

การอนุมานแบบเบย์และการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียนสำหรับการ  
ตรวจสอบสภาพของโครงสร้างสะพานคานรูปกล่อง

BAYESIAN INFERENCE AND GAUSSIAN PROCESS REGRESSION FOR  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BOX GIRDER BRIDGE JOINT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2025-EN-M-097-081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BAYESIAN INFERENCE AND GAUSSIAN PROCESS REGRESSION FOR  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BOX GIRDER BRIDGE JOINT



GULLANAN JUNTIM

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN  
CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION

MANAGEMENT

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2025-EN-M-097-081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING KING MONGKUT'S INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอนุมานแบบเบย์และการถดถอยของกระบวนการ เกาส์เซียนสำหรับการตรวจสอบสภาพของโครงสร้าง สะพานคานรูปกล่อง
นักศึกษา	นายกุลนันท์ จันทรทิม
รหัสนักศึกษา	66016006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ณ์ภูริ์ดน้อย สิ้นสมุทรผดุง

### บทคัดย่อ

ระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้างมีบทบาทสำคัญในการรับรองมีบทบาทสำคัญในการรับรองความปลอดภัยและความพร้อมใช้งานของโครงสร้างพื้นฐานโดยเฉพาะโครงสร้างสะพาน อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมักไม่สามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นหรือระบุตำแหน่งของความเสียหายได้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่จำเป็นต้องพัฒนาวิธีการที่สามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำและตรวจสอบได้ทันที งานวิจัยนี้นำเสนอกรอบการทำงานที่อิงกับการอนุมานแบบเบย์ โดยเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน เพื่อประเมินสภาพของจุดเชื่อมต่อสะพานคอนกรีตคานรูปกล่อง โดยใช้วิธีการปรับปรุงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับแนวคิดการอนุมานแบบเบย์ การสุ่มตัวอย่างแบบละตินไฮเปอร์คิวบ์ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างชุดข้อมูลของโมดูลัสยืดหยุ่น เพื่อนำมาใช้ร่วมกับวิธีการมอนเตการ์โลลูกโซ่มาร์ตอฟ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถระบุตำแหน่งของความเสียหายบนโครงสร้างสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องได้อย่างแม่นยำ โดยโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้มากที่สุดของการแจกแจงภายหลัง มีความใกล้เคียงกับค่าจริงของโมดูลัสยืดหยุ่น แนวทางที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สูงในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับความเสียหายของโครงสร้าง พร้อมทั้งลดต้นทุนการคำนวณ ซึ่งถือเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์และมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจสอบสภาพโครงสร้างแบบทันทีทันใดในสะพานคานรูปกล่อง

**คำสำคัญ:** ระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้าง, การอนุมานแบบเบย์, วิธีการปรับปรุงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, การถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน, การตรวจจับความเสียหาย, จุดเชื่อมต่อสะพานคานรูปกล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Bayesian Inference and Gaussian Process Regression for Structural Health Monitoring of Box Girder Bridges Joints
<b>Student</b>	Mr. Gullanan Juntim
<b>Student ID.</b>	66016006
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management
<b>Year</b>	2025
<b>Thesis Advisor</b>	Ast.Prof.Dr. Natdanai Sinsamutpadung

## ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) plays a crucial role in ensuring the safety and availability of infrastructure, especially for bridge structures. The existing methods often fail to detect early-stage or localized damage, which necessitates the development of methods that can provide accurate and real-time monitoring. This study introduces a Bayesian Inference-based framework enhanced by Gaussian Process Regression (GPR) for assessing the structural health of segmental box girder bridge joints. Finite Element Model (FEM) updating is used in conjunction with Bayesian methods. The Latin Hypercube Sampling (LHS) technique is used to establish a comprehensive dataset of elastic modulus values, later analyzed with the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) approach. The results show that the method is successful in determining the localized damage for precast segmental box girder bridges, with posterior distributions closely matching actual elastic modulus values. The proposed Bayesian model updating technique shows significant potential in enhancing the detection of structural damage with reduced computational cost, which provides a practical and efficient tool for real-time monitoring of structural health in box girder bridges.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ณัฐดนัย สินสมุทรผดุง ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จ ได้ด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์เหล่านี้ได้ ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการ ทำงานและการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนร่วมใน การบริหารการเรียนการสอน

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และรุ่นพี่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกัน และกันในการทำวิจัย รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธาตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นพลังแห่งกำลังใจที่ช่วยให้สามารถดำเนินการใน กระบวนการศึกษาและวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์แบบ ขอขอบพระคุณทุกท่านด้วยความ ซาบซึ้งในพระคุณอย่างยิ่ง

กุลนันท์ จันท์ทิม

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 การถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian Process Regression).....	5
2.1.2 การอนุมานแบบเบย์.....	5
2.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 รูปแบบความเสียหายของสะพานคอนกรีตคานรูปกล่อง.....	7
2.2.2 วิธีการระบุความเสียหาย.....	17
2.2.3 การสู่มด้วยวิธีการสู่มลาตินไฮเปอร์คิวบ์ (LHS).....	21
2.2.4 การถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียนในการสร้างแบบจำลองตัวแทน.....	21
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	23
3.1 ลักษณะและการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.2 การดำเนินการปรับปรุงแบบเบย์เซียนด้วยแบบจำลองตัวแทน (Surrogate model).....	25
3.2.1 การสร้างแบบจำลองตัวแทนด้วยการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian Process Regression, GPR).....	25
3.2.2 การดำเนินการตามแนวทางการอนุมานแบบเบย์.....	28
3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการที่เสนอ.....	30
3.3.1 การจำลองความเสียหาย.....	31
3.3.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์.....	32
3.4 การวิเคราะห์ผลของการปรับแก้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RWMH ต่อผลลัพธ์.....	33
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	34
4.1 ผลการวิเคราะห์ของวิธีการที่เสนอ.....	34
4.2 ผลของการปรับแก้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RWMH ต่อผลลัพธ์.....	37
4.2.1 ผลกระทบของจำนวนโมเมนต์ต่อผลลัพธ์.....	37
4.2.2 ผลกระทบของจำนวนการวนซ้ำ.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก ก.....	49
ภาคผนวก ข.....	57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	67

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่ 1	โครงสร้างสะพานในการศึกษาของ Takebayashi et al. [32]	7
รูปที่ 2	หน้าตัดชิ้นส่วน Typical และ Pier Segment [32]	8
รูปที่ 3	หน้าตัดชิ้นส่วน Deviator D1 และ D2 Segment [32]	8
รูปที่ 4	ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gauge [32]	9
รูปที่ 5	ตำแหน่งการติดตั้ง Dial gauge [32]	10
รูปที่ 6	ตำแหน่งการวางน้ำหนักบรรทุกทดสอบ [32]	10
รูปที่ 7	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเครียดของคอนกรีตกับโมเมนต์ [32]	11
รูปที่ 8	ความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวกับโมเมนต์ [32]	12
รูปที่ 9	ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากช่วงต่างๆ [32]	12
รูปที่ 10	ภาพรวมของแบบจำลอง DFEM ในการศึกษาของ Terry et al. [33]	13
รูปที่ 11	ความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดของวัสดุ [33]	14
รูปที่ 12	เปรียบเทียบผลการศึกษาของความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวกับโมเมนต์ [33]	14
รูปที่ 13	เปรียบเทียบผลการศึกษาของความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวกับโมเมนต์ [33]	15
รูปที่ 14	อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงแรงอัดต่อการกระจายตัวของความเสียหายและการโก่งตัวสูงสุด [33]	16
รูปที่ 15	ค่าการโก่งตัวในช่วง Decompression (BC) [33]	16
รูปที่ 16	ค่าการโก่งตัวในช่วง Before failure (BF) [33]	17
รูปที่ 17	ภาพรวมของสะพานเป้าหมาย และระบบของเซนเซอร์ไร้สายในการศึกษาของ Sasaki et al. [29]	18
รูปที่ 18	ลักษณะการเสียรูปและความถี่ธรรมชาติของสะพานเป้าหมาย [29]	18
รูปที่ 19	ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานเป้าหมาย [29]	19
รูปที่ 20	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ Linear perturbation [29]	19
รูปที่ 21	แผนผังการดำเนินการตามขั้นตอนการอนุมานแบบเบย์ [29]	20
รูปที่ 22	การแจกแจงภายหลังของแต่ละพารามิเตอร์ของแบบจำลอง [29]	20
รูปที่ 23	ภาพหน้าตัดของชิ้นส่วนสะพานที่เป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO	23
รูปที่ 24	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ ABAQUS: (a) ภาพรวม (b) ชิ้นส่วนจุดเชื่อมต่อ	24
รูปที่ 25	ค่าเฉลี่ยของ RMSE จากทุกโหมดต่อจำนวนชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน	27
รูปที่ 26	ผังงานของขั้นตอนการสร้างการแจกแจงภายหลังตามแนวคิดของการอนุมานแบบเบย์	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 27 ตัวอย่างลักษณะของการแจกแจงปกติและการแจกแจงภายหลัง.....	32
รูปที่ 28 Trace plot สำหรับตรวจสอบการลู่เข้าของกรณี E1 .....	34
รูปที่ 29 การแจกแจงภายหลังของกรณี E1 .....	35
รูปที่ 30 การแจกแจงปกติของกรณี A1(a), B1(b), C1(c), และ D1(d) .....	36
รูปที่ 31 การกระจายตัวของโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยจำนวนโหมดที่แตกต่างกัน.....	39
รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของทุก ชิ้นส่วน .....	40



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	คุณสมบัติของวัสดุในการศึกษาของ Takebayashi et al. [32].....	9
ตารางที่ 2	การกำหนดน้ำหนักบรรทุกทดสอบ [32].....	10
ตารางที่ 3	ผลลัพธ์ของความถี่ธรรมชาติหลังจากการปรับแก้พารามิเตอร์ตามผลลัพธ์ของการแจกแจง ภายหลัง [29].....	21
ตารางที่ 4	คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุ.....	25
ตารางที่ 5	ช่วงของการสุ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นส่วนด้วยวิธี LHS.....	26
ตารางที่ 6	ผลลัพธ์ของ RMSE และ R-square จากการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติ.....	27
ตารางที่ 7	การแจกแจงปกติก่อนหน้าของแต่ละชั้นส่วน.....	30
ตารางที่ 8	การกำหนดค่าจำนวนโหมดของความถี่ธรรมชาติและจำนวนการวนซ้ำสำหรับอัลกอริทึม RWMH.....	30
ตารางที่ 9	ระดับและตำแหน่งของความเสียหายที่ถูกจำลองขึ้นให้แก่แต่ละชั้นส่วนในการศึกษานี้..	31
ตารางที่ 10	รายละเอียดการปรับแก้พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่ออัลกอริทึม RWMH.....	33
ตารางที่ 11	ผลลัพธ์ของการประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลองจากกรณี E1.....	35
ตารางที่ 12	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ตามวิธีการที่เสนอสำหรับทุกกรณี.....	36
ตารางที่ 13	การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 3 โหมด.....	37
ตารางที่ 14	การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 4 โหมด.....	38
ตารางที่ 15	การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 6 โหมด.....	38
ตารางที่ 16	การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 6 โหมด (ต่อ).....	38

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา โครงสร้างพื้นฐานได้ขยายตัวมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเพื่อรองรับความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่ง โดยเฉพาะสะพานซึ่งมีบทบาทสำคัญในการอำนวยความสะดวกในการเดินทางให้กับผู้คนนับล้าน ด้วยจำนวนของสะพานที่เพิ่มขึ้นมาตลอดหลายปีที่ผ่านมาประกอบกับสะพานเก่าที่มีอยู่เริ่มมาอายุการใช้งานมากและเริ่มเสื่อมสภาพ ได้ทำให้ภาระงานในการตรวจสอบสภาพสะพานเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้วิธีการตรวจสอบสภาพสะพานแบบดั้งเดิม [1, 2] ไม่เพียงพออีกต่อไปและได้กลายเป็นความท้าทายในปัจจุบัน ในบางครั้งการดำเนินการตรวจสอบที่ล่าช้าเกินไปส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นทวีความรุนแรงมากขึ้น นำไปสู่ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่เพิ่มขึ้นและอาจนำไปสู่การพังทลายของโครงสร้าง อย่างในกรณีของสะพานซิลเวอร์ในรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา [3] และสะพานโมรันตีในเจนัว ประเทศอิตาลี [4] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้าง (Structural Health Monitoring) จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถการประเมินและซ่อมบำรุงโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ [5-7]

ระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้างเป็นกลยุทธ์ในการดำเนินการระบุความเสียหายที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในหลายภาคส่วนรวมถึงในด้านวิศวกรรมโยธาซึ่งช่วยให้การตรวจสอบสภาพของโครงสร้างสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยข้อมูลต่างๆ ผ่านเซนเซอร์ที่ติดตั้งกับโครงสร้างสะพานด้วยระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องส่งคนไปตรวจสอบที่หน้างาน [6] ทำให้ทรัพยากรที่ใช้ในการตรวจสอบลดลงได้อย่างมาก หนึ่งในวิธีการระบุความเสียหายของระบบนี้คือการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองของโครงสร้าง เช่น การสั่นสะเทือนของสะพาน [8] ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ Time domain ที่สามารถถูกรบกวนได้ง่าย ทั้งจากสภาพภูมิอากาศหรือการจราจรที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวัน ซึ่งทำให้เกิด False damage detection ดังนั้นจึงต้องมีการนำเทคนิคอื่นเข้ามาช่วยเหลือเพิ่มเติมเพื่อเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลให้อยู่ในรูปของ Frequency domain โดยการนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ซึ่งข้อมูลประเภทนี้จะไม่ได้รับผลกระทบของ Force vibration โดยสามารถถูกหาได้จากกรณีวิเคราะห์รูปแบบเชิงทดลอง (Experimental modal analysis, EMA) [9] หรือการ

วิเคราะห์รูปแบบเชิงปฏิบัติการ (Operational modal analysis, OMA) [10] ในปัจจุบันการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์รูปแบบเชิงปฏิบัติการ (OMA) ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายมากกว่าเนื่องจากขั้นตอนในการวิเคราะห์มีความซับซ้อนน้อยกว่า [11] ในช่วงเวลาที่ผ่านมามีวิธีต่างๆในการวิเคราะห์รูปแบบดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้น เช่น การแยกสลายในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Decomposition, FDD) [12] และการระบุโครงสร้างเชิงสุ่มในซบสเปซ (Stochastic Subspace Identification, SSI) [13] การพัฒนาวิธีการต่างๆอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ดีในการในการตรวจจับความเสียหายด้วยข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง [14, 15] อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดที่สำคัญคือไม่สามารถระบุตำแหน่งที่แน่นอนของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากข้อมูลเชิงพลศาสตร์จะแสดงภาพรวมของโครงสร้างเท่านั้น หากตรวจพบที่มีความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อต้องการดำเนินการซ่อมแซมผู้ซ่อมบำรุงจำเป็นต้องหาจุดที่เกิดความเสียหายดังกล่าว นอกจากนี้ความไวของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์อย่างความถี่ธรรมชาติต่อความเสียหายยังไม่สูงมาก [16] อาจกล่าวได้ว่าหากความเสียหายยังไม่รุนแรงระบบอาจไม่สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมีการปรับปรุงความสามารถของระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้าง หลักการของพลศาสตร์โครงสร้างกล่าวว่าความถี่ธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับความแข็งแกร่ง (Stiffness) และมวล (Mass) ของโครงสร้าง [17] นอกจากนี้ความเสียหายรูปแบบต่างๆที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง เช่น การแตกร้าว ความล้า และการกัดกร่อน ทั้งหมดล้วนนำไปสู่การลดลงของความแข็งแกร่งรวมถึงความถี่ธรรมชาติ [18] การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถนำมาใช้เพื่อประมาณโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานได้ ทำให้ทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชิ้นส่วนซึ่งช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งของความเสียหายได้

นอกจากนี้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างสามารถนำมาใช้ร่วมกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อดำเนินการตรวจสอบสภาพโครงสร้างแบบคู่เสมือนดิจิทัล (Digital twin) ได้แล้ว เนื่องจากระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้างมักดำเนินการควบคู่ไปกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ภาระงานไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก ขณะที่การดำเนินการแบบคู่เสมือนดิจิทัลนี้จะช่วยให้ผู้ตรวจสอบสามารถตรวจจับความเสียหาย ประเมินความเสี่ยง และวางแผนได้ดีมากขึ้น เพื่อที่จะระบุโมดูลัสยืดหยุ่น แนวทางการปรับปรุงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element updating, FEU) ได้ถูกพัฒนาขึ้น [19] แนวทางนี้อาศัยวิธีการปรับค่าให้เหมาะสมเชิงกำหนด (Determinist optimization method) [20] โดยการสร้างแบบจำลองของสะพานที่ต้องการตรวจสอบและปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองกับข้อมูลจริงของสะพานที่ต้องการตรวจสอบ ขั้นตอนการปรับแก้จะถูกดำเนินการหลายครั้งจนกระทั่งข้อมูลทั้งสองใกล้เคียงกัน จากนั้นพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนของคุณสมบัติของ

สะพาน ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวมีการใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่ค่อนข้างมากโดยเฉพาะกับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมาก เพื่อลดภาระในการคำนวณและนำความไม่แน่นอนของข้อมูลมาเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญ แนวทางการปรับปรุงแบบเบย์เซียน (Bayesian updating, BU) ได้ถูกพัฒนาขึ้น

แนวทางนี้ดำเนินการตามทฤษฎีของเบย์ (Bayes' theorem) [21] ช่วยให้เข้าใจความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและความแปรปรวนของพารามิเตอร์ได้อย่างครอบคลุมมากขึ้นซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในหลายการศึกษา การศึกษาของ Hurtado et al. [22] ดำเนินการตามแนวทาง BU กับอาคาร 5 ชั้น การศึกษาของ Zeng et al. [23] เสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural networks) ร่วมกับแนวทาง BU กับโครงเหล็ก 18 ชั้น และโครงอาคารคอนกรีต การศึกษาของ Liu et al. [24] เสนอการใช้กรอบงาน PCA ร่วมกับแนวทาง BU เพื่อแก้ปัญหาผลลัพธ์หลายมิติของแบบจำลองปีกเครื่องบิน การศึกษาของ Sasaki et al. [25-27] ได้เสนอวิธีการระบุพารามิเตอร์ของโครงสร้างโดยใช้ข้อมูลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากวิธี NExT-ERA

ในปัจจุบันสะพานคอนกรีตคานรูปกล่อง (Concrete box girder bridge) ได้ถูกนำมาใช้ก่อสร้างอย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีต่างๆ เช่น มีระยะเวลาการก่อสร้างน้อย ควบคุมคุณภาพได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อสร้างสะพานแบบทั่วไป หนึ่งในวิธีการก่อสร้างสะพานชนิดดังกล่าวที่ได้รับความนิยมคือการนำชิ้นส่วนของสะพาน (Segment) ที่หล่อจากโรงงานแต่ละชิ้นส่วนมาเชื่อมต่อกันด้วยระบบการอัดแรงภายหลัง (Post-Tension) ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องมีการใช้วัสดุเสริมอื่นกับบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนทำให้ลดความซับซ้อนในการก่อสร้างลง อย่างไรก็ตาม จุดเชื่อมต่อเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นถึงความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างและได้กลายเป็นหนึ่งในจุดที่น้ำหนักของโครงสร้างโดยภาพรวมทำให้ได้รับความสนใจในหลายการศึกษา [28-30]

จากการศึกษาก่อนหน้าเกี่ยวกับการพัฒนาแนวทาง BU ด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่า การแสดงให้เห็นถึงกรอบการทำงานที่ชัดเจนรวมไปถึงการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่อผลลัพธ์ยังมีอยู่อย่างจำกัด และเนื่องจากความนิยมที่เพิ่มขึ้นของสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องขณะที่ยังถูกกล่าวในการศึกษาอื่นค่อนข้างน้อย ดังนั้นในการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นถึงกรอบการทำงานที่ชัดเจนของการนำแนวทาง BU ไปใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถให้แก่แนวทางการติดตามและเฝ้าระวังโครงสร้างสะพานที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยจะกำหนดกรณีศึกษาด้วยแบบจำลองของสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องที่ให้ความสำคัญกับบริเวณข้อต่อของสะพาน นอกจากนี้จะมีการศึกษาถึงปัจจัยของพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อผลลัพธ์และอิทธิพลผลลัพธ์ที่ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

เพื่อพัฒนาแนวทางในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานคอนกรีตคานรูปกล่อง ด้วยข้อมูลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากระบบการตรวจสอบสภาพสะพาน โดยใช้เทคนิคการอนุมานแบบเบย์ (Bayesian inference)

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้นำเอาสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องมาใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการระบุความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองที่สร้างขึ้น จากนั้นแบบจำลองจะถูกกำหนดให้เกิดความเสียหายในบริเวณต่างๆ และบันทึกความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้การลดลงของโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นตัวแทนของความเสียหายที่เกิดขึ้น ข้อมูลความถี่ธรรมชาติจะถูกนำมาใช้เพื่อทำนายตำแหน่งและระดับของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพาน โดยใช้ข้อมูลทางสถิติร่วมกับแนวความคิดการอนุมานแบบเบย์

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกพัฒนาขึ้นโดยมีต้นแบบเป็นสะพานคอนกรีตคานรูปกล่อง
- 2) กำหนดระดับและตำแหน่งของความเสียหายให้กับแบบจำลองและบันทึกความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้น
- 3) นำความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นมาดำเนินการตามแนวความคิดการอนุมานแบบเบย์
- 4) ตรวจสอบความถูกต้องของแนวทางที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ทำนายได้กับความเสียหายที่กำหนดให้แก่แบบจำลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำข้อมูลความถี่ธรรมชาติมาใช้ในการระบุโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละส่วนของสะพานได้ซึ่งช่วยให้ทราบตำแหน่งและระดับความเสียหายของสะพานได้
- 2) สามารถตรวจสอบประสิทธิภาพของแนวทางที่พัฒนาขึ้นได้ทั้งในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนและระยะเวลาในการดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทบทวนวรรณกรรมและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 การถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian Process Regression)

กระบวนการเกาส์เซียนถูกกำหนดด้วย mean function  $m(x)$  และ covariance function  $k(x, x')$  ที่อธิบายด้วยสมการที่ (1.1)

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (1.1)$$

ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ mean function มีค่าเป็นศูนย์ และ covariance function ถูกกำหนดดังแสดงในสมการที่ (1.2)

$$k(x, x') = \left(1 + \frac{d(x, x')^2}{2\alpha^2}\right)^{-\alpha} \quad (1.2)$$

โดยกำหนดให้ชุดข้อมูลสำหรับการฝึก (training set) ถูกแสดงด้วย  $D=(X, F)$  เมื่อ  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  และ  $F=(f_1, f_2, \dots, f_n)^T$  และมี joint probability distribution ของชุดข้อมูลดังกล่าวดังสมการที่ (1.3)

$$p(F) \sim GP(m(X), k(X, X')) \quad (1.3)$$

เมื่อ  $x^*$  เป็นข้อมูลทดสอบที่สัมพันธ์กับ  $f^*$  เมื่อ  $(F^T, f^*)$  เป็นไปตามการแจกแจงแบบเกาส์เซียนที่อธิบายได้ในสมการที่ (1.4)

$$p(F^T, f^*) \sim GP\left(\begin{bmatrix} m(X) \\ m(x^*) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} k(X, X) & k(X, x^*) \\ k(x^*, X) & k(x^*, x^*) \end{bmatrix}\right) \quad (1.4)$$

โดยการใช้สูตรความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข จะได้การแจกแจงภายหลังสำหรับค่า  $f^*$  ที่ทำนายไว้จากสมการที่ (1.5)

$$p(f^* | X, F^T, x^*) \sim GP(\hat{m}^*, \hat{k}^*) \quad (1.5)$$

#### 2.1.2 การอนุมานแบบเบย์

ทฤษฎีบทของเบย์เป็นกฎพื้นฐานในทฤษฎีความน่าจะเป็นที่ช่วยให้สามารถคำนวณ ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional Probability) ได้ โดยสูตรของทฤษฎีบทของเบย์สามารถเขียนได้จากสมการที่ (1.6)

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (1.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $P(A|B)$  คือการแจกแจงภายหลังความน่าจะเป็นของโมดูลัสความยืดหยุ่น,  $A$  จากข้อมูลความถี่ธรรมชาติ,  $B$ ,  $P(B|A)$  คือฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Likelihood function) ที่บ่งบอกความน่าจะเป็นของ  $B$  จากข้อมูล  $A$ ,  $P(A)$  คือการแจกแจงก่อนหน้าความน่าจะเป็นของโมดูลัสความยืดหยุ่น, และ  $P(B)$  คือความน่าจะเป็นของข้อมูลความถี่ธรรมชาติ

อย่างไรก็ตาม  $P(B)$  ทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์ในการ Normalize การแจกแจงภายหลัง และเพื่อลดความซ้ำซ้อนในการคำนวณ โดยจะพิจารณา  $P(A|B)$  เป็นอัตราส่วนกับ  $P(B|A) \cdot P(A)$  ดังแสดงในสมการที่ (1.7)

$$P(A|B) \propto P(B|A) \cdot P(A) \quad (1.8)$$

เพื่อนำกรอบการทำงานของ การอนุมานแบบเบย์มาใช้เพื่อประมาณโมดูลัสยืดหยุ่น ได้มีการนำวิธีการ Markov Chain Monte Carlo (MCMC) มาใช้ โดยเลือกใช้อัลกอริทึมที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายคืออัลกอริทึม Metropolis-Hastings (MH) สามารถสุ่มตัวอย่างจากการกระจายความน่าจะเป็นที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการเสนอค่าใหม่  $A_{new}$  และยอมรับหรือปฏิเสธตามค่าความน่าจะเป็นของมัน เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถสำรวจพื้นที่พารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการนำเทคนิคการเดินสุ่ม (Random Walk) [31] มาประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึม MH ซึ่งเรียกว่า Random Walk Metropolis-Hastings Algorithm (RWMH) โดยมีความคล้ายคลึงกับอัลกอริทึม MH ทั่วไป มีความแตกต่างกันในขั้นตอนการสุ่มค่าใหม่  $A_{new}$  ดังนี้

$$A_{new} = A_{current} + \varepsilon$$

โดยที่

$$\varepsilon \in N(0, \sigma^2)$$

ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Likelihood function) สำหรับการอัปเดตการแจกแจงก่อนหน้าไปสู่การแจกแจงภายหลัง ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชัน multivariate probability density function (MPDF) ดังแสดงในสมการที่ (1.9)

$$f(x|\mu, \Sigma) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k |\Sigma|}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)} \quad (1.9)$$

โดยที่  $x$ ,  $\mu$  และเมทริกซ์ความแปรปรวน  $\Sigma$  ถูกแสดงดังนี้

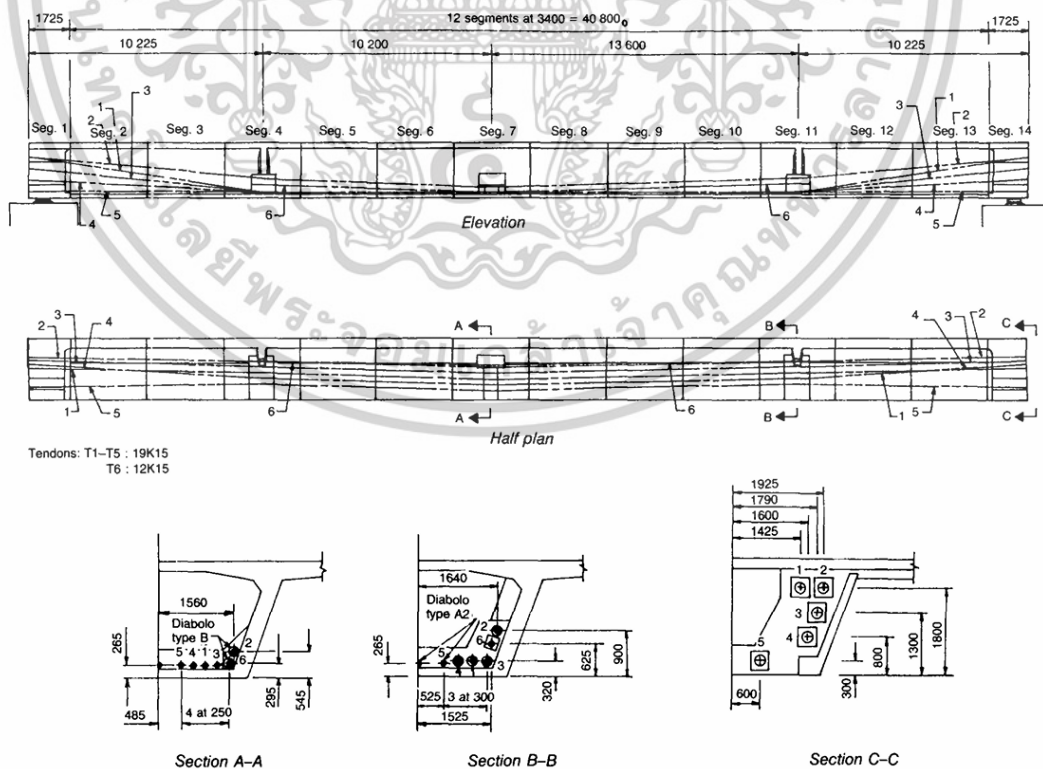
$$X = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_1 \\ \hat{\omega}_2 \\ \vdots \\ \hat{\omega}_i \end{bmatrix}, \mu = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_i \end{bmatrix}, \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{1,2} & \cdots & \sigma_{1,i} \\ \sigma_{2,1} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2,i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i,1} & \sigma_{i,2} & \cdots & \sigma_i^2 \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $\hat{\omega}_i$  และ  $\omega_i$  คือความถี่ธรรมชาติที่วัดได้และที่ทำนายได้ในโหมดที่  $i$  ตามลำดับ,  $\sigma_i^2$  คือความแปรปรวนของแต่ละตัวแปร  $i$ ,  $\sigma_{i,j}$  คือความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรที่  $i$  และ  $j$  ในชุดข้อมูล

## 2.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

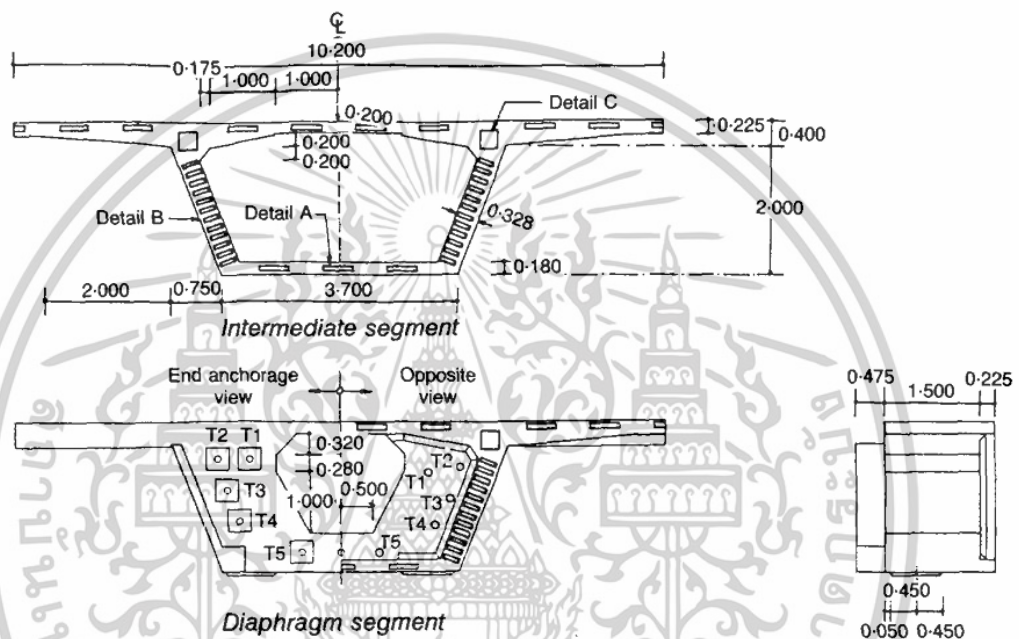
### 2.2.1 รูปแบบความเสียหายของสะพานคอนกรีตคานรูปกล่อง

Takebayashi et al. [32] ได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องอัดแรงภายนอกของทางด่วนในจังหวัดกรุงเทพมหานคร มีลักษณะของโครงสร้างและลวดอัดแรงดังแสดงใน รูปที่ 1

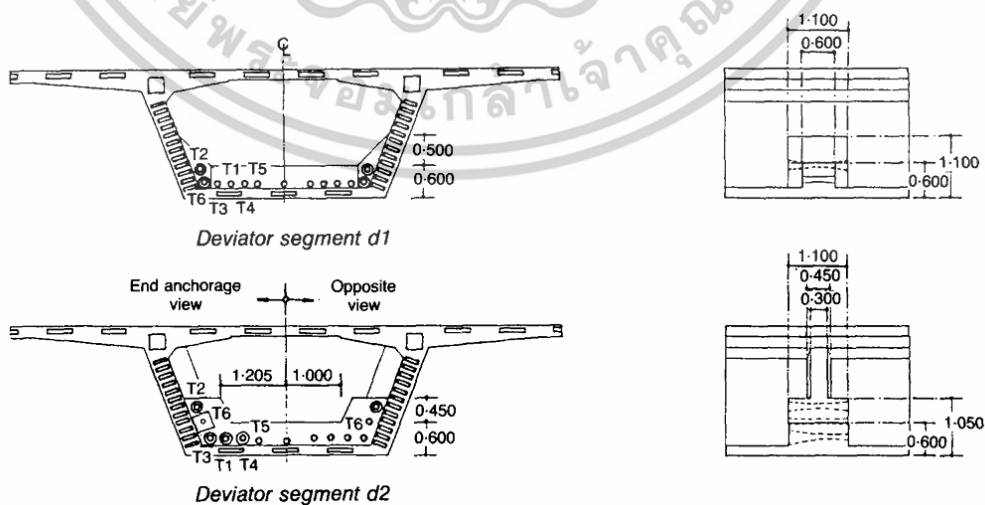


รูปที่ 1 โครงสร้างสะพานในการศึกษาของ Takebayashi et al. [32]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างสะพานมีความยาวและกว้าง 43.25 เมตร และ 10.20 เมตร ตามลำดับ ประกอบด้วยชิ้นส่วนสำเร็จ 14 ชิ้น แบ่งเป็น Typical Segment 9 ชิ้นส่วน, ชิ้นส่วน Deviator D1 และ D2 3 ชิ้นส่วน, และ End Pier Segment 2 ชิ้นส่วน มีความยาวต่อชิ้นเป็น 3.40 เมตร, 3.40 เมตร, และ 1.75 เมตร ตามลำดับ เหล็กเสริมอัดแรงภายนอก 12K15 สำหรับ T6 และ 19K15 สำหรับ T1, T2, T3, T4 และ T5 ดังแสดงใน รูปที่ 2 และ รูปที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุแสดงใน ตารางที่ 1



รูปที่ 2 หน้าตัดชิ้นส่วน Typical และ Pier Segment [32]



รูปที่ 3 หน้าตัดชิ้นส่วน Deviator D1 และ D2 Segment [32]

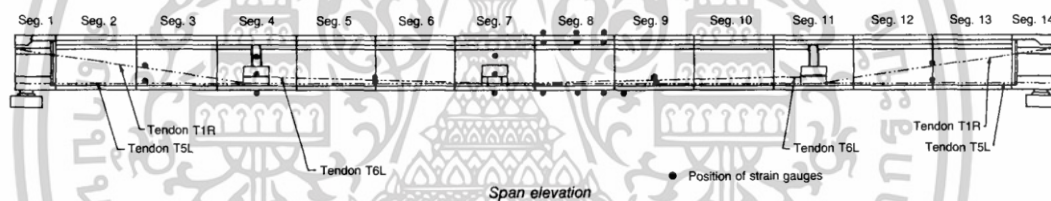
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุในการศึกษาของ Takebayashi et al. [32]

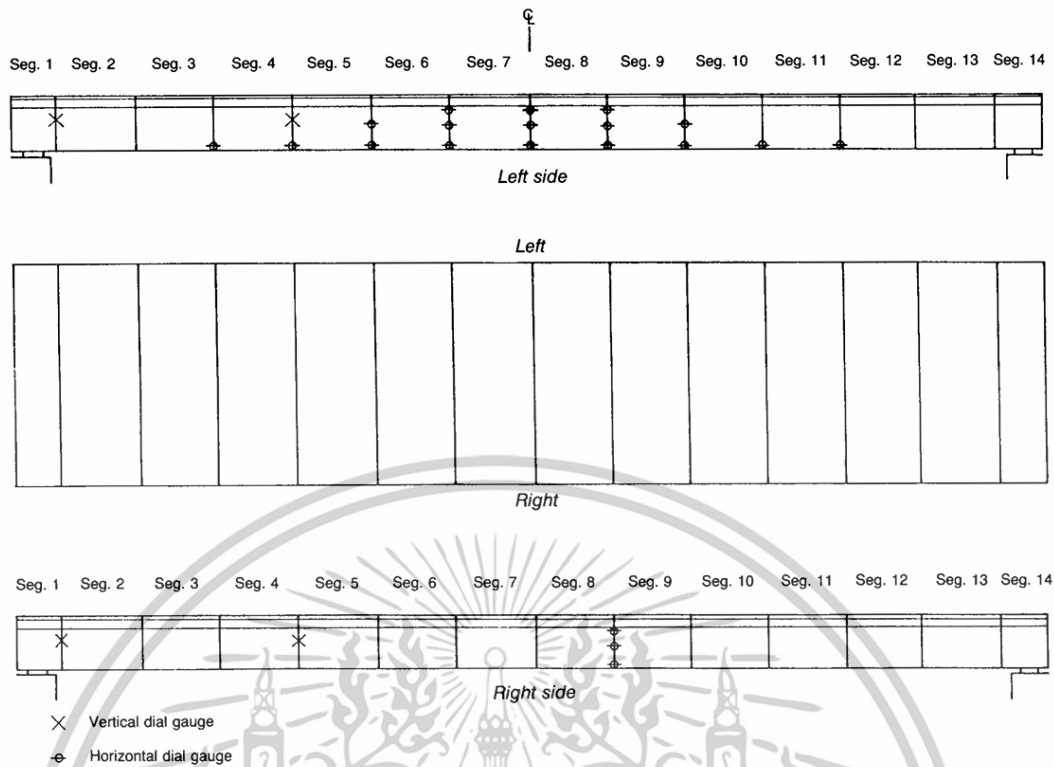
Material	Properties item	Average figures: MPa
Concrete	Compressive strength	55-62
	Modulus of elasticity	43,000
Rebars	Tensile strength	390
Tendons	Breaking strength	1,920
	Modulus of elasticity	193,000

พฤติกรรมของโครงสร้างอย่าง ค่าการโก่งตัว การแยกตัวของรอยต่อ (joint opening) ความเครียดของคอนกรีตและลวดอัดแรง ได้ถูกเก็บข้อมูลโดยอาศัย Strain gauge และ Dial gauge มีตำแหน่งการติดตั้งดังแสดงใน รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gauge [32]

ดำเนินการทดสอบโดยใช้แผ่นเหล็กเป็นน้ำหนักบรรทุกทดสอบไปวางในตำแหน่งที่แสดงใน รูปที่ 6 เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ที่ต้องการ ใช้เวลาในการทดสอบ 5 วันโดยเพิ่มและลดจำนวนของแผ่นเหล็กในแต่ละวันดังแสดงใน ตารางที่ 2 และบันทึกข้อมูล



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้ง Dial gauge [32]



รูปที่ 6 ตำแหน่งการวางน้ำหนักบรรทุกทดสอบ [32]

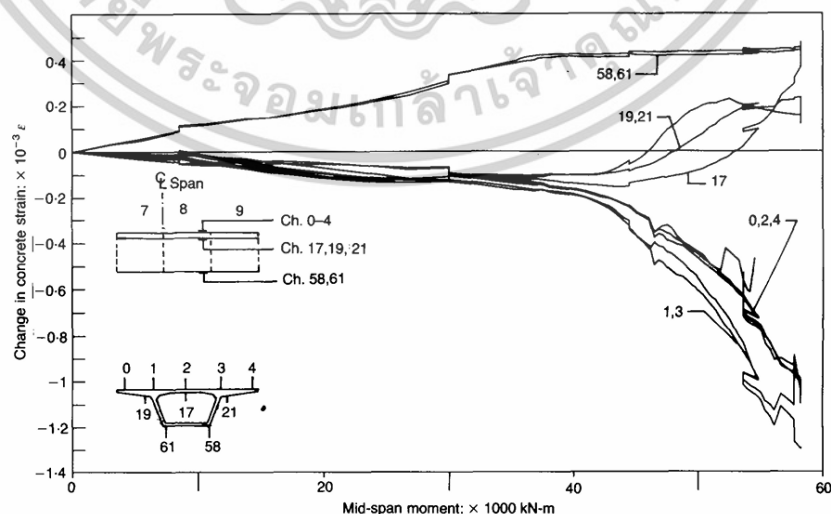
ตารางที่ 2 การกำหนดน้ำหนักบรรทุกทดสอบ [32]

Day	Load Stage	No. of Billets	Applied Mid-span Moment, kN-m
1	No Load	0	0
	Trial Load	120	3,200
	No Load	0	0
	Overnight Load	360	8,600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2	Design Service Load	1,080	24,600
	Overnight Load	1,320	30,000
3	Observed Decompression Load at Joint 8-9	1,620	36,500
	Observed Decompression Load at Joint 7-8	1,660	37,250
	Design Ultimate Load (Overnight Load)	1,980	44,600
4	Load to 2470 Billets	2,470	54,900
	Unload 70 Billets for Safety (Overnight Load)	2,400	53,600
5	Design Ultimate Load / $\emptyset$	2,600	57,700
	Failure Load	2,620	58,200

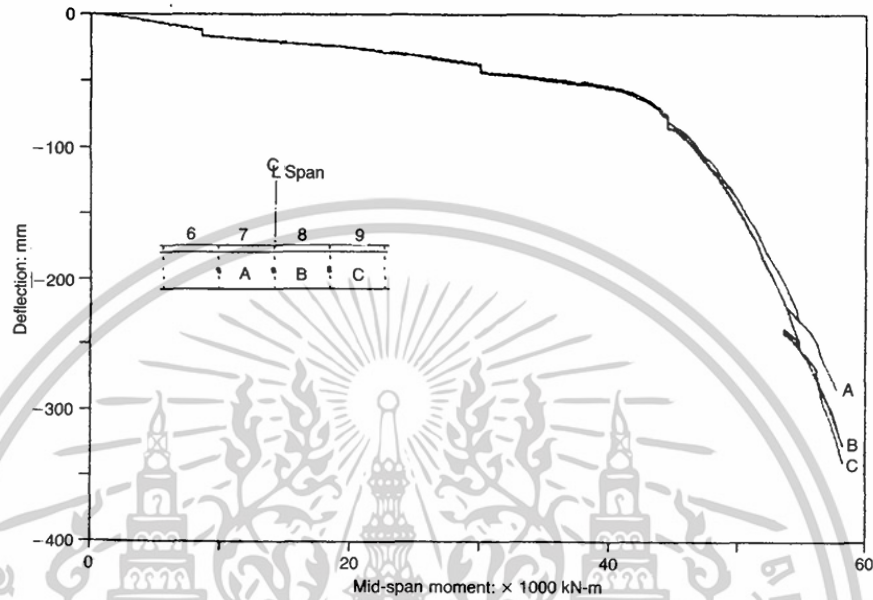
ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเครียดของคอนกรีตพบว่าในช่วงแรกของการทดสอบ พฤติกรรมของโครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับคานคอนกรีตแบบขึ้นเดียว (Monolithic) และเป็นเชิงเส้น แต่หลังจากน้ำหนักบรรทุกทุกถึง Decompression Load ซึ่งเกิดโมเมนต์ดัดที่ประมาณ 36,500 kN-m ได้ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนที่ 8 และ 9 ทำให้พฤติกรรมของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ดังแสดงใน รูปที่ 7 การแยกตัวของรอยต่อส่งผลให้ความเค้นบริเวณส่วนล่างของคานกลายเป็นศูนย์ ขณะที่ส่วนบนมีความเค้นที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ



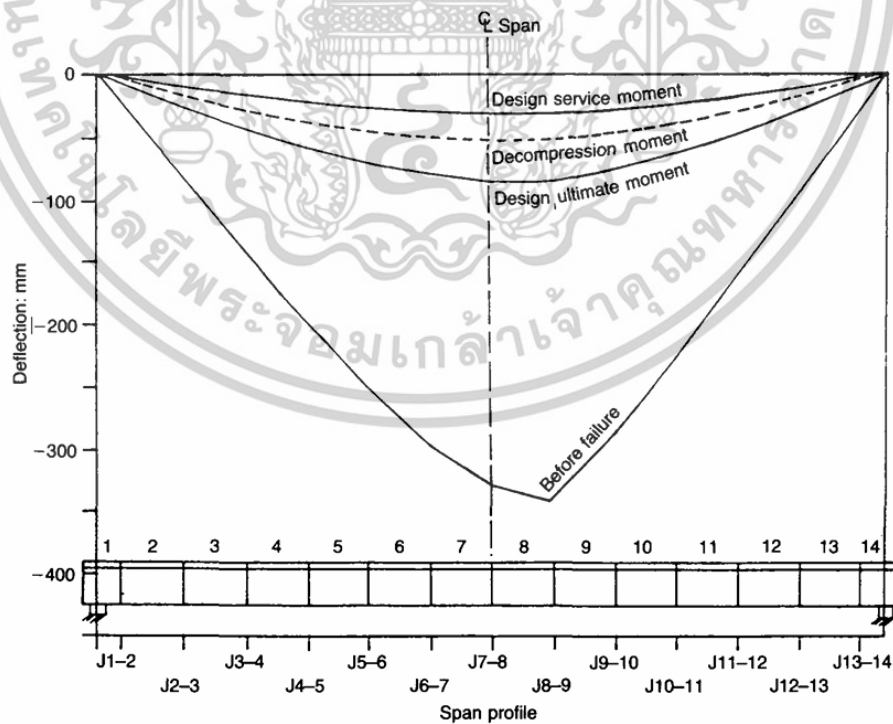
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเครียดของคอนกรีตกับโมเมนต์ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับโมเมนต์ดัดในช่วงแรกเป็นแบบเชิงเส้น และเริ่มมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นหลังจากมีโมเมนต์ดัดถึง 40,000 kN-m ดังแสดงใน รูปที่ 8 โดยมีค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติเกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วน 8 และ 9 ซึ่งมีค่าประมาณ 350 มิลลิเมตร ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากช่วงต่างๆถูกแสดงใน รูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวกับโมเมนต์ [32]

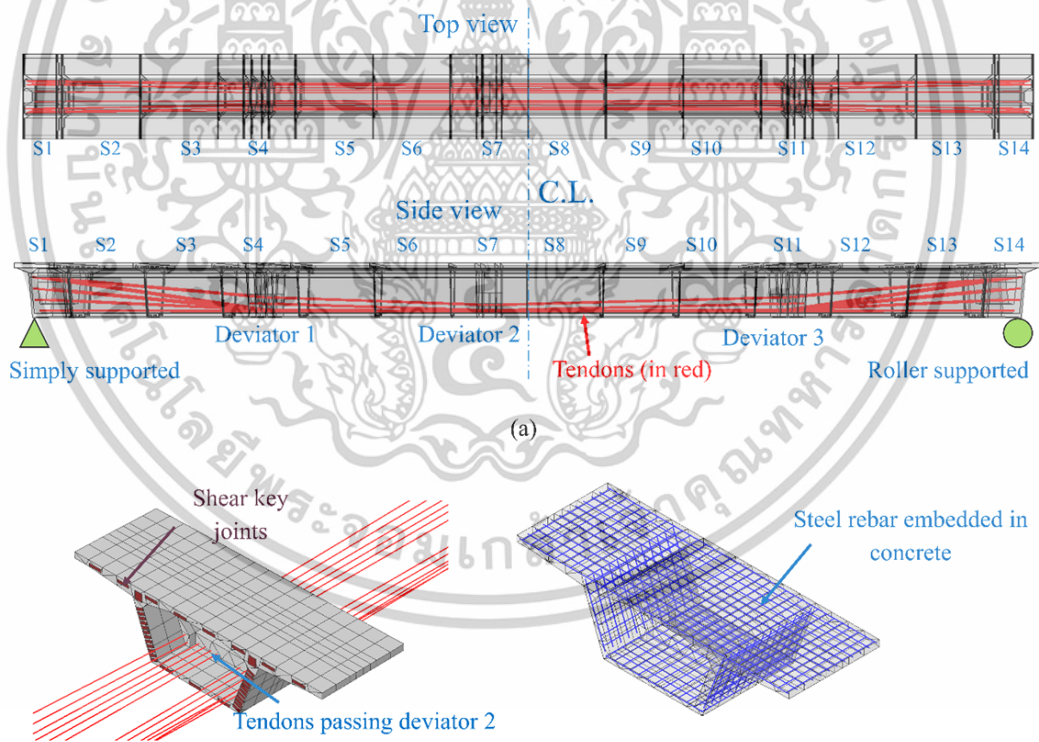


รูปที่ 9 ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากช่วงต่างๆ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของความเสียหายของโครงสร้างเกิดจากการการแยกตัวของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน ส่งผลให้แกนสะเทินของคานเลื่อนขึ้นส่งผลให้คานสูญเสียคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้ส่วนบนของคานเกิดความเค้นที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติในที่สุด

Yuan et al. [33] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงแรงอัด (Prestress Changes) ของลวดอัดแรง ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องอัดแรงภายนอกโดยอาศัยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบแยกส่วน (Discrete Finite Element Model หรือ DFEM) เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างดังกล่าวทำให้การทำนายการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเป็นเรื่องยาก นอกจากนี้การบำรุงรักษาที่ไม่เหมาะสมยังนำไปสู่การสูญเสียแรงดึงได้เช่นกัน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมต่อปัจจัยดังกล่าว แบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ ABAQUS [34] โดยอ้างอิงลักษณะและคุณสมบัติของสะพานมาจากการศึกษาของ Takebayashi et al. [32] ลักษณะของแบบจำลองถูกแสดงใน รูปที่ 10 แบบจำลองถูกสร้างให้มีความละเอียดใกล้เคียงกับสะพานต้นแบบเพื่อให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของสะพานได้



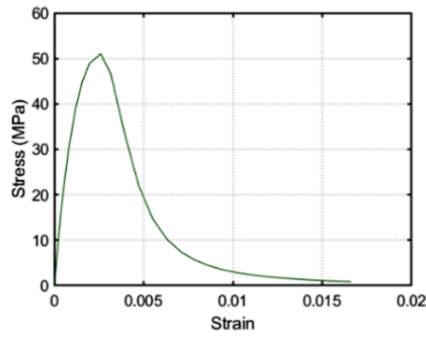
รูปที่ 10 ภาพรวมของแบบจำลอง DFEM ในการศึกษาของ Terry et al. [33]

คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาอ้างอิงได้ถูกนำมาใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้แก่ DFEM โดย

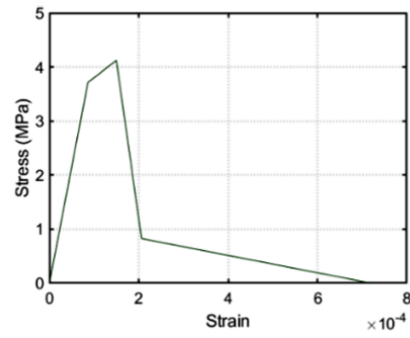
ความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดของวัสดุแต่ละชนิดถูกแสดงใน รูปที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

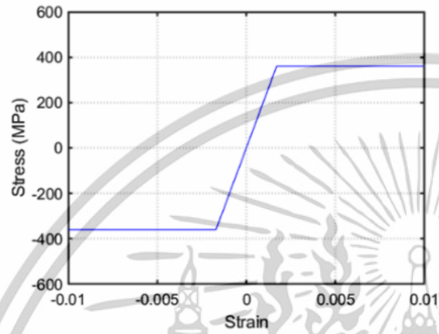
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



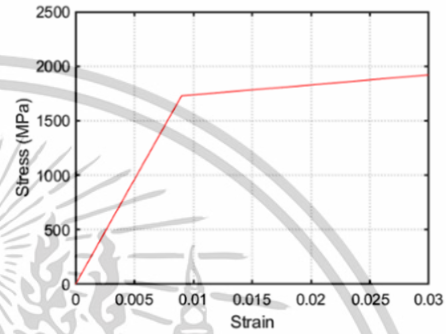
(a) Concrete in compression



(b) Concrete in tension



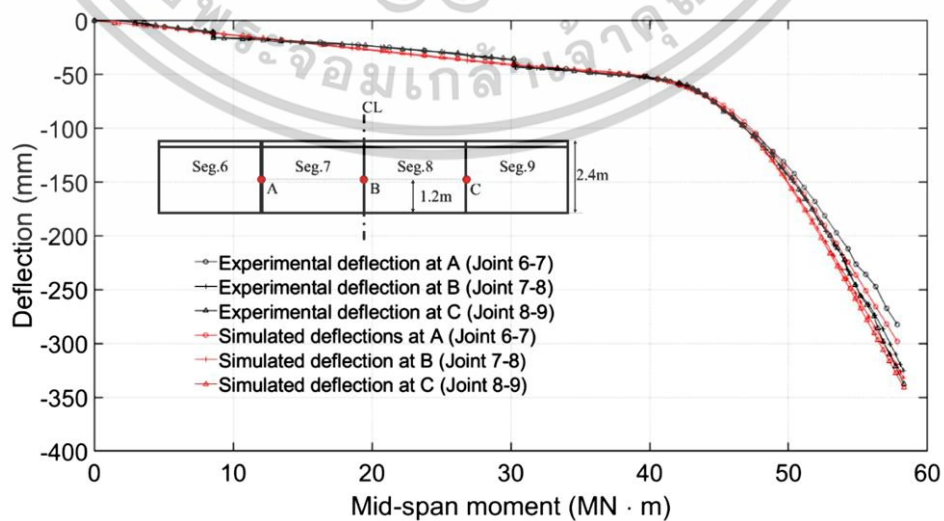
(c) Non-prestressing steel



(d) Prestressing tendon

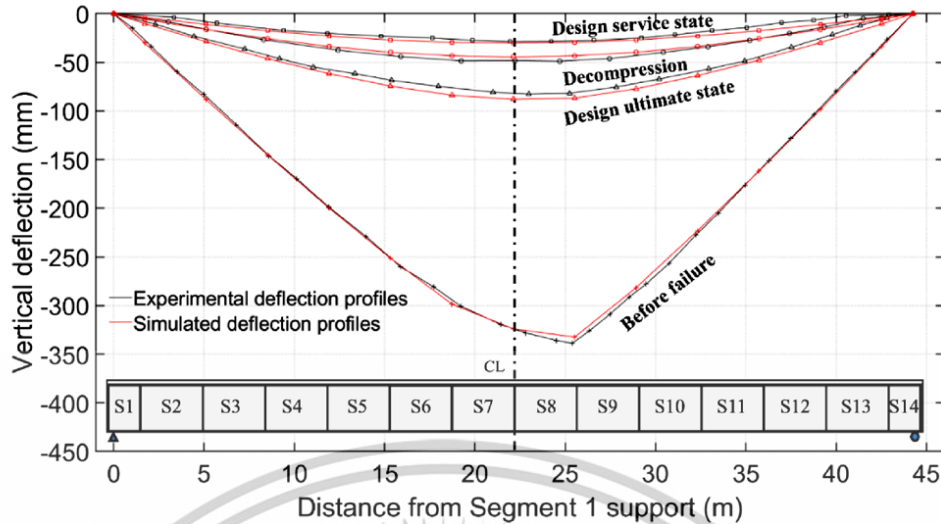
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดของวัสดุ [33]

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ค่าการโก่งตัวของการศึกษาอ้างอิงได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ DFEM ในการศึกษาี้ ดังแสดงใน รูปที่ 12 และ รูปที่ 13 ผลลัพธ์ของการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมความเป็นจริงในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลการศึกษาของความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวกับโมเมนต์ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลการศึกษาของความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวกับโมเมนต์ [33]

ในการศึกษาอ้างอิงได้กำหนดให้ค่าแรงอัดของลวดอัดแรงมีค่าเป็น 60% ของจุดครากของลวดอัดแรง ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ดังที่ระบุไว้ในการศึกษาอ้างอิง ในการศึกษาทำการดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลอง 7 ครั้งโดยกำหนดให้มีค่าการอัดแรงที่ต่างกัน โดยมีค่าแรงอัดคิดเป็น 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140% ของค่าแรงอัดจากการศึกษาอ้างอิง ( $p_{ei}$ ) ขณะที่พารามิเตอร์อื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากแบบจำลองที่มีการตรวจสอบแล้ว

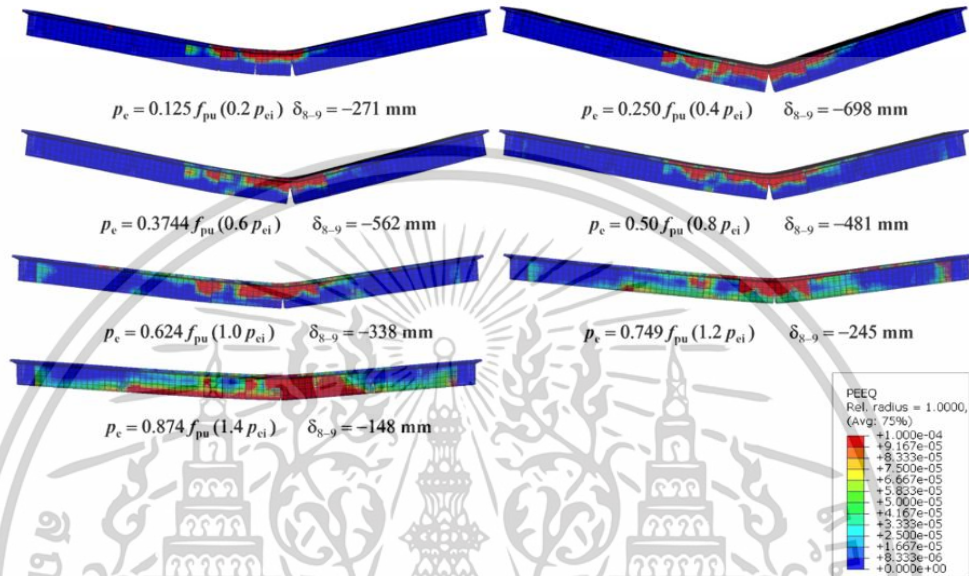
แบบจำลองทั้ง 7 ได้ถูกวิเคราะห์ โดยผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ใน รูปที่ 14 แสดงการกระจายตัวของความเสียหายถูกนำเสนอในรูปแบบของการกระจายตัวของ equivalent plastic strain (PEEQ) นอกจากนี้ยังแสดงการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติ และ รูปที่ 15 และ รูปที่ 16 แสดงค่าในช่วง Decompression (BC) และ Before failure (BF) ตามลำดับ

การโก่งตัวของสะพานเป็นค่าที่สัมพันธ์กับรูปแบบเริ่มต้นของสะพานหลังจากการถ่ายโอนแรงอัดล่วงหน้าและการเพิ่มน้ำหนักของตัวสะพานเองเข้าไปแล้ว พบว่า เมื่อใช้แรงอัด  $0.2P_{ei}$  เกิด Decompression ทันทีทำให้สะพานพังทลายที่การโก่งตัวเพียงเล็กน้อย โดยความเสียหายจำกัดอยู่บริเวณด้านบนของ S8 และ S9 แม้ว่า Decompression จะเกิดขึ้นเร็วเช่นกันในกรณีของแบบจำลองที่ใช้แรง  $0.4P_{ei}$  เมื่อมีการรับน้ำหนัก แต่แรงดึงที่มากขึ้นในเส้นลวดแรงอัดล่วงหน้าสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างได้ผ่านผลกระทบของโมเมนต์ลำดับที่สองเมื่อเส้นลวดมีการโก่งตัวด้านข้างส่งผลให้แบบจำลองที่ใช้แรงอัด  $0.4P_{ei}$  มีการโก่งตัวที่มากที่สุด (มากที่สุด ในบรรดาทั้ง 7 แบบจำลอง) และมีขอบเขตความเสียหายที่กว้างขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระดับแรงอัดล่วงหน้าต่อไปความสามารถในการเสียรูปกลับลดลง เนื่องจากถูกจำกัดโดยการแตกร้าวของคอนกรีตที่บริเวณ S8-

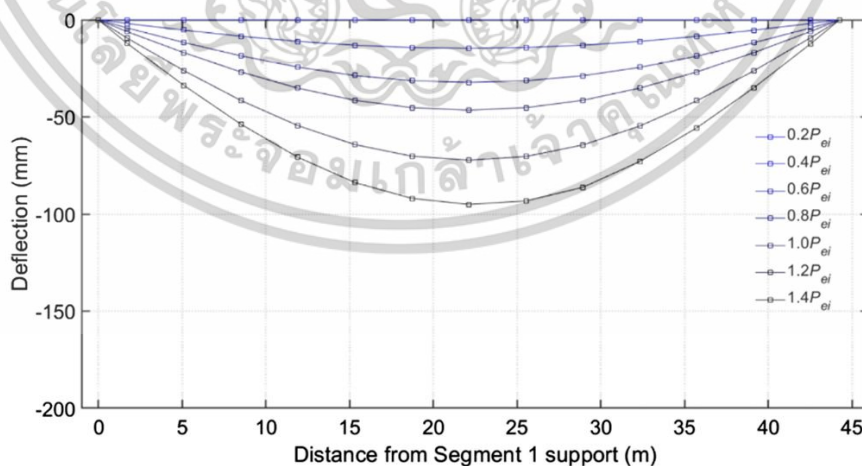
S9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ใช้แรง  $1.2P_{ei}$  และ  $1.4P_{ei}$  แรงอัดล่งหน้าที่สูงมากทำให้เกิดการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นอย่างรุนแรงในคอนกรีตบริเวณด้านล่างระหว่างตัวเปลี่ยนแนวเส้นลวดแรงอัดล่งหน้า (deviators) นอกจากนี้ การเปิดของรอยต่อและความสามารถในการเสียรูปของแบบจำลองทั้งสองมีขนาดเล็กมาก และการล้มเหลวของโครงสร้างเกิดขึ้นตามกระบวนการคลายแรงโดยตรง

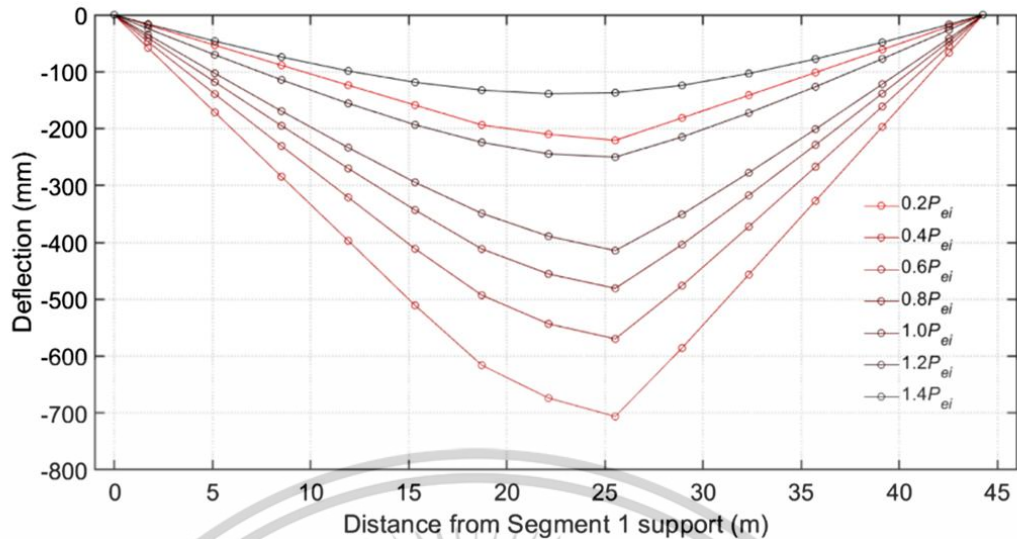


รูปที่ 14 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงแรงอัดต่อการกระจายตัวของความเสียหายและการโก่งตัวสูงสุด [33]



รูปที่ 15 ค่าการโก่งตัวในช่วง Decompression (BC) [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

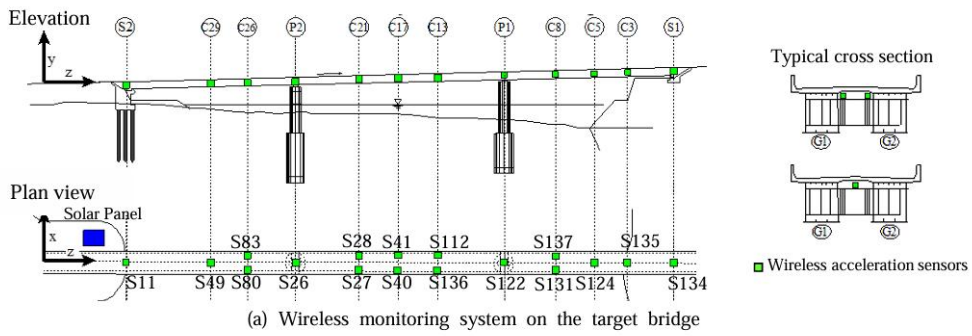


รูปที่ 16 ค่าการโก่งตัวในช่วง Before failure (BF) [33]

จากแบบจำลองทั้งหมดได้แสดงให้เห็นว่าก่อนช่วง Decompression แบบจำลองมีการเสียรูปในลักษณะเชิงเส้นซึ่งคล้ายกับสะพานคอนกรีตแบบชิ้นเดียว (Monolithic concrete span) หลังจากนั้นเมื่อถึงช่วง Decompression ลักษณะการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นมากขึ้นจากการเปิดออกของข้อรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน S8 และ S9 สิ่งนี้แสดงให้เห็นเด่นชัดมากขึ้นเมื่อถึงช่วง Before failure เมื่อพิจารณาถึงการสูญเสียค่าแรงอัดล่วงหน้าจาก  $1.0P_{ei}$  ลดลงเป็น 0.8, 0.6, และ  $0.4P_{ei}$  พบว่าแม้มีค่าการโก่งตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ขณะเดียวกันโมเมนต์ดัดสูงสุดที่รับได้มีค่าลดลงตามลำดับ จึงอาจสรุปได้ว่าการเสื่อมสภาพของลวดอัดแรงย่อมส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นที่บริเวณข้อต่อก่อนเป็นอันดับแรก ความเสียหายในลักษณะนี้ก็เกิดขึ้นกับการศึกษาของ Halder et al. [35] เช่นกัน ดังนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรอยต่อจึงถือเป็นจุดที่ควรให้ความสนใจ

## 2.2.2 วิธีการระบุความเสียหาย

Sasaki et al. [26] ได้ประเมินสภาพของโครงสร้างสะพานโดยอาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งไร้สาย (Wireless sensor) สะพานเป้าหมายเป็นสะพานคานเหล็กรูปกล่องพื่นคอนกรีตต่อเนื่อง มีความยาวกึ่งกลาง 88 เมตร ลักษณะและตำแหน่งของการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งไร้สาย ถูกแสดงใน รูปที่ 17



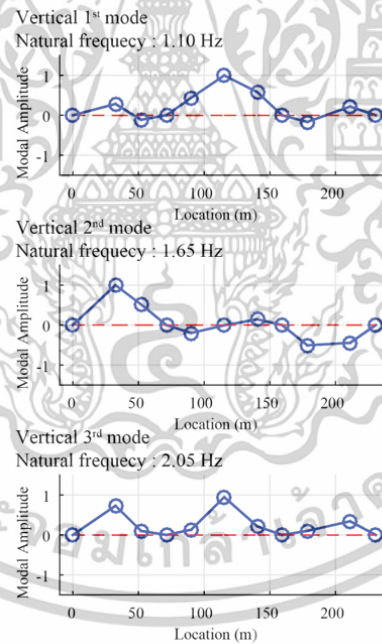
(b) Corrosion of steel box girder



(c) Crack at concrete deck

รูปที่ 17 ภาพรวมของสะพานเป้าหมาย และระบบของเซนเซอร์ไร้สายในการศึกษาของ Sasaki et al.

[26]

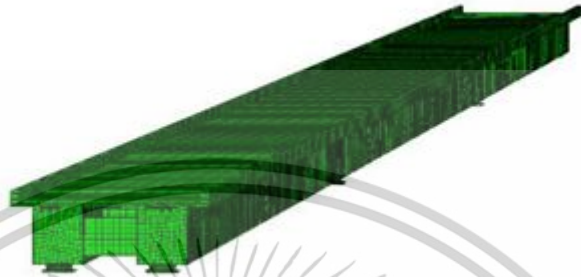


รูปที่ 18 ลักษณะการเสียรูปและความถี่ธรรมชาติของสะพานเป้าหมาย [26]

ข้อมูลจากเซนเซอร์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาคคุณสมบัติทางพลวัตของสะพาน (ความถี่ธรรมชาติ, และรูปร่างการเสียรูป) ด้วยเทคนิค Eigensystem Realization Algorithm (ERA) ร่วมกับ Natural Excitation Technique (NEXT) เรียกว่า NEXT-ERA คุณสมบัติทางพลวัตทั้งสองได้ถูกแสดงใน รูปที่ 18

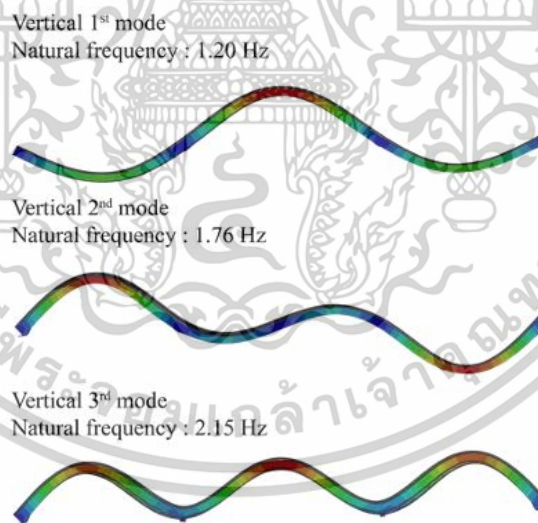
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อตรวจสอบผลกระทบของความไม่แน่นอน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วย ABAQUS โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของแบบจำลองเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้น ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกแสดงใน รูปที่ 19



รูปที่ 19 ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานเป้าหมาย [26]

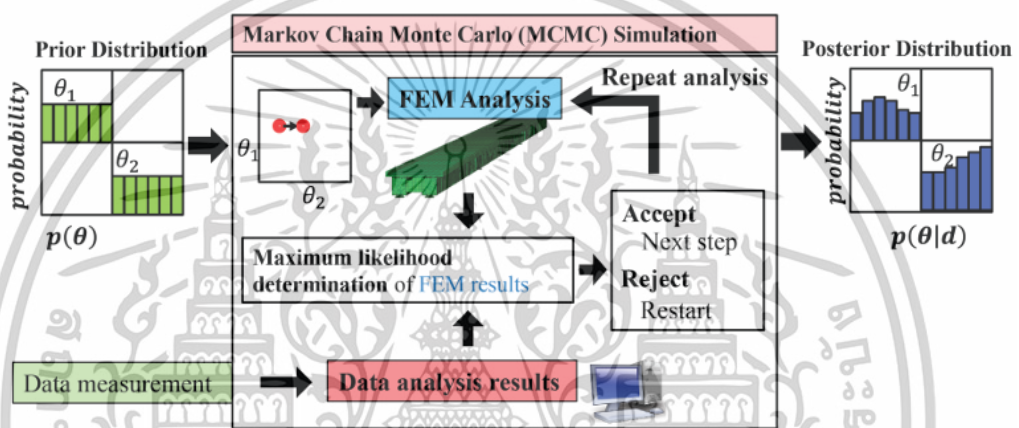
แบบจำลองถูกนำมาวิเคราะห์ Linear perturbation ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงใน รูปที่ 20 ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงพลวัตของสะพานเป้าหมาย



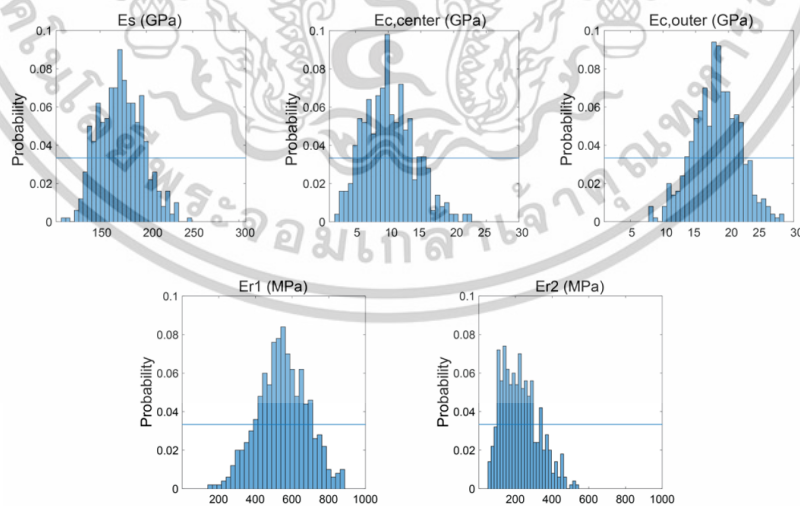
รูปที่ 20 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ Linear perturbation [26]

จากการสังเกตพบว่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์ Linear perturbation ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ตรงกันกับผลลัพธ์ของเทคนิค NEXT-ERA สิ่งนี้แสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของสะพานจริงกับแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อระบุความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ของแบบจำลองจึงได้มีการนำวิธีการอนุมานแบบเบย์มาใช้ ซึ่งได้เลือกดำเนินการตามอัลกอริทึม MH โดยขั้นตอนการดำเนินการถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบุใน รูปที่ 21 พารามิเตอร์ทั้งจะถูกสุ่มขึ้นด้วยวิธีการสุ่มแบบลาตินไฮเปอร์คิวบ์ ทั้งหมด 2000 ชุด ข้อมูลและนำไปกำหนดเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อนำไปวิเคราะห์เพื่อให้ความถี่ธรรมชาติ หลังจากนั้นความถี่ธรรมชาติจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก NEXT-ERA ด้วยฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็นและเลือกเก็บข้อมูลตามกฎเกณฑ์ของ MH สุดท้ายผลลัพธ์ของการแจกแจงปกติได้ถูกแสดงใน รูปที่ 21 หลังจากการปรับแก้ พารามิเตอร์ที่เป็นไปได้มากที่สุดของการแจกแจงภายหลังได้ถูกกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองและดำเนินการ Linear perturbation ใหม่อีกครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังแสดงใน ตารางที่ 3



รูปที่ 21 แผนผังการดำเนินการตามขั้นตอนการอนุมานแบบเบย์ [26]



รูปที่ 22 การแจกแจงภายหลังของแต่ละพารามิเตอร์ของแบบจำลอง [26]

**ตารางที่ 3** ผลลัพธ์ของความถี่ธรรมชาติหลังจากการปรับแก้พารามิเตอร์ตามผลลัพธ์ของการแจกแจง  
ภายหลัง [26]

โหมด ที่	ข้อมูลที่วัดได้	ค่าสมมติฐาน		ค่าจากการปรับแก้	
	(NEXT-ERA) ค่าเฉลี่ย (Hz)	ผลการวิเคราะห์ (Hz)	%ความ ผิดพลาด	ผลการวิเคราะห์ (Hz)	%ความ ผิดพลาด
1	1.10	1.20	9.09	1.10	0.00
2	1.65	1.76	6.67	1.64	0.61
3	2.05	2.15	4.88	1.91	6.83

วิธีการระบุคุณสมบัติทางพลวัตของโครงสร้างได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการระบุ  
ความถี่ธรรมชาติและ Mode shape นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาพารามิเตอร์ของ  
แบบจำลองด้วยการนำการอนุมานแบบเบย์มาใช้ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ ข้อมูลเหล่านี้มีความจำเป็น  
ในการนำไปใช้วิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างต่อและยังช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างใน  
ขณะนั้นได้มากยิ่งขึ้น

### 2.2.3 การสุ่มด้วยวิธีการสุ่มลาตินไฮเปอร์คิวบ์ (LHS)

Chu et al. [36] ได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของวิธีการสุ่ม LHS และ Monte  
Carlo simulation ในการสร้าง Kriging Surrogate Models หรือแบบจำลองตัวแทน พบว่าวิธี LHS  
ให้ผลลัพธ์การสุ่มที่คล้ายกันขณะที่มีจำนวนตัวอย่างที่เล็กกว่า ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการนี้จึงมี  
ประสิทธิภาพในการคำนวณมากกว่า และผลลัพธ์ในการศึกษาของ Shields et al. [37] ให้ผลลัพธ์ที่  
คล้ายกัน

ทั้งสองการศึกษาได้แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในวิธี LHS ในการสร้างแบบจำลอง  
ตัวแทนเมื่อเทียบกับวิธี Monte Carlo simulation ด้วยขนาดจำนวนตัวอย่างที่เล็กกว่า ดังนั้นใน  
การศึกษานี้จึงได้เลือกวิธี LHS ในการสุ่มตัวเลขสำหรับใช้เป็น input ให้แก่ชุดข้อมูลในช่วงโมดูลัส  
ยืดหยุ่นที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละชิ้นส่วน

### 2.2.4 การถอดถอยของกระบวนการเกาส์เซียนในการสร้างแบบจำลองตัวแทน

การถอดถอยของกระบวนการเกาส์เซียนเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์  
ระหว่าง input และ output ผ่านฟังก์ชันที่สร้างขึ้น [38] สำหรับการศึกษา input และ output คือ

โมดูลัสยืดหยุ่นและความถี่ธรรมชาติตามลำดับ ฟังก์ชันที่ได้จากเทคนิคนี้จะเป็นฟังก์ชันไร้พารามิเตอร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

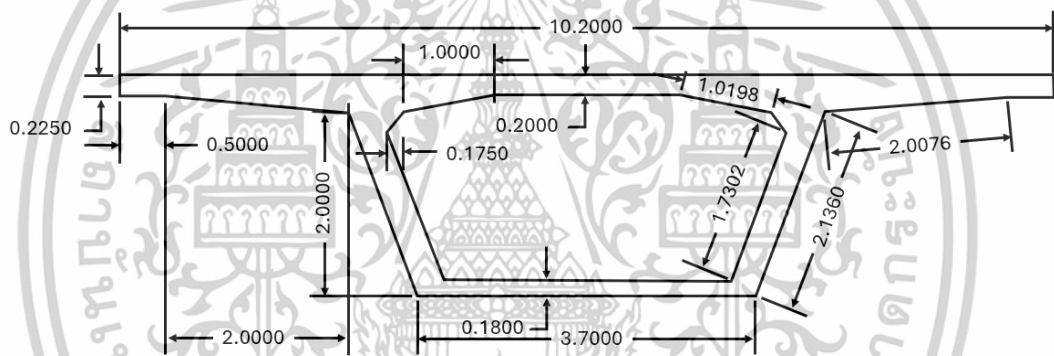
ตายตัว (non-parametric) [39] มีหลายการศึกษาที่นำเทคนิคนี้ไปใช้ ตัวอย่างเช่น ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเสียรูป [40] ทหารการเสียรูปของโครงสร้างคานขนาดใหญ่ [41] นอกจากนี้การระบุเมทริกซ์ความแปรปรวนใน [42] เทคนิคนี้ยังมีความซับซ้อนที่น้อยด้วยเช่นกัน ส่งผลให้การคำนวณสามารถทำได้ง่ายกว่าในบางสถานการณ์ แม้ว่าวิธีการอื่นๆในการอธิบายความสัมพันธ์อาจให้ความแม่นยำที่มากกว่าแต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการคำนวณเทคนิคการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียนอาจเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ที่แบบจำลองได้มีการทำให้ง่ายขึ้นแล้ว



### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 ลักษณะและการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โครงสร้างสะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นส่วนหนึ่งของสะพานทางด่วนในกรุงเทพมหานคร มีลักษณะเป็นสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องที่ก่อสร้างด้วยวิธีการอัดแรงภายหลัง เพื่อเชื่อมต่อชิ้นส่วนของสะพานเข้าไว้ด้วยกันโดยไม่มีการใช้วัสดุเสริมบริเวณจุดเชื่อมต่อ สะพานหนึ่งช่วงสะพานมีความยาวรวมทั้ง 44.25 เมตรประกอบด้วยชิ้นส่วนของสะพานทั้งหมด 14 ชิ้นส่วน ซึ่งมีความสูง 2.4 เมตร และกว้าง 10.2 เมตร สะพานต้นแบบนี้ได้ถูกออกแบบและอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO [43] ภาพหน้าตัดของชิ้นส่วนสะพานถูกแสดงใน รูปที่ 23

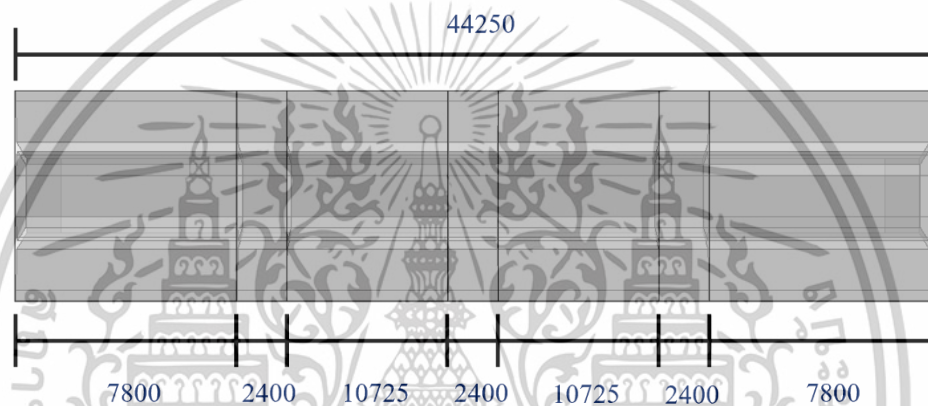


รูปที่ 23 ภาพหน้าตัดของชิ้นส่วนสะพานที่เป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO

สะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE model) ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ABAQUS [34] เนื่องจากสะพานต้นแบบมีความซับซ้อนและประกอบด้วยวัสดุหลายชิ้นทำให้ใช้ทรัพยากรในการคำนวณค่อนข้างมาก เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง แบบจำลองจะถูกสร้างตามวิธี Equivalent plain concrete element ที่เสนอใน [30] โดยกำหนดให้แบบจำลองอยู่ในช่วงยืดหยุ่นที่ทุกเอลิเมนต์เชื่อมต่อกันแบบต่อเนื่องเป็นชิ้นเดียวกัน (Monolithic elastic model) ซึ่งประกอบด้วยเอลิเมนต์ 2 ชนิด ได้แก่ (1) เอลิเมนต์ของชิ้นส่วน (Segment element) จำนวน 4 เอลิเมนต์ เป็นตัวแทนของช่วงของสะพานที่อยู่ภายนอกพื้นที่จุดเชื่อมต่อ (joint area) และ (2) เอลิเมนต์จุดเชื่อมต่อ (Joint element) จำนวน 3 เอลิเมนต์ เป็นตัวแทนของช่วงของสะพานที่อยู่ในพื้นที่จุดเชื่อมต่อ โดยวิธีการที่เสนอกล่าวว่าความยาวของเอลิเมนต์จุดเชื่อมต่อควรมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวของเอลิเมนต์ และเนื่องจากเอลิเมนต์ทั้ง 2 ชนิดมีความ

ลึกเท่ากันคือ 2.4 เมตร ดังนั้นความยาวของเอลิเมนต์จุดเชื่อมต่อจึงถูกกำหนดให้เป็น 2.4 เมตร นอกจากนี้แบบจำลองนี้ไม่ได้มีการพิจารณาอิทธิพลของลวดอัดแรงของระบบอัดแรงภายหลัง ลักษณะและขนาดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นรวมถึงการตั้งชื่อของแต่ละเอลิเมนต์ถูกแสดงในรูปที่ 24 เนื่องจากในการศึกษานี้มุ่งเน้นที่การตรวจจับตำแหน่งและระดับของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับบริเวณรอยต่อเป็นหลัก จึงกำหนดให้ในส่วนของ Segment element (S) เป็นชื่อเดียวกัน ซึ่งเมื่อนำไปกำหนดความเสียหายในขั้นตอนถัดไปจะถือว่าเอลิเมนต์นี้เกิดความเสียหายอย่างเท่ากันในทุกจุด กล่าวคือโมดูลัสยืดหยุ่นของเอลิเมนต์นี้จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้ง 4 ชั้นส่วน

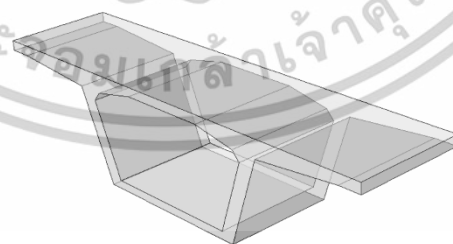
Top view :



Side view :



(a)



(b)

รูปที่ 24 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ ABAQUS: (a) ภาพรวม (b) ชิ้นส่วนจุดเชื่อมต่อ

คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุของแต่ละเอลิเมนต์ได้ถูกแสดงไว้ใน ตารางที่ 4 โดยอ้างอิงคุณสมบัติดังกล่าวตามการศึกษาของ Takabayashi et al. [32] เนื่องจากเป็นสะพานเดียวกันกับที่นำมาวิเคราะห์ในการศึกษา

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุ

ชิ้นส่วน	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]	อัตราส่วนปัวซองต์ (Poisson's Ratio)
S	43	0.19
J1	43	0.19
J2	43	0.19
J3	43	0.19

### 3.2 การดำเนินการปรับปรุงแบบเบย์เซียนด้วยแบบจำลองตัวแทน (Surrogate model)

#### 3.2.1 การสร้างแบบจำลองตัวแทนด้วยการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian Process Regression, GPR)

การสร้างแบบจำลองตัวแทนคือการสร้างฟังก์ชันที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของ input และ output ซึ่งทำได้โดยการทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยอาศัยชุดข้อมูล (Dataset) ที่มีอยู่ในการศึกษาที่กำหนดให้ input คือโมดูลัสยืดหยุ่นและให้ output คือความถี่ธรรมชาติ โดยวิธีการทำนายที่เลือกใช้คือการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน หรือ GPR การมีแบบจำลองตัวแทนจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรในการคำนวณลงอย่างมาก เนื่องจากวิธีในการระบุความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ทำได้โดยการกำหนดคุณสมบัติต่างๆของวัสดุให้แก่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งอาศัยทรัพยากรในการคำนวณค่อนข้างมากโดยเฉพาะหากต้องทำซ้ำหลายครั้ง ขณะที่การใช้แบบจำลองตัวแทนใช้ทรัพยากรน้อยกว่า

หนึ่งในสิ่งจำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองตัวแทนคือชุดข้อมูล ในการศึกษาจะดำเนินการสร้างชุดข้อมูลขึ้นโดยอาศัยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบละตินไฮเปอร์คิวบ์ (Latin Hypercube Sampling, LHS) เพื่อสุ่มชุดตัวเลขที่เป็นตัวแทนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซึ่งดำเนินการสุ่มด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB ตัวเลขที่สุ่มขึ้นมาจะถูกกำหนดช่วงโดยอ้างอิงตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของวัสดุ (43 GPa) โดยกำหนดให้ค่าต่ำที่สุดได้คือ 20% ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นหรือเท่ากับ 8.6 GPa และเนื่องจาก

โอกาสที่ค่าโมดูลัสจะเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นมีน้อยจึงกำหนดให้ค่าสูงสุดที่สุ่มได้ไม่สูงมากคือ 50 GPa ช่วงของการสุ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธี LHS ถูกสรุปใน ตารางที่ 5 ค่าถูกสุ่มขึ้นมาจะถูกนำไปกำหนดเป็นคุณสมบัติของวัสดุให้แก่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามแต่ละชั้นส่วนเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติ 5 โหมดแรกของแบบจำลอง จากนั้นค่าทั้ง 2 จะถูกนำมาสร้างเป็นชุดข้อมูลตามที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

ตารางที่ 5 ช่วงของการสุ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นส่วนด้วยวิธี LHS

ชั้นส่วน	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
S	8.6	50
J1	8.6	50
J2	8.6	50
J3	8.6	50

ชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ด้วย GPR โดยใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูป “fitgpr” ที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ MATLAB อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของฟังก์ชันสำเร็จรูปนี้คือฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นสามารถมี output ได้เพียงหนึ่งค่า และเนื่องจากการศึกษานี้ต้องการหาความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นส่วนกับความถี่ธรรมชาติ 5 โหมดแรก ดังนั้น GPR จะถูกนำมาใช้สร้างฟังก์ชันทั้งหมด 5 ฟังก์ชัน ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันที่ 1 จะเป็นความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นกับความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 จนครบตามจำนวนโหมดทั้งหมด

เพื่อตรวจสอบขนาดชุดข้อมูลที่เหมาะสมต่อการนำมาสร้างเป็นฟังก์ชันได้เลือกใช้วิธี Trial and error ในการตรวจสอบ โดยเริ่มต้นดำเนินการสร้างชุดข้อมูล 6 ครั้งให้มีขนาดที่แตกต่างกัน ดังนี้: จำนวน 50, 250, 500, และ 1500 ชุดข้อมูล และสร้างชุดข้อมูลเพิ่มเติมอีก 1 ครั้ง จำนวน 100 ชุดข้อมูลเพื่อใช้สำหรับทดสอบความถูกต้องของฟังก์ชันความสัมพันธ์โดยนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากชุดข้อมูลเพิ่มเติมไปแทนลงในฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น จากนั้นใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) จากสมการที่ เพื่อเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติที่ได้จากฟังก์ชันกับจากชุดข้อมูลเพิ่มเติม ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงใน ตารางที่ 6

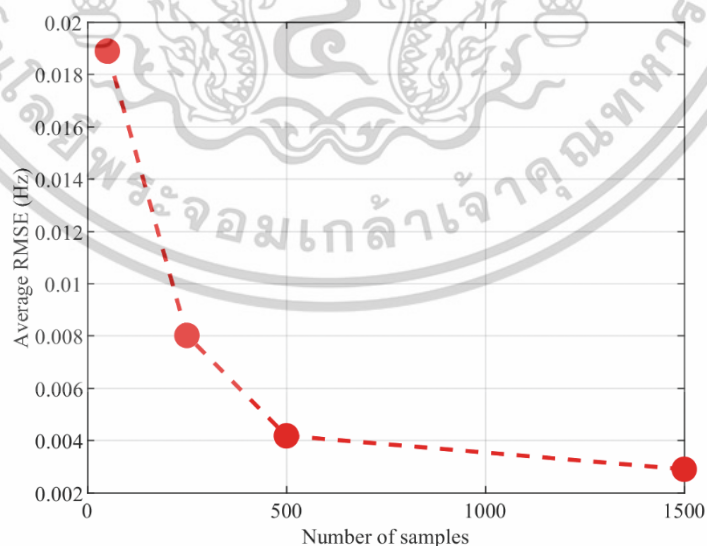
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1.10)$$

เมื่อ  $y_i$  คือความถี่ธรรมชาติจากชุดข้อมูล (ได้จาก FEM),  $\hat{y}_i$  คือความถี่ธรรมชาติจากฟังก์ชัน,  $n$  จำนวนชุดข้อมูล

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์ของ RMSE และ R-square จากการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติ

จำนวนชุดข้อมูล	RMSE $\times 10^{-2}$ (Hz)					เวลาในการสร้างแบบจำลอง
	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5	ตัวแทน (ชม.)
50	1.69	1.27	2.74	2.15	1.60	0.19
250	0.45	1.22	0.71	1.08	0.55	0.97
500	0.11	0.33	0.47	0.54	0.64	1.94
1500	0.17	0.33	0.31	0.35	0.29	5.83

จากการตรวจสอบผลกระทบของขนาดชุดข้อมูลทั้ง 4 ครั้งดังที่แสดงใน ตารางที่ 6 พบว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้งค่า RMSE ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสร้างแบบจำลองที่มีความซับซ้อนและชนิดของวัสดุที่น้อย ขนาดของชุดข้อมูลเหมาะสมจึงมีขนาดเล็กลงตามไปด้วยซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบนี้ค่าเฉลี่ยของ RMSE ของแบบจำลองตัวแทนโดยใช้ขนาดชุดข้อมูลที่แตกต่างกันถูกแสดงใน รูปที่ 25



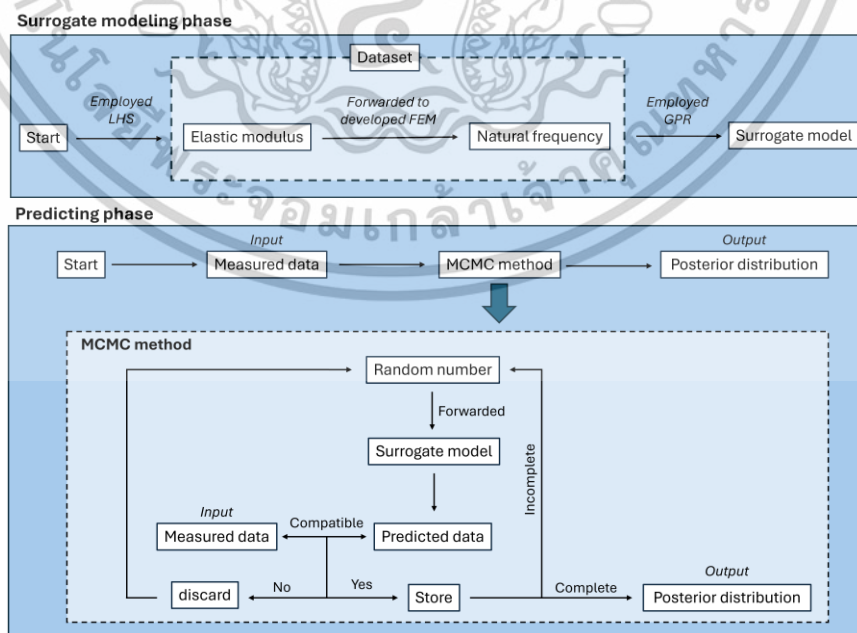
รูปที่ 25 ค่าเฉลี่ยของ RMSE จากทุกโหมดต่อจำนวนชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน

ในการศึกษาของ Li et al. [44] ได้เสนอการสร้างแบบจำลองตัวแทนด้วยโครงข่ายประสาทเทียมโดยตรวจสอบขนาดของชุดข้อมูลที่เหมาะสมด้วยวิธีเดียวกันโดยเริ่มต้นตั้งแต่จำนวน 200 และเพิ่มขึ้นครั้งละ 200 จนถึง 5000 ชุดข้อมูล ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกความถูกต้องของฟังก์ชันเพิ่มขึ้นอย่างมากขณะที่ชุดข้อมูลมีขนาดเล็กถึงปานกลางและค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อจำนวนชุดข้อมูลที่ขนาดใหญ่ ซึ่งการเลือกชุดข้อมูลขนาดปานกลางของการศึกษานี้ให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่อ้างกล่าวได้ว่าจำนวนชุดข้อมูลที่ 1500 เป็นชุดข้อมูลขนาดปานกลางและเมื่อพิจารณาเรื่องความถูกต้องของฟังก์ชันร่วมกับการใช้ทรัพยากรในการคำนวณ การเลือกใช้จำนวนชุดข้อมูลที่ 1500 โดยไม่มีการเพิ่มจำนวนข้อมูลเพิ่มอาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดจากการสร้างชุดข้อมูลที่ 4 ครั้ง

### 3.2.2 การดำเนินการตามแนวทางการอนุมานแบบเบย์

ในการนำข้อมูลความถี่ธรรมชาติมาใช้ระบุโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชิ้นส่วนโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนร่วมด้วยได้มีการนำทฤษฎีบทของเบย์มาใช้ในการวิเคราะห์หรือการอนุมานแบบเบย์ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของการแจกแจงปกติ (Normal distribution) เนื่องจากการอนุมานนี้เป็นวิธีในการหาคำตอบที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายทำให้มีวิธีดำเนินการหลายวิธี ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้วิธี MCMC โดยดำเนินการตามอัลกอริทึม Random Walk Metropolis-Hasting (RWMH) ซึ่งถูกพัฒนาต่อยอดมาจากอัลกอริทึม Metropolis-Hasting (MH) มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในการลู่เข้าหาคำตอบ



รูปที่ 26 ผังงานของขั้นตอนการสร้างการแจกแจงภายหลังตามแนวคิดของการอนุมานแบบเบย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

แบบจำลองตัวแทนที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาใช้ร่วมกับอัลกอริทึม RWMH เพื่อลดทรัพยากรในการคำนวณซึ่งจะทำหน้าที่แทนการกำหนดคุณสมบัติลงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยตรง ขั้นตอนการดำเนินการทั้งหมดตามแนวทางการอนุมานแบบเบย์ที่เสนอถูกแสดงอยู่ใน

รูปที่ 26 แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการสร้างแบบจำลองตัวแทน (Surrogate modeling phase) ซึ่งเป็นช่วงที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 และ ช่วงการทำนาย (Predicting Phase) ซึ่งดำเนินการตามอัลกอริทึม RWMH ภายในซอฟต์แวร์ MATLAB

องค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญของการดำเนินการตามแนวคิดของการอนุมานแบบเบย์คือฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็น (Likelihood function) สำหรับอัลกอริทึมนี้โดยทั่วไปจะเลือกใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function, PDF) แต่เนื่องจากการศึกษานี้ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติทั้ง 5 โหมดพร้อมกันจึงเลือกใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบหลายตัวแปร (Multivariate probability density function, MPDF) แทน โดยหาได้จากสมการที่ (1.9)

ใน Predicting phase ความถี่ธรรมชาติที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ ( $\omega_i$ ) จะถูกกำหนดให้เป็นค่าเป้าหมาย (Objective value) สำหรับอัลกอริทึม RWMH หลังจากนั้นตัวเลขจะถูกสุ่มขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชิ้นส่วน โดยในการสุ่มครั้งแรกตัวเลขจะถูกสุ่มขึ้นในช่วงของการแจกแจงก่อนหน้า (Prior distribution) มีลักษณะเป็นไปตาม ตารางที่ 7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ถูกสุ่มจะถูกนำไปแทนในแบบจำลองตัวแทนซึ่งแบบจำลองจะทำนายความถี่ธรรมชาติออกมา จากนั้นความถี่ดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายโดยแสดงผลพหุในรูปของ “ค่าความเป็นไปได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น” ด้วย MPDF โดยหากค่าความเป็นไปได้นี้ดังกล่าวนั้นเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับของอัลกอริทึม MH ( $U \leq \alpha$ ) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ถูกสุ่มในครั้งนั้นจะถูกเก็บไว้ และจะวนซ้ำขั้นตอนนี้จนกระทั่งความถี่ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ถูกสุ่มก่อตัวเป็นการแจกแจงภายหลัง (Posterior distribution)

ในการศึกษาของ Hurtado et al. [22] พบว่าการเลือกใช้เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) ซึ่งอนุมานว่าแต่ละพารามิเตอร์เป็นอิสระต่อกัน ในกรณีที่ไม่ทราบข้อมูลความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างพารามิเตอร์ สามารถลดความซับซ้อนของการคำนวณลงได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์มาก

## ตารางที่ 7 การแจกแจงปกติก่อนหน้าของแต่ละชั้นส่วน

การแจกแจงก่อนหน้า		
ชั้นส่วน	ค่าเฉลี่ย [GPa]	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [GPa]
S	35	2
J1	35	2
J2	35	2
J3	35	2

การกำหนดค่าจำนวนโหมดของความถี่ธรรมชาติและจำนวนการวนซ้ำสำหรับอัลกอริทึม RWMH ถูกแสดงใน ตารางที่ 8 โดยจำนวนโหมดหมายถึงจำนวนโหมดที่ใช้ในการทำนายโหมดคู่สียืดหยุ่น และจำนวนการวนซ้ำหมายถึงจำนวนข้อมูลที่เก็บเพื่อนำมาสร้างการแจกแจงปกติตามขั้นตอนของอัลกอริทึม

ตารางที่ 8 การกำหนดค่าจำนวนโหมดของความถี่ธรรมชาติและจำนวนการวนซ้ำสำหรับอัลกอริทึม RWMH

การกำหนดค่า	
จำนวนโหมด	5
จำนวนการวนซ้ำ	300,000

### 3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการที่เสนอ

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการระบุโหมดคู่สียืดหยุ่นจากข้อมูลความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีการที่เสนอ ในการศึกษานี้ได้อาศัยการจำลองความเสียหายให้แก่แบบจำลองไฟต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นไว้ก่อนหน้า (หัวข้อที่ 3.3.1) หลังจากนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองได้ถูกดำเนินการเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองที่ได้จำลองความเสียหายแล้ว จากนั้นค่าความถี่ธรรมชาติดังกล่าวจะถูกนำไปดำเนินการตามวิธีการที่เสนอเพื่อทำนายโหมดคู่สียืดหยุ่นของแต่ละชั้นส่วน แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับโหมดคู่สียืดหยุ่นที่ถูกกำหนดให้แบบจำลองก่อนหน้า (หัวข้อที่ 3.3.2)

### 3.3.1 การจำลองความเสียหาย

ความเสียหายจะถูกจำลองโดยการลดค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชิ้นส่วนโดยมุ่งเน้นไปที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ joint element เป็นหลักซึ่งได้กำหนดให้ความเสียหายแต่ละจุดมีขนาดแตกต่างกัน ขณะที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ segment element ถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากันในทุกจุด สำหรับการศึกษานี้ได้จัดทำกรณีตัวอย่างของตำแหน่งของความเสียหายขึ้นมาทั้งหมด 5 กรณี ดังนี้:

- กรณี A : เกิดความเสียหายขึ้นที่จุดเชื่อมต่อกลางสะพาน (ชิ้นส่วน J2)
- กรณี B : เกิดความเสียหายขึ้นที่จุดเชื่อมต่อข้างใดข้างหนึ่งของสะพาน (ชิ้นส่วน J1 หรือ J3)
- กรณี C : เกิดความเสียหายขึ้นที่จุดเชื่อมต่อกลางข้างใดข้างหนึ่งและกลางสะพาน (ชิ้นส่วน J1 หรือ J3 และชิ้นส่วน J2)
- กรณี D : เกิดความเสียหายขึ้นที่จุดเชื่อมต่อทั้งสองข้างของสะพาน (ชิ้นส่วน J1 และ J3)
- กรณี E : เกิดความเสียหายขึ้นที่จุดเชื่อมต่อทั้งสามจุดของสะพาน (ชิ้นส่วน J1 J2 และ J3)

ในแต่ละกรณีจะถูกแบ่งระดับความเสียหายแบบสุ่มออกเป็นกรณีละ 2 ระดับ รวม 10 กรณี ดังแสดงใน ตารางที่ 9

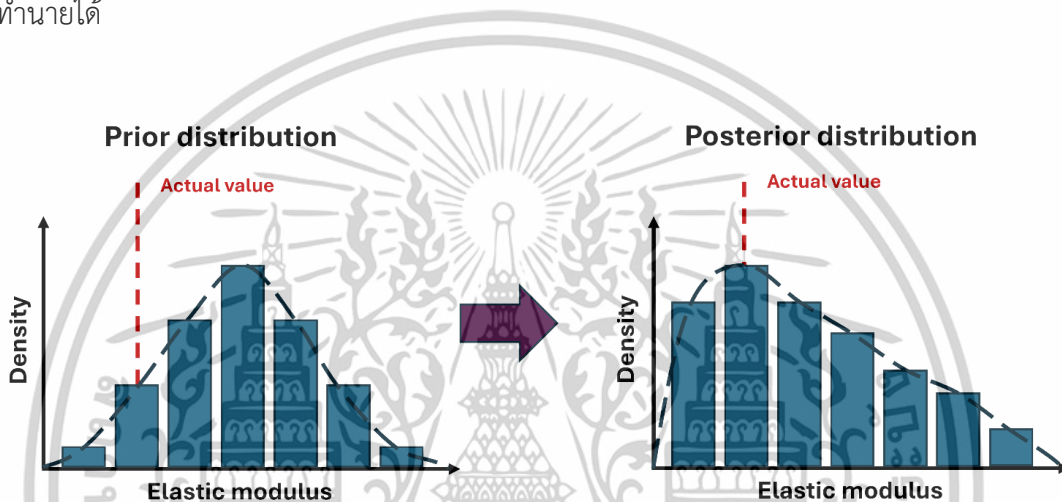
ตารางที่ 9 ระดับและตำแหน่งของความเสียหายที่ถูกจำลองขึ้นให้แก่แต่ละชิ้นส่วนในการศึกษานี้

กรณี	ระดับความเสียหาย (% ของการสูญเสียค่าโมดูลัสยืดหยุ่น)				ตัวย่อ
	S	J1	J2	J3	
A	10	0	20	0	A1
	20	0	60	0	A2
B	0	20	0	0	B1
	30	0	0	60	B2
C	30	20	70	0	C1
	40	0	20	80	C2
D	20	30	0	40	D1
	10	50	0	10	D2
E	10	80	70	50	E1
	30	20	10	80	E2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

กรณีทั้งหมดใน ตารางที่ 9 ถูกดำเนินการตามวิธีการที่เสนอ ผลลัพธ์ของวิธีการนี้คือการสร้างการแจกแจงภายหลัง (Posterior distribution) โดยการเปลี่ยนแปลงการแจกแจงก่อนหน้า (Prior distribution) ด้วยฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็น (Likelihood function) มีลักษณะเป็นเส้นโค้งของระฆังคว่ำ ดังตัวอย่างที่แสดงใน รูปที่ 27 จุดสูงสุดของแต่ละการแจกแจงภายหลังแสดงถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้มากที่สุดของชิ้นส่วนนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงจะกำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ณ ตำแหน่งที่มีโอกาสเป็นไปได้มากที่สุดของแต่ละชิ้นส่วนเป็นตัวแทนของโมดูลัสยืดหยุ่นที่วิธีการที่เสนอทำนายได้



รูปที่ 27 ตัวอย่างลักษณะของการแจกแจงปกติและการแจกแจงภายหลัง

โมดูลัสยืดหยุ่นที่ทำนายได้ถูกเปรียบเทียบกับโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริง (ค่าที่ใช้กำหนดให้แก่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละกรณี) โดยใช้สมการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดพื้นฐาน ดังแสดงในสมการที่ (1.11) ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ไม่สูงแสดงถึงความไม่แตกต่างกันระหว่างผลลัพธ์ของการทำนายและค่าจริงซึ่งจะถือว่าวิธีการที่เสนอมีความถูกต้องสำหรับแบบจำลองนี้

$$\delta = \left| \frac{\hat{x} - x}{x} \right| \times 100\% \quad (1.11)$$

เมื่อ  $\delta$  คือเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด(%),  $\hat{x}$  คือโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้, และ  $x$  เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นจริง

### 3.4 การวิเคราะห์ผลของการปรับแก้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RWMH ต่อผลลัพธ์

ผลลัพธ์ของการจำลองความเสียหายแก่แบบจำลองตามที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 เกิดจากการตั้งค่าจำนวนโหนดของความถี่ธรรมชาติและจำนวนการวนซ้ำของอัลกอริทึม RWMH ตาม ตารางที่ 8 ซึ่งการปรับแก้พารามิเตอร์ดังกล่าวอาจส่งผลต่อผลลัพธ์ วิธีการที่เสนอได้ถูกดำเนินการซ้ำอีกครั้งกับกรณี A1, C1 และ E1 โดยปรับแก้พารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อศึกษาผลกระทบของมัน ซึ่งจะแบ่งเป็น (1) ศึกษาจำนวนโหนดของความถี่ธรรมชาติ โดยเริ่มต้นที่ 3 โหนดและเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 โหนด จนถึง 6 โหนด และ (2) ศึกษาจำนวนการวนซ้ำ โดยเริ่มต้นที่ 1,000 รอบ และปรับเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึง 500,000 รอบ ดังแสดงใน ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ที่ไม่ได้รับการศึกษาในแต่ละหัวข้อได้ถูกกำหนดให้ไม่ต้องมีการปรับแก้เกิดขึ้น

ตารางที่ 10 รายละเอียดการปรับแก้พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่ออัลกอริทึม RWMH

พารามิเตอร์	เริ่มต้นที่	สิ้นสุดที่
จำนวนโหนด	3	6
จำนวนการวนซ้ำ	1,000	500,000

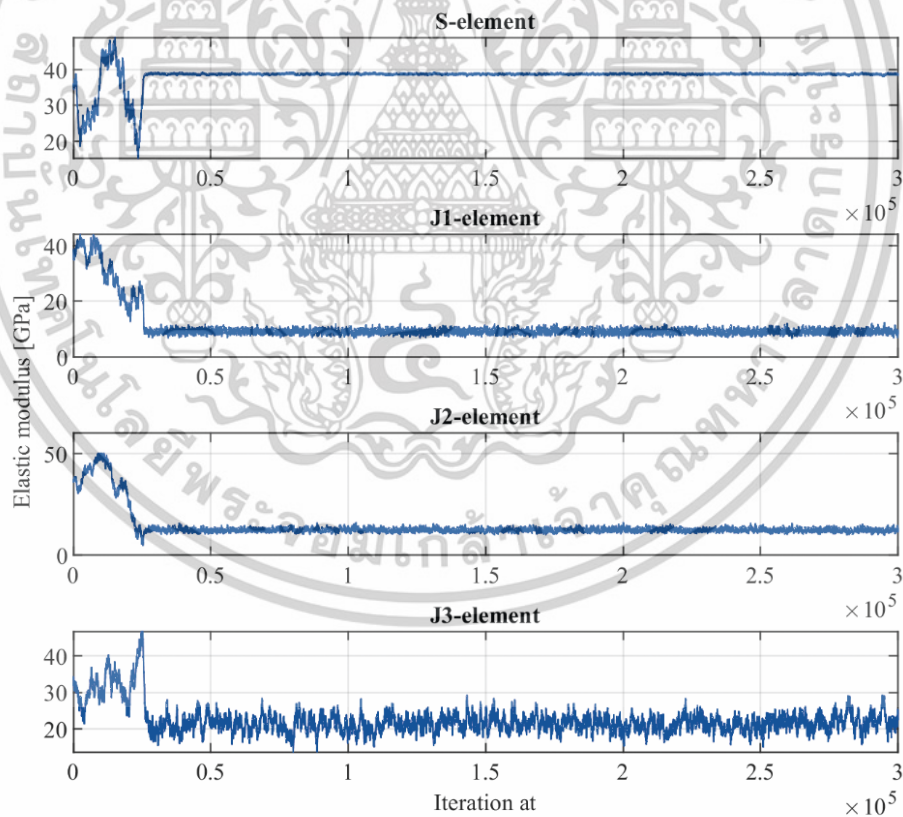
หลังจากการปรับแก้พารามิเตอร์และดำเนินการตามขั้นตอนของวิธีการที่เสนอในแต่ละครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เช่นเดียวกับที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ผลลัพธ์ได้ถูกแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุดที่คำนวณด้วยสมการ (1.11) จากชิ้นส่วนทั้งหมดสำหรับการปรับแก้จำนวนโหนด และแสดงในรูปแบบของการลู่เข้าของผลลัพธ์สำหรับจำนวนการวนซ้ำ การวิเคราะห์นี้มีส่วนช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆกับผลลัพธ์มากยิ่งขึ้น

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์

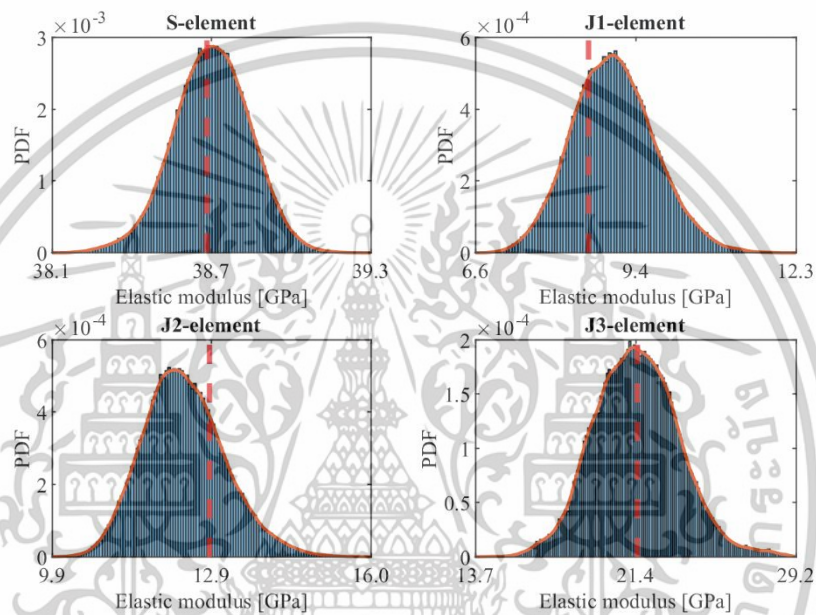
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ของวิธีการที่เสนอ

Trace plot ของกรณี E1 ได้แสดงใน รูปที่ 28 แสดงให้เห็นลักษณะการลู่เข้าหาผลลัพธ์ของวิธีการที่เสนอ พบว่าเริ่มมีการลู่เข้าที่ประมาณการวนซ้ำที่ 25,000 ครั้ง (ประมาณ 8% ของจำนวนการวนซ้ำทั้งหมด) สำหรับทุกชิ้นส่วน ในช่วงก่อนการลู่เข้า ข้อมูลที่ได้ยังมีความไม่คงที่ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของการสุ่มตามขั้นตอนของอัลกอริทึม MH ข้อมูลเหล่านี้อาจรบกวนการสร้างเส้นโค้งการแจกแจงภายหลังได้ ดังนั้นจึงได้มีการตัดข้อมูลช่วงที่ยังไม่คงที่นี้ออก ก่อนที่จะเริ่มมีการเก็บข้อมูลสำหรับมาสร้างเป็นการแจกแจงภายหลัง ในการศึกษานี้จะเลือกใช้ผลลัพธ์ของกรณี E1 เป็นตัวอ้างอิงในการกำหนดจำนวนชุดข้อมูลที่ควรตัดออกสำหรับทุกกรณีที่เหลือ โดยได้มีการเผื่อระยะเพิ่มเติมเข้าไป



รูปที่ 28 Trace plot สำหรับตรวจสอบการลู่เข้าของกรณี E1

ทุกกรณีจะถูกตัดข้อมูลช่วงแรกออกไปโดยกำหนดให้จำนวนชุดข้อมูลที่ตัดออกจะคิดเป็น 20% ของจำนวนการวนซ้ำทั้งหมด ในหัวข้อนี้ได้เลือกใช้การวนซ้ำที่ 300,000 ครั้ง ดังนั้นข้อมูล 45,000 ครั้งแรกจะถูกตัดออกและไม่นำมาพิจารณาในการสร้างการแจกแจงภายหลัง ผลการวิเคราะห์กรณี E1 หลังจากการตัดข้อมูลช่วงแรกออกไปแล้วได้ถูกแสดงใน รูปที่ 29 โดยที่เส้นประสีแดง หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริง และการเปรียบเทียบค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดจากวิธีการที่เสนอกับค่าที่แท้จริงใน ตารางที่ 11 และขั้นตอนเดียวกันนี้ได้ถูกดำเนินการกับกรณีที่เหลือโดยแสดงผลลัพธ์ที่ได้ใน รูปที่ 30

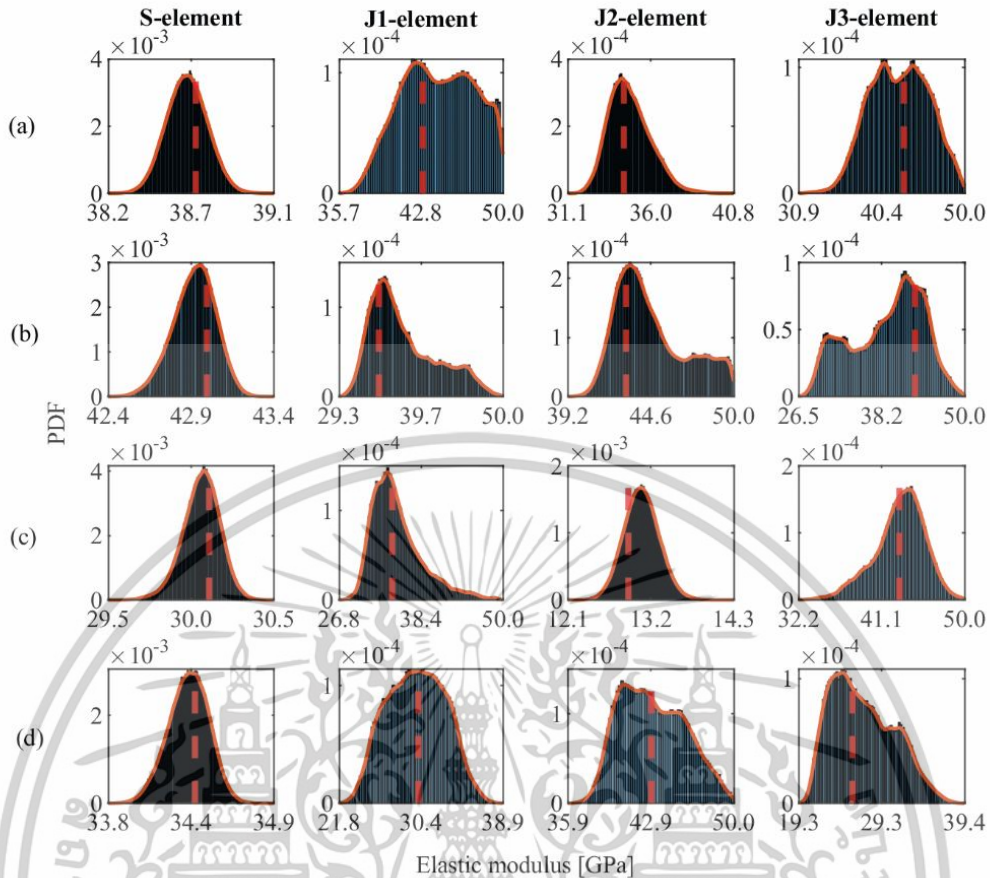


รูปที่ 29 การแจกแจงภายหลังของกรณี E1

ตารางที่ 11 ผลลัพธ์ของการประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลองจากกรณี E1

	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	38.70	8.60	12.90	21.50	2.0512	3.6401	3.9981	4.1066	4.5204
เป็นไปได้	38.71	9.08	12.13	21.15	2.0501	3.6373	4.0060	4.1022	4.5190
SD	0.14	0.72	0.78	2.05	0.0032	0.0020	0.0033	0.0033	0.0029
%ความผิดพลาด	0.01	5.52	6.01	1.63	0.0536	0.0769	0.1976	0.1071	0.0310

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 30 การแจกแจงปกติของกรณี A1(a), B1(b), C1(c), และ D1(d)

ตารางที่ 12 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ตามวิธีการที่เสนอสำหรับทุกกรณี

กรณี	โมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้ [GPa] (%ความผิดพลาด)				%ความผิดพลาด	
	S	J1	J2	J3	ต่ำสุด	สูงสุด
A1	38.67 (0.08)	42.10 (2.09)	34.23 (0.51)	44.10 (2.56)	0.08	2.56
A2	34.36 (0.11)	42.70 (0.70)	17.19 (0.06)	44.95 (4.53)	0.06	4.53
B1	42.96 (0.10)	35.10 (2.03)	42.85 (0.35)	41.55 (3.37)	0.10	3.37
B2	30.07 (0.09)	42.95 (0.12)	43.25 (0.58)	17.23 (0.15)	0.09	0.58
C1	30.07 (0.09)	33.70 (2.03)	13.09 (1.43)	44.35 (3.14)	0.09	3.14
C2	25.81 (0.03)	41.75 (2.91)	34.55 (0.44)	84.90 (1.28)	0.03	2.91
D1	34.38 (0.07)	30.10 (0.00)	40.55 (5.70)	23.90 (7.36)	0.00	7.36
D2	38.71 (0.02)	21.23 (1.28)	43.02 (0.06)	38.95 (0.65)	0.02	1.28
E1	38.71 (0.01)	9.08 (5.52)	12.13 (6.01)	21.15 (1.63)	0.01	6.01
E2	30.02 (0.27)	34.25 (0.44)	39.85 (2.97)	83.90 (2.44)	2.97	0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จากผลลัพธ์การแจกแจงภายหลังของทุกชิ้นส่วนพบว่าชิ้นส่วน S ในทุกกรณีมีการกระจุกตัวของข้อมูลมากที่สุดซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเป็นชิ้นส่วนที่มีสัดส่วนคิดเป็นมากกว่า 80% ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการคำนวณอัตราส่วนต่อความยาว ทำให้การเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วน S เพียงเล็กน้อยส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติมากเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอื่น

ตารางที่ 12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของทุกกรณี พบว่าทุกกรณีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุดจะเกิดจากผลลัพธ์ของชิ้นส่วน S ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไวที่มากกว่าชิ้นส่วนอื่น ขณะที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งอย่างเฉพาะเจาะจง

## 4.2 ผลของการปรับแก้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RWMH ต่อผลลัพธ์

### 4.2.1 ผลกระทบของจำนวนโมเมนต์ต่อผลลัพธ์

การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 3, 4, และ 6 โมเมนต์ ถูกแสดงในตารางที่ 13, ตารางที่ 14, และ ตารางที่ 15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้โดยเฉพาะชิ้นส่วน J3 ด้วยการใส่ 3 โมเมนต์ในการประมาณพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้จำนวนโมเมนต์ที่มากกว่า 3 ชิ้นไป เนื่องจากจำนวนโมเมนต์เปรียบเสมือนจำนวน input ของวิธีการนี้ การเปลี่ยนแปลง input ย่อมส่งผลต่อ output ในทางกลับกันไม่พบความแตกต่างกันของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุดซึ่งให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกับหัวข้อที่ 4 นอกจากนี้การเลือกใช้จำนวนโมเมนต์ระหว่าง 5 และ 6 โมเมนต์มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่แตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการใช้ 6 โมเมนต์นั้นมีการใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านระยะเวลาและทรัพยากรในการคำนวณการเลือกใช้ 5 โมเมนต์จึงอาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 13 การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 3 โมเมนต์

	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]		
	S	J1	J2	J3	โมเมนต์ที่ 1	โมเมนต์ที่ 2	โมเมนต์ที่ 3
เกิดขึ้นจริง	38.70	8.60	12.90	21.50	2.0512	3.6401	3.9981
เป็นไปได้	38.93	14.25	11.75	32.50	2.0501	3.6373	4.0060
SD	0.91	10.17	8.92	8.11	0.0033	0.0033	0.0034
%ความผิดพลาด	0.58	65.70	8.91	84.88	0.0536	0.0769	0.1976

ตารางที่ 14 การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 4 โหมด

	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]			
	S	J1	J2	J3	โหมดที่	โหมดที่	โหมดที่	โหมดที่
					1	2	3	4
เกิดขึ้นจริง	38.70	8.60	12.90	21.50	2.0512	3.6401	3.9981	4.1066
เป็นไปได้	38.69	9.03	12.23	21.10	2.0501	3.6373	4.0060	4.1022
SD	0.25	0.74	0.76	3.29	0.0033	0.0034	0.0033	0.0034
%ความผิดพลาด	0.01	4.94	5.23	1.86	0.0536	0.0769	0.1976	0.1071

ตารางที่ 15 การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 6 โหมด

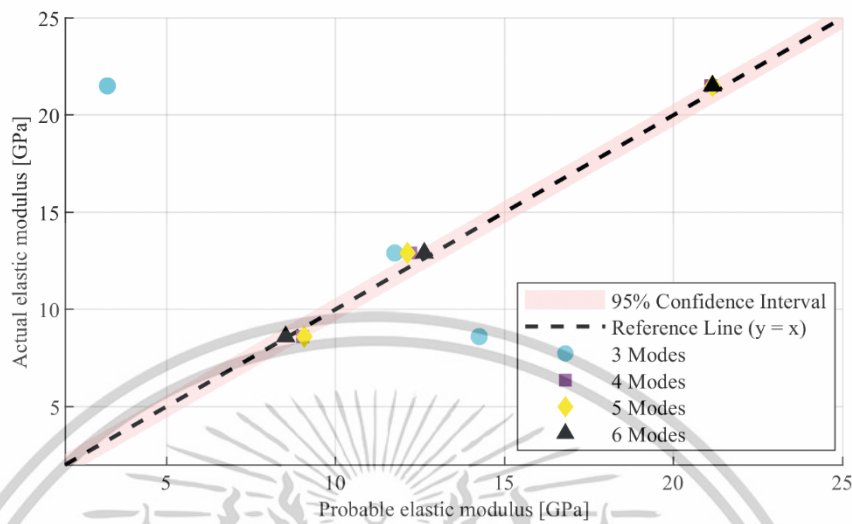
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]			
	S	J1	J2	J3
เกิดขึ้นจริง	38.70	8.60	12.90	21.50
เป็นไปได้	38.68	8.53	12.63	21.15
SD	0.13	0.67	0.78	2.08
%ความผิดพลาด	0.06	0.87	2.13	1.63

ตารางที่ 16 การประมาณพารามิเตอร์ของโมเดลโดยใช้ 6 โหมด (ต่อ)

	ความถี่ธรรมชาติ [Hz]					
	โหมดที่	โหมดที่	โหมดที่	โหมดที่	โหมดที่	โหมดที่
	1	2	3	4	5	6
เกิดขึ้นจริง	2.0512	3.6401	3.9981	4.1066	4.5204	4.8204
เป็นไปได้	2.0501	3.6373	3.9900	4.1022	4.5190	4.8236
SD	0.0031	0.0019	0.0032	0.0033	0.0025	0.0023
%ความผิดพลาด	0.0536	0.0769	0.2026	0.1071	0.0310	0.0664

ผลลัพธ์ดังกล่าวถูกสนับสนุนด้วย รูปที่ 31 ที่แสดงการกระจายตัวของโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้ด้วยการใช้จำนวนโหมดที่แตกต่างกัน โดยเส้นประสีแดงคือเส้นอ้างอิงที่แสดงถึงความแม่นยำของการทำนาย ขณะที่แถบสีชมพูแสดงถึงช่วงความเชื่อมั่น 95% จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าการใช้จำนวนโหมด 3 โหมดผลลัพธ์ส่วนมากอยู่นอกช่วงความเชื่อมั่น 95% ขณะที่การใช้จำนวนโหมด 4,

และ 5 โหมดส่วนมากจะมีผลลัพธ์ภายในช่วงความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้การใช้จำนวนโหมด 6 โหมดผลลัพธ์ของทุกชิ้นส่วนที่ประเมินได้อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นดังกล่าว



รูปที่ 31 การกระจายตัวของโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยจำนวนโหมดที่แตกต่างกัน

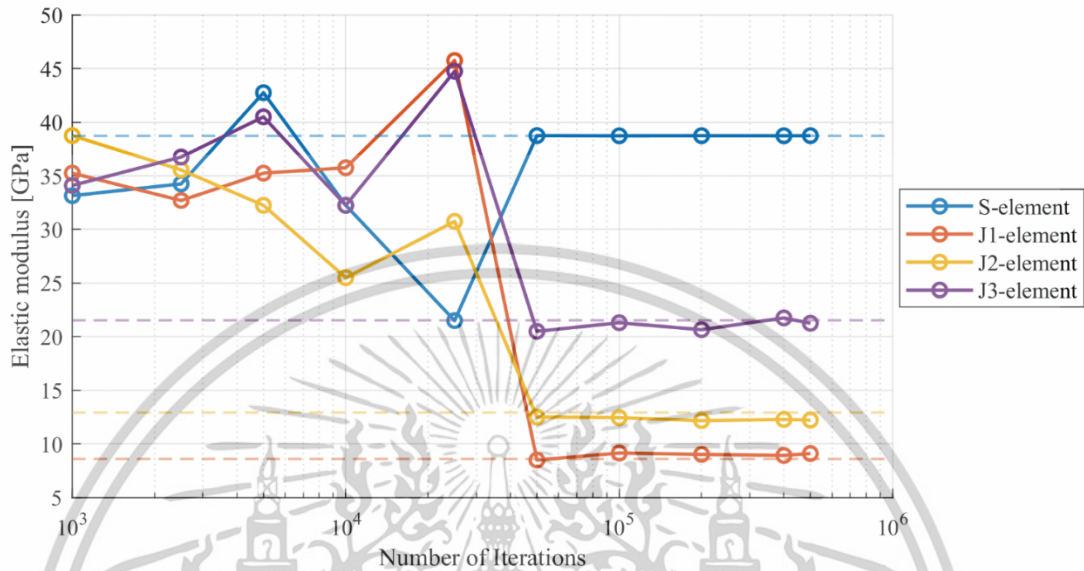
สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โหมด 5 โหมดในวิธีการที่นำเสนออาจเพียงพอสำหรับการประมาณ โมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม การใช้จำนวนโหมดที่มากกว่า 5 โหมดสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้นเล็กน้อย แต่ต้องแลกกับการใช้ทรัพยากรการคำนวณที่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้โหมดที่ไม่เพียงพออาจทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อน เนื่องจากจำนวนโหมดที่น้อยอาจเพิ่มโอกาสที่ความถี่ธรรมชาติเดียวกันจะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความถี่ธรรมชาติที่เป็นไปได้ในทุกกรณีที่ใช้จำนวนโหมดต่างกันแต่ไม่มีความแตกต่างของผลลัพธ์ ในทางตรงกันข้าม การใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นสามารถลดโอกาสดังกล่าวลงได้

#### 4.2.2 ผลกระทบของจำนวนการวนซ้ำ

วิธีการที่เสนอได้ถูกดำเนินการโดยใช้จำนวนการวนซ้ำที่แตกต่างกันซึ่งพารามิเตอร์อื่นที่ไม่เกี่ยวข้องได้ถูกกำหนดให้เป็นค่าเดียวกับที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 4 ผลลัพธ์ได้ถูกแสดงในรูปแบบของการสุ่มเข้าหาผลลัพธ์ดังแสดงใน รูปที่ 32 โดยเส้นประแต่ละสีแสดงถึงโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของชิ้นส่วนต่างๆ จากผลลัพธ์สังเกตได้ว่าผลลัพธ์เริ่มมีการสุ่มเข้าที่การวนซ้ำ 50,000 ครั้ง ในทุกชิ้นส่วน การใช้จำนวนการวนซ้ำที่ต่ำกว่า 50,000 ครั้ง แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของผลลัพธ์ซึ่งหากนำผลลัพธ์ที่ได้มาพิจารณาจะเกิดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่มากอย่างมีนัยสำคัญ และการดำเนินการตามขั้นตอนที่เสนอโดยใช้จำนวนการวนซ้ำที่ต่ำกว่า 50,000 ครั้ง ในแต่ละครั้งยังให้ผลลัพธ์ที่ไม่เท่ากันอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือกใช้การวนซ้ำที่มากกว่า 50,000 ครั้ง เช่น 50,000 100,000 หรือ 20,000 ครั้ง กลับไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของทุกชิ้นส่วน

การใช้อัลกอริทึม RWMH ตามวิธีการที่เสนอการแจกแจงภายหลังได้ถูกสร้างขึ้นจากการอัปเดตการแจกแจงก่อนหน้าตามจำนวนการวนซ้ำ เน้นย้ำว่าการมีจำนวนการวนซ้ำที่ไม่เพียงพออาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ไม่คงที่ได้ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์นี้ได้พิสูจน์ว่าผลลัพธ์ที่แสดงในหัวข้อที่ 4 อยู่ในช่วงที่ข้อมูลมีการลู่เข้าแล้ว ซึ่งอาจพิจารณาการใช้จำนวนการวนซ้ำที่น้อยกว่า 300,000 ครั้งได้จากผลลัพธ์นี้ วิธีการนี้อาจใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบการลู่เข้าของผลลัพธ์สำหรับวิธีการที่เสนอได้ ในกรณีที่น่าไปปรับใช้กับแบบจำลองอื่น

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแนวทางของระบบการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสำหรับสะพานคอนกรีตคานรูปกล่องโดยใช้กระบวนการ Finite element model ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบสุ่มตามวิธีการที่เสนอ วิธีการที่เสนอถูกพัฒนาขึ้นดำเนินการตามอนุमानแบบเบย์โดยทำงานร่วมกับแบบจำลองตัวแทนที่สร้างขึ้นจากการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียนด้วยข้อมูลที่สุ่มตัวอย่างด้วยลาตินไฮเปอร์คิวบ์ วิธีการที่เสนอนี้ช่วยเข้ามาแก้ปัญหาข้อจำกัดการตรวจสอบสภาพสะพานแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบสะพานลงตามแนวทางของ SHM เดิมลงได้ โดยการเพิ่มความสามารถในการระบุตำแหน่งของความเสียหายจากการตรวจจับการลดลงของโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชิ้นส่วน ประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถนำข้อมูลคุณสมบัติทางพลศาสตร์อย่างความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างซึ่งได้จากวิธีการ SHM มาใช้ในการระบุโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนประกอบต่างๆของสะพานได้
2. การทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนประกอบสามารถนำมาระบุตำแหน่งของความเสียหายได้ ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบ
3. สามารถนำข้อมูลโมดูลัสยืดหยุ่นมาใช้จัดลำดับความสำคัญของจุดที่ต้องการซ่อมแซมได้
4. สามารถนำข้อมูลมาใช้กำหนดให้แก่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อดำเนินการตรวจสอบแบบ Digital twin ได้

ในอนาคตแนวทางนี้อาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแนวทางการตรวจสอบโครงสร้างและระบบเฝ้าติดตามพฤติกรรมสะพานในปัจจุบัน ซึ่งช่วยให้สามารถระบุความรุนแรงและตำแหน่งของความเสียหายได้ โดยเพิ่มภาระงานไม่มาก เนื่องจากสะพานหลายแห่งทั้งในและต่างประเทศได้มีการนำแนวทางของ SHM มาใช้อยู่แล้ว [45, 46] ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อเพื่อหาข้อมูลความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างได้ด้วยวิธีการต่างๆ วิธีการที่เสนอนี้จะเป็นเพียงขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นมาโดยอาศัยข้อมูลที่มีอยู่ แล้วนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลอีกประเภทหนึ่งที่สามารถตีความได้ง่ายกว่าอย่างคุณสมบัติของวัสดุ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความซับซ้อนน้อยเพื่อลดทรัพยากรในการคำนวณซึ่งอาจทำให้แบบจำลองไม่สะท้อนกับสะพานจริงมากเท่าที่ควร ควรมีการดำเนินการตามวิธีการที่เสนออีกครั้งกับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น
2. อาจมีการลองนำอัลกอริทึมแขนงอื่นมาใช้ประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการที่เสนอ เช่น deep learning หรือ neural network เพื่อความแม่นยำที่มากขึ้นและระยะเวลาที่ลดลง
3. ควรพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยอื่นเข้ามาร่วมวิเคราะห์ด้วย เช่น อุณหภูมิ และความชื้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสภาพของสะพาน รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติ
4. ควรทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอกับสะพานประเภทอื่นเพื่อตรวจสอบว่าให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกันหรือไม่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F. H. Administration., *Bridge Inspector's Reference Manual*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA), 2012
- [2] A. A. o. S. H. a. T. Officials., *The Manual for Bridge Evaluation*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022.
- [3] T. R. Witcher, "From Disaster to Prevention: The Silver Bridge," *Civil Engineering Magazine*, vol. 87, no. 11, pp. 44-47, 2017, doi: doi:10.1061/ciepag.0001250.
- [4] M. Morgese, F. Ansari, M. Domaneschi, and G. P. Cimellaro, "Post-collapse analysis of Morandi's Polcevera viaduct in Genoa Italy," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 10, pp. 69-85, 2020.
- [5] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, pp. 303 - 315, 2007.
- [6] P. C. Chang, A. Flatau, and S. C. Liu, "Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure," *Structural Health Monitoring*, vol. 2, no. 3, pp. 257-267, 2003, doi: 10.1177/1475921703036169.
- [7] J. M. W. Brownjohn, "Structural health monitoring of civil infrastructure," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 589-622, 2007, doi: doi:10.1098/rsta.2006.1925.
- [8] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," 1996.
- [9] W. Chen *et al.*, "Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower," *Engineering Structures*, vol. 33, no. 12, pp. 3628-3646, 2011.
- [10] R. Brincker and C. Ventura, *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons, 2015.
- [11] F. B. Zahid, Z. C. Ong, and S. Y. Khoo, "A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 8, p. 398, 2020.

- [12] R. Brincker, C. E. Ventura, and P. Andersen, "Damping estimation by frequency domain decomposition," in *Proceedings of IMAC 19: A Conference on Structural Dynamics: februar 5-8, 2001, Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, 2001*, 2001: Society for Experimental Mechanics, pp. 698-703.
- [13] J. Fan, Z. Zhang, and H. Hua, "Data processing in subspace identification and modal parameter identification of an arch bridge," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 4, pp. 1674-1689, 2007.
- [14] S. Russotto, A. Di Matteo, and A. Pirrotta, "An innovative structural dynamic identification procedure combining time domain OMA technique and GA," *Buildings*, vol. 12, no. 7, p. 963, 2022.
- [15] A. Pirrotta and S. Russotto, "A new OMA method to perform structural dynamic identification: numerical and experimental investigation," *Acta Mechanica*, vol. 234, no. 9, pp. 3737-3749, 2023.
- [16] O. Huth, G. Feltrin, J. Maeck, N. Kilic, and M. Motavalli, "Damage identification using modal data: Experiences on a prestressed concrete bridge," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 12, pp. 1898-1910, 2005.
- [17] R. R. Craig Jr and A. J. Kurdila, *Fundamentals of structural dynamics*. John Wiley & Sons, 2006.
- [18] D. Adams, *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [19] M. I. Friswell and J. Mottershead, *Finite element model updating in structural dynamics*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [20] D. Raviolo, M. Civera, and L. Zanotti Fragonara, "A Bayesian sampling optimisation strategy for finite element model updating," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, pp. 1-23, 2024.
- [21] E. Eells, "Review: Bayes's Theorem," *Mind*, vol. 113, no. 451, pp. 591-596, 2004, doi: 10.1093/mind/113.451.591.
- [22] O. D. Hurtado, A. R. Ortiz, D. Gomez, and R. Astroza, "Bayesian model-updating implementation in a five-story building," *Buildings*, vol. 13, no. 6, p. 1568, 2023.
- [23] J. Zeng, M. D. Todd, and Z. Hu, "Probabilistic damage detection using a new likelihood-free Bayesian inference method," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 13, no. 2, pp. 319-341, 2023.

- [24] Y. Liu, L. Li, and Z. Chang, "Efficient Bayesian model updating for dynamic systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 236, p. 109294, 2023.
- [25] H. Mishima, E. Sasaki, N. Sinsamutpadung, and P. Tuttipongsawat, "Structural Parameter Evaluation Using Numerical Model Analysis for Bridge Monitoring," in *Taiwan-Japan Joint Symposium on the Advancement of Urban Earthquake Hazard Mitigation Technology*, 2018.
- [26] E. Sasaki, P. Tuttipongsawat, N. Sinsamutpadung, H. Nishida, and K. Takase, "Condition Evaluation of a Highway Bridge with RC Deck Using Monitoring Data Obtained by Wireless sensors," in *1st International Conference on Concrete and Steel Technology, Engineering & Design (CASTED2018)*, 2018.
- [27] E. Sasaki, P. Tuttipongsawat, N. Sinsamutpadung, H. Nishida, and K. Takase, "Development of a remote monitoring system with wireless power-saving sensors for analyzing bridge conditions," in *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*: CRC Press, 2018, pp. 1207-1214.
- [28] H. Jiang, Y. Li, A. Liu, Z. J. Ma, L. Chen, and Y. Chen, "Shear behavior of precast concrete segmental beams with external tendons," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 23, no. 8, p. 04018049, 2018.
- [29] A. Yuan, H. Dai, D. Sun, and J. Cai, "Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending," *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 623-634, 2013.
- [30] G. Ramos and A. C. Aparicio, "Ultimate analysis of monolithic and segmental externally prestressed concrete bridges," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 10-17, 1996.
- [31] C. Andrieu and É. Moulines, "On the ergodicity properties of some adaptive MCMC algorithms," 2006.
- [32] T. Takebayashi, K. Deerasertwong, and Y. Leung, "A FULL-SCALE DESTRUCTIVE TEST OF A PRECAST SEGMENTAL BOX GIRDER BRIDGE WITH DRY JOINTS AND EXTERNAL TENDONS," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, vol. 104, no. 3, pp. 297-315, 1994.
- [33] T. Y. Yuen *et al.*, "DFEM of a post-tensioned precast concrete segmental bridge with unbonded external tendons subjected to prestress changes," in *Structures*, 2020, vol. 28: Elsevier, pp. 1322-1337.

- [34] A. Inc., *Abaqus User Subroutines Reference Guide*. ABAQUS Inc., 2014.
- [35] R. Halder *et al.*, "Tendon stress evaluation of unbonded post-tensioned concrete segmental bridges with two-variable response surfaces," *Engineering Structures*, vol. 245, p. 112984, 2021.
- [36] L. Chu, E. S. De Cursi, A. El Hami, and M. Eid, "Application of Latin hypercube sampling based kriging surrogate models in reliability assessment," *Sci. J. Appl. Math. Stat*, vol. 3, no. 6, pp. 263-274, 2015.
- [37] M. D. Shields, K. Teferra, A. Hapij, and R. P. Daddazio, "Refined stratified sampling for efficient Monte Carlo based uncertainty quantification," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 142, pp. 310-325, 2015.
- [38] C. E. Rasmussen, "Gaussian processes in machine learning," in *Summer school on machine learning*: Springer, 2003, pp. 63-71.
- [39] J. Wang, "An intuitive tutorial to Gaussian processes regression," *Computing in Science & Engineering*, 2023.
- [40] Q. Xia, Y. Xia, H. P. Wan, J. Zhang, and W. X. Ren, "Condition analysis of expansion joints of a long-span suspension bridge through metamodel-based model updating considering thermal effect," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 27, no. 5, p. e2521, 2020.
- [41] W. Fu, Y. Chen, Y. Luo, H.-P. Wan, Z. Ma, and Y. Shen, "Deformation prediction model of large-span prestressed structure for health monitoring based on robust Gaussian process regression," *Engineering Structures*, vol. 318, p. 118597, 2024.
- [42] D. J. MacKay, "Introduction to Gaussian processes," *NATO ASI series F computer and systems sciences*, vol. 168, pp. 133-166, 1998.
- [43] A. A. o. S. H. a. T. Officials., *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, D.C.: AASHTO, 2010.
- [44] Q. Li, X. Du, P. Ni, Q. Han, K. Xu, and Z. Yuan, "Efficient Bayesian inference for finite element model updating with surrogate modeling techniques," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, pp. 1-19, 2024.
- [45] I. Talebinejad, C. Fischer, and F. Ansari, "Numerical Evaluation of Vibration-Based Methods for Damage Assessment of Cable-Stayed Bridges," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 26, 2011.

- [46] J. R. Billing, "Dynamic loading and testing of bridges in Ontario," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 11, pp. 833-843, 1984.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ดำเนินการตามขั้นตอนของวิธีการที่เสนอตามการอนุมานแบบเบย์

```
input = '1500.xlsx';
```

```
trainingdata = importdata(input);
```

```
E_true = [38700      43000 34400 43000];
```

```
w_true = [2.4647 4.0143 4.3634 4.4229 4.7708]; % Don't forget to notice the square values!!
```

```
number_of_modes = length(w_true);
```

```
number_of_elements = length(E_true);
```

```
%% Start Timing %%
```

```
tic;
```

```
%% Load or Train Gaussian Process Regression Models %%
```

```
% gp_models = load(sprintf('gp_models_%dmodes.mat',  
number_of_modes)).gp_models;
```

```
% gp_models = load(sprintf('gp_models_%dmodes_square.mat',  
number_of_modes)).gp_models;
```

```
disp('Training GPR models...')
```

```
gp_models = cell(1, number_of_modes);
```

```
for i = 1:number_of_modes
```

```
    gp_models{i} = fitrgp(trainingdata(:,1:number_of_elements),  
trainingdata(:,i+number_of_elements), ...
```

```
    'KernelFunction', 'rationalquadratic');
```

```
    disp(['Finished training model ', num2str(i)]);
```

```
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%% Bayesian Inference with Random Walk with Adaptive Scaling %%

arraynum = 300000;

variance = 0.0001;

cov_matrix = eye(number_of_modes) * variance;

keepE = zeros(number_of_elements, arraynum);

keepW = zeros(number_of_modes, arraynum);

E_initial = normrnd(35000, 2000, 1, number_of_elements);

pdf_in = 0;

% Adaptive Scaling Parameters
target_acceptance_rate = 0.234;

scaling_factor = 1;

adaptation_interval = 500;

accepted = 0;

proposals = 0;

n = 1;

while n <= arraynum

    E_candidate = max(min(E_initial + normrnd(0, 100 * scaling_factor, 1,
number_of_elements), 50000), 0);

    if any(E_candidate == 0 | E_candidate == 50000), continue; end

    w_gpr = cellfun(@(model) predict(model, E_candidate), gp_models);

    pdf = mvnpdf(w_gpr, w_true, cov_matrix);

    alpha = min(1, pdf / pdf_in);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

proposals = proposals + 1;

if rand < alpha

    keepE(:, n) = E_candidate;

    keepW(:, n) = w_gpr;

    E_initial = E_candidate;

    pdf_in = pdf;

    accepted = accepted + 1;

    n = n + 1;
end

% Adaptive scaling adjustment
if mod(proposals, adaptation_interval) == 0
    current_acceptance_rate = accepted / adaptation_interval;
    scaling_factor = scaling_factor * (1 + 0.01 * sign(current_acceptance_rate -
target_acceptance_rate));
    accepted = 0;
end

% Display progress

if mod(n, 1000) == 0

    clc;

    disp('Starting Bayesian inference with Random Walk...')

    fprintf('Progress: %d / %d (%.2f%%)\n', n, arraynum, (n / arraynum) * 100);

    disp(['Acceptance rate : ', num2str(current_acceptance_rate)]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end

end

% Extract Post-Burn-in Data

burninamount = round(arraynum * 0.6);

dataE = keepE(:, burninamount+1:end);

dataW = keepW(:, burninamount+1:end);

%% Histograms %%

figure_titles_E = {'S', 'J1', 'J2', 'J3'};

figure_titles_W = {'W1', 'W2', 'W3', 'W4', 'W5', 'W6'};

for i = 1:number_of_elements

    figure;

    h = histogram(dataE(i, :), 'Normalization', 'pdf');

    title(figure_titles_E{i}); hold on;

    ylabel('PDF'); xlabel('Modulus of Elasticity [GPa]');

    % Trend Line

    [f, xi] = ksdensity(dataE(i, :));

    plot(xi, f, 'LineWidth', 1.2);

    % Adding vertical red dashed line at True Value

    xline(E_true(i), 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Peak Value');

    legend('show'); % Display legend

    hold off;

    % Peak Value

```

```

[~, idx] = max(h.Values);

peak_E = mean(h.BinEdges(idx:idx+1));

fprintf('Peak %s: %.2f, Error: %.2f%%\n', figure_titles_E{i}, peak_E, abs((peak_E -
E_true(i)) / E_true(i) * 100));

% Save File

%savefig(sprintf('%s.fig', figure_titles_E{i}));

end

for i = 1:number_of_modes

figure;

h = histogram(dataW(i, :), 'Normalization', 'pdf');

title(figure_titles_W{i}); hold on;

% Trend Line

[f, xi] = ksdensity(dataW(i, :));

plot(xi, f, 'LineWidth', 1.2);

% Peak Value

[~, idx] = max(h.Values);

peak_W = mean(h.BinEdges(idx:idx+1));

fprintf('Peak %s: %.4f, Error: %.4f%%\n', figure_titles_W{i}, peak_W, abs((peak_W -
w_true(i)) / w_true(i) * 100));

% Save File

%savefig(sprintf('%s.fig', figure_titles_W{i}));

end

%% Mean and Standard Deviation %%

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mean_E = mean(dataE, 2);

sd_E = std(dataE, 0, 2);

mean_W = mean(dataW, 2);

sd_W = std(dataW, 0, 2);

for i = 1:number_of_elements

    fprintf('Mean %s: %.2f, SD: %.2f\n', figure_titles_E{i}, mean_E(i), sd_E(i));

end

for i = 1:number_of_modes

    fprintf('Mean %s: %.4f, SD: %.4f\n', figure_titles_W{i}, mean_W(i), sd_W(i));

end

%% Trace Plot %%

figure;

for i = 1:number_of_elements

    subplot(number_of_elements, 1, i);

    plot(1:arraynum, keepE(i, :) / 1000, 'b');

    ylabel('Elastic Modulus [GPa]');

    title(figure_titles_E{i});

    xlabel('Sample Number (n)');

    grid on;

end

% Save File

%savefig('TracePlot.fig');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%% End Timing %%

disp('Process completed.');

toc;



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

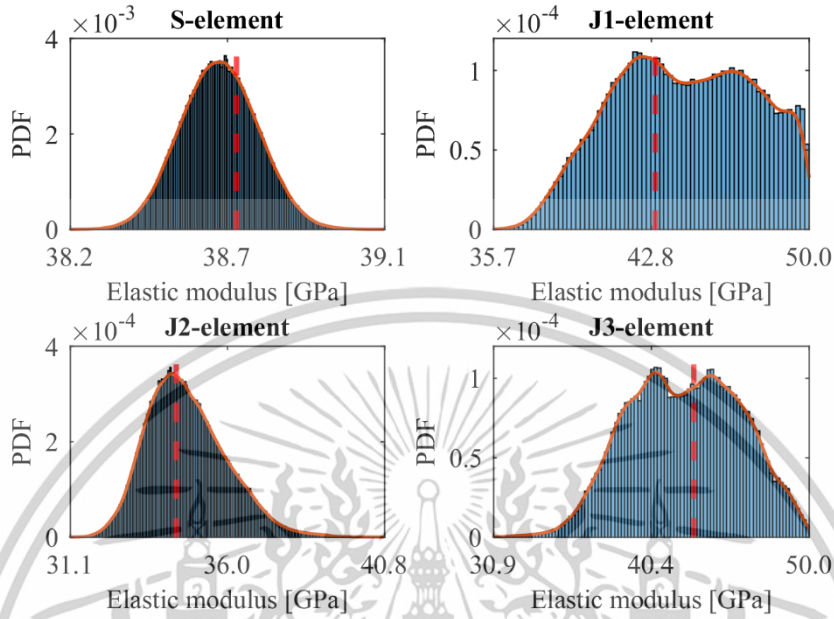


## ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

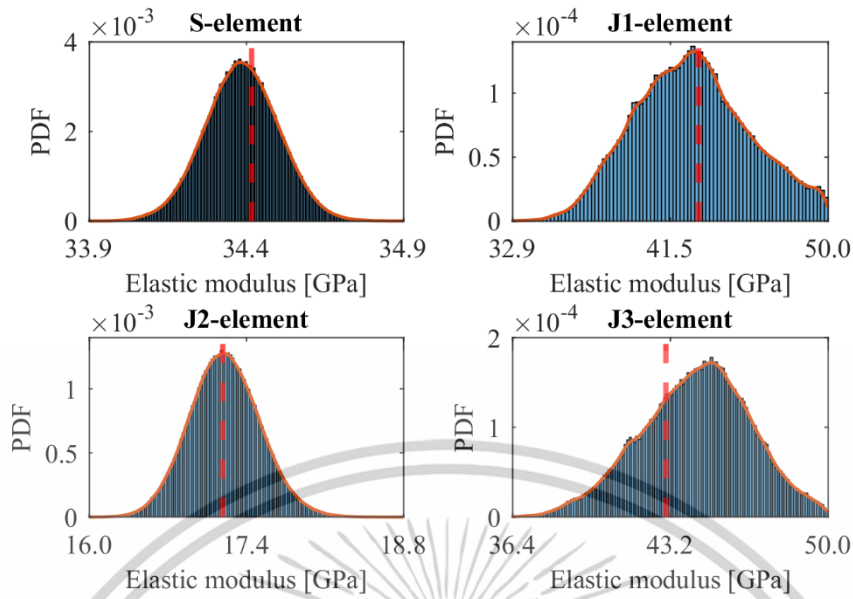
ผลการวิเคราะห์ของทั้ง 10 กรณี



รูปที่ ข. 1 ผลลัพธ์ของกรณี A1

ตาราง ข. 1 ผลการวิเคราะห์ของกรณี A1

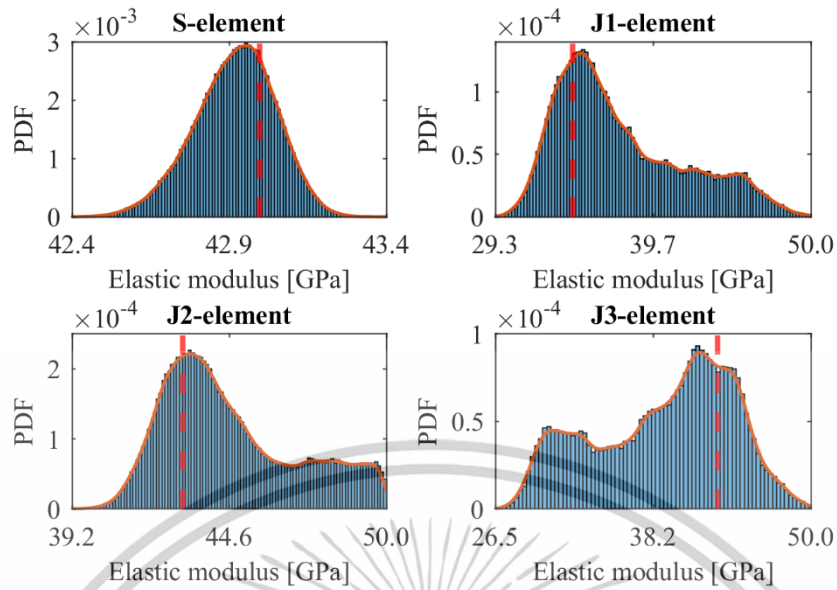
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	38.70	43.00	34.40	43.00	2.4647	4.0143	4.3634	4.4229	4.7708
เป็นไปได้	38.67	42.10	34.23	40.70	2.4656	4.0144	4.3635	4.4229	4.7705
SD	0.11	3.13	1.22	3.36	0.0024	0.0024	0.0031	0.0022	0.0032
%ความผิดพลาด	0.08	2.09	0.51	5.35	0.0345	0.0012	0.0023	0.0011	0.0063



รูปที่ ข. 2 ผลลัพธ์ของกรณี A2

ตาราง ข. 2 ผลการวิเคราะห์ของกรณี A2

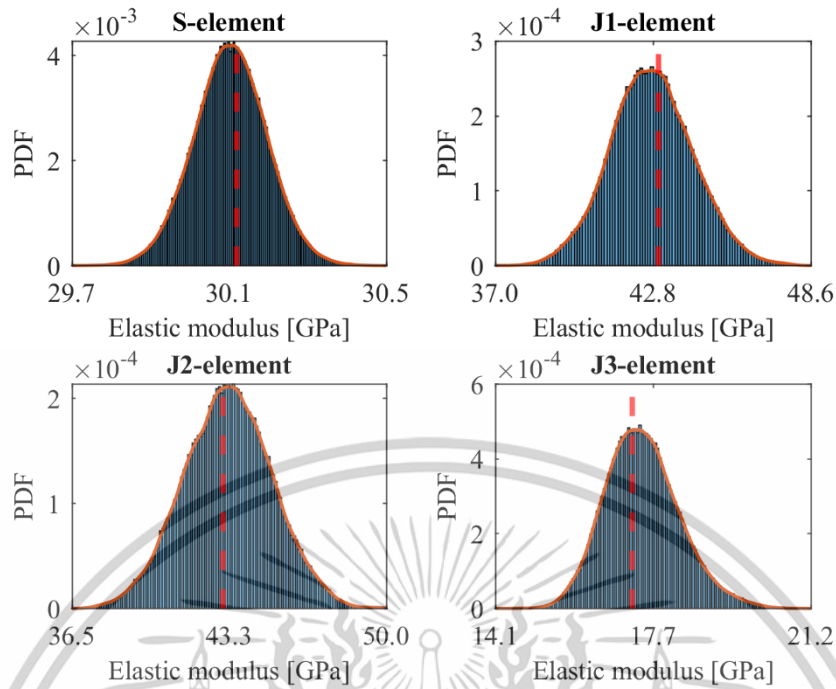
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	34.40	43.00	17.20	43.00	2.2422	3.7082	4.1052	4.1191	4.4683
เป็นไปได้	34.36	42.70	17.19	44.95	2.2427	3.7081	4.1045	4.1191	4.4681
SD	0.11	3.10	0.31	2.36	0.0030	0.0020	0.0030	0.0024	0.0033
%ความผิดพลาด	0.11	0.70	0.06	4.53	0.0223	0.0040	0.0171	0.0012	0.0045



รูปที่ ข. 3 ผลลัพธ์ของกรณี B1

ตาราง ข. 3 ผลการวิเคราะห์ของกรณี B1

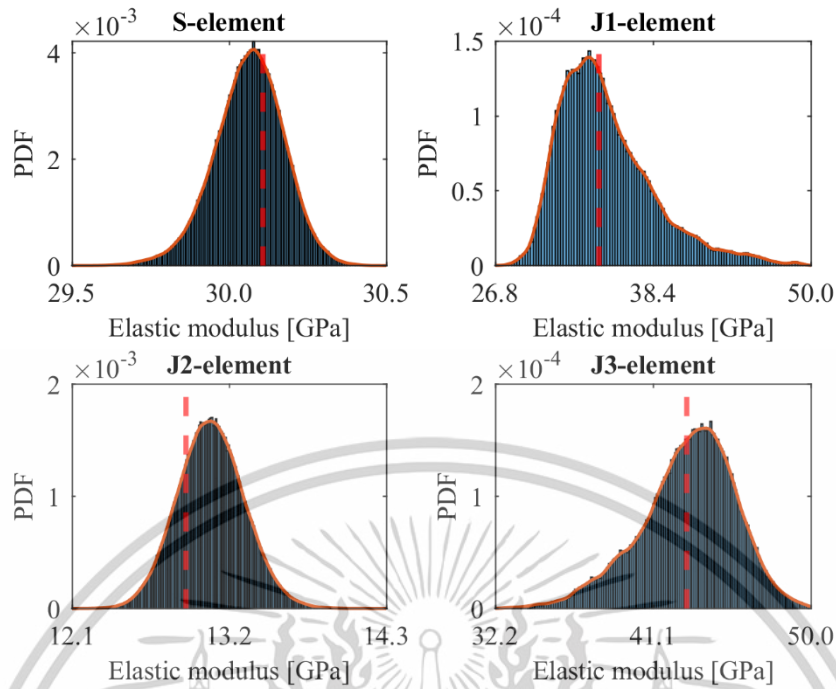
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	43.00	34.40	43.00	43.00	2.5796	4.2072	4.5404	4.6355	5.0110
เป็นไปได้	42.96	35.10	43.25	41.55	2.5804	4.2079	4.5401	4.6331	5.0117
SD	0.14	4.19	2.31	5.11	0.0024	0.0025	0.0032	0.0029	0.0033
%ความผิดพลาด	0.10	2.03	0.58	3.37	0.0291	0.0154	0.0066	0.0518	0.0140



รูปที่ ข. 4 ผลลัพธ์ของกรณี B2

ตาราง ข. 4 ผลการวิเคราะห์ของกรณี B2

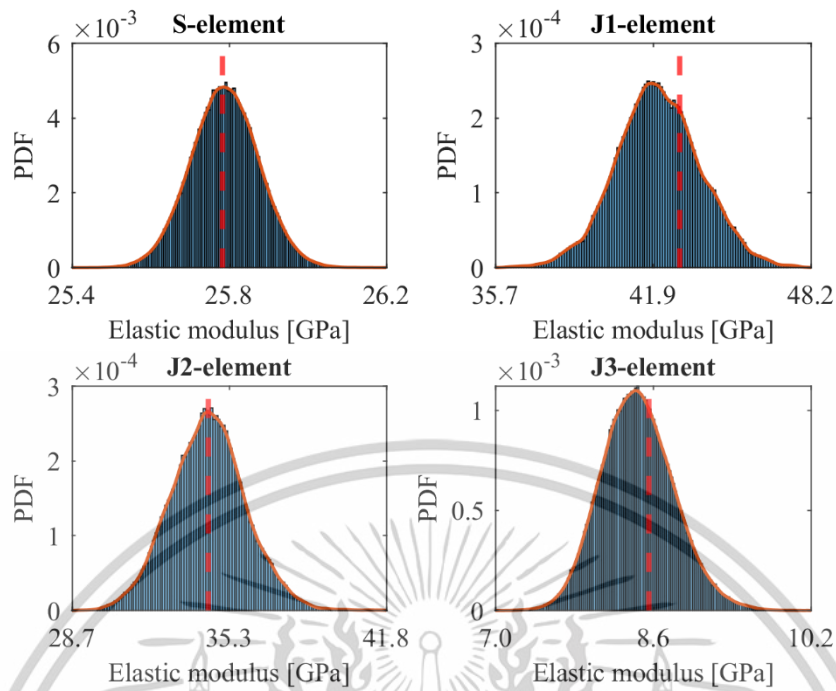
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	30.10	43.00	43.00	17.20	2.1815	3.5598	3.8506	3.9365	4.2304
เป็นไปได้	30.10	42.75	43.45	17.38	2.1823	3.5593	3.8501	3.9365	4.2311
SD	0.09	1.52	1.89	0.84	0.0027	0.0028	0.0030	0.0030	0.0033
%ความผิดพลาด	0.02	0.58	1.05	1.02	0.0367	0.0140	0.0130	0.0000	0.0165



รูปที่ ข. 5 ผลลัพธ์ของกรณี C1

ตาราง ข. 5 ผลการวิเคราะห์ของกรณี C1

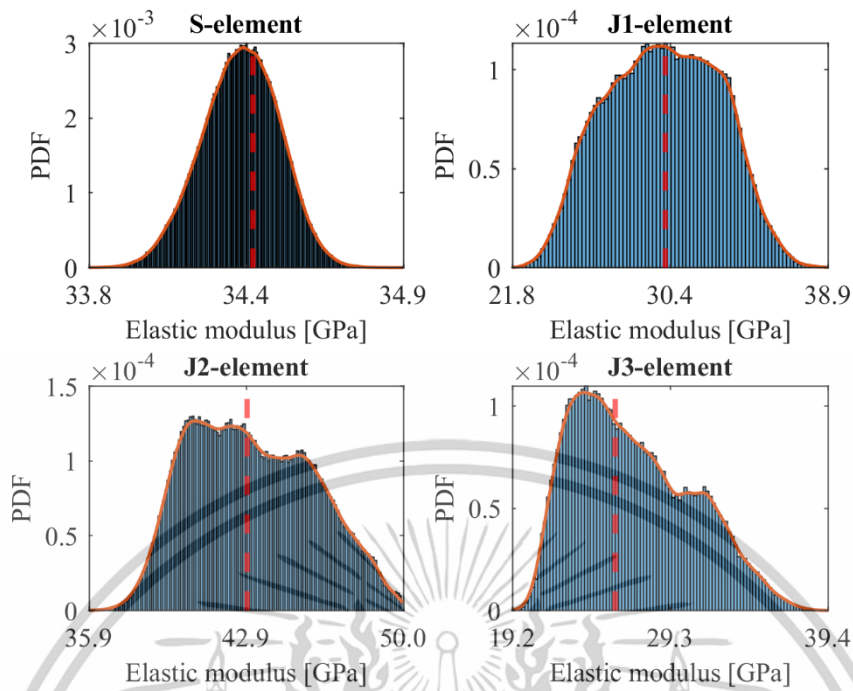
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	30.10	34.40	12.90	43.00	2.0677	3.4510	3.8313	3.8447	4.1702
เป็นไปได้	30.07	33.70	13.08	44.30	2.0681	3.4505	3.8317	3.8443	4.1703
SD	0.10	3.58	0.24	2.70	0.0030	0.0030	0.0032	0.0031	0.0032
%ความผิดพลาด	0.09	2.03	1.36	3.02	0.0193	0.0130	0.0104	0.0104	0.0024



รูปที่ ข. 6 ผลลัพธ์ของกรณี C2

ตาราง ข. 6 ผลการวิเคราะห์ของกรณี C2

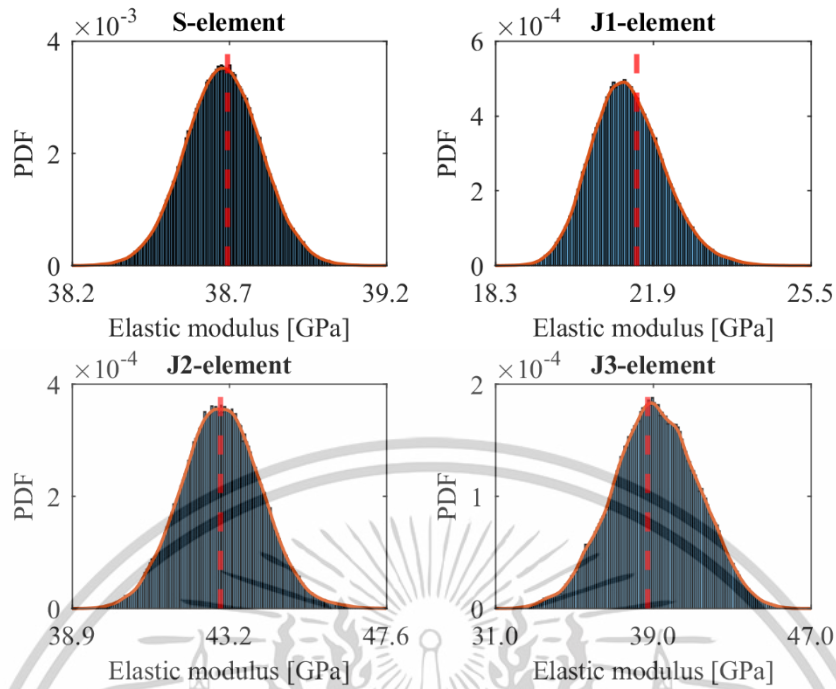
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	25.80	43.00	34.40	8.60	1.9523	3.2283	3.5334	3.6072	3.8911
เป็นไปได้	25.81	41.75	34.55	84.90	1.9525	3.2287	3.5331	3.6075	3.8913
SD	0.08	1.68	1.57	0.37	0.0031	0.0031	0.0023	0.0028	0.0032
%ความผิดพลาด	0.03	2.91	0.44	1.28	0.0102	0.0124	0.0099	0.0083	0.0051



รูปที่ ข. 7 ผลลัพธ์ของกรณี D1

ตาราง ข. 7 ผลการวิเคราะห์ของกรณี D1

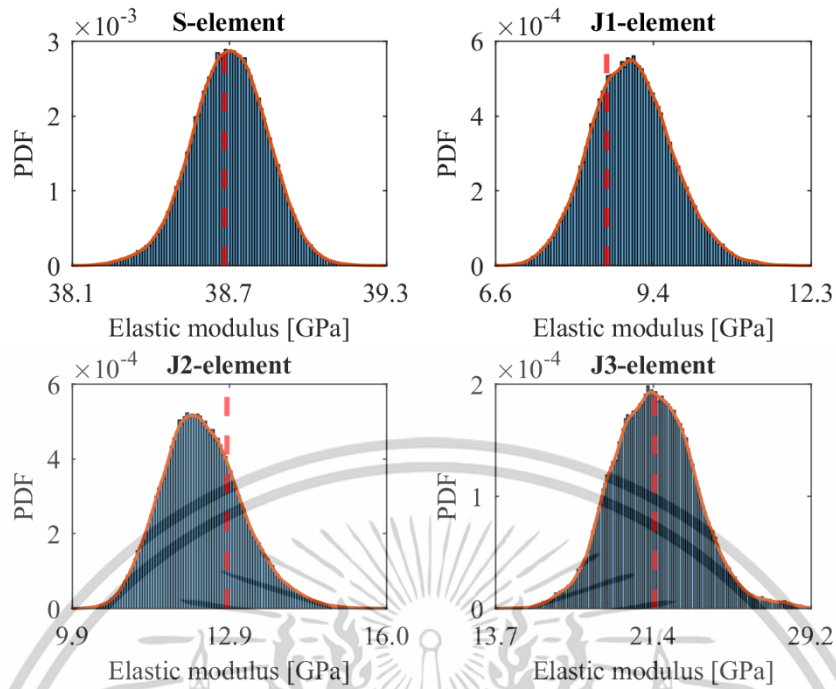
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	34.40	30.10	43.00	25.80	2.3162	3.7820	4.0552	4.1576	4.4940
เป็นไปได้	34.38	30.50	40.50	24.70	2.3162	3.7820	4.0551	4.1585	4.4935
SD	0.13	2.98	2.74	3.79	0.0020	0.0025	0.0031	0.0024	0.0032
%ความผิดพลาด	0.07	1.33	5.81	4.26	0.0022	0.0013	0.0025	0.0228	0.0111



รูปที่ ข. 8 ผลลัพธ์ของกรณี D2

ตาราง ข. 8 ผลการวิเคราะห์ของกรณี D2

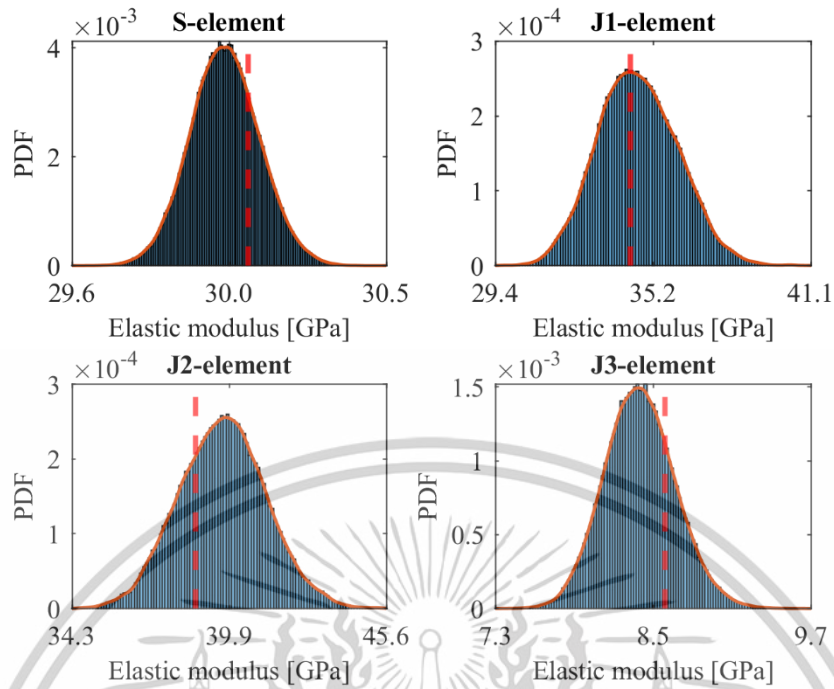
	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	38.70	21.50	43.00	38.70	2.4204	3.9728	4.2625	4.3877	4.7397
เป็นไปได้	38.71	21.23	43.03	38.95	2.4215	3.9726	4.2623	4.3875	4.7401
SD	0.11	0.84	1.11	2.20	0.0026	0.0026	0.0032	0.0031	0.0033
%ความผิดพลาด	0.02	1.28	0.06	0.65	0.0434	0.0038	0.0047	0.0046	0.0084



รูปที่ ข. 9 ผลลัพธ์ของกรณี E1

ตาราง ข. 9 ผลการวิเคราะห์ของกรณี E1

	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	38.70	8.60	12.90	21.50	2.0512	2.6401	3.9981	4.1066	4.5204
เป็นไปได้	38.71	9.08	12.23	21.15	2.0509	3.6403	3.9983	4.1067	4.5203
SD	0.14	0.72	0.78	2.09	0.0032	0.0020	0.0033	0.0033	0.0030
%ความผิดพลาด	0.01	5.52	5.23	1.63	0.0146	0.0069	0.0050	0.0024	0.0022



รูปที่ ข. 10 ผลลัพธ์ของกรณี E2

ตาราง ข. 10 ผลการวิเคราะห์ของกรณี E2

	โมดูลัสยืดหยุ่น [GPa]				ความถี่ธรรมชาติ [Hz]				
	S	J1	J2	J3	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3	โหมดที่ 4	โหมดที่ 5
เกิดขึ้นจริง	30.10	34.40	38.70	8.60	2.0631	3.4475	3.7481	3.8280	4.1607
เป็นไปได้	30.02	34.65	39.65	8.45	2.0633	3.4473	3.7473	3.8289	4.1613
SD	0.10	1.48	1.58	0.27	0.0031	0.0028	0.0028	0.0027	0.0033
%ความผิดพลาด	0.27	0.73	2.45	1.74	0.0097	0.0058	0.0213	0.0235	0.0144

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล นาย กุลนันท์ จันทรทิ้ม  
วัน เดือน ปีเกิด เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม พุทธศักราช 2544  
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 45/343 ถนนลำลูกกาคลอง 1 ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัด  
ปทุมธานี 12130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2562 - 2566

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566 - ปัจจุบัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

