

ผลตอบสนองต่อแรงลมของอาคารหน้าตัดรูปวงกลมและวิธีการลดผลตอบสนอง โดยใช้มวลหน่วงปรับค่าและมวลน้ำหน่วงปรับค่า Wind Response of Circular Towers and Response Reduction Method by Tuned Mass Dampers and Tuned Liquid Dampers

พัฒนศิริ ใจก้าวหน้า^{1*} รศ.ดร.วิโรจน์ บุญญิกัญญา²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: Patsiri.j@gmail.com

บทคัดย่อ

หอบสูงหน้าตัดวงกลมเป็นอาคารที่มีรูปร่างอ่อนแอซึ่งมีการตอบสนองต่อแรงลมอย่างมาก การสั่นไหวของอาคารจากแรงลมอาจรบกวนความสบายของผู้อยู่อาศัยและสร้างความเสียหายต่อองค์อาคารที่ไม่ใช่โครงสร้าง จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนที่เรียกกันว่า Dampers เพื่อช่วยควบคุมการตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงสั่นไหว โดยการเพิ่มความหน่วงเทียบเท่าให้กับระบบโครงสร้างโดยรวม ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการออกแบบทั่วไปคือ ลดการเปลี่ยนแปลงวัสดุโครงสร้างและไม่กระทบการออกแบบส่วนอื่น ๆ โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาเพื่อหาสมการคำนวณโดยประมาณสำหรับการออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ อุปกรณ์ประเภทมวลหน่วง 2 ชนิดได้แก่ มวลหน่วงปรับค่า(TMD) และมวลน้ำหน่วงปรับค่า (TLD) และประเมินอัตราหน่วงที่เทียบเท่าของโครงสร้างที่ได้เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งอุปกรณ์ ทำการออกแบบโครงสร้างกับตัวอย่างศึกษาคือ หอชมเมืองแห่งหนึ่ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการออกแบบโครงสร้างโดยใช้ Dampers เปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไป ซึ่งผลวิจัยพบว่าการออกแบบโครงสร้างโดยใช้อุปกรณ์ สามารถลดปริมาณงานก่อสร้างลงได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: การควบคุมการสั่นไหว, อุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือน, มวลหน่วงปรับค่า, มวลน้ำหน่วงปรับค่า, การตอบสนองต่อแรงลมของหอรูปทรงกลม

Abstract

High-rise circular tower is considered as slender building which is subject to a high response under the wind load. The vibration may disturb the harmony of resident and cause deficiency for non-structural component. The vibration control device known as “Dampers” has been developed to control structural response under dynamics load by give an equivalent damping to overall structural system. It has an advantage over the conventional design such as reduce a wasteful of structural material and other function design. This research focus on the

approximated formula to design an optimum parameter and the formula to estimate an equivalent damping of structural system obtained from 2 type of mass dampers, namely Tune mass Dampers (TMD) and Tuned Liquid Damper (TLD). Experiment the structural design with the circular watchtower to study the profit of mass dampers compared with conventional design. The result show that mass dampers significantly reduce the amount of structural work.

Keywords: Vibration control, Dampers, Tuned mass dampers, Tune liquid dampers, Wind response of circular towers

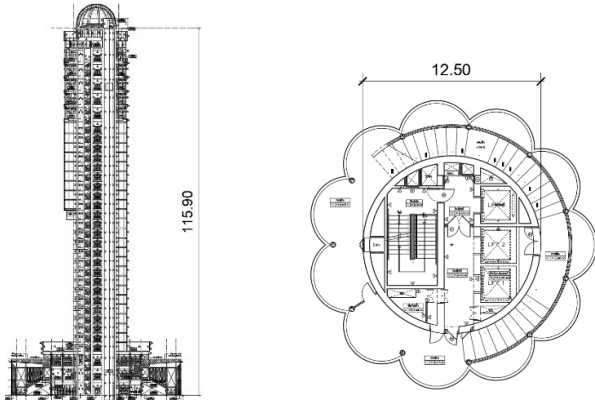
1. คำนำ

การวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการออกแบบโครงสร้างอาคารโดยใช้อุปกรณ์ลดการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือน โดยมวลอุปกรณ์ที่พิจารณาใช้เป็นอุปกรณ์ประเภทมวลหน่วงได้แก่ มวลหน่วงปรับค่า Tuned Mass Damper (TMD) และมวลน้ำหน่วงปรับค่า Tuned Liquid Damper (TLD) โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการออกแบบทั่วไป เพื่อศึกษาว่าการใช้ อุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าในการนำมาใช้งานมากน้อยเพียงใด โดยเลือกอาคารหอชมเมืองแห่งหนึ่งเป็นตัวอย่างในการศึกษาการออกแบบโครงสร้างอาคารโดยใช้อุปกรณ์ลดการตอบสนอง

เบื้องต้นอาคารหอชมเมืองได้ถูกออกแบบโครงสร้างไว้แล้ว โดยอาคารมีความสูงของระดับพื้นชั้นบนสุดที่ 115.9 เมตร โครงสร้างหลักทั้งการรับแรงในแนวนิ่งและแรงด้นข้างคือผนังค.ส.ล. รูปวงกลมความหนา 500 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางผนังค.ส.ล. 12.5 เมตร โดยตั้งแต่ระดับความสูง 45 ม. ขึ้นไป จะมีโครงสร้างเหล็กยื่นออกรอบตัวเป็นโครงผนังค.ส.ล. ทำให้อาคารมีเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุดประมาณ 20 เมตร ผนังถ่ายแรงลงสู่ฐานรากรวมถ้ำน้ำหนักลงเสาเข็ม โดยผังอาคารแสดงไว้ในรูปที่ 1

เนื่องด้วยอาคารนี้มีรูปทรงที่ค่อนข้างเชลูดและไม่มีผลของโครงเพรมในการช่วยรับแรงด้นข้างซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความอ่อนแอและตอบสนองต่อแรงลมค่อนข้างสูง จึงตั้งสมมุติฐานได้ว่าอาคารนี้จะมี

ผลกระทบจากแรงลมที่วิกฤติมากกว่าแรงแผ่นดินไหว ซึ่งอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนประเภทมวลหน่วง (Mass Dampers) มีคุณลักษณะการทำงานที่ตอบสนองได้ดีกับพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนที่มีคาบการสั่นไหวยาว และเป็นแรงแบบสุ่ม (Random Force) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของแรงลม ดังนั้นทางทีมผู้วิจัยจึงเลือกอาคารนี้เป็นตัวอย่างในการศึกษา



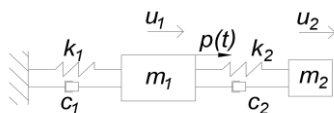
รูปที่ 1 รูปตัดอาคาร (ซ้าย), และผังส่วนหอคอย (ขวา)

วิธีการศึกษา ทีมผู้วิจัยจะทำการออกแบบโครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นองค์หลักที่รับแรงด้านข้างของอาคารหอชมเมืองใหม่ ให้มีขนาดเล็กลงอย่างเหมาะสม จนพบว่าอาคารมีผลการตอบสนองต่อการสั่นไหวที่มากเกินไปเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แล้วจึงทำการออกแบบอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนประเภทมวลหน่วง เพื่อใช้ผลการเพิ่มความหน่วงของระบบโครงสร้างเทียบเท่าจากอุปกรณ์ลดการสั่นไหวเข้ามาช่วยซึ่งจะทำให้ได้ผลการตอบสนองต่อแรงลมที่ลดลง นำผลนั้นไปพิจารณาออกแบบจนได้โครงสร้างที่เหมาะสมแล้วทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างต้นแบบ

2. หลักการและทฤษฎีที่ใช้วิจัย

2.1 การเคลื่อนที่แบบสั่นไหวและมีความหน่วง

พฤติกรรมการสั่นไหวของโครงสร้างทั่วไปเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำภายนอกใด ๆ จะเป็นไปตามกฎของนิวตัน นั่นคือจะเกิดแรงต้านทานจากแรงภายในและแรงหน่วงของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ 2 ตัวแปร

กำหนดให้มวลที่ 1 คือมวลของโครงสร้างหลักและมวลที่ 2 คือมวลของอุปกรณ์ลดการสั่น ณ เวลาใด ๆ ผลลัพธ์ของแรงภายนอกกับแรงภายในจะต้องเท่ากับแรงเฉื่อยของตัวโครงสร้างเอง สามารถเขียนอยู่รูปสมการเชิงเส้นของระบบตัวแปรเดียวได้ตามสมการที่ (1)

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

โดย m คือ มวล

c คือ ค่าความหน่วง

k คือ ค่าความแข็งของโครงสร้าง (แรง/การกระจัด)

$u/\dot{u}/\ddot{u}$ คือ การกระจัด/ความเร็ว/ความเร่ง

แรงหน่วงในสมการที่ (1) จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของวัตถุ กับค่าความหน่วง c โดยแรงหน่วงนี้เป็นกระบวนการถ่ายเทและดูดซับพลังงานที่ทำให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นไหวลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา การดูดซับพลังงานอาจเกิดได้หลายทางเช่น โดยค่าความหน่วงสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

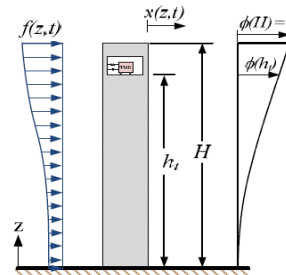
$$c = \zeta c_{cr} = 2\zeta m \omega_n = 2\zeta \sqrt{km} \quad (2)$$

โดย ζ คือ อัตราความหน่วง

c_{cr} คือ ค่าความหน่วงวิกฤติ

ω_n คือ คาบการสั่นไหวธรรมชาติในโหมดใด ๆ

หากแต่อัตราส่วนความหน่วงไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากรูปร่างของโครงสร้างเหมือนค่าความแข็ง (Stiffness) ต้องอาศัยวิธีการตรวจวัดการสั่นไหวจากอาคารจริง โดยวัดอัตราการลดลงของการสั่นไหวซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราหน่วงได้ หรืออาจทำการทดลองกับโครงสร้างจำลองเพื่อวัดอัตราการสั่นไหวได้เช่นกัน



รูปที่ 3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ 2 ตัวแปรของอาคารสูง

สำหรับกรณีของอาคารสูงตามรูปที่ 3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของมวลจะมีผลของรูปร่างการสั่นไหว (Mode shape) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ไหวของอาคารในรูปที่ 3 เสมือนเป็นระบบตัวแปรเดียวเฉพาะโหมดที่ต้องการและกำหนดให้มวลหน่วงติดตั้งค่าที่ความสูง h จะได้ค่าการเคลื่อนที่ $u_1(h,t) = \phi(h)x_1(t)$ แทนลงในสมการที่ (1) และหารสมการที่ (1) ด้วย m_1 จะสามารถจัดรูปสมการเคลื่อนไหวได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 + \phi^2 \mu & \phi \mu \\ \phi \mu & \mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega_1 \zeta_1 & 0 \\ 0 & 2\mu \omega_n \zeta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \mu \omega_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t)/m_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

โดย $\mu = \frac{m_2}{m_1}$ คือ อัตราส่วนมวลหน่วง/มวลโครงสร้าง

ϕ คือ ค่าประกอบรูปร่างการสั่นไหว (Mode shape)

h ระดับ Z ที่ติดตั้งมวลหน่วง

x คือ แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

พิจารณาตัวแปรในสมการที่ (3) เห็นได้ว่าข้อจำกัดของอุปกรณ์ประเภทมวลหน่วงนั้นคือ สามารถควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่สัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติเพียงโหมดเดียวเท่านั้น ตัวแปรที่ผลต่อประสิทธิภาพของการทำงานของอุปกรณ์นั้นได้แก่รูปร่างการสั่นไหว (ϕ) ของอาคาร ณ จุดที่ติดตั้งอุปกรณ์, ค่าอัตราหน่วงของชุดอุปกรณ์ (ζ_2) และอัตราส่วน

มวลหน้าต่อมวลโครงสร้างในโหมดที่พิจารณา (μ) [1] หากแต่การคำนวณตัวแปรข้างต้นโดยตรงนั้นมีความยุ่งยากมาก จึงมีการคิดวิธีการคำนวณโดยแปลงให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่าย โดยจะกล่าวในบทต่อไป

2.2 การคำนวณตัวแปรของอุปกรณ์ลดการสั่นประเภทมวลหน้า

เริ่มต้นวิศวกรควรพิจารณาลักษณะรูปร่างของอาคารและประเมินค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบโครงสร้างเดิมที่สภาวะประลัยและสภาวะใช้งานเองว่ามีค่าประมาณเท่าใด โดยอาคารสูงที่มีรูปร่างสูงขลุ่ยและมีส่วนของโครงสร้างที่ต้านทานแรงต้านข้างน้อยควรจัดเป็นอาคารที่มีอ่อนต่อการสั่นไหวและใช้ค่าอัตราความหน่วง 1% และ 0.5% ที่สภาวะด้านกำลังและใช้งานตามลำดับ ซึ่งอาคารหอชมเมืองรูปวงกลมจัดอยู่ในประเภทนี้

พิจารณาแรงตอบสนองต่อแรงลม โมเมนต์ที่ฐานส่วนกำหนด ตามสมการที่ (4)[2] จะพบว่าความหน่วงของโครงสร้างนั้นจะแปรผกผันกับโมเมนต์กำลังสอง ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างสมการที่ (5) เพื่อใช้คำนวณว่าอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าของระบบโครงสร้างต้องมีเท่าใดจึงลดความเร่งตอบสนองของอาคารให้ได้ตามที่ต้องการ

$$M_R = G_R \sqrt{\frac{\pi}{4\zeta} f S_m(f)} \quad (4)$$

โดย M_R คือ โมเมนต์ที่ฐานจากผลของแรงลมส่วนกำหนด

ζ คือ อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง

G_R คือ ค่าประกอบเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าสูงสุด

$S_m(f)$ คือ ค่าสเปกตรัมโมเมนต์ที่ฐานที่แปรปรวนของแรงลม

f คือ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (เฮิรตซ์)

$$\zeta_{eq} = \zeta_s \left(\frac{a_i}{a_{target}} \right)^2 \quad (5)$$

โดย ζ_{eq} คือ อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างที่ต้องการ

ζ_s คือ อัตราส่วนความหน่วงเดิมของโครงสร้าง

a_{target} คือ ความเร่งของอาคารที่ต้องการ

a_i คือ ความเร่งของเดิมของอาคาร

เมื่อมีค่าอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าที่ต้องการแล้วก็สามารถประมาณค่าอัตราส่วนมวลหน้าที่เหมาะสมต่อมวลโครงสร้างที่ตอบสนองในโหมดที่พิจารณาต้องการได้จากสมการ (6) และ (7) โดยที่ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ประมาณระหว่าง 0.5-3% ของมวลตอบสนองในโหมดที่พิจารณา เนื่องจากการใส่มวลที่มีปริมาณมากเกินไปจะกระทบต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของทั้งระบบและทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนมากขึ้น ส่วนการใช้ปริมาณมวลที่น้อยเกินไปอาจทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถตอบสนองต่อการสั่นไหวได้จริงในเชิงปฏิบัติ [3]

$$\mu_{opt} = \frac{\phi M_{L,opt}}{M_S} = \left(6\zeta_{eq}^2 - 0.5 \right) + \sqrt{36\zeta_{eq}^4 + 10\zeta_{eq}^2 + 0.25} \quad (6)$$

โดย μ_{opt} คือ อัตราส่วนมวลหน้าที่เหมาะสมต่อมวลโครงสร้างที่ตอบสนองในรูปร่างการสั่นไหวที่พิจารณา

$M_{L,opt}$ คือ มวลหน้าที่เหมาะสมที่ต้องการ

M_S คือ มวลโครงสร้างที่ตอบสนองในโหมดที่พิจารณา

ϕ คือ ค่าประกอบของรูปร่างการสั่นไหวที่ระดับชั้นที่ติดตั้งมวลโดยมีค่ามากที่สุดคือ 1

เมื่อทราบปริมาณของมวลหน้าที่เหมาะสมที่ต้องการแล้ว จึงนำค่ามวลดังกล่าวไปออกแบบอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนแบบมวลหน้าซึ่งมีสองประเภทหลักได้แก่มวลหน้าปรับค่า (TMD) และมวลหน้าปรับค่า (TLD) โดยทั้งสองแบบมีหลักการพื้นฐานคือความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ต้องเท่ากับหรือใกล้เคียงค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในโหมดที่พิจารณาที่ปรับค่าด้วยตัวคูณตามสมการ (7) [3]

$$f_t = \gamma_t f_s = \frac{\sqrt{1+(\mu/2)}}{1+\mu} f_s \quad (7)$$

โดย γ_t คือ ตัวคูณปรับค่าความถี่โครงสร้าง

f_s คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง (เฮิรตซ์)

f_t คือ ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)

หลังจากออกแบบค่าความถี่ที่เหมาะสมได้แล้วต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนความหน่วงของอุปกรณ์เพื่อควบคุมให้มวลหน้าตอบสนองต่อโหมดการสั่นสะเทือนที่พิจารณาเท่านั้นโดยค่าอัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมของอุปกรณ์ลดการสั่นไหว คำนวณได้จากสมการที่ (8) แล้วจึงคำนวณหาค่าอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าของระบบโครงสร้างที่ได้เพิ่มจากอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนจากสมการที่ (9)[3]

$$\zeta_{t,opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{(1+\mu)(1+(\mu/2))}} \quad (8)$$

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu+\mu^2}{1+(3\mu/4)}} \quad (9)$$

โดย $\zeta_{t,opt}$ คือ อัตราส่วนความหน่วงของอุปกรณ์ลดการสั่นไหว

ζ_{eq} คือ อัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าของระบบโครงสร้างที่ได้จากอุปกรณ์ Mass Dampers

μ คือ อัตราส่วนมวลหน้า/มวลโครงสร้าง

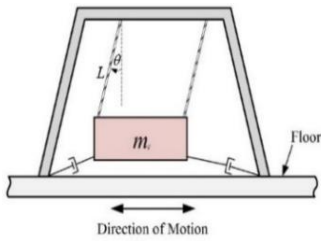
อัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าที่ได้จากสมการที่ (9) มาจากอุปกรณ์เท่านั้น ไม่รวมกับอัตราส่วนความหน่วงเดิมของระบบโครงสร้าง ในทางการคำนวณเพื่อลดผลตอบสนอง จึงอาจพิจารณาใช้ความหน่วงเดิมของระบบครั้งหนึ่งร่วมกับความหน่วงจากอุปกรณ์ จะไม่ใช้ความหน่วงเดิมเต็มที่เพราะการตอบสนองต่อการสั่นของอุปกรณ์จะทำงานเร็วกว่าการถ่ายเทความหน่วงภายในโครงสร้าง ประสิทธิภาพของความหน่วงเดิมจึงทำงานร่วมกับอุปกรณ์ได้ไม่เต็มที่

2.3 หลักการคำนวณ TMD แบบลูกตุ้ม

ในกรณีนี้จะเลือกใช้มวลหน้าปรับค่าแบบลูกตุ้ม (Pendulum TMD) เนื่องจากมีข้อดีที่สามารถคำนวณออกแบบค่าความถี่ที่ต้องการและทำการติดตั้งได้ง่ายเมื่อเทียบกับ TMD แบบอื่น ๆ โดยชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยมวลที่ยึดโยงเข้ากับโครงสร้างในลักษณะลูกตุ้มและที่ฐานมวลมีอุปกรณ์หน่วงการสั่น (Shock Absorber) ตามรูปที่ 4

สามารถคำนวณหาขนาดปริมาตรทรงกลมได้จากอัตราส่วนมวลหน้าเหมาะสมที่ต้องการ ส่วนความยาวของสายที่ยึดโยงมวล คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติของลูกตุ้มตามสมการที่ (10) ส่วน

อุปกรณ์หน่วงการสั่นนั้น คำนวณค่าความหน่วงที่ TMD ต้องการได้จากสมการที่ (6) และ (8) แล้วเลือกตัวอุปกรณ์ที่ให้ค่าความหน่วงตามต้องการจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตมาติดตั้ง



รูปที่ 4 การเคลื่อนที่และทำงานของ Pendulum TMD

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (10)$$

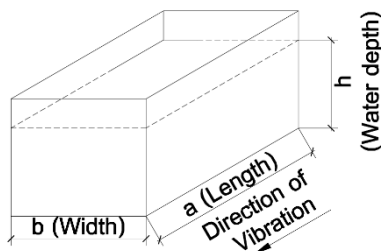
โดย f_t คือ ความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วง (เฮิรตซ์)

L คือ ความยาวของสายเคเบิล

2.4 หลักการคำนวณ TLD

2.4.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

ในกรณีนี้จะพิจารณาออกแบบมวลน้ำหน่วงแบบถังรูปสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถทำการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติของแต่ละถังน้ำได้ค่อนข้างง่ายและยังใช้ต้นทุนน้อยเนื่องจากมวลน้ำนั้นมีต้นทุนต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น หากแต่ TLD นั้นก็มีข้อเสียที่การออกแบบให้มวลน้ำรวมมีทั้งความถี่และมวลประสิทธิภาพได้ตามต้องการนั้นไม่มากนัก ซึ่งหลักการออกแบบถังบรรจุน้ำรูปทรงสี่เหลี่ยมให้มวลน้ำมีคุณสมบัติในการเพิ่มความหน่วงให้กับระบบโครงสร้างได้ มีตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณาและคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 5 ถังน้ำ TLD

พิจารณาดังน้ำรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5 สมมุติการตอบสนองในทิศทางที่สนใจขนานกับด้านยาว a อัตราส่วนความสูงของน้ำและความยาวในทิศตอบสนอง (h/a) ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3 เพราะถ้าอัตราส่วนเกินค่าดังกล่าวจะทำให้มีเป็นมวลน้ำส่วนที่ไม่สั่นไหว (Dead mass) มาก ทำให้ประสิทธิภาพของมวลลดน้อยลง

ความถี่ธรรมชาติของมวลน้ำในทิศทางที่พิจารณาสามารถคำนวณได้จากสมการ(11) โดยค่าความถี่ต้องใกล้เคียงกับความถี่ที่ปรับค่าแล้วของโครงสร้างตามสมการ (7) ในโหมดที่พิจารณา ไม่ควรแตกต่างกัน 2%[4]

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{a} \pi \tanh\left(\frac{\pi h}{a}\right)} \quad (11)$$

โดย f_t คือ ความถี่ธรรมชาติของมวลน้ำ (เฮิรตซ์)

g คือ ค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง

h คือ ความยาวของมวลน้ำในทิศการสั่น

a คือ ความลึกของน้ำ

โดยมวลน้ำที่ใช้จะมีประสิทธิภาพในการเป็นมวลหน่วงได้ไม่เต็มปริมาณ ซึ่งมวลประสิทธิภาพคำนวณได้ตามสมการที่ (12) และ (13)[4]

$$\psi_R = \frac{\beta_R^2}{\alpha_R} = \frac{(2a/h\pi^2)^2}{a/(2\pi \tanh(\pi h/a))} \quad (12)$$

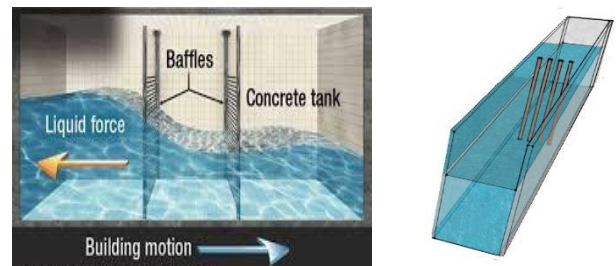
$$M_{eff} = \psi_R M_0 \quad (13)$$

โดย M_{eff} คือ มวลประสิทธิภาพของน้ำ

M_0 คือ มวลของน้ำ

ψ_R คือ ค่าประสิทธิภาพของมวลน้ำ

ปัญหาเรื่องมวลน้ำประสิทธิภาพของ TLD คือการปรับขนาดถังน้ำที่ใหญ่เกินไปจะทำให้ความถี่ในการสั่นของน้ำข้างจนไม่สอดคล้องกับความถี่ที่ต้องการและอาจกระทบกับพื้นที่อาคาร การเพิ่มจำนวนถังน้ำแทนการเพิ่มขนาดเพื่อทำให้มวลประสิทธิภาพรวมของน้ำมีจำนวนมากพอตามที่ต้องการได้เช่นกันแต่ไม่ควรแบ่งมวลน้ำมากกว่า 4 มวลเพราะพฤติกรรมการทำงานของมวลรวมจะไม่เป็นแบบ TLD และมีการคำนวณที่ซับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 6 การติดตั้งตาข่าย(ขั้ว)หรือเสานขนาดเล็ก(ขัว) ในถังน้ำเพื่อหน่วงการสั่นของคลื่นทำให้ TLD มีอัตราความหน่วงตามต้องการ

2.4.2 ค่าอัตราส่วนความหน่วงของถังน้ำ

เมื่อทราบความถี่ที่เหมาะสมของ TLD แล้ว จะต้องออกแบบให้ถังน้ำ มีอัตราส่วนความหน่วงได้ตามต้องการ อาจใช้การติดตั้งตาข่ายแผงกัน(Baffles) หรือติดตั้งเสานขนาดเล็กภายในดังรูปที่ 6 ซึ่งทำให้มวลน้ำขณะสั่นไหวปะทะกับเสภายในถัง เกิดการถ่ายพลังงานและความหน่วงให้กับระบบโครงสร้าง โดยอัตราส่วนความหน่วงเฉพาะมวลน้ำคำนวณได้ตามสมการที่ (14) ส่วนอัตราส่วนความหน่วงที่ได้จากการติดตั้งเสานขนาดเล็กหน่วงคลื่นน้ำได้คำนวณจากสมการที่ (15) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าอัตราความหน่วงนี้แปรผันตามแอมพลิจูดของคลื่นซึ่งสามารถประมาณการแบบลองถูกลองผิด (Trial & Error) ได้จากสมการที่ (16) โดยอาจประมาณการค่า β ก่อนแล้วจะสามารถประมาณได้ค่า A ที่ทำให้ได้อัตราความหน่วงตามต้องการแล้วจึงคำนวณหาความกว้างของเสาในถังน้ำ d และคำนวณกลับเพื่อตรวจว่าค่า β และ A ได้ใกล้เคียงกับที่ประมาณไว้ที่แรกหรือไม่[5][6]

$$\zeta_{liq} = \left(\frac{1+h/b}{2h}\right) \sqrt{2v} \omega_{liq} \quad (14)$$

$$\zeta_{add} = \beta A = C_d \frac{d}{b} \frac{1}{a} \left[\frac{9 \sinh(\pi h/a) + \sinh(3\pi h/a)}{9\pi \sinh^2(\pi h/a) \cosh(\pi h/a)} \right] A \quad (15)$$

$$\left(\frac{8}{3\pi} \beta A\right)^2 A^2 = \left(\frac{2}{\pi} \tanh\left(\frac{h}{a}\right)\right)^2 X^2 \quad (16)$$

โดย ζ_{liq} คือ ความหน่วงจากของเหลว

ζ_{add} คือ ความหน่วงเพิ่มเติมจากการหน่วงการไหลของเหลว

v คือ ค่าความหนืดของของเหลว (น้ำ $v=1 \text{ mm}^2/\text{s}$)

- A คือ แอมพลิจูดของคลื่นของเหลว
- C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงดูด (Drag Coefficient) ของการไหล มีค่าประมาณ 1.5
- X คือ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน
- d คือ ความกว้างรวมของเสาทั้งหมดในถังน้ำ

3. การวิเคราะห์โครงสร้างต้นแบบ

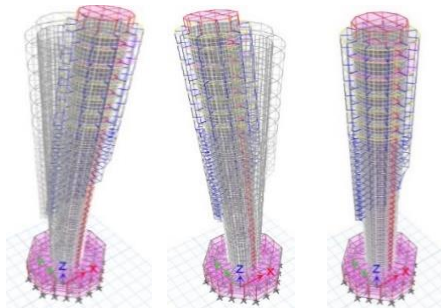
3.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

โครงสร้างอาคารหอชมตามแบบเดิม ถูกออกแบบไว้โดยมีโครงสร้างหลักที่ต้านทานแรงด้านข้างเป็นผนังคอนกรีตเสริมเหล็กรูปวงกลมกับผนังแนวขวางกลางวงกลมของอาคาร โดยผนังทั้งหมดมีความหนา 500 มม. โดยความหนาของผนังมีขนาดเท่ากันเท่ากันตั้งแต่ฐานรากถึงยอดอาคาร

สร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคารหอชมเมืองตามต้นแบบเดิมโดยใช้โปรแกรมประเภทไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของระบบโครงสร้าง โดยมวลของโครงสร้างจะพิจารณาใช้น้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง (Dead Load) รวมกับน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Super imposed Dead load) อันได้แก่ น้ำหนักผนังก่อ, ฝ้าฉาบ และ ฝ้าเพดาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้รูปร่างการสั่นไหวของโหมดหลักดังรูปที่ 7 และคุณสมบัติของอาคารตามตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารต้นแบบ

คุณสมบัติ	ต้นแบบเดิม
ขนาดผนังรับแรง (มม.)	500
มวล (ตัน)	10167
ความถี่ธรรมชาติหลักในทิศ X (Hz)	0.369
% ของมวลที่ตอบสนองในทิศ X	55.8
ความถี่ธรรมชาติหลักในทิศ Y (Hz)	0.391
% ของมวลที่ตอบสนองในทิศ Y	54.9



รูปที่ 7 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โครงสร้างและรูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ธรรมชาติในทิศ X, Y และหมุนรอบทิศ Z (ตามลำดับจากซ้ายไปขวา)

ผลวิเคราะห์จากในตารางที่ 1 และรูปร่างการสั่นไหวของความถี่ธรรมชาติหลักของอาคารใน 3 ทิศ จะเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบ การวิเคราะห์ ผลจากการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างในอุโมงค์ลม โดยสมมติฐานและตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ความเร็วลม, สภาพภูมิประเทศที่ตั้งอาคารและอัตราส่วนความหน่วงของอาคารได้สรุปไว้ในตารางที่ 2 โดยแบบจำลองอาคารสร้างด้วยขนาด 1 ต่อ 400 ส่วนและจำลองสภาพภูมิประเทศเสมือนจริงในระยะ 400 เมตรรอบอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทดสอบแบบจำลองหอชมเมืองในอุโมงค์ลม

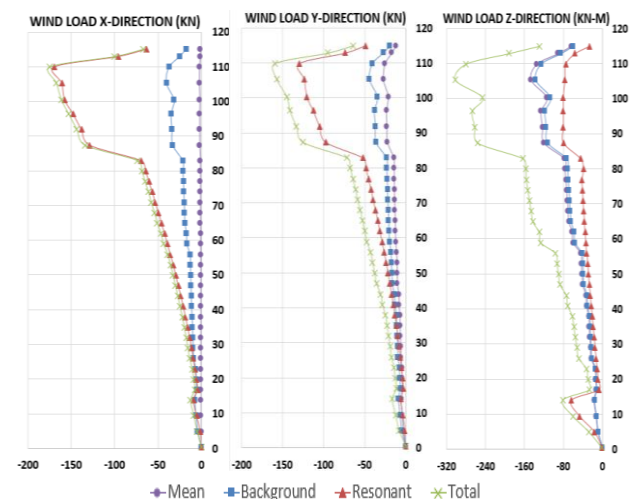
ตารางที่ 2 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแรงลม

สมมติฐาน	ค่าที่ใช้
ประเภทและสภาพภูมิประเทศ	B ชานเมือง
ความเร็วลมอ้างอิงระดับ 10 เมตร คาบเวลากลับ 50 ปี (เมตร/วินาที)	25
ความเร็วลมที่ยอดอาคาร คาบเวลากลับ 50 ปี (เมตร/วินาที)	30.64
ความเร็วลมที่ยอดอาคาร คาบเวลากลับ 10 ปี (เมตร/วินาที)	24.82
อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างที่ด้านข้าง (%)	1.0
อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างที่สภาวะใช้งาน (%)	0.5

ตารางที่ 3 โมเมนต์ที่ฐานอาคารต้นแบบจากผลของแรงลม (อัตราหน่วง 1%)

	โมเมนต์ที่ฐาน (กิโลนิวตัน-เมตร)
M_y (ดีกรอบแกน Y)	161,874
M_x (ดีกรอบแกน X)	156,067
M_z (หมุนรอบแกน Z)	4,297

ผลวิเคราะห์จากแบบจำลองจะทำให้ทราบผลลัพธ์ของโมเมนต์ที่ฐาน โดยในกรณีนี้พิจารณาใช้แรงลมที่ความเร็วลมที่คาบ 50 ปีและอัตราหน่วงของระบบโครงสร้างเท่ากับ 1% ตามตารางที่ 3 และได้ผลการกระจายของแรงลมตามระดับความสูงช่วงชั้นต่าง ๆ ของอาคารดังรูปที่ 9 ซึ่งในการออกแบบจะใช้ผลรวมค่าแรงลมใน 3 ทิศที่ทำร่วมกับแรงลมสูงสุดและแรงที่ให้ผลสูงสุดในแต่ละ Quadrant แล้วจึงนำแรงลมนั้นไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เป็นแรงสถิตเทียบเท่ากระทำที่จุดศูนย์กลางของ Diaphragm ของแต่ละชั้น



รูปที่ 9 ผลการกระจายแรงลมทั้ง 3 ทิศตลอดความสูงอาคาร

3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้าง

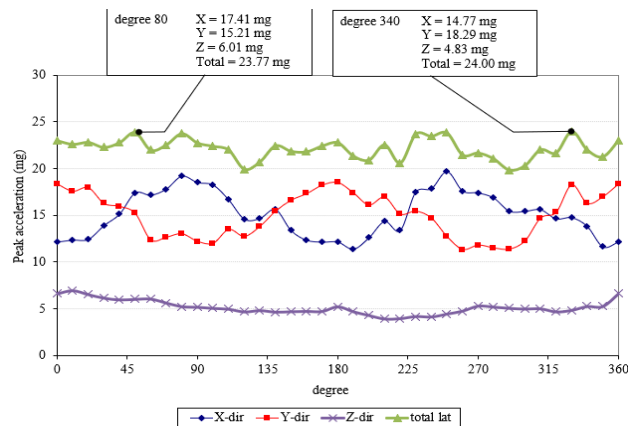
ตรวจสอบการออกแบบผนังโครงสร้างด้านกำลังภายใต้ผลการรวมแรงทุกกรณี สรุปผลได้ตามตารางที่ 4 ซึ่งแสดงในรูปแบบของอัตราส่วนของแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อกำลังของหน้าตัดนั้น (Demand/Capacity ratio) โดยแบ่งย่อยได้เป็น ผลรวมของอัตราส่วนแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อกำลังของหน้าตัดของแรงในแนวแกนรวมกับโมเมนต์ดัดในสองทิศ (PMM ratio) และอัตราส่วนของการรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นต่อกำลังการรับแรงเฉือน (Shear ratio) พบว่าค่าอัตราส่วนนี้ของโครงสร้าง ค่ามากที่สุดมีค่าไม่เกิน 0.39 แสดงว่าโครงสร้างอาคารมีกำลังเพียงพอและมีความปลอดภัยมาก

ตารางที่ 4 ผลตรวจสอบอัตราส่วนแรงที่เกิดขึ้น/กำลังของโครงสร้าง

ช่วงชั้น	ผนังวงกลมด้านนอก		ผนังขวางด้านใน	
	PMM	Shear	PMM	Shear
ฐานราก - ชั้น 4	0.39	0.16	0.31	0.15
ชั้น 4 - ชั้น 8	0.37	0.10	0.27	0.08
ชั้น 8 - ชั้น 12	0.34	0.08	0.26	0.07
ชั้น 12 - หลังคา	0.29	0.08	0.25	0.06

ตรวจสอบสภาวะด้านการใช้งานของอาคารได้แก่ การแอ่นตัวด้านข้างและความเร่งสูงสุดของอาคารภายใต้ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี โดยข้อกำหนดระบุให้การแอ่นตัวด้านข้างได้ไม่เกิน $H/500$ (H คือความสูงของอาคาร) หรือเท่ากับ 0.232 เมตร โดยวิเคราะห์การแอ่นตัวด้านข้างสูงสุดของอาคารในทิศ X และ Y ได้ผลเป็น 0.102 และ 0.097 เมตร ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าสูงสุดที่ยอมให้

ส่วนความเร่งของอาคารประเภทอาคารสาธารณะนั้นต้องไม่เกิน 25 ชม./วินาที² หรือ 25 mg อ้างอิงจากมาตรฐาน มยผ.1311-50[7] โดยผลวิเคราะห์ความเร่งของอาคารแสดงไว้ตามรูปที่ 10 ซึ่งพิจารณาผลแล้วพบว่าอาคารต้นแบบมีสภาวะใช้งานที่ผ่านข้อกำหนดทั้งหมด



รูปที่ 10 กราฟแสดงผลความเร่งเนื่องจากแรงลมของอาคารต้นแบบในแต่ละทิศ

4. การวิเคราะห์โครงสร้างลดขนาดและติดตั้ง Mass Dampers

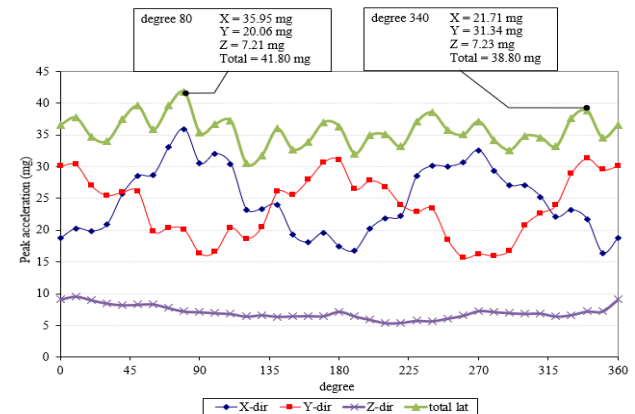
4.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

ทดลองเปลี่ยนขนาดโครงสร้างผนังและเสา ใช้ขนาดเล็กลงกว่า 500 มม. แล้ววิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อหาขนาดโครงสร้างที่ทำให้อาคารตอบสนองต่อแรงลมอย่างมากแต่มีความเป็นไปได้ในการออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอ จนได้ขนาดที่เหมาะสมที่ 300 มม. ผู้วิจัยใช้สมมุติฐานและหลักเกณฑ์เดียวกับการวิเคราะห์โครงสร้างต้นแบบตามหัวข้อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านพลศาสตร์โดยได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 5 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ลดขนาด

คุณสมบัติ	แบบลดขนาด
ขนาดผนังรับแรง (มม.)	300
มวล (ตัน)	7243
ความถี่ธรรมชาติหลักในทิศ X (Hz)	0.316
% ของมวลที่ตอบสนองในทิศ X	54.3
ความถี่ธรรมชาติหลักในทิศ Y (Hz)	0.352
% ของมวลที่ตอบสนองในทิศ Y	53.4

เลือกใช้ค่าผลการวิเคราะห์จากการทดสอบอุโมงค์ลมที่ค่าความถี่ธรรมชาติ 0.8 เท่าของโครงสร้างต้นแบบเดิม เนื่องด้วยค่าความถี่ธรรมชาติการสั่นไหวหลักของโครงสร้างที่ลดขนาดลงมีค่าประมาณ 0.85 เท่าของโครงสร้างเดิมและการเปลี่ยนขนาดโครงสร้างหลักนั้นทำให้มวลของอาคารเปลี่ยนแปลงอย่างมาก จึงต้องทำการวิเคราะห์ผลข้อมูลจากการทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อหาความเร่งตอบสนองและแรงลมสถิตเทียบเท่าใหม่ด้วยเช่นกัน โดยผลความเร่งในแนวราบของโครงสร้างแบบที่ลดขนาดลง ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลความเร่งเนื่องจากแรงลมของอาคารที่ลดขนาดในแต่ละทิศ

จากข้อมูลที่แสดงในกราฟจะเห็นได้ว่าอาคารหอชมเมืองที่ใช้ความหนาของผนังอาคารลดลงเหลือ 300 มม. มีความเร่งลัพท์ในแนวราบมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 30-42 mg ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้ กรณีนี้จึงเหมาะที่จะใช้อุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนประเภทมวลหน่วงเพื่อช่วยลดทอนผลต่อของอาคาร นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าความเร่งในแนวราบจะมีค่าสูงสุดทางแกน X และ Y สูงสุดที่ทิศทางลมกระทำกับอาคารในมุม 80 และ 340 องศาตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอาคารนี้รูปร่างที่อ่อนแอและตัวอาคารได้รับผลกระทบจากการแรงตั้งฉากทิศทางของลมมากกว่าแรงตามทิศทางลม

4.2 คำนวณออกแบบ TMD และวิเคราะห์ผลอัตราส่วนความหน่วง

4.2.1 คำนวณค่าคุณสมบัติของอุปกรณ์

พิจารณาความเร่งในทิศทาง X จากแรงลมกระทำที่ทิศ 80 องศาซึ่งทำให้เกิดความเร่งลัพท์ในแนวราบสูงสุดและมีความเร่งในทิศทาง X เป็นหลัก

$$a_{x,target} = \sqrt{25^2 - 7.21^2} = 23.92 \text{ cm/s}^2$$

กำหนดให้โครงสร้างมีอัตราหน่วงที่ 0.5% จะประมาณค่าอัตราหน่วงเทียบเท่าที่ต้องการของระบบโครงสร้างได้จากสมการที่ (4)

$$a = \sqrt{41.8^2 - 7.21^2} = 41.17 \text{ cm/s}^2$$

$$\zeta_{eq} = \left(\frac{a_i}{a_{x,target}} \right)^2 \zeta_s = \left(\frac{41.17}{23.92} \right)^2 (0.005) = 0.0148$$

พิจารณาให้ระบบโครงสร้างหลักมีค่าอัตราหน่วงที่ขยับลดการสั่นไหวร่วมกับอุปกรณ์เท่ากับ 0.0025 ดังนั้นค่าอัตราหน่วงที่อุปกรณ์ต้องเพิ่มให้กับระบบโครงสร้างจะเท่ากับ 0.0123 นำค่าอัตราหน่วงนี้ไปคำนวณอัตราส่วนมวลหน่วง/มวลโครงสร้างที่ต้องการได้จากสมการที่ (6)

$$\mu = \frac{6(0.0123)^2 - 0.5 + \sqrt{36(0.0123)^4 + 10(0.0123)^2 + 0.25}}{10} = 0.0024$$

ปริมาณมวลหน่วงที่เหมาะสมมีค่าน้อยกว่า 0.5% ของมวลโครงสร้างที่ตอบสนองในโหมดหลัก ในกรณีนี้จึงเลือกใช้ปริมาณมวลหน่วงที่ 0.5% แล้วนำไปหาค่าปรับความถี่, อัตราหน่วงของมวลหน่วงและอัตราหน่วงเทียบเท่าของระบบโครงสร้างที่ได้เพิ่มจากอุปกรณ์ได้จากสมการ(8),(10),(11) ดังนี้

$$\gamma_t = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{0.005}{2}\right)}}{1 + 0.005} = 0.996$$

$$\zeta_{t,opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{0.05 \left(1 + \left(\frac{3 \times 0.005}{4}\right)\right)}{(1 + 0.05) \left(1 + \left(\frac{0.005}{2}\right)\right)}} = 0.0354$$

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{0.005(1 + 0.005)}{\left(1 + \left(\frac{3 \times 0.005}{4}\right)\right)}} = 0.0177$$

ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง TMD ตามหลักการ ควรเป็นตำแหน่ง ความสูงที่มีค่าการสั่นไหวด้านข้างมากที่สุดตามรูปร่างการสั่นไหวหลักที่พิจารณารลดการสั่นไหวต่างๆ พบว่าตำแหน่งที่พอจะสามารถติดตั้งได้และทำให้ได้ $\phi = 1$ คือชั้นหลังคาห้องเครื่องลิฟต์ซึ่งจะเป็นชั้นบนสุด หากแต่จะต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างเช่นการเทพื้นและติดตั้งโครงเหล็กเพิ่มเพื่อให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ สรุปผลคำนวณคุณสมบัติมวลหน่วงที่เหมาะสมที่ได้ดังนี้

มวล TMD $M_t = (\mu M_{s1}) / \phi = 0.005 \times 3933 / 1 = 19.67 \text{ T}$

ความถี่ธรรมชาติ TMD $f_t = \gamma_t f_{s1} = 0.996 \times 0.316 = 0.315 \text{ Hz}$

อัตราส่วนความหน่วง TMD $\zeta_{t,opt} = 0.0354$

พิจารณาความเร่งในทิศทาง X จากแรงลมกระทำที่ทิศ 340 องศาซึ่งทำให้เกิดความเร่งลัพท์ในแนวราบสูงสุดและมีความเร่งในทิศทาง X เป็นหลัก

ทำการคำนวณตามขั้นตอนเช่นเดียวการพิจารณาผลในทิศ X จะได้ปริมาณมวลหน่วงที่เหมาะสมมีค่า 0.5% ของมวลโครงสร้างและสรุปผลคุณสมบัติมวลหน่วงที่เหมาะสมได้ดังนี้

มวล TMD $M_t = (\mu M_{s2}) / \phi = 0.005 \times 3882 / 1 = 19.41 \text{ T}$

ความถี่ธรรมชาติ TMD $f_t = \gamma_t f_{s1} = 0.996 \times 0.352 = 0.351 \text{ Hz}$

อัตราส่วนความหน่วง TMD $\zeta_{t,opt} = 0.0354$

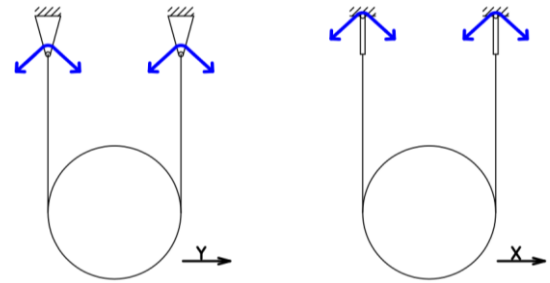
4.2.2 การออกแบบชุดอุปกรณ์

คำนวณความยาวของสลิงห้อยมวลเพื่อให้มวล TMD แบบ Pendulum มีความถี่ธรรมชาติสอดคล้องกับความถี่ที่เหมาะสมจากสมการ (12)

ทิศ X $L = \frac{g}{(2\pi f_t)^2} = \frac{9.81}{(2 \times 3.1416 \times 0.3146)^2} = 2.51 \text{ m.}$

ทิศ Y $L = \frac{g}{(2\pi f_t)^2} = \frac{9.81}{(2 \times 3.1416 \times 0.351)^2} = 2.02 \text{ m.}$

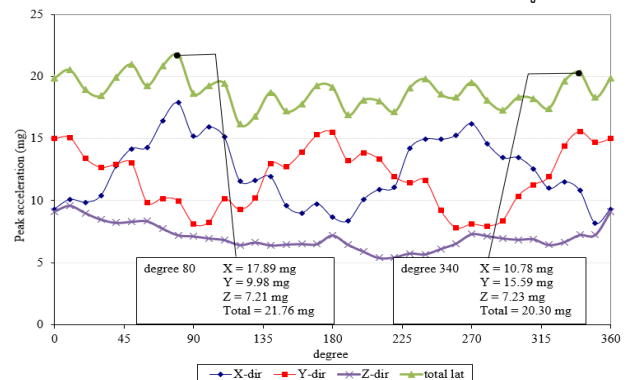
เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบ TMD ลดการสั่นไหวของสองทิศทางแล้วพบว่าต้องใช้มวลอย่างน้อย 19.67 ตันเพื่อควบคุมความเร่งที่เกิดในทิศ X เป็นหลัก โดยการออกแบบลวดสลิงห้อยมวลสามารถทำได้โดยห้อยมวลด้วยสายสลิงความยาว 2.02 เมตรต่อเข้ากับชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กที่มีความยาวรวม 2.51 เมตร โดยปลายบนของชิ้นส่วนเหล็กออกแบบยึดกับโครงสร้างที่รองรับแต่ให้มีรอยต่อแบบบานพับ(Hinge) เพื่อให้หมุนได้เฉพาะในทิศทาง X ซึ่งการห้อยมวลลักษณะนี้จะทำให้เมื่อเกิดการสั่นไหวของอาคาร มวลจะสามารถแกว่งตอบสนองได้ทั้งทิศทาง X และ Y ตามค่าความถี่ที่ต้องการดังในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การติดตั้ง TMD แบบสั่นได้สองแกน

4.2.3 ผลตอบสนองของอาคารหลังติดตั้ง TMD

นำค่าอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าของโครงสร้าง (ζ_{eq}) ที่ได้จาก TMD รวมกับส่วนวงเดิมของระบบจะได้อัตราส่วนความหน่วงรวมทั้งหมด 0.0202 แล้วกลับไปวิเคราะห์ค่าความเร่งของอาคารเนื่องจากแรงลม ได้ผลพบว่าความเร่งของอาคารลดลงไม่เกิน 25 mg ดังแสดงในกราฟรูปที่ 13



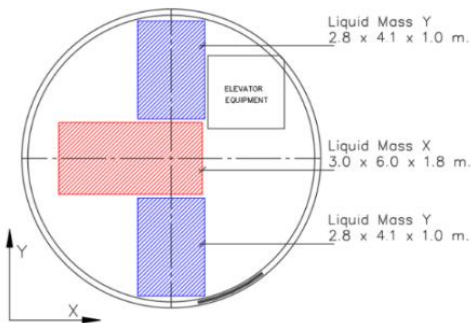
รูปที่ 13 กราฟแสดงผลความเร่งเนื่องจากแรงลมแต่ละทิศของอาคารที่ลดขนาดและติดตั้ง TMD

4.3 คำนวณและออกแบบ TLD

4.3.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติอุปกรณ์

แนวทางเบื้องต้นจะพิจารณาออกแบบ TLD ให้ขนาดถึงน้ำและระดับน้ำในแต่ละถังให้มีความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในแกนเดียวและไม่ตอบสนองกับอีกแกนเพื่อให้มวลน้ำมีคุณสมบัติในการหน่วงการสั่นไหวในแกนนั้น ๆ อย่างเต็มที่ เมื่อรวมมวลหน่วงที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่างแกนกันไว้ก็จะช่วยกันลดการสั่นไหวที่เกิดทั้งสองแกน X,Y พร้อมกัน โดยอาจแบ่งมวลน้ำเป็นหลายถังซึ่งสามารถช่วยกันเพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้างได้เสมือนเป็น TLD อันเดียว

พิจารณาผังอาคารพบว่าพื้นที่เหมาะสมที่สามารถวางถังน้ำคือที่ระดับ +115.9 ซึ่งมีพื้นที่คสล.ห้องเครื่องลิฟต์บนนั้นเป็นช่องเปิดโล่งตามแสดงในผังนั้นการติดตั้งถังน้ำจำเป็นต้องมีการเพิ่มพื้นที่คสล.และผนังโครงสร้างขึ้นที่ระดับดังกล่าวเพื่อรับน้ำหนักของมวลน้ำ



รูปที่ 14 ผังการจัดวางถังน้ำใช้เป็น TLD

เนื่องจากตัวแปรปรับค่าความถี่ (γ) จะแปรผันตามผลรวมของมวลน้ำหน่วงประสิทธิผล จึงต้องสุ่มคำนวณและปรับระดับน้ำ (h) ของแต่ละถังที่เหมาะสมตามเงื่อนไขในหัวข้อที่ 2.4 เพื่อให้มวลน้ำประสิทธิผลแต่ละถังมีความถี่ธรรมชาติที่ใกล้เคียงกับความถี่ของโครงสร้างปรับค่า ($\omega_s \gamma$) มากที่สุดและได้มวลหน่วงประสิทธิผลรวมตามที่ระบบต้องการในแต่ละทิศทางด้วย โดยผู้วิจัยทดลองเลือกขนาดมวลน้ำและจัดวางตำแหน่งถังน้ำให้ศูนย์กลางของมวลแต่ละทิศเยื้องศูนย์กลางจากศูนย์กลางตัวอาคารน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการเพิ่มความสั่นไหวแบบหมุนของโครงสร้างสั่นไหวเนื่องจากมวลที่เยื้องศูนย์กลาง สรุปผลการทดลองคำนวณคุณสมบัติของมวลน้ำของถังแต่ละถังที่เหมาะสมได้ตามตารางที่ 6 และรูปแบบการจัดวางถังน้ำแสดงไว้ในรูปที่ 14

ตารางที่ 6 มวลประสิทธิผลและคุณสมบัติของถังน้ำในการตอบสนองต่อการสั่น

ขนาดถัง		ความลึกน้ำ (เมตร)	ความถี่ธรรมชาติ (HZ)		มวลประสิทธิผล(ตัน)	
X	Y		ทิศ X	ทิศ Y	ทิศ X	ทิศ Y
6.0	3.0	1.8	0.310	0.499	20.52	ไม่ตอบสนอง
2.8	4.1	1.0	0.475	0.350	ไม่ตอบสนอง	9.82

พิจารณาผลในทิศ X คำนวณอัตราส่วนมวลหน่วงประสิทธิผลทั้งหมดต่อมวลโครงสร้างที่ตอบสนองได้

$$\mu = M_t / M_s = 20.52 / 3933 = 0.0052$$

ตรวจสอบค่าความถี่ของมวลน้ำ TLD ทุกมวลที่ใช้ว่าเข้ากับความถี่ปรับค่าของระบบโครงสร้างโดยต่างกันเกิน 2% หรือไม่

$$\gamma_t = \frac{\sqrt{1+\frac{\mu}{2}}}{1+\mu} = \frac{\sqrt{1+\frac{0.0052}{2}}}{1+0.0052} = 0.996$$

$$\omega_t = \omega_s \gamma_t = (0.316)(0.996) = 0.315 \text{ ต่างกันไม่เกิน 2\%}$$

คำนวณความหน่วงของถังน้ำและผลของ TLD ทำให้ระบบโครงสร้างมีอัตราความหน่วงเพิ่มขึ้นได้เท่ากับ

$$\xi_{t,opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{0.05(1+(3 \times 0.0052/4))}{(1+0.05)(1+(0.0052/2))}} = 0.0361$$

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+(\frac{3\mu}{4})}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{0.0052(1+0.0052)}{1+(\frac{3 \times 0.0052}{4})}} = 0.0180$$

พิจารณาผลในทิศ Y คำนวณด้วยวิธีการเดียวกับทิศ X จะได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมของอุปกรณ์ดังนี้

$$\mu = M_t / M_s = 2(9.82) / 3882 = 0.0051$$

$$\gamma_t = \frac{\sqrt{1+\frac{\mu}{2}}}{1+\mu} = \frac{\sqrt{1+\frac{0.0051}{2}}}{1+0.0051} = 0.996$$

$$\omega_t = \omega_s \gamma_t = (0.352)(0.996) = 0.350 \text{ ต่างกันไม่เกิน 2\%}$$

$$\xi_{t,opt} = 0.0361$$

$$\xi_{eq} = 0.0178$$

4.3.2 การออกแบบถังน้ำและชุดอุปกรณ์

คำนวณอัตราส่วนความหน่วงของเฉพาะน้ำในถังสำหรับผลตอบสนองในทิศทาง X และ Y จากสมการ(16) ได้เท่ากับ

$$\text{ทิศ X } \xi_{liq} = \left(\frac{1+1.8/6}{2 \times 1.8} \right) \sqrt{\frac{2 \times 1 \times 10^{-6}}{2 \pi \times 0.31}} = 0.00045$$

$$\text{ทิศ Y } \xi_{liq} = \left(\frac{1+2.8/4.1}{2 \times 1} \right) \sqrt{\frac{2 \times 1 \times 10^{-6}}{2 \pi \times 0.35}} = 0.00065$$

น้ำในถังให้อัตราส่วนความหน่วงที่น้อยกว่าที่ต้องการ ต้องออกแบบเสาภายในถังน้ำเพื่อเพิ่มความหน่วง โดยแอมพลิจูดการสั่นในทิศ X และ Y ของถังซึ่งอ้างอิงจากผลวิเคราะห์การโก่งตัวด้านข้างจากแรงลมที่คิดเฉพาะผลของแรงส่วนกำหนดเท่ากับ 204 และ 109 มม.ตามลำดับ

คำนวณความกว้างเสาสำหรับถังที่ใช้ลดการสั่นของทิศ X เริ่มจากลองประมาณค่า $\beta = 0.03$ จากสมการ (18) จะคำนวณได้ $A = 1.219 \text{ m}$. ซึ่งทำให้ได้ค่าอัตราหน่วงที่ต้องการแล้วนำไปออกแบบความกว้างรวมของเสาที่ต้องการได้ $d = 0.7 \text{ m}$. จากนั้นลองคำนวณกลับเพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ถูกต้องอีกครั้ง

$$\beta = 1.5 \frac{0.7}{3.0} \frac{1}{6.0} \left[\frac{\rho \sinh(1.8\pi/6) + \sinh(5.4\pi/6)}{9\pi \sinh^2(1.8\pi/6) \cosh(1.8\pi/6)} \right] = 0.030$$

$$A = \sqrt{\left(\frac{\rho}{\pi} \tanh\left(\frac{1.8}{6}\right) \right) (0.207) / \left(\frac{\rho}{3\pi} \times 0.030 \right)} = 1.219 \text{ m}$$

สำหรับถังที่ใช้ลดการสั่นของทิศ Y ประมาณค่า $\beta = 0.065$ จะคำนวณได้ $A = 0.548 \text{ m}$. คำนวณหาความกว้างรวมของเสาที่ต้องการในถังได้ $d = 0.85 \text{ m}$. จากนั้นลองคำนวณกลับเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

$$\beta = 1.5 \frac{0.7}{3.0} \frac{1}{6.0} \left[\frac{9 \sinh(1\pi/4.1) + \sinh(3\pi/4.1)}{9\pi \sinh^2(1\pi/4.1) \cosh(1\pi/4.1)} \right] = 0.064$$

$$A = \sqrt{\left(\frac{\rho}{\pi} \tanh\left(\frac{1}{4.1}\right) \right) (0.121) / \left(\frac{\rho}{3\pi} \times 0.064 \right)} = 0.549 \text{ m}$$

พบว่าค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับที่ประมาณไว้ ต่างกันไม่เกิน 2% ทั้งถังน้ำในแกน X และ Y ถือว่ามีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

4.3.3 ผลตอบสนองของอาคารหลังติดตั้ง TLD

วิเคราะห์ความเร่งตอบสนองของอาคารโดยคิดผลของการเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงจาก TLD พบว่าผลลัพธ์ค่าความเร่งมีความใกล้เคียงกับการใช้ TMD และถูกควบคุมให้ไม่เกิน 25 mg ได้ ตามกราฟในรูปที่ 13

4.4 ผลการออกแบบโครงสร้าง

โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มความหน่วงในระบบโครงสร้างจะช่วยลดผลตอบสนองต่อการสั่นไหวและทำให้แรงลัพท์ที่ฐานอาคารเนื่องจากแรงลมลดลง หากคิดผลการเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงที่ได้จาก Mass Dampers จะทำให้แรงที่ฐานอาคารน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญดังที่แสดงผลในตารางที่ 7 ซึ่งพิจารณาที่ความถี่ 0.8 เท่าของโครงสร้างต้นแบบ

ตารางที่ 7 โมเมนต์ที่ฐานของอาคารที่ใช้อุปกรณ์การสั่นสะเทือน เปรียบเทียบระหว่างแบบคิดรวมผลความหน่วงและไม่คิดผลความหน่วงที่เพิ่มขึ้น

โมเมนต์ที่ฐาน (กิโลนิวตัน-เมตร)	คิดผลความหน่วง	ไม่คิดผลความหน่วง
M_y (ตัดรอบแกน Y)	150,230	262,731
M_x (ตัดรอบแกน X)	135,309	215,927
M_z (หมุนรอบแกน Z)	4,071	4,267

ผู้วิจัยเลือกจะไม่ใช้ความหน่วงที่ได้เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนเข้ามาช่วยผลตอบสนองในด้านแรง เนื่องจากการออกแบบด้านกำลังนั้น ค่าแรงลมจะสูงกว่าแรงลมที่สภาวะใช้งานมาก เนื่องจากความเร็วลมที่สูงกว่าและมีตัวคุณประกอบน้ำหนักบรรทุก ซึ่งภายใต้แรงดังกล่าว องค์อาคาร คสล. จะเข้าใกล้สภาวะประลัยและมีการแตกร้าวเพิ่มที่สูงมาก ส่งผลทำให้ความถี่ธรรมชาติของอาคารที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถตอบสนองได้เต็มที่ ความหน่วงที่เพิ่มให้ระบบโครงสร้างก็จะน้อยลงและแรงลัพท์ที่ฐานก็จะสูงขึ้นกว่าที่ประเมินได้ ดังนั้นจึงควรใช้ผลของแรงที่ไม่คิดผลจากการเพิ่มความหน่วงที่มีความปลอดภัยสูงกว่า

ออกแบบโดยเบื้องต้นใช้เหล็กเสริมแนวตั้ง DB20@250 และเหล็กเสริมแนวนอน DB12@250 (1% และ 0.25% ของหน้าตัดคอนกรีตตามลำดับ) ยกเว้นเหล็กเสริมยืนของผนังวงกลมตั้งแต่ช่วงชั้นที่ 4 ลงมาและเหล็กเสริมแนวนอนของผนังวงกลม ตั้งแต่ช่วงชั้นที่ 12 เพราะพบว่ากำลังของหน้าตัดไม่เพียงพอ ต้องเพิ่มปริมาณเหล็กเสริม โดยผลการตรวจสอบและออกแบบของโครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างอาคารต้นแบบและอาคารลดขนาดที่ติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นไหว สรุปไว้ในตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 ผลการออกแบบผนังของโครงสร้างที่ลดขนาดและติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือน ส่วนผนังวงกลมด้านบน

เหล็กเสริม/Ratio	ฐานราก-ชั้น4	ชั้น4 - ชั้น8	ชั้น8 - 12	ชั้น12 - หลังคา	
ชุดแกนใน	เหล็กแนวตั้ง	DB32@200	DB25@200	DB25@200	DB25@200
	PMM Ratio	0.39	0.37	0.34	0.29
	เหล็กแนวนอน	DB16@200	DB16@200	DB16@200	DB16@200
	Shear ratio	0.16	0.10	0.08	0.08
ชุดแกนนอก	เหล็กแนวตั้ง	DB25@200	DB25@200	DB20@200	DB20@200
	PMM Ratio	0.89	0.73	0.83	0.69
	เหล็กแนวนอน	DB16@200	DB16@250	DB12@200	DB12@250
	Shear Ratio	0.85	0.94	0.89	0.91

ตารางที่ 9 ผลการออกแบบผนังของโครงสร้างที่ลดขนาดและติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือน ส่วนผนังแนวขวาง

เหล็กเสริม/Ratio	ฐานราก-ชั้น4	ชั้น4 - ชั้น8	ชั้น8 - ชั้น12	ชั้น12 - หลังคา	
ชุดแกนใน	เหล็กแนวตั้ง	74-DB32	70-DB32	70-DB25	50-DB25
	PMM Ratio	0.31	0.27	0.34	0.29
	แนวนอน	DB16@250	DB16@250	DB16@250	DB16@250
	Shear ratio	0.15	0.08	0.07	0.06
ชุดแกนนอก	เหล็กแนวตั้ง	DB20@200	DB20@200	DB20@200	DB20@200
	PMM Ratio	0.56	0.43	0.39	0.35
	เหล็กแนวนอน	DB12@250	DB12@250	DB12@250	DB12@250
	Shear Ratio	0.95	0.89	0.86	0.46

ตรวจสอบสภาวะด้านการใช้งานของอาคารได้แก่ การแอ่นตัวด้านข้าง พบว่าการแอ่นตัวสูงสุดในทิศ X และ Y เป็น 0.187 และ 0.121 ม. ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่าที่ยอมให้คือ 0.232 ม.

พบว่าการออกแบบโครงสร้างทั้ง 2 แบบไม่มีปัญหาในการออกแบบด้านกำลัง แต่อาคารมีความอ่อนแอต่อความเร่งตอบสนองในสภาวะใช้งาน การออกแบบขนาดโครงสร้างจึงถูกควบคุมด้วยการลดค่าความเร่งตอบสนองของอาคารให้ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้

5. ผลการเปรียบเทียบราคาของโครงสร้างต้นแบบกับโครงสร้างที่ใช้อุปกรณ์ลดการสั่นไหว

ผู้วิจัยศึกษาประสิทธิภาพผลของการออกแบบโครงสร้างแบบใช้อุปกรณ์ลดการสั่นโดยเปรียบเทียบกับอาคารต้นแบบในเชิงต้นทุนของการก่อสร้าง โดยโครงสร้างที่ใช้อุปกรณ์จะมีปริมาณงานโครงสร้างหลักได้แก่ คอนกรีต, เหล็กเสริมและเสาเข็มที่น้อยกว่าโครงสร้างต้นแบบอย่างชัดเจน หากแต่การติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นจะทำให้เกิดงานเพิ่มเติมเช่นนี้

หากใช้ TMD ต้องเพิ่มงานประกอบลูกตุ้มเหล็กโดยเหล็กหล่อกำลังต่ำ, เพิ่มอุปกรณ์ Shock absorber และเปลี่ยนโครงสร้างเหล็กหลังคาจากท่อกลม 216 มม.หนา 4.5 มม. ใช้เป็นเหล็กรูปพรรณ H 300x150x6.5x9 เพื่อให้รับน้ำหนัก 19.67 ตันของลูกตุ้ม TMD ได้ ส่วนกรณีใช้ TLD ต้องมีการเพิ่มพื้นและผนังคสล. ที่เพื่อรับน้ำหนักถังน้ำและเพิ่มงานติดตั้งเสาขนาดเล็กหรือลดตาข่ายภายในถังน้ำและนอกจากนี้ทั้ง TMD และ TLD ยังต้องมีค่าจ้างผู้เชี่ยวชาญให้ดำเนินการทดสอบและติดตั้งระบบอุปกรณ์ด้วย

ราคาต่อหน่วยจะอ้างอิงค่าวัสดุจากราคาโดยเฉลี่ยของราคากลางวัสดุก่อสร้างในช่วงปี 2561 ประกอบกับการสำรวจและสอบถามราคาที่ได้รับเหมาก่อสร้างใช้ทำงานจริง ซึ่งสามารถสรุปปริมาณและราคาต่อหน่วยได้ และสรุปต้นทุนราคางานก่อสร้างได้ตามตารางที่ 10 และ 11

ตารางที่ 10 ปริมาณงานโครงสร้างและราคาต่อหน่วยเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างต้นแบบ, โครงสร้างที่ติดตั้ง TMD และ TLD

รายการ (หน่วย)	ปริมาณงาน			ราคา/หน่วย
	ต้นแบบ	TMD	TLD	
คอนกรีต (ลบ.ม.)	2,733.7	1,725.5	1,725.5	2,600
เหล็กเสริม (กก.)	360,784	234,860	234,860	24

เสาเข็ม (ต้น)	91	85	85	500,000
โครงสร้างเหล็ก (กก.)	5,738	7,046	5,738	40
ลูกตุ้มเหล็กหล่อ TMD (กก.)	-	19,670	-	25
อุปกรณ์ TMD (เหมา)	-	1	-	400,000
อุปกรณ์ TLD (เหมา)	-	-	1	100,000
ค่าจ้างติดตั้งและตรวจสอบ (เหมา)	-	1	1	500,000

ตารางที่ 11 สรุปราคางานโครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างต้นแบบ, โครงสร้างที่ติดตั้ง TMD และ TLD

รายการ	ราคา		
	ต้นแบบ	TMD	TLD
คอนกรีต	7,107,620	4,452,500	4,452,500
เหล็กเสริม	8,658,816	5,636,640	5,636,640
เสาเข็ม	45,500,000	42,500,000	42,500,000
โครงสร้างเหล็ก	229,520	281,840	281,840
ลูกตุ้ม TMD	-	491,750	--
อุปกรณ์ Dampers	-	400,000	100,000
ค่าจ้างติดตั้งและตรวจสอบ	-	500,000	500,000
รวมราคา	61,495,956	54,262,730	53,418,660

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการออกแบบพบว่า การออกแบบโครงสร้างใหม่ให้มีขนาดเล็กลง พร้อมกับใช้อุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนแบบใช้ TLD เพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้างนั้น มีประสิทธิภาพมาก สามารถควบคุมสภาวะการใช้งานในด้านการการโก่งตัวและความเร่งในแนวราบเนื่องจากแรงลมให้อยู่ในข้อกำหนด และสามารถออกแบบโครงสร้างให้มีกำลังพองเพียงได้โดยประหยัดต้นทุน โครงสร้างหลักได้มากที่สุด คือลดต้นทุนได้ประมาณ 8 ล้านบาท เมื่อเทียบกับการออกแบบโครงสร้างแบบเดิม

ส่วน TMD แบบ Pendulum นั้น มีประสิทธิภาพมาก เหมือนกับ TLD แต่ต้องใช้งบประมาณที่มากกว่าในการสร้างมวลลูกตุ้มและติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อมวลลูกตุ้มให้สามารถตอบสนองต่อการสั่นไหวอย่างมีประสิทธิภาพได้หลายทิศทาง นอกจากนั้นการยกติดตั้งและเชื่อมประกอบลูกตุ้มยังมีความยากลำบากในการทำงาน จึงต้องการงบประมาณที่ค่อนข้างสูง ทำให้ประหยัดสามารถต้นทุนโครงสร้างหลักได้ประมาณ 7 ล้านบาท เมื่อเทียบกับการออกแบบโครงสร้างแบบเดิม อย่างไรก็ตาม TMD ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า TLD และการบำรุงรักษาในระยะยาวจะดีกว่า TLD

ในเบื้องต้นสามารถสรุปผลได้ว่า การติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนสามารถช่วยประหยัดโครงสร้างในการออกแบบได้พอสมควร คิดเป็นอัตราส่วนที่ประมาณ 10%-12% ของการออกแบบทั่วไป และเป็นวิธีการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่มีลักษณะชะลุดและพบปัญหาในการออกแบบเพื่อต้านการสั่นไหวในสภาวะใช้งานจากแรงลม

อย่างไรก็ตามอัตราส่วนความหน่วงที่เพิ่มขึ้นจาก TLD และ TMD จะนำมาใช้ในการลดการสั่นไหวจากแรงลมหรือแรงอื่นๆ ในสภาวะใช้งานเท่านั้น จะไม่นำมาพิจารณาในการลดแรงลมในการออกแบบต้านกำลัง เนื่องจากเมื่อโครงสร้างรับแรงลมจนใกล้ถึงประลัย (แรงลมที่คูณตัว

ประกอบน้ำหนักบรรทุก) ความถี่ธรรมชาติหรือคาบการสั่นไหวของโครงสร้างจะเปลี่ยนไปอย่างมาก ทำให้ TLD และ TMD จะมีการตอบสนองต่อการสั่นและประสิทธิภาพลดลงด้วยอย่างมาก ถ้าจะนำมาใช้ยังต้องมีการศึกษาพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงลมของอุปกรณ์หนึ่งในสภาวะประลัย ว่ายังสามารถทำงานได้ต่อเนื่องจากสภาวะใช้งานหรือไม่และอัตราหน่วงเทียบเท่าของระบบโครงสร้างที่ได้จากอุปกรณ์ยังเป็นไปตามการคำนวณที่สภาวะใช้งานหรือไม่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาและพัฒนาแนวทางการออกแบบและคำนวณโครงสร้างของอาคารที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนเพื่อสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหวและแรงลม โดยได้รับทุนวิจัยจากกรมโยธาธิการและผังเมืองและมี รศ.ดร.นคร ภู่วโรดม เป็นหัวหน้าโครงการ ผู้เขียนขอขอบคุณ นายจิรวุฒิ จันทร์เรือง และ นายสมศักดิ์ สืบสาย นักศึกษาปริญญาเอก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานศูนย์วิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (2562). *โครงการศึกษาและพัฒนาแนวทางการออกแบบและคำนวณโครงสร้างที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนเพื่อสลายพลังงานจากแรงลมและแผ่นดินไหว (ฉบับร่าง)*
- [2] Holmes, J.D. (2003). *Wind Loading of Structures*. Spon Press Companies, pp 111-114
- [3] Warburton, G.B. (1982). *Optimum Absorber Parameter for Various Combination of Response and Excitation Parameter*. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.10, pp 381-401
- [4] Kawakun, W. (1999). *Passive and Active Vibration control for High-rise building under Wind load*. M.Eng Thesis, Sirindhorn International Institute of Technology and Thammasat University, Thailand.
- [5] Thaiboonmee, A. (2016). *Suppressing Wind-induced response of Tall building by Multiple Tune liquid dampers*. M.Eng Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [6] Warntitchai, P. and Pinkaew, T. (1998). *Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices*. Engineering Structures, Vol 20, No.7, pp 593-600
- [7] มยพ. 1311-50(2550) *มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร*, กรมโยธาธิการและผังเมือง.