

การออกแบบกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้รับแรงเฉือนด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์

จันทกานต์ เมาน้อย¹, สุจิตรา มาเพชร¹, วัชร จันทรอนันต์^{1*} และ เอกนรา จันดา¹

¹วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*654602007@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการใช้วัสดุที่เป็นทางเลือกเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำไม้แปรรูปที่จัดเรียงแบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber; CLT) นำไปใช้เป็นโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือน ซึ่งเป็นองค์อาคารหลักของโครงสร้างอาคารที่ทำหน้าที่รับแรงแผ่นดินไหว โดยในการออกแบบกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้จะเลือกใช้วิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design; PBPD) การศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองอาคารตัวอย่างความสูง 10 ชั้น จำนวน 4 อาคาร โดยกำหนดให้แต่ละอาคารมีค่าปรับแก้พลังงาน (k) ที่แตกต่างกัน พื้นที่ตั้งอาคารอยู่ในอำเภอเมืองจังหวัดกาญจนบุรี และอ้างอิงระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 โดยมุ่งประเมินความสามารถในการรับแรงเฉือนของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ และพัฒนาแบบจำลองเพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคารไม้ที่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวและแรงเฉือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาพบว่า ค่าปรับแก้พลังงาน (k) ที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าแรงเฉือนฐานและพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้าง โดยอาคารที่มีค่า $k = 2.78$ ให้ค่าแรงเฉือนฐานสูงสุดเท่ากับ 4,344 กิโลนิวตัน ขณะที่อาคารที่มีค่า $k = 0.70$ ให้ค่าแรงเฉือนฐานเท่ากับ 435 กิโลนิวตัน และค่าการสั่นพื้นฐานของอาคารทั้ง 4 อาคารมีค่าอยู่ในช่วง 2.06–2.08 วินาที

คำสำคัญ: ไม้แผ่นไขว้ (CLT) การออกแบบแบบ PBPD แรงแผ่นดินไหว กลไกการคราก ค่าปรับแก้พลังงาน

Performance-Based Plastic Design Method for Cross Laminated Timber Shear Wall Structures

Chantakan Maonoi¹, Sujittra Mapetch¹, Watchara Chan-anan^{1*} and Eknara Junda¹

¹Civil Engineering Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

*654602007@webmail.npru.ac.th

Abstract

This study investigates the use of alternative materials to mitigate environmental impacts by utilizing Cross-Laminated Timber (CLT) as shear walls, which are key structural components responsible for resisting seismic forces in buildings. this study adopts a performance-based plastic design approach (Performance-Based Plastic Design; PBPD) for the design of CLT shear walls. The study employs four 10-story prototype building models, each assigned different energy modification factors (k). The buildings are assumed to be located in Mueang District, Kanchanaburi Province, and the seismic intensity is defined according to the Ministry of Interior Regulation on seismic-resistant design of buildings (B.E. 2564). The research focuses on evaluating the shear capacity of CLT shear walls and developing analytical models to support the design of timber buildings capable of efficiently resisting seismic and shear forces. The results indicate that different energy modification factors significantly affect the base shear and structural response behavior. The building model with $k = 2.78$ produced the highest base shear of 4,344 kN, whereas the model with $k = 0.70$ produced a base shear of 435 kN. In addition, the fundamental periods of the four building models ranged from 2.06 to 2.08 seconds.

Keywords: Cross-Laminated Timber (CLT), Performance – Based Plastic Design (PBPD), Seismic Load, Yield Mechanism, Energy modification factor

1. บทนำ

ในปัจจุบัน แนวคิดการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุธรรมชาติสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะไม้ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถหมุนเวียนได้และมีศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ จึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุโครงสร้างในงานก่อสร้างมากขึ้น

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีไม้แปรรูปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและประสิทธิภาพในการรับแรงของไม้ เช่น ไม้แบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber, CLT) ซึ่งเกิดจากการนำแผ่นไม้มาจัดเรียงสลับทิศทางและอัดประสานเข้าด้วยกัน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรง ความมั่นคง และสามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบโครงสร้างหลักของอาคารได้ โดยเฉพาะกำแพงรับแรงเฉือนที่มีบทบาทสำคัญในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว

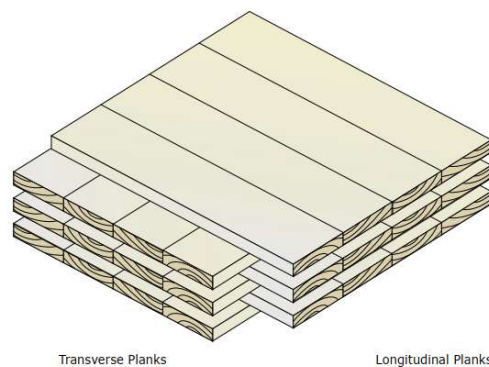
อย่างไรก็ตาม กำแพงรับแรงเฉือนจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับแรงแผ่นดินไหวจำเป็นต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างและกลไกการครากภายใต้แรงกระทำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์กำแพงไม้แบบแผ่นไขว้โดยใช้วิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design; PBPD) เพื่อกำหนดกลไกการครากและประเมินความสามารถในการรับแรงเฉือนของโครงสร้าง พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองอาคารเพื่อศึกษาพฤติกรรมของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ภายใต้แรงแผ่นดินไหว อันจะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วัสดุไม้ในงานออกแบบอาคารให้มีความปลอดภัยและสอดคล้องกับแนวทางการก่อสร้างอย่างยั่งยืนในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองสำหรับกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้
- 2.2 เพื่อประยุกต์ใช้วิธี Performance-Based Plastic Design; PBPD สำหรับกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้
- 2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสลายพลังงานของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ที่มีค่าปรับแก้พลังงานที่แตกต่างกัน

3. แผ่นไม้แบบไขว้ (Cross-Laminated Timber; CLT)

แผ่นไม้แบบแผ่นไขว้เป็นผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูปที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกในยุโรปและได้แพร่หลายไปในหลายประเทศทั่วโลก เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น จีน และนิวซีแลนด์ แผ่นไม้แบบไขว้ได้รับความนิยมทั้งในอาคารและบ้านเมือง คุณสมบัติและการออกแบบแผ่นไม้แบบไขว้ ได้ผ่านการรับรองทางเทคนิคระดับประเทศเริ่มตั้งแต่ปี 1998 และระดับนานาชาติของยุโรปเริ่มตั้งแต่ปี 2006 มาตรฐานแผ่นไม้แบบไขว้ของยุโรปมาตรฐานแรกคือ Timber Structures Cross Laminated Timber Requirements (EN 16351) แผ่นไม้แบบไขว้ผลิตจากการนำแผ่นไม้แปรรูปแต่ละแผ่นมาวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ทำมุม 90 องศา ดังแสดงในภาพที่ 1 ส่วนการเรียงแผ่นไม้แปรรูปในชั้นสุดท้ายจะให้แผ่นบนและแผ่นล่างของแผ่นไม้แบบไขว้ให้มีทิศทางของเสี้ยนไม้ขนานกับทิศทางจตุรรองรับดังแสดงในภาพที่ 1 และยึดติดแต่ละแผ่นด้วย กาว ตะปู หรือเดือยไม้ เมื่อยึดติดกันแล้ว ในระหว่างแผ่นไม้แปรรูปจะเกิดการประสานกัน (Interlocking Cross-Laminated Timber; ICLT) จะทำให้รับกำลังได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะรับแรงได้ทั้งในระนาบและนอกระนาบ โดยแผ่นไม้แบบไขว้จะมีจำนวนการวางซ้อนกันอย่างน้อย 3 ชั้น และโดยทั่วไปจะวางแผ่นไม้ซ้อนกันเป็นจำนวนคี่ แผ่นไม้แบบไขว้นี้นำมาใช้เป็นพื้นและผนังกันอย่างแพร่หลาย [3] Gagnon, S., E.M. Bilek, L. Podesto and P. Crespell. (2013)

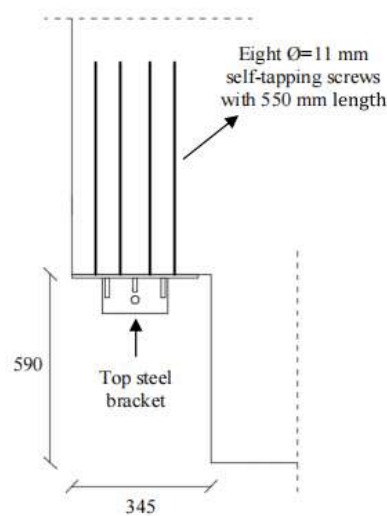
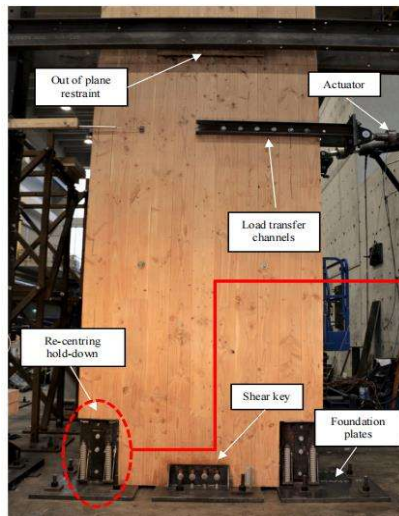


ภาพที่ 1 ลักษณะการซ้อนทับของแผ่นไม้แปรรูป [1]

4. การทดสอบขนาดใหญ่ของผนังไม้แบบแผ่นไขว้ที่มีตัวยึดแบบกลับสู่ศูนย์กลาง (Re-Centring Hold-Downs)

4.1 แผงผนังไม้แบบแผ่นไขว้

การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2 แผงผนังไม้แบบแผ่นไขว้ที่ใช้ในการทดสอบมีความสูง 6 เมตร กว้าง 2.025 เมตร หนาชั้นละ 40 มิลลิเมตร ซึ่งใช้แผ่นไม้มาประกบกันทั้งหมด 5 ชั้น ทำให้มีความหนาทั้งหมด 200 มิลลิเมตร ผนังใช้เกรดไม้ MSG 8 มีความหนาแน่น 510 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจึงเท่ากับ 1.2 ตัน ตัวยึด (Hold-Down) ถูกยึดกับแผ่นฐานรากด้วยสลักเกลียว M20 (เกรด 8.8) และเว้นระยะห่างระหว่างตัวยึด (Hold-Down) กับแผ่นฐานราก 10 มิลลิเมตร [4] Hashemi, A. and P. Quenneville. (2020) เพื่อรองรับการเคลื่อนตัวในการบีบอัด และใช้สกรูยาวยึดตัวยึด (Hold-Down) เข้ากับผนังที่มุมด้านล่างดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนการทดสอบ [2]

4.2 ตัวยึด (Hold-Downs) และแผ่นฐานราก (Foundation Plates)

ตัวยึด (Hold-Downs) ให้การโก่งตัวสูงสุดในแรงดึงได้ 70 มิลลิเมตร และแรงอัดได้ 20 มิลลิเมตร และฐานรากจะใช้แผ่นเหล็กหนา 36 มิลลิเมตร จำนวน 3 แผ่น ทำจากเหล็กกล้าเกรด 350 MPa แผ่นฐานรากแต่ละแผ่นจะยึดติดกับพื้นคอนกรีตโดยใช้ Posttensioned Rods ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร ยึดทั้ง 4 มุม

4.3 Shear Keys

Shear Key ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้เพื่อลดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนระหว่างผนังกับฐานรากหรือพื้นด้านล่างในขณะที่รับแรงกระทำด้านข้างมีการออกแบบให้รูของ Shear Key รองรับารเคลื่อนที่ด้านข้าง 5% ในระหว่างที่ผนังโยก และใช้น็อต M20 เกรด 8.8 จำนวน 4 ตัวเพื่อยึด Shear Key เข้ากับผนัง

ก่อนการทดลองมีการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 300 กิโลนิวตัน เพื่อใช้เป็นแรงที่กระทำที่ด้านข้างของผนัง โดยติด Load Cell ไว้ที่แม่แรงไฮดรอลิกเพื่อวัดแรง และติดตั้ง Linear Variable Displacements Transducers (LVDT) ไว้ที่ตัวยึด (Hold-Down) แต่ละตัวเพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง และติดตั้ง Shear Keys เพื่อวัดการเคลื่อนที่ระหว่างผนังกับฐานราก นอกจากนี้ยังมีการนำ LVD มาใช้เพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวนอนของผนังไม้แบบแผ่นไขว้

5. การออกแบบพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design; PBPD)

การออกแบบพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design; PBPD) เป็นแนวคิดการออกแบบโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้าง โดยสามารถกำหนดกลไกการคราก (Yield Mechanism) ของโครงสร้างและระดับการเสียรูป (Deformation) ภายใต้แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่กำหนด แนวคิดการออกแบบนี้ใช้การกำหนดค่าการเยื้องตัวเป้าหมาย (Pre-Selected Target Drift) และกลไกการคราก (Yield Mechanism) เป็นขีดจำกัดของสมรรถนะเป็นเกณฑ์ ค่าแรงเฉือนฐานสำหรับการออกแบบได้มาจากการพิจารณาแนวคิดสมดุลพลังงาน (Energy Balance Concept) ดังแสดงในภาพที่ 29 ที่สอดคล้องกับระดับการเยื้องตัวเป้าหมายและกลไกการครากที่กำหนดไว้ การออกแบบขีดจำกัดของพลาสติกจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้สามารถตอบสนองตามกลไกที่เลือกได้ วิธี PBPD ทำให้พบว่าโครงสร้างที่ออกแบบจะแสดงพฤติกรรมตามที่กำหนดไว้ในช่วงที่ไม่ยืดหยุ่น วิธี PBPD จึงตรงกับเป้าหมายของการออกแบบตามสมรรถนะโดยทำให้ผู้ออกแบบสามารถควบคุมการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้ระดับแรงกระทำที่แตกต่างกันได้

5.1 ขั้นตอนการออกแบบตามวิธี PBPD สำหรับผนังรับแรงเฉือน

5.1.1 กลไกการครากที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (Pre-Selected Yielding Mechanism)

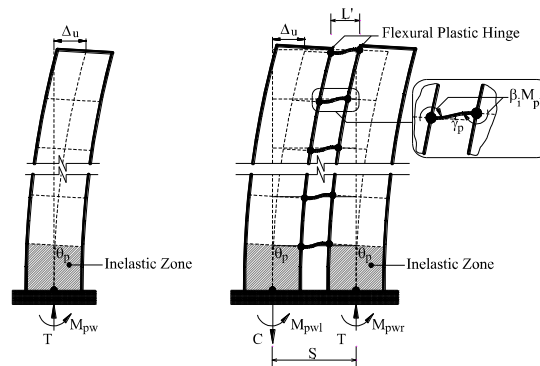
วิธี PBPD ได้รับการปรับเพื่อให้เหมาะกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน [2] Chan-Anan, W. and S. Leelatawivat. (2015) วิธี PBPD สำหรับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนเริ่มต้นด้วยการเลือกกลไกการครากเป้าหมาย (Target Yield Mechanism) พร้อมด้วยชุดขององค์ประกอบการครากที่กำหนด (Designated Yielding Members-DYMs) สำหรับโครงสร้างผนัง ซึ่งกลไกที่เลือกประกอบด้วยกลไกการครากจากการดัดที่ฐานในกรณีของผนังรับแรงเฉือนแบบเดี่ยว และการครากจากการดัดที่ฐานของผนังกับการครากเฉือนของคานคู่ในกรณีของผนังรับแรงเฉือนคู่ดังภาพที่ 3 แสดงกลไกการครากที่เลือก หลังจากกำหนดกลไกการครากที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะได้ค่าการเยื้องตัวเป้าหมายโดยค่าการเยื้องตัวเป้าหมายจะใช้เพื่อจำกัดระบบและความต้องการความเหนียวขององค์ประกอบสำหรับระดับอันตรายที่กำหนด สำหรับระบบผนัง ค่าการเยื้องตัวเป้าหมายถูกเลือกส่วนใหญ่เพื่อจำกัดการหมุนแบบพลาสติกที่ฐานของผนัง ความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนแบบพลาสติกและการเยื้องตัวระหว่างชั้นที่กำหนดสำหรับกลไกการครากที่เลือกแสดงดังสมการที่ (1)

$$\theta_p = \theta_{target} - \theta_y = \frac{\theta_{max}}{\sigma_d} - \theta_y \quad (1)$$

โดยที่	θ_p	คือ การหมุนพลาสติก (Plastic Rotation)
	θ_{target}	คือ ค่าการเยื้องตัวเป้าหมาย (Target Story Drift)
	θ_{max}	คือ ค่าการเยื้องตัวสูงสุด (Peak Story Drift) ที่เกิดขึ้นภายใต้ระดับแรงที่กำหนด
	σ_d	คือ อัตราส่วนระหว่างการเยื้องตัวเฉพาะชั้น (Inter - Story Drift Ratio) ตลอดความสูงของอาคารกับค่าการเยื้องตัวเฉลี่ยที่เกิดจากโหมดแรก
	θ_y	คือ ค่าการเยื้องตัวเมื่อเกิดการคราก (Yield Drift) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\Theta_y = 0.001 \frac{h}{l_w} \quad (2)$$

โดยที่ h คือ ความสูงทั้งหมดของอาคาร
 l_w คือ ความกว้างทั้งหมดของอาคาร



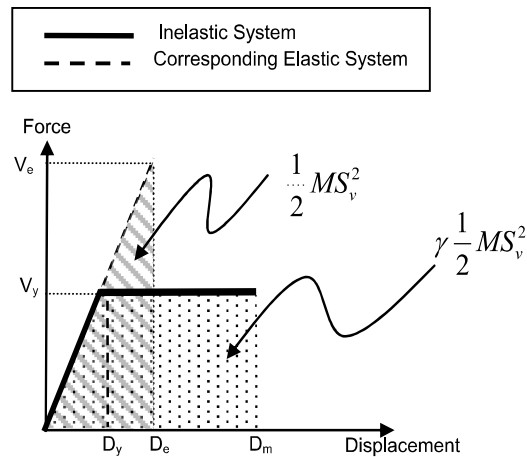
ภาพที่ 3 โครงสร้างผนังรับแรงเฉือนเดี่ยวและโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนคู่ [3]

5.1.2 การออกแบบแรงเฉือนฐาน (Design Base Shear)

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี PBPD แรงเฉือนฐานที่ออกแบบจะคำนวณโดยใช้แนวคิดสมมูลพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 4 แนวคิดนี้อิงตามสมมุติฐานที่ว่า พลังงานจากพฤติกรรมแรงต่อการเสียรูปแบบพลาสติก ($E_e + E_p$) และของระบบยึดหยุ่นที่สอดคล้องกัน (E) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันโดยอาศัยตัวแปรที่เรียกว่า γ แนวคิดสมมูลพลังงานแสดงดังสมการที่ (3)

$$\gamma E = 0.5 \gamma M S_v^2 = E_e + E_p \quad (3)$$

โดยที่ E_e คือ พลังงานยึดหยุ่น
 E_p คือ พลังงานไม่ยึดหยุ่น
 S_v คือ ความเร็วเทียมเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ
 M คือ มวลรวมของโครงสร้าง



ภาพที่ 4 แนวคิดสมดุลพลังงาน [3]

แรงเฉือนที่ฐานคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{V_y}{W} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\gamma C_e^2}}{2} \quad (4)$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักของโครงสร้าง
 C_e คือ ค่าความเร่งเทียบตามการออกแบบที่ถูกทำให้เป็น
 ตามมาตรฐาน (Sa/g)
 γ คำนวณได้จากสมการที่ (5)
 α คำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\gamma = \frac{2\mu - 1}{R_\mu^2} \quad (5)$$

โดยที่ μ คือ อัตราส่วนความเหนียว
 R_μ คือ ปัจจัยลดแรงจากการคราก

$$\alpha = \left(\sum_{j=1}^n \lambda_i h_i \right) \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \quad (6)$$

โดยที่ θ_p คือ การหมุนพลาสติก (Plastic Rotation)
 h_i คือ ความสูงจากฐานถึงชั้นที่ i
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เท่ากับ 9.81 m/s²)
 T คือ คาบการสั่นของอาคารคำนวณได้จากสมการที่ (7)
 λ_i คือ ตัวประกอบการกระจายแรงด้านข้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$T = C_t h_n^\beta \quad (7)$$

โดยที่ C_t คือ 0.0488 สำหรับอาคารไม้
 h_n คือ ความสูงทั้งหมดของอาคาร (มีหน่วยเป็นเมตร)
 β คือ 0.75

$$\lambda_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.5T-0.2} \quad (8)$$

โดยที่ w_j คือ น้ำหนักของอาคารที่ความสูง j
 h_j คือ ความสูงของอาคารที่ตำแหน่ง j
 w_n คือ น้ำหนักของอาคารชั้นที่ n
 h_n คือ ความสูงของอาคารชั้นที่ n
 j คือ ตำแหน่งของชั้นอาคาร
 i คือ ระดับชั้นอาคาร
 n คือ จำนวนชั้นของอาคาร
 β_i คือ ค่าปรับแก้การกระจายแรงเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$\beta_i = \left(\frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{0.5T-0.2} \quad (9)$$

แรงต้านข้างที่กระทำกับโครงสร้างอาคารแต่ละชั้นคำนวณได้ดังสมการที่ (10)

$$F_i = \lambda_i V_y \quad (10)$$

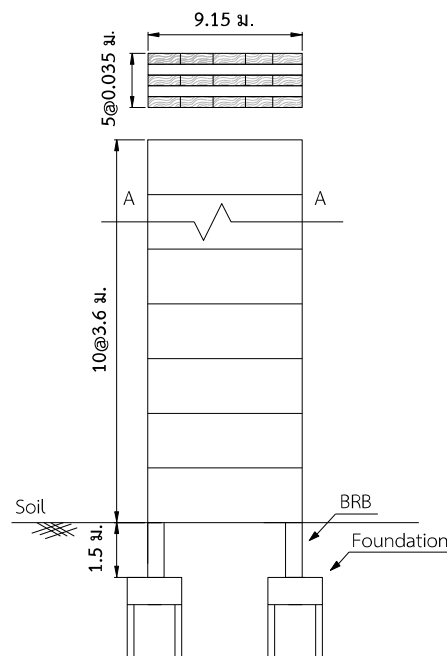
6.วิธีการ

การศึกษานี้ดำเนินการโดยพัฒนาแบบจำลองอาคารผนังไม้แบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber; CLT) สูง 10 ชั้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยอาคารตัวอย่างมีความสูงรวม 36 เมตร ความสูงแต่ละชั้น 3.6 เมตร และมีความกว้าง 9.15 เมตร กำหนดให้ผนังรับแรงเฉือนติดตั้งองค์อาคารรั้งยึดที่ไม่โก่งเดาะ (Buckling Restrained Brace; BRB) บริเวณฐานของผนัง อาคารตัวอย่างจำนวน 4 อาคารถูกกำหนดให้มีค่าปรับแก้พลังงาน (k) แตกต่างกันได้แก่ 2.78, 1.39, 0.93 และ 0.70 เพื่อศึกษาผลของค่าดังกล่าวต่อพฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคาร

การวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design, PBPD) โดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของอาคารอยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี และอ้างอิงค่าพารามิเตอร์ทางแผ่นดินไหวตามประกาศกระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2564 [5] Royal Thai Government Gazette. (2021) จากนั้นนำข้อมูลการตอบสนองเชิงสเปกตรัมมาคำนวณหาค่าการสั่นพื้นฐานค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธี PBPD

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์ดังกล่าว จึงคำนวณค่าปรับแก้การกระจายแรงเฉือน ค่าตัวประกอบการกระจายแรงด้านข้าง ค่าปรับแก้ความเหนียวของอาคาร รวมถึงแรงเฉือนฐานและแรงแผ่นดินไหวที่กระทำในแต่ละชั้น เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบผนังรับแรงเฉือนและประเมินพฤติกรรมการตอบสนองของอาคาร

สำหรับการออกแบบผนังไม้แบบแผ่นไขว้ ได้พิจารณาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของผนังโดยอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CLT [1] Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่ารับแรงของผนังและเปรียบเทียบกับแรงที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PBPD เพื่อประเมินความเพียงพอของกำลังรับแรงและศึกษาผลของค่าปรับแก้พลังงานที่มีต่อสมรรถนะของโครงสร้างอาคารไม้แบบแผ่นไขว้ภายใต้แรงแผ่นดินไหว



ภาพที่ 5 ผนังรับแรงเฉือนที่มีความสูง 10 ชั้น

7. ผลการศึกษา

จากการคำนวณแรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับอาคารด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design; PBPD) ทำให้ได้ค่าแรงเฉือนฐานที่ออกแบบของอาคารแต่ละตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1 และเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกคงที่กับแรงแผ่นดินไหวที่คำนวณด้วยวิธี PBPD ของแต่ละอาคารไปใส่ในโปรแกรม SAP2000 จะทำให้ได้แรงปฏิกิริยาที่ฐานของผนัง จากนั้นนำแรงปฏิกิริยาที่ได้จากโปรแกรมไปคำนวณขนาดหน้าตัดขององค์อาคารรับยึด



ที่ไม่โก่งเดาะ (BRB) ทำให้ได้ขนาดหน้าตัดของ BRB แสดงดังตารางที่ 1 และจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรม Perform3D ทำให้ได้ค่าการสั่นพื้นฐานของอาคารแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าแรงเฉือนฐานที่ออกแบบและขนาดหน้าตัดของ BRB ของแต่ละอาคาร

ชื่ออาคาร	ค่าปรับแก้พลังงาน (k)	แรงเฉือนฐานที่ ออกแบบ (กิโลนิวตัน)	แรงปฏิกิริยาที่ฐานผนัง (กิโลนิวตัน)	ขนาดหน้าตัด BRB (ตารางเซนติเมตร)
A	2.78	4344	24628.11	529
B	1.39	2179	17829.03	383
C	0.93	1455	15552.18	334
D	0.70	1092	14409.62	310

ตารางที่ 2 ค่าการสั่นพื้นฐานของอาคาร 10 ชั้น ที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม Perform3D

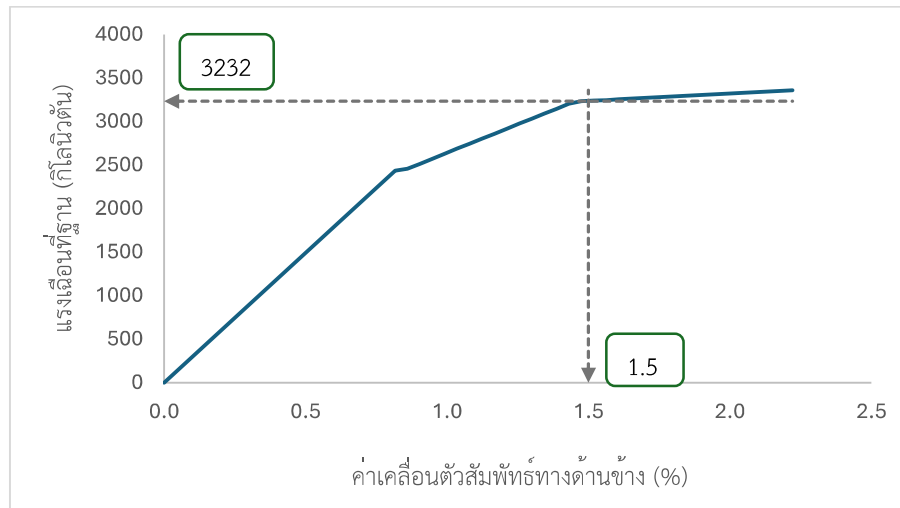
ชื่ออาคาร	ความสูง (เมตร)	ค่าตัวประกอบปรับแก้ (η)	ค่าปรับแก้พลังงาน (k)	ค่าการสั่นพื้นฐานของ อาคาร (วินาที)
A	36	0.2	2.78	2.06
B	36	0.4	1.39	2.07
C	36	0.6	0.93	2.08
D	36	0.8	0.70	2.08

จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ที่มีค่าปรับแก้พลังงาน (k) ที่แตกต่างกัน จำนวน 4 อาคาร ได้แก่ อาคาร A, B, C และ D ด้วยโปรแกรม Perform3D โดยการศึกษาจะเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์แรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างของอาคาร

7.1. ค่าความสัมพันธ์แรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง

(1) อาคาร A

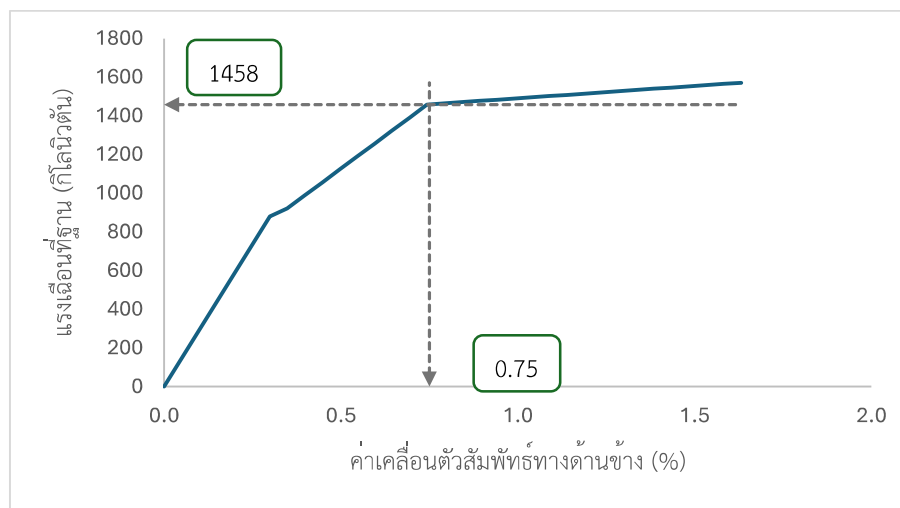
แสดงค่าความสัมพันธ์แรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง เมื่อนำแรงแผ่นดินไหวที่คำนวณด้วยวิธี PBPD ไปออกแบบโครงสร้างอาคารพบว่า ค่าต้านทานแรงเฉือนที่ฐานมีค่า 3232 กิโลนิวตัน และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากมีค่าร้อยละ 1.5 แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างกับแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร A ที่มีค่าปรับแก้พลังงาน (k) เท่ากับ 2.78

(2) อาคาร B

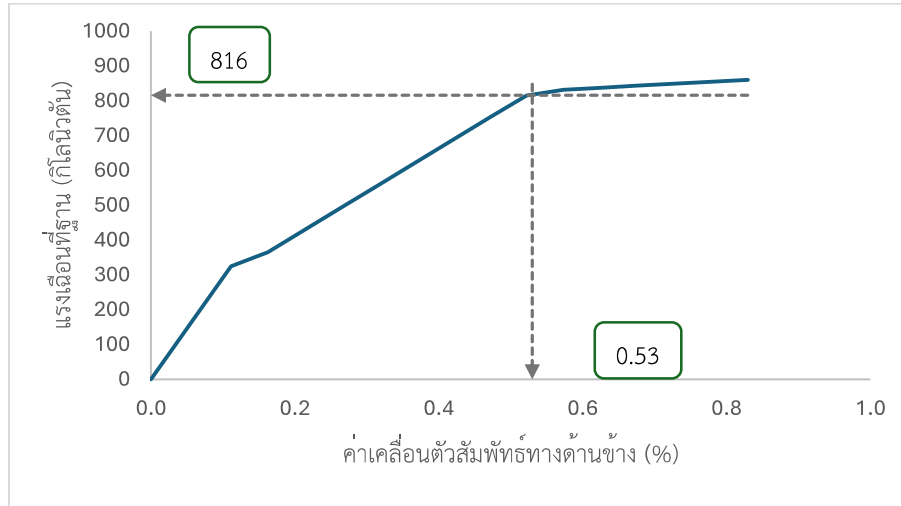
แสดงค่าความสัมพันธ์แรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง เมื่อนำแรงแผ่นดินไหวที่คำนวณด้วยวิธี PBPD ไปออกแบบโครงสร้างอาคารพบว่า ค่าต้านทานแรงเฉือนที่ฐานมีค่า 1458 กิโลนิวตัน และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากมีค่าร้อยละ 0.75 แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างกับแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร B ที่มีค่าปรับแก้พลังงาน (k) เท่ากับ 1.39

(3) อาคาร C

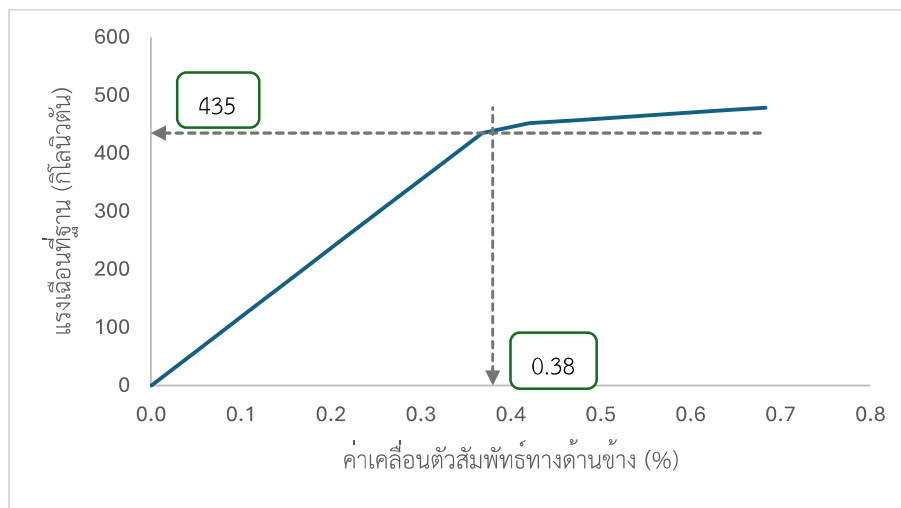
แสดงค่าความสัมพันธ์แรงเฉือนพื้นฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง เมื่อนำแรงแผ่นดินไหวที่คำนวณด้วยวิธี PBPD ไปออกแบบโครงสร้างอาคารพบว่า ค่าต้านทานแรงเฉือนพื้นฐานมีค่า 816 กิโลนิวตัน และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากมีค่าน้อยละ 0.53 แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างกับแรงเฉือนพื้นฐานของอาคาร C ที่มีค่าปรับแก้พลังงาน (k) เท่ากับ 0.93

(4) อาคาร D

แสดงค่าความสัมพันธ์แรงเฉือนพื้นฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างเมื่อนำแรงแผ่นดินไหวที่คำนวณด้วยวิธี PBPD ไปออกแบบโครงสร้างอาคารพบว่า ค่าต้านทานแรงเฉือนพื้นฐานมีค่า 435 กิโลนิวตัน และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากมีค่าน้อยละ 0.38 แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างกับแรงเฉือนพื้นฐานของอาคาร D ที่มีค่าปรับแก้พลังงาน (k) เท่ากับ 0.70

8. วิจัยผลการศึกษา

8.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์แรงเฉือนพื้นฐานกับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง

โดยเปรียบเทียบค่าแรงเฉือนพื้นฐานและค่ามุมเป้าหมายการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากของอาคารที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี PBPD กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Perform3D ค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี PBPD กับค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Perform3D ของอาคาร A, B, C และ D แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าแรงเฉือนพื้นฐานและค่ามุมเป้าหมายการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากของอาคารที่ได้จากการออกแบบและจากการวิเคราะห์ในแบบจำลองของแต่ละอาคาร

ชื่ออาคาร	ค่าปรับแก้พลังงาน (k)	ค่าที่ได้จากการออกแบบ		ค่าที่ได้จากแบบจำลอง	
		แรงเฉือนพื้นฐาน (กิโลนิวตัน)	Θ_y (%)	แรงเฉือนพื้นฐาน (กิโลนิวตัน)	Θ_y (%)
A	2.78	4344	0.4	3232	1.5
B	1.39	2179	0.4	1458	0.75
C	0.93	1455	0.4	816	0.53
D	0.70	1092	0.4	435	0.38

(1) อาคาร A

ค่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่า 3232 กิโลนิวตัน ซึ่งน้อยกว่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ออกแบบไว้ 4344 กิโลนิวตัน คิดเป็นร้อยละ 25.60 และตามที่ได้กำหนดมุมเป้าหมายการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากของอาคารไว้ร้อยละ 0.4 พบว่า อาคารถึงจุดครากจริงที่ร้อยละ 1.5 ซึ่งมากกว่าที่ออกแบบไว้ร้อยละ 275

(2) อาคาร B

ค่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่า 1458 กิโลนิวตัน ซึ่งน้อยกว่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ออกแบบไว้ 2179 กิโลนิวตัน คิดเป็นร้อยละ 33.09 และตามที่ได้กำหนดมุมเป้าหมายการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากของอาคารไว้ร้อยละ 0.4 พบว่า อาคารถึงจุดครากจริงที่ร้อยละ 0.75 ซึ่งมากกว่าที่ออกแบบไว้ร้อยละ 87.5

(3) อาคาร C

ค่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่า 816 กิโลนิวตัน ซึ่งน้อยกว่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ออกแบบไว้ 1455 กิโลนิวตัน คิดเป็นร้อยละ 43.92 และตามที่ได้กำหนดมุมเป้าหมายการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากของอาคารไว้ร้อยละ 0.4 พบว่า อาคารถึงจุดครากจริงที่ร้อยละ 0.53 ซึ่งมากกว่าที่ออกแบบไว้ร้อยละ 32.5

(4) อาคาร D

ค่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่า 435 กิโลนิวตัน ซึ่งน้อยกว่าแรงเฉือนพื้นฐานที่ออกแบบไว้ 1092 กิโลนิวตัน คิดเป็นร้อยละ 60.16 และตามที่ได้กำหนดมุมเป้าหมายการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้างที่จุดครากของอาคารไว้ร้อยละ 0.4 พบว่า อาคารถึงจุดครากจริงที่ร้อยละ 0.38 ซึ่งน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ร้อยละ -5

9. สรุป

การศึกษานี้ได้นำวิธีการออกแบบพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance-Based Plastic Design; PBPD) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber; CLT) และศึกษาผลของค่าปรับแก้พลังงาน (k) ต่อพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ผลการศึกษาพบว่า ค่าปรับแก้พลังงาน (k) ส่งผลต่อค่าแรงเฉือนฐานที่ใช้ในการออกแบบ โดยอาคารที่มีค่า $k = 2.78$ ให้ค่าแรงเฉือนฐานที่ออกแบบสูงสุด ขณะที่อาคารที่มีค่า $k = 0.70$ ให้ค่าแรงเฉือนฐานต่ำที่สุด นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Perform3D ให้ค่าแรงเฉือนฐานต่ำกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบในทุกอาคาร โดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 25.60–60.16%

เมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่จุดคราก พบว่าอาคาร A, B และ C มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ขณะที่อาคาร D มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดมากที่สุด ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าวิธี PBPD สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือนแบบ CLT ได้ และค่าปรับแก้พลังงาน (k) มีผลต่อการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างอาคารไม่ให้มีสมรรถนะในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างเหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). *Cross Laminated Timber (CLT): Overview and Development*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351.
- [2] Chan-Anan, W. and S. Leelatawivat. (2015). *Performance-Based Plastic Design Method for Single and Coupled Shear Wall*. In *Conference on Civil Engineering and Environmental Engineering (ICCEE)*, 3-5 February 2015, Toshi Center Hotel, Tokyo, Japan.
- [3] Gagnon, S., E.M. Bilek., L. Podesto and P. Crespell. (2013). *Introduction to Cross Laminated Timber*, pp. 1-45. In Erol Karacabeyli and Brad Douglas., ed. *CLT Handbook Cross Laminated Timber*. U.S. Department of Agriculture, USA.
- [4] Hashemi, A. and P. Quenneville. (2020). *Large-Scale Testing of Low Damage Rocking Cross Laminated Timber (CLT) Wall Panels with Friction Dampers*. *Engineering Structures*.
- [5] Royal Thai Government Gazette. (2021). *Ministerial Regulation Prescribing Load-Bearing Capacity, Resistance, Durability of Buildings and Ground Supporting Buildings to Resist Seismic Forces of Earthquakes*, B.E. 2564 (2021). Retrieved August 17, 2024, from <https://ratchakitcha.soc.go.th>