Received: Feb 5, 2026 **Revised:** Jul 14, 2026 **Accepted:** Jul 8, 2026

การตรวจติดตามสุขภาพโครงสร้างของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์โดยใช้การผสานข้อมูลจากหลายเซนเซอร์

REAL-TIME STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF TELECOMMUNICATION TOWERS VIA MULTI-SENSOR DATA FUSION

กฤษฎา ศรียารันต์[1] ธนภัทร สังขรัตน์[2] สนธินันท์ อินทสนธิ[3*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

[2]ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตและหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Krissada Sriyaran[1], Thanapat Sangkharat[2], Sontinan Intasonti[3*]

[1]Department of Industrial Engineering and Logistics, Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

[2]Department of Production and Robotics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[3]Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

*Corresponding Author, E-mail: sontinan.i@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

เสาโทรคมนาคมมีความเสี่ยงต่อการเอียง และการสั่นสะเทือนจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะแรงลม และการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม วิธีการตรวจสอบสภาพเสาแบบเดิมยังขาดความต่อเนื่อง ไม่สามารถติดตามพฤติกรรมของเสาได้แบบเรียลไทม์ (Real-time) และอาจไม่เพียงพอต่อการป้องกันความเสียหายรุนแรงที่อาจเกิดขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตรวจติดตามพฤติกรรมของเสาโทรคมนาคม (Tower Monitoring System: TMS) แบบเรียลไทม์ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) และแนวคิดการตรวจติดตามสุขภาพโครงสร้าง (Structural Health Monitoring: SHM) ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความเอียงสำหรับวัดมุมเอียง เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน และเซนเซอร์วัดความเร็วลม ข้อมูลจากเซนเซอร์ถูกส่งผ่านตัวควบคุมกลาง และจัดเก็บบนฐานข้อมูลคลาวด์ พร้อมแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์ ผลการทดสอบภาคสนามในพื้นที่จริงแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาได้ละเอียดถึง 0.2 องศา และสามารถจำแนกระดับความเสี่ยงของเสาออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ สภาวะปกติ (Normal) สภาวะน่าสงสัย (Suspect) สภาวะเตือนภัย (Warning) และสภาวะอันตราย (Danger) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ สนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบตรวจติดตามพฤติกรรมของเสาโทรคมนาคม, อินคลิโนมิเตอร์, การตรวจติดตามสุขภาพโครงสร้าง, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

Abstract

Telecommunication towers are susceptible to tilting and vibration from environmental factors, particularly wind and structural deterioration. However, traditional tower monitoring methods lack continuity, cannot track tower behavior in real-time, and may be inadequate for preventing serious damage. This research aims to develop a real-time Tower Monitoring System (TMS) for telecommunication towers, applying Internet of Things (IoT) technology and Structural Health Monitoring (SHM) concepts. The system comprises an inclinometer sensor for measuring tilt angle, a vibration sensor for measuring vibration, and a wind speed sensor. Sensor data is transmitted via a central controller and stored in a cloud database, displayed in real-time via a web application. Field tests show the system can detect changes in tower tilt angle with an accuracy of 0.2 degrees and classify tower risk levels into four categories: Normal, Suspect, Warning, and Danger. The developed system operates stably. And it supports preventive maintenance, leading to effective predictive maintenance.

Keywords: Telecommunication Tower Monitoring System, Inclinometer, Structural Health Monitoring, Internet of Things (IoT), Preventive Maintenance

บทนำ

เสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบการสื่อสารของประเทศ ทั้งในด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ เครือข่ายอินเทอร์เน็ต และการสื่อสารในสถานการณ์ฉุกเฉิน โครงสร้างดังกล่าวมักมีลักษณะเป็นโครงสร้างแนวตั้งที่มีความสูงมาก และต้องรับแรงกระทำจากสภาพแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง เช่น แรงลม การสั่นสะเทือนจากสภาพแวดล้อม และการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเอียง การสั่นสะเทือนผิดปกติ หรือความเสียหายเชิงโครงสร้างสะสมในระยะยาว หากไม่สามารถตรวจพบความผิดปกติได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น อาจนำไปสู่ความเสี่ยงด้านความปลอดภัย การหยุดชะงักของระบบสื่อสาร และความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมีนัยสำคัญ ในปัจจุบันการตรวจสอบสภาพโครงสร้างของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคม ส่วนใหญ่ยังคงอาศัยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม คือ การส่งเจ้าหน้าที่ลงพื้นที่ไปตรวจสอบสุขภาพของเสาส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นการตรวจสอบเป็นช่วงเวลาโดยใช้แรงงานมนุษย์ วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดทั้งในด้านความถี่ ความต่อเนื่อง ความแม่นยำ และค่าใช้จ่าย อีกทั้งไม่สามารถติดตามพฤติกรรมของโครงสร้างแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ความผิดปกติบางประการอาจไม่ถูกตรวจพบในช่วงเวลาที่เหมาะสม

งานวิจัยด้านการตรวจติดตามสุขภาพโครงสร้าง (Structural Health Monitoring : SHM) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้ให้ความสำคัญกับการนำเทคโนโลยีเซนเซอร์ ระบบเครือข่าย และการประมวลผลข้อมูลมาประยุกต์ใช้เพื่อเฝ้าระวังสภาพโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ซึ่งช่วยให้สามารถรวบรวม ส่งผ่าน และจัดเก็บข้อมูลจากโครงสร้างในระยะไกลแบบเรียลไทม์ (Forlesi et al., 2024) นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาแนวทางการตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้เซนเซอร์ต้นทุนต่ำ และระบบสื่อสารไร้สาย เพื่อให้สามารถติดตั้ง และขยายระบบตรวจสอบได้ในวงกว้าง (Venkatesh et al., 2024). ควบคู่กันนั้นการนำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence: AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการสั่นสะเทือน และการตอบสนองของโครงสร้างได้ช่วยเพิ่มศักยภาพในการตรวจจับความเสียหาย และความผิดปกติได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การใช้

แบบจำลองเชิงอัจฉริยะสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และให้ผลการจำแนกสภาวะความเสียหายที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบดั้งเดิม (Rehman et al., 2024; Bormon, 2025) โดยมีการพัฒนาโครงสร้างสถาปัตยกรรม IoT–AI แบบครบวงจรตั้งแต่การเก็บข้อมูลการประมวลผลไปจนถึงการแสดงผลและระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ

แม้ว่างานวิจัยด้าน SHM จำนวนมากจะมุ่งเน้นไปที่โครงสร้างประเภทอาคารสูงหรือสะพาน (De Simone et al., 2022; Attar et al., 2024). แต่หลักการตรวจสอบพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง เช่น การเอียง การสั่นสะเทือน และอิทธิพลของแรงลม สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยที่บูรณาการเซนเซอร์วัดความเอียง เซนเซอร์วัดความเร็วลม และเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เข้าไว้ในระบบเดียว พร้อมแพลตฟอร์มแสดงผลแบบเรียลไทม์ สำหรับเสาโทรคมนาคมโดยเฉพาะยังมีจำนวนจำกัดซึ่งสะท้อนถึงช่องว่างขององค์ความรู้ที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบ และพัฒนาระบบตรวจสอบพฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์ โดยใช้เซนเซอร์วัดความเอียง เซนเซอร์วัดความเร็วลม และเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริก ร่วมกับแพลตฟอร์ม IoT สำหรับการรวบรวม จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูลสภาพโครงสร้างแบบเรียลไทม์ รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงลม การเอียง และการสั่นสะเทือนของเสาส่งสัญญาณ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงอัจฉริยะ และสนับสนุนการประเมินสภาพโครงสร้าง และการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ในอนาคต

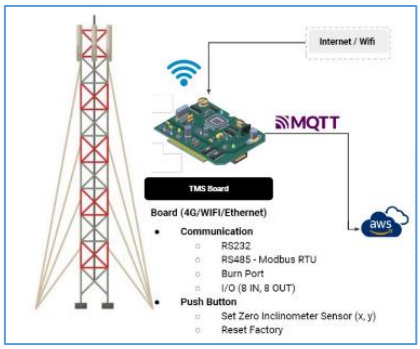
วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

หลักการทำงานภาพรวมของระบบตรวจสอบพฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมที่พัฒนาขึ้นมีการออกแบบภายใต้แนวคิดของ SHM ร่วมกับเทคโนโลยี IoT เพื่อเฝ้าระวังพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของเสาแบบต่อเนื่อง และแบบเรียลไทม์ ระบบทำงานโดยอาศัยการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพที่มีผลต่อความมั่นคงของเสา ได้แก่ การเอียง การสั่นสะเทือน และแรงลม แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผล แสดงผล และประเมินระดับความเสี่ยงของโครงสร้างผ่านแพลตฟอร์มกลาง หลักการรับ-ส่งสัญญาณของระบบ ในส่วนของการรับสัญญาณ ระบบใช้เซนเซอร์ตรวจวัดทางกายภาพที่ติดตั้งบนเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมในตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของเสา เซนเซอร์แต่ละชนิดทำหน้าที่แปลงปริมาณทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยมีองค์ประกอบในเรื่องของเซนเซอร์วัดความเอียงแปลงการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงเป็นสัญญาณดิจิทัล เซนเซอร์วัดความเร็วลมแปลงแรงลมเป็นค่าความเร็วลม เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริก แปลงการสั่นสะเทือนเชิงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณจากเซนเซอร์ทั้งหมดถูกส่งผ่านระบบสื่อสารแบบ RS485 โดยใช้โปรโตคอล Modbus RTU ซึ่งเป็นรูปแบบการสื่อสารที่เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมภาคสนาม เนื่องจากมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน และสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะไกล ในรูปที่ 1 แสดงระบบการสื่อสาร RS485-Modbus RTU protocol

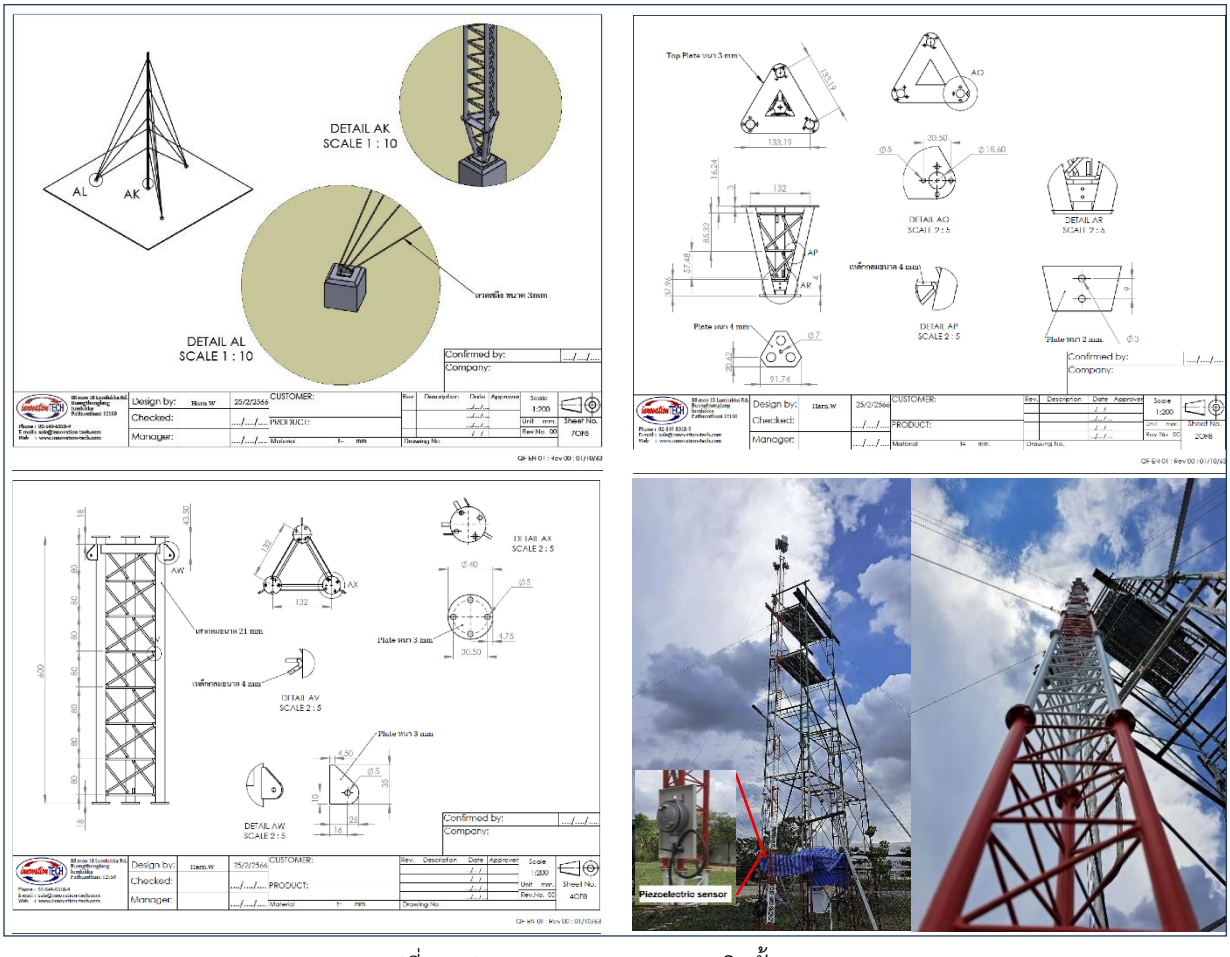
2.1 เสาทดสอบชนิดกายด์ทาวเวอร์ (Guyed tower) ความสูง 11 เมตร

ได้ทำการออกแบบ และสร้างเสาทดสอบชนิดกายด์ทาวเวอร์ (Guyed Tower) จำนวนทั้งสิ้น 18 ช่วง โดยแต่ละช่วงมีความยาว 600 มิลลิเมตร รวมความสูงตลอดเสาเท่ากับ 11 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ ได้มีการกำหนด และก่อสร้างระบบฐานรากของเสา รวมถึงจุดยึดสลิง (Guy Wire Concrete Anchors) ให้มีรูปแบบ และตำแหน่งการติดตั้งสอดคล้องกับการติดตั้งเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมจริง ในภาคสนามของระบบการสื่อสารเสาทดสอบนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้าง

และพฤติกรรมการรับแรงใกล้เคียงกับเสาส่งสัญญาณที่ใช้งานจริง เพื่อให้เหมาะสมต่อการศึกษาการเอียง การสั่นสะเทือน และผลกระทบจากแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง ทั้งนี้ การออกแบบยังคำนึงถึงความมั่นคงแข็งแรง และความปลอดภัยในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ตลอดแนวความสูงของเสา เพื่อรองรับการเก็บข้อมูลเชิงโครงสร้างในระยะยาวอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ระบบการสื่อสาร RS485-Modbus RTU protocol



รูปที่ 2 รูปแบบเสาทดสอบ และการติดตั้ง

ในส่วนของการส่งสัญญาณ ข้อมูลที่ถูกรวบรวมจากเซนเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่ชุดควบคุม (Controller (ESP8266)) เพื่อทำหน้าที่ประมวลผลเบื้องต้น และส่งข้อมูลต่อไปยังระบบฐานข้อมูลของแพลตฟอร์มทีเอ็มเอส (Platform TMS) ผ่านเครือข่าย

สื่อสาร ข้อมูลที่ส่งไปยังระบบกลางจะถูกจัดเก็บในลักษณะบันทึกข้อมูลตลอดเวลา (Record Every Time) และนำไปแสดงผลในรูปแบบกราฟ ตาราง และสถานะความเสี่ยงแบบเรียลไทม์บนเว็บแอปพลิเคชัน กระบวนการรับ–ส่งสัญญาณดังกล่าวทำให้ระบบสามารถติดตามพฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถแจ้งเตือนผู้ดูแลระบบเมื่อค่าที่ตรวจวัดได้เกินเกณฑ์ที่กำหนด การออกแบบ และพัฒนาระบบตรวจสอบพฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดทางกายภาพร่วมกับระบบควบคุม และแพลตฟอร์มการแสดงผล ซึ่งสามารถจำแนกวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ ดังแสดงรายการอุปกรณ์ IoT ในตารางที่ 1

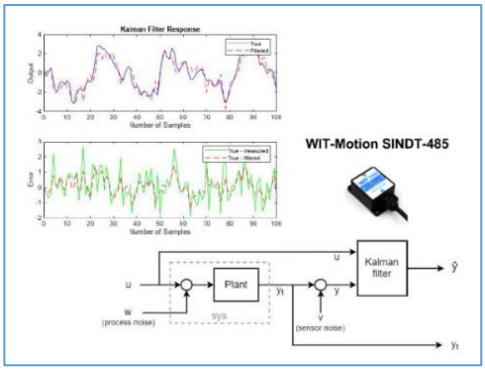
ตารางที่ 1 อุปกรณ์ IoT ที่ใช้ในการติดตั้งในระบบ

ลำดับ	รูปภาพ	Sensor	Qty		ลำดับ	รูปภาพ	Sensor	Qty
1		Inclinometer Sensor	3		4		Controller + Accessories	1
2		Wind Seed Sensor	1		5		Converter 220v to 12v	1
3		4G Router Wifi	1		6		Transducer แบบ Piezoelectric	1

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensors)

2.2.1 เซนเซอร์วัดความเอียง

ใช้สำหรับตรวจวัดค่ามุมเอียงของเสาในแกน x และ y ติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ ของเสา ได้แก่ ส่วนบน (Top) ส่วนกลาง (Mid) และส่วนล่าง (Bottom) ใช้เซนเซอร์วัดความเอียงรุ่น SINDT-485 ซึ่งรองรับการสื่อสารแบบ Modbus RTU ผ่าน RS485 และมีระบบกรองสัญญาณรบกวนด้วยแคลแมนฟิลเทอร์ (Kalman Filter) ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัด ในรูปที่ 3 แสดงเซนเซอร์วัดความเอียง (WIT-Motion SINDT-485) ด้วย Kalman Filter



รูปที่ 3 เซนเซอร์วัดความเอียง (WIT-Motion SINDT-485) ด้วย Kalman Filter

2.2.2 เซนเซอร์วัดความเร็วลม ติดตั้งบริเวณส่วนบนของเสา เพื่อใช้วัดความเร็วลมที่กระทำต่อโครงสร้าง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเอียง และการสั่นสะเทือนของเสา

2.2.3 เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Vibration Sensor) ใช้สำหรับตรวจวัดการสั่นสะเทือนของเสา โดยสามารถแสดงผลในรูปของความเร็วแอมพลิจูด จากผลการติดตั้งในสถานที่จริง พบว่าการติดตั้งเซนเซอร์บริเวณส่วนบนของเสาให้ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ชัดเจนที่สุด

2.3 ระบบควบคุม และการสื่อสาร (Controller and Communication)

2.3.1 แผงควบคุม (Controller Board)

ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 สำหรับรวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งหมด โดยรองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายชนิดพร้อมกัน

2.3.2 ระบบสื่อสารข้อมูล

ใช้การสื่อสารแบบ RS485 ด้วยโปรโตคอล Modbus RTU สำหรับการรับส่งข้อมูลจากเซนเซอร์ไปยัง Controller ใช้สายสัญญาณ RS485 แบบ Shielded Cable สำหรับพื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวนสูง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน

2.3.3 ตู้ควบคุมและแหล่งจ่ายไฟ (Controller Cabinet and Power Supply)

ใช้สำหรับป้อนกระแสไฟ DC ให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และควบคุมการจ่ายพลังงานให้ระบบอย่างต่อเนื่อง

2.4 ซอฟต์แวร์และแพลตฟอร์มการแสดงผล

2.4.1 ระบบบันทึกข้อมูล (Data Logging System)

ระบบ TMS จะบันทึกข้อมูลจากเซนเซอร์แบบบันทึกข้อมูลตลอดเวลา (Record Every Time) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมได้อย่างละเอียด

2.4.2 ทีเอ็มเอสเว็บแอปพลิเคชัน (TMS Web Application)

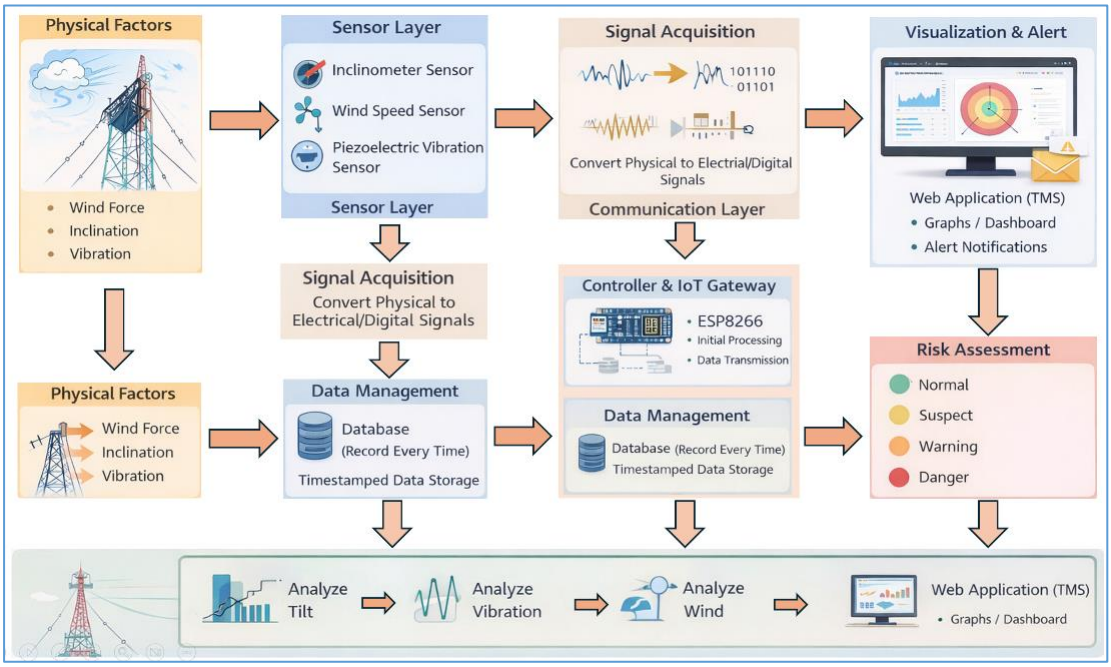
ใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ประกอบด้วย ค่ามุมเอียงของเสา ข้อมูลการสั่นสะเทือน ความเร็วแอมพลิจูด การกระจัด ความเร็วลม สถานะความเสี่ยงของเสา 4 ระดับ ได้แก่ สภาวะปกติ (Normal) สภาวะน่าสงสัย (Suspect) สภาวะเตือนภัย (Warning) และสภาวะอันตราย (Danger) ระบบสามารถแจ้งเตือนสถานะผิดปกติผ่าน E-mail ตามเกณฑ์ที่กำหนด ในรูปที่ 4 แสดงรูปแบบของการแสดงผล Software Web Application



รูปที่ 4 ซอฟต์แวร์ เว็บแอปพลิเคชัน (Software Web Application)

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบระบบตรวจสอบสุขภาพของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคม มีการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ TMS โดยกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการเสียรูปของเสาโทรคมนาคมในรูปแบบเสากายด์ทาวเวอร์ (Guyed Tower) ในรูปที่ 5 แสดงกรอบแนวคิดระบบการตรวจติดตามสภาพของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์



รูปที่ 5 กรอบแนวคิดระบบการตรวจติดตามสภาพของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์

3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และระบบภาคสนาม

ดำเนินการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเอียงในตำแหน่ง บน กลาง และล่าง ของเสา ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วลมบริเวณส่วนบน และติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยยึดตามมาตรฐานการติดตั้ง (Work Instruction: WI) ที่พัฒนาขึ้นในโครงการ TMS การเดินสายสัญญาณใช้ระบบ RS485 พร้อมสาย Shielded Cable เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมจริง

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

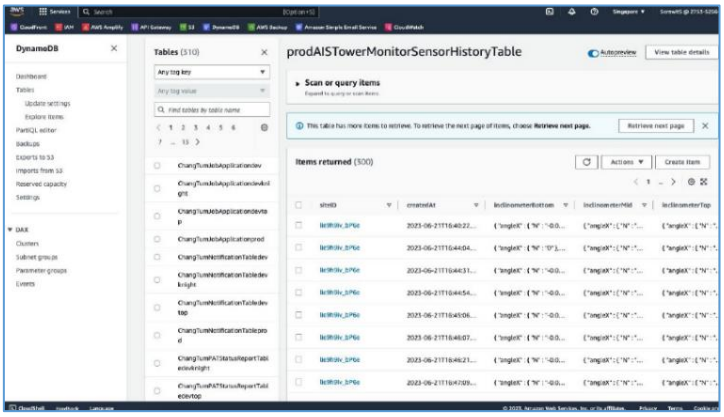
ระบบทำการเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งหมดแบบต่อเนื่อง โดยส่งข้อมูลผ่านชุดควบคุม (Controller) ไปยังระบบฐานข้อมูลของแพลตฟอร์ม TMS ข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย ค่ามุมเอียงของเสา ความเร็วลม ค่าการสั่นสะเทือนในรูปของความเร็ว (Speed) การกระจัด (Displacement) ข้อมูลถูกบันทึกเป็นระยะเวลาต่อเนื่องเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาในสภาวะปกติ และสภาวะที่มีแรงลมกระทำ

3.3 การประมวลผลและแสดงผลข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดถูกประมวลผล และแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน TMS ในรูปแบบเรียลไทม์ โดยกำหนดเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของเสาเป็น 4 ระดับ ตามผลการจำลอง (Simulation) และการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) ที่อ้างอิงจากโครงการต้นแบบ ระบบสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มความผิดปกติของเสา และการวางแผนบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ในอนาคต

ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล

4.1 ผลการดำเนินงานของระบบตรวจสอบเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคม จากการดำเนินการติดตั้ง และทดสอบระบบ TMS ตามขั้นตอนที่กำหนดในงานวิจัย พบว่าสามารถติดตั้งระบบตรวจสอบแบบเรียลไทม์ได้สำเร็จในเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมที่เสาชนิดกายด์ทาวเวอร์ ระบบสามารถเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเอียง เซนเซอร์วัดความเร็วลม และเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริกได้อย่างต่อเนื่อง โดยในระบบ Software Web Application มีการบันทึกข้อมูล ดังในรูปที่ 6 ลักษณะ Record Every Time ส่งผลให้ปริมาณข้อมูลที่เก็บได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

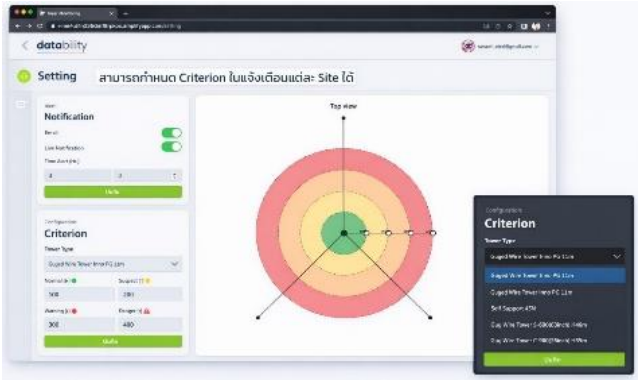


รูปที่ 6 ข้อมูลในลักษณะการบันทึกตลอดเวลา

จากข้อมูลในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถรองรับการเก็บข้อมูลความถี่สูงในระยะยาวได้อย่างมีเสถียรภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างแบบต่อเนื่อง

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเซนเซอร์วัดความเอียง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมุมเอียงของเสาในตำแหน่ง บน กลาง และล่าง ในช่วงระยะเวลาการทดสอบ พบว่ามีค่ามุมเอียงไม่เกิน 0.2 องศา ซึ่งอยู่ภายใต้เกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนดไว้ในระบบ TMS ดังแสดงในรูปที่ 7 ค่ามุมเอียงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามช่วงเวลาที่มีแรงลม ลักษณะการเปลี่ยนแปลงมีความต่อเนื่อง ไม่เกิดสัญญาณกระโดด (Spike) อย่างผิดปกติ



รูปที่ 7 เกณฑ์ระดับความปลอดภัยของเสา

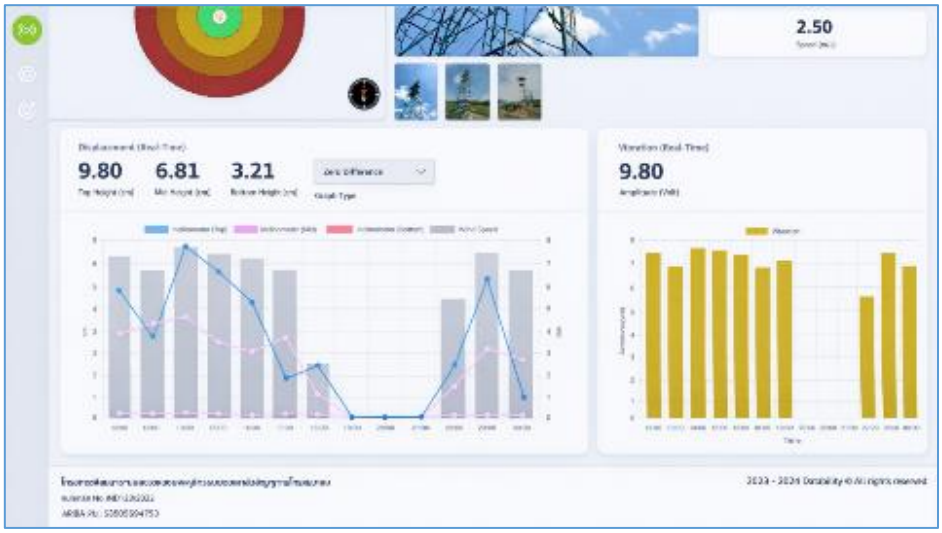
ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การใช้เซนเซอร์วัดความเอียงรุ่น SINDT-485 ร่วมกับการสื่อสารแบบ RS485 และ Modbus RTU สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ ที่แสดงว่าค่าที่ได้จากเซนเซอร์มีความสอดคล้องกับเครื่องมือวัดแบบตัวเลข รูปที่ 8 แสดงเทียบองศาของเซนเซอร์วัดความเอียงกับเครื่องมือวัดแบบตัวเลข



รูปที่ 8 เทียบองศาของตัววัดเอียงกับเครื่องมือวัดแบบตัวเลข

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์ข้อมูลจากเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริกแสดงผลในรูปของความเร็ว และการกระจัด พบว่า การสั่นสะเทือนของเสาอยู่ในระดับต่ำ ไม่มีรูปแบบการสั่นที่บ่งชี้ถึงความเสียหายของโครงสร้างในช่วงเวลาทดสอบ จากการเปรียบเทียบตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งบน และล่าง พบว่า ตำแหน่งด้านบนของเสาให้ค่าการสั่นสะเทือนที่ชัดเจน และมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงลม ตำแหน่งด้านล่างของเสาแทบไม่พบการเคลื่อนไหวที่มีนัยสำคัญ ตามที่แสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 เทียบค่าความเร็วลมกับค่าการสั่นสะเทือน

4.4 อภิปรายผลภาพรวมของระบบ

จากผลการดำเนินงานทั้งหมด สามารถอภิปรายได้ว่า ระบบ TMS สามารถเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์หลายชนิดได้อย่างต่อเนื่อง และเสถียรในสภาพแวดล้อมจริง การใช้ข้อมูลเชิงกราฟ และตารางช่วยให้สามารถติดตามแนวโน้มพฤติกรรมของเสาได้ชัดเจนมากกว่าการตรวจสอบแบบเป็นช่วงเวลา แนวทางการติดตั้งเซนเซอร์ และการประเมินความเสี่ยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปขยายผลสู่โครงการในระดับหลายสิบหรือหลายร้อย Site ได้ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบตรวจสอบพฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ และเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้างในระยะยาว

สรุป

ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถรวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเอียง เซนเซอร์วัดความเร็วลม และเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนแบบเพียโซอิเล็กทริกส่งข้อมูลผ่านระบบการสื่อสาร Modbus RTU protocol ไปยังชุดควบคุม และจัดเก็บข้อมูลในระบบฐานข้อมูลของระบบ TMS ได้อย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบภาคสนามแสดงให้เห็นว่า ระบบมีความเสถียร สามารถบันทึกข้อมูลได้ในปริมาณมาก และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟ และตารางแบบเรียลไทม์ การวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟและตารางพบว่า ค่ามุมเอียง การสั่นสะเทือน และความเร็วลมมีความสัมพันธ์กันตามหลักพฤติกรรมเชิงพลวัตของโครงสร้างแนวตั้ง โดยเฉพาะการตอบสนอง ของเสาในช่วงที่มีแรงลมเพิ่มสูงขึ้น ระบบสามารถประเมินระดับความเสี่ยงของเสาออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ สภาวะปกติ (Normal) สภาวะน่าสงสัย (Suspect) สภาวะเตือนภัย (Warning) และ สภาวะอันตราย (Danger) ซึ่งช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถรับรู้สถานะของโครงสร้างได้อย่างชัดเจน และทันเวลา

แนวโน้มการพัฒนาในอนาคต จากผลการดำเนินงาน พบว่าระบบตรวจสอบพฤติกรรมของเสาส่งสัญญาณโทรคมนาคมแบบเรียลไทม์มีศักยภาพสูงในการนำไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวโน้มการพัฒนาในอนาคตที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ ได้แก่ การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ขั้นสูง การนำเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) หรือการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) มาวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นสะเทือน และมุมเอียง เพื่อพัฒนาโมเดลการ

ตรวจจับความผิดปกติ และการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) การขยายระบบสู่การใช้งานในระดับเครือข่ายขนาดใหญ่ การพัฒนาแพลตฟอร์มให้สามารถรองรับการติดตั้งในเสาส่งสัญญาณจำนวนมาก (Multi-site Monitoring) พร้อมระบบแดชบอร์ด (Dashboard) สำหรับการบริหารจัดการในระดับภูมิภาคหรือระดับประเทศการเพิ่มชนิดของเซนเซอร์ และข้อมูลสภาพแวดล้อม เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้น หรือแรงดึงของสลิง สำหรับกายด์ทาวเวอร์ (Guyed Tower) เพื่อให้การวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างมีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

แนวโน้มทิศทางในอนาคต

6.1 ควรมีการทดสอบระบบในระยะยาว และในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น พื้นที่ที่มีลมแรงหรือสภาพอากาศรุนแรง พื้นที่ที่มีการโจรกรรมเพื่อประเมินความทนทานของอุปกรณ์ การป้องกันการโจรกรรมโดยใช้ความแม่นยำของข้อมูลอย่างทันท่วงที

6.2 ควรพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติให้รองรับหลายช่องทาง เช่น SMS หรือ แสดงผลบนหน้าจอโทรศัพท์ เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการตอบสนองต่อเหตุการณ์ผิดปกติ

6.3 สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรนำข้อมูลจากระบบนี้ ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างจากแบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการประเมิน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ และความร่วมมือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทีมอาจารย์ที่ปรึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ และการชี้แนะแนวทางทางวิชาการอันมีคุณค่า ขอขอบพระคุณ บริษัท อินโนเวชั่นเทค จำกัด ที่สนับสนุนด้านทรัพยากร และอุปกรณ์ และบริษัท ดาต้าบิลิตี้ จำกัด ที่เอื้ออำนวยด้านซอฟต์แวร์ในการดำเนินงานวิจัย รวมถึง ร้านเพกะลาว ลำลูกกา คลอง 4 ที่สนับสนุนสถานที่ติดตั้ง และทดสอบระบบ Tower Monitoring System (TMS) นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจตลอดการดำเนินงานวิจัย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานด้านวิศวกรรม และเทคโนโลยีในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

Attar, N. S., Makandar, A., Ziaullah, M., Fatima, S., & Patel, N. (2024). IoT-Machine Learning-Based Structural Health Monitoring System for Detection of Cracks in Bridges. *Saudi J Biomed Res*, 9(2), 28-32.

Bormon, J. C. (2025). AI-assisted structural health monitoring for foundations and high-rise buildings.

De Simone, M. C., Lorusso, A., & Santaniello, D. (2022, July). Predictive maintenance and structural health monitoring via IoT system. *In 2022 IEEE workshop on complexity in engineering (COMPENG), IEEE.*

Forlesi, M., Esposito, A., Ciabattini, L., Sciullo, L., Di Felice, M., Kamali, S., ... & Marzani, A. (2024, July). An IoT-AI Toolchain for Structural Health Monitoring. *In 2024 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N), IEEE.*

Mahanty, S., Kumar, R., Sharma, A., Kumari, M., Kumari, P., & Kumari, P. (2024, April). Industrial Building Vibration Detection Using Wireless Sensor Network. *In 2024 5th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology (ICRTCST), IEEE.*

Rosso, M. M., Aloisio, A., Cirrincione, G., & Marano, G. C. (2024, June). Evaluation of Varying Noise Levels' Effects on Damage Detection in Structural Health Monitoring. *In 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv), IEEE.*

Rehman, S. U., Usman, M., Toor, M. H. Y., & Hussaini, Q. A. (2024). Advancing structural health monitoring: A vibration-based IoT approach for remote real-time systems. *Sensors and Actuators A: Physical,* 365, 114863.

Venkatesh, D., Nimitha, P., Vishali, M., Sravanthi, M., & Suryanarayan, G. (2024). A Comprehensive Analysis of IoT-Driven Bridge Health Monitoring Systems for Structural Risk Mitigation. *Journal of e-Science Letters*, 5(1), 26-30.