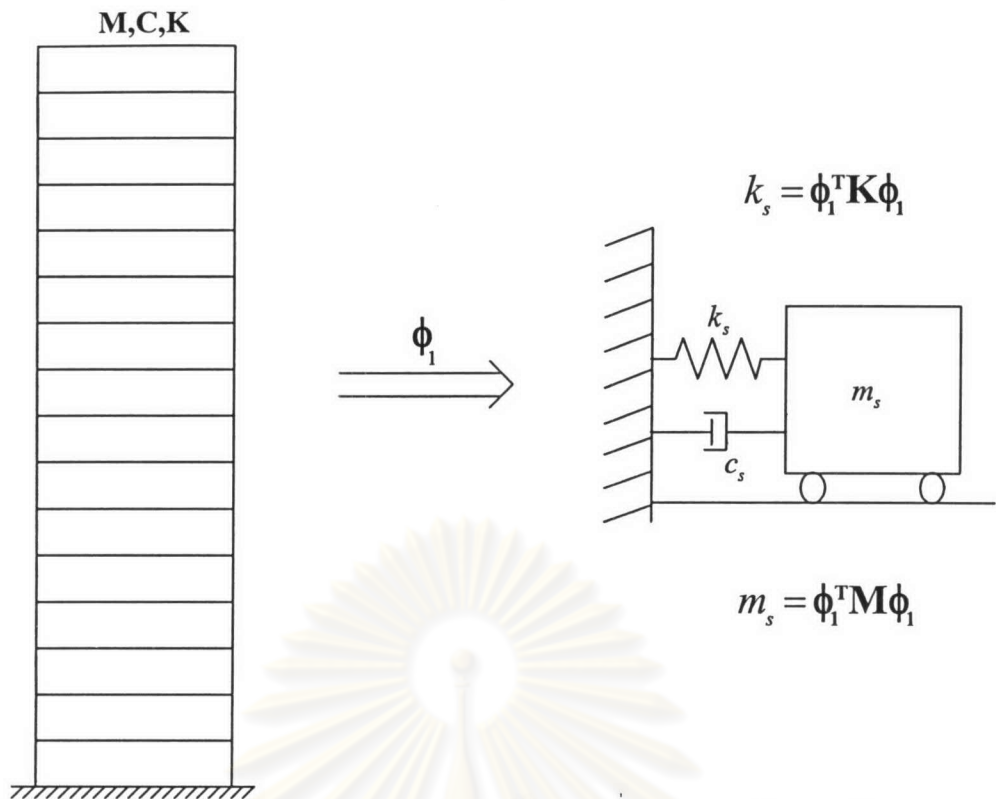


บทที่ 4

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดการสั่นไหวของโครงสร้างระหว่างการใส่ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟกับการใช้ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิก

การศึกษาในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟกับแอกทีฟ ภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิก โดยจะทำการจำลองอาคารสูง 76 ชั้น ที่มีค่าความถี่หลักของโครงสร้าง ($f_s = \omega_s / 2\pi$) เท่ากับ 0.16 เฮิรตซ์ ให้เป็นโครงสร้างที่มีระดับชั้นความถี่เดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ด้วยการแปลงโคออร์ดิเนตของอาคารไปสู่โคออร์ดิเนตเชิงโหมดของโหมดการสั่นไหวที่ 1 โดยใช้ค่าโหมดรูปร่างที่ 1 ซึ่งจะได้ค่ามวลของโครงสร้างในโหมดที่ 1 (1^{st} modal mass, m_s) ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 37,661 ตัน ค่าสติฟเนส (k_s) มีค่าเท่ากับ 38,047 กิโลนิวตันต่อเมตร และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c_s) มีค่าเท่ากับ 757 กิโลนิวตันวินาทีต่อเมตร สำหรับอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงเพื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง ระยะเวลาการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง ระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วง และระยะเวลาการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วง อีกทั้งยังทำการหาอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟที่เทียบเท่ากับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ซึ่งการเปรียบเทียบดังกล่าวจะพิจารณาในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้าง (โหมดที่ 1) อยู่ในช่วง 1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างอยู่ในช่วง 1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบมวลหน่วงปรับค่าจะใช้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณี และในกรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบมวลหน่วงจะกำหนดให้สามารถปรับค่าได้ในช่วง 0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 300 เปอร์เซ็นต์ ในการออกแบบการปรับค่าความหน่วง เมตริกซ์น้ำหนักสำหรับการตอบสนองของโครงสร้างจะใช้เมตริกซ์ที่ให้ค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในโครงสร้างหลักซึ่งรวมพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ไว้ในสมการดัชนีสมรรถนะ (สมการที่ (2.13)) แล้วทำการออกแบบหาค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณีที่มีขนาดมวลหน่วงต่าง ๆ กัน ที่ทำให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวเนื่องจากแรงกระทำในช่วงความถี่ที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุด โดยจะสมมติให้โครงสร้างหลักมีค่าอัตราส่วนความหน่วงคงที่เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำค่าที่ออกแบบได้ไปใช้กับโครงสร้างที่มีอัตราส่วนความหน่วงต่าง ๆ และนำผลตอบสนองที่ได้มาศึกษาต่อในขั้นต่อไป



รูปที่ 4.1 รูปแสดงการจำลองโครงสร้างอาคาร 76 ชั้น ให้เป็นโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเร็วเดียว การวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองที่กล่าวมานั้น เมื่อได้ทำการจำลองโครงสร้างอาคารสูง 76 ชั้น ให้เป็นโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเร็วเดียวแล้ว จะทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงเข้าไป ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแรงที่กระทำนั้นเป็นแบบฮาร์โมนิกใน 2 ลักษณะ ได้แก่ แรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับ ความถี่หลักของโครงสร้าง และแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ที่ตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟเมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟมีค่าน้อยจากกราฟตัวประกอบขยายพลวัต (Dynamic amplification factor, DAF) ซึ่งความถี่ที่เลือกใช้ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 1.16 เท่า ของความถี่หลักของโครงสร้าง โดยระบบมวลหน่วงที่ติดตั้งเข้าไปเพื่อทำการศึกษา ในที่นี้จะทำการพิจารณาด้วยกัน 2 ระบบ ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ทางคณิตศาสตร์ได้ในทำนองเดียวกับสมการที่ (2.3) และ (2.19) ซึ่งนำมาแสดงใหม่ในสมการที่ (4.1) และ (4.2) ดังนี้

กรณีทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ m_d & m_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_d \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_d \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ x_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \sin(\Omega t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

กรณีทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟ

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ m_d & m_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_d \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ x_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \sin(\Omega t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} u'(t) \quad (4.2)$$

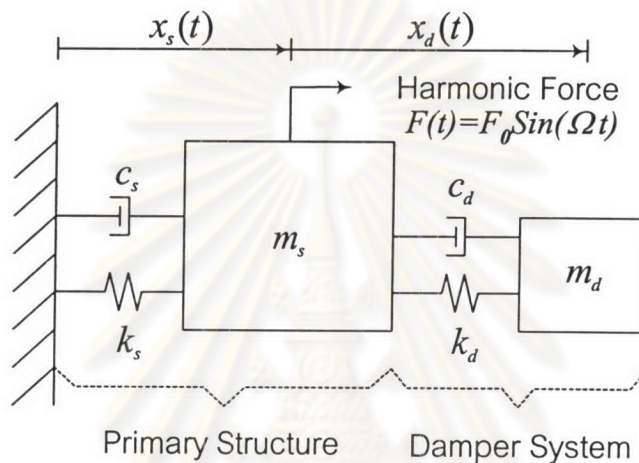
โดยที่ $u'(t) = c_d(t)\dot{x}_d$

โดยที่ค่า $c_d(t)$ ที่เหมาะสมจะคำนวณได้จาก

$$c_d(t) = \begin{cases} c_{d,max} & ; \quad c'_d(t) \geq c_{d,max} \\ c'_d(t) & ; \quad c_{d,min} < c'_d(t) < c_{d,max} \\ c_{d,min} & ; \quad c'_d(t) \leq c_{d,min} \end{cases}$$

โดยที่ $c'_d(t) = \frac{u(t)}{\dot{x}_d(t)} \quad ; \quad \dot{x}_d(t) \neq 0$

$u(t)$ = ค่าแรงควบคุมที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2.14)



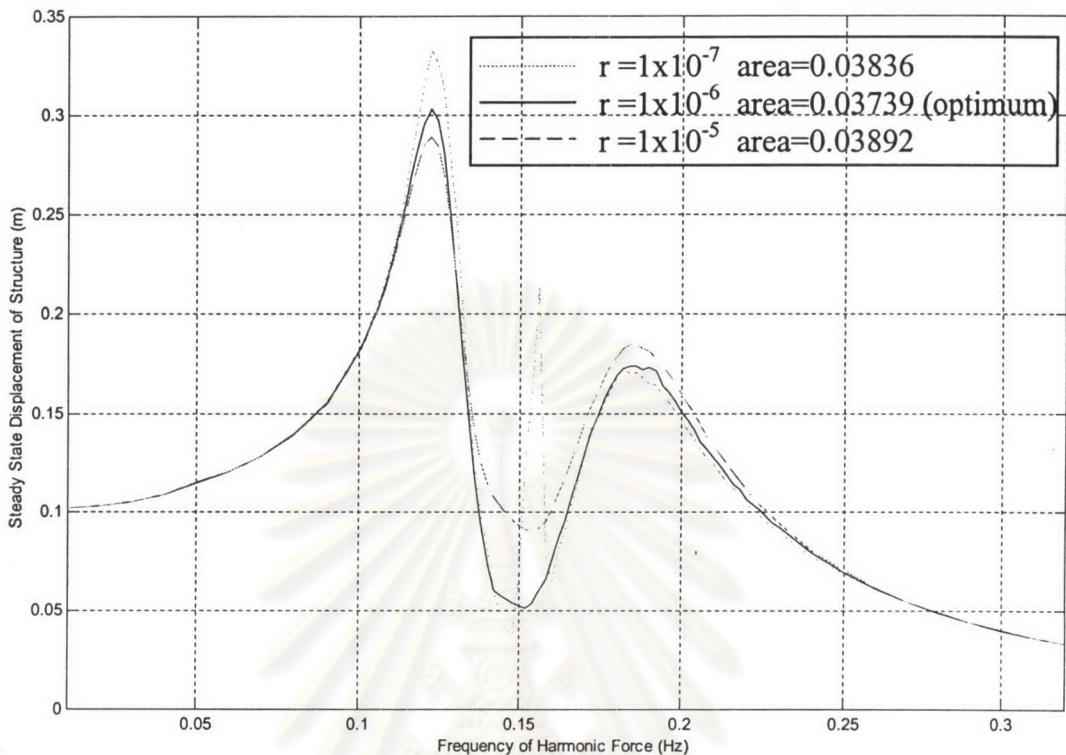
รูปที่ 4.2 รูปแสดงแบบจำลองโครงสร้างที่ติดตั้งระบบมวลหน่วงรับแรงกระทำที่เป็นแบบฮาร์โมนิก

4.1 กรณีที่โครงสร้างรับแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักของโครงสร้าง

ในกรณีนี้ แรงที่มากกระทำต่อโครงสร้างใช้เป็นแบบฮาร์โมนิกที่มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับค่าที่มากที่สุดของแรงลมที่ได้มาจากเพิ่มข้อมูลการทดลองในอุโมงค์ลมในโหมดแรก โดยให้ความถี่ของแรงเท่ากับความถี่โหมดแรกของโครงสร้าง เนื่องจากเป็นกรณีที่โครงสร้างมีการสั่นไหวมากที่สุดเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วง โดยแรงดังกล่าวจะกระทำเป็นระยะเวลาที่นานพอที่ทำให้การสั่นไหวของโครงสร้างเข้าสู่ในช่วงคงตัว (Steady State)

จากการศึกษา จะพบว่าในการควบคุมโครงสร้างโดยระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงแยกที่พื้นจะมีค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในช่วงคงตัวเมื่อรับแรงในแต่ละความถี่โดยรวมมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งในที่นี้ก็คือพื้นที่ใต้กราฟที่น้อยที่สุดของกราฟตัวประกอบการขยายพลวัตของระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในช่วงคงตัวนั่นเอง ตัวอย่างกราฟตัวประกอบการขยายพลวัตในกรณีที่อัตราส่วนของมวลหน่วงต่อ

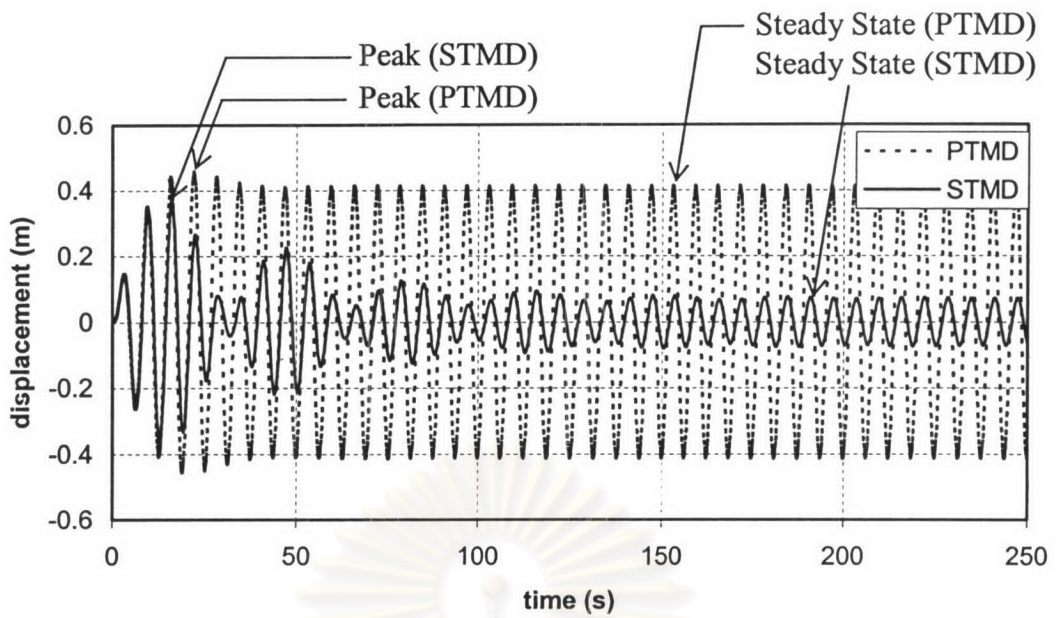
มวลของโครงสร้างเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟตัวประกอบขยายพลวัตของโครงสร้างในช่วงคงตัวโดยใช้เมตริกซ์น้ำหนัก สำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ต่าง ๆ กัน ($\mu = 5\%$, $\xi = 3.5\%$)

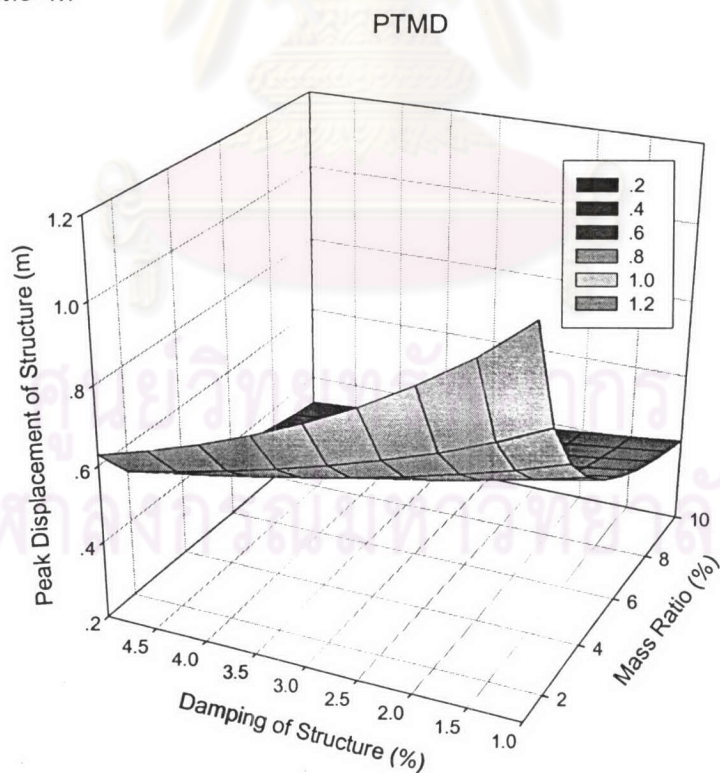
เมื่อได้ค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ดีที่สุดจากการออกแบบที่โครงสร้างที่มีอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่ากลางของอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างที่ทำการพิจารณา ในแต่ละอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างแล้ว จะนำค่าที่ได้ดังกล่าวไปใช้กับโครงสร้างที่มีอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างตั้งแต่ 1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างนั้น ๆ

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข จะได้ผลตอบสนองของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองในกรณีที่ใช้ระบบมวลหน่วงที่มีค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์และใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลตอบสนองดังรูปที่ได้แสดงนั้น จะนำค่าสูงสุดตลอดช่วงเวลาและค่าสูงสุดในช่วงคงตัว นำมาสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุมทั้งสองระบบเมื่อค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างและค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเปลี่ยนแปลงไป



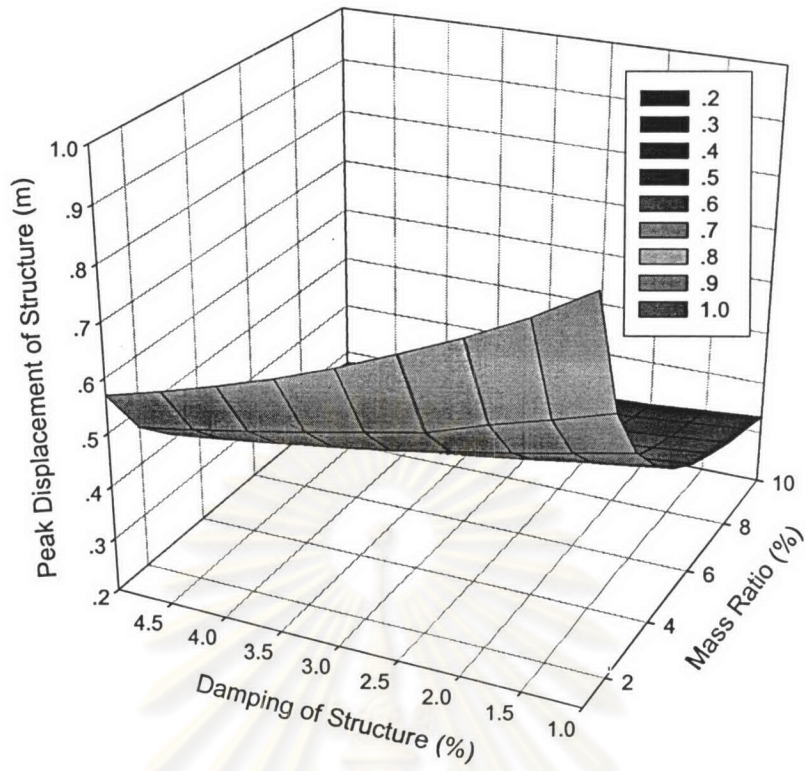
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าที่ได้จากทั้งระบบแบบพาสซีฟและเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_r, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่เกิดขึ้น จะสามารถสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7

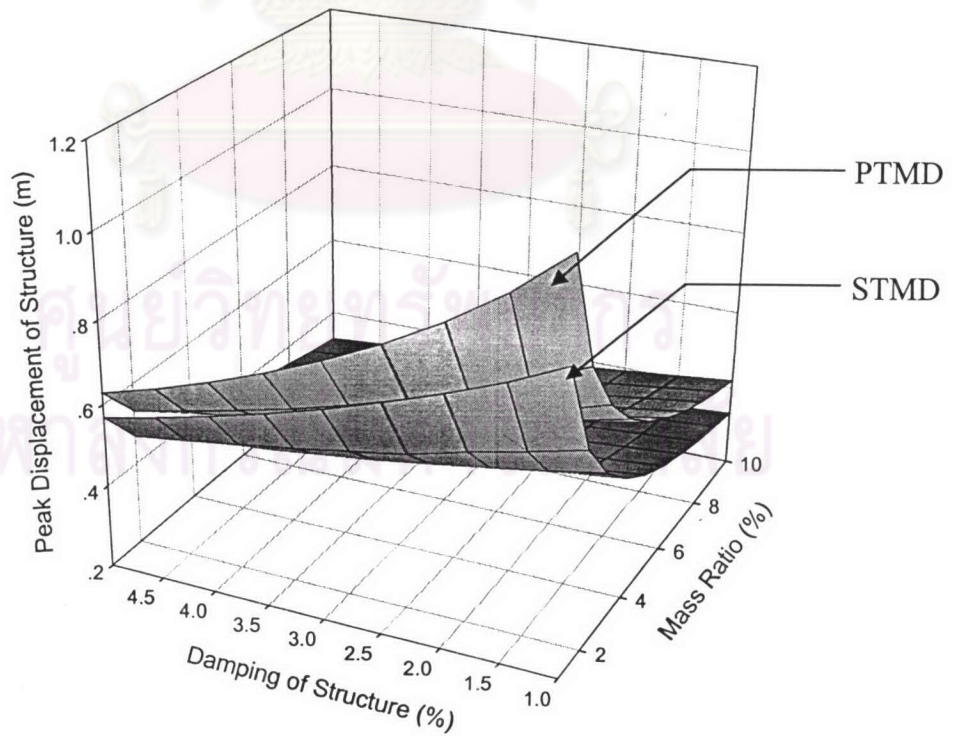


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ($\Omega = \omega_r$)

STMD



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_s$)



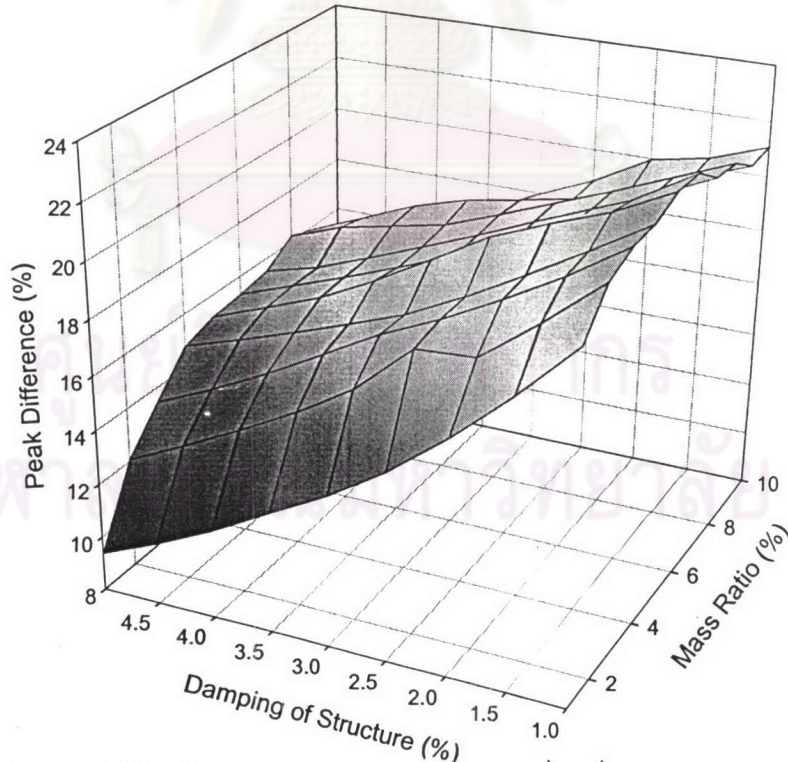
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$)

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองระบบควบคุมจะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการควบคุม การสั่นไหวที่เหมือนกัน โดยที่เมื่อค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างเพิ่มขึ้นระยะ การเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างก็จะลดลง เช่นเดียวกันกับเมื่ออัตราส่วนความหน่วงของ โครงสร้างเพิ่มขึ้นระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างก็จะลดลงเช่นกัน แต่เมื่อนำผลที่ได้จากทั้ง สองระบบมาเปรียบเทียบกันแล้ว จะเห็นได้ว่าระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างของระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟจะมีค่าน้อยกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟอยู่เสมอ โดยค่า ความแตกต่างระหว่างทั้งสองระบบจะลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้าง และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น

เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟเมื่อเทียบกับระบบ มวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟได้ดียิ่งขึ้น จึงทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลที่ได้จาก ทั้งสองระบบเทียบกับผลที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ดังกล่าว คำนวณจากสมการที่ (4.3) ดังนี้

$$\text{Peak Difference} = \frac{(x_s^p)_{PTMD} - (x_s^p)_{STMD}}{(x_s^p)_{PTMD}} \times 100\% \quad (4.3)$$

ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการข้างต้น ในแต่ละอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อ มวลของโครงสร้างและอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมาสร้างกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.8

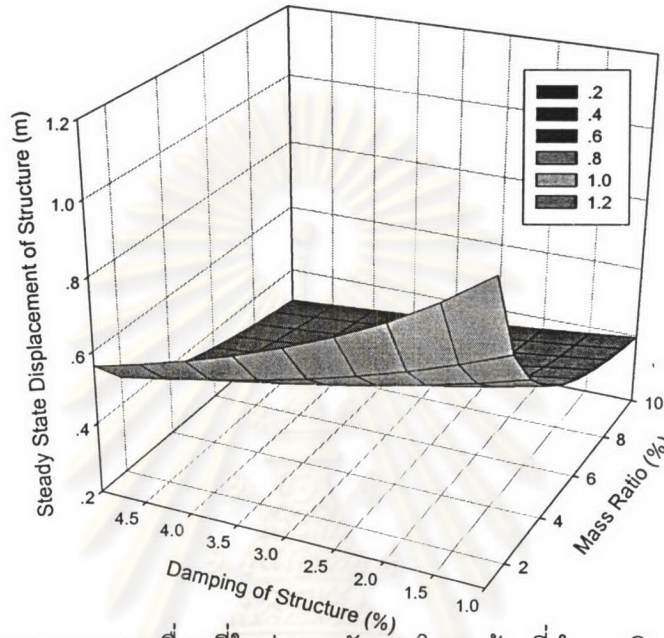


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ได้จาก ทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\Omega = \omega_s$)

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟที่สามารถลดระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างได้ประมาณ 8 ถึง 23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ

เมื่อพิจารณาระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้น จะสามารถสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11

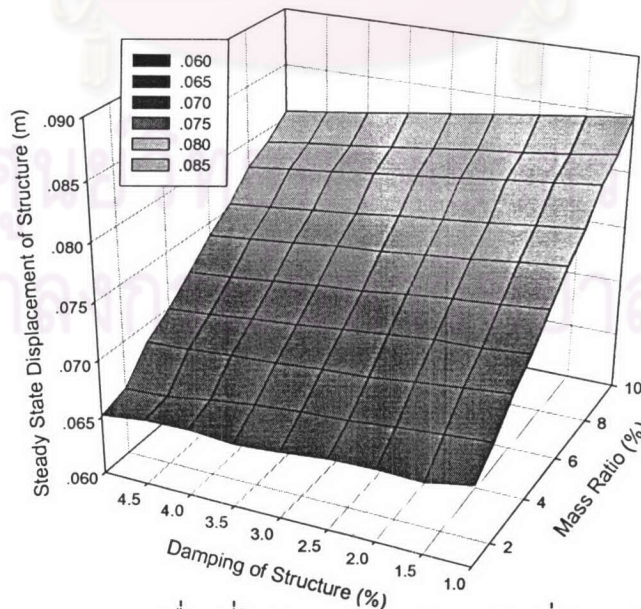
PTMD



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วง

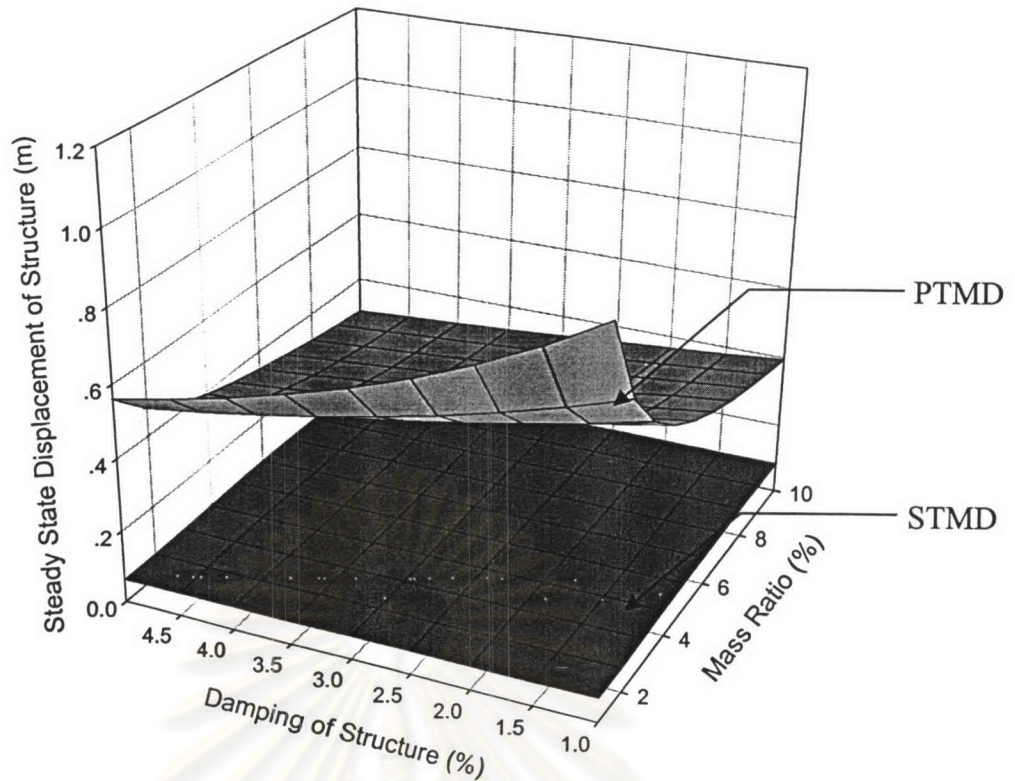
ปรับค่าแบบพาสซีฟ ($\Omega = \omega_s$)

STMD



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วง

ปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_s$)

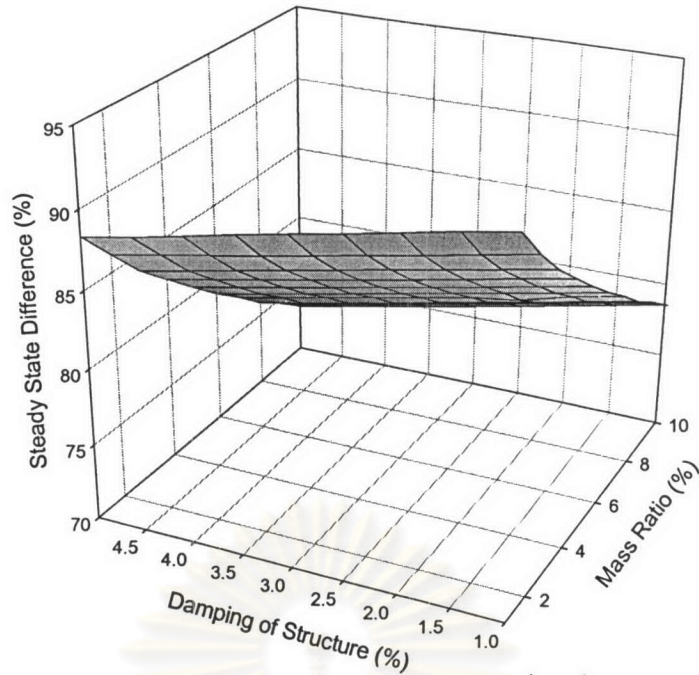


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$)

จากกราฟ แนวโน้มของกราฟทั้งสองระบบจะมีลักษณะไม่เหมือนกัน โดยที่กราฟระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟนั้นจะมีแนวโน้มเหมือนกันกับกรณีที่พิจารณาระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง ส่วนกราฟระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟนั้นจะมีแนวโน้มที่ต่างออกไป แต่เมื่อนำผลที่ได้จากทั้งสองระบบมาเปรียบเทียบกันแล้ว จะเห็นได้ว่าระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างจากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟจะมีค่าน้อยกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟอยู่มาก โดยกราฟที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟจะมีลักษณะแบนราบเมื่อนำมาเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ซึ่งแสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างและมวลหน่วงดังที่ทำการพิจารณา ระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟนั้นเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะการเคลื่อนที่ที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ

เช่นเดียวกับระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟเมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟได้ดียิ่งขึ้น จึงทำการสร้างกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลที่ได้จากทั้งสองระบบได้ดังรูปที่ 4.12 โดยค่าเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวคำนวณได้ในทำนองเดียวกับสมการที่ (4.3)

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟสามารถลดระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างได้ประมาณ 71 ถึง 93 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ

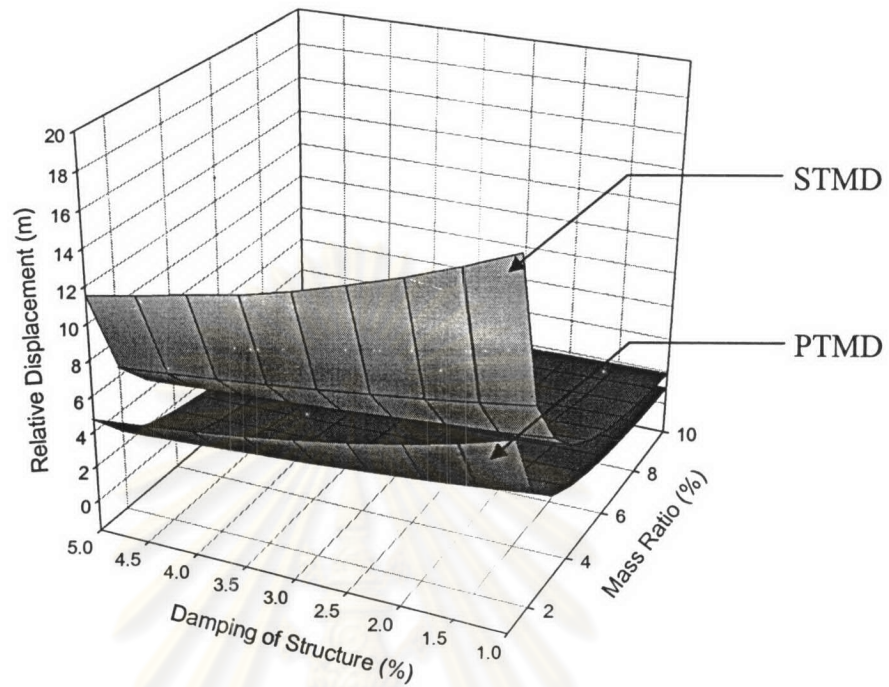


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\Omega = \omega_s$)

จากระยะการเคลื่อนที่ของทั้งสองระบบทั้งระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างและระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้าง จะเห็นได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟจะสิ้นไหวมากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ หรืออีกนัยหนึ่งคือ พลังงานการสั่นไหวได้ถูกถ่ายเทจากโครงสร้างไปสู่ระบบมวลหน่วงในกรณีที่ใช้ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟมากกว่า โดยในที่นี้ได้ทำการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วงและระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วง ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟทำงานได้มากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟจริง ซึ่งในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วงนั้น จะมีค่ามากเมื่อโครงสร้างมีค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างและค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าน้อย โดยค่าความแตกต่างจะลดลงเมื่อค่าทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.14 ค่าความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวสัมพัทธ์นั้น จะมีค่ามากเมื่อโครงสร้างมีค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างมีค่าน้อยและค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่ามาก โดยค่าความแตกต่างจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าลดลง โดยค่าอัตราส่วนของระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟต่อระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟมีค่าประมาณ 3 ถึง 15 เท่า ในขณะที่อัตราส่วนของระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของมวลหน่วงในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟต่อระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของ

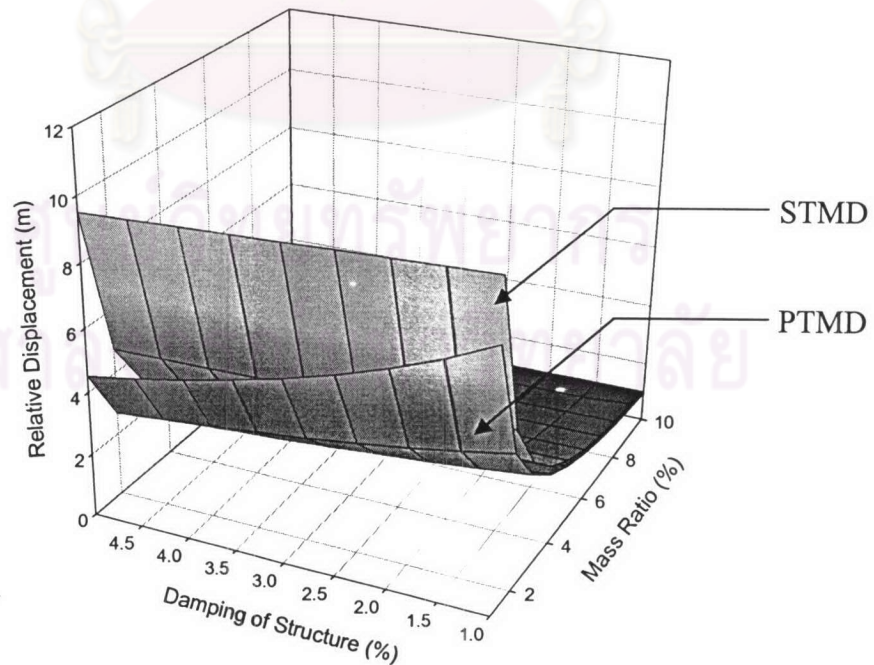
มวลหน่วงในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟนั้นมีค่าเพียง 1.1 ถึง 2.1 เท่าเท่านั้น

Peak Amplitude of Tuned Mass Damper



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วงปรับค่าของทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s$)

Steady State Amplitude of Tuned Mass Damper

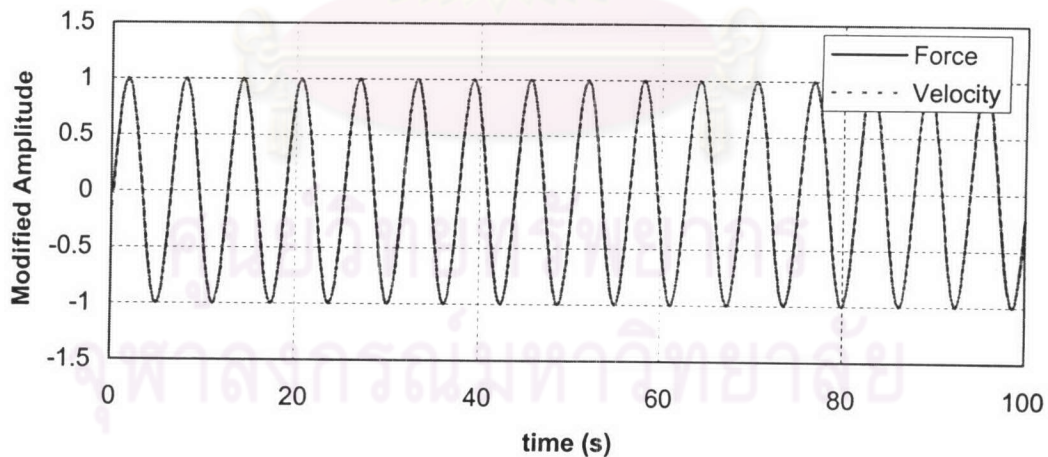


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวสัมพัทธ์ของระบบมวลหน่วงปรับค่าของทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s$)

เพื่อให้เห็นถึงความสามารถของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเฮมิแอคทีฟที่มีมากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะทำการพิจารณาจากพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากระบบมวลหน่วง (E_D) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (4.4) ดังนี้

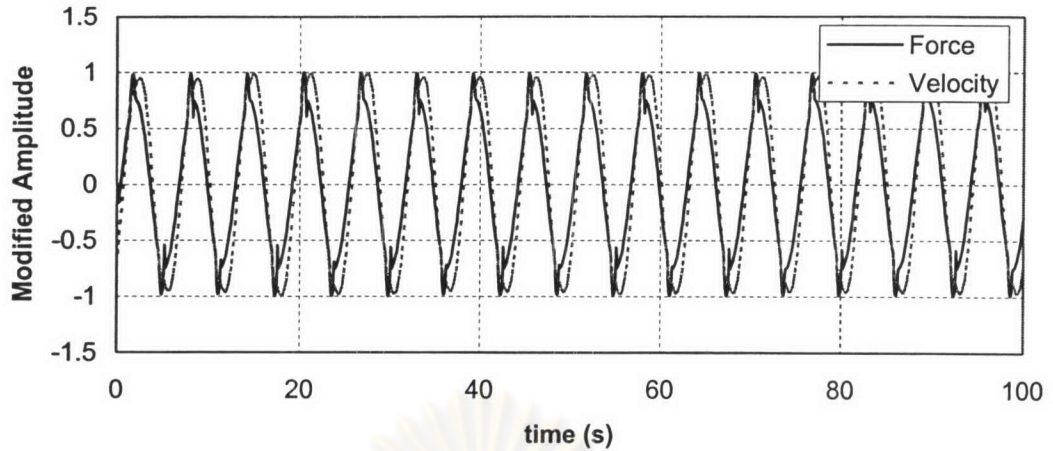
$$E_D = \int_0^1 F_D \frac{dx_s}{dt} dt = \int_0^1 F_D \dot{x}_s dt \quad (4.4)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า พลังงานที่เกิดขึ้นจะเกิดจากแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากระบบมวลหน่วง (F_D) และความเร็วของโครงสร้างหลัก (\dot{x}_s) ซึ่งขนาดของพลังงานที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของค่าทั้งสองค่าที่กล่าวมามีค่ามากน้อยเพียงใดแล้ว เฟสของค่าทั้งสองนั้นก็จะมีผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเฟสของแรงที่เกิดจากระบบมวลหน่วงกับเฟสของความเร็วของโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวของระบบควบคุมทั้งสองระบบ โดยปรับค่าขนาดให้ค่าสูงสุดของทั้งสองค่าให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา โดยในที่นี้จะทำการพิจารณากรณีที่ใช้ระบบมวลหน่วงที่มีค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์และใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ เพียงกรณีเดียว เนื่องจากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเฮมิแอคทีฟมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟในทุก ๆ กรณีดังที่ได้ทำการศึกษามาแล้วข้างต้น ซึ่งผลการศึกษาที่ได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ดังนี้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงเฟสของแรงที่เกิดจากระบบมวลหน่วงเทียบกับเฟสของความเร็วของโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ

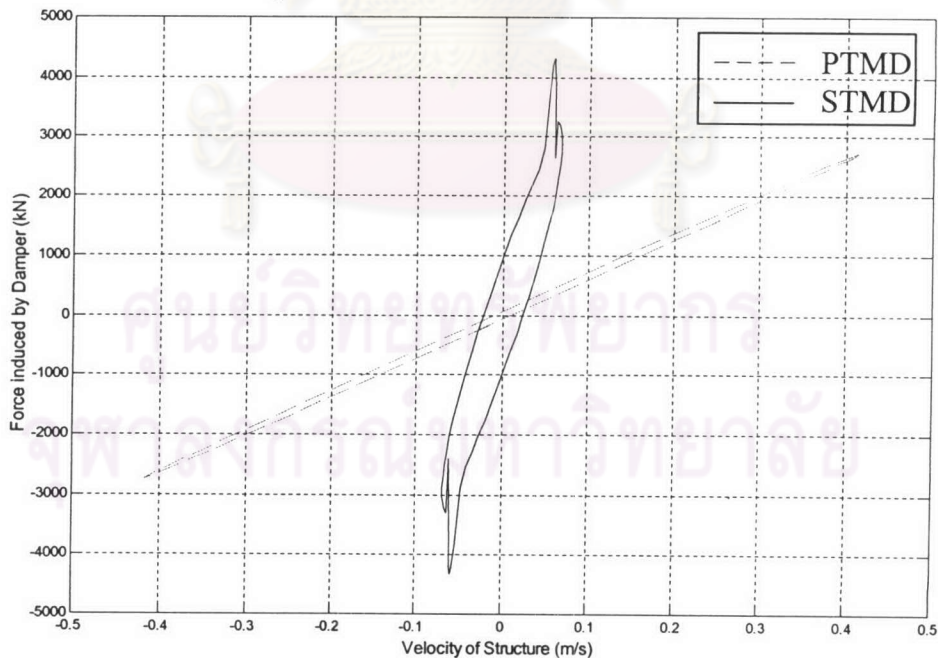
$$(\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%)$$



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงเฟสของแรงที่เกิดจากระบบมวลหนึ่งเทียบกับเฟสของความเร็วของโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวของระบบมวลหนึ่งปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟ

$$(\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%)$$

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า เฟสของแรงที่เกิดจากระบบมวลหนึ่งเมื่อเทียบกับเฟสของความเร็วของโครงสร้างหลักของทั้งสองระบบควบคุมนั้น มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นจึงมีผลมาจากขนาดแรงที่กระทำเนื่องจากระบบมวลหนึ่งและความเร็วของโครงสร้างหลัก ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาขนาดของทั้งสองค่าที่กล่าวมานั้นในช่วงคงตัวของทั้งสองระบบควบคุม มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำเนื่องจากระบบมวลหนึ่งและความเร็วของโครงสร้างหลัก ในช่วงคงตัวของการติดตั้งระบบควบคุมทั้งสองระบบ

$$(\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%)$$

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟ จะให้แรงกระทำกับ โครงสร้างหลักที่มากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ แต่ในขณะเดียวกัน ความเร็วของ โครงสร้างหลักในกรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟนั้นจะมีค่าน้อยกว่ากรณีของ ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ซึ่งจากกราฟที่แสดงนั้น พื้นที่ใต้กราฟของกราฟนี้ จะแสดงถึง อัตราการสลายพลังงานที่ระบบมวลหน่วงช่วยสลายออกให้กับโครงสร้างต่อการเคลื่อนที่ในช่วงคง ตัวของโครงสร้าง 1 รอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟสามารถสลาย พลังงานออกจากโครงสร้างได้มากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ อีกทั้งพลังงานที่เข้าสู่ โครงสร้างเนื่องจากแรงภายนอก (E_F) ของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟมีค่าน้อยกว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟอยู่อย่างมาก ด้วยสาเหตุที่ความเร็วของโครงสร้างหลักมีค่า น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่แรงภายนอกที่มากกระทำนั้นเหมือนกัน ดังนั้นพลังงานที่เหลืออยู่ ในโครงสร้างหลัก (E_S) ในกรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟจึงมีค่าน้อยกว่าใน กรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟนั่นเอง และเพื่ออธิบายสิ่งที่กล่าวมาได้ดียิ่งขึ้น จะ สามารถอธิบายผ่านสมการพลังงานที่สร้างขึ้นจากสมการการเคลื่อนที่ได้ดังต่อไปนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลักทั้งสองระบบ ดังสมการที่ (4.5)

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s - (c_d \dot{x}_d + k_d x_d) = F(t) \quad (4.5)$$

สามารถจัดสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (4.6)

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = F(t) - F_D \quad (4.6)$$

โดยที่

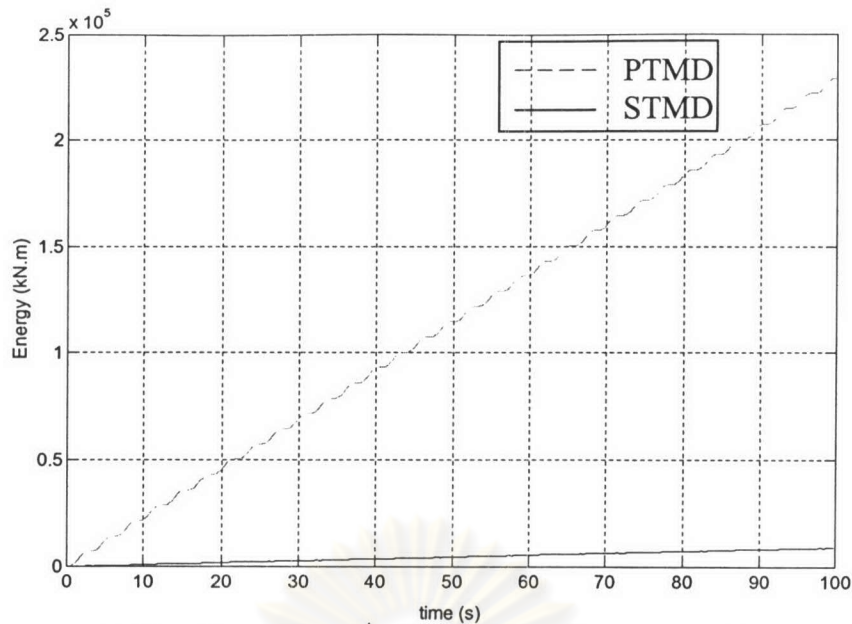
$$F_D = -(c_d \dot{x}_d + k_d x_d)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (4.6) ดังสมการที่ (4.7)

$$\int_0^t (m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s) \dot{x}_s dt = \int_0^t F(t) \dot{x}_s dt - \int_0^t F_D \dot{x}_s dt \quad (4.7)$$

$$E_S = E_F - E_D \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.8) พลังงานที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลัก (E_S) จะมีค่าเท่ากับผลต่างของ พลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างเนื่องจากแรงภายนอก (E_F) กับพลังงานที่เกิดจากแรงที่กระทำต่อ โครงสร้างเนื่องจากระบบมวลหน่วง (E_D) ซึ่งในกรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟ ค่าผลต่างของพลังงานดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่าในกรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ทำให้พลังงานที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลัก (E_S) มีค่าน้อยกว่า ส่งผลให้โครงสร้างหลักมีการสั่นไหว น้อยกว่า ซึ่งในรูปที่ 4.18 จะแสดงพลังงานสะสมที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวของ ระบบมวลหน่วงทั้งสองระบบ



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลัก (E_s) ในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)

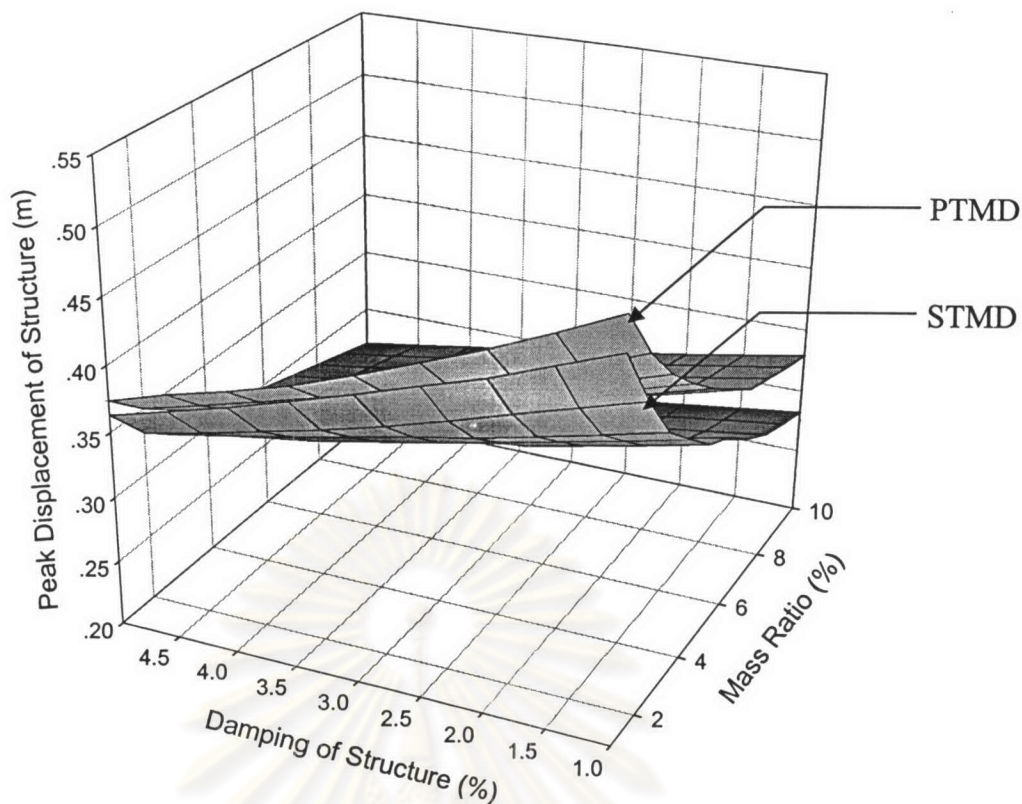
4.2 กรณีที่โครงสร้างรับแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับ 1.16 เท่า ของความถี่หลักของโครงสร้าง

เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว แรงลมที่กระทำกับอาคารนั้นมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แต่สามารถแปลงเป็นแรงฮาร์โมนิกหลาย ๆ ความถี่ได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ที่ตำแหน่งที่ประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอคทีฟเมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟมีค่าน้อย ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้แรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับ 0.186 เฮิร์ตซ์ (1.16 เท่าของความถี่หลักของโครงสร้าง) ซึ่งเป็นความถี่ในช่วงที่ประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอคทีฟเมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟมีค่าน้อยกว่าที่ความถี่ที่เท่ากับความถี่หลักของโครงสร้างอยู่มาก เพื่อทดสอบความสามารถของระบบมวลหน่วงทั้งสอง

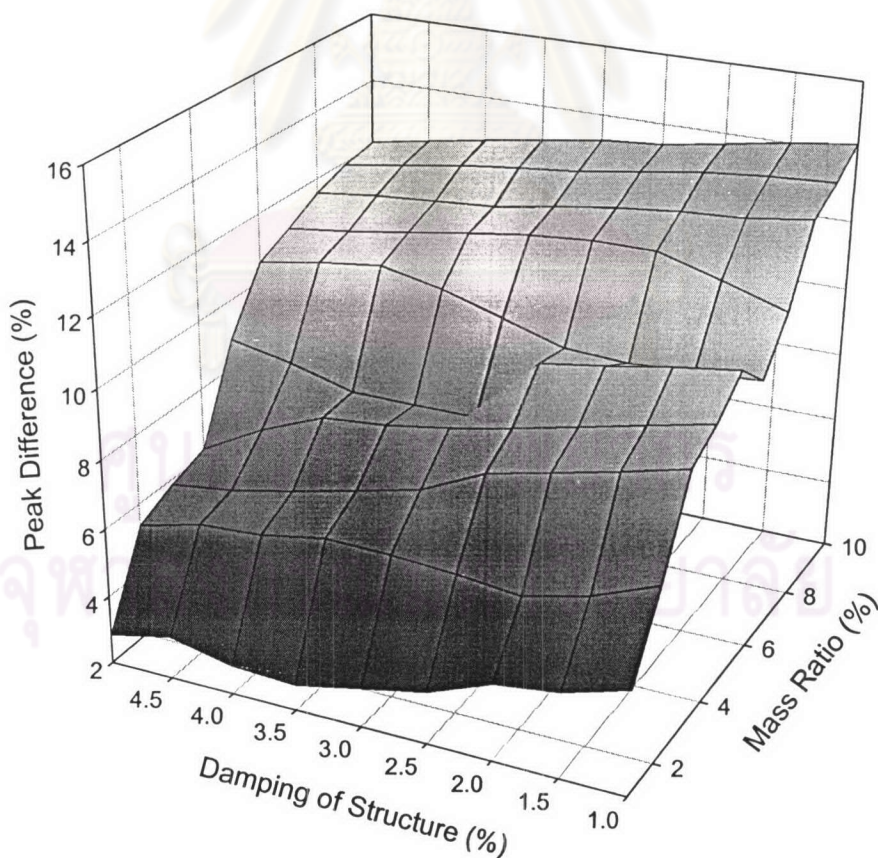
จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข สามารถนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุมทั้งสองระบบ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่เกิดขึ้น จะสามารถสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 4.19

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของทั้งสองกราฟ จะเหมือนกับในกรณีที่ได้รับแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักของโครงสร้าง แต่จะต่างกันตรงที่ความแตกต่างของประสิทธิภาพการลดการสั่นไหวของทั้งสองระบบ มีค่าลดลง โดยเห็นได้จากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับผลที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ดังรูปที่ 4.20 โดยค่าเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวคำนวณจากสมการที่ (4.3)



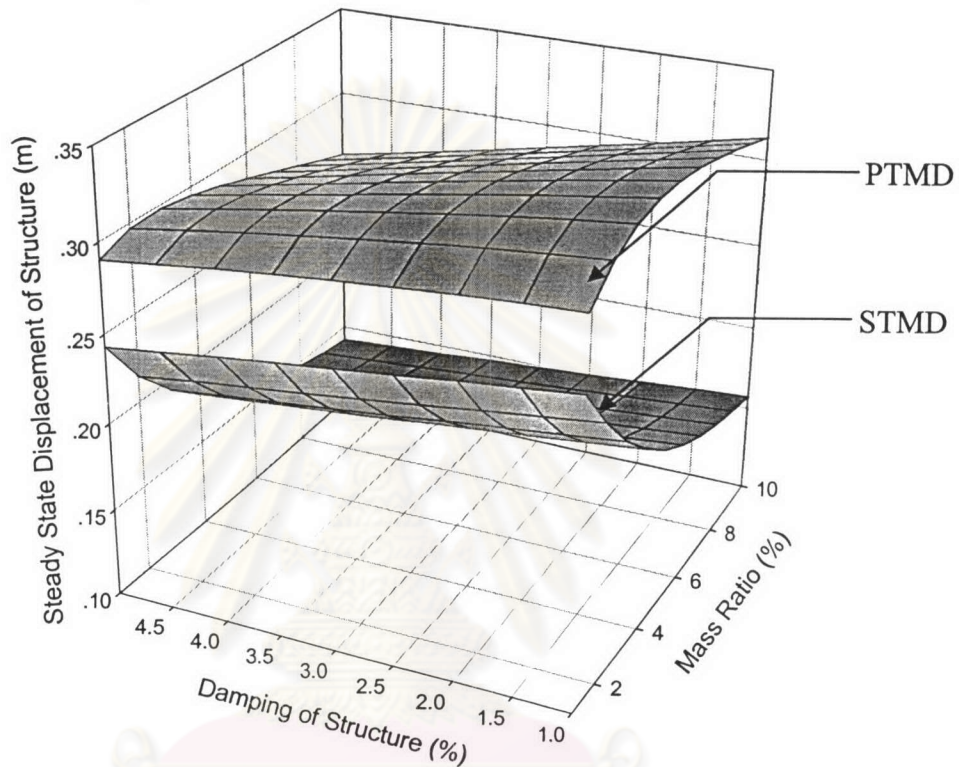
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง ($\Omega = 1.16\omega_s$)



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ($\Omega = 1.16\omega_s$)

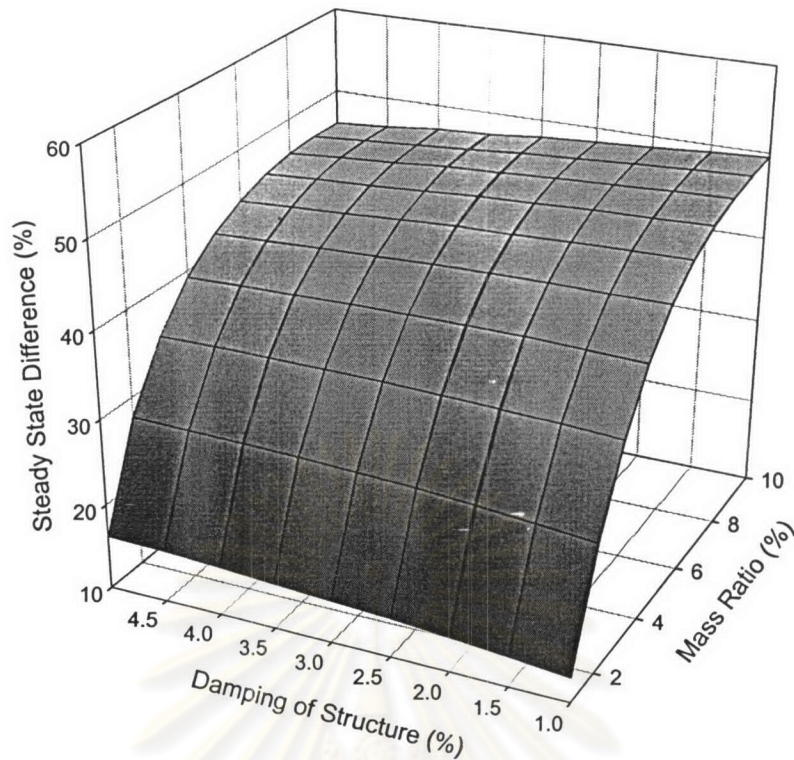
จากกราฟจะเห็นได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟสามารถลดระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างได้ประมาณ 3 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้น จะสามารถสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้าง
($\Omega = 1.16\omega_s$)

จากกราฟจะเห็นได้ว่า แม้แนวโน้มของกราฟที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟจะมีลักษณะไม่เหมือนเดิม แต่ยังมีประสิทธิภาพในการลดระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่น้อยกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟอยู่เสมอ ซึ่งเมื่อทำการสร้างกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับผลที่ได้จากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ดังรูปที่ 4.22 โดยค่าเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกับสมการที่ (4.3) ซึ่งจะพบว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟสามารถลดระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างได้ประมาณ 12 ถึง 47 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากกรณีที่โครงสร้างรับแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักของโครงสร้าง

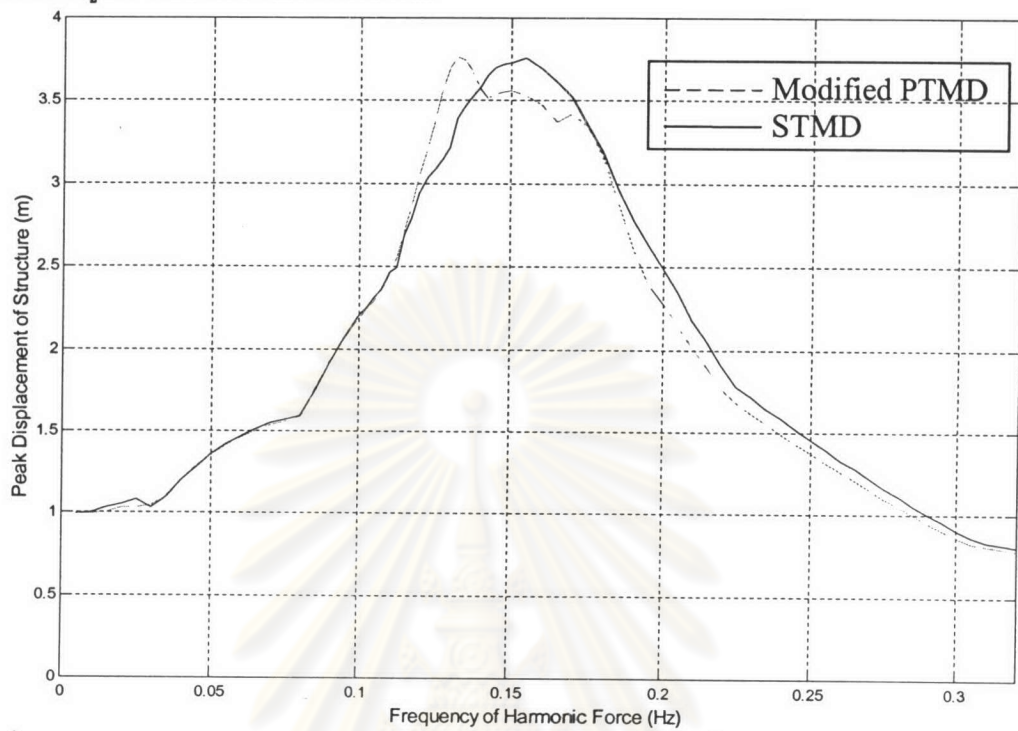


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\Omega = 1.16\omega_s$)

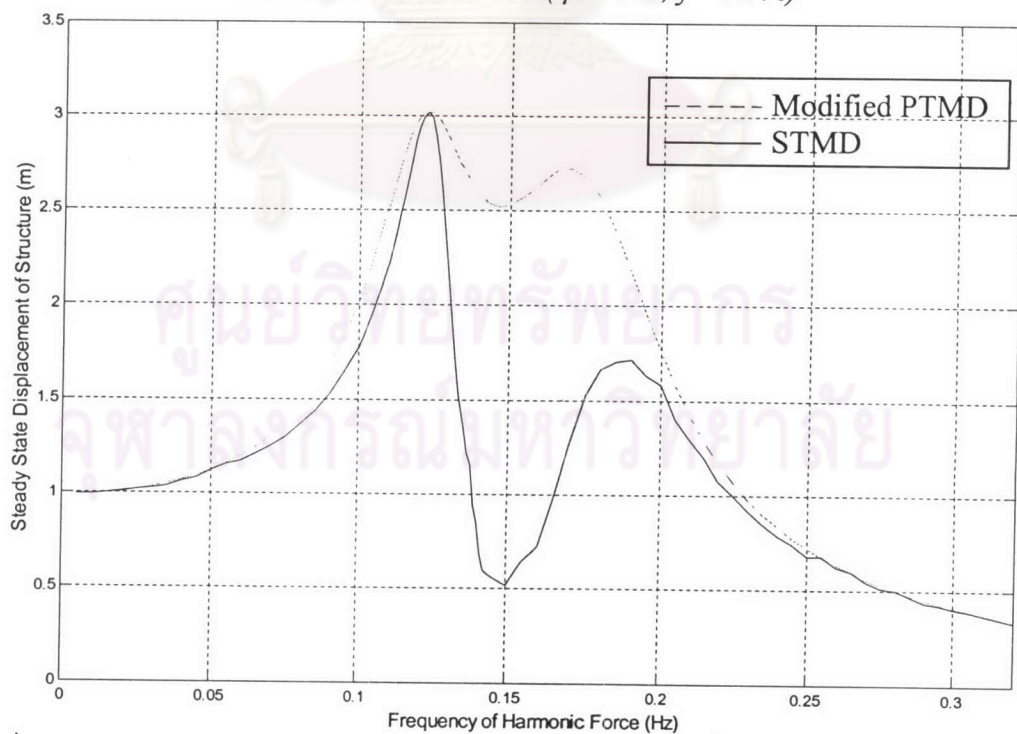
4.3 อัตราส่วนมวลเทียบเท่า

เนื่องจากการทำงานจริงการนำค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ที่ได้จากทั้งสองระบบควบคุมที่ได้นำเสนอมาแล้วข้างต้นนั้นไปใช้ทำได้ค่อนข้างยาก อีกทั้งแรงลมโดยทั่วไปที่กระทำต่ออาคารนั้นประกอบด้วยแรงฮาร์โมนิกหลาย ๆ ความถี่ ดังนั้นในที่นี้จะทำการหาค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่า (Equivalent Mass Ratio) เพื่อนำเสนอประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสองระบบ ในอีกแง่มุมหนึ่ง ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง ซึ่งสามารถหาค่าดังกล่าวโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดมวลของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ จนค่าที่มากที่สุดของทุกความถี่ที่ได้จากกราฟตัวประกอบขยายพลวัตของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากัน จำนวนเท่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมนั้นคือ อัตราส่วนมวลเทียบเท่า ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งตัวอย่างดังกล่าวเป็นการหาค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างและค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างตามลำดับ ซึ่งกราฟดังกล่าวเป็นกรณีที่ใช้ระบบมวลหน่วง(ในกรณีของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ)ที่มีค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ และใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์

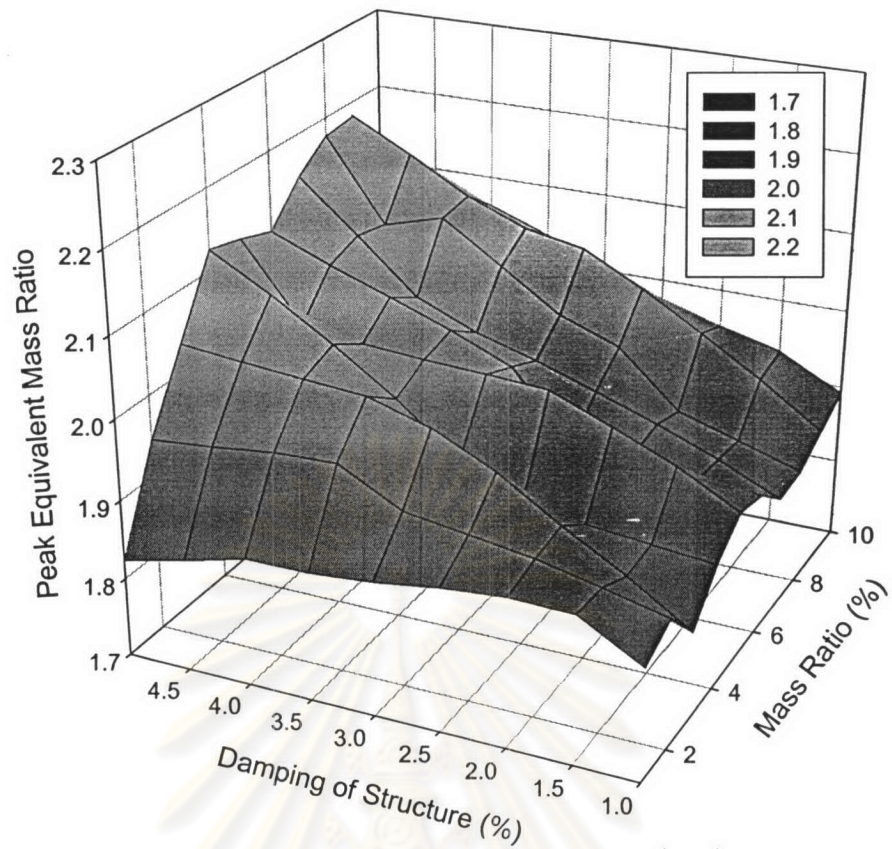
การศึกษาในส่วนนี้จะทำการหาทั้งค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระบบการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างและค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระบบการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้าง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



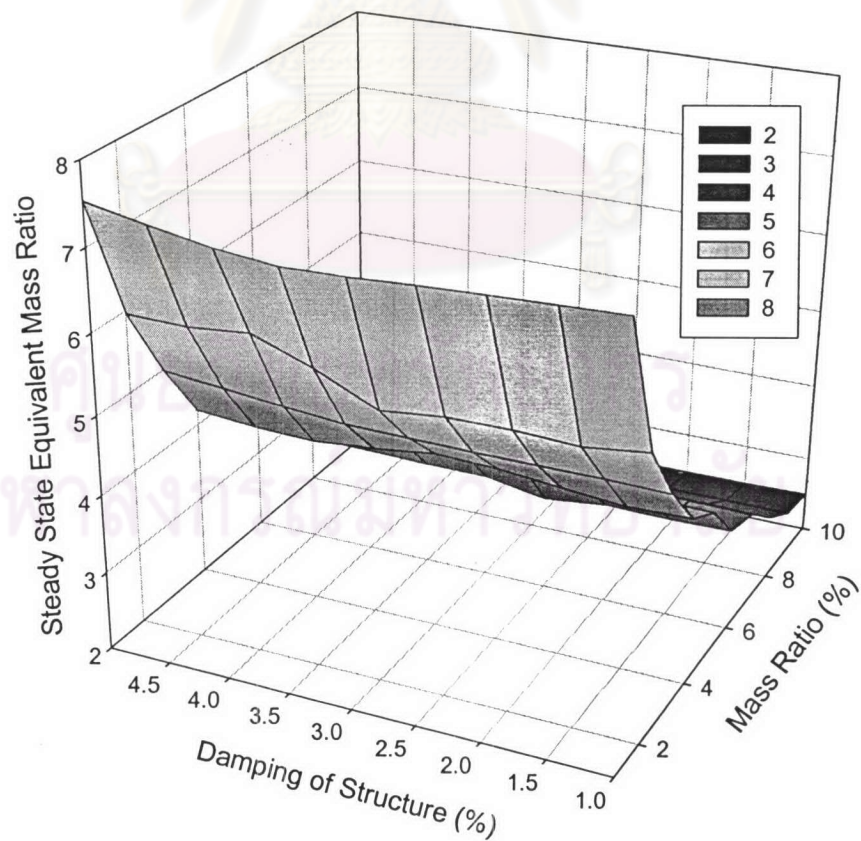
รูปที่ 4.23 กราฟตัวประกอบกระจายพลวัตของระบบการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างในการหาค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่า ($\mu = 5\%$, $\xi = 3.5\%$)



รูปที่ 4.24 กราฟตัวประกอบกระจายพลวัตของระบบการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างในการหาค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่า ($\mu = 5\%$, $\xi = 3.5\%$)



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้าง

จากกราฟ จะได้ว่า ถ้าต้องการให้ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟสามารถลดระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับระบบมวลห้วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ จะต้องใช้ขนาดของมวลห้วงที่มีขนาดอย่างน้อยประมาณ 2 เท่าของมวลเดิม แต่ถ้าต้องการให้ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟสามารถลดระยะเวลาเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับระบบมวลห้วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟนั้น จะต้องใช้ขนาดของมวลห้วงที่มีขนาดมากกว่าเดิม โดยค่าดังกล่าวนี้มีค่าอย่างน้อยประมาณ 2.4 – 7.3 เท่าของมวลเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟนั้นสามารถลดขนาดมวลห้วงได้อย่างมากเมื่อต้องการประสิทธิภาพในการลดระยะเวลาเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เท่ากันกับกรณีที่ใช้ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ซึ่งสิ่งที่กล่าวมานี้มีผลดีต่อการออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักของระบบมวลห้วงที่ทำการติดตั้งที่ชั้นบนสุดของอาคารได้ ทำให้สามารถลดขนาดของระบบโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักในแนวดิ่งได้เป็นอย่างดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย