



วิทยานิพนธ์

ค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟโครงสร้างเหล็ก
แบบแม่แควเหล็กแขงขึ้น

**DYNAMIC AMPLIFICATION FACTOR OF THROUGH
PLATE GIRDER RAILWAY BRIDGES**

นายอภิรัฐ ขำทอง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา

เรื่อง ค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟโครงสร้างเหล็กแบบแม่แควร์เหล็กแขงขึ้น

Dynamic Amplification Factor of Through Plate Girder Railway Bridges

นามผู้วิจัย นายอภิรัฐ ขำทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศ. โชคไชย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ โชคไชย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. กานดา

(ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนาลัย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

ศ. ชัยวัฒน์

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทร์วางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

ศ. ชัยวัฒน์

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน พ.ค. พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟโครงสร้างเหล็กแบบแม่แครงเหล็กแผ่นขึ้น

Dynamic Amplification Factor of Through Plate Girder Railway Bridges

โดย

นายอภิรัฐ ขำทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

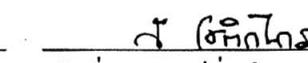
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2551

อภิรัฐ ขำทอง 2551: ค่าคุณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟโครงสร้างเหล็กแบบ
แม่แคร่เหล็กแผงขึ้น ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ โชติกไกร, Ph.D. 200 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอค่าคุณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟโครงสร้างเหล็กแบบแม่แคร่เหล็กแผงขึ้น 2 แห่งซึ่งมีความยาวช่วงแตกต่างกัน โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม ด้วยการใช้เครื่องมือตรวจวัดความเครียด และความเร่งของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของโครงสร้างสะพาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักของขบวนรถไฟที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ค่าการตอบสนองทางสถิตศาสตร์และพลศาสตร์สำหรับรถไฟแต่ละขบวนสามารถหาได้จากการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) โดยที่ค่าคุณเพิ่มทางพลวัตในแต่ละชั้นส่วน โครงสร้างของสะพานจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนความแตกต่างของการตอบสนองสูงสุดทางพลศาสตร์และทางสถิตศาสตร์เทียบกับทางสถิตศาสตร์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการประมาณด้วยมาตรฐาน AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association) มาก จากการทดสอบพบว่าค่าคุณเพิ่มทางพลวัตสำหรับในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 9% - 25% สำหรับสะพานความยาวประมาณ 10 ม. และช่วง 4% - 15% สำหรับสะพานความยาวประมาณ 20 ม. โดยขึ้นอยู่กับขนาดของน้ำหนักเพลาและความเร็วของขบวนรถไฟ รวมทั้งประเภทของขบวนรถไฟ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าขบวนรถดีเซลรางจะให้ค่าคุณเพิ่มทางพลวัตที่สูงที่สุด ในขณะที่ขบวนรถพ่วงสินค้าจะให้ค่าคุณเพิ่มทางพลวัตที่ต่ำที่สุด ผลที่ได้รับจากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการปรับปรุงและพัฒนามาตรฐานการออกแบบสะพานรถไฟที่เหมาะสมกับโครงสร้างและลักษณะของขบวนรถไฟในประเทศไทยต่อไป

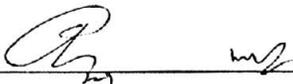

ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

23 / 5 / 51

Apirat Khumtong 2008: Dynamic Amplification Factor of Through Plate Girder Railway Bridges. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Piya Chotickai, Ph.D. 200 pages.

The dynamic amplification factors of two through plate girder railway bridges with various span lengths was evaluated using field investigation. Strain gage instrumentation and accelerometer measurement were utilized to monitor the actual bridge behavior under routine train traffic loadings. The equivalent static and dynamic responses for each train passage were first determined using the fast fourier transform (FFT) technique. The dynamic amplification factors in several bridge members were obtained from the ratio of maximum instantaneous dynamic response and maximum static response. The results indicate that the dynamic response can be notably overestimated by the current available standards. The averages of dynamic amplification factor for each bridge member were found to be in a range of 9% - 25% for 10-m bridge span and 4% - 15% for 20-m bridge span, depending on the axle weight and train velocity. Additionally, it has been found that the magnitude of dynamic amplification factors strongly relates to car type. The mean maximum and minimum dynamic amplification factors were given by diesel railcar and freight train, respectively. The results obtained from the study can be used as crucial information for developing a design standard corresponding to actual bridge structures and train configurations currently used in Thailand.



Student's signature

 23 / 5 / 51

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ โชติกไกร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนาลัย กรรมการร่วมและผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนด้านทุนวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบพระคุณ การรถไฟแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือพร้อม เจ้าหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมถึง พี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

คุณประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบความดีทั้งปวงแก่ บิดามารดา ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า และเพื่อน ๆ ของข้าพเจ้าทุกท่าน

อภิรัฐ ขำทอง

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	53
อุปกรณ์	53
วิธีการ	53
ผลและวิจารณ์	92
สรุปและข้อเสนอแนะ	168
สรุป	168
ข้อเสนอแนะ	170
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	171
ภาคผนวก	173
ภาคผนวก ก ช่องสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือของกลุ่มประเมีนของทั้ง 2 สะพาน	174
ภาคผนวก ข คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพาน คุณสมบัติทั่วไปของขบวน รถไฟและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท	178
ภาคผนวก ค ค่า DAF จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ของ ขบวนรถไฟแต่ละประเภทของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	182
ภาคผนวก ง ค่า DAF จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ของ ขบวนรถไฟแต่ละประเภทของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	191
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	200

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าปรับแก้สำหรับการประเมินความล้าของโครงสร้างสะพาน	23
2	ค่าปรับแก้สำหรับการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง	23
3	รายละเอียดข้อมูลจราจรเบื้องต้น	62
4	คุณสมบัติของ Strain gage ที่ใช้ศึกษา	71
5	คุณสมบัติของ Accelerometer ที่ใช้ศึกษา	72
6	สถิติของจำนวนขบวนรถไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์	103
7	ค่า DAF ขณะหัวจักรข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟ	111
8	ค่า DAF ขณะขบวนรถไฟขบวนโดยสารข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	111
9	ค่า DAF ขณะขบวนรถไฟดีเซลรางข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	111
10	ค่า DAF ขณะขบวนรถไฟขบวนสินค้าข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	112
11	ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า DAF ในแต่ละชิ้นส่วนโครงสร้าง เมื่อรถไฟประเภทต่างๆ ข้ามสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	112
12	ค่า DAF ขณะหัวจักรข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	113
13	ค่า DAF ขณะขบวนรถไฟขบวนโดยสารข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	113
14	ค่า DAF ขณะขบวนรถไฟดีเซลรางข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	113
15	ค่า DAF ขณะขบวนรถไฟขบวนสินค้าข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า DAF ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง เมื่อรถไฟประเภทต่างๆ ข้ามสะพาน ใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	114
17	การเปรียบเทียบค่า DAF จากมาตรฐาน AREMA กับการตรวจวัดจริง ในภาคสนามสำหรับโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	115
18	การเปรียบเทียบค่า DAF จากมาตรฐาน AREMA กับการตรวจวัดจริง ในภาคสนามสำหรับโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	116
19	การเปรียบเทียบค่า DAF จาก Eurocode กับการตรวจวัดจริงในภาคสนาม	116
20	ค่า DAF ที่นำเสนอจากผลการทดสอบในภาคสนาม	117
21	โมเมนต์การสั่นไหวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ	124
22	โมเมนต์การสั่นไหวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ	124
23	ค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและทดสอบ ในภาคสนาม	125
24	การเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน และทดสอบในภาคสนาม	125
25	ค่าโมเมนต์ที่เกิดจากการแบ่งน้ำหนักเพลลาออกเป็น 1 ส่วน, 2 ส่วน และ 3 ส่วน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Finite element	128
26	ค่าหน่วยแรงสถิติสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพาน ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	136
27	การเปรียบเทียบหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน และทดสอบในภาคสนามของสะพานใกล้สถานีรังสิต	137
28	ค่าหน่วยแรงสถิติสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพาน ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	145
29	การเปรียบเทียบหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน และทดสอบในภาคสนามของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	145

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
30	กำหนดหน่วยแรงที่จุดเชื่อมต่อของสะพานรถไฟไกล้สถานีรังสิต	146
31	กำหนดหน่วยแรงที่จุดเชื่อมต่อของสะพานรถไฟไกล้สถานีบางบำหรุ	147
32	การเปรียบเทียบ DAF จากการทดสอบในภาคสนามและการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์	154
33	การเปรียบเทียบ DAF ที่กึ่งกลางสะพานและด้านริมสะพาน	155
34	การเปรียบเทียบ DAF จากการทดสอบในภาคสนามและการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์	161
35	แสดงค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง	164
36	แสดงค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง	167
ตารางผนวกที่		
ก1	ช่องสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือ และกลุ่มประเมินของสะพานไกล้สถานีรังสิต	175
ก2	ช่องสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือและกลุ่มประเมินของสะพานไกล้สถานีบางบำหรุ	176
ข1	คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพาน	179
ข2	คุณสมบัติทั่วไปของขบวนรถไฟแต่ละประเภท	180
ข3	คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท	181

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของสะพานไม้	6
2	ลักษณะของสะพานบวบราง	7
3	ลักษณะของสะพานแม่แควเหล็กแฝงลง	8
4	ลักษณะของสะพานแม่แควเหล็กแฝงขึ้น	9
5	ลักษณะของสะพานกะบะเหล็ก	10
6	ลักษณะของสะพานโครงขึ้น	11
7	ลักษณะของสะพานโครงลง	12
8	ลักษณะของสะพานกะบะคอนกรีตเสริมเหล็ก	13
9	ลักษณะของสะพานคอนกรีตอัดแรง	14
10	ลักษณะของสะพานคอมโพสิต	15
11	การแบ่งประเภทและจำนวนของสะพานรถไฟในประเทศไทย	16
12	การตอบสนองเชิงพลวัตและสถิตสูงสุด	19
13	ค่า DAF จากมาตรฐานออกแบบของ SNRA และ Eurocode	22
14	Single-degree-of-freedom-system (SDOF)	24
15	คานที่มีแรงแบบเคลื่อนที่ P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V	25
16	แรงที่เกิดขึ้นใน Element	25
17	ความสัมพันธ์กับการหมุนระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างที่จุดเชื่อมต่อ	35
18	การจัดประเภทของการเชื่อมต่อตามระบบ Eurocode 3	36
19	การจัดประเภทของการเชื่อมต่อตาม Bjorhovde	37
20	ฟังก์ชันรูปร่างของสะพาน โครงสร้างอย่างง่าย	39
21	ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุกเดี่ยวนเคลื่อนที่	40
22	ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อมีน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่	40
23	รูปแบบของแบบจำลองขบวนรถไฟโดยสมบูรณ์	41
24	แบบจำลองการกระทำของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟอย่างง่าย	42
25	การกระทำของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ความสัมพันธ์ของประวัติเวลาและสัญญาณความถี่	46
27	ผลของ FFT ของสัญญาณระหว่างมุมของคาบ กับสัญญาณความถี่ กรณีสัญญาณเป็นแบบไม่มีความหน่วง (Undamp)	47
28	ผลของ FFT ของโครงสร้างที่มีความหน่วง (Damp) ระหว่าง การตอบสนองและค่าความถี่	47
29	สัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน	48
30	การใช้ FFT เพื่อหาค่าสัญญาณความถี่หลัก	49
31	การกรองสัญญาณต่ำ (Low-Pass Filter)	49
32	การกรองสัญญาณสูง (High-Pass Filter)	50
33	การตัดสัญญาณ (Band-Pass Filter)	51
34	ผลของการกรองสัญญาณแบบอุดมคติกับที่เกิดขึ้นจริง	52
35	ลักษณะของ Strain gage	55
36	ลักษณะของ Accelerometer	56
37	ลักษณะของ Data logger	56
38	ลักษณะของ Computer	57
39	ลักษณะสะพานรถไฟที่ทำการตรวจวัดที่ใกล้สถานีรถไฟรังสิต	58
40	ลักษณะสะพานรถไฟที่ทำการตรวจวัดที่ใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	59
41	ลักษณะสะพานรถไฟแบบแม่แคร่เหล็กแขงขึ้น	60
42	รายละเอียดของชิ้นส่วน โครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	61
43	รายละเอียดของชิ้นส่วน โครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	61
44	แบบจำลองเบื้องต้นของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	62
45	แบบจำลองเบื้องต้นของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	63
46	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	65
47	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	67
48	ตำแหน่งการจัดวางเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
49	ตำแหน่งการจัดวางเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	70
50	การขจัดลอคสีตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด	73
51	ทำความสะอาดพื้นผิวสะพานเหล็กด้วยอะซีโตน (Acetone)	73
52	ทาขาว Cyanoacrylate cement (CN) เพื่อยึดติดกับพื้นผิวเหล็ก	74
53	Strain gage ติดกับพื้นผิวเหล็ก	74
54	ปิดทับด้วย VM rubber เพื่อป้องกันน้ำและความชื้นในอากาศ	75
55	สายเคเบิลเชื่อมต่อระหว่าง Strain gage กับ Data logger	75
56	ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า	76
57	ลักษณะการติดตั้ง Accelerometer	77
58	ระบบการทำงานของ Data Logger	78
59	โปรแกรม SDA-810C_SDA-830C Software และการตั้งค่าโปรแกรม	79
60	สัญญาณที่ได้แสดงผลออกทางโปรแกรม Excel	79
61	ตัวอย่างลักษณะการจัดวางกลุ่มเพลลา ของหัวรถจักร ขบวนรถดีเซลราง ขบวนรถพ่วงโดยสาร และขบวนรถพ่วงสินค้า	82
62	การจับเวลาเพื่อวัดความเร็วเบื้องต้น	83
63	แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูลตรวจวัด	83
64	ตัวอย่างของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น	85
65	ตัวอย่างสัญญาณทางสถิติศาสตร์ที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว	86
66	ตัวอย่างของ Beam Element	89
67	ตัวอย่างของ Plate Element	89
68	ข้อมูลความเร่งของโครงสร้างสะพานที่ตำแหน่งคานประธาน	93
69	ข้อมูลความเร่งของการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระของคาน ประธาน	93
70	ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	94
71	ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	95

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
72	ช่วงอัตราส่วนความหน่วงสำหรับการสั่นแบบอิสระ ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	96
73	ช่วงอัตราส่วนความหน่วงสำหรับการสั่นแบบอิสระ ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	96
74	ตรวจสอบช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวนก่อนรถไฟเข้าสะพาน	97
75	ความถี่ของสัญญาณรบกวนก่อนรถไฟเข้าสะพาน	97
76	การกรองสัญญาณต่ำที่ความถี่ 75 Hz แล้วใช้ FFT ตรวจสอบ	98
77	การตัดสัญญาณต่ำช่วงความถี่ 10 – 20 Hz แล้วใช้ FFT ตรวจสอบ	98
78	ผลการตอบสนองของคานรองรับรถไฟของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	99
79	ผลการตอบสนองของคานรองรับรถไฟของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	101
80	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานรองรับรถไฟตัวริม (Section 1) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	103
81	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานรองรับรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	104
82	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	104
83	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	105
84	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	105
85	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
86	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานขวาง (Section 2) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	106
87	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานรองหมอนรถไฟตัวริม (Section 6) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	107
88	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานรองหมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	108
89	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	108
90	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	109
91	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	109
92	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	110
93	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานขวาง (Section 2) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	110
94	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเพลาและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานประธานของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิตและสถานีรถไฟบางบำหรุ	118
95	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเครียดสถิตของสะพานและค่า DAF ของปีกล่างของคานรองหมอนรถไฟของทั้งสองสะพาน	119
96	โหมคการสั่นไหวแบบ 2 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	120
97	โหมคการสั่นไหวแบบ 2 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ	121
98	โหมคการสั่นไหวแบบ 3 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต	121

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
99	โหมคการสันไหวแบบ 3 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟ บางบำหรุ	123
100	การแบ่งน้ำหนักเพลาารถไฟตามมาตรฐาน AREMA	126
101	ค่าการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานรองรับนอนรถไฟตัวกลาง	127
102	การแบ่งน้ำหนักเพลาารถไฟของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบ	128
103	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานที่ได้จาก การชั่งด้วย WIM	129
104	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วน ต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Rigid connection	130
105	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วน ต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Shear connection	130
106	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วน ต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ แบบ Rigid connection	131
107	กำหนดหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ	132
108	กำหนดหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ	132
109	กำหนดหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่าง ของคานรองรับนอนรถไฟตัวริม (Section 1) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	133
110	กำหนดหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่าง ของคานรองรับนอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานี รังสิต	133
111	กำหนดหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบน ของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	134
112	กำหนดหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่าง ของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	134

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
113	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	135
114	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	135
115	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานขวาง (Section 2) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต	136
116	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานที่ทำการชั่งด้วย WIM	137
117	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ (Rigid connection)	138
118	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ (Shear connection)	138
119	ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ	139
120	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ	140
121	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ	140
122	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานรองหมอนรถไฟตัวริม (Section 6) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	141
123	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานรองหมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	141
124	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	142

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
125	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	142
126	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	143
127	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานประธาน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	143
128	ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานขวาง (Section 2) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ	144
129	ค่าการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่จุดต่อเชื่อมของคานรองหมอนรถไฟ (Stringer) กับ คานขวาง (Floor Beam)	146
130	ตัวอย่างข้อมูลการซั่งน้ำหนักขบวนรถไฟจำนวน 5 โบกี้ (รวมหัวรถจักร)	148
131	โหมดการสั่นไหวแรกของโครงสร้างสะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิต	149
132	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 40 กม./ชม.	149
133	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 50 กม./ชม.	150
134	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 60 กม./ชม.	150
135	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 70 กม./ชม.	151
136	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 80 กม./ชม.	151
137	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 90 กม./ชม.	152

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
138	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 100 กม./ชม.	152
139	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (moving loads) ของหัวรถจักร	153
140	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยความสัมพันธ์ของโครงสร้าง สะพานและขบวนรถไฟ (vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร	153
141	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (moving loads) และความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวน รถไฟ (vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร	154
142	ตัวอย่างข้อมูลการชั่งน้ำหนักขบวนรถไฟจำนวน 5 โบกี้ (รวมหัวรถจักร)	156
143	โหมคการสั้นไหวแรกของโครงสร้างสะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ	156
144	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 20 กม./ชม.	157
145	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 30 กม./ชม.	157
146	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 40 กม./ชม.	158
147	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 50 กม./ชม.	158
148	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 60 กม./ชม.	159
149	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (moving loads) ของหัวรถจักร	159
150	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้าง สะพานและขบวนรถไฟ (vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร	160

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
151	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (moving loads) และความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร	160
152	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	162
153	ค่า DAF กับเวลาที่ข้ามผ่านสะพานของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	163
154	ค่า DAF กับค่าปัจจัยความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	163
155	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	165
156	ค่า DAF กับเวลาที่ข้ามผ่านสะพานของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	166
157	ค่า DAF กับค่าปัจจัยความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	166
ภาพผนวกที่		
ข1	การเรียกลักษณะของขบวนรถไฟ	179
ข2	ลักษณะคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟ	179
ค1	ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Hitachi (HID)	183
ค2	ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร General electric USA (GEA)	183
ค3	ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Alsthom (ALD)	184
ค4	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	184
ค5	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชท.(BSC)	185
ค6	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนท.(BNS)	185
ค7	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนอป.(ANF)	186
ค8	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนทป.(ANS)	186
ค9	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชท.(BCS)	187
ค10	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชล.(BCP)	187
ค11	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชค.(BOT)	188

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค12	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บทด.(BCF)	188
ค13	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บตญ.(BCG)	189
ค14	ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง THN	189
ค15	ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง NKF	190
ค16	ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง ATR	190
ง1	ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Hitachi (HID)	192
ง2	ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร General electric USA (GEA)	192
ง3	ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Alsthom (ALD)	193
ง4	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส.(BTC)	193
ง5	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชท.(BSC)	194
ง6	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนท.(BNS)	194
ง7	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนอป.(ANF)	195
ง8	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนทป.(ANS)	195
ง9	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชท.(BCS)	196
ง10	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชล.(BCP)	196
ง11	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชค.(BOT)	197
ง12	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บทด.(BCF)	197
ง13	ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บตญ.(BCG)	198
ง14	ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง THN	198
ง15	ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง NKF	199
ง16	ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง ATR	199

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ม.ม.	=	มิลลิเมตร
ซ.ม.	=	เซนติเมตร
ม.	=	เมตร
กม./ชม.	=	กิโลเมตรต่อชั่วโมง
กก.-ชม.	=	กิโลกรัม-เซนติเมตร
กก./ชม. ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
m/s ²	=	เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
Hz	=	เฮิรตซ์
Ksc	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
$\mu\epsilon$	=	ไมโครสเตรน
ms	=	มิลลิวินาที
s	=	วินาที

ค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟโครงสร้างเหล็กแบบแม่แคร่เหล็กแผ่นขึ้น

Dynamic Amplification Factor of Through Plate Girder Railway Bridges

คำนำ

สะพานรถไฟเป็นโครงสร้างสำคัญในการคมนาคมขนส่งระบบราง ซึ่งจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่ค่อนข้างมากตลอดช่วงเวลาของการใช้งาน โครงสร้าง ขนาดของแรงที่กระทำกับโครงสร้างสะพานเมื่อขบวนรถไฟวิ่งผ่านจะประกอบไปด้วยน้ำหนักจร ซึ่งมาจากน้ำหนักของรถไฟและแรงพลวัตเนื่องจากการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ผลรวมของแรงเหล่านี้จะทำให้เกิดการตอบสนองทางพลวัตของสะพานรถไฟ สำหรับการออกแบบโครงสร้างสะพานจะต้องพิจารณาถึงผลตอบสนองทางพลวัตสูงสุดที่คาดว่าโครงสร้างจะได้รับตลอดช่วงอายุการใช้งาน โดยพิจารณาระดับความปลอดภัยที่เหมาะสมและโอกาสที่ขบวนรถไฟจะมีค่าน้ำหนักเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งมาตรฐานการออกแบบสะพานโดยส่วนใหญ่จะกำหนดค่าแรงพลวัตนี้เป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักทางสถิตที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งจะเรียกค่านี้ว่า ค่าคูณเพิ่มทางพลวัต (Dynamic Amplification Factors, DAF)

ผลกระทบทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเมื่อขบวนรถไฟวิ่งผ่านสะพานสามารถประมาณอย่างถูกต้องได้ยากกว่าพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้าง เนื่องจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการออกแบบโดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการกำหนดสมการอย่างง่ายในการคำนวณผลกระทบทางพลศาสตร์นี้ เพื่อที่จะช่วยให้การออกแบบสามารถทำได้สะดวกและมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง สำหรับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสะพานรถไฟที่ใช้ในประเทศไทย ได้อ้างอิงแนวทางการออกแบบของมาตรฐาน AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association) และมาตรฐาน UIC (International Union of Railways) ซึ่งลักษณะของโครงสร้างสะพานและแรงกระทำที่ใช้ในการพัฒนามาตรฐานเหล่านี้ อาจมีความแตกต่างอย่างมากจากสภาพการใช้งานของสะพานรถไฟในประเทศไทย ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานแบบแม่แคร่เหล็กแผ่นขึ้นที่มีค่าน้ำหนักของขบวนรถไฟประเภทต่างๆ ที่ใช้ในประเทศไทย เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้งานสะพานโครงสร้างประเภทนี้เป็นจำนวนมาก โดยในการศึกษาจะใช้วิธีการทดสอบ

ในภาคสนามและการวิเคราะห์โครงสร้าง ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์
ของโครงสร้าง เพื่อที่จะนำผลจากการศึกษาที่ได้ไปปรับปรุงและพัฒนามาตรฐานการออกแบบ
สะพานรถไฟในประเทศไทยต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของสะพานรถไฟแบบแม่แควเหล็กแขงขึ้นในแต่ละชั้นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างสะพาน
2. เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลวัตในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้าง
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าคูณเพิ่มทางพลวัตจากการทดสอบในภาคสนามและตามมาตรฐานการออกแบบของการรถไฟในประเทศไทยในปัจจุบัน
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็ว ขนาดน้ำหนัก และประเภทของรถไฟที่มีผลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของ โครงสร้างสะพานแบบแม่แควเหล็กแขงขึ้น

ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้เสนอค่าคูณเพิ่มทางพลวัตจากการทดสอบในภาคสนามของสะพานรถไฟแบบแม่แควเหล็กแขงขึ้นจำนวน 2 สะพาน โดยจะศึกษาปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลวัตนี้ รวมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานการออกแบบที่การรถไฟแห่งประเทศไทยใช้อยู่ในปัจจุบัน และพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างสะพานเพื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการตอบสนองที่เกิดขึ้นจริง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงค่าคูณเพิ่มทางพลวัตและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานรถไฟแบบแม่แควเหล็กแขงขึ้น
2. ทราบถึงพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์และสถิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานรถไฟแบบแม่แควเหล็กแขงขึ้นทั้ง 2 สะพาน เมื่อขบวนรถไฟประเภทต่างๆ ข้ามผ่าน

3. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการปรับปรุงและพัฒนา
มาตรฐานการออกแบบสะพานรถไฟที่เหมาะสมกับโครงสร้างและลักษณะของขบวนรถไฟ
ในประเทศไทย

การตรวจเอกสาร

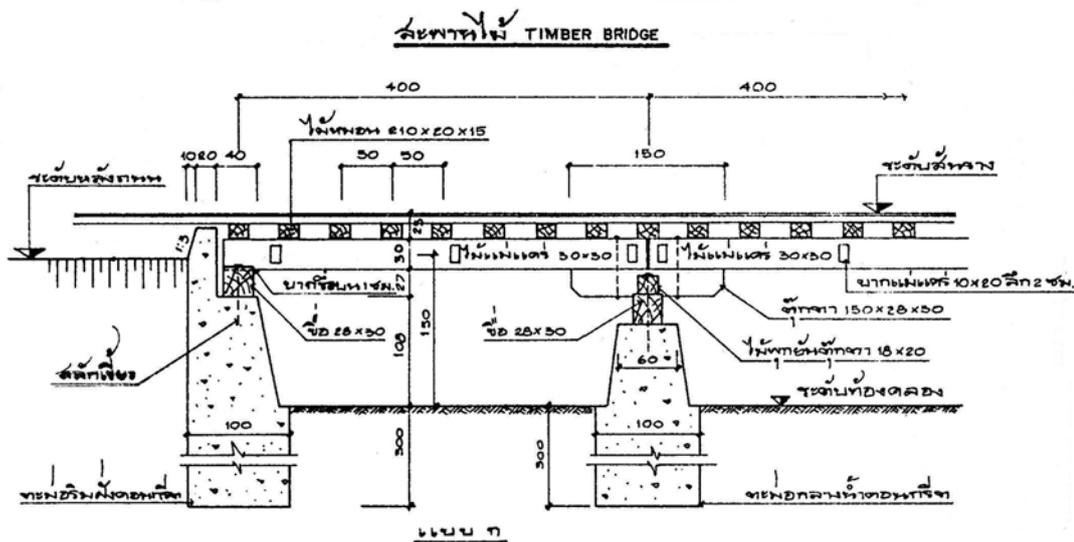
1. ประเภทของสะพานรถไฟในประเทศไทย

สะพานรถไฟเป็นโครงสร้างสำคัญในการคมนาคมขนส่งระบบราง โดยชนิดของสะพานรถไฟแตกต่างกันออกไปตามวัสดุที่ใช้ก่อสร้างสะพาน น้ำหนักรถไฟที่ใช้ออกแบบสะพานและความเจริญก้าวหน้าในการออกแบบและก่อสร้างสะพาน เป็นต้น โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ สะพานไม้ สะพานเหล็ก และ สะพานคอนกรีต

1.1 สะพานไม้

สะพานไม้ได้ถูกนำมาใช้ในการรถไฟตั้งแต่ยุคเริ่มแรก เนื่องจากในยุคนั้นวิวัฒนาการทางเทคนิคเกี่ยวกับเหล็กและคอนกรีตในประเทศยังไม่ดีพอ และไม้หาได้ง่ายสามารถคัดหาขนาดใหญ่เล็กได้ตามความต้องการ โดยปกติสะพานไม้สามารถใช้ได้ดีกับขนาดความยาวช่วงไม่เกิน 4 เมตร เท่านั้น

ปัจจุบันสะพานไม้ส่วนใหญ่ในکانประชาชนได้ถูกทดแทนโดยสะพานเหล็ก หรือ สะพานคอนกรีตแล้ว ยังคงมีเหลืออยู่เฉพาะในทางสายแยกหรือในทางตอนที่มีขบวนรถไฟไม่หนาแน่นและน้ำหนักเพลาของขบวนรถไฟไม่สูง เนื่องจากข้อเสียของสะพานไม้ คือไม่รับน้ำหนักได้น้อย และไม้ขนาดที่ต้องการนอกจากจะมีราคาสูงแล้วยังหาได้ยากอีกด้วยทั้งยังต้องดูแลบำรุงรักษาอย่างใกล้ชิด เนื่องจากธรรมชาติของไม้ไม่คงทนต่อสภาวะแวดล้อมและเครื่องยึดเหนี่ยวรอยต่อชิ้นส่วนต่างๆ มักจะคลายหลุดหลวมอยู่เสมอเมื่อต้องรับแรงกระแทกจากขบวนรถ ลักษณะสะพานไม้แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะของสะพานไม้

ที่มา: ทวี (2537)

1.2 สะพานเหล็ก

สะพานเหล็กได้ถูกนำมาใช้ในการรถไฟในยุคถัดมาจากสะพานไม้ประมาณ 70 - 100 ปีมาแล้ว ปัจจุบันสะพานรถไฟที่มีอยู่ส่วนใหญ่เป็นสะพานเหล็ก แต่เนื่องจากสะพานเหล็กมีปัญหาด้านการบำรุงรักษา เนื่องจากปัญหาการเกิดสนิมที่รุนแรงได้ง่าย โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ต่ำกว่าระดับสันราง โดยสามารถแบ่งประเภทสะพานเหล็กออกเป็น

1.2.1 สะพานบวบราง (Rail girder)

จัดเป็นสะพานกึ่งถาวรขนาดช่วงยาวไม่เกิน 4.50 เมตร สามารถประกอบติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็ว เหตุที่จัดเป็นสะพานกึ่งถาวรก็เนื่องจากเหล็กที่ตัดขวางกับไม้หมอนมีสภาพไม่มั่นคงนัก และมักจะหลวมได้ง่ายต้องคอยตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ ลักษณะสะพานบวบรางแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะของสะพานบวบราง

ที่มา: ทวี (2537)

1.2.2 สะพานแม่แควเหล็กแฝงลง (Deck plate girder bridge)

ตัวแม่แควสะพานประกอบขึ้นเป็นหน้าตัดรูป I ด้วยเหล็กแผ่นและเหล็กฉาก เนื่องจากไม่สามารถที่จะหาเหล็กรูปพรรณที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ได้ภายในประเทศ การประกอบขึ้นส่วนใหญ่ใช้วิธีเป็นเครื่องยึดเหนี่ยว

มีความยาวช่วงสะพานระหว่าง 5.00 – 25.00 เมตร เนื่องจากตัวแม่แควสะพานทำหน้าที่เป็นคานรองรับทางรถไฟโดยตรง จึงเหมาะสำหรับลำน้ำที่ช่องว่างใต้สะพานพอเพียงที่จะสามารถติดตั้งตัวแม่แควสะพานให้ต่ำลงไปได้ ลักษณะสะพานแม่แควเหล็กแฝงลงแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะของสะพานแม่แควเหล็กแฝงลง

ที่มา: ทวี (2537)

1.2.3 สะพานแม่แควเหล็กแฝงขึ้น (Through plate girder bridge)

ประกอบขึ้นด้วยเหล็กแผ่นและเหล็กฉากเช่นเดียวกับสะพานแม่แควเหล็กแฝงลง ตัวแม่แควสะพานรองรับทางรถไฟในลักษณะของคานหิ้วแทนที่จะใช้เป็นคานรอง ทำให้ระยะความลึกจากสันรางถึงท้องสะพานน้อยลงเหมาะที่จะใช้กับช่องน้ำที่มีพาหนะสัญจร ความยาวช่วงสะพานระหว่าง 8.00 – 25.00 เมตร ลักษณะสะพานแม่แควเหล็กแฝงขึ้น แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะของสะพานแม่แควเหล็กแผงขึ้น

ที่มา: ทวี (2537)

1.2.4 สะพานกะบะเหล็ก (Steel slab bridge)

สะพานกะบะเหล็กเป็นสะพานแบบที่เหมาะสมสำหรับสร้างข้ามถนนรถยนต์ที่อยู่ในบริเวณในเมือง เพราะสามารถลดเสียงรบกวนได้บ้าง เนื่องจากมีหินโรยทางบนสะพาน นอกจากนี้ยังป้องกันไม่ให้สิ่งของตกลงจากสะพานลงไปโดนรถยนต์ที่สัญจรไปมาอยู่ใต้สะพานได้อีกด้วย ลักษณะสะพานกะบะเหล็ก แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะของสะพานกะบะเหล็ก

ที่มา: ทวี (2537)

1.2.5 สะพาน โครงขึ้น (Through truss bridge)

ตัวแม่แครงสะพานเป็น โครงข้อหมุนขึ้นส่วนต่างๆ ยึดเหนี่ยวด้วยริเวท สะพานชนิดนี้ใช้งานในลักษณะของคานหิ้ว เหมาะสำหรับการใช้สร้างข้ามลำห้วยเล็กๆ ความยาวช่วงสะพานระหว่าง 25.00 – 90.00 เมตร ลักษณะสะพาน โครงขึ้น แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะของสะพาน โครงขึ้น

ที่มา: ทวี (2537)

1.2.6 สะพานโครงลง (Deck truss bridge)

ตัวแม่แคว่สะพานเป็น โครงข้อหมุนขึ้นส่วนต่างๆ ยึดเหนี่ยวด้วยริเวท สะพานชนิดนี้ใช้งานในลักษณะคานรอง เหมาะสำหรับใช้สร้างข้ามลำห้วยเล็กๆ ที่พื้นที่วางได้สะพานไม่ต้องการใช้สอย ตัวสะพานมีความลึกมากความยาวช่วงสะพานระหว่าง 25.00 – 40.00 เมตร ลักษณะสะพานโครงลง แสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะของสะพานโครงลง

ที่มา: ทวี (2537)

1.3 สะพานคอนกรีต

ได้ถูกนำมาใช้ในการรถไฟเมื่อประมาณ 40 - 50 ปีที่ผ่านมา ยุคแรกเป็นสะพานคอนกรีตเสริมรางเหล็ก มีข้อเสียอยู่ที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและรางเหล็กไม่สูงพอทำให้คอนกรีตได้ท้องสะพานหลุดร่อนออก ต่อมาเป็น สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่ออุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเสริมในประเทศมีมาตรฐานเป็นที่ยอมรับ เริ่มมีใช้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503 เป็นต้นมา แบ่งออกเป็น

1.3.1 สะพานกะบะคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete slab bridge)

คือสะพานแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก มีขอบกันหินรอบทั้ง 4 ด้านวางพาดหัวท้ายลงบนตอม่อคอนกรีต รองรับทางรถไฟ มีขนาดช่วงตั้งแต่ 3.00 ถึง 6.00 เมตร

สะพานกะบะคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กเสริมจะมีอายุใช้งานได้ตามอายุของคอนกรีต หากใช้คอนกรีตคุณภาพดีจะใช้งานได้ไม่น้อยกว่า 50 ปี ลักษณะสะพานกะบะคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ลักษณะของสะพานกะบะคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา: ทวี (2537)

1.3.2 สะพานคอนกรีตอัดแรง (Prestress concrete bridge)

สะพานจะประกอบด้วยคานคานคอนกรีตอัดแรง 2 ท่อน ขนาดกว้างคานละ 1.00 เมตร ความยาวของคานสะพานคอนกรีตอัดแรงถูกจำกัดอยู่ที่ 15.00 เมตร เนื่องจากความยาวและน้ำหนักที่มากกว่านี้เป็นอุปสรรคในการขนส่งทางรถไฟ

สะพานคอนกรีตอัดแรงที่ใช้อยู่ในการรถไฟส่วนใหญ่เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดอัดแรงก่อน หล่อเป็นคานสำเร็จรูปจากโรงงาน ขนาดช่วง 6.00 – 15.00 เมตร แล้วนำมาประกอบเป็นตัวสะพาน ณ ที่ก่อสร้าง ลักษณะสะพานคอนกรีตอัดแรง แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะของสะพานคอนกรีตอัดแรง

ที่มา: ทวี (2537)

1.3.3 สะพานคอมโพสิต (Composite bridge)

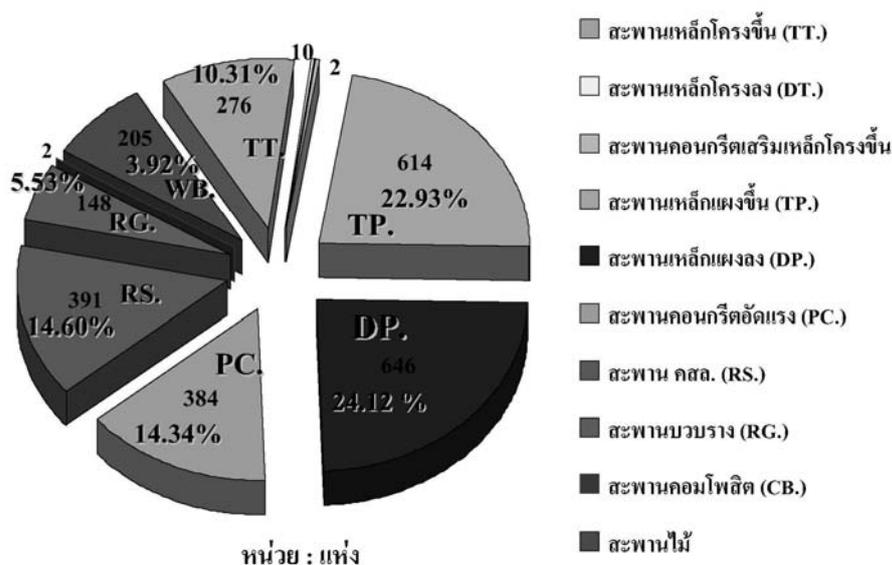
สะพานคอมโพสิต เป็นสะพานที่ใช้คานประธานของสะพานเป็นเหล็ก แต่บนปีกบน (Upper flange) ของคานจะหล่อเป็นกะบะคอนกรีตเสริมเหล็กรองรับทางรถไฟ โดยทั้งสองส่วนนี้ถูกยึดไว้ด้วยกันด้วยสลักที่เรียกว่า “Shear connector” จะใช้สำหรับข้ามลำน้ำที่มีความยาวมากกว่า 100 เมตร ลักษณะสะพานคอมโพสิตแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลักษณะของสะพานคอมโพสิต

ที่มา: ทวี (2537)

จำนวนสะพานรถไฟทั้งหมดในประเทศไทย มีทั้งหมด 2,678 แห่ง โดยประเภทของสะพานที่ใช้เป็นส่วนมากคือ สะพานแม่แควเหล็กแฝงลงและสะพานแม่แควเหล็กแฝงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การแบ่งประเภทและจำนวนของสะพานรถไฟในประเทศไทย

ที่มา: ทวี (2537)

โดยในการวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานแบบแม่แคร่เหล็กแผงขึ้นที่มีต่อน้ำหนักของขบวนรถไฟประเภทต่างๆ เนื่องจากสะพานประเภทนี้ใช้งานเป็นส่วนใหญ่ของสะพานรถไฟทั้งหมดในประเทศไทย โดยอาศัยวิธีการทดสอบในภาคสนามและการวิเคราะห์โครงสร้าง

2. การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการตอบสนองของสะพานภายใต้น้ำหนักรถไฟ เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1849 โดยนาย Willis (Paultre et al., 1992) ได้ศึกษาผลของแรงกระทำแบบเคลื่อนที่บนคานเหล็กในห้องปฏิบัติการ และศึกษาสมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion) สำหรับแรงกระทำแบบจุดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในการศึกษานั้นได้ให้ความสนใจที่สะพานรถไฟ ซึ่งแรงพลวัตจะเกิดขึ้นจากผลกระทบของแรงกระแทก (Hammer Blow) จากหัวรถจักรไอน้ำ โดยแรงนี้ จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของหัวรถจักรคือ เมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้นและจะทำให้แรงพลวัตมีค่ามากขึ้นด้วย (Billing and Green, 1984) ในปี ค.ศ. 1911 มาตรฐาน AREA (American Railway Engineering Association) ได้ทำการศึกษาและกำหนดสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ในการออกแบบ

ดังแสดงในสมการที่ 1 โดยขนาดของแรงกระทบ (Impact Factor) ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของ สะพานหรือชิ้นส่วนโครงสร้างรถไฟ

$$I = 50 / (L+150) \quad (1)$$

เมื่อ

I = Impact Factor แต่ไม่เกิน 30 %

L = ความยาวช่วงสะพาน, ฟุต

ในปี ค.ศ. 1927 การประชุมกลุ่มย่อย (ASCE, 1931) ของ AREA และ AASHO (American Association of State Highway Officials) ได้ปรับปรุงให้ใช้สมการใหม่สำหรับทั้งสะพานรถไฟและ สะพานรถยนต์ดังสมการที่ 2 คือ

$$I = 50 / (L+125) \quad (2)$$

ในปี ค.ศ.1980 O'Conner และ Chan (Billing and Green, 1984) ได้ทำการทดสอบ โครงสร้างสะพานที่ Ontario จำนวน 27 สะพานที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5 – 122 ม. โดยเก็บข้อมูล ความเครียด การแอ่นตัว และการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานรถไฟ จากข้อมูลขบวนรถไฟ มากกว่า 100 ขบวนซึ่งข้ามผ่านด้วยความเร็วแตกต่างกัน พบว่าค่าแรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่ามากถึง 50% และค่าแรงพลวัตมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อน้ำหนักที่ข้ามผ่านมีค่ามากขึ้น สำหรับสะพานที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 30 ม. ขึ้นไป

ในปี ค.ศ. 1981 การประชุมกลุ่มย่อยของ ASCE (ASCE, 1981) ได้แนะนำให้เปลี่ยนชื่อจาก ค่า Impact factor เป็น ค่า Dynamic load allowance (DLA) ซึ่งให้คำจำกัดความที่ดีกว่าเนื่องจาก ค่าแรงกระทบนั้นเป็นผลที่เกิดจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ และเพื่อให้เป็นค่าที่สามารถสื่อ ได้ ในมาตรฐานต่างๆ ทั่วโลก

ในปี ค.ศ.1989 Nassif และ Nowak (Paultre et al. 1992) ได้ทำการตรวจวัดโครงสร้าง สะพานรถยนต์ในภาคสนาม และวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งพบว่าค่า Dynamic load allowance จะมีค่าน้อยลงเมื่อน้ำหนักที่ข้ามผ่านมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับ

แบบจำลองโครงสร้าง โดยค่า Factor ที่ได้คำนวณจากค่าความเครียดที่คานประธานจะมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักที่กระทำและหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

ในปี ค.ศ.1992 Paultre ได้เสนอการวิเคราะห์และการทดสอบทางพลศาสตร์ของสะพานรถยนต์ เพื่อประเมินค่าคูณเพิ่มทางพลวัต (Dynamic amplification factor) หรือค่า DAF ซึ่งสรุปได้ดังนี้คือ

- 1) ค่า DAF มีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน
- 2) ความเร็ว และน้ำหนักเพลามีอิทธิพลสำคัญต่อค่า DAF รวมถึงความขรุขระและอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพานด้วย
- 3) รูปร่างของโครงสร้างสะพานมีอิทธิพลกับค่า DAF ไม่มาก

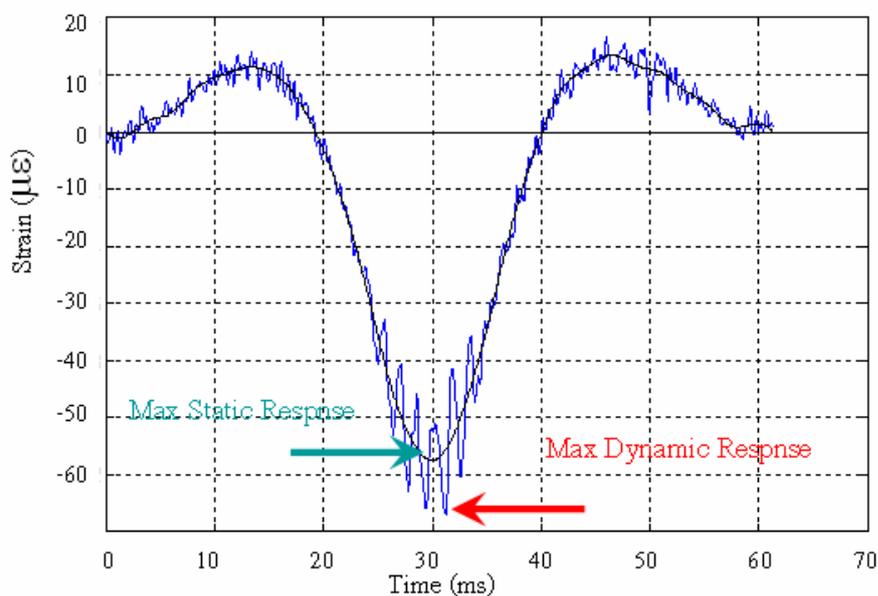
Xia and Gao (2004) ได้ทำการทดสอบสะพานรถไฟความเร็วสูงในภาคสนาม เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน และประเมินค่า DAF ของสะพานคอนกรีตอัดแรงยาว 24 ม. และขบวนรถไฟมีความเร็วสูงสุด 321.5 กม./ชม. โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง และความเร่งของโครงสร้าง พบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจะมีค่า DAF ที่สูงขึ้นด้วย โดยค่า DAF สูงสุดที่ตรวจวัดได้เมื่อพิจารณา การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับ 21% ซึ่งในการเอนตัวสูงสุดจากการทดสอบไม่เกินมาตรฐานความปลอดภัยในการเอนตัวของโครงสร้างสะพาน

ค่าคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF เป็นค่าที่ใช้คูณเพื่อขยายผลการตอบสนองพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์ให้รวมผลจากการสั่นไหวของโครงสร้าง เนื่องจากแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตามเวลา อีกทั้งมีลักษณะเป็นแรงกระแทก (Impact force) ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงต่อโครงสร้าง โดยกำหนดให้ค่า DAF เป็นอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของการตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุด (R_{dyn}) และการตอบสนองทางสถิตศาสตร์สูงสุด (R_{sta}) ต่อการตอบสนองทางสถิตศาสตร์สูงสุด ดังสมการที่ 3

$$DAF = \frac{R_{dyn} - R_{sta}}{R_{sta}} \times 100(\%) \quad (3)$$

เมื่อ R_{dyn} = การตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุดของสะพาน
 R_{sta} = การตอบสนองทางสถิตศาสตร์สูงสุดของสะพาน

ค่า R_{dyn} สามารถประเมินโดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดเชิงพลวัต ซึ่งจะเป็นผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง สำหรับกรณีที่ไม่สามารถทำการตรวจวัดแบบสถิตได้ จะสามารถวิเคราะห์หาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างทางสถิตศาสตร์ โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดทางพลศาสตร์มาผ่านกระบวนการกรองสัญญาณต่ำ (Low - pass filter) เพื่อแยกส่วนของการตอบสนองทางสถิตศาสตร์แบบเทียบเท่า (Pseudo - static) ออกจากการตอบสนองทางพลศาสตร์ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยการตอบสนองทางสถิตศาสตร์แบบเทียบเท่านี้จะเสมือนเป็นพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างที่ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาภายใต้น้ำหนักกระทำแบบสถิต เมื่อน้ำหนักที่กระทำเคลื่อนที่ไปตามความยาวของช่วงสะพานโดยไม่มีผลจากการสั่นไหวของโครงสร้างเข้ามาเกี่ยวข้อง ค่า R_{sta} ที่ใช้ในการคำนวณในสมการข้างต้นจะเป็นค่าสูงสุดของการตอบสนองทางสถิตศาสตร์แบบเทียบเท่านี้



ภาพที่ 12 แสดงการตอบสนองเชิงพลวัตและสถิตสูงสุด

ที่มา: AREMA (2002)

ค่าคุณสมบัติทางพลวัตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่สำคัญของโครงสร้างสะพานคือ ค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง

1) ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน

ค่าความถี่ธรรมชาติเป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง โดยจะเป็นค่าความถี่ในการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free vibration) เมื่อแรงกระทำที่มีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ ผลการตอบสนองจะมีการสั่นพ้อง (Resonance) ทำให้มีระดับการตอบสนองสูงกว่าปกติมาก

2) ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพาน

ค่าอัตราส่วนความหน่วงเป็นค่าในการลดพลังงานของการสั่นไหวของโครงสร้างให้กลับมาอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง โดยสะพานที่มีอัตราส่วนความหน่วงสูง เมื่อรถไฟวิ่งออกจากสะพานแล้วโครงสร้างสะพานจะสั่นแบบอิสระในช่วงเวลาสั้นๆ ก็จะกลับมาอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ในทางกลับกันสะพานที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่ำกว่าจะมีช่วงเวลาในการสั่นแบบอิสระจนกระทั่งหยุดนิ่งนานกว่า ค่าอัตราส่วนความหน่วงสามารถคำนวณได้จากข้อมูลการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระดังแสดงในสมการที่ 4

$$\xi = \frac{\ln(Y/Y_n)}{2n\pi} \quad (4)$$

โดยที่ ξ = อัตราส่วนความหน่วง
 Y = แอมพลิจูดของคลื่นรอบแรกที่พิจารณา
 Y_n = แอมพลิจูดของคลื่นรอบที่ n
 n = จำนวน Cycle ของคลื่น

ในระบบ Single degree of freedom ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำภายนอกแบบ Harmonic ที่มีความถี่รอบการสั่นไหว (ω) ของแรงจะสามารถคำนวณค่า DAF ดังสมการที่ 5 (Chopra, 2001)

$$DAF = \frac{F_{dyn}}{F_{sta}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + [2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})]^2}} \quad (5)$$

เมื่อ F_{dyn} = แรงกระทำทางพลศาสตร์
 F_{sta} = แรงกระทำทางสถิตศาสตร์
 ω = ความถี่ในการข้ามผ่าน (rad/s)
 ω_n = ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน (rad/s)
 ξ = อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพาน

Banverket (2004) ได้เสนอค่า DAF สำหรับการออกแบบของ Swedish National Railway Administration (SNRA) โดยเป็นผลที่ได้จากการตรวจวัดจริง และนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของยุโรป (Eurocode) ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งมีสูตรอย่างง่ายดังสมการที่ 6 ถึง 8

$$D = 1.0 + \frac{4}{8 + L_\phi} \quad (6)$$

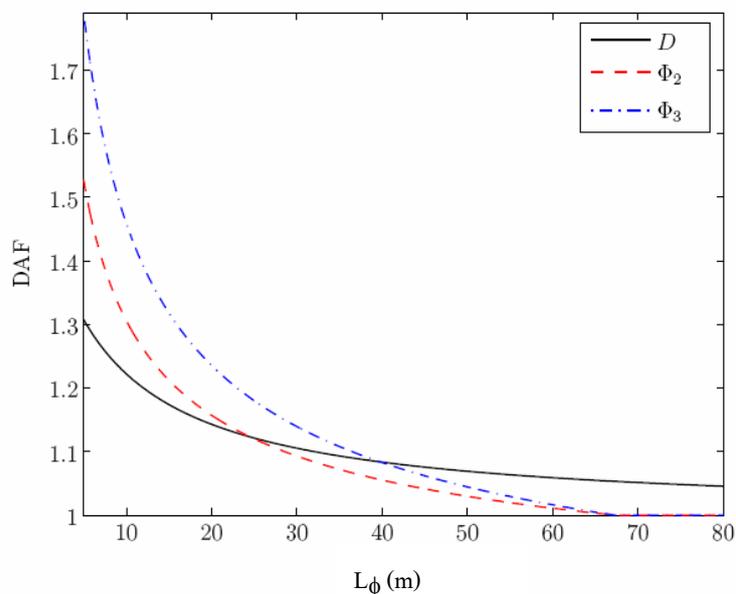
เมื่อ D คือ ค่า DAF สำหรับการออกแบบของ SNRA และ L_ϕ คือ ความยาวของสะพานรถไฟ มีหน่วยเป็นเมตร

ขณะที่ Eurocode (2002) เสนอค่า DAF สำหรับรถไฟที่มีการบำรุงรักษาเป็นประจำ (Carefully maintenance) และรถไฟมาตรฐาน (Standard maintenance) ดังแสดงในสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

$$\phi_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.82 \quad (7)$$

$$\phi_3 = \frac{2.16}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.73 \quad (8)$$

ภาพที่ 13 แสดงค่า DAF จากมาตรฐานออกแบบของ SNRA และ Eurocode จะเห็นว่า มาตรฐานออกแบบของ SNRA จะให้ค่าที่ต่ำกว่าของ Eurocode เมื่อความยาวของสะพานน้อย แต่เมื่อความยาวของสะพานมีค่ามากกว่า 40 ม. จะให้ค่าที่สูงกว่าของ Eurocode



ภาพที่ 13 ค่า DAF จากมาตรฐานออกแบบของ SNRA และ Eurocode (Johan Wiberg, 2006)

3. ข้อกำหนดของค่าคูณเพิ่มทางพลวัตในการออกแบบสะพานรถไฟในประเทศไทย

สำหรับการออกแบบสะพานรถไฟนั้น ทางการรถไฟแห่งประเทศไทยจะใช้ค่า DAF ตามมาตรฐาน AREMA (2002) ซึ่งมีข้อกำหนดในการใช้ดังสมการที่ 9 และ 10 ดังนี้

$$\text{DAF}(\%) = \text{RE} + 40 - \frac{L^2}{48} \quad \text{เมื่อ } L \text{ น้อยกว่า } 24.4 \text{ ม.} \quad (9)$$

$$\text{DAF}(\%) = \text{RE} + 16 + \frac{180}{L-9} \quad \text{เมื่อ } L \text{ มากกว่า } 24.4 \text{ ม.} \quad (10)$$

เมื่อ RE = ผลของความไม่สม่ำเสมอของรางรถไฟโดยทั่วไปคิดเป็น 10%

L = ความยาวช่วงของสะพานวัดจากศูนย์กลางฐานรองรับถึงศูนย์กลางฐานรองรับ, ม. หรือความยาวชิ้นส่วนโครงสร้างจากฐานรองรับหนึ่งไปอีกฐานรองรับหนึ่ง, ม.

ค่า DAF สำหรับการออกแบบโครงสร้างสะพานจะสามารถนำมาใช้ในการประเมินความถี่และกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานได้ โดยต้องมีการปรับแก้ค่า DAF ในสมการที่ 9 และ 10 ตามขนาดช่วงสะพานและความเร็วของขบวนรถไฟ สำหรับการประเมินความถี่ของโครงสร้างสะพาน มาตรฐาน AREMA (2002) กำหนดให้ใช้ค่า DAF เฉลี่ย (Mean DAF) โดยมีค่าเท่ากับค่า DAF ของมาตรฐานการออกแบบคูณกับค่าปรับแก้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าปรับแก้สำหรับการประเมินความถี่ของโครงสร้างสะพาน

ความเร็วของขบวนรถไฟ (กม./ชม.)	ค่าปรับแก้
≤ 96.54	$1.00 - \frac{0.80}{2500} (60 - 0.62S)^2 \geq 0.20$
> 96.54	1.00

สำหรับการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง มาตรฐาน AREMA (2002) กำหนดให้ใช้ค่า DAF มีค่าเท่ากับค่า DAF ของมาตรฐานการออกแบบคูณด้วยค่าปรับแก้ ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับความเร็วของขบวนรถไฟ (S) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าปรับแก้สำหรับการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง

ความยาวสะพาน, ม.	ค่าปรับแก้
≤ 9.15	1.00
> 9.15	0.65

4. แบบจำลองโครงสร้างสะพาน

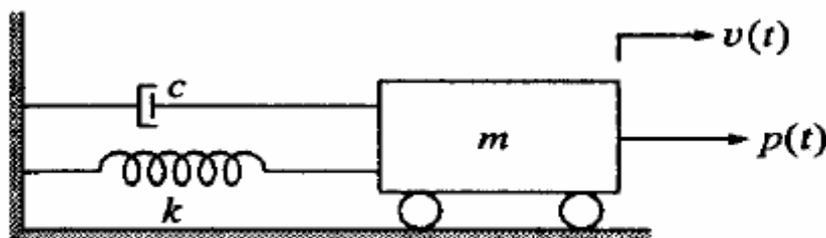
การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานรถไฟภายใต้น้ำหนักกระทำแบบเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟเป็นปัญหาที่ต้องพิจารณาในขั้นตอนออกแบบและบำรุงรักษา ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยที่พยายามศึกษาถึงความความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำของรถไฟกับโครงสร้างสะพานสืบเนื่องมาแล้วกว่า 100 ปี อย่างไรก็ตามในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ได้มีการคิดค้นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนของล้อรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน (Xia H, 2000) ซึ่งผลศึกษาดังกล่าวทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์

ระหว่างการตอบสนองทางพลศาสตร์ในแนวดิ่งและแนวราบของสะพานกับการเคลื่อนที่ของรถไฟที่ข้ามผ่านสะพานและพบว่าการศึกษาการตอบสนองของสะพานต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟนั้นมีความซับซ้อนและต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์เป็นจำนวนมาก ซึ่งวิธี Finite element เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยในการคำนวณ

แบบจำลองที่ง่ายที่สุดของการศึกษาเกี่ยวกับพลศาสตร์โครงสร้างแสดงในภาพที่ 14 โดยระบบจะประกอบด้วยมวล (Mass, m) ค่าคุณสมบัติของความยืดหยุ่น (Stiffness, k) และตัวดูดซับพลังงาน (Damper, c) โดยที่มวลนั้นวางบนล้อเลื่อนที่ปราศจากความฝืดระหว่างล้อกับพื้นผิวสัมผัส ดังนั้น มวลจึงสามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวราบ ระบบนี้ถูกเรียกว่า Single-degree-of-freedom (SDOF) หากการเคลื่อนที่ของระบบนี้ไม่มีแรงภายนอกกระทำและไม่มีความหน่วง จะเรียกว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบอิสระ (Free vibration) ซึ่งมีสมการของการเคลื่อนที่เมื่อ y คือค่าการตอบสนองของโครงสร้างดังแสดงในสมการที่ 11

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (11)$$

โดยค่าความถี่เชิงมุม (ω_0) ของการเคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{k}{m}}$



ภาพที่ 14 Single-degree-of-freedom-system (SDOF)

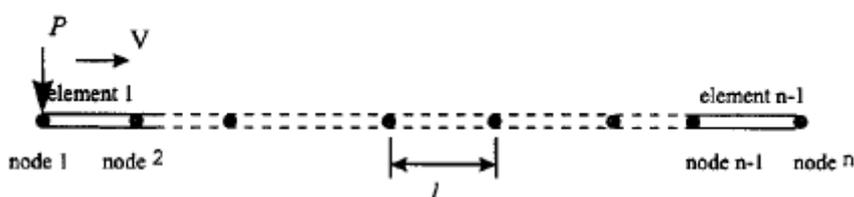
สำหรับกรณีที่ระบบถูกกระทำจากแรงภายนอก $p(t)$ สมการการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 12

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = p(t) \quad (12)$$

สมการที่ 12 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาการตอบสนองของโครงสร้างที่มีแรงกระทำจากภายนอก

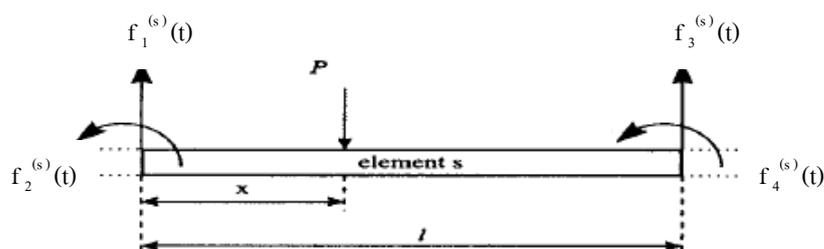
4.1 หลักการจำลองการเคลื่อนที่แบบ One-Force Model

หลักการจำลองการเคลื่อนที่ของแรงกระทำแบบ One-Force Model จะสมมติให้แรงที่เกิดจากโบริกรูป 1 โบริก มีค่าเท่ากับแรงหนึ่งแรงเคลื่อนที่จาก Node 1 ไปยัง Node n ด้วยความเร็วคงที่ V ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 คานที่มีแรงแบบเคลื่อนที่ P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V

ถ้าหากพิจารณาเพียง 1 Element พบว่าแรงที่เกิดขึ้นใน Element ภายใต้อิทธิพลของแรงเคลื่อนที่ P สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แรงที่เกิดขึ้นใน Element

เมื่อ $f_1^{(s)}(t)$ และ $f_3^{(s)}(t)$ คือแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งที่แต่ละปลายของ Element ส่วน $f_2^{(s)}(t)$ และ $f_4^{(s)}(t)$ คือโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่แต่ละปลายของ Element ซึ่ง Wu (2000) ได้เสนอว่าไม่ต้องนำค่าโมเมนต์ที่จุดปลายของแต่ละ Element มาพิจารณาในการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้น

เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความยาวของ Element ดังนั้นสำหรับ Element ที่มีความยาว (l) จะสามารถหาค่าของแรงได้จากสมการที่ 13 และ 14

$$f_1^{(s)}(t) = P\left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad (13)$$

$$f_3^{(s)}(t) = P\left(\frac{x}{l}\right) \quad (14)$$

สำหรับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนแรงจาก Node 1 ไปยัง Node i สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$t_i = \frac{(i-1)\Delta x}{v}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

เมื่อ Δx คือความยาวของแต่ละ Element, $(x_i - x_{i-1})$

t_i คือเวลาที่แรงใช้ในการเคลื่อนที่จาก Node 1 ไปหา Node i

v คือความเร็ว

4.2 หลักการจำลองการเคลื่อนที่แบบ Multi-Force Model

สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของแรงในกรณีที่มีแรงมากกว่า 1 แรง ซึ่งเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของโบกี้รถไฟที่มีจำนวนล้อมากขึ้นไปตามชนิดของขบวนรถ ซึ่งจะส่งผลให้มีจำนวนของแรงกระทำแบบเคลื่อนที่เท่ากับจำนวนล้อ ในกรณีนี้แรงทั้งหมดจะไม่ได้กระทำที่โครงสร้างพร้อมกัน แต่จะกระทำไปตามลำดับของแรงที่มาก่อนหลัง ตัวอย่างเช่นสมมติให้แรงที่ 1 กระทำที่ Node 1 เมื่อเวลา $t=0$ และแรงที่ 2 จะเคลื่อนที่มากกระทำที่ Node 1 เมื่อเวลาผ่านไป t_2 หรือที่เรียกว่า Time delay ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16

$$t_2 = \frac{s_2}{v} \quad (16)$$

เมื่อ V คือความเร็วของแรง และ s_2 คือระยะห่างระหว่างแรงที่ 1 และแรงที่ 2 สำหรับกรณีของแรงที่ 3 ไปจนถึงแรงที่ n ก็สามารถคำนวณหา Time delay ได้จากการพิจารณาระยะห่างระหว่างแรงที่พิจารณากับแรงที่ 1

4.3 ทฤษฎีและหลักการของกลศาสตร์โครงสร้าง

สมการพื้นฐานทางกลศาสตร์ของโครงสร้างประกอบด้วย สมการสภาวะสมดุล สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของวัสดุ และสมการความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสภาพขอบเขต สมการพื้นฐานดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สมการสภาวะสมดุล (Equilibrium equation)

โครงสร้างโดยรวมและแต่ละ Element จะต้องอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลระหว่างแรงกระทำจากภายนอกและภายใน ซึ่งผลรวมของแรงจากภายนอกจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงภายในของ Element ณ จุดต่อ (Node) ทั้งหมดของระบบโครงสร้างนั้น โดยมีเงื่อนไขว่าสมการสภาวะสมดุลสำหรับชิ้นส่วนนั้นจะต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องของจุดต่อนั้นด้วย

สำหรับที่จุดต่อภายในโครงสร้าง 3 มิติ จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการความสมดุลทั้ง 6 สมการ ดังสมการที่ 18

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0 \\ \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0\end{aligned}\quad (18)$$

2) สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของวัสดุ (Stress-strain relationship)

ในทางปฏิบัติสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดจะถูกสมมติให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear stress-strain relationship) ในช่วงความยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุ โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กฎของฮุก (Hook's Law) ประกอบกับวัสดุจะถูกสมมติให้เป็นแบบ Isotropic นั่นคือวัสดุจะมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์เหมือนกัน

โดยไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อย ทำให้การคำนวณและแก้สมการเป็นไปได้สะดวกและง่าย

จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของหน่วยแรงกับความเครียด และวัสดุเป็นแบบ Isotropic คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจะใช้ทำการวิเคราะห์ 2 ค่า คือ ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν) สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในชิ้นส่วนของวัสดุแบบ 3 มิติ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 19 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{21} \\ \tau_{31} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} \quad (19)$$

ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus, G) หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) ตามสมการที่ 20

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (20)$$

สำหรับ Isotropic material แล้วมีเพียงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) ที่ต้องมีการกำหนด ถ้าไม่ได้มีการกำหนดค่ามาให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้สมการนี้ในการคำนวณค่า Shear modulus

3) ความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และเงื่อนไขขอบเขต (Compatibility and Boundary conditions)

ข้อกำหนดของความต่อเนื่องกันจะต้องเป็นไปตามที่กำหนด ในการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างของ Element อันใดอันหนึ่ง หรือทุกๆ Element ที่ติดต่อกับข้อต่อ จะต้องได้ค่าของการเคลื่อนที่ที่เท่ากัน ถ้าให้ค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อ (Node displacement) มาด้วยการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของ Element ก็จะถูกคำนวณได้จากการใช้สมการพื้นฐานของเรขาคณิต ในการวิเคราะห์ Finite element โดยยึดหลักของการเคลื่อนที่ การสอดคล้องกันของการเคลื่อนที่ของข้อต่อจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจะต้องกำหนดให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงตามที่ได้สำรวจพบ เช่น ฐานรองรับแบบหมุนได้แต่เคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge) ฐานรองรับแบบเคลื่อนที่ได้เฉพาะแนวอน (Roller) ฐานรองที่ไม่อนุญาตให้มีการหมุนและเคลื่อนที่ (Fixed) และฐานรองรับแบบสปริง (Spring) เป็นต้น อย่างไรก็ตามสภาพของฐานรองอาจมีพฤติกรรมกึ่งๆระหว่างฐานรองที่ได้กล่าวมาทั้ง 3 ดังนั้นจะต้องใช้วิจารณญาณในการเลือกแบบที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

4.4 การวิเคราะห์ด้วย Finite element กับโครงสร้างสะพาน

หลักการของวิธี Finite element ทำได้โดยการแบ่งโครงสร้างจริงให้มีขนาดเล็กหลายๆ ชิ้นส่วน โดยชิ้นส่วนเล็กแต่ละชิ้นเรียกว่า Element ในแต่ละ Element กำหนดโดยสมการพื้นฐานทางกลศาสตร์โครงสร้าง ประกอบด้วย สมการสถานะสมดุล สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ และสมการความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสภาพขอบเขต จากนั้นสมการของชิ้นส่วนทุกตัวจะถูกนำมาประกอบกันเป็นระบบสมการของโครงสร้างโดยรวม และทำการกำหนดสภาพขอบเขตของปัญหาหลังจากนั้นทำการแก้ระบบสมการ เพื่อหาคำตอบด้วยกระบวนการเชิงตัวเลข การวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

1) การเลือกใช้ชนิด Element

การเลือกใช้ชนิดของชิ้นส่วนหรือเรียกว่า Element นั้นจะต้องเลือกชนิดของชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างจริงที่ทำการวิเคราะห์ โดยที่ชนิดของชิ้นส่วนจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด เช่น อาจจะใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ (Beam element หรือ Frame element) แทน Girder ของสะพาน เป็นต้น ตลอดจนจะต้องคำนึงถึงการกระทำของน้ำหนัก รวมทั้งความละเอียดที่ผู้วิเคราะห์ต้องการ คือ อาจจะใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ เช่น เป็นชนิด Plate หรือ Shell element เป็นต้น

2) การแบ่งโครงสร้างสะพานเป็นชิ้นส่วนย่อย

การแบ่งโครงสร้างสะพานจริงให้ออกเป็นหลายๆ ชิ้นส่วนย่อย โดยแต่ละชิ้นส่วนจะต้องติดกับชิ้นส่วนข้างเคียงกับจุดขอบของชิ้นส่วนซึ่งเรียกว่า จุดต่อ (Node) และจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิมให้มากที่สุดกล่าวคือ แบบจำลองทาง Finite element จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมมากที่สุด เช่น บริเวณที่มีส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลันก็จำเป็นต้องแทนด้วยชิ้นส่วนขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้การวิเคราะห์นั้นถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ก็อาจแทนด้วยชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองมีจำนวนชิ้นส่วนมากเกินไปก็จะทำให้เวลาในการคำนวณสูง และอาจไม่สามารถทำงานได้ถ้าคอมพิวเตอร์มีข้อจำกัดในเรื่องหน่วยความจำและการนำเสนอข้อมูล

3) การเลือกฟังก์ชันการขจัด

การเลือกจะต้องเลือกใช้ฟังก์ชันการขจัด (Displacement function) ภายในชิ้นส่วนให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของชิ้นส่วนหรือสอดคล้องกับระดับความเสรี (Degree of freedom) ของชิ้นส่วน ฟังก์ชันการขจัดที่นิยมใช้คือ พอลิโนเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจจะเป็นพอลิโนเมียลกำลังหนึ่ง กำลังสอง หรือกำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเรขาคณิตก็สามารถเลือกใช้ได้แต่ไม่เป็นที่นิยม ทั้งนี้เพราะฟังก์ชันพอลิโนเมียลให้ความสะดวกมากกว่า ในกรณีของปัญหาเอลิเมนต์ 1 มิติ ฟังก์ชันการขจัดที่จุดต่อจะเขียนอยู่ในเทอมของพิกัดของระนาบ เช่นระนาบ x-y เป็นต้น ฟังก์ชัน

การขจัดที่จะเลือกใช้จะต้องทำให้ผลเฉลยมีความต่อเนื่องทั้งภายในชิ้นส่วน และแบบจำลองของระบบรวม

4) การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการขจัดและหน่วยแรงกับความเครียด

การหาสมการทาง Finite element ของแต่ละชิ้นส่วน จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการขจัด และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด ในกรณีของปัญหามิติเดียว การยึดหดตัวของชิ้นส่วน (u) ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น ทิศทาง x จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด ϵ_x ในกรณีที่ ϵ_x มีค่าน้อย $\epsilon_x = du/dx$ และถ้าวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่นจากกฎของฮุก จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับความเครียดได้ดังสมการที่ 21 คือ

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (21)$$

โดยที่ σ_x = หน่วยแรงในทิศทาง x
 E = โมดูลัสยืดหยุ่น

ผลเฉลยของการขจัด หน่วยแรง ความเครียด โดยวิธี Finite Element จะถูกต้องแม่นยำเพียงใด ย่อมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการขจัด และหน่วยแรงกับความเครียดจะเป็นลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เป็นสมการเชิงเส้น

5) การหาสติเฟเนสมเมตริกและสมการของเอลิเมนต์

วิธีสมมูลโดยตรงนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถหา Stiffness matrix และสมการสมมูลของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของ Element หรือเรียกว่าชิ้นส่วนได้โดยเงื่อนไขการสมมูลของชิ้นส่วน ส่วนมากจะใช้หา Stiffness matrix ของชิ้นส่วนมิติเดียว เช่น สปริง ท่อนโลหะ เพลลา และคาน เป็นต้น

โดยอาศัยสมการสมมูลที่จุดต่อ เราจะได้สมการสมมูลของแรงในเทอมของสติฟเนสเมตริกของเอลิเมนต์ และการกระจัดที่จุดต่อของ Element สมการดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของเมตริกดังสมการที่ 22

$$[f] = [k][d] \quad (22)$$

เมื่อ $[f]$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำที่จุดต่อ

$[k]$ = สติฟเนสเมตริกของเอลิเมนต์

$[d]$ = จำนวนการกระจัดที่จุดต่อที่ยังไม่ทราบค่า

6) การกำหนดน้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่ คือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อสะพานอยู่ตลอดอายุการใช้งาน เช่น น้ำหนักตัวโครงสร้างเอง หรืออาจจะเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม เช่น หินร่องรางไม้หมอน เป็นต้น สำหรับน้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำกับโครงสร้างสะพานเหล็กคือน้ำหนักของขบวนรถไฟโดยสาร ขบวนรถไฟดีเซลราง และขบวนรถไฟบรรทุกสินค้า

7) การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สมการรวมของระบบโครงสร้างหาได้จากการรวมสมการของแต่ละ Element ในขั้นตอนที่ 5 เข้าด้วยกันโดยวิธี Superposition method หรือ Direct stiffness method โดยอาศัยหลักการสมมูลของแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วนและความต่อเนื่องของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้รับ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกได้ดังสมการที่ 23

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (23)$$

โดยที่ $\{F\}$ = เวกเตอร์รวมของแรงที่จุดต่อ

$[K]$ = สติฟเนสเมตริกรวมของระบบโครงสร้าง

$\{d\}$ = เวกเตอร์รวมของการกระจัดที่อาจจะทราบค่าบางค่า และบางตัวอาจไม่ทราบค่า

เนื่องจาก $[K]$ เป็น Singular matrix ซึ่งมี Determinant เป็นศูนย์จึงไม่สามารถหาค่า $\{d\}$ โดยตรงได้ จึงต้องมีเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) หรือเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ที่เหมาะสมกับลักษณะของจตุรกรรับจริง และไม่เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะ Rigid body motion ซึ่งจะทำให้ $[K]$ ไม่เป็น Singular matrix และสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

8) การวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองของระบบโครงสร้างสะพาน

8.1) การวิเคราะห์แบบสถิต

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบเขต หรือเงื่อนไขบังคับดังสมการที่ 23 แล้วจะสามารถหาการกระจัด $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตพร้อมๆ กันคือการหาการกระจัด $\{d\}$ อาจจะใช้ Gauss's elimination method หรือ Iteration method หรืออาจหาจากการคูณด้วย $[K]^{-1}$ ตลอดโดย $[K]$ จะต้องไม่เป็น Singular matrix

ค่าสถิติในสมมาตริกสามารถหาได้จากการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด และคุณสมบัติของพื้นที่หน้าตัด ในแต่ละกรณีของการบรรทุกน้ำหนัก (Load case) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป จะทำการสร้าง Load vector (r) และแก้สมการหาการขจัดสถิต (Static displacement, u) โดยอัตโนมัติ

8.2) การวิเคราะห์แบบพลวัต

ในส่วนการวิเคราะห์แบบพลวัต (Dynamic analysis) จะทำการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue โดยที่การวิเคราะห์ Eigenvalue จะใช้ในกระบวนการปรับแก้แบบจำลองให้มีคุณสมบัติทางพลศาสตร์ทางด้านความถี่ของโครงสร้างสะพานให้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงระหว่างการทดสอบกับผลการวิเคราะห์

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างเช่น ค่าความถี่พื้นฐานธรรมชาติ และโหมดการสั่นไหว (Mode shapes) โดยอิสระแบบ Undamped สามารถหาได้จากสมการการวิเคราะห์ Eigenvalue ดังสมการที่ 24 คือ

$$[K - \omega^2 M]\phi = 0 \quad (24)$$

โดยที่ M = Diagonal mass matrix

Ω^2 = Diagonal matrix of eigenvalue

ϕ = Matrix of corresponding eigenvalue (Mode shape)

Eigenvalue คือค่า Circular Frequency (Ω) ของ Mode นั้นยกกำลังสอง ส่วนค่า Cycle Frequency (f) และ Period (T) ของ Mode นั้นจะสัมพันธ์กับ Ω คือ $T = 1/f$ และ $f = \Omega/2\pi$ แต่ละคู่ของ Eigenvalue – Eigenvector เป็นโหมดการสั่นไหวธรรมชาติ (Natural vibration mode of structure) โดยที่โหมดต่างๆ ถูกบ่งชี้โดยหมายเลข 1 ถึง n ตามลำดับ

9) การหาค่าความเครียดและหน่วยแรง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างนอกจากต้องการทราบการกระจัดแล้วยังต้องการทราบค่าของความเครียด หน่วยแรง หรือค่าของโมเมนต์และแรงเฉือน ค่าต่างๆเหล่านี้สามารถคำนวณหาได้โดยใช้ความรู้พื้นฐานทางกลศาสตร์ เช่น ถ้าทราบค่าการกระจัด u ก็สามารถหาความเครียดจาก $\epsilon = du/dx$ และหาค่าหน่วยแรงจาก $\sigma = E \epsilon$ เป็นต้น

4.5 การวิเคราะห์การเชื่อมต่อของโครงสร้างสะพาน

เนื่องจากโครงสร้างสะพานมีชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกันคือคานรองหมอนรถไฟ (Stringer) กับคานขวาง (Floor beam) โดยทั่วไปในการออกแบบมักจะไม่ได้คิดถึงการเชื่อมต่อว่าเป็นรูปแบบใด ส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นคานอย่างง่าย ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่ออาจจะไม่ใช่เช่นนั้นก็ได้ ดังนั้นการตรวจสอบว่าเป็นการเชื่อมต่อรูปแบบไหน จะนำไปเปรียบเทียบกับ การเชื่อมต่อของโครงสร้างสะพานได้

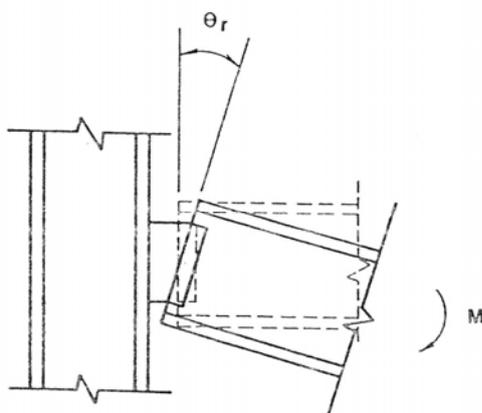
The Allowable stress design (AISC, 1989) ได้ให้รูปแบบของการเชื่อมต่อของโครงสร้างเป็น 3 ประเภทคือ

1) Rigid connection การเชื่อมต่อชนิดนี้จะสมมติว่าการเชื่อมต่อคิดเป็นโครงสร้างเดียวกันระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น โดยสมมติว่าอยู่ในช่วงพฤติกรรมการยืดหยุ่นของโครงสร้าง

2) Shear connection การเชื่อมต่อชนิดนี้จะสมมติว่ามีการถ่ายแรงเฉพะแรงเฉือนเท่านั้น โดยปราศจากโมเมนต์เมื่อโครงสร้างมีแรงมากระทำ โดยการเชื่อมต่อนี้จะไม่เกิดหน่วยแรงยึดรั้ง (Restraint) เกิดขึ้น

3) Semi-Rigid connection การเชื่อมต่อชนิดนี้สามารถถ่ายแรงเฉือนและยังสามารถถ่ายเทโมเมนต์ได้บางส่วน

การเชื่อมต่อโครงสร้างโดยทั่วไปนั้น จะมีแรงตามแนวแกน (Axial force) แรงเฉือน (Shear force) โมเมนต์ดัด (Bending moment) และโมเมนต์บิด (Torsion) ซึ่งในระนาบเดียวกันแรงตามแนวแกนและแรงเฉือนจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยเมื่อเทียบกับโมเมนต์ดัด ดังนั้นจะมีผลกระทบของโมเมนต์กับมุมหมุนของจุดเชื่อมต่อเท่านั้นที่จะต้องพิจารณา เมื่อจุดเชื่อมต่อหมุนด้วยมุม θ_r เมื่อมีโมเมนต์ M กระทำ ค่าของมุมจะมีความสัมพันธ์กับการหมุนระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างที่จุดเชื่อมต่อ ดังแสดงในภาพที่ 17



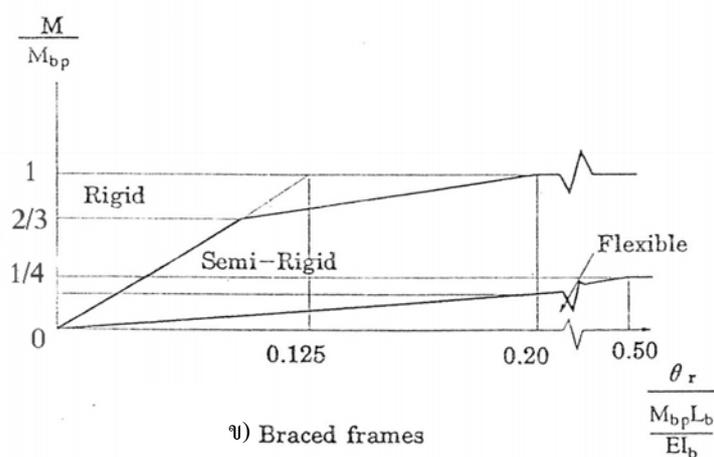
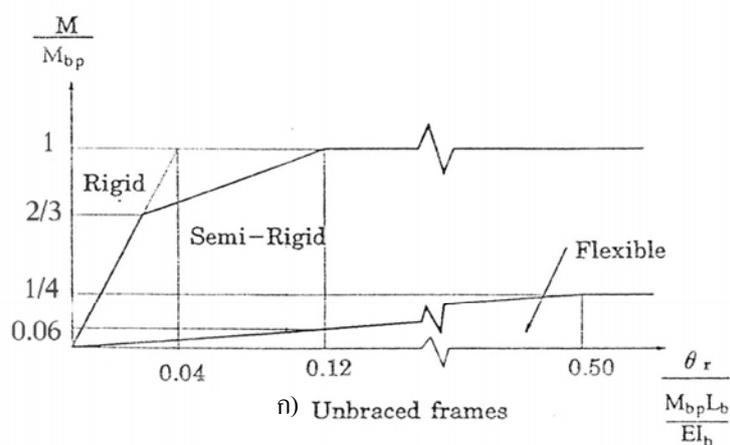
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์กับการหมุนระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างที่จุดเชื่อมต่อ

ที่มา: AISC (1989)

Eurocode (Cen, 1992) และ Bjorhovde (1990) ได้นำเสนอการจัดประเภทของการเชื่อมตื่อดังแสดงในภาพที่ 18 และ 19 เมื่อ EI_b คือ Bending rigidity ของคานที่ต่อเชื่อม, L_b คือ ความยาวคาน และ M_{bp} คือ กำลังรับโมเมนต์ (Moment capacity) ของคานที่ต่อเชื่อม โดยในการจัดประเภทของ Bjorhovde จะเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากไม่ได้พิจารณาพฤติกรรมทั้งหมดของโครงข้อแข็ง ซึ่งของ Eurocode จะพิจารณาพฤติกรรมทั้งหมดแต่ต้องการรายละเอียดด้านกำลังของโครง

ข้อแข็งในระบบโครงสร้างมาก อีกทั้งไม่ได้พิจารณาค่า Ductility ของการเชื่อมต่อ แต่อย่างไรก็ตาม Eurocode ก็ได้ยอมรับการจัดประเภทวิธีการประมาณ โดย Bjorhovde

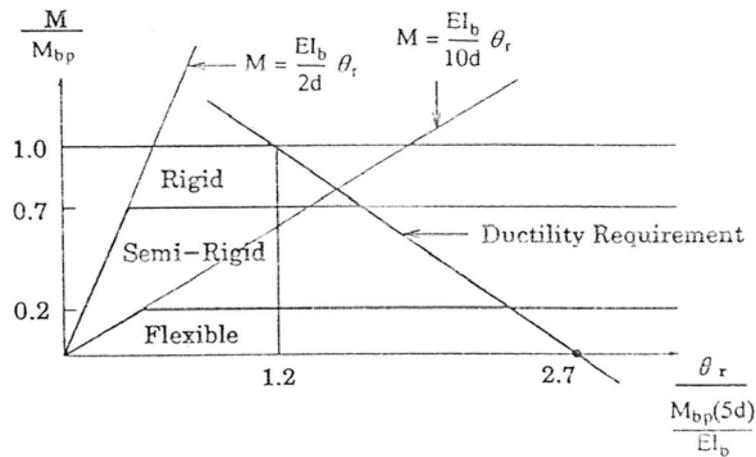
Goto, Miyashita and Chen (1994) ได้ทำการทดสอบและใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Elastic-plastic finite displacement พบว่าขอบเขตการจัดประเภททั้ง Eurocode และ Bjorhovde ใช้ได้ แต่อาจจะต้องตรวจสอบการกระทำของน้ำหนักบรรทุกเพื่อพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักของจุดเชื่อมต่อ



ภาพที่ 18 การจัดประเภทของการเชื่อมต่อตามระบบ Eurocode

หมายเหตุ EI_b = Bending rigidity of connected beam L_b = Beam length
 M_{bp} = Moment capacity of connected beam

ที่มา: Cen (1992)



EI_b = Bending rigidity of connected beam

d = Beam depth

M_{bp} = Moment capacity of connected beam

ภาพที่ 19 การจัดประเภทของการเชื่อมต่อตาม Bjorhovde

ที่มา: Bjorhovde (1990)

สำหรับการหาดีกรีความต่อเนื่อง (Degree of continuity, α) ของการเชื่อมต่อของคานารองหมอนรถไฟ (Stringer) กับคานาขวาง (Floor Beam) จากการตรวจวัด Mohammad Al-Emrani (2005) นำเสนอให้คำนวณจากสมการที่ 25 คือ

$$\alpha = \frac{M_p}{M_f} \quad (25)$$

เมื่อ M_p คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นเป็นบางส่วน (Partially moment) ที่ได้จากการตรวจวัด

M_f คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Fully moment) ที่ได้จากการวิเคราะห์

ซึ่งเมื่อรู้ค่าดีกรีความต่อเนื่อง ก็จะสามารถพิจารณารูปแบบของการเชื่อมต่อของโครงสร้างสะพานโดยพิจารณาจากแกน Y ของการจัดประเภทของ Bjorhovde ได้

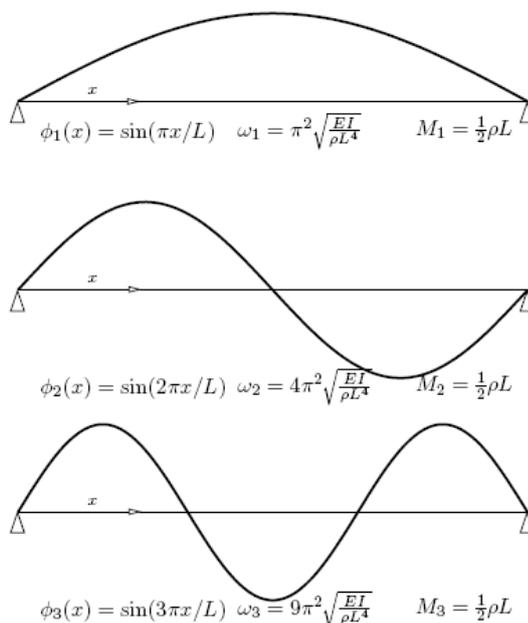
5. การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพาน

จากการศึกษาที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลกระทบทางพลศาสตร์ที่สำคัญของโครงสร้างสะพานนี้อาจจะมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของค่า DAF เมื่อทำการทดสอบในภาคสนาม คือ ความเร็วของรถไฟ น้ำหนักเพลา และความหน่วงของโครงสร้างสะพาน ตัวแปรเหล่านี้จะนำเสนอได้ในรูปการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ 2 รูปแบบ คือ

5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่จะคำนึงถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน แต่ไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์ขบวนรถไฟที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานไว้ด้วย ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่โดยใช้วิธี Time integration ในสมการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์เมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่เปรียบเสมือนน้ำหนักเพลาารถไฟที่เคลื่อนที่ ซึ่งในแบบจำลองโครงสร้างสำหรับการอินทิเกรตในระบบอาจจะมี N degree of freedom หรืออาจจะลดจำนวน Degree of freedom ลงจากการวิเคราะห์โหมดการสั่นไหว โดยการลดรูปนั้นจะใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ประมาณหาค่า Eigen mode of vibration โดยอาศัยโปรแกรมช่วยในการคำนวณ

สำหรับการวิเคราะห์สะพานโครงสร้างอย่างง่าย Simply supported isostatic อาจจะสามารถหา Eigen mode of vibration ได้จากการใช้ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) คือ $\phi_n(x) = \sin(n\pi x/L)$ เมื่อค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ $\omega_n = n\pi^2 \sqrt{EI/mL^4}$ ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ฟังก์ชันรูปร่างของสะพาน โครงสร้างอย่างง่าย

ที่มา: Goicolea (2002)

Goicolea (2002) ได้นำเสนอสมการในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโครงสร้างสะพาน โดยค่าโหมดการสั่นไหวที่ได้นั้น จะนำไปใช้อินทิเกรตในสมการทางพลศาสตร์ สำหรับการหาผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 21 ซึ่งเมื่อพิจารณาคานต่อเนื่องความยาว L ที่มีค่ารูปร่างของโหมด ($\phi_i(x)$) มวลของโหมด (M_i) และค่าความถี่ของโหมด (ω_i) จะสามารถแสดงสมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับน้ำหนักบรรทุก F เมื่อข้ามผ่านสะพานด้วยความเร็วคงที่ v ดังสมการที่ 26

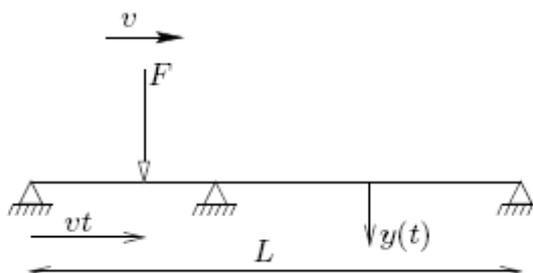
$$M_i \ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i M_i \dot{y}_i + \omega_i^2 M_i y_i = F \phi_i(vt) \quad (26)$$

เมื่อ y_i คือ ขนาดของการเคลื่อนที่ของแต่ละโหมดการสั่นไหว

ξ_i คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพาน

$\phi(\cdot)_i$ คือ รูปร่างของโหมด มีเงื่อนไขคือ

$$\begin{aligned}\phi_i(x) &= \phi_i(x) \quad , \quad 0 < x < L \\ &= 0 \quad , \quad \text{กรณีอื่นๆ}\end{aligned}$$



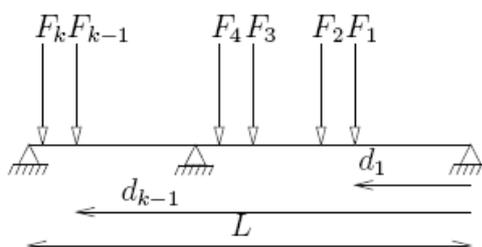
ภาพที่ 21 ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่

ที่มา: Goicolea (2002)

ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อน้ำหนักเพลาารถไฟวิ่งผ่านได้จากการรวมกันของผลการตอบสนองของน้ำหนักเดี่ยว F_k ดังภาพที่ 22

สมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับกลุ่มน้ำหนักเพลาารถไฟที่ข้ามผ่านสะพานด้วยความเร็วคงที่ v แสดงในสมการที่ 27

$$M_i \ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i M_i \dot{y}_i + \omega_i^2 M_i y_i = \sum_{k=1}^n F \phi_i(vt - d_k) \quad (27)$$



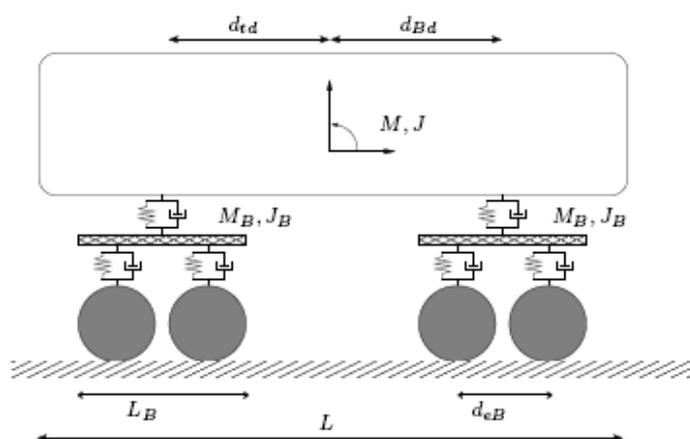
ภาพที่ 22 ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อน้ำหนักเพลาารถไฟเคลื่อนที่

ที่มา: Goicolea (2002)

5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction)

การวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของ โครงสร้างและขบวนรถไฟนั้นคล้ายกับการวิเคราะห์โดยการใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในแต่ละ Time integration ของสมการทางพลศาสตร์ของโครงสร้างเชื่อมต่อการสั่นไหวของค่าสปริงของรถไฟ ดังนั้นในความเป็นจริงน้ำหนักบรรทุกไม่ได้กระทำกระทำแบบตายตัว (Fixed value) เมื่อข้ามผ่านสะพาน

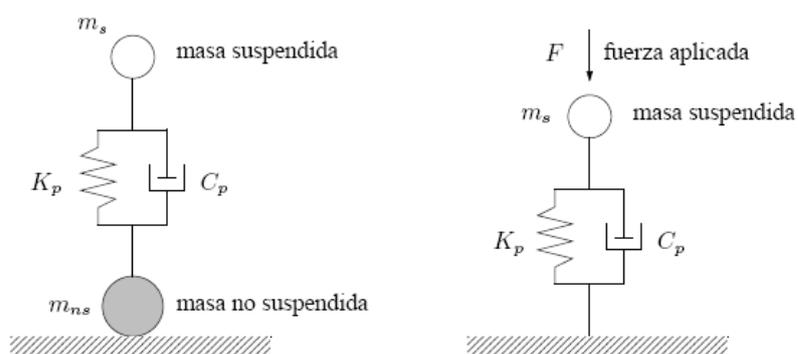
รูปแบบของแบบจำลองขบวนรถไฟโดยสมบูรณ์ ดังภาพที่ 23 จะมีค่าสปริงชุดแรกในแต่ละเพลลาโดยจะแสดงค่าคุณสมบัติในการรับแรงกระทำด้วยค่าสติฟเนส (Stiffness, K_p) และค่าความหน่วง (Damping, C_p) ค่าสปริงในชุดสองเกี่ยวข้องกับค่าคุณสมบัติในการรับแรงกระทำด้วยค่าสติฟเนส (K_s) และค่าความหน่วงของตัว (C_s) ของตัวโบกี้, ค่ามวลของล้อ (m_w) ความยาว (L_B) มวลแคร่รับเพลลา (M_B) และ โมเมนต์ความเฉื่อยของแคร่รับเพลลา (J_B), มวล และ โมเมนต์ความเฉื่อยของห้องโดยสาร (M, J), ความยาวของรถไฟ (L), ระยะศูนย์กลางมวลถึงระยะศูนย์กลางล้อ (d_{Bd} , d_{td}) และระยะศูนย์กลางล้อถึงศูนย์กลางล้อ (d_{eB})



ภาพที่ 23 รูปแบบของแบบจำลองขบวนรถไฟโดยสมบูรณ์

ที่มา: Goicolea (2002)

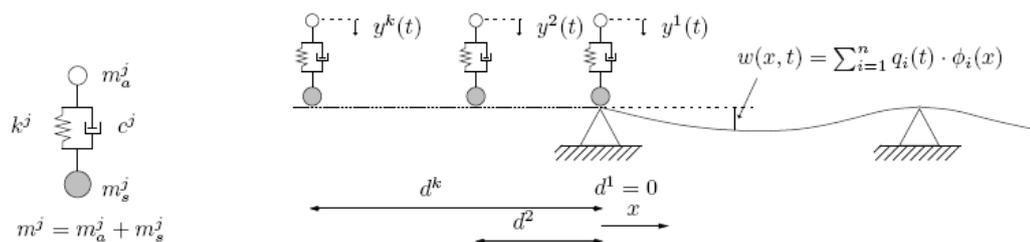
รายละเอียดของการทำแบบจำลองแบบนี้จะค่อนข้างยุ่งยากและมีความละเอียดสูง
อย่างไรก็ดี สามารถแทนด้วยแบบจำลองการกระทำของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟอย่างง่าย
โดยจะมีสปริงชุดเดียวในแต่ละเพลา ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แบบจำลองการกระทำของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟอย่างง่าย

ที่มา: Goicolea (2002)

สำหรับขบวนรถไฟที่มีน้ำหนักเพลาจำนวน k กลุ่ม จะแสดงการกระทำของ
โครงสร้างและขบวนรถไฟดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การกระทำของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ

ที่มา: Goicolea (2002)

ดังนั้นในแบบจำลองจะพิจารณา Degree of freedom สำหรับแต่ละโหนดการสั่นไหว ของความสัมพันธ์ของโครงสร้างและขบวนการไฟฟ้า ซึ่ง J.M. Goicolea (2002) ได้แสดงสมการ สำหรับแต่ละโหนดการสั่นไหว ดังสมการที่ 28 และ 29 คือ

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = \sum_{j=1}^k (\phi_i(d^j))(m_a^j \ddot{y} + m_g^j \ddot{y}_g) \quad (28)$$

$$m_a^j \ddot{y} + k[y^j - \sum_{i=1}^n q_i (\phi_i(d^j))] + c^j [\dot{y}^j - \sum_{i=1}^n \dot{q}_i (\phi_i(d^j))] - \sum_{i=1}^n q_i v(\phi_i'(d^j))] = 0 \quad (29)$$

เมื่อ q_i คือ ขนาดของการเคลื่อนที่ของแต่ละโหนดการสั่นไหวของสะพาน

M_i คือ มวลของโครงสร้างสะพาน

C_i คือ ค่าความหน่วงของโครงสร้างสะพาน

K_i คือ ค่าสติเฟนสของโครงสร้างสะพาน

m คือ มวลของน้ำหนักเพลารถไฟ

m_a คือ มวลส่วนที่เหนือแคร่เพลารถไฟ

y คือ ขนาดของการเคลื่อนที่ของขบวนการไฟฟ้า

k คือ ค่าสติเฟนสจากสปริงของรถไฟ

c คือ ค่าความหน่วงจากลูกสูบของรถไฟ

$\phi(\cdot)_i$ คือ รูปร่างของโหนด

การหาผลการตอบสนองในสมการที่ 28 และ 29 จะใช้วิธี Time numerical integration ในการแก้สมการทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง ด้วยวิธีของ Newmark's method เพื่อใช้ช่วย ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์

Yau (2001) ได้ศึกษาผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน แล้วพบว่า เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่มากกว่า 1 น้ำหนักบรรทุก ข้ามผ่านโครงสร้างสะพานจะเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ขึ้น ทำให้เกิดการตอบสนองที่เกิดขึ้นค่อนข้างสูง โดยจะมีความสัมพันธ์ กับค่าปัจจัยของความเร็ว (S, Speed parameter) ดังแสดงในสมการที่ 30

$$S = \pi v / L\omega_n \quad (30)$$

ซึ่งสำหรับค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้องนั้นจะมีค่าดังสมการที่ 31

$$S = d / (2nL) \quad (31)$$

เมื่อ d คือ ระยะระหว่างน้ำหนักบรรทุกถึงน้ำหนักบรรทุก และ n เป็นเลขจำนวนเต็ม นั่นคือเมื่อค่าปัจจัยความเร็วมีค่าใกล้เคียงกับค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้องจะทำให้การตอบสนองของโครงสร้างสะพานมีค่าสูง

6. การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analysis)

6.1 การวิเคราะห์สัญญาณแกนเวลาและความถี่ (Time & frequency domain in signal analysis)

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดนั้น จะต้องมีการวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analysis) ก่อน ซึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณนี้จะทำการเปลี่ยนสัญญาณของเวลา (Time domain) ให้อยู่ในรูปของสัญญาณความถี่ (Frequency domain) โดยพื้นฐานของทฤษฎีนี้คือ การแสดงสัญญาณจากความสัมพันธ์ของจำนวน Sine และ Cosine เทอม นั่นก็คือจะทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยรวมกันหลายๆ ค่าความถี่และแสดงค่าออกเป็นสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันของแต่ละค่าความถี่

ฟังก์ชัน Cosine และ Sine มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลใน Euler's Formula ดังสมการที่ 31 และ 32

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (31)$$

$$e^{-i\theta} = \cos(-\theta) + i \sin(-\theta) = \cos \theta - i \sin \theta \quad (32)$$

จากความสัมพันธ์นี้ จะสามารถแสดงพจน์ของฟังก์ชัน Sine และ Cosine ในรูปฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลดังสมการที่ 33

$$\sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} \quad \text{และ} \quad \cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \quad (33)$$

เมื่อกำหนดให้ ω_n คือค่าความถี่ของสัญญาณลำดับที่ n จะสามารถแสดงค่าในรูปของฟังก์ชัน Sine และ Cosine ได้ดังสมการที่ 34

$$\omega_n = \cos(2\pi/n) - i \sin(2\pi/n) = e^{-2\pi i/n} \quad (34)$$

การวิเคราะห์สัญญาณนั้นจะใช้คุณสมบัติการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) และพิจารณาขนาดของฟังก์ชัน Sine และ Cosine ในแต่ละความถี่ สมมติฟังก์ชันหรือค่าจากสัญญาณ y โดยขึ้นอยู่กับเวลา t มีขนาดของสัญญาณจำนวน n ความถี่ จะแสดงดังสมการที่ 35

$$y_l = y_l(t) \quad , \quad l=1,2,\dots,n \quad (35)$$

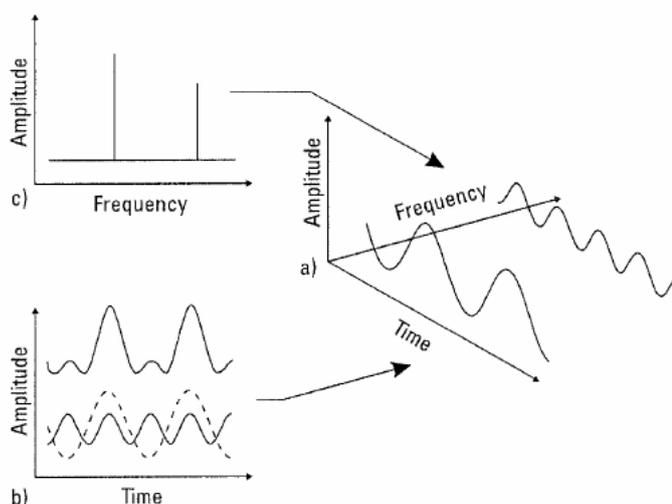
เทคนิคการแปลงฟูเรียร์นี้จะทำให้แยกสัญญาณออกมาได้ เรียกว่า Discrete Fourier transform (DFT) สำหรับสัญญาณที่มีจำนวนข้อมูลแน่นอน จะเขียนอยู่ในรูปอนุกรม ดังสมการที่ 36

$$Y_l = \sum_{k=1}^n y_k \omega_n^{(k-1)(l-1)} \quad , \quad l=1,2,\dots,n \quad (36)$$

หรือในรูปของเมตริก

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_n^1 & \dots & \omega_n^{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \omega_n^n & \dots & \omega_n^{(n-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}$$

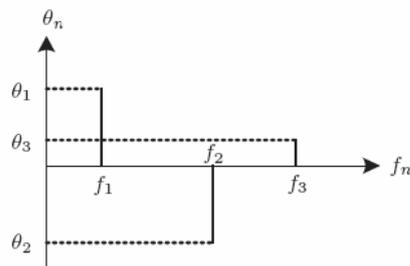
ในการคำนวณ โดยการใช้ DFT นั้นจะมีข้อมูลมากและใช้เวลาในการคำนวณนาน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) จะช่วยให้สามารถคำนวณได้เร็วขึ้น (Hewlett-Packard Co, 1994) โดยวิธี FFT จะต้องการตัวเลขของชุดข้อมูลเป็นเลขยกกำลังสอง $n = 2^N$ เมื่อ N เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประวัติของเวลาและสัญญาณความถี่อยู่ในกราฟเดียวกันได้ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ของประวัติเวลาและสัญญาณความถี่

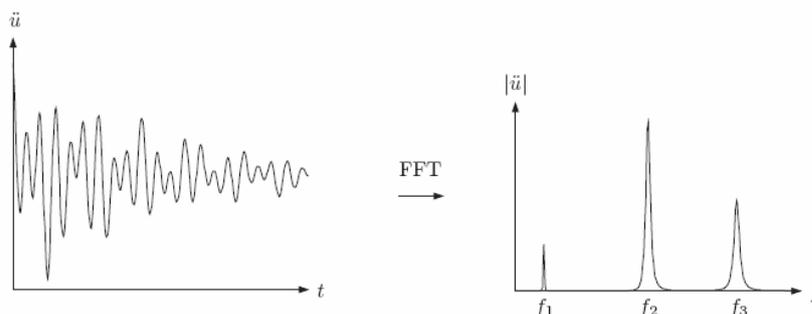
ที่มา: Battini (2005)

ผลของการแปลงค่าข้อมูลด้วยวิธี FFT จะให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างในรูปของสัญญาณความถี่ (Frequency domain) ในกรณีสัญญาณเป็นแบบไม่มีความหน่วง ค่าความถี่จะสัมพันธ์กับมุมคาบของสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 27 ในขณะที่ภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมคาบและความถี่ของสัญญาณแบบมีความหน่วง โดยค่าความถี่จะพิจารณาได้จากความถี่ความถี่ของโครงสร้าง



ภาพที่ 27 ผลของ FFT ของสัญญาณระหว่างมุมของคาบ กับสัญญาณความถี่ กรณีสัญญาณเป็นแบบไม่มีความหน่วง (Undamp)

ที่มา: Battini (2005)

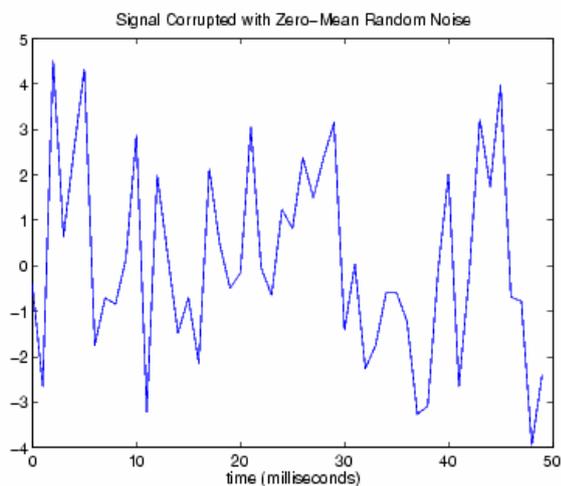


ภาพที่ 28 ผลของ FFT ของโครงสร้างที่มีความหน่วง (Damp) ระหว่างการตอบสนองและค่าความถี่

ที่มา: Battini (2005)

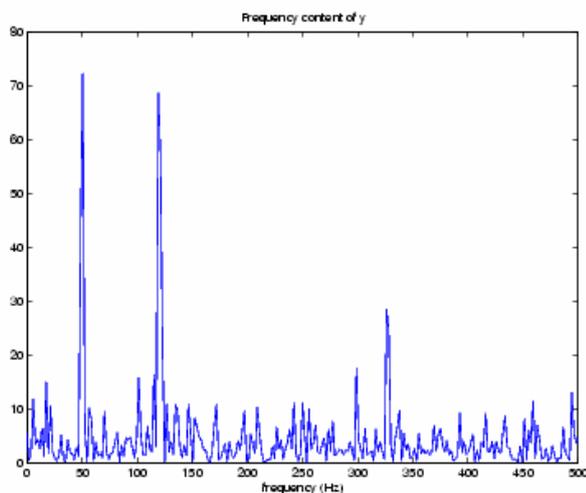
การใช้ Fast fourier transform สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณความถี่ซึ่งอยู่ในประวัติของเวลาและมีสัญญาณรบกวน (Noise) ตัวอย่างเช่น ข้อมูลที่ได้จากการเก็บด้วยความถี่ 1000 Hz จากสัญญาณซึ่งมีความถี่หลักเป็น 50 Hz และ 10 Hz และมีความถี่ของสัญญาณรบกวนอยู่อย่างกระจัดกระจายดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งจะเป็นการยากที่จะระบุค่าสัญญาณความถี่โดยการดูจากสัญญาณดั้งเดิม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปลี่ยนแกนประวัติเวลา (Time history) ให้อยู่ในรูปของ

สัญญาณความถี่ (Frequency domain) โดยการใช้วิธี FFT ดังแสดงในภาพที่ 30 สามารถหาค่าสัญญาณความถี่หลักของข้อมูลได้จากความถี่ที่มีค่าสูงสุดในกราฟ



ภาพที่ 29 สัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน

ที่มา: Hewlett-Packard Co (1994)



ภาพที่ 30 การใช้ FFT เพื่อหาค่าสัญญาณความถี่หลัก

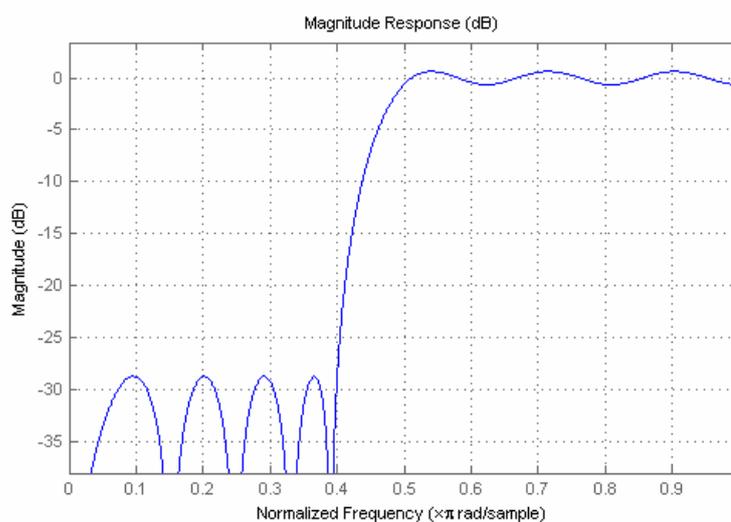
ที่มา: Hewlett-Packard Co (1994)

6.2 การกรองสัญญาณ (Filter Signal)

ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณดิบนั้นส่วนมากจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) ปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการกรองสัญญาณในช่วงที่ต้องการออกมา ซึ่งสามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น 3 วิธี คือ

1) วิธีการกรองสัญญาณต่ำ (Low-Pass Filter)

เป็นการกรองสัญญาณโดยทำการตัดช่วงสัญญาณ (Cutoff) ที่มีค่าความถี่สูงกว่าที่กำหนดออกไปให้เหลือแต่สัญญาณต่ำที่ต้องการไว้ ภาพที่ 31 แสดงการกรองสัญญาณความถี่ต่ำในช่วงสัญญาณประมาณ 0.5π rad/s

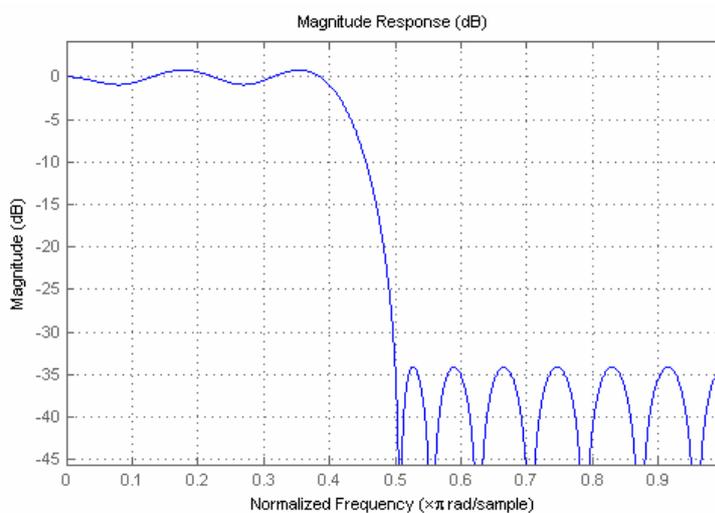


ภาพที่ 31 แสดงการกรองสัญญาณต่ำ (Low-Pass Filter)

ที่มา: Hewlett-Packard Co (1994)

2) วิธีการกรองสัญญาณสูง (High-Pass Filter)

เป็นการกรองสัญญาณโดยการตัดช่วงสัญญาณ (Cutoff) ที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าที่ต้องการออกไปให้เหลือแต่สัญญาณสูงที่ต้องการไว้ ภาพที่ 32 แสดงการกรองสัญญาณความถี่สูงในช่วงสัญญาณประมาณ 0.5π rad/s

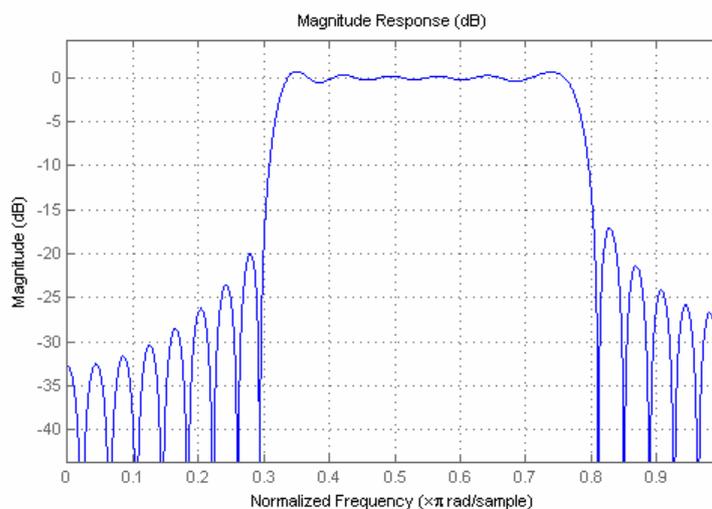


ภาพที่ 32 แสดงการกรองสัญญาณสูง (High-Pass Filter)

ที่มา: Hewlett-Packard Co (1994)

3) วิธีการตัดสัญญาณ (Band-Pass Filter)

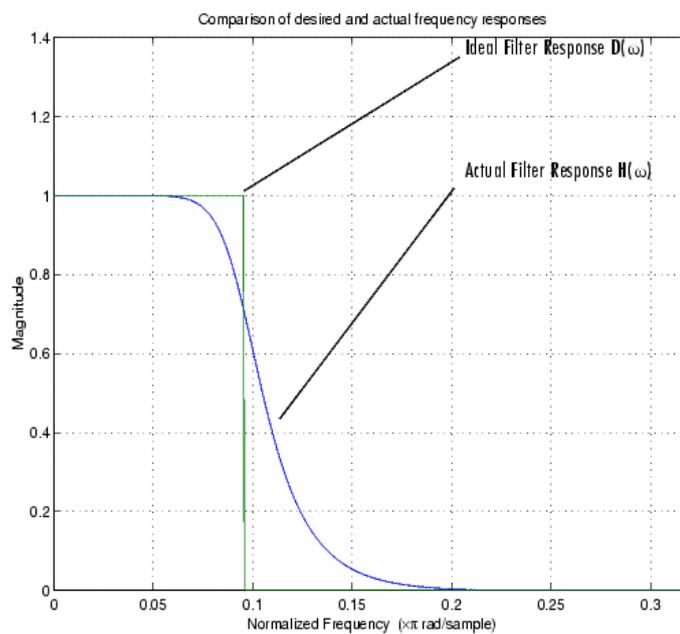
เป็นการกรองสัญญาณ โดยการตัดช่วงสัญญาณ (Cutoff) เฉพาะที่มีค่าความถี่ที่ไม่ต้องการออกให้เหลือแต่สัญญาณที่ต้องการไว้ ภาพที่ 33 แสดงการตัดสัญญาณความถี่ในช่วงสัญญาณประมาณ $0.3-0.8 \pi \text{ rad/s}$



ภาพที่ 33 แสดงการตัดสัญญาณ (Band-Pass Filter)

ที่มา: Hewlett-Packard Co (1994)

การเลือกใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณที่เหมาะสม (Optimal filter) นั้น ควรจะพิจารณาถึงความผิดพลาดของคำตอบเนื่องจากการกรองสัญญาณ (Error) ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 34 พิจารณาการกรองสัญญาณ 2 ค่า เมื่อ $D(\omega)$ คือ ผลของการกรองสัญญาณในอุดมคติ และ $H(\omega)$ คือ ผลของการกรองสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งจะเห็นว่าอุปกรณ์กรองสัญญาณที่เหมาะสมนั้นคือการเลือกช่วงในการกรองสัญญาณที่จะทำให้ $H(\omega)$ และ $D(\omega)$ มีค่าใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อที่จะได้ขนาดผลการตอบสนองของการกรองสัญญาณที่มีค่าใกล้เคียงกับที่ต้องการทางอุดมคติมากที่สุด



ภาพที่ 34 ผลของการกรองสัญญาณแบบอุดมคติกับที่เกิดขึ้นจริง

ที่มา: Hewlett-Packard Co (1994)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องพิมพ์ 1 ชุด
2. Strain gage
3. Accelerometer
4. Data logger
5. อุปกรณ์บันทึกข้อมูล เช่น แผ่นดิสก์ เป็นต้น
6. เครื่องเขียน และอุปกรณ์สำนักงาน

วิธีการ

การดำเนินการวิจัยเพื่อประเมินค่าคุณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟแบบแม่แแร่เหล็ก แฝงชั้นของการศึกษา มีการแบ่งขั้นตอนของการวิจัยเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1. ทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา
2. การทดสอบในภาคสนาม
3. การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม
4. การทำแบบจำลองโครงสร้างสะพาน
5. การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพาน

โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา

การทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา นั้นมีจุดประสงค์เพื่อทบทวนผลงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดค่าคุณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF ของสะพานรถไฟ รวมทั้งการศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการตอบสนองของสะพาน

2. การทดสอบในภาคสนาม

การดำเนินการทดสอบสะพานภายใต้สภาพการใช้งานจริงนั้นเป็นวิธีการที่ยอมรับกันว่าจะนำไปสู่ผลการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างที่ถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ดังนั้นเพื่อให้การประเมินค่าคุณเพิ่มทางพลวัตในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้มีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริง จึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบสะพานโดยทำการศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานจำนวน 2 สะพาน ภายใต้สภาพการใช้งานจริงเป็นเวลา ติดต่อกัน 7 วัน และทำการบันทึกช่วงเวลาของรถไฟแต่ละขบวนที่วิ่งผ่านสะพาน ความเร็วของรถไฟ และประเภทของรถไฟ

สำหรับการทดสอบในภาคสนามจะมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้ คือ

1) Strain gage ใช้สำหรับวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง สะพาน มีความละเอียดในการตรวจวัด $1.0 \times 10^{-6} \text{ } \epsilon$ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ จะประกอบด้วยสายไฟที่มีความเรียบมากมาทำเป็นรูปแบบที่คล้ายกับตาราง และจะต้องทำให้ผลของความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือนนั้นเกิดขึ้นน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 35 โดยที่ในการทำงานของอุปกรณ์ชิ้นนี้จะอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานในตารางที่ทำจากสายไฟนั้น ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจะทำให้ความต่างศักย์มีการเปลี่ยนแปลง การทดสอบในภาคสนามจะสามารถหาค่าของความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้จากขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์นี้

2) Accelerometer ใช้สำหรับวัดค่าความเร่งของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างโดย Accelerometer ที่ใช้เป็นรุ่น Model ARF-50A SER No.DJ003105 ของบริษัท Tokyo Sokki Kenkyujo จำกัด มีขนาดวัดความเร่งสูงสุด $\pm 1g$ ความละเอียด 0.5 V/g สำหรับข้อมูลความเร่งที่ได้จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลวัตที่สำคัญของโครงสร้างสะพาน 2 ชนิด คือ ความถี่ของโหมดการสั่นไหวและค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 36

3) Data logger เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานและแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล อุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วย ตัวควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัด และ ตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า Excitation ให้กับเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ และวัดความต่างศักย์ Read out จากอุปกรณ์ดังกล่าว

แปลงสัญญาณ Read out ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลตามความถี่ของ Sampling ที่ต้องการ ในการตรวจวัดโครงสร้างสะพานจะใช้ Data logger รุ่น SDA-810C Dynamic strain meter ของบริษัท Tokyo Sokki Kenkyujo จำกัด ดังแสดงในภาพที่ 37 ความละเอียดสูงสุด 50,000 Hz (สามารถเก็บข้อมูลได้ 50,000 ข้อมูลใน 1 วินาที) และมีระบบ Low-pass filter ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าที่ต้องการออกไป โดยจะปล่อยให้ผ่านแต่สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าค่าที่ต้องการผ่านเท่านั้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนจากไฟฟ้าที่ใช้เลี้ยงระบบไฟจะมีความถี่สูงกว่าความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดสะพาน

4) คอมพิวเตอร์ เพื่อใช้บันทึก แสดงผล และประมวลผลข้อมูล ในการต่อเครื่องมือตรวจวัดเข้ากับ Data logger จะใช้สายสัญญาณที่มีความต้านทานต่ำ ส่วนการส่งข้อมูลจาก Data logger เข้าสู่คอมพิวเตอร์จะต่อเข้าทาง USB Port ด้วยโปรแกรม SDA-810C_SDA-830C Software ซึ่งจะช่วยในการนำสัญญาณดิจิทัลที่ถูกแปลงแล้วมาแสดงทางโปรแกรม Excel เพื่อจะสามารถเรียกสัญญาณดังกล่าวออกมาใช้งานได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 38



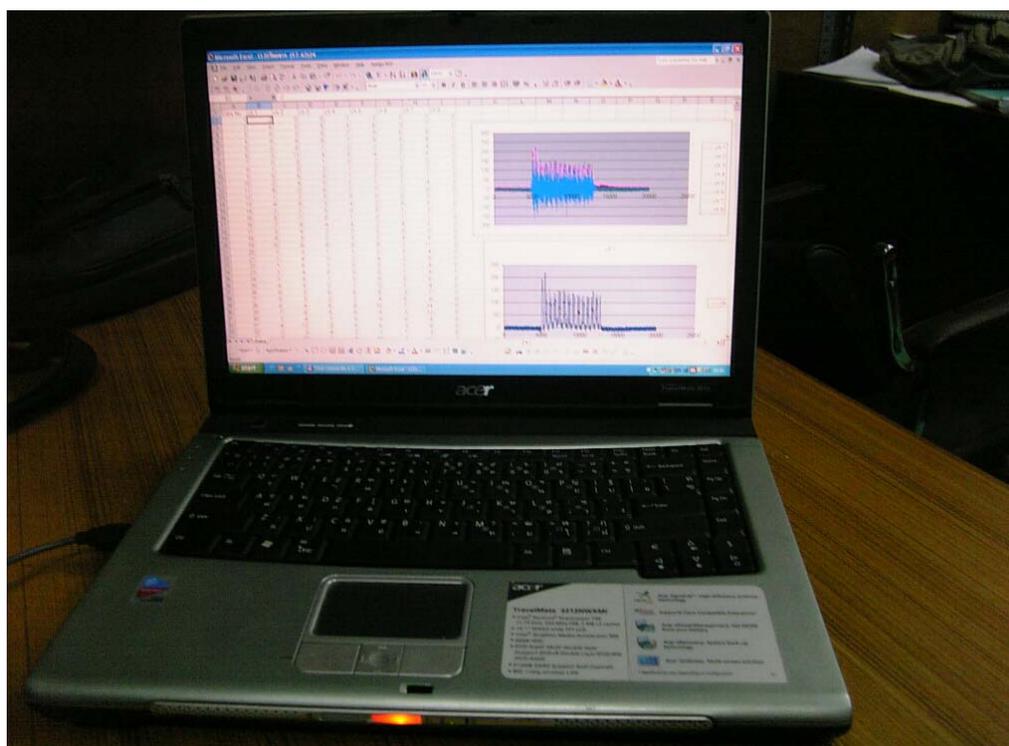
ภาพที่ 35 ลักษณะของ Strain gage



ภาพที่ 36 ลักษณะของ Accelerometer



ภาพที่ 37 ลักษณะของ Data logger



ภาพที่ 38 ลักษณะของ Computer

สำหรับขั้นตอนการทดสอบในภาคสนามสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

2.1 การสำรวจเบื้องต้น

เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวางแผนและกำหนดรายละเอียดการตรวจวัดสะพานรถไฟทั้ง 2 สะพานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมตามหลักวิชาการ รวมทั้งให้มีผลกระทบต่อตัวสะพานและผู้สัญจรในระหว่างตรวจวัดน้อยที่สุด การดำเนินการในส่วนของการสำรวจเบื้องต้น กำหนดให้เป็นงานขั้นตอนแรกของการทดสอบในภาคสนาม โดยจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของสะพานเป็นระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์แล้วจึงทำการคัดเลือกสะพานรถไฟ ซึ่งจะต้องทำการติดต่อกับการรถไฟแห่งประเทศไทย เพื่อนัดหมายวันเวลาที่จะต้องทำการติดตั้งเครื่องมือ

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสะพาน

สะพานรถไฟที่ใช้ในการศึกษา เพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้าง และค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์นั้นมีลักษณะเป็น โครงสร้างสะพานเหล็กแบบแม่แครงเหล็กแผ่นขึ้น (Though Plate Girder) 2 สะพานซึ่งมีช่วงความยาวสะพานแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 39 และ 40



ภาพที่ 39 ลักษณะสะพานรถไฟที่ทำการตรวจวัดที่ใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ภาพที่ 40 ลักษณะสะพานรถไฟที่ทำการตรวจวัดที่ใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

สะพานรถไฟตัวแรกในภาพที่ 39 ตั้งอยู่ที่บริเวณใกล้กับสถานีรถไฟรังสิต สร้างขึ้นเมื่อปี พ.ศ.2471 มีความยาวสะพาน 10.08 ม. รองรับการจราจรขนส่งระหว่างกรุงเทพฯ กับ ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โครงสร้างสะพานมีช่วงความยาวของคานรองรับหมอนรถไฟ 3 ช่วงความยาวที่เท่ากัน จากการประเมินด้วยสายตา พบว่าโครงสร้างสะพานยังมีสภาพอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดี เนื่องจากการผูกกร่อนจากสนิมน้อย

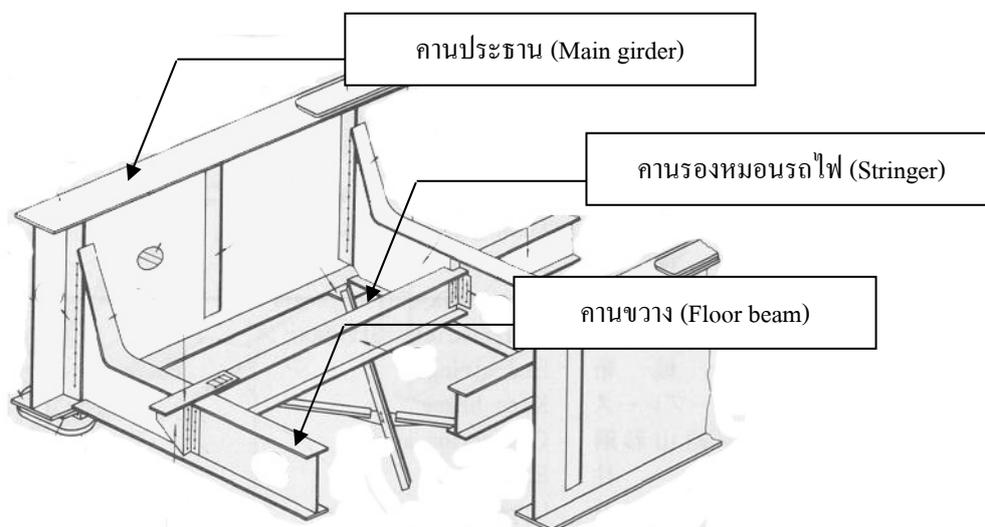
สะพานรถไฟตัวที่สองในภาพที่ 40 ตั้งอยู่บริเวณใกล้กับสถานีรถไฟบางบำหรุ สร้างขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2466 มีความยาวสะพาน 19.98 ม. รองรับการจราจรขนส่งระหว่างกรุงเทพฯ กับ ภาคใต้ โครงสร้างสะพานมีช่วงความยาวของคานรองรับหมอนรถไฟ 6 ช่วงความยาวที่เท่ากัน จากการประเมินด้วยสายตา พบว่าโครงสร้างสะพานมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากการผูกกร่อนและเป็นสนิมมากกว่าสะพานตัวแรก

สะพานรถไฟแบบแม่แควเหล็กแฝงขึ้นจะประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญดังแสดงในภาพที่ 41 คือ

1) คานประธาน (Main girder) คือ คานที่ประกอบขึ้นเป็นหน้าตัดรูปตัวไอ มีปีกบน ปีกล่าง และเหล็กแผ่นเอวเป็นองค์ประกอบใช้วางพาระหว่างตอม่อริมฝั่ง (Abutment) หรือตอม่อกลางน้ำ (Pier) คานประธานเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพานในการต้านทานน้ำหนักจากขบวนรถไฟ

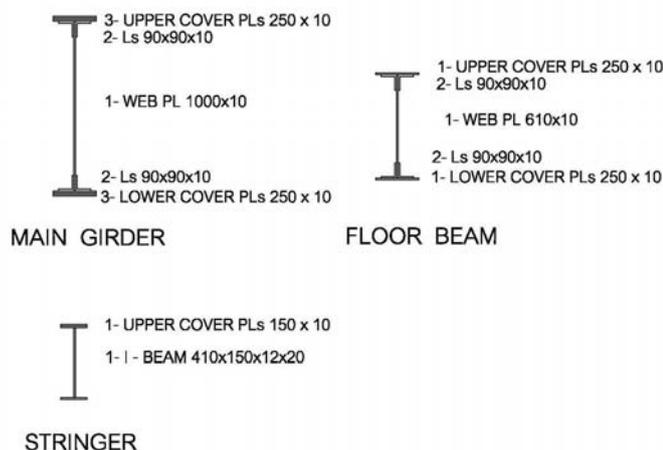
2) คานรองรับหมอนรถไฟ (Stringer) เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างหนึ่งที่ประกอบขึ้นเป็นระบบพื้นของสะพาน เป็นคานรองรับไม้หมอนสะพาน ซึ่งรับน้ำหนักจากรถไฟโดยตรง และถ่ายน้ำหนักสู่คานขวาง

3) คานขวาง (Floor beam) เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างหนึ่งที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบพื้น (Floor system) ของสะพานคานขวางมีหน้าที่รับน้ำหนักรถไฟที่ถ่ายมาจากคานรองรับหมอนรถไฟ (Stringer) โดยถ่ายน้ำหนักไปสู่คานประธาน (Main girder)

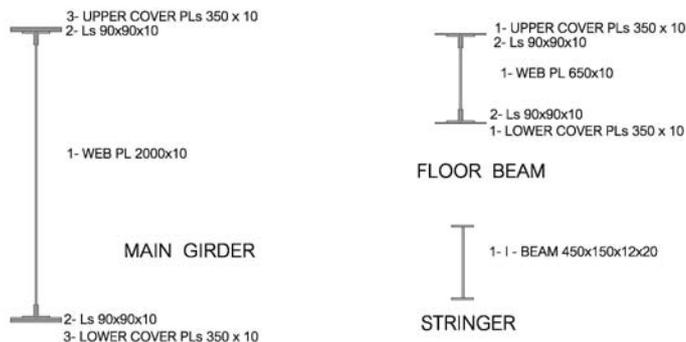


ภาพที่ 41 ลักษณะสะพานรถไฟแบบแม่แควเหล็กแฝงขึ้น

สำหรับสะพานที่ศึกษาทั้ง 2 สะพานมีขนาดของหน้าตัดของแต่ละชั้นส่วน
โครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 42 และ 43



ภาพที่ 42 รายละเอียดของชั้นส่วนโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ภาพที่ 43 รายละเอียดของชั้นส่วนโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

2.1.2 ข้อมูลการจราจรเบื้องต้น

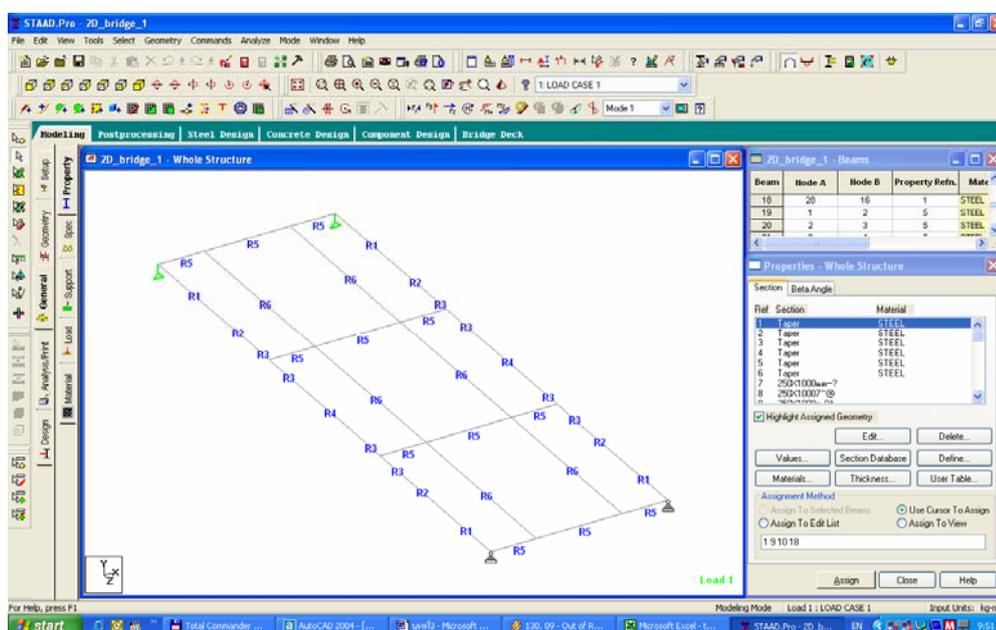
นอกเหนือไปจากลักษณะโครงสร้างของสะพานแล้ว ข้อมูลการจราจรก็เป็น
สิ่งสำคัญเพื่อที่จะได้ทราบว่ามีความหนาแน่นของจราจรที่วิ่งผ่านสะพานวันละกี่ขบวน เพื่อความสะดวก
ในการติดตั้งเครื่องมือ และการเก็บข้อมูล ดังนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลของปริมาณจราจร
และประเภทของขบวนรถไฟ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดข้อมูลจราจรเบื้องต้น

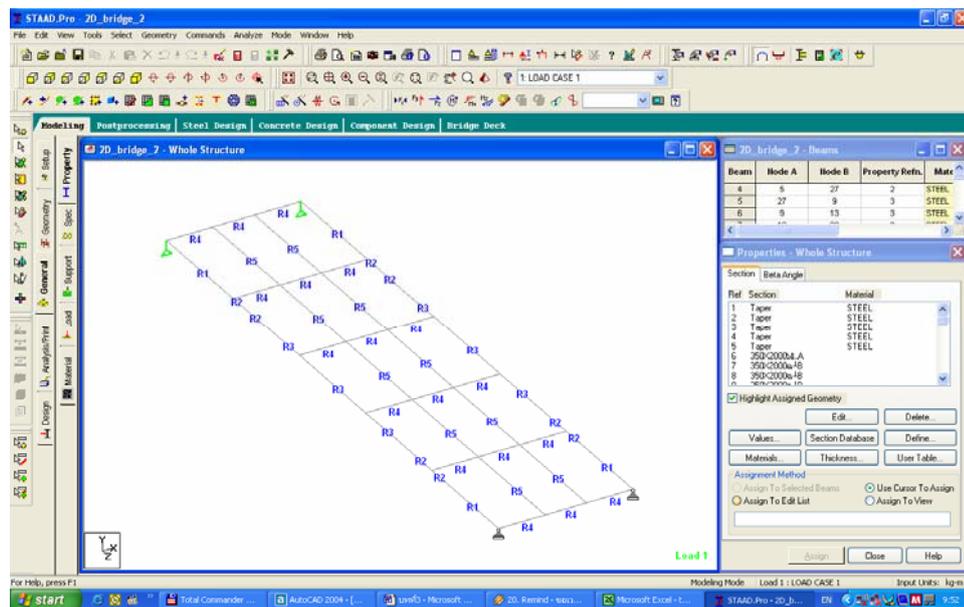
สะพานรถไฟ	ปริมาณการจราจร	% ขบวนรถ	% ขบวนรถบรรทุก	% ขบวนรถ
	ขบวน / วัน	โดยสาร	สินค้า	ดีเซลราง
1. โกลีสถานีรังสิต	36	61%	22 %	17%
2. โกลีสถานีบางบำหรุ	13	62%	15%	23%

2.1.3 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

การตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงของสะพานในสภาพการจราจรปกติจะเป็นข้อมูลหลักที่จะนำไปสู่การประเมินค่าคุณสมบัติทางพลวัต และพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน ดังนั้นจุดติดตั้งจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง รวมทั้งการบันทึกผลของข้อมูลจะต้องมีความเร็วในการเก็บข้อมูลเพียงพอกับพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพาน ซึ่งในการเลือกตำแหน่งติดตั้งนั้นจะทำการตรวจสอบด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เบื้องต้นจากโปรแกรม STAAD PRO ดังแสดงในภาพที่ 44 และ 45



ภาพที่ 44 แบบจำลองเบื้องต้นของสะพานโกลีสถานีรถไฟรังสิต



ภาพที่ 45 แบบจำลองเบื้องต้นของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

เนื่องจากจำนวนข้อสัญญาณของเครื่องมือที่ทำการศึกษามีจำนวนจำกัด จึงกำหนดตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งเครื่องมือออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ

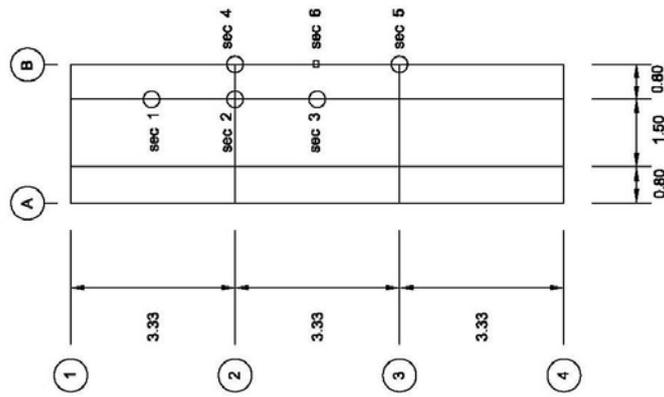
- 1) กลุ่มประเมินค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของโครงสร้างสะพาน (DAF)
- 2) กลุ่มประเมินการถ่ายน้ำหนักของเพลารถไฟ (Wheel load distribution)
- 3) กลุ่มประเมินหน่วยแรงที่จุดต่อเชื่อม (Restraint)
- 4) กลุ่มประเมินความสมดุลของน้ำหนักเพลารถไฟ (Symmetry loading)

โดยในกลุ่มที่ 1 ใช้เพื่อตรวจวัดค่าคูณเพิ่มทางพลวัตของชิ้นส่วนโครงสร้างสำคัญของตัวสะพานเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบของ AREMA ว่ามีความแตกต่างกันเพียงใด และมีพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพานเป็นอย่างไร โดยจะทำการติดตั้ง Strain gage จะติดไว้ที่ปีกล่าง (Bottom flange) และปีกบน (Top flange) ของคานประธาน คานรองรับหมอนรถไฟ และคานขวาง ในบริเวณช่วงความยาวแรก และบริเวณกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากคาดว่าจะเกิดความเครียดคด (Bending strain) มากที่สุด เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองในแต่ละชิ้นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างสะพาน สำหรับการติดตั้ง Accelerometer จะติดไว้บริเวณกึ่งกลางสะพาน เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน ส่วนในกลุ่ม 2, 3

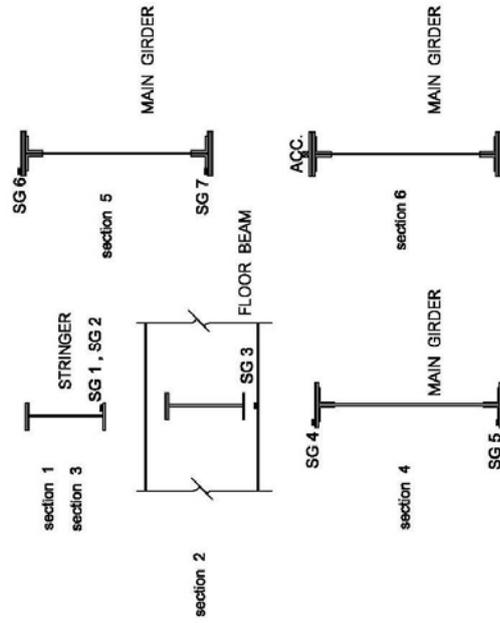
และ 4 นั้น ใช้พิจารณาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำไปใช้ประกอบกับการพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ให้มีสภาพใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือแสดงในภาพที่ 46 – 47 และตารางผนวกที่ ก1 และ ก2 แสดงช่องสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือของกลุ่มประเมนของทั้ง 2 สะพาน

DATA SETUP

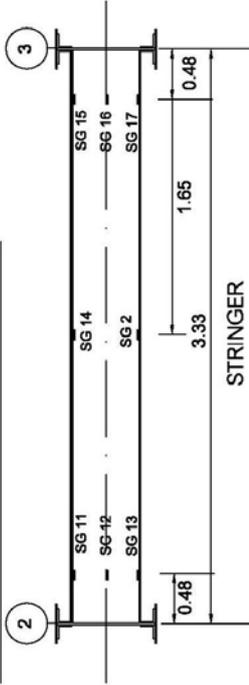


SET 1 DAF

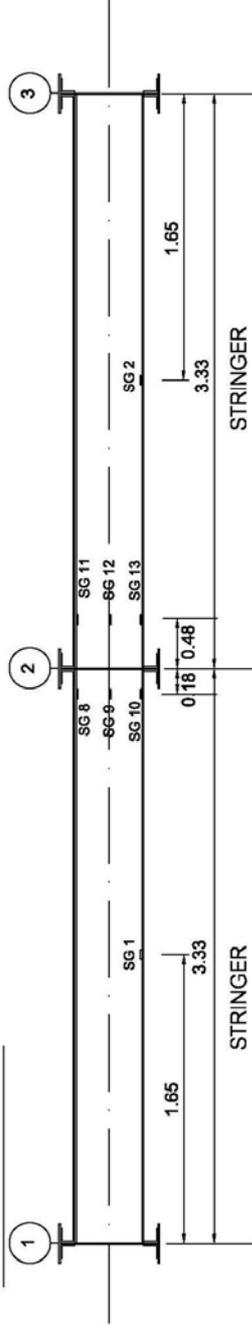


ภาพที่ 46 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

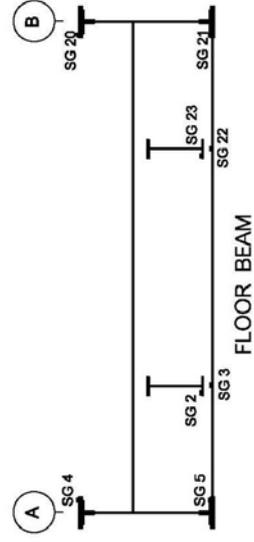
SET 2 WHEEL LOAD DISTRIBUTION

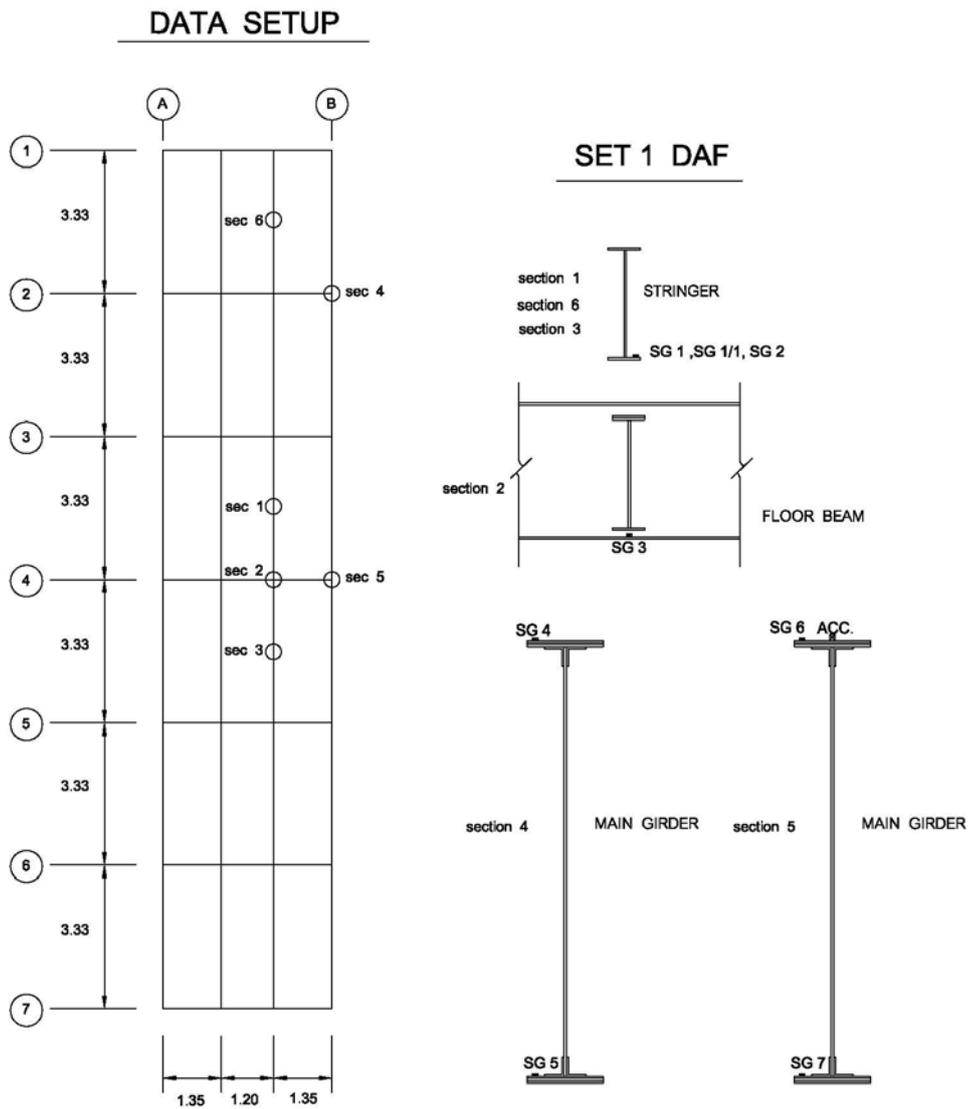


SET 3 RESTRAINED



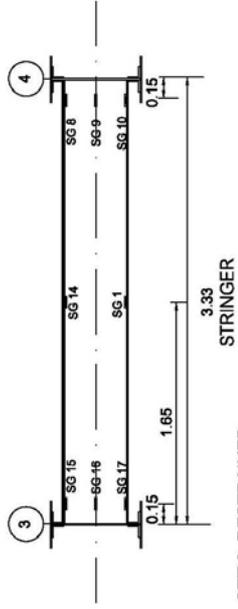
SET 4 CHECK SYMMETRY LOADING



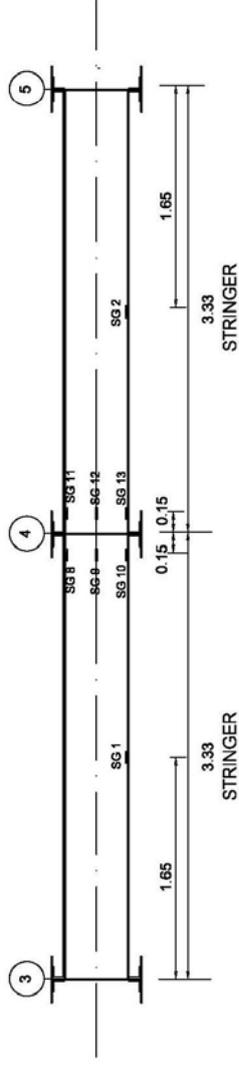


ภาพที่ 47 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

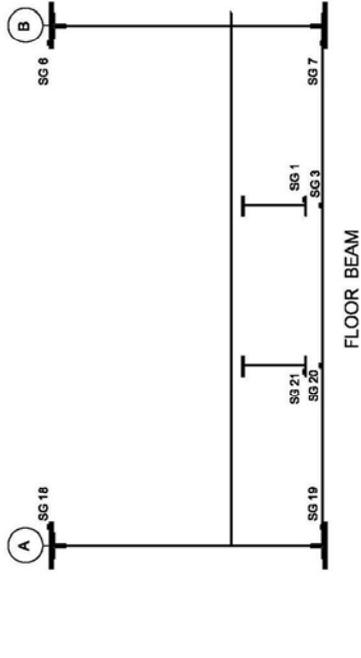
SET 2 WHEEL LOAD DISTRIBUTION



SET 3 RESTRAINED



SET 4 CHECK SYMMETRY LOADING



2.1.4 ตำแหน่งการจัดวางเครื่องมือ

การบันทึกข้อมูลจากอุปกรณ์การตรวจวัดการตอบสนองที่เกิดขึ้นของสะพาน จะใช้ระบบดิจิทัลซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวอาศัยการส่งงานจากคอมพิวเตอร์ โดยส่งผ่านข้อมูลจากสายเคเบิลมายัง Data logger และเก็บข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นจะต้องมีตำแหน่งที่วางเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เหมาะสม ซึ่งจะกำหนดโดยอาศัยข้อมูลจากการสำรวจเบื้องต้น ดังแสดงในภาพที่ 48 และ 49



ภาพที่ 48 ตำแหน่งการจัดวางเครื่องมือของสะพานโกสัถยานิรตไพรงลิต



ภาพที่ 49 ตำแหน่งการจัดวางเครื่องมือของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

2.2 การตรวจวัดค่าการตอบสนองของสะพาน

การตรวจวัดค่าการตอบสนองของสะพาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักของขบวนรถไฟที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ จะทำการใช้อุปกรณ์การตรวจวัดดังกล่าวมาข้างต้นโดยหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ และการติดตั้งรวมทั้งการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ดังกล่าวนั้นสามารถที่จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 Strain gage เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งสำหรับการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โดยที่ Strain gage ที่ใช้เป็นแบบต้านทานไฟฟ้า กล่าวคือ เป็นเกจที่นำคุณสมบัติในการเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อมีการยืดหรือหดตัวมาใช้ในการวัดค่าความเครียด (Strain) มีลักษณะเป็นเมทัลฟอยล์เกจ (Metal foil gage) แผ่นบางๆ ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของ Strain gage นี้

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของ Strain gage ที่ใช้ศึกษา

Type	Cu-Ni foil gage
Gage pattern	Single element
Gage resistant	120 Ohm.
Gage factor	2.11
Gage length	5 mm.
Gage width	1.5 mm.

Self-temperature compensated for mild steel (10-80 °C)

ขั้นตอนการติดตั้ง Strain gage ทำได้ดังต่อไปนี้

1) ทำการขัดลอกสี และทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) ณ ตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด จนเห็นผิวโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 50 และ 51

2) แล้วนำเมทัลฟลอยเจมาทาภาวดัดกับเนื้อเหล็กด้วย Cyanoacrylate cement (CN) ซึ่งสามารถแข็งตัวได้ภายในเวลา 30 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 52 และ 53

3) ภายหลังจากที่กาวแข็งตัวแล้วจึงทำการปิดทับ Strain gage ด้วย VM rubber ซึ่งมีลักษณะเป็นเทปหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร โดย VM rubber นี้สามารถที่จะสมานตัวยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกัน Strain gage และกาวจากน้ำและความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 54

4) Strain gage จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับสายไฟที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 0.05 โอห์มต่อเมตร) มีลักษณะเป็นชีลด์เคเบิล (Shield cable) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise) โดยสายเคเบิลนี้จะถูกเชื่อมต่อระหว่าง Strain gage กับ Data logger ดังแสดงในภาพที่ 55

5) การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับ Strain gage จะใช้แบบวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) แบบ Quarter bridge ในลักษณะ Load cell เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุดและเป็นการป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการยืดหดตัวตามอุณหภูมิของโครงสร้างรวมทั้งผลจากความยาวของสายต่อที่ไม่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 56

2.2.2 Accelerometer ใช้สำหรับวัดค่าความเร่งของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง โดยใช้หลักการของเซ็นเซอร์ที่อยู่ภายในซึ่งจะมีความไวต่อการเคลื่อนที่มาก ข้อมูลความเร่งที่ได้จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลวัตที่สำคัญของโครงสร้างสะพาน 2 ชนิด คือ ความถี่ของโหมดการสั่นไหวและค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง คุณสมบัติของ Accelerometer นี้แสดงดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของ Accelerometer ที่ใช้ศึกษา

Type	Accelerometer transducer
Product	TML , Japan
Model	ARF-50A
Capacity	50 m/s ²
Coefficient	4.81 x 10 ⁻² m/s ²
Serial No.	DJD03105

ขั้นตอนการติดตั้ง Accelerometer ทำได้ดังต่อไปนี้

1) นำ Accelerometer มาทาภาวติดกับโครงสร้างสะพานด้วย Cyanoacrylate cement (CN) โดยให้ติดแนบแน่นกับตัวโครงสร้าง และตรวจสอบเพื่อป้องกันการหลุดกระเด็นเนื่องจากแรงกระแทกที่เกิดจากขบวนรถไฟ

2) ภายหลังจากที่กาวแข็งตัวแล้วจึงทำการปิดทับ ด้วย VM Rubber ซึ่งมีลักษณะเป็นเทปหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร โดย VM Rubber นี้สามารถที่จะสมานตัวยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันน้ำและความชื้นในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 57

3) สายเคเบิลของ Accelerometer เป็นแบบชิลด์เคเบิล (Shield cable) และมีตัวเชื่อมต่อแบบขั้วเดียวเรียกว่า One – touch connecter ในการเชื่อมต่อระหว่าง Accelerometer กับ Data logger



ภาพที่ 50 การขจัดลอกสีตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด



ภาพที่ 51 ทำความสะอาดพื้นผิวสะพานเหล็กด้วยอะซิโตน (Acetone)



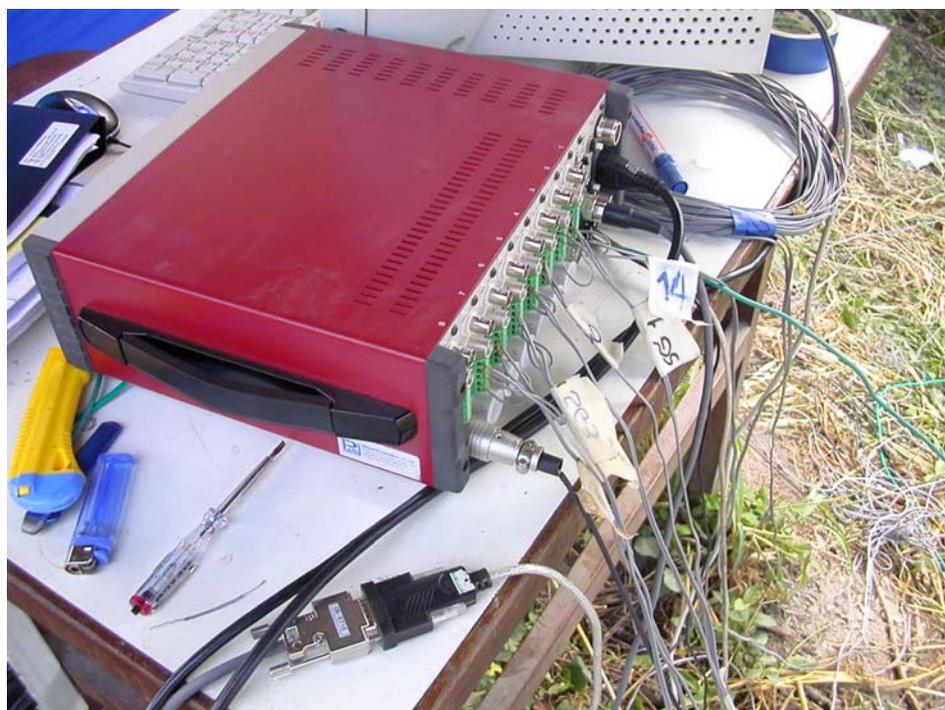
ภาพที่ 52 ทากาว Cyanoacrylate cement (CN) เพื่อยึดติดกับพื้นผิวเหล็ก



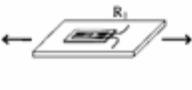
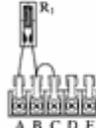
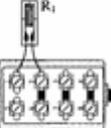
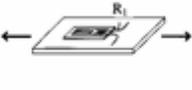
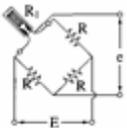
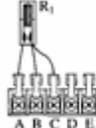
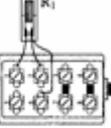
ภาพที่ 53 Strain gage ติดกับพื้นผิวเหล็ก

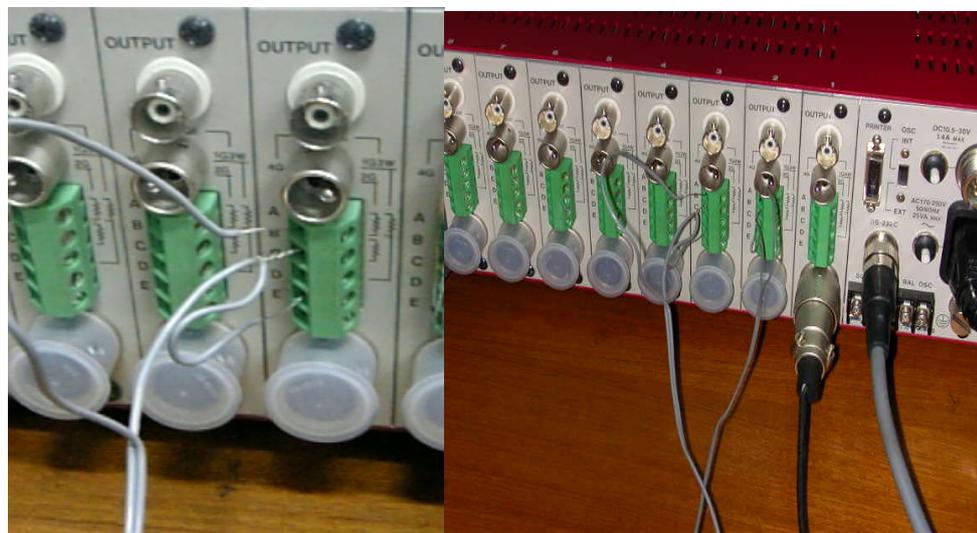


ภาพที่ 54 ปิดทับด้วย VM rubber เพื่อป้องกันน้ำและความชื้นในอากาศ



ภาพที่ 55 สายเคเบิลเชื่อมต่อระหว่าง Strain gage กับ Data logger

Measuring mode	Bridge circuit	On switching box	On bridge box	Bridge output
Quarter bridge 				E : Excitation voltage e : Output voltage Δe : Output voltage due to strain e_0 : Output voltage before strain generation R_0 : Resistance before strain generation ΔR : Resistance change due to strain c : Strain K : Gauge factor $e = e_0 + \Delta e$ $R_1 = R_0 + \Delta R$ $R = R_0$ $\Delta e = \frac{E}{4} K \epsilon$
Quarter bridge with 3-wire system 				E : Excitation voltage e : Output voltage Δe : Output voltage due to strain e_0 : Output voltage before strain generation R_0 : Resistance before strain generation ΔR : Resistance change due to strain c : Strain K : Gauge factor $e = e_0 + \Delta e$ $R_1 = R_0 + \Delta R$ $R = R_0$ $\Delta e = \frac{E}{4} K \epsilon$



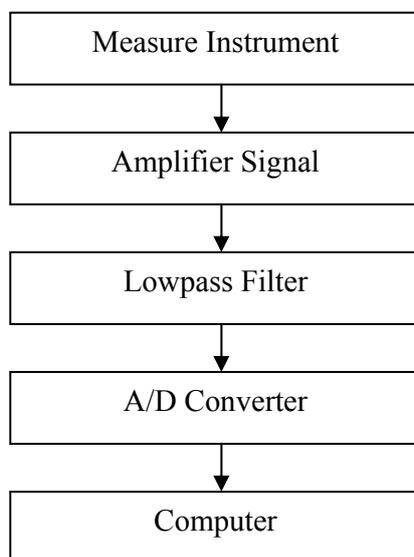
ภาพที่ 56 ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า



ภาพที่ 57 ลักษณะการติดตั้ง Accelerometer

2.2.3 Data logger เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน ในการศึกษาใช้ Data logger รุ่น SDA-810C Dynamic strain meter ซึ่งจะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ 1) ทำการขยายสัญญาณที่ได้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดมีขนาดเล็กมาก เพราะการยืดหดตัวของโครงสร้างมีค่าเกิดขึ้นน้อย 2) เปลี่ยนค่าสัญญาณไฟฟ้าที่จุดตรวจวัดเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาลอก (Analog signal) ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital signal) เข้าสู่คอมพิวเตอร์ และ 3) ทำหน้าที่ส่งไฟเลี้ยงไปยังอุปกรณ์ตรวจวัด เพราะถ้าไม่มีไฟเลี้ยงส่งไปยังอุปกรณ์แล้ว การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ก็จะไม่เกิดด้วยเช่นกัน โดยสัญญาณไฟฟ้านี้นำมากรองเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนด้วย Analog lowpass filter ซึ่งจะยอมให้สัญญาณในย่านความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ตัดออก (Cut-off frequency, f_c) ผ่านได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะปิดกั้นสัญญาณที่อยู่ในย่านความถี่ที่สูงกว่า f_c ผ่าน

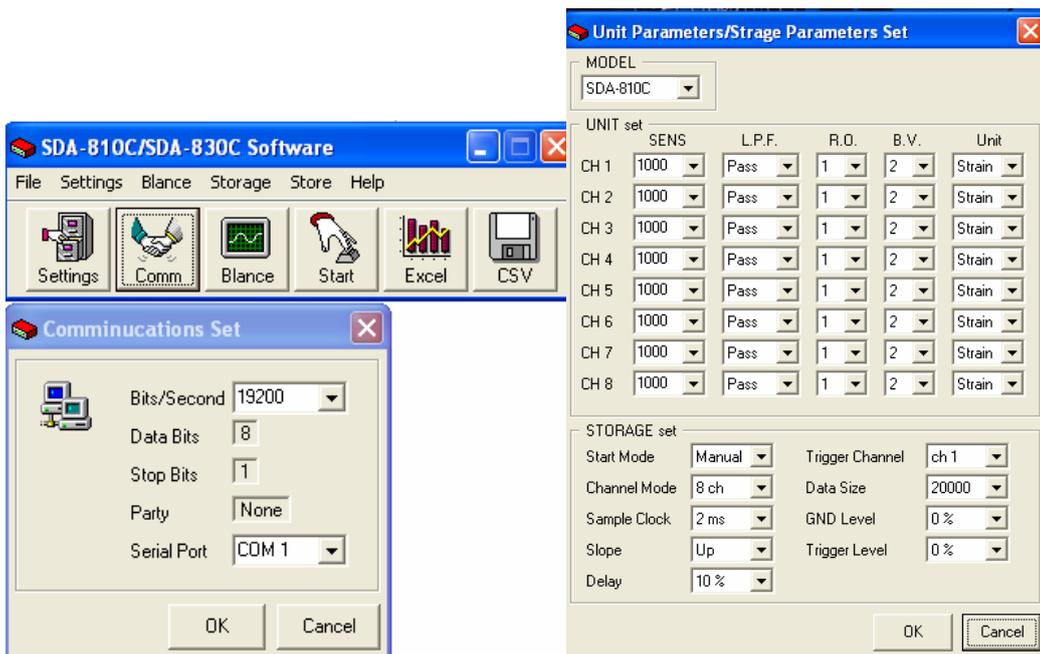
ระบบการทำงานของ Data Logger แสดงได้ดังภาพที่ 58



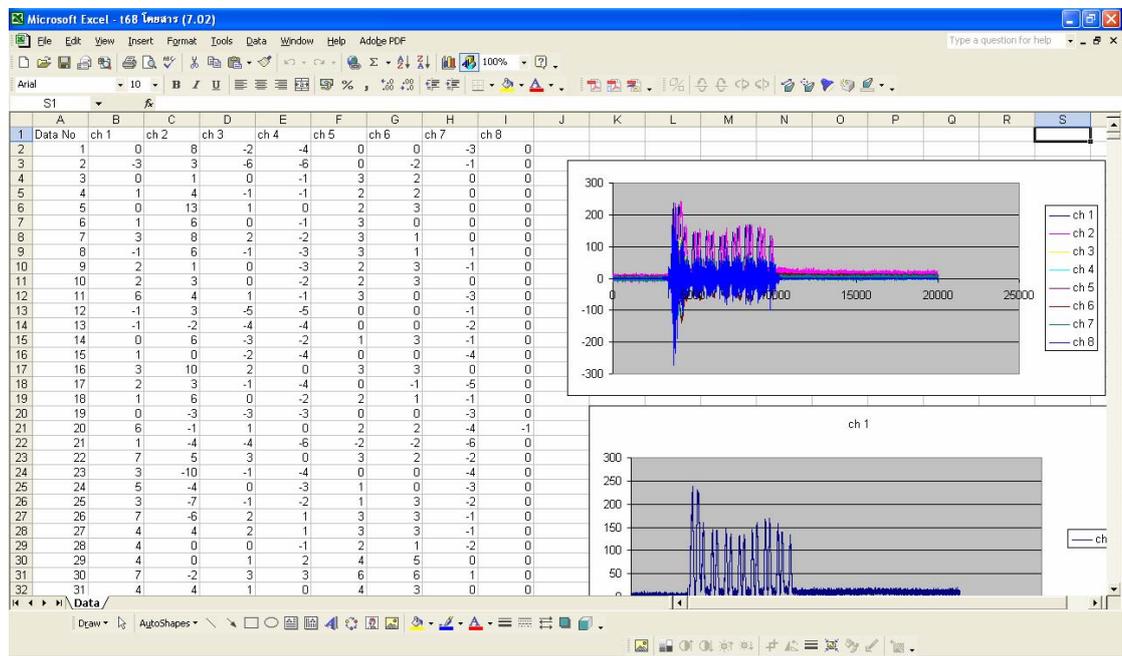
ภาพที่ 58 ระบบการทำงานของ Data Logger

ทั้งนี้จากการทำแบบจำลองเบื้องต้น พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของสะพานรถไฟทั้ง 2 สะพานอยู่ในช่วงประมาณ 10 Hz - 24 Hz ในการศึกษา จึงเลือกใช้ความเร็วในการบันทึกข้อมูล (Scan rate) ในช่วง 200 Hz - 500 Hz ซึ่งมากพอที่จะบันทึกการตอบสนองของโครงสร้างสะพานที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงของสัญญาณอนาล็อกไว้ได้อย่างสมบูรณ์

2.2.4 Computer เพื่อใช้บันทึก แสดงผล และประมวลผลข้อมูล ในการต่อเครื่องมือตรวจวัดเข้ากับ Data Logger จะใช้สายสัญญาณที่มีความต้านทานต่ำ ส่วนการส่งข้อมูลจาก Data logger เข้าสู่คอมพิวเตอร์จะต่อเข้าทาง RS232 Port แล้วใช้ตัวแปลงเป็น USB Port ด้วยโปรแกรม SDA-810C_SDA-830C Software ซึ่งจะช่วยในการนำสัญญาณดิจิทัลที่ถูกแปลงแล้วมาแสดงทางโปรแกรม Excel เพื่อจะสามารถเรียกสัญญาณดังกล่าวออกมาใช้งานได้ง่าย โดยจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม และตัวอย่างของสัญญาณที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 59 และ 60



ภาพที่ 59 โปรแกรม SDA-810C_SDA-830C Software และการตั้งค่าโปรแกรม



ภาพที่ 60 สัญญาณที่ได้แสดงผลออกทางโปรแกรม Excel

2.3 การตรวจวัดการใช้งานของขบวนรถไฟ

การที่จะศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของสะพานที่ทำการตรวจวัดทั้ง 2 สะพานนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการเก็บข้อมูลลักษณะ ประเภทของขบวนรถไฟ และความเร็วของขบวนรถไฟ ไปพร้อมกับการตรวจวัด เพื่อนำไปประเมินผลกระทบต่อค่าคูณเพิ่มทางพลวัตที่เกิดขึ้นจากสภาพการใช้งานจริงจากการจราจรขบวนรถไฟประเภทต่างๆ รวมทั้งสามารถตรวจสอบพฤติกรรมของขบวนรถไฟได้กรณีมีการเก็บบันทึกข้อมูลผิดพลาด

การเก็บข้อมูลของการตรวจวัดการใช้งานของขบวนรถไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น ขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

2.3.1 การจำแนกประเภทขบวนรถไฟ

เนื่องจากผลของพฤติกรรมการตอบสนองของสะพานนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างกลุ่มเพลตต่างกัน ลักษณะการใช้งานต่างกัน ความเร็วที่ใช้ในการขับเคลื่อน และการบรรทุกน้ำหนักไม่เท่ากัน ทำให้ค่าคูณเพิ่มทางพลวัตมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของขบวนรถไฟออกได้เป็นขบวนรถฟ่วงโดยสาร ขบวนรถฟ่วงสินค้า และขบวนรถดีเซลราง ลักษณะการจัดวางกลุ่มเพลต ดังแสดงในภาพที่ 61

2.3.2 การจับเวลาเพื่อตรวจวัดความเร็วเบื้องต้น

เป็นการใช้การคำนวณของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของไม้ Staff ที่ตั้งระหว่างความยาวของสะพาน และจับเวลาเมื่อหัวของขบวนรถไฟถึงไม้ Staff ข้างหนึ่ง และหยุดเวลาเมื่อขบวนรถไฟถึงไม้ Staff อีกข้างหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 62 โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 39

$$V = S/t \quad (39)$$

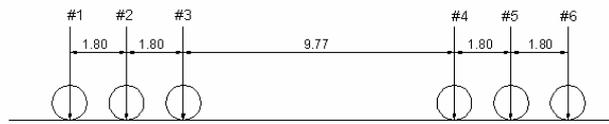
เมื่อ V = ความเร็วของขบวนรถไฟ

S = ระยะระหว่างไม้ Staff

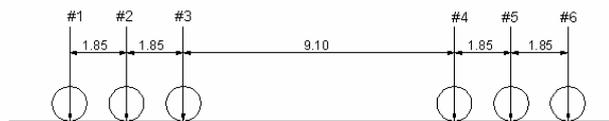
t = เวลาที่ใช้เมื่อหัวขบวนรถไฟถึงไม้ Staff อีกข้างหนึ่ง

2.3.3 การบันทึกข้อมูลเบื้องต้น

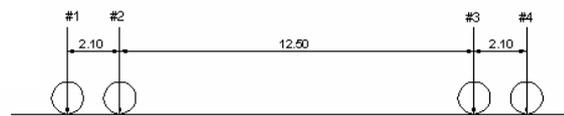
ข้อมูลการจราจรบนสะพานทั้งประเภทของขบวนรถไฟ ความเร็วที่ของขบวนรถไฟ วันและเวลาที่ทำการตรวจวัด จะถูกบันทึกไว้ในแบบฟอร์มการบันทึก โดยแบบฟอร์มนั้นจะสามารถใส่ข้อมูลได้อย่างเป็นระเบียบเพื่อนำไปใช้ต่อไป และใช้ตรวจสอบถ้าเกิดมีความผิดพลาดจากผู้ทำการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 63



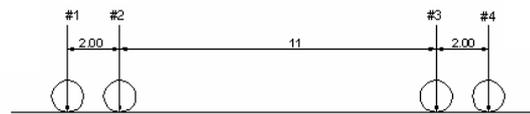
ก) หัวรถจักร GEA



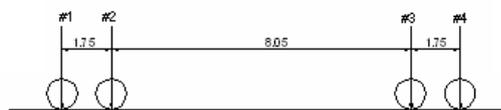
ข) หัวรถจักร Hitachi



ค) ขบวนรถดีเซลราง

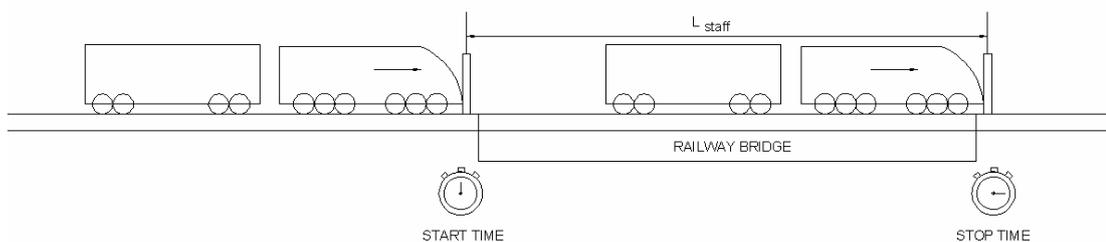


ง) ขบวนรถพ่วงโดยสาร



จ) ขบวนรถพ่วงสินค้า

ภาพที่ 61 ตัวอย่างลักษณะการจัดวางกลุ่มเพลลาของหัวรถจักร ขบวนรถดีเซลราง ขบวนรถพ่วงโดยสาร และขบวนรถพ่วงสินค้า



ภาพที่ 62 การจับเวลาเพื่อวัดความเร็วเบื้องต้น

การตรวจวัดความเร็วของรถไฟ

ระยะทาง = ม. EXPERIMENT DURING WEIGHING THE TRAIN

แผนที่

รหัส	วัน , เวลา	ชื่อรถไฟ	เวลาข้ามสะพาน (s)	จำนวนใบกัก	ความเร็ว . (km /hr)
t122	24 /11/06 (18.38)	รถบรรทุกน้ำมัน	0.90	10	43.20
t123	24 /11/06 (18.48)	รถบรรทุกปูน	1.18	21	32.95
t124	24 /11/06 (19.38)	รถโดยสาร	1.19	5	32.67
t125	24 /11/06 (19.50)	รถโดยสาร	0.85	8	45.74
t126	24 /11/06 (19.59)	รถโดยสาร 102	0.81	8	48.00
t127	24 /11/06 (20.19)	รถโดยสาร	0.72	10	54.00
t128	24 /11/06 (20.54)	หัวรถจักร	0.88	-	44.18
t129	24 /11/06 (22.16)	ดีเซลราง	0.56	2	69.43
t130	24 /11/06 (22.25)	รถโดยสาร	1.62	5	24.00
t131	24 /11/06 (22.34)	รถโดยสาร	0.50	5	77.76
t132	24 /11/06 (23.28)	รถบรรทุกน้ำมัน	1.16	23	33.52
t133	24 /11/06 (23.56)	รถหินห้ำ	1.41	14	27.57
t134	25 /11/06 (01.43)	ดีเซลราง	0.79	-	49.22
t135	25 /11/06 (02.18)	รถโดยสาร	1.12	13	34.71
t136	25 /11/06 (02.32)	รถโดยสาร	0.81	8	48.00
t137	25 /11/06 (02.58)	รถโดยสาร	0.80	3	48.60
t138	25 /11/06 (03.45)	รถโดยสาร 142	1.03	13	37.75
t139	25 /11/06 (03.58)	ดีเซลราง 7455	0.88	2	44.18
t140	25 /11/06 (04.12)	รถโดยสาร	0.72	4	54.00
t141	25 /11/06 (04.27)	รถโดยสาร	1.06	14	36.68
t142	25 /11/06 (04.54)	รถโดยสาร	0.71	16	54.76
t143	25 /11/06 (05.05)	รถโดยสาร	1.12	13	34.71
t144	25 /11/06 (05.30)	รถโดยสาร	0.67	14	58.03
t145	25 /11/06 (05.37)	รถโดยสาร	0.72	13	54.00
t146	25 /11/06 (05.58)	ดีเซลราง	0.47	8	82.72
t147	25 /11/06 (06.15)	รถโดยสาร	0.78	13	49.85
t148	25 /11/06 (06.23)	รถบรรทุกปูน	1.00	20	38.88
t149	25 /11/06 (06.55)	รถโดยสาร	0.75	11	51.84
t150	25 /11/06 (07.39)	รถโดยสาร	1.47	7	26.45

END OF DATA

ภาพที่ 63 แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูลตรวจวัด

3. การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้เป็นการแปลงสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัดในภาคสนามมาเป็นข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าคุณเพิ่มทางพลวัต และพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน รวมทั้งเป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทย การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนที่สำคัญคือ

- 1) การกำหนดรหัสของข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนาม
- 2) การกรองสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม
- 3) การแสดงความสัมพันธ์ของค่าคุณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF กับความเร็วของรถไฟประเภทต่างๆ แต่ละขบวนขณะข้ามผ่านสะพาน ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้างสำคัญของสะพาน คือ คานรองหมอนรถไฟ คานขวาง และคานประธาน
- 4) การแสดงความสัมพันธ์ของค่า DAF กับค่าน้ำหนักกลุ่มเพลลาของรถไฟ จากข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทย
- 5) การเปรียบเทียบความแตกต่างของ ค่า DAF ที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามกับค่าตามมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทย

โดยสามารถที่จะอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

3.1 การกำหนดรหัสของข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนาม

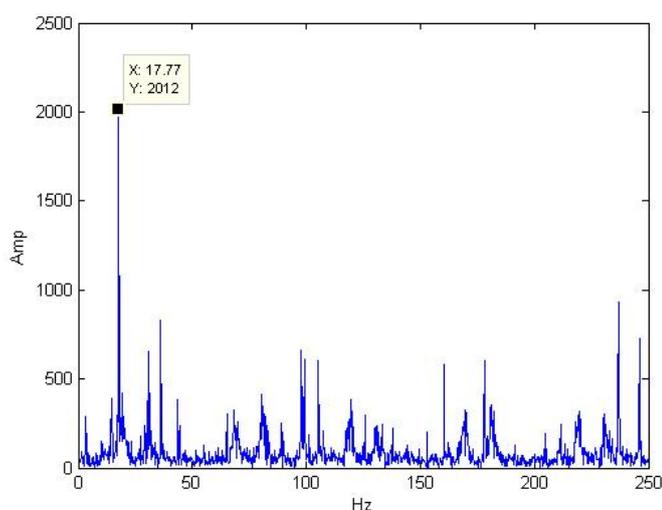
ข้อมูลที่ทำกรเรียกเก็บมาจากการตรวจวัดในภาคสนาม จะถูกกำหนดไว้เป็นรหัสเพื่อบ่งบอกว่า ข้อมูลเป็นของขบวนรถประเภทใด กลุ่มการติดตั้งเครื่องมือกลุ่มไหน วันใดที่ทำการตรวจวัด เพื่อให้ไม่เกิดการสับสนในการวิเคราะห์ข้อมูล และสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ง่าย

3.2 การกรองสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม

การกรองสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัดในภาคสนามนั้นจะใช้วิธี Fast fourier transform (FFT) โดยในการวิเคราะห์สัญญาณคือ การนำข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบซึ่งอยู่ในรูปประวัติของเวลา (Time history) มาแปลงให้อยู่ในรูปสัญญาณความถี่ (Frequency domain) โดยค่าความถี่หลักของการสั่นไหว จะเป็นความถี่ที่มีขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุด ซึ่งจะใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ

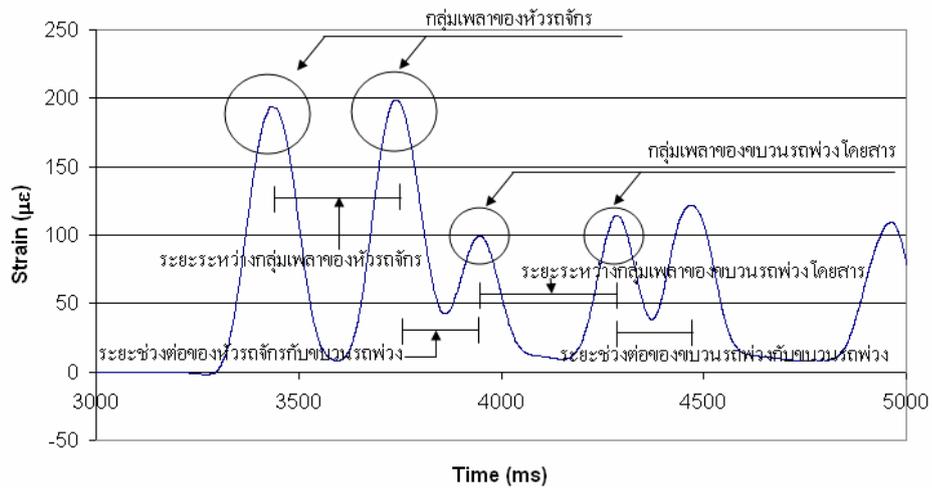
ค่าความถี่ธรรมชาติเป็นค่าความถี่ในการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free Vibration) เมื่อแรงกระทำมีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ ผลการตอบสนองจะมีการสั่นพ้อง (Resonance) ทำให้มีระดับการตอบสนองสูงกว่าปกติมาก สำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ใช้ข้อมูลความเร่งของการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระจาก Accelerometer

สำหรับภาพที่ 64 แสดงการตรวจสอบช่วงสัญญาณรบกวนของ Strain gage โดยใช้วิธี FFT ซึ่งเมื่อการตัดสัญญาณรบกวนออกด้วยวิธีการกรองสัญญาณต่ำ (Low-pass filter) และวิธีการตัดช่วงสัญญาณ (Band-pass filter) แล้วจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ หลังจากนั้นจึงทำการแยกส่วนของพฤติกรรมตอบสนองทางสถิตศาสตร์ ออกจากพฤติกรรมตอบสนองทั้งหมดของโครงสร้าง ได้ด้วยการกรองสัญญาณต่ำ (Low-pass filter) อีกครั้งหนึ่ง

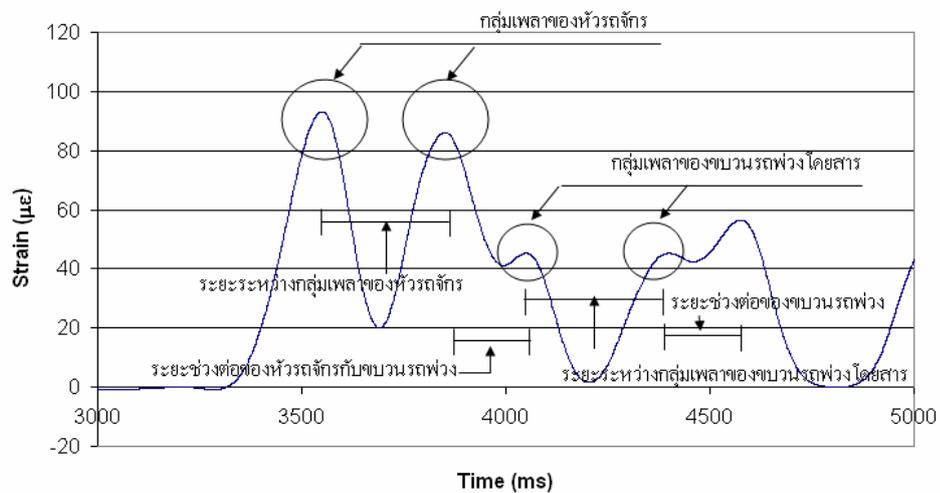


ภาพที่ 64 ตัวอย่างของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

ภาพที่ 65 แสดงการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเมื่อขบวนรถไฟวิ่งผ่านที่ได้จากการกรองสัญญาณ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเป็นผลของแรงกระทำจากน้ำหนักกลุ่มเพลลาของหัวรถจักรและขบวนรถพ่วงเป็นหลัก

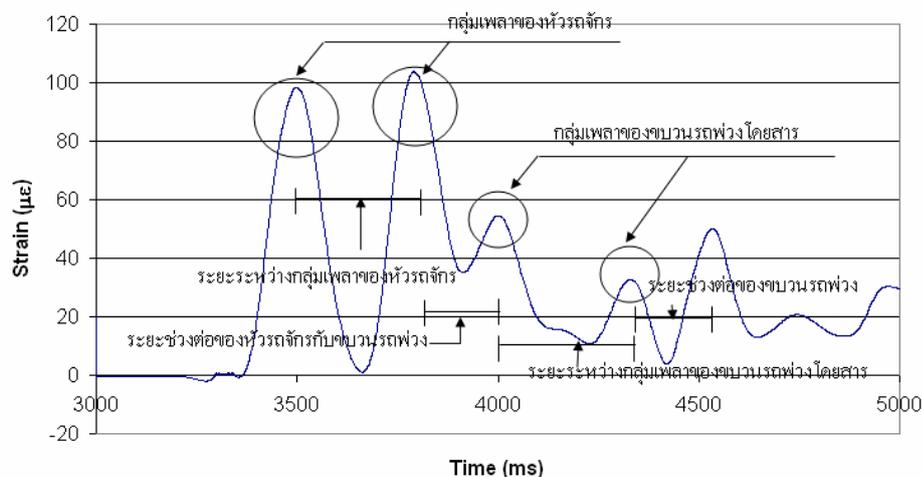


ก) คานรองรับขบวนรถไฟ



ข) คานประธาน

ภาพที่ 65 ตัวอย่างสัญญาณทางสถิติศาสตร์ที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว



ค) คานขวาง

ภาพที่ 65 (ต่อ)

3.3 การแสดงความสัมพันธ์ของค่าคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF กับความเร็วของรถไฟประเภทต่างๆ

เมื่อทำการกรองสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณทางสถิติแบบเทียบเท่า (Pseudo Static) ซึ่งสามารถนำมาหาค่า DAF ได้จากอัตราส่วนของการตอบสนองเชิงพลวัตสูงสุดต่อการตอบสนองเชิงสถิติสูงสุด ในขั้นตอนนี้จะนำขบวนรถไฟที่ได้กำหนดรหัสข้อมูลขบวนรถไฟเบื้องต้น มาทำการตรวจสอบหาความเร็วอีกครั้งหนึ่งเพื่อเปรียบเทียบกับกรจับเวลาด้วยมือ โดยใช้ข้อมูลสัญญาณทางสถิติและระยะระหว่างกลุ่มเพลลา ความสัมพันธ์ของค่า DAF ในแต่ละชิ้นส่วนสำคัญของสะพานกับความเร็วของรถไฟประเภทต่างๆ สามารถแสดงด้วยการพล็อตกราฟ

3.4 การแสดงความสัมพันธ์ของค่า DAF กับค่าน้ำหนักกลุ่มเพลลาของรถไฟ จากข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทย

สำหรับค่าน้ำหนักเพลลาของรถไฟ อาศัยข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทยซึ่งได้ทำการชั่งน้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) จากการเก็บรวบรวมข้อมูลน้ำหนักเพลลาโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักรถไฟแบบพกพา (Portable train weighing system) ผลิตโดยบริษัท WEIGHWELL ของประเทศอังกฤษ เครื่องมือดังกล่าวสามารถตรวจชั่งน้ำหนักเพลลาได้ ในขณะที่

ขบวนรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเครื่องชั่งด้วยความเร็วน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความสัมพันธ์ของค่า DAF ในแต่ละชิ้นส่วนสำคัญของสะพาน กับค่าน้ำหนักกลุ่มเพลลาของรถไฟ สามารถแสดงด้วยการพล็อตกราฟ

3.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของ ค่า DAF ที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามกับ ค่าตามมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทย

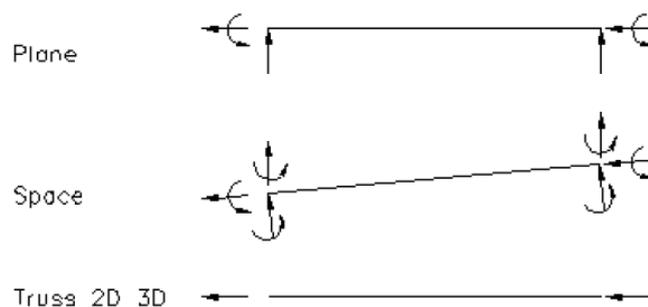
ทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า DAF ที่ได้จากการตรวจวัดกับ ค่าตามมาตรฐาน AREMA ที่ใช้ในการออกแบบในประเทศไทย ในแต่ละชิ้นส่วนสำคัญของ สะพาน คือ คานรองหมอนรถไฟ คานขวาง และคานประธาน

4. แบบจำลองโครงสร้างสะพาน

การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ จะต้องจำลองโครงสร้างในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปร่างคุณลักษณะต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด วิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของ โครงสร้าง ซึ่งได้แก่การแอ่นตัว หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ และความถี่ธรรมชาติ เป็นต้น โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบจำลองเบื้องต้น (2 มิติ) และการวิเคราะห์แบบจำลองแบบละเอียด (3 มิติ)

4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองเบื้องต้น (2 มิติ)

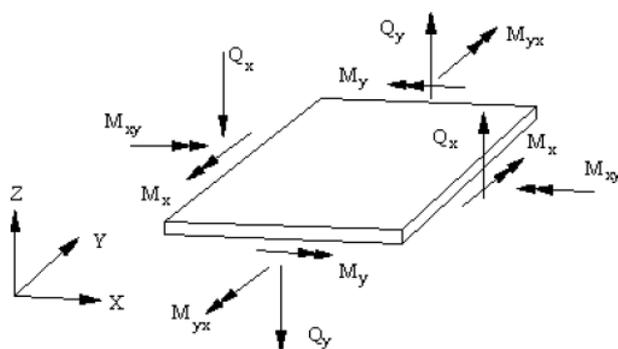
การวิเคราะห์โครงสร้างเบื้องต้นจะใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากแบบแปลนก่อสร้าง และข้อมูลทางกายภาพของสะพานเท่าที่มีอยู่ ซึ่งในแบบจำลองจะใช้ Beam Element เพื่อหาค่าแรง ภายในและค่าโมเมนต์คอร์ดรอบแกน 2 แกน ซึ่งมีสมมติฐานคือ รูปร่างและคุณสมบัติการยึดหยุ่น คงที่ตลอดความยาวของชิ้นส่วน และระนาบการเปลี่ยนรูปร่างยังคงเป็นระนาบเดิม ใน 1 Element จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) จำนวน 2 จุด โดยจะสามารถวิเคราะห์ค่าแรง ภายในและโมเมนต์ได้ตามชนิดของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 66



ภาพที่ 66 ตัวอย่างของ Beam Element

4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองละเอียด (3 มิติ)

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบละเอียด จะใช้รายละเอียดรูปร่างของโครงสร้างสะพานที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้มีความถูกต้องมากขึ้น ในแบบจำลองจะใช้ Plate Element เพื่อหาค่าแรงต่างๆ ในโครงสร้าง ใน 1 Element จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) จำนวน 3 จุดหรือ 4 จุด และจะต้องเชื่อมต่อกันกับ Element อื่น โดยความละเอียดของความถูกต้องขึ้นอยู่กับการแบ่งจำนวน Element โดยถ้ามีจำนวน Element มากก็就会有ความถูกต้องสูง โดยจะสามารถวิเคราะห์ค่าแรงภายในและโมเมนต์ได้ในระบบ 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 67 ตัวอย่างของ Plate Element

การพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างสะพาน มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างโดยรวมและเฉพาะที่ โดยข้อมูลที่ได้จะใช้ในการพิจารณาดำเนินงานที่จะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการตอบสนองของสะพาน
2. เพื่อประเมินสภาพการสั่นไหว และการตอบสนองของโครงสร้าง ได้แก่ การแอ่นตัว หน่วยแรงสถิต และความถี่ในการสั่นของโครงสร้าง
3. เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องตามพฤติกรรมจริงของโครงสร้างภายหลังการเปรียบเทียบกับค่าการตอบสนองจริง

ในการสร้างแบบจำลอง ถ้าต้องการความถูกต้องในระดับสูงจากแบบจำลอง ลักษณะของหน่วยแรงและความเครียดในทิศทางและตำแหน่งต่างๆ จะค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำแบบจำลองที่มีการใช้สมมติฐานต่างๆ ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าแบบจำลองที่ใช้สมมติฐานน้อย จะมีรายละเอียดมากและจะใช้เวลาในการคำนวณมาก แต่จะให้ผลการทำนายที่ดีกว่า

ในการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างสะพานจะใช้ Plate element ซึ่งในการจำลองในลักษณะนี้จะมีการใช้สมมติฐานน้อยมาก สมมติฐานสำคัญที่ใช้ในการจำลองตัวโครงสร้างมีเพียงว่าผนังบางของโครงสร้างสามารถจำลองได้ด้วย Plate element โดยในการนี้ไม่มีการใช้สมมติฐานอื่นๆ เกี่ยวกับตัวโครงสร้างอีก ดังนั้นในการทำแบบจำลองโดยใช้ Plate element น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ

Shape function ที่ใช้ในการประมาณค่าภายในของการขจัด (Displacement interpolation) ของ Plate element ที่เลือกใช้เป็น Linear shape function ในการทำแบบจำลองจะใช้ลักษณะของจุดรองรับด้านท้ายสะพานแบบ Simply Support วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้เป็นแบบเชิงเส้น โดยใช้ทฤษฎี Small displacement และคิดพฤติกรรมของวัสดุเหล็กในช่วงยืดหยุ่น

สำหรับโปรแกรมที่จะใช้ในการทำแบบจำลองโครงสร้างสะพานนั้นจะใช้โปรแกรม STAAD PRO ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณโครงสร้างที่ได้รับการยอมรับว่ามีความถูกต้องในระดับสูง

5. การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพาน

ผลกระทบทางพลศาสตร์ที่สำคัญของโครงสร้างสะพานนั้น อาจจะมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของค่า DAF เมื่อทำการทดสอบในภาคสนาม คือ ความเร็วของรถไฟ น้ำหนักเพลา และความหน่วงของโครงสร้างสะพาน ตัวแปรเหล่านี้เสนอได้ในรูปการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ 2 รูปแบบ คือ การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) โดยไม่รวมผลของพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟ และการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) โดยจะใช้ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพาน แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่า DAF ที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม

ผลและวิจารณ์

จากการดำเนินการวิจัยในการประเมินหาค่าคุณเพิ่มทางพลวัตของสะพานรถไฟแบบแม่แตร์เหล็กแขงขึ้น ในภาคสนามเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ โดยในการศึกษานี้ได้แบ่งขั้นตอนของการศึกษาวิจัยออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

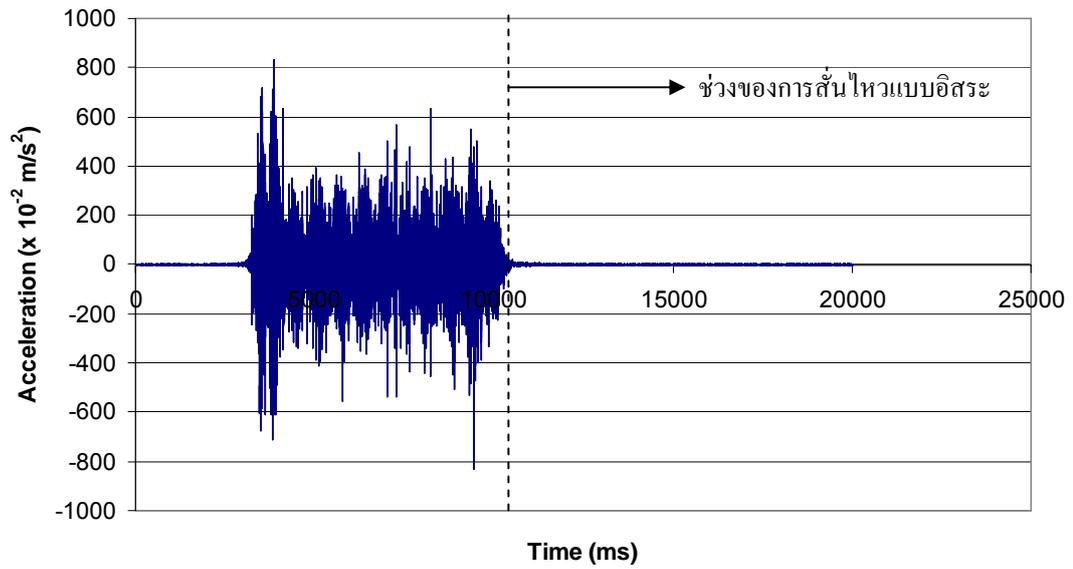
- 1) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม
- 2) การเปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานกับแบบจำลองโครงสร้างสะพาน
- 3) การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพาน

โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

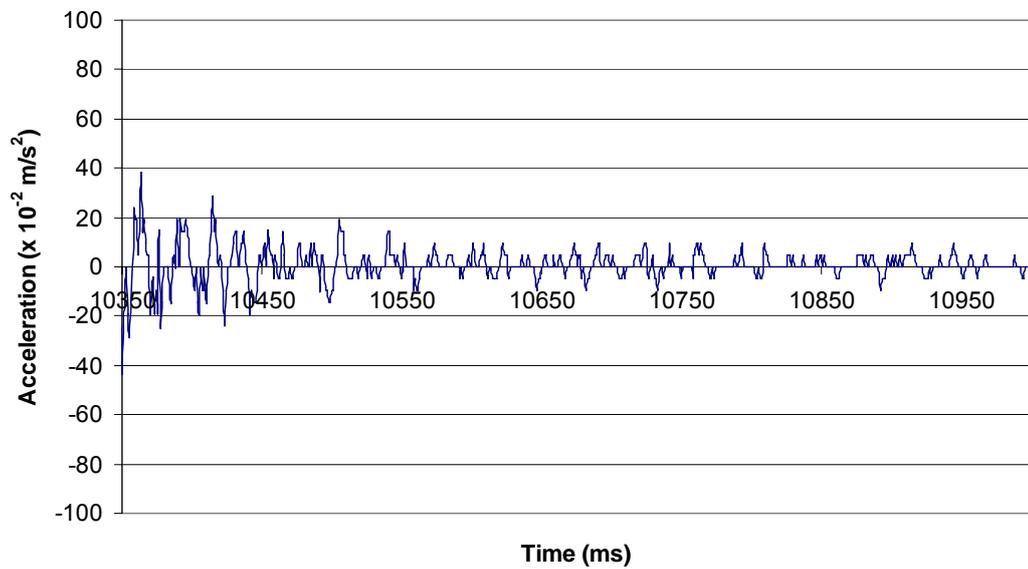
1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม

1.1 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน และอัตราส่วนความหน่วง

ค่าความถี่ธรรมชาติจะเป็นค่าความถี่ในการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free Vibration) เมื่อแรงกระทำมีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ ผลการตอบสนองจะมีการสั่นพ้อง (Resonance) ทำให้มีระดับการตอบสนองสูงกว่าปกติมาก สำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ใช้ข้อมูลความเร่งของการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระ ดังแสดงในภาพที่ 68 และ 69

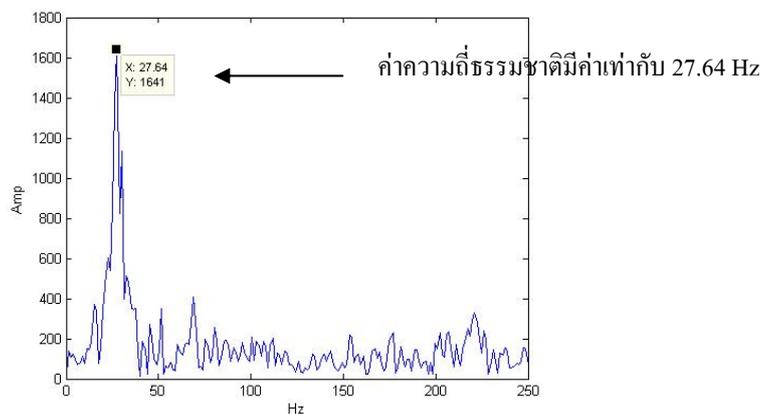


ภาพที่ 68 ข้อมูลความเร่งของโครงสร้างสะพานที่ตำแหน่งคานประธาน

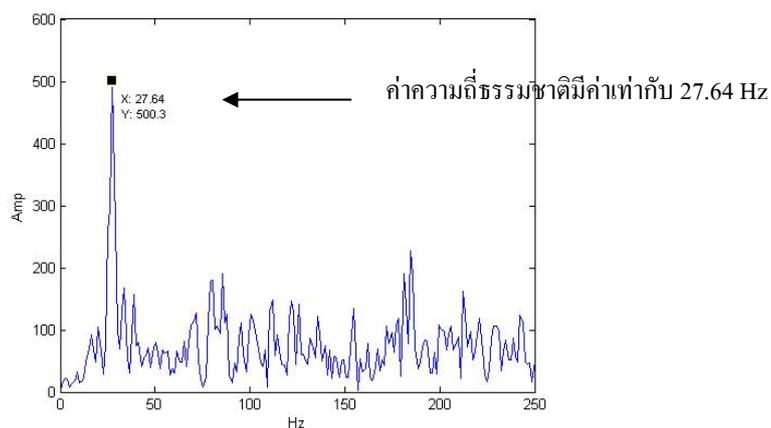


ภาพที่ 69 ข้อมูลความเร่งของการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระของคานประธาน

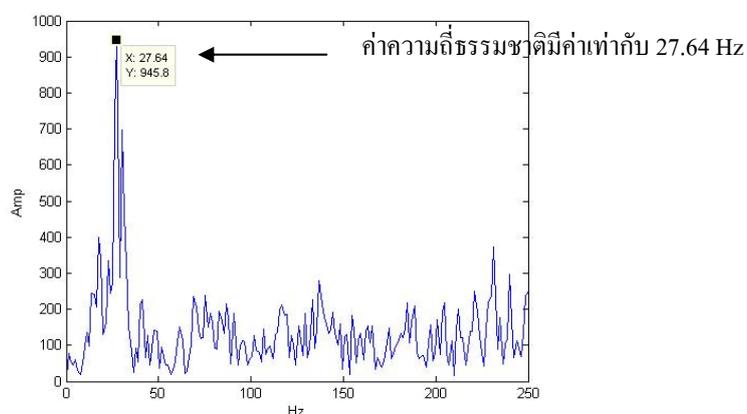
ภาพที่ 70 และ 71 แสดงการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) โดยอาศัยวิธีการ Fast Fourier Transform (FFT) จากข้อมูลความถี่ของการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระของคานาประจันของขบวนรถไฟหลายๆ ขบวนของทั้งสองสะพาน



ก) ขบวนรถโดยสาร รหัส t62

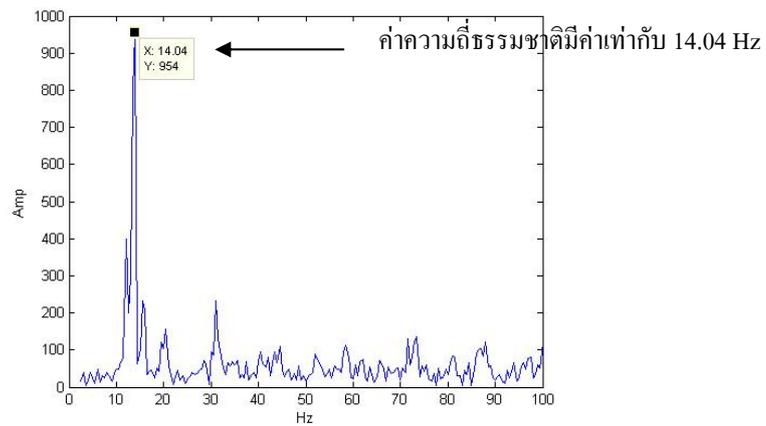


ข) ขบวนรถโดยสาร รหัส t63

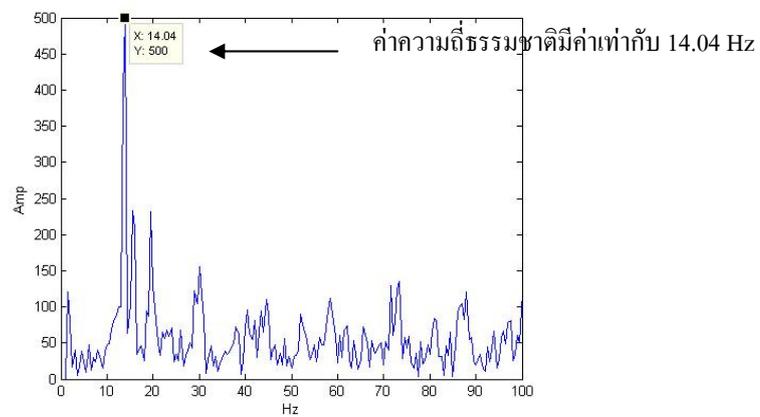


ค) ขบวนรถโดยสาร รหัส t64

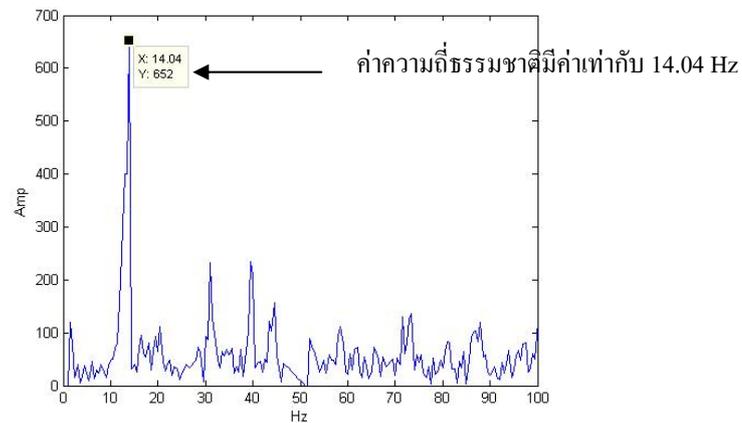
ภาพที่ 70 ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ก) ขบวนการโดยสาร รหัส ๓45



ข) ขบวนการโดยสาร รหัส ๓48

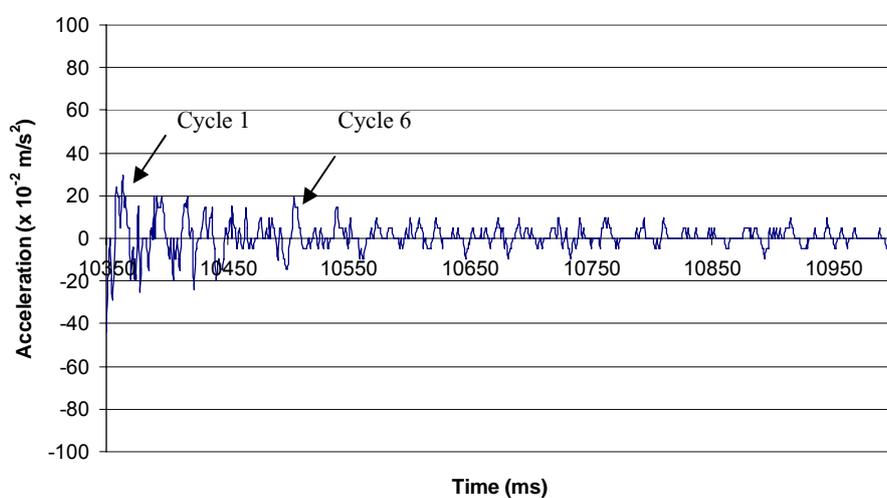


ค) ขบวนการดีเซลราง รหัส ๓49

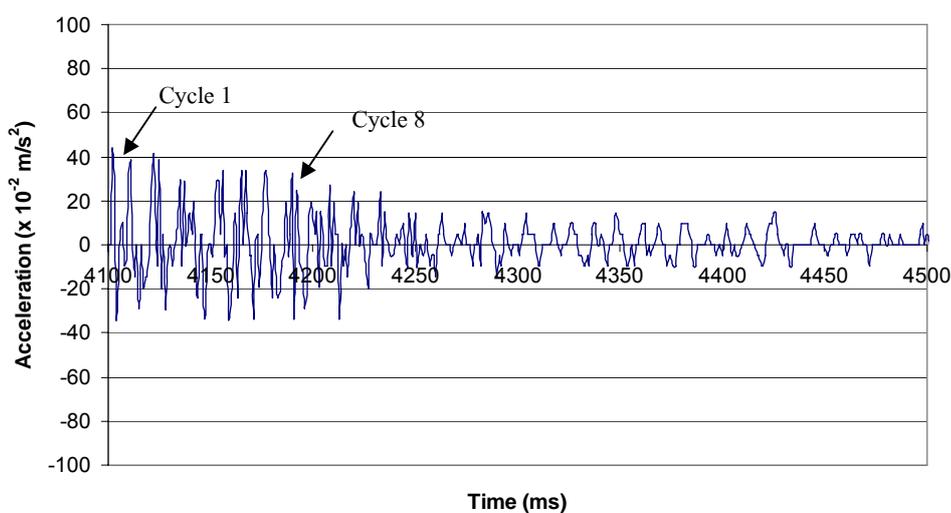
ภาพที่ 71 ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

จากการใช้ FFT วิเคราะห์การสั่นไหวในช่วง Free vibration เพื่อการหาค่าความถี่ธรรมชาติ พบว่าสำหรับสะพานรถไฟใกล้สถานีรถไฟรังสิต ความถี่ธรรมชาติมีค่า 27.64 Hz และสำหรับสะพานรถไฟใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ ความถี่ธรรมชาติมีค่า 14.04 Hz

จากข้อมูลความเร่งของการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระ พบว่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิตมีค่าประมาณ 1% และอัตราส่วนความหน่วงของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุมีค่าประมาณ 0.5% โดยอาศัยสมการที่ 4 ในการคำนวณ ภาพที่ 72 และ 73 แสดงช่วงอัตราส่วนความหน่วงของทั้งสองสะพาน



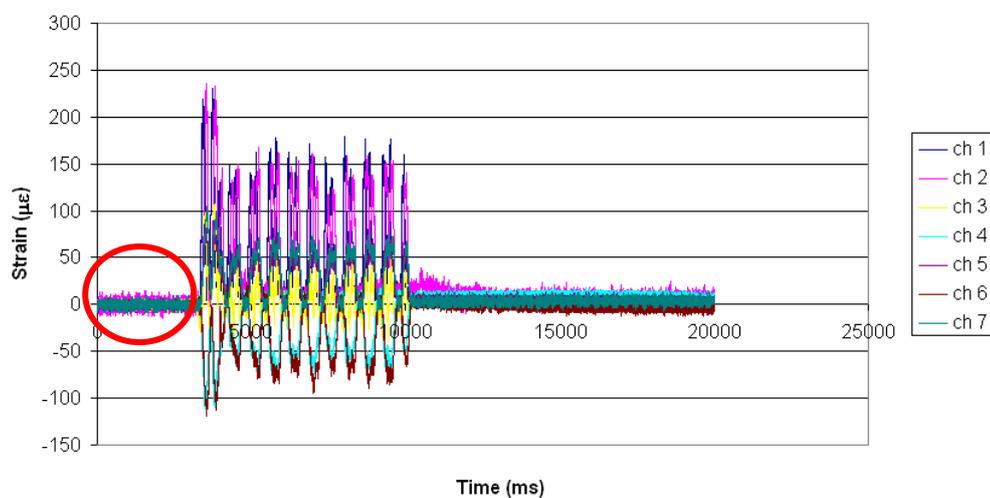
ภาพที่ 72 ช่วงอัตราส่วนความหน่วงสำหรับการสั่นแบบอิสระ ของสะพานใกล้สถานีรังสิต



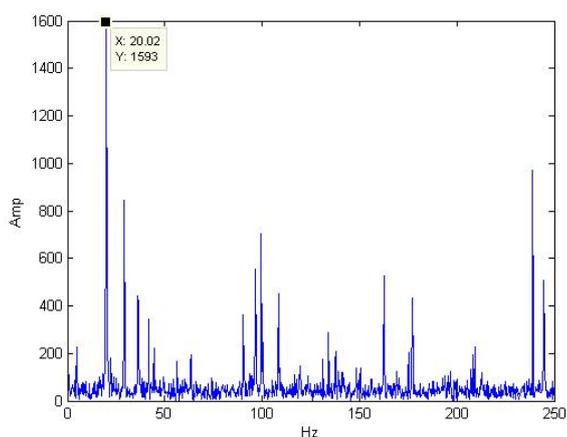
ภาพที่ 73 ช่วงอัตราส่วนความหน่วงสำหรับการสั่นแบบอิสระ ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ

1.2 การกรองสัญญาณ โดยการใช้การกรองสัญญาณต่ำ (Low-pass filter) และการตัดสัญญาณ (Band-pass filter)

การกรองสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัดในภาคสนามนั้นจะทำการใช้วิธี Fast fourier transform (FFT) โดยจะทำการตรวจสอบความถี่ของสัญญาณรบกวนก่อนที่จะรูดไฟเข้าสะพาน เพื่อจะหาช่วงการกรองสัญญาณ ดังภาพที่ 74 และตรวจสอบค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนจากขบวนรถไฟหลายๆ ขบวน ดังแสดงในภาพที่ 75

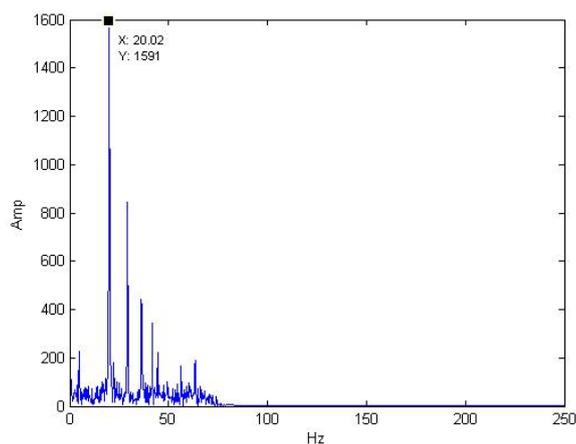


ภาพที่ 74 ตรวจสอบช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวนก่อนรูดไฟเข้าสะพาน

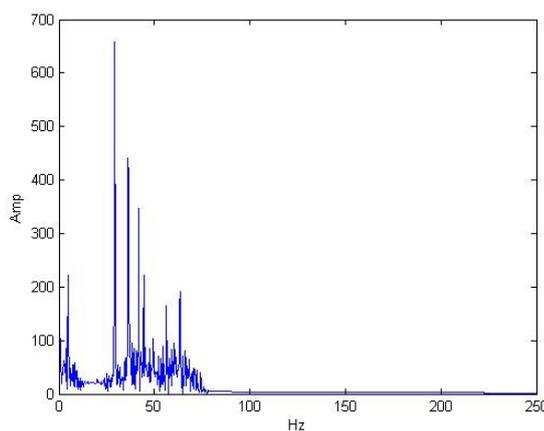


ภาพที่ 75 ความถี่ของสัญญาณรบกวนก่อนรูดไฟเข้าสะพาน

สำหรับสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต พบว่าความถี่ของสัญญาณรบกวนได้อยู่ใกล้ช่วงของความถี่ธรรมชาติของสะพาน 27.64 Hz จึงจะต้องทำการกรองสัญญาณต่ำ (Low-pass filter) ที่ 75 Hz และการตัดสัญญาณ (Band-pass filter) ในช่วง 10-20 Hz ในการตัดสัญญาณรบกวนจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมในภาคสนาม ดังแสดงในภาพที่ 76 และ 77



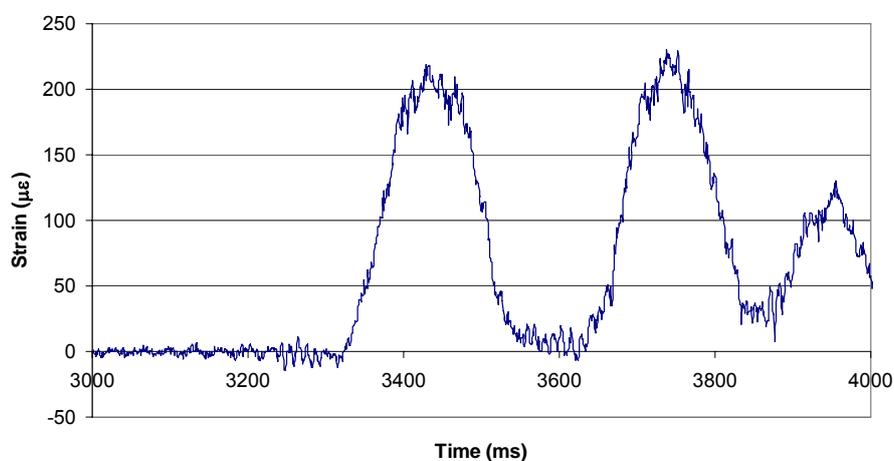
ภาพที่ 76 สัญญาณ Strain gage หลังจากผ่านการกรองสัญญาณต่ำที่ความถี่ 75 Hz



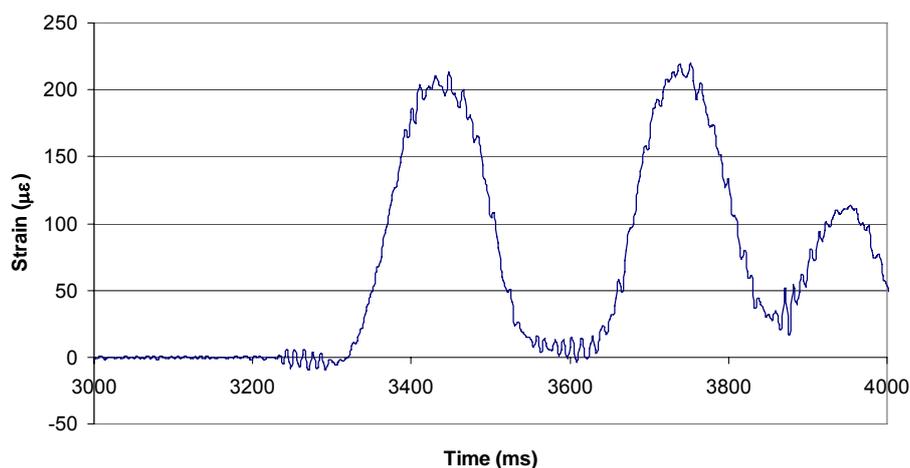
ภาพที่ 77 สัญญาณ Strain gage หลังจากผ่านการกรองสัญญาณต่ำที่ 75 Hz และการตัดสัญญาณที่ 10-20 Hz แล้วใช้ FFT ตรวจสอบ

เมื่อทำการกรองสัญญาณรบกวนแล้วสัญญาณที่ได้จะเป็นผลการตอบสนองเชิงพลวัต ซึ่งจะต้องทำการกรองสัญญาณต่ำ (Low-pass filter) อีกครั้งหนึ่งโดยจะกรองที่ช่วงความถี่ 20 Hz เพื่อแยกส่วนของพฤติกรรมการตอบสนองเชิงสถิต ออกจากพฤติกรรมการตอบสนองทั้งหมดของ โครงสร้าง

ผลการตอบสนองของคานรองรับน้ำหนักไฟของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟ รังสิต เมื่อขบวนรถโดยสารข้ามผ่านสะพาน แสดงได้ดังภาพที่ 78

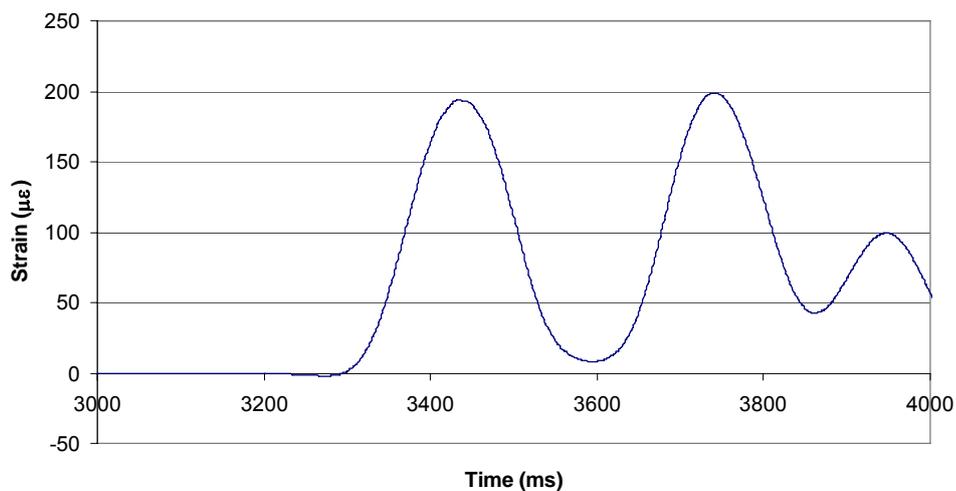


ก) ข้อมูลสัญญาณดิบก่อนกรองของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ข) ข้อมูลสัญญาณทางพลวัตของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ภาพที่ 78 ผลการตอบสนองของคานรองรับน้ำหนักไฟของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

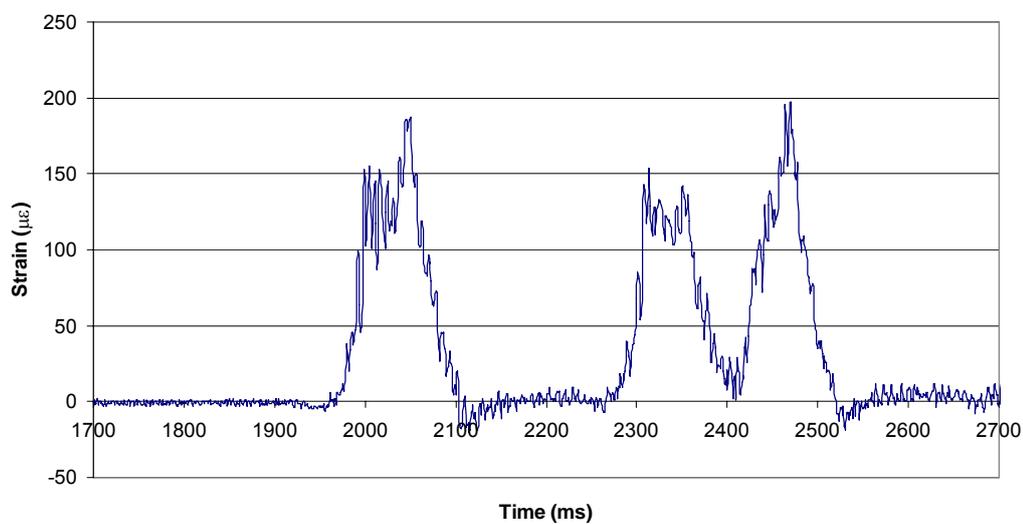


ค) ข้อมูลสัญญาณทางสถิติโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรังสิต

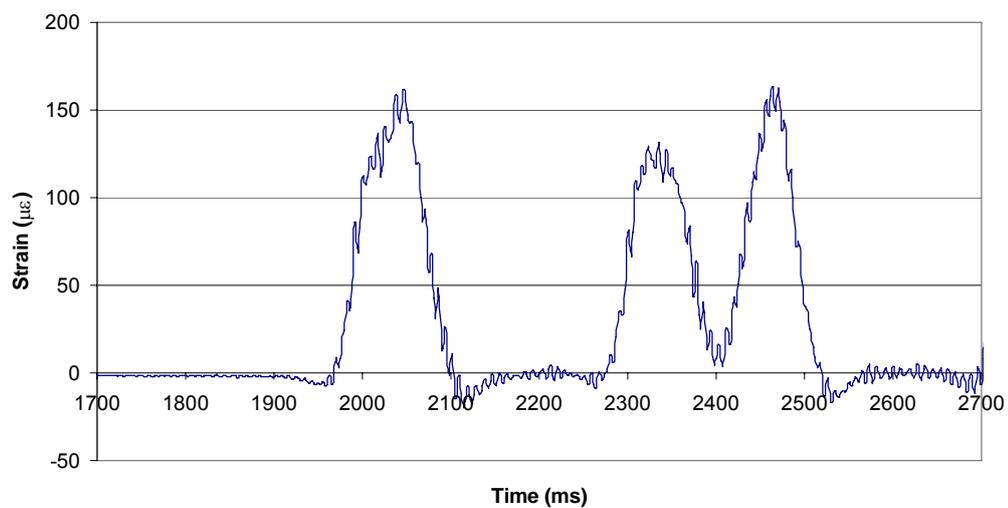
ภาพที่ 78 (ต่อ)

สำหรับสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ พบว่าความถี่ของสัญญาณรบกวนได้อยู่ใกล้ช่วงของความถี่ธรรมชาติของสะพาน 14.04 Hz จึงจะต้องทำการกรองสัญญาณต่ำ (Low-pass filter) ที่ความถี่ 75 Hz และตัดสัญญาณรบกวน (Band-pass filter) ในช่วงความถี่ 5 – 10 Hz เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม ข้อมูลที่ได้จากการกรองสัญญาณแล้วจะเป็นผลการตอบสนองเชิงพลวัต แล้วจึงทำการกรองสัญญาณต่ำอีกครั้งหนึ่ง ที่ความถี่ 5 Hz เพื่อแยกส่วนของพฤติกรรมตอบสนองเชิงสถิต ออกจากพฤติกรรมตอบสนองทั้งหมดของโครงสร้าง

ผลการตอบสนองของคานรองรับหมอนรถไฟของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ เมื่อขบวนรถดีเซลรางข้ามผ่านสะพาน แสดงได้ดังภาพที่ 79

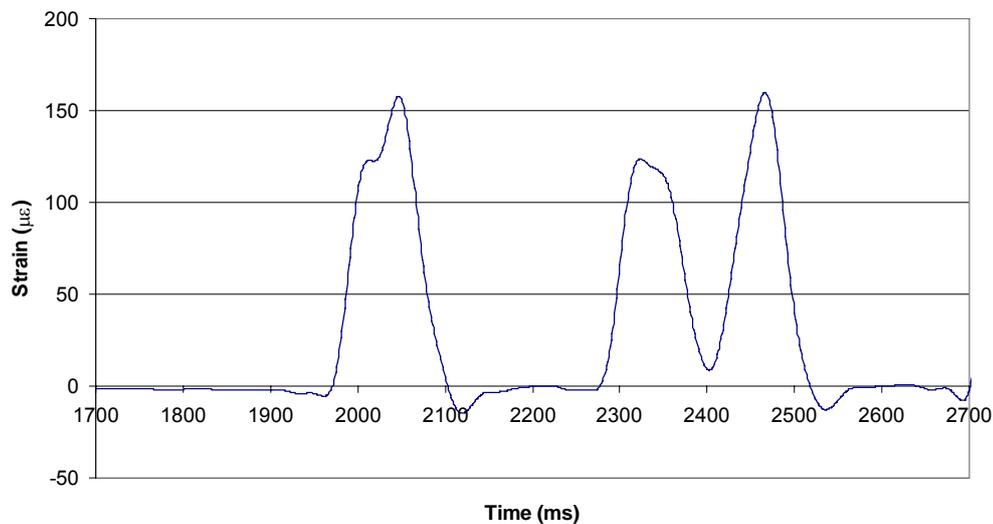


ก) ข้อมูลสัญญาณคืบก่อนกรองของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ



ข) ข้อมูลสัญญาณทางพลวัตโครงสร้างสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ

ภาพที่ 79 ผลการตอบสนองของคานรองรับรถยนต์ไฟของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ



ค) ข้อมูลสัญญาณทางสถิติโครงสร้างสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ

ภาพที่ 79 (ต่อ)

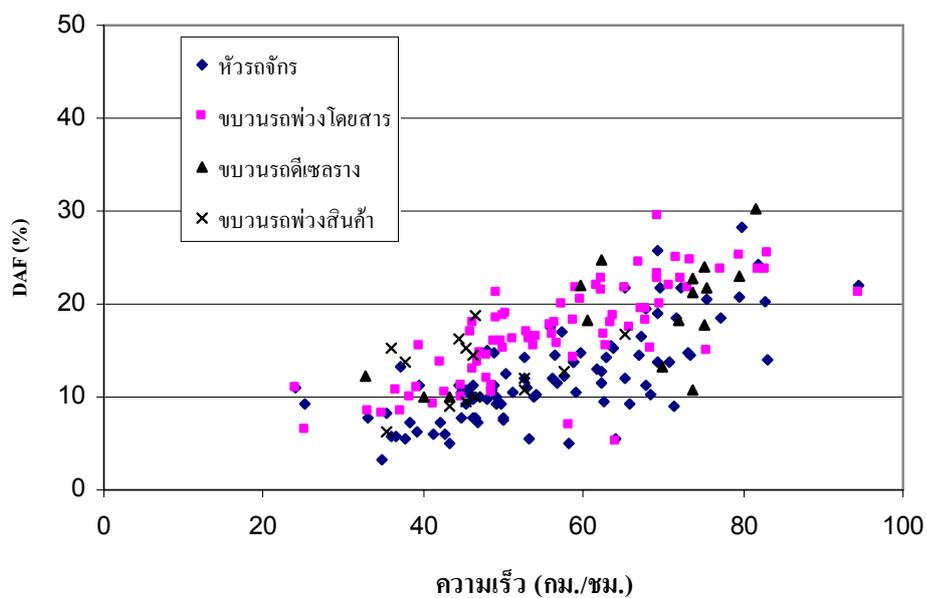
1.3 การแสดงความสัมพันธ์ของค่าคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF กับความเร็วของรถไฟประเภทต่างๆ แต่ละขบวนขณะข้ามผ่านสะพาน ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้างสำคัญ

ในการทดสอบที่ได้ทำการตรวจวัดค่าการตอบสนองของโครงสร้างสะพานเป็นเวลาติดต่อกัน 7 วัน ในแต่ละสะพาน โดยทำการบันทึกช่วงเวลาของรถไฟแต่ละขบวนที่วิ่งผ่านสะพาน ความเร็วของรถไฟ และประเภทของรถไฟ ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกได้เป็นขบวนรถพ่วงโดยสาร ขบวนรถพ่วงสินค้า และขบวนรถดีเซลราง โดยสถิติของจำนวนขบวนรถไฟแสดงดังตารางที่ 6

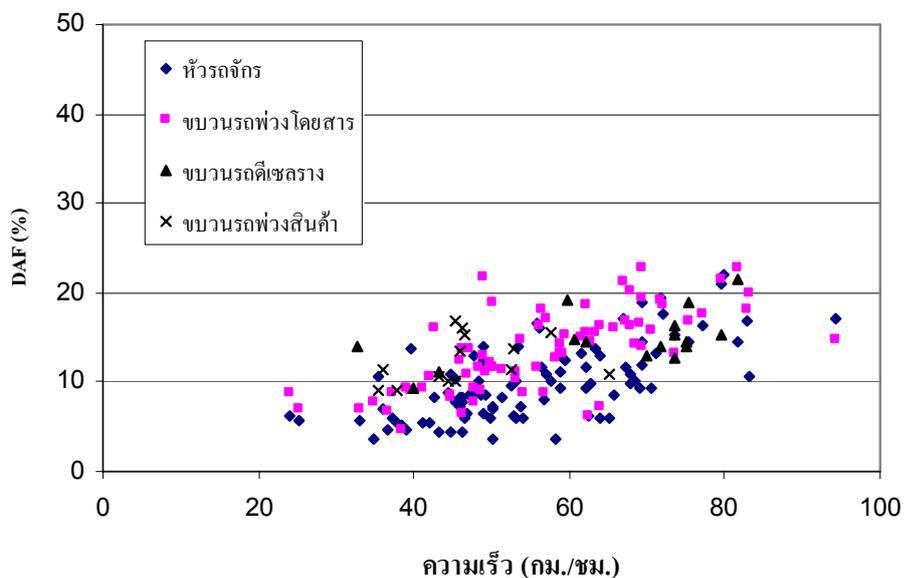
สำหรับสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต พบว่าเมื่อขบวนรถไฟมีความเร็วเพิ่มจาก 40 กม./ชม. เป็น 70 กม./ชม. ค่า DAF ของคานรองหมอนรถไฟมีค่าเพิ่มจาก 10% - 20% คานประธานมีค่าเพิ่มจาก 5% - 15% และคานขวางมีค่าเพิ่มจาก 10% - 30% ดังแสดงในภาพที่ 80 - 86 โดยที่ปีกคานรองหมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) จะมีค่า DAF น้อยกว่าปีกคานรองหมอนรถไฟตัวริม (Section 1) และคานประธานที่ Section 4 และ Section 5 มีค่า DAF ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6 แสดงสถิติของจำนวนขบวนการไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์

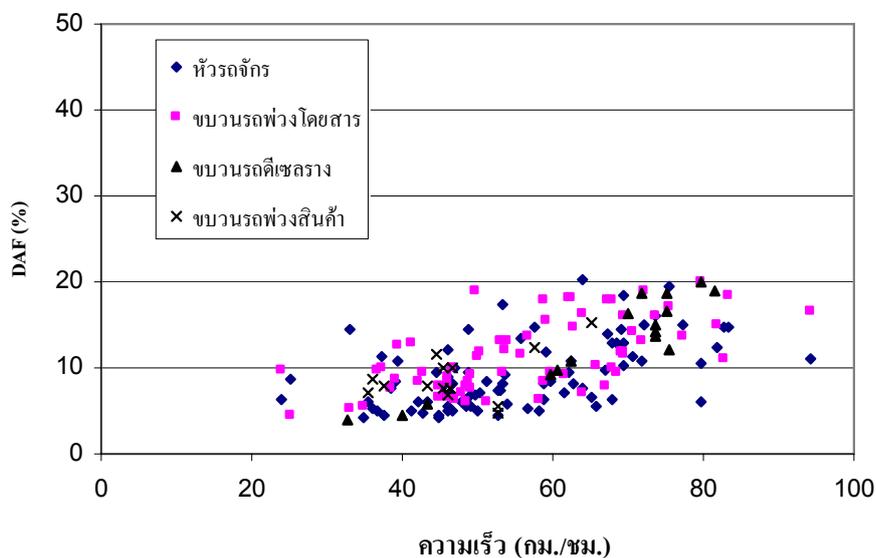
ประเภทขบวนการไฟ	สะพานใกล้สถานีรังสิต (ขบวน)	สะพานใกล้สถานีบางบำหรุ (ขบวน)
หัวรถจักร	94	37
ขบวนรถพ่วงโดยสาร	76	25
ขบวนรถดีเซลราง	16	16
ขบวนรถพ่วงสินค้า	14	8



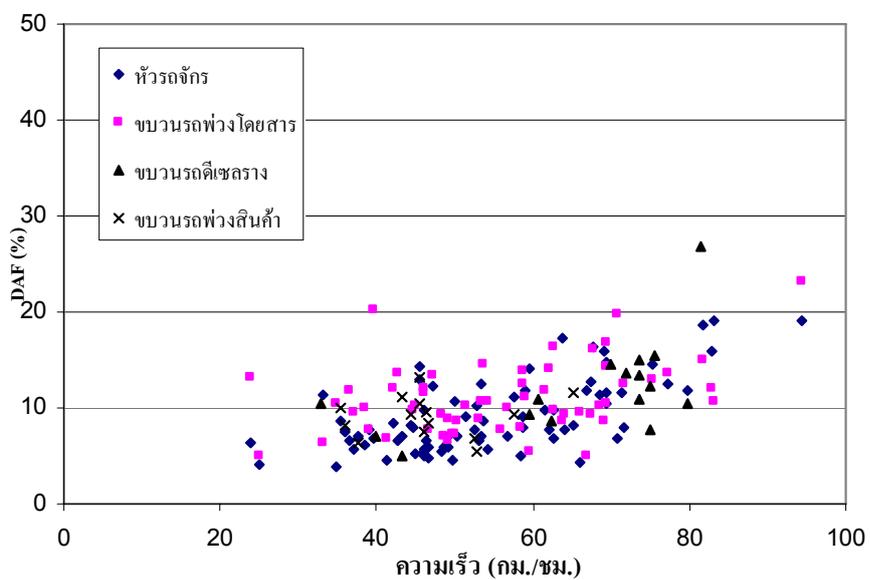
ภาพที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกลางของคานรองหมอนรถไฟตัวริม (Section 1) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



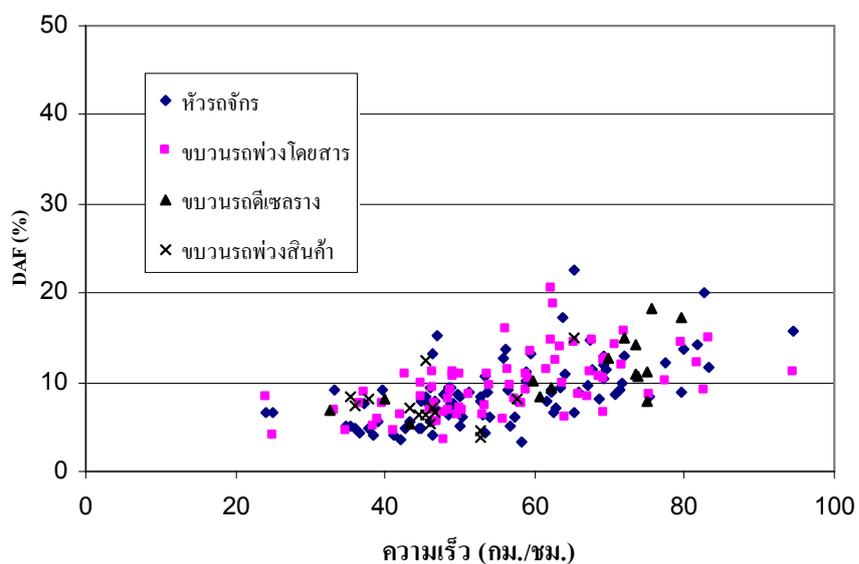
ภาพที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกลางของคานรองหมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



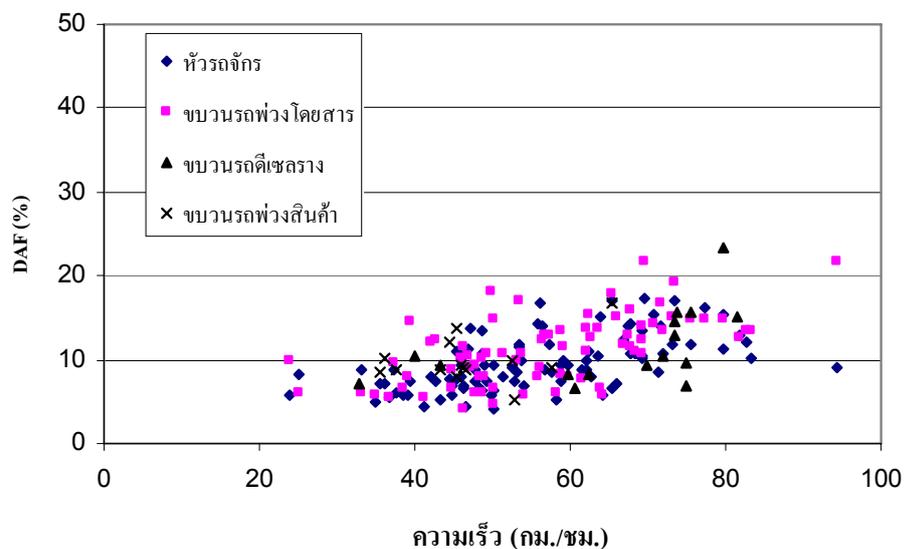
ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



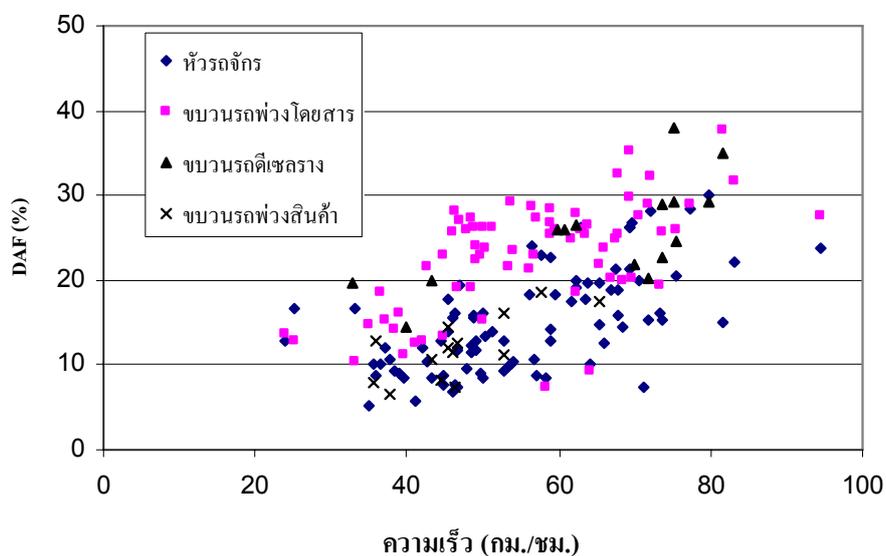
ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกกลางของคานาประชาน (Section 4) ของ สะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานาประชาน (Section 5) ของ สะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

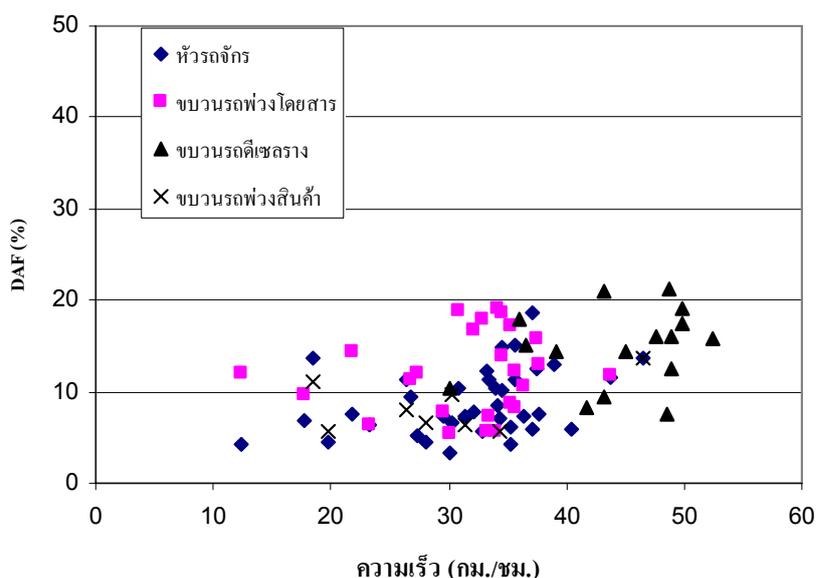


ภาพที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกกลางของคานาประชาน (Section 5) ของ สะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

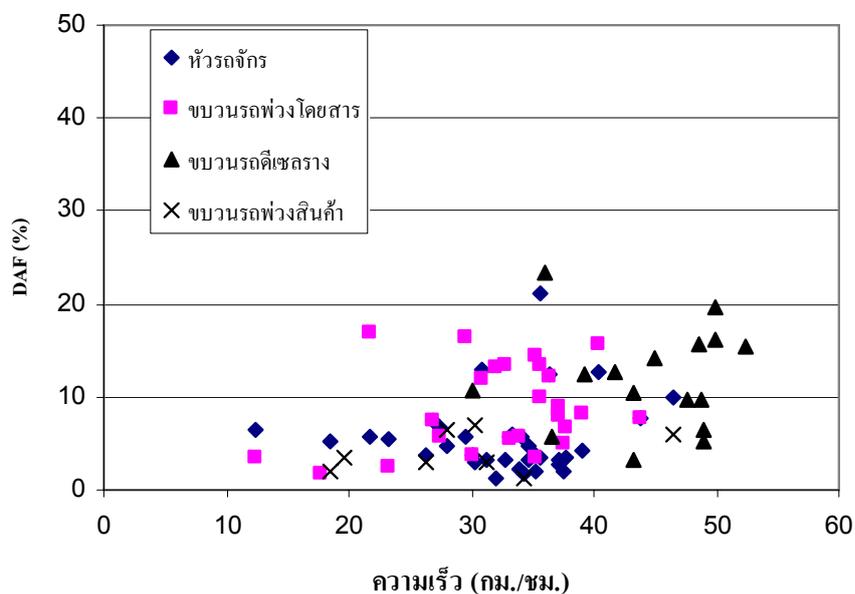


ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกกลางของคานาขวาง (Section 2) ของ สะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

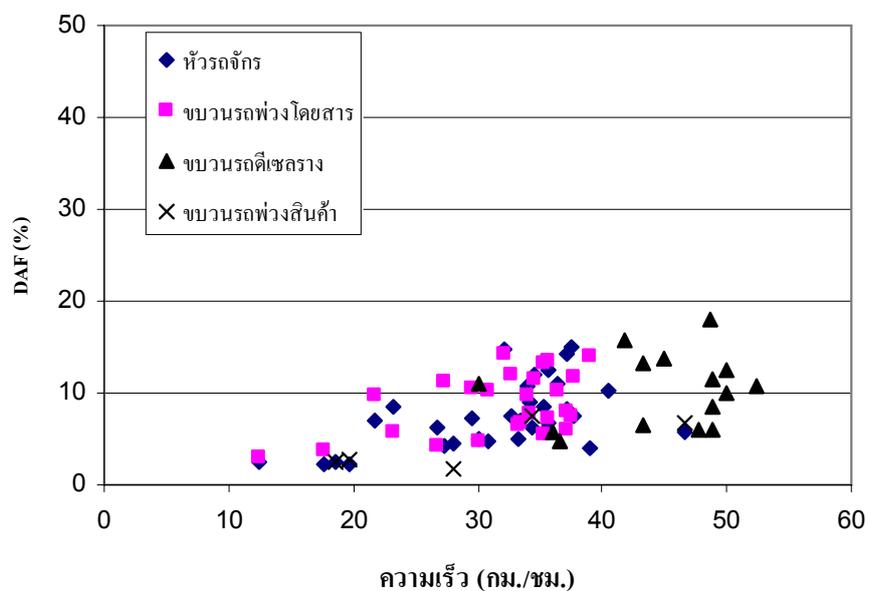
สำหรับสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ พบว่าเมื่อขบวนรถไฟมีความเร็วเพิ่มจาก 20 กม./ชม. เป็น 50 กม./ชม. ค่า DAF ของคานรองหมอนรถไฟมีค่าเพิ่มจาก 5% - 15% คานประธานมีค่าเพิ่มจาก 5% - 10% และคานขวางมีค่าเพิ่มจาก 5% - 10% ดังแสดงในภาพที่ 87 - 93 โดยคานรองหมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) จะมีค่า DAF น้อยกว่าคานรองหมอนรถไฟตัวริม (Section 6) และคานประธานที่ Section 4 และ Section 5 มีค่า DAF ที่ใกล้เคียงกัน



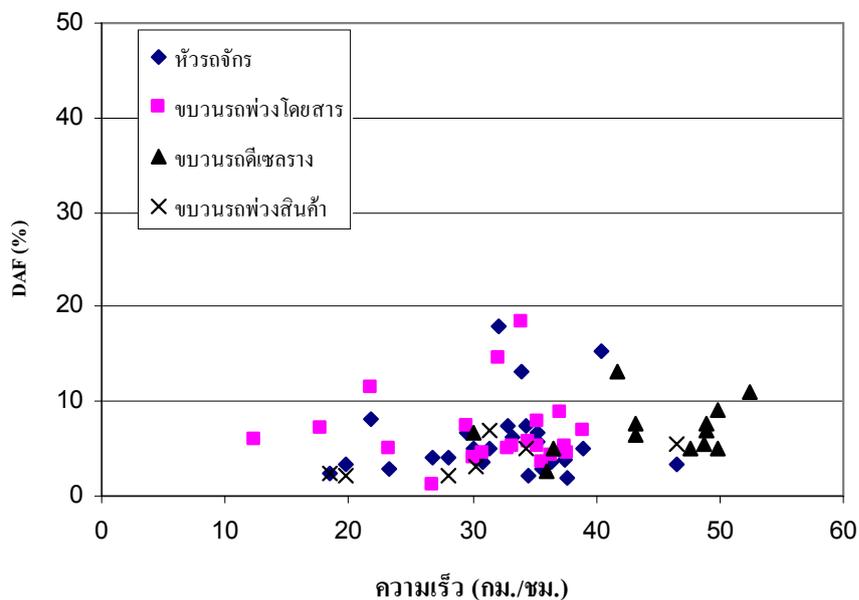
ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกลางของคานรองหมอนรถไฟตัวริม (Section 6) ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ



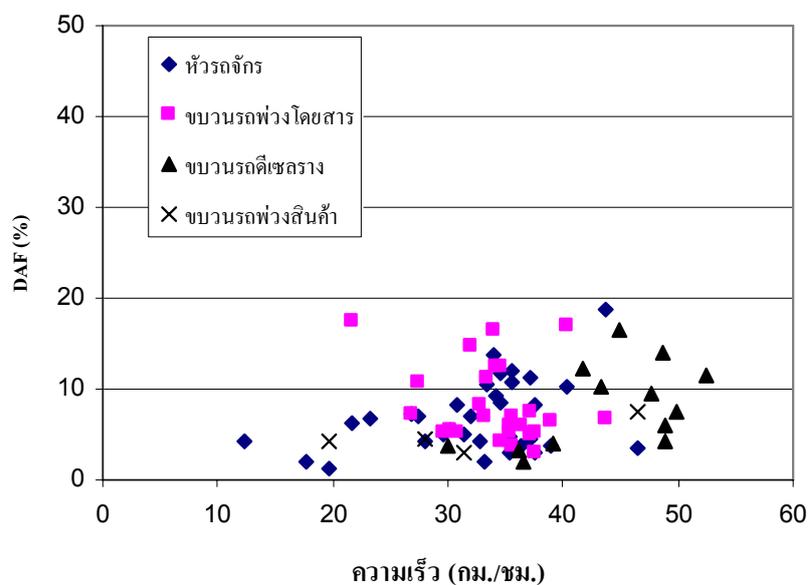
ภาพที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกกลางของคานรองรับมอเตอร์ไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานไกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ



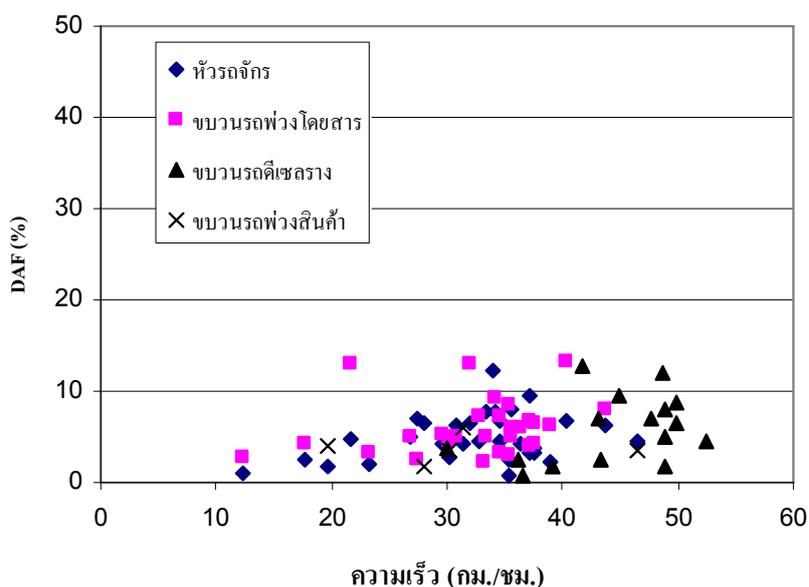
ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประธาน (Section 4) ของสะพานไกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ



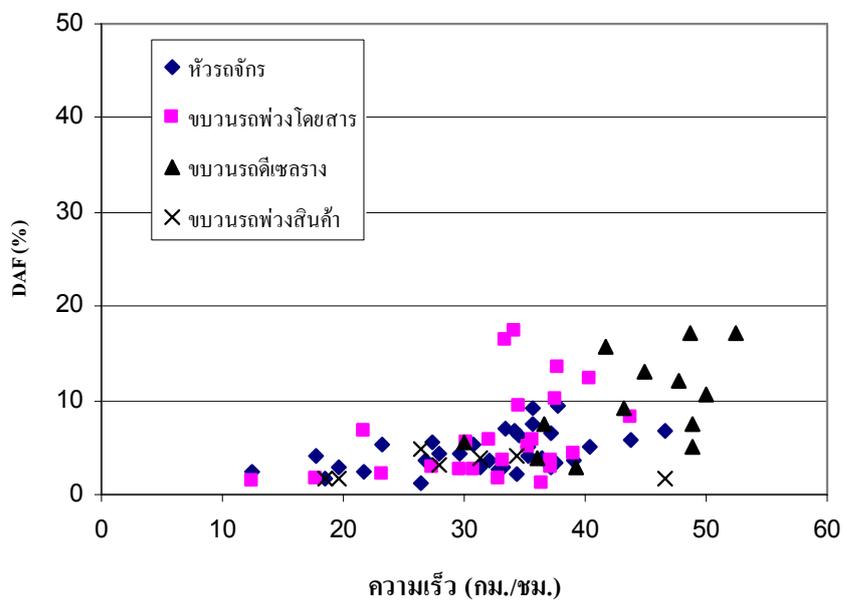
ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกลางของคานประชาน (Section 4) ของ สะพานไถ่สถานีรถไฟบางบำหรุ



ภาพที่ 91 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกบนของคานประชาน (Section 5) ของ สะพานไถ่สถานีรถไฟบางบำหรุ



ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกลางของคานประชาชน (Section 5) ของ สะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ



ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่า DAF ที่ปีกลางของคานขวาง (Section 2) ของ สะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ค่า DAF ของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง สำหรับแต่ละช่วงของความเร็วของขบวนรถไฟประเภทต่างๆ แสดงในตารางที่ 7 – 10 และตารางที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า DAF ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง สำหรับขบวนรถไฟประเภทต่างๆ

ตารางที่ 7 ค่า DAF ขณะหัวจักรข้ามผ่าน โครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประธาน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-40	6.52	2.9	6.79	1.4	10.82	3.3
40-60	8.71	3.1	8.72	2.8	12.72	4.5
60-80	12.85	4.4	11.79	3.2	19.58	5.7
80-100	14.74	3.0	11.01	1.8	20.34	4.5

ตารางที่ 8 ค่า DAF ขณะขบวนรถพ่วงโดยสารข้ามผ่าน โครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประธาน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-40	7.71	1.5	8.01	2.9	14.12	2.5
40-60	12.35	3.4	9.70	3.3	22.82	5.4
60-80	16.39	3.8	13.49	3.5	25.03	5.5
80-100	18.96	3.3	15.28	4.3	32.38	5.2

ตารางที่ 9 ค่า DAF ขณะขบวนรถดีเซลรางข้ามผ่าน โครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประธาน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-40	14.01	-	7.13	-	19.71	-
40-60	13.21	5.2	9.33	1.2	20.13	5.7
60-80	14.83	1.7	12.12	5.0	26.70	5.1
80-100	21.59	-	15.12	-	34.99	-

ตารางที่ 10 ค่า DAF ขณะขบวนรถฟ่งลินค้าข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประธาน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-40	9.84	1.3	9.21	0.9	9.12	3.3
40-60	13.30	2.6	9.38	2.3	12.25	3.4

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า DAF ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง เมื่อรถไฟประเภทต่างๆ ข้ามสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ชั้นส่วนโครงสร้าง	ประเภทรถไฟ	DAF (%)	DAF (%)	DAF (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	
คานรองหมอน รถไฟ	หัวรถจักร	10.70	14.74	6.52	3.76
	รถโดยสาร	13.85	18.96	7.71	4.91
	ดีเซลราง	15.91	21.59	13.21	3.84
	รถสินค้า	11.57	13.30	9.84	2.44
คานประธาน	หัวรถจักร	9.58	11.79	6.79	2.27
	รถโดยสาร	11.62	15.28	8.01	3.35
	ดีเซลราง	10.92	15.12	7.13	3.46
	รถสินค้า	9.29	9.38	9.21	0.12
คานขวาง	หัวรถจักร	15.86	20.34	10.82	4.80
	รถโดยสาร	23.59	32.38	14.12	7.52
	ดีเซลราง	25.38	34.99	19.71	7.16
	รถสินค้า	10.68	12.25	9.12	2.21

ค่า DAF ของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง สำหรับแต่ละช่วงของความเร็วของขบวนรถไฟประเภทต่างๆ แสดงในตารางที่ 12 – 15 และตารางที่ 16 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า DAF ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง สำหรับขบวนรถไฟประเภทต่างๆ

ตารางที่ 12 ค่า DAF ขณะหัวจักรข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประชาชน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-20	7.30	4.5	2.96	0.7	2.76	1.0
20-30	7.35	2.4	5.14	2.2	3.87	1.6
30-40	9.45	3.8	5.92	4.0	5.03	2.2
40-60	10.38	4.1	9.34	8.4	5.86	0.8

ตารางที่ 13 ค่า DAF ขณะขบวนรถฟางโดยสารข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประชาชน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-20	2.53	1.2	8.01	2.9	1.53	0.2
20-30	9.79	6.6	9.70	3.3	3.60	2.1
30-40	11.91	6.9	13.49	3.5	6.81	5.1
40-60	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 14 ค่า DAF ขณะขบวนรถดีเซลรางข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประชาชน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-20	-	-	-	-	-	-
20-30	-	-	-	-	-	-
30-40	14.42	3.1	4.75	2.0	3.65	3.4
40-60	14.90	4.7	7.75	2.6	8.16	5.9

ตารางที่ 15 ค่า DAF ขณะขบวนรถฟ่งลินค้าข้ามผ่านโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ความเร็ว (กม./ชม.)	คานรองหมอนรถไฟ		คานประชาชน		คานขวาง	
	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.	DAF (%) เฉลี่ย	SD.
0-20	2.74	0.9	2.32	0.2	1.72	0.0
20-30	4.75	2.5	2.19	-	4.07	1.2
30-40	3.76	2.9	5.07	1.9	4.08	0.1
40-60	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า DAF ในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง เมื่อรถไฟประเภทต่างๆ ข้ามสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ชั้นส่วนโครงสร้าง	ประเภทรถไฟ	DAF (%)	DAF (%)	DAF (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	
คานรองหมอน รถไฟ	หัวรถจักร	8.62	10.38	7.30	1.54
	รถโดยสาร	8.08	11.91	2.53	4.92
	ดีเซลราง	14.66	14.90	14.42	0.34
	รถสินค้า	3.75	4.75	2.74	1.01
คานประชาชน	หัวรถจักร	5.84	9.34	2.96	2.65
	รถโดยสาร	10.40	13.49	8.01	2.81
	ดีเซลราง	6.25	7.75	4.75	2.12
	รถสินค้า	3.19	5.07	2.19	1.63
คานขวาง	หัวรถจักร	4.38	5.86	2.76	1.35
	รถโดยสาร	3.98	6.81	1.53	2.66
	ดีเซลราง	5.91	8.16	3.65	3.19
	รถสินค้า	3.29	4.08	1.72	1.36

สำหรับสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อขบวนรถไฟข้ามผ่านสะพาน ชั้นส่วนโครงสร้างสะพานที่มีค่า DAF จากมากไปหาน้อยคือ คานขวาง คานรองหมอนรถไฟ และคานประชาชน ตามลำดับ เนื่องจากรูปร่างหน้าตัดของคานมีผลต่อหน่วยแรงซึ่งถ้ามีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดหน่วยแรงน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 9% -25% ประเภทของรถไฟ

ที่มีค่า DAF มากที่สุดคือ ขบวนการดีเซลรางเนื่องจากวิ่งผ่านสะพานรถไฟด้วยความเร็วสูง และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับขบวนการรถไฟประเภทอื่น

สำหรับสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อขบวนการไฟข้ามผ่านสะพาน ชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่มีค่า DAF จากมากไปหาน้อยคือ คานรองหมอนรถไฟ คานขวาง และคานประธาน ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4% -15% ประเภทของรถไฟที่มีค่า DAF มากที่สุดคือ ขบวนการดีเซลราง

1.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างของ ค่า DAF ที่ได้จากการทดสอบในภาคสนามกับค่าตามมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทย

เมื่อพิจารณาจากมาตรฐานการออกแบบของ AREMA ตามสมการที่ 9 โดยใช้ค่า $RE = 10\%$ จะได้ความแตกต่างจากการทดสอบในภาคสนามดังตารางที่ 17 และ 18

เมื่อพิจารณาจากมาตรฐานการออกแบบของ Eurocode ตามสมการที่ 8 จะได้ความแตกต่างจากการทดสอบในภาคสนามดังตารางที่ 19

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบค่า DAF จากมาตรฐาน AREMA กับการตรวจวัดจริงในภาคสนาม สำหรับโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

ชิ้นส่วนโครงสร้าง	DAF (%) ของ AREMA	DAF (%) สูงสุดจากการตรวจวัด	% ความ แตกต่าง
คานรองหมอนรถไฟ (L=3.33)	49.76	21.59	56.61
คานประธาน (L=10.08)	47.88	15.28	68.08
คานขวาง(L=3.10)	49.79	34.99	29.72

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบค่า DAF จากมาตรฐาน AREMA กับการตรวจวัดจริงในภาคสนาม สำหรับโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ชิ้นส่วนโครงสร้าง	DAF (%)	DAF (%)	% ความแตกต่าง
	ของ AREMA	สูงสุดจากการตรวจวัด	
คานรองหมอนรถไฟ (L=3.33)	49.76	14.90	70.05
คานประธาน (L=19.98)	41.68	13.49	67.63
คานขวาง (L=2.90)	49.82	8.16	83.62

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบค่า DAF จาก Eurocode กับการตรวจวัดจริงในภาคสนาม

สะพาน	DAF (%)	DAF (%)	% ความแตกต่าง
	ของ Eurocode	สูงสุดจากการตรวจวัด	
1. ใกล้สถานีรังสิต	45.60	34.99	23.26
2. ใกล้สถานีบางบำหรุ	23.58	14.90	36.81

ผลของค่า DAF ที่ตรวจวัดในภาคสนามจะมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานการออกแบบทั้งของ AREMA และ Eurocode โดยที่มาตรฐานของ Eurocode จะมีค่า DAF น้อยกว่าของ AREMA อย่างไม่กี่เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบในประเทศไทย มาตรฐานการออกแบบของ AREMA มีความแตกต่างจากการตรวจวัดจริงในภาคสนามอยู่ในช่วง 30% ถึง 85% และค่า DAF จากการตรวจวัดที่คานขวางจะมีความแตกต่างจากค่าของมาตรฐาน AREMA มากที่สุด

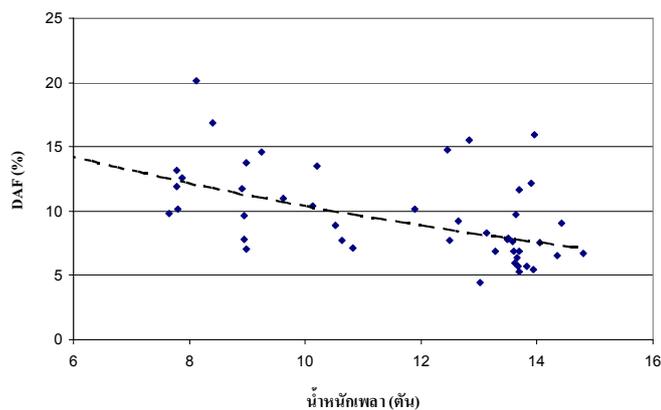
ซึ่งค่า DAF ที่จะนำเสนอคือค่าประมาณทางสถิติสูงสุด (Maximum statistics) โดยการใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบภาคสนาม (Mean) รวมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Standard deviation) แสดงดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่า DAF ที่นำเสนอจากผลการทดสอบในภาคสนาม

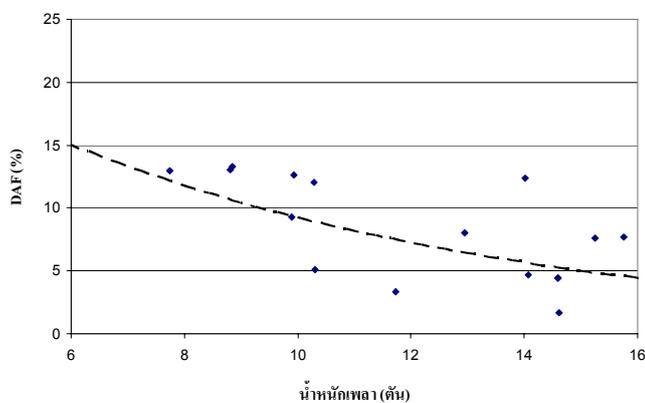
ชิ้นส่วนโครงสร้าง	ประเภทรถไฟ	DAF (%)	
		สะพานใกล้สถานีรังสิต	สะพานใกล้สถานีบางบำหรุ
คานรองหมอน รถไฟ	หัวรถจักร	14.46	10.16
	รถโดยสาร	18.76	13.00
	ดีเซลราง	19.75	15.00
	รถสินค้า	14.01	4.76
คานประธาน	หัวรถจักร	11.85	8.49
	รถโดยสาร	14.97	13.21
	ดีเซลราง	14.38	8.37
	รถสินค้า	9.41	4.82
คานขวาง	หัวรถจักร	20.66	5.73
	รถโดยสาร	31.11	6.64
	ดีเซลราง	32.54	9.10
	รถสินค้า	12.89	4.65

1.5 การแสดงความสัมพันธ์ของค่าคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF กับน้ำหนักเพลา ของรถไฟ แต่ละขบวนขณะข้ามผ่านสะพาน

เมื่อพิจารณาค่า DAF กับน้ำหนักของเพลารถไฟ โดยอาศัยข้อมูลการชั่งน้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) จากการเก็บรวบรวมข้อมูลน้ำหนักเพลาโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักรถไฟแบบพกพา (Portable Train Weighing System) ผลิตโดยบริษัท WEIGHWELL ของประเทศอังกฤษ เครื่องมือดังกล่าวสามารถตรวจชั่งน้ำหนักเพลาได้ ในขณะที่ขบวนรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเครื่องชั่งด้วยความเร็วน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อน้ำหนักเพลามากค่า DAF มีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 94 อย่างไรก็ตามค่าของ DAF ยังมีการกระจายข้อมูลค่อนข้างมาก เนื่องจากผลกระทบของความเร็วของขบวนรถไฟที่แตกต่างกันและจำนวนข้อมูลที่มีจำนวนจำกัด



ก) สะพานไกล์สถานีรถไฟรังสิต

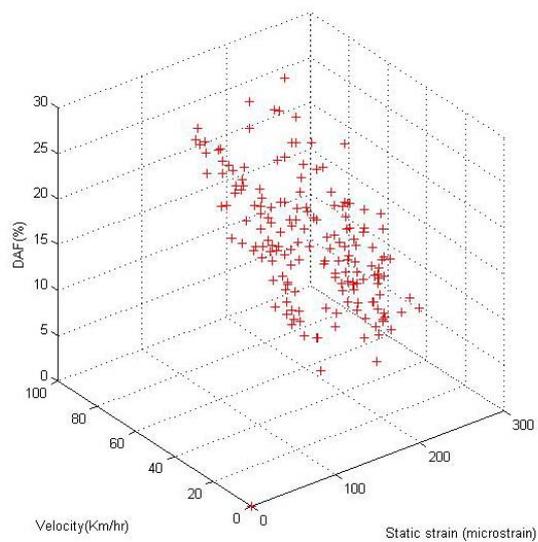


ข) สะพานไกล์สถานีรถไฟบางบำหรุ

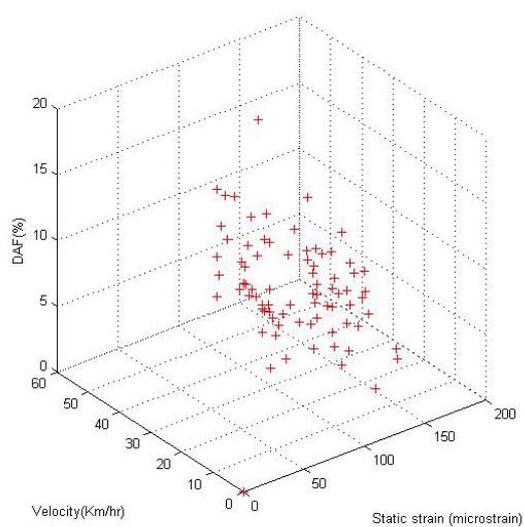
ภาพที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเถ้าและค่า DAF ที่ปีกล่างของคานประชานของสะพานไกล์สถานีรถไฟรังสิตและสถานีรถไฟบางบำหรุ

1.6 การแสดงความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติทางพลวัตหรือค่า DAF กับความเร็ว และความเครียดตึงของสะพาน เมื่อรถไฟแต่ละขบวนขณะข้ามผ่านสะพาน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทั้งความเร็ว และค่าความเครียดตึงของสะพาน กับค่า DAF โดยการแสดงด้วยกราฟ 3 แกน พบว่าเมื่อรถไฟมีความเร็วมากขึ้นและมีน้ำหนักกลุ่มเพลาน้อย ซึ่งเป็นผลให้มีความเครียดตึงน้อย จะทำให้ค่า DAF เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 95



ก) สะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ข) สะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ภาพที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเครียดสถิตของสะพานและค่า DAF ของปีกล่าง
ของคานรองรับมอนรถไฟของทั้งสองสะพาน

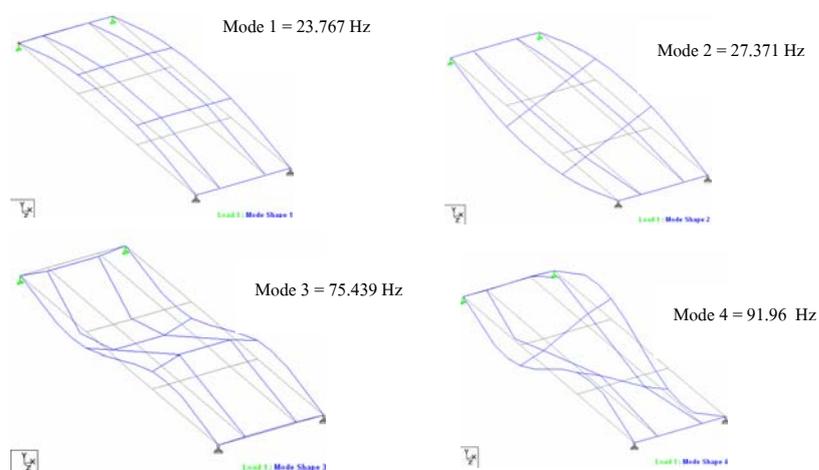
2. การเปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานกับแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

2.1 เงื่อนไขและข้อสมมติฐาน

การทำแบบจำลองโครงสร้างสะพานจะทำโดยวิธี Finite element โดยโปรแกรม STAAD PRO ซึ่งจะใช้ Beam Element ในการจำลองโครงสร้างสะพาน 2 มิติ ซึ่งจะใช้เงื่อนไขและข้อสมมติฐานตามทฤษฎีของ Bernoulli-Euler คือ ระนาบของหน้าตัดโครงสร้างจะยังคงเป็นระนาบเดิมหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปแล้ว และ Plate Element สำหรับการจำลองโครงสร้างสะพานใน 3 มิติ ซึ่งต้องการความถูกต้องในระดับสูง มีความต้องการลักษณะของหน่วยแรงและความเครียดในทิศทางและตำแหน่งต่างๆ ที่ค่อนข้างซับซ้อน Shape function ที่ใช้ในการประมาณค่าภายในของการขจัด (Displacement interpolation) ของ Plate element ที่เลือกใช้มีลักษณะเป็น Linear shape function ในการทำแบบจำลองจะใช้ลักษณะของจตุรกรับแบบ Simply support วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้เป็นแบบเชิงเส้น โดยใช้ทฤษฎี Small displacement และคิพพฤติกรรมของวัสดุเหล็กในช่วงยืดหยุ่น

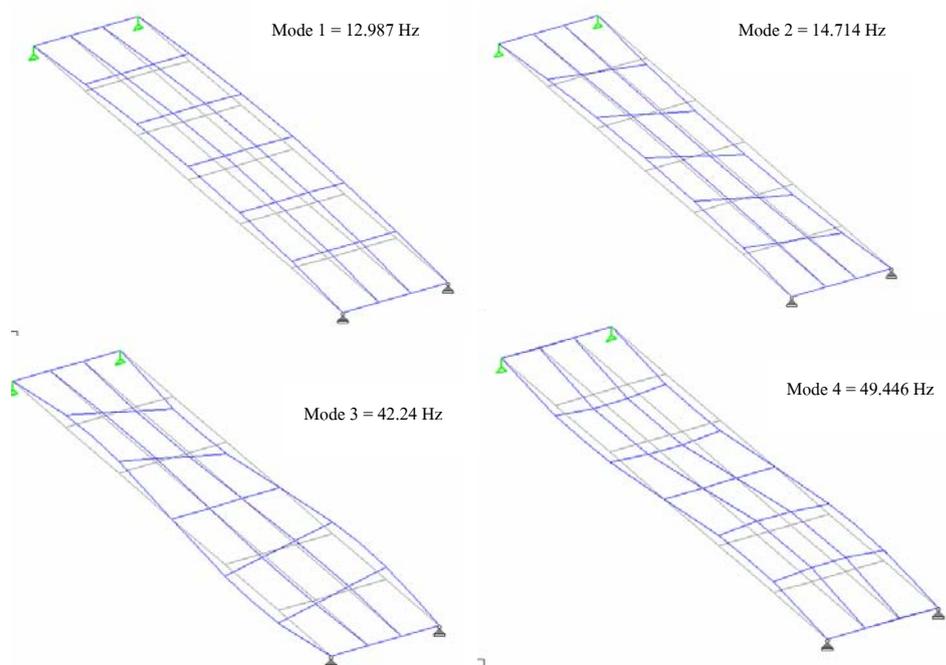
2.2 โหมดการสั่นไหวของการทดสอบในภาคสนามและแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

สำหรับโหมดการสั่นไหวแบบ 2 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต แสดงค่าความถี่การสั่นไหวในแต่ละโหมดได้ดังภาพที่ 96



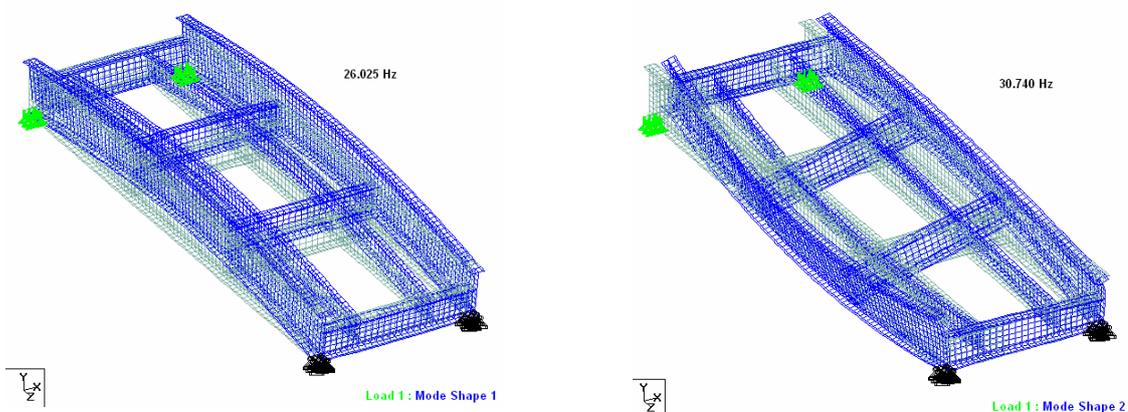
ภาพที่ 96 โหมดการสั่นไหวแบบ 2 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

สำหรับโหมดการสั่นไหวแบบ 2 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ
แสดงค่าความถี่การสั่นไหวในแต่ละโหมดได้ดังภาพที่ 97

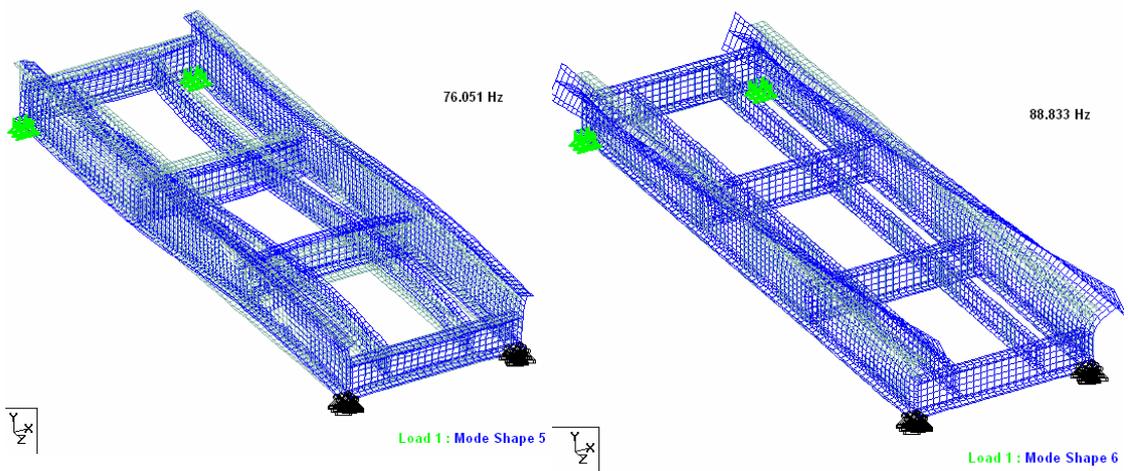
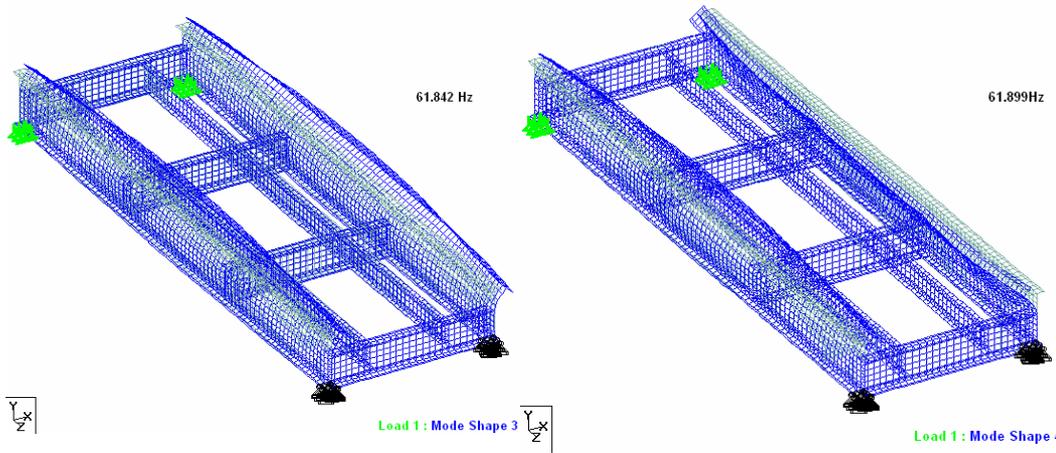


ภาพที่ 97 โหมดการสั่นไหวแบบ 2 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

สำหรับโหมดการสั่นไหวแบบ 3 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต
แสดงค่าความถี่การสั่นไหวในแต่ละโหมดได้ดังภาพที่ 98

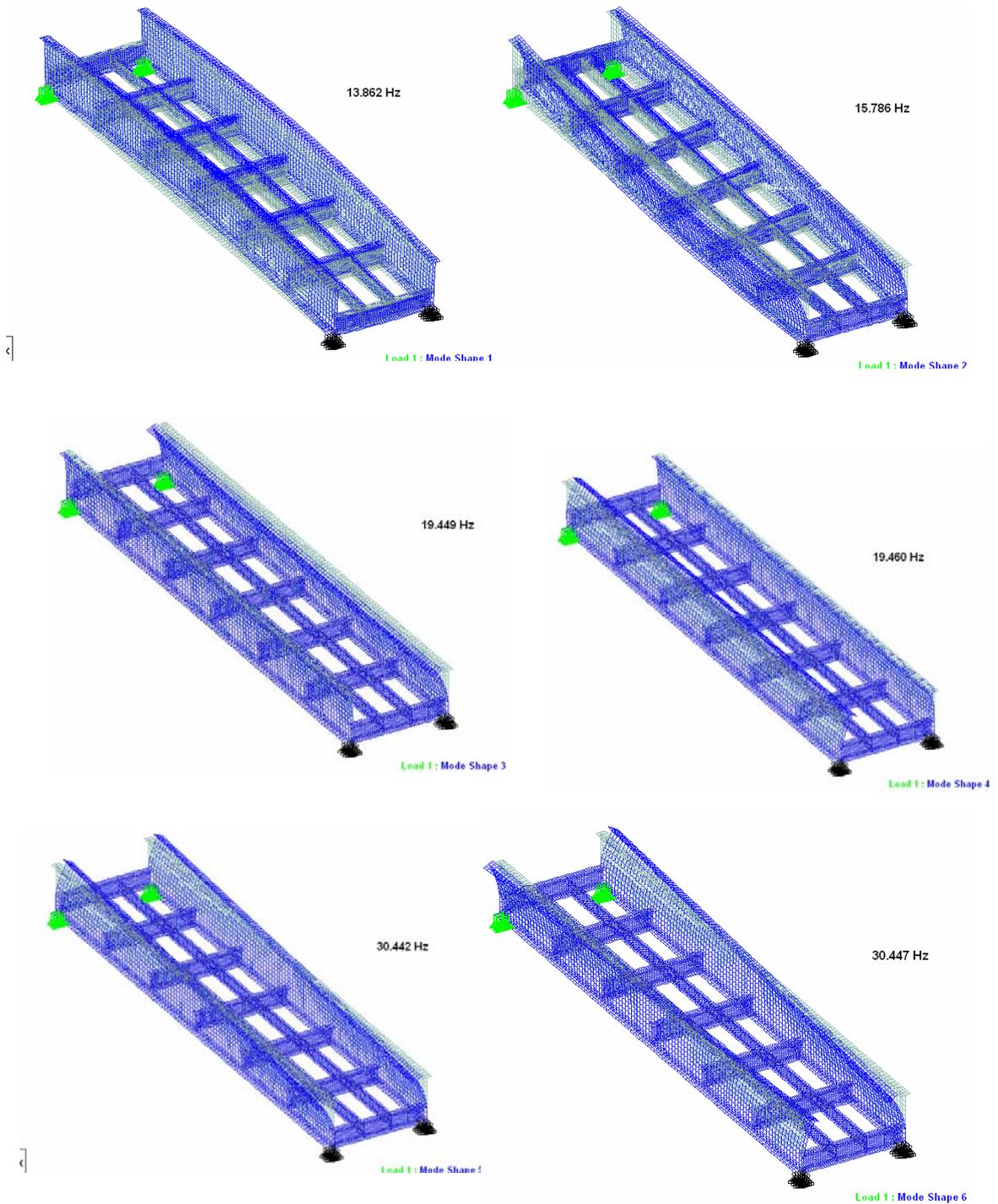


ภาพที่ 98 โหมดการสั่นไหวแบบ 3 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ภาพที่ 98 (ต่อ)

สำหรับโหมดการสั่นไหวแบบ 3 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ
แสดงค่าความถี่การสั่นไหวในแต่ละโหมดได้ดังภาพที่ 99



ภาพที่ 99 โหมดการสั่นไหวแบบ 3 มิติของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ค่าความถี่และคาบของการสั่นไหวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 21 และ 22 ซึ่งเมื่อพิจารณาโหมดการสั่นไหวแรกจะเป็นโหมดการสั่นไหวของความถี่ธรรมชาติของตัวสะพาน เมื่อนำค่าที่ทำการตรวจวัดมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงสร้างสะพานทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ พบว่าแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติจะให้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่า เนื่องแบบจำลอง 3 มิติมีรายละเอียดสูงและตรงกับสภาพความเป็นจริงของตัวสะพานมากกว่าแบบจำลอง 2 มิติ แสดงดังตารางที่ 23 และ 24

ตารางที่ 21 โหมดการสั่นไหวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ

Bridge 2-D model	Mode	Frequency (Hz)	Period (s)
1. โกลัสนานีรังสิต	1	23.767	0.042
	2	27.371	0.036
	3	75.439	0.013
	4	91.96	0.010
2. โกลัสนานีบางบำหรุ	1	12.987	0.077
	2	14.714	0.067
	3	42.24	0.023
	4	49.446	0.020

ตารางที่ 22 โหมดการสั่นไหวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ

Bridge 3-D model	Mode	Frequency (Hz)	Period (s)
1. โกลัสนานีรังสิต	1	26.025	0.038
	2	30.74	0.032
	3	61.842	0.016
	4	61.899	0.016
	5	76.051	0.013
	6	88.833	0.011

ตารางที่ 22 (ต่อ)

Bridge 3-D model	Mode	Frequency (Hz)	Period (s)
2. โกลัสถานีนางบำหรุ	1	13.862	0.072
	2	15.768	0.063
	3	19.449	0.051
	4	19.46	0.051
	5	30.442	0.032
	6	30.447	0.032

ตารางที่ 23 ค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและผลการทดสอบในภาคสนาม

สะพาน	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	แบบจำลอง 2 มิติ	แบบจำลอง 3 มิติ	ทดสอบในภาคสนาม
1. โกลัสถานีรังสิต	23.767	26.025	27.64
2. โกลัสถานีนางบำหรุ	12.987	13.862	14.04

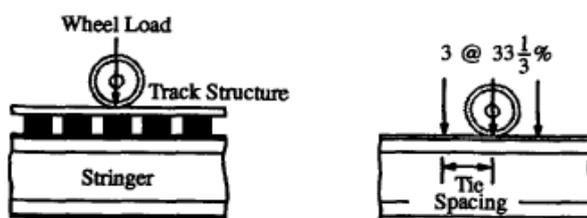
ตารางที่ 24 การเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและผลการทดสอบในภาคสนาม

สะพาน	% ความแตกต่างเมื่อเทียบกับการทดสอบในภาคสนาม	
	แบบจำลอง 2 มิติ	แบบจำลอง 3 มิติ
1. โกลัสถานีรังสิต	14.01 %	5.84 %
2. โกลัสถานีนางบำหรุ	7.50 %	1.26 %

2.3 การจำลองน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

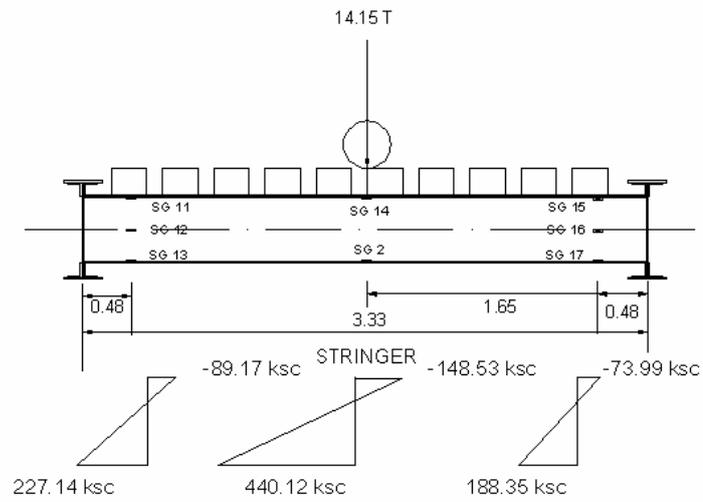
จากการตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม น้ำหนักของขบวนรถไฟจะผ่านไม้หมอนรถไฟก่อนแล้วจึงถ่ายลงคานรองหมอนรถไฟ ซึ่งจะใช้ข้อมูลของกลุ่มประเมินการถ่ายน้ำหนักของเพลารถไฟ (Wheel load distribution) ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การตรวจสอบการแบ่งน้ำหนักของเพลารถไฟถ่ายลงสู่สะพานนั้นจะใช้การแบ่งน้ำหนักตามมาตรฐานของ AREMA โดยจะแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟออกเป็น 3 ส่วนตามระยะของไม้หมอนดังแสดงในภาพที่ 100

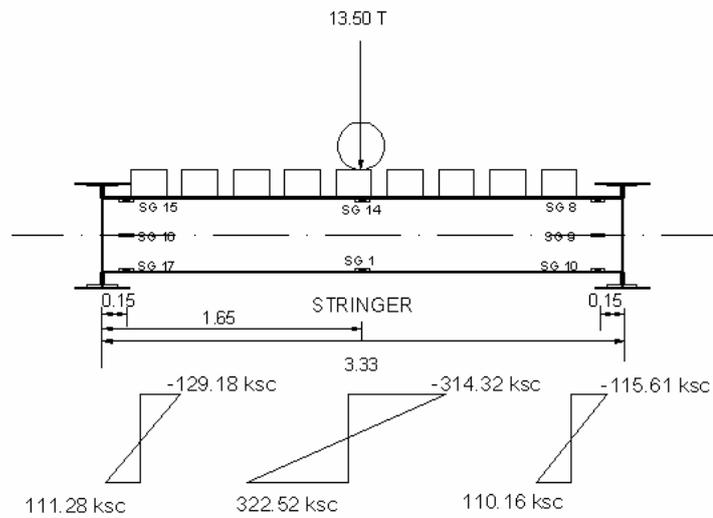


ภาพที่ 100 การแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟตามมาตรฐาน AREMA

จากข้อมูลการทดสอบในภาคสนาม ค่าการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นแสดงได้ในภาพที่ 101 ดังนั้นเพื่อตรวจสอบการแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟของ AREMA จึงทำการเปรียบเทียบการแบ่งน้ำหนักออกเป็น 1 ส่วน, 2 ส่วน และ 3 ส่วน



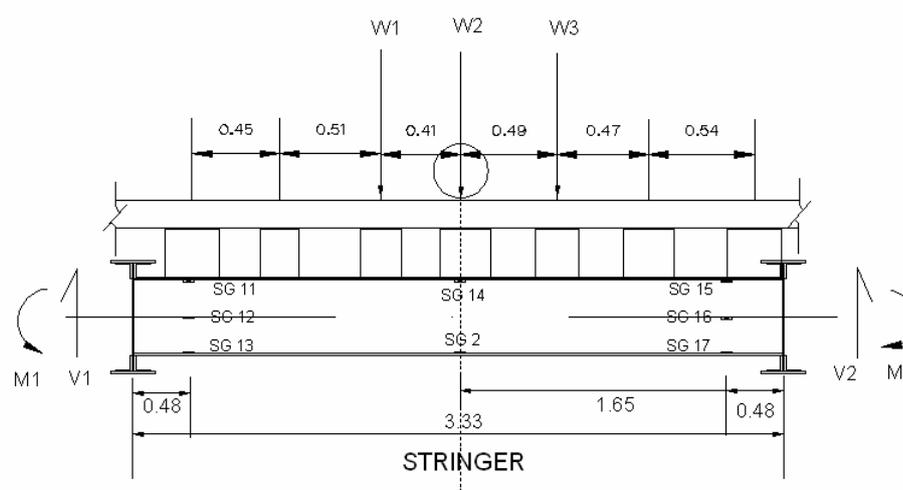
ก) สะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



ข) สะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

ภาพที่ 101 ค่าการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานรองรับมอนรถไฟตัวกลาง

ความสัมพันธ์ของการแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟ กับค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากตรวจวัดในภาคสนาม โดยพิจารณาจากน้ำหนักเพลารถไฟ (W) โมเมนต์ (M) และแรงเฉือน (V) ดังแสดงในภาพที่ 102 และตารางที่ 25 แสดงค่าโมเมนต์ที่เกิดจากการแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟออกเป็น 1 ส่วน, 2 ส่วน และ 3 ส่วน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Finite element เบื้องต้น (2 มิติ) แบบ Rigid connection



ภาพที่ 102 การแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 25 ค่าโมเมนต์ที่เกิดจากการแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟออกเป็น 1 ส่วน, 2 ส่วน และ 3 ส่วน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Finite element

สะพาน	โมเมนต์จากการแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟ-M1 (kg-cm)			
	1 ส่วน	2 ส่วน	3 ส่วน	การทดสอบ
1. โกลีสถานีรังสิต	165360	161221	156518	141778
2. โกลีสถานีบางบำหรุ	137708	133759	129272	123748

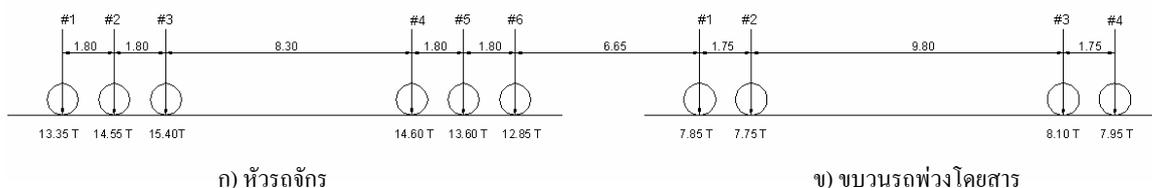
เมื่อตรวจสอบค่าโมเมนต์ที่ได้จากการตรวจวัดมา พบว่าโมเมนต์ที่เกิดจากการแบ่งน้ำหนักเป็น 3 ส่วนจะมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุด จึงเลือกการแบ่งน้ำหนักเพลารถไฟเป็น 3 ส่วน ในการใส่ค่าลงในแบบจำลอง Finite element ของโครงสร้างสะพาน

2.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม

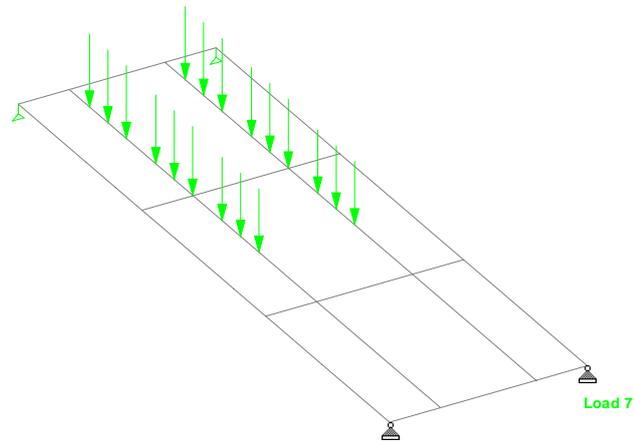
แบบจำลองโครงสร้างสะพานที่จะทำการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบแบบจำลอง 2 มิติกับแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อตรวจสอบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดสอบในภาคสนามเพียงใด โดยที่ช่วงจุดเชื่อมต่อของคานรองรับถนนไฟและคานขวาง สำหรับแบบจำลอง 2 มิติ จะทำการจำลองเป็น Flexible connection และ Rigid connection เพื่อตรวจสอบการตอบสนองของสะพาน ส่วนแบบจำลอง 3 มิติ จะทำการจำลองเป็น Rigid connection ซึ่งในกรณี Flexible connection นั้นมีความยุ่งยากในการจำลองมากจึงไม่ได้ทำการเปรียบเทียบ โดยค่าการวิเคราะห์จะพิจารณาที่ค่าหน่วยแรงสถิต (Static stress) ที่เกิดขึ้นในช่วงที่โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น

1) สะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิต

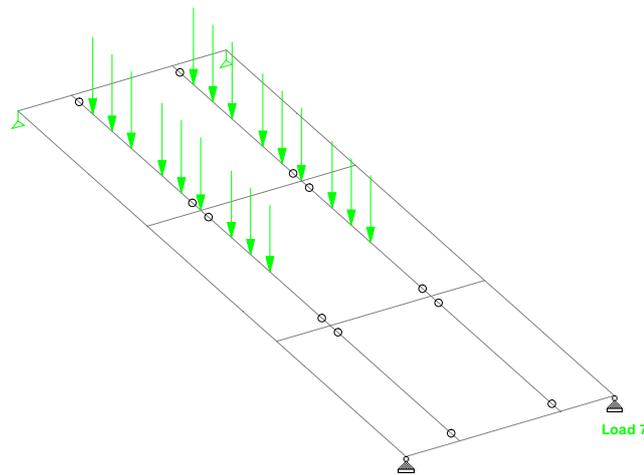
น้ำหนักเพลาน้ำหนักกระทำต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานได้จากข้อมูลการชั่งน้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) ใช้การแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลตามมาตรฐาน AREMA ซึ่งจะทำการแบ่งน้ำหนักเพลเป็น 1/3 หรือ 0.33% เคลื่อนที่ไปบนโครงสร้างสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 103 - 106



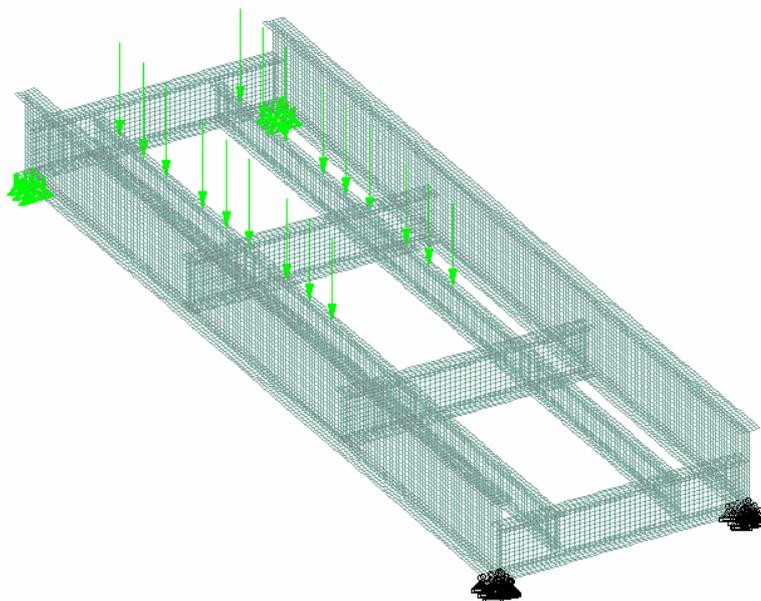
ภาพที่ 103 ตัวอย่างน้ำหนักเพลารถไฟที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานที่ได้จากการชั่งด้วย WIM



ภาพที่ 104 ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลาเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลอง
โครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Rigid connection

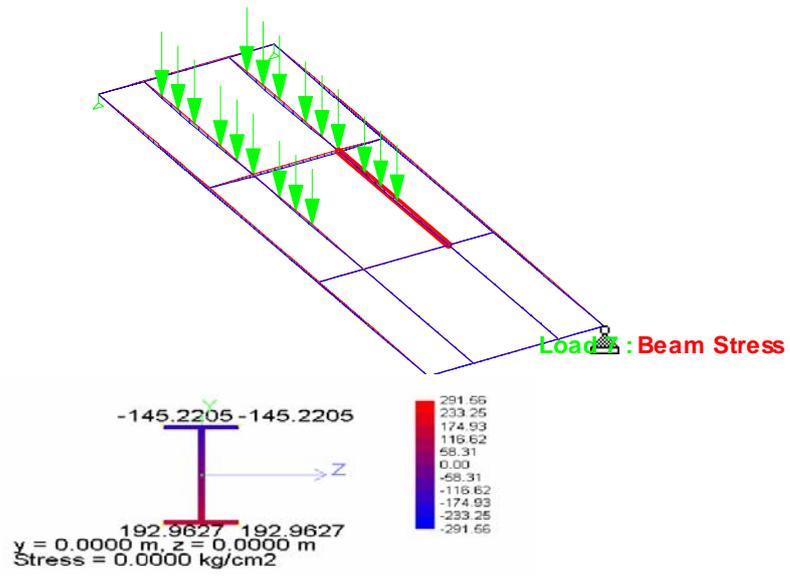


ภาพที่ 105 ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลาเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลอง
โครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Flexible connection

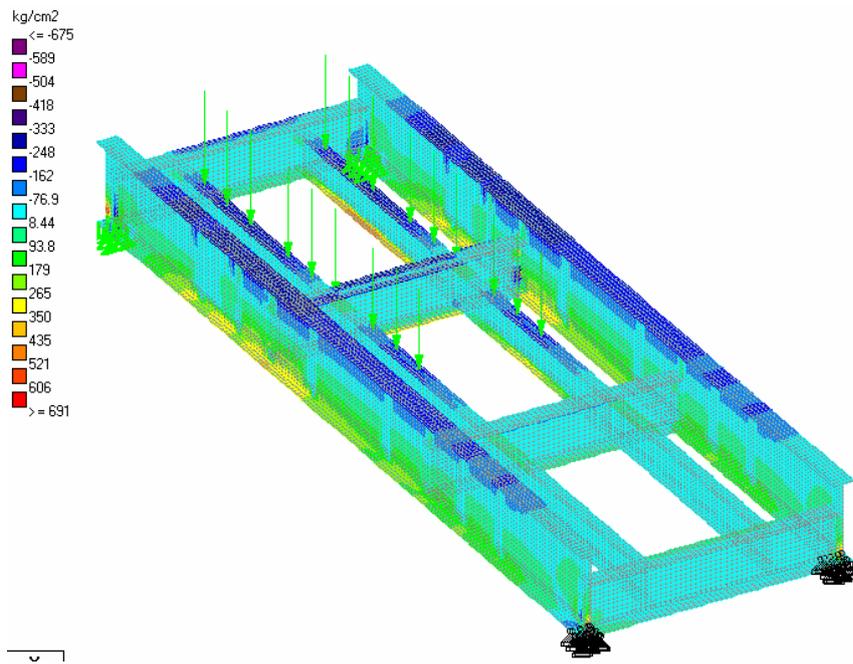


ภาพที่ 106 ตัวอย่างนำนักเพลิงไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลาเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลอง
โครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ แบบ Rigid connection

โดยผลการวิเคราะห์ค่าของหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ จะใช้ผลการวิเคราะห์ของ Beam element ส่วนในแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ จะใช้ผลการวิเคราะห์ของ Plate element แสดงออกมาเป็น Stress contour ซึ่งจะมีรายละเอียดสูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 107 และ 108

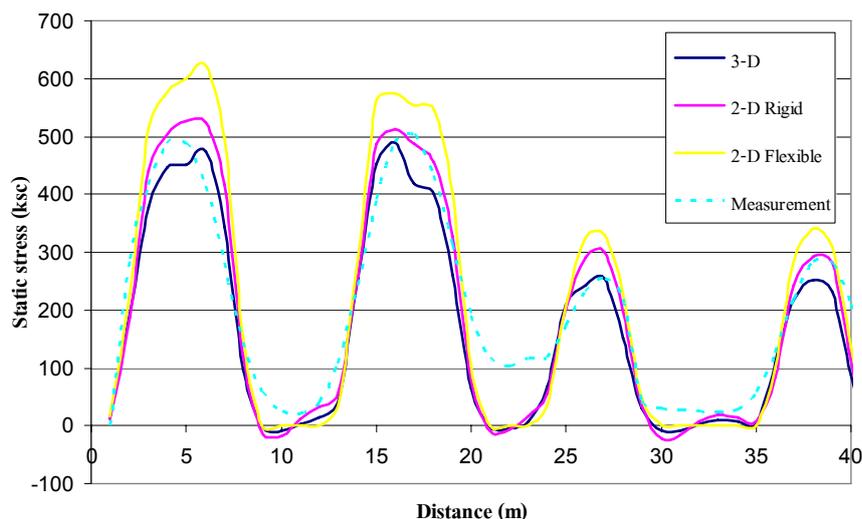


ภาพที่ 107 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Rigid connection

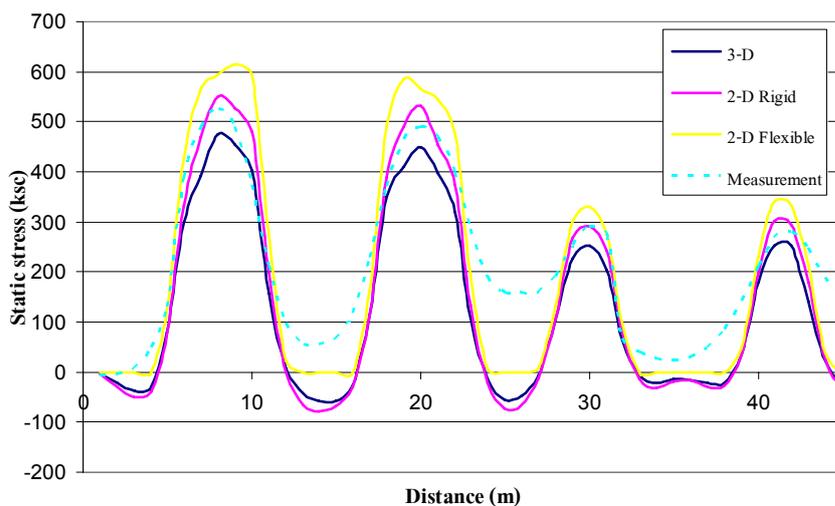


ภาพที่ 108 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ แบบ Rigid connection

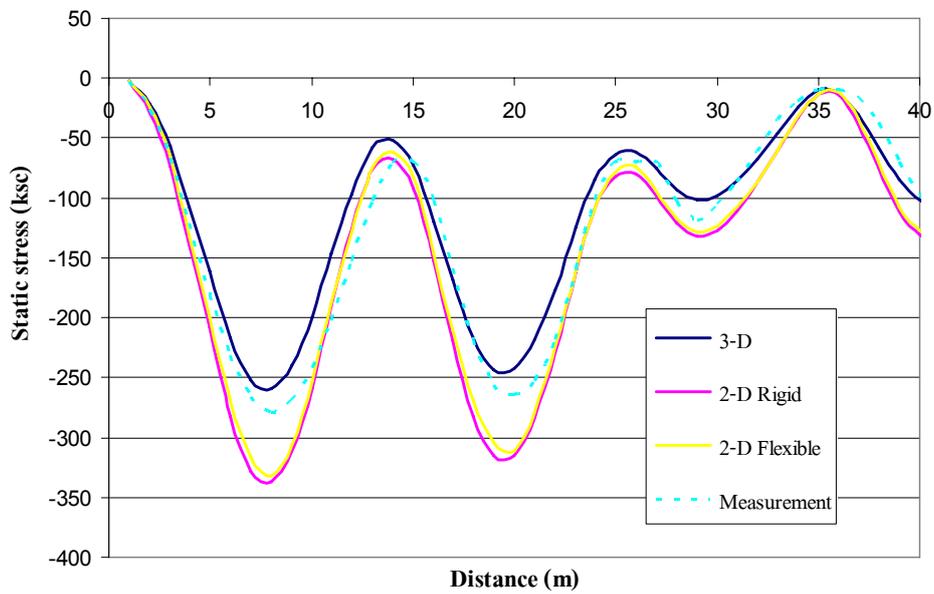
ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรังสิต พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสถิตกับแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ กับการทดสอบในภาคสนาม แล้วแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติมีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดจริง ดังแสดงในภาพที่ 109-115



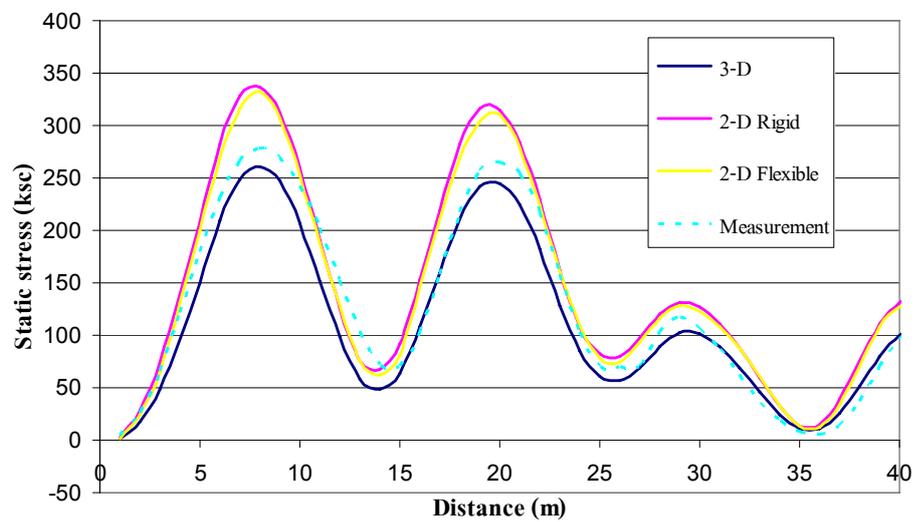
ภาพที่ 109 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคาน
รองหมอนรถไฟตัวริม (Section 1) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต



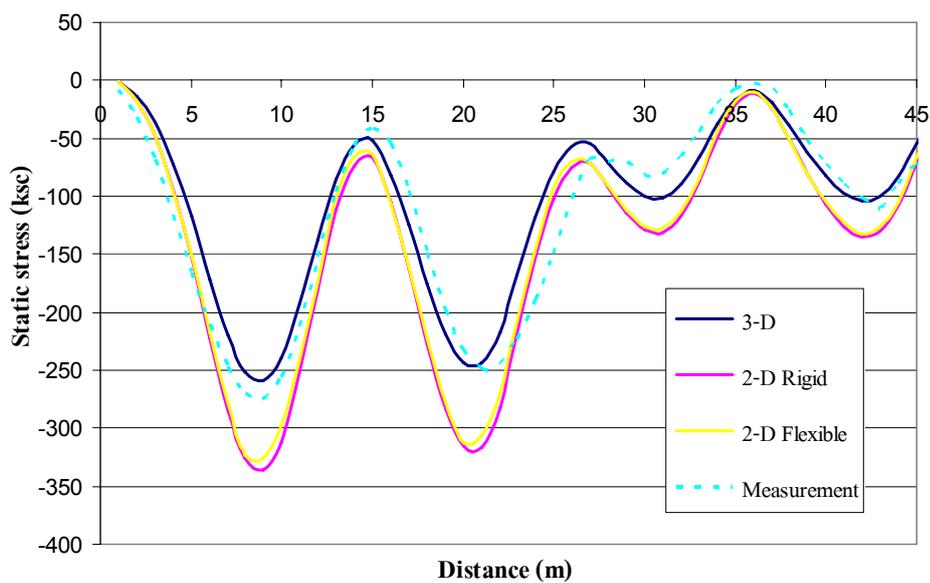
ภาพที่ 110 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคาน
รองหมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต



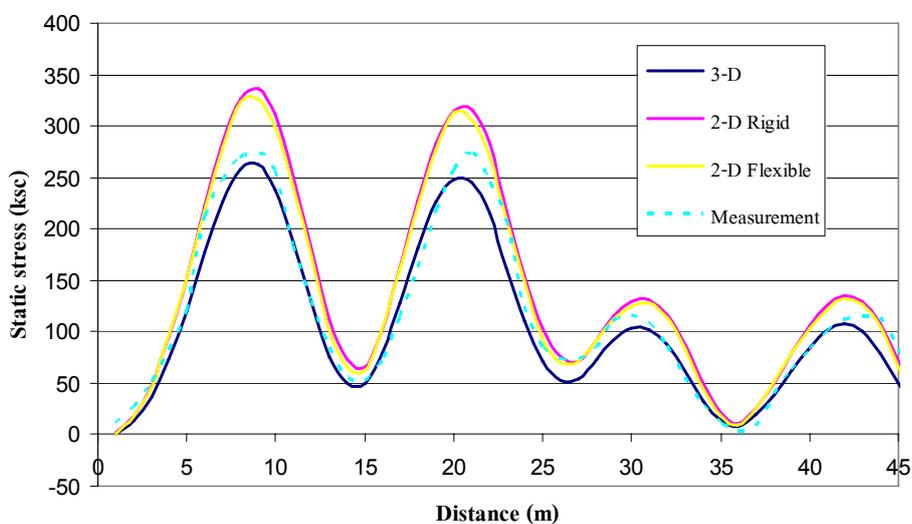
ภาพที่ 111 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของ
คานประชาน (Section 4) ของสะพานไค้สถานี่รังสิต



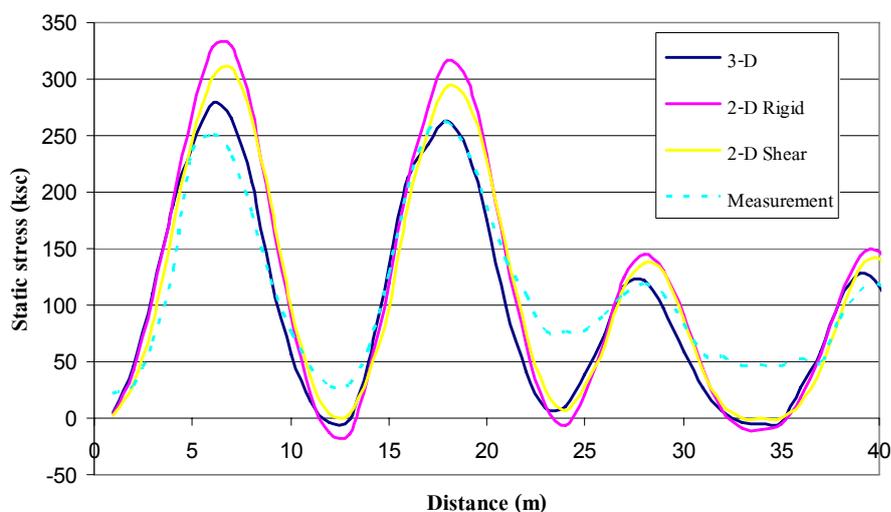
ภาพที่ 112 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของ
คานประชาน (Section 4) ของสะพานไค้สถานี่รังสิต



ภาพที่ 113 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของคานประจัน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต



ภาพที่ 114 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกกลางของคานประจัน (Section 5) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต



ภาพที่ 115 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกกลางของคานขวาง (Section 2) ของสะพานใกล้สถานีรังสิต

จากแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ 3 มิติ และการทดสอบในภาคสนาม จะได้ค่าหน่วยแรงสถิตสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานดังตารางที่ 26 และตารางที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและการทดสอบในภาคสนาม โดยมีความแตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 6 % ในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพาน สำหรับแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ

ตารางที่ 26 ค่าหน่วยแรงสถิตสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานของสะพาน ใกล้สถานีรังสิต

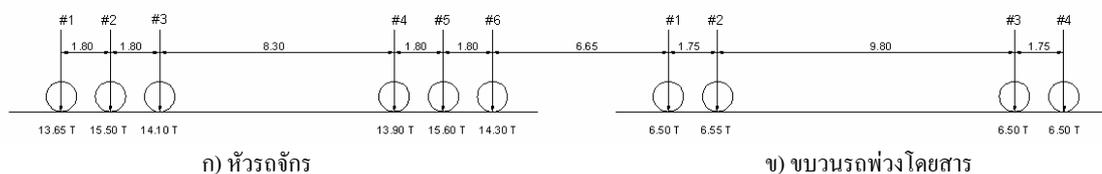
ชั้นส่วนโครงสร้าง สะพาน	หน่วยแรงสถิต (2-D Flexible)	หน่วยแรงสถิต (2-D Rigid)	หน่วยแรงสถิต(3-D)	การทดสอบในภาคสนาม
คานรองหมอนรถไฟ	621.48	525.95	488.84	502.67
คานประธาน	332.18	336.98	261.21	278.19
คานขวาง	309.75	329.57	278.61	264.12

ตารางที่ 27 การเปรียบเทียบหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและทดสอบ
ในภาคสนามของสะพานใกล้สถานีรังสิต

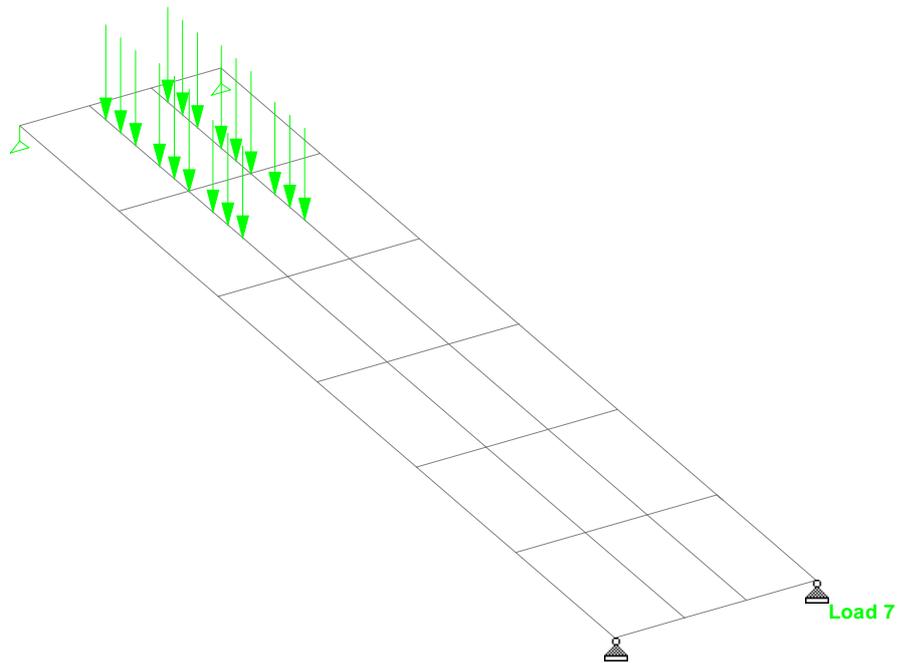
% ความแตกต่าง เทียบกับการทดสอบ	2-D Flexible	2-D Rigid	3-D
คานรองหมอนรถไฟ	23.63	4.63	2.75
คานประธาน	19.40	21.13	6.10
คานขวาง	17.28	24.78	5.49

2) สะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ

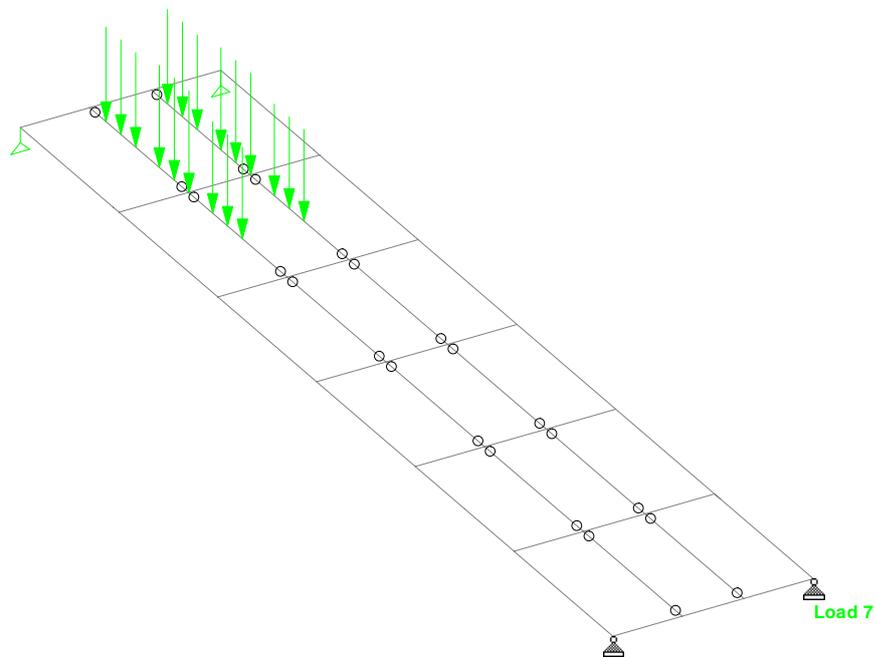
น้ำหนักเพลาที่จะนำมากระทำต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพานได้จากข้อมูลการชั่งน้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) ใช้การแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลา ตามมาตรฐาน AREMA ซึ่งจะทำการแบ่งน้ำหนักเพลาเป็น 1/3 หรือ 0.33% เคลื่อนที่ไปบนโครงสร้างสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 116-119



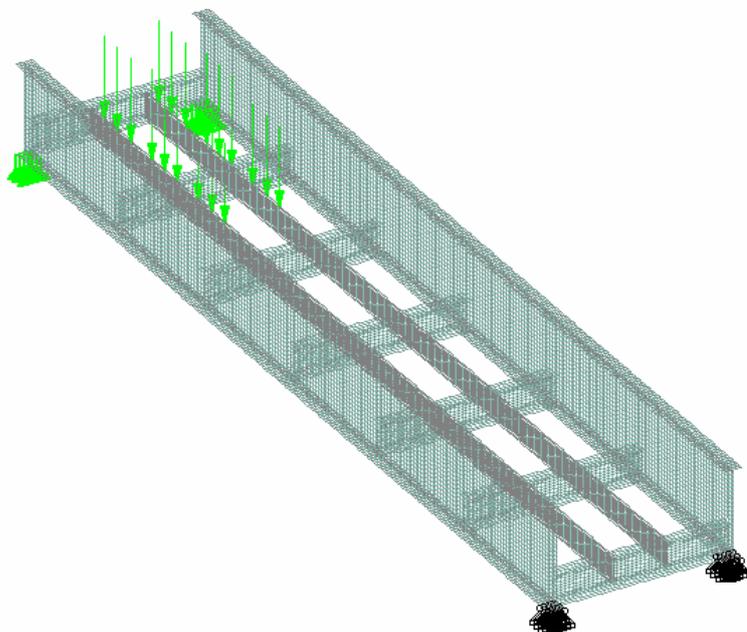
ภาพที่ 116 ตัวอย่างน้ำหนักเพลารถไฟที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานที่ทำการชั่งด้วย WIM



ภาพที่ 117 ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลาเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลอง
โครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Rigid connection

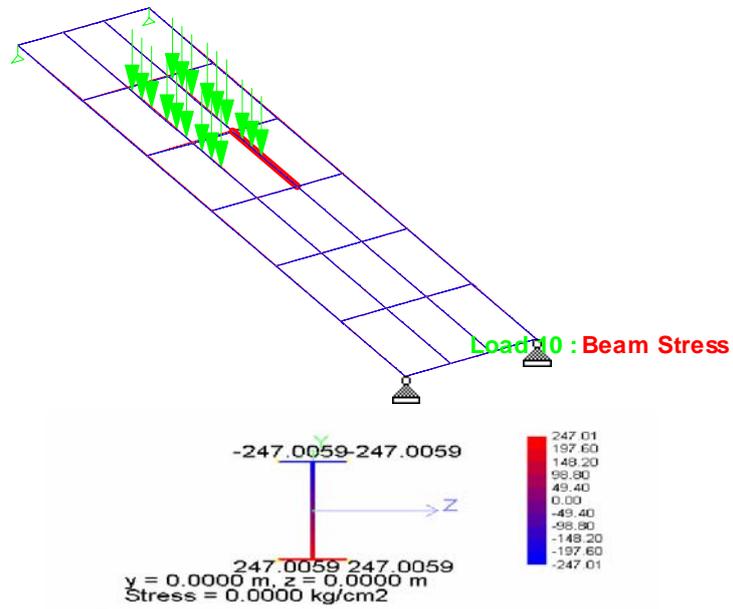


ภาพที่ 118 ตัวอย่างน้ำหนักเพลาารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลาเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลอง
โครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Flexible connection

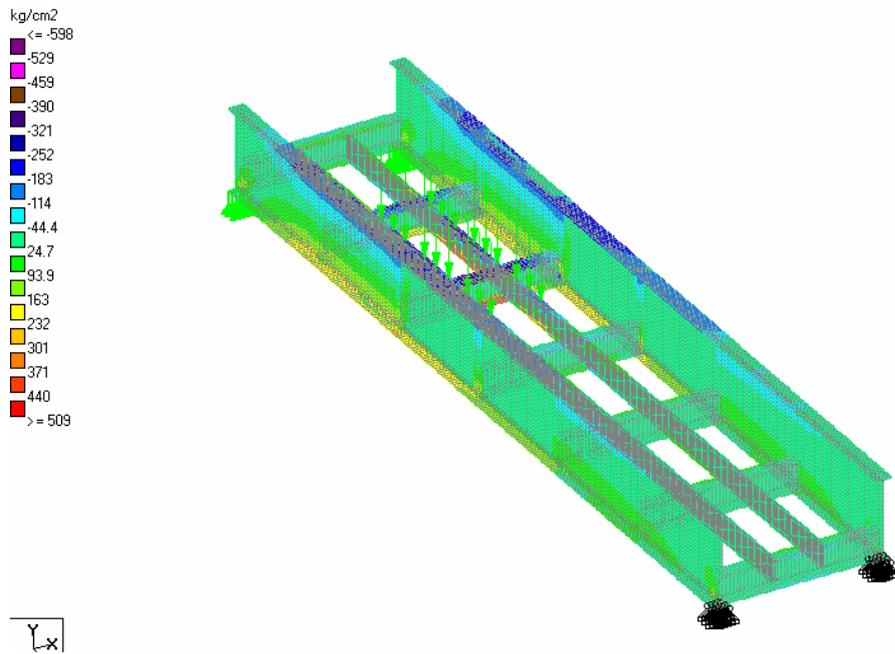


ภาพที่ 119 ตัวอย่างน้ำหนักเพลารถไฟที่ทำการแบ่งน้ำหนักกลุ่มเพลเป็น 3 ส่วนต่อแบบจำลอง
โครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ แบบ Rigid connection

โดยผลการวิเคราะห์ค่าของหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติจะใช้ผลการวิเคราะห์ของ Beam element ส่วนในแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ จะใช้ผลการวิเคราะห์ของ Plate element ซึ่งจะแสดงออกมาเป็น Stress contour ซึ่งจะมีรายละเอียด สูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 120 และ 121

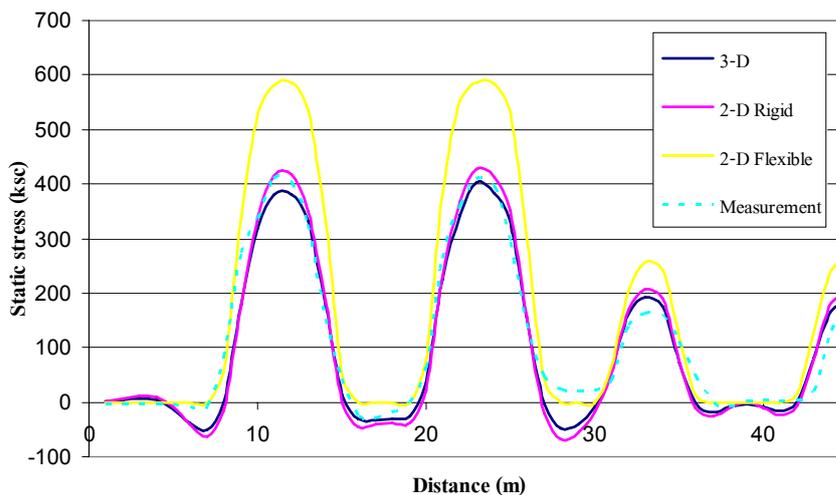


ภาพที่ 120 ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ แบบ Rigid connection

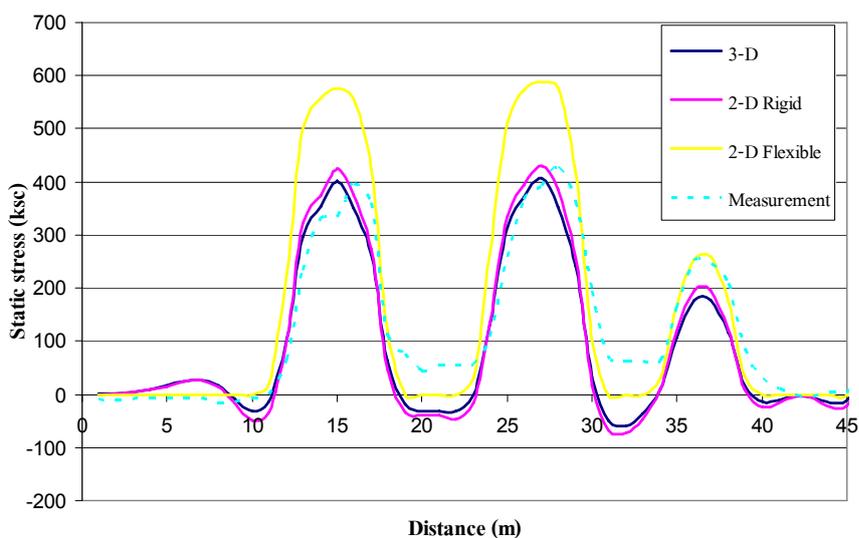


ภาพที่ 121 ค่าหน่วยแรงสถิติของแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ แบบ Rigid connection

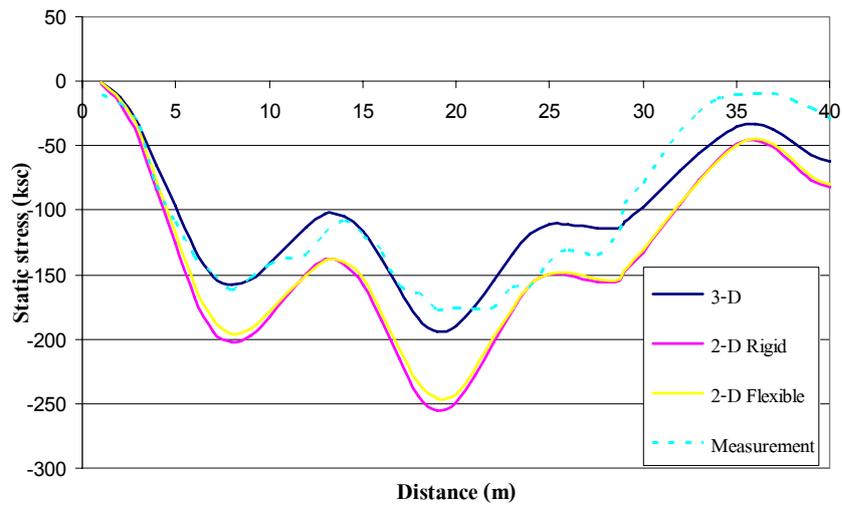
ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสถิตกับแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ กับการตรวจวัดในภาคสนาม แล้วแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติมีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดจริงดังแสดงในภาพที่ 122-128



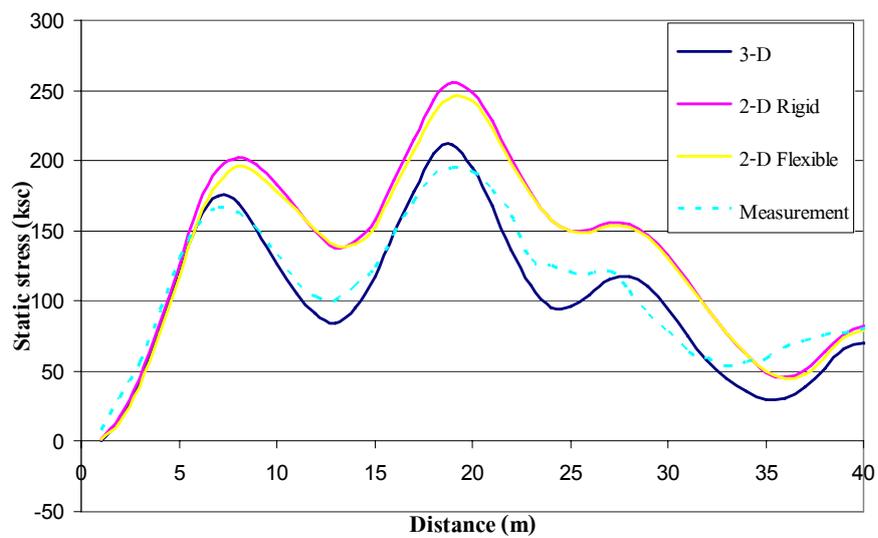
ภาพที่ 122 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานรอง หมอนรถไฟตัวริม (Section 6) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ



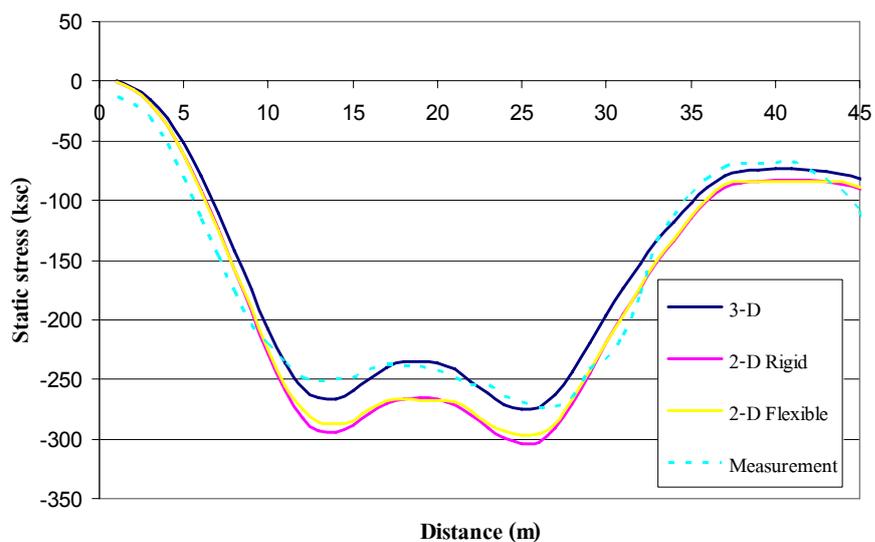
ภาพที่ 123 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของคานรอง หมอนรถไฟตัวกลาง (Section 3) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ



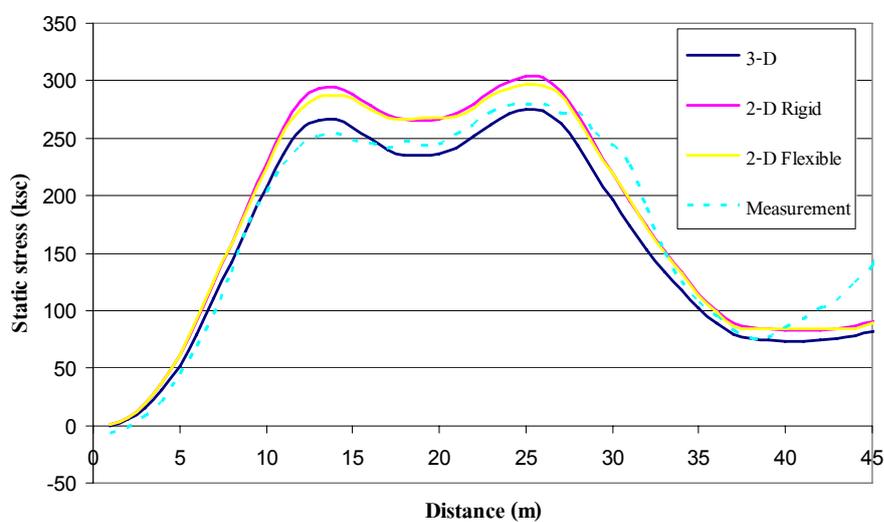
ภาพที่ 124 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของ
คานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ



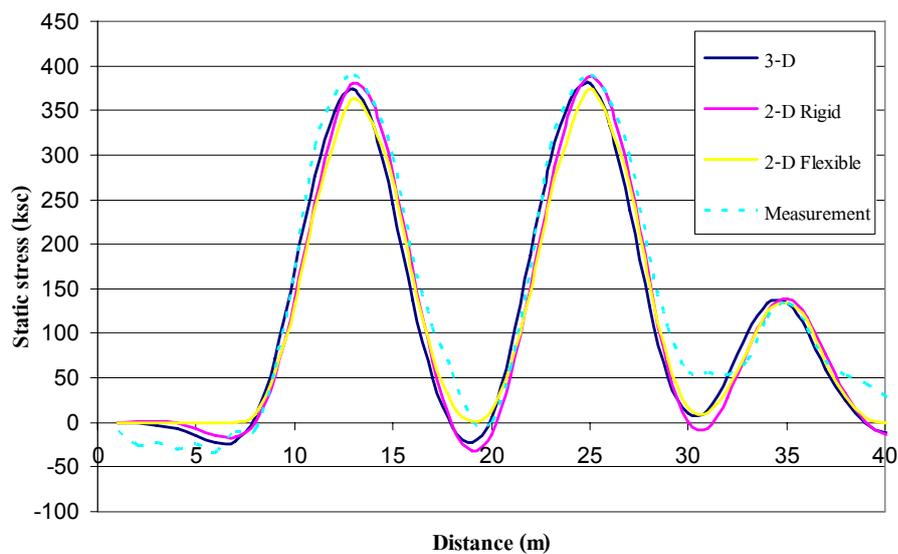
ภาพที่ 125 คำนวณหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกกลางของ
คานประธาน (Section 4) ของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ



ภาพที่ 126 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกบนของ
คานประธาน (Section 5) ของสะพานโกสัถยานีบางบำหรุ



ภาพที่ 127 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกล่างของ
คานประธาน (Section 5) ของสะพานโกสัถยานีบางบำหรุ



ภาพที่ 128 ค่าหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองกับการทดสอบในภาคสนามที่ปีกกลางของคานขวาง (Section 2) ของสะพานโกสัถยานีบางบำหรุ

จากแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 2 มิติ 3 มิติ และการทดสอบในภาคสนาม จะได้ค่าหน่วยแรงสถิตสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานดังตารางที่ 28 และตารางที่ 29 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยแรงสถิตของแบบจำลอง โครงสร้างสะพานและการทดสอบ ในภาคสนาม โดยมีความแตกต่างไม่เกินประมาณ 10 % ในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพาน สำหรับแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ

ตารางที่ 28 ค่าหน่วยแรงสถิตสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานของสะพานใกล้สถานี
บางบำหรุ

ชั้นส่วน โครงสร้าง สะพาน	หน่วยแรงสถิต (2-D Flexible)	หน่วยแรงสถิต (2-D Rigid)	หน่วยแรงสถิต (3-D)	การทดสอบในภาคสนาม
คานรองหมอนรถไฟ	585.10	427.45	402.48	410.12
คานประธาน	245.62	255.16	211.02	195.04
คานขวาง	363.64	379.72	373.75	389.67

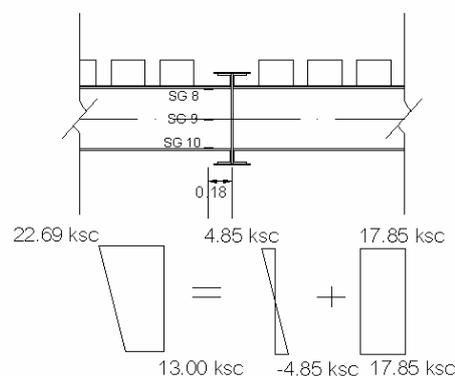
ตารางที่ 29 การเปรียบเทียบหน่วยแรงสถิตของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและทดสอบ
ในภาคสนามของสะพานใกล้สถานีบางบำหรุ

% ความแตกต่าง เทียบกับการทดสอบ	2-D Flexible	2-D Rigid	3-D
คานรองหมอนรถไฟ	42.67	4.23	1.86
คานประธาน	25.93	30.82	8.19
คานขวาง	6.68	2.55	4.08

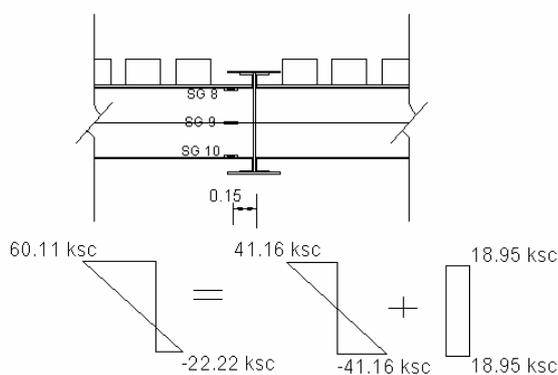
2.5 การเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงที่จุดต่อเชื่อม

ค่าหน่วยแรงที่ได้จากการตรวจวัดของการเชื่อมต่อที่คานรองหมอนรถไฟ (Stringer) กับคานขวาง (Floor Beam) ที่บริเวณปีกบนและปีกล่างของคานรองหมอนรถไฟของสะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิตและสะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ และจากการวิเคราะห์จากแบบจำลอง 3 มิติพิจารณาด้านที่รถไฟเข้าสะพาน ได้ค่าดังตารางที่ 30 และ 31

ภาพที่ 129 แสดงค่าการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่จุดต่อเชื่อมของคานรองหมอนรถไฟ (Stringer) กับ คานขวาง (Floor Beam) ที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม



ก) สะพานใกลีสถาณิรตไฟริงสิต



ข) สะพานใกลีสถาณิรตไฟบงบ้ำหรุ

ภาพที่ 129 ค่าการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่จุดต่อเชื่อมของคานรองหมอนรถไฟ (Stringer) กับ คานขวาง (Floor Beam)

ตารางที่ 30 ค่าหน่วยแรงที่จุดเชื่อมต่อของสะพานรถไฟใกลีสถาณิริงสิต

Stringer	Measurement (ksc)	Analysis (ksc)
top	22.69	32.35
bottom	13.00	6.75
axial	17.85	19.55
Moment	$M_p = 5236.93 \text{ kg-cm}$	$M_f = 12789.63 \text{ kg-cm}$

ตารางที่ 31 ค่าหน่วยแรงที่จุดเชื่อมต่อของสะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ

Stringer	Measurement (ksc)	Analysis (ksc)
top	60.11	116.19
bottom	-22.22	-93.08
axial	18.95	11.55
Moment	Mp = 44494.94 kg -cm	Mf = 104509.43 kg -cm

จะสามารถหาดีกรีความต่อเนื่อง (Degree of continuity , α) จากสมการที่ 25 ได้ เมื่อไม่นำผลของแรงตามแนวแกนมาคิดจะได้ค่า $\alpha = 0.38$ และ $\alpha = 0.40$ สำหรับสะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิต และสถานีบางบำหรุ ตามลำดับ ดังนั้นจุดเชื่อมต่อของคานรองหมอนรถไฟกับคานขวางเปรียบเสมือนรอยต่อแบบ Semi-rigid เนื่องจากอยู่ในช่วง 0.2-0.7 จากการจัดประเภทของ Bjorhovde

3. การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพาน

3.1 การเปรียบเทียบค่า DAF กับ การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์

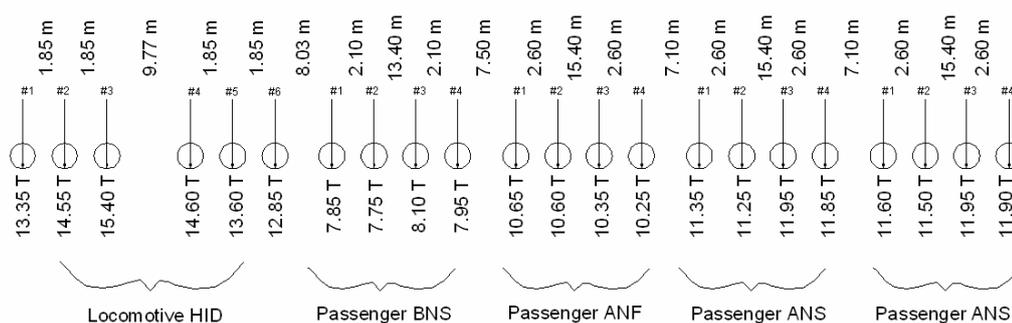
ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อขนาดของค่า DAF เมื่อทำการทดสอบในภาคสนาม คือ ความเร็วของรถไฟ น้ำหนักเพลา และความหน่วงของโครงสร้างสะพาน ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ที่มีผลต่อค่า DAF ได้จากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ 2 รูปแบบ คือ การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) และ การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction)

วิธีการวิเคราะห์จะใช้วิธี Time numerical integration ในสมการทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง โดยการใช้วิธีของ Newmark's method (ใช้ค่า $\gamma = 0.5$ และ $\beta = 0.25$) เพื่อใช้ในการสมมติการอินทิเกรตของแบบจำลองทางพลศาสตร์ คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน คุณสมบัติทั่วไปของขบวนรถไฟ และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท แสดงในตารางผนวกที่ ข1 - ข3

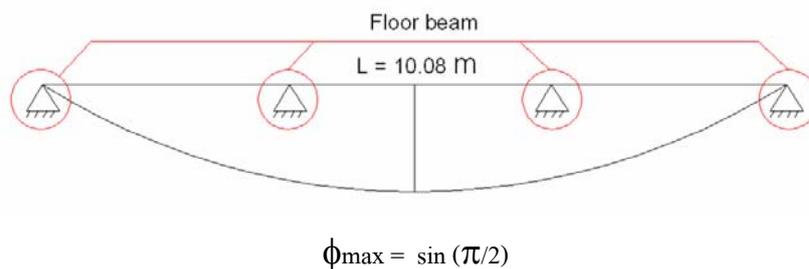
ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) นั้น จะใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานเท่านั้น ขณะที่การวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) จะใช้ทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ ในสมการทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง

1) สะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิต

ตัวอย่างน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธี Numerical และพฤติกรรมตอบสนองจริงของโครงสร้างสะพานจะใช้ข้อมูลการชั่งน้ำหนักขบวนรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) จากข้อมูลการชั่งน้ำหนักขบวนรถไฟจำนวน 5 โบกี้ (รวมหัวรถจักร) ดังแสดงในภาพที่ 130 โดยจะพิจารณาเมื่อขบวนรถไฟเคลื่อนที่ด้วยช่วงความเร็วแตกต่างกัน โดยใช้ช่วงความเร็วที่ได้จากการเก็บข้อมูล คือ 40 - 100 กม./ชม. และ อัตราส่วนความหน่วงของสะพานต่างกัน ตั้งแต่ 0% - 5% ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวสะพาน ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการประเมินคือ คานรองหมอนรถไฟ (Stringer) เนื่องจากรับน้ำหนักของขบวนรถไฟโดยตรง และพิจารณาเฉพาะโหมดการสั่นไหวแรกนั้นคือ Shape function $\phi_n(x) = \sin(n\pi x/L) = \sin(\pi x/L)$ เนื่องจากมีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพานมากที่สุดดังแสดงในภาพที่ 131 เมื่อ n มีค่าเท่ากับ 1

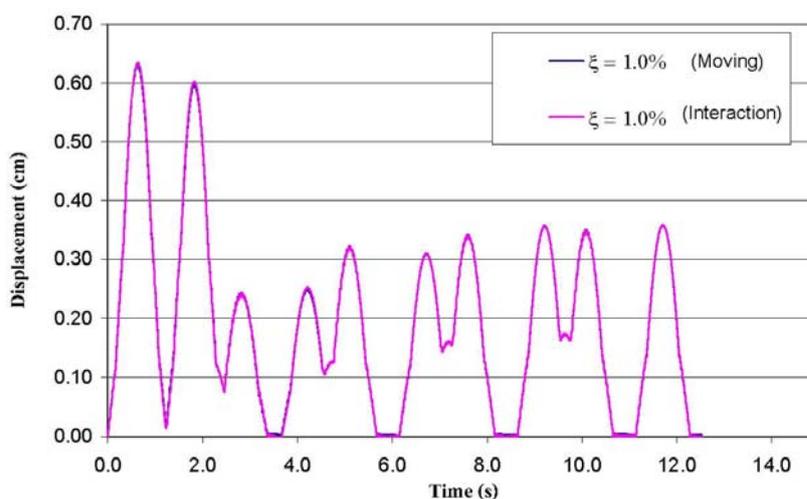


ภาพที่ 130 แสดงตัวอย่างข้อมูลการชั่งน้ำหนักขบวนรถไฟจำนวน 5 โบกี้ (รวมหัวรถจักร)

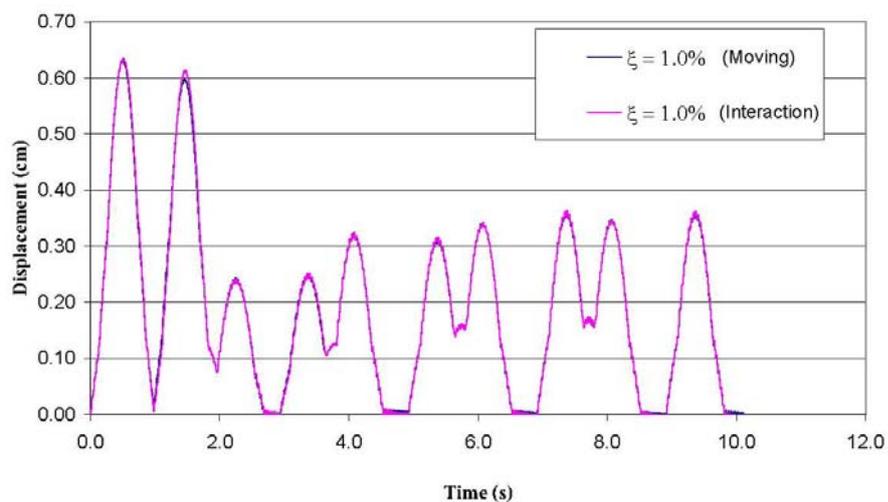


ภาพที่ 131 แสดงโหมดการสั่นไหวแรกของโครงสร้างสะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิต

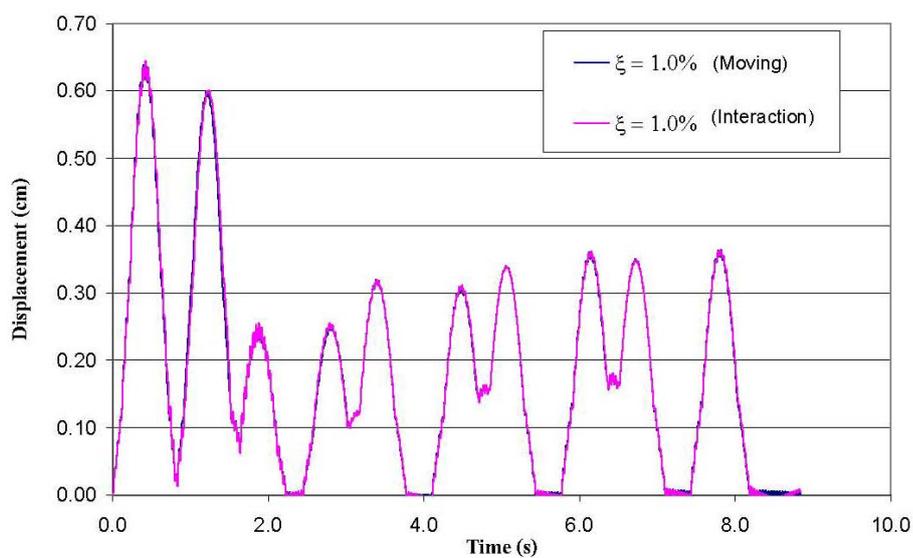
สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน จะวิเคราะห์ใน 2 ลักษณะคือการใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) และการรวมความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) ดังภาพที่ 132-138 แสดงค่าการตอบสนองของโครงสร้างสะพาน เมื่อขบวนรถไฟมีความเร็ว 40 – 100 กม./ชม. และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพานมีค่าเท่ากับ 1.0 %



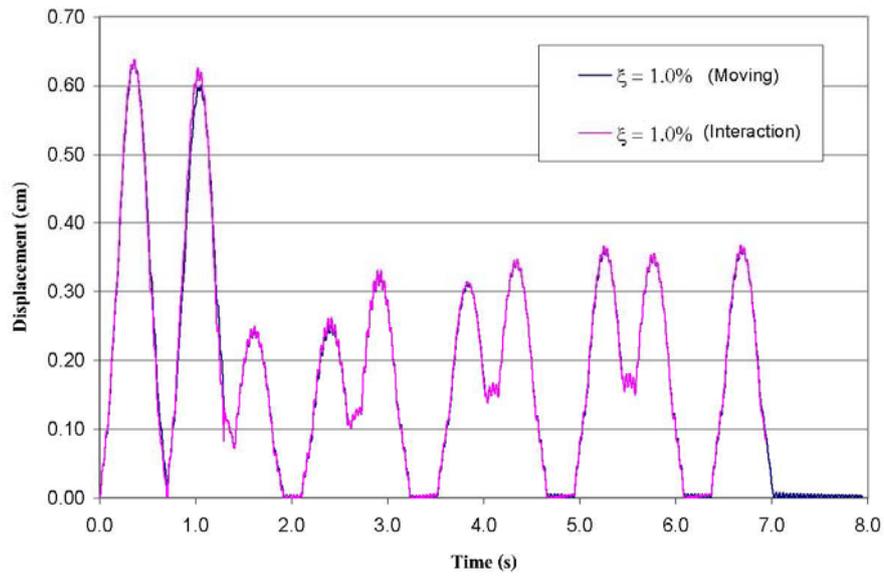
ภาพที่ 132 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 40 กม./ชม.



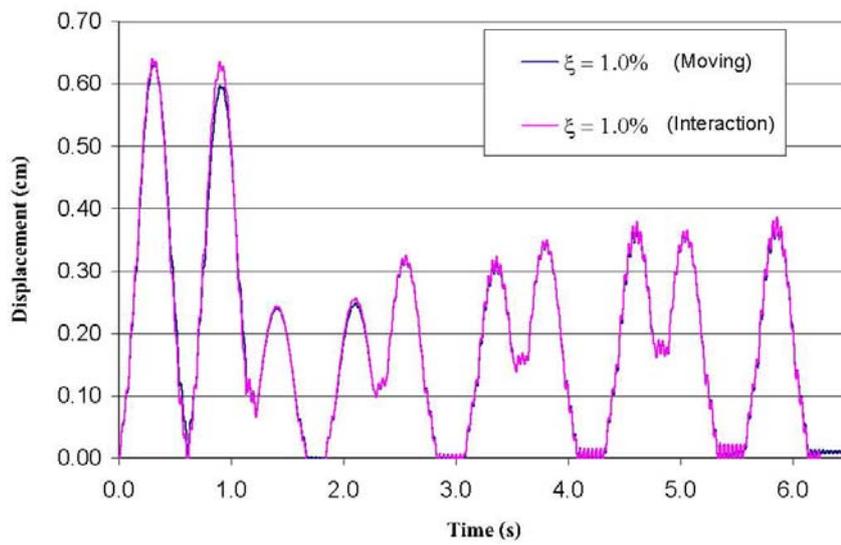
ภาพที่ 133 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 50 กม./ชม.



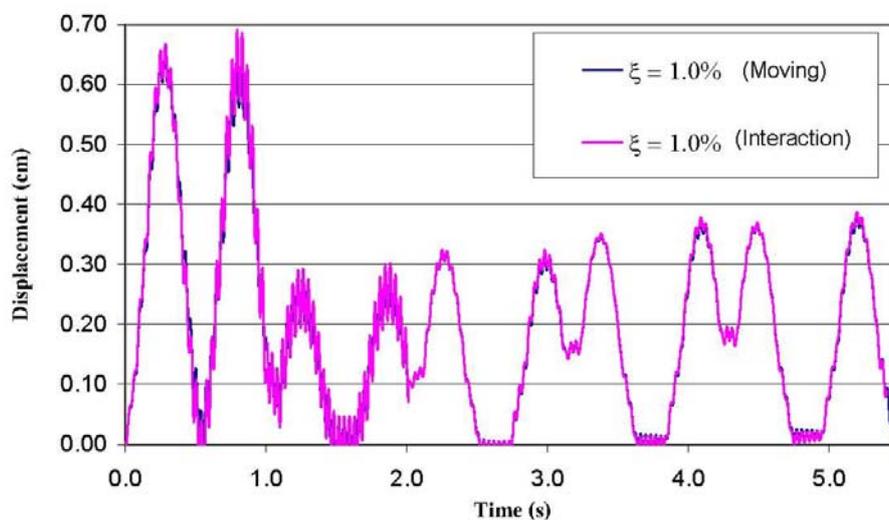
ภาพที่ 134 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 60 กม./ชม.



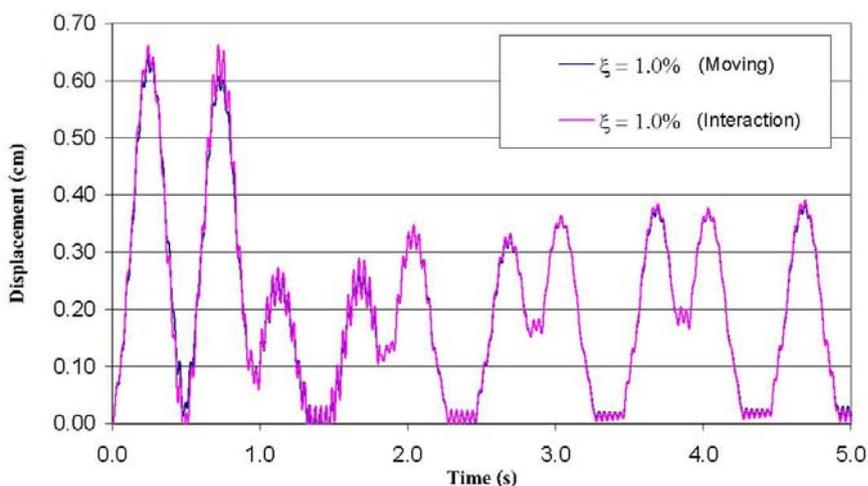
ภาพที่ 135 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 70 กม./ชม.



ภาพที่ 136 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 80 กม./ชม.

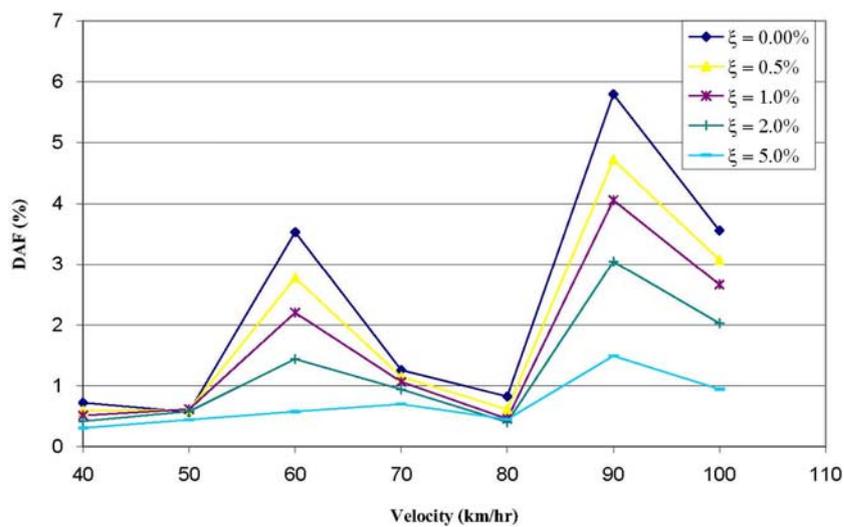


ภาพที่ 137 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 90 กม./ชม.

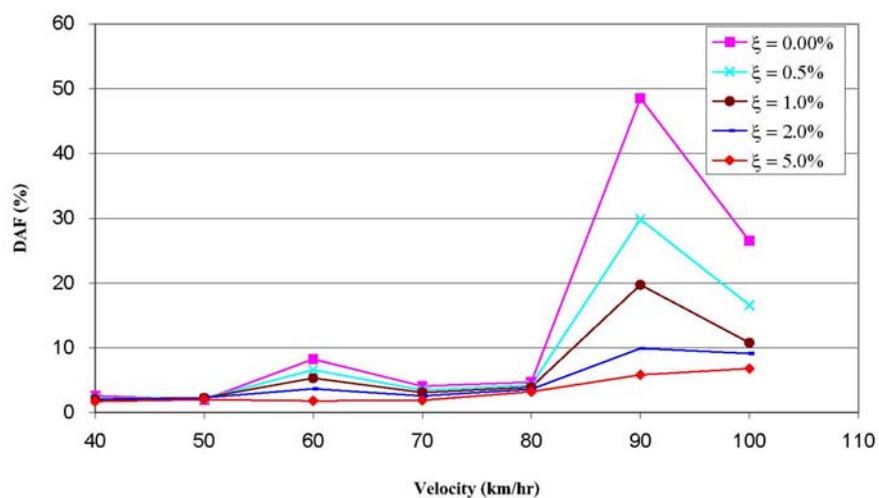


ภาพที่ 138 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 100 กม./ชม.

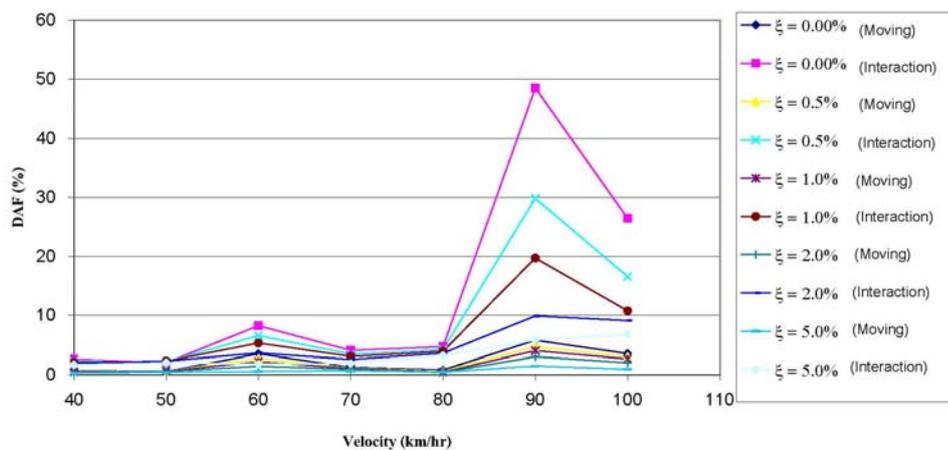
เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า DAF และความเร็วพบว่า การวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน คือการใช้น้ำหนักบรรทุกที่เคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) จะให้ค่าที่น้อยกว่า การวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) เมื่อหัวรถจักรข้ามผ่านสะพานแสดงได้ดังภาพที่ 139 – 141



ภาพที่ 139 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (Moving loads) ของหัวรถจักร



ภาพที่ 140 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพาน และขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร



ภาพที่ 141 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (Moving loads) และความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร

จากผลการวิเคราะห์แสดงอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพานจะมีผลต่อค่า DAF ค่อนข้างสูงโดยค่าอัตราส่วนความหน่วงที่สูงจะให้ค่า DAF ที่ต่ำ และในช่วงความเร็ว 60 และ 90 กม./ชม. จะเกิดการตอบสนองที่สูงขึ้นเนื่องจากการที่ความเร็วของขบวนรถไฟทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) กับตัวสะพาน โดยการตอบสนองของหัวรถจักรส่งผลกระทบต่อขบวนพ่วงโดยสารขบวนแรกที่มาทางด้านหลังด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบในภาคสนามที่ความเร็วประมาณ 60 กม./ชม. และอัตราความหน่วงของตัวสะพาน 1.0 % ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะได้ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 การเปรียบเทียบ DAF จากการทดสอบในภาคสนามและการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานโกสัถยานีรถไฟรังสิต

ประเภทรถไฟ	DAF จากการทดสอบ	DAF จากการวิเคราะห์	
		Moving load	Interaction
หัวรถจักร	8.32 %	2.20 %	7.38 %
ขบวนพ่วงโดยสาร	11.50 %	3.36 %	9.25 %

จะเห็นว่าค่า DAF จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) มีค่าใกล้เคียงกับผลกับการทดสอบในภาคสนามมากกว่าการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving loads)

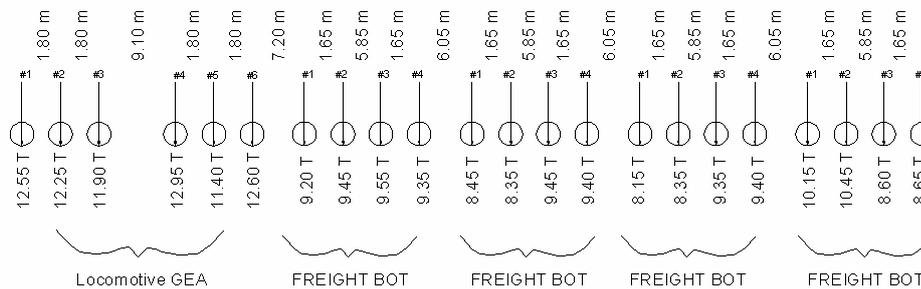
เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ตำแหน่งคานรองหมอนรถไฟตัวริม (End stringer) พบว่าค่า DAF ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) มีค่ามากกว่าจากการทดสอบในภาคสนามค่อนข้างมาก ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีแนวโน้มที่จะให้ค่า DAF มากกว่าความเป็นจริง (Overestimate) ดังแสดงในตารางที่ 33

ตารางที่ 33 การเปรียบเทียบ DAF ที่กึ่งกลางสะพานและด้านริมสะพานขณะหัวรถจักรข้ามสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต

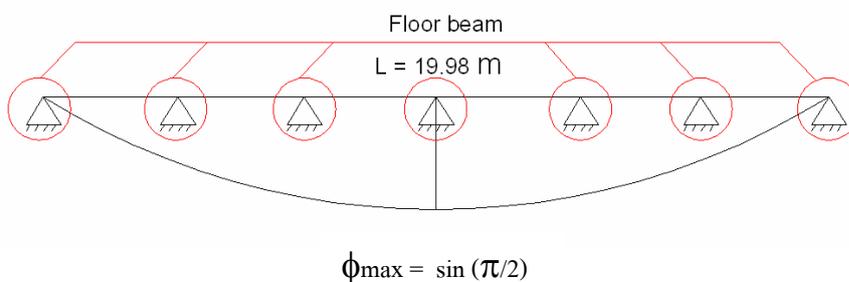
ตำแหน่ง	DAF จากการทดสอบ	DAF จากการวิเคราะห์	% ความแตกต่าง
กึ่งกลางสะพาน (L/2)	8.32 %	7.38 %	11.29 %
ด้านริมสะพาน (L/4)	10.57 %	14.76 %	39.64 %

2) สะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ

ตัวอย่างน้ำหนักเพลาน้ำหนักเคลื่อนที่จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธี Numerical และพฤติกรรมตอบสนองจริงของโครงสร้างสะพานจะใช้ข้อมูลการชั่งน้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) จากข้อมูลการชั่งน้ำหนักขบวนรถไฟจำนวน 5 โบกี้ (รวมหัวรถจักร) ดังแสดงในภาพที่ 142 โดยจะพิจารณาเมื่อขบวนรถไฟเคลื่อนที่ด้วยช่วงความเร็วแตกต่างกัน โดยใช้ช่วงความเร็วที่ได้จากการเก็บข้อมูล คือ 20 – 60 กม./ชม. และ อัตราส่วนความหน่วงของสะพานต่างกัน ตั้งแต่ 0% - 5% ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวสะพาน ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการประเมินคือ คานรองหมอนรถไฟ (Stringer) เนื่องจากรับน้ำหนักของขบวนรถไฟโดยตรง และพิจารณาเฉพาะโหมดการสั่นไหวแรกนั่นคือ Shape function $\phi_n(x) = \sin(n\pi x/L) = \sin(\pi x/L)$ เนื่องจากมีอิทธิพลต่อโครงสร้างสะพานมากที่สุดดังแสดงในภาพที่ 143 เมื่อ n มีค่าเท่ากับ 1

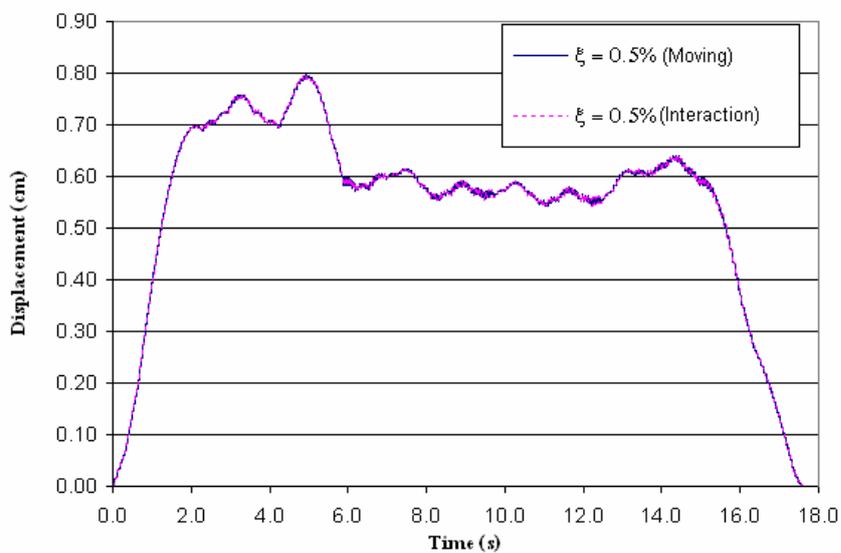


ภาพที่ 142 ตัวอย่างข้อมูลการชั่งน้ำหนักขบวนรถไฟจำนวน 5 โบกี้ (รวมหัวรถจักร)

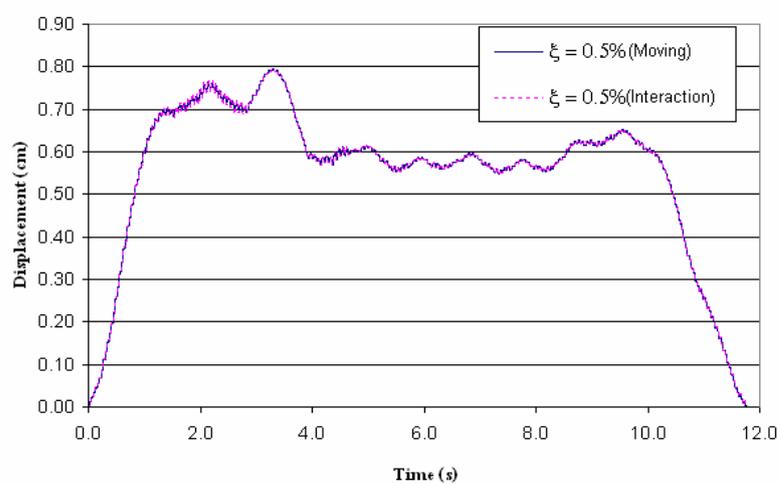


ภาพที่ 143 โหมดการสั่นไหวแรกของโครงสร้างสะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ

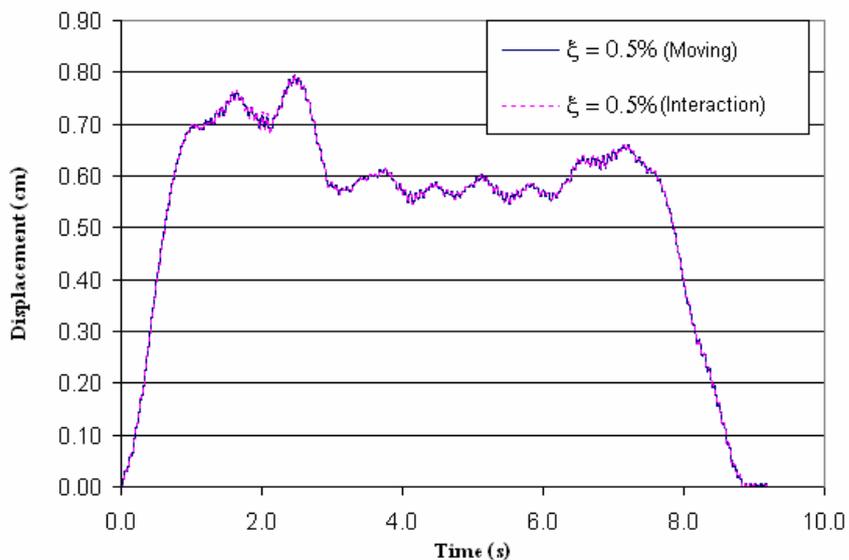
สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน คือการใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) และความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) ดังภาพที่ 144-148 แสดงค่าการตอบสนองของโครงสร้างสะพานเมื่อขบวนรถไฟมีความเร็ว 20 – 60 กม./ชม. และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพานมีค่าเท่ากับ 0.5%



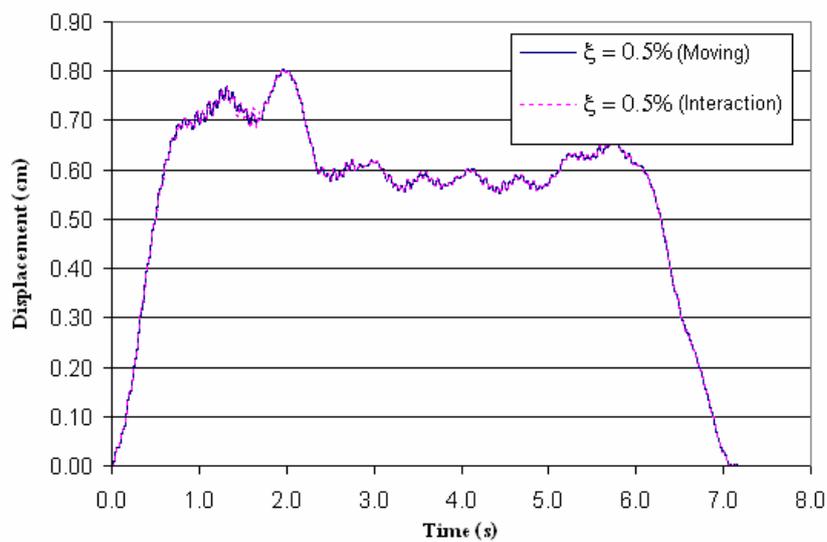
ภาพที่ 144 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 20 กม./ชม.



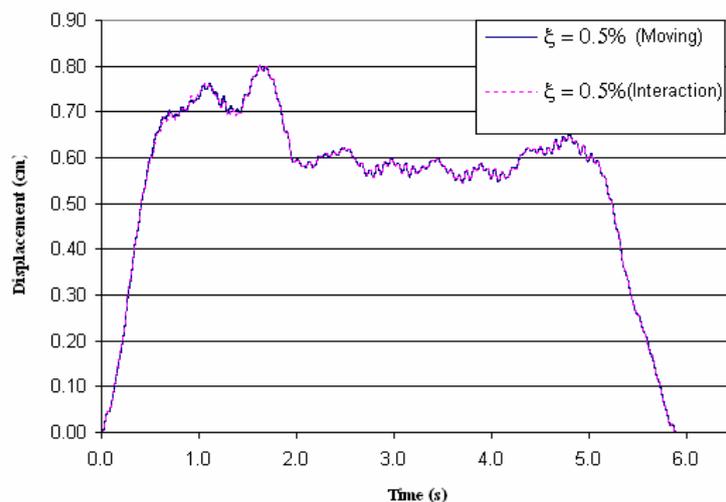
ภาพที่ 145 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 30 กม./ชม.



ภาพที่ 146 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 40 กม./ชม.

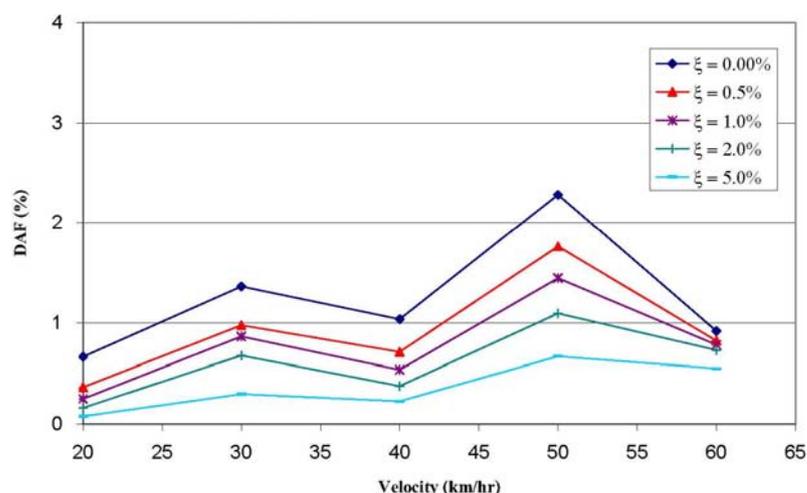


ภาพที่ 147 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 50 กม./ชม.

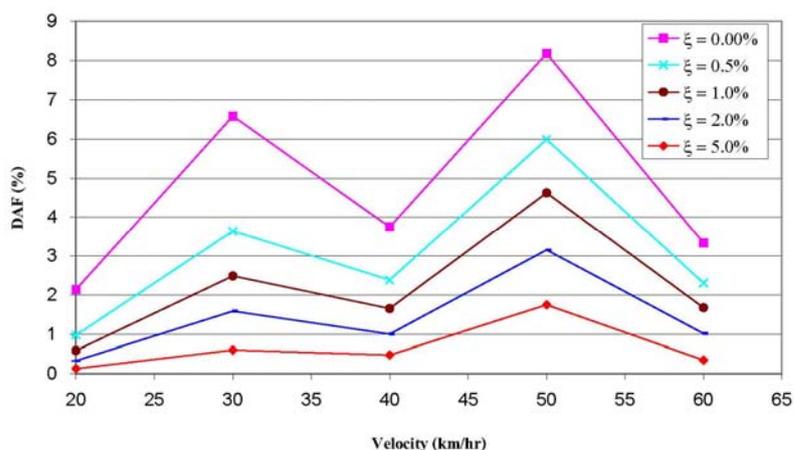


ภาพที่ 148 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ 60 กม./ชม.

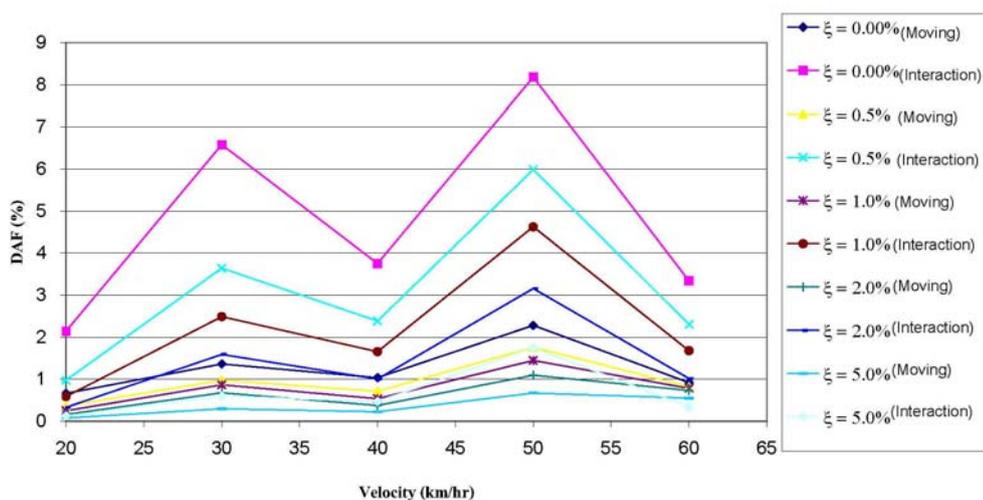
เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า DAF และความเร็วพบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน คือการใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) จะให้ค่าที่น้อยกว่าการวิเคราะห์การด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) เมื่อหัวรถจักรข้ามผ่านสะพาน แสดงได้ดังภาพที่ 149-151



ภาพที่ 149 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (Moving loads) ของหัวรถจักร



ภาพที่ 150 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพาน และขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร



ภาพที่ 151 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ (Moving loads) และความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) ของหัวรถจักร

จากผลการวิเคราะห์แสดงอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพานจะมีผลต่อค่า DAF ก่อนข้างสูง โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงที่สูงจะให้ค่า DAF ที่ต่ำ และในช่วงความเร็ว 30 และ 50 กม./ชม. จะเกิดการตอบสนองที่สูงขึ้นเนื่องจากการที่ความเร็วของขบวนรถไฟทำให้เกิดการสั่นพ้อง (resonance) กับตัวสะพาน โดยการตอบสนองของหัวรถจักรส่งผลกระทบต่อขบวน

พวงสินค้าขบวนแรกที่ตามมาด้านหลังด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบในภาคสนามที่ความเร็วประมาณ 30 กม./ชม. และอัตราความหน่วงของตัวสะพาน 0.5 % ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะได้ดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 การเปรียบเทียบ DAF จากการทดสอบในภาคสนามและการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ

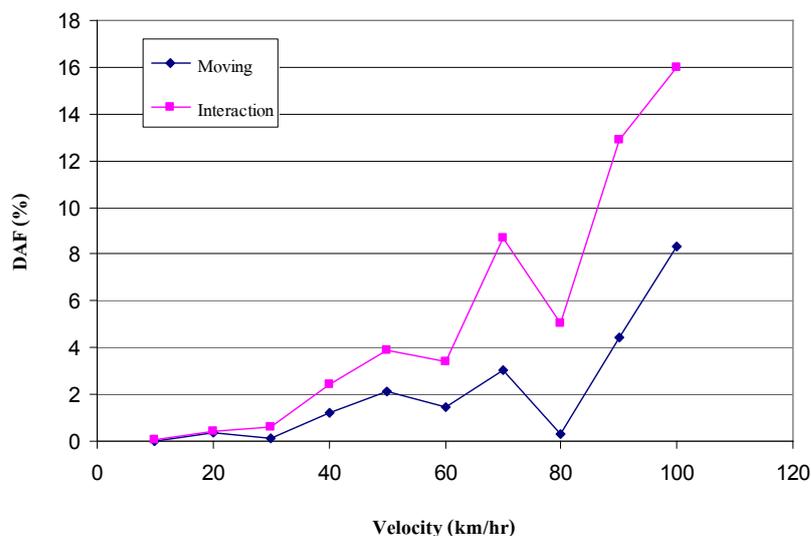
ประเภทรถไฟ	DAF จากการทดสอบ	DAF จากการวิเคราะห์	
		Moving load	Interaction
หัวรถจักร	4.79 %	0.98 %	3.64 %
ขบวนพวงสินค้า	3.40 %	0.87 %	2.18 %

จะเห็นว่าค่า DAF จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Vehicle-structure interaction) มีค่าใกล้เคียงกับผลกับการทดสอบในภาคสนามมากกว่าการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving loads)

3.2 ค่า DAF จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท

1) สะพานรถไฟใกล้สถานีรังสิต

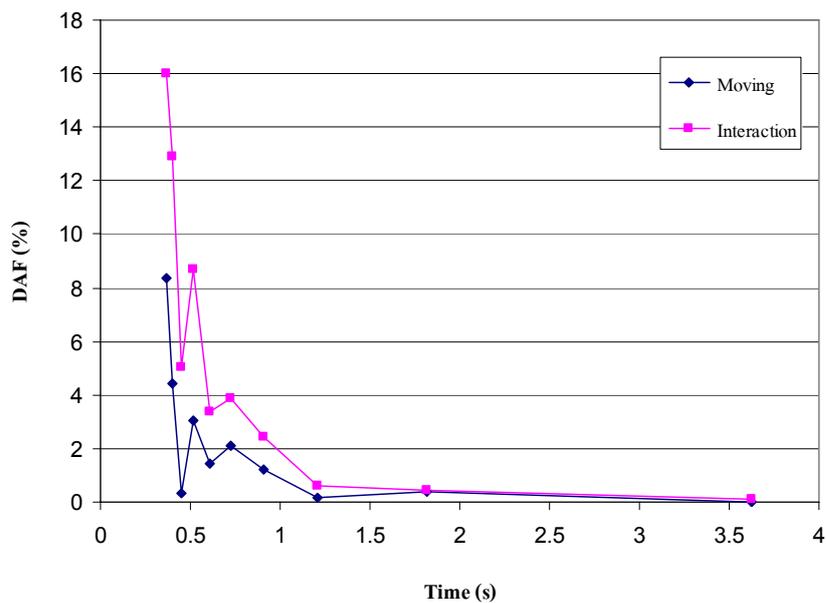
ทำการวิเคราะห์ประเภทของขบวนรถไฟแต่ละประเภท โดยการใช้น้ำหนักเพลามากที่สุดตามที่กฎหมายประเทศไทยกำหนดไว้ คือ 15 ตัน/เพลา สำหรับชนิดของหัวรถจักร ขบวนรถพ่วงโดยสาร และขบวนรถพวงสินค้า สำหรับน้ำหนักเพลาของดีเซลรางมีค่าสูงสุดเท่ากับ 12 ตัน/เพลา ตัวอย่างเช่น ขบวนพ่วงโดยสาร บขส. (BTC) เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า DAF กับความเร็วดังแสดงในภาพที่ 152



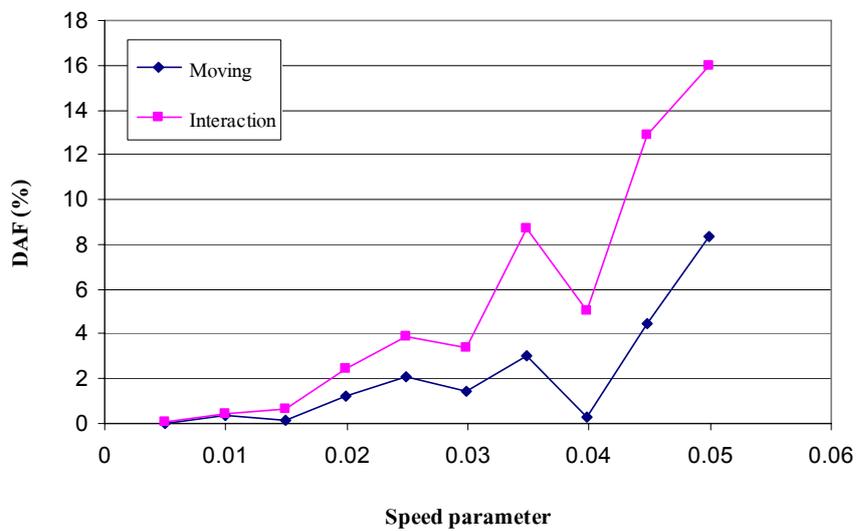
ภาพที่ 152 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บขส. (BTC)

พบว่าค่า DAF มากที่สุดประมาณ 16 % โดยเมื่อขบวนรถไฟมีความเร็วสูงขึ้น จะเกิดค่า DAF ที่สูงขึ้นด้วย แต่เนื่องด้วยเกิดการสั่นพ้อง (resonance) ขึ้นกับตัวสะพานจึงทำให้เกิดการตอบสนองที่สูงขึ้น เมื่อขบวนรถไฟข้ามผ่านสะพานที่ความเร็ว 70 และ 100 กม./ชม. ซึ่งวิธีที่จะหาความสัมพันธ์ของความเร็วกับการสั่นพ้องนั้นหาได้จากกับค่าปัจจัยของความเร็ว (S , speed parameter) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi v / L\omega_n$ หรือ $vT / 2L$ ซึ่งถ้าปัจจัยความเร็วตรงกับปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง ($S_{res} = d / (2nL)$, เมื่อ d คือ ระยะระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกถึงน้ำหนักบรรทุกทุกในคูเพลลาเดียวกันมีค่าเท่ากับ 2 ม.และ L คือ ความยาวสะพานมีค่าเท่ากับ 10.08 ม.) ก็จะทำให้เกิดการตอบสนองที่สูงขึ้น นั่นคือทำให้ค่า DAF สูงขึ้นด้วย

ภาพที่ 153 -154 แสดงความสัมพันธ์ของค่า DAF กับเวลาที่ขบวนรถไฟข้ามผ่าน และความสัมพันธ์ของค่า DAF กับปัจจัยความเร็ว และตารางที่ 35 แสดงค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง



ภาพที่ 153 ค่า DAF กับเวลาที่ข้ามผ่านสะพานของขบวนพ่วงโดยสาร บขส.(BTC)



ภาพที่ 154 ค่า DAF กับค่าปัจจัยความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บขส.(BTC)

ตารางที่ 35 แสดงค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั้นพ้อง

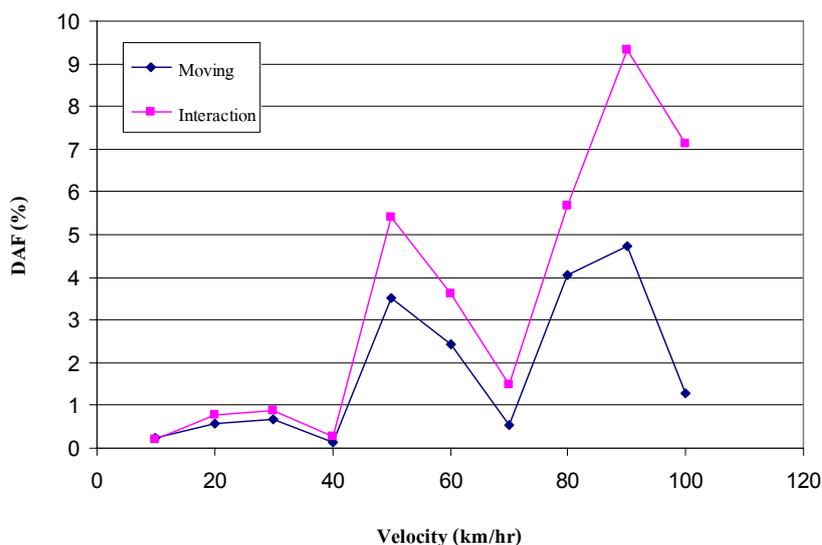
n	Sre = d/2nL	v (km/hr)
1	0.099206	
2	0.049603	100
3	0.033069	70
4	0.024802	50

ผลการวิเคราะห์ค่า DAF โดยการใช้น้ำหนักเพลามากที่สุดตามที่กฎหมายประเทศไทย กำหนดไว้ คือ 15 ตัน / เพล สำหรับชนิดของหัวรถจักร ขบวนรถพ่วงโดยสาร ขบวนรถพ่วงสินค้า และ 12 ตัน / เพล สำหรับชนิดของดีเซลราง แสดงดังภาพผนวกที่ ค1-ค16

พบว่าสำหรับหัวรถจักรค่า DAF ของ GEA มากที่สุดตามมาด้วย HID และ ALD ตามลำดับ สำหรับขบวนพ่วงโดยสารค่า DAF ของ BTC มากที่สุดตามมาด้วย BSC, BNS, ANF และ ANS ตามลำดับ สำหรับขบวนพ่วงสินค้าค่า DAF ของ BOT มากที่สุดตามมาด้วย BCF, BCS, BCP และ BCG ตามลำดับ สำหรับดีเซลรางค่า DAF ของ THN มากที่สุดตามมาด้วย NKF และ ATR ตามลำดับ

2) สะพานรถไฟใกล้สถานีบางบำหรุ

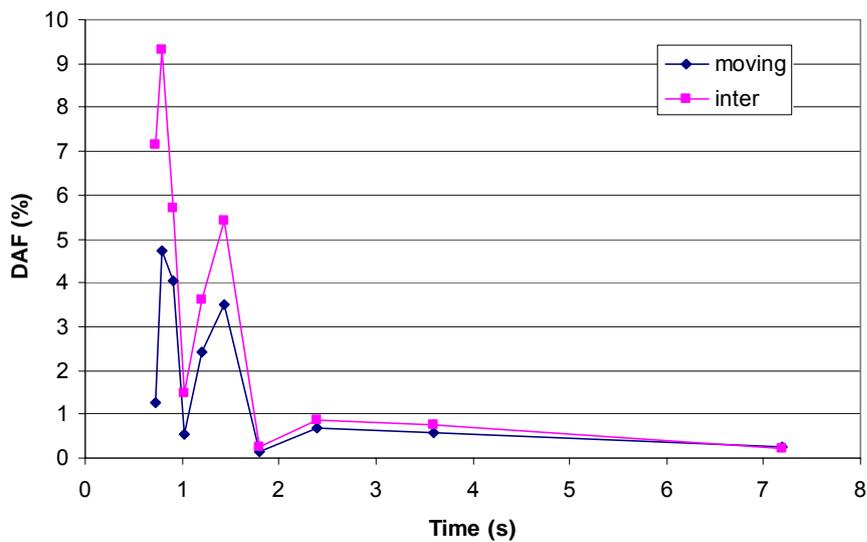
ทำการวิเคราะห์ประเภทของขบวนรถไฟแต่ละประเภท โดยการใช้น้ำหนักเพลามากที่สุดตามที่กฎหมายประเทศไทยกำหนดไว้ คือ 15 ตัน / เพล สำหรับชนิดของหัวรถจักร ขบวนรถพ่วงโดยสาร และขบวนรถพ่วงสินค้า สำหรับน้ำหนักเพลของดีเซลรางมีค่าสูงสุดเท่ากับ 12 ตัน/เพล ตัวอย่างเช่น ขบวนพ่วงโดยสาร บขส. (BTC) เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า DAF กับความเร็วดังแสดงในภาพที่ 155



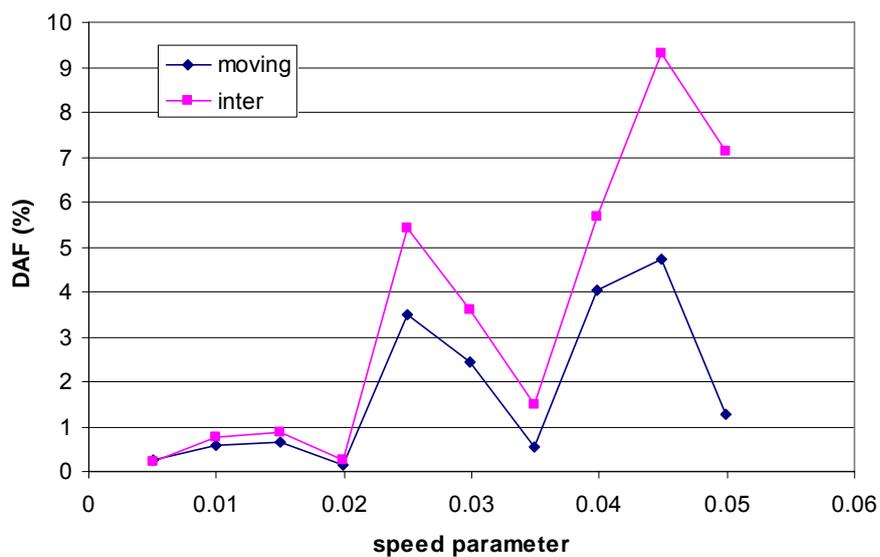
ภาพที่ 155 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บขส. (BTC)

พบว่าค่า DAF มากที่สุดประมาณ 9 % โดยเมื่อขบวนรถไฟมีความเร็วสูงขึ้นจะเกิดค่า DAF ที่สูงขึ้นด้วย แต่เนื่องด้วยเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ขึ้นกับตัวสะพานจึงทำให้เกิดการตอบสนองที่สูงขึ้น เมื่อขบวนรถไฟข้ามผ่านสะพานที่ความเร็ว 50 และ 90 กม./ชม. ซึ่งวิธีที่จะหาความสัมพันธ์ของความเร็วกับการสั่นพ้องนั้นหาได้จากกับค่าปัจจัยของความเร็ว (S , speed parameter) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi v / L\omega_n$ หรือ $vT / 2L$ ซึ่งถ้าปัจจัยความเร็วตรงกับปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง ($S_{res} = d / (2nL)$, เมื่อ d คือ ระยะระหว่างน้ำหนักบรรทุกถึงน้ำหนักบรรทุกในคูเพลลาเดียวกันมีค่าเท่ากับ 2 ม. และ L คือ ความยาวสะพานมีค่าเท่ากับ 19.98 ม.) ก็จะทำให้เกิดการตอบสนองที่สูงขึ้น นั่นคือทำให้ค่า DAF สูงขึ้นด้วย

ภาพที่ 156 -157 แสดงความสัมพันธ์ของค่า DAF กับเวลาที่ขบวนรถไฟข้ามผ่าน และความสัมพันธ์ของค่า DAF กับปัจจัยความเร็ว และตารางที่ 36 แสดงค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง



ภาพที่ 156 ค่า DAF กับเวลาที่ข้ามผ่านสะพานของขบวนพ่วงโดยสาร บขส.(BTC)



ภาพที่ 157 ค่า DAF กับค่าปัจจัยความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บขส.(BTC)

ตารางที่ 36 แสดงค่าปัจจัยความเร็วที่เกิดการสั่นพ้อง

n	Sre = $d/2nL$	v (km/hr)
1	0.044656	90
2	0.025025	50
3	0.016683	30

ผลการวิเคราะห์ค่า DAF โดยการใช้น้ำหนักเพลามากที่สุดตามที่กฎหมายประเทศไทย กำหนดไว้ คือ 15 ตัน / เพล สำหรับชนิดของหัวรถจักร ขบวนรถพ่วงโดยสาร ขบวนรถพ่วงสินค้า และ 12 ตัน / เพล สำหรับชนิดของดีเซลราง แสดงดังภาพผนวกที่ 1-16

พบว่าสำหรับหัวรถจักรค่า DAF ของ HID มากที่สุดตามมาด้วย GEA และ ALD ตามลำดับ สำหรับขบวนพ่วงโดยสารค่า DAF ของ BSC มากที่สุดตามมาด้วย BTC, ANF, ANS และ BNS ตามลำดับ สำหรับขบวนพ่วงสินค้าค่า DAF ของ BCF มากที่สุดตามมาด้วย BCS, BCG, BOT และ BCP ตามลำดับ สำหรับดีเซลรางค่า DAF ของ THN มากที่สุดตามมาด้วย NKF และ ATR ตามลำดับ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การทดสอบในภาคสนามสามารถให้ค่าพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างที่สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริง โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF ของโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากมาตรฐานการออกแบบของ AREMA ในช่วง 30% ถึง 85%

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟรางสิตที่มีค่า DAF จากมากไปหาน้อยคือ คานขวาง คานรองหมอนรถไฟ และคานประธาน ตามลำดับ เนื่องจากรูปร่างหน้าตัดของคานมีผลต่อหน่วยแรง ซึ่งถ้ามีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดหน่วยแรงน้อย โดยมีค่า DAF เฉลี่ยอยู่ในช่วง 9% - 25%

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุที่มีค่า DAF จากมากไปหาน้อยคือ คานรองหมอนรถไฟ คานขวาง และคานประธาน ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4% - 15% โดยขบวนรถดีเซลราง ให้ค่า DAF สูงสุดในทั้งสองสะพาน

2. จากการทดสอบในภาคสนาม พบว่าความยาวของสะพานมีผลต่อคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF โดยถ้าสะพานที่มีความยาวน้อยจะมีค่า DAF มากกว่าสะพานที่มีความยาวมาก เนื่องจากเมื่อน้ำหนักขบวนรถไฟกระทำต่อสะพานที่มีความยาวมากจะเกิดการตอบสนองทางสถิติมากกว่าสะพานที่มีความยาวน้อย

3. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานทั้ง 2 สะพาน โดยใช้น้ำหนักเพลลาที่ได้จากข้อมูลการชั่งน้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) และใช้การแบ่งน้ำหนักเพลลาตามมาตรฐาน AREMA โดยทำการแบ่งน้ำหนักเพลลาออกเป็น 3 ส่วนที่มีน้ำหนักเท่าๆ กัน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสถิติกับแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ กับการทดสอบในภาคสนามแล้วแบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติมีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดจริงมากกว่าแบบจำลอง 2 มิติ โดยมีความแตกต่างมากที่สุดประมาณ 10 % สำหรับในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน

4. ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลวัตหรือค่า DAF คือความเร็วของขบวนรถไฟ และน้ำหนักกลุ่มเพลารถไฟ เมื่อขบวนรถไฟมีความเร็วมากและมีน้ำหนักกลุ่มเพลาน้อยจะมีค่าคูณเพิ่มทางพลวัตสูง

5. ในการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน พบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน ด้วยการใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Dynamic analysis with moving loads) จะให้ค่า DAF ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสะพานและขบวนรถไฟ (Dynamic analysis with vehicle-structure interaction) เนื่องจากในการวิเคราะห์แบบน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ จะไม่สามารถรวมผลของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟเข้าไว้ในการคำนวณได้

6. อัตราส่วนความหน่วงที่สูงขึ้นของโครงสร้างสะพานทำให้ค่า DAF มีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟอยู่ในระดับที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง (resonance) กับตัวโครงสร้างสะพาน ค่า DAF จะมีค่าสูงขึ้นมาก โดยช่วงความเร็วที่เกิดการสั่นพ้องสำหรับสะพานโกสต์สถานีรถไฟรังสิต มีค่าเท่ากับ 60 และ 90 กม./ชม. และสำหรับสะพานโกสต์สถานีรถไฟบางบำหรุ มีค่าเท่ากับ 30 และ 50 กม./ชม.

7. ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท พบว่าขบวนรถดีเซลรางจะให้ค่า DAF ที่สูงสุด และขบวนรถฟ่วงลินค้ำจะให้ค่า DAF ที่ต่ำสุด เมื่อขบวนรถไฟข้ามผ่านสะพานที่ความเร็วเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟต่างกัน โดยถ้ามีการยืดหยุ่นของสปริงค่อนข้างสูงจะทำให้ค่า DAF มีค่าต่ำ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่า DAF ที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม

ข้อเสนอแนะ

1. ในการติดตั้งเครื่องมือทดสอบนั้น ต้องทำการสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือก่อนที่จะนำไปทดสอบในสนามจริง เพื่อให้ค่ามีความถูกต้องและเที่ยงตรง
2. ปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเป็นปัญหาใหญ่ในการเก็บข้อมูล ควรทำการติดตั้งตัวกำจัดสัญญาณรบกวนก่อนที่จะดำเนินการเก็บข้อมูล
3. ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการปรับปรุงและพัฒนามาตรฐานการออกแบบสะพานรถไฟที่เหมาะสมกับโครงสร้างและลักษณะของขบวนรถไฟในประเทศไทยรวมถึงสามารถนำไปใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง และทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น
4. ควรมีการทดสอบสะพานประเภทอื่นๆ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ทวี ทองปาน. 2537. สะพานรถไฟของ ร.ฟ.ท. เทคนิคเกี่ยวกับงานสะพาน. กรุงเทพฯ.

AISC. 1989. **Allowable Stress Design and Plastic Design Specification for Structural Steel Buildings**. 9th Ed., Chicago.

American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). 2002. **Steel Structures**, Washington D.C.

ASCE Committee on Loads and Forces on Bridges of the Committee on Bridges of the Structural Division. 1981. Recommended Design Loads for Bridges. **Journal of the Structural Division**. 107: 1161-1213.

Battini, J. M. 2005. **Structural Dynamics**. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

Billing J.R. and R. Green. 1984. Dynamic Loading and Testing of Bridges in Ontario. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 11: 833-843.

Bjorhovde, R., J. Brozzetti and A. Colson. 1990. A Classification System for Beam to Column Connections. **Journal of Structural Engineering**. ASCE. 116: 3059-3076.

CEN. European Committee for Standardization. 1992. **Design of Steel Structures**. Vol. 1

Dally, J.W. 1993. Measuring Instruments. **Instrumentation for Engineering Measurements**. New York.

David, I.M. and M.L. Lee. 1998. Dynamic Impact Factors for Bridge. **Synthesis of Highway Practice 266**, Nation Research Council, Washington D.C.

- Goicolea, J.M. 2002. Dynamic Loads in New Engineering Codes for Railway Bridges in Europe and Spain. **Bridges for High Speed Railways**. 43-58.
- Johan, W. 2006. Bridge Monitoring to Allow for Reliable Dynamic FE Modeling. Bulletin 81.
- Lee, M.L. and W.K. Chiu. 2005. A Comparative Study of Impact Force Prediction on A Railway Track-like Structure. **Structural Health Monitoring**. 4: 355-376.
- Al-Emrani M. 2005. Fatigue Performance of Stringer-to-Floor-Beam Connections in Riveted Railway Bridges. **Journal of Bridge Engineering**. Vol. 10
- Mutsuura, A.A. 1976. Study of Dynamics Behaviours of Bridge Girders for High-Speed Railway. **Journal of JSCE** 256. 35-47.
- Paultre, P. and O. Challal. 1992. Bridge Dynamic and Dynamic Amplification Factor: A Review of Analytical and Experimental Findings. **Canadian Journal of Civil Engineering** 12: 260-278.
- Wu, J.J., A.R. Whittaker and M.P. Cartmell. 2000. The Use of Finite Element Technique for Calculating the Dynamics Response of Structure to Moving Load. **Computer & Structure**. 78: 789-799.
- Xia, H., Y.L. Xu and T.H. Chan. 2000. Dynamic Interaction of Long Suspension Bridge with Running Trains. **International Journal Sound and Vibration** 237. 12: 263-280.
- Yang, Y.B. and J.D. Yau. 1997. Vehicle -Bridge Interaction Element for Dynamics Analysis. **Journal of Structural Engineering**. ASCE. 11: 1512-1518.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ช่งสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือของกลุ่มประเมีนของทั้ง 2 สะพาน

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงช่องสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือ และกลุ่มประเมินของสะพานใกล้
สถานีรังสิต

ประเภทการทดสอบ	หมายเลขช่องสัญญาณ	ชิ้นส่วนโครงสร้าง	ตำแหน่ง	รหัสเครื่องมือ
กลุ่ม 1	CH 1	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG1
	CH 2	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG2
	CH 3	คานขวาง	บนปีกล่าง	SG3
	CH 4	คานประธาน	บนปีกบน	SG4
	CH 5	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG5
	CH 6	คานประธาน	บนปีกบน	SG6
	CH 7	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG7
	CH 8	คานประธาน	กึ่งกลางสะพาน	ACC
กลุ่ม 2	CH 1	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG11
	CH 2	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG12
	CH 3	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG13
	CH 4	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG14
	CH 5	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG15
	CH 6	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG16
	CH 7	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG17
	CH 8	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG2
กลุ่ม 3	CH 1	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG1
	CH 2	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG2
	CH 3	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG8
	CH 4	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG9
	CH 5	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG10
	CH 6	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG11
	CH 7	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG12
	CH 8	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG13

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ประเภทการทดสอบ	หมายเลขช่องสัญญาณ	ชั้นส่วนโครงสร้าง	ตำแหน่ง	รหัสเครื่องมือ
กลุ่ม 4	CH 1	คานประธาน	บนปีกบน	SG4
	CH 2	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG5
	CH 3	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG2
	CH 4	คานขวาง	บนปีกล่าง	SG3
	CH 5	คานขวาง	บนปีกล่าง	SG23
	CH 6	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG22
	CH 7	คานประธาน	บนปีกบน	SG20
	CH 8	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG21

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงช่องสัญญาณของตำแหน่งเครื่องมือและกลุ่มประเมินของสะพานใกล้
สถานีบางบำหรุ

ประเภทการทดสอบ	หมายเลขช่องสัญญาณ	ชั้นส่วนโครงสร้าง	ตำแหน่ง	รหัสเครื่องมือ
กลุ่ม 1	CH 1	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG1/1
	CH 2	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG2
	CH 3	คานขวาง	บนปีกล่าง	SG3
	CH 4	คานประธาน	บนปีกบน	SG4
	CH 5	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG5
	CH 6	คานประธาน	บนปีกบน	SG6
	CH 7	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG7
	CH 8	คานประธาน	กึ่งกลางสะพาน	ACC

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

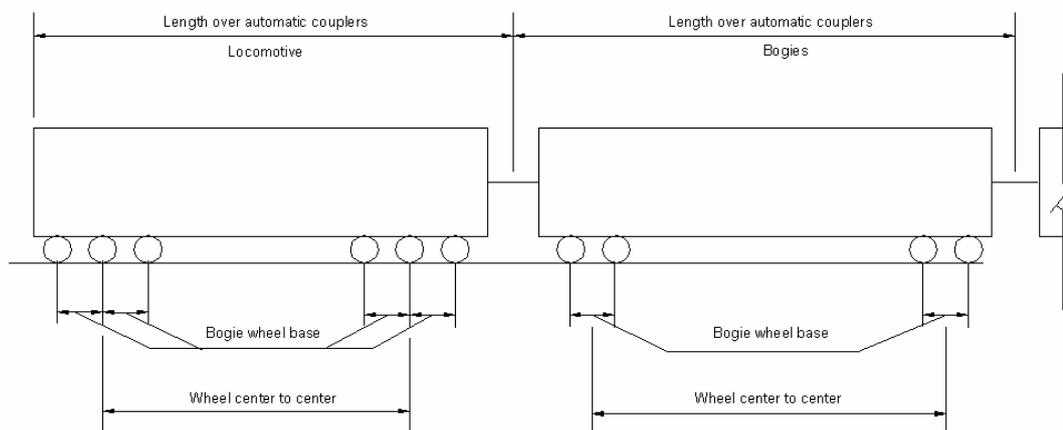
ประเภทการทดสอบ	หมายเลขช่องสัญญาณ	ชิ้นส่วนโครงสร้าง	ตำแหน่ง	รหัสเครื่องมือ
กลุ่ม 2	CH 1	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG15
	CH 2	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG16
	CH 3	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG17
	CH 4	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG1
	CH 5	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG14
	CH 6	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG8
	CH 7	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG9
	CH 8	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG10
กลุ่ม 3	CH 1	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG1
	CH 2	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG8
	CH 3	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG9
	CH 4	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG10
	CH 5	คานรองหมอนรถไฟ	ใต้ปีกบน	SG11
	CH 6	คานรองหมอนรถไฟ	กลางคาน	SG12
	CH 7	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG13
	CH 8	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG2
กลุ่ม 4	CH 1	คานประธาน	บนปีกบน	SG6
	CH 2	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG7
	CH 3	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG1
	CH 4	คานขวาง	บนปีกล่าง	SG3
	CH 5	คานขวาง	บนปีกล่าง	SG21
	CH 6	คานรองหมอนรถไฟ	บนปีกล่าง	SG22
	CH 7	คานประธาน	บนปีกบน	SG18
	CH 8	คานประธาน	บนปีกล่าง	SG19

ภาคผนวก ข

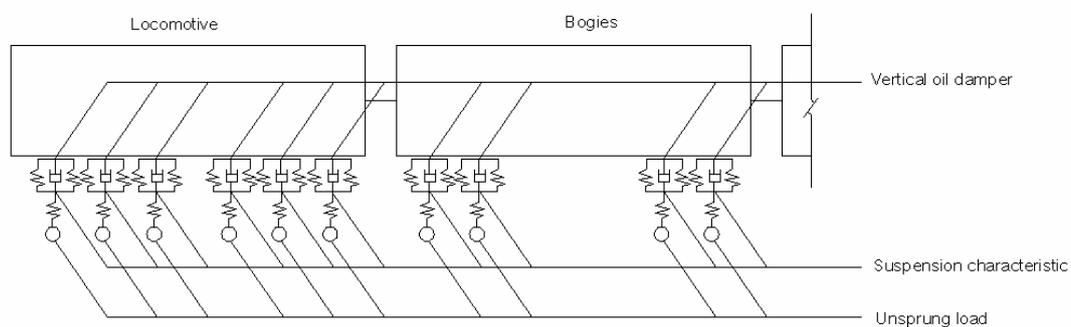
คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพาน คุณสมบัติทั่วไปของขบวนรถไฟ
และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท

ตารางผนวกที่ ข1 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพาน

คุณสมบัติทางพลศาสตร์	สะพานโกสสถานี่รังสิต	สะพานโกสสถานี่บางบำหรุ
System mass (M , $\text{kg.s}^2/\text{cm}$)	1.018529	3.309685
System stiffness (K , kg/cm)	30719.15	25646.18
Natural frequency (ω_n , rad/s)	173.6672	88.02743
Damping ratio (ξ)	0.01	0.005



ภาพผนวกที่ ข1 การเรียกลักษณะของขบวนรถไฟ



ภาพผนวกที่ ข2 ลักษณะคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟ

ตารางผนวกที่ ข2 คุณสมบัติทั่วไปของขบวนรถไฟแต่ละประเภท

Locomotive	Full name	Code	Bogie wheel base (mm)	Wheel center to center (mm)	Length over automatic coupler (mm)
1	Hitachi japan	HID	1850	13470	19900
2	General electric USA	GEA	1800	12700	19355
3	Alsthom atantique france	ALD	1650	10410	16258

Passenger	Full name	code	bogie wheel base (mm)	wheel center to center (mm)	Length over automatic coupler (mm)
บชส	Bogie third class	BTC	2000	13000	19800
บชท	Bogie second class	BSC	2000	13000	19800
บนท	Bogie second class day&night	BNS	2100	15500	20800
บนอป	Air condition first class	ANF	2600	18000	25000
บนทป	Air condition second class	ANS	2600	18000	24420

Freight	Full name	code	bogie wheel base (mm)	wheel center to center (mm)	Length over automatic coupler (mm)
บชท	Bogie Cement wagon	BCS	1650	8800	13300
บชด	Bogie Cement wagon	BCP	1750	8000	13300
บทก	Bogie Oil Tank wagon	BOT	1650	7500	13300
บทด	Bogie container flat wagon	BCF	1750	8800	13300
บตญ	Bogie cover goods wagon	BCG	1650	8800	13300

Diesel Rail car	Full name	code	bogie wheel base (mm)	wheel center to center (mm)	Length over automatic coupler (mm)
กชข	-	THN	2100	14600	20800
กชขป	-	NKF	2100	14600	20800
กชมป	-	ATR	2100	14600	20800

ตารางผนวกที่ ข3 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟแต่ละประเภท

Locomotive	Code	Suspension Characteristic (k) (kg/cm) / wheel	Vertical oil damper (c) (kg/cm/sec) / wheel	Unsprung load / bogies (kg)
1	HID	389.19	46.67	5500
2	GEA	747.38	33.33	4900
3	ALD	554.63	46.67	5000

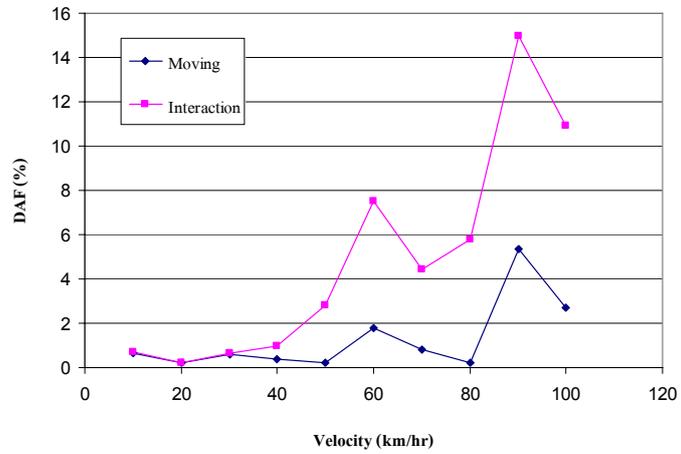
Passenger	Code	Suspension Characteristic (k) (kg/cm) / wheel	Vertical oil damper (c) (kg/cm/sec) / wheel	Unsprung load / bogies (kg)
บขส	BTC	286.00	40	8780
บขท	BSC	289.50	40	5780
บนท	BNS	229.38	35	4800
บนอป	ANF	286.00	11.05	4000
บนทป	ANS	286.00	10.2	3600

Freight	Code	Suspension Characteristic (k) (kg/cm) / wheel	Vertical oil damper (c) (kg/cm/sec) / wheel	Unsprung load / bogies (kg)
บขท	BCS	1883.00	-	8000
บขล	BCP	2347.00	-	8000
บทก	BOT	976.80	-	8000
บทด	BCF	1746.95	-	8000
บตญ	BCG	1192.30	-	8000

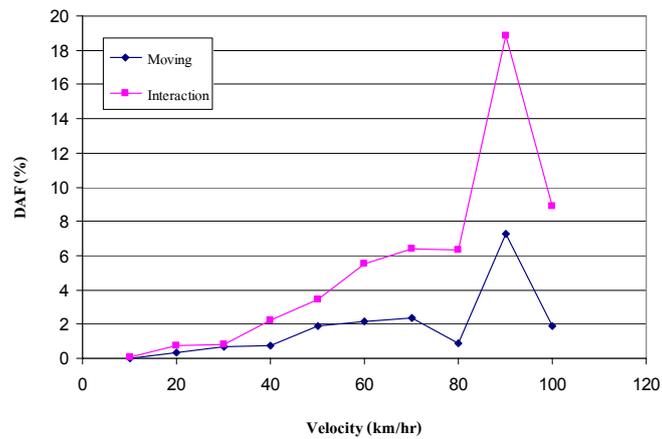
Diesel Rail car	Code	Suspension Characteristic (k) (kg/cm) / wheel	Vertical oil damper (c) (kg/cm/sec) / wheel	Unsprung load / bogies (kg)
กขข	THN	490	70	4122
กขขป	NKF	490	50	4165
กขมป	ATR	490	50	4116

ภาคผนวก ค

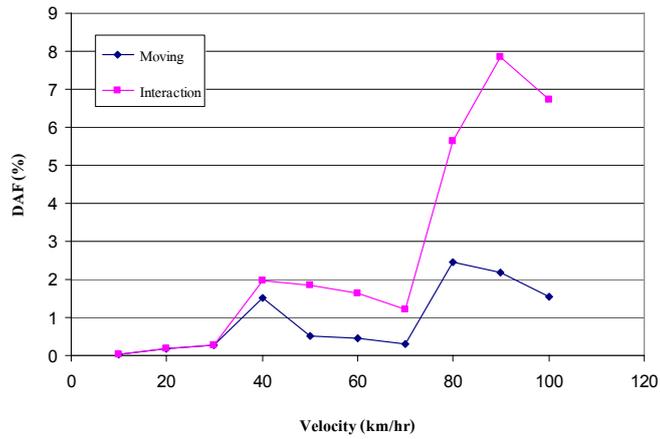
ค่า DAF จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟ
แต่ละประเภทของสะพานใกล้สถานีรถไฟรังสิต



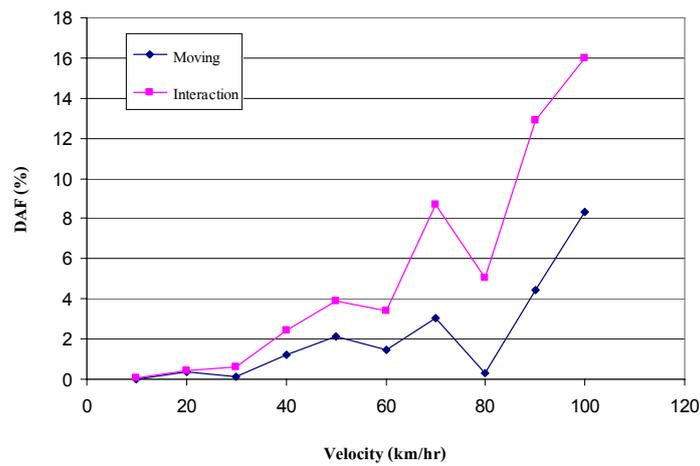
ภาพผนวกที่ ค1 ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Hitachi (HID)



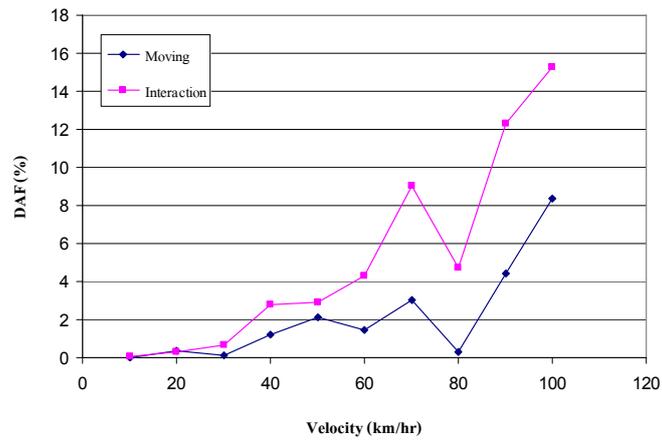
ภาพผนวกที่ ค2 ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร General electric USA (GEA)



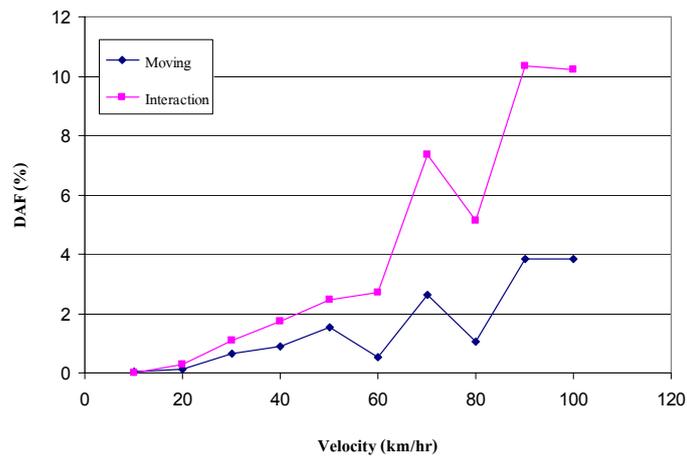
ภาพผนวกที่ ค3 ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Alsthom (ALD)



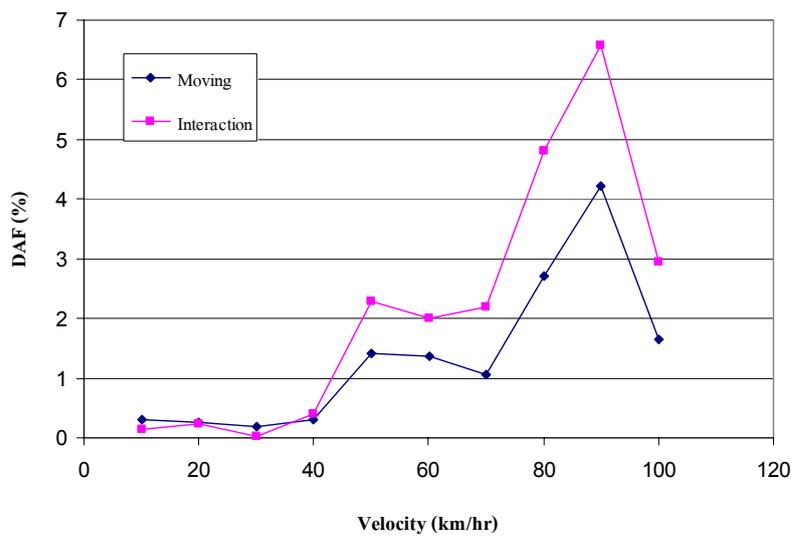
ภาพผนวกที่ ค4 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส. (BTC)



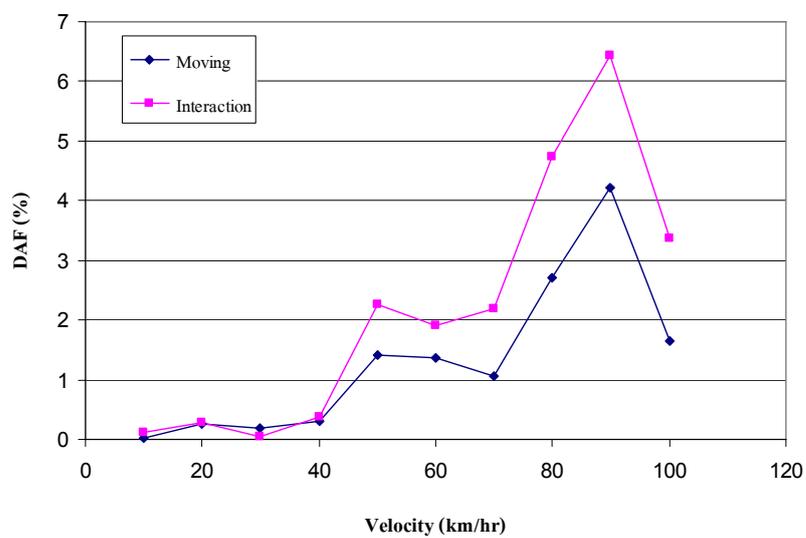
ภาพผนวกที่ ค5 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บขท. (BSC)



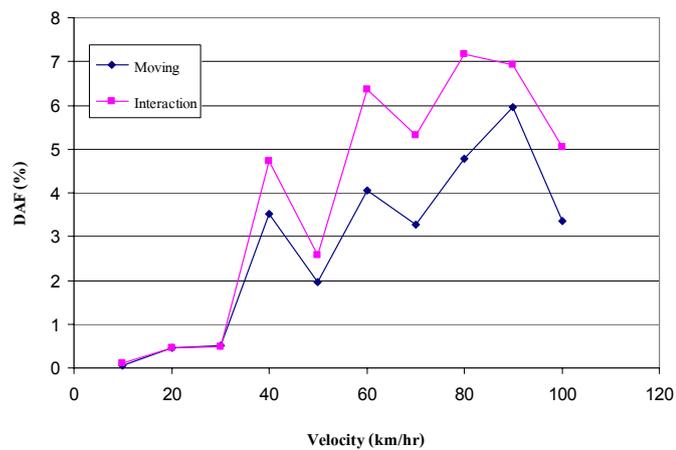
ภาพผนวกที่ ค6 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บหนท. (BNS)



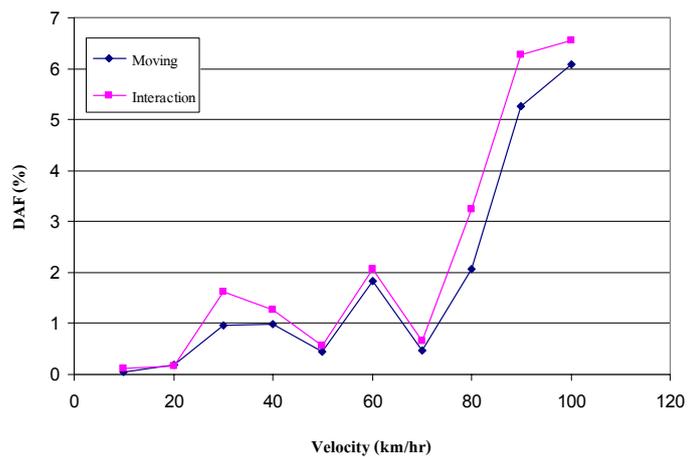
ภาพผนวกที่ ค7 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนอป. (ANF)



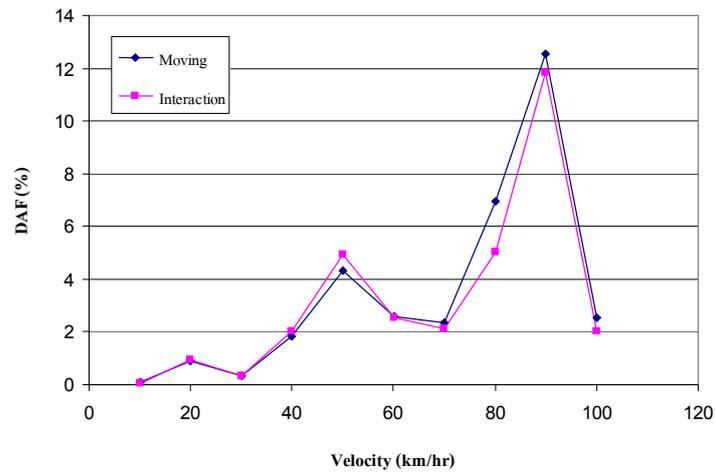
ภาพผนวกที่ ค8 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนทป. (ANS)



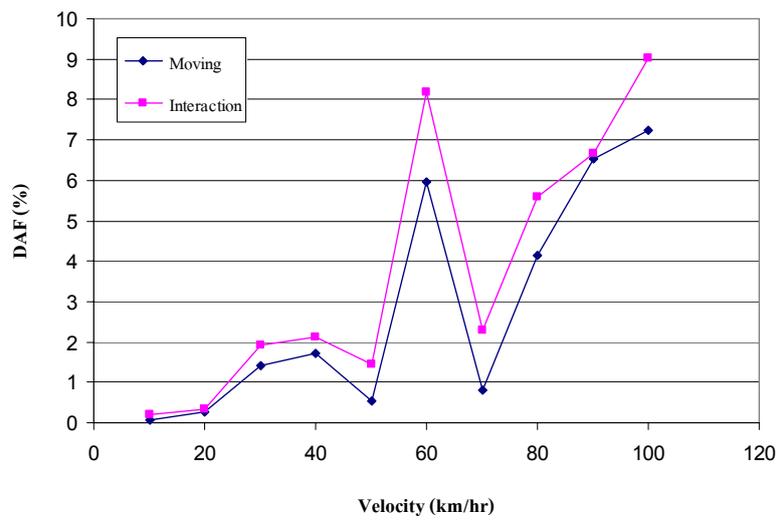
ภาพผนวกที่ ค9 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชท. (BCS)



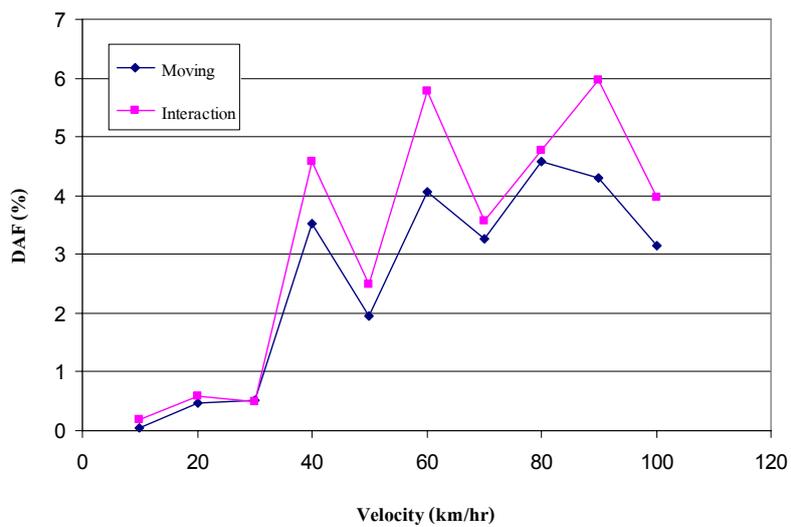
ภาพผนวกที่ ค10 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บชล. (BCP)



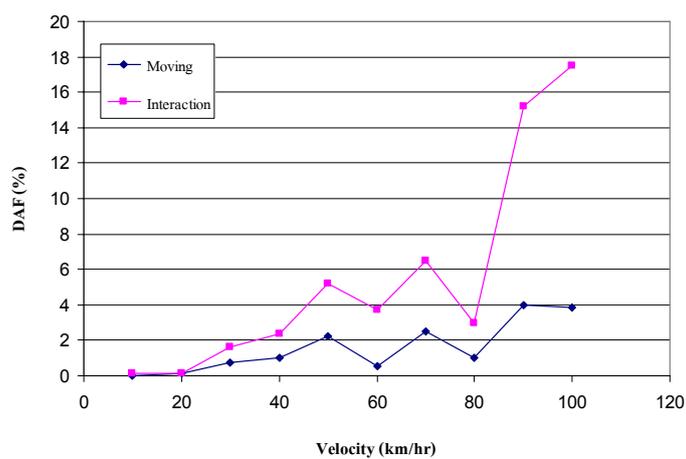
ภาพผนวกที่ ค11 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพวงสีก้า บชค. (BOT)



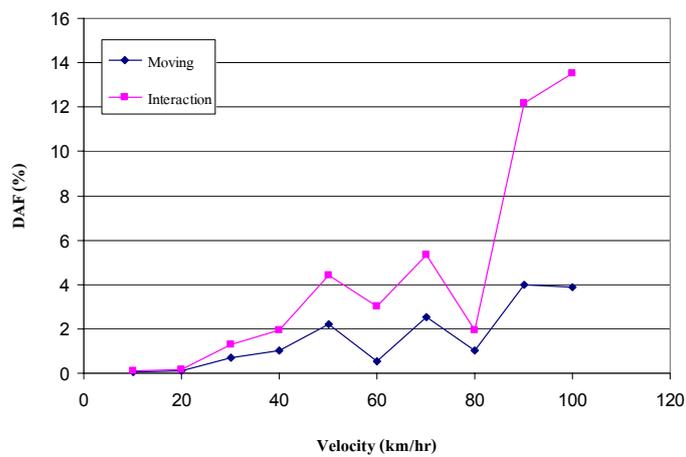
ภาพผนวกที่ ค12 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพวงสีก้า บทต. (BCF)



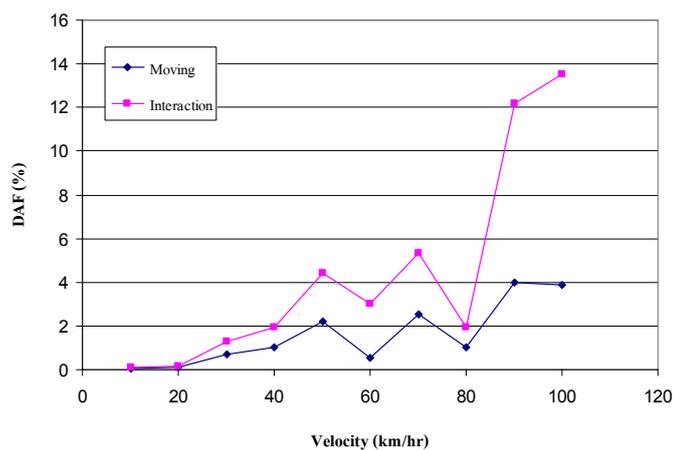
ภาพผนวกที่ ค13 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงสินค้า บตญ. (BCG)



ภาพผนวกที่ ค14 ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง THN



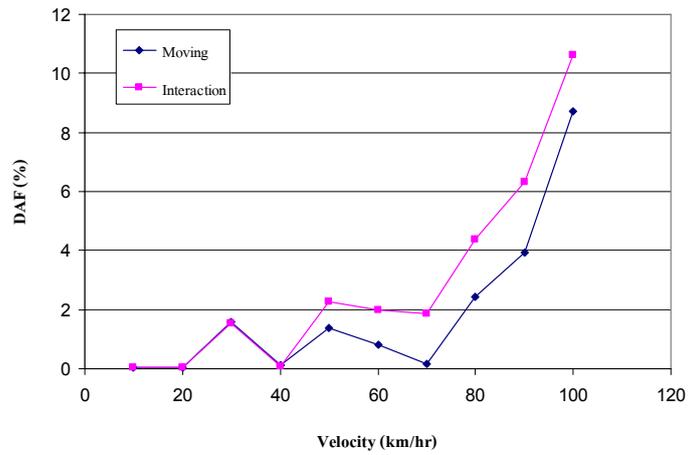
ภาพผนวกที่ ค15 ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง NKF



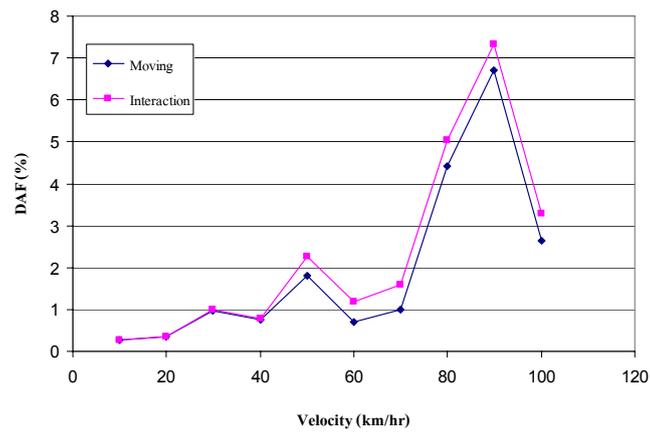
ภาพผนวกที่ ค16 ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง ATR

ภาคผนวก ง

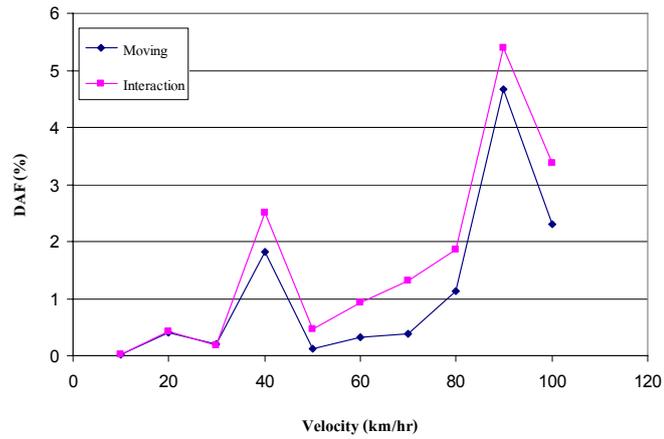
ค่า DAF จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางพลศาสตร์ของขบวนรถไฟ
แต่ละประเภทของสะพานใกล้สถานีรถไฟบางบำหรุ



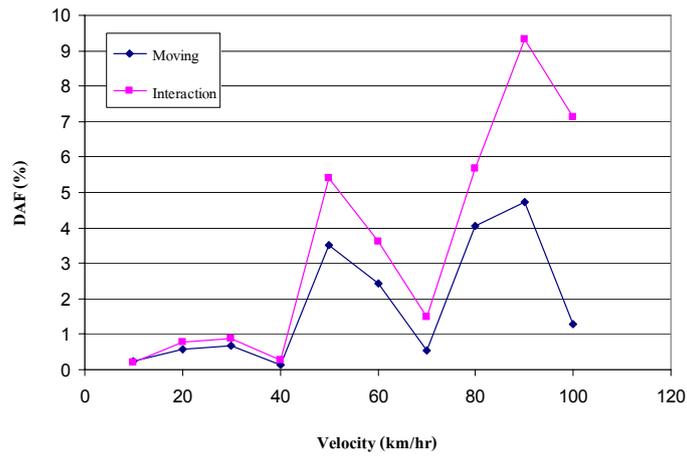
ภาพผนวกที่ ๑1 ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Hitachi (HID)



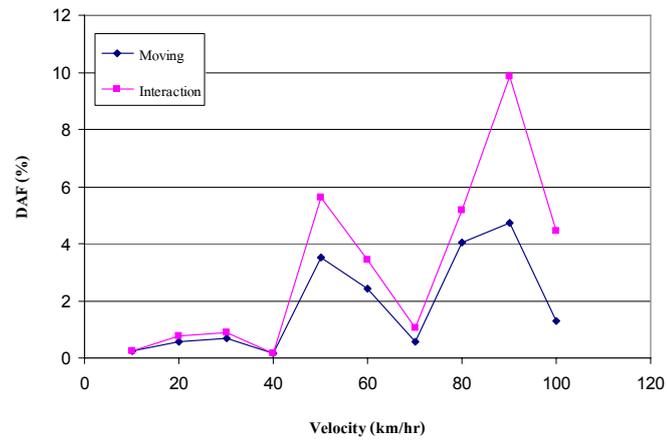
ภาพผนวกที่ ๑2 ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร General electric USA (GEA)



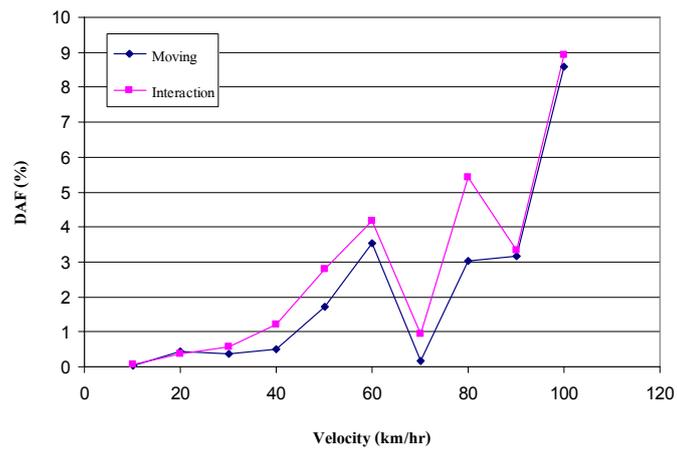
ภาพผนวกที่ 33 ค่า DAF กับความเร็วของหัวรถจักร Alsthom (ALD)



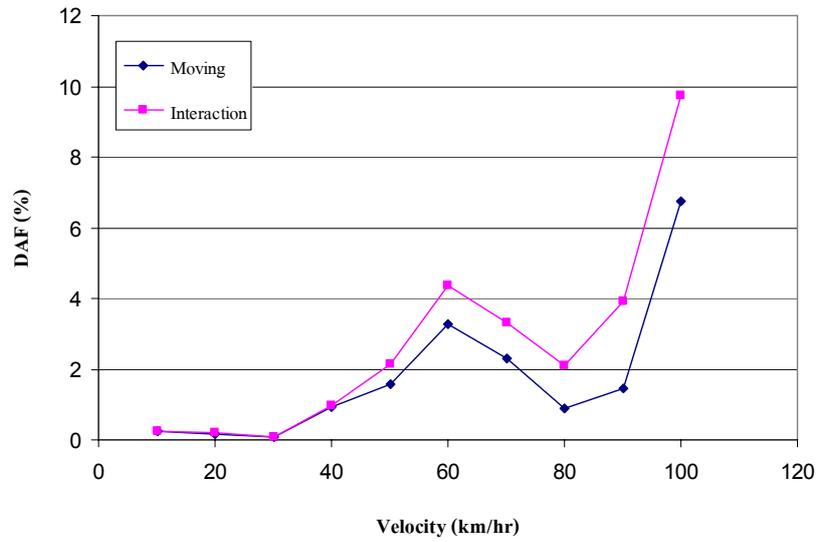
ภาพผนวกที่ 34 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชส. (BTC)



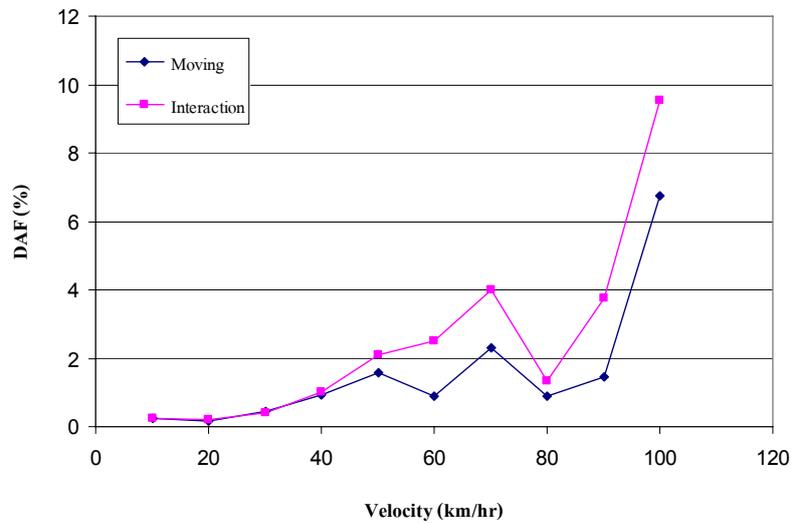
ภาพผนวกที่ ๕ ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บชท. (BSC)



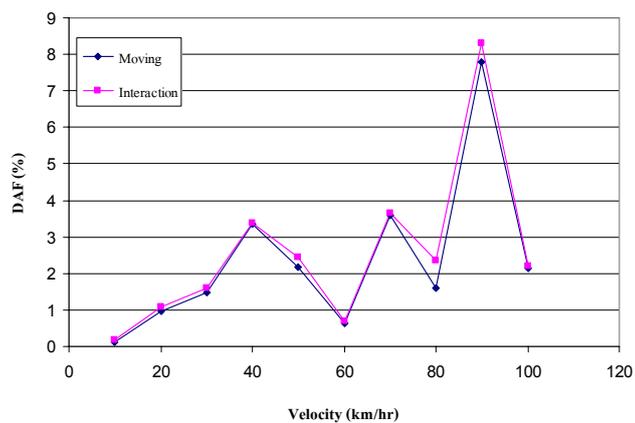
ภาพผนวกที่ ๖ ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนท. (BNS)



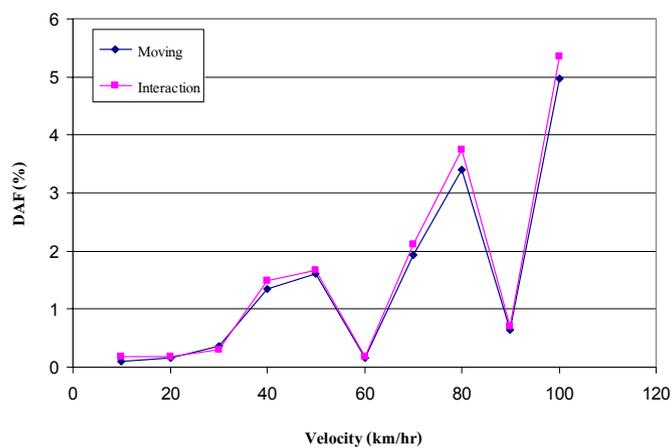
ภาพผนวกที่ 7 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนอป. (ANF)



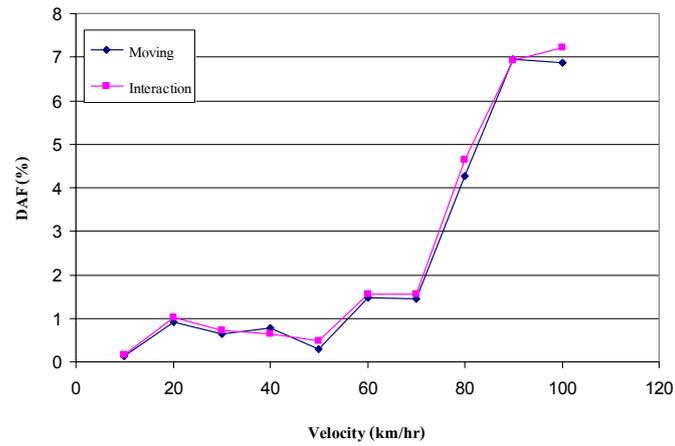
ภาพผนวกที่ 8 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพ่วงโดยสาร บนทป. (ANS)



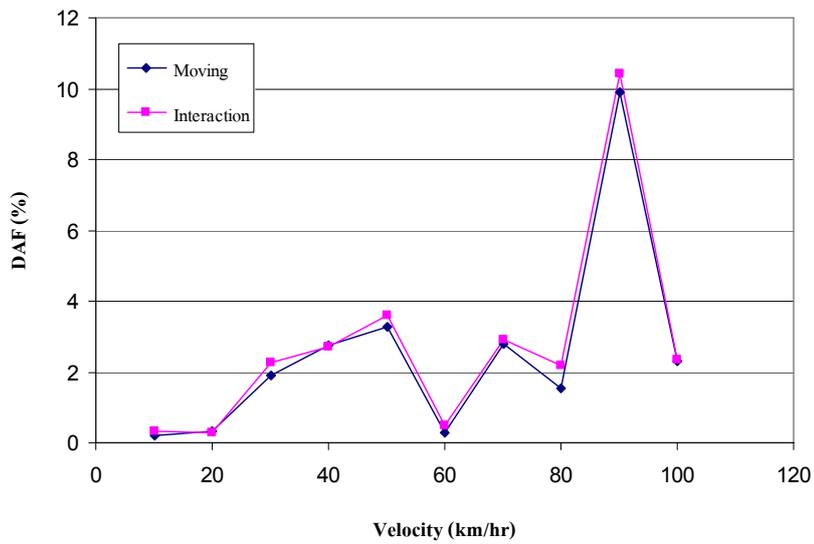
ภาพผนวกที่ ๙ ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพวงสีก้า บชท. (BCS)



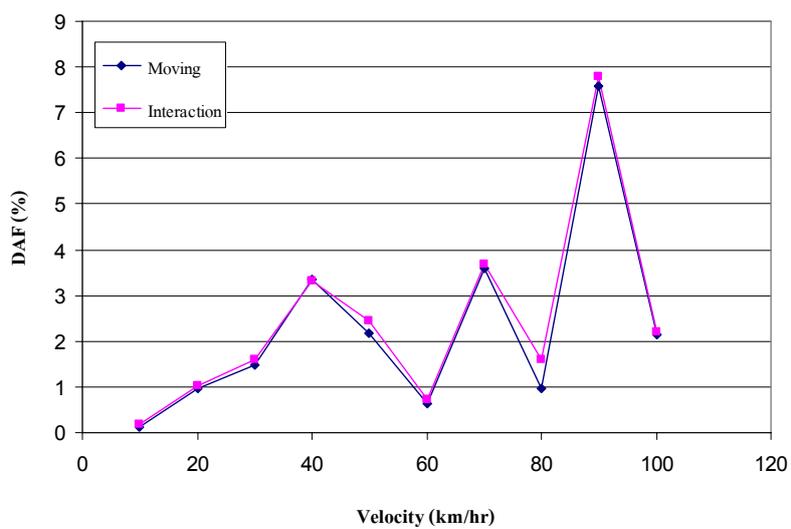
ภาพผนวกที่ ๑๐ ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพวงสีก้า บชล. (BCP)



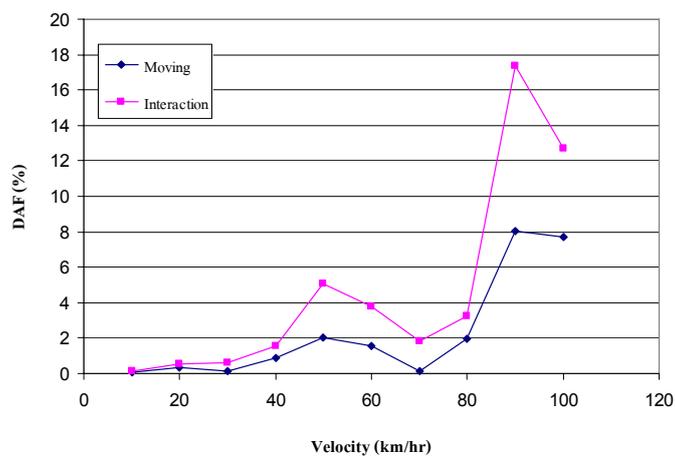
ภาพผนวกที่ 11 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนฟ่งสินค้า บชค. (BOT)



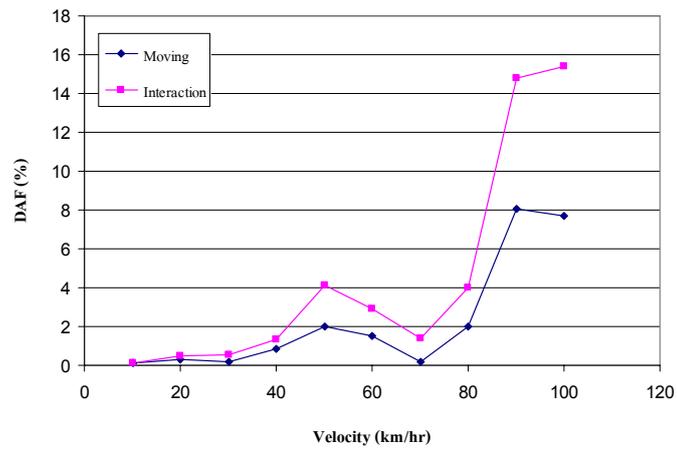
ภาพผนวกที่ 12 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนฟ่งสินค้า บทด. (BCF)



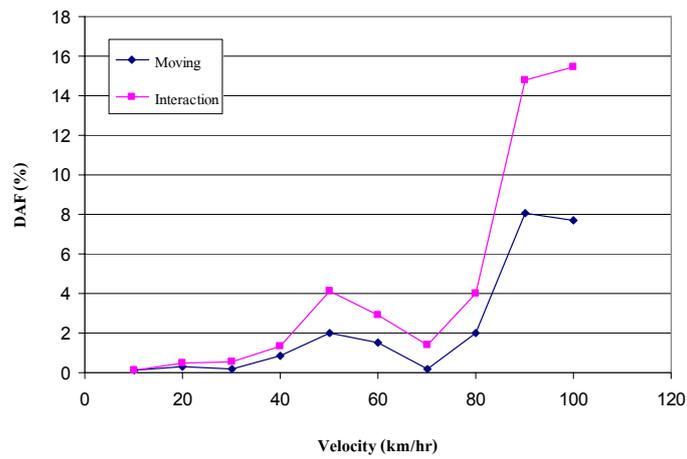
ภาพผนวกที่ 13 ค่า DAF กับความเร็วของขบวนพวงสีก้า บตญ. (BCG)



ภาพผนวกที่ 14 ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง THN



ภาพผนวกที่ 15 ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง NKF



ภาพผนวกที่ 16 ค่า DAF กับความเร็วของดีเซลราง ATR

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายอภิรัฐ จำทอง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 4 พฤศจิกายน 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2547 (เกียรตินิยมอันดับสอง)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร โครงสร้าง
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ซิกม่าไฮโดรคอนซัลแตนท์ จำกัด
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย