

บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุสามมิติเพื่อการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลของสะพานแขวน : กรณีศึกษาสะพานแขวนข้ามแม่น้ำท่าจีน ตำบลลำพญา อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม

ธนียพรรณ ศรีมนตรีกิติ ขนาธิป บินซาฮิส กันตภณ จินทราคำ พิรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย* สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์

ธงชัย ปัญญาสหชาติ และ ชัยณรงค์ อธิสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5537 4567 อีเมล: Peerasit.mahasu@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.004

รับเมื่อ 6 ตุลาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 17 เมษายน 2569 ตอบรับเมื่อ 25 มิถุนายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 15 ตุลาคม 2569

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการติดตามสภาพโครงสร้างสายเคเบิลโดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการวัดความถี่ ซึ่งมีข้อจำกัดเนื่องจากต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่สายเคเบิลโดยตรงทำให้ยากต่อการปฏิบัติงานในบริเวณที่เข้าถึงได้ลำบาก การศึกษานี้จึงนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติด้วยแสงเลเซอร์ เพื่อประเมินแรงดึงภายในสายเคเบิลขนาดใหญ่ด้วยวิธีไม่สัมผัส จุดเด่นของวิธีการนี้คือ สามารถเก็บข้อมูลได้จากระยะไกลและไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ บนสายเคเบิล งานวิจัยนี้อาศัยหลักทางกลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาเส้นโค้งหย่อนตัวของสายเคเบิลจากค่าแรงดึงที่กำหนดและใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในการประเมินเพื่อหาเส้นโค้งหย่อนตัวที่เหมาะสมที่สุดและค่าแรงดึงที่สอดคล้อง โดยใช้ข้อมูลจากสะพานแขวนข้ามแม่น้ำท่าจีน ตำบลลำพญา จังหวัดนครปฐม เป็นกรณีศึกษา ผลการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติมีความแม่นยำสูงในการเก็บข้อมูลพิกัดการหย่อนตัวของสายเคเบิลสะพานแขวน ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าสายเคเบิลหลักมีความปลอดภัยภายใต้สภาวะน้ำหนักบรรทุกจรน้อยที่สุดและน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าการลดจำนวนการแบ่งช่วงหรือจำนวนพิกัดที่ใช้ในการวิเคราะห์หลังยังคงให้ผลการประเมินที่มีความแม่นยำเพียงพอ อย่างไรก็ตามข้อมูลพิกัดบริเวณจุดรองรับยังคงเป็นข้อมูลสำคัญที่จำเป็นต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์

คำสำคัญ: การประเมินแรงดึงภายในเคเบิล เทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติด้วยแสงเลเซอร์ สะพานแขวน

การอ้างอิงบทความ: ธนียพรรณ ศรีมนตรีกิติ, ขนาธิป บินซาฮิส, กันตภณ จินทราคำ, พิรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์, ธงชัย ปัญญาสหชาติ และ ชัยณรงค์ อธิสกุล, “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุสามมิติเพื่อการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลของสะพานแขวน : กรณีศึกษาสะพานแขวนข้ามแม่น้ำท่าจีน ตำบลลำพญา อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 1, หน้า 1-18, ม.ค.-มี.ค. 2570. เลขที่บทความ 271-028369, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.004.



Research Article

Application of 3D Laser Scanning Technology for Cable Tension Evaluation of Suspension Bridge: A Case Study of Suspension Bridge Crossing the Tha-Chin River Lamphaya, Banglen, Nakhonpathom

Thaniyaphat Srimontriphakdi, Chanatip Binzaitis, Kantapon Jintrakham, Peerasit Mahasuwanchai*,
Sutat Leelataviwat, Thongchai Phanyasahachart and Chainarong Athisakul

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok,
Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5537 4567, E-mail: Peerasit.mahasu@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.004

Received 6 October 2025; Revised 17 April 2026; Accepted 25 June 2026; Published online: 15 October 2026

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Currently, structural health monitoring of cables typically relies on frequency-based methods, which require sensor installation directly onto the cables. This poses a significant limitation when cables are located in hard-to-reach areas. Therefore, this study proposes an alternative approach using three-dimensional (3D) laser scanning technology for the non-contact tension assessment of large-scale cables. The primary advantage of this method is its ability to collect data remotely without the need to install any devices on the cables. Based on cable mechanics, sag curves are analyzed using specified tension values, and the Root Mean Square Error (RMSE) is employed to determine the best-fit sag curve and its corresponding tension. The suspension bridge crossing the Tha Chin River in Lam Phaya Subdistrict, Nakhon Pathom Province, was selected as the case study. The results demonstrate that 3D laser scanning technology provides high accuracy in capturing the sag coordinates of suspension bridge cables. The assessment indicates that the main cables remain safe under both minimum and maximum live-load conditions. Furthermore, the study reveals that reducing the number of segments or coordinate points used in the analysis remains feasible while maintaining sufficient accuracy. However, coordinate data at the support points remain critical for obtaining reliable analytical results.

Keywords: 3D Laser Scanning Technology, Cable Tension Evaluation, Suspension Bridge

Please cite this article as: T. Srimontriphakdi, C. Binzaitis, K. Jintrakham, P. Mahasuwanchai, S. Leelataviwat, T. Phanyasahachart, and C. Athisakul, "Application of 3D laser scanning technology for cable tension evaluation of suspension bridge: A case study of suspension bridge crossing the Tha-Chin River Lamphaya, Banglen, Nakhonpathom," *The Journal of KMUTNB*, vol. 37, no. 1, pp. 1–18, Jan.–Mar. 2027 (in Thai), Art. no. 271-028369, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.004.

1. บทนำ

สายเคเบิลถือเป็นองค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญในงานวิศวกรรมโยธาหลากหลายประเภท เช่น โครงสร้างหลังคา สะพานแขวน และสะพานซิง เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในการรับแรงดึงได้สูง และมีน้ำหนักเบา จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้กับโครงสร้างช่วงยาวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ความยืดหยุ่นของสายเคเบิลยังช่วยให้การขนส่ง เคลื่อนย้าย และการติดตั้งดำเนินไปได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามสายเคเบิลมักเผชิญกับปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพหลายประการ อาทิ การกัดกร่อน (Corrosion) และความล้า (Fatigue) ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและอาจนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างโดยฉับพลัน ดังจะเห็นได้จากกรณีการวิบัติของสะพานแขวนข้ามแม่น้ำปาลัก จังหวัดพระนครศรีอยุธยา [1] สะพานแขวนข้ามแม่น้ำมัจจุ ประเทศอินเดีย [2] และสะพานแขวนเจียงวิน ประเทศจีน [3] เหตุการณ์เหล่านี้ไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน แต่ยังส่งผลกระทบต่อความมั่นคงตลอดจนสร้างความเสียหายต่อภาพลักษณ์และเศรษฐกิจในพื้นที่อย่างมหาศาล ดังนั้นการติดตามและประเมินสภาพของสายเคเบิลอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประเมินแรงดึงในสายเคเบิล ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญที่สะท้อนถึงความสมบูรณ์และเสถียรภาพของโครงสร้างทั้งหมด

ปัจจุบันมีการตรวจสอบและติดตามสภาพโครงสร้างสายเคเบิลหลากหลายวิธี โดยวิธีที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางคือ วิธีการวัดความถี่ ซึ่งอาศัยการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิล เพื่อนำมาคำนวณหาแรงดึงที่ผ่านมามีการพัฒนาวิธีการนี้อย่างต่อเนื่อง เช่น Fang และ Wang [4] ได้นำเสนอสูตร

เชิงประจักษ์ที่พัฒนาจากสมการการสั่น เพื่อประมาณค่าแรงดึงโดยใช้ความถี่ธรรมชาติในโหมดลำดับสูง ขณะที่ Wang และคณะ [5] ได้นำเสนอวิธีการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลหลักของสะพานแขวน โดยพิจารณาผลกระทบจากสายแขวนแต่ละเส้นทำให้สามารถประเมินแรงดึงได้แม้ในสภาวะที่สายแขวนอยู่ระหว่างการซ่อมบำรุง นอกจากนี้ Nam และ Nghia [6] ยังได้พัฒนาสมการที่ครอบคลุมถึงผลของการหย่อนตัวและความต้านทานการดัดโค้ง ส่วนในด้านการประมวลผลสัญญาณ Qu และคณะ [7] ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้พาวเวอร์สเปกตรัมอันดับสูง สามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนในกระบวนการจำแนกความถี่ธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการวัดความถี่ยังมีข้อจำกัดสำคัญในทางปฏิบัติคือ จำเป็นต้องติดตั้งเซนเซอร์ลงบนสายเคเบิลโดยตรง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อลักษณะการสั่นตามธรรมชาติของสายเคเบิล อีกทั้งยังไม่คล่องตัวสำหรับโครงสร้างที่เข้าถึงได้ยาก นอกจากนี้แรงดึงที่ประเมินได้จากวิธีนี้มักเป็นค่าแรงดึงเฉลี่ยตลอดความยาวเส้น ซึ่งในความเป็นจริงแรงดึงในสายเคเบิล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพและกลศาสตร์ของโครงสร้าง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสแกนวัตถุสามมิติด้วยแสงเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner; TLS) ได้รับการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ในฐานะวิธีการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว [8], [9] โดยเฉพาะในด้านการติดตามสภาพโครงสร้างเชิงอนุรักษ์ อาทิ การศึกษาของ Sairuamyat และคณะ [10] ที่ใช้ TLS ในการสำรวจพิกัดเพื่อติดตามการเอียงตัวขององค์เจดีย์วัดกระจี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ต่อมา Mahasuwanchai และคณะ [11] ได้ดำเนินการ

ติดตามสภาพในระยะยาวและนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์พฤติกรรมการเอียงตัวของโครงสร้างดังกล่าว ขณะที่ ชนาธิป และคณะ [12] ได้ใช้เทคโนโลยีนี้ในการเก็บข้อมูลพิกัดของปาสานเจติยของวัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกเหนือจากงานด้านโบราณสถาน TLS ยังถูกนำมาใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐาน เช่น Kim และคณะ [13] ที่ใช้การสแกนเพื่อตรวจสอบระยะห่างของชิ้นส่วนสะพานระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วนสุดท้ายได้ถึง 10 วัน ขณะที่ Artese และ Zinno [14] ได้ประยุกต์ใช้ TLS ในการประเมินการเคลื่อนตัวของสะพานรูปแบบต่าง ๆ ภายใต้การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ ในส่วนของการวิเคราะห์สายเคเบิล ชนาธิป และคณะ [15] ได้นำข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติจากสะพานพระราม 9 มาใช้ตรวจสอบค่าระดับและความชันรวมถึงนำเสนอวิธีการสร้างเส้นโค้งหย่อนตัวจากเส้นสัมผัสได้ของสายเคเบิล นอกจากนี้ยังมีแนวทางการสร้างเส้นโค้งหย่อนตัวด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น งานของ Zhou และคณะ [16], [17] ที่ใช้วิธีระบุตำแหน่งจุดศูนย์กลางหน้าตัดของสายเคเบิล อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลขนาดหน้าตัดที่แท้จริงของสายเคเบิลเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์

วิธีการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลจากเส้นโค้งหย่อนตัวจัดเป็นวิธีการเชิงสถิติ ซึ่งมีหลักการที่แตกต่างจากวิธีการวัดความถี่โดยสิ้นเชิง โดย Zhou และคณะ [16] ได้ประยุกต์ใช้สมการคาทินารี (Catenary Equation) เพื่อวิเคราะห์แรงดึงจากพิกัดเส้นโค้งหย่อนตัวของสะพานซึ่งมีข้อดีสำคัญคือ สามารถประเมินแรงดึงเฉพาะช่วงได้ แม้จะมีข้อมูลกลุ่มจุดเพียงบางส่วน จากข้อได้เปรียบนี้

Zhou และคณะ [17] จึงได้ต่อยอดสู่การประเมินแรงดึงในสายแขวน โดยพิจารณาพฤติกรรมของสายเคเบิลหลักแต่ละช่วงที่ถูกแบ่งโดยสายแขวนเป็นแบบคาทินารีภายใต้น้ำหนักตัวมันเอง จากนั้นจึงคำนวณหาแรงดึงในสายแขวนจากผลต่างของแรงในแนวตั้งของสายเคเบิลหลักสองช่วงที่อยู่ติดกัน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าแรงดึงในแนวราบที่แม่นยำเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์เริ่มต้น นอกจากการประยุกต์ใช้สมการทางกลศาสตร์พื้นฐานแล้ว Srimontriphakdi และคณะ [18] ได้เสนอการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่พิจารณาผลของสติฟเนสด้านทานการดัด (Bending Stiffness) และการยึดตัว เพื่อประเมินแรงดึงในสายเคเบิลเชิงของโครงสร้างหลังคา ซึ่งให้ผลการประเมินที่ใกล้เคียงกับวิธีการวัดความถี่ นอกจากนี้การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของสติฟเนสด้านทานการดัดกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าแบบจำลองที่พิจารณาสติฟเนสด้านทานการดัดให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่า อย่างไรก็ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นมีข้อจำกัดด้านความซับซ้อนของอัลกอริทึมเชิงตัวเลขและกระบวนการคำนวณซ้ำเพื่อแก้ระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่งผลให้วิธีการดังกล่าวยังไม่ได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริงในประเทศไทยอย่างแพร่หลายนัก

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการเก็บข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติ การประมวลผลข้อมูลและการวิเคราะห์แรงดึงในสายเคเบิลผ่านกรณีศึกษาสะพานแขวนข้ามแม่น้ำท่าจีน ตำบลลำพญา อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยนำเสนอแนวทาง

การประยุกต์ใช้สมการกลศาสตร์ของสายเคเบิลร่วมกับวิธีการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อประเมินแรงดึงจากรูปทรงการหย่อนตัวของสายเคเบิล วิธีการที่นำเสนอนี้มีจุดเด่นในการลดความซับซ้อนของขั้นตอนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ทำให้วิศวกรสามารถประเมินแรงดึงในสายเคเบิลได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ซึ่งจะเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตามสภาพและประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานแขวนในอนาคต

2. วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลโดยอาศัยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติด้วยแสงเลเซอร์ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเครื่องสแกนวัตถุสามมิติด้วยแสงเลเซอร์แบบพื้นดิน การประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุดเพื่อสร้างเส้นโค้งหย่อนตัวของสายเคเบิล และการวิเคราะห์ประเมินแรงดึงโดยอิงตามหลักกลศาสตร์ของสายเคเบิล

2.1 ข้อมูลทั่วไปของกรณีศึกษา

โครงสร้างสายเคเบิลที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้คือ สะพานแขวนข้ามแม่น้ำท่าจีน ตั้งอยู่ที่ตำบลลำพญา อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ตัวสะพานมีความยาวรวมประมาณ 140 เมตร แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงพาด (Spans) ประกอบด้วย ช่วงพาดกลาง ความยาว 80 เมตร และช่วงพาดริมทั้งสองฝั่ง ความยาวฝั่งละ 30 เมตร ตามหลักกลศาสตร์ของสายเคเบิล สามารถจำแนกลักษณะการหย่อนตัวของสายเคเบิลในกรณีศึกษานี้ได้เป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบเส้นโค้งพาราโบลา (Parabolic Curve) สำหรับสายเคเบิลช่วงพาดกลาง และรูปแบบเส้นโค้งคาทินารี (Catenary Curve) สำหรับสายเคเบิลช่วงพาดริม ดังแสดงในรูปที่ 1

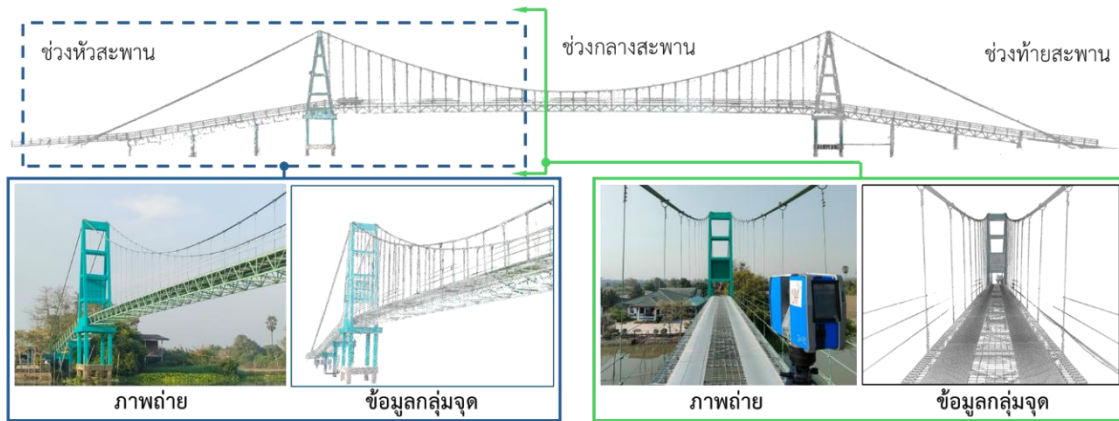


รูปที่ 1 สะพานแขวนข้ามแม่น้ำท่าจีน ตำบลลำพญา

2.2 การเก็บข้อมูลด้วยเทคโนโลยีสแกนวัตถุสามมิติ และการประมวลผลข้อมูล

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการเก็บข้อมูลกลุ่มจุดในงานวิจัยนี้คือ FARO Focus 3D X-330 ซึ่งเป็นเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติแบบภาคพื้นดินที่ทำงานโดยการส่งลำแสงเลเซอร์อินฟราเรดสะท้อนผ่านกระจกหมุนในแนวตั้งควบคู่ไปกับการหมุนรอบตัวเองของตัวเครื่องในแนวราบ เพื่อบันทึกข้อมูลสภาพปัจจุบันของสะพานแขวนครอบคลุมทั้งพื้นที่แนวราบและแนวตั้ง ในการนี้ได้กำหนดค่าความละเอียด (Resolution) ไว้ที่ระดับ 1/5 หรือเทียบเท่ากับพิกัดจุดประมาณ 28.1 ล้านจุดต่อตำแหน่ง ด้วยความเร็วในการเก็บข้อมูล 122,200 จุดต่อวินาที [19] สำหรับขั้นตอนการปฏิบัติงานภาคสนาม รวมถึงการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5 นาที ต่อจุดตั้งเครื่อง โดยมีการกำหนดระยะห่างระหว่างจุดตั้งเครื่องประมาณ 10 เมตร และมีจำนวนจุดตั้งเครื่องรวมทั้งสิ้น 23 จุด

กระบวนการสร้างแบบจำลองกลุ่มจุดสามมิติของสะพานแขวนต้นแบบเริ่มต้นจากการนำข้อมูลที่ได้จากการสแกนมาประมวลผลด้วยโปรแกรม FARO SCENE เพื่อรวมพิกัดข้อมูลแต่ละตำแหน่งเข้าด้วยกัน โดยในการ



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติกับภาพถ่ายของสะพานแขวนต้นแบบ

วิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด (Mean Scan Point Distance Error) ไม่เกิน 8 มิลลิเมตร และต้องมีพื้นที่ทับซ้อนระหว่างตำแหน่งการสแกนไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 [20] เพื่อรักษาความถูกต้องแม่นยำของข้อมูล ทั้งนี้ งานวิจัยได้เลือกใช้กระบวนการจุดที่ใกล้ที่สุดแบบวนซ้ำ (Iterative Closest Point; ICP) ในการเชื่อมต่อข้อมูลกลุ่มจุดแต่ละชุดเข้าด้วยกัน [11], [12] ผลจากการประมวลผลทำให้ได้แบบจำลองพิกัดสามมิติที่สมบูรณ์ของโครงสร้างสะพานทั้งหมด โดยรายละเอียดการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลกลุ่มจุดและภาพถ่ายจริงแสดงดังรูปที่ 2

2.3 การวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

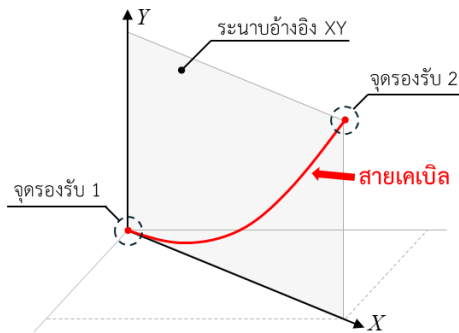
กระบวนการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

2.3.1 การเตรียมข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติของเคเบิล
ในขั้นตอนนี้จะทำการปรับแต่งข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติให้เหมาะกับการนำไปใช้งาน โดยจะทำการลบข้อมูลกลุ่ม

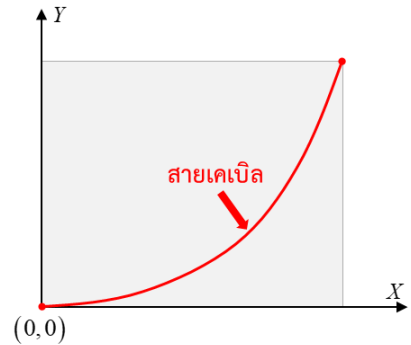
จุดอื่น ๆ ที่ไม่จำเป็นหรือไม่เกี่ยวข้องออก และจำแนกเฉพาะข้อมูลกลุ่มจุดของสายเคเบิลเพื่อนำไปใช้ประเมินในขั้นตอนต่อไป

2.3.2 การกำหนดระบบอ้างอิงของสายเคเบิล

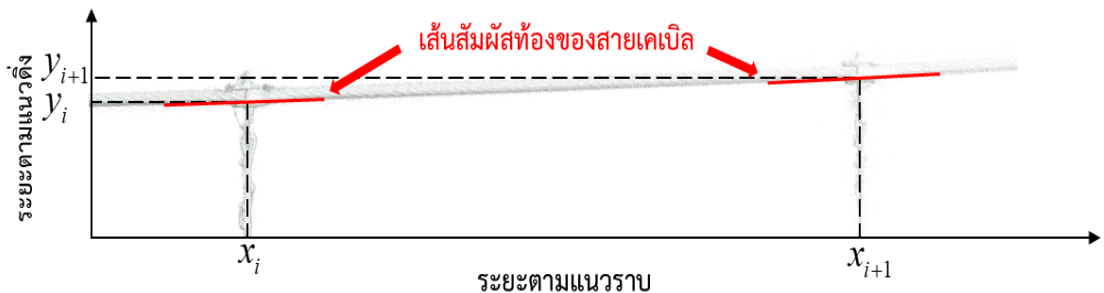
ในการกำหนดระบบพิกัดอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์เส้นโค้งหย่อนตัว งานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานให้สายเคเบิลอยู่ในสภาวะสมดุลสถิตภายใต้น้ำหนักตัวเองและแรงกระจายในแนวตั้งเท่านั้น โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากแรงลมส่งผลให้การเปลี่ยนรูปของสายเคเบิลเกิดขึ้นเฉพาะในแนวแกนตั้งโดยไม่มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ด้วยเหตุนี้การตรวจวัดและวิเคราะห์การหย่อนตัวจึงสามารถพิจารณาบนระนาบ 2 มิติ โดยกำหนดให้เป็นระนาบที่ผ่านจุดรองรับของสายเคเบิลทั้งสองฝั่งดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) จากนั้นกำหนดจุดอ้างอิงค่าพิกัด (0,0) ให้กับระบบพิกัดเฉพาะ (Local Coordinate) สำหรับเส้นโค้งหย่อนตัว โดยจุดอ้างอิงค่าพิกัด (0,0) จะเป็นจุดรองรับด้านใดด้านหนึ่งของสายเคเบิลตามรูปที่ 3 (ข) โดยจะทำการวัดค่าพิกัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิล ณ ตำแหน่งท้องของสายเคเบิล ซึ่งจากรูปที่ 3 (ค) แสดงตัวอย่างการวัดค่าพิกัดของพาราโบลาเคเบิลที่ตำแหน่งที่มีสายแขวน



(ก) การกำหนดระนาบของเคเบิล



(ข) การกำหนดพิกัดอ้างอิงในระนาบของเคเบิล



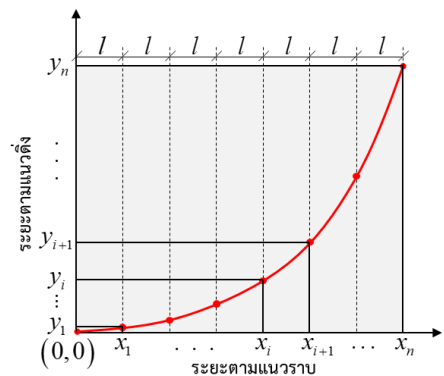
(ค) การวัดค่าพิกัดที่ท้องของเคเบิล

รูปที่ 3 การกำหนดระบบอ้างอิงของเคเบิลและวิธีการวัดค่าพิกัด

ซึ่งไม่สามารถระบุตำแหน่งท้องของสายเคเบิลหลักได้อย่างชัดเจน จึงทำการสร้างเส้นสัมผัสที่บริเวณท้องของเคเบิลหลักจากบริเวณข้างเคียงเพื่อใช้ระบุตำแหน่งท้องของสายเคเบิลหลักตำแหน่งที่ยึดติดกับสายแขวนตามรูปที่ 3 (ค)

2.3.3 การวัดข้อมูลเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิล

การวัดเส้นโค้งรูปร่างการหย่อนตัวของคาทินารีเคเบิลจะทำได้โดยการแบ่งสายเคเบิลออกเป็นช่วงที่มีระยะในแนวนราบที่เท่ากันและทำการวัดค่าพิกัดของเคเบิลที่ตำแหน่งนั้น ๆ โดยจะทำการวัดที่ท้องของสายเคเบิลเช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 2.3.2 ตามรูปที่ 4 และสำหรับพาราโบลาเคเบิลจะวัดค่าพิกัดของสายเคเบิลหลักตรงตำแหน่งที่ยึดติดกับสายแขวน



รูปที่ 4 การแบ่งช่วงของเคเบิลสำหรับวัดค่าพิกัด

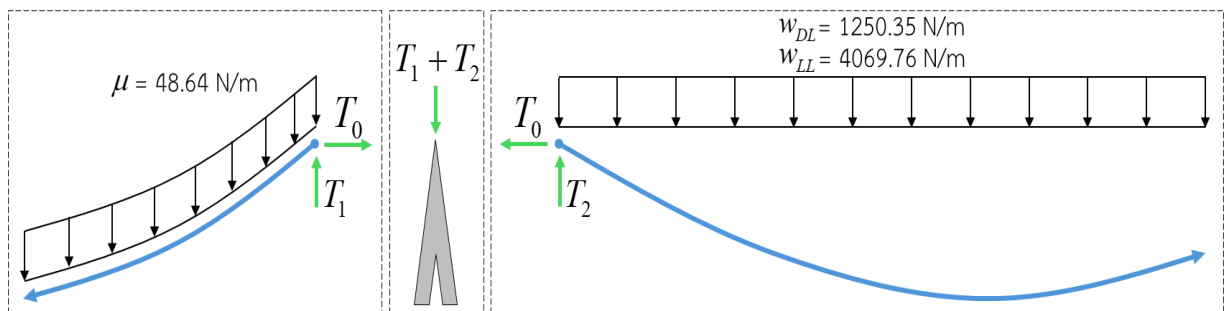
2.4 การประเมินแรงดึงภายในเคเบิลโดยอาศัยกลศาสตร์ของเคเบิล

การประเมินแรงดึงภายในเคเบิลจะทำได้โดยคำนวณหาเส้นโค้งหย่อนตัวในสภาวะสมดุลสถิตของสายเคเบิล

จากสมการกลศาสตร์ของเคเบิลและทำการปรับพารามิเตอร์ในสมการนั้น เพื่อให้ได้เส้นโค้งหย่อนตัวของสายเคเบิลที่มีความใกล้เคียงกันกับเส้นโค้งหย่อนตัวของสายเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติมากที่สุด จากกลศาสตร์ของเคเบิล [21] สมการที่ใช้ในการคำนวณจะประกอบด้วยสมการพาราโบลาเคเบิลสำหรับเคเบิลหลักในช่วงกลางสะพานซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่สมมติต่อหน่วยความยาวช่วงสะพาน (w) และสมการคาทินารีในช่วงหัวและท้ายสะพานซึ่งเป็นช่วงที่เคเบิลมีความตึงและรับน้ำหนักต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลเท่านั้น (μ) และสมมติให้แรงที่ถ่ายจากสายเคเบิลลงเสารับน้ำหนักที่บริเวณหัวเสาเป็นแรงในแนวดิ่งเท่านั้น จะได้ว่าแรงในแนวดิ่งของคาทินารีเคเบิลและพาราโบลาเคเบิลที่เชื่อมต่อกันจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 5 โดยเส้นโค้งหย่อนตัวและแรงตึงของพาราโบลาเคเบิลสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ดังนี้

$$y = \frac{w}{2T_0} x^2 \quad (1)$$

$$T = \sqrt{T_0^2 + w^2 x^2} \quad (2)$$



คาทินารีเคเบิล

เสารับน้ำหนัก

พาราโบลาเคเบิล

รูปที่ 5 องค์ประกอบของแรงบริเวณยอดเสารับน้ำหนัก

เส้นโค้งหย่อนตัวและแรงตึงของคาทินารีเคเบิลจะเขียนได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ ดังนี้

$$y = \frac{T_0}{\mu} \left(\cosh \frac{\mu x}{T_0} - 1 \right) \quad (3)$$

$$T = T_0 + \mu y \quad (4)$$

เมื่อ x คือ พิกัดตามแนวนอน (เมตร)

y คือ พิกัดตามแนวดิ่ง (เมตร)

T คือ แรงตึงในแนวแกนของสายเคเบิล (นิวตัน)

T_0 คือ แรงตึงแนวดิ่งของสายเคเบิล (นิวตัน)

w คือ น้ำหนักบรรทุกต่อหนึ่งหน่วยความยาวช่วงของสะพานในแนวดิ่ง (นิวตันต่อเมตร)

μ คือ น้ำหนักสายเคเบิลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นโค้งหย่อนตัวที่อยู่ในรูปแบบเส้นโค้งคาทินารีเคเบิล (นิวตันต่อเมตร)

สำหรับพารามิเตอร์ที่ทำการปรับแก้เพื่อให้เกิดเส้นโค้งหย่อนตัวที่ใกล้เคียงกับข้อมูลกลุ่มจุดมากที่สุด คือ แรงตึงในแนวดิ่ง โดยสมการที่ (1) จะใช้สำหรับพาราโบลาเคเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงกลางสะพานและสมการที่ (3) จะใช้สำหรับคาทินารีเคเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงหัวและท้ายสะพาน

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของเส้นโค้งหย่อนตัวจะใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) เพื่อเปรียบเทียบค่าพิกัดในแนวตั้งระหว่างข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติและผลการคำนวณจากสมการทางกลศาสตร์ของสายเคเบิล โดยสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (y_i - y_i^*)^2}{n-1}} \quad (5)$$

เมื่อ y_i คือค่าพิกัดในแนวตั้งจากข้อมูลกลุ่มจุด (เมตร)
 y_i^* คือ ค่าพิกัดในแนวตั้งจากสมการเคเบิล (เมตร)
 n คือ จำนวนช่วงของสายเคเบิลที่ทำการแบ่ง
โดยเส้นโค้งหย่อนตัวที่ทำให้ผลการคำนวณค่า RMSE ตามสมการที่ (5) มีค่าต่ำที่สุดคือ เส้นโค้งหย่อนตัวที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด และค่าแรงดึงในแนวราบนั้นจะเป็นค่าที่นำไปใช้คำนวณแรงดึงในสายเคเบิลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ต่อไป

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากการสำรวจสายเคเบิลของกรณีศึกษาในพื้นที่พบว่าเป็นลวดสลิงไส้เหล็ก (Independent Wire Rope Core; IWRC) ชนิด 6x19 จำนวน 3 เส้น มัดรวมกัน และจากข้อมูลการออกแบบสะพานแขวนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องพบว่ามีกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจรต่อความยาว (w_{LL}) สูงสุดไม่เกิน 4,069.76 นิวตันต่อเมตร และน้ำหนักบรรทุกคงที่ต่อความยาว (w_{DL}) เท่ากับ 1,250.35 นิวตันต่อเมตร โดยรายละเอียดน้ำหนักบรรทุกจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก ดังนั้นน้ำหนักกระจายที่ใช้ในการศึกษานี้จะมีทั้งหมด 2 กรณี

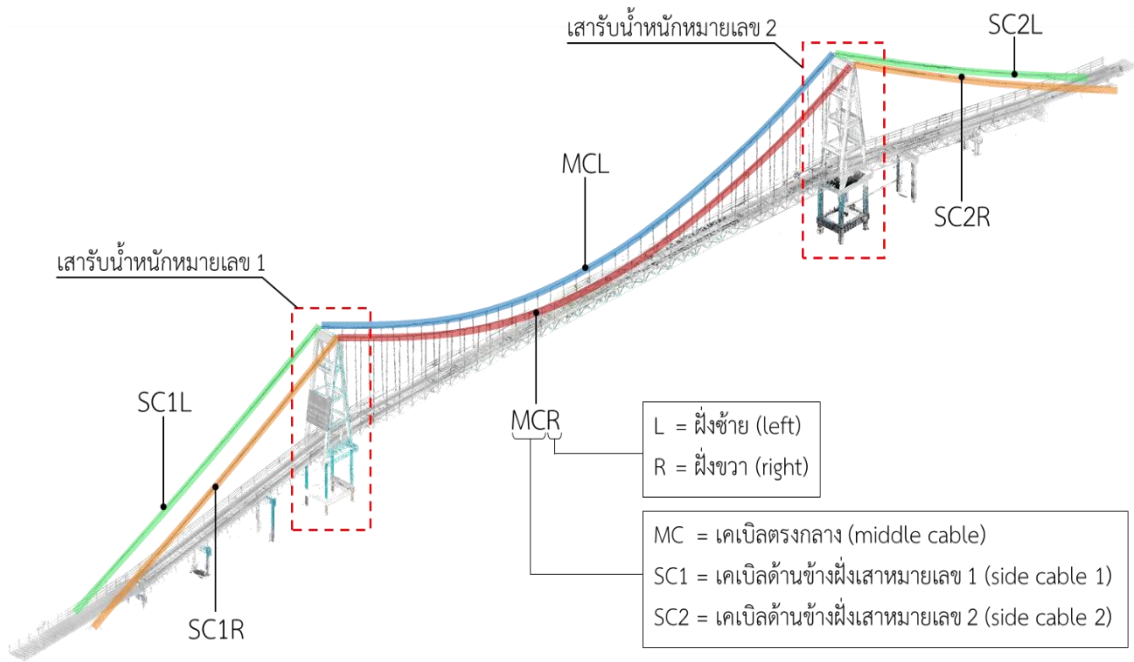
คือ กรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่อย่างเดียว ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพโครงสร้างจริงที่มีการควบคุมให้น้ำหนักบรรทุกจมน้อยสุด ณ เวลาที่ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติ และกรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่ร่วมกับน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งจะนำมาประเมินอัตราส่วนแรงกระทำสูงสุดต่อกำลังต้านทานของสายเคเบิล (Demand-Capacity Ratio; DCR) โดยสมบัติของสายเคเบิลแสดงดังตารางที่ 1 และได้ทำการกำหนดชื่อเรียกสายเคเบิลโดยให้ MC SC1 และ SC2 คือ เคเบิลช่วงกลางสะพาน (Middle Cable) เคเบิลช่วงปลายสะพานฝั่งเสาหมายเลข 1 (side cable 1) และเสาหมายเลข 2 (side cable 2) ตามลำดับ โดยที่ L และ R ข้างหลัง หมายถึง เคเบิลฝั่งซ้ายและขวาของสะพาน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังกำหนดหมายเลขเสาไว้ตามรูปที่ 6

ตารางที่ 1 สมบัติของสายเคเบิลหลัก

สมบัติของสายเคเบิล	ค่า
น้ำหนักต่อหน่วยความยาว (นิวตันต่อเมตร)	48.64
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	7,800
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	35
พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	6.359
แรงดึงประลัย (กิโลนิวตัน)	668.81
แรงดึงที่ยอมให้ (กิโลนิวตัน)	267.53

3.1 ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์หาเส้นโค้งหย่อนตัวของสายเคเบิลสะพานแขวน

การวัดค่าพิกัดของสายเคเบิลที่นาริเคเบิลจะดำเนินการตามหัวข้อที่ 2.3.3 คือ จะแบ่งสายเคเบิลออกเป็น 10 ช่วง ให้มีระยะในแนวราบที่เท่ากันและวัดค่าพิกัดที่ตำแหน่งจุดแบ่งเหล่านั้นรวมถึงจุดปลายทั้งสองด้าน ในขณะที่สายพาราโบลิคเคเบิลจะทำการวัดค่าพิกัดที่ปลายทั้งสองด้านและตำแหน่งที่ยึดติดกับสายแขวน

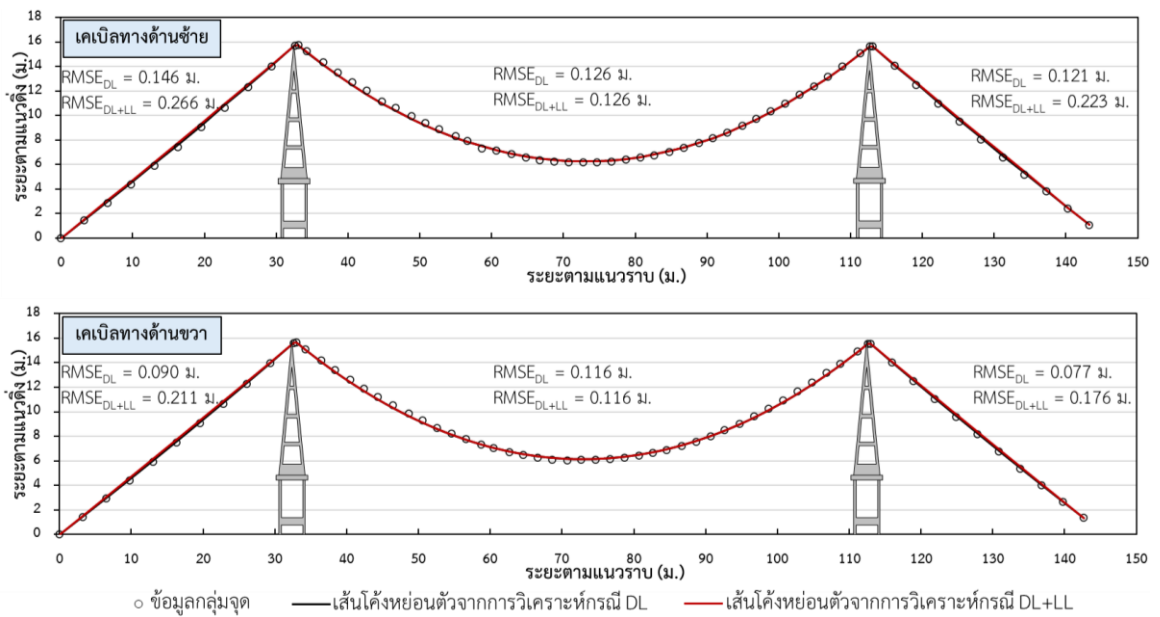


รูปที่ 6 การกำหนดชื่อเรียกเสาและสายเคเบิล

ทั้งหมดรวมเป็น 40 ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงมีความยาวในแนวราบต่างกันเล็กน้อยหลังจากนั้นใช้สมการกลศาสตร์ของเคเบิลตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.4 คำนวณหาเส้นโค้งหย่อนตัวให้มีความใกล้เคียงกันกับข้อมูลกลุ่มจุดมากที่สุด ซึ่งผลการเปรียบเทียบข้อมูลกลุ่มจุดกับเส้นโค้งหย่อนตัวที่วิเคราะห์ได้จะแสดงดังรูปที่ 7

จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติพบว่าสายเคเบิลทางด้านซ้าย SC1L MCL และ SC2L มีความยาวช่วงเท่ากับ 32.600 79.561 และ 30.140 เมตร ตามลำดับ และเคเบิลทางด้านขวา SC1R MCR และ SC2R มีความยาวช่วงเท่ากับ 32.600 79.520 และ 29.680 เมตร ตามลำดับ และจากเส้นโค้งหย่อนตัวที่วิเคราะห์ได้จากกรณีนี้น้ำหนักกระจายมีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกคงที่มีค่า RMSE ต่ำสุดเท่ากับ 0.128 และ 0.107 เมตร สำหรับเคเบิลตลอดทั้งเส้นทางด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ และ

สำหรับกรณีที่น้ำหนักกระจายเท่ากับน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจรจะได้ว่าเส้นโค้งหย่อนตัวที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.173 และ 0.146 เมตร สำหรับเคเบิลตลอดทั้งเส้นทางด้านซ้ายและขวาตามลำดับ ซึ่งค่าต่ำสุดที่คำนวณได้บ่งชี้ให้เห็นว่าเส้นโค้งหย่อนตัวที่วิเคราะห์ได้จากกรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่อย่างเดียวมีความใกล้เคียงกับข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติมากกว่ากรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งสอดคล้องกับสถานะการรับน้ำหนักจริงของโครงสร้างสะพานที่มีการควบคุมให้น้ำหนักบรรทุกจรมีน้อยที่สุด ณ เวลาที่ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติ หลังจากได้เส้นโค้งหย่อนตัวที่ใกล้เคียงที่สุดโดยการคำนวณต่ำสุดจากเคเบิลตลอดทั้ง 3 ช่วง จะสามารถแจกแจงค่าเฉพาะของแต่ละช่วงได้ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างกัน

3.2 ผลการประเมินแรงดึงภายในเคเบิลของสะพานแขวนต้นแบบ

จากเส้นโค้งหย่อนตัวที่วิเคราะห์ได้ตามรูปที่ 7 กรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่เกิดจากการปรับแรงดึงในแนวราบให้มีค่าเท่ากับ 105.21 และ 104.76 กิโลนิวตัน สำหรับสายเคเบิลทางด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ และสำหรับเส้นโค้งหย่อนตัวที่วิเคราะห์ได้ในกรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจร เกิดจากการปรับแรงดึงในแนวราบให้มีค่าเท่ากับ 447.71 และ 445.75 กิโลนิวตัน สำหรับสายเคเบิลทางด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ ซึ่งแรงดึงในแนวราบเหล่านี้สอดคล้องกับแรงดึงตามแนวแกนที่ตำแหน่งจุดต่ำสุดของพาราโบลาเคเบิล MCL และ MCR ตามหลักกลศาสตร์ของเคเบิล โดยจากสมการที่ (2) และ (4) จะสามารถคำนวณแรงดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสายเคเบิลในสภาวะน้ำหนักบรรทุกคงที่และสภาวะน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจรได้

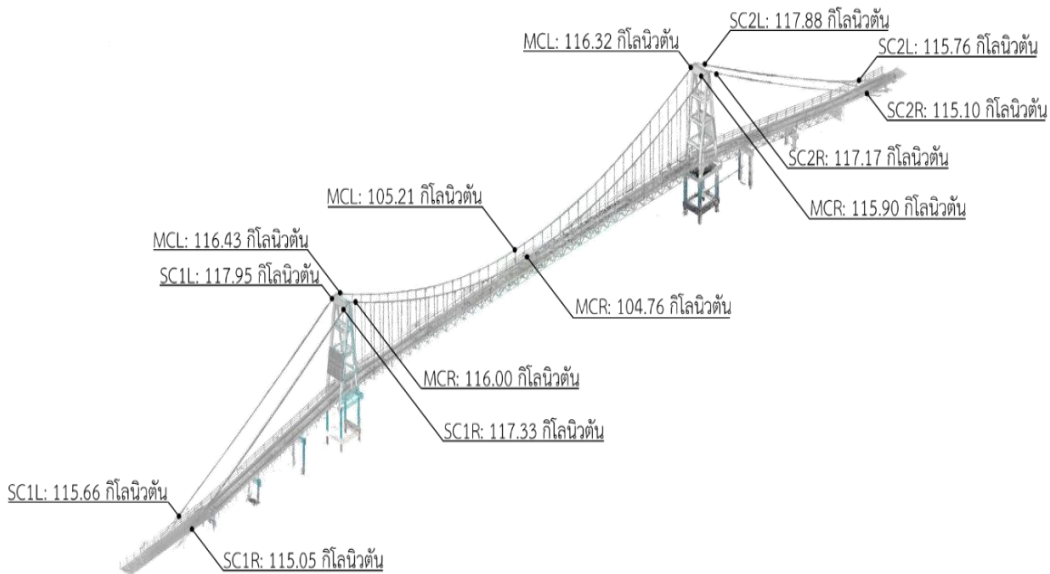
ตามรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์แรงดึงในสายเคเบิลภายใต้สภาวะน้ำหนักบรรทุกคงที่ดังรูปที่ 8 พบว่าแรงดึงสูงสุดของสายเคเบิลด้านซ้ายและด้านขวาเกิดขึ้นที่บริเวณจุดรองรับบนเสาสะพานหมายเลข 1 โดยมีค่าเท่ากับ 117.95 กิโลนิวตัน และ 117.33 กิโลนิวตัน ตามลำดับ สำหรับผลการวิเคราะห์ในกรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจรดังรูปที่ 9 พบว่าแรงดึงสูงสุดยังคงปรากฏอยู่ที่บริเวณเสาสะพานหมายเลข 1 เช่นเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 498.08 กิโลนิวตัน สำหรับสายเคเบิลด้านซ้าย และ 495.43 กิโลนิวตัน สำหรับสายเคเบิลด้านขวา

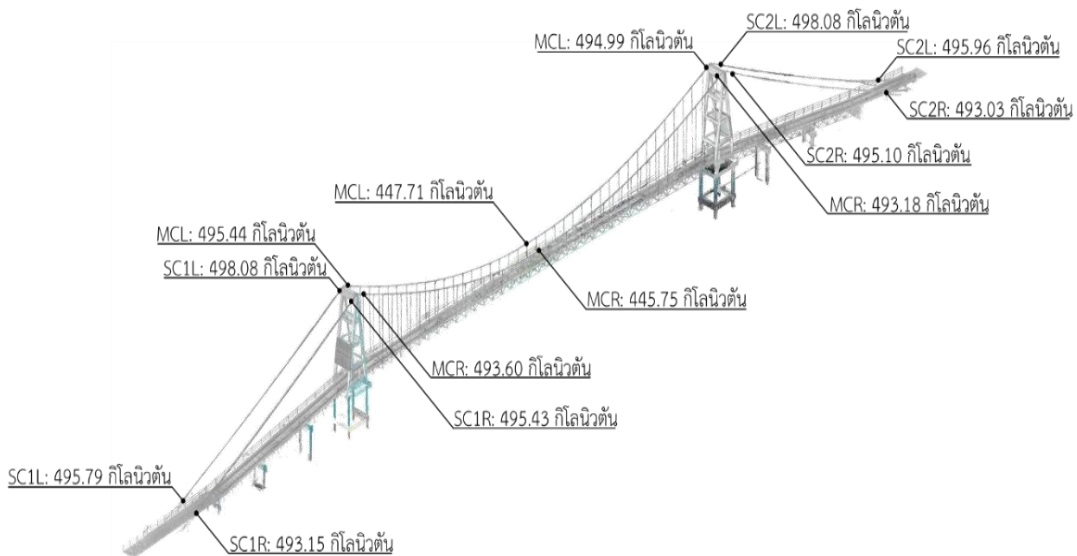
จากผลการประเมินแรงดึงของสายเคเบิลทั้งสองสภาวะน้ำหนักบรรทุกคงที่ได้ว่าความเค้นภายในเคเบิลที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 61.83–261.09 เมกะพาสคัล และ 61.50–259.70 เมกะพาสคัล (630.48–2,662.37

กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 627.16–2,648.19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) สำหรับสายเคเบิลทางด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ หรือหากพิจารณาเป็นอัตราส่วนแรงภายในสูงสุดต่อกำลังต้านทานจะมีค่า

เท่ากับ 0.621 และ 0.617 สำหรับสายเคเบิลทางด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างสะพานแขวนต้นแบบมีความปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักจรสูงสุด



รูปที่ 8 แรงดึงภายในของสายเคเบิลกรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่



รูปที่ 9 แรงดึงภายในของสายเคเบิลกรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร

3.3 ผลการเปรียบเทียบแรงดึงที่ประเมินได้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

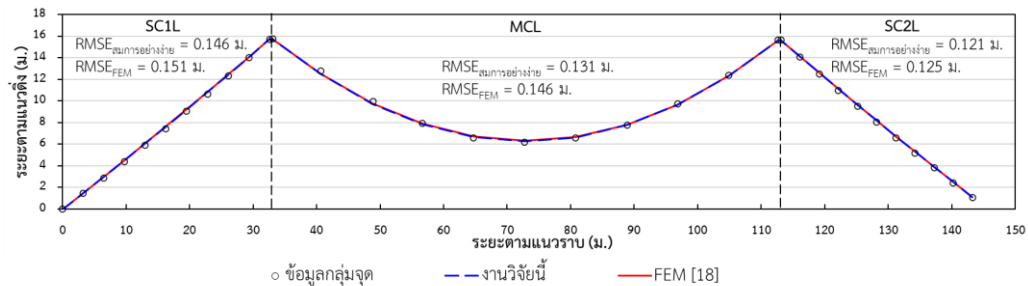
งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ โดยใช้สมการอย่างง่ายที่สอดคล้องกับหลักกลศาสตร์ของสายเคเบิลในการวิเคราะห์หาแรงดึงในสายเคเบิล ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยในอดีตที่นำเสนอวิธีการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ แต่ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในการวิเคราะห์ ซึ่งพิจารณาผลของสตีฟเนสด้านทานการดัด และมีการตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบกับท่อเหล็กขนาดเล็กที่มีการติดตั้งโหลดเซลล์เพื่อทำการวัดแรงดึงโดยตรง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาผลของสตีฟเนสด้านทานการดัดแบบจำลองให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาแต่ในกรณีที่มีแรงดึงภายในสูง ๆ หรือเส้นโค้งหย่อนตัวค่อนข้างตรง แบบจำลองทั้งสองจะให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบ [18] ในหัวข้อนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลจากวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้กับวิธีการตามงานวิจัยข้างต้น

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สายเคเบิลทางด้านซ้ายของสะพาน (SC1L MCL และ SC2L) โดยอาศัยสมการกลศาสตร์ของเคเบิลที่ได้จากการศึกษานี้กับผลการวิเคราะห์โดยละเอียดด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [18] จะได้ว่าผลการวิเคราะห์เส้นโค้งหย่อนตัวจากทั้งสองวิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากตามรูปที่ 10 โดยมีค่า RMSE ต่ำสุดเท่ากับ 0.141 และ 0.133 สำหรับสายเคเบิลตลอดทั้งเส้นที่วิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการอย่างง่าย ตามลำดับ ซึ่งสามารถ

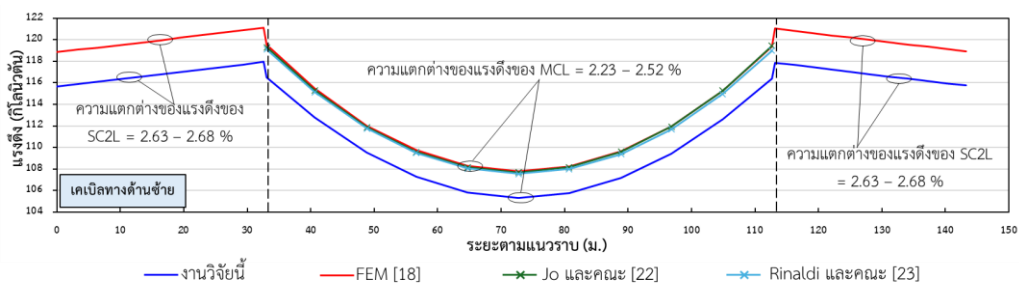
แยกคิดเป็น RMSE ของแต่ละช่วงได้ตามรูปที่ 10 ในขณะที่ผลการประเมินแรงดึงจากวิธีอย่างง่ายตามรูปที่ 11 มีความแตกต่างร้อยละ 2.52 สำหรับเคเบิลในช่วงที่มีการหย่อนตัวเป็นเส้นโค้งพาราโบลา และมีความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 2.63–2.68 สำหรับเคเบิลในช่วงที่มีการหย่อนตัวเป็นเส้นโค้งคาทินารี นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Jo และคณะ [22] ที่ประเมินแรงดึงจากระยะหย่อนตัวสูงสุด (Sag-based Formula) และงานวิจัยของ Rinaldi และคณะ [23] ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับวิธี FEM อย่างไรตามการประเมินแรงดึงจากระยะหย่อนตัวสูงสุดอาศัยข้อมูลเพียงจุดเดียว ซึ่งมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดสูง

ผลการเปรียบเทียบนี้บ่งชี้ว่าการประเมินแรงดึงโดยอาศัยสมการตามหลักกลศาสตร์ของเคเบิลที่มีกระบวนการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อนสามารถใช้ได้ดีกับช่วงพาราโบลาเคเบิลที่มีการหย่อนตัวมาก ส่วนในกรณีที่เคเบิลมีการหย่อนตัวด้วยน้ำหนักตัวเองของสายเคเบิลในลักษณะเส้นโค้งคาทินารีนั้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมินด้วยสมการคาทินารีสูงกว่า ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากเส้นโค้งหย่อนตัวในช่วงดังกล่าวมีลักษณะดังทำให้การหย่อนตัวมีค่าน้อย ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการประเมินสูงขึ้นได้จากการประเมินระยะการหย่อนตัวที่ยากขึ้น นอกจากนี้ผลของสตีฟเนสเนื่องจากการดัดที่ไม่ได้รวมอยู่ในสมการคาทินารีและสมการพาราโบลาเคเบิลทำให้เกิดความแตกต่างของผลการประเมินแรงดึง ซึ่งหากต้องการความถูกต้องของผลการประเมินมากขึ้นจำเป็นต้องใช้กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น [18] ที่มีผลของสตีฟเนสเนื่องจากการดัดรวมอยู่ด้วย

อย่างไรก็ตามผลการประเมินแรงดึงจากทั้งสองวิธี



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลทางด้านซ้ายของสะพานเทียบกับ FEM



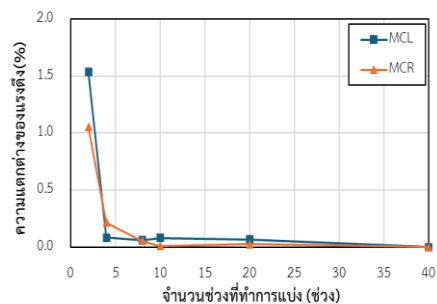
รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์แรงดึงในเคเบิลทางด้านซ้ายของสะพานเทียบกับ FEM

มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นวิธีอย่างง่ายสำหรับการประเมินแรงดึงเพื่อลดความซับซ้อนในขั้นตอนการวิเคราะห์ได้

3.4 ผลการประเมินแรงดึงภายในเคเบิลของสะพานแขวนต้นแบบจากการแบ่งช่วงเคเบิลที่ต่างกัน

จากการศึกษาการประเมินแรงดึงภายในเคเบิลของช่วงกลางสะพานที่เป็นพาราโบลาเคเบิลจะเห็นได้ว่าการวัดค่าพิกัดของสายเคเบิลหลักทุกตำแหน่งที่ยึดติดกับสายแขวน ทำให้สายเคเบิลถูกแบ่งออกเป็นช่วงมากถึง 40 ช่วง ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในกระบวนการวัดค่าพิกัดและการนำค่าพิกัดก่อนการวิเคราะห์ผล เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องวัดค่าพิกัดมีจำนวนมากขึ้น ในส่วนนี้จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของจำนวนการแบ่งช่วงของสายเคเบิลต่อแรงดึงใน

สายเคเบิลที่ประเมินได้ โดยการศึกษาจะแบ่งสายพาราโบลาเคเบิลออกเป็น 20 10 8 4 และ 2 ช่วง อันจะทำให้จำนวนตำแหน่งในการวัดค่าพิกัดสำหรับนำมาประเมินแรงดึงลดลง และเมื่อนำค่าแรงดึงตามแนวราบที่ประเมินได้จากการลดจำนวนการแบ่งช่วงลงในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกับกรณีที่สายเคเบิลถูกแบ่งออกเป็น 40 ช่วง จะได้ผลตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความแตกต่างของแรงดึงกับจำนวนการแบ่งช่วงของสายเคเบิล

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 12 เมื่อพิจารณาแรงดึงตามแนวราบที่ประเมินได้จากสายเคเบิลที่ถูกแบ่งออกเป็น 4-40 ช่วง โดยกำหนดให้น้ำหนักกระจายมีเพียงน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่เท่านั้นพบว่ามีความแตกต่างของผลการประเมินน้อยมาก โดยมีความแตกต่างสูงสุดเพียงร้อยละ 0.21 (223.92 นิวตัน) แต่สำหรับผลการประเมินแรงดึงจากสายเคเบิลที่ถูกแบ่งเพียง 2 ช่วง พบว่ามีความแตกต่างสูงสุดร้อยละ 1.53 (1,614.03 นิวตัน) และ 1.05 (1,100.50 นิวตัน) สำหรับพาราโบลาเคเบิลทางด้านซ้ายและด้านขวา ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดจากการใช้ค่าพิกัดเพียงจุดเดียวในการวิเคราะห์เส้นโค้งหย่อนตัวที่เหมาะสมทำให้ตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นโค้งหย่อนตัวที่ได้ตรงกับข้อมูลกลุ่มจุดพอดี แต่โดยรวมทั้งเส้นอาจมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามจากผลการเปรียบเทียบแรงดึงที่ประเมินได้ตามรูปที่ 12 ที่มีความแตกต่างสูงสุดเพียงร้อยละ 1.53 อาจบ่งชี้ได้ว่าข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติจากเทคโนโลยีสแกนวัตถุสามมิติมีความแม่นยำเพียงพอต่อการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลของสะพานแขวน

การศึกษานี้ยังบ่งชี้ได้ว่าจำนวนการแบ่งช่วงของสายเคเบิลสามารถลดลงให้เหลือ 8 หรือ 10 ช่วงได้ เพื่อลดภาระในการวิเคราะห์ โดยยังคงได้ผลการประเมินค่าแรงดึงที่มีความแม่นยำเพียงพอ ทั้งนี้ จำนวนการแบ่งช่วงที่แนะนำนี้จะทำให้ได้จำนวนค่าพิกัดที่ไม่น้อยเกินไป ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์ยังคงมีความน่าเชื่อถือ

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้เสนอทางเลือกใหม่ในการประเมินแรงดึงในสายเคเบิลแบบไม่สัมผัสผ่านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติร่วมกับหลักกลศาสตร์

ของสายเคเบิล โดยได้สาธิตขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ผ่านกรณีศึกษาสะพานแขวน ซึ่งผลการประเมินสามารถนำมาใช้เป็นดัชนีชี้วัดความปลอดภัยของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ วิธีการที่นำเสนอได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาผลของสตีเฟนด้านทานการดัด ซึ่งพบว่าให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าการลดความละเอียดของจำนวนช่วงแบ่งบนสายเคเบิลสามารถกระทำได้โดยยังคงให้ความแม่นยำในการประเมินที่เพียงพอ แม้ว่าวิธีการนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสายเคเบิลประเภทอื่น ๆ เช่น สะพานซิง หรือโครงสร้างหลังคาแบบซิงเคเบิลได้แต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญคือ ความจำเป็นในการระบุตำแหน่งจุดรองรับของสายเคเบิลให้ได้อย่างชัดเจน จึงอาจไม่เหมาะสำหรับกรณีจุดรองรับถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้สภาพพื้นที่ทำงานต้องเอื้ออำนวยต่อการตั้งเครื่องมือ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ในอนาคตด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV LiDAR) รวมถึงแนวทางการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ในการหาค่าพิกัดสายเคเบิลอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความรวดเร็วในกระบวนการประมวลผล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้กองทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2569 (รหัสโครงการ FRB690020/0164) นอกจากนี้ยังได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนกลยุทธ์เพื่อการ



พัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ร่วมกับทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai PBS. (2013, Apr.). A suspension bridge over the Pa Sak River collapsed due to misuse of its intended purpose. Thai PBS, Thailand. [Online]. Available: <https://www.thaipbs.or.th/news/content/165964> (in Thai).
- [2] Thairath. (2022, Oct.). Dramatic incident: Indian suspension bridge collapses in the middle, people fall into river and drown, 120 dead (video). Thairath, Thailand. [Online]. Available: <https://www.thairath.co.th/news/foreign/2540306> (in Thai).
- [3] Matchon. (2025, Aug.). A suspension bridge cable snapped in Xinjiang, killing 5 and injuring 24. China has dispatched an investigation team. Matchon, Thailand. [Online]. Available: https://www.matchon.co.th/foreign/news_5312699 (in Thai).
- [4] Z. Fang and J. Wang, "Practical formula for cable tension estimation by vibration method," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 161–164, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000200.
- [5] J. Wang, W. Liu, L. Wang, and X. Han, "Estimation of main cable tension force of suspension bridges based on ambient vibration frequency measurements," *Structural Engineering and mechanics*, vol. 56, no. 6, pp. 939–957, 2015, doi: 10.12989/sem.2015.56.6.939.
- [6] H. Nam and N. T. Nghia, "Estimation of cable tension using measured natural frequencies," *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 1510–1517, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.190.
- [7] C.-X. Qu, T.-H. Yi, Y.-Z. Zhou, H.-N. Li, and Y.-F. Zhang, "Frequency identification of practical bridges through higher-order spectrum," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 31, no. 3, pp. 04018018, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000840.
- [8] A. Pesci, G. Casula, and E. Boschi, "Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): Detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, no. 2, pp. 117–127, 2011, doi: 10.1016/j.culher.2011.01.002.
- [9] C.-J. Agustí, L. i G. Josep, C.-P. Sergio, and L.-P. Monica, "Using the terrestrial laser scanner and simple methodologies for geometrically assessing complex masonry vaults," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 36, pp. 247–254, 2019, doi: 10.1016/j.culher.2018.10.003.

- [10] P. Sairuamyat, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, S. Leelataviwat, and S. Chucheeepsakul, "Application of 3D laser scanning technology for preservation and monitoring of Thai pagoda: A case study of Wat Krachee Ayutthaya," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 463, 2020, Art. no. 012082, doi: 10.1088/1755-1315/463/1/012082.
- [11] P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, P. Sairuamyat, W. Tangchirapat, S. Leelataviwat, and S. Chucheeepsakul, "An alternative method for long-term monitoring of Thai historic pagodas based on terrestrial laser scanning data: A case study of Wat Krachee in Ayutthaya," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1155/2021/5587046.
- [12] C. Binzaitis, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, S. Leelataviwat, S. Chucheeepsakul, C. Tingsanchali, and C. Sudthongkhong, "Long-term monitoring and finite element analysis of the Pasana Chedi Wat Ratchapradit Sathimahasimaram Ratchaworawihan based on terrestrial laser scanning data," *The journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1–17, 2025 (in Thai), Art. no. 253-02737, doi: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.016.
- [13] D. Kim, Y. Kwak, and H. Sohn, "Accelerated cable-stayed bridge construction using terrestrial laser scanning," *Automation in Construction*, vol. 117, 2020, Art. no. 103269, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103269.
- [14] S. Artese and R. Zinno, "TLS for dynamic measurement of the elastic line of bridges," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, 2020, Art. no. 1182, doi: 10.3390/app10031182.
- [15] C. Binzaitis, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, and S. Leelataviwat, "Terrestrial laser scanning data for monitoring and inspection of Rama IX cable-stayed bridge," *presented at the 26th National Convention on Civil Engineering, Online conference, 23–25, Jun. 2021* (in Thai).
- [16] Y. Zhou, Z. Huang, Y. Wang, Z. Xiang, J. Zhou, and X. Zhang, "Measurement method of stay cable force based on measured cable shape using laser scanning," *China Journal of Highway and Transport*, vol. 34, no. 12, pp. 91–103, 2021, doi: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.12.008.
- [17] Y. Zhou, Z. Xiang, X. Zhang, Y. Wang, D. Han, and C. Ying, "Mechanical state inversion method for structural performance evaluation of existing suspension bridges using 3D laser scanning," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 37, no. 5,



- pp. 650–665, 2021, doi: 10.1111/mice.12765.
- [18] T. Srimontriphakdi, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, S. Leelataviwat, K. Klaycham, N. Poovarodom, N. Magteppong, and S. Chucheeesakul, “A non-contact approach for cable tension evaluation based on 3D laser scanning data and nonlinear finite element analysis,” *Measurement*, vol. 212, 2023, Art. no. 112680, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112680.
- [19] FARO Technologies, Inc. (2015). FARO laser scanner focus3D X330 manual. Lake Mary, FL. [Online]. Available: https://knowledge.faro.com/Hardware/Focus/Focus/User_Manuals_and_Quick_Start_Guides_for_the_Focus_Laser_Scanner.
- [20] FARO Technologies, Inc. (2023). FARO SCENE 2023.1 user manual. Lake Mary, FL. [Online]. Available: https://knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/User_Manual_for_SCENE?mt-learningpath=scene_downloads.
- [21] H. M. Irvine, Cable structures, The MIT Press, London, pp. 1-43, 1981.
- [22] H. C. Jo, S. H. Kim, J. Lee, H.-G. Sohn, and Y. M. Lim, “Sag-based cable tension force evaluation of cable-stayed bridges using multiple digital images,” *Measurement*, vol. 186, Art. no. 110053, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110053.
- [23] C. Rinaldi, M. Lepidi, F. Potenza, and V. Gattulli, “Identification of cable tension through physical models and non-contact measurements,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 205, Art. no. 110867, 2023, doi: 10.1016/j.ymssp.2023.110867.