

การเฝ้าระวังและติดตามความเสียหายของสะพานคานรูปกล่องภายใต้แรง  
เคลื่อนที่ ด้วยวิธี NExT-ERA


DAMAGE EVALUATION OF BOX GIRDER BRIDGE SUBJECTED TO MOVING  
LOAD BASE ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING DATA USING  
NExT-ERA TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2567  
KMITL-2024-EN-M-097-251

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DAMAGE EVALUATION OF BOX GIRDER BRIDGE SUBJECTED TO MOVING  
LOAD BASE ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING DATA USING  
NEXT-ERA TECHNIQUE



PUSIT SUKKAROM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN  
CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND  
CONSTRUCTION MANAGEMENT  
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-EN-M-097-251

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแผ่รังสีและติดตามความเสียหายของสะพานคานรูป กล่องภายใต้แรงเคลื่อนที่ ด้วยวิธี NEX-T-ERA
นักศึกษา	นายภูษิต สุขรัมย์
รหัสประจำตัว	65016070
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ณ์ภูษิตนัย สีนสมุทรผดุง

### บทคัดย่อ

ระบบแผ่รังสีแบบไร้สายสามารถนำมาใช้เพื่อประเมินสภาพของสะพานจากระยะไกลและลดขั้นตอนรวมถึงเวลาในการตรวจสอบสะพานได้ สะพานคานคอนกรีตรูปกล่องได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน การประเมินสภาพของสะพานได้อย่างรวดเร็วจึงสำคัญ ระบบการตรวจสอบจะประกอบด้วยเซนเซอร์วัดค่าความเร่งการสั่นของสะพานเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยเทคนิค Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEX-T-ERA) และประเมินความเสียหายของสะพานในรูปของดัชนีความถี่ธรรมชาติ สะพานคานรูปกล่องและน้ำหนักรถแบบเคลื่อนที่ที่กระทำกับสะพานจะถูกจำลองให้ในรูปแบบของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองสะพานที่มีความเสียหายที่แตกต่างกันในหลายระดับ ได้ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายและดัชนีความถี่ธรรมชาติ เพื่อใช้ในการประเมินความเสียหายผ่านเซนเซอร์ไร้สายระยะไกล ระดับความ ในการบริหารการซ่อมบำรุงสะพานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Damage Evaluation of Box Girder Bridge Subjected to Moving Load Base on Structural Health Monitoring Data Using NEXT-ERA Techniques
<b>Student</b>	Mr. Pusit Sukkarom
<b>Student ID.</b>	65016070
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management
<b>Year</b>	2024
<b>Thesis advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Natdanai Sinsamutpadung

### ABSTRACT

Wireless monitoring systems can be used for remote assessment of bridge conditions, shortening the bridge inspection process and time. Box girder bridges are currently very popular. It is very important to quickly evaluate the condition of the bridge. The monitoring system is composed of bridge acceleration sensors. The data are analyzed by Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEXT-ERA), and the bridge damage is evaluated in the form of natural frequency. A box girder bridge and moving load acting on the bridge are simulated using a finite element model. Bridge models with different levels of damage. has been used to establish a relationship between the damage level and the natural frequency. Remote damage assessment is carried out by a wireless sensor, and the damage degree of the bridge is evaluated by the natural frequency index. The research results can be applied to bridge maintenance management, thus achieving higher efficiency.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ณัฐรัตน์ย สินสมุทรผดุง ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือ ในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ภูษิต สุขรมย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	V
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	VI
กิตติกรรมประกาศ.....	VII
สารบัญ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 สะพานในประเทศไทย.....	4
2.1.1.1 ระบบพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (Slab type) .....	4
2.1.1.2 ระบบพื้นสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไป (I-girder) .....	5
2.1.1.3 ระบบพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตัน (Plank girder).....	5
2.1.1.4 ระบบพื้นสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box girder). .....	6
2.1.1.5 ระบบพื้นสะพานแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที (T-girder) .....	6
2.1.1.6 ระบบสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องหล่อสำเร็จรูป (Segmental box girder).....	7
2.1.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS).....	9
2.1.2.1 ขั้นตอนของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน.....	9
2.1.2.2 การตรวจสอบสะพาน (Inspection).....	10
2.1.3 ระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง (Structural health monitoring, SHM)...	11
2.1.4 Accelerometer Sensor.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5 Eigensystem Realization Algorithm (ERA).....	14
2.1.6 Natural Excitation Technique (NExT).....	18
2.1.7 Natural Excitation Technique - Eigensystem Realization Algorithm (NExT-ERA).....	20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Natural Excitation Technique – Eigensystem Realization Algorithm (NExT-ERA).....	21
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักของยานพาหนะ.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 ลักษณะของสะพาน.....	23
3.2 น้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบ.....	25
3.3 น้ำหนักเคลื่อนที่ (Moving load) .....	27
3.4 ความเสียหายของสะพาน.....	27
3.5 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน.....	30
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	32
4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่องโดยที่ไม่มี ผลกระทบจาก Force vibration.....	32
4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง ภายใต้ผลกระทบ จากจาก Force vibration (Moving load) เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติ ของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางคาน ด้วยวิธี Linear perturbation และ NExT-ERA.....	34
4.3 กระบวนการแก้ปัญหา.....	41
4.3.1 เพิ่มระยะเวลาในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์.....	40
4.3.2 ปรับแก้ค่าความถี่ในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์.....	40
4.3.3 ปรับขนาดของ Hankel matrix.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	44
5.1 สรุปผลการดำเนินการ.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย และแนวทางทางในการดำเนินการศึกษาใน อนาคต.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	49
ประวัติผู้เขียน.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

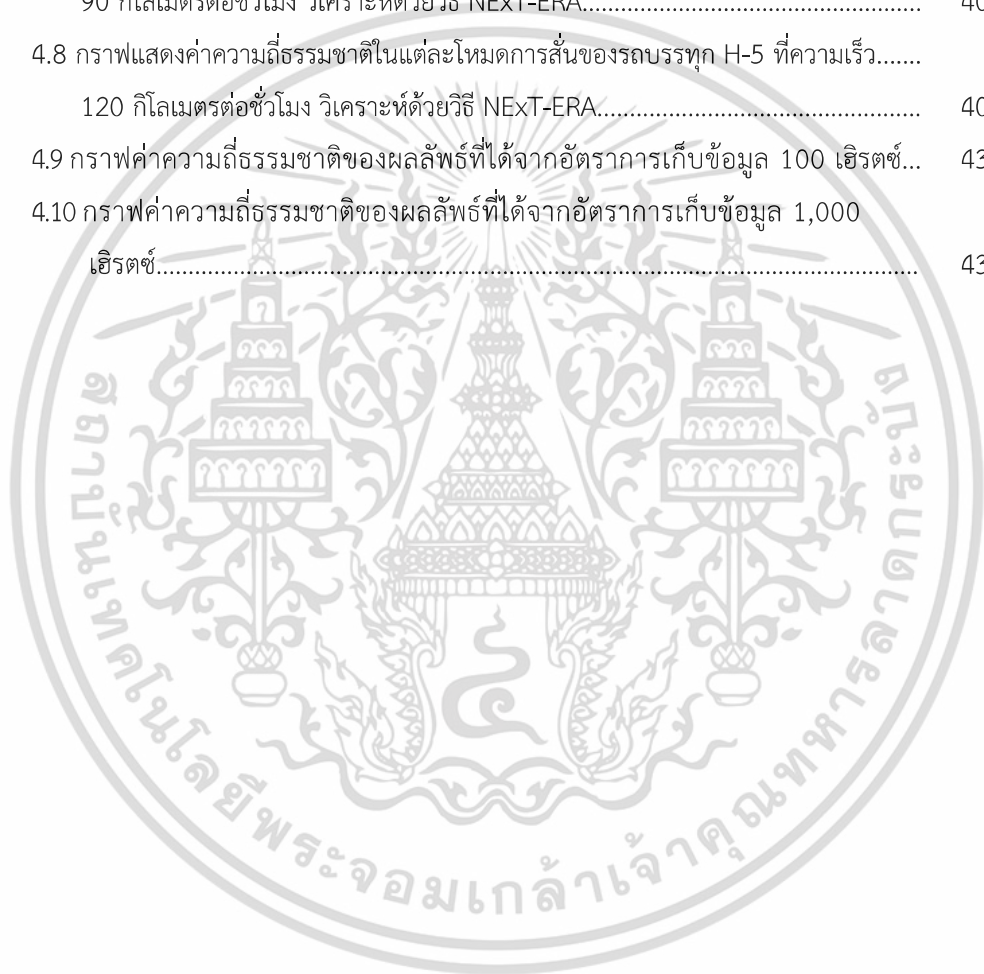
# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติวัสดุ.....	25
3.2 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแรง.....	27
3.3 ระดับความเสียหายของสะพาน.....	28
3.4 กรณีศึกษาที่ต้องการทำการวิเคราะห์ภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบ HL-93.....	29
3.5 กรณีศึกษาที่ต้องการทำการวิเคราะห์ภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบ H-5	29
4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี Linear perturbation.....	32
4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี NEXt-ERA.....	33
4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ NEXt-ERA.....	34
4.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี Linear perturbation.....	35
4.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมี การลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี NEXt-ERA ภายใต้แรงเคลื่อนจาก รถบรรทุกทดสอบ HL-93.....	35
4.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติของวิธี Linear perturbation กับวิธี NEXt-ERA เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน ภายใต้ แรงเคลื่อนจากรถบรรทุกทดสอบ HL-93.....	38
4.7 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมี การลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี NEXt-ERA ภายใต้แรงเคลื่อนจาก รถบรรทุกทดสอบ H-5.....	39
4.8 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติของวิธี Linear perturbation กับวิธี NEXt-ERA เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน ภายใต้ แรงเคลื่อนจากรถบรรทุกทดสอบ H-5.....	41
4.9 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการเพิ่มระยะเวลาในการรับ ข้อมูลของเซ็นเซอร์จาก 20 วินาที เป็น 60 วินาที.....	42
4.10 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการปรับแก้ความถี่ในการรับ ข้อมูลของเซ็นเซอร์.....	42

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (Slab type).....	4
2.2 สะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ.....	5
2.3 สะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบตัน (Plank girder).....	5
2.4 สะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box girder).....	6
2.5 สะพานแบบคานคอนกรีตรูปตัวที (T-girder).....	6
2.6 สะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องหล่อสำเร็จรูป (Segmental box girder).....	7
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสะพานและอายุของสะพานที่อยู่ในการดูแล ของกรมทางหลวง.....	8
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสะพานกับประเภทของสะพานที่อยู่ในการ ดูแลของกรมทางหลวง.....	8
2.9 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ seismic.....	12
2.10 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric.....	14
2.11 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA.....	15
2.12 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล.....	15
2.13 การตอบสนองการสั่นแบบอิสระได้มาจากการใช้ NExT.....	19
2.14 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT.....	20
2.15 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT-ERA.....	21
3.1 หน้าตัดของแบบจำลองสะพาน.....	23
3.2 ด้านยาวของแบบจำลองสะพาน.....	24
3.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์.....	24
3.4 น้ำหนักที่กดลงบนพื้นของรถบรรทุกทดสอบ HL-93.....	26
3.5 น้ำหนักรถที่กดลงบนพื้นของรถบรรทุกทดสอบ H-5.....	26
3.6 ภาพจำลองทิศทางเคลื่อนที่ของแรงจากรถบรรทุกทดสอบ HL-93.....	27
3.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	30
3.8 แผนภาพการเฝ้าระวังและติดตามความเสียหาย.....	31
4.1 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่น ของวิธี Linear Perturbation และ NExT-ERA.....	34
4.2 ความหมายของเส้นกราฟแต่ละเส้น.....	36
4.3 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก HL-93 ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NExT-ERA.....	36

4.4 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก HL-93 ที่ความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXt-ERA.....	37
4.5 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก HL-93 ที่ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXt-ERA.....	37
4.6 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก H-5 ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXt-ERA.....	39
4.7 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก H-5 ที่ความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXt-ERA.....	40
4.8 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก H-5 ที่ความเร็ว..... 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXt-ERA.....	40
4.9 กราฟค่าความถี่ธรรมชาติของผลลัพธ์ที่ได้จากอัตราการเก็บข้อมูล 100 เฮิร์ตซ์...	43
4.10 กราฟค่าความถี่ธรรมชาติของผลลัพธ์ที่ได้จากอัตราการเก็บข้อมูล 1,000 เฮิร์ตซ์.....	43



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีสะพานอยู่ประมาณ 17,000 แห่งทั่วประเทศ ซึ่งสะพานในประเทศไทยนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น สะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Prestress segmental box girder bridge), สะพานคานแบบแผ่น (Plank girder), สะพานโค้ง (Arch bridge) สะพานซิง (Cable stayed bridge), สะพานแบบโครงถัก (Truss bridge), และสะพานแขวน (Suspension bridge) เป็นต้น โดยที่สะพานแต่ละประเภทจะถูกเลือกใช้งานตามความเหมาะสมของลักษณะทางภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมในที่นั้นๆ [1] ปัจจุบันประเทศไทยนิยมใช้สะพานคานรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ในหลายโครงการ ตัวอย่างเช่น สะพานข้ามแยก สะพานข้ามแม่น้ำ รวมทั้งทางเดินรถของรถไฟฟ้า โดยสะพานเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของเครือข่ายการขนส่งและการเชื่อมโยงระบบคมนาคมของประเทศ [2] หมายความว่าหากสะพานที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้เกิดความเสียหายจนถึงระดับที่ไม่สามารถใช้งานได้ จะทำให้เกิดผลกระทบต่อหลายภาคส่วนที่ต้องการใช้ประโยชน์จากสะพานเหล่านั้น เพราะฉะนั้นสะพานควรได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม โดยปกติการสำรวจตรวจสอบสะพานจะมีการดำเนินการในทุกๆ 2-6 ปี ตามลักษณะของการตรวจสอบ และการมีสำรวจแบบพิเศษ (Special inspection) เป็นการสำรวจเพิ่มเติมหลังจากที่สะพานได้เกิดความเสียหายแล้ว [3] ซึ่งจะเห็นว่าการตรวจสอบสะพานนั้นมีช่องว่างของเวลาที่ห่างกันเป็นหลักปีและด้วยจำนวนของสะพานที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก จึงไม่สามารถที่จะตรวจสอบสะพานพร้อมๆ กันได้ ส่งผลให้การรอการตรวจสอบอาจจะสายเกินไป จนทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยในการตรวจสอบสะพานแต่ละครั้งจะต้องดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ความสามารถในการตรวจสอบ ทำให้การตรวจสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการวางแผนในส่วนของการทำงานและในส่วนของงบประมาณ และในบางครั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา เช่น รอยแตกภายในของวัสดุ หรือความแข็งแรงของวัสดุที่ลดลง ด้วยปัญหาเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาช่วยในการวิเคราะห์ความเสียหาย เพื่อช่วยลดเวลาในการดำเนินการตรวจสอบ ทั้งยังช่วยให้การตรวจสอบมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [4]

ระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง (Structural health monitoring, SHM) เป็นระบบที่สามารถทำให้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างได้อย่างต่อเนื่องและตลอดเวลา ทำให้สามารถวางแผนการ

ซ่อมบำรุงได้ทันก่อนที่ความเสียหายของโครงสร้างจะขยายตัวและรุนแรงมากยิ่งขึ้นจนไม่สามารถซ่อมบำรุงได้ SHM ถูกใช้ในโครงสร้างวิศวกรรมหลายประเภท ตั้งแต่สะพานไปจนถึงเครื่องบิน [5] โดยที่ SHM เป็นระบบที่ผสมผสานการทำงานร่วมกันของสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น เซนเซอร์ ระบบสื่อสารไร้สาย เครื่องมือวัด (Accelerometer, Strain gauge) และคอมพิวเตอร์ การผสมผสานการทำงานของเครื่องมือเหล่านี้ทำให้ระบบ SHM นำข้อมูลจากสภาพแวดล้อมจริงมาทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] SHM จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับโครงสร้าง ตัวอย่างเช่นการสั่นของโครงสร้างที่แตกต่างจากการสั่นแบบปกติของโครงสร้าง (การสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ) จะสะท้อนถึงความผิดปกติของโครงสร้าง แต่ในบางครั้งการกระตุ้นให้เกิดการสั่นด้วยปัจจัยจากภายนอก (Force vibration) เช่น รถที่มีน้ำหนักมากเคลื่อนที่บนสะพาน ลมที่มีกำลังสูงปะทะกับโครงสร้าง ก็สามารถทำให้การสั่นของโครงสร้างแตกต่างออกไปจากปกติเช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงต้องหาวิธีในการกำจัดการสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

การวิเคราะห์ข้อมูลของโครงสร้างโดยใช้ข้อมูลความเร่ง สามารถทำได้หลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่นวิธี Natural excitation technique (NExT) และ Eigensystem realization algorithm (ERA) โดยทั้งสองวิธีนี้สามารถแปลงข้อมูลจากความเร่งของการสั่นของโครงสร้างเป็นความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างได้ ซึ่งความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงจะสะท้อนให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลง [6] และนอกจากนั้นทั้งสองวิธีนี้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยที่การทำงานร่วมกันของ NExT และ ERA จะสามารถกำจัดการสั่นที่เกิดปัจจัยภายนอกได้ เพื่อผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่แม่นยำและไม่เกิดการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อน [7] การรวมกันของทั้งสองเทคนิคนี้เป็นที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้กับระบบ SHM

ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ด้วยวิธีการ Finite element model (FEM) และทำการจำลองความเสียหายในระดับต่างๆ ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำแบบเคลื่อนที่ (Moving load) เพื่อนำมาใช้เป็นโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างด้วยวิธี NExT-ERA เพื่อยืนยันความสามารถของการประมวลผลด้วยวิธีดังกล่าว

## 1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อพัฒนากระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างสะพานแบบคานรูปกล่อง ด้วยเทคนิควิธี Natural Excitation technique (NExT) and The Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษานี้ได้นำเอาสะพานคานคอนกรีตรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ต่อเนื่อง 3 ช่วง มาใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองความเสียหายให้กับสะพาน และจำลองแรงเคลื่อนที่กระทำกับสะพาน เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความเสียหายด้วยวิธี NEX-T-ERA

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

- 1) สามารถพัฒนาเทคนิค NEX-T-ERA ให้มาประยุกต์ใช้ได้จริงกับโครงสร้างสะพานในการเฝ้าระวังและติดตามความเสียหาย
- 2) สามารถนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาต่อให้เป็นระบบ และสร้างโปรแกรมที่เป็นมาตรฐานและใช้งานได้อย่างสะดวก
- 3) สร้างความปลอดภัยและมั่นใจมากขึ้นในการใช้งานสะพานที่มีอายุค่อนข้างมาก
- 4) ทางองค์กรที่เป็นหน่วยงานสำหรับติดตามและซ่อมแซมสะพาน จะสามารถจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุดสำหรับการซ่อมแซมสะพานในแต่ละครั้ง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 สะพานในประเทศไทย

สะพานเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในโครงข่ายของทางหลวง เพื่อการขนส่งสินค้าและการเดินทางในประเทศ ปัจจุบันในประเทศไทยมีสะพานเป็นจำนวนมากกว่า 17,000 แห่งที่อยู่ในการดูแลของกรมทางหลวง [8] โดยทั่วไปแล้วการแบ่งประเภทของสะพานแบ่งได้หลายกรณี เช่น การแบ่งประเภทตามวัสดุของสะพาน หรือแบ่งตามลักษณะรูปร่างของโครงสร้างสะพาน เป็นต้น โดยการจำแนกประเภทของสะพานตามลักษณะรูปร่างสามารถแบ่งได้ดังนี้ [3]

##### 2.1.1.1 ระบบพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (Slab type)

สะพานประเภท Slab type จะมีลักษณะเป็นสะพานช่วงสั้น มีความยาวช่วง 5-10 เมตร มีความหนาของพื้นสะพานประมาณ 32-56 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพาน



รูปที่ 2.1 สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (Slab type)

### 2.1.1.2 ระบบพื้นสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I-girder)

สะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ มีลักษณะคล้ายกับตัวไอ เป็นคานที่ทำการหล่อจากโรงงานแล้วนำมาติดตั้ง ช่วงคานมีความยาวประมาณ 20-30 เมตร และความสูงประมาณ 120-170 เซนติเมตร



รูปที่ 2.2 สะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ

### 2.1.1.3 ระบบพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตัน (Plank girder)

มีลักษณะเป็นคอนกรีตอัดแรงแบบตันมีความสูงประมาณ 16-45 เซนติเมตร และความยาวประมาณ 5-12 เมตร



รูปที่ 2.3 สะพานแบบคอนกรีตอัดแรงแบบตัน (Plank girder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.1.4 ระบบพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box girder)

เป็นระบบสะพานที่ใช้กับสะพานช่วงสั้น โดยมีความยาวช่วงสูงสุดอยู่ที่ 20 เมตร เป็นคานที่ทำการหล่อจากโรงงานแล้วจึงนำมาก่อสร้าง



รูปที่ 2.4 สะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box girder)

#### 2.1.1.5 ระบบพื้นสะพานแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที (T-girder)

มีลักษณะคานเป็นรูปตัวที นิยมใช้ในช่วงความยาวสะพานประมาณ 10-30 เมตร โดยที่ส่วนมากมักก่อสร้างในรูปแบบของการหล่อในที่



รูปที่ 2.5 สะพานแบบคานคอนกรีตรูปตัวที (T-girder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

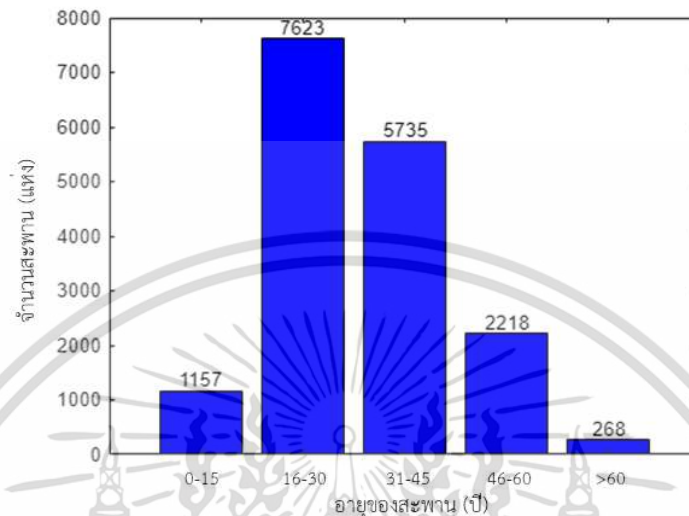
### 2.1.1.6 ระบบสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องหล่อสำเร็จรูป (Segmental box girder)

มีลักษณะเป็นคานคอนกรีตรูปกล่อง นิยมใช้กับสะพานที่มีระยะทางยาว ตัวอย่างเช่น ทางยกระดับ สะพานสำหรับรถไฟฟ้า เป็นต้น โดยช่วงความยาวของ segmental box girder จะยาวประมาณ 30-40 เมตร เป็นคานคอนกรีตหล่อสำเร็จจากโรงงานแล้วนำมาต่อกันที่หน้างาน ในปัจจุบันประเทศไทยได้นิยมนำสะพานรูปแบบนี้มาใช้ในหลายๆโครงการของรัฐ

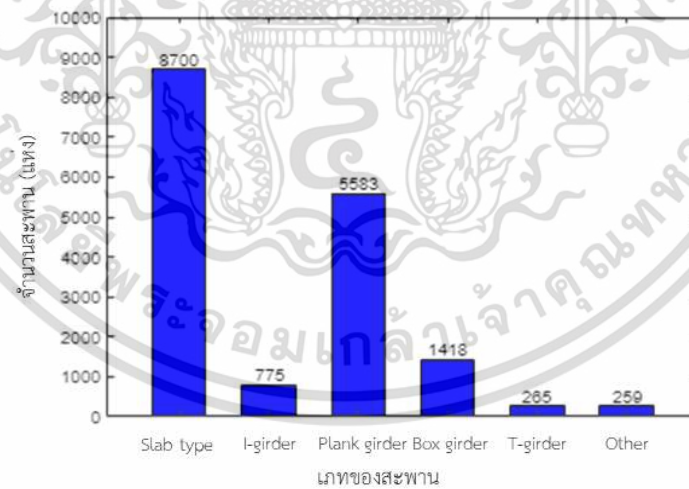


รูปที่ 2.6 สะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องหล่อสำเร็จรูป (Segmental box girder)

สะพานแต่ละแห่งมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชาชนในแต่ละพื้นที่ และในปัจจุบันสะพานมีอายุที่แตกต่างกันไปหลายช่วงแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสะพานและอายุของสะพานที่อยู่ในการดูแลของกรมทางหลวง



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสะพานกับประเภทของสะพานที่อยู่ในการดูแลของกรมทางหลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS)

คือระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพานช่วยบริหารจัดการข้อมูลต่างๆ [9] ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรม ตรวจสอบ คัดราคาซ่อม การประเมินอายุของสะพาน การรับน้ำหนักของสะพาน การจัดลำดับความสำคัญของสะพานเพื่อเสนอของบประมาณ และการใช้ข้อมูลเชิงบริหาร โดยประโยชน์ของ BMMS มีดังต่อไปนี้

1. ด้านประสิทธิภาพในการบริหารจัดการ
  - รวดเร็ว ไม่ซ้ำซ้อน เพิ่มประสิทธิภาพ
  - เพิ่มความปลอดภัยสะพานบนโครงข่ายทางหลวง
2. ด้านการบริหารงบประมาณ
  - ได้ภาพรวมการซ่อมบำรุงรักษา
  - มีข้อมูลสนับสนุนที่มาของงบ เช่น ค่าซ่อมสะพาน
  - บริหารงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพ
  - แจกแจงและเปรียบเทียบงบประมาณ

### 2.1.2.1 ขั้นตอนของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน



#### 1. ข้อมูล INPUT

ข้อมูลทั่วไปของสะพาน เช่น ตำแหน่งที่ตั้ง, ปริมาณการจราจร, ข้อมูลที่ตั้ง, ปีที่สร้าง

- ข้อมูลการตรวจสอบสะพาน เช่น รูปถ่ายลักษณะชิ้นส่วนสะพาน,
- ข้อมูลลักษณะเฉพาะสะพาน เช่น ความยาวสะพาน, จำนวนช่วงสะพาน, ความกว้าง
- ข้อมูลประมาณราคาค่าซ่อม เช่น ราคาน้ำมัน, ราคาค่าแรง, ราคาวีสดุ

#### 2. กระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Model การเชื่อมความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน
- Model อายุที่เหลือของสะพาน
- การคิดราคาซ่อมแซมรายปีตามราคาวัสดุที่เปลี่ยนไป
- การคิดราคาค่าขนส่งตามระยะทางจริง
- การจัดลำดับความสำคัญของสะพาน

### 2.1.2.2 การตรวจสอบสะพาน (Inspection)

ระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานภายหลังการก่อสร้างหรือการเปิดใช้งาน สะพานประกอบด้วย กระบวนการทำงานต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่การวางแผนการตรวจสอบ การตรวจสอบ การวางแผนการ ซ่อมแซม การซ่อมแซม และการปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้าง เป็นวงจรต่อเนื่องและสนับสนุนซึ่งกันและกันด้วยระบบ ฐานข้อมูลเพื่อใช้พิจารณา ประกอบการดำเนินการ โดยระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานที่มีประสิทธิภาพนั้นมีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้การดำเนินการต่าง ๆ ทุก ๆ ขั้นตอนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เป็นไปได้อย่างมีความเหมาะสม รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณ ทั้งนี้เพื่อความมั่นคง แข็งแรงของสะพาน ตลอดจนความปลอดภัยของผู้ใช้บริการสะพาน ผู้ที่เกี่ยวข้องในแต่ละ ส่วนของ

การตรวจสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน ประกอบด้วยขั้นตอน และรายละเอียดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบ และขั้นตอนที่ทำการตรวจสอบ [1] ผู้ตรวจสอบควรจะต้องมีความรู้ความชำนาญในวิธีการ ตรวจสอบ และความเข้าใจทางด้านพฤติกรรมสะพาน การตรวจสอบ สามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะตามความถี่ในการตรวจสอบดังนี้

1.การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection) เป็นการตรวจสอบตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด เช่น การตรวจสอบประจำเดือน หรือการตรวจสอบประจำปี เพื่อให้ทราบถึงสภาพของสะพานในช่วงเวลาต่าง ๆ หากสะพานเริ่มเกิดความเสียหาย จะได้มีมาตรการตรวจสอบความเสียหายเพิ่มเติม ซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาอื่น ๆ ได้ทัน่วงที โดยทั่วไปมักจะเป็นทดสอบทางกายภาพที่ใช้ระยะเวลาและงบประมาณต่อหนึ่งสะพานไม่มากนัก

2.การตรวจสอบพิเศษ(Special Inspection) เป็นการตรวจสอบเพิ่มเติมภายหลังที่ทราบว่าสะพานเกิดความเสียหายขึ้น เป็นการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดความเสียหาย ติดตามการขยายตัวของความเสียหาย หรือประเมินความสามารถของสะพานอย่างละเอียด เป็นต้น การตรวจสอบพิเศษในบางกรณีเป็นวิธีเฉพาะ มีข้อควรระวังและเทคนิควิธีการที่ละเอียดซับซ้อน จำเป็นต้องตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

3.การตรวจสอบฉุกเฉิน(Emergency Inspection) เป็นการตรวจสอบเมื่อมีเหตุการณ์ฉุกเฉินเกิดขึ้นกับสะพานเช่น ไฟไหม้ สารเคมีรั่วไหล รถยนต์หรือเรือชนสะพาน หรือแผ่นดินไหว เป็นต้น การตรวจสอบแบบฉุกเฉินนี้จะกระทำไปพร้อม ๆ กับมาตรการบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวสะพาน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อประชาชนที่อยู่โดยรอบหรือต้องใช้สะพานในการสัญจรน้อยที่สุด ประกอบด้วยวิธีการตรวจสอบประเมินความเสียหายในหลายระดับขึ้นอยู่กับสภาพความร้ายแรงของความเสียหาย

### 2.1.3 ระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง (Structural health monitoring, SHM)

ระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง (Structural health monitoring, SHM) เป็นระบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างแบบต่อเนื่อง และตลอดเวลา โดยจะสามารถทำการเก็บข้อมูลของโครงสร้างได้ตลอดเวลาเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของโครงสร้าง และสามารถช่วยให้ทำการวางแผนการซ่อมบำรุงได้ทันก่อนที่ความเสียหายของโครงสร้างจะขยายตัวจนไม่สามารถซ่อมแซมได้ จากงานวิจัย [5] ระบบ SHM ถูกใช้ในโครงสร้างทางวิศวกรรมหลายประเภท ตั้งแต่สะพานไปจนถึงเครื่องบิน SHM เป็นระบบที่สามารถนำเทคโนโลยีด้านต่างๆประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ ระบบสื่อสารไร้สาย เครื่องมือวัดต่างๆ และคอมพิวเตอร์

### 2.1.4 Accelerometer Sensor

Accelerometer คือ เครื่องมือวัดความเร่ง ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ คำนวณได้ในมือถือสมาร์ทโฟนทั่วไป ตัวอย่างการใช้งานเช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกมส์ ล้วนเป็นคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดมาในเครื่อง

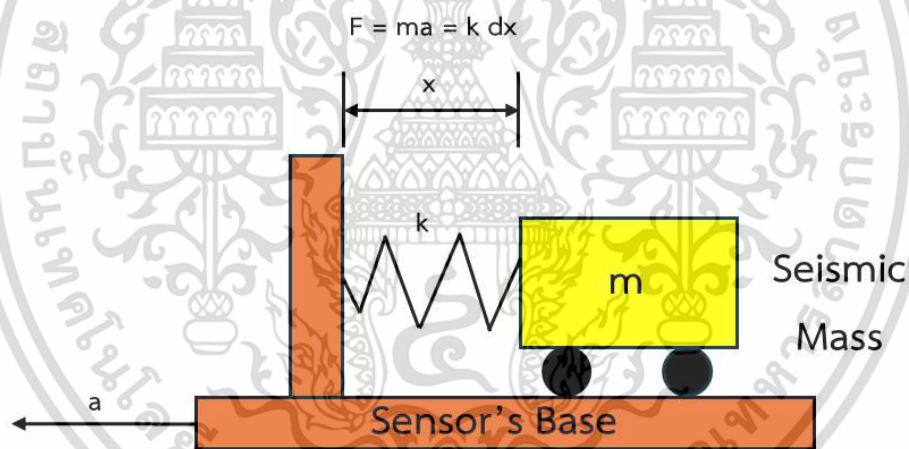
โครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีก

ครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง [11]

มิเตอร์วัดความเร่งนี้โดยหลักๆแล้วจะแบ่งเป็น 2 ชนิด

1. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซมิกแมส (seismic mass accelerometer) มิเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการตรวจวัดระยะขจัดเชิงเส้นแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถอธิบายง่ายๆ ได้ก็คือ วัตถุชิ้นหนึ่งจะมีความเร่งได้ ก็จะต้องมีแรงมากระทำยังมีแรงมากระทำมาก ก็จะมีมีความเร่งมาก ในขณะที่เดียวกันแรงต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากด้วยนอกจากนี้เมื่อมีแรงมาทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ ก็จะมีระยะขจัด ซึ่งก็จะแปรผันตรงกับแรงที่มากระทำที่วัตถุ ยิ่งแรงมากระทำระยะขจัดยิ่งมาก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้นำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซมิกแมสในการตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุในเทอมของระยะขจัดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ seismic

จากรูป แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซมิกแมส โครงสร้างนี้มีมวล  $m$  ที่เรียกว่ามวลตรวจการสั่นไหว (seismic mass) ยึดติดอยู่กับสปริงที่มีค่า spring constant เท่ากับ  $k$  และมวลนี้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับได้ซึ่งหลักการทำงานก็ง่ายๆ ไม่ได้ซับซ้อนอะไร

เมื่อตัวเซนเซอร์ตัวนี้ถูกทำให้มีอัตราเร่งเกิดขึ้นจะส่งผลให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ออกไปจะเป็นระยะขจัดเท่ากับ  $x$  และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวมิเตอร์

ดังนั้นอัตราเร่ง  $a$  ของวัตถุสามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 2.1

$$a = x(k/m) \quad (2.1)$$

โดยที่  $a$  คือ อัตราเร่งของวัตถุ หน่วย เมตร/วินาที

$x$  คือ ระยะขจัดของมวล  $m$  หน่วย เมตร

$k$  คือ ค่าคงที่ของสปริง หน่วย นิวตัน/เมตร

$m$  คือ น้ำหนักของมวล  $m$  หน่วย กิโลกรัม

จากสมการดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า

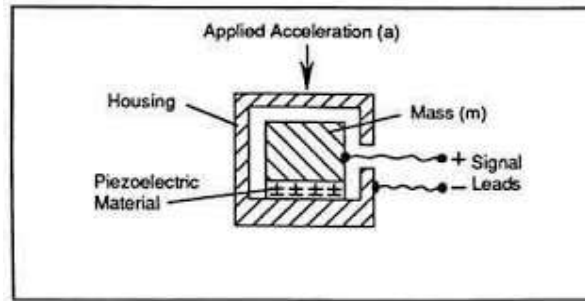
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะขจัดของมวล  $m$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าลดลง ทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ไปดันสปริง
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุหยุดลง ก็จะทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่กลับมาอยู่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่งอ้างอิง)

แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดระยะขจัดของมวล  $m$  ได้โดยอาศัยมิเตอร์อีกชนิดหนึ่ง คือ มิเตอร์วัดระยะขจัดเชิงเส้น (LVDT, potentiometer)

## 2. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer)

คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric crystal) ถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในราวปี ค.ศ.1880 ซึ่งเจ้า piezoelectric crystal นี้มันมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อมันถูกแรงทางกลมากระทำ มันจะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมา โดยเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำนั้น ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้ได้ถูกดัดแปลงนำไปใช้สร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้เป็นแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับนาฬิกาข้อมือดิจิตอลที่เราใช้ทั่วไป และยังใช้สร้างมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย

โครงสร้างของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วย seismic mass ยึดติดกับ piezoelectric crystal และบรรจุอยู่ในตัวถังป้องกัน โดย piezoelectric crystal ที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ผลึกควอตซ์ และผลึกโซเดียมโปตัสเซียมตาเตรต (sodium potassium tartrate) เพราะมีความทนทานต่อแรงกระทำ และราคาไม่แพงมากนัก



รูปที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric

จากรูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer) สามารถอธิบายการทำงานง่ายๆ ได้ดังนี้

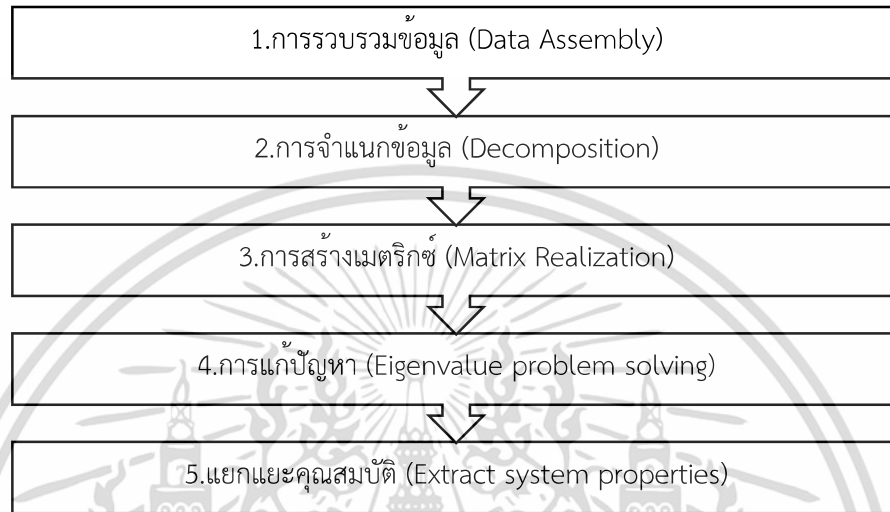
เมื่อ seismic mass (m) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) มันจะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับ piezoelectric crystal ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษของมันจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น และถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจรขยายประจุไฟฟ้า (charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์

มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดี แต่ในทางกลับกันก็จะมีผลตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง  $250,000 \text{ m.s}^{-2}$

### 2.1.5 Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

เป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบสุขภาพ โครงสร้าง ERA สามารถใช้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบ Modal และสร้างการรับรู้ของระบบโดยใช้การตอบสนองของโดเมนเวลา (multi-) input และ (multi-) data output ERA ถูกเสนอโดย Juang และ Pappa [11] และถูกนำมาใช้เพื่อระบุระบบโครงสร้างการบินและอวกาศเช่นยานอวกาศกาลิเลโอ , กังหัน, โครงสร้างพลเรือนและระบบอื่น ๆ อีกมากมาย ในวิศวกรรมโครงสร้าง ERA ใช้เพื่อระบุความถี่ธรรมชาติ, รูปร่างโหมดและอัตราส่วนการหน่วง มักใช้ ERA ร่วมกับ Natural Excitation Technique (NExT) เพื่อระบุพารามิเตอร์ของโมดัลจากการสั่นสะเทือนรอบข้าง เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้กับอาคารสะพานและระบบโครงสร้างอื่น ๆ อีกมากมาย ในด้านการติดตามตรวจสอบสุขภาพเชิงโครงสร้าง ERA และเทคนิคการระบุตัวตนอื่น ๆ มีบทบาทสำคัญในการพัฒนารูปแบบของโครงสร้างจากข้อมูลการทดลอง การแทนค่าสถานะพื้นที่หรือพารามิเตอร์ modal ใช้สำหรับการวิเคราะห์

เพิ่มเติมและระบุความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยใช้ Natural frequencies, mode shapes และ damping ratios [12]

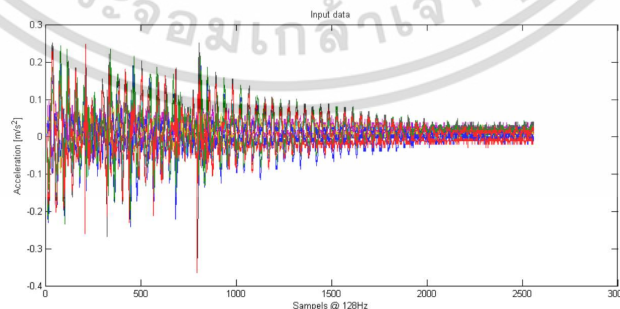


รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA

ลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

#### 1. การรวบรวมข้อมูล (Data Assembly)

เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการวัดตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นจะนำข้อมูลมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ Hankel Matrix และ Shift Hankel Matrix



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะนำข้อมูลมาสร้างเมทริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือเมทริกซ์จัตุรัสที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว ตัวอย่างดังสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$\text{Data} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_{n+k+1}]$$

$$\text{Hankel Matrix [H0]} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_n \\ y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n+1} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{n+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_n & y_{n+1} & y_{n+2} & \dots & y_{n+k} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\text{Shift Hankel Matrix [H1]} = \begin{bmatrix} y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n+1} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{n+2} \\ y_4 & y_5 & y_6 & \dots & y_{n+3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n+1} & y_{n+2} & y_{n+3} & \dots & y_{n+k+1} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

## 2. การจำแนกข้อมูล (Decomposition)

จะเป็นการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) คือ เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกมาให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่เท่ากันจำนวน 3 เมทริกซ์ ยกตัวอย่างเช่น มีเมทริกซ์จัตุรัส A ขนาด  $N \times N$  จะแยกออกเป็น เมทริกซ์ U, V และ D ซึ่ง  $A = UDV^T$  โดยที่  $V^T$  คือ ทราานเวิร์สเมทริกซ์ของเมทริกซ์ V

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V} \end{pmatrix}^T \quad (2.4)$$

$$\text{SVD (A)} = [U D V]. \quad (2.5)$$

$$\text{SVD (A)} = \lambda_1 U_1 V_1^T + \lambda_2 U_2 V_2^T + \dots + \lambda U V \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = UDV^T \quad (2.7)$$

### 3. การสร้างเมตริกซ์ (Matrix Realization)

เมตริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือเมตริกซ์จัตุรัสที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว พบว่า

$$P = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^n \end{bmatrix} \quad Q = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^nB] \quad (2.8)$$

### 4. การแก้ปัญหา (Eigenvalue problem solving)

เมื่อแก้ปัญหาก็ได้ว่า

$$\text{Eigenvalue} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (2.9)$$

$$\text{Eigenvectors} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (2.10)$$

### 5. แยกแยะคุณสมบัติ (Extract system properties)

$$\text{จาก Eigenvalue} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (2.11)$$

$$\text{Eigenvectors} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (2.12)$$

จะได้ว่า

$$\lambda_{c(i)} = \ln(\lambda_i)/dt \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{Natural frequency} = |\lambda_{c(i)}| \quad (2.14)$$

### 2.1.6 Natural Excitation Technique (NExT)

Natural Excitation Technique (NExT) ถูกเสนอโดย James และ Carne ถูกนำมาใช้เพื่อระบุชิ้นส่วนไบแก๊สกันก๊าซความเร็วสูง ในสภาพการทำงานภายใต้ Natural frequencies และ damping ratios ซึ่งขึ้นอยู่กับทฤษฎีของฟังก์ชัน cross-correlation โดยการประมวลผลของฟังก์ชัน cross-correlation ที่ได้รับมาแทนฟังก์ชัน impulse response ในวิธีการระบุพารามิเตอร์โมดอลในโดเมนเวลาแบบดั้งเดิมภายใต้การกระตุ้นของ white noise

Natural excitation technique (NExT) [8] ถูกนำมาใช้ครั้งแรกสำหรับการทดสอบโมดอลของกังหันลมที่อยู่ภายใต้แรงกระตุ้นจากลม และวิธีการนี้ถูกนำมาศึกษาหลายครั้ง โดยพิจารณาโครงสร้างอิสระหลายระดับที่ถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 2.15

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = F(t) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $y(t)$  คือเวกเตอร์ของการกระจัดที่เวลา  $t$ ,  $F(t)$  คือเวกเตอร์ของแรงในแต่ละช่วงเวลา  $M$ ,  $C$  และ  $K$  คือเมทริกซ์ของมวล ตัวหน่วง และค่าความแข็งของโครงสร้าง (Stiffness) ตามลำดับ และ  $(\bullet)$  เป็นตัวระบุอนุพันธ์เทียบกับเวลา สมมติว่าอินพุตเป็นการกระตุ้นจาก White noise จะแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชัน Cross-correlation ระหว่างเวกเตอร์ความเร่งกับสัญญาณความเร่ง  $R_{\ddot{y},\ddot{y}_i}(\tau) = 0$

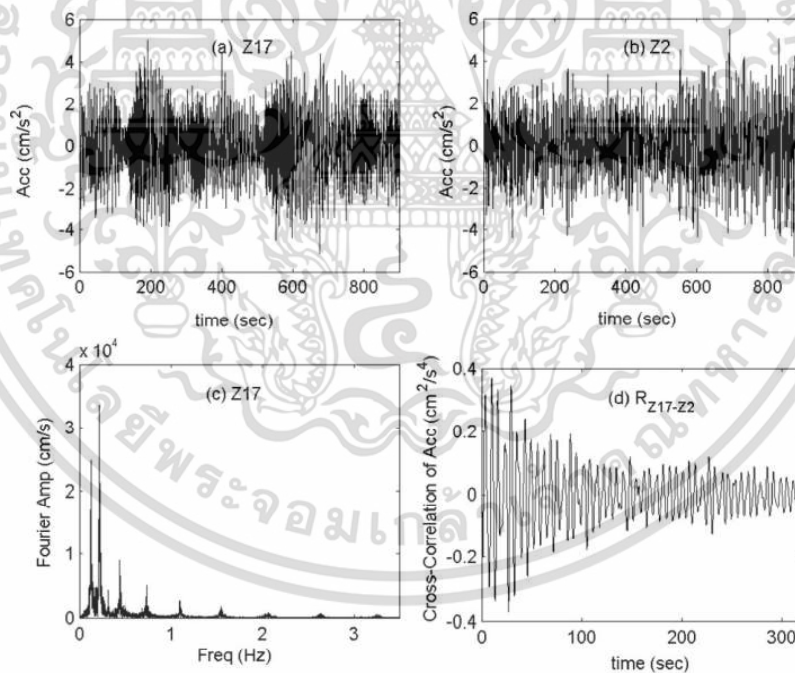
$$MR\ddot{y}_i(\tau) + CR\dot{y}_i(\tau) + KR\ddot{y}_i(\tau) = 0 \quad (2.16)$$

สมการที่ 2.16 นี้มีรูปแบบเดียวกับสมการเชิงอนุพันธ์เอกพันธ์ของการเคลื่อนที่และบอกเป็นนัยว่าฟังก์ชันสหพันธ์  $R\ddot{y}_i(\tau)$  มีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณของการสั่นแบบอิสระของโครงสร้างซึ่งฟังก์ชัน cross-correlation สามารถประมาณได้โดยใช้สองวิธีที่แตกต่างกัน วิธีแรกเป็นขั้นตอนโดยตรง และอีกวิธีคือผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transforms, FFTs) โดย

ในขั้นตอนโดยตรงจะใช้ข้อมูลโดเมนเวลาในขณะที่เป็นการประมาณค่า และวิธี FFTs ต้องคำนวณฟังก์ชันความหนาแน่นของสเปกตรัม พิจารณำบันทึกความเร่งแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งฟังก์ชัน cross-correlation ระหว่างสองช่องสัญญาณของความเร่ง  $i$  และ  $j$  ถูกประมาณโดยใช้วิธีการโดยตรงโดยใช้สมการที่ 2.17 ดังแสดง

$$\ddot{y}_i \ddot{y}_j(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{l=1}^{L-k} \ddot{y}_i(l) \ddot{y}_j(l+k) \quad (2.17)$$

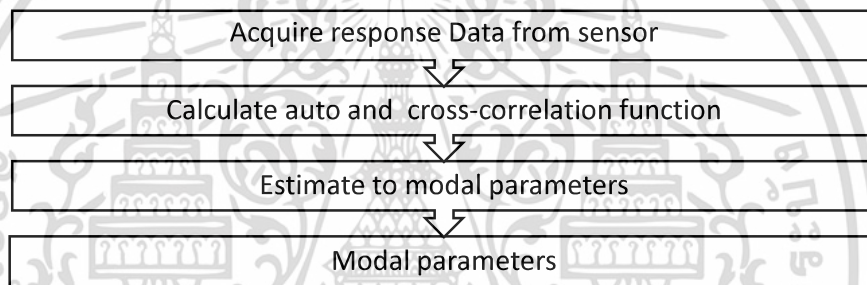
เมื่อ  $\Delta t$  และ  $L$  คือการเปลี่ยนแปลงของเวลาและจำนวนจุดทั้งหมดของความเร่งที่บันทึกตามลำดับ วิธีที่สองในการประมาณฟังก์ชัน correlation ประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสามารถทำได้โดยง่ายโดยวิธีของ Welch ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เช่น โปรแกรม Matlab



รูปที่ 2.13 การตอบสนองการสั่นแบบอิสระได้มาจากการใช้ NExT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

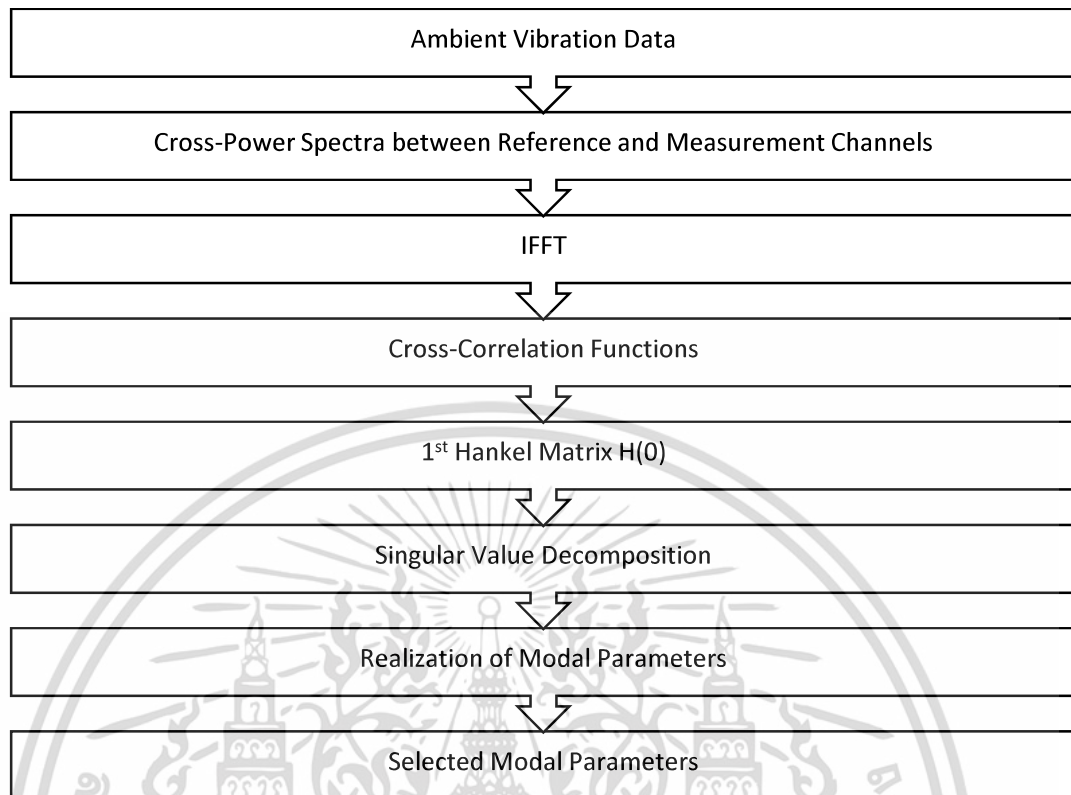
ในกระบวนการนี้ การบันทึกเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกข้อมูล และความหนาแน่นของสเปกตรัมจะถูกคำนวณโดยการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของสเปกตรัม FFT ของแต่ละบล็อกข้อมูล ผู้วิเคราะห์ควรกำหนดจำนวนจุดสำหรับ FFT จำนวนจุดข้อมูลที่ทับซ้อนกันระหว่างแต่ละบล็อก และความยาวเร็กคอร์ดหรือจำนวนบล็อกสำหรับการคำนวณ นอกจากนี้ ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องตัดสินใจว่าควรใช้ช่องอ้างอิง (หรือช่องสัญญาณ) ใดในการคำนวณฟังก์ชัน cross-correlation และประเภทของฟังก์ชัน tapering (เช่น Hanning หรือ Hamming) ที่ใช้สำหรับแต่ละบล็อกข้อมูล สิ่งสำคัญคือต้องระบุว่าจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่เป็นฟังก์ชัน cross-correlation มีเท่ากับจำนวนจุดที่ใช้สำหรับ FFT และความถี่ในการสุ่มตัวอย่างจะเท่ากับความถี่การสุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึก โดยมีลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT

### 2.1.7 Natural Excitation Technique - Eigensystem Realization Algorithm (NExT-ERA)

การระบุโมดอลโดยใช้ NExT และ ERA มีสามขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือข้อมูลการกระตุ้นโดยรอบจะได้รับการประมวลผลด้วย NExT เพื่อรับสัญญาณที่มีลักษณะเดียวกันกับข้อมูลการสั่นสะเทือนอิสระ ยกตัวอย่างพารามิเตอร์ เช่น จำนวนจุดสำหรับการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFTs) และความถี่การสุ่มตัวอย่างของข้อมูลมีความสำคัญสำหรับขั้นตอนนี้ ขั้นตอนที่สอง ERA จะใช้เพื่อให้ได้แบบจำลองตัวเลขของระบบในรูปแบบคงที่โดยอิงจากสัญญาณการสั่นสะเทือนอิสระนี้ ในที่นี้จำนวนโหมดการสั่นสะเทือนที่คาดหวัง และจำนวนแถวและคอลัมน์ของเมทริกซ์ Hankel เป็นพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่อาจส่งผลต่อกระบวนการระบุโมดอล และขั้นตอนสุดท้าย ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างโหมด และอัตราส่วนการหน่วง จะคำนวณจากแบบจำลองตัวเลขที่ระบุ โดยมีลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT-ERA ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT-ERA

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Natural Excitation Technique – Eigensystem Realization Algorithm (NExT-ERA)

Kordkheili et al. [7] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Experimental identification of closely spaced modes using NExT-ERA โดยมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยเพื่อประเมินความแม่นยำของการทำงานร่วมกันระหว่าง ERA และ NExT ในโดเมนของเวลา ในการแยกโหมดที่ใกล้เคียงกัน โดยที่มีสัญญาณรบกวนการแยกโหมด นอกจากนี้ยังใช้วิธี NExT-ERA ในการทดสอบแยกโหมดของแผ่นที่มีรูปร่างสมมาตร ซึ่งมีความยากในการแยกโหมด และในการทดสอบสุดท้าย จะทำการแยกโหมดของแผ่นและวงแหวนพูลส์ที่มีโหมดใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาความแม่นยำของวิธี NExT-ERA ผลสรุปของงานวิจัยนี้พบว่า ภายใต้งานการทดสอบต่างของผู้วิจัย ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบโหมดที่ซ้ำกันของโครงสร้างถูกแยกออกด้วยความแม่นยำของวิธี NExT-ERA จึงสรุปได้ว่า วิธี NExT-ERA เป็นวิธีการที่มีความแม่นยำในการแยกความถี่ธรรมชาติและโหมดจากสัญญาณความถี่บนโดเมนของเวลา

Caicedo [13] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Practical guidelines for the natural excitation technique (NExT) and the eigensystem realization algorithm (ERA) for modal identification using ambient vibration โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการแนะนำการใช้วิธี NExT-ERA ในการระบุโมดอลของโครงสร้าง โดยเน้นไปที่การเลือก และปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้ผลลัพธ์ของการระบุโมดอลเป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ วิธีการระบุโมดอลของโครงสร้างมีขั้นตอนหลักๆ คือการประมวลผลจากข้อมูลสัญญาณการสั่นจากสภาพแวดล้อมด้วยวิธี NExT เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณการสั่นแบบอิสระ จากนั้นใช้วิธี ERA เพื่อให้ได้ค่าโมดอลของระบบและค่าคงที่ จากนั้นจึงจะคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ รูปร่างโหมด และอัตราการสั่นจากโมดอลที่ระบุได้ ผลสรุปของงานวิจัยฉบับนี้กล่าวว่า ขั้นตอนและพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการระบุโมดอลของโครงสร้างโดยวิธี NExT และ ERA ให้มีประสิทธิภาพมีดังนี้ 1)การเลือกบันทึกข้อมูล 2) คำนวณฟังก์ชันความสัมพันธ์แบบข้าม (cross-correlation functions) 3)ระบุเมตริกซ์ของระบบ 4)การคำนวณโมดอลพารามิเตอร์ ความยาวการบันทึก จำนวนของจุดสำหรับ FFT และการบันทึก ตัวอย่างข้อมูลความถี่ที่มีผลต่อการคำนวณของฟังก์ชันความสัมพันธ์แบบข้าม จำนวนของแถวและหลักของ Hankel เมตริกซ์ จำนวนของโหมดที่มีความสำคัญต่อการระบุโมดอลพารามิเตอร์ของระบบเมตริกซ์ที่ใช้วิธี ERA

### 2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักของยานพาหนะ

Linda Kaplan [14] ได้ทำการศึกษาเรื่อง AASHTO Vehicle live loading โดยมีเนื้อหา กล่าวถึงการใช้น้ำหนักบรรทุกทุกในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งกล่าวถึงความ เป็นมาตั้งแต่อดีตในปี 1870 ในการนำน้ำหนักบรรทุกทุกมาใช้ในการออกแบบจนถึงปัจจุบัน โดยค่าที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบันและได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ โดยที่น้ำหนักบรรทุกทุก 3 เพลา (Truck load) ตามมาตรฐานนี้มีน้ำหนักอยู่ที่ 325 กิโลนิวตัน

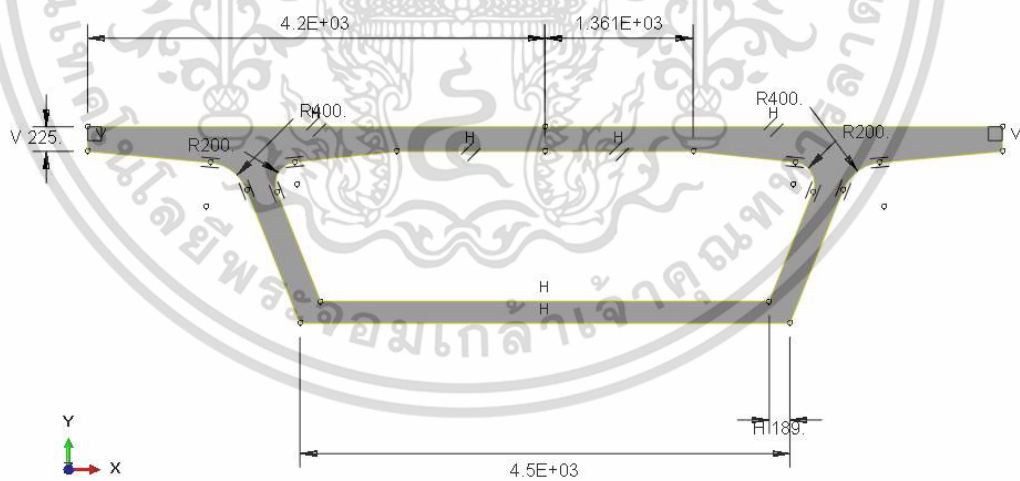
น้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ที่นิยมนำมาใช้ในการทดสอบ ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกทุก HL-93 โดยมีน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมด 325 กิโลนิวตัน [15] ซึ่งมีค่าเทียบเคียงกับ ยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว ที่ระบุโดยกรมทางหลวงชนบท โดยยานพาหนะนั้นก็คือ ยานพาหนะที่มี 4 เพลา 8 ล้อ ยาง 12 เส้น ชนิดเพลาหน้า [16] มีน้ำหนักรวมประมาณ 300 กิโลนิวตัน

# บทที่ 3

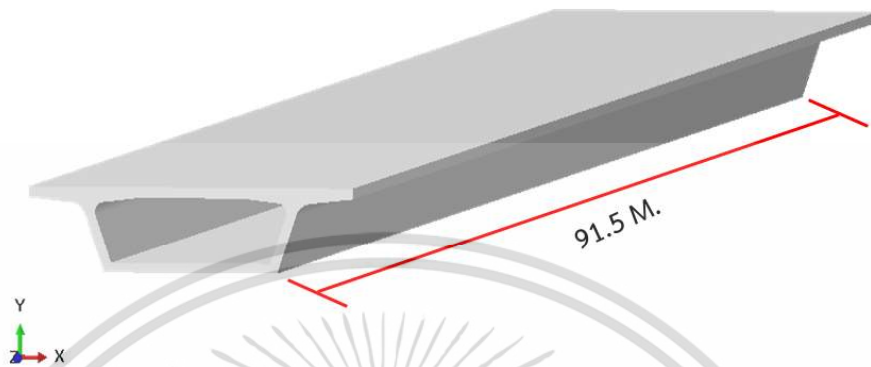
## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ลักษณะของสะพาน

สะพานที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Finite Element Model (FEM) โดยโปรแกรม Abaqus [17] และแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์มีลักษณะเป็นสะพานคานคอนกรีตรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ซึ่งข้อมูลสะพานที่นำมาใช้อ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO Standard [18] โดยที่สะพานมีความยาว 30.50 เมตร ต่อหนึ่งช่วงความยาวของสะพาน ทั้งหมดจำนวน 3 ช่วง ความยาวรวมทั้งหมดคือ 91.50 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยในการงานวิจัยนี้ใช้ลักษณะของสะพานที่เป็นคอนกรีตล้วน โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 1 [19] โดยการติดตั้งมาตรวัดความเร่ง จะติดตั้งที่ใต้พื้นถนนบริเวณกึ่งกลางของเลนถนน โดยติดตั้งทุกๆ 3.05 เมตรตลอดความยาวของคานดังแสดงในรูปที่ 3.3 เนื่องจากสะพานมักจะเกิดรอยแตกร้าวในบริเวณดังกล่าว และมีค่าของการโก่งตัวที่สูง และเป็นตำแหน่งที่ง่ายต่อการติดตั้งมาตรวัด



รูปที่ 3.1 หน้าตัดของแบบจำลองสะพาน



รูปที่ 3.2 ด้านยาวของแบบจำลองสะพาน



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์

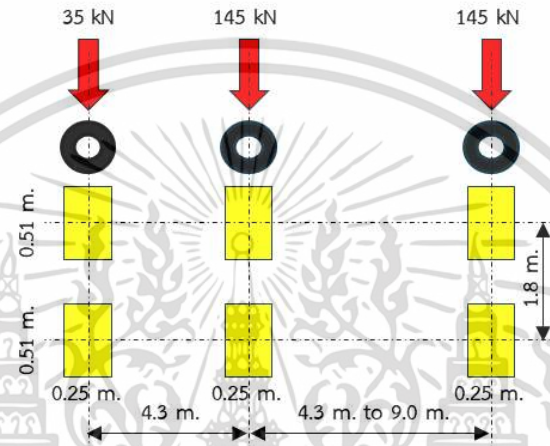
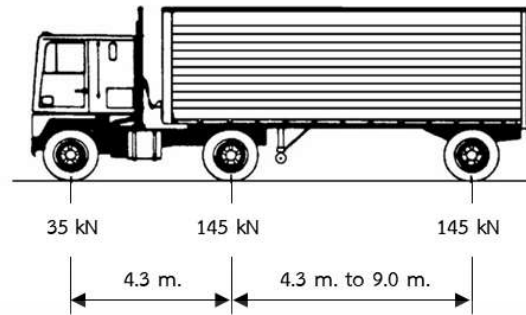
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุ

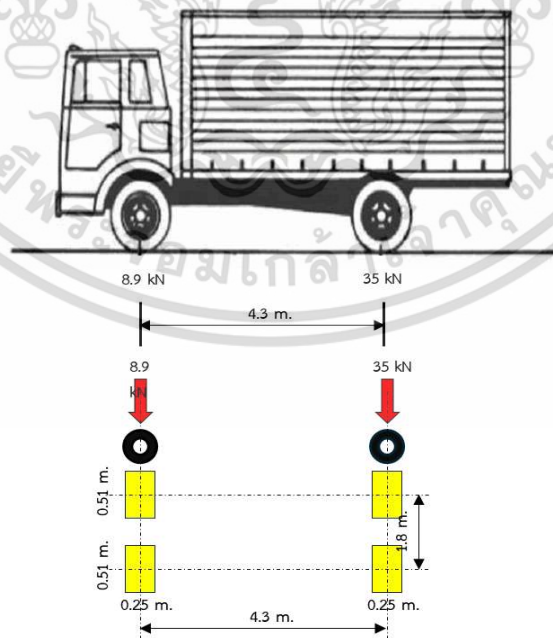
ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย
1	Elastic modulus	29.81	GPa
2	Poisson's ratio	0.20	-
3	Density	2400.00	kg/m <sup>3</sup>

### 3.2 น้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบ

การจำลองน้ำหนักและตำแหน่งของน้ำหนักที่กดลงบนสะพานของรถบรรทุกทดสอบ HL-93 จะมีตำแหน่งและน้ำหนักที่กดลงบนพื้นจำนวน 6 จุด ส่วนรถบรรทุกทดสอบ H-5 จะมีน้ำหนักกดลงบนพื้นจำนวน 4 จุด โดยที่ในแต่ละจุดของน้ำหนักที่กดลงบนพื้นของ HL-93 จะมีพื้นที่ของน้ำหนักที่กดคือ กว้าง 0.25 เมตร และยาว 0.51 เมตร โดยที่พื้นที่คู่หน้าสุดจะมีน้ำหนักกดอยู่ที่ 35 กิโลนิวตันในแต่ละพื้นที่ พื้นที่คู่ถัดมามีน้ำหนักกด 145 กิโลนิวตัน และพื้นที่คู่หลังสุดมีน้ำหนักกด 145 กิโลนิวตัน โดยที่พื้นที่ของน้ำหนักที่กดลงบนถนนคู่แรกมีระยะห่างจากคู่ที่สองอยู่ 4.30 เมตร และระยะห่างของพื้นที่ที่สองกับพื้นที่ที่สามมีระยะห่าง 4.30 เมตร เช่นเดียวกันดังแสดงดังรูปที่ 3.4 และในส่วนของรถบรรทุกทดสอบ H-5 จะมีพื้นที่ของน้ำหนักที่กดคือ กว้าง 0.25 เมตร และยาว 0.51 เมตร โดยที่พื้นที่คู่หน้าสุดจะมีน้ำหนักกดอยู่ที่ 8.9 กิโลนิวตันในแต่ละพื้นที่ พื้นที่คู่ถัดมามีน้ำหนักกด 35 กิโลนิวตัน ดังแสดงดังรูปที่ 3.5 มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน [15] โดยการจำลองน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบ HL-93 และ H-5 นั้นเป็นการจำลองโดยใช้วัตถุที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยม เท่ากับขนาดของพื้นที่ที่น้ำหนักกดลงบนพื้นถนน



รูปที่ 3.4 น้ำหนักที่กดลงบนพื้นของรถบรรทุกทดสอบ HL-93



รูปที่ 3.5 น้ำหนักรถที่กดลงบนพื้นของรถบรรทุกทดสอบ H-5

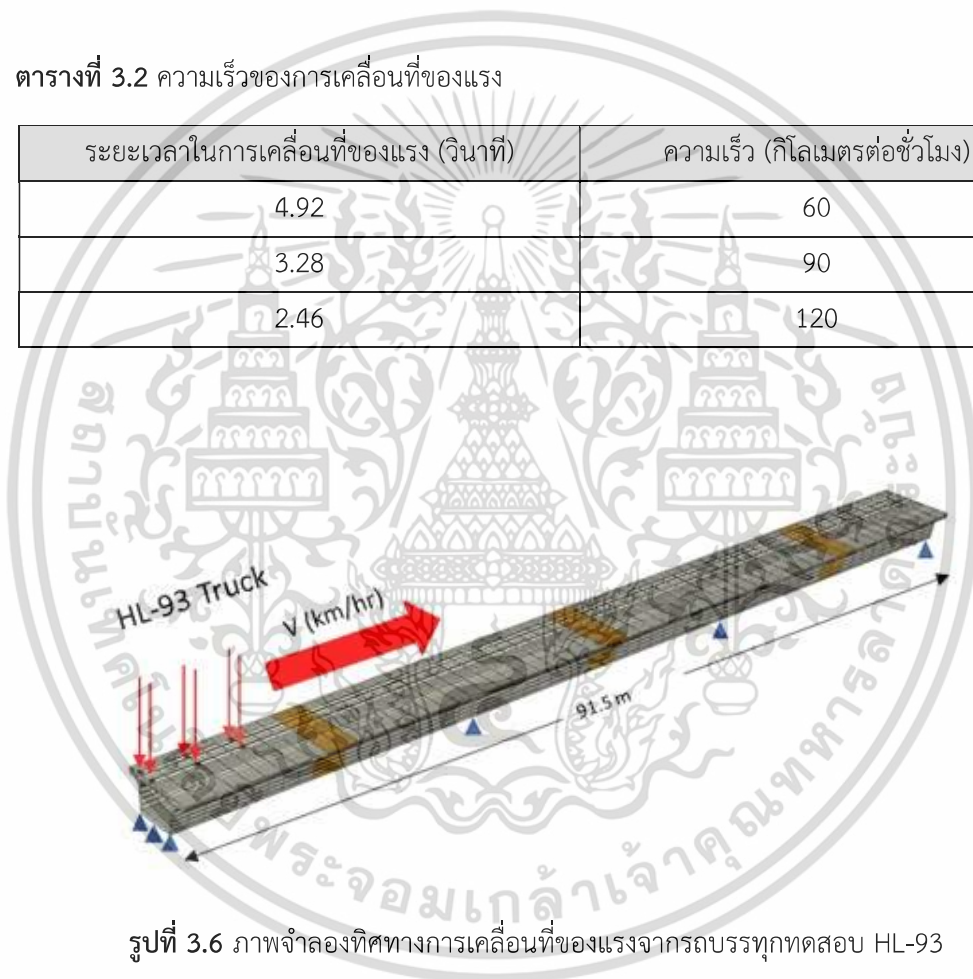
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 น้ำหนักเคลื่อนที่ (Moving load)

การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถบรรทุกทดสอบทำโดยวิธีการให้แรงเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดของแบบจำลองสะพาน ซึ่งจะทำการกำหนดเวลาให้กับการเคลื่อนที่ของน้ำหนัก และเนื่องจากความยาว 91.5 เมตร แต่ระยะทางที่กำหนดให้แรงเคลื่อนที่ใช้ระยะทางเพียง 82 เมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้เวลาที่กำหนดให้น้ำหนักเคลื่อนที่มาแปลงเป็นความเร็วในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแรง

ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของแรง (วินาที)	ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
4.92	60
3.28	90
2.46	120



รูปที่ 3.6 ภาพจำลองทิศทางของการเคลื่อนที่ของแรงจากรถบรรทุกทดสอบ HL-93

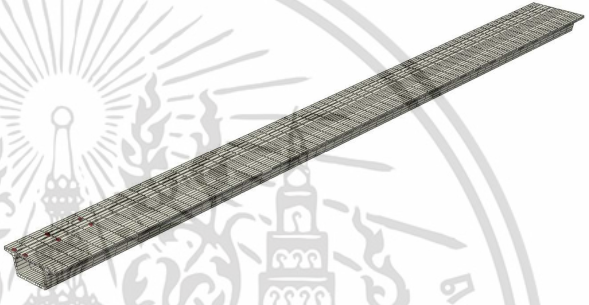
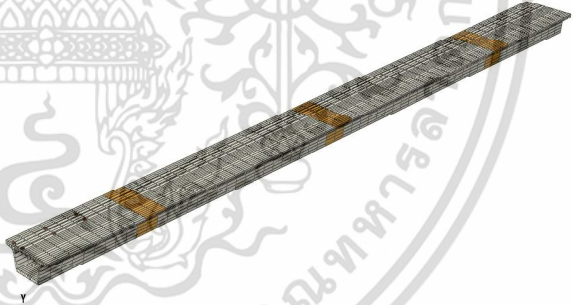

### 3.4 ความเสียหายของสะพาน

การจำลองความเสียหายของสะพานนั้น ทำโดยวิธีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของสะพานลง ในตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละช่วงความยาวของสะพาน โดยที่พื้นที่ที่ทำการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนั้น คิดเป็นร้อยละ 10 ของความกว้างของหนึ่งช่วงความยาวของสะพานหรือเท่ากับ 3.05 เมตร (หนึ่งช่วงความยาวของสะพานมีค่าเท่ากับ 30.50 เมตร) ดังตารางที่ 3.3 ซึ่งจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลงเป็นอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 เพื่อทำการสังเกตและเก็บข้อมูล และนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบ โดยมีกรณีศึกษาที่ต้องการศึกษาเป็นไปดังตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.3 ระดับความเสียหายของสะพาน

ระดับความเสียหาย (ลดโมดูลัสยืดหยุ่น)	ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย
0%	
25%	
50%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 กรณีศึกษาที่ต้องการทำการวิเคราะห์ภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบ HL-93

ลำดับ	Damage (Reduce Young's Modulus)	Velocity of Load (km./hr.)
1	0%	60
2	25%	60
3	50%	60
4	0%	90
5	25%	90
6	50%	90
7	0%	120
8	25%	120
9	50%	120

ตารางที่ 3.5 กรณีศึกษาที่ต้องการทำการวิเคราะห์ภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบ H-5

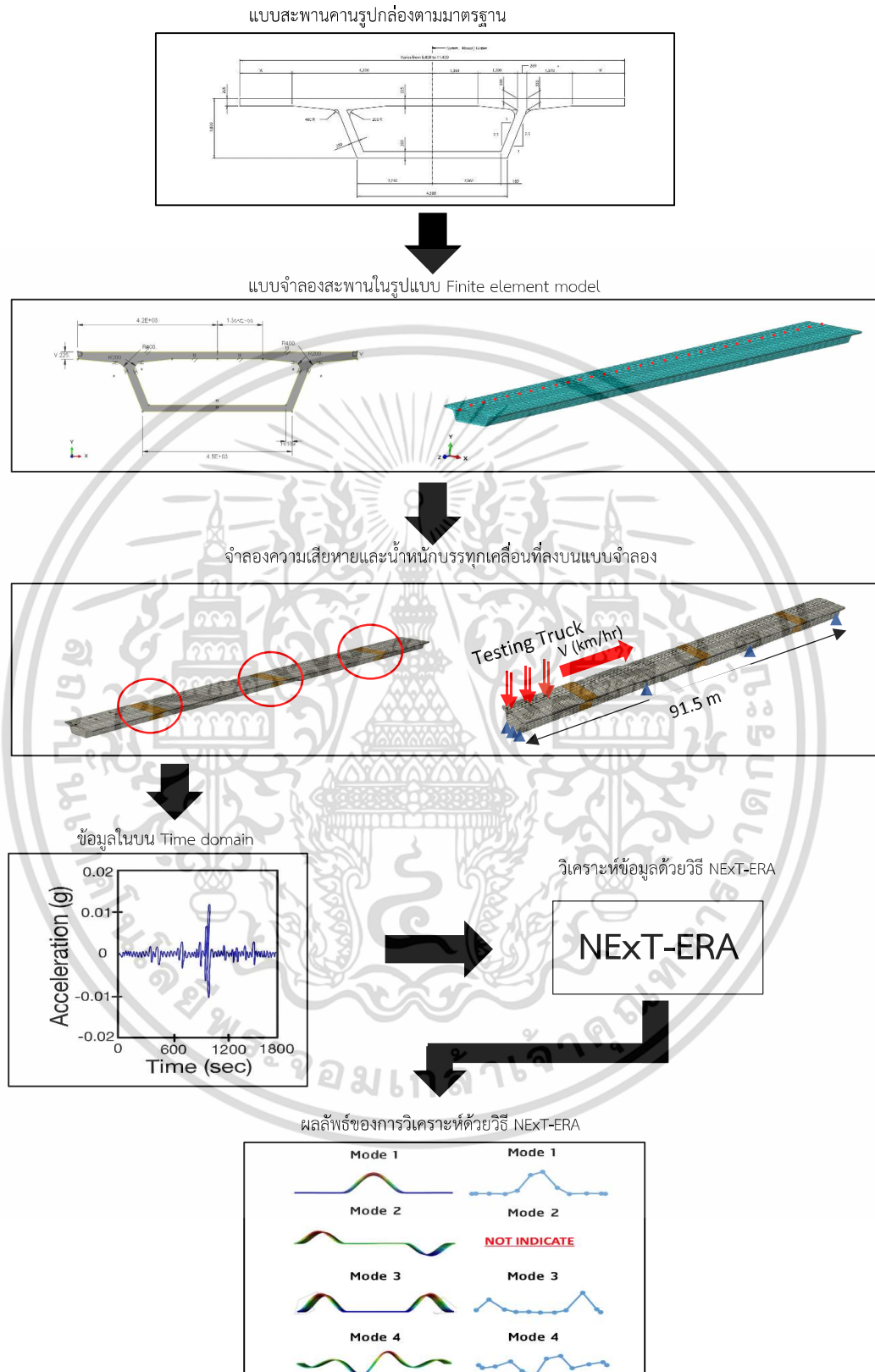
ลำดับ	Damage (Reduce Young's Modulus)	Velocity of Load (km./hr.)
1	0%	60
2	25%	60
3	50%	60
4	0%	90
5	25%	90
6	50%	90
7	0%	120
8	25%	120
9	50%	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.8 แผนภาพการเฝ้าระวังและติดตามความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

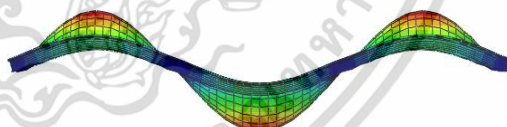

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์


#### 4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่องโดยที่ไม่มีผลกระทบจาก Force vibration

ในหัวข้อที่ 4.1 นี้จะเป็นการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ผลระหว่างวิธีการ Linear perturbation เปรียบเทียบกับวิธี NExT-ERA เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของวิธี NExT-ERA ว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลในกรณีอื่นๆได้หรือไม่ โดยกรณีตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบนี้จะกำหนดให้แบบจำลองอยู่ในสภาพของการสั่นแบบอิสระ (Free vibration) ปรากฏการสั่นที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแรงภายนอก (Force vibration) ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี Linear perturbation ของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี NExT-ERA ของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4.2 และผลการเปรียบเทียบของทั้งสองวิธีแสดงดังตารางที่ 4.3


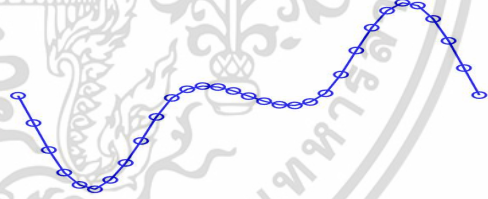
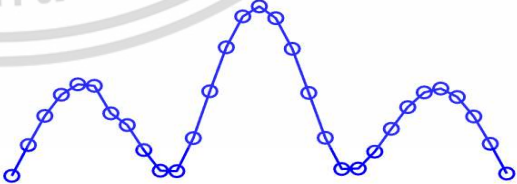
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี Linear perturbation

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่น
1	4.54	
2	4.88	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่น
3	5.39	

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี NEXT-ERA

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่น
1	4.49	
2	4.82	
3	5.33	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

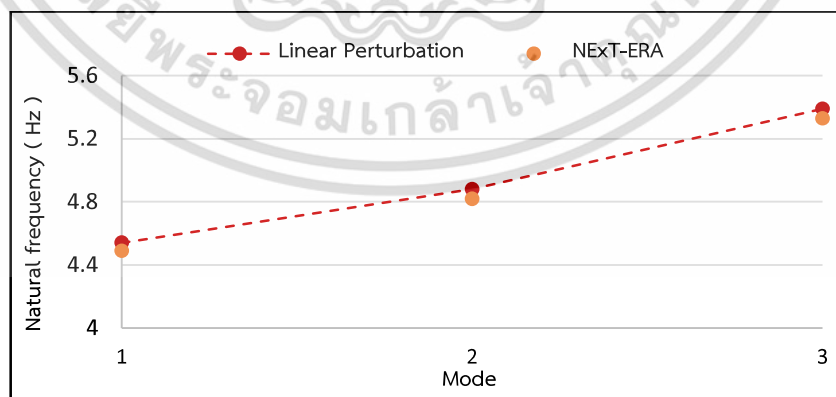
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ NEXT-ERA

โหมด	Linear perturbation (Hz)	NEXT-ERA (Hz)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	4.54	4.49	1.05
2	4.88	4.82	1.27
3	5.39	5.33	1.06

จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี NEXT-ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี Linear Perturbation ในกรณีต่างๆ

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง ภายใต้ผลกระทบจาก Force vibration (Moving load) เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางคาน ด้วยวิธี Linear perturbation และ NEXT-ERA

ทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง ภายใต้น้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบแบบเคลื่อนที่ทั้ง HL-93 และ H-5 เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวคาน



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่น ของวิธี Linear Perturbation และ NEXT-ERA

**ตารางที่ 4.4** ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี Linear perturbation

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
1	4.54	4.44	4.27
2	4.88	4.79	4.64
3	5.39	5.30	5.19

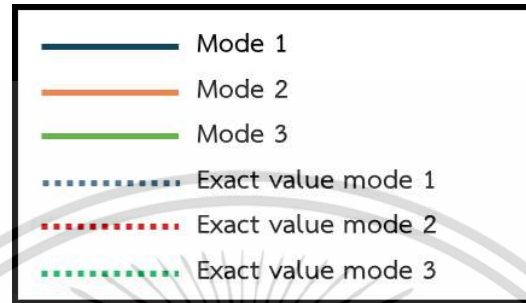
ทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวของสะพาน โดยที่มีการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบ HL-93 อยู่บนสะพานด้วยความเร็ว 60, 90 และ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี NExT-ERA ภายใต้แรงเคลื่อนจากรถบรรทุกทดสอบ HL-93

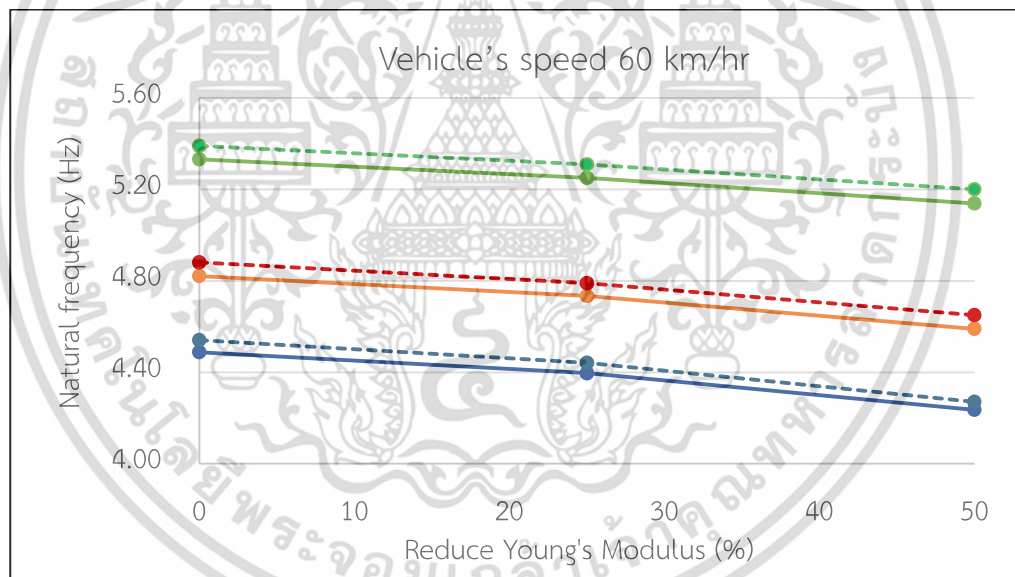
ความเร็ว กม./ชม.	โหมด	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
60	1	4.49	4.40	4.24
	2	4.82	4.73	4.59
	3	5.33	5.25	5.14
90	1	4.39	4.39	4.06
	2	4.74	4.79	4.23
	3	5.24	5.24	4.59
120	1	4.11	4.09	4.06
	2	4.49	4.39	4.23
	3	4.83	4.74	4.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

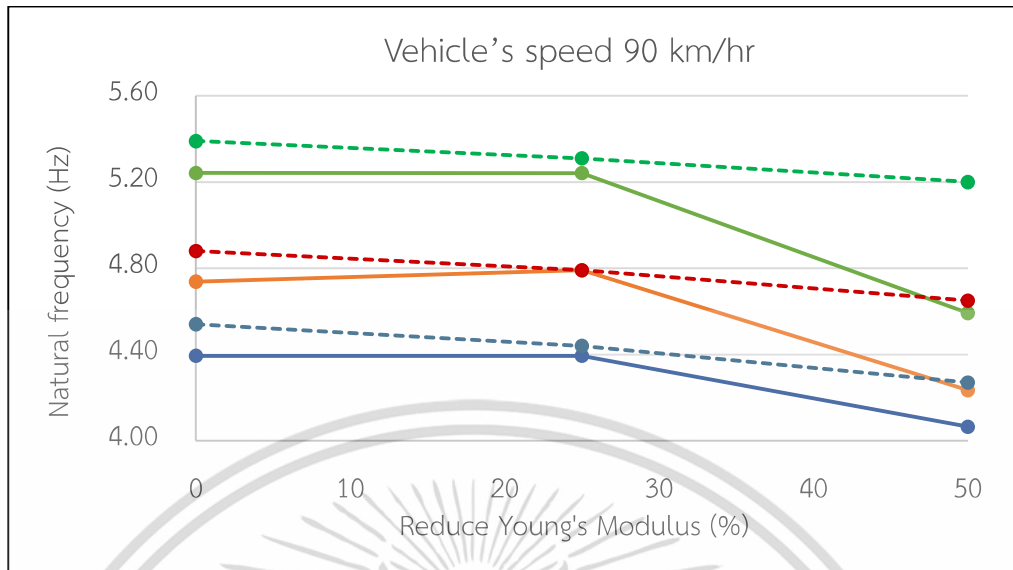
นำผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 4.6 มาทำกราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติของรถที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60, 90 และ 120 โดยที่เส้นกราฟแต่ละเส้นมีความหมายดังแสดงในรูปที่ 4.2 และผลลัพธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติเป็นไปตามตารางที่ 4.3 - 4.5



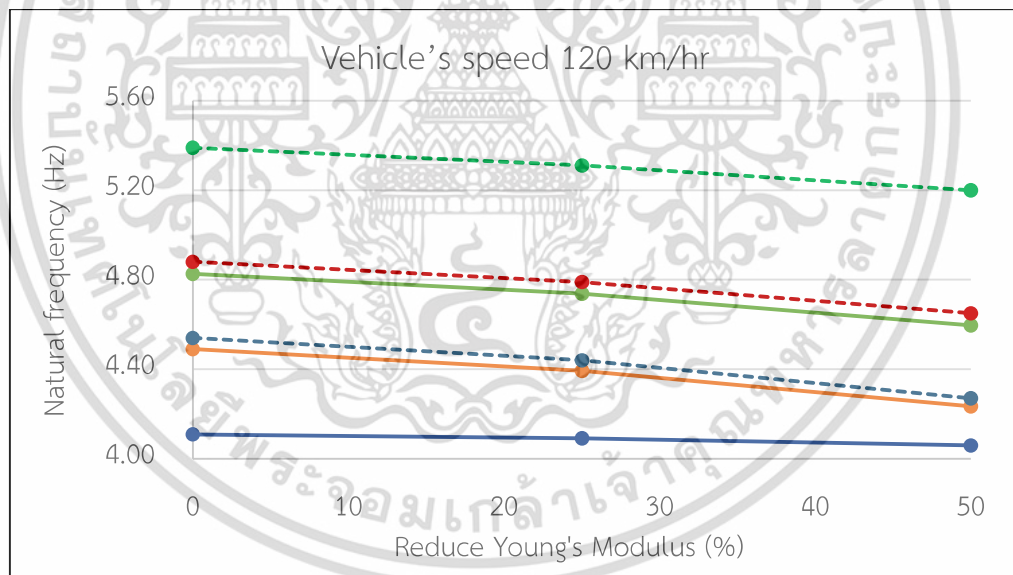
รูปที่ 4.2 ความหมายของเส้นกราฟแต่ละเส้น



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก HL-93 ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXT-ERA



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก HL-93 ที่ความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXT-ERA



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก HL-93 ที่ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXT-ERA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของทั้งสองวิธีการแล้ว นำผลลัพธ์ของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันแสดงดังตารางที่ 4.6

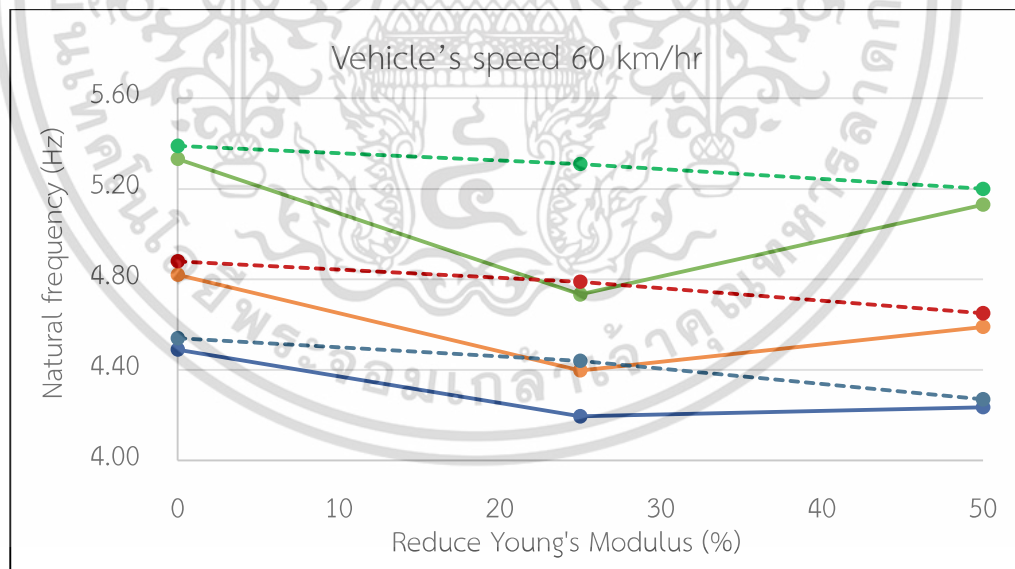
**ตารางที่ 4.6** เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติของวิธี Linear perturbation กับวิธี NEXT-ERA เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน ภายใต้แรงเคลื่อนจากรถบรรทุกทดสอบ HL-93

ความเร็ว กม./ชม.	โหมด	ความคลาดเคลื่อน (%)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
60	1	1.10	0.90	0.70
	2	1.23	1.25	1.08
	3	1.11	0.94	0.96
90	1	3.30	1.13	4.92
	2	2.87	0.00	8.84
	3	2.78	1.13	11.56
120	1	9.47	7.88	4.92
	2	7.99	8.35	8.84
	3	10.39	10.57	11.37

ทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวของสะพาน โดยที่มีการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบ H-5 อยู่บนสะพานด้วยความเร็ว 60, 90 และ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.6 – 4.8

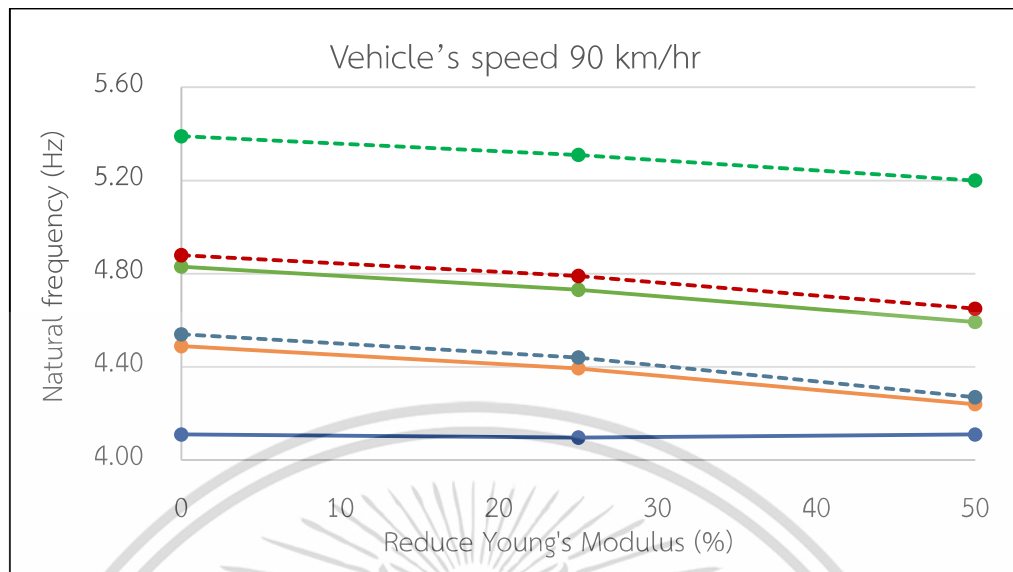
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี NEXt-ERA ภายใต้แรงเคลื่อนจากรถบรรทุกทดสอบ H-5

ความเร็ว กม./ชม.	โหนด	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น
		0%	25%	50%
60	1	4.49	4.20	4.24
	2	4.82	4.40	4.59
	3	5.33	4.73	5.13
90	1	4.11	4.09	4.23
	2	4.49	4.39	4.24
	3	4.83	4.73	4.59
120	1	4.11	4.09	4.23
	2	4.49	4.39	4.60
	3	4.83	4.74	5.16

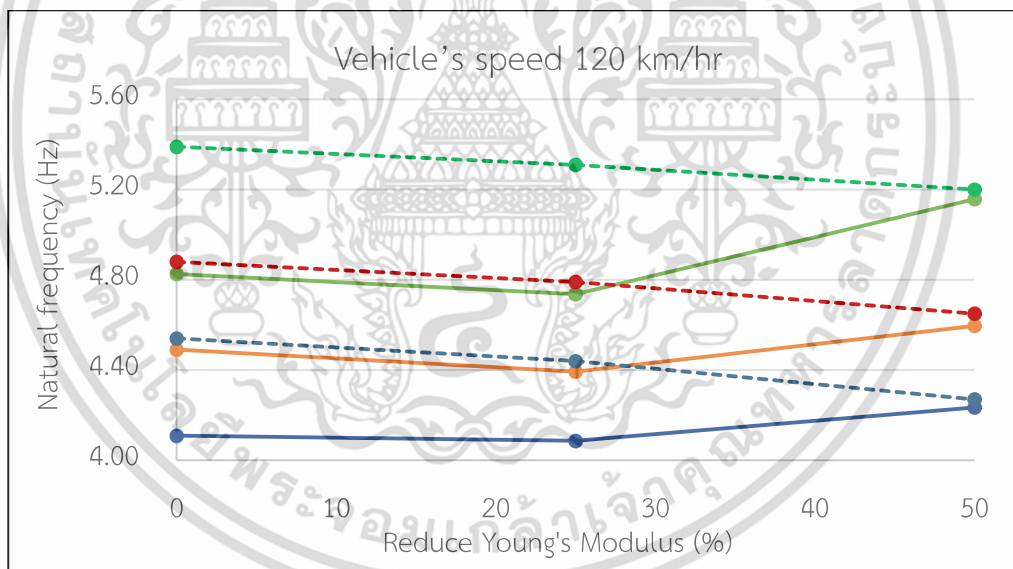


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหนดการสั่นของรถบรรทุก H-5 ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXt-ERA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก H-5 ที่ความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXT-ERA



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นของรถบรรทุก H-5 ที่ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยวิธี NEXT-ERA

หลังจากได้ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของทั้งสองวิธีการแล้ว นำผลลัพธ์ของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันแสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติของวิธี Linear perturbation กับวิธี NExT-ERA เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน ภายใต้แรงเคลื่อนจากรถบรรทุกทดสอบ H-5

ความเร็ว กม./ชม.	โหมด	ความคลาดเคลื่อน (%)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
60	1	1.10	5.40	0.70
	2	1.23	8.14	1.08
	3	1.11	10.75	1.16
90	1	9.47	7.66	3.75
	2	7.99	8.35	8.62
	3	10.39	10.75	11.56
120	1	9.47	7.88	0.94
	2	7.99	8.35	0.86
	3	10.39	10.57	0.58

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ จะพบว่าน้ำหนักของรถมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติที่วิเคราะห์ออกมาได้ มีความเป็นไปได้ว่าเมื่อน้ำหนักที่กระทำน้อยลงอาจจะมีผลต่อเซ็นเซอร์วัดความเร่งของการสั่นของสะพาน ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จึงมีค่าความคลาดเคลื่อน

### 4.3 กระบวนการแก้ปัญหา

#### 4.3.1 เพิ่มระยะเวลาในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์

ทำการเพิ่มระยะเวลาในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์จากเดิม 20 วินาที เป็น 60 วินาทีและนำกรณีที่รถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลงร้อยละ 25 มาทำการทดสอบการแก้ไขปัญหา ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.9

**ตารางที่ 4.9** ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการเพิ่มระยะเวลาในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์จาก 20 วินาที เป็น 60 วินาที

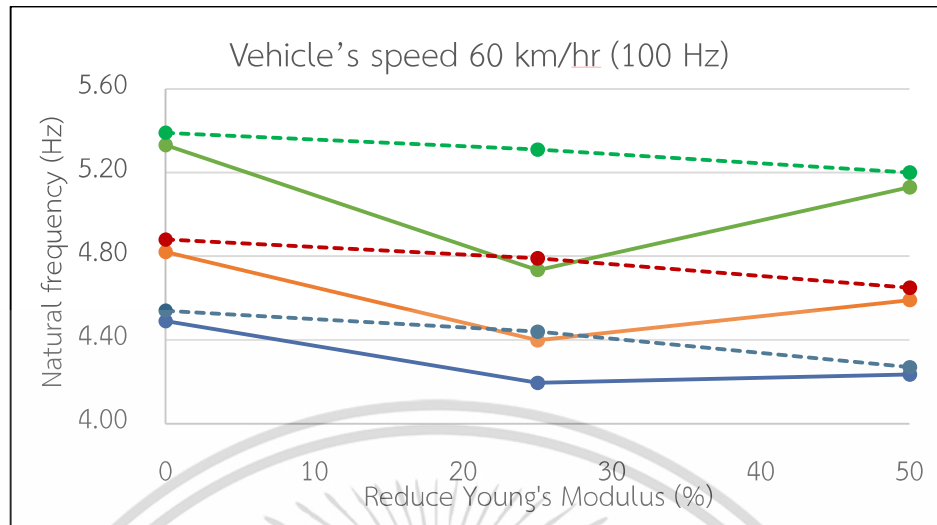
โหมต	Linear perturbation (Exact value)	ค่าความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์) HL-93		ค่าความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์) H-5	
		20 วินาที	60 วินาที	20 วินาที	60 วินาที
		1	4.44	4.40	4.40
2	4.79	4.73	4.73	4.40	4.39
3	5.30	5.25	5.25	4.73	4.74

#### 4.3.2 ปรับแก้ค่าความถี่ในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์

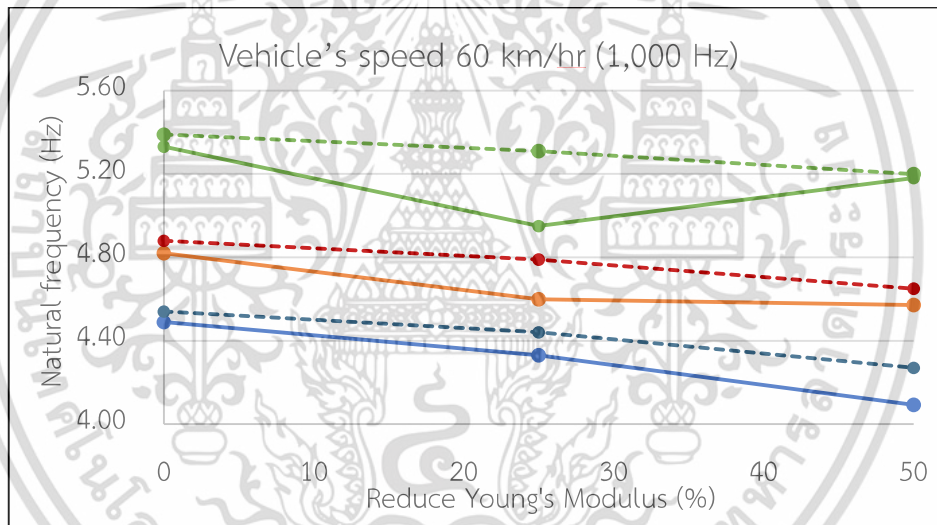
ทำการเพิ่มความถี่ในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์จากเดิม 100 เฮิรตซ์ เป็น 1,000 เฮิรตซ์ และนำกรณีที่รถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลงร้อยละ 25 ของรถบรรทุก H-5 มาทำการทดสอบการแก้ไขปัญหา ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.8 – 4.9

**ตารางที่ 4.10** ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการปรับแก้ค่าความถี่ในการรับข้อมูลของเซ็นเซอร์

ความเร็ว กม./ชม.	โหมต	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
		1	4.49	4.33
60	2	4.82	4.60	4.57
	3	5.33	4.95	5.18



รูปที่ 4.9 กราฟค่าความถี่ธรรมชาติของผลลัพธ์ที่ได้จากอัตราการเก็บข้อมูล 100 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.10 กราฟค่าความถี่ธรรมชาติของผลลัพธ์ที่ได้จากอัตราการเก็บข้อมูล 1,000 เฮิร์ตซ์

สำหรับวิธีการปรับค่าความถี่ในการรับข้อมูลจะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากวิธี Linear perturbation มากกว่าการเก็บข้อมูลที่ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ เพราะฉะนั้นจึงตีความได้ว่า จำนวนของข้อมูลมีผลต่อการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ

## บทที่ 5

# สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิควิธี Natural Excitation technique (NExT) และ The Eigensystem Realization Algorithm (ERA) เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานในอนาคต เพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน อีกทั้งเพื่อความรวดเร็วและประเมินความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างทันเวลา

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยมีลำดับหัวข้อการนำเสนอต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินการ

5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษา

### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

จากการศึกษาในแบบจำลองหลายๆแบบ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น เพื่อเป็นตัวแทนสะพานคานรูปกล่อง ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนเมื่อลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ได้ผลสรุปการศึกษาดังนี้

(1) แบบจำลอง FEM สะพานคานรูปกล่อง ตามมาตรฐานของ AASHTO สามารถพัฒนาสำหรับในการวิเคราะห์แบบ Dynamic และ Linear perturbation ได้

(2) ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) ของแบบจำลองสะพานคานรูปกล่อง สามารถวิเคราะห์ได้จากวิธี Linear perturbation

(3) การวิเคราะห์แบบ Dynamic ของแบบจำลองสะพานคานรูปกล่องนั้น ใช้กับเทคนิค Natural Excitation technique (NExT) และ The Eigensystem Realization Algorithm (ERA) ได้

(4) เทคนิค Natural Excitation technique (NExT) และ The Eigensystem Realization Algorithm (ERA) สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา (acceleration and time) ได้

(5) ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี NExT-ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

(6) เทคนิค Natural Excitation technique (NExT) และ The Eigensystem Realization Algorithm (ERA) มีความเป็นไปได้ที่รูปร่างการสั่นที่โหมดสูง สามารถพัฒนาต่อไปใช้ในการระบุถึงตำแหน่งผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการสั่น (Modal shape) ในขั้นที่สูง

(7) เทคนิค Natural Excitation technique (NExT) และ The Eigensystem Realization Algorithm (ERA) ทำการวิเคราะห์ผล พบว่าความเร็วของรถมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ มีความเป็นไปได้ว่า เมื่อรถวิ่งด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นการตรวจจับของเซ็นเซอร์อาจมีค่าไม่เพียงพอ ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย และแนวทางในการดำเนินการศึกษาในอนาคต

จากประสบการณ์ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมได้ดังนี้

- (1) เมื่อลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ยิ่งทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติน้อยลง
- (2) ความถี่ในการตรวจจับข้อมูลของเซ็นเซอร์อาจมีค่าไม่เพียงพอ เมื่อความเร็วรถเปลี่ยนแปลงไป
- (3) ในขณะนี้อาจศึกษาได้ใช้แบบจำลองของรถนั้น ยังเป็นเพียงรถคันเดียว ควรจะมีการเพิ่มจำนวนรถ เพื่อตรวจสอบว่าเทคนิค NExT-ERA นั้นยังสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้หรือไม่ อีกทั้งสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของสะพานเป็นเหล็ก (Steel) แล้วดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดสั่นกับโครงสร้างสะพาน
- (4) จากผลการวิจัยสามารถสังเกตได้ว่าน้ำหนักของรถมีผลต่อการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติของเทคนิค NExT-ERA จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้บางส่วนของเทคนิค NExT-ERA ให้เหมาะสมตามปัจจัยต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลง เช่น ความถี่ของการรับข้อมูลเซ็นเซอร์เพื่อรองรับต่อความเร็วต่าง ๆ ของรถ ระยะเวลาของการเก็บข้อมูล รวมไปถึงความละเอียดของ Hankle Matrix ในเทคนิค NExT-ERA เพื่อให้การคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติมีความแม่นยำที่มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวงชนบท. **คู่มือปฏิบัติงานสะพานสำหรับ อปท.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักส่งเสริมการพัฒนาทางหลวงท้องถิ่น กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม. 2556.
- [2] Nili M.H., Taghaddos H. and Zahraie B. “Integrating Discrete Event Simulation and Genetic Algorithm Optimization for Bridge Maintenance Planning” **Automation in Construction.** vol.122, February 2021.
- [3] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. **คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน โครงการศึกษาและพัฒนาระบบการบริหารงานบำรุงสะพาน.** โรงพิมพ์. 2555.
- [4] Grosso A.E.D. “Structural Health Monitoring: Research and Practice” **Conference on SMAR, Istanbul, Turkey, September 2013.**
- [5] Gunawan F.E., Nhan T.H., Asrol M., Kanto Y., Kamil I. and Sutikno. “A New Damage Index for Structural Health Monitoring: A Comparison of Time and Frequency Domains” **Procedia Computer Science.** vol.179, February 2021. pp.930-935.
- [6] Karbhari V.M., Guan H. and Sikorsky C. “7 - Operational Modal Analysis for Vibration-Based Structural Health Monitoring of Civil Structures” **Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems.** 2009. pp.213-259.
- [7] Kordkheili S.A.H., Massouleh S.H.M., Hajirezayi S. and Bahai H. “Experimental Identification of Closely Spaced Modes Using NExT-ERA” **Journal of Sound and Vibration.** vol.412, January 2018. pp.116-129.
- [8] กรมทางหลวง. “ศักดิ์สยาม สั่งทางหลวง เร่งสร้างความมั่นใจผู้ใช้ทาง ยืนยันความปลอดภัย โครงสร้างสะพานทั่วประเทศ” [Online]. Available : <https://doh.go.th/content/page/news/204515>. 2565.
- [9] กรมทางหลวง. **คู่มือการตรวจสอบสะพานกรมทางหลวง (BMMS).** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์.
- [10] Biomedical Engineering. “**Accelerometer**” [Online]. Available : <https://bme231metrology.blogspot.com/2011/07/accelerometer-iphone-accelerometer.html>. 2011
- [11] Juang J.N. and Pappa R.S. “An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction” **Journal of Guidance, Control, and Dynamics.** vol.8, no.5, November 1985. pp. 620-627.
- [12] ETH Zurich. “**The Eigensystem Realization Algorithm (ERA)**” [Online]. Available : [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ibk/structural-mechanics-dam/education/identmeth/ERA\\_2013.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ibk/structural-mechanics-dam/education/identmeth/ERA_2013.pdf). 2013.

