

การประเมินสภาพของโครงสร้างสะพานแบบคานรูปกล่องด้วยเทคนิคการ
อนุมานแบบเบย์จากข้อมูลของระบบเฝ้าระวังสะพาน

CONDITION EVALUATION OF BOX GIRDER BRIDGE USING
BAYESIAN INFERENCE TECHNIQUE BASED ON STRUCTURAL
HEALTH MONITORING DATA



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONDITION EVALUATION OF BOX GIRDER BRIDGE USING
BAYESIAN INFERENCE TECHNIQUE BASED ON STRUCTURAL
HEALTH MONITERING DATA



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การประเมินสภาพของโครงสร้างสะพานแบบคานรูปกล่องด้วยเทคนิคการ
อนุมานแบบเบย์จากข้อมูลของระบบเฝ้าระวังสะพาน
Condition Evaluation of box girder bridge using Bayesian Inference
Technique based on Structural Health Monitoring Data

นักศึกษา นายกุลนันท์ จันทร์ทิม รหัสนักศึกษา 62010073
นางสาวจิราภา กุดแถลง รหัสนักศึกษา 62010128
นายเจษฎาภรณ์ จักรคุ้ม รหัสนักศึกษา 62010141
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐดนัย สินสมุทรผดุง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐดนัย สินสมุทรผดุง	
ผศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ	
ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 2 มิถุนายน 2566 เวลา 9.30-13.00 น.

สถานที่สอบ ออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ดร.ชลิตา อู่ตะเภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 2 มิถุนายน 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินสภาพของโครงสร้างสะพาน Box Girder ด้วยเทคนิคการ อนุมานแบบเบย์จากข้อมูลของระบบเฝ้าระวังสะพาน

นายกุลนันท์ จันทรทิม รหัสนักศึกษา 62010073
นางสาวจิราภา กุดแถลง รหัสนักศึกษา 62010128
นายเจษฎาภรณ์ จักรคุ้ม รหัสนักศึกษา 62010141

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐดนัย สินสมุทรผดุง
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

ปัจจุบันสะพานในประเทศไทยที่มีอายุมากกว่า 15 ปีมีจำนวนมาก ซึ่งควรจะได้รับ การดูแลและตรวจสอบเพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน แต่ในขณะที่จำนวนผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบและงบประมาณที่มียังไม่เพียงพอ ส่งผลให้ถ้าหากมีการตรวจพบความผิดปกติได้เข้า ก็อาจเกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นราคาการซ่อมแซมก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เพื่อให้แผนการตรวจสอบและซ่อมบำรุงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ระบบเฝ้าระวังด้วยเทคโนโลยีเซนเซอร์ในการตรวจสอบจึงมีประโยชน์มาก สามารถเก็บข้อมูลได้ตามเวลาจริง และสามารถควบคุมผ่านระยะไกลโดยไม่ต้องให้ ผู้ตรวจสอบไปตรวจสอบที่สะพานจริง เป็นการช่วยลดขั้นตอนการตรวจสอบ ลดการใช้ทรัพยากรบุคคล และลดงบประมาณในการตรวจสอบ จึงมีการศึกษาโดยการนำข้อมูลการสั่นของคานที่เปรียบเสมือน สะพาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM ไปผ่านกระบวนการวิเคราะห์และตีความ เพื่อหา ความความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยเทคนิควิธี Bayesian Inference โดยแบบจำลองที่ใช้เป็น สะพานคานรูปกล่อง ต่อเนื่อง 3 ช่วง ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับสะพานจริงมากที่สุด เพื่อวิเคราะห์แบบ Force-Vibration นั้นคือเปรียบเสมือนมีรถวิ่งผ่านคานดังกล่าว จากการวิเคราะห์พบว่าเทคนิค Bayesian Inference สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้ การศึกษาโครงการนี้เพื่อเป็นแนวทางใน พัฒนาระบบการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานต่อไปในอนาคตได้

คำสำคัญ: FEM (Finite Element Method), เทคโนโลยีเซนเซอร์, เทคนิคการอนุมานแบบเบย์ (Bayesian Inference), Structural Health Monitoring (SHM)

Condition Evaluation of Box Girder Bridge using Bayesian Inference Technique based on Structural Health Monitoring Data

Mr. Gullanan Juntim Student ID. 62010073
Ms. Jirapa Kuttalang Student ID. 62010128
Mr. Jatsadaporn Jakkum Student ID. 62010141

Advisor: Asst.Prof.Dr. Nathania Sinsamutpadung

Academic Year 2022

ABSTRACT

Nowadays, there are many bridges in Thailand that are more than 15 years old, which should be maintained and inspected for safe use. But while the number of inspection experts and available budget are still insufficient. As a result, if abnormalities are detected late It may cause damage to life and property. As time increases, repair prices also increase. In order to make the inspection and maintenance plan effective. The use of surveillance systems with sensor technology for monitoring is therefore very useful. Data can be collected in real time. And can be controlled remotely without requiring the inspector to inspect the actual bridge. This helps to reduce the inspection process. Reduce the use of human resources and reduce the audit budget. Therefore, the study was carried out by using the data on the vibration of the beam that is similar to the bridge. This is the information obtained from FEM analysis, going through the analysis and interpretation process. To determine natural frequency and oscillation shape by Bayesian Inference technique, the model used is a 3-span continuous box girder bridge, which has the most similar characteristics to the real bridge. to analyze Force-Vibration That is like a car passing through the beam. From the analysis it was found that the Bayesian Inference technique was able to determine the natural frequency and shape of the oscillations. The study of this project can be used as a guideline for the development of inspection and assessment systems for bridge structures in the future.

KEYWORDS: FEM (Finite Element Method), Sensor Technology, Bayesian Inference, Structural Health Monitoring (SHM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ 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 คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

กุลนันท์ จันทร์ทิม
จิราภา กุดแกลง
เจษฎาภรณ์ จักรคุ้ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 สะพานในประเทศไทย.....	4
2.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน.....	5
2.2.1 ประโยชน์ของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน.....	5
2.2.2 ขั้นตอนของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน.....	5
2.2.3 การตรวจสอบสะพาน (Inspection).....	6
2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology).....	7
2.3.1 Accelerometer Sensor.....	9
2.4 Structural Health Monitoring.....	12
2.5 Time-domain Method.....	13
2.6 Frequency domain method.....	14
2.7 Fourier Transformation.....	15
2.8 Eigensystem Realization Algorithm(ERA).....	16
2.8.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA.....	16
2.9 Natural Excitation Technique (NExT).....	19
2.9.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT.....	20
2.10 Natural Excitation Technique (NExT) และ Eigensystem Realization Algorithm (ERA).....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค NEXT-ERA.....	21
2.11 Machine Learning.....	22
2.11.1 ประเภทของ Machine learning.....	23
2.11.2 การเรียนรู้และการอนุมานของ Machine learning.....	24
2.11.3 ลำดับและขั้นตอนของ Machine learning.....	25
2.12 การอนุมานแบบเบย์เซียน.....	25
2.12.1 ทฤษฎีบทของเบย์.....	27
2.13 การถอดอยแบบกระบวนการเกาส์เซียน.....	28
2.13.1 การกระจายแบบเกาส์เซียนหลายตัวแปร.....	28
2.14 Metropolis Hasting.....	29
2.14.1 อัลกอริธึมของเมโทรโปลิส-เฮสติ้ง.....	30
2.15 องค์ประกอบของโครงสร้างสะพาน.....	31
2.15.1 โครงสร้างสะพานส่วนบน.....	32
2.15.2 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง.....	33
2.15.3 ส่วนประกอบรอง.....	34
2.16 ระบบพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	36
3.1 รูปแบบงานวิจัย.....	36
3.2 การรวบรวมข้อมูล.....	36
3.3 เครื่องมือวิจัย.....	36
3.4 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย.....	36
3.4.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ของสะพานรูปกล่อง.....	36
3.4.1.1 เลือกแบบสะพานรูปกล่อง.....	36
3.4.1.2 หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของ สะพานรูปกล่อง จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM).....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 จำลองความเสียหายลงในโมเดล.....	37
3.5 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	40
4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีแก๊สเซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ.....	40
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มี การเปลี่ยน คุณสมบัติชิ้นส่วน.....	40
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1.....	41
4.1.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2.....	41
4.1.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3.....	42
4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีแก๊สเซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	42
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มี การเปลี่ยน คุณสมบัติชิ้นส่วน.....	42
4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1.....	43
4.2.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2.....	43
4.2.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3.....	44
4.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีแก๊สเซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ.....	44
4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มี การเปลี่ยน คุณสมบัติชิ้นส่วน.....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1.....	45
4.3.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2.....	45
4.3.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3.....	46
4.4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีแกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ.....	46
4.4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยน คุณสมบัติชิ้นส่วน.....	46
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1.....	47
4.4.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2.....	47
4.4.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3.....	48
4.5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีแกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	48
4.5.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยน คุณสมบัติชิ้นส่วน.....	48
4.5.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1.....	49
4.5.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2.....	49
4.5.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีแก๊สเซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ.....	50
4.6.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มี การเปลี่ยน คุณสมบัติชิ้นส่วน.....	50
4.6.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1.....	51
4.6.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2.....	51
4.6.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยน คุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	53
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย และแนวทางทางในการดำเนินการศึกษาใน อนาคต.....	54
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	56
ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ.....	40
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ.....	41
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ.....	41
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ.....	42
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	42
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	43
ตารางที่ 4.7 จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	43
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	44
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ.....	44

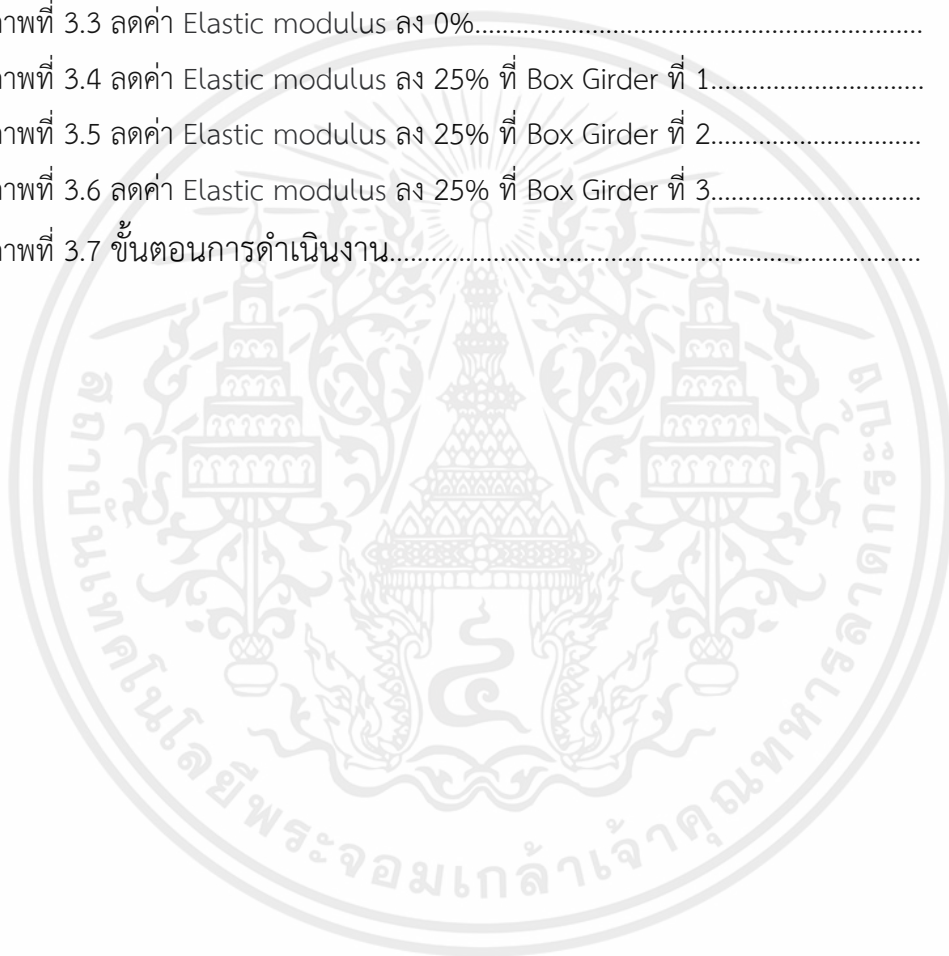
ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ.....	50
ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ.....	51
ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ.....	51
ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ.....	52



สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 จำนวนสะพานที่อายุต่างในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง).....	4
รูปภาพที่ 2.2 จำนวนสะพานประเภทต่างๆในประเทศไทย (อ้างอิงกรมทางหลวง).....	4
รูปภาพที่ 2.3 เพอร์เซ็นต์สัดส่วนสะพานประเภทต่างๆในประเทศไทย (อ้างอิงกรมทางหลวง).....	5
รูปภาพที่ 2.4 เทคโนโลยีเซนเซอร์.....	7
รูปภาพที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ Seismic.....	10
รูปภาพที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ Piezoelectric.....	11
รูปภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของ Time-domain และ Frequency domain.....	13
รูปภาพที่ 2.8 สัญญาณในรูปแบบของ (ก) Time domain และ (ข) Frequency domain.....	13
รูปภาพที่ 2.9 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA.....	16
รูปภาพที่ 2.10 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล.....	17
รูปภาพที่ 2.11 การตอบสนองการสั่นแบบอิสระได้มาจากการใช้ NEXt.....	20
รูปภาพที่ 2.12 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NEXt.....	20
รูปภาพที่ 2.13 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NEXt-ERA.....	21
รูปภาพที่ 2.14 Machine Learning.....	22
รูปภาพที่ 2.15 เปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการเขียนโปรแกรมแบบเดิมและMachine Learning (ก) การเขียนโปรแกรมแบบเดิม และ (ข) Machine Learning.....	23
รูปภาพที่ 2.16 แผนภาพ Machine Learning.....	23
รูปภาพที่ 2.17 แผนภาพขั้นตอนการเรียนรู้ (Learning phase).....	24
รูปภาพที่ 2.18 แผนภาพขั้นตอนการอนุมานจากโมเดล (Inference from model).....	24
รูปภาพที่ 2.19 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของ Machine Learning.....	25
รูปภาพที่ 2.20 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของ $P(X_1 X_2 = x_2)$	29
รูปภาพที่ 2.21 องค์ประกอบของสะพาน.....	32
รูปภาพที่ 2.22 โครงสร้างสะพานส่วนบน (ก) พื้นสะพาน และ (ข) คานตามยาวรูปตัวไอ และค้ำยันคานตามยาว.....	32
รูปภาพที่ 2.23 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ก) คานรัดหัวเสา และ (ข) ค้ำยันตอม่อ.....	33

รูปภาพที่ 2.24 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ค) คานรัดหัวเสา และ (ง) ค้ำยันต่อม่อ.....	33
รูปภาพที่ 2.25 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (จ) ฐานราก และ (ฉ) เสาเข็ม.....	34
รูปภาพที่ 2.26 ส่วนประกอบรอง (ก) แผ่นรองรับคานแบบ Paper Asphalt และ (ข) รอยต่อเพื่อขยาย.....	34
รูปภาพที่ 2.27 ส่วนประกอบรอง (ค) แผงกั้นจราจร และ (ง) ราวสะพาน.....	35
รูปภาพที่ 2.28 ระบบพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง.....	35
รูปภาพที่ 3.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ของสะพาน.....	37
รูปภาพที่ 3.2 หน้าตัดของสะพานรูปกล่อง.....	37
รูปภาพที่ 3.3 ลดค่า Elastic modulus ลง 0%.....	38
รูปภาพที่ 3.4 ลดค่า Elastic modulus ลง 25% ที่ Box Girder ที่ 1.....	38
รูปภาพที่ 3.5 ลดค่า Elastic modulus ลง 25% ที่ Box Girder ที่ 2.....	38
รูปภาพที่ 3.6 ลดค่า Elastic modulus ลง 25% ที่ Box Girder ที่ 3.....	39
รูปภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงสร้างพื้นฐานประเภทสะพานได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อตอบสนองระบบขนส่งเนื่องจากการขยายตัวของเมือง ในอนาคตอันใกล้ โครงสร้างสะพานจำนวนมากกำลังจะมีอายุมากกว่า 15 ปี ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวต้องการการตรวจสอบสภาพและซ่อมแซม เพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม งบประมาณและกำลังคนนั้นมีอยู่อย่างจำกัดในแต่ละปี ดังนั้นการจัดสรรงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องจำเป็น

โดยทั่วไป ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสะพานนั้นจะแปรผันตรงกับระดับความเสียหาย ถ้าหน่วยงานที่ดูแลสะพานสามารถตรวจพบความเสียหายและซ่อมแซมได้ก่อนที่ความเสียหายจะขยายตัวกลายเป็นความเสียหายขนาดใหญ่ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสะพานได้ ในทางปฏิบัติ การตรวจสอบสภาพสะพานนั้นจะทำด้วยประเมิณทางสายตาในทุก ๆ 2-5 ปี เพื่อประเมินสภาพของสะพานและจัดลำดับความรุนแรงของความเสียหาย จากนั้นงบประมาณจะถูกจัดสรรไปตามกระบวนการจัดลำดับความสำคัญของสะพาน ในบางครั้ง ความเสียหายของสะพานอาจจะไม่ถูกตรวจพบในระหว่าง 2-5 ปี ที่รอการตรวจสอบสภาพสะพาน ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเพิ่มขึ้น ดังนั้นการตรวจพบความเสียหายของสะพานได้ก่อนที่ความเสียหายจะขยายตัว จะสามารถช่วยให้การจัดสรรงบประมาณในการดูแลสะพานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งความเสียหายบางประเภทอาจไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยสายตา เช่น รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในชั้นทางคอนกรีต สนิมในเหล็กเสริม สนิมในคานเหล็ก ความเสื่อมสภาพของยางที่ฐานรองรับสะพาน วิธีการตรวจพบนอกจากการประเมินทางสายตาควรถูกพัฒนา

ซึ่งจากข้อมูลการติดตามโครงสร้างสะพานที่ได้กระทำกันมาอย่างต่อเนื่องเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟวงจรชีวิตของโครงสร้างและค่าบำรุงรักษาพบว่า ในขณะที่เมื่อเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพและคุณภาพของโครงสร้างจะลดลง ในเช่นเดียวกันค่าบำรุงรักษาและซ่อมแซมกลับมากขึ้นด้วย ถ้าเปรียบเทียบกับตรวจสอบแบบพิเศษที่จะกระทำทุก ๆ 2-5 ปี พบว่าในช่วงเวลา 2-5 ปีนั้น สามารถเกิดเหตุการณ์ได้หลากหลาย เช่นเดียวกันถ้าหากสะพานเกิดความเสียหายในช่วงเวลาปีที่ 1-2 จะทำให้ไม่สามารถแก้ไขสะพานได้จนกว่าจะมีการมาตรวจสอบสะพานอีกครั้งเมื่อครบ 5 ปี ในกรณีที่เลวร้ายถ้าหากประชาชนกำลังใช้งานสะพานดังกล่าวอยู่แล้วสะพานเกิดการชำรุดเสียหายอย่างรุนแรงโดยที่ไม่ทันได้ตั้งตัวนั้นหมายความว่าถึงชีวิตของประชาชนกำลังมีความเสี่ยง จึงเป็นสาเหตุที่บางที่การตรวจสอบทุก 5 ปีอาจจะสายเกินไป

ด้วยเหตุผลที่ว่า การตรวจสอบทุก 2-5 ปีนั้นอาจจะสายเกินไป และด้วยข้อจำกัดที่ว่างประมาณ และกำลังคนที่ใช้ในการตรวจสอบนั้น มีอย่างจำกัด อีกทั้งในการตรวจสอบแต่ละครั้งนั้นจะต้องมีการเดินทางไปตรวจสอบที่ตัวสะพานจริงหรือทำการติดตั้งเครื่องมือเพื่อเก็บข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์เป็นไปได้อย่าง ทางเลือกของการแก้ไขปัญหานี้ เพื่อพัฒนาการตรวจสอบสภาพสะพานด้วยสายตา จึงมีระบบการเฝ้าระวัง โครงสร้าง (Structural Health Monitoring) ด้วยเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์วัดความเร่ง การกระจัดและความเค้น ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อ การตรวจพบความผิดปกติของโครงสร้างด้วยข้อมูลตามเวลาจริง (Real Time) ในทางปฏิบัติระบบดังกล่าวยังถูกใช้ในการแจ้งเตือนการตรวจสอบสภาพของสะพาน เช่น ถ้าค่าความเร่งหรือความเค้นมีค่าสูงผิดปกติ ระบบจะแจ้งเตือนหน่วยดูแลสะพานให้มีการออกไปตรวจสอบ สภาพ ณ สะพานจริง

เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานนั้น เกี่ยวข้องกับการสั่นไหวจากยานพาหนะ, แรงแลม, แรงแผ่นดินไหว จึงมีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการใช้พฤติกรรมการสั่นไหว อาทิ เช่น ค่าความถี่สั่นพ้อง (Natural frequency) และรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง (Modal shape) ในการตรวจพบความเสียหายของโครงสร้าง และมีการใช้หลักการดังกล่าวในระบบเฝ้าระวังสะพานอยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้นการประมวลผลภายหลังของค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งเพื่อให้ได้มาซึ่งดัชนีวัดการสั่นไหวจึงเป็น ความคิดที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวิธีการประเมินความเสียหายร่วมกับระบบเฝ้า ระวังโครงสร้าง

ทางผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้ทำการวิจัยในหัวข้อนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย ขอบเขตในการทำวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และลำดับการทำวิจัย นั้นได้แสดงในหัวข้อต่อไป

1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อพัฒนากระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างสะพานแบบ Box Girder ด้วยเทคนิค วิธี Bayesian Inference Technique

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้คานช่วงเดียว และคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ในการศึกษาเป็นตัวแทนโครงสร้างสะพาน

1.3.2 ใช้โมเดลแบบ Box Girder และโมเดลแบบ Line Element ในการศึกษาทางพลศาสตร์ และการศึกษา ด้วยเทคนิค Linear perturbation

1.3.3 ใช้ข้อมูลความเร่งในกระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิค Bayesian Inference Technique

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสามารถจัดแบ่งกระบวนการศึกษาได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่

1.4.1 ใช้การสร้างโมเดลโดย Finite Element เป็นตัวแทนให้กับโครงสร้างสะพาน

1.4.2 จำลองความเสียหายลงในโมเดล

1.4.3 หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างจากเทคนิค Linear perturbation และนำไปเข้ากระบวนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Bayesian Inference Technique

1.4.4 เปรียบเทียบค่า Elastic Modulus ของโครงสร้างจากที่กำหนดกับเทคนิค Bayesian Inference Technique

1.4.5 ตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการและประเมินความเสียหายต่างๆ จำนวนความถี่ธรรมชาติและจำนวนการวนซ้ำมีผลต่อค่า Elastic Modulus โดยใช้เทคนิค Bayesian Inference Technique

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

1.5.1 สามารถพัฒนาเทคนิค วิธี Bayesian Inference Technique ให้มาประยุกต์ใช้ได้จริงกับโครงสร้างสะพานในการเฝ้าระวังและติดตามความเสียหาย

1.5.2 สามารถนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาต่อให้เป็นระบบ และสร้างโปรแกรมที่เป็นมาตรฐานและใช้งานได้อย่างสะดวก

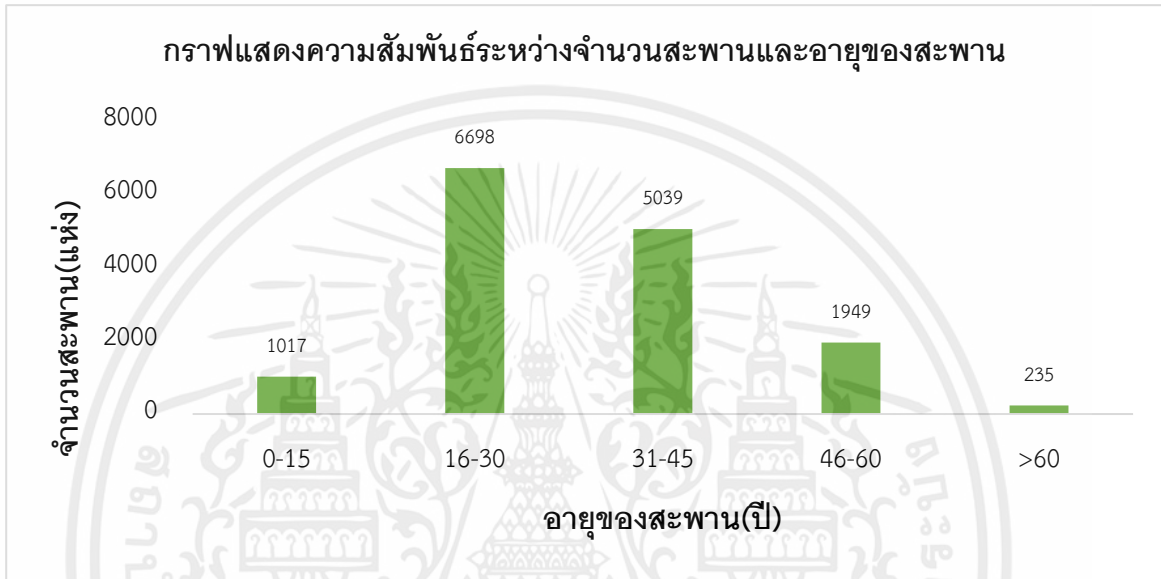
1.5.3 สร้างความปลอดภัยและมั่นใจมากขึ้นในการใช้งานสะพานที่มีอายุค่อนข้างมาก

1.5.4 ทางองค์กรที่เป็นหน่วยงานสำหรับติดตามและซ่อมแซมสะพาน จะสามารถจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุดสำหรับการซ่อมแซมสะพานในแต่ละครั้ง

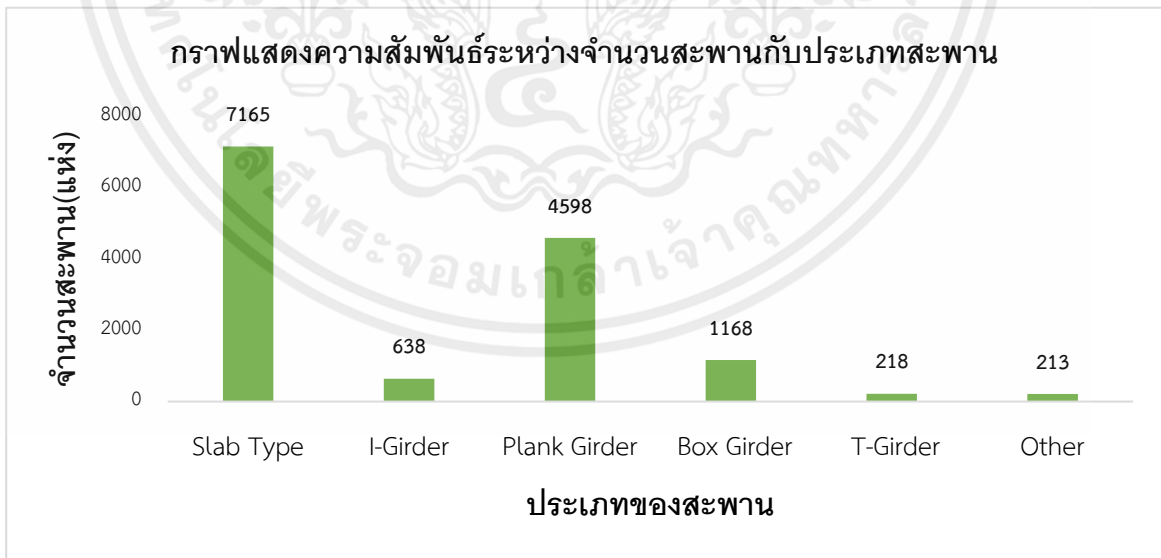
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 สะพานในประเทศไทย

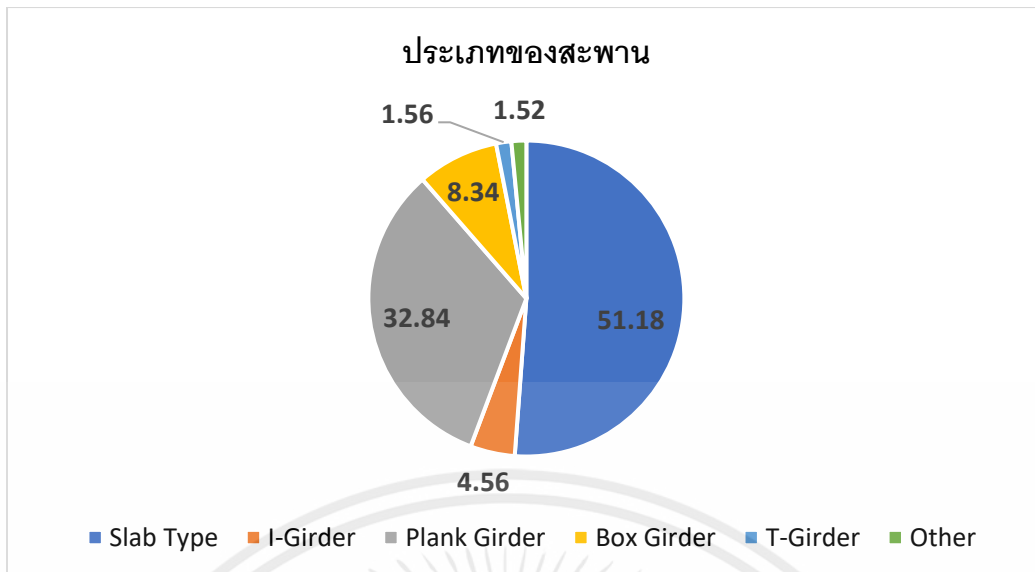
ปัจจุบันในประเทศไทยมีสะพานเป็นจำนวนมากกว่า 10,000 แห่งที่มีความสำคัญต่อการคมนาคมของประชาชน และปัจจุบันสะพานมีอายุที่แตกต่างกันไปหลายช่วงแสดงดังกราฟดังกล่าว



รูปที่ 2.1 จำนวนสะพานที่อายุต่างในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง)



รูปที่ 2.2 จำนวนสะพานประเภทต่าง ๆ ในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง)



รูปที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์สัดส่วนสะพานประเภทต่าง ๆ ในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง)

2.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS)

คือระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพานช่วยบริหารจัดการข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมตรวจสอบ คัดราคาซ่อม การประเมินอายุของสะพาน การรับน้ำหนักของสะพาน การจัดลำดับความสำคัญของสะพานเพื่อเสนอของบประมาณ และการใช้ข้อมูลเชิงบริหาร

2.2.1 ประโยชน์ของ BMMS

2.2.1.1 ด้านประสิทธิภาพในการบริหาร

- รวดเร็ว ไม่ซ้ำซ้อน เพิ่มประสิทธิภาพ
- เพิ่มความปลอดภัยสะพานบนโครงข่ายทางหลวง

2.2.1.2 ด้านการบริหารงบประมาณ

- ได้ภาพรวมการซ่อมบำรุงรักษา
- มีข้อมูลสนับสนุนที่มาของงบ เช่น ค่าซ่อมสะพาน
- บริหารงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพ
- แจกแจงและเปรียบเทียบงบประมาณ

2.2.2 ขั้นตอนของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 ข้อมูล INPUT

ข้อมูลทั่วไปของสะพาน เช่น ตำแหน่งที่ตั้ง, ปริมาณการจราจร, ข้อมูลที่ตั้ง, ปีที่สร้าง

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

2.2.2.2 กระบวนการ

- Model การเสื่อมความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน
- Model อายุที่เหลือของสะพาน
- การคิดราคาค่าซ่อมแซมรายปีตามราคาวีสดุที่เปลี่ยนแปลงไป
- การคิดราคาค่าขนส่งตามระยะทางจริง
- การจัดลำดับความสำคัญของสะพาน

2.2.3 การตรวจสอบสะพาน (Inspection)

ระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานภายหลังการก่อสร้างหรือการเปิดใช้งานสะพาน ประกอบด้วย กระบวนการทำงานต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่การวางแผนการตรวจสอบ การตรวจสอบ การวางแผนการ ซ่อมแซม การซ่อมแซม และการปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้าง เป็นวงจรต่อเนื่องและสนับสนุนซึ่งกันและกันด้วยระบบ ฐานข้อมูลเพื่อใช้พิจารณาประกอบการดำเนินการโดยระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานที่มีประสิทธิภาพนั้นมีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้การดำเนินการต่าง ๆ ทุก ๆ ขั้นตอนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เป็นไปได้อย่างมีความเหมาะสม รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณ ทั้งนี้เพื่อความมั่นคงแข็งแรงของสะพาน ตลอดจนความปลอดภัยของผู้ใช้บริการสะพาน ผู้ที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนของการตรวจสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน ประกอบด้วย ขั้นตอน และรายละเอียดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบ และขึ้นส่วนที่ทำการตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบควรจะต้องมีความรู้ความชำนาญในวิธีการตรวจสอบ และความเข้าใจทางด้านพฤติกรรมสะพาน การตรวจสอบ สามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะตามความถี่ในการตรวจสอบดังนี้

1. การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection) เป็นการตรวจสอบตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด เช่น การตรวจสอบประจำเดือน หรือการตรวจสอบประจำปี เพื่อให้ทราบถึงสภาพของสะพานในช่วงเวลาต่าง ๆ หากสะพานเริ่มเกิดความเสียหาย จะได้มีมาตรการตรวจสอบความเสียหายเพิ่มเติม ซ่อมแซมหรือ

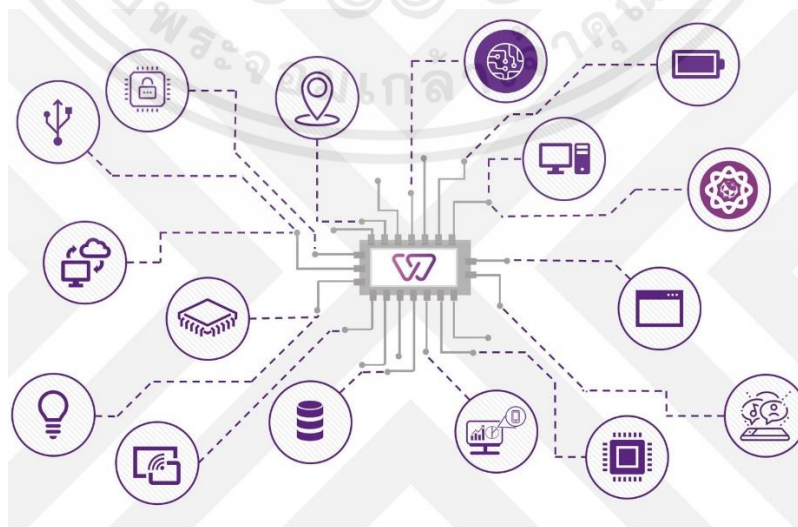
บำรุงรักษาอื่น ๆ ได้ทันเวลาที่ โดยทั่วไปมักจะเป็นทดสอบทางกายภาพที่ใช้ระยะเวลาและงบประมาณต่อหนึ่งสะพานไม่มากนัก

2. การตรวจสอบพิเศษ (Special Inspection) เป็นการตรวจสอบเพิ่มเติมภายหลังที่ทราบว่า สะพานเกิดความเสียหายขึ้น เป็นการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดความเสียหายติดตามการขยายตัวของความเสียหาย หรือประเมินความสามารถของสะพานอย่างละเอียดเป็นต้น การตรวจสอบพิเศษในบางกรณีเป็นวิธีเฉพาะ มีข้อควรระวังและเทคนิควิธีการที่ละเอียดซับซ้อน จำเป็นต้องตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

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

2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology)

เซนเซอร์ (Sensor) คือ ชุดอุปกรณ์ วงจร หรือ ระบบ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือลักษณะของสิ่งต่าง ๆ โดยรอบวัตถุเป้าหมาย และนำข้อมูลจำนวนมาก (Big Data) ที่ได้จากการตรวจวัด เข้าสู่กระบวนการแจกแจง และวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลง ประมวลผล เป็นองค์ความรู้และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ให้มนุษย์สามารถนำองค์ความรู้มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดขั้นตอนของกระบวนการทำงาน



รูปที่ 2.4 เทคโนโลยีเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันมีการนำระบบ sensor มาใช้บนโทรศัพท์มือถือ ในหลายรูปแบบ เช่น G-sensor ระบบตรวจจับความเคลื่อนไหว , Accelerometer Sensor ระบบหมุนภาพ อัตโนมัติ, Orientation Sensor เซ็นเซอร์ปรับมุมมองหน้าจอ, Sound Sensor เซ็นเซอร์ตรวจจับระดับเสียง, Magnetic Sensor ตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก, Light Sensor ตรวจจับแสงสว่างสำหรับการปรับแสงบนหน้าจออัตโนมัติ และ Proximity Sensor ระบบเปิด/ปิดหน้าจออัตโนมัติขณะสนทนาแบบหู เป็นต้น ซึ่งเรามักพบคุณสมบัติเหล่านี้ได้กับโทรศัพท์มือถือ แบบ Smartphone ทั้งในระบบ iOS และ Android OS

อุปกรณ์เซนเซอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามคุณสมบัติในการตรวจวัด ประกอบด้วย

1. เซนเซอร์ด้านกายภาพ (Physical Sensor) คือ เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้เซลล์พิเศษที่มีความไว ต่อ แสง, การเคลื่อนไหว, อุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก, แรงโน้มถ่วง, ความชื้น, การสั่นสะเทือน, แรงดัน, สนามไฟฟ้า, เสียง และลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ ของสภาพแวดล้อมภายนอก/ภายใน เช่น แรงยึด, การเคลื่อนไหวของอวัยวะ รวมทั้งสารพิษ, สารอาหาร, และสภาพแวดล้อมการเผาผลาญภายใน เช่น ระดับน้ำตาล, ระดับออกซิเจน, ฮอร์โมน, สารสื่อประสาท เป็นต้น

2. เซนเซอร์ด้านเคมี (Chemical Sensor) คือ เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสารเคมีต่าง ๆ โดยอาศัยปฏิกิริยาจำเพาะทางเคมี และมีการแปลงเป็นข้อมูลหรือสัญญาณที่สามารถอ่านวิเคราะห์ได้ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดสารเคมีปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม หรือดินและน้ำเซนเซอร์ และ อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทดสอบ สัมพันธ์กันอย่างไร?ทิศทางการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทดสอบมีแนวโน้มจะประยุกต์เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถอ่านผลได้ง่าย แสดงผลเป็นระบบดิจิทัลหรือตัวเลข โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์และอ่านผลผู้ใช้สามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้ด้วยตัวเอง (Point-of-Care: PoC) จากลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ที่สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ที่มีขนาดพกพาสะดวกและใช้งานง่ายนั้น จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

3. เซนเซอร์ทางชีวภาพ (Biosensor) คือ เซนเซอร์ที่อาศัยเทคนิคการนำ สารชีวภาพ (Biological Recognition Material) มาเป็นตัวทำปฏิกิริยาจำเพาะกับสารเป้าหมาย เช่น เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับน้ำตาลในเลือด

ในยุค 4.0 เทคโนโลยี Sensor มีความสำคัญมากต่อการทำงานกับระบบเก็บข้อมูลอัตโนมัติต่าง ๆ ผ่านเครือข่ายของวัตถุที่เรียกว่า อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) และ AI เนื่องจาก ระบบ Sensor ในปัจจุบันมีทิศทางที่คาดว่าจะก้าวสู่ คำว่า วัตถุอัจฉริยะ (Smart Objects) โดยปัจจุบันได้มีการเชื่อมโยงและสื่อสารเข้ากับวัตถุต่าง ๆ รอบตัว ไม่ว่าจะเป็นรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน และแม้แต่สัตว์เลี้ยงที่บ้าน ก็สามารถเชื่อมโยงสื่อสาร และตอบสนองผ่าน IoT ซึ่งทั้งหมดต้องอาศัยเซนเซอร์ที่มีขนาดเล็กลง ฉลาดขึ้น และราคาที่ถูกลง ซึ่งมีการคาดการณ์ว่า วัตถุอัจฉริยะที่เชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเทอร์เน็ตจะมีมากถึง 13 ล้านล้านตัวภายในปี 2025 สำหรับระบบอัจฉริยะต่าง ๆ รวมทั้ง บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) ระบบขนส่งอัจฉริยะ (intelligent transport) เมืองอัจฉริยะ (Smart City) เกษตรกรรมอัจฉริยะ (Smart Agriculture) ระบบดูแลสุขภาพอัจฉริยะ (Smart Healthcare) เป็นต้น

ประเทศไทย 4.0 กำลังเตรียมมุ่งเข้าสู่เศรษฐกิจดิจิทัล รับรองได้ว่า เทคโนโลยีเซนเซอร์ มีความจำเป็นต้องลงทุนอย่างจริงจัง และเชื่อว่าในอีกไม่เกิน 10 ปีข้างหน้า จำนวนเซนเซอร์ทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นจากหลักพันล้านตัว (billion) ไปสู่หลักล้านล้านตัว (trillion) จนเรียกได้ว่า เทคโนโลยีนี้เข้าสู่ยุค Trillion Sensors จากแนวโน้มของเทคโนโลยีเซนเซอร์ ที่มีชิปเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กลง และมีความฉลาดและเป็นอัจฉริยะเพิ่มขึ้น จนสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผลเป็นองค์ความรู้และสร้างปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เพื่อพัฒนาให้เกิดเป็นนวัตกรรมฝีมือคนไทย และนักวิจัยมีบทบาทในเวทีนวัตกรรมด้านเซนเซอร์ของโลกต่อไป

2.3.1 Accelerometer Sensor

Accelerometer คือ เครื่องวัดความเร่ง ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ค้นเคยดีในมือถือสมาร์ตโฟนทั่วไป เช่น iPhone ตัวอย่างการใช้งานเช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกม ล้วนเป็นคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดมาในเครื่อง

โครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีกครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง

มิเตอร์วัดความเร่งนี้โดยหลักๆแล้วจะแบ่งเป็น 2 ชนิด

1. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซามิคส์แมส (seismic mass accelerometer)

มิเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการตรวจวัดระยะขจัดเชิงเส้นแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถอธิบายง่ายๆ ได้ก็คือ วัตถุชิ้นหนึ่งจะมีความเร่งได้ ก็จะต้องมีแรงกระทำที่ยิ่งมีแรงกระทำมาก ก็จะมีแรงเร่งมาก ในขณะที่เดียวกันแรงต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากด้วยนอกจากนี้เมื่อมีแรงมาทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ ก็จะมีระยะขจัด ซึ่งก็จะแปรผันตรงกับแรงที่มากกระทำที่วัตถุ ยิ่งแรงมาก ระยะขจัดยิ่งมาก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้นำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซามิกส์แมสในการตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุในเทอมของระยะขจัดที่เกิดขึ้น

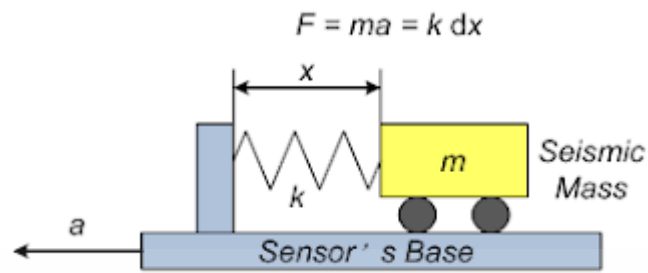


Fig-1 A spring-mass system

รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ Seismic

จากรูป แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซามิกส์แมส โครงสร้างนี้มีมวล m ที่เรียกว่ามวลตรวจการสั่นไหว (seismic mass) ยึดติดอยู่กับสปริงที่มีค่า spring constant เท่ากับ k และมวลนี้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับได้ซึ่งหลักการทำงานก็ง่ายๆ ไม่ได้ซับซ้อนอะไรเมื่อตัวเซนเซอร์ตัวนี้ถูกทำให้มีอัตราเร่งเกิดขึ้นจะส่งผลให้มวล m เคลื่อนที่ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ออกไปจะเป็นระยะขจัดเท่ากับ x และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวมิเตอร์

ดังนั้นอัตราเร่ง a ของวัตถุสามารถคำนวณหาค่าได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$a = x(k/m)$$

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

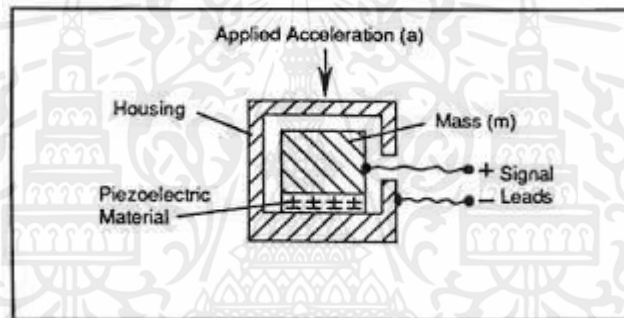
จากสมการดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า

- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะขจัดของมวล m มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าลดลง ทำให้มวล m เคลื่อนที่ไปดันสปริง
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุหยุดลง ก็จะทำให้มวล m เคลื่อนที่กลับมาอยู่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่งอ้างอิง) แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดระยะขจัดของมวล m ได้โดยอาศัยมิเตอร์อีกชนิดหนึ่งคือมิเตอร์วัดระยะขจัดเชิงเส้น (LVDT, potentiometer)

2. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric accelerometer)

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

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



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ Piezoelectric

จากรูปแสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric accelerometer) สามารถอธิบายการทำงานง่ายๆ ได้ดังนี้

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

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

2.4 Structural Health Monitoring

การตรวจสอบสุขภาพโครงสร้าง (SHM) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ในทุกช่วงเวลาของชีวิตของโครงสร้างการวินิจฉัยของ "รัฐ" ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของที่แตกต่างกันขึ้นส่วนและจากการประกอบอย่างเต็มรูปแบบของชิ้นส่วนเหล่านี้ประกอบเป็นโครงสร้างโดยรวมสถานะของโครงสร้างจะต้องคงอยู่ในโดเมนที่ระบุในการออกแบบแม้ว่าสิ่งนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยอายุปกติเนื่องจากการใช้งานโดยการกระทำของสภาพแวดล้อมและโดยเหตุการณ์ที่ไม่ได้ตั้งใจ ขอบเขตเวลาของการตรวจสอบซึ่งทำให้เป็นไปได้ที่จะพิจารณาฐานข้อมูลประวัติแบบเต็มของโครงสร้างและด้วยความช่วยเหลือของ ตรวจสอบการใช้งานมันยังสามารถให้การพยากรณ์โรค (วิวัฒนาการของความเสียหายชีวิตที่เหลือ ฯลฯ)

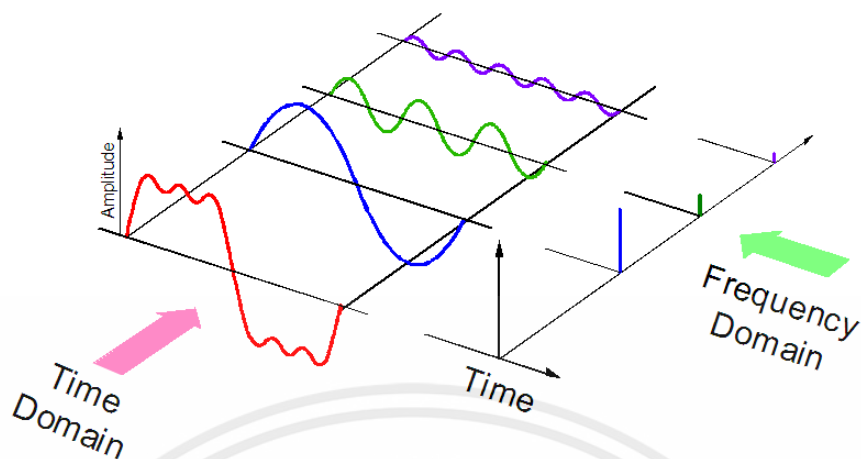
หากพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันแรกการวินิจฉัยสามารถประมาณได้ว่าการตรวจสอบสุขภาพโครงสร้างเป็นวิธีใหม่และปรับปรุงในการประเมินผลแบบไม่ทำลาย ที่กล่าวมาเป็นความจริงบางส่วน แต่ SHM นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการรวมกันของเซ็นเซอร์, วัสดุที่ชาญฉลาด, การส่งข้อมูล, การคำนวณพลังงานและความสามารถในการประมวลผลภายในโครงสร้าง ทำให้สามารถพิจารณาได้อีกครั้งการออกแบบโครงสร้างและการจัดการเต็มรูปแบบของโครงสร้างตัวเองและของโครงสร้างถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่กว้างขึ้น

รายละเอียดการจัดระเบียบของระบบ SHM ทั่วไปส่วนแรกของระบบซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ฟังก์ชันสามารถกำหนดโดย:

- i) ประเภทของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับความเสียหายซึ่งตรวจสอบโดยเซ็นเซอร์
- ii) ประเภทของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เซ็นเซอร์ใช้เพื่อสร้างสัญญาณ (โดยทั่วไปคือไฟฟ้า) ที่ส่งไปยัง

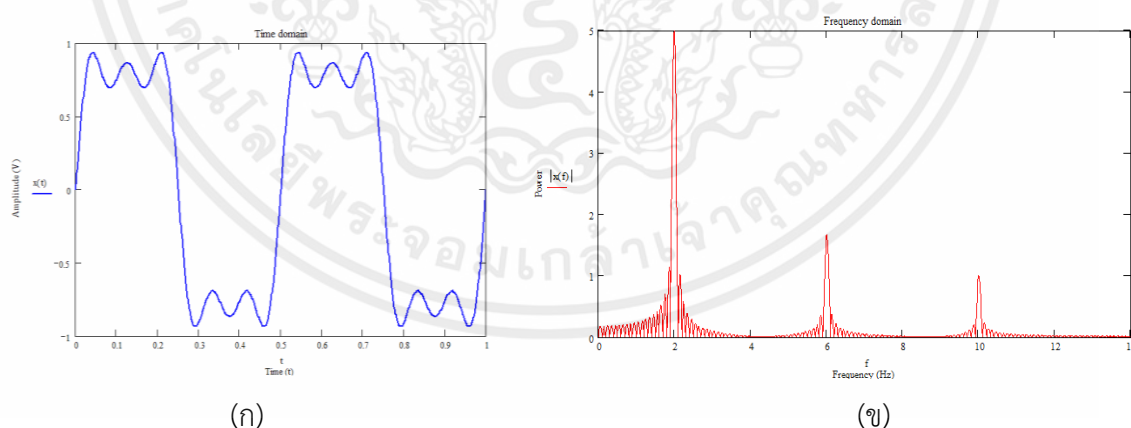
การได้มาและการจัดเก็บระบบย่อย เซ็นเซอร์หลายตัวที่เป็นชนิดเดียวกัน เครือข่ายสามารถมัลติเพล็กซ์และข้อมูลของพวกเขาพร้อมกับผู้ที่มาจากประเภทอื่น ๆ อาจเป็นไปได้ว่าเซ็นเซอร์อื่น ๆ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมทำให้มัน เป็นไปได้ที่จะดำเนินการฟังก์ชันการตรวจสอบการใช้งาน สัญญาณที่ส่งมอบโดย การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบย่อยควบคุมไปกับข้อมูลที่ลงทะเบียนก่อนหน้านี้คือ ใช้โดยคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างการวินิจฉัย การผสมข้อมูลของความเชื่อสัตย์ การตรวจสอบระบบย่อยด้วยการใช้งานระบบย่อยการตรวจสอบและกับความรู้ตามกลไกความเสียหายและกฎหมายพฤติกรรมทำให้เป็นไปได้

2.5 Time-domain Method



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของ Time domain และ Frequency domain

โดเมน หมายถึงการอธิบายความหมายต่าง ๆ คือหากการอธิบายหรือการทำงานนั้นกระทำภายใต้ตัวแปรของเวลา (t) ก็จะเรียกว่า Time domain หรือ โดเมนเวลา หรือถ้าหากการทำงานนั้นกระทำภายใต้ตัวแปรของความถี่ (f) ก็จะเรียกว่า Frequency domain หรือ โดเมนความถี่ เป็นต้น ในการวิเคราะห์สัญญาณเดียวกันนั้นคุณสมบัติบางอย่างอาจมองได้เด่นชัดในอีกโดเมนหนึ่ง เช่น กราฟที่ 3 ใน Time domain เราสามารถจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและขนาดของสัญญาณในขณะที่เวลาเปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน แต่จะบอกได้ยากกว่าสัญญาณนั้นประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้าง แต่ใน Frequency domain นั้นเราสามารถที่จะระบุได้ว่าสัญญาณนั้นประกอบด้วยความถี่ใดบ้างแต่ละความถี่นั้นมีพลังงานเท่าไร



รูปที่ 2.8 สัญญาณในรูปแบบของ (ก) Time domain และ (ข) Frequency domain

จากรูป (ก) เป็นสัญญาณในรูปแบบของ Time domain ซึ่งใช้ Oscilloscope เป็นเครื่องมือวัด สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและขนาดของสัญญาณในขณะที่เวลาเปลี่ยนไปได้ แต่ไม่สามารถรู้ได้ว่าสัญญาณที่วัดได้ประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้าง ดังนั้นในรูปที่ 4 (ข) เป็นสัญญาณในรูปแบบของ Frequency domain ซึ่งใช้ Spectrum เป็นเครื่องมือวัด จะเห็นได้ว่ามีความถี่ใดบ้างเป็นส่วนประกอบใน

ที่นี้ การเปลี่ยนจาก Time domain ไปเป็น Frequency domain นั้นในทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ โดยการ Fourier Transformation ส่วนการแปลงจาก Frequency domain ไปเป็น Time domain นั้นทำได้โดยการ Inverse Fourier Transformation ซึ่งแสดงสมการได้ดังนี้

Fourier Transformation
$$X(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Inverse Fourier Transformation
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

เมื่อ $x(t)$ คือ สมการในรูปของ Time domain

$X(\omega)$ คือ สมการในรูปของ Frequency domain

2.6 Frequency domain method

FDE เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของผลตอบสนองที่อยู่ในตัวแบบเชิงพหุนาม (Polynomial Model) เป็นฟังก์ชันที่ได้มาจากการจำลองสถานการณ์ผ่านปัจจัย การจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีนี้ต้องการจำนวนครั้งการทำจำลองระบบเพียง 2 ถึง 3 ครั้งเท่านั้นก็สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือไม่ สิ่งสำคัญในการใช้โดเมนความถี่ในการคัดเลือกปัจจัยประกอบไปด้วย

รูปแบบปัญหา

FDE ใช้ประโยชน์ในระบบที่ไม่ทราบความสัมพันธ์ที่แน่นอน (Black Box) โดยความสัมพันธ์ในระบบจะถูกสมมติให้มีความสัมพันธ์แบบพหุนามลำดับที่ k เมื่อกำหนดให้ปัจจัยมีจำนวน p ตัว นั้นคือ x_1, x_2, \dots, x_p ผลตอบสนองกำหนดให้เป็นเป็นตัวแปร y ค่าคาดหวังของผลตอบสนองคือ $E(y)$ เป็นฟังก์ชันของทุกตัวแปร x ดังนั้นตัวแบบมีสมการพหุนามลำดับที่ k เป็นดังนี้

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1\tau_1 + \beta_2\tau_2 + \dots + \beta_q\tau_q \quad (2.1)$$

หรือ
$$E(y) = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j\tau_j$$

เมื่อ $E(y)$ เป็นค่าคาดหวังของผลตอบสนอง

τ_j เป็นเทอมในพหุนาม ลำดับที่ k โดยผลรวมของเลขชี้กำลังของตัวแปรไม่มากกว่าค่า k ยกตัวอย่างเช่น ในเทอม $j = 1$ และถ้า $k = 5$ แล้ว $\tau_1 = x_1^2x_2^4$ จะไม่อยู่ในเทอมของสมการเพราะเลขชี้กำลัง $2 + 4$ มากกว่า 5 เป็นต้น

β_j เป็นสัมประสิทธิ์ของเทอม τ_j ถ้าเทอมของ τ_j ใดๆ ที่มีความหมายต่อฟังก์ชันค่าสัมประสิทธิ์ β_j จะไม่มีค่าเป็นศูนย์ และ q เป็นจำนวนเทอมทั้งหมดของฟังก์ชันผลตอบสนอง

2.7 Fourier Transformation

จุดประสงค์ของการหาอนุกรมฟูเรียร์และฟูเรียร์ทรานสฟอร์มก็เพื่อที่จะดูว่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่มักให้เห็นในรูปของอาณาจักรของเวลา (time domain) มีองค์ประกอบทางความถี่ (frequency components) ในอาณาจักรของความถี่ (frequency domain) ที่ความถี่ใดบ้าง การแปลงข้อมูลจากระบบของเวลา ให้กลายเป็นระบบของความถี่ จะใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการแปลงไปกลับได้ ดังนี้

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f t} df$$

$s(t)$, $S(\omega)$, คือสัญญาณในระบบของเวลา, จาก $\omega = 2\pi f$, จะได้ว่า

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

และเพื่อความถูกต้องเนื่องจากความสมมาตร จะได้ว่า

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

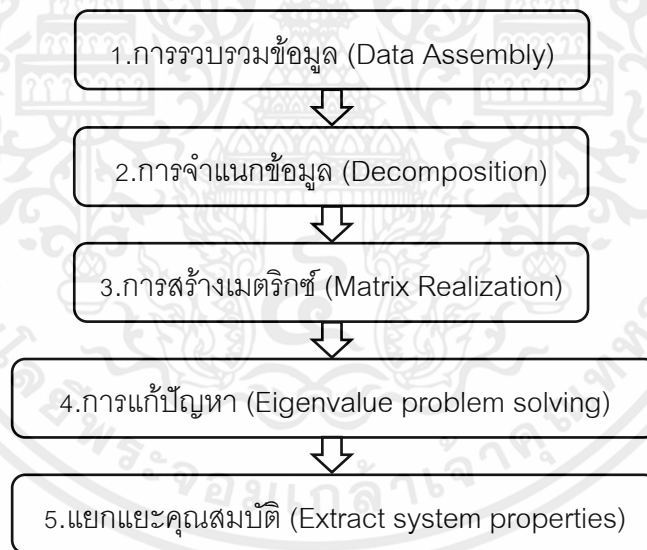
บางครั้งการใช้ Fourier transform สามารถใช้กับสัญญาณจริงหรือสัญญาณเชิงซ้อน และโดยทั่วไปสัญญาณเชิงซ้อนจะอยู่ในรูปของ ω (หรือ f).

Fourier transform ใช้ได้กับสัญญาณเวลาที่เป็นระยะและไม่ตรงตามเวลาซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขั้นต่ำ เกือบทุกสัญญาณในโลกแห่งความจริงสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้

2.8 Eigensystem Realization Algorithm

เป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบสุขภาพโครงสร้าง ERA สามารถใช้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบ Modal และสร้างการรับรู้ของระบบโดยใช้การตอบสนองของโดเมนเวลา (multi-) input และ (multi-) data output ERA ถูกเสนอโดย Juang และ Pappa 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 ใช้สำหรับการวิเคราะห์เพิ่มเติมและระบุความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยใช้ Natural frequencies, mode shapes และ damping ratios

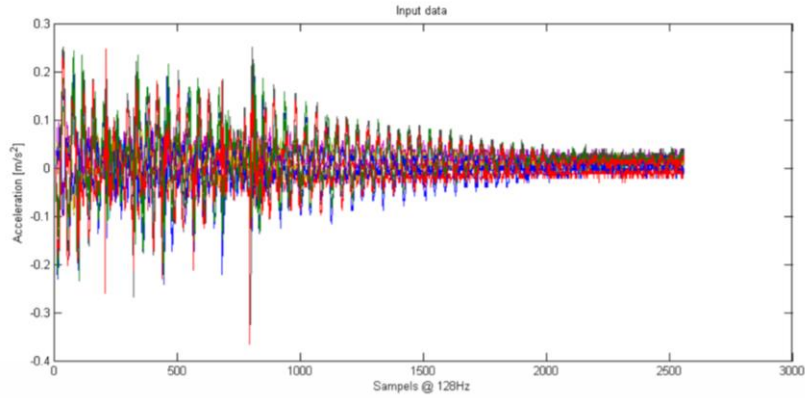
2.8.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA

2.8.1.1 การรวบรวมข้อมูล (Data Assembly)

เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการวัดตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นจะนำข้อมูลมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ Hankel Matrix และ Shift Hankel Matrix



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล

จากนั้นจะนำข้อมูลมาสร้างเมทริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือเมทริกซ์จัตุรัสที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว ตัวอย่างเช่น

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

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

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

2.8.1.2 การจำแนกข้อมูล (Decomposition)

จะเป็นการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) คือเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกมาให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่เท่ากันจำนวน 3 เมทริกซ์ ยกตัวอย่างเช่น มีเมทริกซ์จัตุรัส A ขนาด N x N จะแยกออกเป็นเมทริกซ์ U, V และ D ซึ่ง $A = UDV^T$ โดยที่ V^T คือ ทรานเวิร์สเมทริกซ์ของเมทริกซ์ V

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

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

$$\text{SVD}(\mathbf{A}) = \lambda_1 \mathbf{U}_1 \mathbf{V}_1^T + \lambda_2 \mathbf{U}_2 \mathbf{V}_2^T + \dots + \lambda_n \mathbf{U}_n \mathbf{V}_n^T$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T.$$

2.8.1.3 การสร้างเมตริกซ์ (Matrix Realization)

เมตริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือเมตริกซ์จัตุรัสที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว พบว่า

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

2.8.1.4 การแก้ปัญหา (Eigenvalue problem solving)

เมื่อแก้ปัญหาก็ได้ว่า Eigenvalue = $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$

Eigenvectors = $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

2.8.1.5 แยกแยะคุณสมบัติ (Extract system properties)

จาก Eigenvalue = $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$

Eigenvectors = $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

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

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

2.9 Natural Excitation Technique (NExT)

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

Natural Excitation Technique (NExT) ถูกนำมาใช้ครั้งแรกสำหรับการทดสอบโมดอลของกังหันลมภายใต้แรงกระตุ้นจากลม และมีการใช้ในการศึกษาจำนวนมาก พิจารณาโครงสร้างอิสระหลายระดับที่อธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = F(t) \quad (2.2)$$

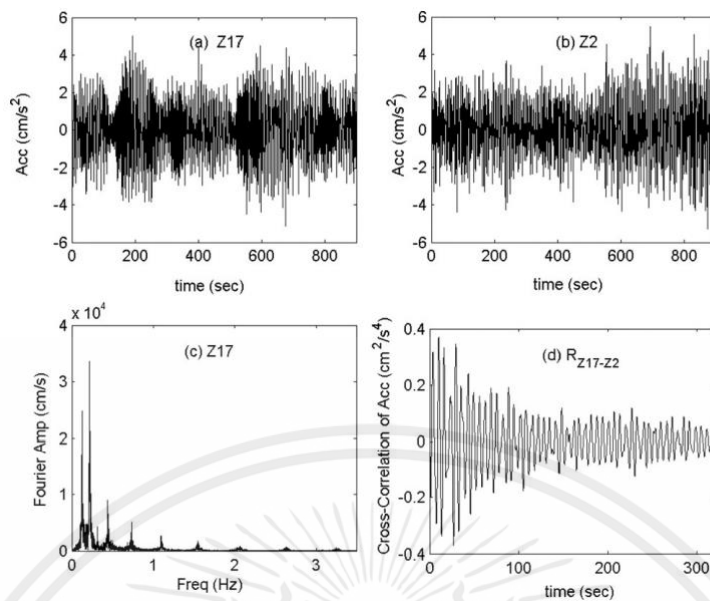
เมื่อ $y(t)$ คือ เวกเตอร์ของการกระจัดที่เวลา t , $F(t)$ คือเวกเตอร์ของแรงในแต่ละช่วงเวลา M , C และ K คือเมทริกซ์ของมวล ตัวหน่วง และค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง (stiffness) ตามลำดับ และ (\cdot) เป็นตัวระบุอนุพันธ์เทียบกับเวลา สมมติว่าอินพุตเป็นการกระตุ้นจาก white noise สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าฟังก์ชัน cross-correlation ระหว่างเวกเตอร์ความเร่งกับสัญญาณความเร่ง $R\ddot{y}, \ddot{y}_i, i(\tau)$ คือ

$$MR\ddot{y}, \ddot{y}_i(\tau) + CR\dot{y}, \dot{y}_i(\tau) + KR\ddot{y}, \ddot{y}_i(\tau) = 0 \quad (2.3)$$

สมการนี้มีรูปแบบเดียวกับสมการเชิงอนุพันธ์เอกพันธ์ของการเคลื่อนที่และบอกเป็นนัยว่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ $\ddot{R}, \dot{y}, \ddot{y}_i(\tau)$ มีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณสั่นสะเทือนอิสระจากโครงสร้าง ซึ่งฟังก์ชัน cross-correlation สามารถประมาณได้โดยใช้สองวิธีที่แตกต่างกัน วิธีแรกเป็นขั้นตอนโดยตรง และอีกวิธีคือผ่านการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFTs) ขั้นตอนโดยตรงใช้ข้อมูลโดเมนเวลาในขณะที่เป็นการประมาณค่า และวิธี FFTs ต้องคำนวณฟังก์ชันความหนาแน่นของสเปกตรัม พิจารณามันที่ความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งฟังก์ชัน cross-correlation ระหว่างสองช่องสัญญาณของความถี่ i และ j ถูกประมาณ โดยใช้วิธีการโดยตรงโดยใช้สมการ

$$\ddot{R}\ddot{y}_i, \ddot{y}_j(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{l=1}^{N-k} \ddot{y}_i(l) \ddot{y}_j(l+k) \quad (2.4)$$

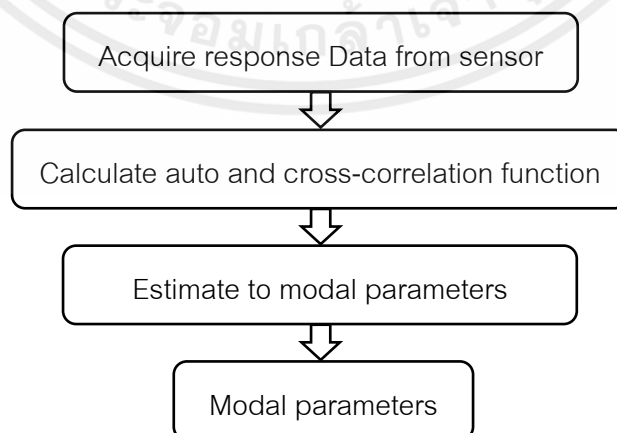
เมื่อ Δt และ L คือ การเปลี่ยนแปลงของเวลาและจำนวนจุดทั้งหมดของความถี่ที่บันทึกตามลำดับ วิธีที่สองในการประมาณฟังก์ชัน correlation ประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสามารถทำได้โดยง่ายโดยวิธีของ Welch ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เช่น MATLAB



รูปที่ 2.11 การตอบสนองการสั่นแบบอิสระได้มาจากการใช้ NEXT

กระบวนการนี้ การบันทึกเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกข้อมูล และความหนาแน่นของสเปกตรัม จะถูกคำนวณโดยการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของสเปกตรัม FFT ของแต่ละบล็อกข้อมูล ผู้วิเคราะห์ควร กำหนดจำนวนจุดสำหรับ FFT จำนวนจุดข้อมูลที่ทับซ้อนกันระหว่างแต่ละบล็อก และความยาวเรกคอร์ด หรือจำนวนบล็อกสำหรับการคำนวณ นอกจากนี้ ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องตัดสินใจว่าควรใช้ช่องอ้างอิง (หรือ ช่องสัญญาณ) ไตในการคำนวณฟังก์ชัน cross-correlation และประเภทของฟังก์ชัน tapering (เช่น Hanning หรือ Hamming) ที่ใช้สำหรับแต่ละบล็อกข้อมูล สิ่งสำคัญคือต้องระบุว่าจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่เป็นฟังก์ชัน cross-correlation มีเท่ากับจำนวนจุดที่ใช้สำหรับ FFT และความถี่ในการสุ่มตัวอย่างจะ เท่ากับความถี่การสุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึก

2.9.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค NEXT



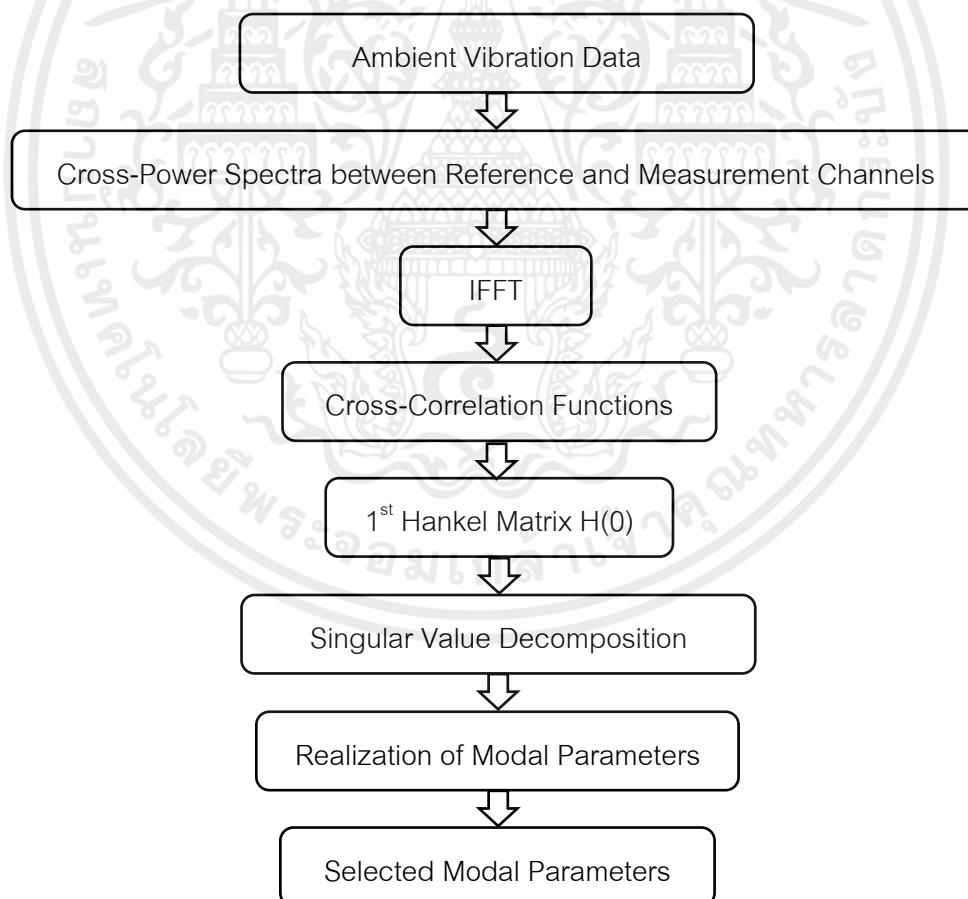
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NEXT

