

การพัฒนาระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแบบทันทีสำหรับโครงสร้างสะพาน Development of Real-Time Monitoring and Warning System for Bridge Structure

อิทธิพงษ์ เขมะเพชร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

Received: December 11, 2018; Revised: December 23, 2017; Accepted: December 24, 2018; Published: December 25, 2018

ABSTRACT – Engineering structure has been regarded as one of the physical aspects of societal and civil development and evolution. It also impacts life quality and safety of the civilian. Proper inspection and detection are thus crucial both during regular and unsafe events. A real-time monitoring and warning system for bridge structure (SPAN NeTwork – SPANNeT) has been developed and described in this paper. SPANNeT applies wireless sensor network, real-time and decentralized stream processing and weighted attack graph (WAG) based upon the measured bending strain. Major contributions include an effective, accurate and energy-aware data communication and real-time monitoring and warning mechanisms for existing bridge structures. SPANNeT has been tested and evaluated by means of computer-based simulation and on-site levels. According to the measurements, the reported strains are within the scale of 10 microstrains and the observed maximum values are 25 to 30 microstrains during normal operation. Given protocol provides at least 90% of data communication reliability. SPANNeT is capable of real-time data report, monitoring and warning efficiently conforming to the predefined thresholds which can be adjusted regarding user's requirements and structural engineering characteristics.

KEY WORDS -- Wireless sensor network; structural health monitoring system; data stream processing; weighted attack graph; real-time monitoring and warning

บทคัดย่อ -- โครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญต่อชุมชนและสังคม ทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต สวัสดิภาพ และความปลอดภัยของประชาชน ดังนั้น การเฝ้าระวังหรือตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม ทั้งในสภาวะการใช้งานตามปกติและเมื่อเกิดภัยพิบัติ ระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแบบทันทีสำหรับโครงสร้างสะพานได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานโดยการพิจารณาถึงค่าความเครียดตัดที่ตรวจวัดได้จากผลการทดสอบที่ได้ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือทางคอมพิวเตอร์ และโครงสร้างจริง พบว่าค่าความเครียดที่วัดได้ในช่วงเวลาปกติอยู่ในระดับ 10 ไมโครสเตรน และมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 25 ถึง 30 ไมโครสเตรน ชุดโปรแกรมที่มาพร้อมกับชุดอุปกรณ์เฝ้าวัดความเครียดให้ค่าความน่าเชื่อถือของการสื่อสารข้อมูลตั้งแต่ร้อยละ 90 ระบบสามารถรายงานผล เฝ้าระวัง และแจ้งเตือนแบบทันทีได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ สอดคล้องกับค่าขีดแบ่งซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการของผู้ใช้และลักษณะทางวิศวกรรมของโครงสร้าง

คำสำคัญ – เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย; ระบบตรวจสอบสภาพโครงสร้าง; การประมวลผลกระแสข้อมูล; กราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนัก; การเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแบบทันที

1. บทนำ

โครงสร้างทางวิศวกรรมมีความสำคัญต่อชุมชนและสังคม ทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต สวัสดิภาพ และความปลอดภัยของประชาชน รวมถึงต้องการการลงทุนสูงทั้งในการก่อสร้าง [1] และการบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้และปลอดภัย [2] นอกเหนือจากแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้าง และน้ำหนักจร (เช่น น้ำหนักจากคน และยานพาหนะ) แล้ว โครงสร้างยังได้รับผลกระทบโดยตรงจากภัยพิบัติและสภาพแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันมีการรายงานข่าวการสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินจากการวิบัติของโครงสร้างฯ ในประเทศอย่างต่อเนื่อง โดยมีสาเหตุหลักมาจากความประมาทและผิดพลาดของมนุษย์ [3] และจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ [4] ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนากระบวนการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมขึ้น โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ เช่น การประมวลผล และการสื่อสารข้อมูล ร่วมกับเครื่องมือตรวจวัดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมจริงได้ โดยการต่อยอดและบูรณาการเทคนิคต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor network) ซึ่งเป็นระบบเครือข่ายที่ประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดและเก็บข้อมูลจากตำแหน่งที่สนใจภายใต้สภาพการใช้งานที่เป็นมิตรหรืออันตราย และสถานีฐาน (Base station) ซึ่งเป็นตัวรับและประมวลผลข้อมูล เชื่อมต่อและติดต่อสื่อสารกันแบบไร้สาย สามารถดำเนินงานแบบอัตโนมัติ ได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้เพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านการตรวจสอบข้อมูลและสภาพทางสิ่งแวดล้อม สุขภาพ ความปลอดภัย ความมั่นคงทางการทหาร รวมถึงสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านพลังงานและทรัพยากรเป็นสิ่งต้องพึงตระหนักในการประยุกต์ใช้เครือข่ายดังกล่าว ซึ่งมีผลงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ได้พัฒนามาตรฐานของการสื่อสารข้อมูล หรือโพรโทคอลแบบประหยัดพลังงาน แต่ยังขาดการวิจัยเชิงประยุกต์ด้านการจัดการหรือประมวลผลกระแสข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์แบบทันที (Real-time data stream processing) ซึ่งมีปริมาณมากและเกิดแบบต่อเนื่องในช่วงที่เกิดภัยพิบัติต่อโครงสร้าง

บทความนี้จะได้กล่าวถึงการพัฒนาแบบฝังและแจ้งเตือนแบบทันทีสำหรับโครงสร้างทางวิศวกรรม (SPANNeT) โดยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เทคนิคการประมวลผลกระแสข้อมูลแบบทันที และกราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนัก รวมถึงการประยุกต์ใช้งานเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ซึ่งมีจำหน่ายในท้องตลาด และสามารถรายงานค่าการเสียรูปของชิ้นส่วนโครงสร้างอันเนื่องมาจากแรงกระทำ และสามารถบ่งชี้ถึงโอกาสในการเกิดความเสียหายในระดับชิ้นส่วนได้

โครงสร้างทางวิศวกรรมมีหลากหลายประเภทตามการใช้งาน เช่น เชื้อเพลิง อาคาร และสะพาน โครงการวิจัยนี้เน้นการพัฒนาสำหรับโครงสร้างสะพาน ซึ่งได้รับผลกระทบจากแรงกระทำในแนวดิ่งได้แก่ น้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง แรงกระทำจากยานพาหนะ และแรงกระทำด้านข้าง เช่น แรงลมแรงแผ่นดินไหว และแรงจากกระแสน้ำ สะพานมีความแข็งแกร่ง (Stiffness) น้อยกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีอายุการใช้งานนานกว่า และได้รับผลจากแรงกระทำน้อยกว่า นอกจากนี้ ระบบ SPANNeT ได้ถูกทดสอบและประเมินผลทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และโครงสร้างทางยกระดับบริเวณแยกสาธุประดิษฐ์ ซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 1

เนื้อหาส่วนที่เหลือประกอบไปด้วย หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงการจำลองโครงสร้างสะพานสำหรับการวิเคราะห์และพัฒนาระบบ หัวข้อที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบของระบบ SPANNeT ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ สถาปัตยกรรมของระบบ และเทคโนโลยีที่ใช้ รายละเอียดของการทดสอบระบบทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมจริง และบทสรุปแสดงไว้ในหัวข้อที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 1. ช่วงของทางยกระดับที่พิจารณาในการวิเคราะห์และทดสอบระบบ

2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ความเสียหายหรือการวิบัติของโครงสร้างทางวิศวกรรมมีผลกระทบต่อความปลอดภัยและชีวิตของประชาชน การศึกษารวบรวม และวิเคราะห์ถึงสาเหตุของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตเป็นวิธีการหนึ่งในการป้องกันและแก้ไขไม่ให้เกิดเหตุการณ์ซ้ำรอยในอนาคต จากการศึกษาสาเหตุของความเสียหายหรือการวิบัติของโครงสร้างสะพานเหล็กที่เกิดขึ้นตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1900 พบว่า ภัยธรรมชาติเป็นสาเหตุหลักและมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นโดยตลอด เช่นเดียวกับอุบัติเหตุ ในขณะที่ผลจากการขาดความรู้ และความผิดพลาดในการออกแบบ มีแนวโน้มลดลงและคงที่ ตามลำดับ [5]

การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับงานด้านการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมได้รับคสามสนใจมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประเด็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งของการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ซึ่งประเด็นปัญหาดังกล่าวสามารถสะท้อนผ่านอัตราความสำเร็จในการรับส่งข้อมูลภายใต้ความไม่แน่นอนของการแพร่สัญญาณวิทยุ ความถี่ในการสื่อสารข้อมูล จำนวนโหนด (Node) ที่พร้อมใช้งาน [6] รวมไปถึงจำนวนของการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดที่อยู่ติดกันหรือการสื่อสารสื่อสารข้อมูลแบบหลายทอด (Multi-hop) รูปแบบการสื่อสารข้อมูลดังกล่าวสามารถจัดข้อจำกัดด้านระยะทางที่สัญญาณสามารถแพร่ออกไปได้ แต่อาจก่อให้เกิดปัญหาใหม่เกี่ยวข้องกับการจราจรของข้อมูลปริมาณมาก จากการศึกษาพบว่า การสื่อสารข้อมูลแบบทอดเดียว (Single-hop) ซึ่งเซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานได้โดยตรง สามารถประหยัดพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดกว่าร้อยละ 50 และมีความน่าเชื่อถือของระบบกว่าร้อยละ 99.97 [7] นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าระยะทางที่สัญญาณสามารถแพร่ออกไปได้ภายใต้สภาพแวดล้อมในร่ม (Indoor) และกลางแจ้ง (Outdoor) มีค่าประมาณ 100 และ 400 เมตรตามลำดับ หากเซ็นเซอร์ส่งข้อมูลด้วยกำลังสูงสุด [8] นอกจากนี้ ระบบที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้กระบวนการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างที่จำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์แบบอนุกรมเวลาทั้งหมดลงในแหล่งเก็บข้อมูลถาวรก่อนการวิเคราะห์ความเสียหายหรือประมวลผลข้อมูล ซึ่งรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลดังกล่าว ส่งผลให้ระบบมีข้อจำกัดในการ

ประมวลผลและแสดงผลลัพท์แบบทันที (Real-time responses) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญต่อการตอบสนองอย่างทันทีทันใดในกรณีที่มีภัยพิบัติเกิดขึ้น นอกจากนั้นการจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์ทั้งหมด ยังอาจส่งผลให้เกิดปัญหาพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในแหล่งเก็บข้อมูลไม่เพียงพออีกด้วย [9] อีกทั้งเทคนิคการประมวลผลควรมีกลไกการทำงานแบบ “On-the-fly” กล่าวคือไม่จำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดในขณะที่ประมวลผล เพื่อแก้ไขปัญหาพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในแหล่งเก็บข้อมูลไม่เพียงพอและสนับสนุนการบริหารหน่วยความจำอย่างมีประสิทธิภาพ [10]

ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมได้ถูกพัฒนาขึ้น พร้อมทั้งได้รับการทดสอบ และประเมินผลการทำงานในสภาพแวดล้อมจริง เช่น สะพานโกลเดนเกต ประเทศสหรัฐอเมริกา [11] และสะพานจินโด ประเทศเกาหลีใต้ [12] ทั้งนี้ ในโครงการพัฒนาระบบเฝ้าระวังโครงสร้างสะพานโกลเดนเกตนั้นถือได้ว่าเป็นระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบรวมศูนย์ โดยแต่ละโหนดของเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับโครงสร้างสะพาน จะรวบรวมข้อมูลการสั่นสะเทือน พร้อมกับการส่งต่อข้อมูลดังกล่าวไปที่สถานีฐานซึ่งอยู่ ณ จุดศูนย์กลางเพื่อวิเคราะห์และประมวลผลกระบวนการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังสนับสนุนการส่งคำสั่งระยะไกล เพื่อควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์ ด้วยเทคนิควิธีการดังกล่าวทำให้การตรวจสอบข้อมูลของเซ็นเซอร์ถูกควบคุมให้กระทำได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นรวมทั้งระบบที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้สามารถเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือวิธีการดำเนินการของระบบได้อย่างทันทีทันใด [11] ในขณะที่ระบบตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานจินโด เป็นโครงการวิจัยล่าสุดที่พัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้าง แบบแยกศูนย์ โครงการนี้เกิดจากความร่วมมือของหน่วยงานวิจัยจากสามประเทศ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐเกาหลี โดยร่วมกันพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างที่มีโครงข่ายขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ประกอบด้วยการใช้งานโหนดของเซ็นเซอร์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของแพลตฟอร์ม iMote 2 จำนวน 113 ตัว ภายในโหนดประกอบด้วยเซ็นเซอร์หลากหลายประเภท อาทิเช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร่ง อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม รวมถึงซอฟต์แวร์กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของสถาปัตยกรรมเชิงบริการ [12]

3. การจำลองโครงสร้างสะพาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแบบทันทีสำหรับโครงสร้างสะพาน โดยกลไกการแจ้งเตือนนั้นขึ้นอยู่กับค่าขีดแบ่งที่สอดคล้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมและพฤติกรรมที่เกิดจากการรับแรงกระทำ ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการจำลองโครงสร้างทางยกระดับบริเวณแยกสาธุประดิษฐ์ ซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปพิจารณาคำแนะนำการคิดเซ็นเซอร์ และกำหนดค่าขีดแบ่ง โดยพิจารณาพร้อมกับมาตรฐานการออกแบบทางวิศวกรรมร่วมด้วย

3.1 สาระสำคัญของโครงสร้าง

การประยุกต์ใช้ระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนสำหรับโครงสร้างทางวิศวกรรมมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการเกิดความเสี่ยงและการวิบัติของโครงสร้างสำหรับในประเทศไทยนั้น ได้มีการนำระบบดังกล่าวมาใช้เฉพาะกับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ เช่น สะพานพระราม 8 ซึ่งอยู่ภายใต้ความดูแลของกรุงเทพมหานคร และได้ติดตั้งระบบในช่วงที่มีการก่อสร้าง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสะพานที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากการทางพิเศษแห่งประเทศไทย ซึ่งดูแลรับผิดชอบสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ได้แก่ สะพานพระราม 9 และทางยกระดับหลายแห่ง ซึ่งได้รับคำแนะนำและอนุญาตให้ดำเนินการ ณ โครงสร้างทางยกระดับช่วงบริเวณข้ามแยกสาธุประดิษฐ์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของทางพิเศษเฉลิมมหานคร (ระบบทางด่วนขั้นที่ 1) สายดาวคะนอง – ท่าเรือ โดยทางยกระดับดังกล่าวเป็นโครงสร้างประเภทคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กหรือลวดอัดแรงเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำจากภายนอก เปิดใช้งานมาแล้ว 20 ปี ดังรายละเอียดที่ให้ไว้ในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่า ทางยกระดับ บริเวณข้ามแยกสาธุประดิษฐ์ เป็นโครงสร้างประเภทคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กหรือลวดอัดแรงเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำจากภายนอก ประกอบไปด้วยองค์อาคาร (Member) หลัก ได้แก่ คานสะพาน (Girder) ซึ่งรับน้ำหนักจากผิวจราจร ไดอะแฟรม (Diaphragm) ซึ่งเป็นที่รองรับและค้ำคานสะพานในแนวนราบ และเสา (Column) ซึ่งถ่ายน้ำหนักจากคานสู่ฐานราก รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของทางยกระดับ



รูปที่ 2. โครงสร้างของทางยกระดับบริเวณข้ามแยกสาธุประดิษฐ์

ตารางที่ 1. สาระสำคัญของทางยกระดับบริเวณข้ามแยกสาธุประดิษฐ์

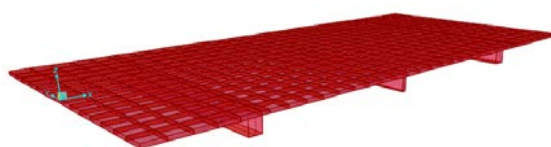
หัวข้อ	คำอธิบาย
1. ตำแหน่ง	อยู่ในเขตพระนคร บริเวณแยกสาธุประดิษฐ์
2. ประเภทของโครงสร้างหลัก	คอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรง
3. ความยาวของช่วงสะพาน (Span)	30 เมตร (วัดจากกึ่งกลางเสา) หรือ 20 เมตร (Clear span)
4. จำนวนคานสะพาน (Girder) ต่อทิศทางจราจร	7 ตัว
5. ระยะห่างระหว่างคานสะพาน	1.975 เมตร (วัดจากกึ่งกลางคาน)
6. คุณลักษณะของคานสะพาน (Girder)	- หน้าตัดรูปตัว I (ยกเว้นบริเวณปลายคานทั้งสองข้าง) - ความลึก 1.15 เมตร - คอนกรีตอัดแรง - มีทั้งหมด 6 แบบ (แบ่งตามการจัดวางและจำนวนของลวดอัดแรง)
7. คุณลักษณะของ	- หน้าตัดรูปตัว I (ยกเว้นบริเวณ

หัวข้อ	คำอธิบาย
ไดอะแฟรม (Diaphragm)	ปลายคานทั้งสองข้าง) - ความลึก 1.33 เมตร (อย่างน้อย) - ขึ้นส่วนหล่อสำเร็จรูป - ทั้งหมด 3 ตัวต่อความยาวช่วงสะพาน (ปลาย 2 ตัว และกึ่งกลาง 1 ตัว)
8. คุณลักษณะของเสา (Column)	- หน้าตัดรูป 8 เหลี่ยมทั้งหมด 6 แบบ - คอนกรีตเสริมเหล็ก - ความสูงตั้งแต่ 2 – 12.50 เมตร

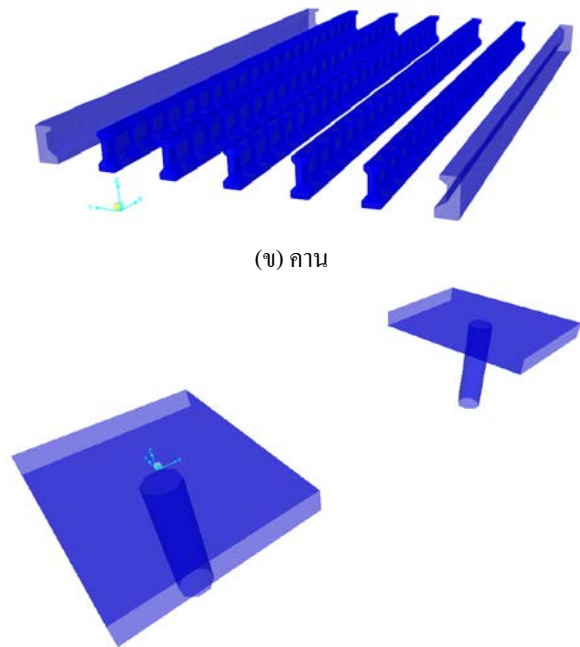
3.2 การจำลองชิ้นส่วนของโครงสร้าง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์กระบวนการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) โดยการแบ่งองค์อาคารออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ประกอบกันด้วยโปรแกรม CSiBridge 2014 รุ่น 16.1.0 [13] ซึ่งวางจำหน่ายในช่วงเดือนมกราคม 2557 รวมถึงการรวมน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO [14] ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับโครงสร้างสะพานโดยเฉพาะทั้งนี้ การพัฒนาแบบจำลองของโครงสร้างเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนย่อย ได้แก่ พื้น คาน และโครงสร้างส่วนล่างของอาคาร ซึ่งประกอบไปด้วยบึงสะพาน และเสา ดังแสดงในรูปที่ 3

นอกจากนี้ ได้มีการกำหนดทิศทางและความกว้างของช่องจราจรเพื่อให้แรงจากยานพาหนะสามารถกระทำต่อโครงสร้างสะพานได้โดยมีทั้งหมด 3 ช่องจราจร ความกว้างของแต่ละช่องจราจรมีค่าเท่ากับ 3,500 มิลลิเมตร



(ก) พื้น



(ข) คาน

(ค) โครงสร้างส่วนล่าง

รูปที่ 3. แบบจำลองชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน

3.3 การคำนวณน้ำหนักบรรทุก

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แรงกระทำต่อโครงสร้างตามมาตรฐาน AASHTO [14] โดยครอบคลุมแรงกระทำที่มาจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ หรือน้ำหนักของโครงสร้าง (DL) น้ำหนักบรรทุกจรเนื่องจากยานพาหนะ (LL) น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากลม ตามยาว (WS_X) น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากลม ตามขวาง (WS_Y) น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากลมกระทำต่อยานพาหนะ (WL) น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแผ่นดินไหว ตามยาว (QL_X) และ น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแผ่นดินไหว ตามขวาง (QL_Y) รวมทั้งสิ้น 10 กรณี พร้อมตัวคูณประกอบของแรง ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ ในการจำลองยานพาหนะที่ให้แรงกระทำต่อโครงสร้างสะพานได้พิจารณาน้ำหนักบรรทุกในรูปแบบอื่นที่มีความเหมาะสมกับประเทศไทยตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน พ.ศ. 2548 [15] เพื่อให้ทราบค่าแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกจากรถบรรทุกที่สอดคล้องกับประเทศไทย สำหรับแรงกระทำด้านข้าง งานวิจัยนี้ใช้หน่วยแรงลมขนาด 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นหน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นในระดับความสูงที่มากกว่า 40 เมตร ของโครงสร้างทั่วไป และใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับแรงแผ่นดินไหว โดย

การคำนวณแรงเฉือนพื้นฐานอาคารและกระจายแรงไปสู่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง

ตารางที่ 2. การรณมน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

กรณี	DL	LL	WS_X	WS_Y	WL	QL_X	QL_Y
Strength I	1.25	1.75					
Strength II	1.25	1.35					
Strength III (WS_X)	1.25		1.4				
Strength III (WS_Y)	1.25			1.4			
Strength V (WS_X)	1.25		0.4		1.0		
Strength V (WS_Y)	1.25			0.4	1.0		
Extreme I (LSP_X)	0.9	0.5				1.0	
Extreme I (LSP_Y)	0.9	0.5					1.0
Extreme I (LSP_X_0.3Y)	0.9	0.5				1.0	0.3
Extreme I (LSP_0.3X_Y)	0.9	0.5				0.3	1.0

3.4 ผลการจำลอง

หัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างที่สนใจ การพัฒนาแบบจำลองของชิ้นส่วนย่อยของโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุกทั้งในแนวดิ่ง ได้แก่ น้ำหนักจากยานพาหนะ และในแนวราบ ได้แก่ แรงลม และแรงแผ่นดินไหว โดยยึดตามมาตรฐานการวิเคราะห์และออกแบบทั้งในและต่างประเทศ ในหัวข้อนี้จะได้แสดงรายละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำตามที่กำหนด

การวิเคราะห์จะพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นกับคาน (Girder) ทั้ง 7 ตัว (G1 ถึง G7) ซึ่งมีความยาว (Clear span) เท่ากับ 20 เมตร เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำจากทั้งยานพาหนะ และพื้นของสะพานโดยตรง รวมถึงจะเกิดการเสียดรูปจากแรงกระทำดังกล่าวซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายได้ โดยในงานวิจัยนี้จะได้ติดตั้งเซ็นเซอร์ที่สามารถวัดค่าความเครียด (Strain) ที่แสดงถึงการยืดตัวหรือการหดตัว ณ บริเวณพื้นผิวของชิ้นส่วน

ค่าความเครียดสูงสุดที่วัดได้และตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุด โดยวัดจากตำแหน่งเริ่มต้น (ตำแหน่ง “ศูนย์”) ดังกล่าวจากการจำลองการทำงานของโครงสร้างแสดงได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3. ค่าความเครียดสูงสุดที่วัดได้และตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดจากการจำลองการทำงานของโครงสร้าง

คาน	ค่าความเครียดสูงสุด (ไมครอน)	ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุด
G1	300	10
G2	350	7.5 – 12.5
G3	300	7.5 – 12.5
G4	275	10
G5	250	10
G6	225	10
G7	150	7.5 – 12.5

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าความเครียดคดสูงสุดเกิดขึ้นช่วงกลางสะพานกล่าวคือ L/3 ถึง 2L/3 โดยค่าความเครียดคดสูงสุดของคาน G1, G4, G5 และ G6 เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง และ L คือ ความยาวของคาน และมีค่าเท่ากับ 20 เมตร ดังนั้น จะได้ติดตั้งเกจความเครียดที่คานสะพาน ณ ตำแหน่ง L/3 L/2 และ 2L/3 ในขั้นตอนของการทดสอบการทำงานของระบบฯ กับโครงสร้างจริง

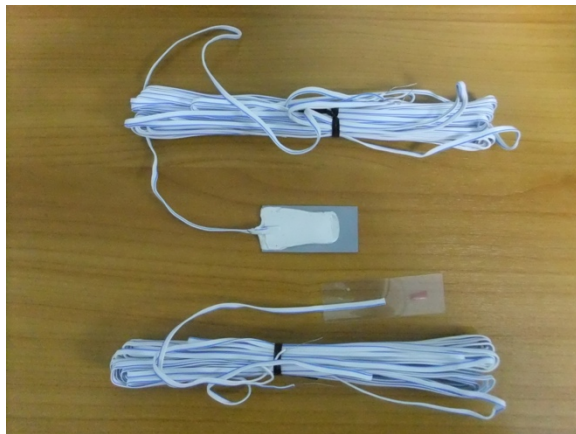
4. การพัฒนาต้นแบบของระบบ SPANNeT

หัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบของระบบตรวจสอบสภาพโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยจะได้นำกล่าวถึงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ สถาปัตยกรรมของระบบ และการประยุกต์ใช้เทคนิคกราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนัก

4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้

โครงสร้างทางวิศวกรรมประกอบไปด้วยหลากหลายชิ้นส่วน (Structural member) เช่น พื้น คาน เสา และฐานราก โดยแต่ละชิ้นส่วนจะเกิดการเสียดรูปจากการรับแรงกระทำ และสามารถตรวจวัดได้จากการชุดอุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ ระบบ SPANNeT ใช้ชุดอุปกรณ์เกจวัดความเครียด (Strain gauge) จากบริษัท Microstrain [16] เพื่อเฝ้าระวังการเปลี่ยนรูป (Deformation) ในระดับชิ้นส่วน ซึ่งมีความยาวเกจ (Gauge length) 5 มม. ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการส่งข้อมูลที่วัดได้แบบไร้สาย อย่างไรก็ตามความยาวเกจขนาด 5 มม. อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อค่าความเครียดที่วัดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อติดกับชิ้นส่วนที่ทำด้วยวัสดุที่ไม่มีความสม่ำเสมอ เช่น คอนกรีต ยกตัวอย่าง

เช่น ค่าความเครียดที่วัดได้อาจมีค่าน้อยเมื่อติดตัววัดความแรงไว้บนบริเวณพื้นผิวที่เป็นมวลรวมหยาบ ในทางตรงกันข้าม ค่าความเครียดที่วัดได้อาจมีค่ามากเมื่อติดเกจวัดความเครียดไว้บนบริเวณพื้นผิวที่เป็นซีเมนต์ (Cement) หรือมอร์ตาร์ (Mortar) เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดดังกล่าว จึงได้ติดเกจวัดความเครียดลงบนแผ่นเหล็กที่มีความบางแทนที่การติดลงบนผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อเพิ่มความยาวเกจและให้ได้จำนวนค่าสัญญาณที่นำมาคำนวณผลลัพธ์ (ค่าความเครียด) ที่มีความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้น แผ่นเหล็กขนาด 25 ซม. × 50 ซม. × 0.5 ซม. ได้ถูกนำมาใช้ และได้ติดตัววัดความขึ้นลงบนเกจวัดค่าความเครียดเพื่อป้องกันอีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4



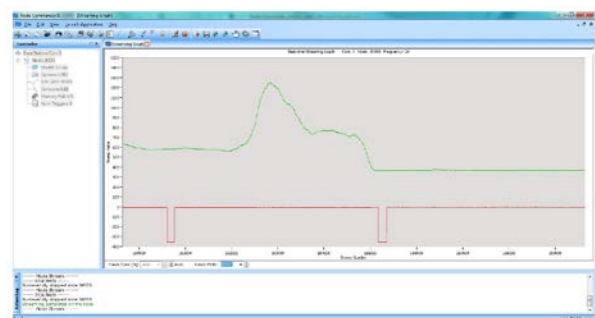
รูปที่ 4. การติดเกจวัดความเครียดลงบนแผ่นเหล็กพร้อมป้องกันความชื้น (บน) เปรียบเทียบกับเกจวัดความเครียดตามปกติ (ล่าง)

ทั้งนี้ เกจความเครียดจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ V-Link ซึ่งเป็นตัวรับสัญญาณค่าความเครียดที่ได้ โดยสามารถรองรับการเชื่อมต่อกับตัววัดความเครียดได้ทั้งหมด 4 ตัวเข้าด้วยกัน ค่าความเครียดที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐาน (Base station) แบบไร้สาย โดยใช้ความถี่ 2.4 GHz (Giga Hertz) รวมถึงสามารถแสดงผลที่ตรวจวัดได้ผ่านทางหน้าจอเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์ที่มาพร้อมกับชุดอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5. เกจวัดความเครียด พร้อมกับ V-Link และสถานีฐาน

นอกจากนี้ บริษัท Microstrain ได้พัฒนาชุดซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมประยุกต์ที่มีชื่อว่า “Node Commander” ซึ่งสนับสนุนการทำงานหลักของเครือข่ายเซ็นเซอร์ เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์ V-Link เข้ากับสถานีฐานที่เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การรายงานผลข้อมูลที่ตรวจวัดได้ และการตั้งค่าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการ ทั้งนี้ โปรแกรม “Node Commander” ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการทำงานบนแพลตฟอร์มของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6. หน้าจอของโปรแกรมประยุกต์ “Node Commander”

4.2 การออกแบบเชิงตรรกะของระบบ

การพัฒนาต้นแบบของระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานในงานวิจัยนี้ ได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลกระแสข้อมูลและกราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ความเสี่ยงและสภาพของโครงสร้างแบบทันที รวมทั้งสนับสนุนการประมวลผลใน

ลักษณะ “On-the-fly” กล่าวคือ ระบบจะประมวลผลข้อมูลที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์โดยอัตโนมัติ และปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีส่วนสำคัญในการประมวลผลแบบพลวัต โดยไม่มีการจัดเก็บข้อมูลในพื้นที่หน่วยความจำอย่างถาวร

ต้นแบบของระบบ สามารถแบ่งออกเป็นระบบงานย่อยได้ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ระบบย่อยส่วนการสร้างข้อมูลซึ่งจำลองการส่งกระแสข้อมูลเข้าสู่ระบบ (Stream generator) 2) กลุ่มของส่วนการประมวลผลกระแสข้อมูล (Set of stream processing units) และ 3) โปรแกรมประยุกต์สำหรับการเฝ้าระวังสภาพของโครงสร้าง (Structural Health Monitoring Application – SHM application) โดยในการทำงาน Stream generator จะทำหน้าที่จำลองการตรวจวัดค่าข้อมูลของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งประกอบด้วย ค่าความเครียด (Strain) และค่าความเร่งที่ตรวจวัดได้จากโครงสร้างสะพาน (Acceleration) สำหรับการพัฒนาคออดระบบในอนาคต ข้อมูลจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ทั้งสองประเภทจะถูกส่งเข้าสู่ระบบในลักษณะของกระแสข้อมูล จากนั้น ส่วนการประมวลผลกระแสข้อมูลจะนำกระแสข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผล ตัวดำเนินการกระแสข้อมูลหลายประเภท อาทิเช่น Stream query filters, Stream aggregation และ Pattern matching ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละส่วนการประมวลผลกระแสข้อมูล เพื่อให้ระบบสามารถวิเคราะห์และประมวลผลกระแสข้อมูลได้อย่างทันกาลและมีประสิทธิภาพ ในท้ายที่สุด SHM application จะเป็นส่วนของระบบที่มีหน้าที่ในการนำผลลัพธ์การประมวลผลแบบทันกาลแสดงผลต่อผู้ใช้ของระบบ

4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับการพัฒนาระบบ SPANNeT อยู่บนพื้นฐานของแนวคิดการประมวลผลแบบแยกศูนย์และระบบแบบกระจาย ทั้งนี้เพื่อสนับสนุนการทำงานบนแพลตฟอร์มที่หลากหลาย ภาษาโปรแกรมจาวา (Java) จึงถูกเลือกให้เป็นภาษาโปรแกรมหลักในการพัฒนาระบบ เนื่องจากสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการที่แตกต่างกัน ประเด็นความยืดหยุ่นของระบบเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่มีความสำคัญด้วยเหตุนี้ Apache ActiveMQ จึงถูกนำมาใช้ในโครงการสำหรับเป็นซอฟต์แวร์ตัวกลางที่ใช้ในการรับหรือส่งข้อมูล Message Oriented Middleware – MOM ของระบบ ActiveMQ มีคุณสมบัติในการรองรับโพรโทคอลสื่อสาร (Transport

protocol) แบบ Point-to-point และแบบ Streaming data อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการขยายขีดความสามารถของระบบเพื่อรองรับกับปริมาณข้อมูลหรือกระแสข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการทำงานของระบบ

ในส่วนของโพรโทคอลสื่อสาร Java Messaging Server (JMS) ถูกเลือกใช้เป็นโพรโทคอลในการรับหรือส่งข้อมูลภายในต้นแบบของระบบ จุดเด่นของ JMS คือ การสนับสนุนการส่งข้อมูลแบบ Streaming data โดยมีกลไกการรับประกันลำดับในการส่งและรับตัวข้อมูล (Order preserving) ส่งผลให้ JMS มีความสามารถตรงกับความต้องการของระบบ ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์และประมวลผลกระแสข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและทันกาลโดยการันตีลำดับของข้อมูล นอกจากนี้ ด้วยการทำงานภายในของระบบ ซึ่งประกอบด้วยส่วนการประมวลผลกระแสข้อมูล ซึ่งถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะที่สอดคล้องกับความต้องการของระบบประมวลผลกระแสข้อมูลโดยเฉพาะ ดังนั้น Esper (Stream processing engine) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบ Esper มีคุณสมบัติในการประมวลผลแบบพลวัต (Dynamic processing) และการสืบค้นกระแสข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous stream queries) อีกทั้ง Esper ยังจัดเตรียมตัวดำเนินการกระแสข้อมูล ทั้งในรูปแบบที่อยู่บนพื้นฐานของลำดับข้อมูล (Order based operations) และที่อยู่บนพื้นฐานของเวลาการประมวลผล (Time based operations) ดังนั้น Esper จึงสามารถสนับสนุนการประมวลผลกระแสข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องต่อความต้องการได้เป็นอย่างดี

รายการซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบ SPANNeT มีดังต่อไปนี้

- Java SE Development Kit 7
- Apache ActiveMQ 5.x.x
- Esper - Stream processing engine
- MySQL Database 5.x.x

4.4 สถาปัตยกรรมของระบบ

โครงสร้างสถาปัตยกรรมของระบบ SPANNeT สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนงานหลัก โดยแต่ละส่วนงานสามารถอธิบาย

บทบาทหรือหน้าที่ความรับผิดชอบภายในกระบวนการทำงานของระบบได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

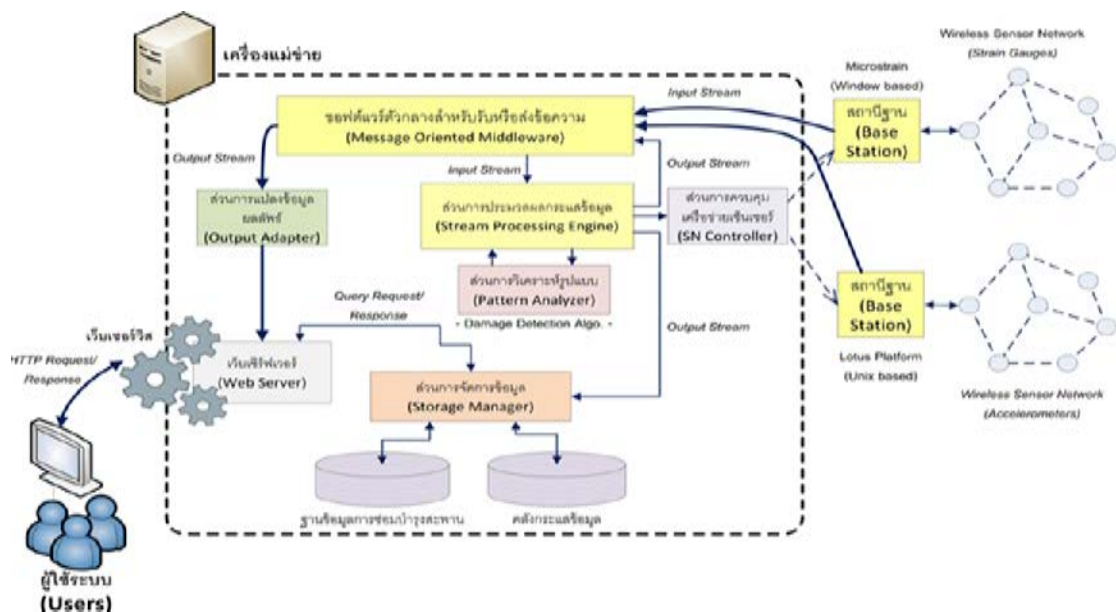
- เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย มีหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลของโครงสร้าง สนับสนุนการรับส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์และสถานีฐาน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เกจวัดความเครียดในการเฝ้าระวังการเสียรูปของชิ้นส่วน หรือ คาน ของโครงสร้างสะพาน และได้พิจารณาถึงการพัฒนาระบบในอนาคตโดยการประยุกต์ใช้ตัววัดความเร่งซึ่งสะท้อนถึงการเคลื่อนไหวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากแรงกระทำในระหว่างการออกแบบและพัฒนา ระบบ
- สถานีฐาน มีหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับข้อมูลจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยสถานีฐานจะรวบรวมกระแสข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อส่งต่อไปประมวลผลยังระบบประมวลผลกระแสข้อมูลต่อไป
- ระบบประมวลผลกระแสข้อมูล นับเป็นส่วนงานหลักที่ถูกติดตั้งอยู่บนเครื่องแม่ข่าย มีหน้าที่ประมวลผลกระแสข้อมูลและแสดงผลลัพท์การประมวลผลหรือการวิเคราะห์ข้อมูลแบบทันที โดยไม่จัดเก็บข้อมูลลงในแหล่งเก็บข้อมูลถาวร รวมถึงขั้นตอนวิธีสำหรับตรวจจับความเสียหายของโครงสร้างสะพาน ซึ่งมีหน้าที่ตรวจสอบสภาพการ

ใช้งานของโครงสร้างของระบบ เว็บเซิร์ฟวิส ทำหน้าที่เสมือนส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ โดยมีหน้าที่ที่สำคัญคือ เป็นผู้กำหนดทางผ่านเข้าออกของข้อมูลระหว่างโปรแกรมประยุกต์กับระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้าง

- โปรแกรมประยุกต์สำหรับการเฝ้าระวังสภาพของโครงสร้าง มีหน้าที่หลักในการแสดงผลข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยผู้ใช้สามารถเรียกดูข้อมูลได้แบบทันที

โครงสร้างสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ของระบบสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 7

สถานีฐานทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูลระหว่างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายกับระบบประมวลผลกระแสข้อมูลที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องแม่ข่าย อีกทั้งยังทำหน้าที่ในการส่งต่อกระแสข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ไปประมวลผลยังระบบประมวลผลกระแสข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนการประมวลผลย่อย โดยแต่ละส่วนทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขั้นตอนการทำงานเริ่มต้นด้วยการส่งกระแสข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมายังระบบผ่านทางสถานีฐาน โดยมีซอฟต์แวร์ตัวกลางสำหรับการรับหรือส่งข้อความ ที่ทำหน้าที่ในการรับกระแสข้อมูลนำเข้า จากนั้นกระแสข้อมูลนำเข้าจะถูกส่งต่อมายังส่วนการประมวลผล



รูปที่ 7. โครงสร้างสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ของระบบ

กระแสดัชนีข้อมูล ซึ่งเป็นส่วนงานหลักที่ควบคุมการประมวลผลกระแสดัชนีข้อมูล ซึ่งจะทำหน้าที่ร่วมกับส่วนการวิเคราะห์รูปแบบ (Pattern analyzer) ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างโดยวิเคราะห์ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้

ในกรณีที่ระบบตรวจสอบพบความเสียหายของโครงสร้าง ข้อความแจ้งเตือนที่อยู่ในรูปแบบของกระแสดัชนีข้อมูลส่งออก จะถูกจัดเก็บลงในคลังกระแสดัชนีข้อมูล (Event repository) ผ่านส่วนการจัดการข้อมูล (Storage manager) นอกจากนี้ ข้อความแจ้งเตือนจะถูกส่งกลับไปยังซอฟต์แวร์ตัวกลางสำหรับรับหรือส่งข้อความ เพื่อส่งต่อไปยังส่วนการแปลงข้อมูลผลลัพธ์ (Output adapter) เพื่อปรับปรุงรูปแบบของข้อมูลให้เหมาะสม ทั้งนี้ กระแสดัชนีข้อมูลส่งออกจะถูกส่งไปแสดงผลยังโปรแกรมประยุกต์สำหรับการเฝ้าระวังสภาพของโครงสร้าง เพื่อให้ผลลัพธ์การวิเคราะห์และการแจ้งเตือนเมื่อเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างแสดงผลต่อผู้ใช้ของระบบในแบบทันกาล

4.5 การประยุกต์ใช้เทคนิคกราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนัก
กราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Attack Graph – WAG) คือ ตัวแบบที่พัฒนามาจากต้นไม้สำหรับการตัดสินใจ ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านการวิเคราะห์ความปลอดภัยในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ โดยสามารถตรวจจับการโจมตีระบบจากผู้ไม่ประสงค์ดี บนพื้นฐานของการพิจารณาจากกลุ่มของเหตุการณ์อันนำไปสู่ความเสียหายในแต่ละกรณี [17]

การสร้าง WAG สำหรับระบบ SPANNeT ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน กล่าวคือ

1. การวิเคราะห์เงื่อนไขอันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างแต่ละจุดจากนั้นนำมาสร้างเป็นโหนดของ WAG โดยเงื่อนไขอันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับค่าความเครียดที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งแต่ละตำแหน่ง
2. การวิเคราะห์หาว่าวิกฤติที่จะส่งผลให้เงื่อนไขในขั้นตอนที่ 1 เป็นจริง โดยการพิจารณาระดับค่าความเครียด (Bending strain) ที่จะส่งผลต่อโครงสร้างตามสะพานตามมาตรฐาน AASHTO (American Association of State Highway and Transportation) [14] ทั้งนี้ กานที่ยังคงสภาพการใช้

งานจะมีค่าความเครียดค้อยู่ในระดับไม่เกิน 50 ไมโครสเตรน (ไมโครอน) และกานที่มีสภาวะเสื่อมเสี่ยงต่อความวิบัติจะมีระดับค่าความเครียดตั้งแต่ 200 ไมโครสเตรน หรือ ประมาณร้อยละ 60 ของค่าความเครียดสูงสุดที่ได้จากการจำลอง (350 ไมโครสเตรน (ไมโครอน)) ดังแสดงในตารางที่ 3 ขึ้นไป เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายอันไม่พึงประสงค์ต่อโครงสร้างจะใช้ระดับค่าความเครียดค้อยู่ที่ไม่เกินร้อยละ 80 ของค่าระดับความเครียดคดขึ้นต่ำที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง โดยจะแบ่งระดับความเครียดคดที่ตรวจสอบออกเป็น 3 ระดับตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4. ช่วงค่าความเครียดคดที่ใช้ตรวจสอบสภาพกานใน SPANNeT WAG

ระดับ	ช่วงความเครียดคดที่วัดได้	ความหมาย
1	0 – 50 ไมโครสเตรน	อยู่ในสภาวะดี
2	51 – 160 ไมโครสเตรน	อยู่ในสภาวะที่เฝ้าระวัง
3	ตั้งแต่ 160 ไมโครสเตรน ขึ้นไป	อยู่ในสภาวะอันตราย

5. ผลการทดสอบและการอภิปราย

การทดสอบการทำงานของระบบ SPANNeT แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน กล่าวคือ การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง ณ ทางยกระดับบริเวณแยกสาธุประดิษฐ์

5.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

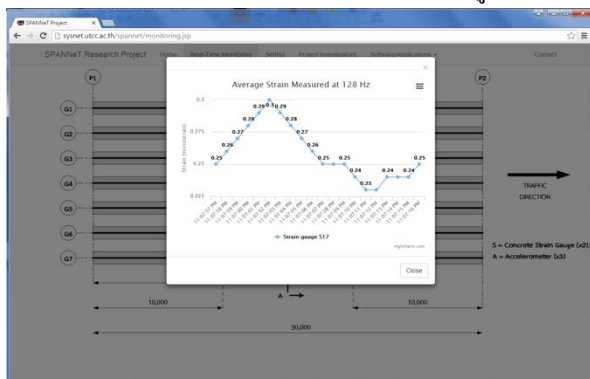
การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์หลักในการตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของระบบก่อนนำไปติดตั้งและทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง โดยการจำลองเหตุการณ์ผ่านค่าความเครียดที่ถูกสมมติขึ้น ผลการทำงานของระบบ แสดงไว้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8. หน้าจอการเฝ้าระวัง โดยแสดงข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ซึ่งอยู่ในระดับอันตราย (Strain Gauge S17 มีสีแดง พร้อมทั้งแจ้งเตือนความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น)

จากรูปที่ 8 พบว่า ระบบ SPANNeT แสดงค่าที่ตรวจวัดได้ตามเซ็นเซอร์หรือเกจวัดความเครียดที่ได้ถูกติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นส่วนหรือคาน จำนวน 7 ตัวด้วยกัน (G1 ถึง G7) โดยนำแบบแปลนของโครงสร้างมาประยุกต์ใช้ในการแสดงผลให้ง่ายต่อความเข้าใจ นอกจากนี้ ยังได้มีการรองรับการใช้งานเซ็นเซอร์ประเภทตัววัดความเร่ง เพื่อรองรับการใช้งานในอนาคต

ทั้งนี้ ค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียด S17 มีค่าสูงกว่าปกติและอยู่ในสถานะอันตราย โดยมีความเสี่ยงต่อการเสียหายของคาน ผู้ดูแลระบบหรือเฝ้าระวังโครงสร้างสะพานสามารถคลิกที่ S17 เพื่อดูค่าความเครียดแบบทันที (Real-time) ดังแสดงในรูปที่ 9

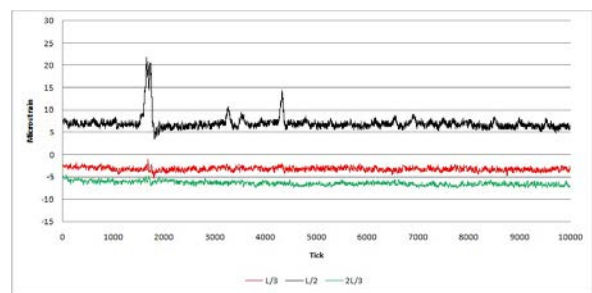


รูปที่ 9. หน้าจอการรายงานค่าที่ตรวจวัดได้จากเกจวัดความเครียดแบบทันที

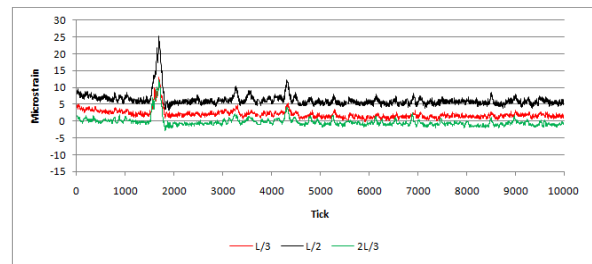
(ในกรณีที่ผู้ใช้คลิกที่สัญลักษณ์แสดงตำแหน่งของ Strain Gauge S17 เพื่อเรียกดูรายละเอียดข้อมูล)

5.2 ผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง

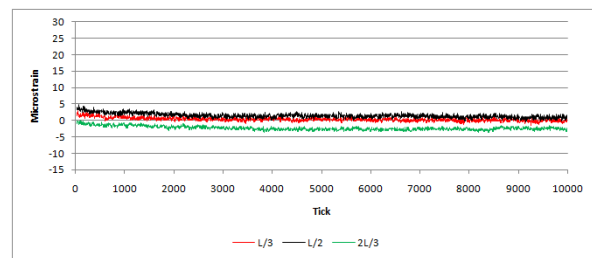
งานวิจัยนี้ได้เลือกโครงสร้างทางยกระดับช่วงบริเวณข้ามแยกสาทรประดิษฐ์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของทางพิเศษเฉลิมมหานคร (ระบบทางด่วนขั้นที่ 1) สายดาวคะนอง – ท่าเรือ อยู่ภายใต้การดูแลของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และได้ติดตั้งเกจวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ของคานในทั้งหมด 5 ตัว (G2 ถึง G6 ในรูปที่ 3) โดย L คือ ความยาวของคาน ผลการตรวจวัดค่าความเครียด แสดงในรูปที่ 10



(ก) คาน G2



(ข) คาน G4

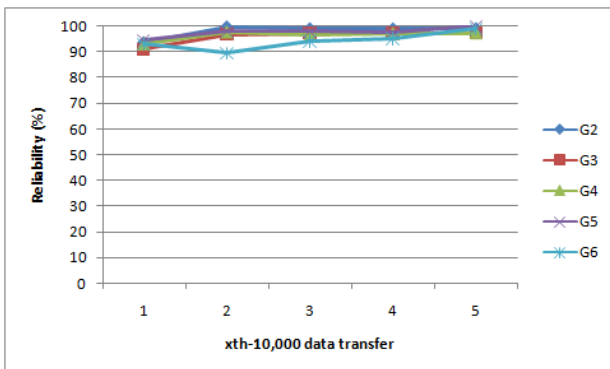


(ค) คาน G6

รูปที่ 10. ค่าความเครียดที่วัดได้จาก โครงสร้างสะพานจริง

จากรูปที่ 10 พบว่า ระบบ SPANNET สามารถวัดค่าความเครียดจากคานของโครงสร้างสะพานได้ โดยค่าความเครียดที่วัดได้จากคาน G6 มีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่เกจความเครียด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคาน (L/2) ให้ค่าสูงสุด และค่าความเครียดสูงสุดที่วัดได้ เกิดขึ้นที่คาน G4 โดยมีค่าประมาณ 25 ไมโครสเตรน ซึ่งอยู่ในช่วงที่ปลอดภัย และค่าสูงสุดดังกล่าวเกิดจากรถบรรทุกขนาดใหญ่วิ่งผ่าน ส่งผลให้พื้นผิวบริเวณด้านล่างของคานเกิดการยืดตัวสูง

นอกจากนี้ ยังได้ทดสอบความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของการสื่อสารข้อมูลของชุดอุปกรณ์เกจวัดความเครียด โดยพิจารณาความสำเร็จของการสื่อสารข้อมูลระหว่างโหนดกว่า 50,000 ครั้ง สามารถคำนวณได้จากร้อยละของจำนวนข้อมูลที่สถานีฐานรับได้ ต่อจำนวนข้อมูลที่ถูกส่งออกจาก V-Link รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการสื่อสารข้อมูลระหว่างชุดอุปกรณ์ V-Link ซึ่งได้ถูกจัดสรรให้กับคานแต่ละตัว (G2 ถึง G6) และสถานีฐาน



รูปที่ 11. ความน่าเชื่อถือของการสื่อสารข้อมูล

จากรูปที่ 11 พบว่า การสื่อสารข้อมูลมีค่าความน่าเชื่อถืออย่างน้อยร้อยละ 90 ซึ่งได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น สิ่งกีดขวาง และสภาพอากาศ

6. บทสรุป

โครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญต่อการรองรับการขยายตัวและความเจริญของชุมชนและสังคม ทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต สวัสดิภาพ และความปลอดภัยของประชาชน รวมถึงต้องการการลงทุนสูงทั้งในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้และปลอดภัย

นอกเหนือจากแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างฯ และน้ำหนักจรแล้ว โครงสร้างทางวิศวกรรมยังได้รับผลกระทบโดยตรงจากภัยพิบัติและสภาพแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันมีการรายงานข่าวการสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินจากการวิบัติของโครงสร้างฯ ในประเทศอย่างต่อเนื่อง โดยมีสาเหตุหลักมาจากความประมาทและผิดพลาดของมนุษย์ และจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ ดังนั้น การเฝ้าระวังหรือตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม ทั้งในสภาวะการใช้งานตามปกติและเมื่อเกิดภัยพิบัตินับเป็นปัญหาที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อประชาชนและประเทศ จึงควรมีการพัฒนากระบวนการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมขึ้น

ระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแบบทันทีสำหรับโครงสร้างสะพาน (SPANNET) ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความมั่นคงและปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่ใช้โครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรม และการประยุกต์ใช้เทคนิค เช่น เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย การประมวลผลกระแสข้อมูล เทคโนโลยีเว็บเซอร์วิส และ กราฟการโจมตีแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเป็นตัวแบบที่พัฒนามาจากต้นไม้สำหรับการตัดสินใจ (Decision tree) ในการพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งสามารถสื่อสารข้อมูล รายงานค่าที่ตรวจวัดได้ และแจ้งเตือนได้อย่างถูกต้อง โดยการพิจารณาถึงค่าความเครียดตัดที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งทดสอบและประเมินผลผลิตที่ได้ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือทางคอมพิวเตอร์ และโครงสร้างจริง

แบบจำลองของโครงสร้างทางยกระดับบริเวณข้ามแยกสารุประดิษฐ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ CSiBridge เพื่อพิจารณาถึงตำแหน่งการติดตั้งชุดอุปกรณ์ โดยค่าความเครียดสูงสุดเกิด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน เนื่องจากข้อจำกัดของความยาวเกจของชุดอุปกรณ์เกจวัดความเครียด จึงได้เพิ่มความถูกต้องของการวัดสัญญาณ โดยติดตั้งเกจความเครียดบนแผ่นเหล็ก แล้วจึงนำไปติดบนพื้นผิวคอนกรีต ระบบ SPANNET ได้ถูกนำไปติดตั้งที่โครงสร้างสะพานจริง พบว่า สามารถตรวจวัดและรายงานค่าความเครียดได้ โดยค่าความเครียดสูงสุดมีค่าประมาณ 25 ไมโครสเตรน (ไมครอน) ขนาดของค่าความเครียดตัดที่เกิดขึ้นกับคานแต่ละตัวขึ้นอยู่กับเส้นทางการสัญจรของยานพาหนะบนพื้นผิวการจราจร นอกจากผลิตชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์แล้ว ผู้ผลิตมักจะพัฒนาชุดโปรโตคอลและโปรแกรมประยุกต์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้

งาน และช่วยอำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้งาน ชุดอุปกรณ์แกจวัดความเครียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดโปรโตคอลสื่อสารที่ต้องการเส้นทางการเชื่อมต่อที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง และสื่อสารข้อมูลแบบทอเดียว ผลจากการทดสอบ พบว่า ความน่าเชื่อถือของการสื่อสารข้อมูลมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 90 ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในสภาพปกติ ทั้งนี้ มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อระบบในอนาคต เช่น การเพิ่มช่องทางการแจ้งเตือนผ่านทางโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อรองรับในกรณีที่เจ้าหน้าที่ไม่สามารถเห็นการรายงานผลการตรวจวัดค่าความเครียดผ่านทางหน้าจอของเครื่องคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการทดสอบระบบกับโครงสร้างประเภทอื่น เช่น โครงสร้างเหล็ก เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ในเชิงลึก และการทำนายความเสียหายและการวิบัติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประชาชาติธุรกิจออนไลน์, “สร้างเพิ่ม10 แห่ง สะพานเจ้าพระยา "กทม.-ปริมณฑล", 2556. [Online], Available: http://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1373518292, 2556. [Accessed Sept. 21, 2014].
- [2] ประชาชาติธุรกิจออนไลน์, “กทม.ทุ่มงบ 620 ล้านซ่อมสะพานเก่าทั่วกรุง”, 2556. [Online], Available: <http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/politics/local/20120423/448143กทม.ทุ่มงบ-620-ล้านซ่อมสะพานเก่าทั่วกรุง.html>. [Accessed Sept. 21, 2014].
- [3] เว็บไซต์สำนักข่าว ไอ.เอ็น.เอ็น., “สดง.ตรวจเหตุสะพานต่างระดับหนองขามถล่ม”, 2556. [Online], Available: <http://www.innnews.co.th/shownews/show?newscode=463209>. [Accessed Sept. 21, 2014].
- [4] เว็บไซต์เดลินิวส์, “ฝนถล่มน้ำป่าซัดสะพาน มอญสังขละบุรีพังมากขึ้น”, 2556. [Online], Available: <http://www.dailynews.co.th/thailand/222336>. [Accessed Sept. 28, 2014].
- [5] B. M. Imam and M.K. Chryssanthopoulos, “A Review of Metallic Bridge Failure Statistics”, In Proc. 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2010), Philadelphia, USA, 2010.
- [6] S. Jang, H. Jo, S. Cho, K.A. Mechitov, J. A. Rice, S.H. Sim, H. J. Jung, C.B. Yun, B. F. Spencer Jr. and G. Agha, “Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge Using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation”, *Smart Structures and Systems*, vol. 6, no. 5-6, pp. 439-459, 2010.
- [7] I. Khemapech, A. Miller, and I. Duncan, “An Energy Aware Protocol for Cyclic Monitoring Wireless Sensor Networks”, In Proc. 8th International Conference on Networking, Architecture, and Storage (IEEE NAS 2013), Xi’An, China, 2013, pp. 13-22.
- [8] I. Khemapech, “Feasibility Study of Direct Communication in Wireless Sensor Networks”. *Procedia Computer Science*, vol. 21, pp. 424-429, 2013.
- [9] W. Sansrimahachai, M. Weal and L. Moreau, “Stream ancestor function: A Mechanism for Fine-Grained Provenance in Stream Processing Systems”, In Proc. 6th IEEE International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS 2012), Valencia, Spain, 2012, pp. 245-256.
- [10] W. Sansrimahachai, L. Moreau and M. Weal, “An On-the Fly Provenance Tracking Mechanism for Stream Processing Systems”, In Proc. 12th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2013), Niigata, Japan, 2013, pp. 475-481.
- [11] S. Pakzad, G. L. Fenves, S. Kim and D. E. Culler, “Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring”, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 89-101, 2008.
- [12] J. W. Park, S. Cho, H. J. Jung, C. B. Yun, S. Jang, H. Jo, B. F. Spencer Jr., T. Nagayama and J. Seo, “Long-Term Structural Health Monitoring System of a Cable-Stayed Bridge Based on Wireless Smart Sensor Networks and Energy Harvesting Techniques”, In Proc. 5th World Conference of Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, 2010.

- [13] Computers & Structures, Inc., *CSiBridge 2014 v16.1.0*. [CD-ROM], CA, 2014.
- [14] ASSHTO, “AASHTO LRFD bridge design specifications,” 2012. [Online], Available: <http://utc2.edu.vn/Uploads/File/AASHTO%20LRFD%202012%20BridgeDesignSpecifications%206th%20Ed%20%28US%29.pdf>. [Accessed Aug. 21, 2014].
- [15] กองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง กรมทางหลวง, “การกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน”, 2548. [Online], Available: http://www.motorway.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=207:2011-03-23-12-11-13&catid=13:2011-12-16-16-32-20&Itemid=51. [Accessed Aug. 5, 2014].
- [16] LORD Sensing MicroStrain, “We build sensing systems,” 2014. [Online], Available: <http://www.microstrain.com>. [Accessed Aug. 21, 2014].
- [17] G. Louthan, M. Haney, P. Hardwicke, P. Hawrylak, J. Hale, "Hybrid Extensions for Stateful Attack Graphs", In Proc. 9th Annual Cyber and Information Security Research Conference (CISR'14), 2014, pp. 101-104.