



การวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนแนง

**SIMULATION ANALYSIS OF THE REINFORCED EARTHQUAKE RESISTANCE OF RC  
BUILDING STRUCTURE MODEL WITH GLASS FIBER REINFORCED POLYMER USING  
BRACED FRAME SYSTEM**

ลิขิต หาญมาก<sup>1</sup>, อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ<sup>2</sup> และวุฒิพงษ์ กุศลคุ้ม<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

<sup>3</sup>อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*Corresponding author, E-Mail: anuchat.lee@neu.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนแนง โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาเป็นโครงข้อแข็งขนาดความกว้าง 4000 มิลลิเมตร และความสูง 3000 มิลลิเมตร ในการจำลองพฤติกรรมกรรมการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนแนงในการค้ำยันซึ่งประกอบด้วย 4 รูปแบบ ได้แก่ โครงแกนแนงรูปตัวเอกซ์ โครงแกนแนงรูปตัววี โครงแกนแนงรูปตัววีคว่ำ และ โครงแกนแนงแบบทแยง โดยการประเมินสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กใช้วิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการค้ำยันแบบ รูปตัวเอกซ์ ให้กำลังรับแรงที่ฐานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการค้ำยันแบบ รูปตัววี รูปตัววีคว่ำ และ โครงแกนแนงแบบทแยง การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของวัสดุในการค้ำยันโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ได้มีผลต่อกำลังรับแรงกระทำของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุเสริมคอนกรีตในหน้าตัดโดยใช้วัสดุเสริมหน้าตัดที่ต่ำที่สุดเพียงพอต่อการรับแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี การใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเสริมหน้าตัดเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อยสามารถนำมาใช้ทดแทนเหล็กข้ออ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส; ระบบโครงแกนแนง; วิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น

**ABSTRACT**

*This research aimed to study simulation analysis of the reinforced earthquake resistance of RC building structure model with glass fiber reinforced polymer using braced frame system. The size of reinforced concrete rigid frame used in the study was a*

Likhit Hanmag<sup>1</sup>, Anuchat Leraanansaksiri<sup>2\*</sup> and Wuttipong Kusonkhum<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Master student in Civil Engineering, Faculty of Engineering Northeastern University, Thailand.

<sup>2</sup> Assistant Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering Northeastern University, Thailand.

<sup>3</sup> Lecturer in Civil Engineering, Faculty of Engineering Khon Kaen University, Thailand.

4000 mm in width and 3000 mm in height to simulate the strengthened behavior with glass fiber reinforced polymer by using braced frame system in bracing consisted of 4 types: X-braced frame, V-braced frame, Inverted V-braced frame, and Diagonal braced frame. The performance of the reinforced concrete rigid frame was evaluated using non-linear statics. The study results were found that: The X-braced bracing model provided the highest base strength compared to V-braced, Inverted V-braced and Diagonal braced model. The increased cross-sectional area ratio of the materials in bracing reinforced concrete rigid frame did not affect the increased strength of reinforced concrete rigid frame. Therefore, reinforced concrete materials in cross-section using reinforced materials with the lowest cross-section were sufficient to resist earthquake force. When comparing to deformed bar, the use of glass fiber reinforced polymer in cross-section can be used to replace deformed bar effectively.

**KEYWORDS:** Glass Fiber Reinforced Polymer; Braced Frame System; Non-linear Statics

## 1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาจะพบปรากฏการณ์การเกิดแผ่นดินไหวบ่อยยิ่งขึ้น แผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติบางพื้นที่ของประเทศไทยยังมีความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหวที่รุนแรง ซึ่งพร้อมจะสร้างความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน ในการออกแบบและคำนวณ โครงสร้างอาคาร ในประเทศไทยในอดีต ยังไม่ได้มีการนำเอาแรงแผ่นดินไหวมาเป็นข้อกำหนดในการออกแบบและคำนวณ โครงสร้างอาคาร เนื่องจากประเทศไทยอาจไม่ได้เกิดแผ่นดินไหวขึ้นบ่อยครั้ง รวมถึงการเก็บรวบรวมข้อมูล และสถิติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยยังมีไม่มากเท่าที่ควร แต่ในปัจจุบันพบว่ามีความโน้มเอียงการเกิดแผ่นดินไหวเพิ่มมากขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย จึงทำให้การออกแบบและคำนวณ โครงสร้างอาคารที่เคยออกแบบและคำนวณไว้ไม่สอดคล้องกับสภาพเหตุการณ์ในปัจจุบัน [1] การเสริมกำลังอาคารเก่าจึงเป็นทางเลือกในการเพิ่มกำลังให้กับอาคารซึ่งต้องได้รับการตรวจสอบประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรง ให้กับโครงสร้างของอาคารเพื่อให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว โดยเป้าหมายระดับสมรรถนะของอาคารและระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวการกำหนดเป้าหมายระดับสมรรถนะเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคารซึ่งผู้ออกแบบและเจ้าของอาคารต้องมีข้อตกลงร่วมกันทั้งนี้การเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคารจะกระทำขึ้นเพื่อแก้ไข โครงสร้างอาคารให้มีความแข็งแรงเป็นไปตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่กำหนดได้ สำหรับการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับโครงสร้างอาคารเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้น (ASCE 41-23) [2] ได้จำแนกระดับสมรรถนะของอาคารไว้ 4 ระดับ ได้แก่ ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level – OP) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level – IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level – LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP)

งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา Xu et al. (2003) [3] โดยวิเคราะห์ไฟในเอลิเมนต์ของโครงสร้างค้ำยันคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 7 โครงสร้าง ซึ่งมีลักษณะการค้ำยันที่แตกต่างกันหลายรูปแบบ จากการศึกษาพบว่าการค้ำยันในรูปแบบตามแนวทแยงให้กำลังขององค์อาคารเพิ่มขึ้นและมีค่าสติเฟนสโดยรวมของอาคารเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ต่อมาได้มีการศึกษาของ Khaloo & Mahdi (2008) [4] เป็นการศึกษาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ค้ำยันด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยรูปแบบที่ทำการค้ำยันมี 2 รูปแบบได้แก่รูปแบบตัว K และตัว X โดยได้ทำการศึกษอาคาร 4, 8 และ 12 ชั้น ให้แรงจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างค้ำยันคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้รูปแบบ X มีความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงด้านข้างและดูดซับพลังงานได้ดี โดยเฉพาะในอาคารที่ไม่สูงมาก การใช้โครงค้ำยันคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเป็นทางเลือกแทนระบบผนังรับแรงเฉือน ซึ่งช่วยแก้ปัญหาด้านการออกแบบทางสถาปัตยกรรมโดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพในการรับแรงแผ่นดินไหว และต่อมาในปี 2017 ได้มีงานวิจัยของ Desai et al. (2017) [5] ได้ทำการศึกษารอบสองต่อแผ่นดินไหวในลักษณะ ไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (inelastic) ของโครงข้อแข็ง

คอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ได้ค้ำยันองค์อาคารในรูปแบบตัว X และตัว K ในการจำลองแผ่นดินไหวใช้คลื่น El Centro ปี 1940 ในทิศทางเหนือ-ใต้ ผลการศึกษาพบว่าการค้ำยันในรูปแบบตัว X และตัว K สามารถทำให้องค์อาคารมีความสามารถเพิ่มกำลังรับแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี

สำหรับงานวิจัยที่ใช้เหล็กรูปพรรณในการค้ำยันเป็นการศึกษาของ Abou-Elfath & Ghobarah (2000) [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เหล็กค้ำยันแบบขนาน ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้ใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสามชั้น เพื่อประเมินผลการค้ำยันเหล็กรูปพรรณ ผลการวิจัยพบว่า การค้ำยันด้วยเหล็กรูปพรรณช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งของอาคารได้อย่างมีนัยสำคัญ ต่อมาในปี 2003 มีงานวิจัยของ Maheri et al. (2003) [7] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งได้ทำการติดตั้งระบบค้ำยันเหล็กแบบตัว X และแบบตัว K การวิเคราะห์กระทำแบบวิธีสถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งระบบค้ำยันทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและสามารถลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างได้ การค้ำยันแบบ X สามารถให้ระบบค้ำยันที่มีความแข็งแรงมากกว่าการค้ำยันแบบ K และในปี 2023 งานวิจัยของ Ahiwale et al. (2023) [8] ได้ศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ระบบค้ำยันหลายประเภทภายใต้แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว อาคารที่ใช้ในการศึกษาเป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 10 ชั้น โดยใช้ระบบค้ำยันชนิดต่าง ๆ ในการวิเคราะห์กระทำแบบวิธีสถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น ผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างแบบตัว X ให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นในการต้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยที่ผ่านมา สำหรับการประเมินสมรรถนะอาคารต้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธีสถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Pushover analysis) นิยมนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะของอาคาร โดยการจำลองจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์เพื่อหาเป้าหมายระดับสมรรถนะของอาคารและระดับความรุนแรงงานวิจัยของ [9-11] ได้ศึกษาวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีสถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Pushover analysis) โดยใช้โปรแกรม Sap2000 ซึ่งในการศึกษาทั้ง 3 งานวิจัยมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการประเมินสมรรถนะของอาคารถูกผลัก ไปให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตามระดับสมรรถนะของระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) เป็นการวิเคราะห์อาคารที่ทำได้ง่ายจากโปรแกรม Sap2000

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนง ในการค้ำยันเพื่อเสริมกำลังให้กับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) มีคุณสมบัติที่ดี เช่น ความต้านทานการกัดกร่อนสูง ไม่เหนียวนาสนาม ไฟฟ้าและแม่เหล็ก มีความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบา ข้อดีเหล่านี้ควบคู่ไปกับการผลิตจำนวนมากสะดวกต่อการติดตั้ง ทำให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และอาจเป็นวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการกระจายพลังงานที่เพียงพอ ในระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว จะทำให้โครงสร้างปลอดภัยต่อการเกิดแผ่นดินไหวอีกด้วย ดังนั้น จะช่วยลดต้นทุนการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างได้อย่างมาก และในขณะเดียวกันก็ช่วยเพิ่มระดับความเชื่อมั่นของวิศวกรผู้ออกแบบรวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างต่อไป

## 2. วิธีดำเนินการศึกษา

### 2.1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กเส้นข้ออ้อยเสริมคอนกรีต เพื่อให้ได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ค่ากำลังดึงที่จุดคราก (Fy) ค่ากำลังดึงประลัย (Fu) และอัตราส่วนปัวซอง ( $\mu$ ) นำไปใส่ค่าคุณสมบัติในโปรแกรม การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยงานวิจัยนี้ใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบของวัสดุ GFRP ต้องทำการเตรียมโดยใช้เหล็กรูปพรรณชนิดแปดกลมดำเส้นขนาดผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ทำการเติมด้วยปูนซีเมนต์อนซิ่งที่ปลายทั้ง 2 ด้าน หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ 14 วันรอการทดสอบดังรูปที่ 1 โดยได้ทำการทดสอบวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อย ตามมาตรฐาน ASTM D 7205 [12]

สำหรับเหล็กข้ออ้อยที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร เป็นชั้นคุณภาพ SD40 ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงเช่นเดียวกัน เมื่อได้กำลังรับแรงดึงจะนำวัสดุทั้ง 2 ได้แก่ วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กเส้นข้ออ้อยเสริมคอนกรีต มาวิเคราะห์เปรียบเทียบและหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุต่อไป



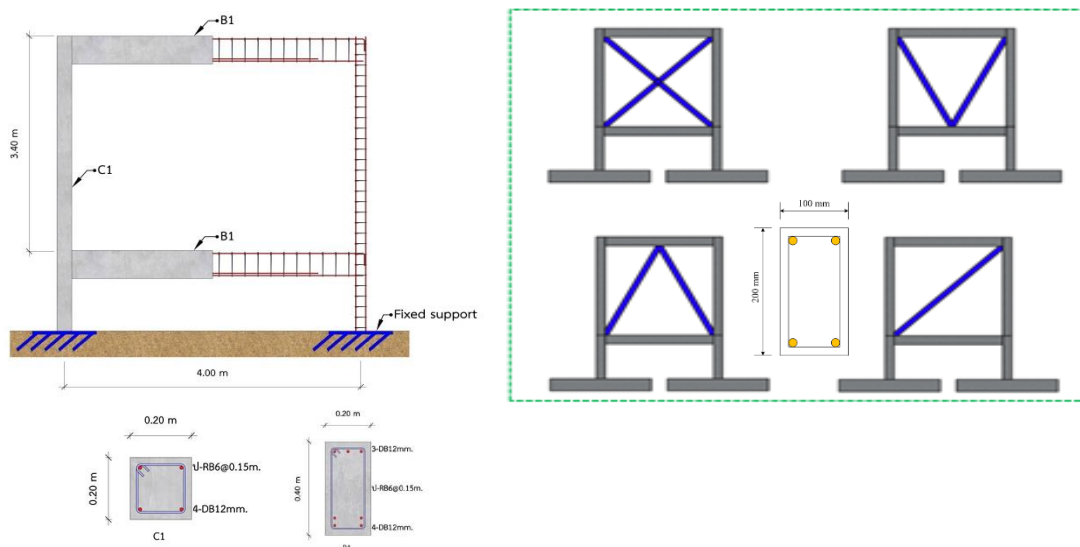
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส

### 2.2 ขั้นตอนการประเมินระดับสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

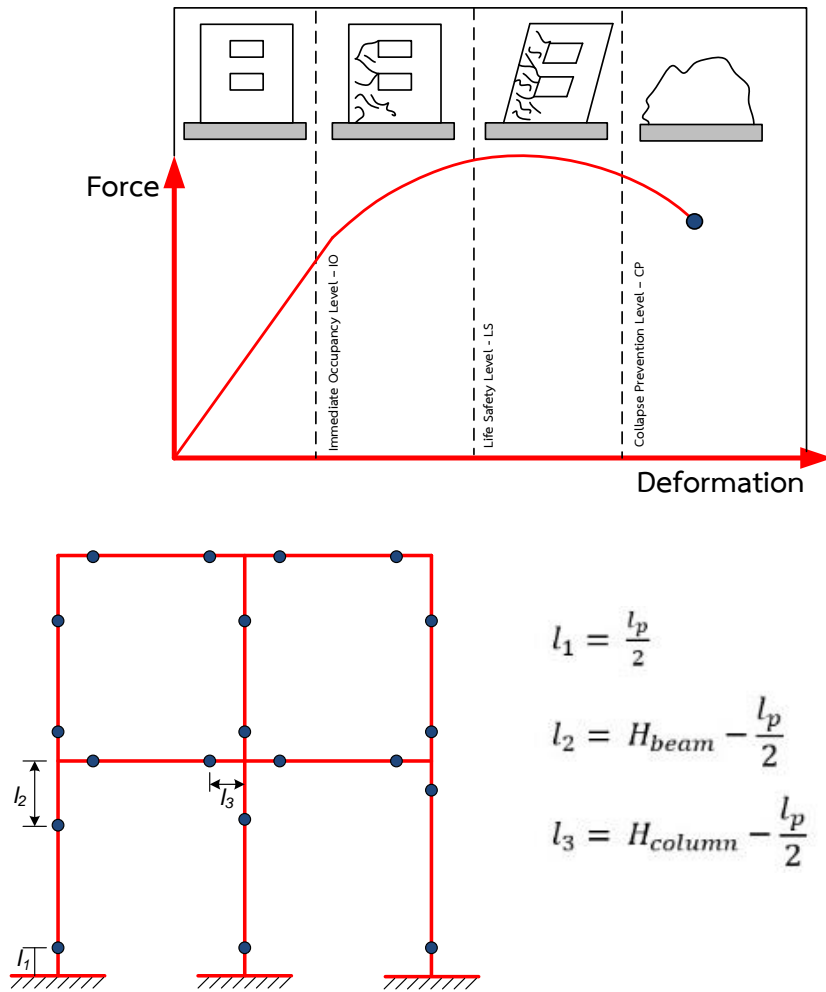
ในขั้นตอนนี้จะใช้คุณสมบัติพื้นฐานที่ได้ทำการทดสอบจากขั้นตอนที่ 2.1 มาจำลองพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการพิจารณาเลือกจำลอง โครงข้อแข็งข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน ซึ่งจากการพิจารณา โครงข้อแข็งมีขนาดความกว้าง 4000 มิลลิเมตร และความสูง 3000 มิลลิเมตร เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 200x200 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนของการเสริมเหล็กเท่ากับ 1.13 % คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 200x400 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนของการเสริมเหล็กเท่ากับ 1.00% และคอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหล็กข้ออ้อยใช้เกรด SD40 เหล็กกลมใช้เกรด SR24 โดยพฤติกรรมดังกล่าวเป็นรูปแบบคานแข็งเสาอ่อน เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมกรรมการเสริม

กำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนงในการค้ำยันซึ่งประกอบด้วย 4 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ 1 โครงแกนงรูปตัวเอกซ์ (X-braced) แบบที่ 2 โครงแกนงรูปตัววี (V-braced) แบบที่ 3 โครงแกนงรูปตัววีคว่ำ (inverted V-braced) และแบบที่ 4 โครงแกนงแบบทแยง (diagonal braced) ดังแสดงในรูปที่ 2

โดยหน้าตัดที่ใช้ในระบบโครงแกนงได้พิจารณาหน้าตัดของการค้ำยันขนาด 100x200 มิลลิเมตร ใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสจำนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเท่ากันจำนวน 4 เส้นซึ่งมีอัตราส่วนของการเสริมวัสดุในหน้าตัดเท่ากับ 2.26 % เป็นค่าต่ำสุดในการเลือกใช้หน้าตัดค้ำยันในการเปรียบเทียบที่เหมาะสมในการพิจารณาหน้าตัดที่แตกต่างกันต่อไปในขั้นตอนที่ 2.3 ในการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารเป็นไปตามข้อกำหนดของ (ASCE 41-23) โดยแบ่งระดับสมรรถนะของอาคารไว้ 4 ระดับ ได้แก่ ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level – OP) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level – IO) ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level – LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP) และมีจุดหมุนพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 3 การประเมินสมรรถนะสามารถทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Static Pushover Analysis โดยใช้โปรแกรม Etab2020



รูปที่ 2 รูปแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการประเมินระดับสมรรถนะและการค้ำยันในแบบต่างๆ

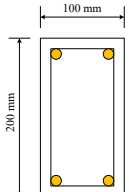
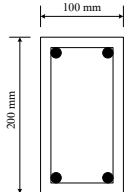
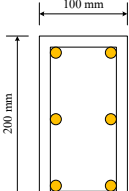
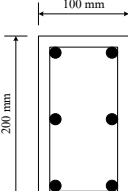
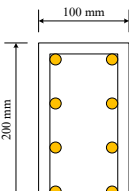
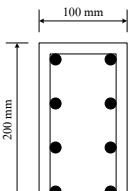


รูปที่ 3 สมรรถนะของอาคารตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเสียรูป และการกำหนดจุดหมุนพลาสติก

### 2.3 ขั้นตอนการเปรียบเทียบหน้าตัดของการเสริมวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

จากขั้นตอนที่ 2.2 เมื่อได้รูปแบบของการค้ำยันที่เหมาะสม ทำการเลือกรูปแบบการค้ำยันที่ให้ค่ากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด มาทำการเพิ่มจำนวนการเสริมวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยในหน้าตัด ซึ่งได้กำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างหน้าตัดคอนกรีตต่อหน้าตัดวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อย ดังแสดงในตารางที่ 1 ในการประเมินสมรรถนะด้วยวิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) โดยการผลักไปให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตามระดับสมรรถนะของระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติก

ตารางที่ 1 แสดงรูปแบบการเสริมกำลังโดยใช้ระบบโครงแกนแนง พร้อมรายละเอียดการเสริมเหล็ก

หน้าตัดคอนกรีตเสริม GFRP 12 mm	สัญลักษณ์	อัตราส่วนระหว่างหน้าตัดคอนกรีตต่อหน้าตัด GFRP ( $\rho$ )	หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก DB 12 mm	สัญลักษณ์	อัตราส่วนระหว่างหน้าตัดคอนกรีตต่อหน้าตัด DB ( $\rho$ )
	4GFRP-12mm	2.26		4DB-12mm	2.26
	6GFRP-12mm	3.39		6DB-12mm	3.39
	8GFRP-20	4.52		8DB-20	4.52

### 3. ผลการศึกษา

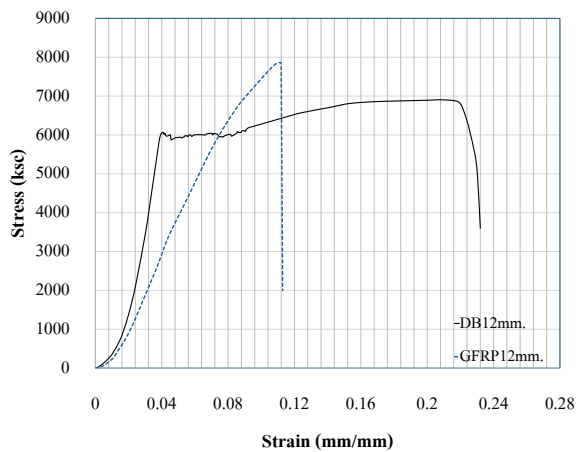
#### 3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ได้ทำการดัดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 7205 [12] ผลการทดสอบของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อย ได้แสดงดังตารางที่ 2 และแสดงผลของกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ในการเปรียบเทียบกันของวัสดุ โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อยมีค่าเท่ากับ 8567 และ 6720 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส ที่ได้ทำการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ [13]-[14] ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดอยู่ในช่วง 8000 – 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่ากำลังที่จุดครากของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กเสริม มีค่าเท่ากับ 5140.25 และ 5650 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในการพิจารณาค่ากำลังที่จุดครากของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส เนื่องจากพฤติกรรมของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส มีแนวโน้มของกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะอยู่ในช่วงอีลาสติก ดังนั้นในการหาค่ากำลังที่จุดครากจึงใช้หลักการของ [15] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าวัสดุที่มีความเปราะจะมีแนวโน้มของกราฟในช่วงอีลาสติกเพียงอย่างเดียวจากนั้นวัสดุจะเกิดการแตกหักเสียหายโดยได้

กำหนดให้ใช้ค่ากำลังที่จุดครากเท่ากับ  $0.6F_y$  และจากรูปที่ 4 เป็นกราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อย จากการศึกษพบว่าเหล็กเสริมมีความยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเป็นอย่างมาก กำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส จะสูงกว่าเหล็กร้อยละ 21.56 และมีความหนาแน่นต่ำกว่าเหล็กร้อยละ 73.12 แสดงให้เห็นถึงน้ำหนักที่เบาว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อย จากคุณสมบัติดังกล่าวได้นำไปทำการจำลองกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้โปรแกรม Etab2020

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

คุณสมบัติของวัสดุ	เหล็กข้ออ้อย (DB) ขนาด 12 mm	วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) ขนาด 12 mm.
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	7850	2110
กำลังจุดคราก ( $\text{kg/cm}^2$ )	5650	5140.25
กำลังรับแรงดึงสูงสุด ( $\text{kg/cm}^2$ )	6720	8567
โมดูลัสยืดหยุ่น $\times 10^6$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	2.04	0.48



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) และเหล็กข้ออ้อย (DB)

### 3.2 ผลการประเมินระดับสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการประเมินระดับสมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ฐานและการเคลื่อนตัวของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 5 จากผลการศึกษพบว่ารูปแบบของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (Bare Frame) เกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่ามีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน (Strong beams and Weak columns) ซึ่งไม่ได้ออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

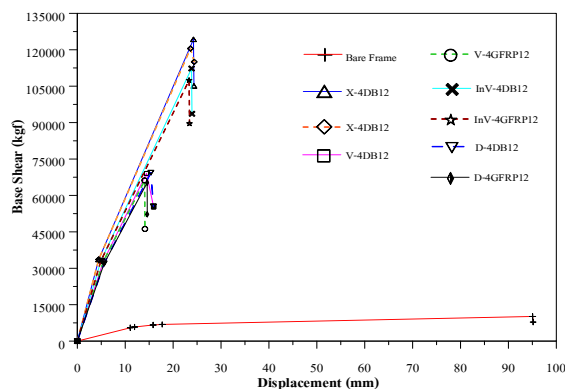


ตารางที่ 3 ผลการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

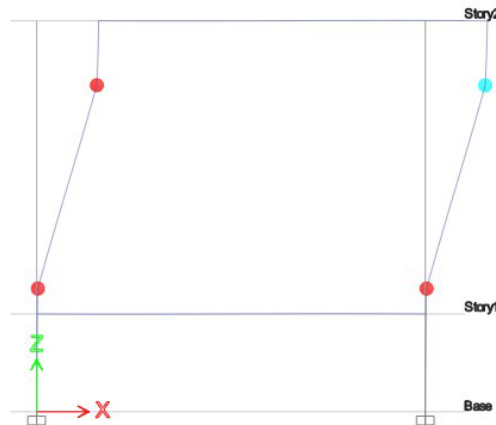
Type	Base Shear (kgf)	Displacement (mm)	สติฟเนส (kg/mm)
Bare Frame	10147.34	95.06	357.21
X-4DB12	124302.57	24.25	4583.92
X-4GFRP12	120511.73	23.62	4536.07
V-4DB12	69064.93	14.45	4016.92
V-4GFRP12	66194.67	14.06	3865.58
InV-4DB12	112286.20	23.85	4183.47
InV-4GFRP12	107404.19	23.33	4035.90
D-4DB12	69395.79	15.36	3830.34
D-4GFRP12	65267.10	14.58	3701.29

หมายเหตุ X คือ X-braced , V คือ V-braced, InV คือ Inverted V-braced, D คือ Diagonal braced  
GFRP คือ Glass Fiber Reinforced Polymer, DB คือ Deformed bar

แรงกระทำพื้นฐานสูงสุดเท่ากับ 10147.34 กิโลกรัม และในการจำลองพฤติกรรมกรรมการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส โดยใช้ระบบโครงแกนในการค้ำยันซึ่งประกอบด้วย 4 รูปแบบ ได้แก่ โครงแกนรูปตัวเอกซ์ (X-braced), โครงแกนรูปตัววี (V-braced), โครงแกนรูปตัววีคว่ำ (Inverted V-braced) และ โครงแกนแบบทแยง (Diagonal braced) โดยกำหนด โดยหน้าตัดที่ใช้ในระบบโครงแกนได้พิจารณาหน้าตัดของการค้ำยันขนาด 100x200 มิลลิเมตร ใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส จำนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเท่ากันจำนวน 4 เส้นซึ่งมีอัตราส่วนของการเสริมวัสดุในหน้าตัดเท่ากับ 2.26 %



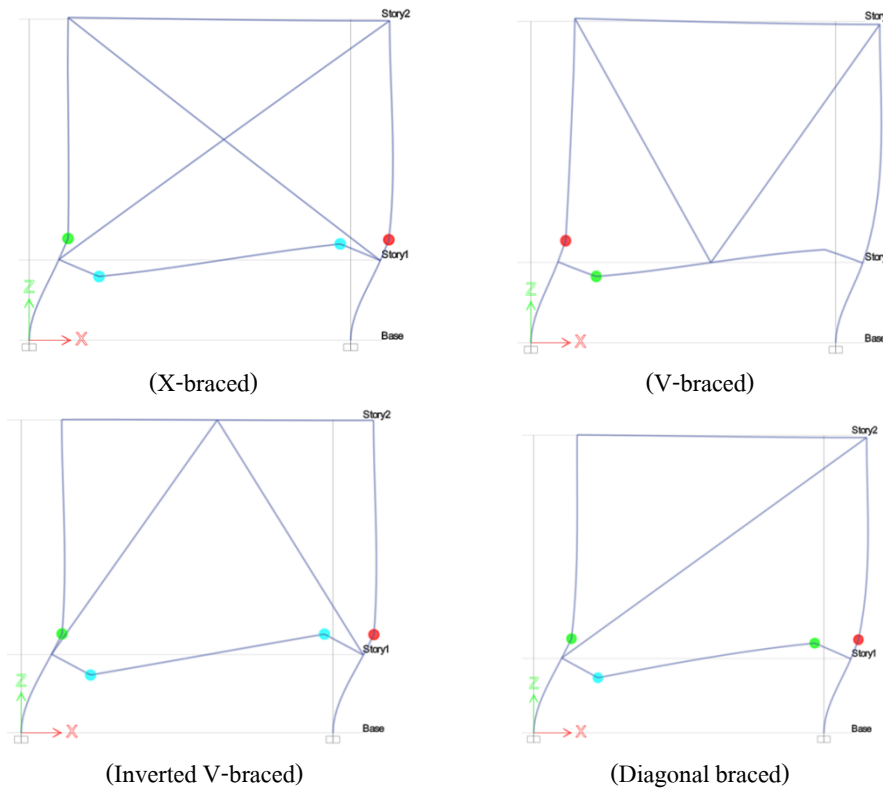
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำพื้นฐานและการเคลื่อนตัวของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 6 การวิบัติที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า bare Frame

ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ตัวอย่าง Bare Frame, X-4DB12, X-4GFRP12, V-4DB12, V-4GFRP12, InV-4DB12, InV-4GFRP12, D-4DB12 และ D-4GFRP12 ได้กำลังรับแรงกระทำที่ฐานมีค่าเท่ากับ 10147.34, 124302.57, 120511.73, 69064.93, 66194.67, 112286.20, 107404.19, 69395.79 และ 65267.10 กิโลกรัม ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการค้ำยันแบบ โครงแกนงรูปตัวเอกซ์ (X-braced) ให้กำลังรับแรงที่ฐานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการค้ำยันแบบ โครงแกนงรูปตัววี (V-braced), โครงแกนงรูปตัววีคว่ำ (Inverted V-braced) และ โครงแกนงแบบทแยง (Diagonal braced) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [8] โดยได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบการค้ำยันของโครงข้อแข็งอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการค้ำยันโดยใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงการใช้เหล็กค้ำยัน จากการศึกษาพบว่า การค้ำยันในรูปแบบรูปตัวเอกซ์ (X-braced) ให้ค่ากำลังของ โครงอาคารสูงกว่ารูปแบบอื่นๆ เช่นเดียวกัน

สำหรับการเกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกของโครงเฟรมที่ค้ำยันด้วยรูปแบบ โครงแกนงรูปตัวเอกซ์ (X-braced), โครงแกนงรูปตัววี (V-braced), โครงแกนงรูปตัววีคว่ำ (Inverted V-braced) และ โครงแกนงแบบทแยง (Diagonal braced) ดังรูปที่ 7 โดยเป็นรูปแบบการเกิดจุดหมุนพลาสติกของการเสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อย และวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่ได้ทำการวิเคราะห์โดยการผลักไปให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตามระดับสมรรถนะของระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP) จากการวิเคราะห์พบว่า การวิบัติของตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของเสาทั้ง 4 รูปแบบ โดยการเสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อย และวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสมีรูปแบบการวิบัติเหมือนกัน ซึ่งไม่ปรากฏการเกิดจุดหมุนพลาสติกของตัวค้ำยัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการค้ำยัน โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กการวิบดียังคงเป็นรูปแบบของพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน และเมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของการค้ำยัน โครงแกนงทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าเกิดจุดหมุนพลาสติกที่โคนเสาทั้ง 4 รูปแบบ โดยการเกิดจุดหมุนดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเสียหายต่อ โครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การรับแรงภายในของเสา อย่างไรก็ตามการค้ำยันทำให้ความเสียหายที่จุดหมุนพลาสติกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า



รูปที่ 7 การวิบัติที่ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวเอกซ์ (X-braced), รูปตัววี (V-braced) , รูปตัววีคว่ำ (Inverted V-braced) และ แบบทแยง (Diagonal braced)

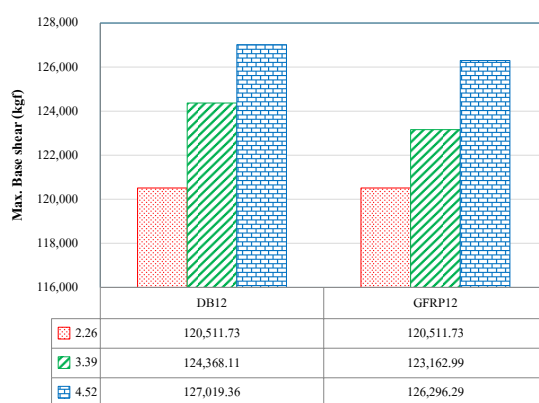
เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงของ โครงข้อแข็งเปล่า Bare Frame การค้ำยันในรูปแบบการวิเคราะห์ X-4DB12, X-4GFRP12, V-4DB12, V-4GFRP12, InV-4DB12, InV-4GFRP12, D-4DB12 และ D-4GFRP12 ให้กำลังสูงกว่า โครงเฟรมเปล่านั้นค่าเท่ากับ 12.5, 11.87, 6.8, 6.5, 11.06, 10.58, 6.83 และ 6.43 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ โครงข้อแข็งเปล่า Bare Frame สำหรับการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กเสริม จากการศึกษาพบว่าการเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยให้กำลังรับแรงสูงกว่า การเสริมด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส เนื่องจากเมื่อ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำทางด้านข้างจะส่งถ่ายแรงเข้าสู่หน้าตัดค้ำยันในลักษณะของแรงในแนวทแยง ส่งผลให้หน้าตัดค้ำยันรับแรงอัดเข้าไปที่หน้าตัด โดยทำหน้าที่เป็นเสาคอนกรีต ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมของตัววัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าเหล็กข้ออ้อย แต่ในทำนองเดียวกัน ความสามารถรับแรงอัดได้น้อยกว่าการเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อย แต่กำลังรับแรงยังมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบ โครงแกนงตัวเอกซ์ (X-braced), โครงแกนงรูปตัววี (V-braced) , โครงแกนงรูปตัววีคว่ำ (Inverted V-braced) และ โครงแกนงแบบทแยง (Diagonal braced) การเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยให้กำลังสูงกว่าร้อยละ 3.0, 4.15, 4.35 และ 5.9 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่อัตราส่วนของการเสริมวัสดุในหน้าตัดเท่ากับ 2.26 % อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์พบว่าค่าสติฟเนสโดยรวมของ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อทำการค้ำยันทั้ง 4 รูปแบบให้ค่าสติฟเนสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ โครงเฟรมเปล่า Bare Frame การค้ำยันมีผลต่อกำลังรับแรงและสติฟเนสของ โครงข้อแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

สมรรถนะของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าการคำนวณรูปแบบการวิเคราะห์โครงเฟรมเปล่า จะมีค่าระหว่างแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อกำลังต้านทานที่รับได้ของชิ้นส่วน (Demand-Capacity Ratio) มากกว่า 1 และมีระดับสมรรถนะของอาคารอยู่ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP) ซึ่งไม่สามารถรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวได้ แต่เมื่อทำการคำนวณด้วยระบบโครงแกนแข็งทั้ง 4 รูปแบบ เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อย การเสริมด้วยวัสดุทั้ง 2 ทำให้ค่า ระหว่างแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อกำลังต้านทานที่รับได้ของชิ้นส่วน (Demand-Capacity Ratio) น้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวได้ และสมรรถนะของอาคารอยู่ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level – OP)

### 3.3 ผลการเปรียบเทียบหน้าตัดของการเสริมวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต

ผลการเปรียบเทียบหน้าตัดของการเสริมวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต โดยขั้นตอนนี้ได้เลือกใช้รูปแบบการคำนวณแบบตัวเอกซ์ (X-braced) ที่ได้กำลังรับแรงสูงสุดจากขั้นตอนที่ 2.2 มาทำการวิเคราะห์ โดยได้ทำการกำหนดอัตราส่วนของการเสริมวัสดุในหน้าตัดเท่ากับ 2.26 , 3.39 และ 4.52 โดยจะใช้หน้าตัดที่แสดงในตารางที่ 1 มาใช้ในการวิเคราะห์จากการศึกษาได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 8

จากรูปที่ 8 เป็นผลการเปรียบเทียบหน้าตัดของการเสริมวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และเหล็กข้ออ้อยเสริมคอนกรีต พบว่าการเพิ่มจำนวนวัสดุเสริมคอนกรีตในหน้าตัดเท่ากับ 2.26 , 3.39 และ 4.52 สำหรับการเสริมด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.2 และ 4.8 ตามลำดับ และในทำนองเดียวกันการเสริมกำลังด้วยเหล็กข้ออ้อยในหน้าตัดคอนกรีตให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.2 และ 5.4 ตามลำดับ เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนของวัสดุเสริมในหน้าตัดไม่ได้มีผลต่อกำลังรับแรงกระทำของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เพิ่มขึ้นมากนัก ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุเสริมคอนกรีตในหน้าตัดโดยใช้อัตราส่วนของหน้าตัดเท่ากับ 2.26 ซึ่งเป็นหน้าตัดที่ใช้วัสดุเสริมหน้าตัดต่ำที่สุดก็เพียงพอต่อการรับแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบหน้าตัดของการเสริมวัสดุเสริมคอนกรีต

## 4. สรุป

ผลการศึกษารวบรวมการวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนแข็งได้ผลสรุปดังนี้

1. การวิเคราะห์แบบจำลองโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสโดยใช้ระบบโครงแกนง ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการค้ำยันแบบ รูปตัวเอกซ์ (X-braced) ให้กำลังรับแรงที่ฐานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการค้ำยันแบบ รูปตัววี (V-braced), รูปตัววีคว่ำ (Inverted V-braced) และ โครงแกนงแบบทแยง (Diagonal braced)

2. การวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า BF เกิดการวิบัติที่จุดหมุนพลาสติกที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก มีพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อน และในทำนองเดียวกันเมื่อวิเคราะห์รูปแบบการค้ำยันทั้ง 4 รูปแบบพบว่า ลักษณะการวิบัติไม่ปรากฏการเกิดจุดหมุนพลาสติกของตัวค้ำยันซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการค้ำยัน โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กการวิบัติยังคงเป็นรูปแบบของพฤติกรรมคานแข็งเสาอ่อนเช่นเดิม

3. การใช้วัสดุเสริมเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเสริมหน้าตัดเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กข้ออ้อย พบว่าวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสให้กำลังรับแรงใกล้เคียงกับหน้าตัดที่ใช้เหล็กข้ออ้อย แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุเสริมเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเสริมหน้าตัดสามารถนำมาใช้ทดแทนเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของวัสดุในการค้ำยัน โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ได้มีผลต่อกำลังรับแรงกระทำของ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุเสริมคอนกรีตในหน้าตัดโดยใช้ค่า  $\rho$  เท่ากับ 2.26 ที่เป็นหน้าตัดที่ใช้วัสดุเสริมหน้าตัดต่ำที่สุดก็เพียงพอต่อการรับแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี

### ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่ อุปกรณ์และห้องทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Meteorological Department, *Earthquake Report in Thailand and Adjacent Areas in June 2017 Seismological Bureau*, 2017. Available from: <https://earthquake.tmd.go.th/report/file/seismo-report-1504512433.pdf> [Accessed 25 May 2023].
- [2] American Society of Civil Engineering, ASCE/SEI 41-23:2023. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. USA, 2013
- [3] Xu, S. and Niu, D. Seismic behavior of reinforced concrete braced frame. *ACI Structural Journal*, 2003, 100, pp. 120-125.
- [4] Khaloo, A.R. and Mahdi Mohseni, M. Nonlinear seismic behavior of RC frames with RC braces. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2008, 9(6), pp. 577-592.
- [5] Desai, J.P. et al. Seismic response of R.C. braced frames. *Computers and Structures*, 2017,29(4), pp. 557-568.
- [6] Abou-Elfath, H. and Ghobarah, A. Behaviour of reinforced concrete frames rehabilitated with concentric steel bracing. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27, pp. 433-444.
- [7] Maheri, M.R. et al. Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames. *Engineering Structures*, 2003, 25, pp. 1697-1705.

- [8] Ahiwale , D.D. *et al.* Seismic performance assessment of reinforced concrete frames with different bracing systems. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, 8, pp. 1–18
- [9] Poluraju, P. and Nageswara Rao, P.V.S. Pushover analysis of reinforced concrete frame structure using SAP 2000. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2011, 4(6), pp. 684-690.
- [10] Hakim, R.A. *et al.* Application of Pushover Analysis for Evaluating Seismic Performance of RC Building. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, 3(1), pp. 1657–1662.
- [11] Milheiro, J. *et al.* Evaluation of The Contribution of Masonry Infill Panels on The Seismic Behavior of Two Existing Reinforced Concrete Buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(4), pp. 1365–1374.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM D7205-06:2006. *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*. USA, 2013
- [13] Saeed, Y.M. *Behavior of Prestressed Concrete Beams with CFRP Strands*. Master Thesis, Portland State University, 2016.
- [14] Quayyum, S. *Bond behaviour of fibre reinforced polymer (FRP) rebars in concrete*. Master Thesis, The University of British Columbia, 2006.
- [15] Leeanansaksiri, A. *et al.* Seismic Capacity of Masonry Infilled RC Frame Strengthening with Expanded Metal Ferrocement. *Engineering Structures*, 2018, 159, pp. 110-127.