

# การวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้การขยายหน้าตัดเสา

## Simulation Analysis of the Reinforced Earthquake Resistance of RC Building Structure Model with Glass Fiber Reinforced Polymer Using Column Section Enlargement

พิเชษฐ์ เกษศรี<sup>1</sup> อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ<sup>1\*</sup> ศักดิ์ชัย ศรีจันทร์ดำ<sup>2</sup> และรังษิ นันทสาร<sup>1</sup>

Pichet Ketsri<sup>1</sup> Anuchat Leeanansaksiri<sup>1\*</sup> Sakchai Srichandum<sup>2</sup> and Rangsi Nanthasan<sup>1</sup>

*Received: September 18, 2024; Revised: October 31, 2024; Accepted: October 31, 2024*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้การขยายหน้าตัดเสา อาคารที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น สังกัดกระทรวงศึกษาธิการ ซึ่งไม่ได้ออกแบบเพื่อรับกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ทำการจำลองพฤติกรรมของอาคารก่อนเสริมกำลังและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อย เพื่อประเมินสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Static) จากผลการศึกษาพบว่าระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (Bare Frame) เกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชั้น 2 ถึงชั้น 4 ของอาคารเรียน ซึ่งมีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน และมีค่าอัตราส่วนระหว่างแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อกำลังต้านทานที่รับได้ของชิ้นส่วน (Demand-Capacity Ratio) มากกว่า 1 ซึ่งไม่สามารถรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวได้ แต่เมื่อเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อย ทำให้อาคารเรียนมีความสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น 1.75 และ 1.73 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (BF) และมีค่า (DCR) ของการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยมีค่าต่ำกว่า 1 ดังนั้นการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสจึงเป็นทางเลือกที่สามารถใช้ในการทดแทนเหล็กข้ออ้อย ในการรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส; กำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว; วิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

<sup>2</sup> คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Northeastern University, Khonkaen

<sup>2</sup> Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen campus

\* Corresponding Author, Tel. 08 8508 9985, E - mail: anuchat.lee@neu.ac.th

## Abstract

This research aimed to study earthquake resistance model of reinforced concrete building structure strengthened with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) by using column section enlargement. The building used in the study was a 4-storey reinforced concrete school building under the Ministry of Education, which was not designed to earthquake resistance. The behavior of the reinforced concrete school building was simulated before and after strengthening with GFRP compared with deformed bars to evaluate capacity of reinforced concrete structure using Nonlinear Static. The study results were found that the capacity level of bare reinforced concrete school building frame (BF) caused failure at the plastic hinge point of reinforced concrete columns on the 2<sup>nd</sup> to 4<sup>th</sup> floors of school building, which had behavior of strong beams and weak columns and had more Demand-Capacity Ratio (DCR) value than 1, which could not earthquake resistance. However, when the school building was strengthened with GFRP and deformed bars, it had a capacity to resist at 1.75 and 1.73 times, respectively, comparing to bare reinforced concrete school building frame (BF), and having Demand-Capacity Ratio (DCR) value of reinforcement with GFRP and reinforced with deformed bars with lower value than 1. Therefore, the reinforcement with GFRP was an alternative that could be used to replace deformed bars in earthquake resistance effectively.

**Keywords:** Glass Fiber Reinforced Polymer; Earthquake Resistance; Pushover Analysis

## บทนำ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันแผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติบางพื้นที่ของประเทศไทยยังมีความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหวที่รุนแรง ซึ่งพร้อมจะสร้างความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนได้ถึงแม้ว่าได้กำหนดกฎ ระเบียบ เกี่ยวกับการก่อสร้างอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวไว้แล้วก็ตาม แต่ข้อกำหนดเหล่านั้นส่วนใหญ่มุ่งเน้นในเรื่องเกี่ยวกับการก่อสร้างอาคารขึ้นใหม่ มิได้มีบทบังคับย้อนหลังไปถึง อาคารที่มีอยู่เดิมให้ต้องประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้ต้านทานแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ ซึ่งหากอาคารที่มีอยู่เดิมเหล่านั้นไม่ได้รับการออกแบบและคำนวณให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวก็อาจเสียหายหรือไม่สามารถใช้งานได้เมื่อมีแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เวลา 18.08 น. ตามเวลาของประเทศไทยได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดศูนย์กลางในเบื้องต้นพบว่ามีจุดศูนย์กลางอยู่บริเวณตำบลทรายขาว อำเภอบ้านไร่ จังหวัดเชียงราย ละติจูด 19.685°N ลองจิจูด 99.687°E ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 ความลึก 7 กิโลเมตร ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี จากเหตุการณ์ครั้งนี้มีผู้เสียชีวิต 1 คนที่จังหวัดเชียงราย บาดเจ็บมากกว่า 100 คน พบความเสียหายเกิดขึ้นแก่บ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้างเป็นจำนวนมากและเป็นบริเวณกว้าง มีผลกระทบถึง 7 จังหวัด และการเกิดแผ่นดินไหวในครั้งนี้ทำให้เกิดแผ่นดินไหวตาม (Aftershock) ไม่น้อยกว่า 700 ครั้ง สร้างความเสียหายต่ออาคาร โบราณสถาน สถานที่ราชการ สาธารณูปโภค และบ้านเรือนของประชาชนเป็นจำนวนมากกระจายตัวหลายบริเวณ ในเขตอำเภอแม่ลาว อำเภอพาน อำเภอแม่สรวย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดแนวรอยเลื่อนพะเยา (Meteorological Department, 2023)

ผลการวิจัยที่ผ่านมา Worasuk and Lapying (2014) ได้ศึกษากำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารโดยการวิเคราะห์วิธีสถิตไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบกับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจากการศึกษาพบว่า การเคลื่อนที่ของอาคารที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นมีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นซึ่งให้ค่าตามจริงรวมถึงงานวิจัยของ Wattanakornkeaw et al. (2017) ได้ศึกษาการประเมินและเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

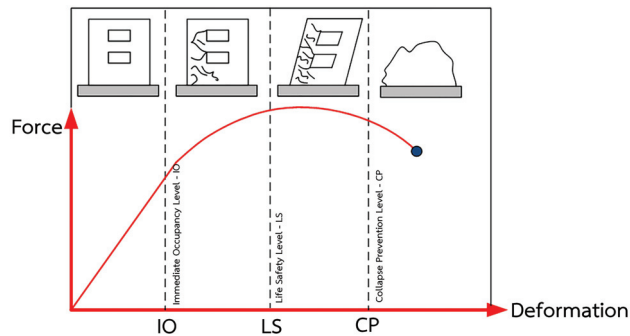
เพื่อดำเนินงานแรงแผ่นดินไหว แรงแผ่นดินไหวที่มีผลต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่ถูกสร้างขึ้นก่อนที่กฎกระทรวงจะออกมาบังคับใช้และตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยจากแรงแผ่นดินไหว โดยเลือกใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กระบบเสาแกน 2 ชั้น เป็นกรณีศึกษา สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร กำลังของชิ้นส่วนในรูปของกำลังรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดกระทำทั้งสองแกน (P-M-M Diagram) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเนื่องจากอาคารที่ศึกษาเป็นอาคารเก่าที่ไม่ได้ออกแบบไว้ให้รับแรงแผ่นดินไหว จะให้ค่า Demand-Capacity Ratio ทั้งของโครงสร้างเสาและแกนส่วนใหญ่จะมากกว่า 1 แสดงถึงการไม่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเดิมได้เมื่อพิจารณาออกแบบแล้วได้เลือกเสริมกำลังอาคารโดยวิธีการพอกด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งเสา และแกนตามมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ. 1303-57) (Department of Public Works and Town & Country Planning Ministry of Interior, 2014) ผลการศึกษาพบว่าความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีพอกเสามีความสามารถรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวได้เพิ่มขึ้น สำหรับผลงานวิจัยในต่างประเทศได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัยโดยงานวิจัยของ Hasan (2016) เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น และ 3 ชั้นเสริมกำลังโครงสร้างด้วยอุปกรณ์สลายพลังงานซึ่งทางเลือกนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร และสามารถซ่อมแซมหรือเปลี่ยนได้ง่ายหลังจากเกิดแผ่นดินไหว โดยได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว และยังมีงานวิจัยเทคนิคการเสริมกำลังการใช้โพลิเมอร์เสริมกำลัง (Aravind et al., 2013; Dong et al., 2013) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากอาคารได้รับผลกระทบแรงแผ่นดินไหว ผลการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังด้วยวัสดุจำพวกโพลิเมอร์ เสริมกำลังให้กำลังต้านทานของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้นแต่ด้านราคายังมีราคาสูงสำหรับตัววัสดุเสริมกำลังจำพวกโพลิเมอร์ ต่อมาในปี ค.ศ. 2023 มีการวิจัยศึกษาการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์เสริมโพลิเมอร์ เป็นงานวิจัยของ Rehman et al. (2024) และ Moretti (2023) จากการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์เสริมโพลิเมอร์ด้วยการพันรอบเสา มีความสามารถเพิ่มกำลังให้กับเสาคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงตระหนักถึงความสามารถของอาคารในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังที่ดีต้องสามารถลดการเสียดรระหว่างชิ้นได้สิ่งสำคัญคือ การคัดเลือกวิธีการเสริมกำลังที่เหมาะสมกับอาคารมากที่สุด ไม่อาจพิจารณาเพียงเทคนิคทางตรงเพียงอย่างเดียวควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ราคาค่าต้นทุน ระยะเวลา ประสิทธิภาพของโครงสร้างเดิม ผลกระทบต่อด้านสถาปัตยกรรม ผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์และอื่น ๆ สิ่งเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน จากการศึกษาในอดีตพบว่าวิธีการที่เหมาะสมในการศึกษาเรื่องการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อดำเนินงานแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารเขตภาคเหนือของประเทศไทย มีหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่น่าสนใจและมีการศึกษาวิจัยในประเทศไทยปริมาณน้อย ได้แก่ การเสริมกำลังด้วยวิธีการขยายหน้าตัดเสา โดยใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในการเสริมแทนเหล็ก ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่น คือ ไม่เป็นสนิม ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า รับแรงได้สูง และน้ำหนักเบา มีอัตราส่วนกำลังรับแรงต่อน้ำหนักสูงเหมาะในการติดตั้งและใช้งาน รวมถึงการขยายผลการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างต่อไปได้

### ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

**การตรวจสอบประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรง ให้กับโครงสร้างของอาคารเพื่อให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว**

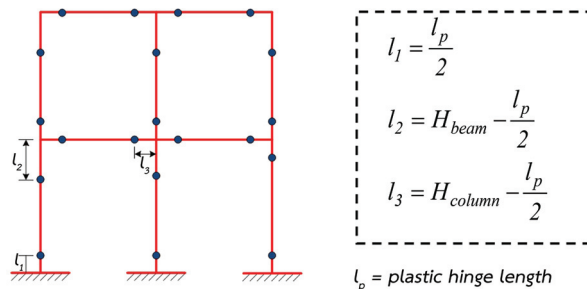
เป้าหมายระดับสมรรถนะของอาคารและระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวการกำหนดเป้าหมายระดับสมรรถนะเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคารซึ่งผู้ออกแบบและเจ้าของอาคารต้องมีข้อตกลงร่วมกันทั้งนี้การเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคารจะกระทำขึ้นเพื่อแก้ไขโครงสร้างอาคารให้มีความแข็งแรงเป็นไปตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่กำหนดได้ สำหรับการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับโครงสร้างอาคารเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้น มยพ. 1303-57 (Department of Public Works and Town & Country Planning Ministry of Interior, 2014) ได้จำแนกระดับสมรรถนะของอาคารไว้ 4 ระดับ ได้แก่ ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level - OP) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level - IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level - LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level - CP) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การระบุสมรรถนะของอาคารตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเสียรูป

### วิธีสถิติศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Pushover Analysis)

การประเมินสมรรถภาพโครงสร้างสำหรับแรงแผ่นดินไหวนั้นมีมากมายหลายวิธี โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิติศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Pushover Analysis) เป็นการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาและคานโดยหลักการรวมผลพลาสติก (Lumped Plasticity) โดยกำหนดตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกที่ปลายทั้งสองของเสาและคาน ดังรูปที่ 2 พฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ในรูปของความสัมพันธ์โมเมนต์ตัดและมุมหมุนได้ถูกกำหนดโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASCE41-13 (American Society of Civil Engineers, 2013)



รูปที่ 2 การกำหนดตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกในโครงข้อแข็ง

### วิธีดำเนินการศึกษา

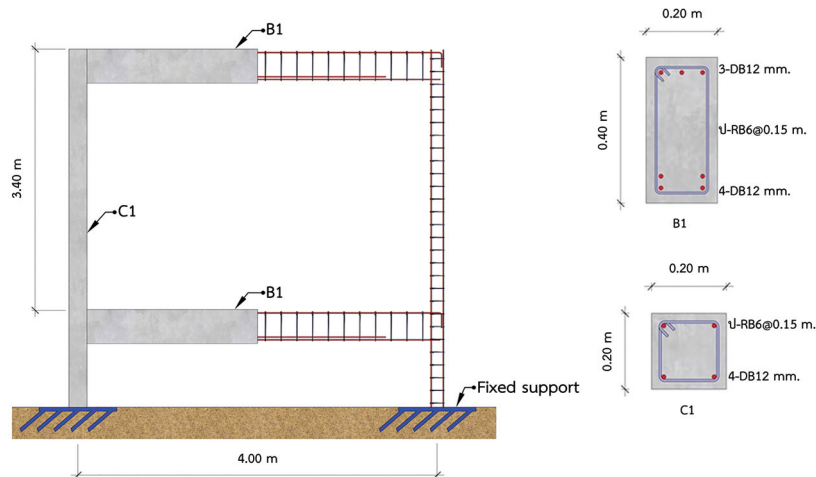
#### 1. ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กเส้นข้ออ้อยเสริมคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ค่ากำลังดึงที่จุดคราก (Fy) ค่ากำลังดึงประลัย (Fu) และอัตราส่วนปัวซอง ( $\mu$ ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุในการนำไปใส่ค่าคุณสมบัติในโปรแกรม ETAB2020 โดยงานวิจัยนี้ใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อย กำหนดใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบของวัสดุ GFRP ต้องทำการเตรียมโดยใช้เหล็กรูปพรรณชนิดแปดกลมดำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ทำการกรอกด้วยมอร์ตาร์กำลังสูงที่ปลายทั้ง 2 ด้าน หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ 14 วันรอการตั้งทดสอบโดยได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 7205 (American Society for Testing and Materials, 2006)

#### 2. ขั้นตอนการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ช่วงเสา (One Bay Frame)

ในขั้นตอนนี้จะใช้คุณสมบัติพื้นฐานที่ได้ทำการทดสอบ โดยกำลังรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย (DB) ขนาด 12 และเหล็กกลม (RB) ขนาด 6 มิลลิเมตร มีค่ากำลังที่จุดครากเท่ากับ 5,650 และ 2,460 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) มีค่ากำลังที่จุดครากเท่ากับ 5,140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มาจำลองพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการพิจารณาเลือกจำลองอาคารที่มีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน ด้วยการพิจารณาแบบก่อสร้างหลายรูปแบบ เช่น แบบอาคารพาณิชย์ แบบบ้านชั้นเดียว แบบบ้านสองชั้น แบบหอพัก เป็นต้น

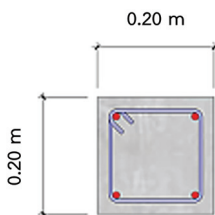
ซึ่งจากการพิจารณาแบบมีขนาดของโครงข้อแข็งมีขนาดความกว้าง 4.0 เมตร และความสูง 3.0 เมตร เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ  $0.20 \times 0.20$  เมตร ซึ่งมีอัตราส่วนของการเสริมเหล็กเท่ากับ 1.13 % คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ  $0.20 \times 0.40$  เมตร ซึ่งมีอัตราส่วนของการเสริมเหล็กเท่ากับ 1.00 % โดยพฤติกรรมดังกล่าวเป็นรูปแบบคานแข็งเสาอ่อน เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมการเสริมกำลังด้วยเทคนิคการขยายหน้าตัดเสาต่อไปดังรูปที่ 3



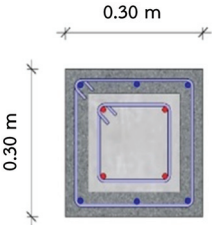
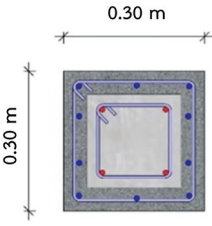
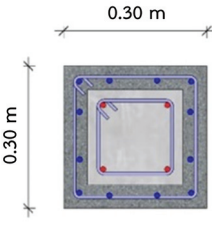
**รูปที่ 3** รูปแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ช่วงเสาที่ใช้ในการประเมินระดับสมรรถนะ

ทำการจำลองพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเสริมกำลังและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อย เพื่อประเมินสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Pushover Analysis) ในการผลักดันให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตามระดับสมรรถนะของระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level - IO) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติก รูปแบบการเสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดยึดตาม มยพ. 1303-57 (Department of Public Works and Town & Country Planning Ministry of Interior, 2014) ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการขยายหน้าตัดจากเดิม  $0.2 \times 0.2$  เมตร เป็น  $0.3 \times 0.3$  เมตร โดยได้กำหนดอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต ( $\rho$ ) อยู่ระหว่าง 0.01 - 0.04 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.0136 ถึง 0.032 เป็นไปตามข้อกำหนดดังรูปแบบการเสริมกำลังตามตารางที่ 1 หลังจากประเมินความสามารถในด้านกำลังต้านทานแผ่นดินไหวจะทำการเลือกค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่เหมาะสมด้านกำลัง นำไปใช้ในการเสริมกำลังของอาคารทั้งหลังในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตร้อยละ 1 - 4

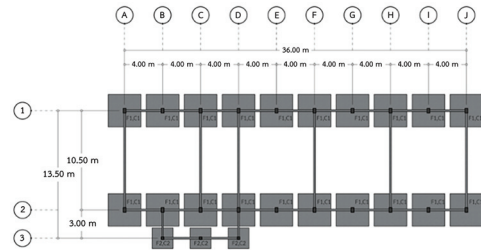
| รูปแบบการขยายหน้าตัดเสา                                                             | สัญลักษณ์     | พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่เพิ่ม (Ast)<br>หน่วย ตารางเซนติเมตร | อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต ( $\rho$ ) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|  | Non 4-DB12 mm | -                                                         | 0.0116                                                                           |

ตารางที่ 1 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตร้อยละ 1 - 4 (ต่อ)

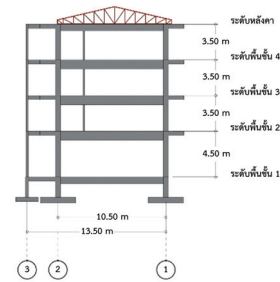
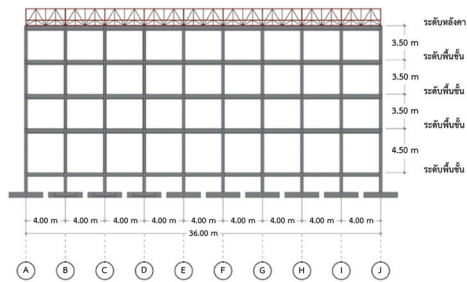
| รูปแบบการขยาย<br>หน้าตัดเสา                                                        | สัญลักษณ์                   | พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่เพิ่ม<br>(Ast)<br>หน่วย ตารางเซนติเมตร | อัตราส่วนระหว่างพื้นที่<br>หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่<br>หน้าตัดของคอนกรีต ( $\rho$ ) |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | 6-DB 12 mm<br>6-GFRP 12 mm  | 6.789                                                        | 0.0136                                                                                   |
|   | 10-DB12 mm<br>10-GFRP 12 mm | 11.314                                                       | 0.0226                                                                                   |
|  | 14-DB12 mm<br>14-GFRP 12 mm | 15.840                                                       | 0.0320                                                                                   |

### 3. ขั้นตอนการประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปแบบอาคารเรียนที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น 12 ห้องเรียน (ใต้ถุนโล่ง) รหัส สน.ศท.4/12 ปรับปรุง 2545 ซึ่งตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทยอาจได้รับผลกระทบที่กำหนดให้เป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวระดับสูง ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว ดังรูปที่ 4 อาคารตัวอย่างหลังนี้ได้ถูกการออกแบบโดยใช้วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design) ตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 โดยอาคารมีขนาด 13.50 x 36.00 เมตร ความสูง 16.70 เมตร ภายในอาคารแต่ละชั้นมีการก่อถ้ำรอบนอกระหว่างห้องด้วยผนังอิฐมวลเบาระเบียงเรียบทาสีเพื่อใช้เป็นห้องเรียน พื้นอาคารส่วนที่เป็นห้องเรียนเป็นพื้นสำเร็จรูปชนิดท้องเรียบ รับน้ำหนักบรรทุกทุกจร 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร พื้นระเบียงกันสาดและพื้นห้องน้ำเป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกจร 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โครงสร้างอาคารเป็นระบบคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กเสาอาคาร และคอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหล็กข้ออ้อยใช้เกรด SD30 เหล็กกลมใช้เกรด SR24 โดยมีข้อมูลทางด้านโครงสร้างของเสาดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3



(ก) โครงสร้างอาคารเรียน 3 มิติ และแบบแปลนอาคาร



(ข) โครงสร้างด้านหน้าและด้านข้างอาคาร

รูปที่ 4 โครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางโครงสร้างของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

| ชั้น           | เสา | ขนาดหน้าตัด | ปริมาณเหล็กเสริม | ระยะเรียงเหล็กปลอก (เมตร) | $\rho$ |
|----------------|-----|-------------|------------------|---------------------------|--------|
| 4 - 3          | C1  | 0.30 x 0.50 | 8-DB16           | 2 x 0.20                  | 0.0107 |
| 2              | C1  | 0.30 x 0.50 | 4-DB20<br>6-DB16 | 2 x 0.20                  | 0.0164 |
| ตอม่อ-ชั้นล่าง | C1  | 0.30 x 0.50 | 10-DB25          | 2 x 0.20                  | 0.0327 |

ตารางที่ 3 ข้อมูลทางโครงสร้างของคานอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

| คาน      | ขนาดหน้าตัด | ปริมาณเหล็กเสริม | ระยะเรียงเหล็กปลอก (เมตร) | $\rho$ |
|----------|-------------|------------------|---------------------------|--------|
| GB1,B1   | 0.15 x 0.40 | 6-DB12           | 0.20                      | 0.0113 |
| GB1',B1' | 0.20 x 0.40 | 6-DB12           | 0.15                      | 0.0085 |
| GB2,RB2  | 0.20 x 0.40 | 12-DB20          | 0.20                      | 0.0471 |
| GB3      | 0.20 x 0.40 | 6-DB16           | 0.20                      | 0.0151 |
| GB4      | 0.20 x 0.40 | 8-DB20           | 0.15                      | 0.0314 |
| B2       | 0.15 x 0.40 | 6-DB12           | 0.20                      | 0.0113 |
| B3       | 0.20 x 0.40 | 5-DB12           | 0.20                      | 0.0071 |
| B4',B8'  | 0.20 x 0.40 | 9-DB16           | 0.20                      | 0.0226 |
| B5       | 0.20 x 0.40 | 8-DB16           | 0.20                      | 0.0201 |
| B6       | 0.30 x 0.90 | 16-DB25          | 0.20                      | 0.0291 |
| B7       | 0.20 x 0.40 | 7-DB16           | 0.20                      | 0.0176 |
| B8       | 0.15 x 0.40 | 6-DB12           | 0.20                      | 0.0113 |
| B9       | 0.20 x 0.50 | 8-DB20           | 0.20                      | 0.0251 |
| B10      | 0.10 x 0.40 | 4-DB12           | 0.20                      | 0.0113 |

### ขั้นตอนการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กในการศึกษาได้ใช้ค่ากำลังของคอนกรีตเท่ากับ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร วิเคราะห์อาคารเรียนด้วยแรงต้านข้างก่อนเสริมกำลังและหลังเสริมกำลัง โดยใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต ( $\rho$ ) ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 2 มาทำการประเมินสมรรถนะด้วยวิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Pushover Analysis) ในการผลักดันให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตามระดับสมรรถนะของระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level - IO) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติก โดยการศึกษาจะใช้วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงโหมด (Response Spectrum Analysis) ในการหาค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคาร (Target Roof Displacement) ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในการศึกษา ใช้ค่าในพื้นที่ภาคเหนือในการวิเคราะห์ โดยกำหนดใช้ที่ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ซึ่งมีค่า  $S_s$  เท่ากับ 0.884 และ  $S_1$  เท่ากับ 0.22

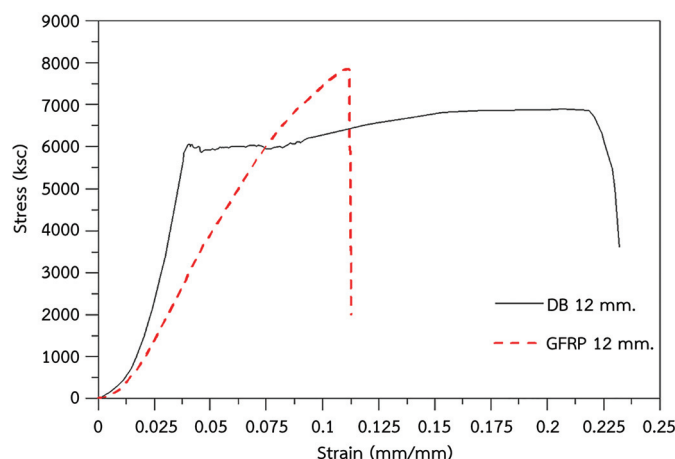
## ผลการศึกษา

### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กเส้นข้ออ้อยเสริมคอนกรีต (DB) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD30 ทำการทดสอบวัสดุทั้ง 2 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM D 7205 (American Society for Testing and Materials, 2006) ผลการทดสอบดังตารางที่ 4 และแสดงผลของกำลังรับแรงดึงของวัสดุทั้ง 2 ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

| คุณสมบัติของวัสดุ                                         | วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส<br>(GFRP)<br>ขนาด 12 มิลลิเมตร | เหล็กข้ออ้อย (DB)<br>ขนาด 12 มิลลิเมตร |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)                     | 2,110                                                   | 7,850                                  |
| กำลังจุดคราก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)                  | 5,140.25                                                | 5,650                                  |
| กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)          | 8,567                                                   | 6,720                                  |
| โมดูลัสยืดหยุ่น $\times 10^6$ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) | 0.48                                                    | 2.04                                   |



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กข้ออ้อย (DB)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กข้ออ้อย (DB) มีค่าเท่ากับ 8,567 และ 6,720 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) ที่ได้ทำการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Saeed (2016) และ Quayyum (2006) ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดอยู่ในช่วง 8,000 - 10,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่ากำลังที่จุดครากของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กข้ออ้อย (DB) มีค่าเท่ากับ 5,140.25 และ 5,650 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในการพิจารณาค่ากำลังที่จุดครากของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) เนื่องจากพฤติกรรมของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) จะมีแนวโน้มของกราฟในแนวเส้นตรงซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะอยู่ในช่วงอีลาสติก ดังนั้นในการหาค่ากำลังที่จุดครากจึงใช้หลักการของ Leeanansaksiri et al. (2018) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าวัสดุที่มีความเปราะจะมีแนวโน้มของกราฟในช่วงอีลาสติกเพียงอย่างเดียวจากนั้นวัสดุจะเกิดการแตกหักเสียหายโดยได้กำหนดให้ใช้ค่ากำลังที่จุดครากเท่ากับ  $0.6F_y$  และจากรูปที่ 5 เป็นกราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กข้ออ้อย (DB) พบว่าเหล็กข้ออ้อย (DB) มีความยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) เป็นอย่างมาก กำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) จะสูงกว่าร้อยละ 21.56 และมีความหนาแน่นต่ำกว่าร้อยละ 73.12 แสดงให้เห็นถึงน้ำหนักที่เบากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อย (DB) จากคุณสมบัติดังกล่าวได้นำไปทำการจำลองกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

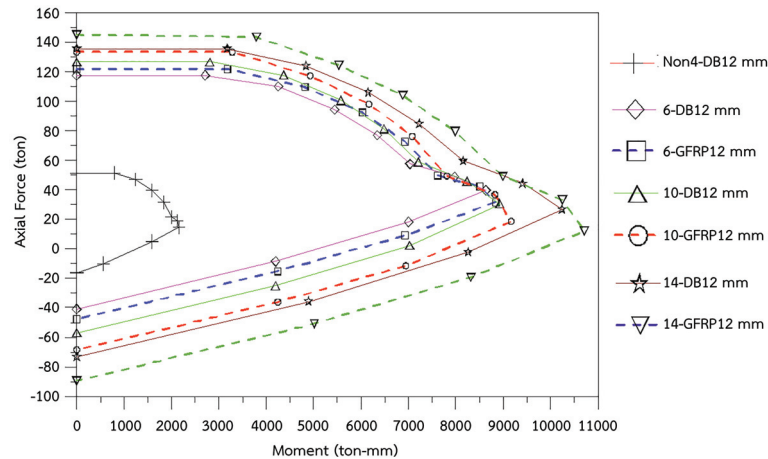
## 2. ผลการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ช่วงเสา (One Bay Frame)

ผลการจำลองพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเสริมกำลังและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) เปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อย (DB) ด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสา ได้ผลการวิเคราะห์แรงภายในหน้าตัดเสา ดังตารางที่ 5 และแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของหน้าตัดเสาที่ใช้ในการจำลอง ดังรูปที่ 6 ซึ่งมีการควบคุมอัตราส่วนของการเสริมเหล็กในหน้าตัดเสา 0.013 - 0.032 จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการขยายหน้าตัดเสาค่ากำลังรับแรงที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของการเสริมเหล็กในหน้าตัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ranjan and Dhiman (2016) และ Talwekar et al. (2018) ซึ่งได้ทำการจำลองโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการขยายหน้าตัด สำหรับการเสริมกำลังด้วยการขยายหน้าตัดเสาด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมพบว่ากำลังรับแรงในหน้าตัดเสามีค่าสูงกว่าการใช้เหล็กเพียงเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 5.56 6.41 และ 6.23 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของการเสริมเหล็กในหน้าตัดเดียวกัน

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์แรงภายในหน้าตัดเสา

| สัญลักษณ์     | Axial Force (ton) | Moment (ton-mm) | กำลังที่เพิ่มขึ้น (%) |
|---------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Non 4-DB12 mm | 51.36             | 2,162.27        | 0                     |
| 6-DB12 mm     | 117.80            | 8,633.54        | 56.40                 |
| 10-DB12 mm    | 126.72            | 8,931.33        | 59.47                 |
| 14-DB12 mm    | 135.65            | 10,239.68       | 62.14                 |
| 6-GFRP12 mm   | 121.82            | 8,512.46        | 57.84                 |
| 10-GFRP12 mm  | 133.43            | 9,168.01        | 61.51                 |
| 14-GFRP12 mm  | 145.04            | 10,714.49       | 64.59                 |

หมายเหตุ Non คือ หน้าตัดเดิมที่ไม่มีการขยายหน้าตัด  
DB คือ เหล็กข้ออ้อย  
GFRP คือ วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส



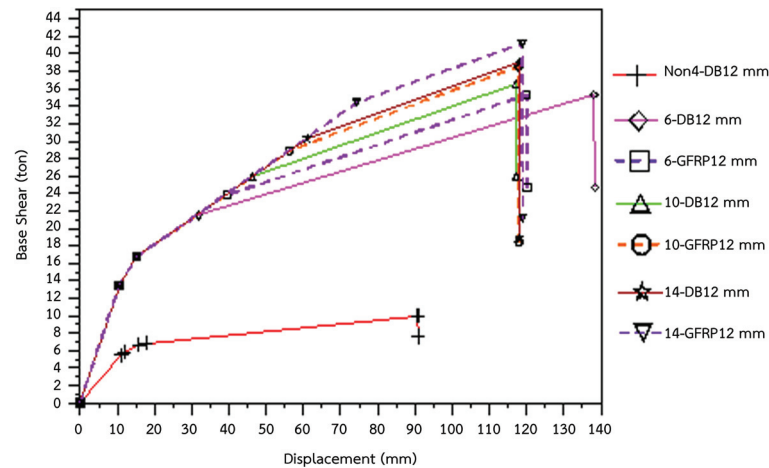
รูปที่ 6 กราฟแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของหน้าตัดเสาที่ใช้ในการจำลอง

จากการประเมินระดับสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ฐานและการเคลื่อนตัวของโครงข้อแข็งดังรูปที่ 7 จากผลการศึกษาพบว่า รูปแบบของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า Non 4-DB12 mm เกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 8(ก) แสดงให้เห็นว่าโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่ามีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน (Strong Beams and Weak Columns) ซึ่งไม่ได้ออกแบบเพื่อดำเนินงานแรงแผ่นดินไหว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเสาหน้าตัดที่ไม่มีการเสริมกำลัง Non 4-DB12 mm กำลังรับแรงกระทำที่ฐานที่ได้มีความสอดคล้องกับหน้าตัดกราฟแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) อย่างมีนัยสำคัญ

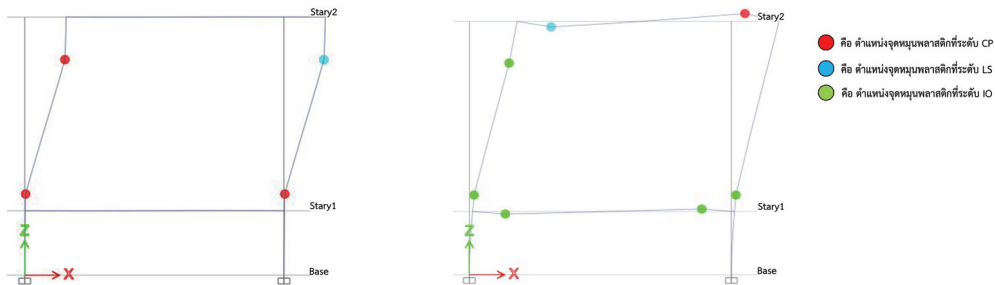
ตารางที่ 6 ผลการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

| Type          | Base Shear (ton) | กำลังที่เพิ่มขึ้น (%) | Displacement (mm) | $\rho$ |
|---------------|------------------|-----------------------|-------------------|--------|
| Non 4-DB12 mm | 9.96             | -                     | 90.78             | 0.0113 |
| 6-DB12 mm     | 35.25            | 72                    | 138.18            | 0.0136 |
| 10-DB12 mm    | 36.61            | 73                    | 117.25            | 0.0226 |
| 14-DB12 mm    | 39.01            | 74                    | 118.04            | 0.0320 |
| 6-GFRP12 mm   | 35.25            | 72                    | 120.01            | 0.0136 |
| 10-GFRP12 mm  | 38.56            | 74                    | 117.82            | 0.0226 |
| 14-GFRP12 mm  | 41.19            | 76                    | 118.81            | 0.0320 |

สำหรับพฤติกรรมหลังการเสริมกำลังด้วยการขยายหน้าตัดเสาทั้งการเสริมด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กเสริมทำให้พฤติกรรมการวิบัติเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของคานซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเปลี่ยนจากคานแข็งเสาอ่อนไปเป็นรูปแบบคานอ่อนเสาแข็ง (Strong Columns and Weak Beams) ดังรูปที่ 8(ข) โดย Panyakapo (2003) ได้กล่าวไว้ว่าในการออกแบบองค์อาคารต้านทานแผ่นดินไหว เสาจะถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงและมั่นคงต่อแรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีพฤติกรรมรับแรงแบบยืดหยุ่นในขณะเดียวกัน คานจะถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าเสาแต่ออกแบบให้มีความเหนียวต่อการดัดโค้งได้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ฐานและการเคลื่อนตัวของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก



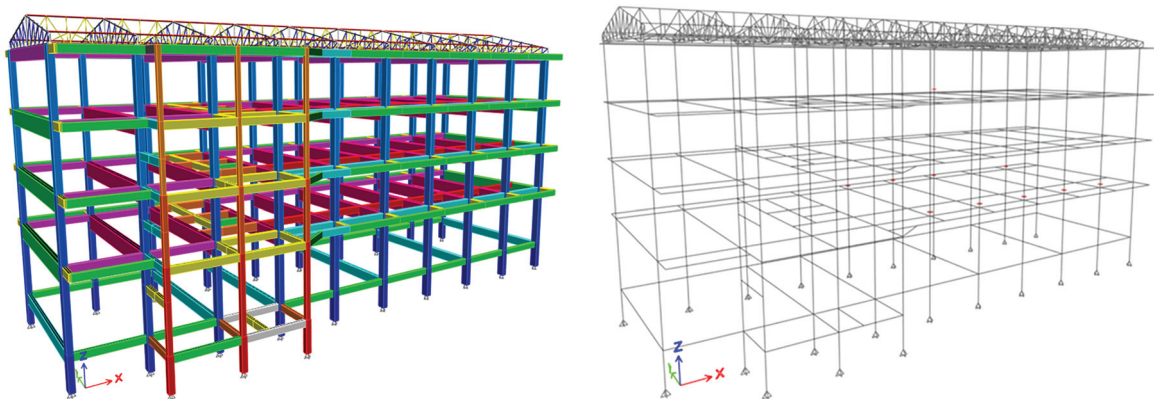
(ก) การวิบัติก่อนเสริมกำลัง

(ข) การวิบัติหลังเสริมกำลัง

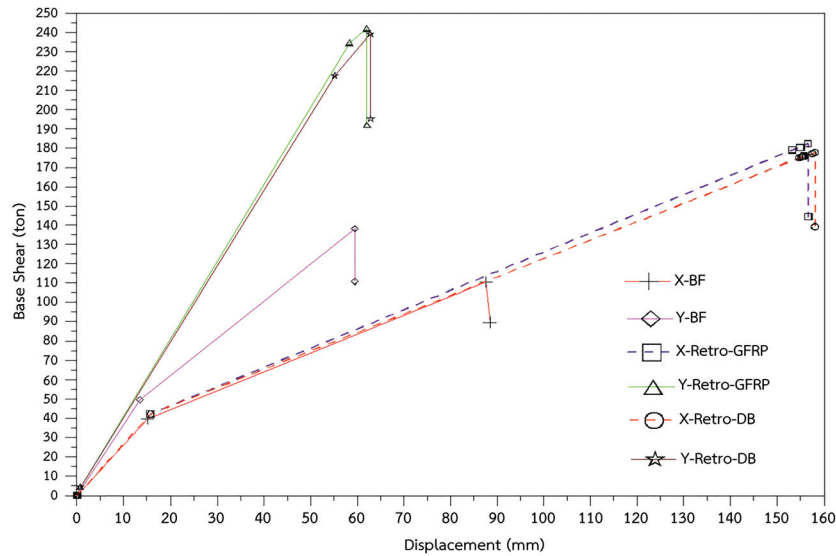
รูปที่ 8 การวิบัติที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 3. ผลการประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการจำลองอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น เลือกใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเท่ากับ 0.0136 ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ต่ำที่สุดและในงานวิจัยได้คำนึงถึงความคุ้มค่าในการก่อสร้าง โดยการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้โปรแกรม ETAB2020 ในการจำลองพฤติกรรมด้วยวิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Pushover Analysis) โดยได้ขึ้นต้นแบบอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 9 จากการศึกษาได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 7 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ฐานและการเคลื่อนที่ด้านข้างดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 การสร้างแบบจำลองอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม Etab2020



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ฐานและการเคลื่อนที่ของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์อาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น

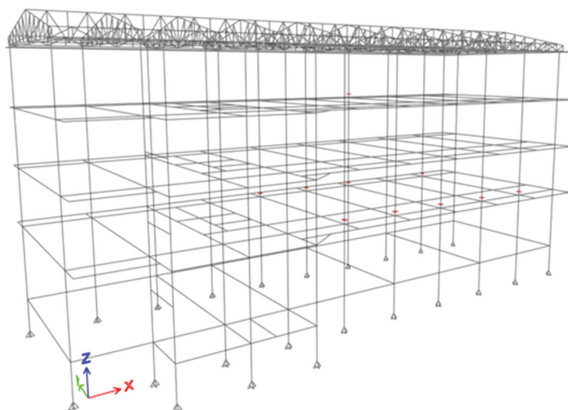
| รูปแบบวิเคราะห์ | แรงเฉือนที่<br>ฐานสูงสุด<br>ในแกน X (ตัน) | แรงเฉือนที่<br>ฐานสูงสุด<br>ในแกน Y (ตัน) | การเคลื่อนตัว<br>ในแกน X<br>(มิลลิเมตร) | การเคลื่อนตัว<br>ในแกน Y<br>(มิลลิเมตร) | Max. DCR |
|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| BF              | 110.42                                    | 138.09                                    | 87.56                                   | 59.48                                   | 1.437    |
| Retro-GFRP      | 182.30                                    | 241.94                                    | 156.60                                  | 62.05                                   | 0.820    |
| Retro-DB        | 177.71                                    | 239.08                                    | 158.07                                  | 62.80                                   | 0.913    |

หมายเหตุ BF คือ การวิเคราะห์อาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า

Retro-GFRP คือ การวิเคราะห์อาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ขยายหน้าตัดและเสริมด้วย GFRP

Retro-DB คือ การวิเคราะห์อาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ขยายหน้าตัดและเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อย DB

จากตารางที่ 7 การประเมินระดับสมรรถนะของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (BF) ได้แรงกระทำที่ฐานสูงสุดในแกน y เท่ากับ 138.09 ตัน และเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 59.48 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงพิจารณาแกน y เนื่องจากการเคลื่อนตัวมากกว่าแกน x จากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (BF) เกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชั้น 2 ถึงชั้น 4 ของอาคารเรียนดังรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่ามีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน (Strong Beams and Weak Columns) ซึ่งไม่ได้ออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากหน้าตัดของคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่า DCR สูงสุดเท่ากับ 1.437 ซึ่งมากกว่า 1 ซึ่งไม่สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้



รูปที่ 11 การเกิดจุดหมุนพลาสติกที่เสาชั้น 2 - 4 ของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Retro-GFRP) ได้แรงกระทำพื้นฐานสูงสุดในแกน y เท่ากับ 241.94 ตัน และเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 62.05 มิลลิเมตร จากการประเมินกำลังให้ค่ากำลังรับแรงเพิ่มขึ้น 1.75 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (BF) และในการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อย (Retro-DB) ในการวิเคราะห์ได้แรงกระทำพื้นฐานสูงสุดในแกน y เท่ากับ 239.08 ตัน และเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 72.31 มิลลิเมตร จากการประเมินกำลังให้ค่ากำลังรับแรงเพิ่มขึ้น 1.73 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (BF) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ranjan and Dhiman (2016) และ Talwekar et al. (2018) เป็นการศึกษาการขยายหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งได้กล่าวไว้ว่าการเสริมกำลังด้วยการขยายหน้าตัดเสาทำให้ความสามารถของอาคารมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นรวมถึงค่าสติฟเนสโดยรวมของอาคารสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อนำข้อมูลการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Retro-GFRP) และเสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อย (Retro-DB) มาเปรียบเทียบกัน พบว่าการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส ให้กำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงกว่าการเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อย ของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่เท่ากันมีค่าเท่ากับ 1.01 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และค่า DCR ของการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยมีค่าต่ำกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงการใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสสามารถใช้แทนเหล็กเสริม มีความสามารถรับกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี

สำหรับการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารเรียนจากการใช้วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงโหมด (Response Spectrum Analysis) ในการหาค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคาร (Target Roof Displacement) ได้การเคลื่อนที่เป้าหมายของอาคารเรียน 32.12 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเป้าหมาย พบว่าตัวอย่างอาคารเรียน คอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (BF) มีระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level - CP) แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ อาคารเรียนที่ทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Retro-GFRP) และเสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อย (Retro-DB) อาคารดังกล่าวมีระดับสมรรถนะเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level - IO) แสดงให้เห็นว่า การขยายหน้าตัดเสาคอนกรีตทำให้โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถรับกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว ได้เป็นอย่างดี

## สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้การขยายหน้าตัดเสาได้ผลสรุปดังนี้

1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กข้ออ้อย (DB) มีค่าเท่ากับ 8,567 และ 6,720 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พฤติกรรมของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) จะมีแนวโน้มของกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก ซึ่งแตกต่างจากเหล็กข้ออ้อยจะมีความเหนียวกว่าวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส

2. ผลการจำลองพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเสริมกำลังและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อยด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสา พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต มีผลต่อกำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อยก็ตาม การเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสให้กำลังใกล้เคียงกับการเสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อยที่อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่เท่ากัน

3. ผลการประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารเรียนสูง 4 ชั้น พบว่าอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล้า (BF) เกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชั้น 2 ถึงชั้น 4 ของอาคารเรียน แสดงให้เห็นว่าโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล้ามีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน (Strong Beams and Weak Columns) และมีค่า DCR สูงสุดเท่ากับ 1.437 ซึ่งมากกว่า 1 ซึ่งไม่สามารถรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวได้ แต่เมื่อเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อย ทำให้อาคารเรียนมีความสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น 1.75 และ 1.73 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเปล้า (BF) และมีค่า DCR ของการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยมีค่าต่ำกว่า 1 อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังอาคารเรียนด้วยวัสดุทั้ง 2 ชนิดให้กำลังรับแรงด้านข้างใกล้เคียงกันการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสจึงมีความสามารถในการเสริมกำลังได้เป็นอย่างดี

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่อุดรธานีให้ใช้พื้นที่ อุปกรณ์และห้องทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้

## References

- American Society for Testing and Materials. (2006). *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (ASTM D7205-06)*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society of Civil Engineers. (2013). *Publication Anticipated Seismic Evaluation and Upgrade of Existing Buildings (ASCE 41-13)*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Aravind, M.N., Samanta, A.K, Singha Roy, D.K. and Thanikal, J.V. (2013). Retrofitting of Reinforced Concrete Beams using Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites - a Review. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(1), 164-175. <https://doi.org/10.4090/juee.2013.v7n1.164175>
- Dong, J., Wang, Q. and Guan, Z. (2013). Structural Behavior of RC Beams with External Flexural and Flexural-shear Strengthened by FRP Sheets. *Composites: Part B*, 44(1), 604-612. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.02.018>
- Department of Public Works and Town & Country Planning Ministry of Interior. (2014). *Standards for Evaluation and Strengthening the Stability of Building Structures in Earthquake-Prone Areas (MYP 1303-2014)*. Department of Public Works and Town & Country Planning Ministry of Interior, Bangkok. (in Thai)

- Hasan, T. (2016). *Seismic Performance Improvement of Low-Rise RC Frame Buildings with Soft First Story by Using Buckling Restrained Braces*. [Unpublished M.Eng. Dissertation]. Asian Institute of Technology.
- Leeanansaksiri, A., Panyakapo, P. and Ruangrassamee, A. (2018). Seismic Capacity of Masonry Infilled RC Frame Strengthening with Expanded Metal Ferrocement. *Engineering Structures*, 159, 110-127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.034>
- Meteorological Department. (2023, 17 September). *Earthquake Report in Thailand and Adjacent Areas in June 2017 Seismological Bureau*. <https://earthquake.tmd.go.th/report/file/seismo-report-1504512433.pdf>
- Moretti, M.L. (2023). Rapid Retrofit of Substandard Short RC Columns with Buckled Longitudinal Bars using CFRP Jacketing. *Earthquakes and Structures*, 24(2), 97-109. <https://doi.org/10.12989/eas.2023.24.2.000>
- Panyakapo, P. (2003). *Building Design 2<sup>nd</sup> ed.* Bangkok: Printing Library Nine
- Quayyum, S. (2006). *Bond Behaviour of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete* [Unpublished M.Eng.Dissertation]. The University of British Columbia.
- Ranjan, P., and Dhiman, P. (2016). Retrofitting of Columns of an Existing Building by RC, FRP and SFRC Jacketing Techniques. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 1, 40-46. <https://doi.org/10.9790/1684-15010010140-46>
- Rehman, A.U., Siddiqi, Z.A., Yasin, M., Aslam, H.M.S., Noshin, S. and Aslam, H.M.U. (2024). Experimental Study on the Behavior of Damaged CFRP and Steel Rebars RC Columns Retrofitted with Externally Bonded Composite Material. *Advanced Composite Materials*, 34(10), 1-47. <https://doi.org/10.1080/09243046.2024.2358262>
- Saeed, Y.M. (2016). *Behavior of Prestressed Concrete Beams with CFRP Strands* [Unpublished M.Eng. Dissertation]. Portland State University.
- Talwekar, T.K., Bhadke, S. and Mendhe, V. (2018). Analytical study on Seismic Response of Retrofitting Multistoried RC Building by using Steel Wrapping and RCC Jacketing Techniques. *International Conference on Innovation and Research in Engineering, Science & Technology*, 5(13), 110-127. <https://journals.pen2print.org/index.php/ijr/article/view/13675/12962>
- Worasuk, A. and Lapying, V. (2014). *Evaluation of Seismic Demand of Building Analyzed by Using Lateral load Specified by Ministerial Regulations* [Unpublished B.Eng. Dissertation]. Burapha University.
- Wattanakornkeaw, P., Pulngern, T. and Leelatawiwat, S. (2017). Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Reinforced Concrete Building. *The 14<sup>th</sup> National Academic Conference, Kasetsart University Kaphaeng Saen Campus*, (pp. 353-362). (in Thai)