2.10 Natural Excitation Technique (NExT) and Eigensystem Realization

Algorithm

การระบุโมดอลโดยใช้ NExT และ ERA มีสามขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือข้อมูลการกระตุ้นโดยรอบ จะได้รับการประมวลผลด้วย NExT เพื่อรับสัญญาณที่มีลักษณะเดียวกันกับข้อมูลการสั่นสะเทือนอิสระ ยกตัวอย่างพารามิเตอร์ เช่น จำนวนจุดสำหรับการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFTs) และความถี่การสุ่ม ตัวอย่างของข้อมูลมีความสำคัญสำหรับขั้นตอนนี้ ขั้นตอนที่สอง ERA จะใช้เพื่อให้ได้แบบจำลองตัวเลขของระบบในรูปแบบคงที่โดยอิงจากสัญญาณการสั่นสะเทือนอิสระนี้ ในที่นี้ จำนวนโหมดการสั่นสะเทือนที่คาดหวัง และจำนวนแถวและคอลัมน์ของเมทริกซ์ Hankel เป็นพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการระบุโมดอล และขั้นตอนสุดท้าย ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างโหมด และอัตราส่วนการหน่วง จะคำนวณจากแบบจำลองตัวเลขที่ระบุ

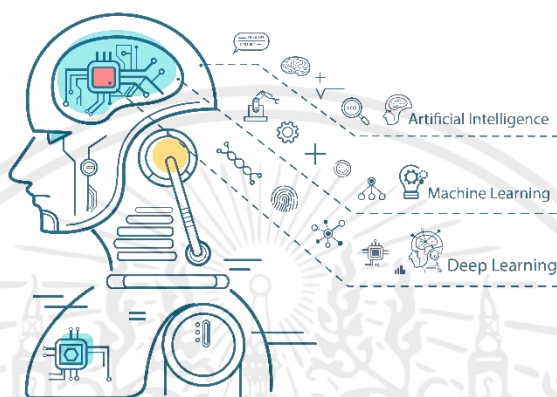
2.10.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT-ERA



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค NExT-ERA

2.11 Machine Learning

Machine Learning คือ ส่วนการเรียนรู้ของเครื่อง ถูกใช้งานเสมือนเป็นสมองของ AI (Artificial Intelligence) อาจพูดได้ว่า AI ใช้ Machine Learning ในการสร้างความฉลาด มักจะใช้เรียกโมเดลที่เกิดจากการเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์ ไม่ได้เกิดจากการเขียนโดยใช้มนุษย์ มนุษย์มีหน้าที่เขียนโปรแกรมให้ AI (เครื่อง) เรียนรู้จากข้อมูลเท่านั้น ที่เหลือเครื่องจะจัดการประมวลเอง

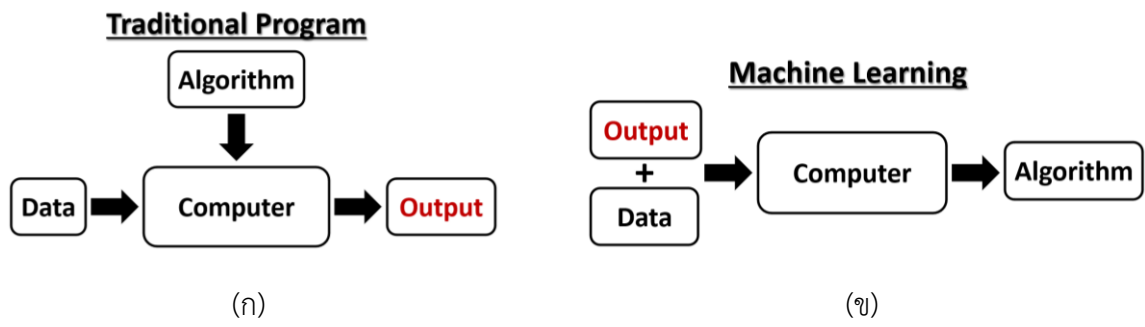


รูปที่ 2.14 Machine Learning

Machine Learning เรียนรู้จากสิ่งที่เราส่งเข้าไปกระตุ้น แล้วจดจำเอาไว้เป็นมันสมอง ส่งผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลข หรือ code ที่ส่งต่อไปแสดงผล หรือให้ AI นำไปแสดงการกระทำ Machine Learning เองสามารถเอาไปใช้งานได้หลายรูปแบบ ต้องอาศัยกลไกที่เป็นโปรแกรมหรือเรียกว่า Algorithm ที่มีหลากหลายแบบ โดยมี Data Scientist เป็นผู้ออกแบบ หนึ่งใน Algorithm ที่ได้รับความนิยมสูง คือ Deep Learning ซึ่งถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย และประยุกต์ใช้ได้หลายลักษณะงาน อย่างไรก็ตาม ในการทำงานจริง Data Scientist จำเป็นต้องออกแบบตัวแปรต่างๆ ทั้งในตัวของ Deep Learning เอง และต้องการ Algorithm อื่นๆ มาเป็นคู่เปรียบเทียบกับเพื่อมองหา Algorithm ที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานจริง

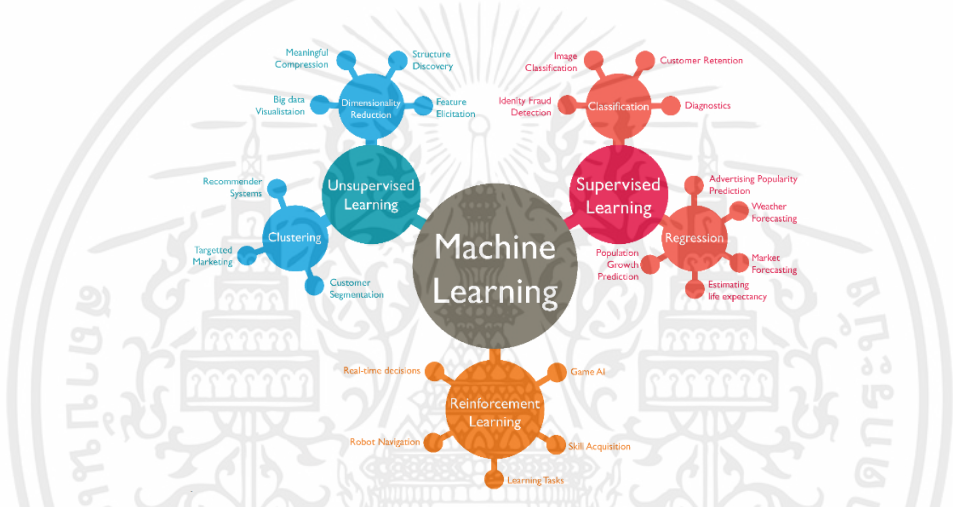
โดยหากพิจารณา Machine Learning เทียบกับการเขียนโปรแกรมในสมัยก่อนจะค้นพบว่า Machine Learning นั้นมีความแตกต่างจากการเขียนโปรแกรมในสมัยก่อนเป็นอย่างมาก โดยการเขียนโปรแกรมในสมัยก่อนนั้นคำสั่งโปรแกรมทั้งหมดจะต้องถูกกำหนดแนวทางไว้ชัดเจนจากผู้เชี่ยวชาญที่ต้องการจะพัฒนาซอฟต์แวร์นั้น ๆ โดยความซับซ้อนของแต่ละชุดคำสั่งนั้นขึ้นอยู่กับความรู้ความสามารถของผู้พัฒนาระบบ และเมื่อระบบเริ่มซับซ้อนมากขึ้น ยิ่งจำเป็นต้องมีชุดคำสั่งที่ถูกเขียนเพิ่มขึ้น ทำให้การบำรุงรักษาระบบจะไม่เสถียร โดย Machine Learning จะเรียนรู้ว่าข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกที่ได้รับมามีความเกี่ยวข้องกันอย่างไร และระบบจะทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของข้อมูล เพื่อเขียนชุดคำสั่งขึ้นมาใหม่โดยที่โปรแกรมเมอร์ไม่จำเป็นต้องเขียนกฎใหม่ทุกครั้งที่มีข้อมูลใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการเขียนโปรแกรมแบบเดิมและ Machine Learning
 (ก)การเขียนโปรแกรมแบบเดิม และ (ข)Machine Learning

2.11.1 ประเภทของ Machine learning



รูปที่ 2.16 แผนภาพ Machine learning

Machine learning แบ่งเป็น 3 ประเภท

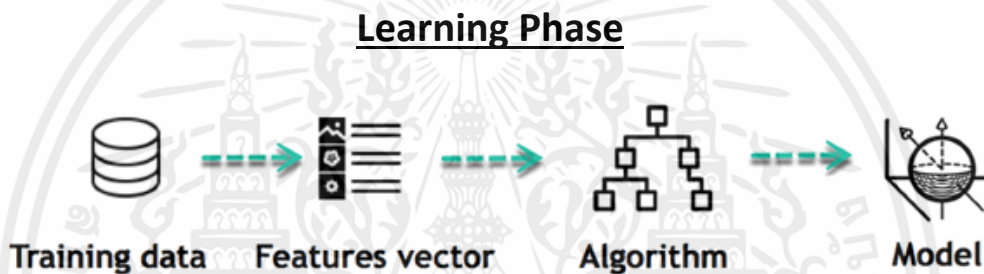
1. Supervised Learning — เรียนรู้โดยมี data มาสอน
2. Unsupervised Learning — เรียนรู้โดยไม่มี data สอน
3. Reinforcement Learning — เรียนรู้ตามสภาพแวดล้อม

โดย Machine learning ในแบบที่งานวิจัยนี้ใช้คือ Supervised Learning เป็นการเรียนรู้ที่เครื่องจักรจะต้องอาศัยข้อมูลในการฝึกฝน เปรียบเสมือนกับการเรียนการสอนของเด็กเล็ก โดยจำเป็นจะต้องอาศัยชุดข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยชุดของข้อมูลและชุดผลลัพธ์ของข้อมูลที่ต้องการ โดยผลที่ได้จากการเรียนรู้คือ Machine Learning สามารถคาดคะเนผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการได้รับข้อมูล ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดของ Machine Learning ในกลุ่ม Supervised Learning ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในเชิงธุรกิจ คือ การคำนวณราคาบ้านหรือการวิเคราะห์ผลฟุตบอล เป็นต้น

2.11.2 การเรียนรู้และการอนุมานของ Machine learning

วัตถุประสงค์หลักของ Machine Learning คือ การเรียนรู้ (learning) และการอนุมาน (inference) สิ่งแรกคือ machine จะเรียนรู้ผ่านการค้นพบรูปแบบหรือแบบแผนซ้ำ ๆ เดิม ๆ การค้นพบถึงการมีอยู่ข้อมูล (data) จะเป็นการเลือกอย่างระมัดระวังว่าข้อมูลไหนสนับสนุนกับเครื่อง คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาถูกเรียกว่า feature vector คุณสามารถนึกถึง feature vector ว่าเป็นชุดย่อยของข้อมูลทั้งหมดที่ถูกใช้ในการแก้ปัญหา

บางครั้ง machine ใช้อัลกอริทึมแปลก ๆ เพื่อทำให้ง่ายต่อชีวิตจริงและดัดแปลงสิ่งที่ค้นพบให้กลายเป็นโมเดล(model) ดังนั้น ขั้นตอนการเรียนรู้ (learning stage) นั้นถูกใช้เพื่อที่จะอธิบายเกี่ยวกับข้อมูล และรวบรวมให้มันกลายเป็น model ขึ้น



รูปที่2.17 แผนภาพขั้นตอนการเรียนรู้ (Learning phase)

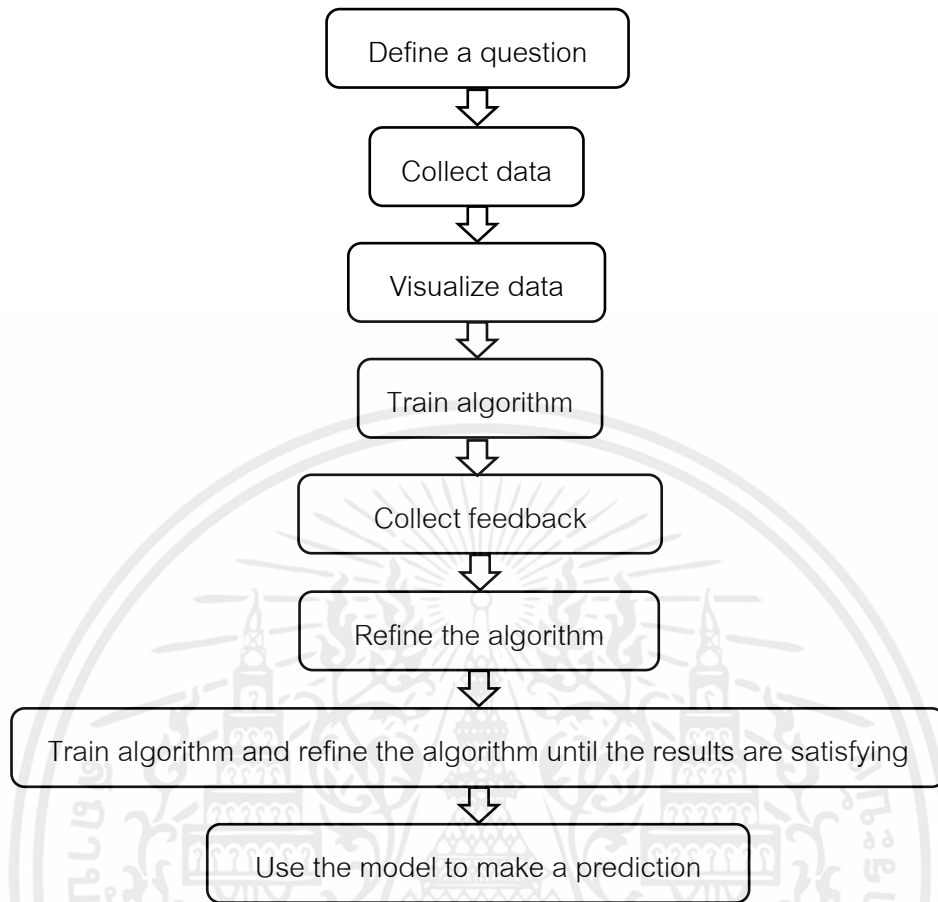
เมื่อ model ถูกสร้างขึ้นมา เป็นไปได้ว่ามันจะถูกทดสอบถูกสมรรถนะของมันกับข้อมูลที่ไม่เคยพบเจอมาก่อน โดยข้อมูลที่แปลกตาเหล่านั้นถูกแปลงให้กลายเป็น feature vector และถูกรวบรวมให้กลายเป็น model และ ทำการพยากรณ์ออกมาได้ นี่แหละคือส่วนของ Machine learning ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเติมกฎใด ๆ ลงไปหรือ train สิ่งใด ๆ เพิ่มเติมเข้าไปใน model สามารถใช้ model ก่อนหน้านี้ train เพื่อทำการอนุมานข้อมูลใหม่ ๆ ต่อไปได้

Inference from model



รูปที่2.18 แผนภาพขั้นตอนการอนุมานจากโมเดล (Inference from model)

2.11.3 ลำดับขั้นตอนของ Machine Learning



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของ Machine Learning

2.12 การอนุมานแบบเบย์เซียน (Bayesian inference technique)

สถิติแบบเบย์เซียน (Bayesian inference technique) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับความไม่แน่นอน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการระบุว่า บุคคลควรจะมีพฤติกรรมเช่นไรในการหลีกเลี่ยงความไม่แน่นอนของพฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์บางประเภท ซึ่งการที่บุคคลจะตัดสินใจว่าควรจะมีพฤติกรรมอย่างไรอย่างมีเหตุผลนั้น การตัดสินใจดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความพึงพอใจสูงสุดที่ได้ทำการคาดหวังไว้ โดยเบย์ให้ความเห็นว่าการตัดสินใจอย่างมีเหตุผลนั้น อาจจะแปรไปตามเหตุการณ์ที่ปรากฏ กล่าวโดยสรุป คือ สถิติแบบเบย์เซียน เป็นระเบียบวิธีการประมาณความไม่แน่นอนส่วนบุคคล ในลักษณะที่เป็นการคาดคะเนล่วงหน้า (Prescriptive Statistic) หรืออาจกล่าวได้ว่า สถิติแบบเบย์เซียนคือ สถิติที่บอกว่าบุคคลนั้นควรปฏิบัติเช่นไร ถ้าบุคคลนั้นๆ ประสงค์ที่จะหลีกเลี่ยงความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่ไม่พึงปรารถนา (Bernardo and Smith,1195)

ตามทฤษฎีบทของเบย์ (Bayes,2005) การวิเคราะห์สถิติแบบเบย์เขียนใช้ความน่าจะเป็นเป็นตัวแสดงค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ไม่ได้มาจากค่าสังเกตหรือ y ซึ่งมีเงื่อนไขอยู่บนข้อมูลที่ได้จากค่าสังเกต y หรือเรียกว่าค่าพารามิเตอร์ θ ของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) โดยเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งแสดงในรูปของ $p(\theta|y)$ หรือ $p(y|\theta)$ นอกจากนั้นยังสามารถแสดงเงื่อนไขบนตัวแปรร่วม x ที่ทราบค่าได้อีกด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์สถิติแบบเบย์เขียนนั้นมีความแตกต่างจากการวิเคราะห์ทางสถิติในรูปแบบเดิม (Classical Statistic) ซึ่งจะใช้ความถี่สัมพัทธ์ของเหตุการณ์ที่สนใจในการวิเคราะห์เป็นหลัก (Gelman,Carlin et al.,2004)

ความน่าจะเป็นของพารามิเตอร์ θ เมื่อทราบค่า y มีค่าเท่ากับการแจกแจงของความน่าจะเป็นสัมพัทธ์ (Joint Probability Distribution) ระหว่าง θ และ y หรือเรียกว่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสัมพัทธ์ (Joint Probability Density Function) ซึ่งประกอบไปด้วย การแจกแจงก่อนหน้า (Prior Distribution) $p(y|\theta)$ (Gelman, Carlin et al.,2004; Koop,Poirier et al.,2007) ดังนี้

$$p(\theta, y) = p(\theta)p(y|\theta) = p(y)p(\theta|y) \quad (2.5)$$

เมื่อใช้กฎของเบย์ (Bayes' Rule) หรือคุณสมบัติพื้นฐานของความน่าจะเป็นแบบเงื่อนไข (Conditional Probability) จะได้การแจกแจงภายหลัง (Posterior Distribution)

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta,y)}{p(y)} = \frac{p(\theta)p(y|\theta)}{p(y)} \quad (2.6)$$

เมื่อ $p(y) = \sum_{\theta} p(\theta)p(y|\theta)$; \sum_{θ} คือ ค่าผลรวมทั้งหมดที่เป็นไปได้ของพารามิเตอร์ θ (2.7)

และ $p(y) = \int p(\theta)p(y|\theta)d\theta$; θ เป็นค่าต่อเนื่อง (2.8)

จากสมการ (2.7) เมื่อกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นของ y หรือ $p(y)$ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ θ จะได้การแจกแจงภายหลัง ซึ่งถือเป็นหลักสำคัญในการอนุมานแบบเบย์เขียน การแจกแจงภายหลังดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ การแจกแจงก่อนหน้า (Prior Distribution) หรือ $p(\theta)$ และฟังก์ชันที่เป็นไปได้ (Likelihood Function) หรือ $p(y|\theta)$ แสดงได้ดังนี้

$$p(y) \propto p(\theta)p(y|\theta) \quad (2.9)$$

การอนุมานเกี่ยวกับค่าสังเกตที่ไม่ทราบค่า (Predictive Inference) หรือ y จะต้องกำหนดค่าการแจกแจงส่วนเพิ่ม (Marginal Distribution) หรือค่าการแจกแจงที่พยากรณ์ไว้ก่อนหน้า (Prior Predictive Distribution) ของ y

$$p(y) = \int p(y, \theta)d\theta = \int p(\theta)p(y|\theta)d\theta \quad (2.10)$$

สามารถพยากรณ์ค่าสังเกตที่ไม่ทราบค่า y หรือการแจกแจงที่พยากรณ์ได้ภายหลัง (Posterior Predictive Distribution) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} p(\tilde{y}|y) &= \int p(\tilde{y}, \theta|y) d\theta \\ p(\tilde{y}|y) &= \int p(\tilde{y}|\theta, y) p(\theta|y) d\theta \\ p(\tilde{y}|y) &= \int p(\tilde{y}|\theta) p(\theta|y) d\theta \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.12.1 ทฤษฎีบทของเบย์ (Bayes' rule)

ตามทฤษฎีบทของเบย์ (Bayes, 2005) ได้ทำการกำหนดให้ A_1, A_2, \dots, A_n เป็นเหตุการณ์ใดๆในแซมเปิลสเปซ S ที่ไม่เกิดขึ้นร่วมกันนั่นคือ

$$\bigcup_{i=1}^n A_i = S \quad (2.12)$$

และ $A_i \cap A_j = \phi$ เมื่อ $i \neq j$

และกำหนดให้ B เป็นเหตุการณ์ใดๆ ที่ $B \subset S$ จากความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional Probability)

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2.13)$$

ดังนั้น $P(A \cap B) = P(A|B)P(B)$ (2.14)

ทำนองเดียวกัน $P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$ (2.15)

และได้ว่า $P(A \cap B) = P(B|A)P(A)$ (2.16)

โดยที่ $B = A \cap B$ (2.17)

$$B = (A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \cap B \quad (2.18)$$

$$B = (A_1 \cap B) \cup (A_2 \cap B) \cup \dots \cup (A_n \cap B) \quad (2.19)$$

ดังนั้น $P(B) = P(A_1 \cap B) + P(A_2 \cap B) + \dots + P(A_n \cap B)$

$$P(B) = P(B|A_1)P(A_1) + P(B|A_2)P(A_2) + \dots + P(B|A_n)P(A_n)$$

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A_i)P(A_i) \quad (2.20)$$

ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional Probability) สามารถเขียนในรูปสมการ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(A_k|B) = \frac{P(A_k \cap B)}{P(B)} = \frac{P(B|A_k)P(A_k)}{\sum_{i=1}^n P(B|A_i)P(A_i)} \quad (2.21)$$

2.13 การถดถอยแบบกระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian process regression)

การถดถอยแบบกระบวนการเกาส์เซียนสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงจากข้อมูลเดิม การถดถอยแบบกระบวนการเกาส์เซียนมีขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ คือ การปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีเพื่อให้ได้กราฟการทำนายค่าที่แม่นยำแต่เนื่องจากมีความแปรปรวน จึงมีการใช้วิธีการถดถอยแบบกระบวนการเกาส์เซียนในการทำนายที่มีข้อมูลรบกวน (Prediction with noisy observations) โดยอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$y = f(x) + \epsilon \quad ; \text{ โดย } \epsilon \text{ คือ ข้อมูลรบกวน} \quad (2.22)$$

จากสมมุติฐานที่ว่าข้อมูลรบกวนในกระบวนการเกาส์เซียนมีการแจกแจงที่เป็นอิสระต่อกัน (Distributed Gaussian noise) ด้วยความแปรปรวน σ_n^2 จึงได้สมการการหาค่าฟังก์ชันที่มีข้อมูลรบกวนโดยพิจารณาจากค่าก่อนหน้า (the prior on the noisy observation) ดังสมการ (2.23)

$$\text{cov}(y) = K(X, X) + \sigma_n^2 I \quad (2.23)$$

การแจกแจงร่วม (joint distribution) ระหว่างค่า y กับค่า f^* (ค่าฟังก์ชันที่มีข้อมูลรบกวนโดยพิจารณาจากค่าก่อนหน้า) จึงได้สมการการแจกแจงร่วม ดังสมการที่ (2.24)

$$\begin{bmatrix} y \\ f_* \end{bmatrix} \sim \mathcal{N} \left(0 \begin{bmatrix} K(X, X) + \sigma_n^2 I & K(X, X_*) \\ K(X_*, X) & K(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) ; \text{ โดย } \mathcal{N} \text{ คือ จำนวนข้อมูล} \quad (2.24)$$

จากสมการทั้งหมดที่ได้ยกมาข้างต้น ทำให้ได้สมการสำหรับคำนวณการถดถอยแบบกระบวนการเกาส์เซียนที่มีสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (2.25)

$$f_* | X, y, X_* \sim \mathcal{N}(\bar{f}_*, \text{cov}(f_*))$$

$$\bar{f}_* \triangleq \mathbb{E}[f_* | X, y, X_*] = K(X_*, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} y$$

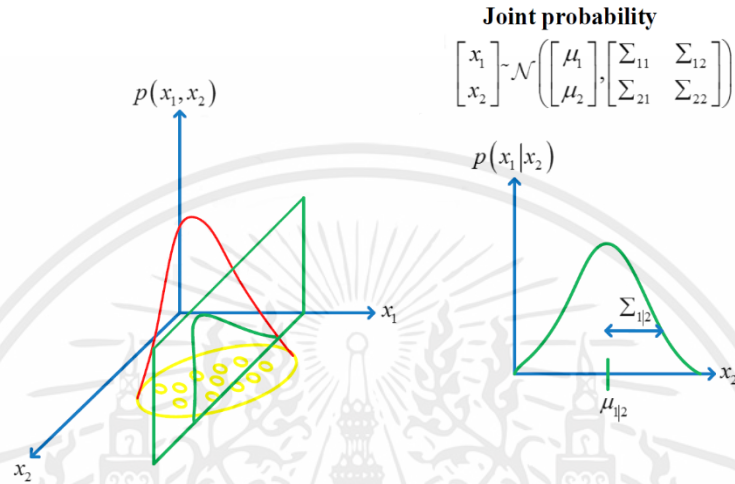
$$\text{cov}(f_*) = K(X_*, X_*) - K(X_*, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} K(X, X_*) \quad (2.25)$$

2.13.1 การกระจายแบบเกาส์เซียนหลายตัวแปร (Multivariable Gaussian Distribution)

ความหมายของการกระจายแบบเกาส์เซียนหลายตัวแปร (Multivariable Gaussian Distribution) ถูกนิยามโดยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF)

$$\mathcal{N}(\mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{d}{2}} \sqrt{|\Sigma|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu)\Sigma^{-1}(x - \mu)^T\right) \quad (2.26)$$

ซึ่ง $x \sim \mathcal{N}(\mu, \Sigma)$ มีค่าเป็นการสุ่มบนเวกเตอร์ $x \in \mathbb{R}^d$ ที่มีค่าเฉลี่ย (Mean : $\mu = \mathbb{E}[x] \in \mathbb{R}^d$) และโคแวนเรียนซ์ (Covariance : $\Sigma = \mathbb{E}[(x - \mu)(x - \mu)^T] \in \mathbb{R}^{d \times d}$) โดยที่ d หมายถึง ลำดับของมิติ (Number of Dimensions)



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของ $P(X_1|X_2 = x_2)$

จากรูปที่ 2.21 รูปทางซ้ายคือการกระจายแบบเกาส์สองตัวแปรตามการที่ (2.25) ระหว่างตัวแปร X_1 และ X_2 โดยกำหนดให้ $x_1 \in X_1$ และ $x_2 \in X_2$ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix}$ และโคแวนเรียนซ์เท่ากับ $\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{bmatrix}$ จากนั้นรูปทางขวาแสดงการหาความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional Probability) ของ $P(X_1|X_2 = x_2)$ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตามสมการ (2.26) และโคแวนเรียนซ์ตามสมการ (2.27) ตามลำดับ

$$\mu_{1|2} = \mu_1 + \Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}(x_2 - \mu_2) \quad (2.27)$$

$$\Sigma_{1|2} = \Sigma_{11} - \Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21} \quad (2.28)$$

2.14 Metropolis Hasting

(Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller, & Teller, 1953) ได้เสนอวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเมโทรโพลิส ซึ่งเป็นการจำลองตัวอย่างแบบลูกโซ่มาร์คอฟ ที่มีการแจกแจงของตัวอย่างลู่อู่เข้าสู่การแจกแจงแบบสมมาตรในสองชั้น โดยสร้างตัวเลือกจากความน่าจะเป็นเปลี่ยนสถานะ Q จากนั้นทำการ

ยอมรับตัวเลือกด้วยความน่าจะเป็น α ต่อมา (Hastings, 1970) ได้ปรับให้วิธีเมโทรโพลิสสามารถจำลองการแจกแจงทั่วไปได้และได้เปลี่ยนชื่อเป็นขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเมโทรโพลิส

สมมติให้ ณ จุดตัวอย่างปัจจุบัน $x^{(n)}$ ผู้จำลองสามารถสร้างจุดตัวอย่างถัดไป x^* ได้ด้วยความน่าจะเป็นเปลี่ยนสถานะ Q ที่มี p.d.f. ของการเปลี่ยนสถานะเป็น $q(x^{(n)}, x^*)$ และกำหนดให้ π' เป็น p.d.f. ของการแจกแจงเป้าหมาย π นิยามความน่าจะเป็นในการยอมรับตัวเลือก x^* เมื่อจุดปัจจุบันเป็น $x^{(n)}$ ใช้สัญลักษณ์ $\alpha(x^{(n)}, x^*)$

$$\alpha(x^{(n)}, x^*) = \begin{cases} \min\left(\frac{\pi'(x^*)q(x^*, x^{(n)})}{\pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*)}, 1\right) & ; \pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*) > 0 \\ 1 & ; \pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*) = 0 \end{cases}$$

ขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเมโทรโพลิสมีดังนี้

กำหนด : 1. p.d.f. π' ของการแจกแจง π

2. p.d.f. q ของการเปลี่ยนสถานะ q

ขั้นตอน : 1. กำหนดค่าเริ่มต้น $n = 1$ และจุดเริ่มต้น $X^{(n)} = x^{(n)}$

2. สุ่มจุด x^* จากฟังก์ชันความหนาแน่นที่กำหนด $q(x)$

3. สุ่ม $y \sim U(0,1)$ และคำนวณความน่าจะเป็น $\alpha(x^{(n)}, x^*)$ ซึ่ง

$$\alpha(x^{(n)}, x^*) = \begin{cases} \min\left(\frac{\pi'(x^*)q(x^*, x^{(n)})}{\pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*)}, 1\right) & ; \pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*) > 0 \\ 1 & ; \pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*) = 0 \end{cases}$$

4. เพิ่ม n ให้เป็น $n + 1$ และกลับไปขั้นตอนที่ 2

ผลลัพธ์ : ตัวอย่างที่อยู่ในรูปลำดับของจุด $\{X^{(n)}, n = 1, 2, \dots\}$ ที่มีการแจกแจงสู่เข้าการแจกแจง π

2.14.1 อัลกอริธึมของเมโทรโพลิส-เฮสติง (Metropolis-Hasting Algorithm)

อัลกอริธึมของเมโทรโพลิส-เฮสติงในเบื้องต้นนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการจำลองตัวอย่างจากการแจกแจงของ $\pi(x)$ และมีแนวคิดมาจาก Reversibility ของมาร์คอฟเชน ซึ่งสามารถสรุปหลักการดังนี้

1. เริ่มจากการกำหนดให้ $t = 0$ และจุดเริ่มต้น x_0 โดยที่ $\pi(x_0) > 0$

2. ทำการสุ่มตัวแคนดิเดท (candidate) x^* จากการแจกแจงพรอพโพซอล (Proposal Distribution) $Q(x^*: x^{(n)})$

3. คำนวณหาความน่าจะเป็นในการยอมรับ (Acceptance Probability) โดยจะเป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันความหนาแน่นระหว่างตัวอย่างปัจจุบันกับตัวแคนดิเดท

$$\alpha(x^{(n)}, x^*) = \begin{cases} \min\left(\frac{\pi'(x^*)q(x^*, x^{(n)})}{\pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*)}, 1\right) & ; \pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*) > 0 \\ 1 & ; \pi'(x^{(n)})q(x^{(n)}, x^*) = 0 \end{cases}$$

4. สร้างเลขสุ่มของการยอมรับ $U \sim \text{uniform}(0,1)$

$$x^{(n+1)} = \begin{cases} x^* & ; \text{เมื่อ } u < \alpha(x^{(n)}, x^*) \text{ ด้วยความน่าจะเป็น } \alpha(x^{(n)}, x^*) \\ x^{(n)} & ; \text{เมื่อ } u \geq \alpha(x^{(n)}, x^*) \text{ ด้วยความน่าจะเป็น } 1 - \alpha(x^{(n)}, x^*) \end{cases}$$

ซึ่งการกำหนดการแจกแจงพรอพโพซอลนั้นสามารถแบ่งได้หลายประเภท เช่น

1. Symmetric chain โดยจะกำหนดให้ $Q(x^*: x^{(n)}) = Q(x^{(n)}: x^*)$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } \alpha(x^{(n)}, x^*) = \min\left(\frac{\pi(x^*)}{\pi(x^{(n)})}, 1\right)$$

2. Random-Walk chain โดยจะกำหนดให้ $Q(x^*: x^{(n)}) = Q(|x^{(n)} - x^*|)$

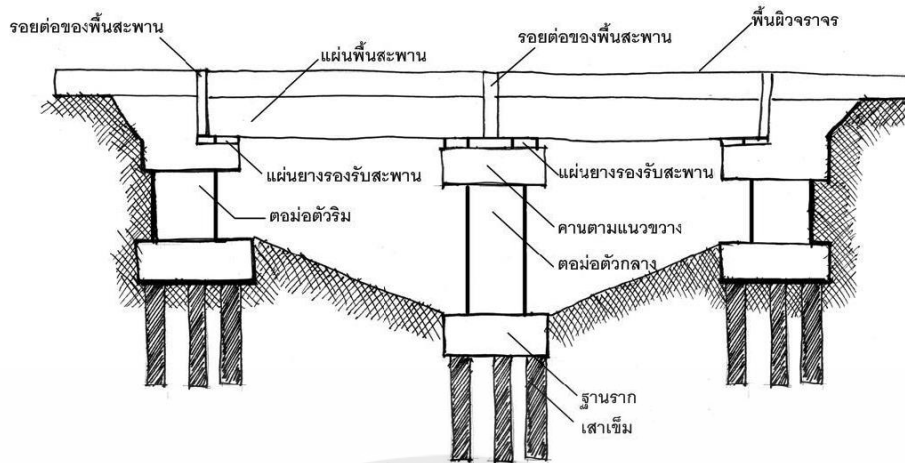
$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } \alpha(x^{(n)}, x^*) = \min\left(\frac{\pi(x^*)}{\pi(x^{(n)})}, 1\right)$$

3. Independence chain โดยจะกำหนดให้ $Q(x^*: x^{(n)}) = Q(x^*)$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } \alpha(x^{(n)}, x^*) = \min\left(\frac{w(x^*)}{w(x^{(n)})}, 1\right) \text{ เมื่อ } w(x^{(n)}) = \frac{\pi(x^{(n)})}{Q(x^{(n)})}$$

2.15 องค์ประกอบของโครงสร้างสะพาน (Bridge structure)

องค์ประกอบของโครงสร้างสะพานส่วนใหญ่มักจะมีรูปแบบและลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะแบ่งองค์ประกอบโครงสร้างออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure) โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure) และส่วนประกอบรอง (Secondary Components)



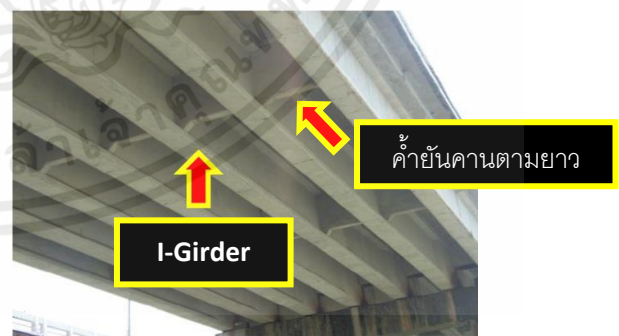
รูปที่ 2.21 องค์ประกอบของสะพาน

2.15.1 โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)

โครงสร้างส่วนบนของสะพานซึ่งอยู่เหนือแผ่นรองรับคาน (Bearing) ขึ้นไป เป็นองค์ประกอบหลักของสะพานที่ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักจากแผ่นพื้นสะพานผิวจราจรของสะพาน และน้ำหนักที่บรรทุกบนแผ่นพื้นสะพานจุดประสงค์ของโครงสร้างส่วนบนคือ เพื่อบรรทุกน้ำหนักที่ถ่ายเทมาจากแผ่นพื้นสะพานตลอดความยาวช่วงสะพาน และถ่ายเทต่อไปยังจุดรองรับหน้าที่ของโครงสร้างส่วนบนคือมีหน้าที่ถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกลงสู่โครงสร้างส่วนล่างโดยน้ำหนักบรรทุกนี้ อาจถูกถ่ายเทโดยผ่านแรงดึง แรงกด แรงดัด หรือ ทั้งสามแรงนี้รวมกัน ซึ่งสะพานอาจถูกตั้งขึ้นตามประเภทของโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนบน อาจจะถูกจัดประเภทโดยคำนึงถึงหน้าที่และการใช้งาน ชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนบนมีดังนี้ พื้นสะพาน (Deck) คานตามยาว (Girder) ค้ำยันคานตามยาว (Diaphragm)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.22 โครงสร้างสะพานส่วนบน (ก)พื้นสะพาน และ (ข)คานตามยาวรูปตัวไอและค้ำยันคานตามยาว

2.15.2 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)

โครงสร้างส่วนล่างของสะพานคือชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่อยู่ต่ำกว่าแผ่นรองรับคาน (Bearing) ลงไป จุดประสงค์ของโครงสร้างส่วนล่างคือ มีหน้าที่รองรับและถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างส่วนบนของสะพาน ให้ลงสู่ฐานรากหน้าที่ของโครงสร้างส่วนล่าง คือ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างส่วนล่างจะต้านน้ำหนักทั้งในแนวตั้งและแนวราบที่ถูกถ่ายเทมาจากโครงสร้างส่วนบน ชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนล่างมีดังนี้ คานรัดหัวเสา (Cap Beam) ค้ำยันตอม่อ (Bracing) เสาตอม่อ (Pier) กำแพงตอม่อ (Pier Wall) ฐานราก (Footing) เสาเข็ม (Pile)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.23 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ก)คานรัดหัวเสา และ (ข)ค้ำยันตอม่อ



(ค)

(ง)

รูปที่ 2.24 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ค)คานรัดหัวเสา และ (ง)ค้ำยันตอม่อ



(จ)

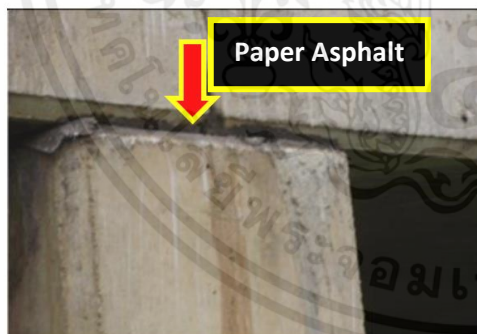


(ฉ)

รูปที่ 2.25 โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (จ)ฐานราก และ (ฉ)เสาเข็ม

2.15.3 ส่วนประกอบรอง (Secondary Components)

เป็นชิ้นส่วนที่ช่วยเสริมในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อสะพาน หรือมีประโยชน์ต่อสะพานด้านอื่น ๆ เช่น ผิวทาง (Wearing Surface) ช่วยรับน้ำหนักจากล้อรถและกระจายแรงสู่ระบบพื้นและคาน ระบบระบายน้ำ (Drainage) ช่วยในการระบายน้ำที่ขังออกจากผิวทาง ซึ่งส่วนประกอบรองมีดังนี้ หูช้าง (Wing Wall) เชิงลาดสะพาน (Approach) แผ่นรองรับคาน (Bearing) รอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint) ผิวทาง (Wearing Surface) แผงกั้นจราจร (Traffic Barrier) ราวสะพาน (Railing) ทางเท้า (Sidewalk) ระบบระบายน้ำ (Drainage) กำแพงกันดิน (Retaining Wall) ลาดป้องกันตลิ่ง (Slope Protection)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบรอง (ก)แผ่นรองรับคานแบบ Paper Asphalt และ (ข)รอยต่อเพื่อขยาย



(ค)

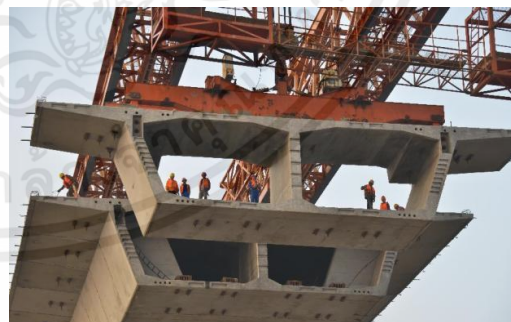


(ง)

รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบรอง (ค)แผงกั้นจราจร และ (ง)ราวสะพาน

2.16 ระบบพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box Girder)

เป็นระบบพื้นสะพานที่ใช้กับสะพานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงสูงสุด 20 เมตร ซึ่งพื้นสะพานระบบนี้ จะมีความหนามากกว่าระบบพื้นสะพานแบบ Plank Girder ที่ใช้สำหรับก่อสร้างสะพานที่มีความยาวช่วงประมาณ 10 เมตร โดยการก่อสร้างสะพานระบบนี้จะเริ่มจากการหล่อโครงสร้างคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box Girder) จากโรงงานและอาศัยการอัดแรงโดยวิธีการดึงลวดก่อน (Pre-Tension) จากนั้นจึงนำไปติดตั้งบริเวณหน้างาน โดยทั่วไปการก่อสร้างพื้นสะพานระบบนี้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งไม้แบบ ทั้งนี้ การติดตั้งคานอัดแรงรูปกล่องจะเริ่มจากการจัดเรียงคานสำเร็จรูปให้ติดกันแล้วเชื่อมด้วยเหล็กรับแรงเฉือนระหว่างคาน จากนั้นจึงเทคอนกรีตทับหน้าหนาประมาณ 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.28 ระบบพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง

บทที่ 3

วิธีการและขั้นตอนในการศึกษา

3.1 รูปแบบงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ของสะพานกล่องภายใต้แรง Free Vibration และ Force Vibration (Moving load) โดยใช้การติดตั้งอุปกรณ์ Sensor รับข้อมูลค่าความเร่งจากสะพาน นอกจากนี้ยังใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) และเทคนิค Bayesian Inference

3.2 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลได้ทำการศึกษาค้นคว้าจากหนังสือ วิทยานิพนธ์ และเอกสารวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยรายละเอียดของการศึกษาค้นคว้าได้แสดงไว้ในบทที่ 2

3.3 เครื่องมือวิจัย

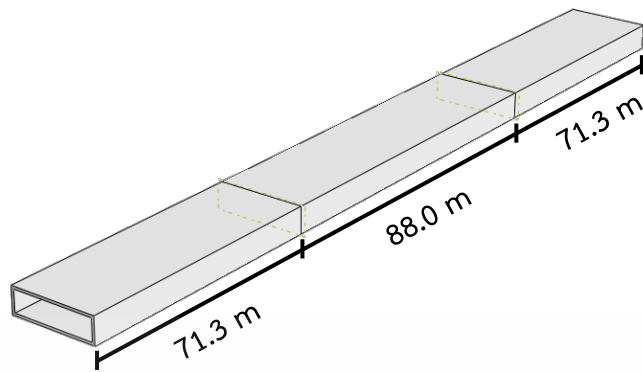
งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานเหล็กรูปกล่อง และทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยวิธีเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) และโปรแกรมคำนวณ MATLAB เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ รูปแบบการสั่นไหวและค่าความแข็งแรงของสะพาน

3.4 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

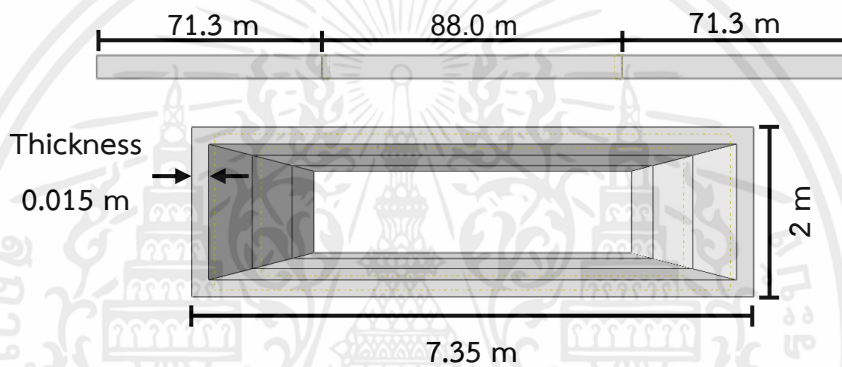
3.4.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ของสะพาน

3.4.1.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ของสะพาน

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานกล่องได้ใช้โปรแกรม ABAQUS ในการสร้างแบบจำลองโดยวิธี line element และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (แรงสถิตเทียบเท่า : Equivalent Static Forces) และวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) โดยแบบจำลองที่สร้างได้จากโปรแกรมแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ของสะพาน



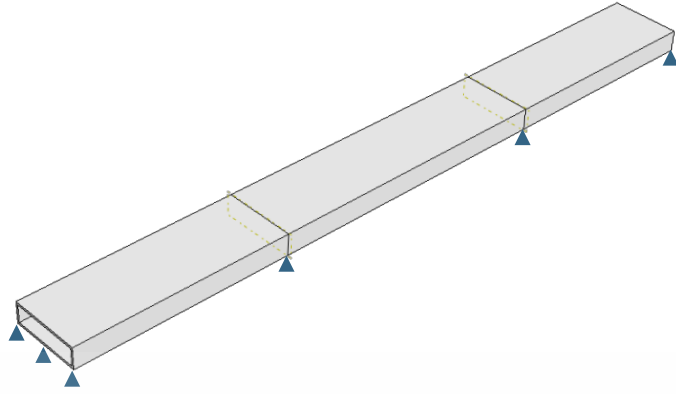
รูปที่ 3.2 หน้าตัดของสะพานรูปกล่อง

3.4.1.2 ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพานรูปกล่องจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM)

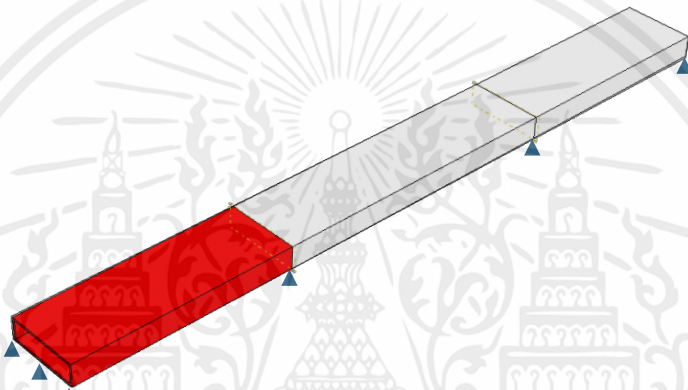
การหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน ในการวิจัยครั้งนี้ เราจะทำการประเมินค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

3.4.2 จำลองความเสียหายลงโมเดล

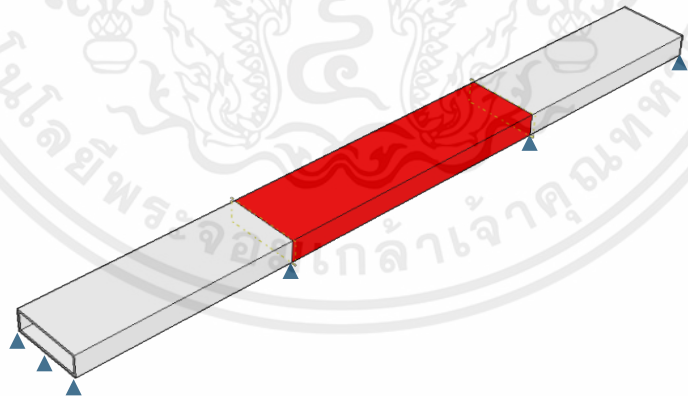
เปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณปลายคานและกลางคาน ลดค่า Elastic modulus ลง 0% และ 25%



รูปที่ 3.3 ลดค่า Elastic modulus ลง 0%

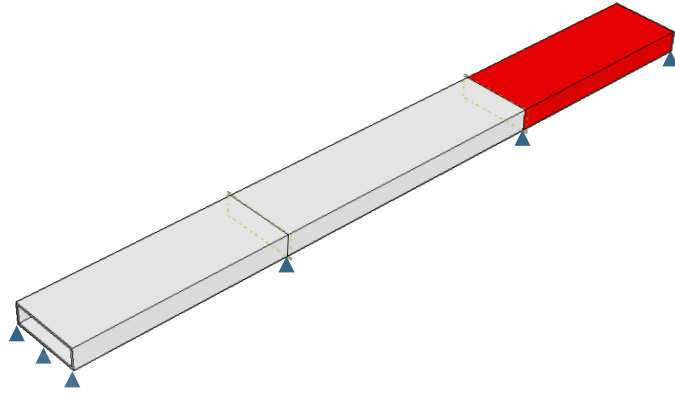


รูปที่ 3.4 ลดค่า Elastic modulus ลง 25% ที่ Box Girder ที่ 1



รูปที่ 3.5 ลดค่า Elastic modulus ลง 25% ที่ Box Girder ที่ 2

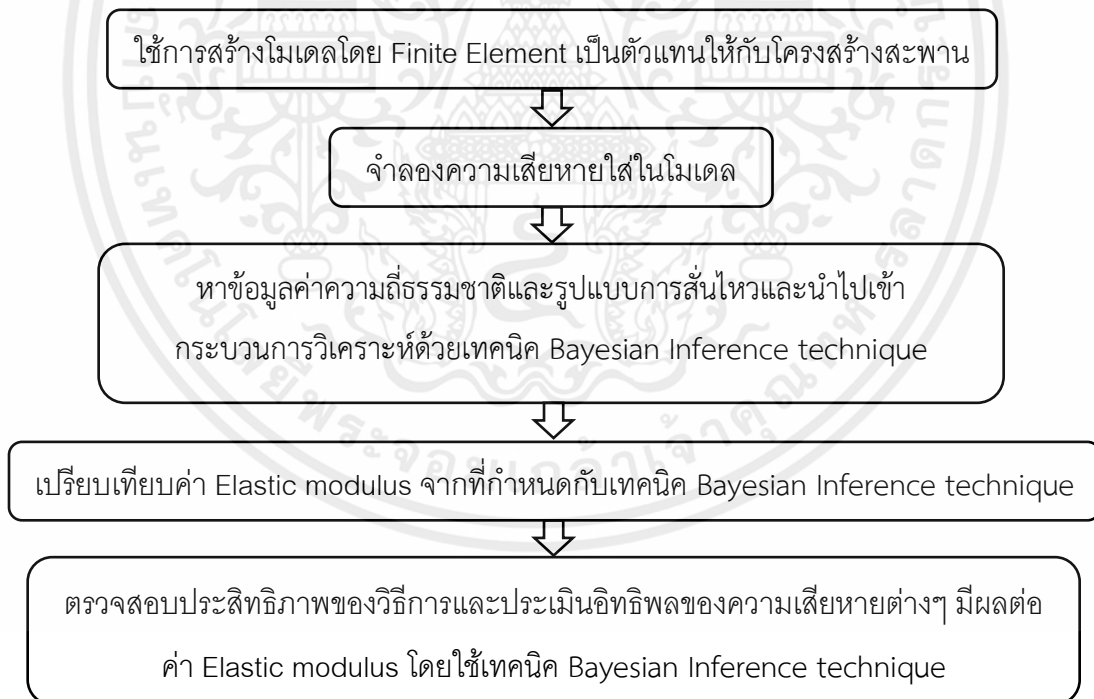
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ลดค่า Elastic modulus ลง 25% ที่ Box Girder ที่ 3

เมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วน ลดค่า Elastic modulus ลง 0% และ 25% ทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน เพื่อวิเคราะห์ผลของการลดค่า Elastic modulus ว่ามีผลต่อการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติอย่างไร และสามารถตรวจจับค่าความเสียหายเมื่อคุณสมบัติของชิ้นส่วนเปลี่ยนแปลงลดลงกี่เปอร์เซ็นต์

3.5 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการศึกษา

จากการทดสอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของการหาค่าคุณสมบัติชิ้นส่วนของสะพานด้วยวิธีการอนุมานของเบย์ และเพื่อเป็นหาขีดความสามารถของวิธีการนี้ จึงทำการทดลองซ้ำและเพิ่มเงื่อนไขต่างๆเข้าไป จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนมีความคงที่และไม่ลดลงอีก โดยแบ่งเงื่อนไขในการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ 1)จำนวนการวนซ้ำของการสุ่มหาค่า; 2)จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่นที่ใช้ในการวิเคราะห์

สามารถแบ่งการวิเคราะห์หาค่าได้เป็น 6 กรณี โดยจำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและ 5 รูปร่าง โดยมีจำนวนการวนซ้ำของการสุ่มหาค่า 100,000 300,000 และ 500,000 ตามลำดับ

4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีเกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	187.175	6.41
2	200	203.207	1.60
3	200	209.620	4.81

จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

**4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1**

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	150	159.92	6.61
2	200	187.576	6.21
3	200	175.952	12.02

จากตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

**4.1.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2**

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	191.984	4.01
2	150	152.706	1.80
3	200	180.361	9.82

จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.1.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	162.325	18.84
2	200	191.183	4.41
3	150	160.321	6.88

จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีเกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างแรก และจำนวน 300,000 รอบ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	189.98	5.01
2	200	195.191	2.4
3	200	199.6	0.2

จากตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	163.527	
2	200	183.167	
3	200	155.912	

จากตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.2.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	198.397	0.8
2	200	150.702	0.47
3	200	189.98	5.01

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.2.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	155.111	22.44
2	200	195.191	2.4
3	200	169.539	13.03

จากตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีเกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างแรก และจำนวน 500,000 รอบ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	195.972	2.01
2	200	195.191	2.4
3	200	196.393	1.8

จากตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	136.273	9.15
2	200	197.996	1
3	200	155.912	22.04

จากตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

4.3.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	182.365	8.82
2	200	148.698	0.87
3	200	162.325	18.84

จากตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

4.3.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	155.111	22.44
2	200	195.191	2.4
3	200	152.305	1.54

จากตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่าจำนวนการวนซ้ำของการสุ่มค่ามีผลต่อความแม่นยำ โดยเมื่อจำนวนการวนซ้ำเพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนจะลดลง และเพื่อวิเคราะห์ว่าจำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่นมีผลต่อความแม่นยำหรือไม่ จึงเพิ่มจำนวนการวิเคราะห์โดยใช้ความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่าง

4.4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีเกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่าง และจำนวน 100,000 รอบ

4.4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	186.373	6.81
2	200	196.794	1.6
3	200	193.988	3.01

จากตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	147.095	1.94
2	200	195.191	2.4
3	200	152.305	23.85

จากตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.4.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณกลางคาน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	193.393	3.41
2	200	143.888	4.07
3	200	186.774	6.61

จากตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.4.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	151.904	24.05
2	200	193.988	3.01
3	200	150.301	0.2

จากตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 100,000 รอบ

4.5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีเกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่าง และจำนวน 300,000 รอบ

4.5.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	189.179	5.41
2	200	189.58	5.21
3	200	187.576	6.21

จากตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.5.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	149.9	0.07
2	200	189.179	5.41
3	200	152.305	23.85

จากตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.5.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	189.58	5.21
2	200	145.892	2.74
3	200	192.384	3.81

จากตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.5.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	150.702	54.65
2	200	190.782	4.61
3	200	151.103	0.74

จากตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 300,000 รอบ

4.6 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ โดยใช้แบบจำลองแบบ line Element โดยทฤษฎีเกาส์เซียน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่าง และจำนวน 500,000 รอบ

4.6.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อยังไม่มีมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วน

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	189.179	5.41
2	200	193.187	3.41
3	200	188.377	5.81

จากตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

4.6.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	150.301	0.2
2	200	189.58	5.21
3	200	153.07	23.25

จากตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 1 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

4.6.3 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบาง
ชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	187.175	5.21
2	200	141.884	2.74
3	200	187.976	3.81

จากตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 2 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

4.6.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า Elastic Modulus เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3

Number of Span	Linear Perturbation (GPa)	Machine Learning (GPa)	Error (%)
1	200	147.095	26.45
2	200	192.786	3.61
3	200	149.499	0.33

จากตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Box Girder เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนบริเวณช่วงที่ 3 ที่ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 5 รูปร่างและจำนวน 500,000 รอบ

จากการวิเคราะห์พบว่าทั้งจำนวนการวนซ้ำของการสุ่มค่าและจำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่นมีผลต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์ โดยจำนวนการวนซ้ำจะทำให้จุดที่มีความน่าจะเป็นของคุณสมบัติของชิ้นส่วนสูงที่สุดชัดเจนยิ่งขึ้น และจำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่นจะช่วยลดโอกาสของความน่าจะเป็นในจุดต่างๆให้เหลือจุดที่มีความน่าจะเป็นสูงที่สุดมีจำนวนลดน้อยลง

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเปลี่ยนจากจำนวนความถี่ของรูปร่างการสั่น 4 รูปร่างเป็น 5 รูปร่าง และเพิ่มจำนวนการวนซ้ำของการสุ่มค่าจาก 300,000 ไป 500,000 ครั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิควิธี Bayesian Inference technique เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานในอนาคตและความปลอดภัยต่อการใช้งาน อีกทั้งเพื่อความรวดเร็วและประเมินความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างทันเวลา

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยมีลำดับหัวข้อการนำเสนอ ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษา

5.1 สรุปผลการดำเนินการ

จากการศึกษาในแบบจำลองหลายๆแบบ เพื่อเป็นตัวแทนสะพานที่มีหน้าตัด Box Girder ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนเมื่อลดค่า Elastic modulus ได้ผลสรุปการศึกษาดังนี้

5.1.1 แบบจำลอง FEM สะพานแบบ Box Girder ต สามารถพัฒนาสำหรับในการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation ได้

5.1.2 ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) ของแบบจำลองสะพานแบบ Box Girder ได้รับจาก Linear perturbation

5.1.3 การวิเคราะห์ของแบบจำลองสะพานแบบ Box Girder นั้น ใช้กับเทคนิค Bayesian Inference technique ได้

5.1.4 เทคนิค Bayesian Inference technique ทำการวิเคราะห์ผล พบว่าจำนวนความถี่ธรรมชาติและจำนวนการรบกวนซ้ำมีผลต่อการหาค่า Elastic Modulus มีความเป็นไปได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนความถี่ธรรมชาติและจำนวนการรบกวนซ้ำ จำทำให้ได้ค่า Elastic Modulus ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.1.5 เทคนิค Bayesian Inference technique สามารถระบุถึงค่า Elastic Modulus ของแต่ละช่วงสะพานได้ จึงสามารถพัฒนาต่อไปใช้ในการระบุถึงตำแหน่งความเสียหายในขั้นที่สูง

5.1.6 เทคนิค Bayesian Inference technique ทำการวิเคราะห์ผล พบว่าความสมมาตรของสะพานมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งส่งผลให้ค่า Elastic Modulus มีความคลาดเคลื่อน

5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย และแนวทางในการดำเนินการศึกษาในอนาคต

จากประสบการณ์ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมได้ดังนี้

5.2.1. ในการสร้างโมเดลถ้าสะพานมีความสมมาตร จะทำให้ได้ความถี่ธรรมชาติที่ความคลาดเคลื่อน ซึ่งส่งผลให้ทำการระบุค่า Elastic Modulus ได้ไม่แม่นยำ ควรมีการสร้างโมเดลสะพานอ้างอิงมาตรฐาน ASSHTO

5.2.2. ในขณะนี้นักศึกษาได้ใช้แบบจำลองสะพานแ

5.2.3. ในขณะนี้นักศึกษาได้ใช้แบบจำลองสะพานเหล็ก (Steel) ซึ่งควรจะมีการพิจารณาคุณสมบัติของสะพานเหล็ก (Steel) แล้วดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดสนิมกับโครงสร้างสะพาน

5.2.4. จากผลการวิจัยสามารถสังเกตได้ว่าจำนวนความถี่ธรรมชาติและจำนวนการวนซ้ำ มีผลต่อการคำนวณค่า Elastic Modulus ของเทคนิค Bayesian Inference technique จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้บางส่วนของเทคนิค Bayesian Inference technique ให้เหมาะสมตามปัจจัยต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลง เช่น จำนวนเพิ่มจำนวนการวนซ้ำในการวิเคราะห์ เพื่อให้การคำนวณค่า Elastic Modulus ที่มีความแม่นยำมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1]Chaojun Huang and Satish Nagarajaiah, **Structural Monitoring and Maintenance**. Retrieved March 24, 2014.
- [2] Infrastructure Monitoring and management system. **Bridge maintenance Database system**. Retrieved August 30,2020. Available online ; <http://www.immsgroup.com/>
- [3]J.M. Caicedo, Dynamic Testing of Civil Engineering Structures Series, **PRACTICAL GUIDELINES FOR THE NATURAL EXCITATION TECHNIQUE (NEXT) AND THE EIGENSYSTEM REALIZATION ALGORITHM (ERA) FOR MODAL IDENTIFICATION USING AMBIENT VIBRATION**. Retrieved August, 2011
- [4] Cem Ayyildiz, H. Emre Erdem, Tamer Dirikgil, Oguz Dugenci, Taskin Kocak, Fatih Altun, and V. Cagri Gungor, **Structure Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks on Structural Elements**. Retrieved June 12,2018
- [5] George H. James and Thomas G. Carne, **The natural excitation technique (NEXT) for modal parameter extraction from operating structures**. Retrieved January 25,2015
- [6] Mojtaba Valinejadshoubi, Ashutosh Bagchi, Osama Moselhi. (2008). **Parameter Estimation For Linear Dynamical Systems with Applicants To Experiment Modal Analysis**. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering.
- [7] Cem Ayyildiz, H. Emre Erdem, Tamer Dirikgil, Oguz Dugenci, Taskin Kocak, Fatih Altun, V. Cagri Gungor. (2019). **Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey**. IEEE COMMUNICATIONS-SURVEYS & TUTORIALS
- [8]AASHTO-PCI-ASBI Segmental Box Girder Standards for Span-by-Span and Balanced Cantilever Construction, December, 1997
- [9] Ilker Tanyer, **PARAMETER ESTIMATION FOR LINEAR DYNAMICAL SYSTEMS WITH APPLICATIONS TO EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS**, Retrieved August, 2008
- [10] กรมทางหลวงชนบท, รายงานผลการตรวจสอบและประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานในสายทาง อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง, กุมภาพันธ์ ,2563

ภาคผนวก

Code วิธี Bayesian Inference Technique ในโปรแกรม MATLAB

(1) ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั้น 4 รูปร่าง

```
%% Import data to Matlab %%
```

```
input = 'RefAJ2_job_output_2.xlsx';  
output = 'RefAJ2_job_output_2.xlsx';  
E = importdata(input);  
w = importdata(output);  
result(:,1:3) = E.data(:,11:13);  
result(:,4) = w.data(:,5);
```

```
%% Gaussian Process Regression %%
```

```
%training model%
```

```
gp_model1 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,1), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 1st train')  
gp_model2 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,2), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 2nd train')  
gp_model3 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,3), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 3rd train')  
gp_model4 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,4), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 4rd train')
```

```
%% Baysian inference %%
```

```
% Determine Value %
```

```
arraynum = 500000; %number of random  
random_value = 400000;  
w1_true = 1.1253;  
w2_true = 1.6568;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

w3_true = 2.0854;
w4_true = 4.3037;
w_true = [w1_true,w2_true,w3_true,w4_true];
pdf_in = 0; %fixed
n = 1; %fixed
sigma = 0.01;

% Determine PDF best value %
E_best = [200000 200000 200000];
w1_best = predict(gp_model1,E_best);
w2_best = predict(gp_model2,E_best);
w3_best = predict(gp_model3,E_best);
w4_best = predict(gp_model4,E_best);
w_best = [w1_best w2_best w3_best w4_best];
pdf_best = mvnpdf(w_true,w_true,[sigma,sigma,sigma,sigma]);

% Determine Matrix %
keepE=zeros(3,arraynum);
keepW=zeros(4,arraynum);

% start %
while(n<=arraynum)
    disp(n);
    disp(arraynum); %test loop
    E1 = randi([100000,300000]);
    E2 = randi([100000,300000]);
    E3 = randi([100000,300000]);
    E_random = [E1 E2 E3];
    w1 = predict(gp_model1,E_random);
    w2 = predict(gp_model2,E_random);
    w3 = predict(gp_model3,E_random);
    w4 = predict(gp_model4,E_random);
    w_gpr = [w1,w2,w3,w4];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

pdf = mvnpdf(w_gpr,w_true,[sigma,sigma,sigma,sigma]);
if (pdf>pdf_in)
    disp('Pass')
    keepE(1:3,n)=E_random;
    keepW(1:4,n)=w_gpr;
    pdf_in=pdf;
    n=n+1;
else
    alpha = pdf/pdf_best;
    u = randi([0,100])*0.01;
    disp(alpha)
    disp(u)
    if u < alpha
        keepE(1:3,n)=E_random;
        keepW(1:4,n)=w_gpr;
        pdf_in=pdf;
        n=n+1;
    end
end
end

%% Burn-in %%
burninamount = ((30/100)*arraynum); %if no burn-in fill 1

dataE1 = keepE(1,burninamount:arraynum);
dataE2 = keepE(2,burninamount:arraynum);
dataE3 = keepE(3,burninamount:arraynum);

```

```
%% histogram E %%
```

```
edges = linspace(100000,300000,500);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

figure(1); %E1
h_E1 = histogram(dataE1,'BinEdges',edges);
title('E1')
hold on
figure(2); %E2
h_E2 = histogram(dataE2,'BinEdges',edges);
title('E2')
hold on
figure(3); %E3
h_E3 = histogram(dataE3,'BinEdges',edges);
title('E3')

%% histogram W %%

edges_W = linspace(1,9,500);
figure(4);
h_W1 = histogram(keepW(1,:),'BinEdges',edges_W);
title('W1')
hold on
figure(5);
h_W2 = histogram(keepW(2,:),'BinEdges',edges_W);
title('W2')
hold on
figure(6);
h_W3 = histogram(keepW(3,:),'BinEdges',edges_W);
title('W3')
hold on
figure(7);
h_W4 = histogram(keepW(4,:),'BinEdges',edges_W);
title('W4')

```

(2) ใช้จำนวนความถี่ของรูปร่างการสั้น 5 รูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%% Import data to Matlab %%
```

```
input = 'RefAJ2_job_output_2.xlsx';  
output = 'RefAJ2_job_output_2.xlsx';  
E = importdata(input);  
w = importdata(output);  
result(:,1:3) = E.data(:,11:13);  
result(:,4) = w.data(:,5);
```

```
%% Gaussian Process Regression %%
```

```
%training model%
```

```
gp_model1 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,1), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 1st train')  
gp_model2 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,2), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 2nd train')  
gp_model3 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,3), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 3rd train')  
gp_model4 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,4), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 4rd train')  
gp_model5 = fitrgp(E.data(:,11:13),w.data(:,5), 'KernelFunction', 'rationalquadratic');  
disp('finish 5rd train')
```

```
%% Bayesian inference %%
```

```
% Determine Value %
```

```
%num = 300000;  
arraynum = 500000; %number of random  
random_value = 400000;  
w1_true = 1.1253;  
w2_true = 1.6568;  
w3_true = 2.0854;  
w4_true = 4.3037;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

w5_true = 5.6240;
w_true = [w1_true,w2_true,w3_true,w4_true,w5_true];
pdf_in = 0; %fixed
n = 1; %fixed
sigma = 0.01;

% Determine PDF best value %
E_best = [200000 200000 200000];
w1_best = predict(gp_model1,E_best);
w2_best = predict(gp_model2,E_best);
w3_best = predict(gp_model3,E_best);
w4_best = predict(gp_model4,E_best);
w5_best = predict(gp_model5,E_best);
w_best = [w1_best w2_best w3_best w4_best w5_best];
pdf_best = mvnpdf(w_true,w_true,[sigma,sigma,sigma,sigma,sigma]);

% Determine Matrix %
keepE=zeros(3,arraynum);
keepW=zeros(5,arraynum);

% start %
while(n<=arraynum)
    disp(n);
    disp(arraynum); %test loop
    E1 = randi([100000,300000]);
    E2 = randi([100000,300000]);
    E3 = randi([100000,300000]);
    E_random = [E1 E2 E3];
    w1 = predict(gp_model1,E_random);
    w2 = predict(gp_model2,E_random);
    w3 = predict(gp_model3,E_random);
    w4 = predict(gp_model4,E_random);
    w5 = predict(gp_model5,E_random);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

w_gpr = [w1,w2,w3,w4,w5];
pdf = mvnpdf(w_gpr,w_true,[sigma,sigma,sigma,sigma,sigma]);
if (pdf>pdf_in)
    disp('Pass')
    keepE(1:3,n)=E_random;
    keepW(1:5,n)=w_gpr;
    pdf_in=pdf;
    n=n+1;
else
    alpha = pdf/pdf_best;
    u = randi([0,100])*0.01;
    disp(alpha)
    disp(u)
    if u < alpha
        keepE(1:3,n)=E_random;
        keepW(1:5,n)=w_gpr;
        pdf_in=pdf;
        n=n+1;
    end
end

end

%% Burn-in %%
burninamount = ((30/100)*arraynum); %if no burn-in fill 1

dataE1 = keepE(1,burninamount:arraynum);
dataE2 = keepE(2,burninamount:arraynum);
dataE3 = keepE(3,burninamount:arraynum);

%% histogram E %%

```

```

edges = linspace(100000,300000,500);
figure(1); %E1
h_E1 = histogram(dataE1,'BinEdges',edges);
title('E1')
hold on
figure(2); %E2
h_E2 = histogram(dataE2,'BinEdges',edges);
title('E2')
hold on
figure(3); %E3
h_E3 = histogram(dataE3,'BinEdges',edges);
title('E3')

%% histogram W %%

edges_W = linspace(1,9,500);
figure(4);
h_W1 = histogram(keepW(1,:),'BinEdges',edges_W);
title('W1')
hold on
figure(5);
h_W2 = histogram(keepW(2,:),'BinEdges',edges_W);
title('W2')
hold on
figure(6);
h_W3 = histogram(keepW(3,:),'BinEdges',edges_W);
title('W3')
hold on
figure(7);
h_W4 = histogram(keepW(4,:),'BinEdges',edges_W);
title('W4')
hold on
figure(8);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
h_W5 = histogram(keepW(5,:),'BinEdges',edges_W);  
title('W5')
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล นายกุลนันท์ จันทร์ทิม
วัน-เดือน-ปี เกิด 6 พฤษภาคม 2543
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 45/343 หมู่ 2 ซอยบุญคุ้ม ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา
จังหวัดปทุมธานี 12130
การศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร

ชื่อ – สกุล นางสาวจิราภา กุดแกลง
วัน-เดือน-ปี เกิด 2 กรกฎาคม 2543
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 144 หมู่ 6 ตำบลอู่เม้า อำเภอยางตลาด
จังหวัดกาฬสินธุ์ 46120
การศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร

ชื่อ – สกุล นายเจษฎาภรณ์ จักรคุ้ม
วัน-เดือน-ปี เกิด 7 ธันวาคม 2543
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 17 หมู่ 5 ซอยประดับเพชร ถนนศรีนครินทร์
ตำบลบางเมือง อำเภอมะเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
การศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร