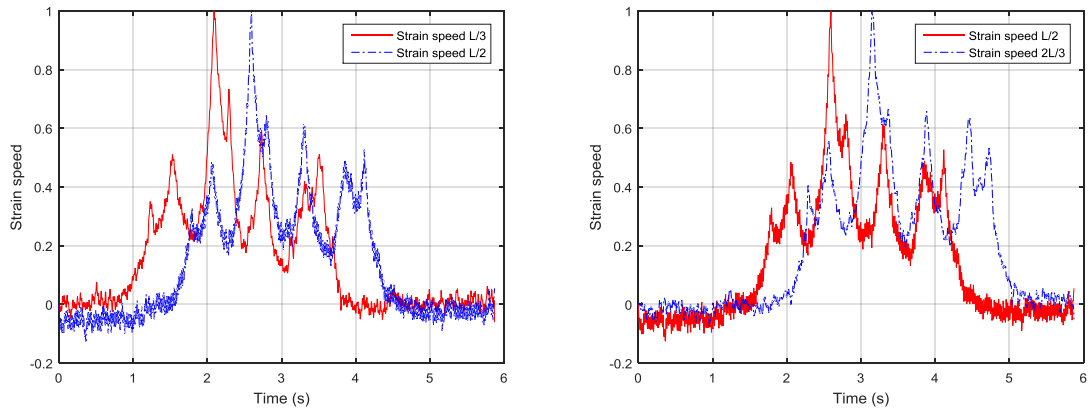




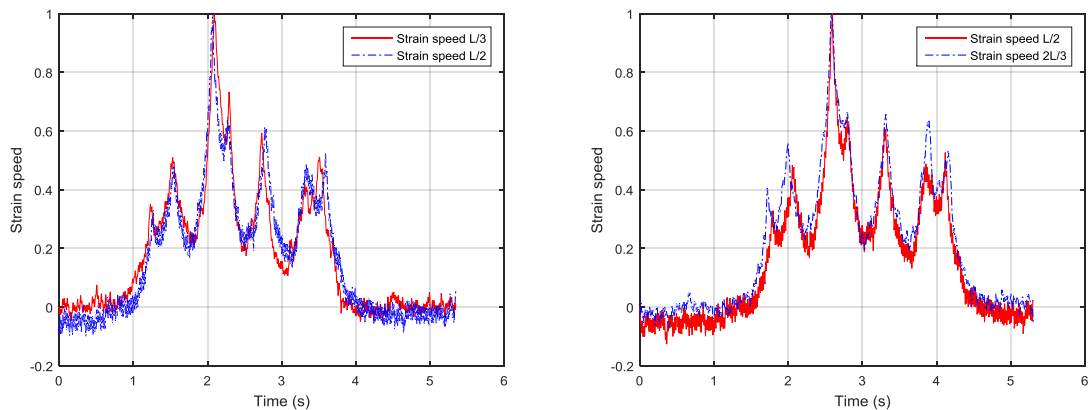
ภาพที่ 5-15 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

#### 6. การหาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา

การหาความเร็วรถบรรทุกเริ่มจากการหาผลรวมของสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงสัญญาณความเครียดจากการหาผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร เมื่อทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดแล้วจะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้น สามารถระบุตำแหน่งเพลาและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกได้ดังแสดงในภาพที่ 5-16 จากนั้นนำสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงค่าแล้วมาทำการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษพบว่าสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดซ้อนทับกันได้ดี สามารถหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดได้ ตัวอย่างของสัญญาณที่ซ้อนทับกันดังแสดงในภาพที่ 5-17

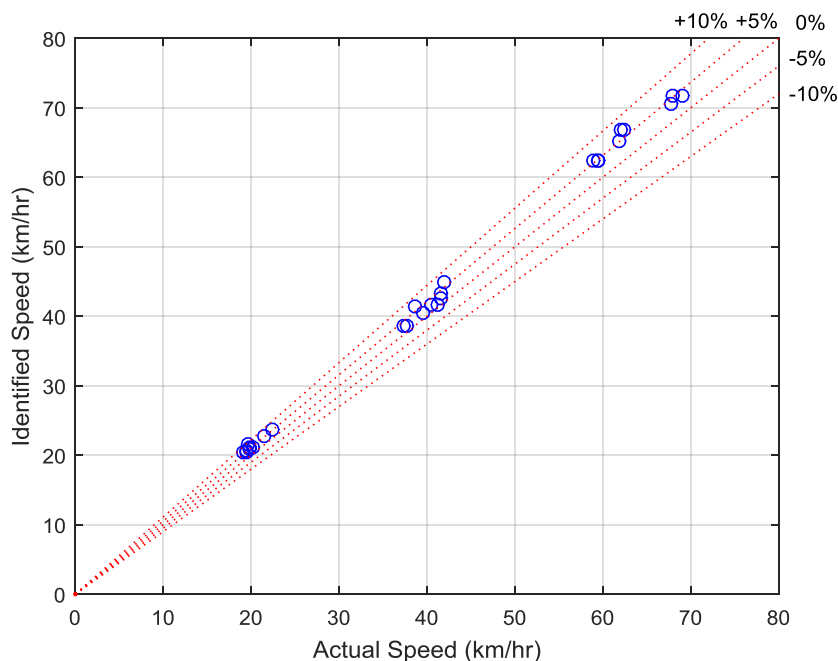


ภาพที่ 5-16 ผลต่างของสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ระหว่างช่องจรรยาสำหรับใช้หาความเร็วกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา



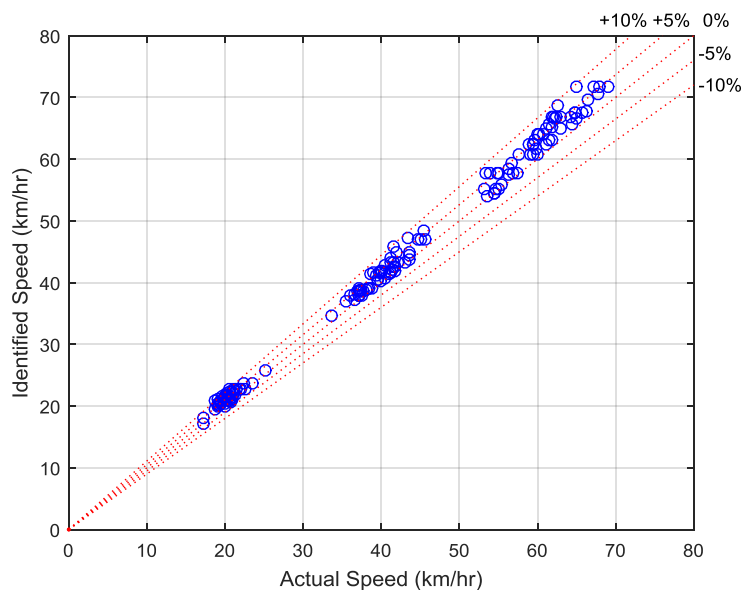
ภาพที่ 5-17 สัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดได้ของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา

จากการศึกษาการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 89.37 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 89.69 และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.62 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-18



ภาพที่ 5-18 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา

จากการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารถบรรทุกประเภท 2 เพลา ถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลา รวมทั้งหมด 6 ประเภท โดยการแบ่งระดับความเร็วออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับความเร็วต่ำ ระดับความเร็วปานกลาง และระดับความเร็วสูง มีค่าความเร็วเทียบเท่าความเร็วจริงที่ประมาณ 20 40 และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและมีพิกัดน้ำหนัก 3 ระดับ ได้แก่ น้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมาย เท่ากับน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมาย และมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมายซึ่งมีกรณีศึกษาทั้งหมด 162 กรณีศึกษาพบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 89.37 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.26 และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.50 โดยความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงตรวจวัดกับความเร็วจากการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-19



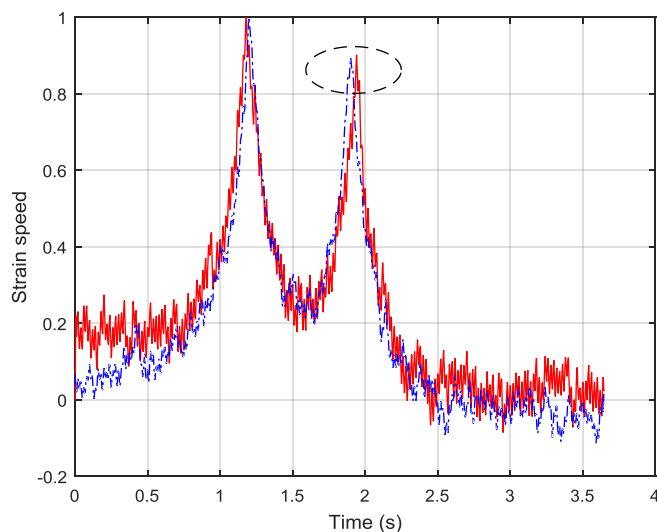
ภาพที่ 5-19 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริงกับความเร็วจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2 ถึงประเภท 7 เพลา

ตารางที่ 5-1 ค่าระดับความเชื่อมั่นและระดับความถูกต้องในการคำนวณความเร็วรถบรรทุก

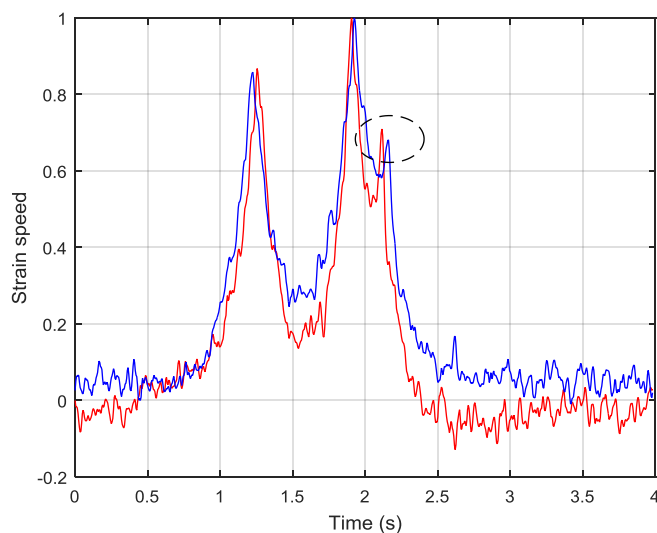
ประเภทรถบรรทุก		ความถูกต้อง (%)						ทุกกรณี
		2 เพลา	3 เพลา	4 เพลา	5 เพลา	6 เพลา	7 เพลา	
ความเชื่อมั่น	100 (%)	91.26	91.04	89.38	91.60	90.19	89.37	89.37
	95 (%)	92.17	93.64	90.19	92.81	92.50	89.69	91.26
	90 (%)	94.20	94.19	92.61	93.57	92.72	91.62	92.50

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบการเพิ่มน้ำหนักให้กับรถบรรทุกทดสอบส่งผลโดยตรงต่ออุปกรณ์ชั่งลาก ทำให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ เมื่อเริ่มทดสอบจะทำการเปิดเครื่องลากรถบรรทุกจากหยุดนิ่งโดยมีช่วงส่งให้รถบรรทุกทำความเร็วประมาณ 1.5 เมตร เพื่อให้รถบรรทุกทำความเร็วตามที่ได้ออกแบบไว้ก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสะพานทดสอบแล้วบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำหนักรถบรรทุกเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มน้ำหนักให้กับรถบรรทุกทดสอบในแต่ละประเภท การลากรถบรรทุกให้ทำความเร็วตามการออกแบบ

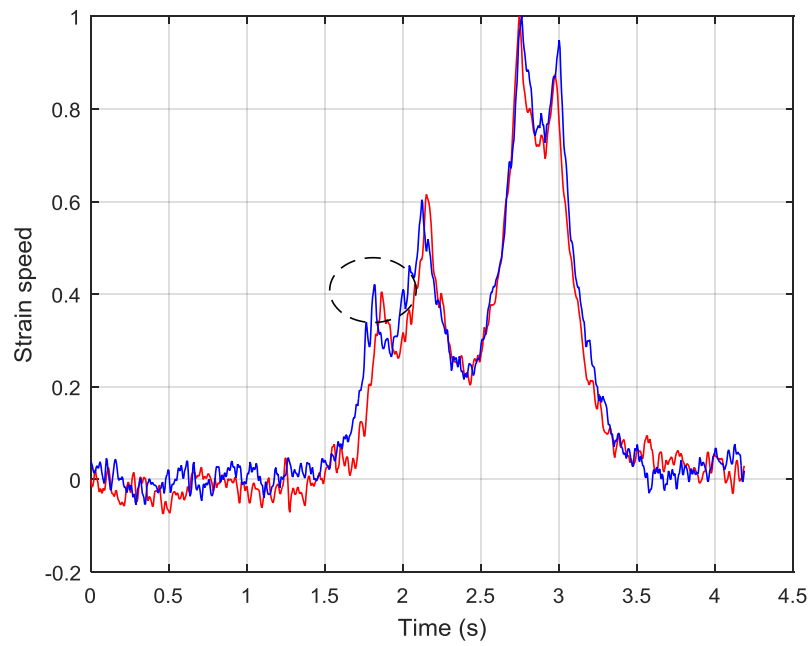
โดยต้องเป็นความเร็วคงที่ตามสมมติฐานจึงเป็นไปได้ยาก โดยที่การเคลื่อนที่ของรถบรรทุก จะเข้าใกล้สมมติฐานการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ก็ต่อเมื่อรถบรรทุกมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ชั่งลากที่ใช้ในการทดสอบ



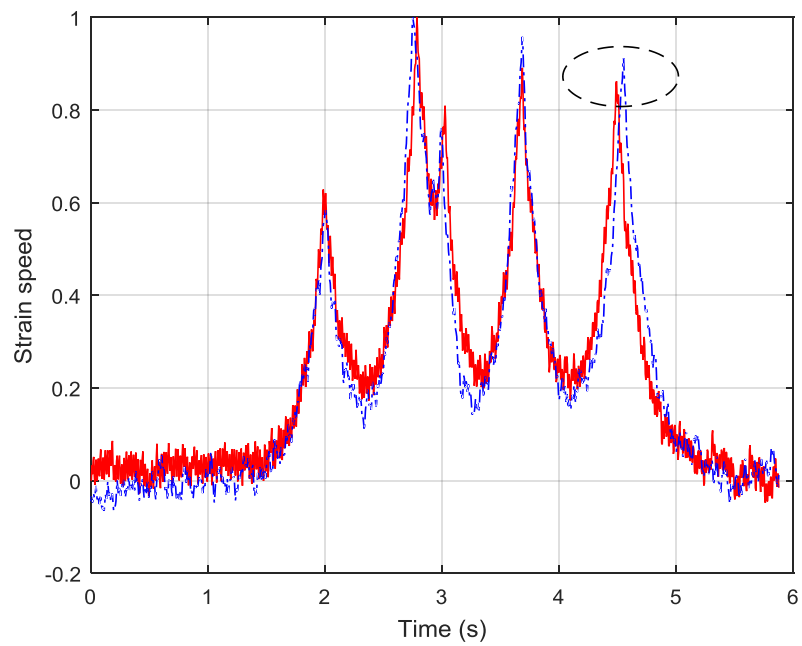
ภาพที่ 5-20 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพล



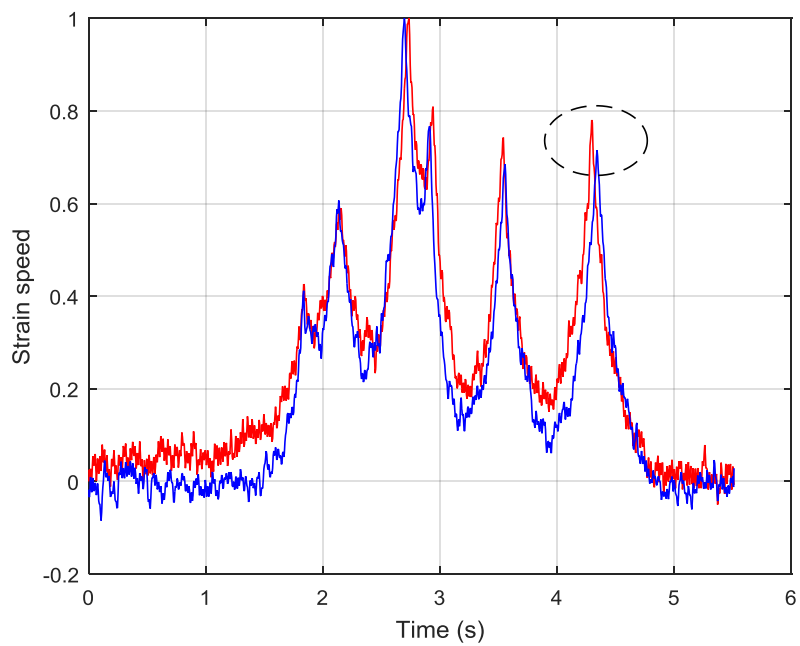
ภาพที่ 5-21 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพล



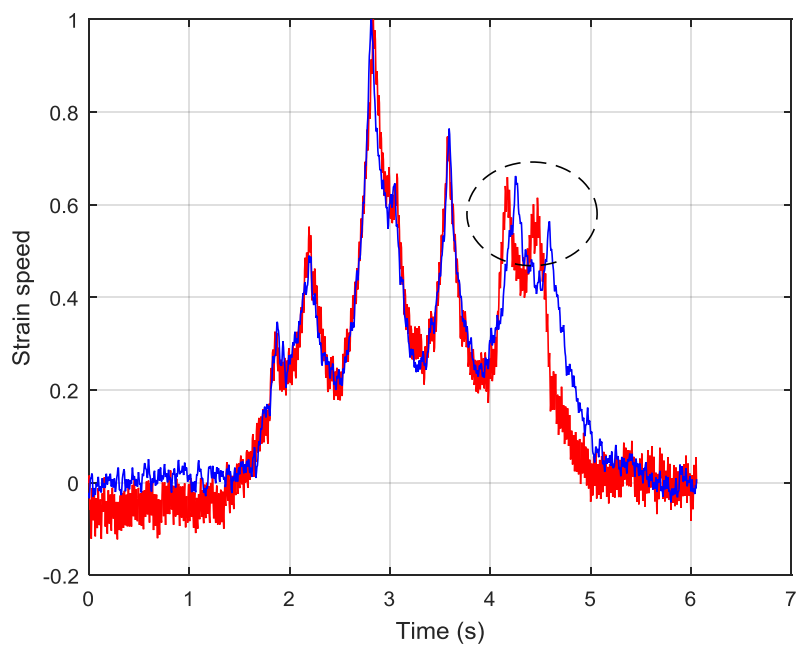
ภาพที่ 5-22 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว  
กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



ภาพที่ 5-23 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว  
กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



ภาพที่ 5-24 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว  
กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

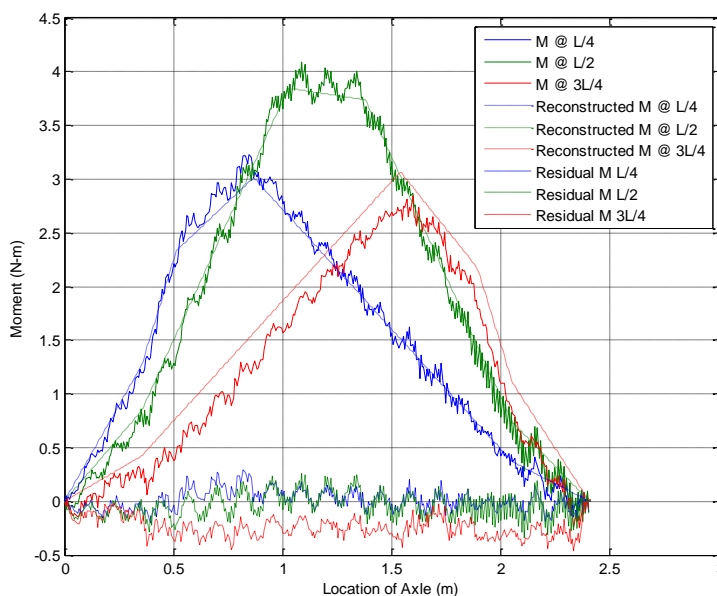


ภาพที่ 5-25 ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณความเครียดสำหรับใช้หาความเร็ว  
กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา

อย่างไรก็ตามจากการทดสอบการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการทดสอบทั้งหมด 162 กรณี พบว่ามีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดร้อยละ 10.63 สำหรับระดับความเชื่อมั่นในการหาความเร็วที่ร้อยละ 95 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภทมีค่าความถูกต้องในการหาความเร็วร้อยละ 92.17 93.64 90.19 92.81 92.50 89.69 และ 91.26 ตามลำดับ

### ผลการจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด

วิธีการหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาเพื่อจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด พบว่าการหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาสามารถทำไปพร้อม ๆ กัน โดยที่จำนวนเพลลาจะแปรผันตามระยะห่างเพลลา หากมีระยะห่างเพลลาเพิ่มขึ้นจำนวนเพลลาจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หลังจากทดสอบและเก็บข้อมูลสัญญาณความเครียดทั้ง 3 หน้าตัด ได้แก่ ระยะ  $L/4$ ,  $L/2$  และ  $3L/4$  จึงตัดสัญญาณบริเวณที่รถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าจนกระทั่งรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพานทดสอบเพื่อนำสัญญาณความเครียดขณะรถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนสะพานมาใช้หาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาเป็นลำดับต่อไป เมื่อได้สัญญาณความเครียดจากนั้นจะกรองสัญญาณรบกวนของระบบออก และเข้าสู่หลักการหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลา



ภาพที่ 5-26 สัญญาณ โมเมนต์ที่ได้จากการวัด สัญญาณ โมเมนต์ที่สร้างขึ้น และสัญญาณ โมเมนต์คงค้าง



จากการประยุกต์หลักการหาจำนวนเพลลาและการคำนวณหาระยะห่างเพลลา โดยเริ่มจากการสมมติรถบรรทุก 2 เพลลาขึ้นมาก่อน จากนั้นใช้หลักการยกกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาค่าระยะห่างเพลลาและน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกที่สมมติขึ้น แล้วจึงนำน้ำหนักเพลลาและระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้ไปสร้างสัญญาณ โมเมนต์คัตของหน้าตัดสะพาน สัญญาณที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปหักลบออกจากสัญญาณ โมเมนต์คัตที่ได้จากสัญญาณความเร็วที่ตรวจวัด และได้โมเมนต์คัตคงค้าง ซึ่งได้แสดงตัวอย่างสัญญาณไว้ในภาพที่ 5-26 กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลลา จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ โมเมนต์คัตคงค้างมีค่าเข้าใกล้ 0 และไม่มีสัญญาณ โมเมนต์คัตที่มีนัยสำคัญแสดงถึงจำนวนเพลลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาจะหยุดลง และส่งคำตอบทางด้าน จำนวนเพลลา ระยะห่างเพลลา น้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวม โดยผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นรูปในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนแสดงไว้ในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 ค่าความคลาดเคลื่อนการคำนวณหาระยะห่างเพลลาและน้ำหนัก

ประเภท รถบรรทุก	ค่าความคลาดเคลื่อนระยะห่าง เพลลา (%)			ค่าความคลาดเคลื่อนน้ำหนักเพลลาและ น้ำหนักรวม (%)				
	S1	S2	S3	P1	P2	P3	P4	GW*
2-Axle	10.58			20.42	7.13			6.64
3-Axle	0.81	12.34		10.57	24.78	19.72		4.81
3-Axle	3.29	14.82		10.30	2.22	44.70		4.84
4-Axle	0.94	0.87	0.00	1.90	8.10	19.80	16.40	3.34
4-Axle	3.24	8.34	11.50	1.90	21.0	2.80	13.60	2.90

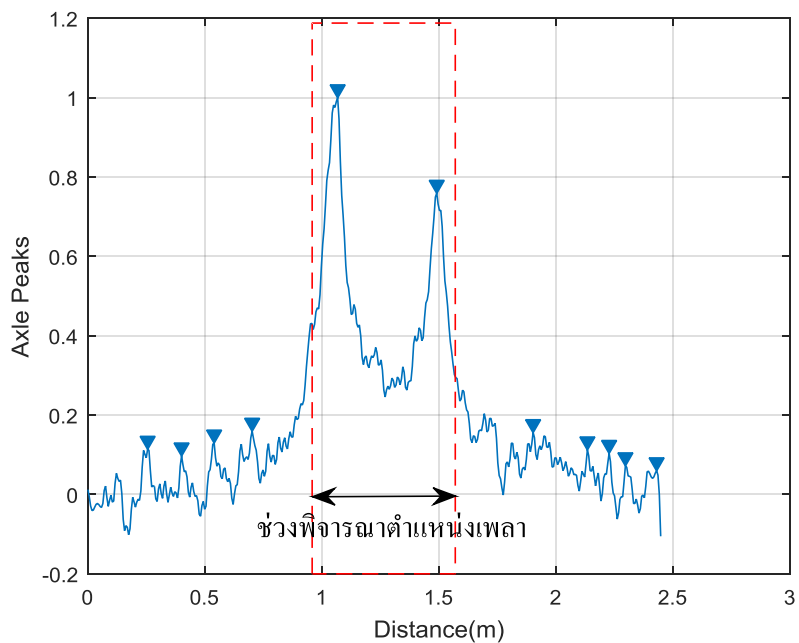
หมายเหตุ: \* GW = Gross vehicle weight

จากการศึกษาพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถคำนวณจำนวนเพลลาได้ถูกต้องในทุกกรณี อย่างไรก็ตามพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาอยู่บ้างซึ่งเป็นผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ การใช้ความเร็วที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณหาระยะห่างเพลลาส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน สำหรับระยะห่างเพลลาที่เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างเพลลาที่มีลักษณะแคบก็จะพบว่าระยะห่างเพลลานั้นจะเกิดความคลาดเคลื่อนสูง ผลจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์และระดับสัญญาณรบกวน

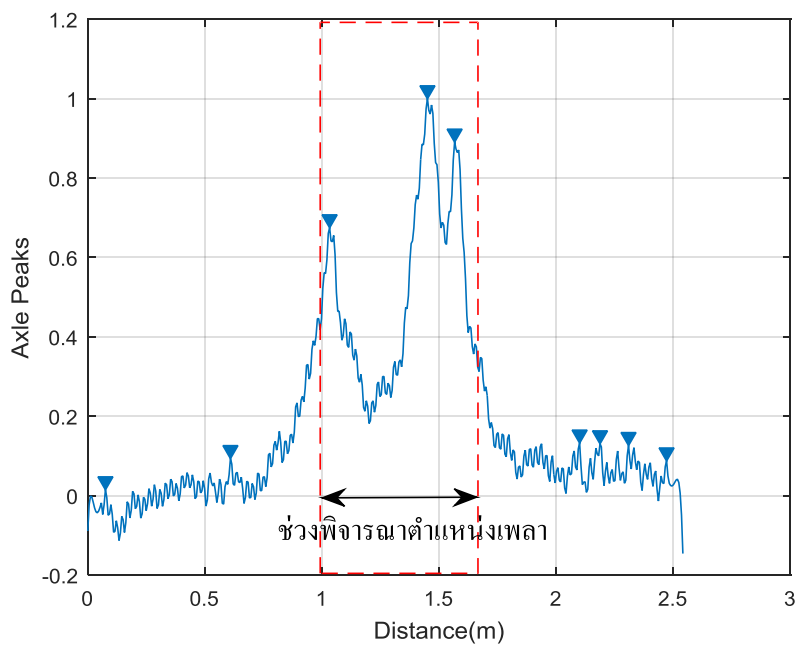
ของระบบส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน โดยหลักการตรวจจับเพลลาที่เพิ่มขึ้น จากสัญญาณ โมเมนต์ตัดคองข้างสูงสุด (Peak) ทำให้การคำนวณระยะห่างเพลลาเกิดความคลาดเคลื่อน จากหลักการการหาจำนวนเพลลาและคำนวณหาระยะห่างเพลลาโดยอาศัยการสร้าง สัญญาณ โมเมนต์ตัดคองสะพานจากน้ำหนักเพลลาและระยะห่างเพลลา พบว่าในการสร้างสัญญาณ โมเมนต์ตัดคองในแต่ละรอบจะต้องหาน้ำหนักเพลลาและระยะห่างเพลลาก่อนเสมอ จึงทำให้ได้ผลของ ระยะห่างเพลลา น้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวม ค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาน้ำหนักเพลลา และน้ำหนักรวม ได้แสดงในตารางที่ 5-2 จากระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้พิจารณาลักษณะหรือประเภทของรถบรรทุกต่อไปได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน สูงสุดไม่เกินร้อยละ 15 อีกทั้งยังพบว่าน้ำหนักของรถบรรทุกที่ประมาณได้จากกระบวนการที่ นำเสนอนี้ มีค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่มีความคลาดเคลื่อนเพียงไม่เกินร้อยละ 7 ซึ่งถือว่ามีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ ระยะเวลาในการคำนวณมากเนื่องจากต้องคำนวณรอบหลายครั้งตามจำนวนเพลลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นวิธีการจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* จึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ มากกว่าวิธีการดังกล่าวซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

### ผลการจำแนกประเภทรถบรรทุกด้วยการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB

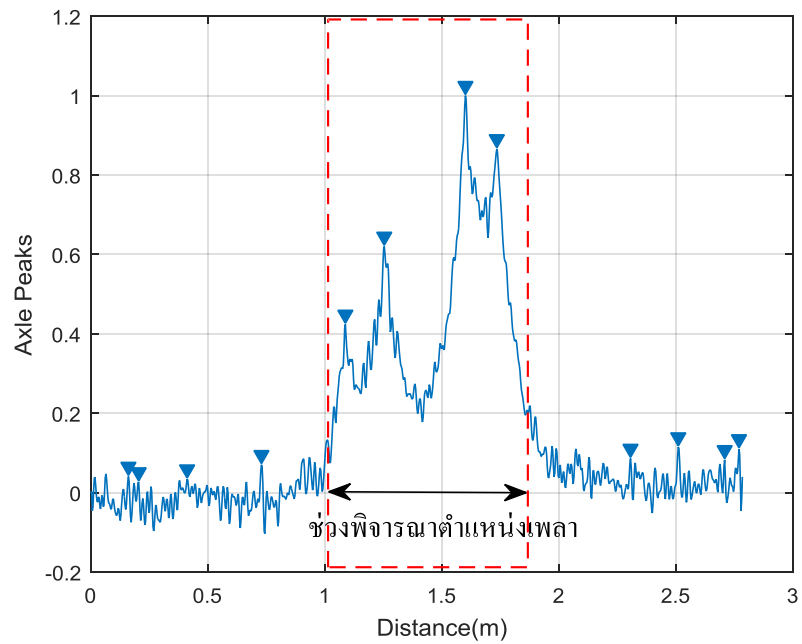
วิธีการหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาเพื่อจำแนกประเภทรถบรรทุกจะใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB ทำการตรวจจับยอดสัญญาณ (Peaks) ดังแสดงในภาพที่ 5-27 ถึง 5-32 โดยใช้สัญญาณความเครียด 1 หน่วยบริเวณกึ่งกลางสะพานเนื่องจากบริเวณ กึ่งกลางสะพานจะให้ความเครียดที่มีความชัดเจน และมียอดสัญญาณที่บ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลา ชัดเจนกว่าบริเวณจุดตรวจวัดอื่น การตั้งค่าฟังก์ชันสำหรับตรวจจับตำแหน่งเพลลาจะตั้งค่า ให้ตรวจจับเฉพาะยอดสัญญาณที่มีความชัดเจนมีค่าแตกต่างกันเกินกว่าร้อยละ 10 ซึ่งหาก บริเวณใกล้เคียงมียอดสัญญาณความเครียดที่มีค่าแตกต่างกันไม่มากกว่าร้อยละ 10 ฟังก์ชันที่ใช้ ก็จะไม่ตรวจจับตำแหน่งยอดสัญญาณนั้น ๆ ดังนั้นเมื่อได้ตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกก็จะสามารถ คำนวณระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกได้



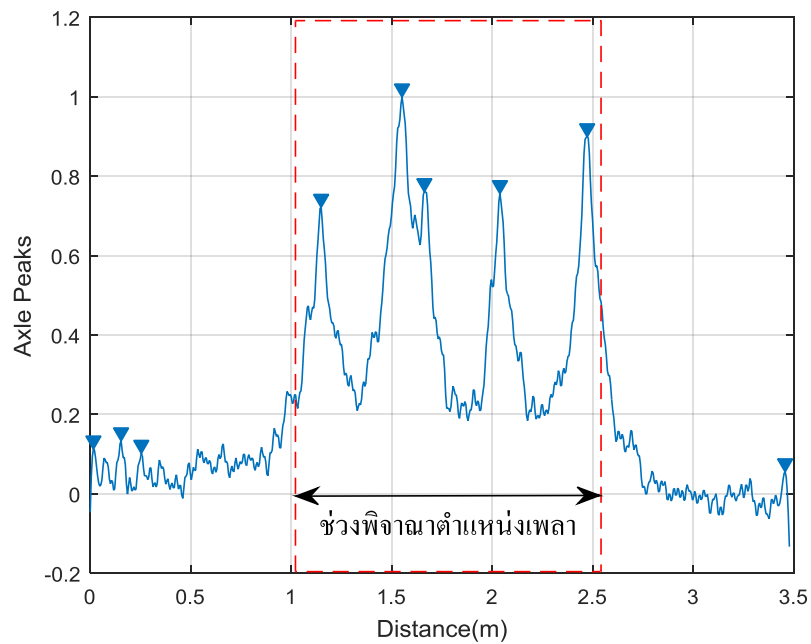
ภาพที่ 5-27 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลลา



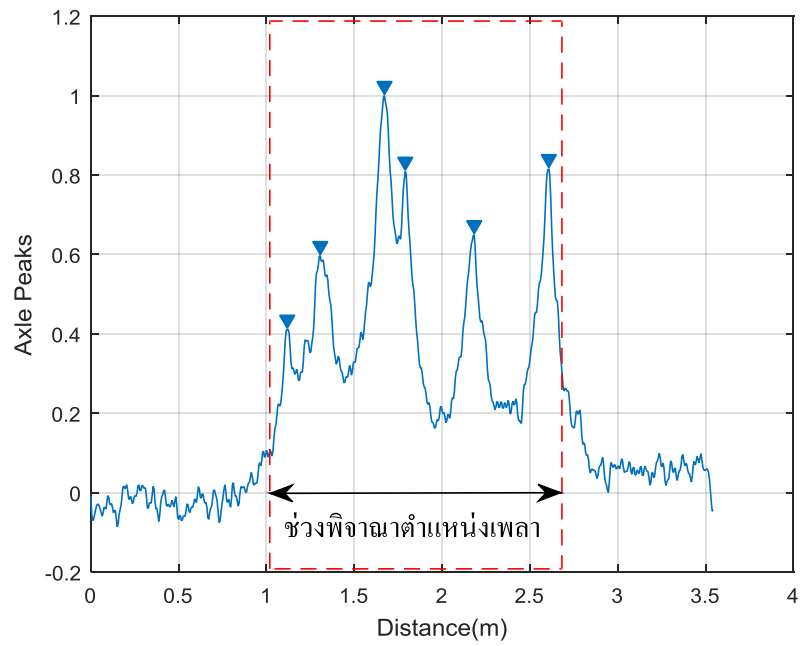
ภาพที่ 5-28 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* กรณีรถบรรทุกทุกประเภท 3 เพลลา



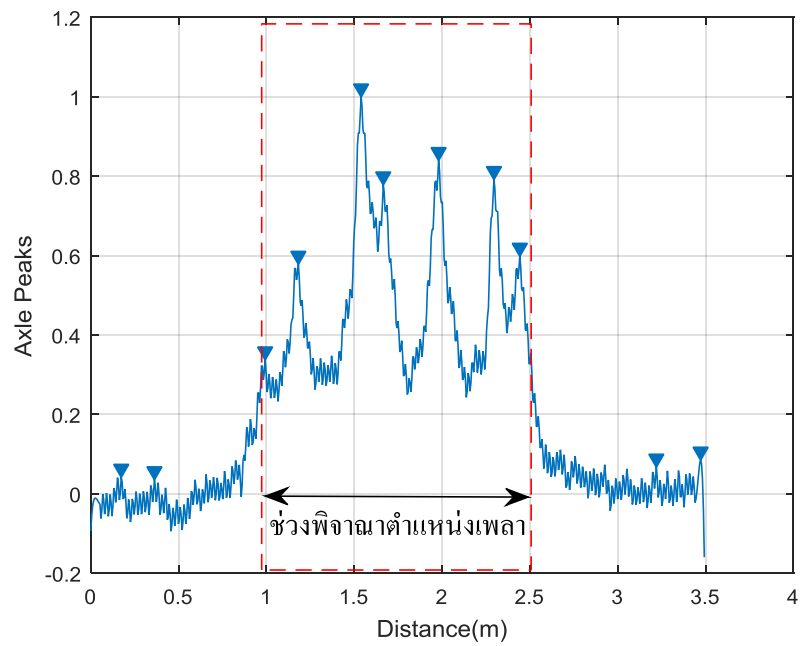
ภาพที่ 5-29 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลลา



ภาพที่ 5-30 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลลา



ภาพที่ 5-31 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลลา



ภาพที่ 5-32 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา

การพิจารณาค่าแห่งเพลลาจะพิจารณาเพลลาแรกถึงเพลลาสุดท้ายตั้งแต่บริเวณกึ่งกลางสะพานที่เป็นบริเวณติดตั้งมาตรวัดความเครียดจนถึงบริเวณตำแหน่งของเพลลาสุดท้าย โดยตำแหน่งเพลลาสุดท้ายสามารถคำนวณได้จากระยะห่างเพลลามากที่สุดซึ่งได้จากการคำนวณ และการแปลงแกนของเวลาให้เป็นแกนระยะทางสามารถระบุตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกได้ สำหรับการจำแนกประเภทรถบรรทุกจะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาของรถบรรทุกที่คำนวณได้ โดยทั่วไปรถบรรทุกจะมีลักษณะทางกายภาพที่สามารถบ่งบอกถึงประเภทของรถบรรทุก ดังนั้นหลังจากที่คำนวณระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาจะสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกและสามารถทราบพิกัดน้ำหนักตามกฎหมายของรถบรรทุกประเภทนั้น ๆ ได้

จากการศึกษาการจำแนกประเภทรถบรรทุกพบว่าการใช้ฟังก์ชัน *Findpeaks* ในซอฟต์แวร์ MATLAB สามารถหาระยะห่างเพลลา จำนวนเพลลาและจำแนกประเภทรถบรรทุกได้อย่างถูกต้องในทุกกรณีศึกษา ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อการจำแนกประเภทรถบรรทุก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์และระดับสัญญาณรบกวนของระบบจึงส่งผลให้การตรวจจับยอดสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนรวม ไปถึงค่าความคลาดเคลื่อนสะสมจากการคำนวณหาความเร็วในขั้นตอนก่อนหน้า

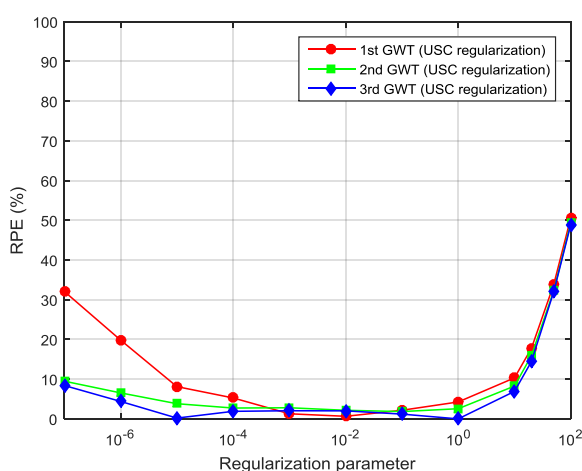
### ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพาน

การหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยผลการตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยหลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันยังมีความถูกต้องไม่มากนัก เนื่องจากองค์ประกอบของแรงมี 2 ส่วนคือ องค์ประกอบทางสถิตย์และองค์ประกอบทางพลศาสตร์ ในการคำนวณหาน้ำหนักเพียงครั้งเดียวจะทำให้ได้คำตอบที่ไม่ถูกต้อง โดยยังขาดองค์ประกอบของน้ำหนักทางสถิตย์ ดังนั้นวิธีการคำนวณซ้ำหรือเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย์ (USC) จึงเข้ามาช่วยปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย์ให้มีความถูกต้องมากขึ้น

#### 1. การหาค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization, $\lambda$ )

ในการคำนวณหาน้ำหนักโดยการเพิ่มเทอมของความราบเรียบ (Smoothing term) เข้าไปในสมการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (Least-square) สามารถลดผลเนื่องจากการเกิดสภาวะบกพร่อง (Ill-condition) ได้ เมื่อมีการเรกูลาร์ไรเซชันค่าแรงที่คำนวณได้จะมีความราบเรียบมากขึ้น ตามค่า  $\lambda$  โดยที่ค่า  $\lambda$  มากเท่าไรก็จะทำให้ค่าแรงที่ได้มีความราบเรียบมากขึ้นเป็นลำดับ แต่วิธีการเรกูลาร์ไรเซชันนี้จะทำให้ค่าแรงที่ได้มีค่าลดลงตามค่า  $\lambda$  ที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจึงเปลี่ยนไปตามการใช้ค่า  $\lambda$  ในการหาน้ำหนัก ตัวอย่างการหาค่า  $\lambda$  ดังแสดงในภาพที่ 5-33 และการหาค่า  $\lambda$  สำหรับกรณีอื่น ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข ผลการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถเลือกใช้ค่า  $\lambda$  ค่าใดค่าหนึ่งก็ได้โดยเลือกค่าที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ในการศึกษาี้เลือกใช้ค่า  $\lambda$  เท่ากับ 0.1 จากนั้นวิธีเพิ่มความถูกต้องของการหาน้ำหนักเพลาทงสถิติด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ จะช่วยเพิ่มความถูกต้องของคำตอบให้มีความถูกต้องมากขึ้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

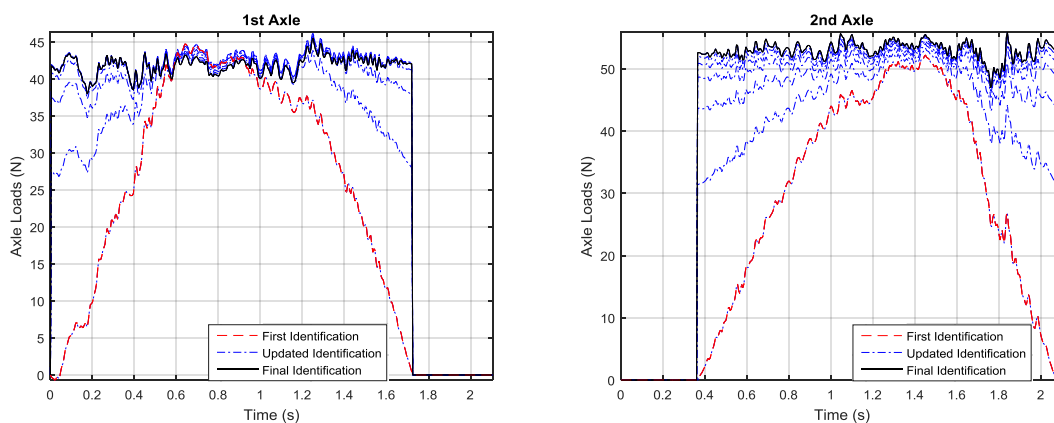


ภาพที่ 5-33 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตร/ ชั่วโมง

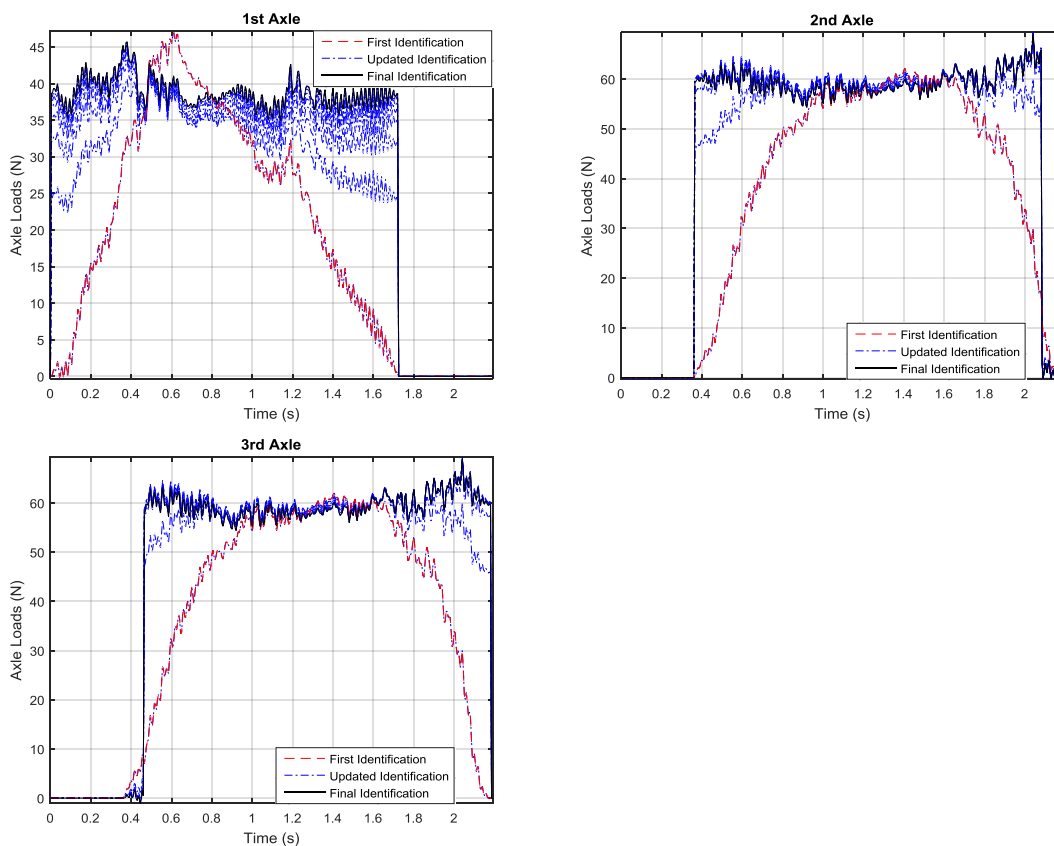
## 2. การเพิ่มความถูกต้องของการหาน้ำหนักเพลาทงสถิติด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC Technique)

จากการเพิ่มความถูกต้องของการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติให้มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น สำหรับการหาน้ำหนักเพลายังคงมีความคลาดเคลื่อนมาก เนื่องจากในขณะที่ทำการทดสอบไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักเพลาระยะเคลื่อนที่ได้จึงไม่ทราบน้ำหนักเพลาริจจริงของรถบรรทุกในขณะที่เคลื่อนที่ ดังนั้นในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาก็ทำได้เพียงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักเพลาทงสถิติที่ได้จากการคำนวณกับน้ำหนักเพลาทงสถิติที่ได้จากการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทางสถิติเท่านั้น ซึ่งตัวอย่าง

การเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลาถึง 7 เพลา ได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-34 ถึงภาพที่ 5-39

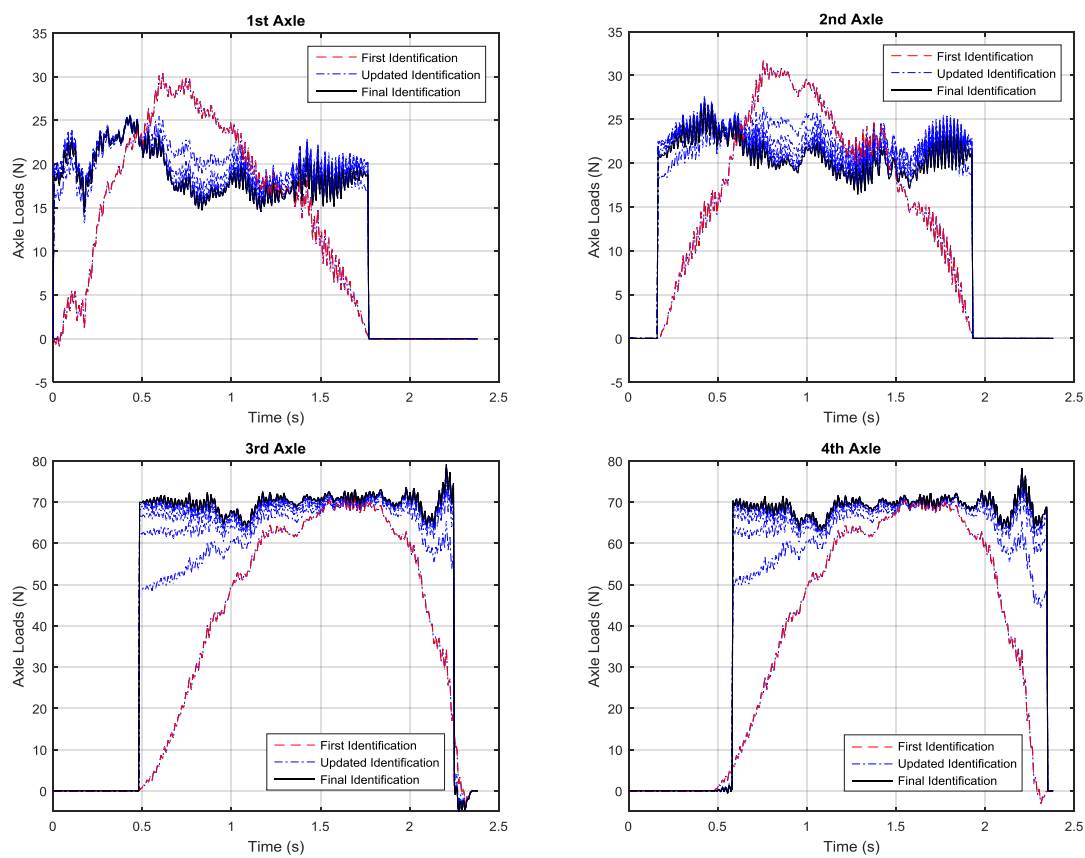


ภาพที่ 5-34 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา

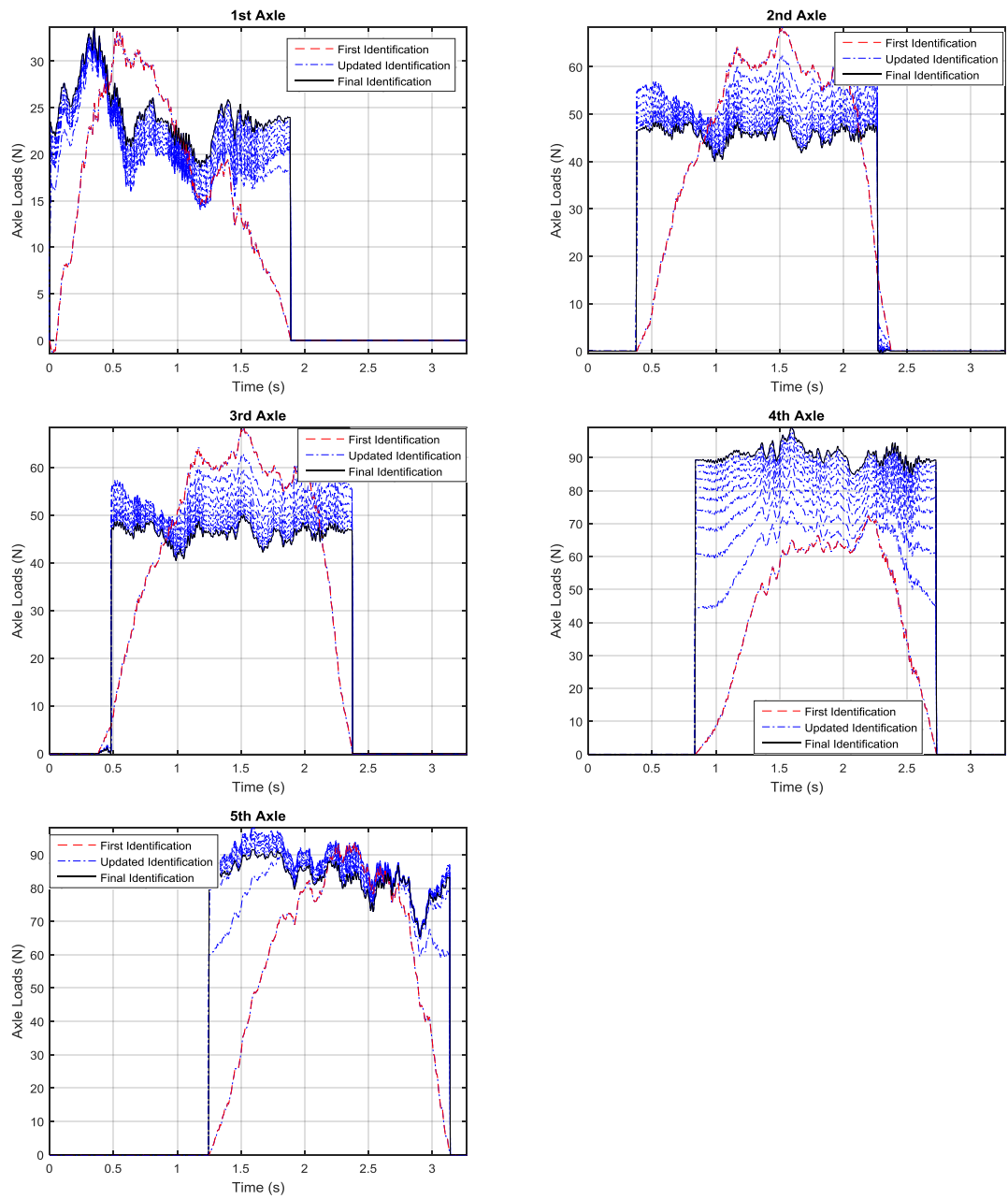


ภาพที่ 5-35 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา

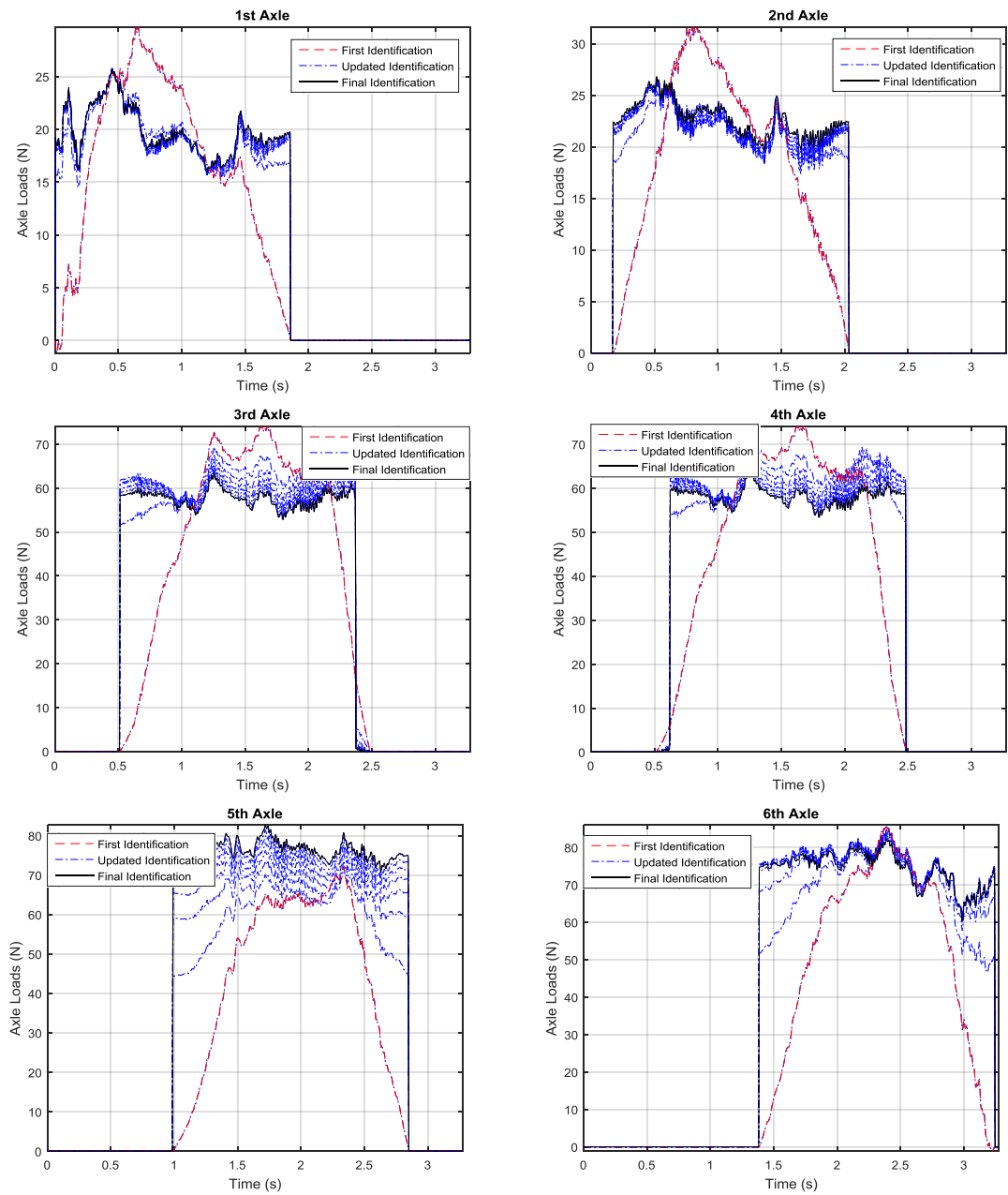




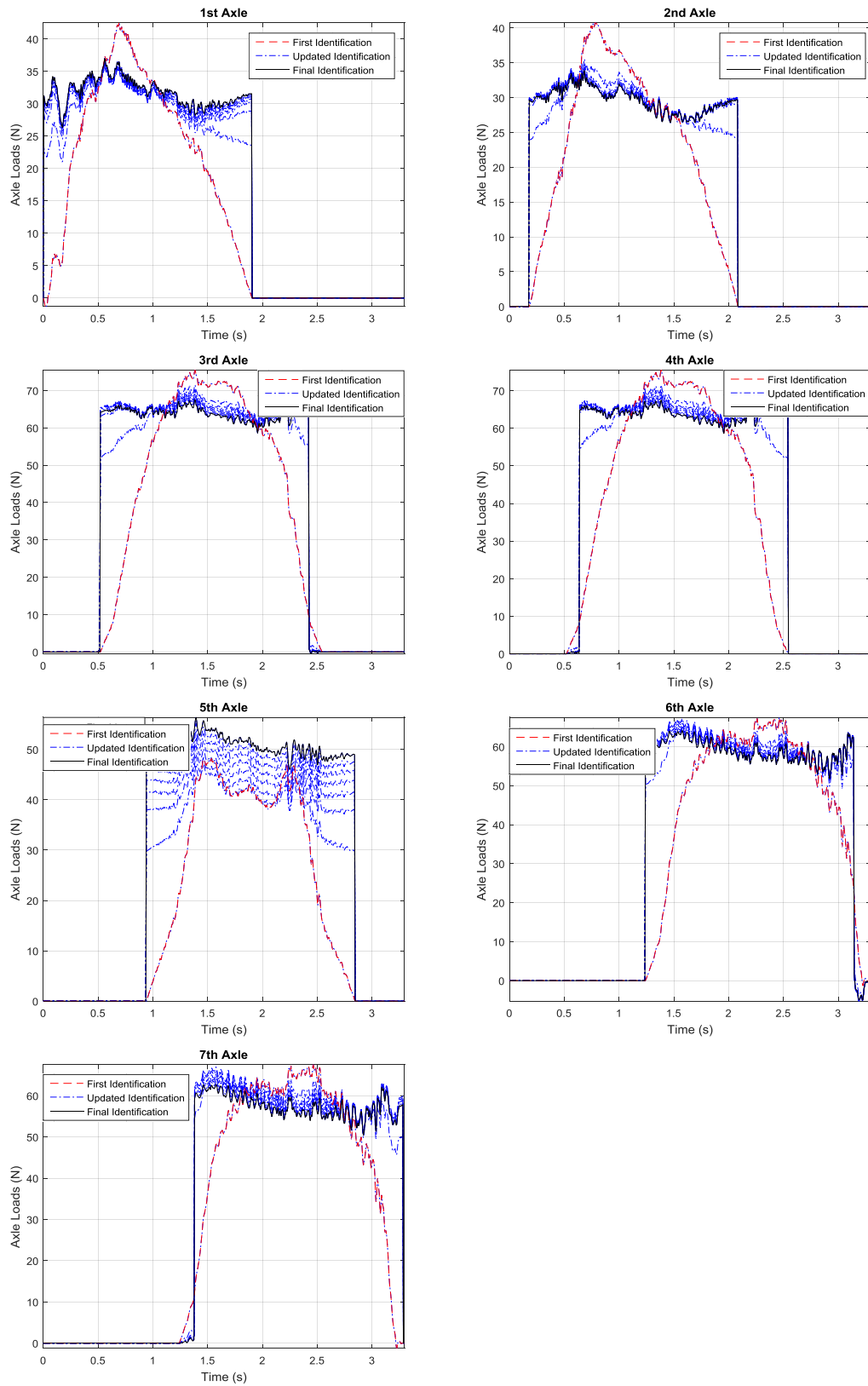
ภาพที่ 5-36 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



ภาพที่ 5-37 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



ภาพที่ 5-38 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา

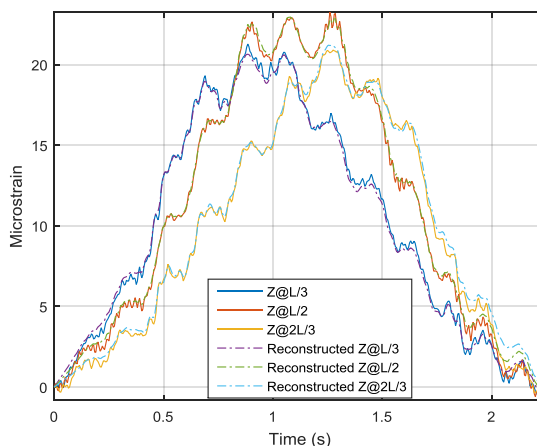


ภาพที่ 5-39 การหาค่าน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา

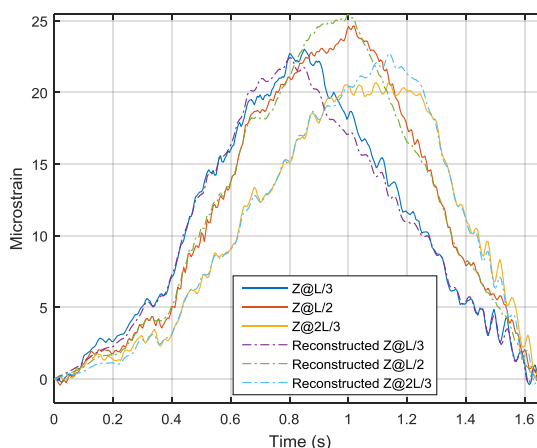
### 3. ผลการทดสอบและความถูกต้องของการหาน้ำหนัก

การหาน้ำหนักของรถบรรทุกจากแบบจำลองย่อส่วนด้วยการเคลื่อนที่รถบรรทุกจำลองผ่านสะพานแบบช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา และเคลื่อนที่บนช่องจราจรทางด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากเป็นสะพานจำลองแบบ 2 ช่องจราจร ในการทดสอบได้ทำการทดสอบที่ระดับความเร็วที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ระดับความเร็วต่ำ (ประมาณ 0.56 เมตรต่อวินาที) ระดับความเร็วปานกลาง (ประมาณ 1.11 เมตรต่อวินาที) และระดับความเร็วสูง (ประมาณ 1.67 เมตรต่อวินาที) โดยแต่ละระดับความเร็วได้ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ครั้ง และทำการทดสอบในลักษณะนี้ทุกระดับน้ำหนักของรถบรรทุกจำลองที่แตกต่างกัน โดยรถบรรทุกจำลองมีทั้งหมด 6 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ถึงตารางที่ 4-10 รวมทั้งหมดเป็นจำนวน 162 การทดสอบ ใช้ตำแหน่งการเก็บสัญญาณ 5 จุด และใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (Regularization parameter,  $\lambda$ ) สำหรับงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.1 เนื่องจากเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ทำให้ได้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและใช้ได้สำหรับทุกกรณี ผลการทดสอบการหาน้ำหนักเพลตาและน้ำหนักรวม รวมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณหาน้ำหนักได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5-3 ถึงตารางที่ 5-8 ซึ่งการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักจะอ้างอิงจากน้ำหนักทางสถิติที่ได้จากการตรวจวัดก่อนการทดสอบ และจากตารางที่ 5-3 ถึงตารางที่ 5-8 พบว่าค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้สำหรับกรณีรถบรรทุกทุกประเภทมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 5.29 11.64 7.88 11.59 7.57 และ 8.19 ตามลำดับ โดยได้ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดในการหาน้ำหนักของรถบรรทุกแต่ละประเภทโดยการเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดตรวจวัดกับสัญญาณความเครียดที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ซึ่งสัญญาณความเครียดในภาพที่ 5-40 ถึงภาพที่ 5-45 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดและการหาน้ำหนักที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ ซึ่งสัญญาณความเครียดตรวจวัดเมื่อทำการปรับเทียบด้วยพารามิเตอร์  $\alpha$  แล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกับทฤษฎีที่คำนวณได้ ขณะที่สัญญาณความเครียดในภาพที่ 5-45 ถึงภาพที่ 5-50 เป็นสัญญาณความเครียดของกรณีทดสอบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกับทฤษฎีที่คำนวณได้เช่นกัน ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการหยุดการคำนวณซ้ำของวิธีการเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักทางสถิติ เมื่อน้ำหนักเพลตาที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกับน้ำหนักเพลตาที่คำนวณได้ในรอบก่อนหน้าไม่เกินร้อยละ 1 ดังนั้นหากต้องการให้ได้คำตอบที่มีความถูกต้องเพิ่มขึ้นจะต้องทำการปรับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 อย่างไรก็ตามการลดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับของวิธีการเพิ่มความถูกต้องให้น้ำหนักทางสถิติจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ

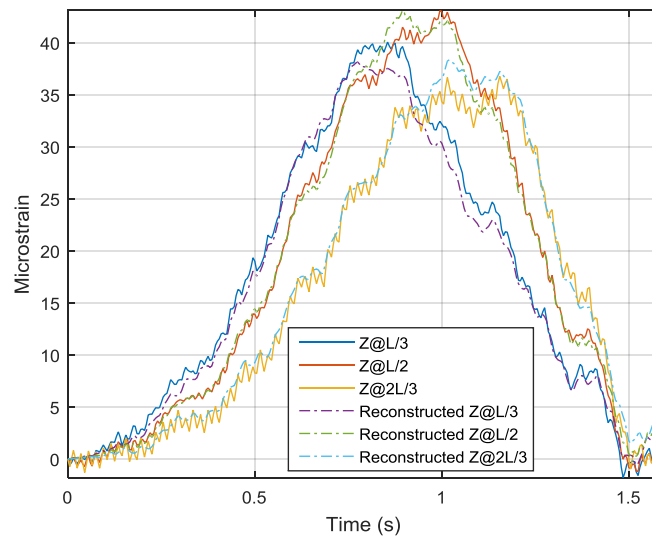
สัญญาณความเครียดตรวจวัดกับสัญญาณความเครียดทางทฤษฎีพบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าคำตอบที่หาได้นั้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก



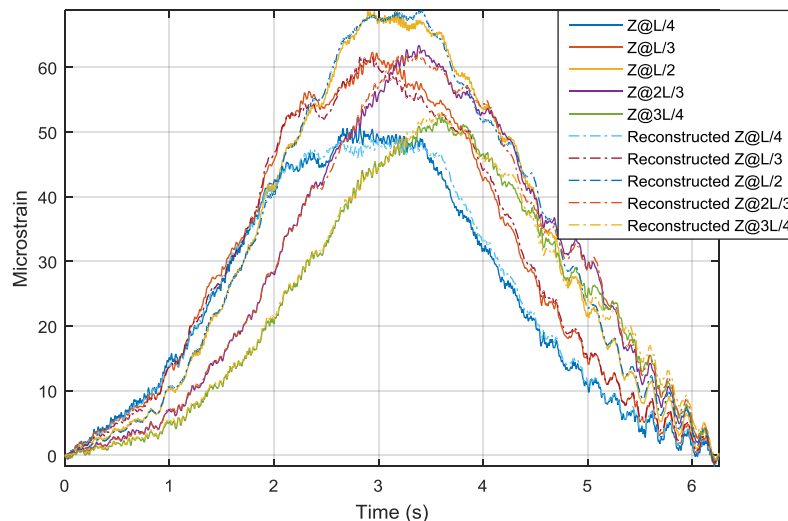
ภาพที่ 5-40 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 1 กรณีรถบรรทุกหนัก 9.25 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วปานกลาง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9992 0.9994 0.9988)



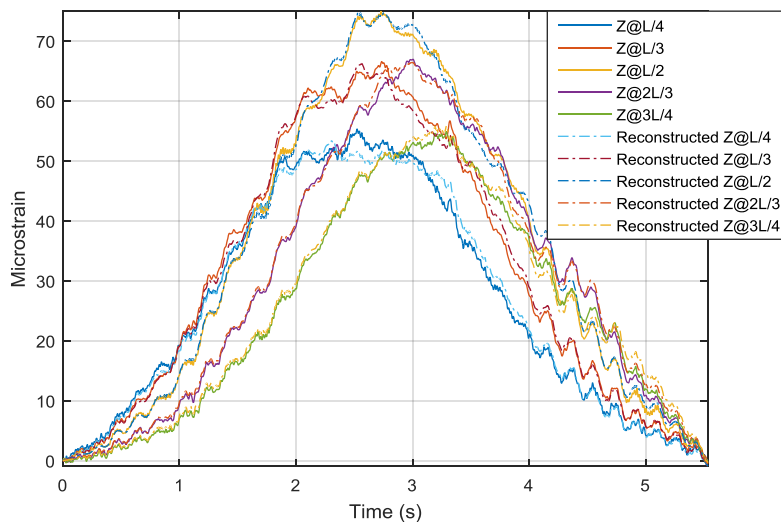
ภาพที่ 5-41 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 2 กรณีรถบรรทุกหนัก 10.80 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9960 0.9968 0.9976)



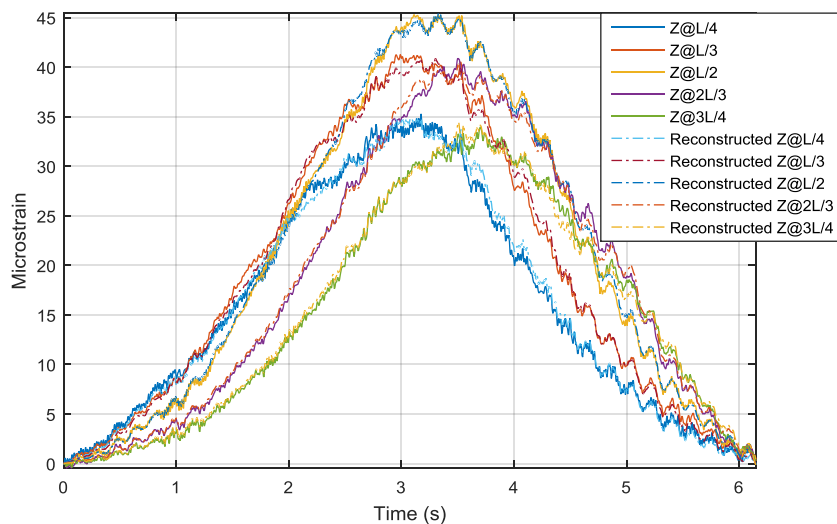
ภาพที่ 5-42 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 1 กรณีรถบรรทุกหนัก 18.50 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9975 0.9978 0.9969)



ภาพที่ 5-43 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 1 กรณีรถบรรทุกหนัก 37.70 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9984 0.9990 0.9992 0.9991 0.9988)

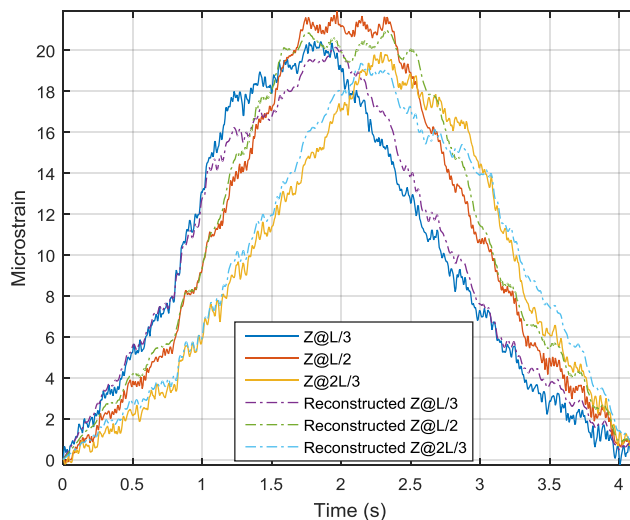


ภาพที่ 5-44 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 2 กรณีรถบรรทุกหนัก 41.70 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9977 0.9986 0.9989 0.9989 0.9985)

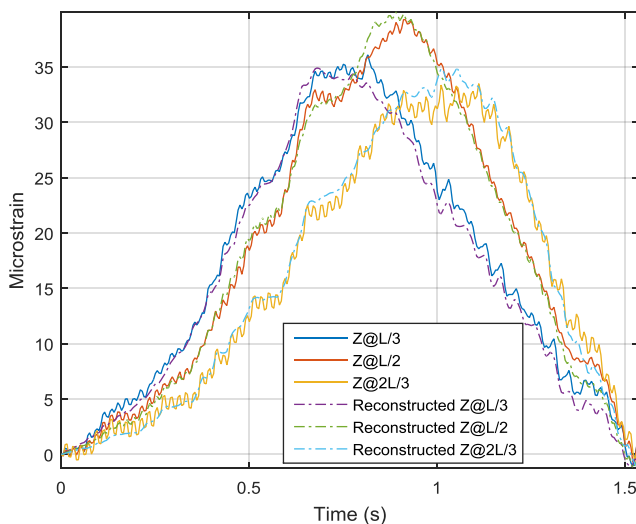


ภาพที่ 5-45 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 1 กรณีรถบรรทุกหนัก 25.00 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9983 0.9989 0.9993 0.9992 0.9988)

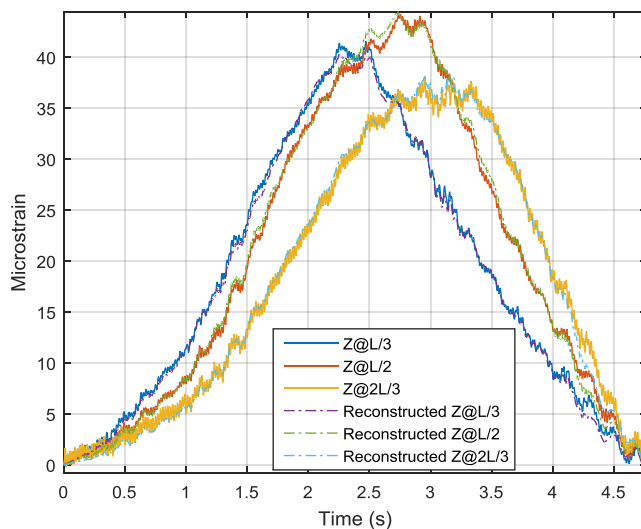




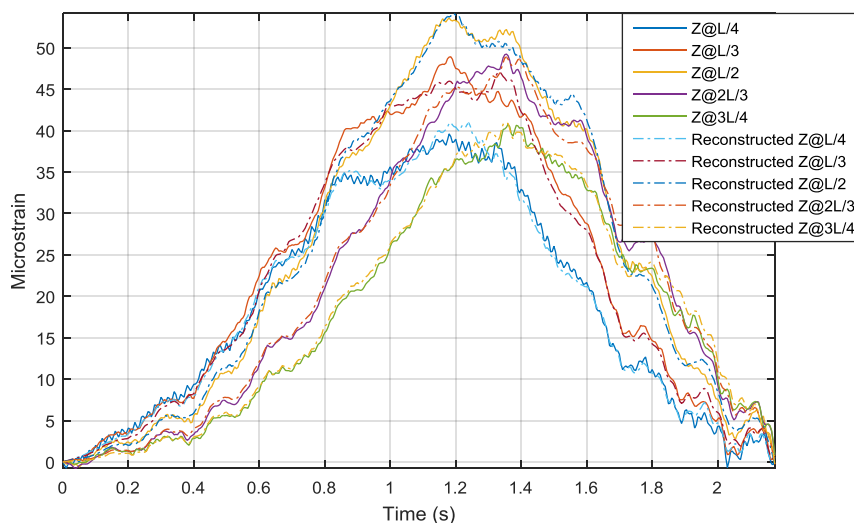
ภาพที่ 5-46 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 3 กรณีรถบรรทุกหนัก 9.25 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9919 0.9955 0.9923)



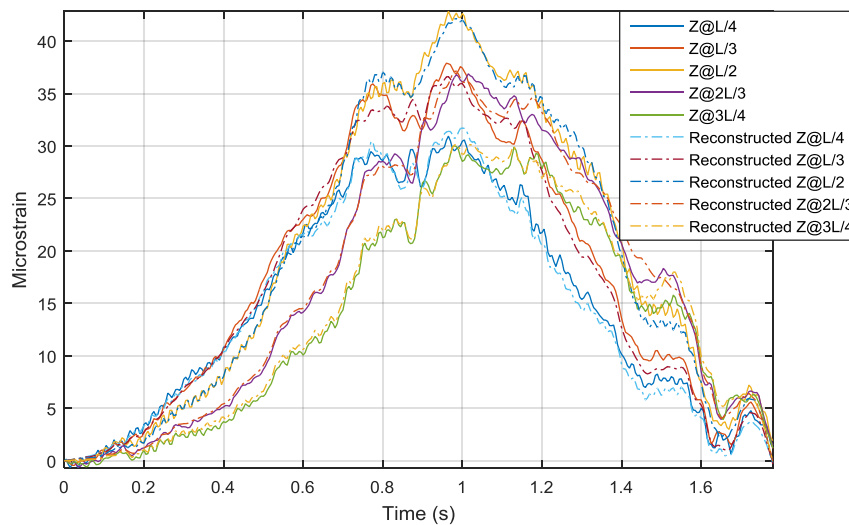
ภาพที่ 5-47 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 2 กรณีรถบรรทุกหนัก 15.40 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9976 0.9980 0.9968)



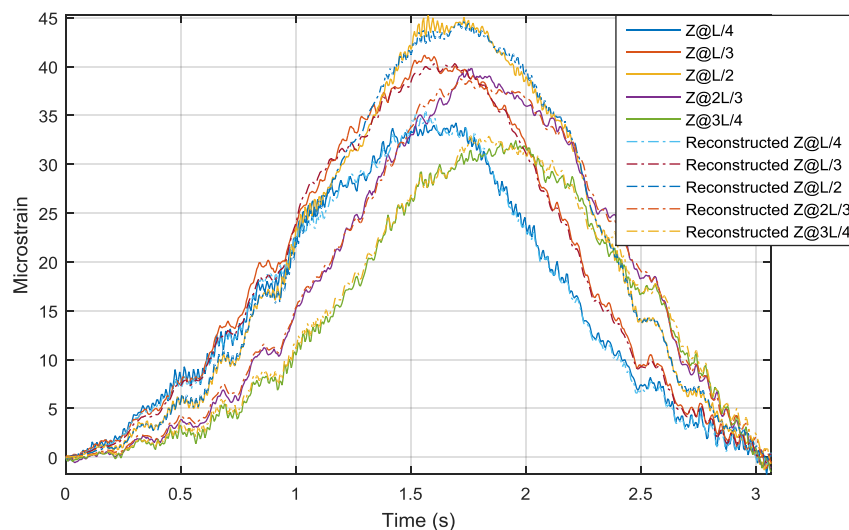
ภาพที่ 5-48 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 3 กรณีรถบรรทุกหนัก 18.50 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9994 0.9992 0.9982)



ภาพที่ 5-49 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 3 กรณีรถบรรทุกหนัก 29.00 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9975 0.9978 0.9969)

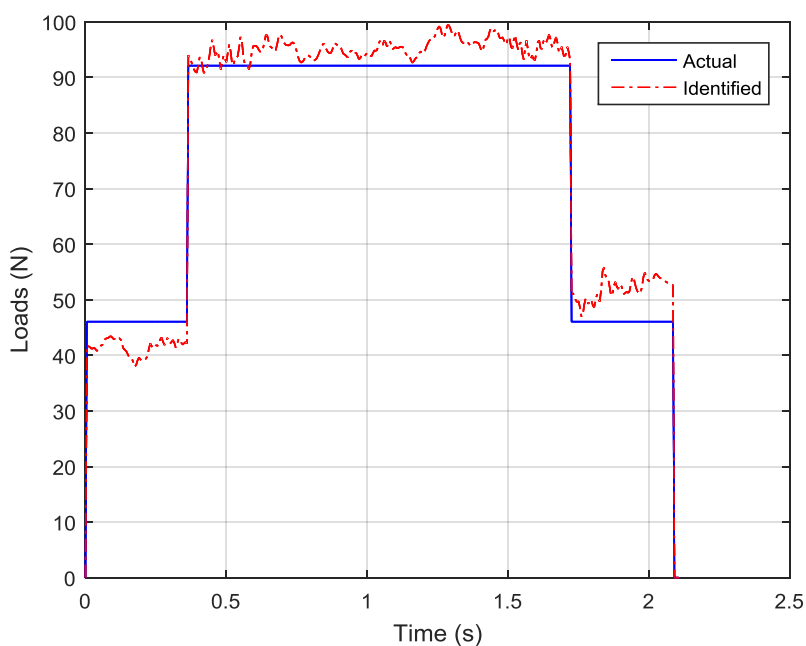


ภาพที่ 5-50 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้การทายน้ําหนักที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 3 กรณีรถบรรทุกหนัก 22.50 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9975 0.9974 0.9986 0.9979 0.9982)

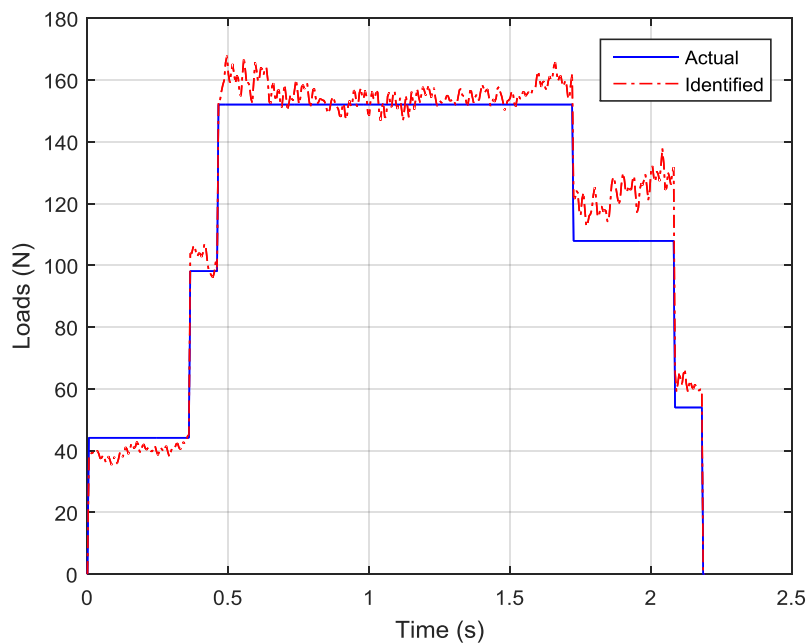


ภาพที่ 5-51 ลักษณะของสัญญาณความเครียดที่ให้การทายน้ําหนักที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา (ผลการทดสอบครั้งที่ 1 กรณีรถบรรทุกหนัก 25.00 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดเท่ากับ 0.9989 0.9992 0.9994 0.9992 0.9990)

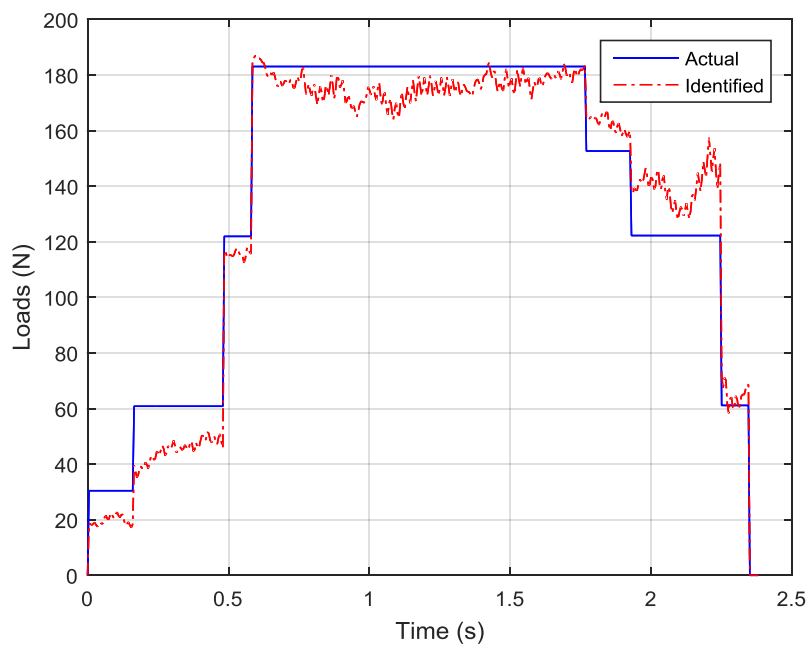
ค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักเพลายังมีค่ามากเนื่องจากการทดสอบไม่ได้ติดตั้งเครื่องตรวจวัดน้ำหนักเพลาวัวที่รถทดสอบได้ ในการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเพียงการเปรียบเทียบน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบกับน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการเฉลี่ยจากทฤษฎีที่คำนวณได้ ซึ่งในสภาพความเป็นจริงขณะที่รถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่จะมีการเอียงของน้ำหนักไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เมื่อนำข้อมูลมาหาค่าความคลาดเคลื่อนจึงได้คำตอบที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่มาก ลักษณะของน้ำหนักที่ได้จากการตรวจวัดกับน้ำหนักที่คำนวณได้จากทฤษฎีกรณีตัวอย่างรถบรรทุกประเภท 2 เพลาดังแสดงถึงรถบรรทุกประเภท 7 เพลาดังแสดงในภาพที่ 5-52 ถึงภาพที่ 5-57 อย่างไรก็ตามในการคำนวณหาน้ำหนักรวมทางสถิตย์ยังให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย



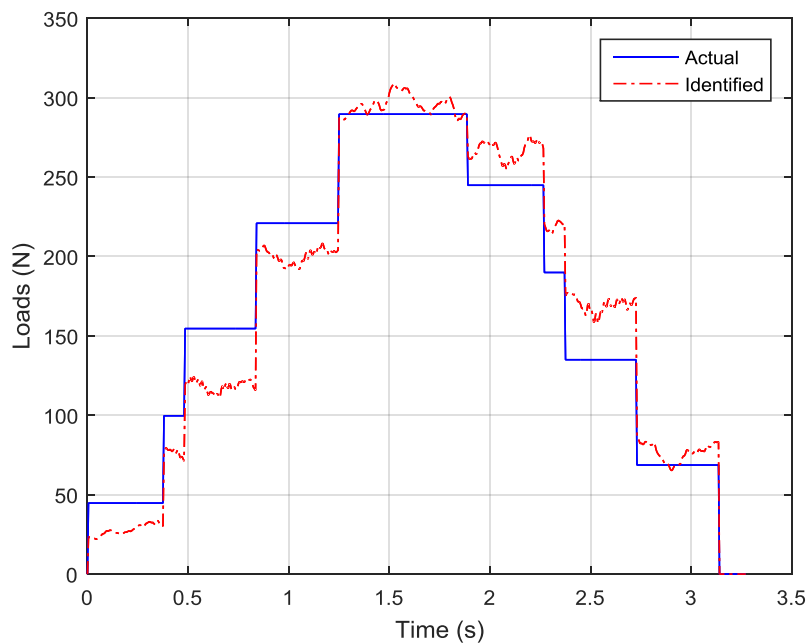
ภาพที่ 5-52 ค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการคำนวณกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา



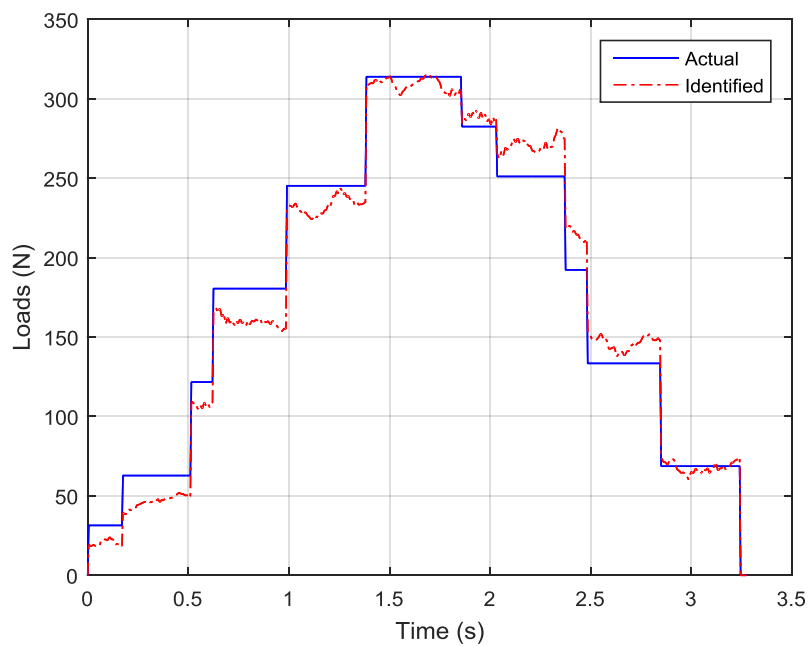
ภาพที่ 5-53 ค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการคำนวณ  
กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา



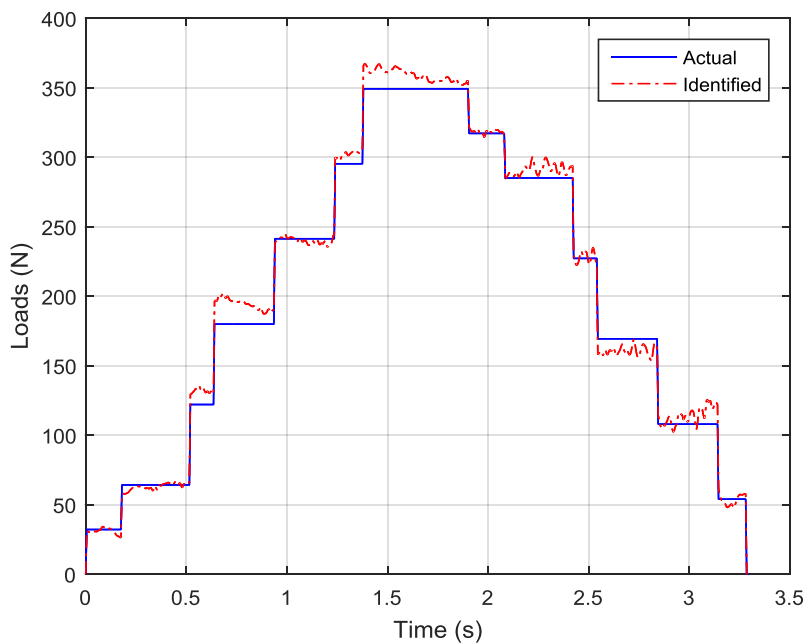
ภาพที่ 5-54 ค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการคำนวณ  
กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



ภาพที่ 5-55 ค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



ภาพที่ 5-56 ค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา



ภาพที่ 5-57 ค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าน้ำหนักทางสถิตย์ที่ได้จากการคำนวณ  
กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพล

ตารางที่ 5-3 ผลการทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกประเภท 2 เพล และค่าความคลาดเคลื่อนทาง  
สถิตย์

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่	น้ำหนักบรรทุก 6.5 กก.			น้ำหนักบรรทุก 9.25 กก.			น้ำหนักบรรทุก 12 กก.		
	ช่องจราจรซ้ายของสะพาน	การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
น้ำหนักเพล 1	32.56	32.99	34.03	44.77	47.46	45.49	60.78	57.38	63.20
Error Static (%)	3.94	2.19	5.41	-2.78	3.05	-1.24	1.69	-3.99	5.72
น้ำหนักเพล 2	32.22	34.67	33.15	46.75	48.04	51.51	60.03	62.91	53.96
Error Static (%)	-0.18	7.38	2.70	1.52	4.31	11.83	0.42	5.24	-9.73
น้ำหนักรวม	65.78	67.65	67.18	91.53	95.50	96.99	120.81	120.28	117.15
Error Static (%)	1.88	4.78	4.05	-0.63	3.68	5.29	1.06	0.62	-2.00
จำนวนรอบ	6	7	7	6	7	7	7	6	7

ตารางที่ 5-3 (ต่อ)

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ ช่องจราจรซ้ายของ สะพาน	น้ำหนักบรรทุก 6.5 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 9.25 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 12 กก. การทดสอบครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	ความเร็วปานกลาง (1.11 m/s)								
น้ำหนักเพลลา 1	29.02	31.14	28.92	48.25	41.85	41.92	51.56	52.23	53.28
Error Static (%)	-10.12	-3.56	-10.41	4.75	-9.12	-8.97	-13.74	-12.62	-10.85
น้ำหนักเพลลา 2	37.92	34.23	36.27	43.99	52.99	51.62	65.89	68.51	68.09
Error Static (%)	17.45	6.03	12.35	-4.48	15.07	12.06	10.23	14.62	13.92
น้ำหนักรวม	66.93	65.36	65.19	92.24	94.85	93.54	117.44	120.74	121.37
Error Static (%)	3.66	1.23	0.97	0.13	2.97	1.54	-1.75	1.00	1.53
จำนวนรอบ	7	6	6	6	7	6	6	6	6
ความเร็วสูง (1.67 m/s)									
น้ำหนักเพลลา 1	26.96	28.89	30.72	37.40	36.93	39.44	44.47	53.17	46.54
Error Static (%)	-16.51	-10.52	-4.84	-18.79	-19.81	-14.36	-25.14	-11.04	-22.15
น้ำหนักเพลลา 2	38.57	35.18	33.06	56.49	57.15	55.29	75.16	71.09	77.89
Error Static (%)	19.47	8.98	2.40	22.64	24.09	20.06	25.75	18.93	30.31
น้ำหนักรวม	65.52	64.07	63.78	93.88	94.08	94.73	119.91	124.26	124.42
Error Static (%)	1.48	-0.77	-1.22	1.92	2.14	2.84	0.30	3.94	4.08
จำนวนรอบ	8	7	6	9	8	7	7	6	9



ตารางที่ 5-4 ผลการทดสอบการหาหน้าหนักบรรทุกทุกประเภท 3 เฟลา และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่	ช่องจราจรซ้ายของสะพาน	น้ำหนักบรรทุก 10.8 กก.			น้ำหนักบรรทุก 15.4 กก.			น้ำหนักบรรทุก 20 กก.		
		การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
ความเร็วต่ำ (0.56 m/s)	น้ำหนักเฟลา 1	26.69	20.74	29.42	28.32	20.27	17.89	47.53	34.03	41.95
	Error Static (%)	-20.89	-38.54	-12.81	-35.84	-54.07	-59.47	-20.56	-43.13	-29.89
	น้ำหนักเฟลา 2	40.22	41.10	38.74	63.52	66.40	65.30	80.95	86.07	79.63
	Error Static (%)	22.02	24.72	17.55	17.72	23.07	21.04	16.88	24.27	14.97
	น้ำหนักเฟลา 3	40.20	41.10	38.74	63.52	66.40	65.30	80.95	86.07	79.63
	Error Static (%)	22.02	24.72	17.55	17.72	23.07	21.04	16.88	24.27	14.97
	น้ำหนักรวม	107.14	102.95	106.91	155.36	153.08	148.51	209.43	206.16	201.21
	Error Static (%)	7.49	3.29	7.27	2.17	0.67	-2.33	5.58	3.93	1.43
	จำนวนรอบ	9	8	9	5	9	10	8	5	7
ความเร็วปานกลาง (1.11 m/s)	น้ำหนักเฟลา 1	25.40	25.26	22.43	28.14	17.30	38.89	36.57	27.42	39.49
	Error Static (%)	-24.74	-25.13	-33.53	-36.26	-60.82	-11.89	-38.89	-54.18	-33.99
	น้ำหนักเฟลา 2	38.47	37.98	38.77	65.19	65.93	59.32	81.50	86.81	86.74
	Error Static (%)	16.71	15.23	17.64	20.82	22.20	9.94	17.67	25.34	25.24
	น้ำหนักเฟลา 3	38.47	37.98	38.77	65.19	65.93	59.32	81.50	86.81	86.74
	Error Static (%)	16.71	15.23	17.64	20.82	22.20	9.94	17.67	25.34	25.24
	น้ำหนักรวม	102.33	101.23	99.98	158.51	149.16	157.52	199.57	201.05	212.97
	Error Static (%)	2.67	1.56	0.31	4.25	-1.90	3.60	0.61	1.35	7.37
	จำนวนรอบ	9	9	7	5	11	8	5	8	6

ตารางที่ 5-4 (ต่อ)

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ ช่องจราจรซ้ายของ สะพาน	น้ำหนักบรรทุก 10.8 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 15.4 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 20 กก. การทดสอบครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	ความเร็วสูง (1.67 m/s)								
น้ำหนักเพลลา 1	20.55	18.22	25.12	18.07	27.96	26.58	25.92	26.10	24.07
Error Static (%)	-39.11	-46.02	-25.55	-59.06	-36.64	-39.79	-56.68	-56.37	-59.77
น้ำหนักเพลลา 2	40.08	40.92	36.82	68.53	70.89	67.24	91.25	91.29	91.22
Error Static (%)	21.58	24.14	11.72	27.01	31.39	24.64	31.75	31.81	31.71
น้ำหนักเพลลา 3	40.08	40.92	36.82	68.53	70.89	67.24	91.25	91.29	91.22
Error Static (%)	21.58	24.14	11.72	27.01	31.39	24.64	31.75	31.81	31.71
น้ำหนักกรวม	100.70	100.05	98.78	155.14	169.75	161.07	208.42	208.70	206.51
Error Static (%)	1.03	0.39	-0.89	2.03	11.64	5.93	5.07	5.21	4.11
จำนวนรอบ	6	5	9	11	5	5	10	9	10

ตารางที่ 5-5 ผลการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกประเภท 4 เพลา และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่	ช่องจราจรซ้ายของสะพาน	น้ำหนักบรรทุก 13 กก.			น้ำหนักบรรทุก 18.5 กก.			น้ำหนักบรรทุก 24 กก.			
		การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
ความเร็วต่ำ (0.56 m/s)	น้ำหนักเพลา 1	15.56	14.64	14.55	23.57	24.81	24.18	25.12	27.65	18.00	
	Error Static (%)	-34.71	-38.57	-38.92	-22.50	-18.41	-20.48	-38.14	-31.90	-55.66	
	น้ำหนักเพลา 2	19.79	17.68	17.12	23.94	25.80	25.66	31.53	43.06	26.77	
	Error Static (%)	-16.95	-25.80	-28.17	-21.29	-15.15	-15.62	-22.35	6.03	-34.08	
	น้ำหนักเพลา 3	51.09	52.40	48.82	73.01	73.04	73.82	95.86	90.92	105.46	
	Error Static (%)	21.11	24.22	15.74	19.46	19.51	20.78	20.64	14.42	32.72	
	น้ำหนักเพลา 4	51.09	52.40	48.82	73.01	73.04	73.82	95.86	90.92	105.46	
	Error Static (%)	21.11	24.22	15.74	19.46	19.51	20.78	20.64	14.42	32.72	
	น้ำหนักรวม	137.53	137.13	129.33	193.52	196.70	197.48	248.38	252.56	255.71	
	Error Static (%)	4.16	3.85	-2.05	5.72	7.45	7.88	3.43	5.17	6.48	
	จำนวนรอบ	9	8	8	8	5	5	9	11	11	
	ความเร็วปานกลาง (1.11 m/s)	น้ำหนักเพลา 1	15.76	20.01	15.92	16.83	18.78	18.49	17.33	15.95	17.53
		Error Static (%)	-33.84	-16.02	-33.22	-44.64	-38.26	-39.20	-57.31	-60.71	-56.83
		น้ำหนักเพลา 2	18.45	21.03	17.80	20.07	20.80	20.41	23.96	26.70	24.76
Error Static (%)		-22.61	-11.76	-25.32	-34.01	-31.61	-32.86	-40.98	-34.23	-39.02	
น้ำหนักเพลา 3		50.77	48.12	51.18	78.18	69.66	73.57	98.15	102.50	100.14	
Error Static (%)		20.36	14.07	21.33	27.91	13.98	20.38	23.52	28.96	26.02	
น้ำหนักเพลา 4		50.77	48.12	51.18	78.18	69.66	73.57	98.15	102.50	100.14	
Error Static (%)		20.36	14.07	21.33	27.91	13.98	20.38	23.52	28.96	26.02	
น้ำหนักรวม		135.76	137.28	136.08	193.25	178.90	186.05	237.61	247.61	242.57	
Error Static (%)		2.81	3.97	3.06	5.57	-2.27	1.63	-1.05	3.10	1.01	
จำนวนรอบ		7	5	7	8	9	9	9	13	10	

ตารางที่ 5-5 (ต่อ)

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ ช่องจราจรซ้ายของ สะพาน	น้ำหนักบรรทุก 13 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 18.5 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 24 กก. การทดสอบครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	ความเร็วสูง (1.67 m/s)								
น้ำหนักเพลลา 1	17.72	11.85	11.43	8.62	11.96	16.44	21.00	15.88	15.27
Error Static (%)	-25.65	-50.28	-52.04	-71.63	-60.65	-45.93	-48.28	-60.89	-62.05
น้ำหนักเพลลา 2	19.48	14.70	14.44	13.00	19.23	6.66	14.63	13.05	7.27
Error Static (%)	-18.25	-38.32	-39.39	-57.26	-36.75	-78.09	-63.97	-67.86	-82.08
น้ำหนักเพลลา 3	50.07	53.67	54.15	81.33	79.44	82.27	109.74	114.41	116.07
Error Static (%)	18.70	27.23	28.37	33.07	29.98	34.62	38.10	43.99	46.07
น้ำหนักเพลลา 4	50.07	53.67	54.15	81.33	79.44	82.27	109.74	114.41	116.07
Error Static (%)	18.70	27.23	28.37	33.07	29.98	34.62	38.10	43.99	46.07
น้ำหนักรวม	137.35	133.89	134.18	184.28	190.08	187.65	255.11	257.76	254.68
Error Static (%)	4.02	1.40	1.62	0.67	3.84	2.51	6.23	7.33	6.05
จำนวนรอบ	5	8	9	13	10	13	11	10	13

ตารางที่ 5-6 ผลการทดสอบการหาหน้าหนักบรรทุกทุกประเภท 5 เพลา และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่	ช่องจราจรซ้ายของสะพาน	น้ำหนักบรรทุก 20.3 กก.			น้ำหนักบรรทุก 29 กก.			น้ำหนักบรรทุก 37.7 กก.		
		การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
ความเร็วต่ำ (0.56 m/s)	น้ำหนักเพลา 1	25.94	22.61	20.96	29.26	28.86	27.09	36.19	31.81	33.74
	Error Static (%)	-30.40	-39.35	-43.76	-34.59	-35.46	-39.42	-29.32	-37.88	-34.11
	น้ำหนักเพลา 2	38.46	39.54	37.67	55.91	55.54	55.37	76.05	74.89	75.50
	Error Static (%)	8.89	11.96	6.67	1.79	1.11	0.80	3.37	1.78	2.63
	น้ำหนักเพลา 3	38.46	39.54	37.67	55.91	55.54	55.37	76.05	74.89	75.50
	Error Static (%)	8.89	11.96	6.67	1.79	1.11	0.80	3.37	1.78	2.63
	น้ำหนักเพลา 4	42.73	44.55	43.75	61.88	62.09	62.79	84.10	83.94	83.75
	Error Static (%)	-9.24	-5.39	-7.09	-6.68	-6.36	-5.31	-2.57	-2.76	-2.98
	น้ำหนักเพลา 5	47.85	48.81	50.63	68.97	70.93	71.06	91.48	92.52	92.86
	Error Static (%)	1.61	3.64	7.52	0.44	3.29	3.48	6.34	7.53	7.93
	น้ำหนักรวม	193.44	195.04	190.69	271.96	272.99	271.71	363.89	358.05	361.37
	Error Static (%)	-4.27	-3.48	-5.63	-6.08	-5.73	-6.17	-1.84	-3.41	-2.52
	จำนวนรอบ	8	8	8	7	8	7	7	6	6

ตารางที่ 5-6 (ต่อ)

สถานีตรวจวัด	ชนิดเครื่องวัด	น้ำหนักบรรทุก 20.3 กก.			น้ำหนักบรรทุก 29 กก.			น้ำหนักบรรทุก 37.7 กก.		
		การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
ความเร็วปานกลาง (1.11 m/s)	สะพาน									
	น้ำหนักเพลลา 1	21.84	24.18	21.82	21.01	21.08	22.57	25.32	25.60	30.04
	Error Static (%)	-41.41	-35.14	-41.47	-53.04	-52.88	-49.55	-50.55	-50.00	-41.34
	น้ำหนักเพลลา 2	36.91	37.26	36.67	54.01	54.12	54.04	71.80	73.60	72.97
	Error Static (%)	4.52	5.53	3.82	-1.68	-1.46	-1.63	-2.41	0.04	-0.82
	น้ำหนักเพลลา 3	36.91	37.26	36.67	54.01	54.12	54.04	71.80	73.60	72.97
	Error Static (%)	4.52	5.53	3.82	-1.68	-1.46	-1.63	-2.41	0.04	-0.82
	น้ำหนักเพลลา 4	40.99	41.47	40.88	63.10	62.84	62.78	81.35	82.78	79.81
	Error Static (%)	-12.94	-11.92	-13.17	-4.84	-5.23	-5.31	5.76	-4.11	-7.55
	น้ำหนักเพลลา 5	47.24	46.99	46.66	72.39	72.54	73.80	95.12	94.64	89.61
	Error Static (%)	0.34	-0.19	-0.90	5.43	5.64	7.47	10.56	10.00	4.17
	น้ำหนักกรวม	183.90	187.18	182.70	264.53	264.73	267.23	345.38	350.22	345.40
	Error Static (%)	-8.99	-7.37	-9.59	-8.65	-8.58	-7.72	-6.83	-5.52	-6.82
	จำนวนรอบ	8	8	8	6	6	6	6	6	6



ตารางที่ 5-7 ผลการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกประเภท 6 เพลา และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่	น้ำหนักบรรทุก 22.5 กก.			น้ำหนักบรรทุก 32 กก.			น้ำหนักบรรทุก 41.7 กก.			
	การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			
	ช่องจราจรซ้ายของสะพาน	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ความเร็วต่ำ (0.56 m/s)	น้ำหนักเพลา 1	17.51	15.66	15.54	21.83	18.70	22.49	30.24	29.84	29.41
	Error Static (%)	-25.32	-33.19	-33.69	-30.45	-40.41	-28.33	-24.63	-25.62	-26.70
	น้ำหนักเพลา 2	18.33	16.94	17.48	22.06	16.24	24.61	31.98	30.50	29.78
	Error Static (%)	-21.79	-27.73	-25.44	-29.72	-48.25	-21.58	-20.27	-23.98	-25.75
	น้ำหนักเพลา 3	42.83	42.36	43.17	61.60	61.08	61.46	81.24	81.30	79.78
	Error Static (%)	3.94	2.81	4.77	4.66	3.76	4.42	3.51	3.60	1.66
	น้ำหนักเพลา 4	42.83	42.36	43.17	61.60	61.08	61.46	81.24	81.30	79.78
	Error Static (%)	3.94	2.81	4.77	4.66	3.76	4.42	3.51	3.60	1.66
	น้ำหนักเพลา 5	48.13	47.60	48.67	68.27	71.50	66.62	87.80	89.15	88.10
	Error Static (%)	-1.86	-2.94	-0.76	5.44	10.43	2.89	4.31	5.92	4.67
	น้ำหนักเพลา 6	54.15	53.82	53.40	74.45	80.68	71.99	91.70	96.42	93.66
	Error Static (%)	13.11	12.43	11.55	8.42	17.49	4.83	3.86	9.21	6.08
	น้ำหนักรวม	223.78	218.76	221.45	309.82	309.29	308.66	404.21	408.53	400.53
	Error Static (%)	-1.07	-3.29	-2.10	-1.30	-1.47	-1.67	-1.33	-0.28	-2.22
	จำนวนรอบ	6	6	6	6	15	6	6	6	6



ตารางที่ 5-7 (ต่อ)

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ ช่องจราจรซ้ายของ สะพาน	น้ำหนักบรรทุก 22.5 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 32 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 41.7 กก. การทดสอบครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	ความเร็วปานกลาง (1.11 m/s)								
น้ำหนักเพลลา 1	10.45	14.05	15.52	15.61	19.53	18.64	38.36	26.27	31.35
Error Static (%)	-55.40	-40.22	-33.76	-50.26	-37.77	-40.60	-4.39	-34.50	-21.85
น้ำหนักเพลลา 2	18.18	16.75	16.70	18.85	22.11	20.85	34.70	28.00	32.35
Error Static (%)	-22.43	-28.53	-28.74	-39.92	-29.55	-33.55	-13.51	-30.19	-19.35
น้ำหนักเพลลา 3	42.21	41.86	41.73	61.03	60.61	61.44	81.39	79.59	81.13
Error Static (%)	2.45	1.61	1.28	3.68	2.98	4.39	3.71	1.42	3.37
น้ำหนักเพลลา 4	42.21	41.86	41.73	61.03	60.61	61.44	81.39	79.59	81.13
Error Static (%)	2.45	1.61	1.28	3.68	2.98	4.39	3.71	1.42	3.37
น้ำหนักเพลลา 5	47.84	46.83	45.46	69.50	65.29	67.68	85.54	85.94	86.98
Error Static (%)	-2.45	-4.52	-7.30	7.35	0.85	4.54	1.63	2.10	3.33
น้ำหนักเพลลา 6	53.65	52.85	50.81	78.60	69.48	74.15	91.76	93.10	95.34
Error Static (%)	12.07	10.39	6.14	14.45	1.18	7.99	3.93	5.45	7.99
น้ำหนักกรวม	214.56	214.18	211.98	304.64	297.66	304.24	413.16	392.53	408.30
Error Static (%)	-5.15	-5.32	-6.29	-2.95	-5.17	-3.08	0.85	-4.18	-0.33
จำนวนรอบ	7	7	6	6	6	6	7	6	6

ตารางที่ 5-7 (ต่อ)

ชนิดรถบรรทุกเคลื่อนที่	ช่องจราจรซ้ายของสะพาน	น้ำหนักบรรทุก 22.5 กก.			น้ำหนักบรรทุก 32 กก.			น้ำหนักบรรทุก 41.7 กก.		
		การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
ความเร็วสูง (1.67 m/s)	น้ำหนักเพลลา 1	10.62	11.52	8.78	11.79	13.48	12.57	24.12	23.42	22.27
	Error Static (%)	-54.67	-50.83	-62.52	-62.43	-57.05	-59.93	-39.87	-41.61	-44.50
	น้ำหนักเพลลา 2	11.81	14.56	12.55	11.82	13.18	13.80	26.61	27.51	26.01
	Error Static (%)	-49.61	37.88	-46.46	-62.33	-58.01	-56.03	-33.67	-31.43	-35.16
	น้ำหนักเพลลา 3	41.06	41.30	41.64	58.14	58.55	58.40	81.92	81.63	79.78
	Error Static (%)	-0.27	0.25	1.07	-1.20	-0.52	-0.78	4.38	4.01	1.66
	น้ำหนักเพลลา 4	41.06	41.30	41.64	58.14	58.55	58.40	81.92	81.63	79.78
	Error Static (%)	-0.27	0.25	1.07	-1.20	-0.52	-0.78	4.38	4.01	1.66
	น้ำหนักเพลลา 5	48.13	47.36	47.45	69.77	68.71	69.66	90.31	91.09	88.66
	Error Static (%)	-1.86	-3.43	-3.25	7.76	6.12	7.59	7.30	8.22	5.34
	น้ำหนักเพลลา 6	59.60	57.46	57.01	87.28	85.23	85.58	99.67	102.86	99.58
	Error Static (%)	24.49	20.03	19.10	27.11	24.12	24.62	12.88	16.49	12.79
	น้ำหนักรวม	212.35	213.54	209.10	296.97	297.72	298.41	404.57	408.15	396.10
	Error Static (%)	-6.13	-5.60	-7.56	-5.39	-5.16	-4.93	-1.24	-0.37	-3.31
	จำนวนรอบ	6	6	8	14	13	9	6	6	6



ตารางที่ 5-8 (ต่อ)

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ ช่องจราจรซ้ายของ สะพาน	น้ำหนักบรรทุก 25 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 35.8 กก. การทดสอบครั้งที่			น้ำหนักบรรทุก 46.5 กก. การทดสอบครั้งที่			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
	สะพาน									
ความเร็วปานกลาง (1.11 m/s)	น้ำหนักเพลลา 1	11.56	11.58	14.18	28.80	32.33	10.51	27.85	38.09	32.08
	Error Static (%)	-50.66	-50.59	-39.50	-10.19	0.78	-67.20	-29.00	-2.90	-18.25
	น้ำหนักเพลลา 2	14.96	14.87	17.26	26.58	31.19	25.89	31.23	40.09	36.52
	Error Static (%)	-36.16	-36.55	-26.37	-17.13	-2.76	-19.27	-20.39	2.17	-6.92
	น้ำหนักเพลลา 3	36.90	37.20	38.72	56.74	59.79	53.46	75.53	78.30	76.32
	Error Static (%)	-10.43	-9.69	-6.00	-1.96	3.31	-7.62	-6.09	-2.65	-5.11
	น้ำหนักเพลลา 4	36.90	37.20	38.72	56.74	59.79	53.46	75.53	78.30	76.32
	Error Static (%)	-10.43	-9.69	-6.00	-1.96	3.31	-7.62	-6.09	-2.65	-5.11
	น้ำหนักเพลลา 5	39.66	39.95	40.54	58.26	59.99	56.77	78.60	78.07	77.26
	Error Static (%)	-20.72	-20.13	-18.96	-5.11	-2.31	-7.54	-4.15	-4.79	-5.79
	น้ำหนักเพลลา 6	44.73	46.76	42.75	56.95	58.47	63.80	81.63	75.30	76.94
	Error Static (%)	26.68	32.42	21.07	5.56	8.36	18.26	18.87	9.65	12.04
	น้ำหนักเพลลา 7	44.73	46.76	42.75	56.95	58.47	63.80	81.63	75.30	76.94
	Error Static (%)	26.68	32.42	21.07	5.56	8.36	18.26	18.87	9.65	12.04
	น้ำหนักรวม	229.48	234.38	234.96	341.06	360.05	327.74	452.04	463.48	452.39
	Error Static (%)	-8.19	-6.23	-6.00	-2.34	3.09	-6.15	-1.45	1.03	-1.37
	จำนวนรอบ	10	9	10	10	9	10	10	9	10

ตารางที่ 5-8 (ต่อ)

กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่	น้ำหนักบรรทุก 25 กก.			น้ำหนักบรรทุก 35.8 กก.			น้ำหนักบรรทุก 46.5 กก.			
	ช่องจราจรซ้ายของ			การทดสอบครั้งที่			การทดสอบครั้งที่			
	สะพาน	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ความเร็วสูง (1.67 m/s)	น้ำหนักเพลลา 1	11.92	8.52	9.81	10.65	11.97	11.94	29.67	30.61	28.77
	Error (%)	-49.15	-63.64	-58.14	-66.77	-62.67	-62.76	-24.39	-21.99	-26.66
	น้ำหนักเพลลา 2	14.43	11.95	14.92	17.28	15.73	16.41	34.96	38.01	35.51
	Error (%)	-38.44	-49.02	-36.37	-46.11	-50.96	-48.82	-10.90	-3.11	-9.48
	น้ำหนักเพลลา 3	37.94	35.31	37.81	50.17	49.29	51.34	76.82	76.90	79.43
	Error (%)	-7.90	-14.27	-8.23	-13.31	-14.83	-11.28	-4.49	-4.39	-1.25
	น้ำหนักเพลลา 4	37.94	35.31	37.81	50.17	49.29	51.34	76.82	76.90	79.43
	Error (%)	-7.90	-14.27	-8.23	-13.31	-14.83	-11.28	-4.49	-4.39	-1.25
	น้ำหนักเพลลา 5	40.35	39.26	40.74	53.97	54.28	55.87	77.12	77.07	81.37
	Error (%)	-19.34	-21.52	-18.55	-12.10	-11.60	-9.01	-5.95	-6.01	-0.77
	น้ำหนักเพลลา 6	49.50	52.05	51.33	70.03	71.89	69.62	76.48	76.57	83.36
	Error (%)	40.15	47.40	45.34	29.78	33.24	29.03	11.37	11.51	21.39
	น้ำหนักเพลลา 7	49.50	52.05	51.33	70.03	71.89	69.62	76.48	76.57	83.36
	Error (%)	40.15	47.40	45.34	29.78	33.24	29.03	11.37	11.51	21.39
	น้ำหนักรวม	241.60	234.50	243.76	322.32	324.36	326.16	448.37	452.67	471.26
	Error Static (%)	-3.34	-6.18	-2.47	-7.70	-7.12	-6.60	-2.25	-1.31	2.73
	จำนวนรอบ	9	10	14	13	9	9	9	10	9

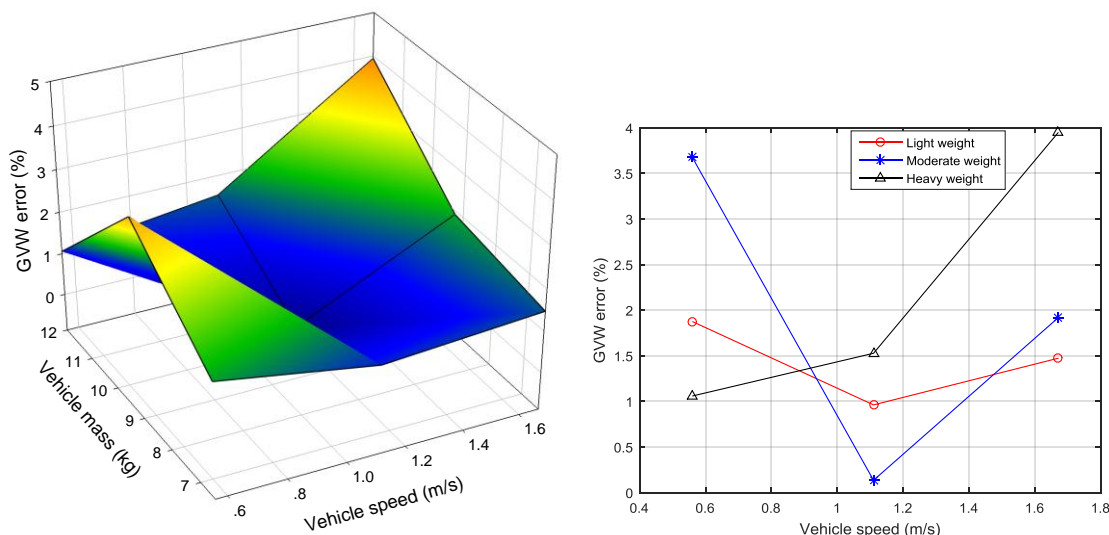
#### 4. อิทธิพลของความเร็วและมวลของรถบรรทุกที่มีผลต่อการคำนวณหาน้ำหนัก

เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วและมวลของรถบรรทุกที่มีผลต่อการคำนวณหาน้ำหนัก

จะทำการพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์จากกราฟ มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ ดังแสดงในภาพที่ 5-58 ถึงภาพที่ 5-63 โดยความสัมพันธ์สร้างจากผลการทดสอบทั้งหมด โดยแยกเป็นกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลลาถึง 7 เพลลา มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 2 เพลลา ดังแสดงในภาพที่ 5-58 พบว่าไม่ว่ารถบรรทุกจะ

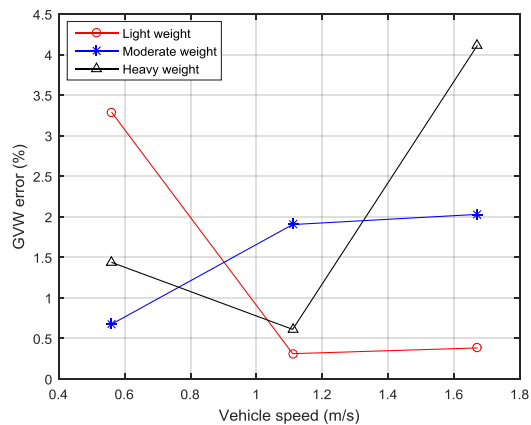
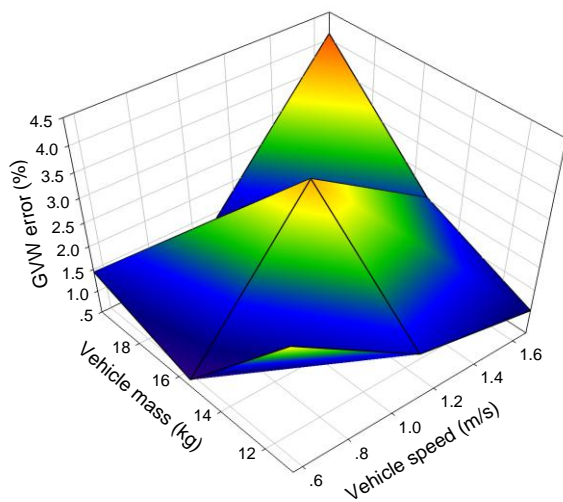
มีมวลน้อยหรือมีมวลมาก และจะทดสอบด้วยความเร็วต่ำหรือความเร็วสูงค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินประมาณร้อยละ 4



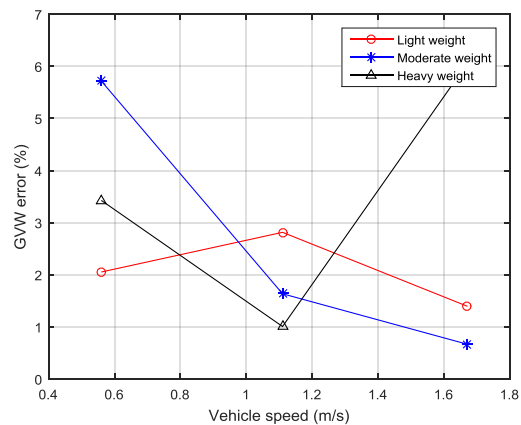
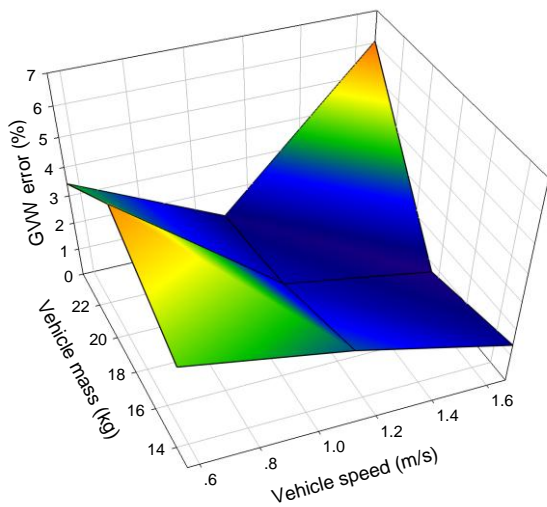
ภาพที่ 5-58 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 2 เพลา

จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 3 เพลา ดังแสดงในภาพที่ 5-59 พบว่ากรณีทดสอบด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเพิ่มน้ำหนักในการทดสอบนั้นส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบทุกกรณีพบว่ามีค่าไม่เกินประมาณร้อยละ 5

จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 4 เพลา ดังแสดงในภาพที่ 5-60 พบว่ากรณีทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเร็วช้าจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการทดสอบด้วยความเร็วที่มากขึ้น การทดสอบด้วยความเร็วสูงได้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบทุกกรณีพบว่ามีค่าไม่เกินประมาณร้อยละ 7

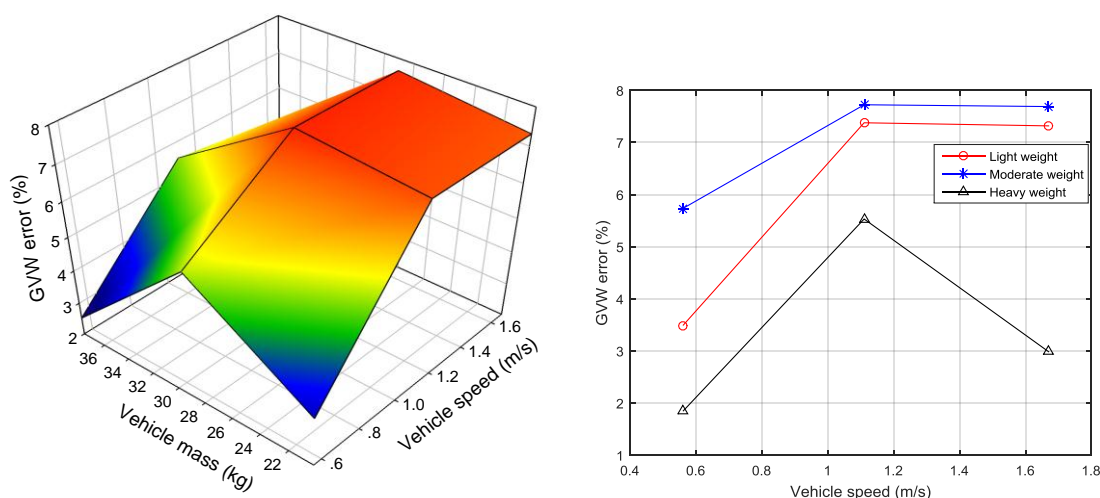


ภาพที่ 5-59 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทาง  
สถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 3 เพลา



ภาพที่ 5-60 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทาง  
สถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 4 เพลา

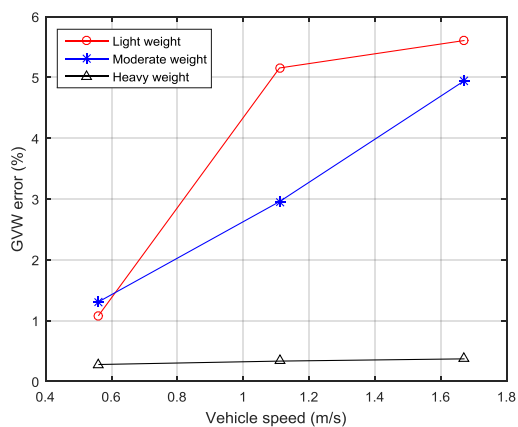
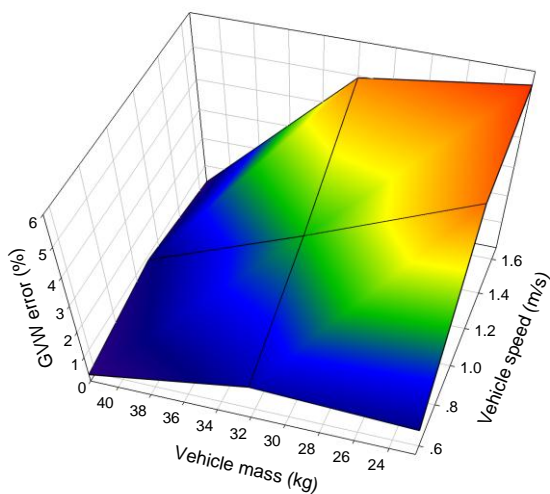
จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 5 เพลา ดังแสดงในภาพที่ 5-61 พบว่ากรณีทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเร็วช้าและมีน้ำหนักมากจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ากรณีทดสอบด้วยน้ำหนักเบาแล้วเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบทุกกรณีพบว่ามีค่าไม่เกินประมาณร้อยละ 8



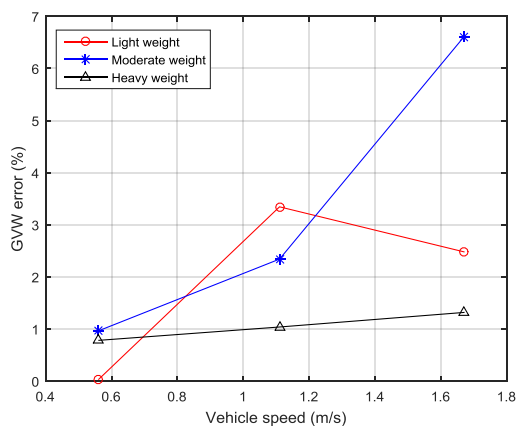
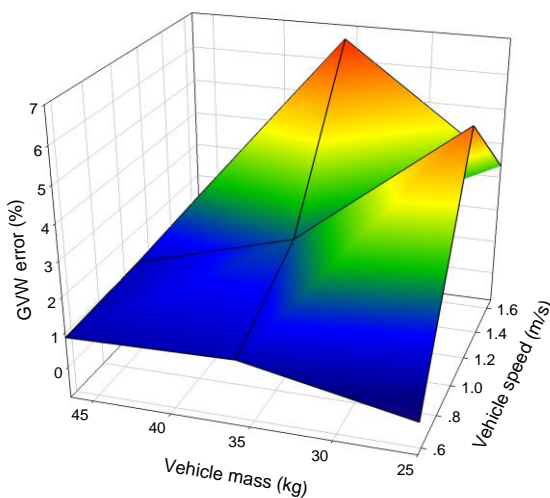
ภาพที่ 5-61 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 5 เพลา

จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 6 เพลา ดังแสดงในภาพที่ 5-62 พบว่ากรณีทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเร็วช้าและมีน้ำหนักมากจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ากรณีทดสอบด้วยน้ำหนักเบาแล้วเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบทุกกรณีพบว่ามีค่าไม่เกินประมาณร้อยละ 7





ภาพที่ 5-62 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 6 เพลา



ภาพที่ 5-63 ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 7 เพลา

จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความเร็ว และค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติ ๓ กรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 7 เพลา ดังแสดงในภาพที่ 5-63 พบว่ากรณีทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเร็วช้าและมีน้ำหนักมากจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ากรณีทดสอบด้วยน้ำหนักเบาแล้วเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดสอบทุกกรณีพบว่ามีค่าไม่เกินประมาณร้อยละ 7

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า เมื่อรถบรรทุกทดสอบมีมวลน้อยและทดสอบด้วยความเร็วสูงจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมมาก ในกรณีที่รถบรรทุกทดสอบมีมวลมากและทดสอบด้วยความเร็วต่ำจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมน้อย อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสังเกตได้ชัดเจนสำหรับกรณีการทดสอบรถบรรทุกประเภท 5 เพลา 6 เพลา และ 7 เพลา สำหรับการทดสอบกับรถบรรทุกกรณีอื่น ๆ ความสัมพันธ์ไม่เป็นไปตามทั้ง 3 กรณี แต่ยังพบว่าในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวณหาน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาความเร็วในขั้นตอนก่อนหน้าอีกด้วย

5. การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างกรณีการใช้ข้อมูลความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับข้อมูลความเร็ว และระยะห่างเพลาที่ได้จากการคำนวณ

ขั้นตอนแรกสำหรับการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกจะต้องทำการคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกก่อน จากนั้นจึงแปลงข้อมูลในรูปแกนของเวลาให้เป็นระยะทาง แล้วจึงทำการหาตำแหน่งเพลารถ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นการนำข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนมาใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกจึงส่งผลให้การหาน้ำหนักนั้นเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้น การตรวจสอบวิธีการที่นำเสนอว่ามีความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใดจึงสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้ข้อมูลจริงเป็นข้อมูลเริ่มต้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก แล้วนำผลการหาน้ำหนักมาเปรียบเทียบกับการหาน้ำหนักโดยการใช้ข้อมูลความเร็ว และระยะห่างเพลาที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 5-9 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงจากการคำนวณ สำหรับรถบรรทุกประเภท 2 เพล

		กรณีความเร็ว และ ระยะห่างเพลาจริง	กรณีความเร็ว และระยะห่าง เพลาจริงจากการคำนวณ
ความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็ว (%)		-	1.0976
ความคลาดเคลื่อนในการหา ระยะห่างเพล (%)	S1	-	6.2857
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักเพล (%)	P1	-9.1456	-9.1267
	P2	13.0323	15.0697
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักรวม (%)	GVW	1.8080	2.9715
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ	L/3	0.9987	0.9987
สัญญาณความเครียด (%)	L/2	0.9990	0.9989
	2L/3	0.9993	0.9992

จากตารางที่ 5-9 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็วมีค่าร้อยละ 1.09 ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมประมาณร้อยละ 1 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการหาน้ำหนักรวมกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพล

จากตารางที่ 5-10 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็วมีค่าร้อยละ -0.16 ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมประมาณร้อยละ 0.17 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการหาน้ำหนักรวมกรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพล

จากตารางที่ 5-11 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็วมีค่าร้อยละ 1.34 ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมประมาณร้อยละ 1.60 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการหาน้ำหนักรวมกรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพล

จากตารางที่ 5-12 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็วมีค่าร้อยละ 4.25 ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมประมาณร้อยละ 4.5 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการหาน้ำหนักรวมกรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพล

ตารางที่ 5-10 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณี  
ความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงจากการคำนวณ  
สำหรับรถบรรทุกประเภท 3 เพล

		กรณีความเร็ว และ ระยะห่างเพลาจริง	กรณีความเร็ว และระยะห่าง เพลาจริงจากการคำนวณ
ความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็ว (%)		-	-0.1627
ความคลาดเคลื่อนในการหา ระยะห่างเพล (%)	S1	-	3.4458
	S2	-	-10.7692
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักเพล (%)	P1	-11.9091	-14.4046
	P2	9.8324	10.7556
	P3	10.1623	11.7833
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักรวม (%)	GVW	3.6370	3.8157
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ	L/3	0.9993	0.9991
สัญญาณความเครียด (%)	L/2	0.9995	0.9994
	2L/3	0.9983	0.9980

จากตารางที่ 5-13 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็วมีค่าร้อยละ 2.70 ซึ่ง  
ส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมประมาณร้อยละ 3.7 ซึ่งมีผลโดยตรง  
ต่อการหาน้ำหนักรวมกรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพล

จากตารางที่ 5-14 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็วมีค่าร้อยละ 1.77 ซึ่ง  
ส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมประมาณร้อยละ 1.76 ซึ่งมีผลโดยตรง  
ต่อการหาน้ำหนักรวมกรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพล

ตารางที่ 5-11 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณี  
ความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงจากการคำนวณ  
สำหรับรถบรรทุกประเภท 4 เพล

		กรณีความเร็ว และ ระยะห่างเพลาจริง	กรณีความเร็ว และระยะห่าง เพลาจริงจากการคำนวณ
ความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็ว (%)		-	1.3417
ความคลาดเคลื่อนในการหา ระยะห่างเพล (%)	S1	-	6.7222
	S2	-	9.8000
	S3	-	-8.6923
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักเพล (%)	P1	-38.2976	-23.9964
	P2	-31.5696	-59.8204
	P3	14.6470	23.5909
	P4	13.0149	6.4043
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักรวม (%)	GVW	-2.3716	-3.9301
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ สัญญาณความเครียด (%)	L/3	0.9974	0.9967
	L/2	0.9980	0.9974
	2L/3	0.9976	0.9974

จากการเปรียบเทียบผลการหาน้ำหนักกรณีใช้ข้อมูลความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงพบว่า ผลการหาน้ำหนักรวมมีความถูกต้องเพิ่มขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนกรณีการหาน้ำหนักรวมรถบรรทุกประเภท 2-7 เพลพบว่าการใช้ข้อมูลความเร็วที่มีความคลาดเคลื่อนจะส่งผลต่อการหาค่าน้ำหนักรวมโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณี

ตารางที่ 5-12 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณี  
ความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงจากการคำนวณ  
สำหรับรถบรรทุกประเภท 5 เพล

		กรณีความเร็ว และ ระยะห่างเพลาจริง	กรณีความเร็ว และระยะห่าง เพลาจริงจากการคำนวณ
ความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็ว (%)		-	4.2599
	S1	-	7.1325
ความคลาดเคลื่อนในการหา ระยะห่างเพล (%)	S2	-	-6.3846
	S3	-	13.0959
	S4	-	14.5647
	P1	-35.4702	-45.4955
	P2	-1.7871	-16.7458
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักเพล (%)	P3	-1.2344	-16.1009
	P4	-4.0701	36.7453
	P5	9.8520	20.7959
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักรวม (%)	GVW	0.0870	-4.6481
	L/4	0.9990	0.9983
	L/3	0.9992	0.9983
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ สัญญาณความเครียด (%)	L/2	0.9996	0.9992
	2L/3	0.9996	0.9984
	3L/4	0.9996	0.9985

ตารางที่ 5-13 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณี  
ความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงจากการคำนวณ  
สำหรับรถบรรทุกประเภท 6 เพล

		กรณีความเร็ว และ ระยะห่างเพลาจริง	กรณีความเร็ว และระยะห่าง เพลาจริงจากการคำนวณ
ความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็ว (%)		-	2.6960
ความคลาดเคลื่อนในการหา ระยะห่างเพล (%)	S1	-	4.5556
	S2	-	7.5143
	S3	-	-9.0000
	S4	-	10.4658
	S5	-	3.7412
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักเพล (%)	P1	-33.5269	-36.8390
	P2	-27.6563	-27.5434
	P3	-0.4219	-2.0825
	P4	0.2636	-1.1883
	P5	0.8308	17.8892
	P6	6.7552	8.1289
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักรวม (%)	GVW	-1.5837	-4.4989
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ สัญญาณความเครียด (%)	L/4	0.9988	0.9987
	L/3	0.9987	0.9986
	L/2	0.9992	0.9992
	2L/3	0.9991	0.9988
	3L/4	0.9994	0.9992

ตารางที่ 5-14 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระหว่างการใช้ข้อมูลกรณี  
ความเร็ว และระยะห่างเพลาจริงกับกรณีความเร็ว และระยะห่างเพลาจากการคำนวณ  
สำหรับรถบรรทุกประเภท 7 เพลา

		กรณีความเร็ว และ ระยะห่างเพลาจริง	กรณีความเร็ว และระยะห่าง เพลาจากการคำนวณ
ความคลาดเคลื่อนในการหาความเร็ว (%)		-	1.7705
	S1	-	5.0556
	S2	-	3.5429
ความคลาดเคลื่อนในการหา ระยะห่างเพลา (%)	S3	-	-3.0000
	S4	-	4.3648
	S5	-	1.7143
	S6	-	-1.9333
	P1	2.0956	-0.8017
	P2	-6.9253	-7.6215
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักเพลา (%)	P3	9.5616	10.2066
	P4	9.4277	10.0990
	P5	-20.9307	-17.9324
	P6	4.7201	9.3115
	P7	0.8936	6.4002
ความคลาดเคลื่อนในการหา น้ำหนักรวม (%)	GVW	-0.1098	1.8657
	L/4	0.9997	0.9997
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ สัญญาณความเครียด (%)	L/3	0.9998	0.9998
	L/2	0.9998	0.9997
	2L/3	0.9999	0.9998
	3L/4	0.9999	0.9998



## 6. ระดับความถูกต้องในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุก

จากการทดสอบการคำนวณน้ำหนักบรรทุกของระบบทุกทั้ง 6 ประเภท พบว่า

6.1 กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 94.70

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 95.23 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

6.2 กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 88.36

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.53 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

6.3 กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.12

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.55 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

6.4 กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 88.41

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 89.34 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

6.5 กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.43

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 93.71 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

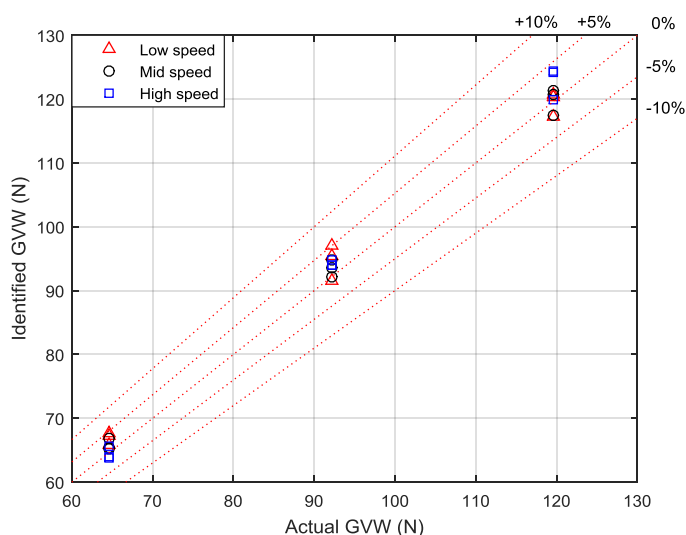
6.6 กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.81

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.29 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

และสำหรับกรณีการทดสอบทั้งหมด 162 การทดสอบพบว่า มีค่าความถูกต้องร้อยละ 88.36, 91.42

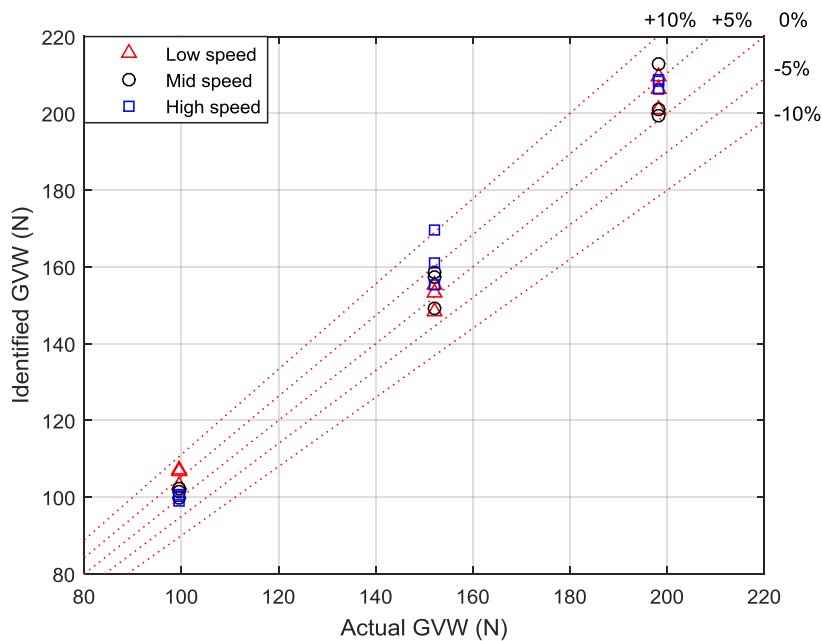
ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และ 95 โดยรายละเอียดดังแสดงภาพที่ 5-64 ถึงภาพที่ 5-70 และ

ตารางที่ 5-15

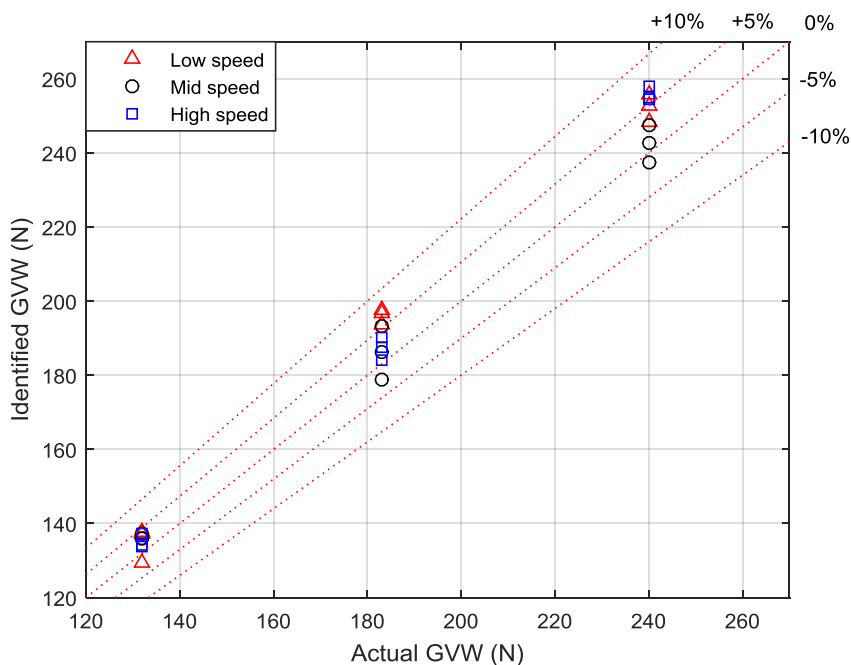


ภาพที่ 5-64 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักจริงกับน้ำหนักจากการคำนวณ กรณี

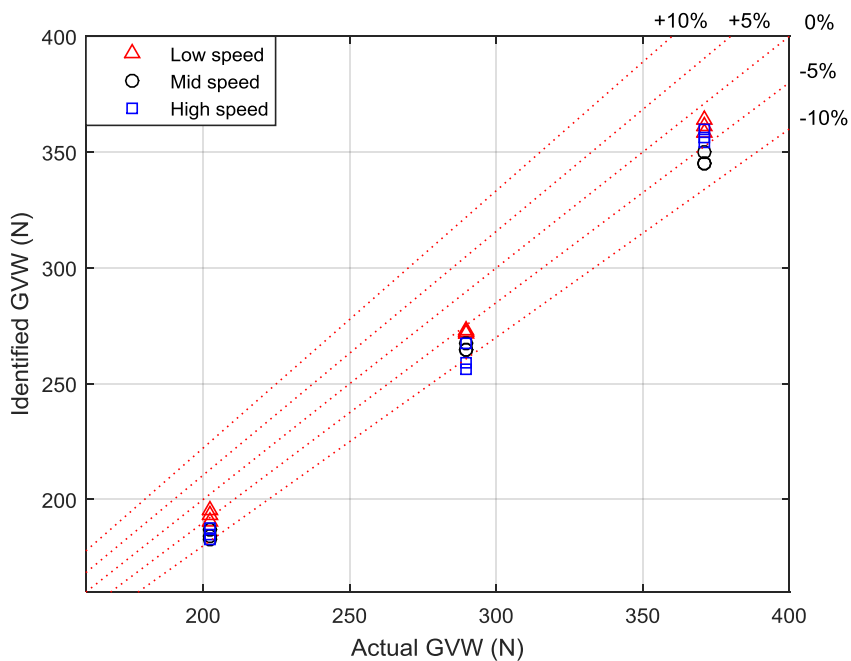
รถบรรทุกประเภท 2 เพลา



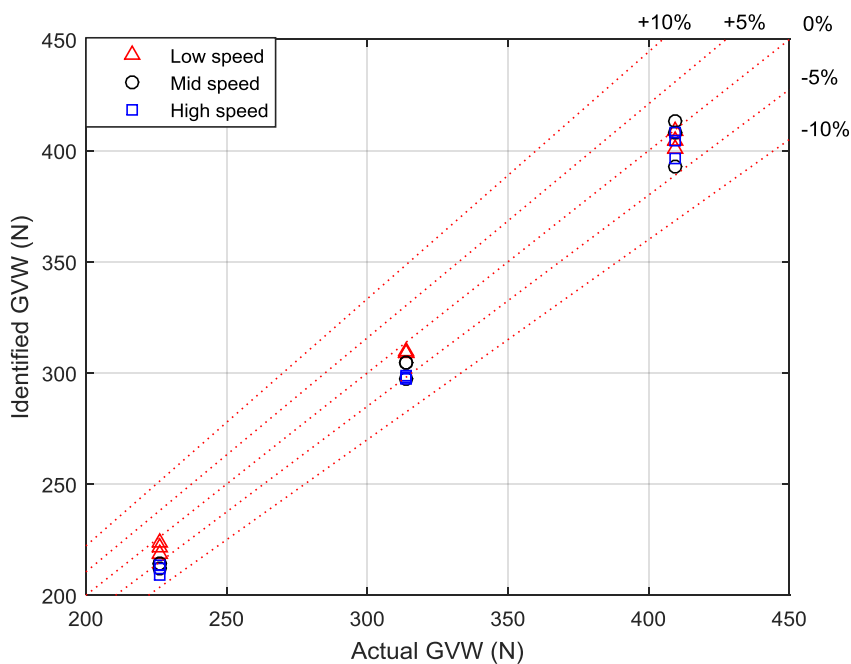
ภาพที่ 5-65 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา



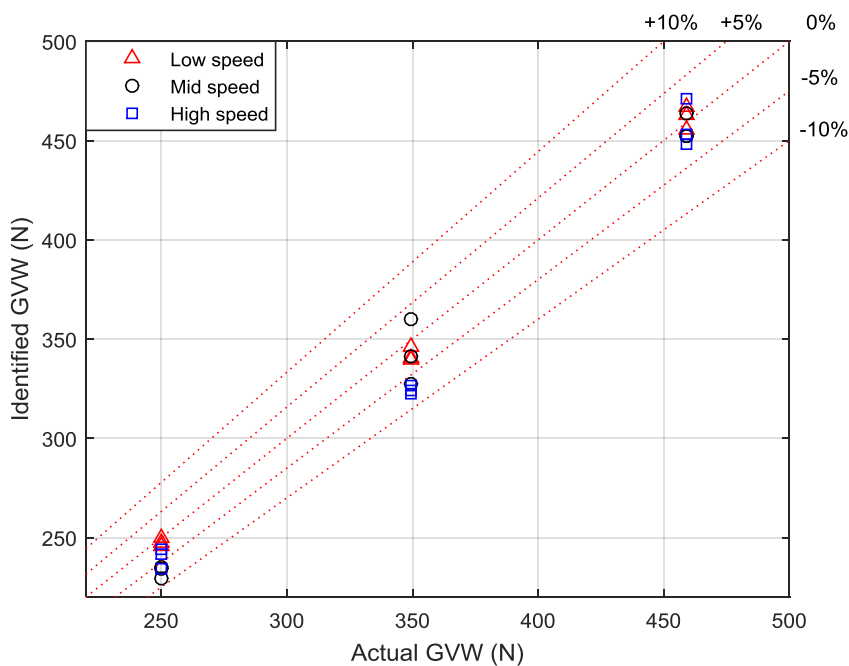
ภาพที่ 5-66 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



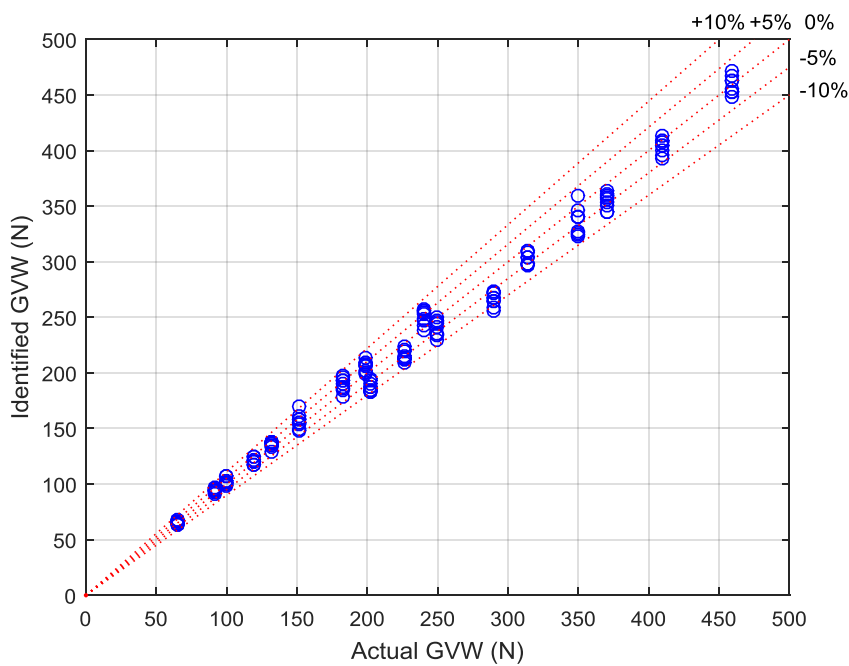
ภาพที่ 5-67 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักจริงกับน้ำหนักจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



ภาพที่ 5-68 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักจริงกับน้ำหนักจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา



ภาพที่ 5-69 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลลา



ภาพที่ 5-70 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักรวมจริงกับน้ำหนักรวมจากการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลลาถึง 7 เพลลา

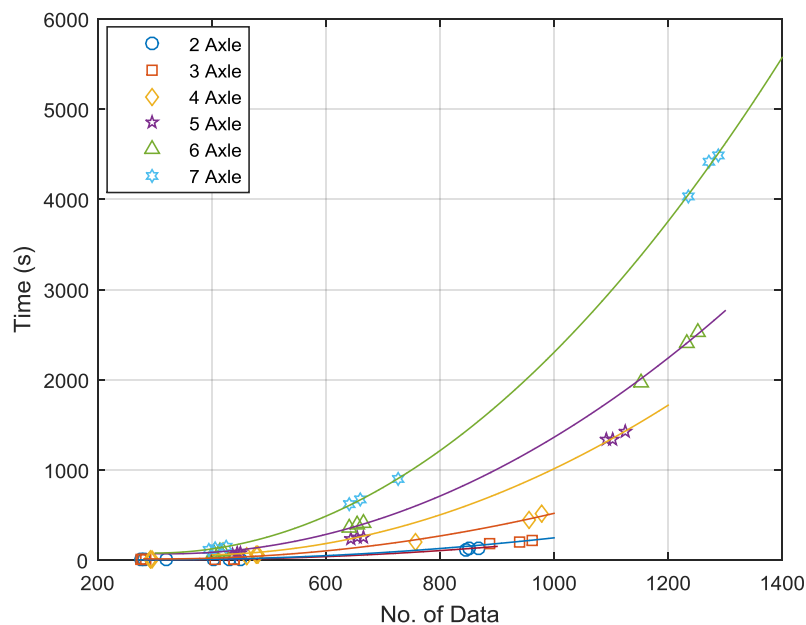
ตารางที่ 5-15 ระดับความเชื่อมั่นและค่าความถูกต้องในการคำนวณหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

ประเภทรถบรรทุก		ความถูกต้อง (%)						
		2 เพลา	3 เพลา	4 เพลา	5 เพลา	6 เพลา	7 เพลา	ทุกกรณี
	100 (%)	94.71	88.36	92.12	88.41	92.43	91.81	88.36
ความเชื่อมั่น	95 (%)	95.23	92.50	92.55	89.34	93.71	92.29	91.42
	90 (%)	95.96	92.74	93.52	90.41	94.40	93.39	92.55

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างเพลลาในขั้นตอนก่อนหน้า ซึ่งความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ส่งผลให้การคำนวณน้ำหนักเกิดความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ในการตรวจวัดข้อมูลเป็นการตรวจวัดข้อมูลความเครียดทางพลศาสตร์ที่รวมอยู่กับสัญญาณรบกวนแต่การคำนวณสัญญาณความเครียดเป็นวิธีการทางสถิติ ในการคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกจึงเกิดความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคสนามเพื่อเป็นการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

#### 7. ระยะเวลาในการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุก

ในการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ผล พบว่าในการเก็บข้อมูลที่ใช้ค่าความถี่ในการเก็บข้อมูลที่เท่ากัน กรณีการทดสอบด้วยความเร็วต่ำจะต้องวิเคราะห์ข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูลมากกว่ากรณีการทดสอบด้วยความเร็วสูง ดังนั้นในการคำนวณในกรณีทดสอบด้วยความเร็วต่ำจะใช้เวลามากกว่ากรณีการทดสอบด้วยความเร็วสูง สำหรับประเภทรถบรรทุกทดสอบที่มีความยาวเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การบันทึกข้อมูลมีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วยจึงทำให้การคำนวณนั้นต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และสำหรับวิธีการคำนวณซ้ำก็ส่งผลต่อระยะเวลาในการคำนวณที่มากขึ้นในกรณีที่มีจำนวนข้อมูลมาก ๆ เท่านั้น โดยรายละเอียดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณดังแสดงในภาพที่ 5-71 และรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถดูได้จากภาคผนวก ค ระยะเวลาในการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุก



ภาพที่ 5-71 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2-7 เพลา

จากภาพที่ 5-71 พบว่าเมื่อจำนวนข้อมูลเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการคำนวณก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งรายละเอียดของระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-10

ตารางที่ 5-16 ระยะเวลาในการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุก

ประเภทรถบรรทุก	จำนวนข้อมูล		ระยะเวลา (วินาที)	
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	น้อยที่สุด	มากที่สุด
2 เพลา	300	900	< 90	150
3 เพลา	300	1,000	< 90	200
4 เพลา	300	1,000	< 90	500
5 เพลา	300	1,100	< 90	1,400
6 เพลา	300	1,200	< 90	2,250
7 เพลา	300	1,300	< 90	4,500

## บทที่ 6

### สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่จากผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยแบบจำลองย่อส่วน พบว่าการจำแนกประเภทถบรทุกด้วยฟังก์ชัน *Findpeaks* จากโปรแกรม MATLAB พร้อมด้วยการใช้เงื่อนไขในการจำแนกจากลักษณะทางกายภาพของถบรทุกสามารถจำแนกถบรทุกได้อย่างถูกต้องในทุกกรณี และการใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน และใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) เพื่อคำนวณหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานสามารถหาน้ำหนักรวมได้อย่างถูกต้องจากการทดสอบทั้งหมด 162 การทดสอบได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

#### การหาความเร็วถบรทุกด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การคำนวณความเร็วถบรทุกโดยใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีศึกษาถบรทุกประเภท 2 เพลลา ถึงถบรทุกประเภท 7 เพลลา จากการศึกษาพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถหาความเร็วของถบรทุกได้ทุกกรณี มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.74 8.96 10.62 8.40 9.81 และ 10.63 ตามลำดับ สำหรับระดับความเชื่อมั่นในการหาความเร็วที่ร้อยละ 95 ของถบรทุกประเภท 2 เพลลา ถึงประเภท 7 เพลลา มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.17 93.64 90.19 92.81 92.50 89.69 และ 91.26 ตามลำดับ

#### การจำแนกประเภทถบรทุก

การคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาถบรทุกสามารถคำนวณได้ และสามารถจำแนกประเภทถบรทุกได้ทุกประเภทตามเงื่อนไขที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของถบรทุก ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาระยะห่างเพลลาของถบรทุกเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการคำนวณหาความเร็ว อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์และระดับสัญญาณรบกวนของระบบ อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอสามารถจำแนกประเภทของถบรทุกได้อย่างถูกต้องในทุกกรณีโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาหรือ FAD Sensor ซึ่งข้อมูลทางด้านความเร็วถบรทุก และประเภทของถบรทุก

จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการนำไปคำนวณหาน้ำหนัก และตรวจจ็ับรถบรรทุกที่บรรทุกน้ำหนักเกินกว่ากฎหมายกำหนด

### การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่

การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่าน โครงสร้างสะพานจากข้อมูลทางด้านความเร็วและประเภทรถบรรทุกที่คำนวณได้ในขั้นตอนก่อนหน้า พบว่าสามารถหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้อย่างถูกต้องสำหรับทุกกรณีศึกษาโดยมีค่าความถูกต้องร้อยละ 88.36 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 และมีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.42 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับค่าความถูกต้องในการทายน้ำหนักกรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลาถึง 7 เพลา มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6-1 ระดับความเชื่อมั่นและค่าความถูกต้องในการคำนวณหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

ประเภทรถบรรทุก		ความถูกต้อง (%)						ทุกกรณี
		2 เพลา	3 เพลา	4 เพลา	5 เพลา	6 เพลา	7 เพลา	
ความเชื่อมั่น	100 (%)	94.71	88.36	92.12	88.41	92.43	91.81	88.36
	95 (%)	95.23	92.50	92.55	89.34	93.71	92.29	91.42

### เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าหาข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์น้อยกว่า 300 ข้อมูลจะใช้เวลาวิเคราะห์ไม่มากนักโดยใช้เวลาประมาณไม่เกิน 1.5 นาที ในการประมวลผล หากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เกินกว่า 1,000 ข้อมูล จะทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเกินกว่า 20 นาที โดยการศึกษานี้มีบางกรณีที่จำนวนข้อมูลมากถึง 1,300 ข้อมูลแล้วต้องใช้เวลาในการคำนวณเกินกว่า 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการประมวลผลขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มี CPU รุ่น Core (TM) 2 Duo 2.26 GHz ซึ่งหากใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการประมวลผลได้ดีกว่านี้ก็จะทำให้ระยะเวลาในการคำนวณนั้นสั้นลงได้



## ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

1. ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดน้ำหนักทางพลศาสตร์ในขณะที่ทำการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบพฤติกรรมจริงของน้ำหนัก เพื่อนำมาตรวจสอบความถูกต้องกับน้ำหนักเพลาที่คำนวณได้
2. ควรใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูงสามารถควบคุมความเร็วได้คงที่ และใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่มีความเสถียรสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนลงได้
3. ควรศึกษาในกรณีที่มีรถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานผิวขรุขระ
4. ควรศึกษาในกรณีที่มีรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่บนสะพาน
5. ควรศึกษาในกรณีที่มีความยาวช่วงสะพานมีความแตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง

1. การปรับเทียบแบบจำลองมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการคำนวณหาน้ำหนัก ในการนำไปใช้งานควรปรับเทียบทุกครั้ง
2. พื้นผิวสะพานไม่ควรมีหลุมมีบ่อเนื่องจากจะทำให้สัญญาณมีความแปรปรวนสูงแล้วทำให้ผลการหาน้ำหนักมีความถูกต้องน้อยลง

## บรรณานุกรม

- ชวิษ์ อัครวิทยาภูมิ. (2545). การเพิ่มความถูกต้องของการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิคมเดช วีระฉันทะชาติ. (2546). การหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาของยานพาหนะบนสะพานจากสัญญาณความเครียด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- पालพิพัฒน์ แสงชูวงศ์. (2550). การหาน้ำหนักจากโมเมนต์ค้ำของสะพานโดยปราศจากการตรวจจับเพลลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล. (2545). การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัทรพงษ์ อาสนจินดา. (2546). การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาณุ ฟุ้งสุข. (2547). การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะรัตน์ อุฬหัสสา. (2553). การหาน้ำหนักเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยผลตอบสนองของโมเมนต์ค้ำของสะพาน. โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ศุภชัย เชื้อเกตุ และ พัทรพงษ์ อาสนจินดา. (2558). การหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, (หน้า 1-8). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- สมพล มาทวิโชติกุล ชีระชัย คีสมสุข และ ทศพล ปิ่นแก้ว. (2559). ระบบอัตโนมัติสำหรับการหา น้ำหนักและประเภทของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน. ใน *การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*, (หน้า 230-236). สงขลา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- Asnachinda, P., Pinkaew, T. & Laman, J. A. (2008). *Multiple vehicle axle load identification from continuous bridge bending moment*. Journal of Engineering Structure. 30(10), 2800-2817.
- Asnachinda, P. (2011). *Identification of Axle Spacing and Axle Loads of Moving Truck Using Dynamic Bridge Response*. IABSE-IASS 2011, The 35th International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Annual Symposium and the 52nd International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Annual Symposium, Queen Elizabeth II Conference Center, London, United Kingdom.
- Liljencrantz, A., Karoumi, R. & Olofsson, P. (2007). *Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic*, Journal of Computers and Structures. 85, 80-88.
- Chan, T. H. T., Law, S. S., Yung, T. H. & Yuan, X. R. (1999). *An Interpretive Method for Moving Force Identification*. Journal of Sound and Vibration. 219(3), 503-524.
- Chan, T. H. T., Law S. S. & Yung, T. H. (2000). *Moving Force Identification Using an Existing Prestressed Concrete Bridge*. Engineering Structures. 22, 1261-1270.
- Dempsey, A.T., O'Brien, E.J. & O'Connor, J.M. (1995). *A bridge weigh-in-motion system for the determination of gross vehicle weights*. In Post Proceedings of First European Conference on Weigh-In-Motion of Road Vehicles, eds. B. Jacob et al., ETH, Zurich: 239-249.
- European Commission 4th Framework Programme Transport (2001). *Weighing-in-motion of Axle and Vehicle for Europe (WAVE) – Bridge WIM systems (B-WIM)*, University College Dublin.
- Laman, J. A., & Nowak, A. S. (1996). *Fatigue-Load Models for Girder Bridges*. Journal of Structural Engineering. 122(7), 726-733.
- Law, S. S., Chan, T. H. T., & Zeng, Q. H. (1999). *Moving Force Identification a Frequency and Time Domains Analysis*. Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control. 121, 394-401.

- Law, S. S., Chan, T. H. T., & Zeng, Q. H. (2001). *Regularization in Moving Force Identification*. Journal of Engineering Mechanics. 127(2), 136-148.
- Law, S. S., & Fang, Y. L. (2001). *Moving Force Identification : Optimal State Estimation Approach*. Journal of Sound and Vibration. 239(2), 233-254.
- Leming, S. K., & Stalford, H. L. (2002). *Bridge weigh-in-motion system development using static truck/bridge models*. Proceeding of the American Control Conference. Anchorage, Alaska, 3672-3677.
- Leming, S. K., & Stalford, H. L. (2003). *Bridge Weigh-in-Motion System Development Using Superposition of Dynamic Truck/Static Bridge Interaction*. Proceeding of the American Control Conference. Denver, Colorado, 815-820.
- Pinkaew, T. (2006). *Identification of Vehicle axle loads from bridge responses using update static component technique*. Journal of Engineering Structures. 28(11), 1599-1608.
- Pinkaew, T. & Asnachinda, P. (2007). *Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicle from the bending moment of bridge*. Journal of Engineering Structure. 29(9), 2282-2293.
- Tilly, G.P. (1986). *Dynamic Behavior of Concrete Structures Report of the Rilem 65-MDB Committee*. Materials and Structures, 19(6), 460-460.
- Thater, G., Chang P., Schelling, D. R. & Fu, C. C. (1998). *Estimation of Bridge Static Response and Vehicle Weights by Frequency Response Analysis*. Canada Journal of Civil Engineering. 25, 631- 639.
- Yu, L. & Chan, T. H. T. (2002). *Moving Force Identification from Bending Moment Response of Bridge*. Journal of Structural Engineering and Mechanics. 14(2), 151-170.
- Zhu, X. Q. & Law, S. S. (1999). *Moving Forces Identification on a Multi-Span Continuous Bridge*. Journal of Sound and Vibration. 228(2), 377-396.
- Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2000). *Identification of Vehicle Axle Loads From Bridge Dynamic Responses*. Journal of Sound and Vibration. 236(4), 705-724.
- Zhu, X. Q., & Law, S. S. (2002). *Moving Loads Identification Through Regularization*. Journal of Engineering Mechanics ASCE. 128(5), 989-1000.
- Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2003a). *Identification of Moving Interaction Forces with Incomplete Velocity Information*. Mechanical Systems and Signal Processing. 17(6), 1349-1366.

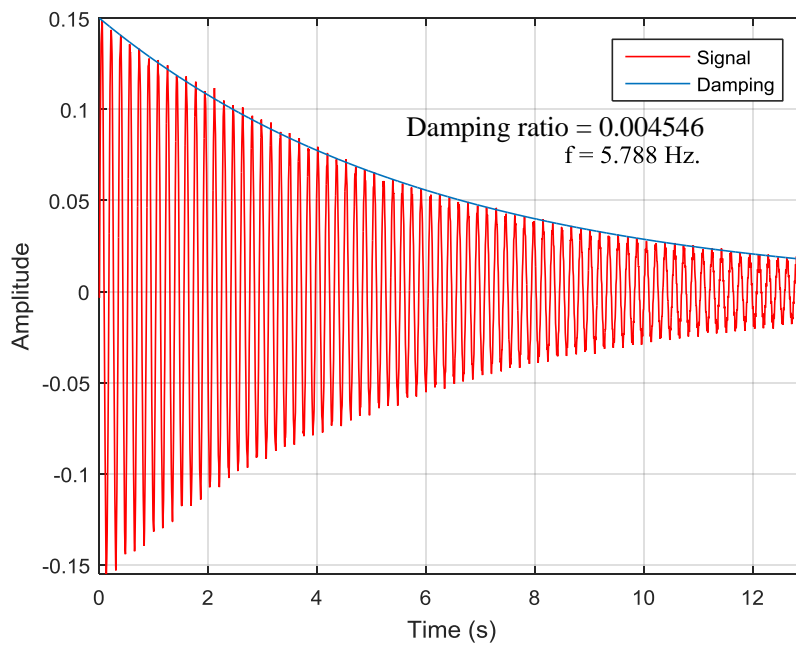
Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2003b). *Dynamic axle and wheel loads identification: laboratory studies*. Journal of Sound and Vibration. 268, 855-879.

Znidaric, A., O'Brien, E. (2001). *Weighting-in-motion of Axles and Vehicle for Europe (WAVE)*. Report of work package 1.2. Bridge WIM Systems (B-WIM), Slovenia.

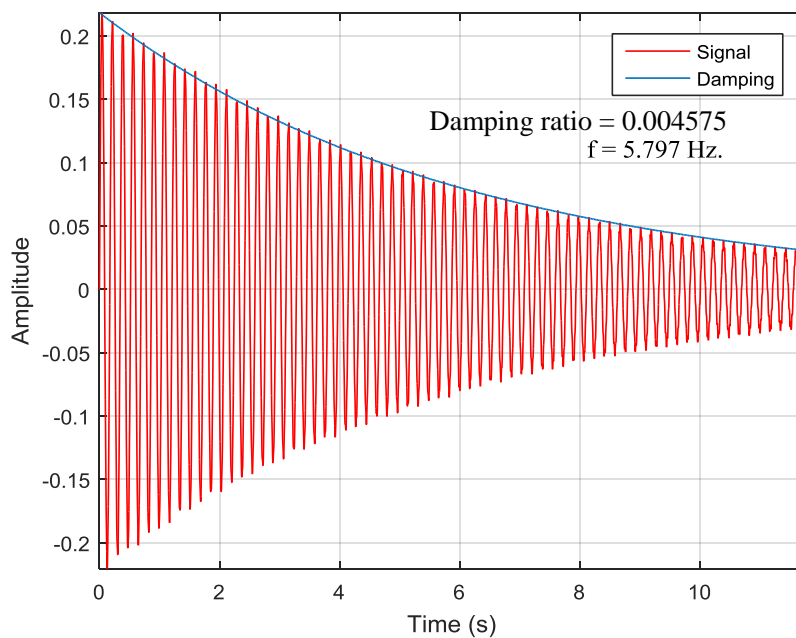
ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

ผลการหาความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหวังของสะพานทดสอบ

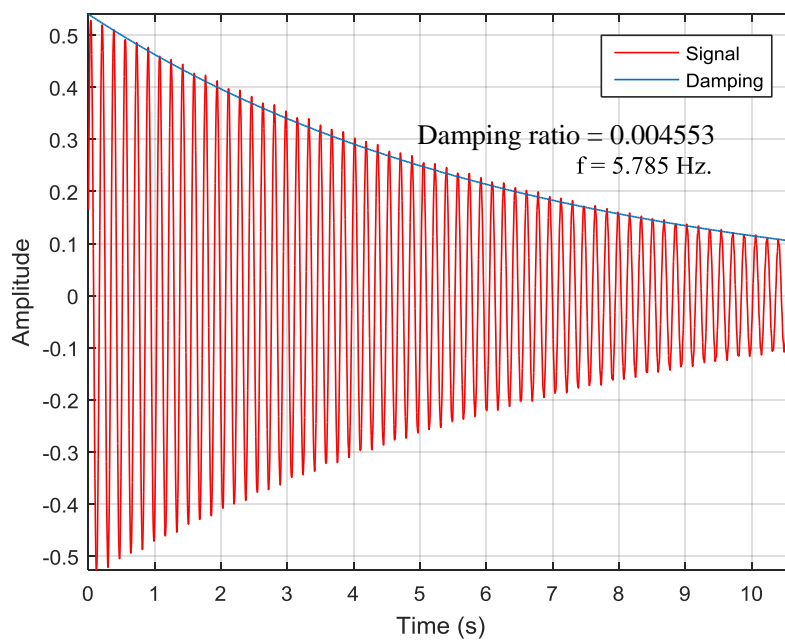


ภาพภาคผนวกที่ ก-1 ค่าสัดส่วนความหน่วงของสะพานทดสอบ กรณีทดสอบครั้งที่ 1



ภาพภาคผนวกที่ ก-2 ค่าสัดส่วนความหน่วงของสะพานทดสอบ กรณีทดสอบครั้งที่ 2

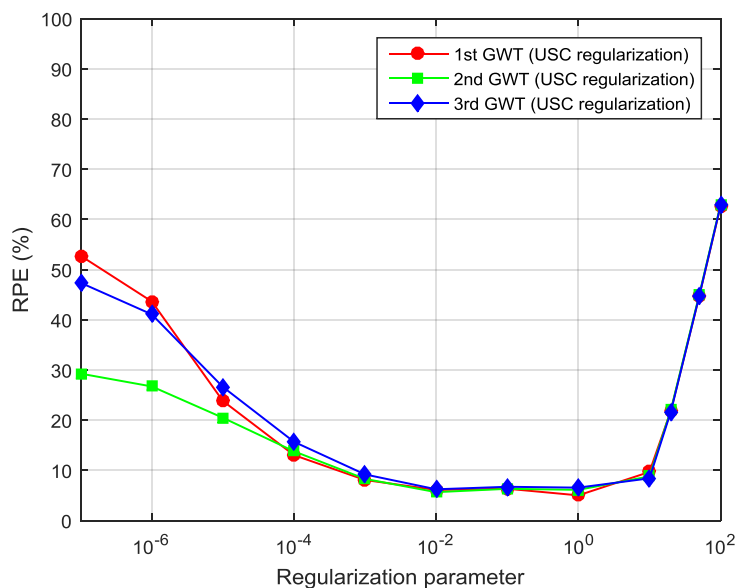




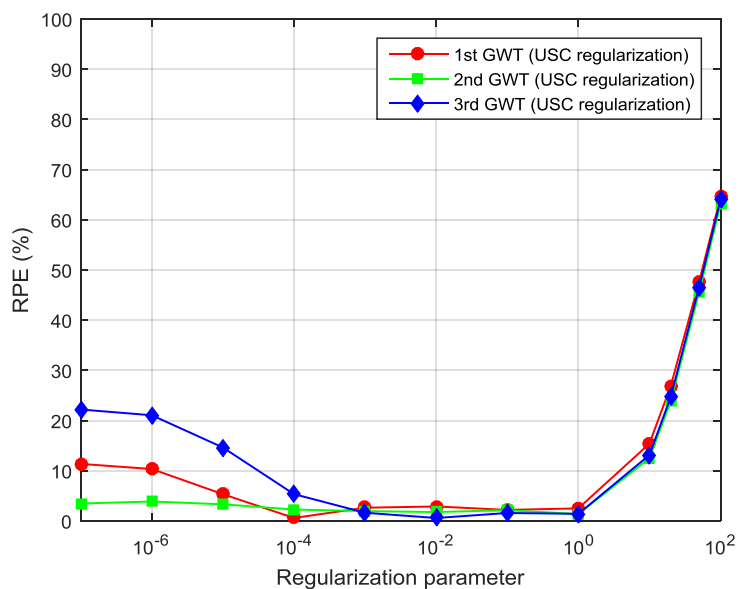
ภาพภาคผนวกที่ ก-3 ค่าสัดส่วนความหน่วงของสะพานทดสอบ กรณีทดสอบครั้งที่ 3

ภาคผนวก ข

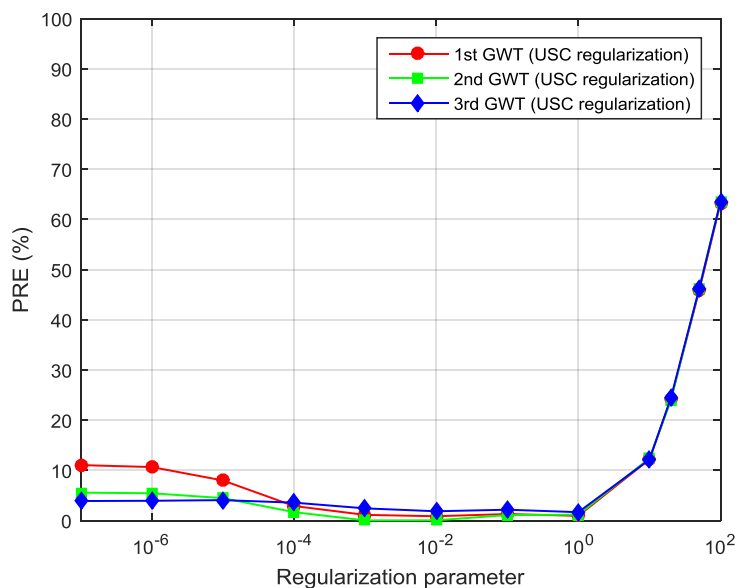
ผลการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter,  $\lambda$ ) ที่เหมาะสม



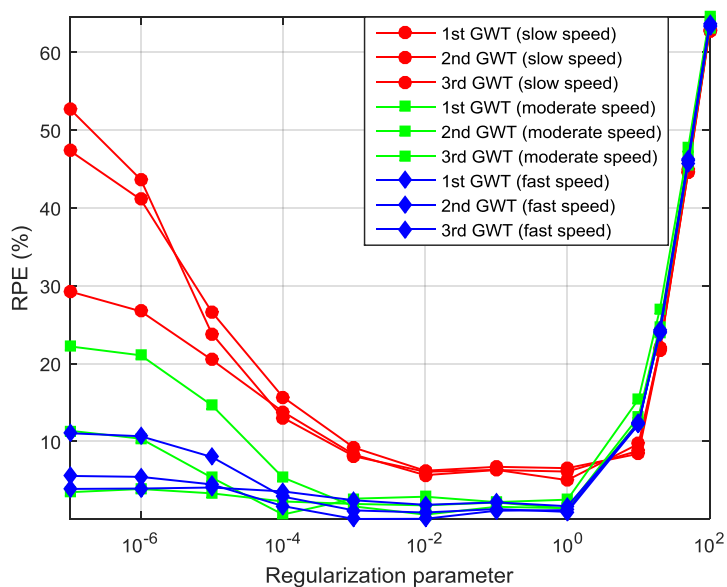
ภาพภาคผนวกที่ ข-1 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 2 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง



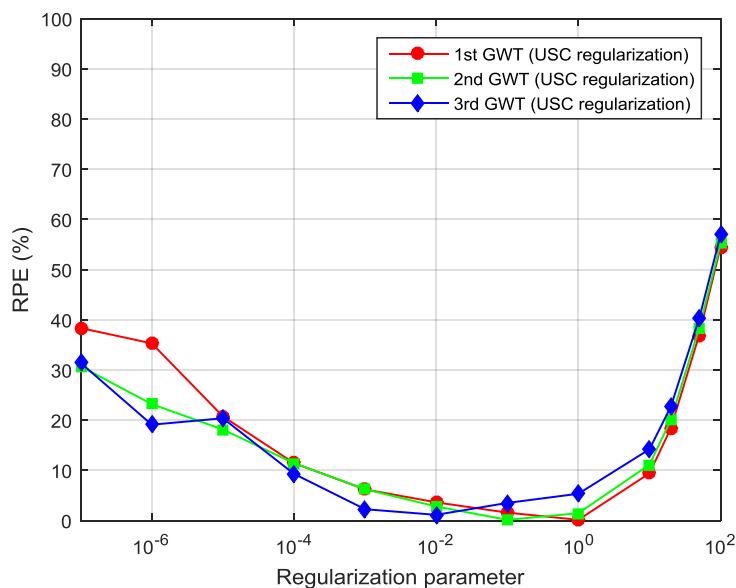
ภาพภาคผนวกที่ ข-2 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 2 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตร/ชั่วโมง



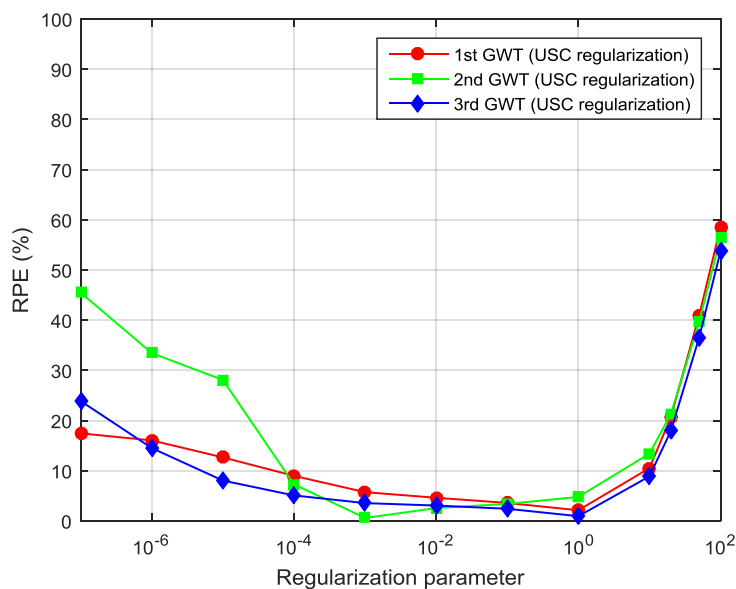
ภาพภาคผนวกที่ ข-3 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 2 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง



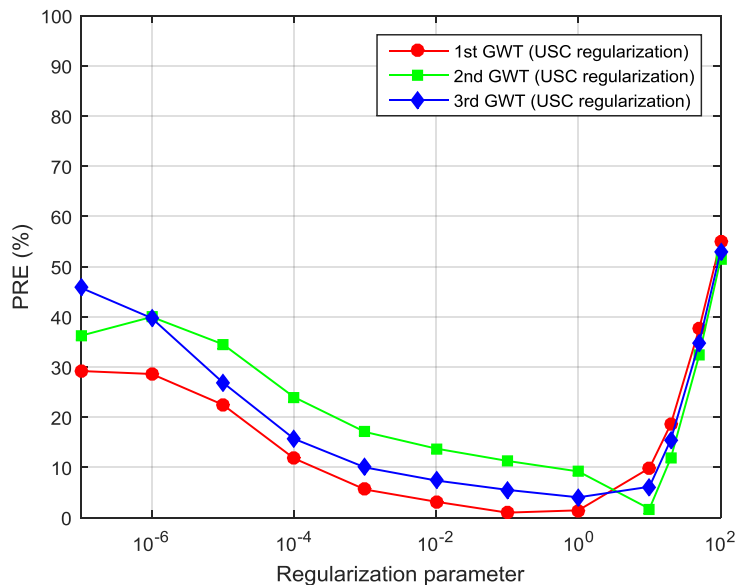
ภาพภาคผนวกที่ ข-4 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 2 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20, 40, 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง



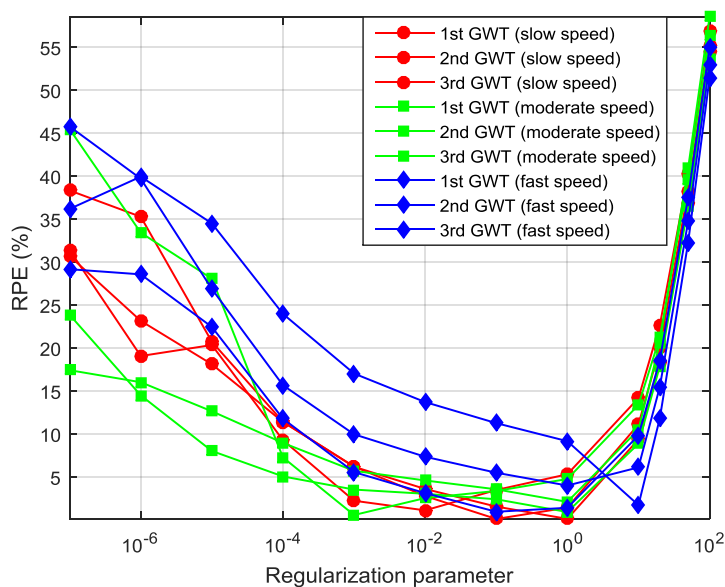
ภาพภาคผนวกที่ ข-5 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 3 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง



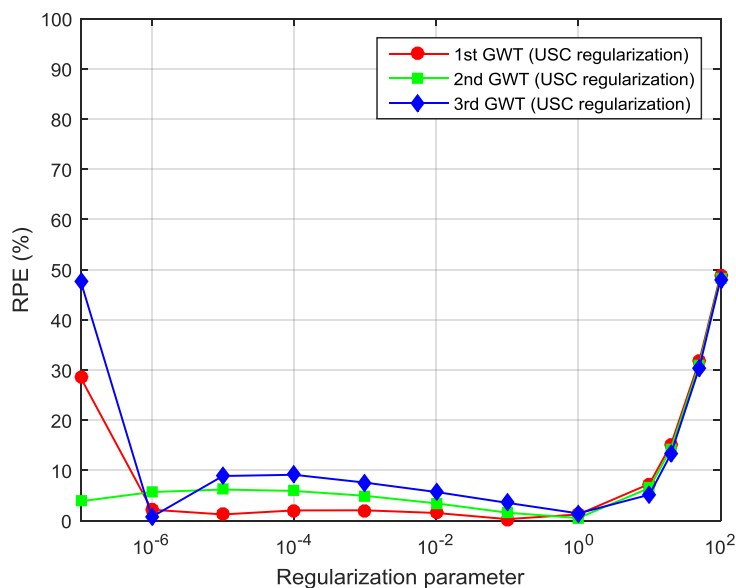
ภาพภาคผนวกที่ ข-6 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 3 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตร/ชั่วโมง



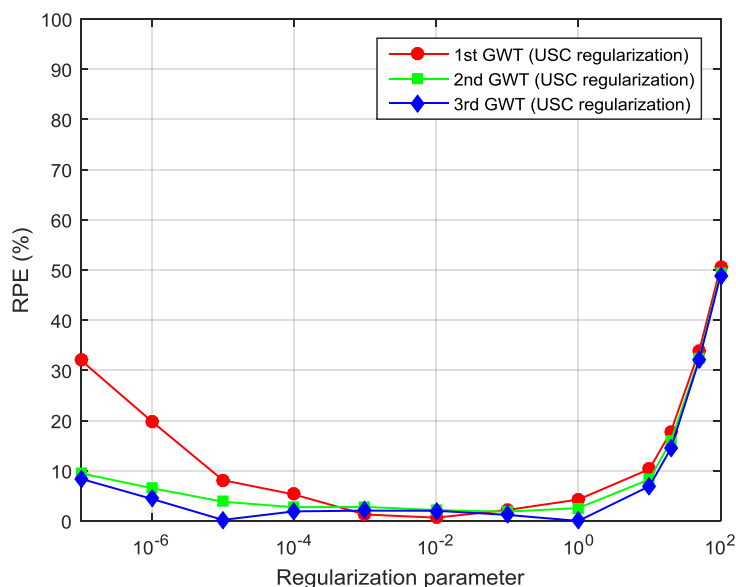
ภาพภาคผนวกที่ ข-7 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 3 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง



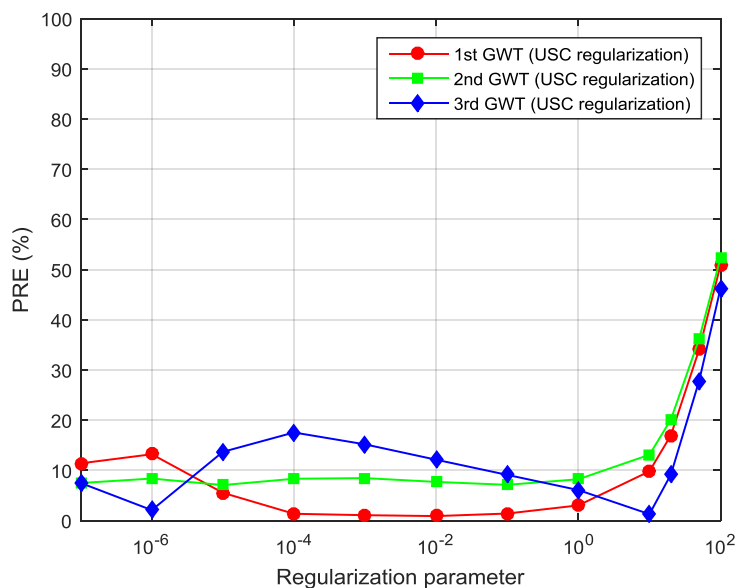
ภาพภาคผนวกที่ ข-8 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 3 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20, 40, 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง



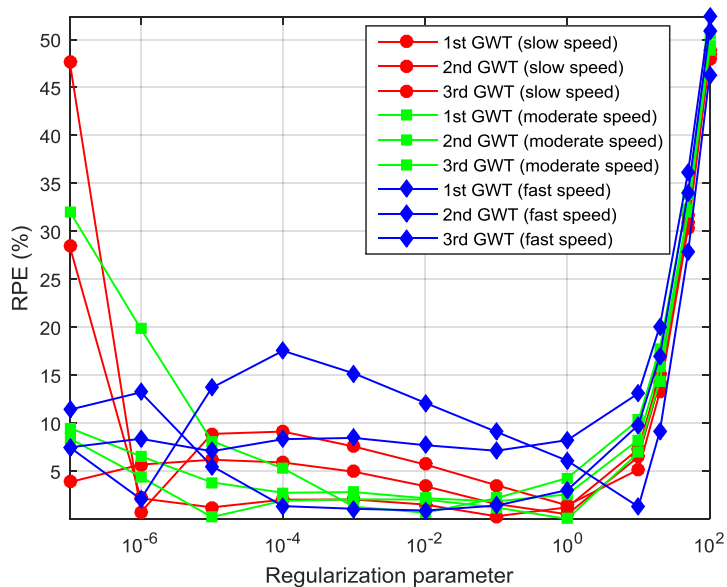
ภาพภาคผนวกที่ ข-9 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง



ภาพภาคผนวกที่ ข-10 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตร/ชั่วโมง



ภาพภาคผนวกที่ ข-11 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง

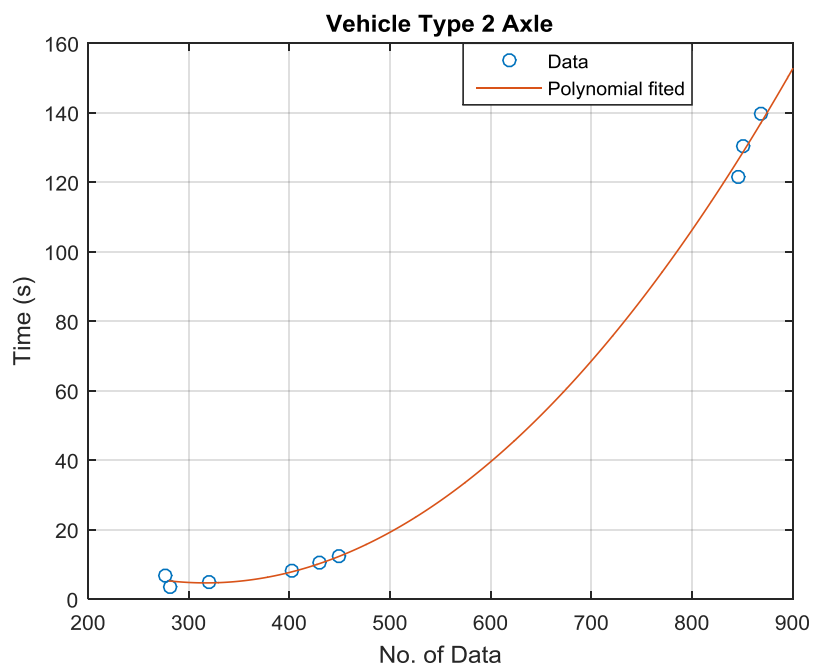


ภาพภาคผนวกที่ ข-12 ค่าความคาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (Regularization parameter) กรณีรถบรรทุก 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20, 40 และ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง

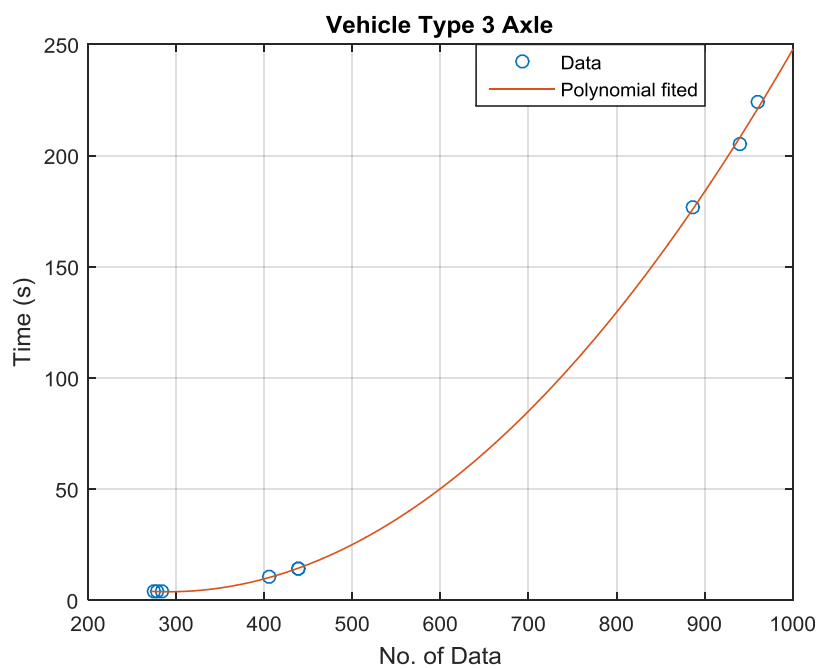


ภาคผนวก ค

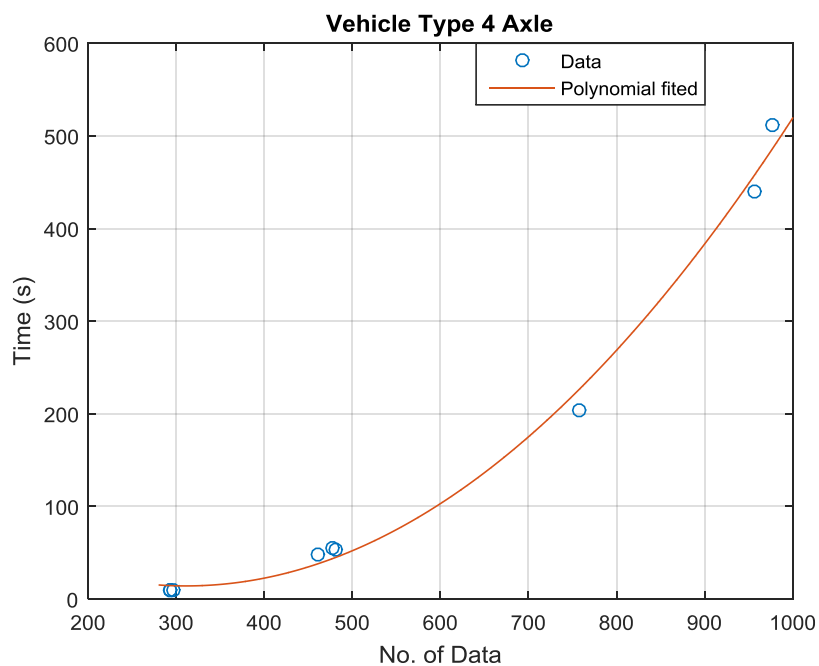
ระยะเวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก



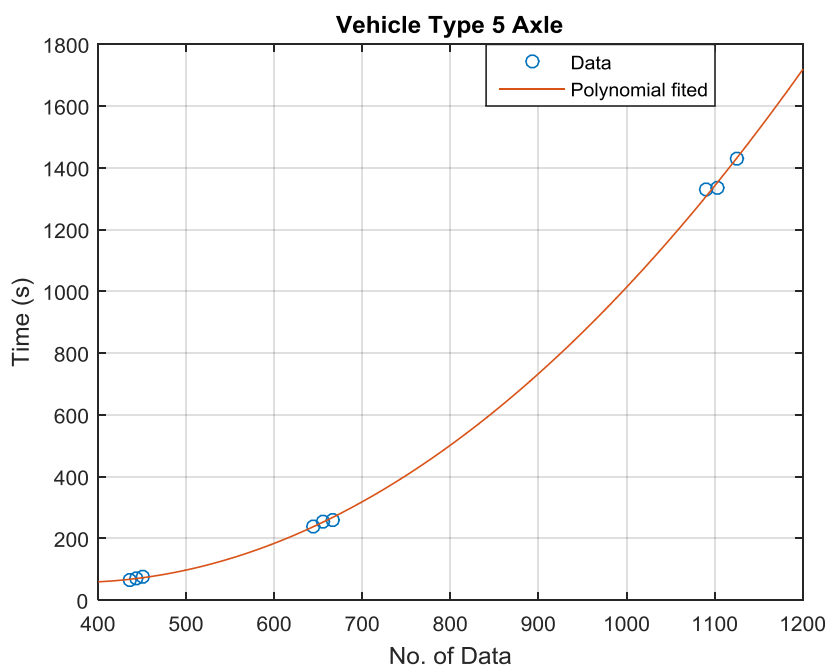
ภาพภาคผนวกที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา



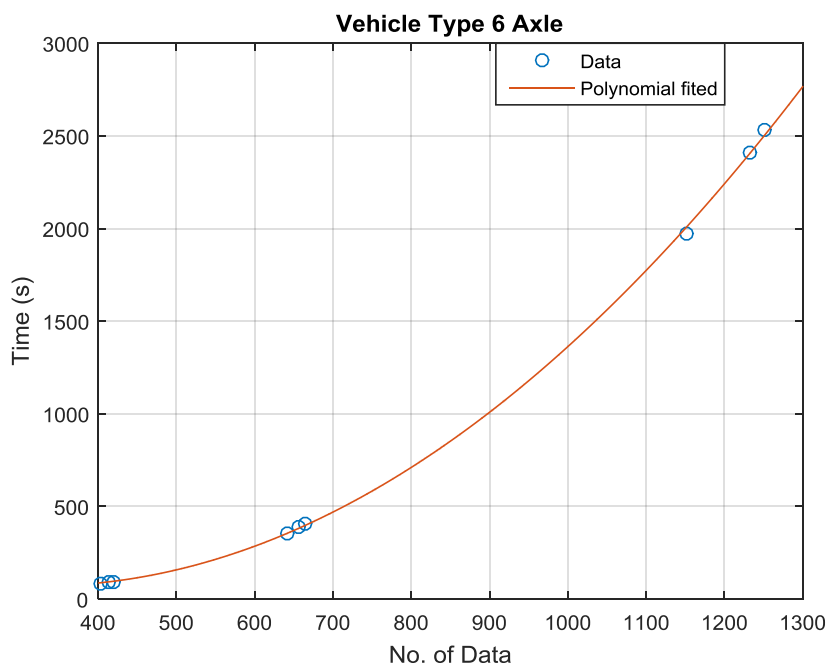
ภาพภาคผนวกที่ ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา



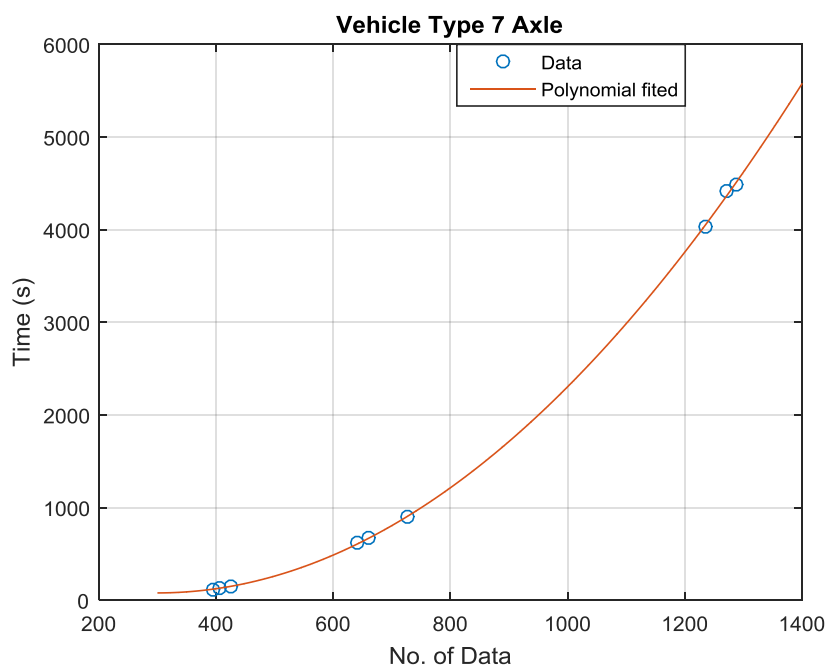
ภาพภาคผนวกที่ ค-3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



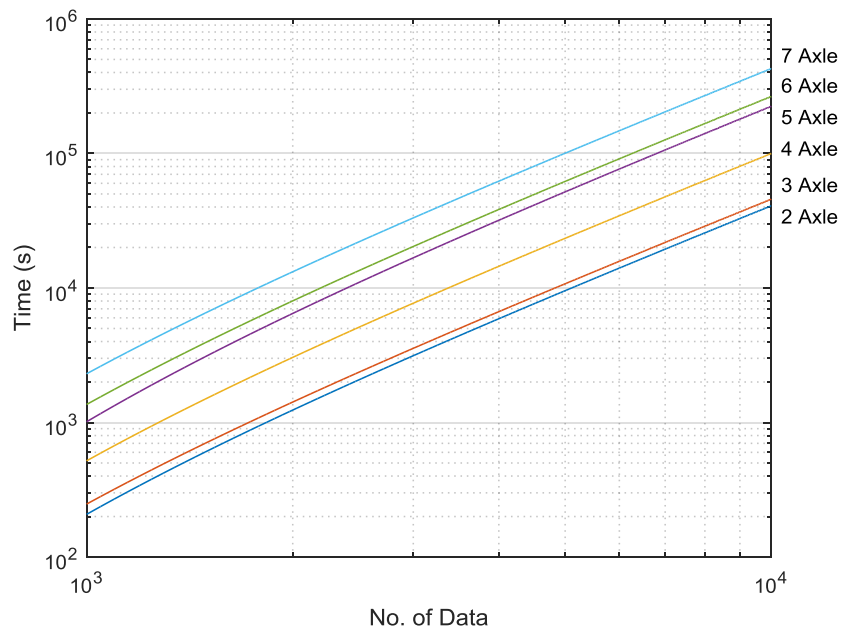
ภาพภาคผนวกที่ ค-4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



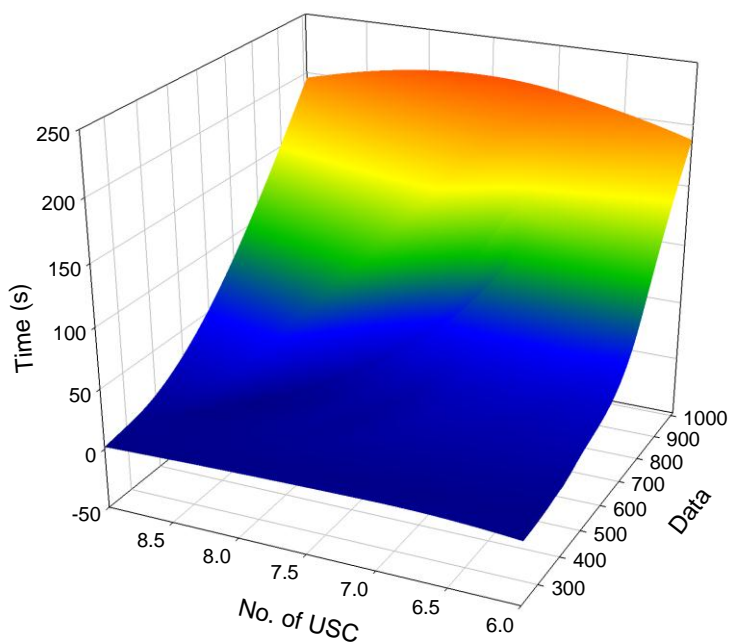
ภาพภาคผนวกที่ ค-5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา



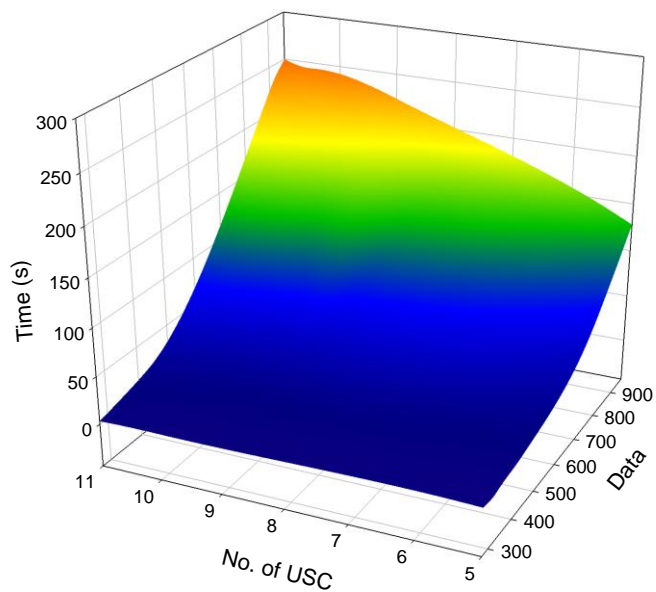
ภาพภาคผนวกที่ ค-6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 7 เพลา



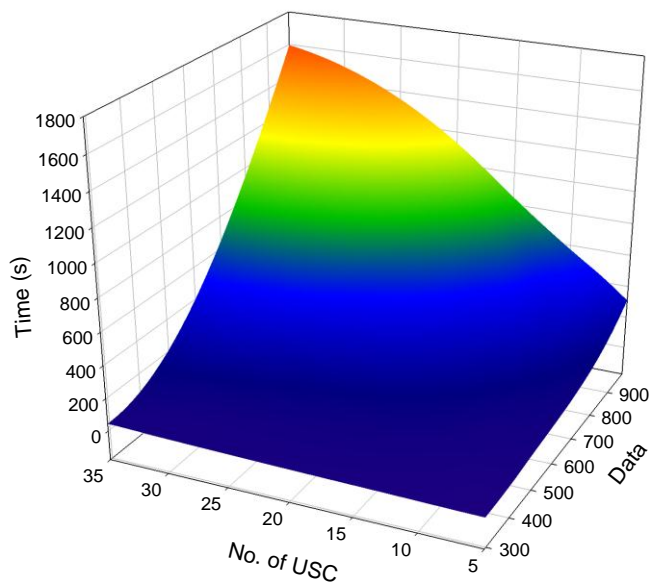
ภาพภาคผนวกที่ ค-7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลกับระยะเวลาในการคำนวณ กรณีรถบรรทุกประเภท 2-7 เพลา



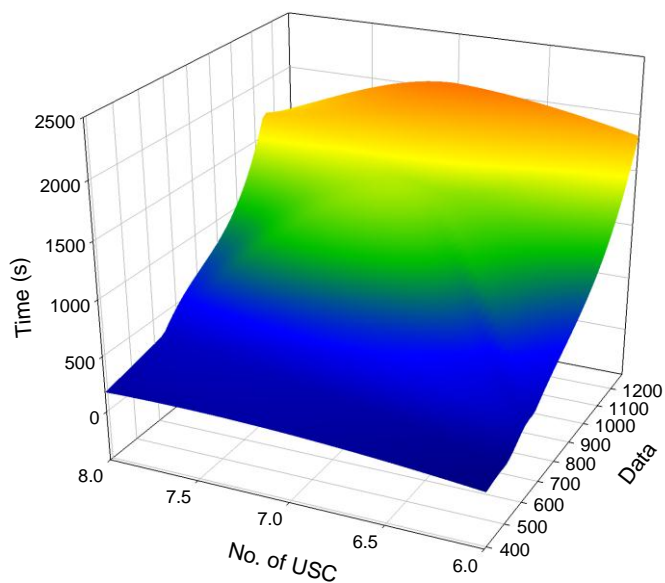
ภาพภาคผนวกที่ ค-8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูล จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ และระยะเวลา กรณีรถบรรทุกประเภท 2 เพลา



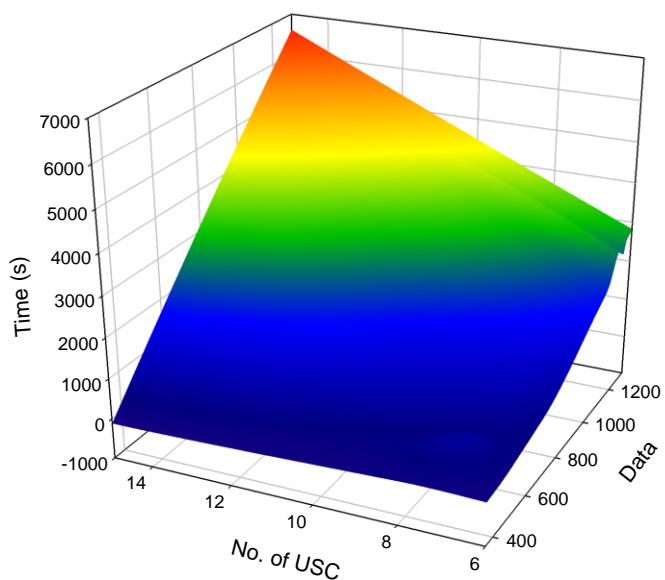
ภาพภาคผนวกที่ ค-9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูล จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ และ  
ระยะเวลา กรณีรถบรรทุกประเภท 3 เพลา



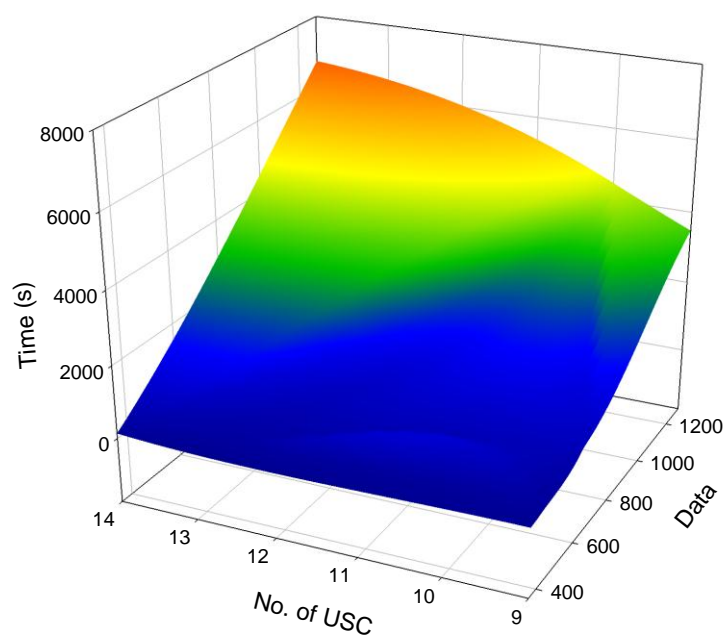
ภาพภาคผนวกที่ ค-10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูล จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ และ  
ระยะเวลา กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลา



ภาพภาคผนวกที่ ค-11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูล จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ และ  
ระยะเวลา กรณีรถบรรทุกประเภท 5 เพลา



ภาพภาคผนวกที่ ค-12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูล จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ และ  
ระยะเวลา กรณีรถบรรทุกประเภท 6 เพลา



ภาพภาคผนวกที่ ค-13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูล จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ และระยะเวลา กรณีรอบบรรทุกประเภท 7 เฟลา