


การควบคุมการสั่นไหวของอาคารสูงภายใต้แรงลมโดยใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟ



นายศุภลักษณ์ ตั้งจาริตสกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3569-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I2123193X

VIBRATION CONTROL OF TALL BUILDING UNDER WIND EXCITATION
USING SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPERS

Mr. Supphalak Tangchareetsakun



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3569-3

ศุภลักษณ์ ตั้งจารีตสกุล : การควบคุมการสั่นไหวของอาคารสูงภายใต้แรงลมโดยใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ. (VIBRATION CONTROL OF TALL BUILDING UNDER WIND EXCITATION USING SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPERS)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 115 หน้า, ISBN 974-17-3569-3

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟหนึ่งชุดในการลดการสั่นไหวของอาคารสูงภายใต้แรงลม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอาคารสูง 76 ชั้นติดตั้งระบบมวลหน่วงไว้ที่ชั้นบนสุดเพื่อควบคุมการสั่นไหวภายใต้แรงลมที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม ทำการวิเคราะห์การสั่นไหวแบบอิลาสติกของโครงสร้างที่จำลองเป็นแบบหลายระดับชั้นความเร็ว และใช้วิธีการลดลำดับของแบบจำลองเพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณได้อย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษานี้ศึกษาการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟเพื่อลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างต่าง ๆ กัน (1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 เปอร์เซ็นต์) เมื่อใช้ขนาดมวลหน่วงที่ต่าง ๆ กัน (อัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้างในโหมดที่ 1 อยู่ในช่วง 1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 10 เปอร์เซ็นต์) ในสภาวะที่โครงสร้างเกิดการสั่นพ้องหรือใกล้เคียง (ซึ่งเป็นกรณีที่มีปัญหาเนื่องจากโครงสร้างมีการสั่นไหวมากที่สุดเมื่อไม่มีระบบควบคุม) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสามารถลดการสั่นไหวได้ดีกว่ามวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟที่ใช้ขนาดมวลหน่วงที่เท่ากัน โดยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เทียบเท่ากับการใช้ขนาดมวลหน่วงในระบบแพสซีฟประมาณ 1.1 ถึง 4.6 เท่าของมวลเดิมเมื่อพิจารณาระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง และประมาณ 1.6 ถึง 2.8 เท่าของมวลเดิมเมื่อพิจารณาระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้าง เนื่องจากว่ามวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟนี้มีความสามารถในการปรับค่าความหน่วงให้เหมาะสมกับการสั่นไหวของโครงสร้างในขณะใด ๆ ได้ จึงทำให้การสลายพลังงานจากโครงสร้างของระบบมวลหน่วงเป็นไปอย่างเหมาะสม ส่วนในสภาวะที่โครงสร้างไม่เกิดการสั่นพ้องนั้น ประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของทั้งสองระบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีนี้เป็นกรณีที่โครงสร้างไม่มีปัญหาเนื่องจากการสั่นไหว

นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ทำการศึกษาความไวของประสิทธิภาพต่อความคลาดเคลื่อนของค่าสติเฟเนสของโครงสร้างของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ จากการศึกษาพบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าสติเฟเนสของโครงสร้างจะทำให้ประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อทำการออกแบบการควบคุมมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟโดยใช้ค่าสติเฟเนสของโครงสร้างที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพมีค่าดีขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา..... 2546.....

ลายมือชื่อนิสิต ศุภลักษณ์ ตั้งจารีตสกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา — ๕

4470572621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: SEMI-ACTIVE / WIND / TALL BUILDING

SUPPHALAK TANGCHAREETSAKUN : VIBRATION CONTROL OF TALL BUILDING UNDER WIND EXCITATION USING SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPERS. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR TOSPOL PINKAEW, D. Eng. 115 pp, ISBN 974-17-3569-3

This thesis studies the effectiveness of a semi-active tuned mass damper (STMD) for vibration suppression of a tall building under wind excitation. The vibration of a 76-story building equipped with a STMD on top against the experimentally measured wind excitation is considered. The building is assumed to be linear elastic with 76 degrees of freedom. The reduced-order method is employed to reduce the degrees of freedom of the building in order to shorten the computing time.

Through the numerical simulation, the control effectiveness of the STMD and the passive tuned mass damper (PTMD) is compared. The damping ratio of the building is varied from 1% to 5%, while the mass ratio of damper is varied from 1 % to 10 %. It is found in most cases that, the vibration reductions obtained from STMD are greater than those from PTMD. This advantage of STMD can be as much as 110%-460% and 160%-280% in term of effective mass ratio when, respectively, the peak and the root-mean-square of the building vibration are compared under wind excitation around the building's natural frequency. This effectiveness is obviously due to the ability of damping adjustment of STMD that can control the damper motion to maximize the energy dissipation of the building. The cases, where the wind excitation having dominant frequency significantly differs from that of the building, are also studied. The effectiveness of STMD and PTMD is similar, however, the vibration levels of the building, in these cases, are not considered to be problem.

Finally, the study investigates the effectiveness sensitivity of the STMD against the error of the building stiffness. The results reveal that the error of the building stiffness significantly deteriorates the effectiveness of STMD. It is observed that, the design of STMD based on slightly lower value of the building stiffness can improved the effectiveness of the damper.

Department.....CIVIL ENGINEERING.....

Concentration ..CIVIL ENGINEERING..

Academic year.....2003.....

Student's signature *Supphalak Tangchareetsakun*

Advisor's signature *Tospol Pinkaew*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดีจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นประธานของคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ อาจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์ และอาจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากบุคคลท่านต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่น้อง และ เพื่อน ๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาเป็นอย่างดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.4 ขอบเขตการวิจัย	7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	7
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	8
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบต่าง ๆ	9
2.1.1 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	9
2.1.2 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟ	13
2.1.3 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ	16
2.1.4 การคำนวณหาผลตอบสนอง	18
2.2 การลดลำดับของแบบจำลอง	19
3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวด้วยระบบมวลห้วงปรับค่า แบบต่าง ๆ และตรวจสอบความถูกต้องของการใช้วิธีการลดลำดับของ แบบจำลองกับอาคารสูง 76 ชั้น ภายใต้แรงลมที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ ลม	23
3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสียดัน ที่ทำการติดตั้งระบบมวล ห้วงปรับค่าแบบต่าง ๆ	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 76 ชั้น ที่รับแรงลม ทั้งที่มีและไม่มีกร ติดตั้งระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบแพลสตีฟ	25
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 76 ชั้น ที่รับแรงลม ทั้งที่มีและไม่มีกร ติดตั้งระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบแพลสตีฟโดยใช้การลดลำดับของ แบบจำลองและแนวทางในการติดตั้งระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบอื่น ๆ	28
4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างระหว่างการใ้ ระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบแพลสตีฟกับการใช้ระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบเคมี แอกทีฟภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิค	32
4.1 กรณีที่โครงสร้างรับแรงฮาร์โมนิคที่มีค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่หลักของ โครงสร้าง	34
4.2 กรณีที่โครงสร้างรับแรงฮาร์โมนิคที่มีค่าความถี่เท่ากับ 1.16 เท่า ของความถี่ หลักของโครงสร้าง	46
4.3 อัตราส่วนมวลเทียบเท่า	49
5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างระหว่างการใ้ ระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบแพลสตีฟกับการใช้ระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบเคมี แอกทีฟภายใต้แรงลมที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม	53
5.1 การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโครงสร้างโดยจำลองโครงสร้างเป็นแบบ ระดับชั้นความเสรีเดี่ยว	53
5.1.1 กรณีที่โครงสร้างรับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลอง ในอุโมงค์ลม	53
5.1.2 กรณีที่โครงสร้างรับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลอง ในอุโมงค์ลมที่ได้ทำการปรับค่าแล้ว	64
5.2 การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโครงสร้างโดยจำลองโครงสร้างเป็นแบบ หลายระดับชั้นความเสรี	73
5.2.1 กรณีที่โครงสร้างรับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลอง ในอุโมงค์ลม	73
5.2.2 กรณีที่โครงสร้างรับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลอง ในอุโมงค์ลมที่ได้ทำการปรับค่าแล้ว	79

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสิ้นไหวของโครงสร้างและความไวของประสิทธิภาพต่อความคลาดเคลื่อนของค่าสถิติเนสของโครงสร้างระหว่างการใช้ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟกับการใช้ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟภายใต้แรงลมที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลมที่ได้ทำการปรับค่าแล้ว	94
7 บทสรุป	101
7.1 สรุปผล	102
7.2 ข้อเสนอแนะ	104
รายการอ้างอิง	105
ภาคผนวก	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	115



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ	23
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างของวิธีการควบคุมแบบต่าง ๆ เทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุม	25
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ที่ชั้นบนสุดของอาคารสูง 76 ชั้น ที่รับแรงลม	30
ตารางที่ 5.1 ตารางค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผล	83
ตารางที่ 5.2 ตารางค่าความเร่งสูงสุดที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีต่าง ๆ	91
ตารางที่ 5.3 ตารางค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีต่าง ๆ	91
ตารางที่ ก.1 ตารางค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ที่ได้จากการใช้เมตริกซ์น้ำหนักที่ทำการออกแบบจากโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 3.5 เปอร์เซนต์เทียบกับระยะการเคลื่อนที่ที่ได้จากการใช้ค่าเมตริกซ์น้ำหนักที่ทำการออกแบบที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเอง ($\Omega = \omega_s$)	110

สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงลักษณะของระบบมวลห่น่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	3
รูปที่ 2.1	แสดงแบบจำลองของระบบมวลห่น่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	9
รูปที่ 2.2	แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้าง	10
รูปที่ 2.3	แสดงแผนภาพอิสระของมวลห่น่วง	10
รูปที่ 2.4	แสดงแบบจำลองของระบบมวลห่น่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ	13
รูปที่ 2.5	แผนผังขั้นตอนการทำงานในระบบควบคุมแบบแอกทีฟ	14
รูปที่ 2.6	แสดงแบบจำลองของระบบมวลห่น่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ	16
รูปที่ 2.7	แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้างและมวลห่น่วงในวิธีการควบคุม แบบมวลห่น่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ	17
รูปที่ 3.1	ภาพแสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นไหวของโครงสร้าง (Displacement Response) ในกรณีที่ทำกรติดตั้งระบบควบคุมแบบ ต่าง ๆ	24
รูปที่ 3.2	ภาพแปลนอาคารสูง 76 ชั้น ที่นำมาทำกรพิจารณา	26
รูปที่ 3.3	ภาพแสดงอาคารทางด้านข้างและภาพกรจำลองโดยสังเขป	27
รูปที่ 3.4	ภาพแสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นไหวของโครงสร้าง (Displacement Response) ที่ชั้นบนสุดทั้งที่มีและไม่มีการติดตั้ง ระบบมวลห่น่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	28
รูปที่ 3.5	ภาพแสดงการลดลำดับของแบบจำลองอาคารสูง	31
รูปที่ 4.1	รูปแสดงกรจำลองโครงสร้างอาคาร 76 ชั้น ให้เป็นโครงสร้างที่มีระดับ ชั้นความเสถียรเดี่ยว	33
รูปที่ 4.2	รูปแสดงแบบจำลองโครงสร้างที่ติดตั้งระบบมวลห่น่วงรับแรงกระทำที่ เป็นแบบฮาร์โมนิค	34
รูปที่ 4.3	กราฟตัวประกอบกรขยายผลวัตของโครงสร้างในช่วงคงตัวโดยใช้ เมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมกรสั่นไหวที่ต่าง ๆ กัน ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)	35
รูปที่ 4.4	กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของโครงสร้างที่ทำกรติดตั้งระบบ มวลห่น่วงปรับค่าที่ได้จากทั้งระบบแบบแพสซีฟและเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_r, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบ มวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\Omega = \omega_s$) 36
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบ มวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_s$) 37
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$) 37
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ แพสซีฟ ($\Omega = \omega_s$) 38
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ทำการติดตั้ง ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\Omega = \omega_s$) 39
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่ทำการติดตั้ง ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_s$) 39
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของ โครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$) 40
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคง ตัวของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับ ค่าแบบแพสซีฟ ($\Omega = \omega_s$) 41
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบ มวลหน่วงปรับค่าของทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s$) 42
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวสัมพัทธ์ของ ระบบมวลหน่วงปรับค่าของทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s$) 42
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงเฟสของแรงที่เกิดจากระบบมวลหน่วงเทียบกับเฟสของ ความเร็วของโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่า แบบแพสซีฟ ($\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$) 43
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงเฟสของแรงที่เกิดจากระบบมวลหน่วงเทียบกับเฟสของ ความเร็วของโครงสร้างหลักในช่วงคงตัวของระบบมวลหน่วงปรับค่า แบบเซมิแอกทีฟ ($\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$) 44

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำเนื่องจากระบบมวล หมุนและความเร็วของโครงสร้างหลัก ในช่วงคงตัวของการติดตั้ง ระบบควบคุมทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$) 44
รูปที่ 4.18	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลัก (E_s) ในช่วงคง ตัวของระบบมวลหมุนทั้งสองระบบ ($\Omega = \omega_s, \mu = 5\%, \xi = 3.5\%$) 46
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง ($\Omega = 1.16\omega_s$) 47
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหมุนปรับค่าแบบ แพลสตีฟ ($\Omega = 1.16\omega_s$) 47
รูปที่ 4.21	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของ โครงสร้าง ($\Omega = 1.16\omega_s$) 48
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคง ตัวของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหมุนปรับ ค่าแบบแพลสตีฟ ($\Omega = 1.16\omega_s$) 49
รูปที่ 4.23	กราฟตัวประกอบการขยายพลวัตของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้างในการหาค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่า ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$) 50
รูปที่ 4.24	กราฟตัวประกอบการขยายพลวัตของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัว ของโครงสร้างในการหาค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่า ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$) 50
รูปที่ 4.25	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้าง 51
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลเทียบเท่าของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคง ตัวของโครงสร้าง 51
รูปที่ 5.1	รูปแสดงแบบจำลองโครงสร้างที่ติดตั้งระบบมวลหมุนรับแรงลมโหมม แรกที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 54
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงขนาดแอมพลิจูดของความถี่ต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นแรงลมที่ ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 54

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 55
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเชมิแอกทีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 56
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 56
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ 57
รูปที่ 5.7	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 58
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 59
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเชมิแอกทีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 59
รูปที่ 5.10	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองระบบที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 60
รูปที่ 5.11	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ 61

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังเฉลี่ยของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม	62
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม	62
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยสัมพัทธ์ของระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม	63
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงขนาดแอมพลิจูดของความถี่ต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	64
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบพาสซีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	65
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	65
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	66
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบพาสซีฟ (รับแรงลมที่ปรับค่าแล้ว)	67
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	68
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบพาสซีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	68

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	69
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	69
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบแพสซีฟ (รับแรงลมที่ปรับค่าแล้ว)	70
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	71
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสัมพัทธ์ของระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	72
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังเฉลี่ยสัมพัทธ์ของระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	72
รูปที่ 5.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห่นวงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม	75
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบแพสซีฟ	75
รูปที่ 5.30 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม	76

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.31	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่รากลที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองระบบที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 77
รูปที่ 5.32	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะเวลาการเคลื่อนที่รากลที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ 78
รูปที่ 5.33	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะเวลาการเคลื่อนที่รากลที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลม 78
รูปที่ 5.34	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองระบบ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว 79
รูปที่ 5.35	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ (รับแรงลมที่ปรับค่าแล้ว) 80
รูปที่ 5.36	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะเวลาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว 81
รูปที่ 5.37	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่รากลที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองระบบที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว 81
รูปที่ 5.38	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะเวลาการเคลื่อนที่รากลที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ (รับแรงลมที่ปรับค่าแล้ว) 82
รูปที่ 5.39	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะเวลาการเคลื่อนที่รากลที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว 83

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.40 กราฟตัวประกอบการขยายพลวัตของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้าง ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)	85
รูปที่ 5.41 กราฟตัวประกอบการขยายพลวัตของระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัว ของโครงสร้าง ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)	85
รูปที่ 5.42 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลัก (E_S) ของระบบ มวลหน่วงทั้งสองระบบ ในกรณีที่ได้รับแรงลมที่ได้จากการทดลองใน อุโมงค์ลม ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)	86
รูปที่ 5.43 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่เหลืออยู่ในโครงสร้างหลัก (E_S) ของระบบ มวลหน่วงทั้งสองระบบ ในกรณีที่ได้รับแรงลมที่ได้จากการทดลองใน อุโมงค์ลมที่ทำการปรับค่าแล้ว ($\mu = 5\%, \xi = 3.5\%$)	86
รูปที่ 5.44 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ไม่ติดตั้งระบบมวล หน่วง ($\xi = 1\%$)	87
รูปที่ 5.45 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\mu = 1\%, \xi = 1\%$)	88
รูปที่ 5.46 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบเฮมิแอกทีฟ ($\mu = 1\%, \xi = 1\%$)	88
รูปที่ 5.47 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\mu = 10\%, \xi = 1\%$)	88
รูปที่ 5.48 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบเฮมิแอกทีฟ ($\mu = 10\%, \xi = 1\%$)	89
รูปที่ 5.49 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ไม่ติดตั้งระบบมวล หน่วง ($\xi = 5\%$)	89
รูปที่ 5.50 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\mu = 1\%, \xi = 5\%$)	89
รูปที่ 5.51 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบเฮมิแอกทีฟ ($\mu = 1\%, \xi = 5\%$)	90
รูปที่ 5.52 กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ ($\mu = 10\%, \xi = 5\%$)	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.53	กราฟความเร่งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างในกรณีที่ตั้งระบบมวล ห้วงปรับค่าแบบเซมิแอกทีฟ ($\mu = 10\%, \xi = 5\%$) 90
รูปที่ 5.54	กราฟแรงที่เกิดในตัวห้วงในกรณีที่ตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ เซมิแอกทีฟ ($\mu = 1\%, \xi = 1\%$) 92
รูปที่ 5.55	กราฟแรงที่เกิดในตัวห้วงในกรณีที่ตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ เซมิแอกทีฟ ($\mu = 1\%, \xi = 5\%$) 92
รูปที่ 5.56	กราฟแรงที่เกิดในตัวห้วงในกรณีที่ตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ เซมิแอกทีฟ ($\mu = 10\%, \xi = 1\%$) 92
รูปที่ 5.57	กราฟแรงที่เกิดในตัวห้วงในกรณีที่ตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ เซมิแอกทีฟ ($\mu = 10\%, \xi = 5\%$) 93
รูปที่ 6.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ทำ การติดตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าทั้งสองระบบ กับกรณีที่ไม่มีระบบ ควบคุมใด ๆ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ ลมที่ปรับค่าแล้ว 95
รูปที่ 6.2	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ แพสซีฟ (รับแรงลมที่ปรับค่าแล้ว) 96
รูปที่ 6.3	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่สูงสุด ของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ ลมที่ปรับค่าแล้ว 97
รูปที่ 6.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ โครงสร้างกับอัตราส่วนมวลประสิทธิผล 97
รูปที่ 6.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสอง เฉลี่ยของโครงสร้างที่ทำการติดตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าทั้งสองระบบ กับกรณีที่ไม่มีระบบควบคุมใด ๆ ที่รับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของ การทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว 98
รูปที่ 6.6	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่รากที่สอง ของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ได้จากทั้งสองระบบเทียบกับระบบ มวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ (รับแรงลมที่ปรับค่าแล้ว) 99

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผลของระยะการเคลื่อนที่รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโครงสร้างที่รับแรงลมที่ได้จากแฟ้มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าแล้ว	100
รูปที่ ก.1 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ที่ได้จากการใช้ค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ทำการออกแบบที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ และ 3.5 เปอร์เซนต์ ในแต่ละค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$)	107
รูปที่ ก.2 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ที่ได้จากการใช้ค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ทำการออกแบบที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ และ 3.5 เปอร์เซนต์ ในแต่ละค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$)	108
รูปที่ ก.3 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ที่ได้จากการใช้ค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ทำการออกแบบที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ และ 3.5 เปอร์เซนต์ ในแต่ละค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$)	108
รูปที่ ก.4 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ในช่วงคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ที่ได้จากการใช้ค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุมการสั่นไหวที่ทำการออกแบบที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ และ 3.5 เปอร์เซนต์ ในแต่ละค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงต่อมวลของโครงสร้าง ($\Omega = \omega_s$)	109

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข.1	กราฟแสดงค่าความแตกต่างของพลังงานในทุก ๆ ช่วงเวลา เมื่อโครงสร้างรับแรงลมที่ได้จากเพิ่มข้อมูลของการทดลองในอุโมงค์ลมของการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งสองระบบ ในกรณีทำการติดตั้งระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	114
------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย