

การออกแบบกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้รับแรงเฉือนด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์

จันทกานต์ เมาน้อย¹, สุธิมา ประทุมสูตร¹, สุจิตรา มาเพชร¹,
วัชรระ จันทรอนันต์^{1*} และเอกรา จันดา¹

¹วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*Watchara_j@yahoo.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งขบวนการผลิตซีเมนต์และเหล็กเสริมคอนกรีตนั้นต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม จึงได้ศึกษาวัสดุที่เป็นทางเลือกเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำไม้ที่เป็นไม้โตเร็วมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้เป็นไม้เศรษฐกิจได้ โดยการนำไม้มาแปรรูปแบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber: CLT) เพื่อเสริมความแข็งแรงของไม้เพื่อนำไปโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนซึ่งเป็นองค์อาคารหลักของโครงสร้างอาคารที่มีหน้าที่รับแรงแผ่นดินไหว สำหรับในการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวและกำหนดกลไกการคราก (Yield Mechanism) เพื่อออกแบบกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้จะใช้วิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance – Based Plastic Design, PBPD) และการออกแบบตามมาตรฐาน National Design Specification for Wood Construction (ANSI/AWC NDS) โดยอาคารตัวอย่างที่มีความสูง 5 10 และ 15 ชั้น ที่ตั้งอยู่ในอำเภอเมืองกาญจนบุรี ใช้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2564

กำหนด รับแรงเฉือนโดยใช้วิธีพลาสติก (Plastic Design Method) และเกณฑ์สมรรถนะ (Performance-Based Design) เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีออกแบบจุดยึดของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ ด้วยวิธี PBPD (Performance-Based Plastic Design) และศึกษาการสร้างแบบจำลองสำหรับกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการพัฒนาอาคารไม้ที่สามารถรับแรงแผ่นดินไหวและแรงเฉือนได้ดี

คำสำคัญ: ไม้แปรรูปแบบแผ่นไขว้ การออกแบบวิธีพลาสติกเชิงสมรรถนะ การรับแรงแผ่นดินไหว

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

Chantakan Maonoi¹, Suthima Prathummasut¹, Sujittra Mapetch¹,
Watchara Chan-anan^{1*} and Eknara Junda¹

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

*Watchara_j@yahoo.com

Abstract

Reinforced concrete is widely used in construction, but its production requires large amounts of natural resources and causes environmental impacts. This study investigates the use of Cross-Laminated Timber (CLT), made from fast-growing timber species, as an environmentally friendly alternative. CLT panels are used to form shear walls, which are key elements in resisting lateral loads during earthquakes.

This research applies the Performance-Based Plastic Design (PBD) method, together with the National Design Specification for Wood Construction (ANSI/AWC NDS), to design and evaluate the shear performance of CLT walls. Case studies include buildings with 5, 10, and 15 stories located in Mueang District, Kanchanaburi Province, with seismic loads determined according to the 2021 Ministry of Interior regulation.

The objective is to develop a practical design for the anchorage system of CLT walls and to create a modeling approach that can support seismic-resistant timber buildings in the future.

Keywords: Cross-Laminated Timber (CLT), PBD, Seismic Design, Shear Wall, Sustainable Material

1. บทนำ

ประเทศไทยมีศักยภาพทางด้านการเกษตรโดยปัจจัยภูมิประเทศ ภูมิอากาศ รวมถึงความรู้ความสามารถของเกษตรกร หากสามารถนำไม้ที่ใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตไม่นานมากนักที่อยู่ในวิสัยจะนำมาแปรรูปเป็นไม้สำหรับการก่อสร้างได้ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของไม้และสร้างทางเลือกในการประกอบอาชีพของเกษตรกรอีกทางหนึ่ง โดยการศึกษาไม้ที่นำเข้ามาภายในประเทศไทยมาผลิตแผ่นไม้แบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber, CLT) เป็นกรรมวิธีที่ทำให้ไม้มีความสามารถรับกำลังทางวิศวกรรมได้เพิ่มขึ้นตามจุดประสงค์การใช้งาน ซึ่งแผ่นไม้แบบไขว้เริ่มใช้ที่ประเทศออสเตรียและเยอรมนี เมื่อ ค.ศ. 1990 และการใช้งานถูกพัฒนาขึ้นมาตามลำดับจนกระทั่งทำไปใช้เป็นโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในโครงสร้างอาคาร สูง 18 ชั้น ก่อสร้างแล้วเสร็จในปี ค.ศ. 2016 ที่เมืองบรูมุนดัล (Brumunddl) ประเทศนอร์เวย์ (Norway) เป็นอาคารที่นำแผ่นไม้แบบไขว้เป็นโครงสร้างที่ต้านทานแรงลมและแรงแผ่นดินไหวอย่างสมบูรณ์แบบ ซึ่งเรียกแผ่นไม้แบบไขว้ที่ทำไปเป็นผนังรับแรงเฉือนนี้จะเรียกว่าผนังไม้แบบแผ่นไขว้รับแรงเฉือน

อีกทั้งหลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวครั้งรุนแรงจุดศูนย์กลางอยู่ที่เมืองเซโกะ ประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2568 ส่งผลให้อาคารในประเทศไทยเกิดความเสียหายในวงกว้างโดยการศึกษาจะสมมุติให้อาคารตัวอย่างสูง 15 ชั้น ตั้งอยู่ที่อำเภอ

เมืองกาญจนบุรีซึ่งมีระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในระดับที่สูงสำหรับประเทศไทย และการวิเคราะห์โครงสร้างจะใช้วิธีวิธีการออกแบบด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance – Based Plastic Design, PBPD) และการออกแบบตามมาตรฐาน National Design Specification for Wood Construction (ANSI/AWC NDS) ใช้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2564

2. วัตถุประสงค์

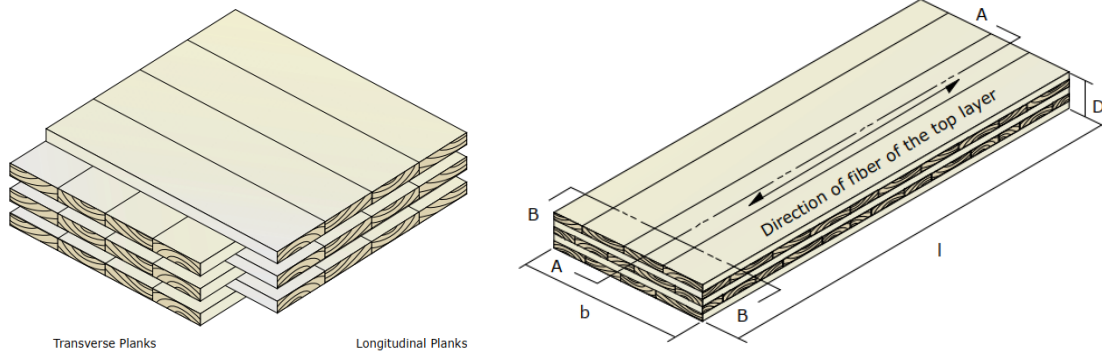
เพื่อเสนอวิธีการออกแบบผนังไม้แบบแผ่นไขว้เพื่อใช้เป็นผนังรับแรงเฉือนโดยคำนวณและวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ตามมาตรฐาน ANSI/AWC NDS โดยเนื่องจากการตอบสนองของโครงสร้างอาคารต่อการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจะอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) โดยวิธีการออกแบบด้วยวิธีพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์นี้มีจุดเด่นที่มีสมมุติฐานในช่วงไม่ยืดหยุ่น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างและอีกทั้งยังสามารถกำหนดกลไกการครากของโครงสร้างได้ (Yield Mechanism) ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายของโครงสร้างเมื่อเกิดแผ่นดินไหวได้ เพื่อเป็นแนวทางในการซ่อมอาคารหลังจากเกิดแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี

3. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะครอบคลุมการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้าง CLT ภายใต้แรงเฉือน และแรงจากแผ่นดินไหว การประยุกต์ใช้แนวคิด PBPD (Performance-Based Plastic Design Method) การจำลองพฤติกรรมเชิงกลผ่านโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบองค์ประกอบโครงสร้างที่สามารถนำไปใช้งานจริงในอาคารที่ต้องการความแข็งแรงและยั่งยืน โดยเฉพาะการตอบสนองของกำแพงไม้ภายใต้แรงจากแผ่นดินไหว และการประเมินพฤติกรรมด้านความเหนียวและการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง

4. แผ่นไม้แบบไขว้ (Cross-Laminated Timber, CLT)

แผ่นไม้แบบไขว้ผลิตมาจากการนำแผ่นไม้แปรรูปแต่ละแผ่นมาวางทับ (โดยทั่วไปในทิศทางตั้งฉากกัน) ดังแสดงในภาพที่ 1A การเรียงแผ่นไม้แปรรูปจะให้แผ่นบนและแผ่นล่างของแผ่นไม้แบบไขว้ให้มีทิศทางของเส้นไม้ขนานกับทิศทางจุดรองรับ ดังแสดงในภาพที่ 1B และยึดติดแต่ละแผ่นด้วย กาว ตะปู หรือเดือยไม้ เมื่อยึดติดกันแล้วในระหว่างแผ่นไม้แปรรูปจะเกิดการสอดประสานกัน (Interlocking Cross – Laminated Timber, ICLT) ทำให้รับกำลังได้เพิ่มมากขึ้น โดยแผ่นไม้แบบไขว้จะมีแผ่นไม้แปรรูปอย่างน้อยจำนวน 3 แผ่นที่นำมายึดติดกัน ไม้แปรรูปที่นำมาใช้มีความหนาตั้งแต่ 16 มิลลิเมตร ถึง 51 มิลลิเมตร มีความกว้าง 60 มิลลิเมตร ถึง 240 มิลลิเมตร เมื่อยึดติดเป็นแผ่นไม้แบบไขว้จะมีความกว้าง 0.60 เมตร 1.2 เมตร 2.4 เมตร และ 3.0 เมตร มีความหนาแน่นได้ถึง 508 มิลลิเมตร และมีความยาวได้ถึง 18 เมตร แผ่นไม้แบบไขว้นี้นำมาให้เป็น พื้นและผนังกันอย่างแพร่หลาย



A) ลักษณะการซ้อนทับของแผ่นไม้แปรรูป

B) ทิศทางการเรียงแผ่นไม้แปรรูป

ภาพที่ 1 การซ้อนทับและทิศทางการเรียงของแผ่นไม้แปรรูป

ที่มา: CLT Handbook (2013) [1]

การออกแบบแผ่นไม้แบบไขว้จะต้องพิจารณาถึงการรับแรงในระนาบและนอกระนาบและพฤติกรรมในระยะสั้นและระยะยาวซึ่งประกอบด้วย การโก่ง การก้มในระนาบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกตัว การสั่นสะเทือนของพื้น แรงอัดที่ขนานกับเสี้ยนไม้ การทนไฟ การดูดซับเสียง และระยะเวลาการใช้งาน ผนังรับแรงเฉือนมีวิธีออกแบบรับแรงต่าง ๆ ดังนี้

แรงอัดตามแนวแกน

$$\left(\frac{P}{F_c' A_{\text{parallel}}} \right) + \left[\frac{M + P \Delta \left(1 + 0.234 \frac{P}{P_{ce}} \right)}{F_b' S_{\text{eff}} \left(1 - \frac{P}{P_{ce}} \right)} \right] \leq 1.0 \quad (1)$$

เมื่อ P = แรงที่กระทำตามแนวแกน

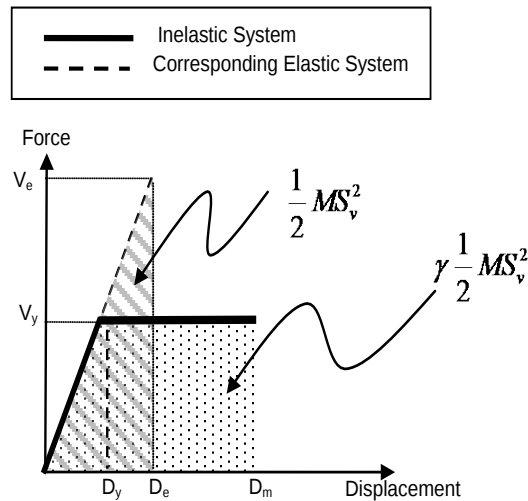
M = โมเมนต์ดัดที่กระทำ

Δ = ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัดตามแนวแกน

P_{ce} = แรงอัดวิกฤติ

5. การออกแบบวิธีพลาสติกเชิงสมรรถนะ (Performance-Based Plastic Design Method, PBPD)

การออกแบบวิธีพลาสติกเชิงสมรรถนะ พัฒนามาเพื่อปรับปรุงวิธีการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (Current Seismic Design Code) ที่ใช้สมมติฐานว่าเมื่อโครงสร้างอยู่ภายใต้แรงแผ่นดินไหวจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากโครงสร้างมีโอกาสจะเกิดพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้นได้เมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่ระดับรุนแรง แนวความคิดของการออกแบบวิธีพลาสติกเชิงสมรรถนะใช้หลักการสมดุลพลังงาน (Energy Balance) ที่เสนอโดย Lee and Goel, 2001, [2] Leelataviwat et al., 2008 [3] ร่วมกับการกำหนดกลไกการคราก (Yield Mechanism) ของโครงสร้างเมื่ออยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ระดับและตำแหน่งของความเสียหายของโครงสร้าง การคำนวณแรงเฉือนฐานสำหรับการออกแบบวิธีพลาสติกเชิงสมรรถนะ โดยอาศัยแนวคิดสมดุลพลังงานปรับแก้ (Modified Energy Balance Concept) ระหว่างช่วงเชิงเส้นและช่วงไม่เชิงเส้น ซึ่งเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 2



ภาพที่ 2 การสมดุลพลังงาน

ที่มา: Lee and Goel, 2001, [2] Leelataviwat et al., 2008 [3]

$$E_e + E_p = \gamma \frac{1}{2} MS_v^2 \quad (2)$$

เมื่อ E_e และ E_p คือ พลังงานในช่วงยืดหยุ่น และพลังงานในช่วงพลาสติก ตามลำดับที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียรูปทางด้านข้างตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ M คือ ผลรวมของมวลของระบบ S_v คือ ค่าความเร็วสเปกตรัมเสมือนที่ใช้ในการออกแบบ และ γ สัมประสิทธิ์พลังงาน (Energy Factor) (Lee and Goel, 2001) [2] คืออัตราส่วนของพลังงานระหว่างช่วงไม่ยืดหยุ่นและยืดหยุ่นซึ่งมีค่าดังแสดงในสมการที่ 3

$$\gamma = \frac{2\mu - 1}{R_\mu^2} \quad (3)$$

เมื่อ μ คือ สัดส่วนความเหนียว (Ductility Ratio) และ R_μ คือ สัมประสิทธิ์ปรับลดแรงคราก (Yield Force Reduction Factor) การสมดุลพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการ $R_\mu - \mu - T$ ที่เสนอโดย Newmark and Hall (1982) [4] ทั้งนี้แรงเฉือนที่ฐานคำนวณได้ตามสมการที่ 4

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

6. ระบบผนังคู่ Coupled (Wall systems)

ในระบบผนังคู่ (Coupled Wall systems) ในส่วนที่เป็นโมเมนต์ที่ฐานในผนังแต่ละแผ่นจะถูกแปลงให้เป็นแรงตามแนวแกน (axial forces) โดยอาศัยแรงเฉือน (Shear forces) ที่เกิดขึ้นในคานเชื่อม (coupling beams) ดูได้จากจากภาพที่ 1

พารามิเตอร์ที่ใช้วัดโมเมนต์ที่ถูกแปลง หรือเรียกว่า induced coupling action และควบคุมพฤติกรรมของระบบผนังคู่นี้ เรียกว่า Coupling Ratio (CR) สำหรับระบบที่มีผนังคู่ ค่าของ CR จะถูกนิยามดังสมการต่อไปนี้

$$CR = \frac{TL_w}{M_{max}} = \frac{TL_w}{TL_w + \sum M_{wall}} = \frac{L_w \sum M_{z,i}}{TL_w + \sum M_{wall}} \quad (5)$$

โดยที่ $M_{max} = (M_1 + M_2)$ = โมเมนต์พลิกคว่ำรวม (total overturning moment) ที่เกิดจากแรงต้านข้าง

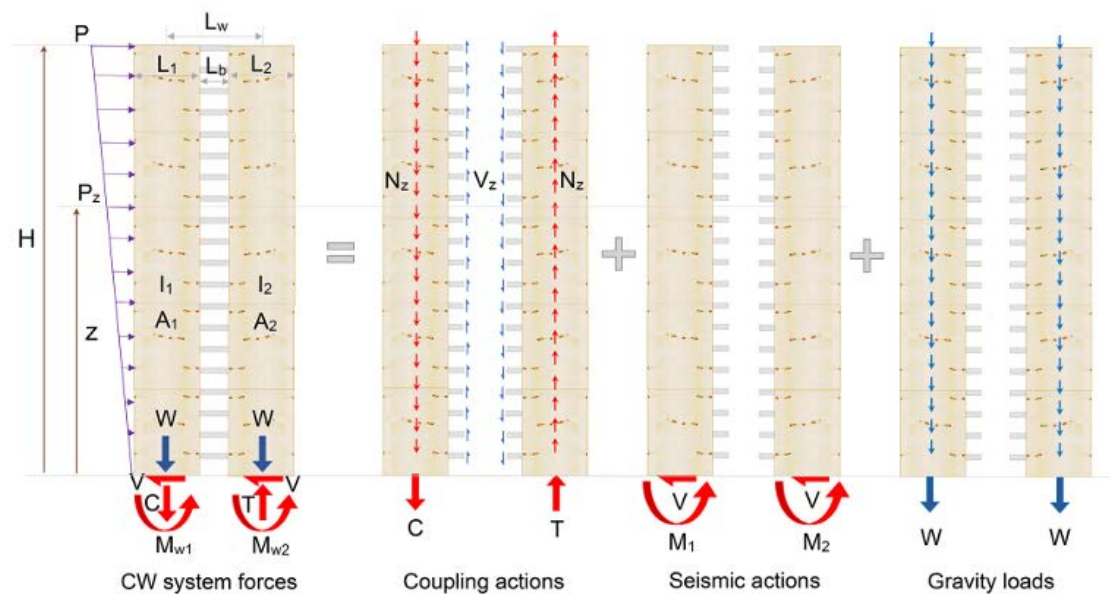
$T = C$ = แรงตามแนวแกน (axial load) ที่เกิดจากแรงเฉือนในคานเชื่อม

L_w = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของผนังคู่

M_{wall} = โมเมนต์ที่ฐานของผนังแต่ละแผ่นหลังจากที่ถูกลดลง (reduced base moment)

ซึ่ง ($M_{w1} = M_{w2}$ สำหรับผนังที่มีลักษณะสมมาตร)

$\sum V_{z,i}$ = ผลรวมของแรงเฉือนในคานเชื่อมที่กระทำบริเวณขอบของเสาทั้งหมด



ภาพที่ 3 ภาพการกระทำของแรงทางด้านข้างกับโมเมนต์ที่เกิดขึ้น

ที่มา : <https://www.sciencedirect.com> [5]

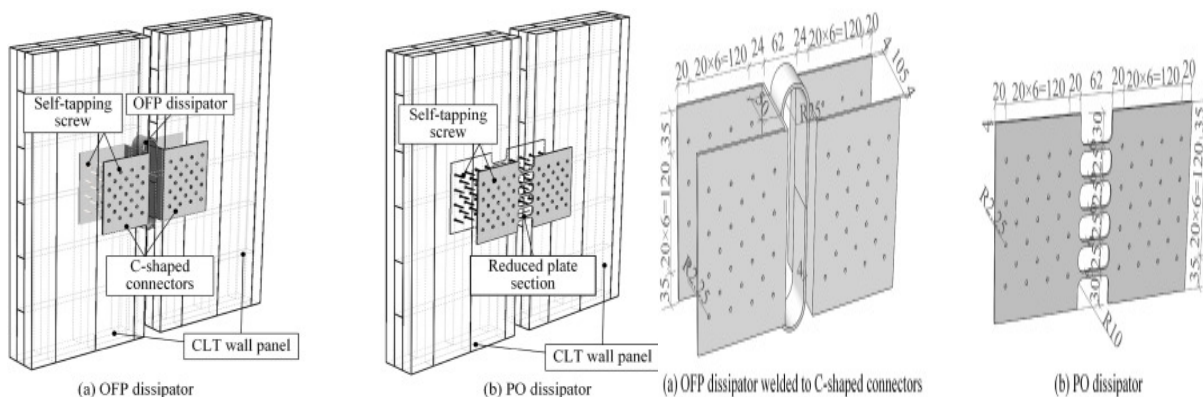
ค่า CR มีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะด้านโครงสร้างของระบบผนังคู่ (Coupled Wall systems) ค่าของ CR ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและความสม่ำเสมอของระบบผนังคู่ ผนังรับแรง (Wall piers) จะไม่เกิดการหมุนมากที่ฐานผนัง การเคลื่อนที่ของชั้นอาคาร การบิดเบี้ยวจากแรงเฉือนและการโก่งตัว (ในกรณีที่มีค่า CR ต่ำ) และจะไม่เกิดการบิดอัดก่อนเวลาอันควรจากแรงอัดตามแนวแกนที่สูง (ในกรณีที่มีค่า CR สูง) ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงควรสังเกตด้วยว่า ค่า CR จะแปรผันตามการตอบสนองตามประวัติของเวลา (time history response) ของระบบผนังคู่ เนื่องจากผลของแผ่นดินไหว (seismic GM action) ในช่วงเริ่มต้น ค่า CR จะเพิ่มขึ้นตามภาระต้านข้างที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคานเชื่อม (Coupling beam) เมื่อคานเชื่อมเข้าสู่ระยะพลาสติกการทำงานของโครงเฟรมจะลดลง และการทำงานด้านดัดของกำแพงเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดของ CR เนื่องจากโดยทั่วไปมีการใช้ค่าเริ่มต้นหรือค่า CR เชิงยืดหยุ่น (ค่า CR ที่สอดคล้องกับสัดส่วนสูงสุดของของโมเมนต์ที่ต้านทานโดยการทำงานร่วมของคานเชื่อม)

7. รูปแบบการการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงาน

ในบทความนี้ได้นำเสนอการติดตั้งตัวดูดซับพลังงานสองประเภท คือ O-shaped flexural plate dissipator (OFP) และ Plate with Openings dissipator (PO) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของผนังรับแรงเฉือน CLT ตัวดูดซับพลังงานทั้งสองถูกออกแบบให้ดูดซับพลังงานผ่านกลไกการโยกของผนัง CLT ได้ หากผนัง CLT ทำหน้าที่เป็นผนังโยกภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยมีการเชื่อมต่อที่เหมาะสมระหว่างแผ่นผนังที่เชื่อมกัน ตัวเชื่อมแนวดิ่งและเหล็กรูปตัว L จะช่วยให้เกิดการกระจัดสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นผนังที่เชื่อมต่อกัน และจะสามารถปล่อยพลังงานได้หลังจากที่โครงสร้างเกิดการเสียรูปถาวร โดยตัวดูดซับพลังงานจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายพลังงานให้กับระบบผนังรับแรงเฉือน CLT ดังภาพที่ 3 และคาดว่าแผ่นผนังจะยังคงสภาพเดิมภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ภาพที่ 4 (a) แสดงภาพแนวคิดของโครงสร้างของ OFP dissipator ซึ่งประกอบขึ้นโดยการตัดแผ่นเหล็กกล้าสองแผ่นด้วยความร้อนให้อยู่ในรัศมีที่กำหนด และเชื่อมต่อเข้าด้วยกันอย่างสมมาตรจากนั้นยึดเข้ากับด้านข้างของแผ่นผนังคู่ด้วยสกรูเจาะตัวเอง ควรสังเกตว่าความร้อนที่ใช้ในการตัดอาจทำให้เกิดความเค้นตกค้างในแผ่นเหล็กกล้า ซึ่งอาจส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวของวัสดุ การเกิดการสลายตัวของแผ่นเหล็กใน OFP ถูกออกแบบให้เป็นแหล่งการดูดซับพลังงานเสริมสำหรับผนังรับแรงเฉือนระบบผนังคู่

ภาพที่ 4 (b) แสดงภาพการติดตั้งโครงสร้างของ PO dissipator ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้ารูปแบบสมมาตรที่ยึดติดกับระบบผนังคู่เพียงด้านเดียว โดยการใช้สกรูเจาะตัวเอง การเสียรูปของการสลายตัว และการยึดด้วยสกรูเจาะตัวเองมีจุดประสงค์เพื่อกระจายพลังงานผ่านการเกิดการครากของการสลายตัว



ภาพที่ 4 รูปแบบการการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงาน

ที่มา : <https://www.sciencedirect.com> [6]

8. การผลิตและเทคโนโลยีของไม้แบบแผ่นไขว้

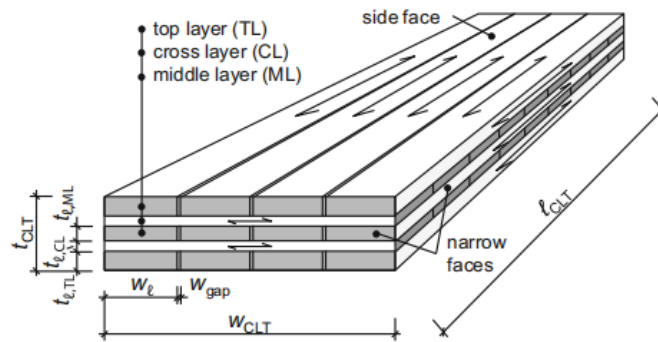
8.1 ลักษณะทั่วไปของไม้แบบแผ่นไขว้ในสหรัฐอเมริกา

ตามมาตรฐาน ANSI/APA PRG 320 ไม้แปรรูปที่นำมาใช้จะมีความหนาตั้งแต่ 16 ถึง 51 มิลลิเมตร มีความกว้าง 60 ถึง 240 มิลลิเมตร เมื่อยึดติดเป็นแผ่นไม้แบบไขว้จะมีความกว้าง 0.60, 1.2, 2.4, และ 3.0 เมตร มีความหนารวมได้ถึง 508 มิลลิเมตร และมีความยาวได้ถึง 18 เมตร

8.2 ลักษณะทั่วไปของไม้แบบแผ่นไขว้ในยุโรป

ขนาดทั่วไปของไม้แบบแผ่นไขว้ มีความยาวสูงสุด 18 เมตร (หรือ 30 เมตร) ความกว้างสูงสุด 3 เมตร (หรือ 4.8 เมตร) และความหนาไม่เกิน 300 ถึง 400 มิลลิเมตร ตัวแปรที่สำคัญสำหรับองค์ประกอบไม้แบบแผ่นไขว้แสดงอยู่ในภาพที่ 5

โดยทั่วไปแล้วแผ่นไม้แบบไขว้จะประกอบขึ้นจากแผ่นไม้ที่มีหน้าตัดรูปรีซึมและมีความหนา t_l เท่ากับ 12 ถึง 45 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน EN 16351 (2014) ของยุโรปกลางกำหนดความหนา t_l ของชั้นไม้แบบไขว้ เท่ากับ 20, 30 และ 40 มิลลิเมตร เนื่องจากแผ่นไม้แบบไขว้ที่รับแรงนอกระนาบจะเกิดความเค้นเฉือนแบบ *Rolling Shear* จึงมีการเสนอให้ใช้ความกว้างขั้นต่ำ w_l มากกว่าหรือเท่ากับ $4 t_l$ และตามมาตรฐาน EN 16351 (2014) ได้มีการกำหนดความกว้างของแผ่นไม้ w_l เท่ากับ 40 ถึง 300 มิลลิเมตร และความกว้างอ้างอิงของวัสดุฐานที่กำหนดโดย EN 384 (2010) $w_{l,ref}$ เท่ากับ 150 มิลลิเมตร แผ่นไม้แบบไขว้ที่รับแรงดัดนอกระนาบจะคำนึงถึงปัจจัยของระบบ $k_{sys,m}$ ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีแผ่นไม้ที่วางขนานกันในแนวยาวอย่างน้อย N มากกว่าหรือเท่ากับ 4 ต่อชั้น



ภาพที่ 5 ตัวแปรและเงื่อนไขที่สำคัญขององค์ประกอบ CLT

ที่มา: Eur.J.Wood Prod. (2016) [7]

9. การกำหนดค่าการทดสอบ

แรงอัดล่วงหน้า (Pre-Stressing) บนสลักเกลียวเสียดทานจะคงที่ตลอดการทดสอบ แต่มีการเปลี่ยนแปลงแรงอัดล่วงหน้า (Pre-Stressing) ที่ใช้กับสปริงแม่พิมพ์ (Die Springs) ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

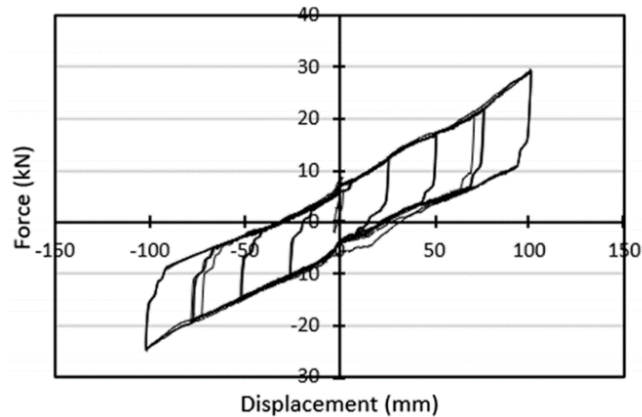
ตารางที่ 1 ค่าที่ใช้ในการทดสอบ

Test code	Pre-stressing force in each friction bolt (kN)	Pre-stressing force in the die springs (kN)	Lateral deflection of the wall (mm)
Test 1	10	4	100
Test 2	10	5	65
Test 3	10	7	58
Test 4	10	9	40

12. ผลการทดลองและสรุป

12.1 ประสิทธิภาพเชิงวัฏจักร (Cyclic Performance) ของระบบ

มีการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวงรอบของผนังไม้แบบแผ่นไขว้ทั้งหมด 4 ครั้ง กราฟการเสียรูปต่อการรับน้ำหนักแบบวงรอบแสดงในภาพที่ 15-18 จากรูปแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของระบบมีเสถียรภาพตลอดการรับน้ำหนักแบบวงรอบจำนวนหลายรอบ และแรงโน้มถ่วงของผนังที่ทำการทดสอบมีเพียงน้ำหนักของผนัง น้ำหนักครึ่งหนึ่งของ Actuator และน้ำหนักของ Load-Transfer Channels (รวม 12.5 กิโลนิวตัน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่ทดสอบนี้มีศักยภาพในการกลับคืนศูนย์กลางด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้ Dead Load เพิ่มเติม



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงวัฏจักร (Cyclic Performance) ของการทดสอบที่ 1

ที่มา: Hashemi and Quenneville (2020) [8]

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบ

	Item	Value
Geometric characteristics of the system	h (height of the wall, mm)	3315
	b (the width of the wall, mm)	2025
	L ₁ (level arm for the ascending hold-down, mm)	1508
	L ₂ (level arm for the descending hold-down, mm)	173
	L _w (level arm for the gravity loads, mm)	668
Target hold-down specifications	F _{1,slip} (slip force in the ascending hold-down, kN)	25
	F _{1,loading} (hold-down force in loading, kN)	36
	F _{1,unloading} (hold-down force in unloading, kN)	5
Target load-deformation behaviour of the system	F _{sys,slip} (horizontal slip force of the wall, kN)	10
	F _{sys,loading} (horizontal force in loading, kN)	29
	F _{sys,unloading} (horizontal force in unloading, kN)	16
	Δ _{sys} (deflection of the wall at the actuator level, mm)	40

13. ผลการทดลอง

จากการศึกษาโดยใช้ไม้ที่นำมาประกบกัน 5 ชั้น ความหนารวมเท่ากับ 6.875 นิ้ว พบว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 8,918,971.07 ปอนด์*ฟุต ซึ่งโมเมนต์ที่โครงสร้างสามารถรับแรงได้เท่ากับ 12,499,987.50 ปอนด์*ฟุต ซึ่งเป็นไปตามสมการและแรงเฉือนที่กระทำกับโครงสร้าง เท่ากับ 66,678.25 ปอนด์ ซึ่งแรงเฉือนที่โครงสร้างรับได้เท่ากับ 668,250 ปอนด์

14. สรุป

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและช่วยเพิ่มมูลค่าของไม้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น โดยการนำไม้มาก่อสร้างแทนการใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธี CLT ในการนำไม้เนื้ออ่อนหรือเศษไม้จากโรงงานหลายๆแผ่นมาประกบกันจนได้แผ่นไม้ขนาดหนาแล้วจึงนำไปใช้เพื่อรับแรงจากแผ่นดินไหว โดยใช้โปรแกรม PBPD (Performance-Based Plastic Design) ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร ซึ่งการคำนวณแรงแผ่นดินไหวสันสะท้อนจากแผ่นดินไหวโดยวิธีการออกแบบพลาสติกโดยใช้สมรรถนะเป็นเกณฑ์ (Performance – Based Plastic Design, PBPD) เพื่อออกแบบผนังรับแรงเฉือนโดยใช้แผ่นไม้แบบไขว้ มีความเป็นไปได้ ซึ่งเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

15. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Karabeyli, E., and Douglas, B. (Eds.). (2013). CLT Handbook: Cross-Laminated timber. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; Binational Softwood Lumber Council (BSLC); FPInnovations.
- [2] Lee, S.-S., and Goel, S.C., Performance-Based Design of Steel Moment Frames Using Target Drift and Yield Mechanics, Report No. UMCE 01-17, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI., 2001.
- [3] Leelataviwat, S., Saewon, W., and Goel, S.C. 2008. Application of Energy Balance Concept in Seismic Evaluation of Structures, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 135, No. 2, 113-121.
- [4] Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). Earthquake Spectra and Design. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- [5] Teweldebrhan, B. T., and Tesfamariam, S. (2022). Performance-Based Design of Tall-Coupled Cross-Laminated Timber Wall Building. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 51(10), 2677-2696. <https://www.sciencedirect.com>
- [6] Selamawit Dires, Thomas Tannert, "Performance of coupled CLT shear walls with internal perforated steel plates as vertical joints and hold-downs", Construction and Building Materials, Volume 346, 5 September 2022, 128389. <https://www.sciencedirect.com>
- [7] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer and A. Thiel. 2016. Crosslaminated timber (CLT): overview and development. Eur. J. Wood Prod 74: 331-351.
- [8] Hashemi and Quenneville (2020) Ashkan Hashemi, and Pierre Quenneville, "Large-scale testing of low damage rocking Cross Laminated Timber (CLT) wall panels with friction dampers", Engineering Structures 206 (2020) 110166.