- [13] Caicedo J.M. “Practical Guidelines for The Natural Excitation Technique (Next) and The Eigensystem Realization Algorithm (ERA) for Modal Identification Using Ambient Vibration” **Society of Experimental Techniques**. vol.35, no.4, June 2010. pp.52-58.
- [14] Kaplan L. “AASHTO vehicle live loading” [Online]. Available : <https://issuu.com/structuremag/docs/structure-apr20-zmag>. 2020.
- [15] AASHTO. **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**. 4th ED. Washinton D.C. : AASHTO. 2007.
- [16] กรมทางหลวงชนบท ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงชนบท เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนด หรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหาย เดิมบนทางหลวงชนบท ในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท กลุ่มบริหารสินทรัพย์งานทางและสะพาน สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท
- [17] ABAQUS Inc. **ABAQUS Analysis User’s Manual**. Version 6.14. 2014.
- [18] AASHTO. **AASHTO-PCI-ASBI Segmental Box Girder Standards for Span-by-Span and Balanced Cantilever Construction**. 1997.
- [19] Limkatanyu S. and Kuntiyawichai K. “Effect of Material Uncertainties on Dynamic Response of Segmental Box Girder Bridge” **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. vol.29, no.6, November 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29 “จากภูมิปัญญาที่สืบสานสู่การรังสรรค์โลกที่ยั่งยืน”

The 29<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering “From Knowledge to Transformation”

### สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering : STR)

ห้องประชุม : Chiang Mai Room no.1, ชั้น 2 (second floor),

อาคารศูนย์ประชุมนานาชาติ เอ็มเพรส (The Empress Convention Centre)

วันที่ 31 พฤษภาคม 2567 เวลา 10.45 - 12.30 น.

ประธานภาค : ผศ.ดร.ชนะชัย ทองโถม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ลำดับ	เวลา	บทความ	ชื่อบทความ/ผู้แต่ง
1	10.45 - 11.00	STR43	การประเมินสมรรถนะกำลังรับน้ำหนักของระบบสายเคเบิลสะพานกาญจนาภิเษก ธรรดา พงษ์อติกุล, นิคมวรรณ พิทักษ์พานิช, ศิวี ปัญญาชัยวัฒนภัก, และ สราวุธ พรหมนาค
2	11.00 - 11.15	STR44	ระบบโครงสร้างขานพาหนะหนักบนทางหลวงด้วยสัญญาณความเครียดของสะพาน พิทรพงษ์ อวสานจินดา, ชาญยศร กาฬกาญจน์, และ ชบรียชัย ไชยงค์
3	11.15 - 11.30	STR45	การเฝ้าระวังและติดตามความเสียหายของสะพานคานรูปกล่องภายใต้แรงเคลื่อนที่ ด้วยวิธี NEXT-ERA ภูษิต สอนชัย และ หนักฐิตินันท์ สืบสมุทรผดุง
4	11.30 - 11.45	STR46	การประเมินคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างทางรถไฟที่เชื่อมสภาพ ด้วยเทคนิคการสั่นสะเทือนด้วยแรงกระตุ้น ธนภฤต ประสาทพรพรชัย, ศรีธนย์ วันไชยธนวงศ์, รศ.กฤษ ฐ่วงศ์วิทย์, และ ชยุตม์ จานโถม
5	11.45 - 12.00	STR47	การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานมิตรภาพไทย - ลาว แห่งที่ 1 ภายใต้แรงกระทำ U-20 ภาสกร เสงี่ยมศรี และ นายธนวัฒน์ ศิวเผือก
6	12.00 - 12.15	STR48	การใช้พลาสติกโกละคริสโตนโกละในโกละโกละแทนที่มวลรวมในแอสฟัลต์คอกกรีต ที่ช่องว่างร้อยละ 5 ภมล ตรีพิชญ, เวลลิเพล ไชยแก้ว, และ วัฒนพงษ์ดวงสิน
7	12.15 - 12.30	STR68	พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานเหล็กปีกกว้างเสริมกำลังด้วยเส้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สำหรับถนน เนื้อขาว, ชนะชัย ทองโถม และ สายันต์ ศรีมนตรี

รูปที่ ก.1 รูปแสดงการเผยแพร่บทความในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเฝ้าระวังและติดตามความเสียหายของสะพานคานรูปกล่องภายใต้แรงเคลื่อนที่ ด้วยวิธี NEXT-ERA Damage Evaluation of Box Girder Bridge Subjected to Moving Load Base on Structural Health Monitoring Data Using NEXT-ERA Techniques

ภูษิต สุขขรมย์<sup>1,\*</sup> ณัฏฐ์ดนัย ลินสมุทรผดุง<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: 65016070@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

ระบบเฝ้าระวังแบบไร้สายสามารถนำมาใช้เพื่อประเมินสภาพของสะพานจากระยะไกลและลดขั้นตอนรวมถึงเวลาในการตรวจสอบสะพานได้ สะพานคานคอนกรีตรูปกล่องได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน การประเมินสภาพของสะพานได้อย่างรวดเร็วจึงสำคัญ ระบบการตรวจสอบจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดค่าความเร่งการสั่นของสะพานเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยเทคนิค Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEXT-ERA) และประเมินความเสียหายของสะพานในรูปของดัชนีความถี่ธรรมชาติ สะพานคานรูปกล่องและน้ำหนักรถแบบเคลื่อนที่ที่กระทำกับสะพานจะถูกจำลองให้ในรูปแบบของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองสะพานที่มีความเสียหายที่แตกต่างกันในหลายระดับ ได้ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายและดัชนีความถี่ธรรมชาติ เพื่อใช้ในการประเมินความเสียหายผ่านเซ็นเซอร์ไร้สายระยะไกล ระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานสามารถประเมินได้จากดัชนีความถี่ธรรมชาติ ผลงานวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ในการบริหารการซ่อมบำรุงสะพานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: ระบบเฝ้าระวังแบบไร้สาย, สะพานคานคอนกรีตรูปกล่อง, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, เทคนิค Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEXT-ERA)

### Abstract

Wireless monitoring systems can be used for remote assessment of bridge conditions, shortening the bridge inspection process and time. Box girder bridges are currently very popular. It is very important to quickly evaluate the condition of the bridge. The monitoring system is composed of bridge acceleration sensors. The data are analyzed by Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEXT-ERA), and the bridge damage is evaluated in the form of natural frequency. A box girder bridge and moving load acting on the

bridge are simulated using a finite element model. Bridge models with different levels of damage, has been used to establish a relationship between the damage level and the natural frequency. Remote damage assessment is carried out by a wireless sensor, and the damage degree of the bridge is evaluated by the natural frequency index. The research results can be applied to bridge maintenance management, thus achieving higher efficiency.

Keywords: Wireless monitoring system, Segmental box girder bridge, Finite element model, Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEXT-ERA)

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีสะพานอยู่ประมาณ 15,500 แห่งทั่วประเทศ ซึ่งสะพานในประเทศไทยนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น สะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Prestress segmental box girder bridge), สะพานคานแบบแผ่น (Plank girder), สะพานโค้ง (Arch bridge) สะพานซิง (Cable stayed bridge), สะพานแบบโครงถัก (Truss bridge), และ สะพานแขวน (Suspension bridge) เป็นต้น โดยที่สะพานแต่ละประเภทจะถูกเลือกใช้งานตามความเหมาะสมของลักษณะทางภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมในนั้นๆ [1] ปัจจุบันประเทศไทยนิยมใช้สะพานคานรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ในหลายๆโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น สะพานข้ามแยก สะพานข้ามแม่น้ำ รวมทั้งทางเดินรถของรถไฟฟ้า โดยสะพานเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของเครือข่ายการขนส่งและการเชื่อมโยงระบบคมนาคมของประเทศ [2] หมายความว่าหากสะพานที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้เกิดความเสียหายจนถึงระดับที่ไม่สามารถใช้งานได้ จะทำให้เกิดผลกระทบต่อหลายภาคส่วนที่ต้องการใช้ประโยชน์จากสะพานเหล่านั้น เพราะฉะนั้นสะพานควรได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม โดยปกติการสำรวจตรวจสอบสะพานจะมีการดำเนินการในทุกๆ 2-6 ปี ตามลักษณะของการตรวจสอบ และการมีสำรวจแบบพิเศษ (Special inspection) เป็นการสำรวจเพิ่มเติมหลังจากที่สะพานได้เกิดความเสียหายแล้ว

[3] ซึ่งจะเห็นว่า การตรวจสอบสะพานนั้นมีช่องว่างของเวลาที่ห่างกันเป็นหลักปีและด้วยจำนวนของสะพานที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก จึงไม่สามารถที่จะตรวจสอบสะพานพร้อมๆกันได้ ส่งผลให้การรอการตรวจสอบอาจจะสายเกินไป จนทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยในการตรวจสอบสะพานแต่ละครั้งจะต้องดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ความสามารถในการตรวจสอบ ทำให้การตรวจสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการวางแผนในส่วนของการทำงานและในส่วนของงบประมาณ และในบางครั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา เช่น รอยแตกภายในของวัสดุ หรือความแข็งแรงของวัสดุที่ลดลง ด้วยปัญหาเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาช่วยในการวิเคราะห์ความเสียหาย เพื่อช่วยลดเวลาในการดำเนินการตรวจสอบ ทั้งยังช่วยให้การตรวจสอบมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [4]

ระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง (Structural health monitoring, SHM) เป็นระบบที่สามารถทำให้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างได้อย่างต่อเนื่องและตลอดเวลา ทำให้สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้ทันก่อนที่ความเสียหายของโครงสร้างจะขยายตัวและรุนแรงมากยิ่งขึ้นจนไม่สามารถซ่อมบำรุงได้ SHM ถูกใช้ในโครงสร้างวิศวกรรมหลายประเภท ตั้งแต่สะพานไปจนถึงเครื่องบิน [5] โดยที่ SHM เป็นระบบที่ผสานการทำงานร่วมกันของสิ่งต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น เซ็นเซอร์ ระบบสื่อสารไร้สาย เครื่องมือวัด (Accelerometer, Strain gauge) และคอมพิวเตอร์ การผสมผสานการทำงานของเครื่องมือเหล่านี้ทำให้ระบบ SHM นำข้อมูลจากสภาพแวดล้อมจริงมาทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] SHM จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น การสั่นของโครงสร้างที่แตกต่างจากการสั่นแบบปกติของโครงสร้าง (การสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ) จะสะท้อนถึงความผิดปกติของโครงสร้าง แต่ในบางครั้งการกระตุ้นให้เกิดการสั่นด้วยปัจจัยจากภายนอก (Force vibration) เช่น รถที่มีน้ำหนักมากเคลื่อนที่บนสะพาน ลมที่มีกำลังสูงปะทะกับโครงสร้าง ก็สามารถทำให้การสั่นของโครงสร้างแตกต่างออกไปจากปกติเช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงต้องหาวิธีในการกำจัดการสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

การวิเคราะห์ข้อมูลของโครงสร้างโดยใช้ข้อมูลความถี่ สามารถทำได้หลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่นวิธี Natural excitation technique (NEXT) และ Eigensystem realization algorithm (ERA) โดยทั้งสองวิธีนี้สามารถแปลงข้อมูลจากความถี่ของการสั่นของโครงสร้างเป็นความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างได้ ซึ่งความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงจะสะท้อนให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลง [6] และนอกจากนี้ทั้งสองวิธีนี้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยที่การทำงานร่วมกันของ NEXT และ ERA จะสามารถกำจัดการสั่นที่เกิดปัจจัยภายนอกได้ เพื่อผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่แม่นยำและไม่เกิดการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อน [7] การรวมกันของทั้งสองเทคนิคนี้เป็นที่น่านสนใจในการประยุกต์ใช้กับระบบ SHM

ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ด้วยวิธีการ Finite element model

(FEM) และทำการจำลองความเสียหายในระดับต่างๆ ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำแบบเคลื่อนที่ (Moving load) เพื่อนำมาใช้เป็นโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างด้วยวิธี NEXT-ERA เพื่อยืนยันความสามารถของการประมวลผลด้วยวิธีดังกล่าว

## 2. Natural excitation technique – Eigensystem realization algorithm (NEXT-ERA)

### 2.1 Natural excitation technique

Natural excitation technique (NEXT) [8] ถูกนำมาใช้ครั้งแรกสำหรับการทดสอบโมเดลของกังหันลมที่อยู่ภายใต้แรงกระตุ้นจากลม และวิธีการนี้ถูกนำมาศึกษาหลายครั้ง โดยพิจารณาโครงสร้างอิสระหลายระดับที่ถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (1)

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = F(t) \quad (1)$$

เมื่อ  $y(t)$  คือเวกเตอร์ของการกระจัดที่เวลา  $t$ ,  $F(t)$  คือเวกเตอร์ของแรงในแต่ละช่วงเวลา  $M$ ,  $C$  และ  $K$  คือเมทริกซ์ของมวล ตัวหน่วง และค่าความแข็งของโครงสร้าง (Stiffness) ตามลำดับ และ  $(\cdot)$  เป็นตัวระบุอนุพันธ์เทียบกับเวลา สมมติว่าอินพุตเป็นการกระตุ้นจาก White noise จะแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชัน Cross-correlation ระหว่างเวกเตอร์ความเร่งกับสัญญาณความเร่ง  $R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau) = 0$

$$M\ddot{R}_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau) + C\dot{R}_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau) + KR_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau) = 0 \quad (2)$$

สมการที่ (2) นี้มีรูปแบบเดียวกับสมการเชิงอนุพันธ์เอกพันธ์ของการเคลื่อนที่ และบอกเป็นนัยว่าฟังก์ชันสหพันธ์  $R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau)$  มีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณของการสั่นแบบอิสระของโครงสร้าง ซึ่งฟังก์ชัน cross-correlation สามารถประมาณได้โดยใช้สองวิธีที่แตกต่างกัน วิธีแรกเป็นขั้นตอนโดยตรง และอีกวิธีคือผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transforms, FFTs) โดยในขั้นตอนโดยตรงจะใช้ข้อมูลโดเมนเวลา ในขณะที่เป็นการประมาณค่า และวิธี FFTs ต้องคำนวณฟังก์ชันความหนาแน่นของสเปกตรัม พิจารณานิยามของความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งฟังก์ชัน cross-correlation ระหว่างสองช่องสัญญาณของความถี่  $i$  และ  $j$  ถูกประมาณโดยใช้วิธีการโดยตรงโดยใช้สมการที่ (3) ดังแสดง

$$R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{l=1}^{N-k} \ddot{y}(l)\ddot{y}(l+k) \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta t$  และ  $L$  คือการเปลี่ยนแปลงของเวลาและจำนวนจุดทั้งหมดของความถี่ที่บันทึกตามลำดับ วิธีที่สองในการประมาณฟังก์ชัน correlation ประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสามารถทำได้โดยง่ายโดยวิธีของ Welch ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เช่น โปรแกรม Matlab ในกระบวนการนี้ การบันทึกเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกข้อมูล และความหนาแน่นของสเปกตรัมจะถูกคำนวณโดยการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของสเปกตรัม FFT ของแต่ละบล็อกข้อมูล ผู้วิเคราะห์ควรกำหนดจำนวนจุดสำหรับ FFT จำนวนจุดข้อมูลที่ทับซ้อนกันระหว่างแต่ละบล็อก และความยาวเรกคอร์ดหรือจำนวนบล็อกสำหรับการคำนวณ นอกจากนี้ ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องตัดสินใจว่าควรใช้ช่องอ้างอิง (หรือช่องสัญญาณ) ในการคำนวณฟังก์ชัน cross-correlation และประเภทของฟังก์ชัน tapering (เช่น Hanning หรือ Hamming) ที่ใช้สำหรับแต่ละ

บล็อกข้อมูล สิ่งสำคัญคือต้องระบุว่าจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่เป็นฟังก์ชัน cross-correlation มีเท่ากับจำนวนจุดที่ใช้สำหรับ FFT และความถี่ในการสุ่มตัวอย่างจะเท่ากับความถี่การสุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึก

## 2.2 Eigensystem realization algorithm (ERA)

พิจารณาการแก้มการด้วยปริภูมิสถานะของระบบที่ไม่ต่อเนื่องกัน [8]

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (5)$$

เมื่อ  $x(k)$  คือเวกเตอร์ของสถานะ  $u$  คือเวกเตอร์ของระบบอินพุต (หรือเรียกอีกอย่างคือ แรงที่ใส่เข้าไปในโครงสร้าง) และ  $y$  คือเวกเตอร์ของระบบเอาต์พุต (หรือเรียกอีกอย่างคือ การวัดความเร่งโดยการระบุมอดอล) ที่ขั้นตอนที่  $k$  และ  $A, B, C$  และ  $D$  คือเมทริกซ์ปริภูมิสถานะที่เวลาไม่ต่อเนื่องกัน

ERA ใช้หลักการของการสร้างขนาดขั้นต่ำ เพื่อให้ได้รูปแบบของปริภูมิสถานะของโครงสร้าง การสร้างในที่นี้หมายถึงการประมาณการของระบบเมทริกซ์  $A, B,$  และ  $C$  จากคำตอบสองของโครงสร้าง มีจำนวนเมทริกซ์  $A, B, C$  และ  $D$  ที่ไม่มีที่สิ้นสุด โดยมีขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตของโครงสร้างได้ อย่างไรก็ตาม เราสนใจในกรณีที่มีจำนวนสถานะน้อยที่สุด การสร้างนี้เรียกว่า การสร้างขั้นต่ำ Eigenvalues ของ  $A$  เป็นค่าจำลองที่ซับซ้อนสอดคล้องกับโหมดการสั่นต่างๆ และสามารถใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของโครงสร้างได้ในส่วนของจำนวนจินตภาพแทนค่าความถี่ธรรมชาติ  $\pm \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2}$  และในส่วนของจำนวนจริงแทนด้วย  $-\xi_n \cdot \omega_n$  โดยที่  $\omega_n$  แทนค่าความถี่ธรรมชาติและ  $\xi_n$  แทนอัตราส่วนการหน่วงของโหมดการสั่นลำดับที่  $n$

เมื่อนำ ERA มาใช้ร่วมกับ NEXT เมทริกซ์  $B$  และ  $D$  จะไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่รู้ข้อมูลที่นำมาใส่ในระบบ อย่างไรก็ตาม โมดอลพารามิเตอร์ของระบบนั้นสามารถคำนวณได้จาก เมทริกซ์  $A$  และ  $C$  ขั้นตอนแรกของการสร้าง ERA คือการสร้าง Hankel Matrix เป็นไปดังแสดงในสมการที่ (6)

$$H(k) = \begin{bmatrix} y(k+1) & y(k+2) & \dots & y(k+m) \\ y(k+2) & y(k+3) & \dots & y(k+m+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k+n) & y(k+n+1) & \dots & y(k+m+n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

โดยที่จำนวนของแถวและหลักของ Hankel Matrix คือ  $n \times N$  และ  $M$  ตามลำดับ โดยที่  $N$  เป็นจำนวนของเซ็นเซอร์ที่ใช้สำหรับการระบุ ขั้นตอนที่สองคือการดำเนินการ Singular value decomposition ของ  $H(0)$

$$H(0) = R \Sigma S^T \quad (7)$$

ดังแสดงในสมการที่ (7)  $H(0)$  คือ Hankel matrix ที่  $k=0, R$  และ  $S$  คือ Orthonormal matrix ขนาด  $m \times m$  และ  $n \times n$  ตามลำดับ และ  $D$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $m \times n$  ที่มีค่าบวกบนแนวทแยง ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมได้ผลลัพธ์ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_g & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

โดยที่  $\Sigma_g$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $g \times g$  และ  $g$  คืออันดับของระบบหรือจำนวนของโพล ในความเป็นจริง เส้นทแยงมุมของเมทริกซ์  $\Sigma$  มีค่าไม่เป็น

ศูนย์โดยเกิดจากการรบกวนในกระบวนการรับข้อมูลและการตัดข้อมูลตัวเลข Minimum realization เกิดจากการลบค่าของ Singular value ผลลัพธ์คืออันดับของระบบที่น้อยที่สุดจะแสดงถึงโครงสร้าง โดยสามารถแสดงการคำนวณของเมทริกซ์  $A$  และ  $C$  ได้ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$A = \Sigma^{-1/2} R^T H(1) \Sigma^{-1/2} \quad (9)$$

$$C = E^T R \Sigma^{1/2} \quad (10)$$

โดยที่ค่า Singular value ที่มีค่าน้อยถูกลบออกจากเมทริกซ์  $\Sigma$  และ  $E = [I \ 0]$  โดย  $I$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด  $m \times m$  และ  $0$  เป็นเมทริกซ์ศูนย์ขนาดที่เหมาะสม สำหรับการนำ ERA ไปใช้งาน ผู้ใช้จำเป็นต้องเลือกใช้จำนวนแถวและหลักของ Hankel matrix  $H$

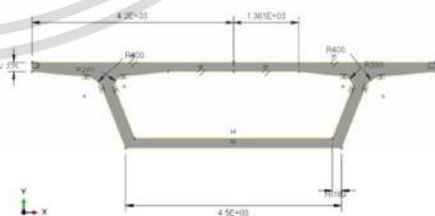
## 3. แบบจำลองเชิงตัวเลข

### 3.1 สะพานคานคอนกรีตรูปกล่อง (Segmental box girder bridge)

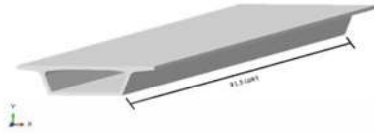
สะพานที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Finite element model (FEM) โดยโปรแกรม Abaqus [9] และแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์มีลักษณะเป็นสะพานคานคอนกรีตรูปกล่อง (Segmental box girder bridge) ซึ่งข้อมูลสะพานที่นำมาใช้อ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO Standard [10] โดยที่สะพานมีความยาว 30.50 เมตร ต่อหนึ่งช่วงความยาวของสะพาน ทั้งหมดจำนวน 3 ช่วง ความยาวารวมทั้งหมดคือ 91.50 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 โดยในการงานวิจัยนี้ใช้ลักษณะของสะพานที่เป็นคอนกรีตล้วน โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 1 [11] โดยการติดตั้งมาตรวัดความเร่ง จะติดตั้งที่ได้ที่บนถนนบริเวณกึ่งกลางของเลนถนน โดยติดตั้งทุกๆ 3.05 เมตรตลอดความยาวของคานดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากสะพานมักจะเกิดรอยแตกร้าวในบริเวณดังกล่าว และมีค่าของภาระโก่งตัวที่สูง และเป็นตำแหน่งที่ง่ายต่อการติดตั้งมาตรวัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุ

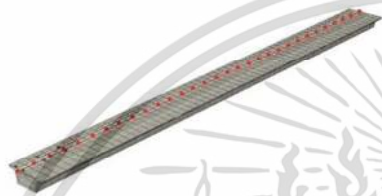
ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย
1	Elastic modulus	29.81	GPa
2	Poisson's ratio	0.20	-
3	Density	2400.00	kg/m <sup>3</sup>



รูปที่ 1 หน้าตัดของแบบจำลอง



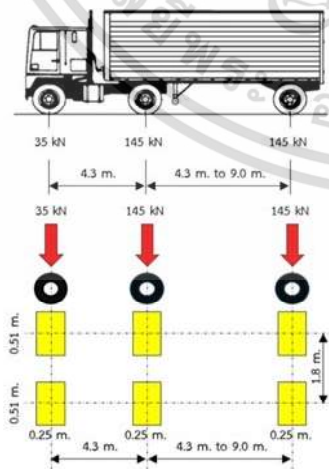
รูปที่ 2 ด้านยาวของสะพาน



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งเส้นลวด

3.2 น้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบ

การจำลองน้ำหนักและตำแหน่งของน้ำหนักที่กดลงบนถนนของรถบรรทุกทดสอบ HL-93 ซึ่งมีตำแหน่งของน้ำหนักที่กดลงพื้นจำนวน 6 จุด โดยแต่ละจุดจะมีพื้นที่ของน้ำหนักที่กดลงคือ กว้าง 0.25 เมตร และยาว 0.51 เมตร โดยที่พื้นที่ค้ำน้ำหนักจะมีน้ำหนักกดลงอยู่ที่ 35 กิโลนิวตันในแต่ละพื้นที่ พื้นที่ค้ำค้ำน้ำหนักมีน้ำหนักกดลง 145 กิโลนิวตัน และพื้นที่ค้ำค้ำน้ำหนักมีน้ำหนักกดลง 145 กิโลนิวตัน โดยที่พื้นที่ของน้ำหนักที่กดลงบนถนนคู่แรกมีระยะห่างจากคู่อีกสองอยู่ 4.30 เมตร และระยะห่างของพื้นที่ที่สองกับพื้นที่ที่สามมีระยะห่าง 4.30 เมตร เช่นเดียวกัน ดังแสดงดังรูปที่ 4 มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน [12] โดยการจำลองน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบ HL-93 นั้นเป็นการจำลองโดยใช้วัตถุที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมเท่ากับขนาดของพื้นที่ที่น้ำหนักกดลงบนพื้นถนนของรถบรรทุกทดสอบ HL-93 ที่กดลงบนพื้นถนน



รูปที่ 4 น้ำหนักที่กดลงบนพื้นของรถบรรทุกทดสอบ HL-93

3.3 น้ำหนักเคลื่อนที่ (Moving load)

การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำหนักนั้นจะทำได้โดยวิธีการให้แรงเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดของแบบจำลองสะพาน ซึ่งจะทำการกำหนดเวลาให้กับการเคลื่อนที่ของน้ำหนัก และเนื่องจากความยาว 91.5 เมตร แต่ระยะทางที่กำหนดให้แรงเคลื่อนที่ใช้ระยะทางเพียง 82 เมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้เวลาที่กำหนดให้น้ำหนักเคลื่อนที่มาแปลงเป็นความเร็วในหน่วย กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแรง

ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของแรง (วินาที)	ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
4.92	60
3.28	90
2.46	120

3.4 ความเสียหายของสะพาน

การจำลองความเสียหายของสะพานนั้น ทำโดยวิธีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของสะพานลง ในตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละช่วงความยาวของสะพาน โดยที่พื้นที่ที่ทำการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนั้นคิดเป็นร้อยละ 10 ของความกว้างของหนึ่งช่วงความยาวของสะพานหรือเท่ากับ 3.05 เมตร (หนึ่งช่วงความยาวของสะพานมีค่าเท่ากับ 30.50 เมตร) ดังตารางที่ 3 ซึ่งจะทำการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลงเป็นอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 เพื่อทำการสังเกตและเก็บข้อมูล และนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบ โดยมีกรณีศึกษาที่ต้องการศึกษาเป็นไปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ระดับความเสียหายของสะพาน

ระดับความเสียหาย (ลดโมดูลัสยืดหยุ่น)	ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย
0%	
25%	
50%	

ตารางที่ 4 กรณีศึกษาที่ต้องการวิเคราะห์

ลำดับ	Damage (Reduce Young's Modulus)	Velocity of Load (km./hr.)
1	0%	60
2	25%	60
3	50%	60
4	0%	90
5	25%	90
6	50%	90
7	0%	120
8	25%	120
9	50%	120

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างสะพานคานรูปกล่องแบบโดยไม่มีผลกระทบจาก Force vibration

4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์โดยวิธี Linear perturbation

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่น
1	4.54	
2	4.88	
3	5.39	

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย NEXT-ERA

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์โดยวิธี NEXT-ERA

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่น
1	4.49	
2	4.82	
3	5.33	

4.1.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติที่ได้จากวิธี Linear perturbation กับ NEXT-ERA

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Linear perturbation กับ NEXT-ERA

โหมด	Linear perturbation (Hz)	NEXT-ERA (Hz)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	4.54	4.49	1.05
2	4.88	4.82	1.27
3	5.39	5.33	1.06

จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี NEXT-ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง ภายใต้ผลกระทบจาก Force vibration เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชิ้นส่วนบริเวณกึ่งกลางคาน ด้วยวิธี Linear perturbation และ NEXT-ERA

ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวของสะพาน

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี Linear perturbation

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
1	4.54	4.44	4.27
2	4.88	4.79	4.64
3	5.39	5.30	5.19

ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวของสะพาน โดยที่มีการเคลื่อนที่ของรถอยู่บนสะพานด้วยความเร็ว 60, 90 และ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน เมื่อมีการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพานด้วยวิธี NEXT-ERA

ความเร็ว กม./ชม.	โหมด	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 0%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 25%	ลดโมดูลัสยืดหยุ่น 50%
60	1	4.49	4.40	4.24
	2	4.82	4.73	4.59
	3	5.33	5.25	5.14
90	1	4.39	4.39	4.06
	2	4.74	4.79	4.23
	3	5.24	5.24	4.59
120	1	4.11	4.09	4.06
	2	4.49	4.39	4.23
	3	4.83	4.74	4.60

ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติ ระหว่างวิธี Linear perturbation กับวิธี NEXT-ERA

ความเร็ว กม./ชม.	โหมด	ความคลาดเคลื่อน (%)		
		ลดโมดูลัสยืดหยุ่น	ลดโมดูลัสยึดหยุ่น	ลดโมดูลัสยึดหยุ่น
		0%	25%	50%
60	1	1.10	0.90	0.70
	2	1.23	1.25	1.08
	3	1.11	0.94	0.96
90	1	3.30	1.13	4.92
	2	2.87	0.00	8.84
	3	2.78	1.13	11.56
120	1	9.47	7.88	4.92
	2	7.99	8.35	8.84
	3	10.39	10.57	11.37

## 5. บทสรุป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิควิธี Natural excitation technique (NEXt) และ Eigensystem realization algorithm (ERA) เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานในอนาคต เพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน อีกทั้งเพื่อความรวดเร็วและประเมินความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างทันเวลา

เนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยมีลำดับหัวข้อการนำเสนอตั้งต่อไปนี้

### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

จากการศึกษาการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างของการสั่น เพื่อเป็น ตัวแทนสะพานที่มีหน้าตัด Box Girder ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน และสังเกตการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนเมื่อลดค่า Elastic modulus ได้ผลสรุปการศึกษาดังนี้

แบบจำลอง FEM สะพานแบบ Segmental box girder ตามมาตรฐานของ AASHTO สามารถพัฒนา สำหรับการวิเคราะห์แบบ Dynamic และ Linear perturbation ได้ โดยที่ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) ของแบบจำลองสะพานแบบ Segmental box girder สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี Linear perturbation

การวิเคราะห์แบบ Dynamic ของแบบจำลองสะพานแบบ Segmental box Girder นั้นสามารถใช้กับเทคนิค Natural excitation technique (NEXt) และ Eigensystem realization algorithm (ERA) ได้ โดยเทคนิคทั้งสองสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) จากค่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาได้ โดยที่ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี NEXt-ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้ในการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

เมื่อนำเทคนิค Natural excitation technique (NEXt) และเทคนิค Eigensystem realization algorithm (ERA) มาทำการวิเคราะห์ผล พบว่าความเร็วของผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ มีความเป็นไปได้ว่าเมื่อรถวิ่งด้วย

ความเร็วที่เพิ่มขึ้นการตรวจจับของเซ็นเซอร์อาจมีค่าไม่เพียงพอ ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะจากการศึกษา

จากผลการวิจัยสามารถสังเกตได้ว่าน้ำหนักของรถมีผลต่อการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ ของเทคนิค NEXt-ERA จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้บางส่วนของเทคนิค NEXt-ERA ให้เหมาะสมตาม ปัจจัยต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลง เช่น ความถี่ของการรับข้อมูลเซ็นเซอร์เพื่อรองรับต่อความเร็วต่าง ๆ ของรถ, ระยะเวลาของการเก็บข้อมูล รวมไปถึงความละเอียดของ Hankle Matrix ในเทคนิค NEXt-ERA เพื่อให้ การคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติมีความแม่นยำมากขึ้น

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลองของรถนั้น ซึ่งเป็นเพียงรถคันเดียวในการทดสอบเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างของการสั่น ควรจะมีการเพิ่มจำนวนรถ เพื่อตรวจสอบว่าเทคนิค NEXt-ERA นั้นยังสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้ หรือไม่ อีกทั้งสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของสะพานเป็นเหล็ก (Steel) เพื่อการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดสนิมกับโครงสร้างสะพาน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวงชนบท (2556). คู่มือปฏิบัติงานก่อสร้างสะพานสำหรับอปท. สำนักส่งเสริมการพัฒนาทางหลวงท้องถิ่นกรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม, หน้า 1-13.
- [2] Nili, M.H., Taghaddos, H., and Zahraie, B. (2021). Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning. *Automation in Construction*, 122, 103513.
- [3] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2555). คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน โครงการศึกษาและพัฒนากระบวนการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน.
- [4] Grosso, A.E.D. (2013). Structural Health Monitoring: research and practice. *Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR2013)*, Istanbul, Turkey, September 2013, pp.1-8.
- [5] Gunawan, F.E., Nhan, T.H., Asrol, M., Kanto, Y., Kamil, I. and Sutikno (2021). A New Damage Index for Structural Health Monitoring: A Comparison of Time and Frequency Domains. *Procedia Computer Science*, 179, pp.930-935.
- [6] Karbhari, V.M., Guan, H. and Sikorsky, C. (2009). 7 - Operational modal analysis for vibration-based structural health monitoring of civil structures. *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, pp.213-259.

- [7] Kordkheili, S.A.H., Massouleh, S.H.M., Hajirezayi, S. and Bahai, H. (2018). Experimental identification of closely spaced modes using NExT-ERA. *Journal of Sound and Vibration*, 412, pp.116-129.
- [8] Caicedo, J.M. (2011). Practical Guidelines for the Natural Excitation Technique (NExT) and the Eigensystem Realization Algorithm (ERA) for Modal Identification Using Ambient Vibration. *Dynamic Testing of Civil Engineering Structures*, 35, pp.52-58.
- [9] ABAQUS Inc. (2014). *ABAQUS Analysis User's Manual*, Version 6.14.
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1997). *AASHTO-PCI-ASBI Segmental Box Girder Standards for Span-by-Span and Balanced Cantilever Construction*.
- [11] Limkatanyu, S. and Kuntiyawichai, K. (2007). Effect of material uncertainties on dynamic response of segmental box girder bridge. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29, pp.1537-1550.
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2007). *AASHTO Bridge Design Specifications*, pp.75-80.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายภูษิต สุขรัมย์
วัน-เดือน-ปี เกิด	3 ธันวาคม 2542
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 48/33 หมู่ 5 ตำบลลาดสวาย อำเภอลำลูกกา จังหวัด ปทุมธานี 12150
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2561 – 2565	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร
พ.ศ.2565 – 2567	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้