

การพัฒนาหนังสือสไลด์ผลงานแบบวิสโคอิลาสติก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of viscoelastic wall dampers



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 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก
โดย	นายฐิติพงศ์ เจริญสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฐิติพงศ์ เจริญสุข : การพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก. ( Development of viscoelastic wall dampers) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic wall dampers) ด้วยวัสดุ Asphalt (ยางมะตอย) และ Polyisobutene (PIB) แม้ว่าในปัจจุบันมีผู้ผลิตอุปกรณ์สลายพลังงานสำหรับอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวและแรงลมจำหน่าย แต่มีราคาแพงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทั้งมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่า ส่วนใหญ่มีรูปแบบที่กระทบต่อความสวยงามด้านสถาปัตยกรรม ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกด้วยวัสดุที่มีราคาไม่แพง มีรูปแบบคล้ายผนังอาคารทั่วไปเพื่อไม่กระทบต่อความสวยงามของอาคาร โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานจากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างขนาดย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic testing) ตามมาตรฐาน ASCE 7-16 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุ PIB มีคุณสมบัติในการสลายพลังงานที่ดี และมีเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานชนิด PIB มาประมาณคุณสมบัติของผนังสลายพลังงานขนาดเท่าของจริงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายพลังงานกับผลิตภัณฑ์ผนังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous Wall Damper) ของต่างประเทศ ผลการศึกษาพบว่าผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกที่พัฒนามีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานดีกว่าผนังสลายพลังงานแบบหนืดอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถลดขนาดและจำนวนผนังสลายพลังงานที่ต้องติดตั้งในอาคารได้ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวและแรงลมที่อาจประหยัดและมีประสิทธิภาพกว่าวิธีการปกติที่นิยมเพิ่มขนาดส่วนโครงสร้างให้มีกำลังหรือสติเฟนสมมากขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270069221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Viscoelastic wall dampers, Viscoelastic materials, wind and earthquake

Titipong Charoensuk : Development of viscoelastic wall dampers. Advisor: Prof. TOSPOL PINKAEW, D.Eng.

This research objective is to develop the viscoelastic wall dampers using Asphalt and PIB (Polyisobutene). Although there are many types of dampers available for wind and earthquake loadings. They are imported items and are expensive. In addition, their costs of installation and maintenance are rather high. However, their configurations affect the building's aesthetic. The research therefore considers the possibility of developing a cost-effective wall damper. Its configuration is similar to a wall partition to minimize the effects on aesthetic. Employing the small-scaled wall damper tests under cyclic loading based on ASCE 7-16, a mathematical model of VE wall damper is derived. The obtained test results indicate that the wall damper using PIB can effectively dissipate the energy with high stability under temperature change. Then the effectiveness of a full-scaled VE wall damper is estimated and compared with those of existing commercial dampers. The comparison results reveal that the proposed VE wall damper can provide better dissipation performance than existing dampers. Consequently, the proposed wall dampers could be made smaller and cheaper. This encourages toward the real application as a building design alternative against the earthquake and wind where the installation of the wall dampers may be more effective than conventional design.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการปริญญาโทรวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำหน่วยทดสอบวัสดุโยธาที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง คณะผู้จัดทำตระหนักถึง ความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของผู้เกี่ยวข้อง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

ฐิติพงศ์ เจริญสุข



## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บรรณานุกรม.....	2
ประวัติผู้เขียน.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก.....	5
2.2 วัสดุวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic material).....	9
2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Viscoelastic dampers.....	10

2.2.1.1 Kelvin model.....	11
2.2.1.2 Maxwell model.....	12
2.2.2 Hysteresis loop.....	12
2.3 พฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานวิสโคอิลาสติก .....	14
2.4 พฤติกรรมของอาคารโครงสร้างเหล็กเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก ....	20
2.5 ผลกระทบจากค่าความถี่และอณูมิติต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์สลายพลังงาน.....	26
2.6 อุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกชนิดอื่นๆ.....	32
2.7 ตัวอย่างกรณีศึกษา .....	34
2.7.1 Columbia tower.....	34
2.7.2 Two union square .....	36
บทที่ 3 การพัฒนาและออกแบบผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก .....	39
3.1 การทดสอบเบื้องต้นของวัสดุ Asphalt.....	39
3.1.1 วิธีการทดสอบ .....	43
3.1.2 ผลการทดสอบ .....	44
3.1.3 สรุปผลการทดสอบ.....	45
3.2 ตัวผนังสลายพลังงานรูปแบบผนังสลายพลังงานวิสโคอิลาสติก .....	47
3.2.1 วิธีการทดสอบ.....	48
3.2.2 ผลการทดสอบ .....	50
3.2.3 ประสิทธิภาพการสลายพลังงาน.....	54
บทที่ 4 การจำลองอาคารตัวอย่างในโปรแกรม ETABS .....	60
4.1 แบบจำลองอาคารตัวอย่าง.....	60
4.2 แบบจำลองตัวผนังสลายพลังงาน.....	65
4.3 ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก Viscoelastic Wall Damper.....	69
4.3.1 ต้นแบบผนังสลายพลังงาน.....	69



4.3.2	แบบจำลองผนังสลายพลังงานในโปรแกรม ETABS .....	71
4.4	คลื่นแผ่นดินไหว .....	76
4.5	แรงลม .....	78
4.6	ผลการวิเคราะห์.....	81
4.6.1	การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร.....	81
4.6.2	แรงเฉือนที่ฐาน.....	88
4.6.3	การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น.....	95
4.6.4	ผลการตอบสนองจากแรงลม .....	102
4.6.5	การประเมินราคาเบื้องต้น .....	112
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย.....	113
5.1	วัสดุวิโคอิลาสติกชนิด PIB-HV .....	113
5.2	ประสิทธิภาพด้านแผ่นดินไหว .....	113
5.3	ประสิทธิภาพด้านแรงลม .....	116

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ damper ในแต่ละประเภท.....	6
ตารางที่ 2.2 แสดงความถี่และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง .....	15
ตารางที่ 2.3 แสดงค่า G1 (Storage modulus), G2 (loss modulus) และ $\eta$ (loss factor) ของยางธรรมชาติและวิสโคอีลาสติกจาก 3M.....	33
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ Asphalt เกรด AC60-70.....	39
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีแผ่นดินไหว .....	49
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีแรงลม.....	49
ตารางที่ 3.4 การสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานชนิดต่างๆ .....	59
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักบรรทุกทุกจรที่ใช้ในการออกแบบในอาคาร.....	63
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอาคาร .....	64
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของ Wall Damper ตัวอย่าง .....	65
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดการทดสอบที่ 8 และ 9 .....	65
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน .....	75
ตารางที่ 4.6 คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ในการศึกษา.....	77
ตารางที่ 4.7 รูปแบบการรวมผลแรงสำหรับตรวจสอบที่สภาวะใช้งาน.....	78
ตารางที่ 4.8 ขนาดของแรงที่อัตราส่วนความหน่วง 0.0075.....	80
ตารางที่ 4.9 ขนาดของแรงที่อัตราส่วนความหน่วง 0.025.....	107
ตารางที่ 4.10 ความเร่งสูงสุดที่ยอดของอาคารภายใต้แรงลม.....	111
ตารางที่ 4.11 ราคาวัสดุของตัวหน่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก .....	112

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างรูปแบบ viscoelastic damper .....	5
รูปที่ 2.2 Viscoelastic damper in Chaoshan Xinxhe Building.....	5
รูปที่ 2.3 รูปแบบการติดตั้งแบบ Diagonal และ Chevron .....	7
รูปที่ 2.4 รูปแบบการติดตั้งแบบ wall damper.....	7
รูปที่ 2.5 รูปแบบการติดตั้งแบบ Coupling.....	8
รูปที่ 2.6 รูปแบบการติดตั้งแบบ VE cable.....	8
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวัสดุวิสโคอีลาสติกชนิด (a) Asphalt และ (b) PIB .....	9
รูปที่ 2.8 Viscoelastic damper .....	10
รูปที่ 2.9 แบบจำลองแบบ Kelvin-voigt.....	11
รูปที่ 2.10 แบบจำลองแบบ Maxwell .....	12
รูปที่ 2.11 กราฟ hysteresis ของแรงและการเคลื่อนที่ .....	13
รูปที่ 2.12 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบจำลองขนาด 1/3.....	14
รูปที่ 2.13 รูปแบบ Viscoelastic damper ทั้งสองแบบ .....	14
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของโครงสร้าง .....	15
รูปที่ 2.15 กราฟ Story drift ของโครงสร้าง .....	15
รูปที่ 2.16 คอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ชั้น และ คอนกรีตเสริมเหล็ก 20 ชั้น.....	16
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวชั้นบนสุดของโครงสร้าง 20 ชั้น.....	17
รูปที่ 2.18 กราฟการเคลื่อนตัวชั้นบนสุดของโครงสร้าง 20 ชั้นที่สภาพดินที่ต่างกัน .....	17
รูปที่ 2.19 อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา (a) มุมมองด้านข้าง (b) มุมมองด้านบน (c) แบบจำลอง ของอาคารและตำแหน่งที่สามารถติดตั้ง viscoelastic damper.....	18
รูปที่ 2.20 กราฟการเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นบนสุดกับเวลา (a) อาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง (b) อาคารที่มีการติดตั้งตัวหน่วง.....	19

รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดในอาคารของตัว หน่วงในตำแหน่งต่างๆ (a) ตัวหน่วง 3 ตัว (b) ตัวหน่วง 4 ตัว (c) ตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพของตัว หน่วง 3 ตัว (d) ตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพของตัวหน่วง 4 ตัว.....	19
รูปที่ 2.22 a) อาคารโครงสร้างเหล็กก่อนติดตั้ง VE Dampers b) อาคารโครงสร้างเหล็กหลังติดตั้ง VE Dampers.....	20
รูปที่ 2.23 a) กราฟการเคลื่อนที่สัมบูรณ์ในแต่ละชั้นของโครงสร้าง b) กราฟการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ใน แต่ละชั้นของโครงสร้าง.....	21
รูปที่ 2.24 กราฟการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดของโครงสร้างตามประวัติเวลา .....	21
รูปที่ 2.25 โครงสร้างเหล็กขนาด 5 ชั้น.....	22
รูปที่ 2.26 ตำแหน่งอุปกรณ์ที่ติดตั้งในโครงสร้าง .....	22
รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงกับอัตราส่วน Stiffness a) VE damper ติดตั้งในชั้นที่1 b) VE damper ติดตั้งในชั้นที่ 1 และชั้นที่2.....	23
รูปที่ 2.28 กราฟผลความเร่งตอบสนองของชั้นที่ 5 ของโครงสร้าง .....	24
รูปที่ 2.29 โครงเหล็กรับแรงดัดตัวอย่าง (a) มุมมองด้านบน (b) มุมมองด้านข้าง .....	24
รูปที่ 2.30 กราฟการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดของโครงอาคารกับเวลา (a) คลื่นแผ่นดินไหว Tabas (b) คลื่นแผ่นดินไหว Hills .....	25
รูปที่ 2.31 กราฟการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแต่ละชั้นกับคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 7 คลื่น (a) ก่อนการ ปรับปรุงสมรรถนะ (b) หลังการปรับปรุงสมรรถนะ .....	25
รูปที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สลายพลังงานที่อุณหภูมิต่าง แตกต่างกัน.....	26
รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ของความถี่และอัตราส่วนความหน่วงต่ออุณหภูมิแวดล้อม .....	27
รูปที่ 2.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	28
รูปที่ 2.35 กราฟความเร่งของแต่ละชั้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	28
รูปที่ 2.36 กราฟการเคลื่อนที่และ story drift ในแต่ละชั้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.37 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของตัวหน่วงที่ใช้ยางสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ความถี่และ ขนาดการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน .....	30

รูปที่ 2.38 กราฟ Hysteresis curves ที่ขนาดการเคลื่อนที่เท่ากันด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (a) $T = 15.2^{\circ}\text{C}$ , $d = 1.0\text{mm}$ (b) $T = 24.6^{\circ}\text{C}$ , $d = 1.0\text{ mm}$ .....	31
รูปที่ 2.39 ระดับของอาคาร 15 ชั้นที่เชื่อมต่อกันด้วย VE dampers .....	32
รูปที่ 2.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดของอาคารกับประวัติเวลา ของ damper ทั้งสองแบบกับอาคารเดิม .....	33
รูปที่ 2.41 อาคาร Columbia tower .....	34
รูปที่ 2.42 Columbia tower floor plan.....	34
รูปที่ 2.43 ตำแหน่งการติดตั้ง VE dampers ในตัวอาคาร .....	35
รูปที่ 2.44 ภาพการติดตั้งจริงของตัว VE dampers ในตัวอาคาร .....	36
รูปที่ 2.45 อาคาร Two Union Square.....	36
รูปที่ 2.46 ลักษณะ VE dampers ที่ติดตั้งในอาคาร Two union square .....	37
รูปที่ 3.1 Asphalt สำเร็จรูปเกรด AC60/70.....	40
รูปที่ 3.2 มุมมองด้านบนของตัวอย่างทดสอบ (unit : cm).....	40
รูปที่ 3.3 มุมมองด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ (unit : cm).....	41
รูปที่ 3.4 โครงตัวอย่างทดสอบสำหรับการเทยางมะตอย .....	41
รูปที่ 3.5 การเทยางมะตอยอุ่นร้อนในตัวอย่างทดสอบ .....	42
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างทดสอบแช่น้ำแข็ง .....	42
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดการขจัด LVDT.....	43
รูปที่ 3.8 เครื่อง Amsler ขนาด 20 tons.....	43
รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเคลื่อนที่.....	44
รูปที่ 3.10 ยางมะตอยหลังการทดสอบด้วยเครื่อง Amsler .....	45
รูปที่ 3.11 สภาพการอ่อนเหลวของยางมะตอยเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน .....	46
รูปที่ 3.12 แบบย่อส่วนของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก (unit : cm).....	47
รูปที่ 3.13 Asphalt สำเร็จรูปเกรด AC60/70.....	48

รูปที่ 3.14	วัสดุวิสโคอีลาสติก PIB.....	48
รูปที่ 3.15	เครื่องทดสอบแบบวัฏจักรขนาด 20 ตัน (Servopulser).....	49
รูปที่ 3.16	อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ STC-1000 .....	50
รูปที่ 3.17	การควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างย่อยส่วนของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก .....	50
รูปที่ 3.18	ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 25°C.....	51
รูปที่ 3.19	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 25°C.....	51
รูปที่ 3.20	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 25°C.....	51
รูปที่ 3.21	ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงลม ที่อุณหภูมิ 25°C.....	51
รูปที่ 3.22	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงลม ที่อุณหภูมิ 25°C .....	51
รูปที่ 3.23	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงลมที่อุณหภูมิ 25°C .....	51
รูปที่ 3.24	ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 30°C.....	52
รูปที่ 3.25	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 30°C.....	52
รูปที่ 3.26	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 30°C.....	52
รูปที่ 3.27	ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงลม ที่อุณหภูมิ 30°C.....	52
รูปที่ 3.28	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงลม ที่อุณหภูมิ 30°C .....	52
รูปที่ 3.29	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงลมที่อุณหภูมิ 30°C .....	52
รูปที่ 3.30	ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 35°C.....	53
รูปที่ 3.31	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 35°C.....	53
รูปที่ 3.32	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 35°C.....	53
รูปที่ 3.33	ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงลม ที่อุณหภูมิ 35°C.....	53
รูปที่ 3.34	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงลม ที่อุณหภูมิ 35°C .....	53
รูปที่ 3.35	ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงลมที่อุณหภูมิ 35°C .....	53
รูปที่ 3.36	Storage modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของยางมะตอย .....	54
รูปที่ 3.37	Loss modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของยางมะตอย .....	54

รูปที่ 3.38 Storage modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของ PIB.....	55
รูปที่ 3.39 Loss modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของ PIB .....	55
รูปที่ 3.40 Equivalent stiffness ของผนังสลายพลังงาน.....	56
รูปที่ 3.41 Equivalent damping ของผนังสลายพลังงาน.....	56
รูปที่ 3.42 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.8 ซม.....	57
รูปที่ 3.43 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.7 ซม.....	58
รูปที่ 3.44 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 2.6 ซม.....	58
รูปที่ 4.1 แพลนอาคารชั้นฐานราก – ชั้น 1 .....	60
รูปที่ 4.2 แพลนอาคารชั้น 2 – ชั้น 9.....	60
รูปที่ 4.3 แพลนอาคารชั้น 10 – ชั้น 12, ชั้น 14 – ชั้น 40 .....	61
รูปที่ 4.4 ด้านข้างของอาคาร 1 .....	61
รูปที่ 4.5 ด้านข้างของอาคาร 2 และ 4.....	62
รูปที่ 4.6 ด้านข้างของอาคาร 3 .....	63
รูปที่ 4.7 แบบจำลองของอาคารตัวอย่างในโปรแกรม ETABS .....	64
รูปที่ 4.8 แบบจำลอง Exponential Maxwell .....	65
รูปที่ 4.9 แบบจำลองชิ้นส่วนสลายพลังงาน.....	66
รูปที่ 4.10 การระบุพฤติกรรมในแต่ละแกนของชิ้นส่วน NLLINK.....	66
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วน NLLINK.....	67
รูปที่ 4.12 กราฟประวัติเวลาที่ใช้การกำหนดความถี่ในการทดสอบ .....	67
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ขนาด 1.27 ซม. ของการทดสอบที่ 8 ..	68
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ขนาด 2.54 ซม. ของการทดสอบที่ 9 ..	69
รูปที่ 4.15 มุมมองสามมิติของ Viscoelastic wall damper .....	70
รูปที่ 4.16 มุมมองด้านข้างของ Viscoelastic wall damper .....	70
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งที่ติด Viscoelastic damper.....	71

รูปที่ 4.18 ตำแหน่งที่ติด Viscoelastic damper ในแบบจำลอง .....	71
รูปที่ 4.19 พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วน NLLINK ของ HV-Damper .....	73
รูปที่ 4.20 แบบจำลอง HV-Viscoelastic damper ในโปรแกรม ETABS .....	74
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ชุดที่ 1.....	76
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ชุดที่ 2.....	77
รูปที่ 4.23 การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ .....	79
รูปที่ 4.24 รูปแบบการกำหนดทิศทางลมในอุโมงค์ลม .....	79
รูปที่ 4.25 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5_12.....	81
รูปที่ 4.26 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5_78.....	82
รูปที่ 4.27 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0_12.....	82
รูปที่ 4.28 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0_78.....	83
รูปที่ 4.29 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5_12.....	83
รูปที่ 4.30 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5_34.....	84
รูปที่ 4.31 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_12.....	84
รูปที่ 4.32 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_34.....	85
รูปที่ 4.33 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_56.....	85
รูปที่ 4.34 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_12.....	86
รูปที่ 4.35 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_34.....	86
รูปที่ 4.36 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_78.....	87
รูปที่ 4.37 กราฟ Hysteresis loop ของตัวห่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกที่ตำแหน่งสูงสุด	87
รูปที่ 4.38 กราฟ Hysteresis loop ของตัวห่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกที่ตำแหน่งล่างสุด	88
.....	88
รูปที่ 4.39 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5_12.....	89
รูปที่ 4.40 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5_78.....	89



รูปที่ 4.41 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0_12.....	90
รูปที่ 4.42 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0_78.....	90
รูปที่ 4.43 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5_12.....	91
รูปที่ 4.44 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5_34.....	91
รูปที่ 4.45 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_12.....	92
รูปที่ 4.46 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_34.....	92
รูปที่ 4.47 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_56.....	93
รูปที่ 4.48 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_12.....	93
รูปที่ 4.49 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_34.....	94
รูปที่ 4.50 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_78.....	94
รูปที่ 4.51 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5_12.....	95
รูปที่ 4.52 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5_78.....	96
รูปที่ 4.53 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0_12.....	96
รูปที่ 4.54 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0_78.....	97
รูปที่ 4.55 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5_12.....	97
รูปที่ 4.56 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5_34.....	98
รูปที่ 4.57 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_12.....	98
รูปที่ 4.58 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_34.....	99
รูปที่ 4.59 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0_56.....	99
รูปที่ 4.60 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_12.....	100
รูปที่ 4.61 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_34.....	100
รูปที่ 4.62 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0_78.....	101
รูปที่ 4.63 การตั้งค่า Damping ratio ของโปรแกรม ETABS.....	102

รูปที่ 4.64 กราฟ Hysteresis loop เปรียบเทียบระหว่าง Linear และ Maxwell link ที่ 2.55 ซม. .....	103
รูปที่ 4.65 กราฟ Hysteresis loop เปรียบเทียบระหว่าง Linear และ Maxwell link ที่ 3.13 ซม. .....	103
รูปที่ 4.66 กราฟ Hysteresis loop เปรียบเทียบระหว่าง Linear และ Maxwell link ที่ 3.61 ซม. .....	104
รูปที่ 4.67 ผลการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ที่ Steady state เมื่อเกิดการ Resonance ของอาคาร. 105	
รูปที่ 4.68 การเคลื่อนที่ ณ Steady state ที่ความถี่ของแรงที่กระทำต่างๆ.....	105
รูปที่ 4.69 การเคลื่อนที่ ณ Steady state ที่ความถี่ของแรงที่กระทำต่างๆ.....	106
รูปที่ 4.70 กราฟเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางแกน Y.....	108
รูปที่ 4.71 การเคลื่อนที่ที่ยอดของอาคารกรณีแรงลม 3 .....	109
รูปที่ 4.72 การเคลื่อนที่ที่ยอดของอาคารกรณีแรงลม 4 .....	109
รูปที่ 4.73 การเคลื่อนที่ที่ยอดของอาคารกรณีแรงลม 8 .....	110
รูปที่ 4.74 การเคลื่อนที่ที่ยอดของอาคารกรณีแรงลม 9 .....	110
รูปที่ 4.75 การเคลื่อนที่ที่ยอดของอาคารกรณีแรงลม 10 .....	111
รูปที่ 4.76 กราฟเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยของผนังสลายพลังงาน .....	112
รูปที่ 5.1 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารสูงสุดที่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ .....	114
รูปที่ 5.2 แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดที่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ.....	114
รูปที่ 5.3 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ .....	114
รูปที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น .....	115



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บรรณานุกรม

- CHANG, K. C., SOONG, T. T., OH, S.-T. & LAI, M. L. 1991. Seismic Response of a 2-5 Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers. Buffalo: State University of New York at buffalo.
- CHANG, K. C., SOONG, T. T., OH, S.-T. & LAI, M. L. 1992. Effect of Ambient Temperature on Viscoelastically damped structure. *Journal of Structural Engineering*, 118, 1955-1973.
- DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS 2017. Viscous Wall Damper Modelling Guide. Nevada: Button Engineering.
- KRAIRI, A. & DOGHRI, I. 2014. A thermodynamically-based constitutive model for thermoplastic polymers coupling viscoelasticity, viscoplasticity and ductile damage. *International Journal of Plasticity*, 60, 163-181.
- LAGO, A., TRABUCCO, D. & WOOD, A. 2019. *Damping Technologies for Tall Buildings*. Amsterdam: Elsevier.
- LEE, D.-G., HONG, S. & KIM, J. 2002. Efficient seismic analysis of building structures with added viscoelastic dampers. *Engineering Structures*, 24, 1217-1227.
- LU, X., ZHOU, Y. & YAN, F. 2008. Shaking table test and numerical analysis of RC Frames with Viscous wall dampers. *Journal of Structural Engineering*, 134, 64-76.
- MIN, K.-W., KIM, J. & LEE, S.-H. 2004. Vibration tests of 5-storey steel frame with viscoelastic dampers. *Engineering Structures*, 26, 831-839.
- NASAB, M. S. E. & KIM, J. 2020. Seismic Retrofit of Structures Using Hybrid Steel Slit-Viscoelastic Dampers. *Journal of Structural Engineering*, 146.
- PATIL, M. B., RAMAKRISHNA, U. & MOHAN, S. C. 2020. Multi-objective optimisation of damper placement for improved seismic response in dynamically similar adjacent buildings. *Sādhanā*, 45.
- RAMAKRISHNA, U. & MOHAN, S. C. 2020. Performance of low-cost viscoelastic damper for coupling adjacent structures subjected dynamic loads. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1024-1029.
- SHEN, K. L., SOONG, T. T., CHANG, K. C. & LAI, M. L. 1995. Seismic behaviour of

- reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers. *Engineering Structures*, 17, 327-380.
- TEZCAN, S. S. & ULUCA, O. 2003. Reduction of earthquake response of plane frame buildings by viscoelastic dampers. *Engineering Structures*, 25, 1755-1761.
- XU, Q. & SOLAIMANIAN, M. 2009. Modelling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet–Sayegh model. *International Journal of Pavement Engineering*, 10, 401-422.
- XU, Z.-D., GE, T. & LIU, J. 2020. Experimental and Theoretical Study of High-Energy Dissipation-Viscoelastic Dampers Based on Acrylate-Rubber Matrix. *Journal of Engineering Mechanics*, 146.
- XU, Z.-D., WANG, D.-X. & SHI, C.-F. 2010. Model, tests and application design for viscoelastic dampers. *Journal of Vibration and Control*, 17, 1359-1370.
- ZHANG, R.-H. & SOONG, T. T. 1989. Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 18, 389-396.
- ปิยวรรณ สุรัญชานาจิรสกุล 2005. สมบัติทางกลแบบพลวัตของโพลีเมอร์,. *Polymer Science Oct-Dec*, 62-64.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ฐิติพงศ์ เจริญสุข
วัน เดือน ปี เกิด	02 สิงหาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วศ.บ (2562-2564) คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	10/1 ซ.ประชาอุทิศ 17 แยก4/1 เขต ราชวัชรบุรณะ กรุงเทพฯ 10140



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

แรงแผ่นดินไหวและแรงลมเป็นแรงด้านข้างที่มีผลต่อการออกแบบระบบโครงสร้างอาคาร อาคารที่มีความสูงหรือความขรุขระมาก มักพบกับความยากลำบากในการออกแบบโครงสร้างเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการโก่งตัวทางด้านข้าง ณ ยอดอาคารไม่เกิน 1/500 ของความสูงอาคารตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ในกรณีของแรงลม ซึ่งหากอาคารใดมีค่าการโก่งตัวเกินเกณฑ์ วิศวกรผู้ออกแบบต้องหาทางเพิ่มสติฟเนสให้กับองค์อาคาร โดยเฉพาะส่วนโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน เพราะมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มสติฟเนสโดยรวมของอาคาร แต่การขยายขนาดผนังรับแรงเฉือนหรือเพิ่มจำนวนนอกจะเป็นการเพิ่มต้นทุนค่าก่อสร้างแล้ว บางกรณีอาจติดปัญหาด้านสถาปัตยกรรมหรือกระทบการใช้สอยอาคาร สำหรับแรงแผ่นดินไหวนั้น แม้ว่าอาคารสูงจะมีการสั่นไหวธรรมชาติยาวขึ้นจนทำให้สัดส่วนของแรงแผ่นดินไหวเทียบกับแรงลมลดลง แต่หลายกรณีพบว่าอาคารมีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นเกินเกณฑ์มาตรฐาน และโมเมนต์ที่ใช้ออกแบบเหล็กเสริมในเสาอาคาร มักเป็นผลมาจากแรงแผ่นดินไหวเป็นหลัก อีกทั้งโครงสร้างอาคารทั้งหลายยังต้องออกแบบให้ได้ระดับความเหนียวตามกำหนดในมาตรฐาน มยผ. 1301.1302-61 ด้วย

เทคโนโลยีหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมและแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารสูงในต่างประเทศ คือ การติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานสำหรับอาคารเพื่อลดผลกระทบจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหว แม้ตัวอุปกรณ์มีราคาแพงแต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนค่าก่อสร้างโดยรวมแล้ว หลายกรณีพบว่ามีความคุ้มค่าและได้เปรียบกว่าการเพิ่มขนาดส่วนโครงสร้างหรือการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามแนวทางการออกแบบปกติ ดังจะเห็นได้จากอาคารสูงและอาคารสำคัญในต่างประเทศจำนวนมากที่เลือกติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้

สำหรับอาคารสูงในประเทศไทย แม้ปัจจุบันจะมีบางโครงการมีแผนจะติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงลมและแรงแผ่นดินไหว แต่อาคารสูงส่วนใหญ่ยังคงใช้นิยมแนวทางการออกแบบปกติ โดยพบว่าอุปกรณ์ที่สำคัญคือราคาของอุปกรณ์เหล่านี้ที่ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ต้นทุนค่าก่อสร้างโดยรวมของอาคารที่ติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานไม่ได้เปรียบเหมือนในต่างประเทศ

งานวิจัยนี้จะพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic wall dampers) เพื่อใช้ในอาคารสูง เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์สลายพลังงานชนิด

อื่นๆ ทั้งมีความสะดวกในการติดตั้งในอาคาร และเป็นรูปแบบที่ไม่กระทบต่อความสวยงามหรือการใช้สอยอาคารมากนัก โดยการพัฒนาที่มีเป้าหมายเพื่อให้ได้ต้นแบบผนังสลายพลังงานที่มีประสิทธิภาพไม่ด้อยกว่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศและราคาไม่แพง

## 1.2 ปัญหา.

อุปกรณ์สลายพลังงานประเภท Viscoelastic damper นั้นเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวและความเร่งของตัวอาคาร โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนพลังงานกลจากแผ่นดินไหวมาเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก ที่มีความสามารถในการสลายพลังงานที่สูง มีผลทำให้อาคารมีคุณสมบัติด้านการสลายพลังงานโดยรวมเพิ่มมากขึ้น

ในอดีตผนังสลายพลังงานมักใช้วัสดุประเภทของเหลวหนืด (Viscous fluid) เป็นตัวดูดซับพลังงาน เพราะสามารถผลิตได้ง่ายกว่าวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก แม้วัสดุวิสโคอิลาสติกจะมีประสิทธิภาพสูงในการสลายพลังงานมากกว่า แต่อาจจะมีผลต่อการเพิ่มแรงภายในระบบโครงสร้าง นอกจากนั้นคุณสมบัติของวัสดุวิสโคอิลาสติกเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อมได้ง่าย เช่น อุณหภูมิ และความถี่ของแรง การออกแบบติดตั้งจึงยุ่งยากซับซ้อนกว่า ประกอบกับวัสดุวิสโคอิลาสติกที่นิยมใช้ในต่างประเทศ เช่น ผลิตภัณฑ์ Viscoelastic Damping Polymers ของบริษัท 3M ก็หาซื้อได้ยากและมีราคาแพง

วิทยานิพนธ์นี้ จึงพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนา Viscoelastic wall damper ด้วยวัสดุที่มีราคาไม่แพง และไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาบ่อย โดยพิจารณาเลือกศึกษาและทำการทดสอบวัสดุวิสโคอิลาสติก 2 ชนิดคือ ยางมะตอยเกรด AC60/70 และ Polyisobutene (PIB) ซึ่งสำหรับ PIB จะทำการทดสอบวัสดุที่ค่าความหนืดต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ ชนิดความหนืดสูง (PIB-HV) และชนิดความหนืดปานกลาง (PIB-MV)

ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างขนาดย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ จะถูกนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายพฤติกรรมของวัสดุทั้งสองชนิดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร แล้วจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาคาดการณ์พฤติกรรมการสลายพลังงานในกรณีผนังสลายพลังงานขนาดเท่าจริง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายพลังงานกับผลิตภัณฑ์ผนังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous Wall Damper) ที่มีจำหน่ายในประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสลายพลังงานของ Viscoelastic wall damper
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติกชนิด Asphalt และ Polyisobutylene (PIB)
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกในการลดความเสียหายและ เพิ่มกำลังต้านทานแผ่นดินไหวเมื่อนำไปติดตั้งในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. พิจารณากรณีศึกษาของอาคารสูงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 41 ชั้น
2. พิจารณาแรงต้านข้างที่กระทำเฉพาะในทิศทางแนวราบของผนังสลายพลังงานเท่านั้น
3. พิจารณาพฤติกรรมไม่เชิงเส้นเฉพาะในส่วนโครงสร้างเสาของอาคาร
4. ไม่พิจารณาผลของแรงกระทำนอกระนาบของผนัง

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกชนิด Asphalt และ PIB จากการทดสอบจริง
2. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงต้านข้างเมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก เปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการติดตั้งผนังสลายพลังงาน
3. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกเปรียบเทียบกับแบบหนืด
4. เพื่อเป็นทางเลือกในการลดความเสียหายของอาคารจากการได้รับแรงต้านข้าง ด้วยผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก
5. เพื่อนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ

## 1.6 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

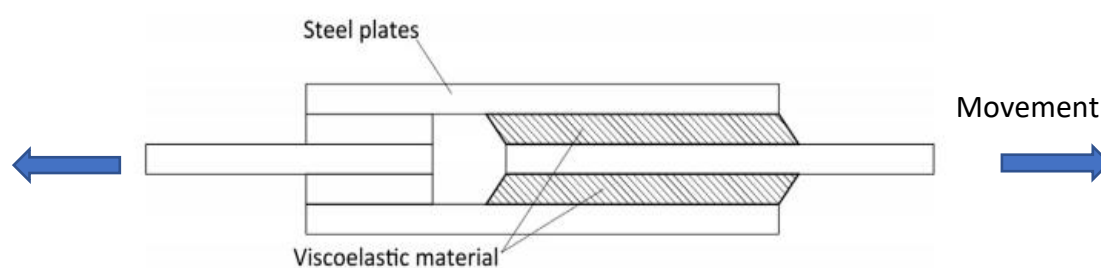
1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับ viscoelastic damper
2. ศึกษาและจำลองอุปกรณ์สลายพลังงานในโปรแกรม ETABS
3. สร้างแบบจำลองอาคารสูงตัวอย่าง ที่ติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงาน และไม่ติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานในโปรแกรม ETABS
4. ทำการพัฒนาและออกแบบผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก
5. ทำการทดสอบต้นแบบของผนังสลายพลังงานย่อส่วน (small-scaled prototype) ที่ใช้ Asphalt หรือ PIB เป็นวัสดุวิสโคอิลาสติกในห้องปฏิบัติการ
6. วิเคราะห์แบบจำลองอาคารสูงด้วยคลื่นแผ่นดินไหวโดยใช้วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น
7. ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรม และประสิทธิภาพของอาคารตัวอย่างที่มีการติดตั้งผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก
8. สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก

อุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic dampers) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย วัสดุวิสโคอีลาสติก (VE material) ที่ถูกเชื่อมประกบกับแผ่นเหล็ก ถูกติดตั้งเพื่อรับแรงทางด้านข้างของโครงสร้าง เพื่อให้วัสดุวิสโคอีลาสติกที่บรรจุภายในตัวอุปกรณ์มีลักษณะการรับแรงแบบเฉือนและสามารถสลายพลังงานได้



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างรูปแบบ viscoelastic damper

(Lago et al., 2019)

วัสดุวิสโคอีลาสติกที่นิยมใช้ในการก่อสร้างเป็น VE material ที่ผลิตโดยบริษัท 3M โดยถูกใช้เพื่อเป็นอุปกรณ์สลายพลังงานครั้งแรกในอาคารในปี 1969 และถูกใช้เพื่อบรรเทาผลกระทบจากแผ่นดินไหวและแรงลมต่ออาคารมากกว่า 250 อาคารอาทิเช่น ตึก Twin tower ของ world trade center ใน New York และ Columbia SeaFirst Building ใน Seattle, Washington แต่ในประเทศไทยยังไม่พบการเลือกใช้อุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกนี้เพื่อติดตั้งในอาคารสูง



รูปที่ 2.2 Viscoelastic damper in Chaoshan Xinhe Building.

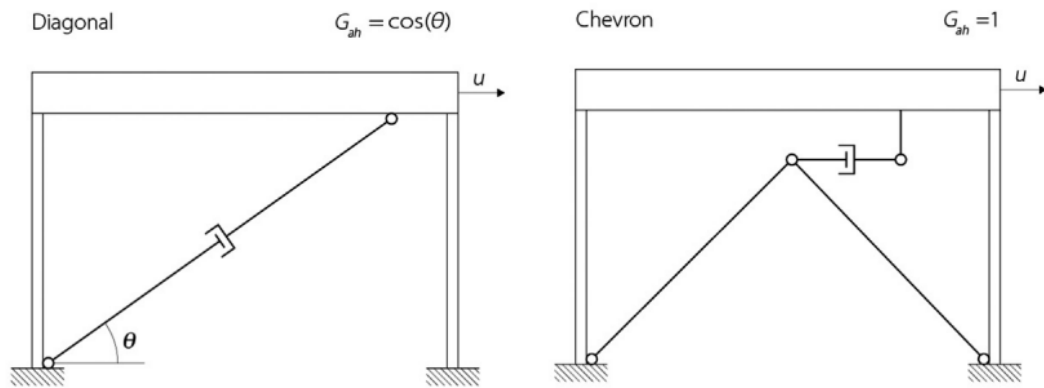
(Lago et al., 2019)

การติดตั้ง Viscoelastic damper จะติดตั้งในบริเวณที่มีการเคลื่อนที่สูงของโครงสร้างซึ่ง  
ลักษณะการติดตั้งมีหลายแบบ แต่ละรูปแบบก็มีข้อเสียและข้อดีที่แตกต่างกันดังตาราง

**ตารางที่ 2.1** แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ damper ในแต่ละประเภท

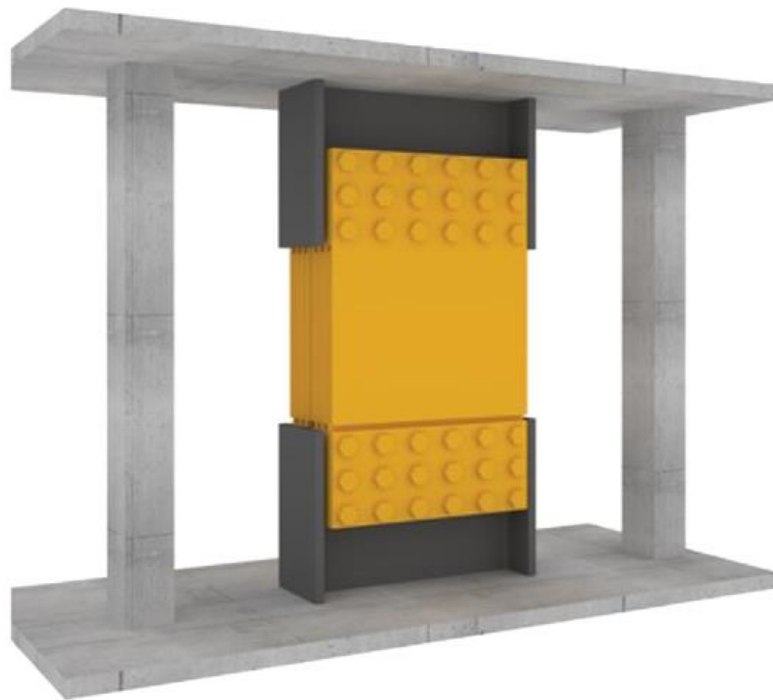
รูปแบบการติดตั้ง	ข้อดี	ข้อเสีย
Diagonal	- ขนาดเล็กสามารถติดตั้งได้ หลายตำแหน่ง กระจายตัว ตาม ความสูงของโครงสร้าง	- การเคลื่อนที่ของ damper ถูก จำกัดลง ทำให้ประสิทธิภาพ ลดลง - ใช้พื้นที่ในการติดตั้ง ไม่สวยงาม
Chevron	- ได้รับผลจากการเคลื่อนที่ ต้านข้างของโครงสร้างโดยตรง	- ประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีการ เคลื่อนที่ที่น้อย - ใช้พื้นที่ในการติดตั้ง ไม่สวยงาม
Existing wall dampers	- ได้รับผลของแรงเฉือนจากการ เคลื่อนที่ต้านข้างของโครงสร้าง โดยตรง - มีองค์ประกอบที่เรียบง่ายกว่า แบบ Diagonal	- ใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่มาก - ไม่สวยงาม
Coupling dampers	- เหมาะสมกับอาคารสูงเนื่องจาก มีการเคลื่อนตัวจากแรงดัดที่สูง - สลายพลังงานได้ดีต่อแรง แผ่นดินไหว - ใช้พื้นที่น้อย	- ไม่เหมาะสมการอาคารเดี่ยว เนื่องจาก มีแต่การเคลื่อนที่แบบ เฉือนเป็นหลัก - จำเป็นต้องติดตั้งกับ Shear wall
VE damper with cable	- ลดขนาดของ damper ได้อย่าง มีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปแบบอื่น	- มีปัญหาความล้าเนื่องจากแรง ดึงในเส้นลวด

ซึ่งในการศึกษานี้จะพัฒนาปรับปรุงรูปแบบของ Existing wall damper ให้มีรูปแบบที่  
กลมกลืนกับผนังอาคารทั่วไป เพื่อให้เกิดความสวยงามและมีประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหว  
กว่ารูปแบบเดิม



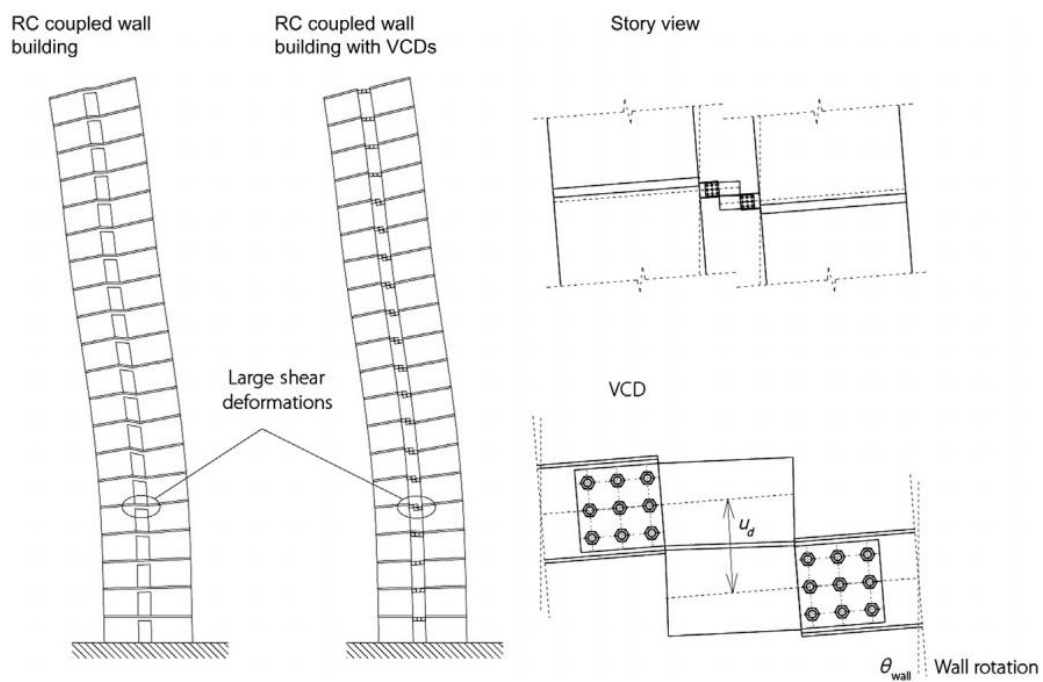
รูปที่ 2.3 รูปแบบการติดตั้งแบบ Diagonal และ Chevron

(Lago et al., 2019)

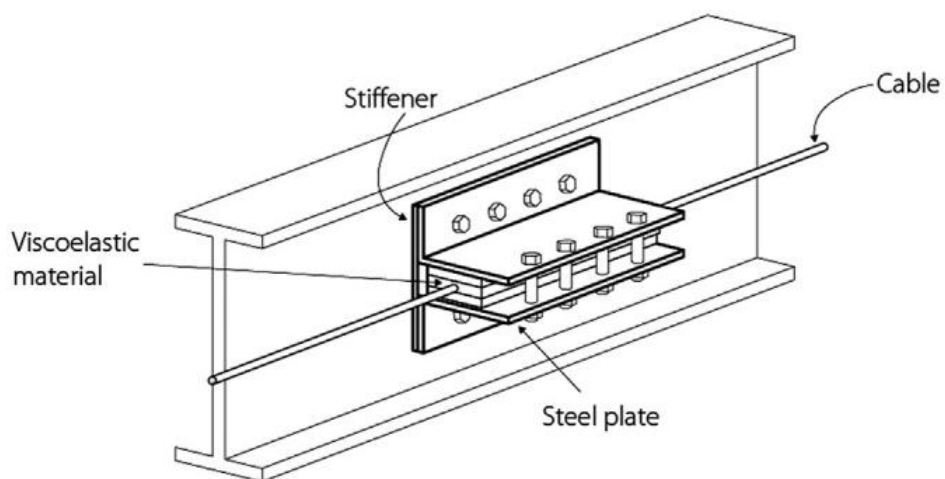


รูปที่ 2.4 รูปแบบการติดตั้งแบบ wall damper

(Lago et al., 2019)



รูปที่ 2.5 รูปแบบการติดตั้งแบบ Coupling  
(Lago et al., 2019)



รูปที่ 2.6 รูปแบบการติดตั้งแบบ VE cable  
(Lago et al., 2019)



## 2.2 วัสดุวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic material)

ปิยวรรณ สุรัญชาจรัสกุล (2005) กล่าวว่า VE material หรือวัสดุที่มีลักษณะแบบหน่วงหนืดจะมีสถานะเป็นเป็นกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว พฤติกรรมของวัสดุนี้เป็นการรวมเอาคุณสมบัติของแข็งและของเหลวไว้ด้วยกัน โดยของแข็งจะอธิบายได้จากทฤษฎียืดหยุ่น (Elasticity) โดยเป็นส่วนโดยตรงระหว่างความเค้นและความเครียดดั่งสมการ

$$\sigma_s = E\varepsilon_s \quad (1)$$

โดย  $\sigma_s$  คือความเค้นในสปริง

$\varepsilon_s$  คือความเครียดในสปริง

E คือค่า Young's modulus

ส่วนของไหลสามารถอธิบายโดยทฤษฎีการหน่วงหนืด (Viscosity) โดยเป็นส่วนโดยตรงระหว่างความเค้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเทียบกับเวลา

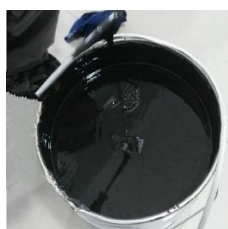
$$\sigma_D = \eta \dot{\varepsilon}_D \quad (2)$$

โดย  $\sigma_D$  คือความเค้นในตัวหน่วง

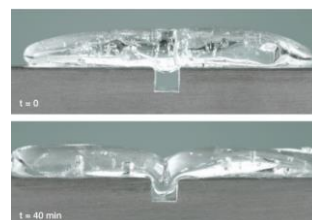
$\dot{\varepsilon}_D$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดในตัวหน่วงเทียบกับเวลา

$\eta$  คือค่าความหนืด

เนื่องจากวัสดุ viscoelastic นี้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทั้งแบบยืดหยุ่นและส่วนที่ไหลได้ ค่าโมดูลัสเชิงซ้อนที่วัดออกมาได้นั้นจึงเป็นค่าโมดูลัสทั้งสองส่วน นั่นคือค่าโมดูลัสจริงเป็นค่าความสามารถในการเก็บพลังงาน (Storage modulus) และค่าโมดูลัสจินตภาพ (loss modulus) ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการกระจายแรงหรือความสามารถในการเปลี่ยนแรงที่มากกระทำเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นกับตัวแปรหลายอย่างได้แก่ เวลา อุณหภูมิ โครงสร้างภายใน ความถี่แรงกระทำ ขนาดการเคลื่อนที่ ความเร็ว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างวัสดุเหล่านี้ได้แก่ Polymer ยางมะตอย PIB ฯลฯ



(a)



(b)

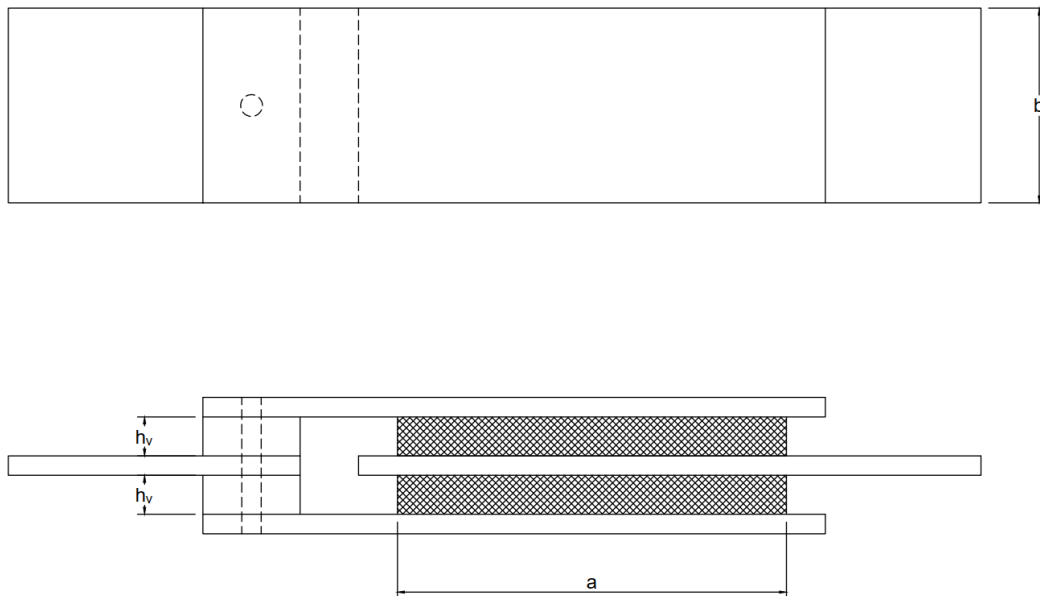
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวัสดุวิสโคอีลาสติกชนิด (a) Asphalt และ (b) PIB

### 2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Viscoelastic dampers

Viscoelastic damper ตามภาพที่ 2.8 ประกอบจากวัสดุวิสโคอีลาสติก 2 ชั้นที่ประกบด้วยแผ่นเหล็กจำนวน 3 แผ่น ซึ่งเมื่อถูกติดตั้งในโครงสร้างแล้ว แรงที่เกิดจาก Viscoelastic dampers เป็นไปตามสมการ

$$F_d = c_d \dot{u} + k_d u \quad (3)$$

โดยที่	$F_d$	คือ แรงที่เกิดจาก VE dampers
	$C_d$	คือ ค่าความหน่วงเทียบเท่า (damping)
	$K_d$	คือ ค่าสติฟเนสเทียบเท่า (stiffness)
	$u$	คือ การเคลื่อนที่ระหว่างแผ่นเหล็ก (displacement)
	$\dot{u}$	คือ ความเร็วระหว่างแผ่นเหล็ก (velocity)



รูปที่ 2.8 Viscoelastic damper

ซึ่งค่าความหน่วงเทียบเท่าและค่าสติฟเนสเทียบเท่า ( $k_d, c_d$ ) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k_d = \frac{n_v G_1 A_v}{h_v} \quad (4)$$

$$c_d = \frac{n_v G_1 \eta A_v}{\omega h_v} \quad (5)$$

โดยที่  $\eta$  คือ ตัวแปรการสูญเสีย (loss factor,  $G_2/G_1$ )

$G_1$  คือ โมดูลัสสะสม (Storage modulus)

$G_2$  คือ โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus)

$n_v$  คือ จำนวนชั้นของวัสดุวิสโคอีลาสติก

$A_v$  คือ พื้นที่ผิวของวัสดุวิสโคอีลาสติก ( $a \times b$ )

$h_v$  คือ ความหนาของวัสดุวิสโคอีลาสติก

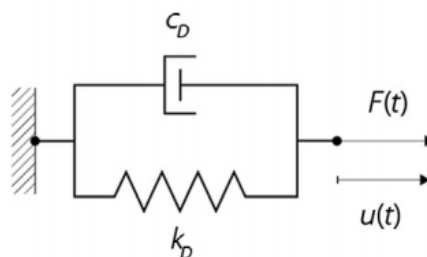
$\omega$  คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่ (excitation frequency)

ปัญหาหลักคือการหาค่า โมดูลัสสะสมและตัวแปรการสูญเสีย ซึ่งทั้งสองค่านี้ได้รับผลกระทบโดยตรงจากสภาวะแวดล้อมทั้งอุณหภูมิและความถี่ของแรง การที่จะจำลองผลของสภาวะแวดล้อมนี้อาจใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาผลกระทบเหล่านี้ อาทิเช่น Kelvin model, Maxwell model, Standard linear solid model, Four parameter model, Finite element model, complex stiffness mode (Lee et al., 2002)

#### 2.2.1.1 Kelvin model

Kelvin-voigt model หรือบางทีถูกเรียกว่า Voigt model เป็นการนำเสนอแบบจำลองที่เป็นตัวแทนวัสดุโดยมีลักษณะเป็น ตัวหน่วงแบบความหนืดและสปริง ที่ต่อกันแบบขนาน ซึ่งการต่อลักษณะนี้ทำให้ได้ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตัวหน่วงและสปริงมีค่าที่เท่ากัน ผลของแรงที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ

$$F(t) = k_D u(t) + c_D \dot{u}(t) \quad (6)$$

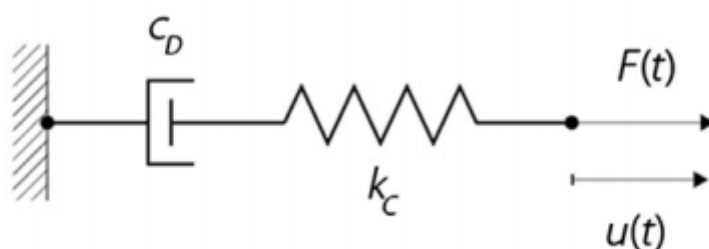


รูปที่ 2.9 แบบจำลองแบบ Kelvin-voigt

### 2.2.1.2 Maxwell model

Maxwell model เป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุวิสโคอิลาสติกได้ค่อนข้างใกล้เคียง โดยแบบจำลองประกอบด้วย ตัวหน่วงและสปริงที่ประกอบต่อกันแบบอนุกรม ผลของแรงที่เกิดขึ้นเป็นไปตาม

$$F(t) + F(t)c_D / k_D = c_D \dot{u}(t) \quad (7)$$



รูปที่ 2.10 แบบจำลองแบบ Maxwell

แบบจำลอง Kelvin-voigt และ Maxwell นั้นเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่สามารถเลือกใช้ในการวิเคราะห์และเป็นตัวแทนของวัสดุวิสโคอิลาสติกได้ แต่เนื่องจากแบบจำลองแบบ Kelvin-voigt นั้นเหมาะสมกับ damper ที่ให้ค่าความสำคัญกับ Stiffness และได้รับผลกระทบกับความถี่ของแรงกระทำที่ให้น้อย ซึ่งผิดจากคุณสมบัติของวัสดุวิสโคอิลาสติกที่คุณสมบัตินั้นเปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำที่ให้ (Lago et al., 2019)

CSI (2016b) จึงแนะนำให้เลือกใช้แบบจำลองแบบ Maxwell สำหรับ Viscoelastic dampers และในการศึกษาอื่น ๆ ก็มีการเลือกใช้แบบจำลองชนิดนี้ อธิบายความเป็นวิสโคอิลาสติกในวัสดุหลายชนิด เช่น Polymer (Krairi and Doghri, 2014), Asphalt concrete (Xu and Solaimanian, 2009) โดยในการศึกษานี้จะใช้แบบจำลอง Maxwell ในการอธิบายพฤติกรรมของ Viscoelastic dampers ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม ETABS

### 2.2.2 Hysteresis loop

ในการหาค่าตัวแปรต่างๆของ Viscoelastic damper จำเป็นต้องทำการทดสอบ damper ด้วยแรงแบบ cyclic เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีรอบปิดหรือที่เรียกกันว่า Hysteresis loop ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่สามารถอธิบายด้วยสมการต่อไปนี้ (Xu et al., 2010)

$$\left( \frac{F_d - K_{d1} u_d}{\eta K_{d1} u_0} \right)^2 + \left( \frac{u_d}{u_0} \right)^2 = 1 \quad (8)$$

โดยที่	$F_d$	คือ แรงที่เกิดขึ้น
	$u_d$	คือ การเคลื่อนตัวของ damper
	$u_0$	คือ การเคลื่อนตัวสูงสุดของ damper
	$k_{d1}$	คือ สติฟเนสสะสม (Storage stiffness, $F_1/u_0$ )

โมดูลัสสะสม  $G_1$ , โมดูลัสสูญเสีย  $G_2$  และตัวแปรการสูญเสีย  $\eta$  สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

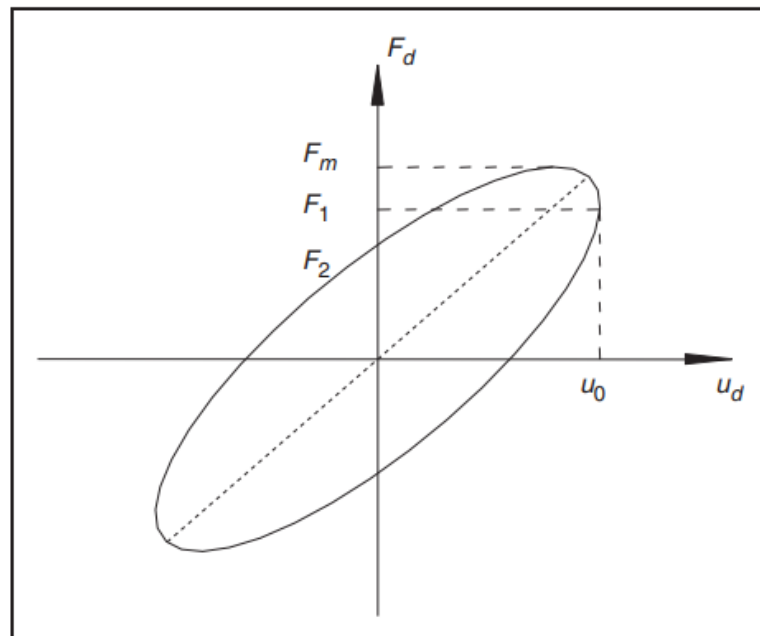
$$G_1 = F_1 h_v / \pi A_v u_0 \quad (9)$$

$$\eta = F_2 / F_1 \quad (10)$$

$$G_2 = \eta G_1 \quad (11)$$

$$E_d = \pi \eta G_2 A_v u_0^2 / h_v \quad (12)$$

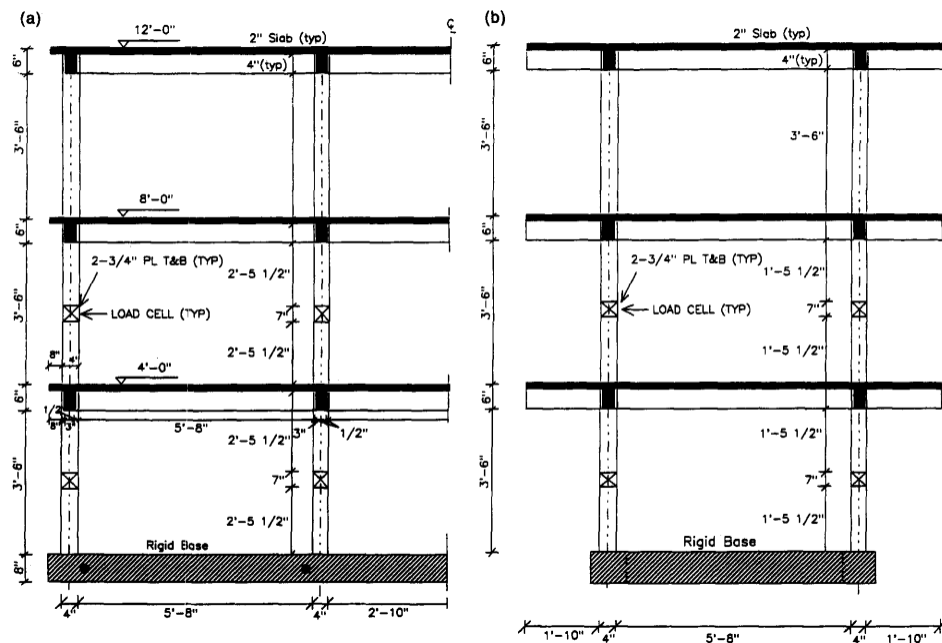
โดยที่	$F_1$	คือ แรงขณะที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุด
	$F_2$	คือ แรงขณะการเคลื่อนที่เป็นศูนย์ ( $F_2 = \eta k_{d1} u_0$ )



รูปที่ 2.11 กราฟ hysteresis ของแรงและการเคลื่อนที่

### 2.3 พฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานวิสโคอีลาสติก

Shen et al. (1995) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อติดตั้ง viscoelastic damper ภายใต้แผ่นดินไหวโดยการจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 1/3 ขนาด 3 ชั้นสูง 12 ฟุต แล้วติดตั้งด้วยตัวหน่วง 2 แบบ แล้วทำการสั่นด้วย shaking table ด้วย ความเร่ง 0.2g และ 0.3g อ้างอิงจาก response spectrum ของคลื่นแผ่นดินไหว Taft



รูปที่ 2.12 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบจำลองขนาด 1/3

Shen และคณะ ได้พิจารณาถึงผลจากการติดตั้ง viscoelastic damper ทั้งสองแบบที่มีความยาวของวิสโคอีลาสติกที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากการติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานนั้นจะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างที่จะช่วยลดผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหว แต่ก็จะเป็นการเพิ่มสติเฟนของโครงสร้างด้วยส่งผลให้ตัวโครงสร้างมีคาบที่สั้นลงและได้รับผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวมากขึ้น

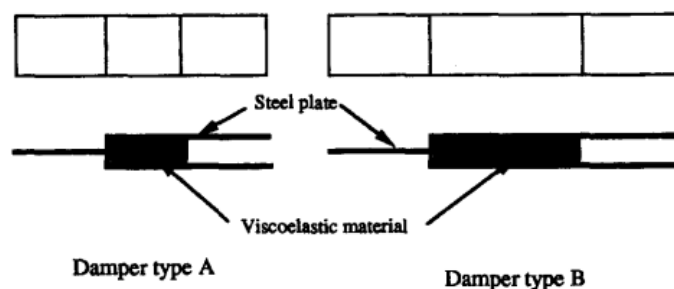


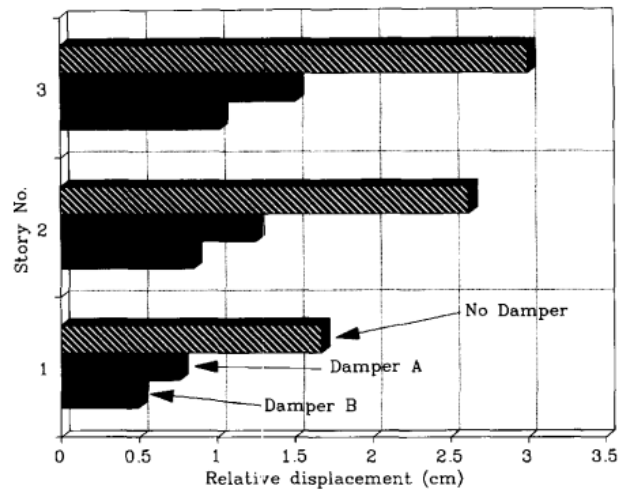
Figure 5 Type A and Type B dampers

รูปที่ 2.13 รูปแบบ Viscoelastic damper ทั้งสองแบบ

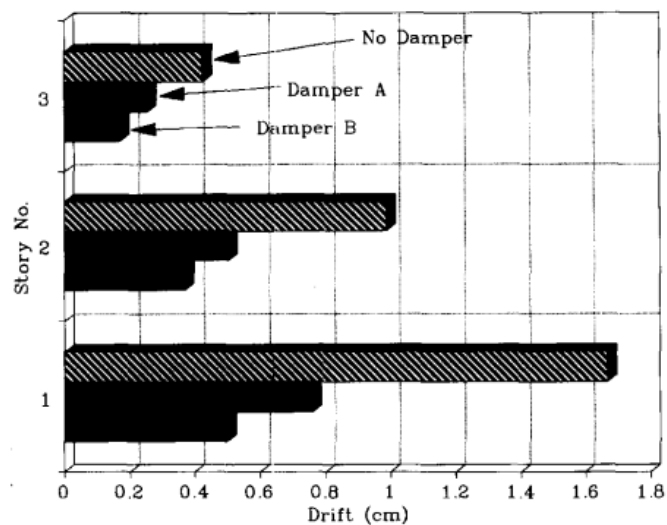
จากการศึกษาพบว่า การติดตั้ง Viscoelastic damper ถึงแม้ว่าคาบของโครงสร้างที่สั้นลงจะทำให้ได้รับแรงแผ่นดินไหวที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ชดเชยกับการเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญทำให้ผลกระทบจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างโดยรวมมีผลลัพธ์ที่ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15

ตารางที่ 2.2 แสดงความถี่และอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง

	Undamped	Damper A	Damper B
Frequency (Hz)	1.86	2.52	3.02
Damping ratio	5%–7%	17%–18%	22%–23%

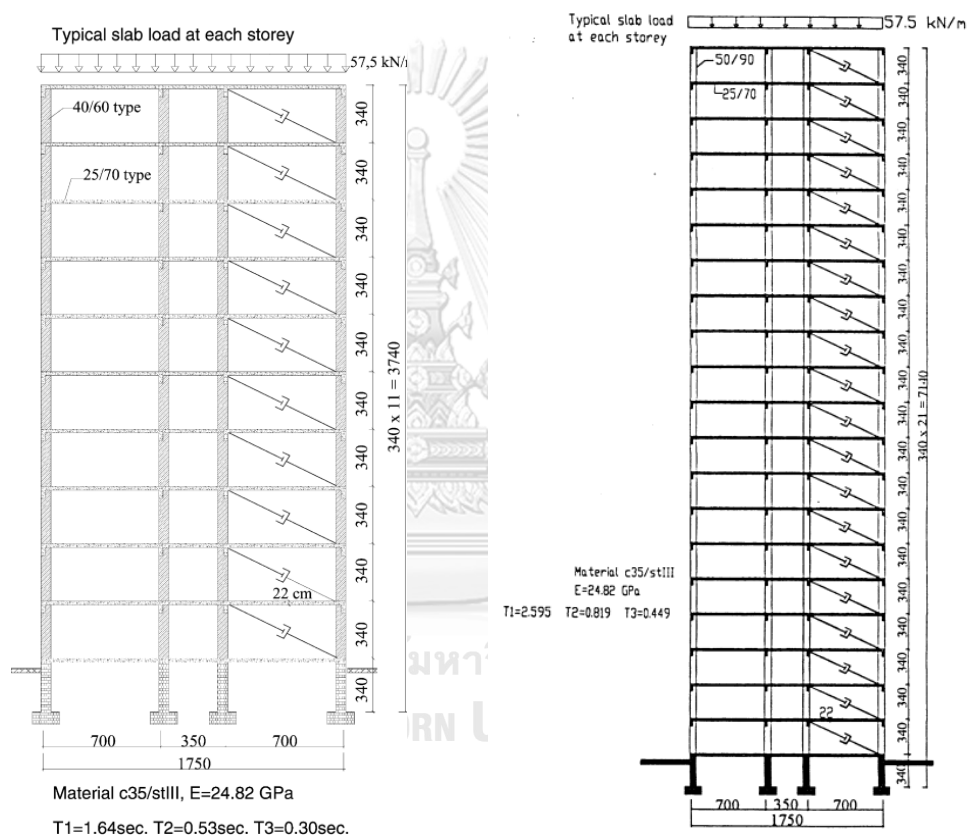


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของโครงสร้าง



รูปที่ 2.15 กราฟ Story drift ของโครงสร้าง

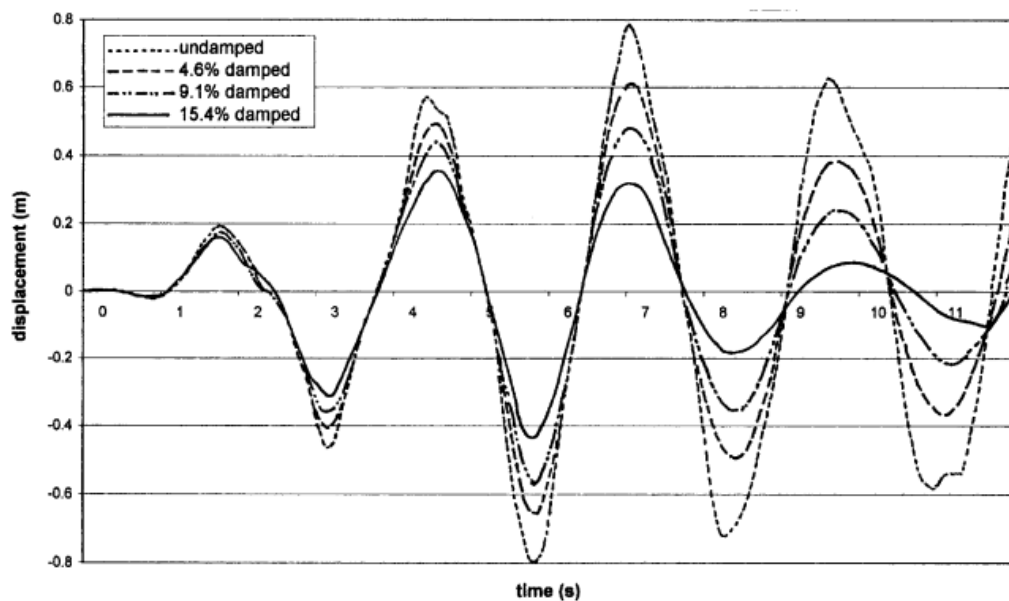
Tezcan and Uluca (2003) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างของกรีตเสริมเหล็กที่ติดตั้ง viscoelastic damper ด้วยการโมเดลโครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยพิจารณา รวมถึงผลของสภาพดินโดยการใช้อัตราคลื่นแผ่นดินไหวที่ช่วงเวลาแตกต่างกันและใช้คลื่นแผ่นดินไหว 2 คลื่น ได้แก่ 1940 ElCetro และ 1952 Pasadena เป็นตัวแทนของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่สูงและต่ำตามลำดับ แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์แบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้นที่กระทำกับโครงสร้าง 2 แบบ ได้แก่ คอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ชั้นและ 20 ชั้น



รูปที่ 2.16 คอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ชั้น และ คอนกรีตเสริมเหล็ก 20 ชั้น

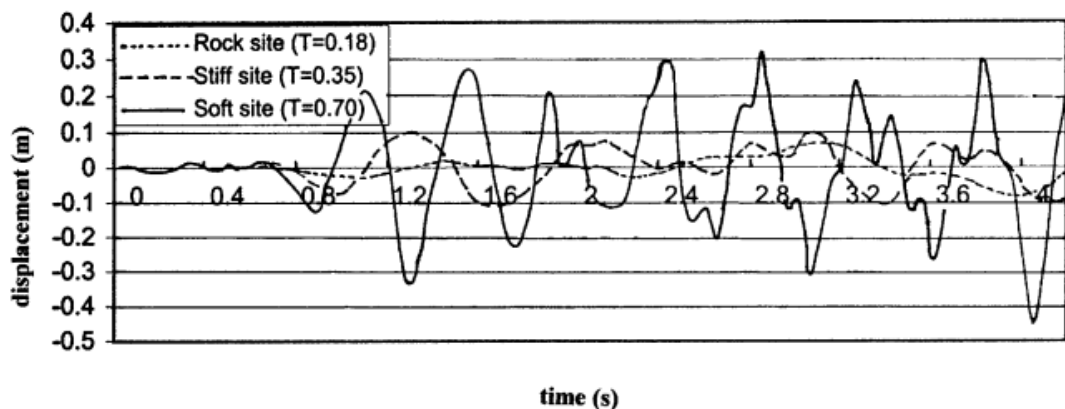


ผลการศึกษาพบว่าโปรแกรม SAP2000 มีความเหมาะสมที่จะวิเคราะห์อาคารภายใต้แผ่นดินไหว โดยการติดตั้ง viscoelastic damper ช่วยลดผลกระทบได้อย่างมีนัยสำคัญโดยลดผลกระทบได้ถึง 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวชั้นบนสุดของโครงสร้าง 20 ชั้นระหว่างก่อนติดตั้งและหลังติดตั้ง และเหมาะสมกับการติดตั้งกับอาคารสูงเมื่อได้รับผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่สูง (ElCentro) สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่ต่ำจะมีโอกาสที่ความถี่ของโครงสร้างจะใกล้เคียงกับสภาพดินส่งผลให้ประสิทธิภาพของ viscoelastic damper ลดลง



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวชั้นบนสุดของโครงสร้าง 20 ชั้น

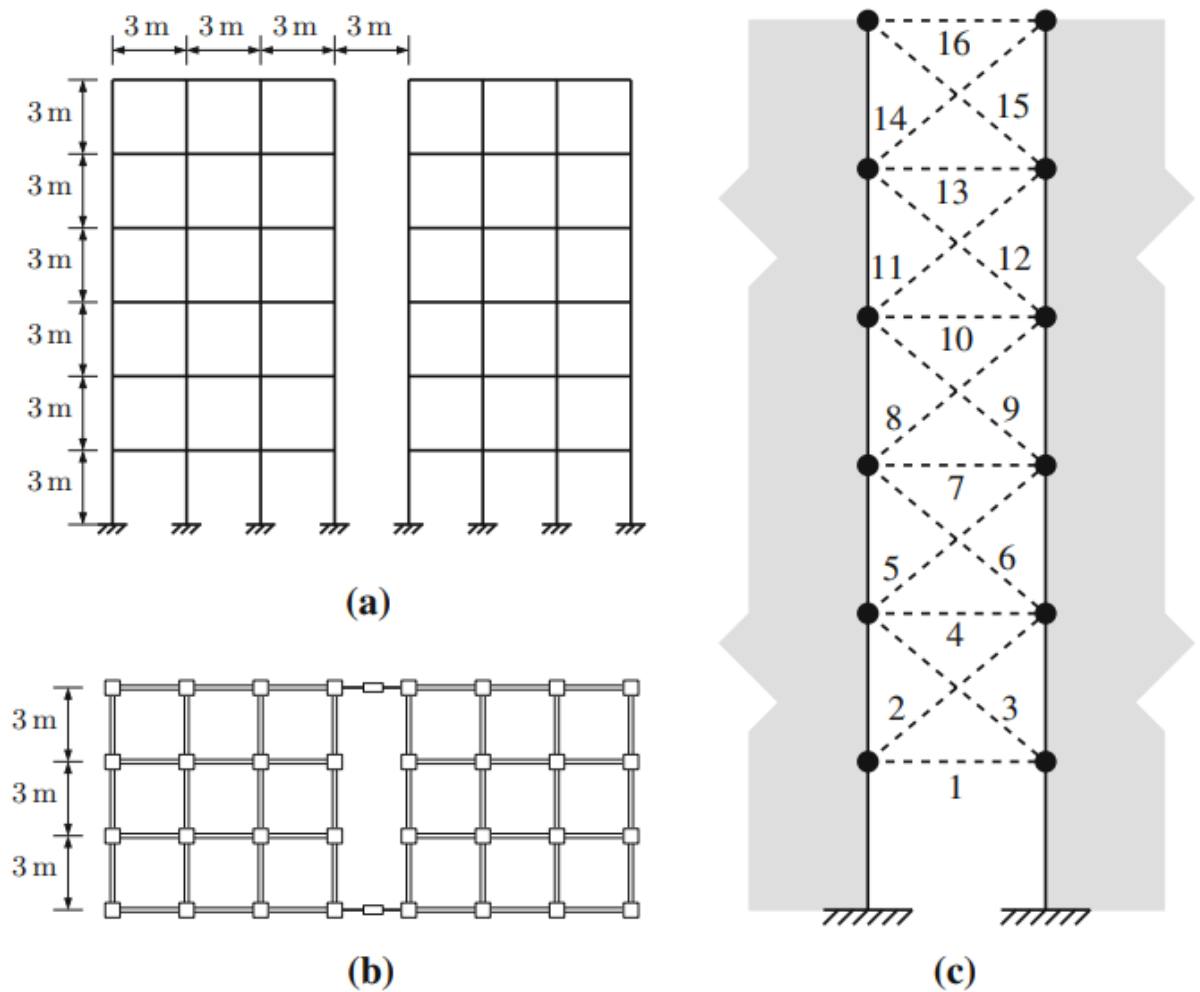
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.18 กราฟการเคลื่อนตัวชั้นบนสุดของโครงสร้าง 20 ชั้นที่สภาพดินที่ต่างกัน

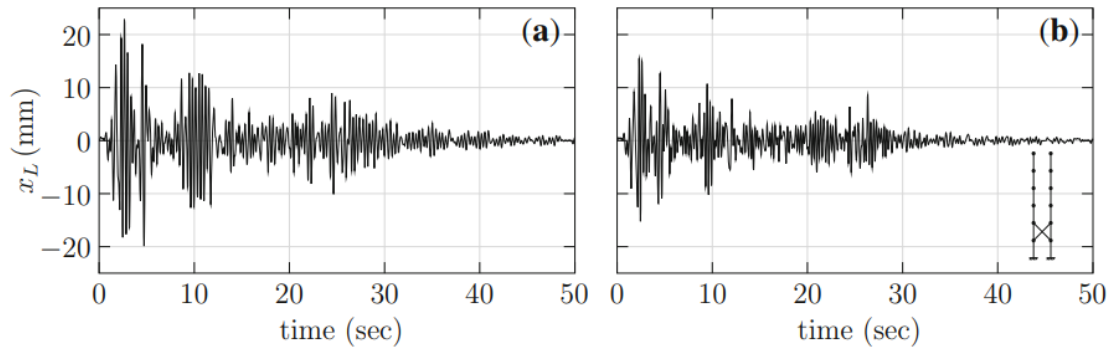
( $T$  = คาบที่พิจารณาของข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว)

Patil et al. (2020) ได้ศึกษาการติดตั้ง viscoelastic damper ในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ เพื่อเปรียบเทียบเคลื่อนตัวของชั้น แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร และความเร่งของอาคาร โดยอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสูงระหว่างชั้น 3 เมตรและระยะจากเสาถึงเสา 3 เมตร และระยะห่างระหว่างอาคาร 3 เมตร แล้วจึงทำการวิเคราะห์แผ่นดินไหว โดยมีคลื่นแผ่นดินไหว Elcentro เป็นตัวแทนคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา



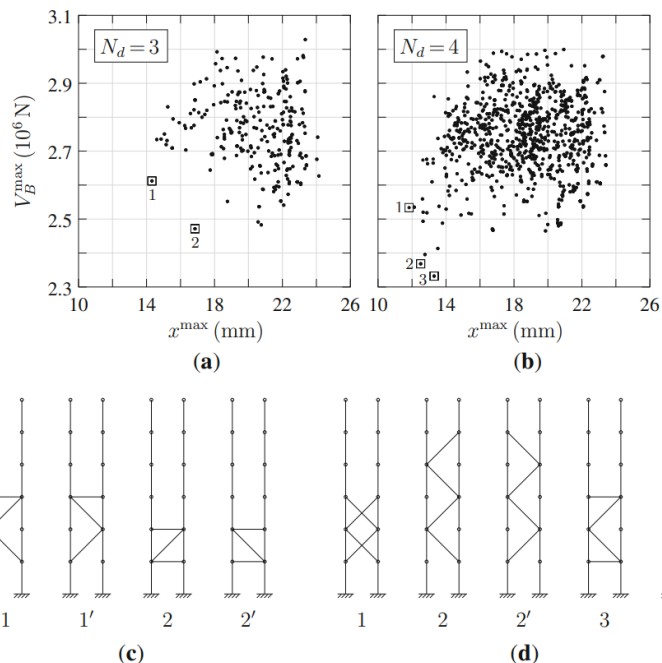
รูปที่ 2.19 อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา (a) มุมมองด้านข้าง (b) มุมมองด้านบน (c) แบบจำลองของอาคารและตำแหน่งที่สามารถติดตั้ง viscoelastic damper

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ไม่มีการติดตั้ง Viscoelastic damper กับอาคารที่มีการติดตั้ง Viscoelastic damper จำนวน 2 ตัว อาคารที่มีการติดตั้งตัวหน่วงนั้น การเคลื่อนตัวของชั้นบนสุดมีค่าน้อยกว่าอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงดังภาพที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟการเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นบนสุดกับเวลา (a) อาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง (b) อาคารที่มีการติดตั้งตัวหน่วง

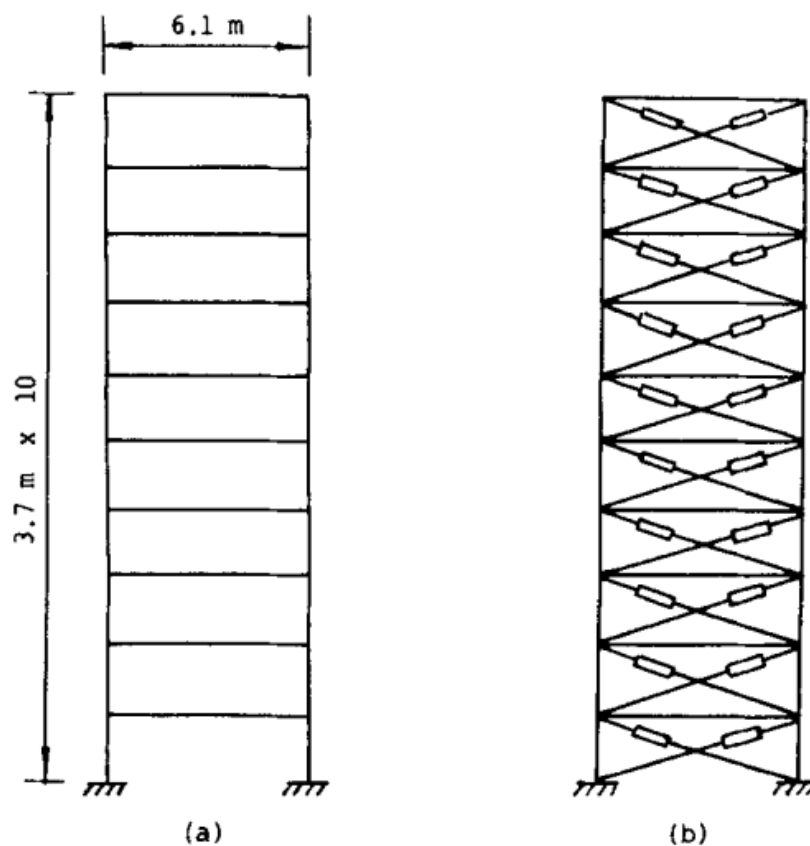
นอกเหนือจากนั้น Patil และคณะ ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในตำแหน่งการติดตั้งของ viscoelastic damper ที่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดผลกระทบของแผ่นดินไหวต่ออาคาร โดยการติดตั้ง Viscoelastic damper ในจำนวนที่เท่ากันที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารและเปรียบเทียบผล ซึ่งพบว่าตำแหน่งในการติดตั้งตัวหน่วงนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานอย่างมากด้วย



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดในอาคารของตัวหน่วงในตำแหน่งต่างๆ (a) ตัวหน่วง 3 ตัว (b) ตัวหน่วง 4 ตัว (c) ตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพของตัวหน่วง 3 ตัว (d) ตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพของตัวหน่วง 4 ตัว

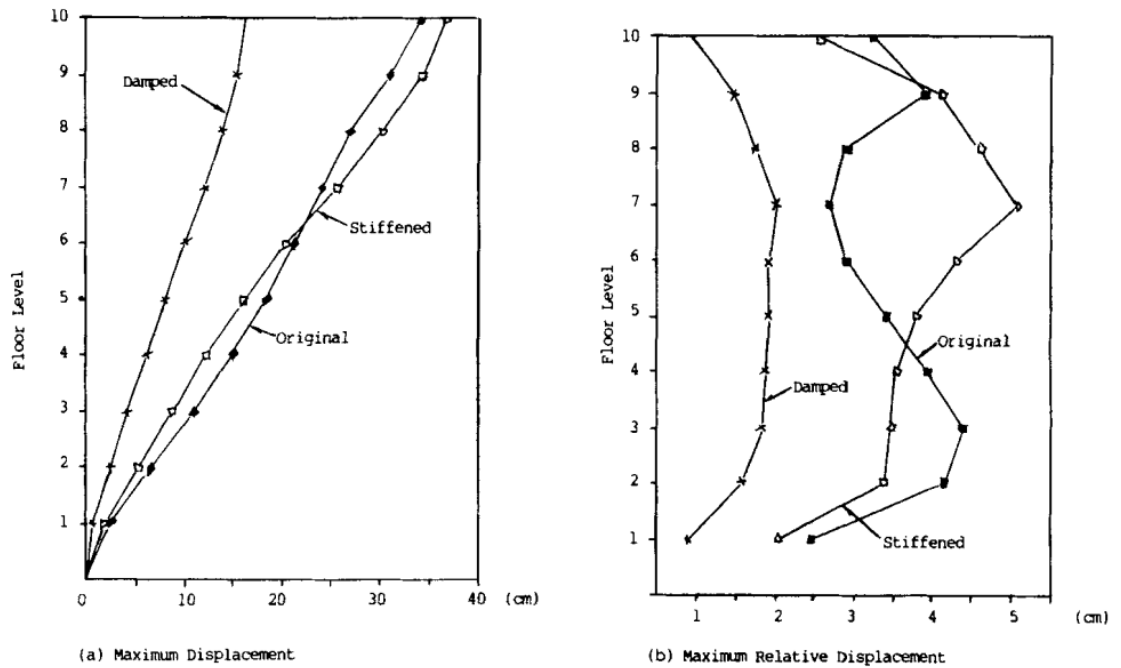
## 2.4 พฤติกรรมของอาคารโครงสร้างเหล็กเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก

Zhang and Soong (1989) ได้ทำการจำลองอาคารโครงสร้างเหล็ก 10 ชั้นแล้วทำการติดตั้ง VE dampers จำนวน 20 ตัวโดยได้ติดตั้งชั้นละ 2 ตัวด้วยวิธีการติดตั้งแบบทแยงมุมเนื่องจากพิจารณาถึงการเคลื่อนตัวที่สูง ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับความสามารถในการสลายพลังงานของอุปกรณ์ แล้วจึงทำการวิเคราะห์แผ่นดินไหวด้วยวิธีประวัติเวลาจาก Response spectrum ของคลื่นแผ่นดินไหว ElCentro

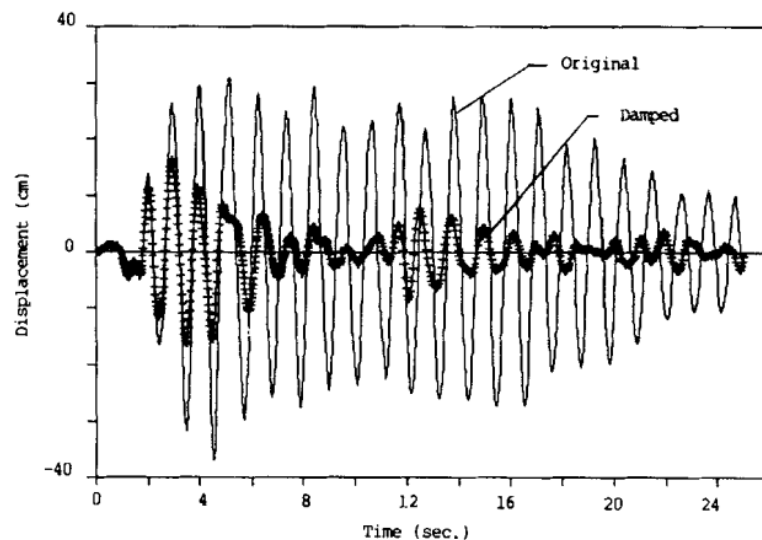


รูปที่ 2.22 a) อาคารโครงสร้างเหล็กก่อนติดตั้ง VE Dampers b) อาคารโครงสร้างเหล็กหลังติดตั้ง VE Dampers

ผลการศึกษาพบว่าหลังจากติดตั้ง VE dampers ทั้ง 20 ตัว การเคลื่อนที่ในแต่ละชั้นของอาคารโครงสร้างเหล็กทั้งการเคลื่อนที่สัมพัทธ์และสัมบูรณ์ลดไปได้อย่างน้อย 100 % เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างก่อนการติดตั้ง แต่การที่ VE dampers เพิ่มสติเฟนส์โดยรวมของอาคารนั้น ไม่ได้มีส่วนช่วยในลดผลกระทบจากแผ่นดินไหวโดยตรง

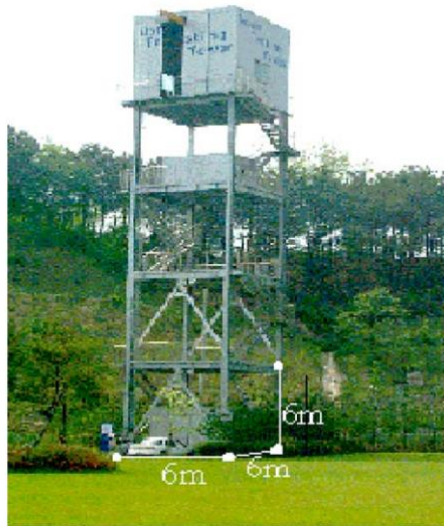


รูปที่ 2.23 a) กราฟการเคลื่อนที่สัมบูรณ์ในแต่ละชั้นของโครงสร้าง b) กราฟการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแต่ละชั้นของโครงสร้าง

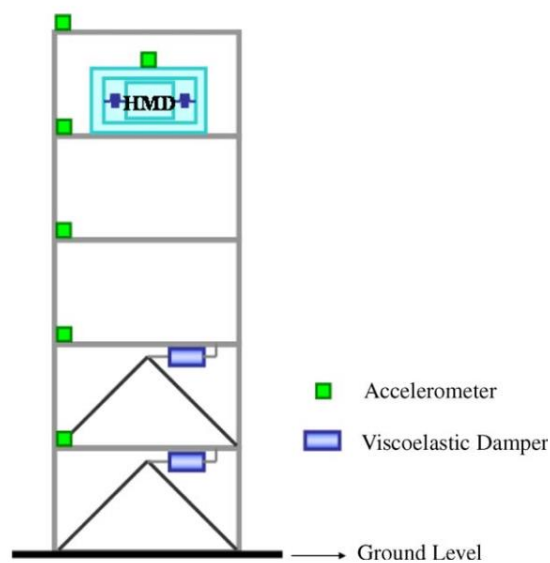


รูปที่ 2.24 กราฟการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดของโครงสร้างตามประวัติเวลา

เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นเพียงแค่การศึกษาด้วยแบบจำลองหรืออาจจะเป็นของจริงที่ถูกย่อส่วนลงมา Min et al. (2004) จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้โครงสร้างเหล็กขนาด 5 ชั้น ที่ถูกติดตั้งด้วย Viscoelastic dampers แล้วทำการสั่นไหวด้วย Hybrid mass driver (HMD) และได้พิจารณาเพิ่มเติมถึงตำแหน่งที่ติดตั้ง Viscoelastic damper และผลของอุณหภูมิด้วย โดยการศึกษาพิจารณา 3 กรณีได้แก่ กรณีที่ [1] ติดตั้ง Viscoelastic ที่ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 30°C กรณีที่ [2] ติดตั้งที่ชั้น 1 และ ชั้น 2 ที่อุณหภูมิ 30°C และกรณีที่ [3] ติดตั้งที่ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 24°C

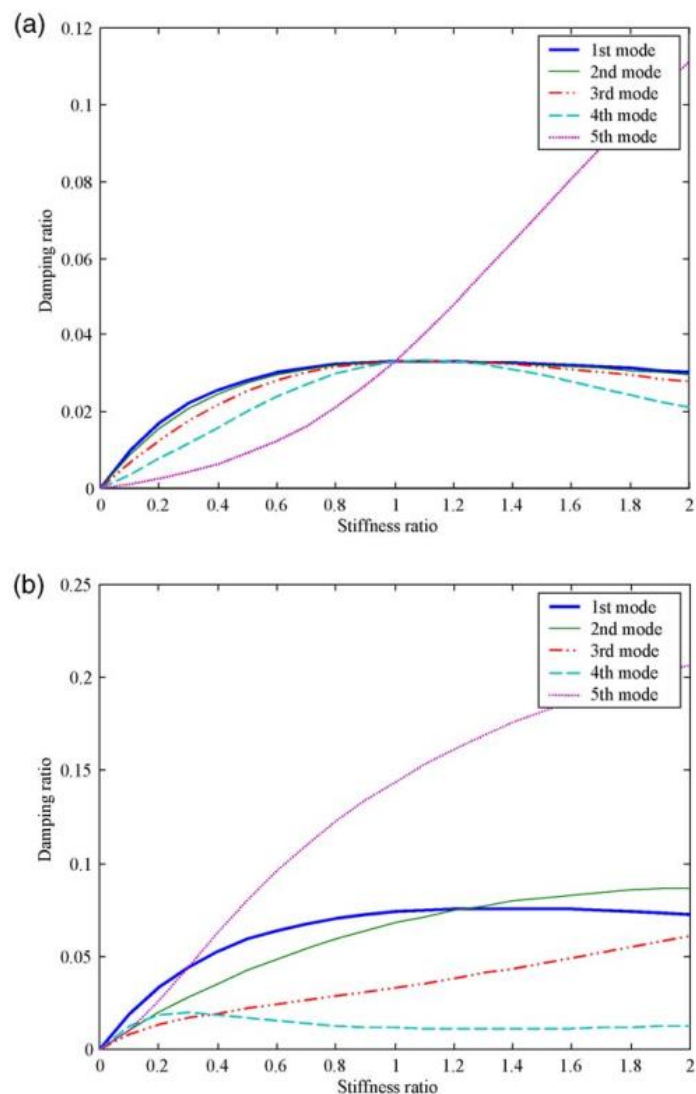


รูปที่ 2.25 โครงสร้างเหล็กขนาด 5 ชั้น



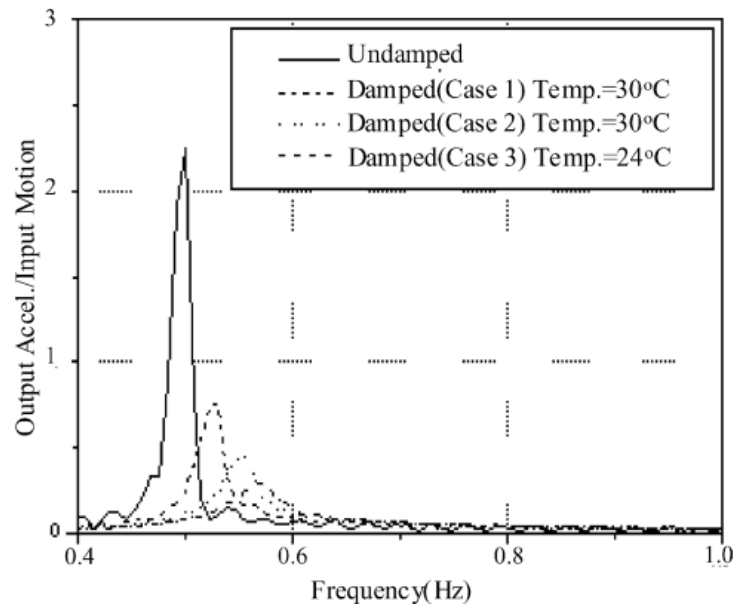
รูปที่ 2.26 ตำแหน่งอุปกรณ์ที่ติดตั้งในโครงสร้าง

การเลือกใช้ค่า Stiffness ของตัว VE damper นั้นมีความสำคัญในการเลือกใช้ก็เพื่อให้ได้ อัตราส่วนของความหน่วงของโครงสร้างที่ต้องการ ซึ่งก็มีการศึกษาจนได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง อัตราส่วนความหน่วงและอัตราส่วนของ stiffness โดยอัตราส่วนของ stiffness คิดจาก stiffness ของ VE damper หารด้วยค่า Stiffness ในแต่ละชั้น ซึ่งพบว่าเมื่อติดตั้งจำนวน VE damper มากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



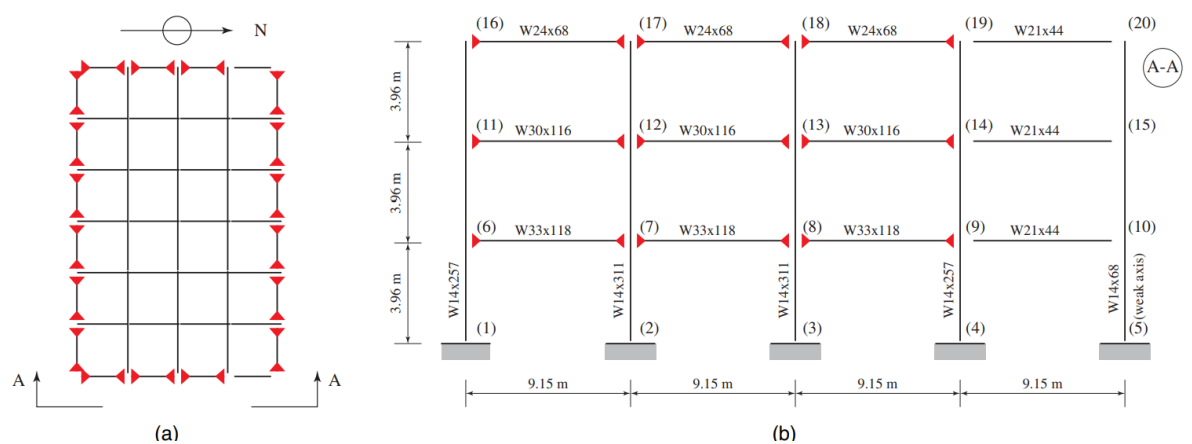
รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงกับอัตราส่วน Stiffness a) VE damper ติดตั้งในชั้นที่1 b) VE damper ติดตั้งในชั้นที่ 1 และชั้นที่2

ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา Viscoelastic damper มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความหน่วงอย่างมีนัยสำคัญ และลดผลกระทบทั้งการเคลื่อนที่และความเร่งของโครงสร้าง และที่อุณหภูมิ 24°C ผลการตอบสนองของอาคารมีผลที่ดีกว่าอุณหภูมิ 30°C



รูปที่ 2.28 กราฟผลความเร่งตอบสนองของชั้นที่ 5 ของโครงสร้าง

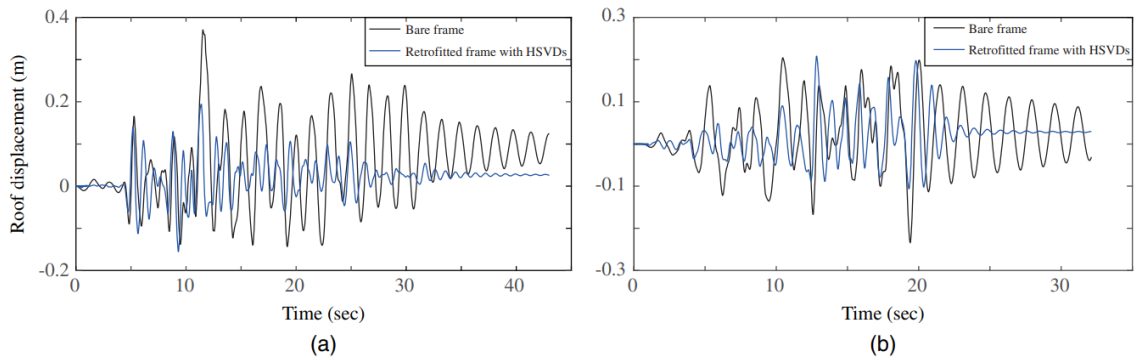
Nasab and Kim (2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมรรถนะต้านแผ่นดินไหวของอาคารเดิมด้วยการใช้ Hybrid Steel Slit-Viscoelastic dampers โดยมีโครงเหล็กรับแรงตัดขนาด 3 ชั้นความสูงระหว่างชั้น 3.96 เมตรและมีระยะห่างระหว่างเสา 9.15 เมตรเป็นอาคารตัวอย่างแล้วทำการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหว



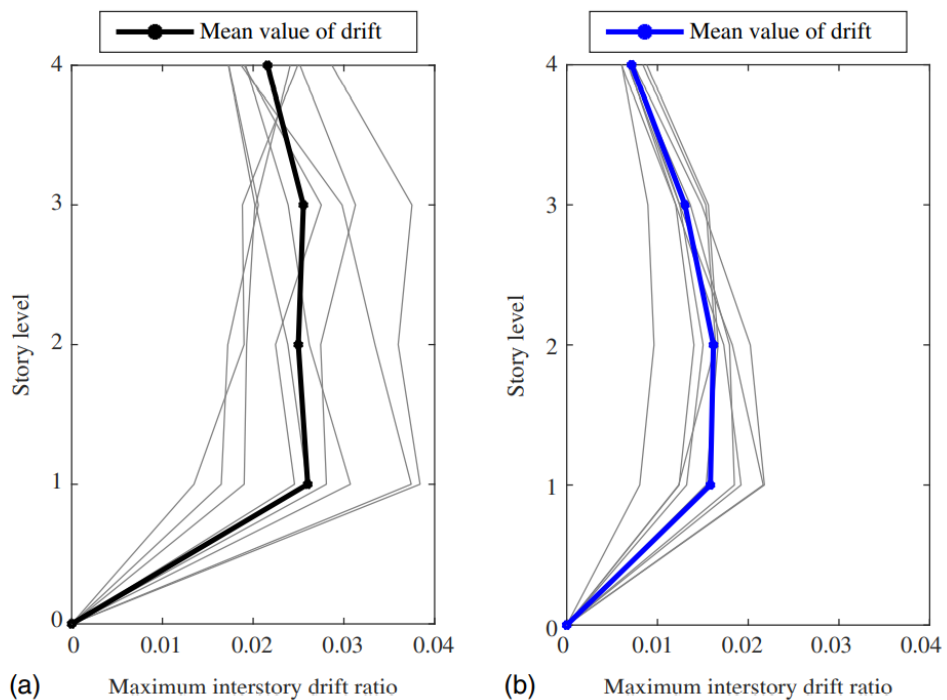
รูปที่ 2.29 โครงเหล็กรับแรงตัดตัวอย่าง (a) มุมมองด้านบน (b) มุมมองด้านข้าง



ผลการศึกษาก็พบว่า Hybrid Steel Slit-Viscoelastic dampers สามารถลดผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวได้ทั้งในแง่ของการเคลื่อนตัวของชั้นบนสุดของอาคารและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแต่ละชั้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 และ 2.31



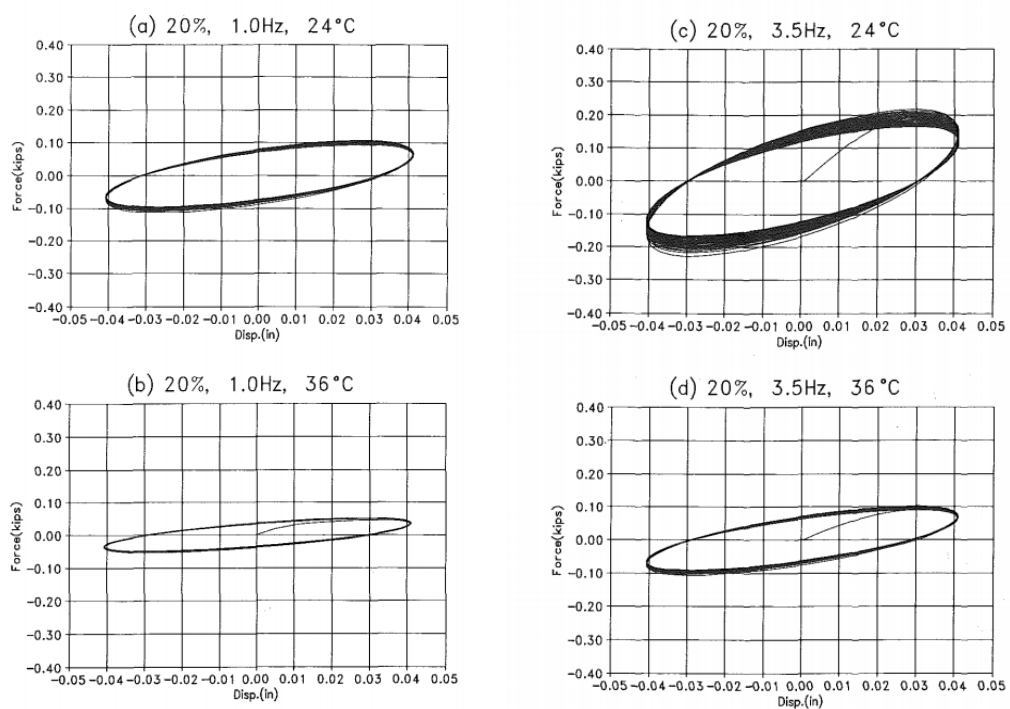
รูปที่ 2.30 กราฟการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดของโครงสร้างอาคารกับเวลา (a) คลื่นแผ่นดินไหว Tabas (b) คลื่นแผ่นดินไหว Hills



รูปที่ 2.31 กราฟการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแต่ละชั้นกับคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 7 ชั้น (a) ก่อนการปรับปรุงสมรรถนะ (b) หลังการปรับปรุงสมรรถนะ

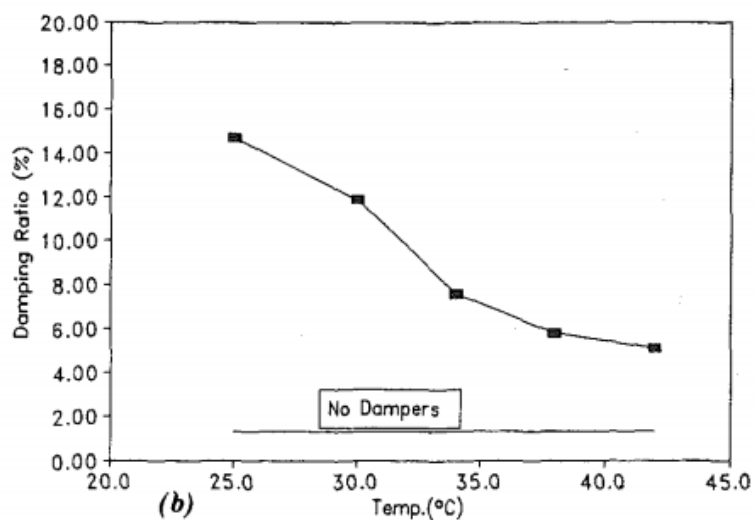
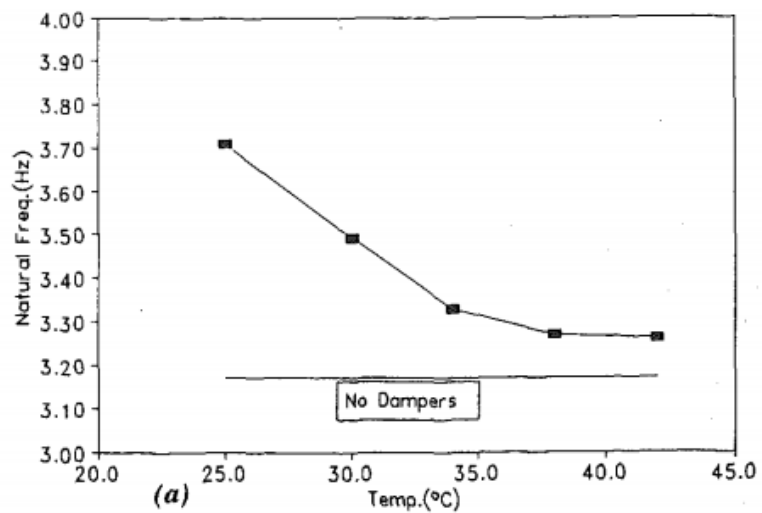
## 2.5 ผลกระทบจากค่าความถี่และอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์สลายพลังงาน

Chang et al. (1992) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสถานะแวดล้อมต่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก โดยการทดสอบ VE damper กับอุณหภูมิที่ต่างกัน 6 อุณหภูมิ (21°C, 24°C, 28°C, 32°C, 36°C และ 40°C) ได้ผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ดังภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น damper stiffness และ shear loss modulus จะมีค่าที่ลดลง

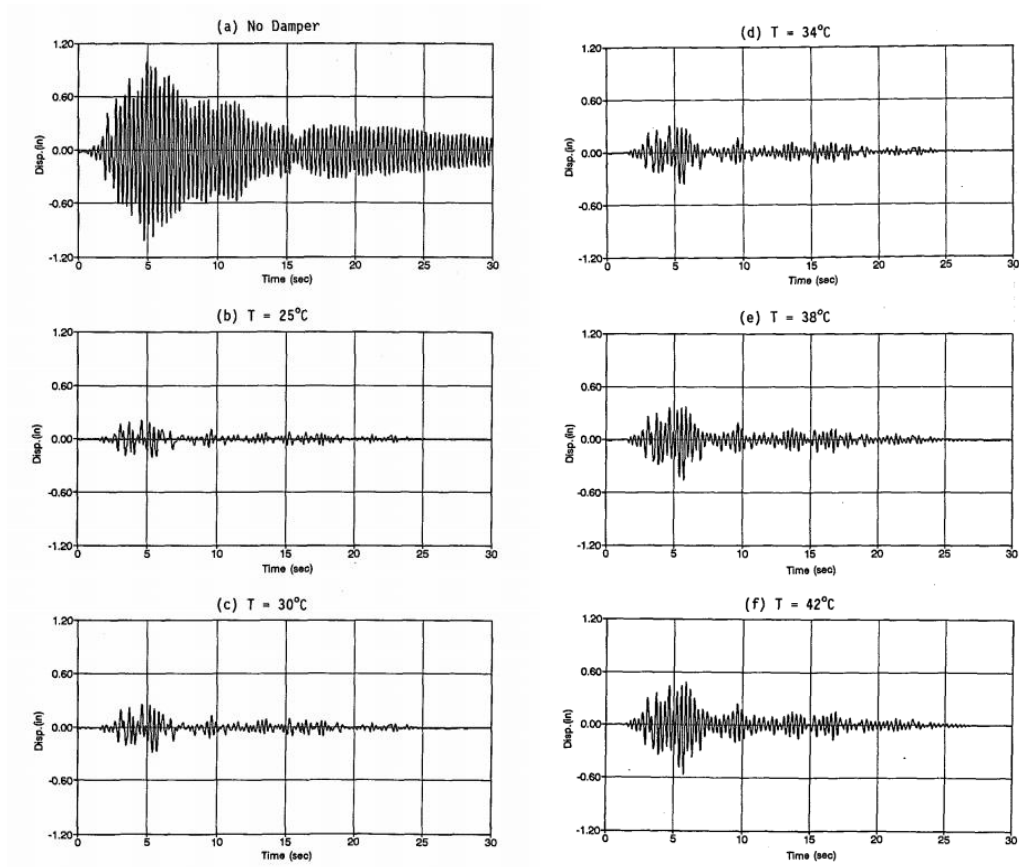


รูปที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สลายพลังงานที่อุณหภูมิต่างกัน

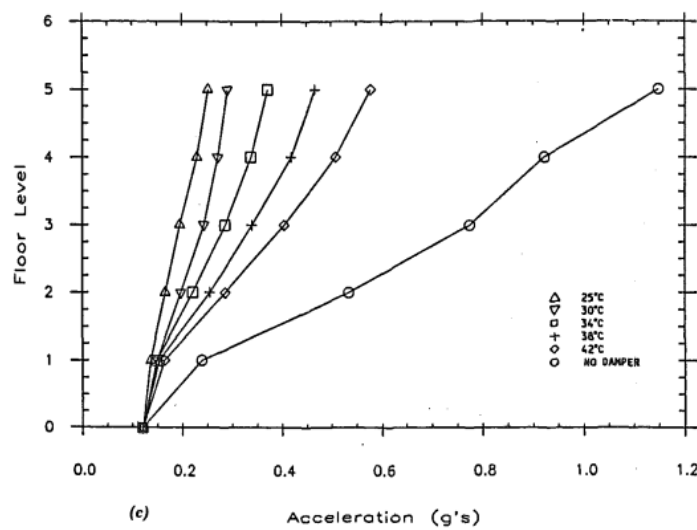
และยังได้ทำการจำลองโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นในขนาด 2/5 ของขนาดจริงที่ติดตั้ง VE damper เพื่อจะทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อมต่อโครงสร้างจริง ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น damping ratio กับ natural frequency ก็มีแนวโน้มที่ลดลงตาม แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่ดีกว่าไม่ติด damper อย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อวัสดุวิสโคอิลาสติก



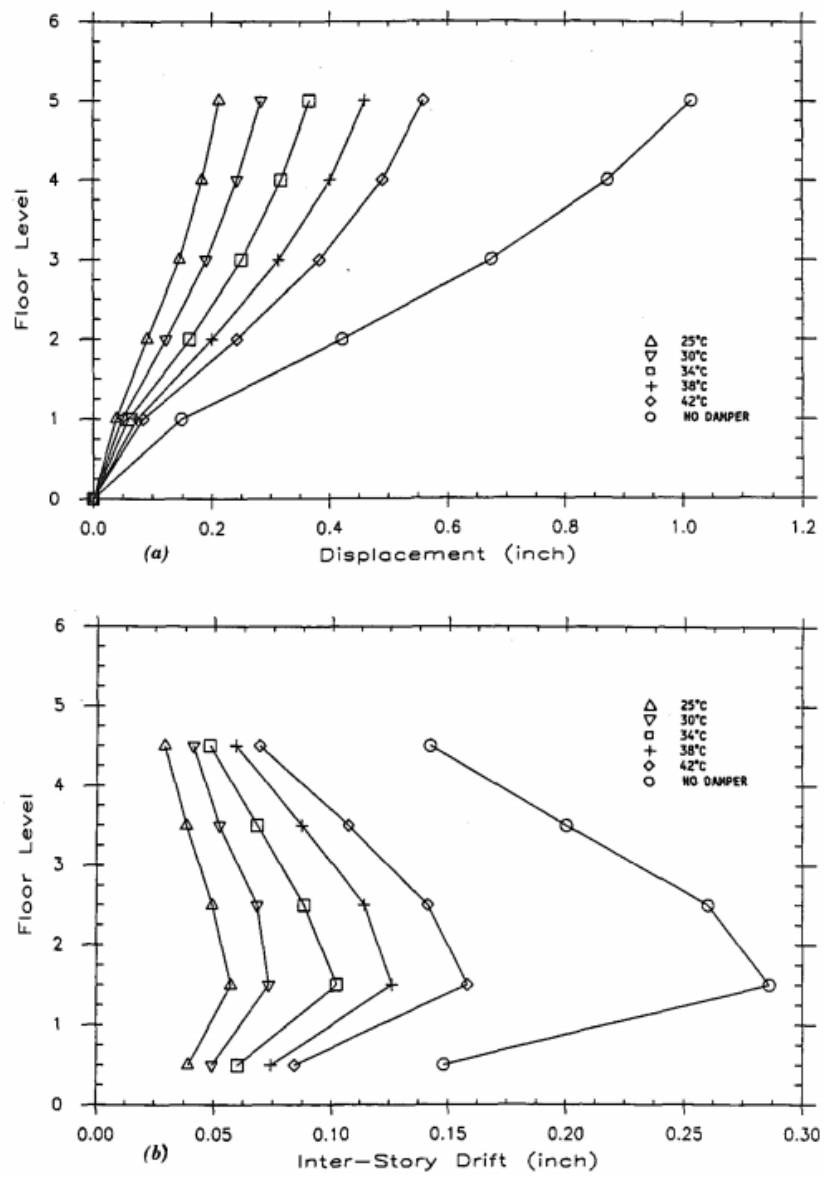
รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ของความถี่และอัตราส่วนความหน่วงต่ออุณหภูมิแวดล้อม



รูปที่ 2.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

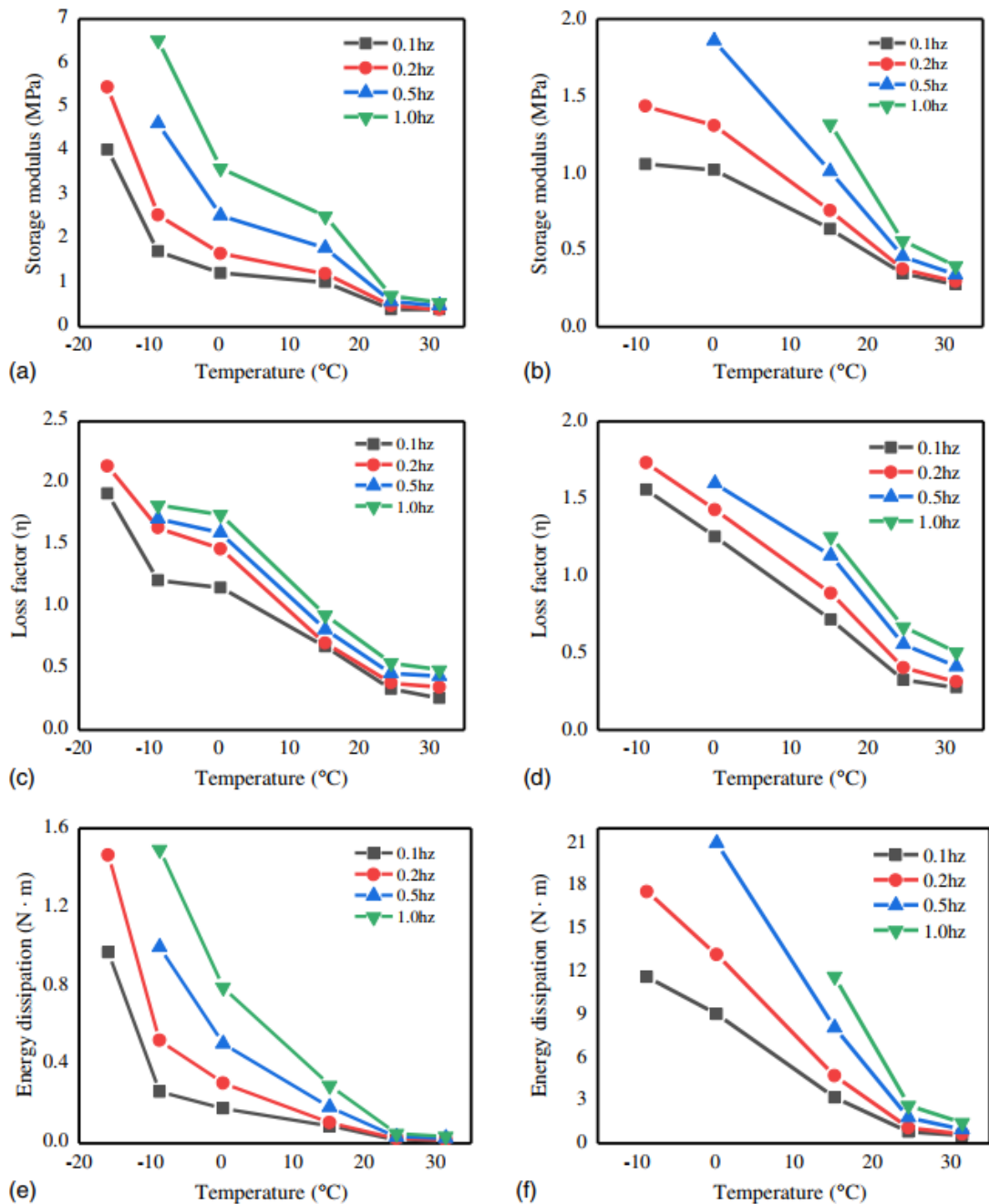


รูปที่ 2.35 กราฟความเร่งของแต่ละชั้นที่อุณหภูมิต่างๆ

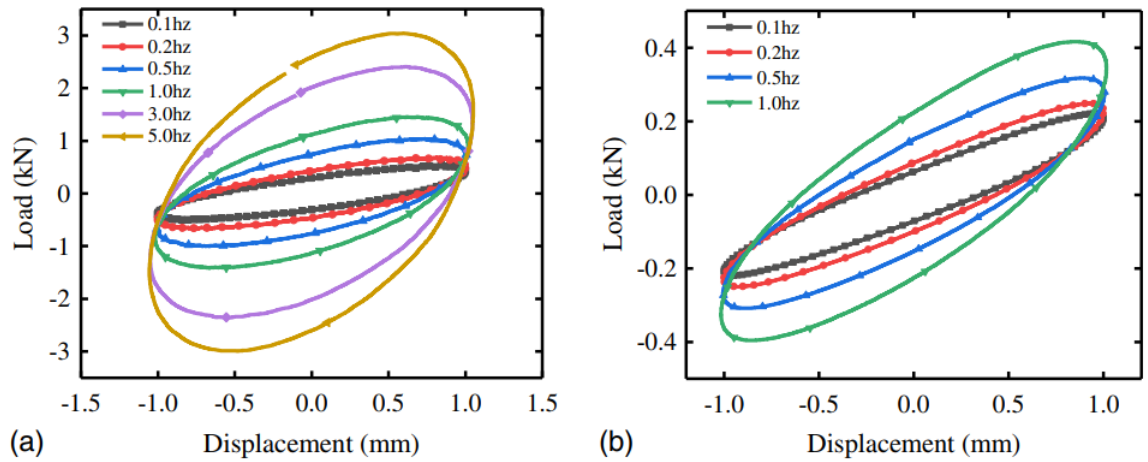


รูปที่ 2.36 กราฟการเคลื่อนที่และ story drift ในแต่ละชั้นที่อุณหภูมิต่างๆ

Xu et al. (2020) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการสลายพลังงานของ viscoelastic damper ที่ใช้ยางสังเคราะห์เป็นวัสดุวิสโคอีลาสติก โดยศึกษาพฤติกรรมของค่าตัวแปร Storage modulus, loss factor และการสลายพลังงานของ damper ที่อุณหภูมิและความถี่ของแรงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.37 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของตัวหน่วงที่ใช้ยางสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ ความถี่และขนาดการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน

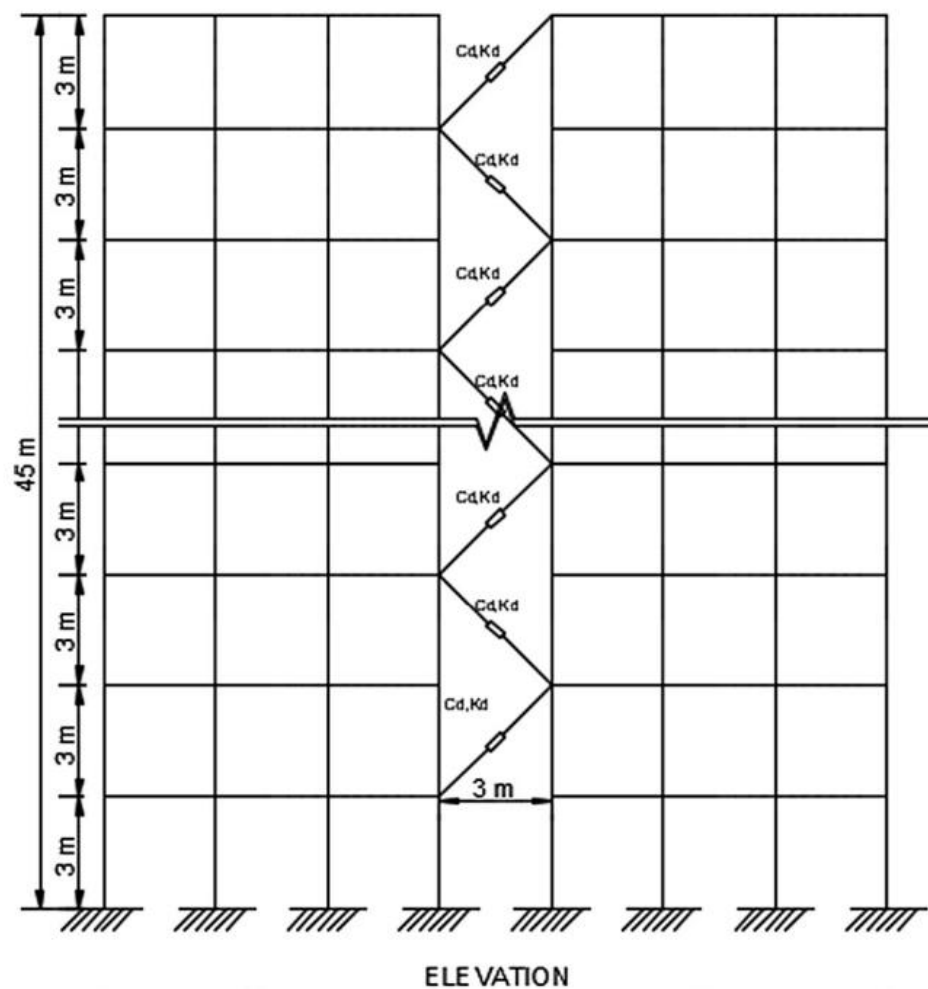


รูปที่ 2.38 กราฟ Hysteresis curves ที่ขนาดการเคลื่อนที่เท่ากันด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน (a)  $T = 15.2^{\circ}\text{C}$ ,  $d = 1.0\text{mm}$  (b)  $T = 24.6^{\circ}\text{C}$ ,  $d = 1.0\text{ mm}$

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิและความถี่ส่งผลกับคุณสมบัติทางกลต่างๆของ Viscoelastic damper ที่ใช้ยางสังเคราะห์เป็นวัสดุวิสโคอีลาสติคอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า Storage modulus , Loss factor และการสลายพลังงาน เมื่อความถี่สูงขึ้นคุณสมบัติทางกลต่างๆก็ดีขึ้นตามไปด้วย แต่สวนทางกับอุณหภูมิซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติต่างๆจะแย่ลง

## 2.6 อุปกรณ์สลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกชนิดอื่นๆ

Ramakrishna and Mohan (2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่หาได้ในท้องถิ่นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบของแผ่นดินไหวและแรงลมจากการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานโดยใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุวิสโคอิลาสติกแทนผลิตภัณฑ์จาก 3 M ที่มีราคาแพง โดยการจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 15 ชั้น 2 อาคารที่เชื่อมกันด้วย VE dampers กับคลื่นแผ่นดินไหว ElCentro 1940



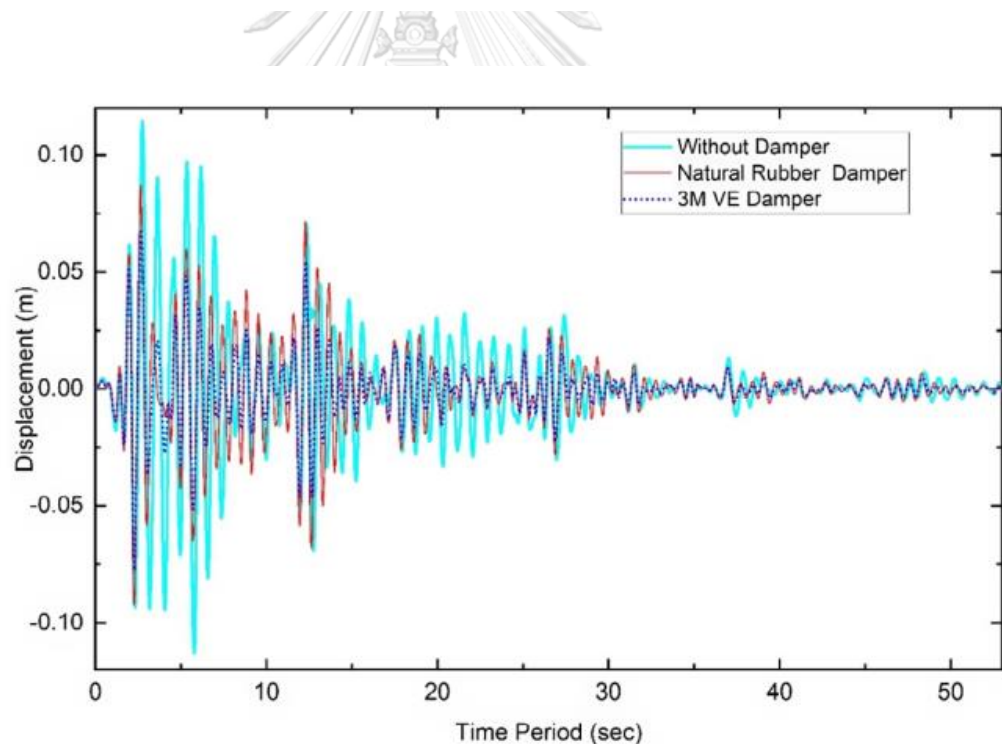
รูปที่ 2.39 ระดับของอาคาร 15 ชั้นที่เชื่อมต่อกันด้วย VE dampers



จากการศึกษาพบว่าค่าความหน่วงและค่าสติเฟเนสนั้น ขึ้นอยู่กับค่า  $G_1$  Storage modulus,  $G_2$  loss modulus และค่า  $\eta$  คือ loss factor ซึ่งค่า loss factor ที่สูงหมายถึงประสิทธิภาพการสลายพลังงานที่สูง โดยพบว่ายางจากธรรมชาติมีค่า loss factor ที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ของ 3M เมื่อเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาถึง 4 เท่า(Chang et al., 1991) แต่ก็ยังสามารถลดผลการตอบสนองของอาคารจากคลื่นแผ่นดินไหวได้อย่างมีนัยยะ ยางธรรมชาติจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่การศึกษานี้ไม่ได้กล่าวถึงการเสื่อมสภาพกับเวลาของยางธรรมชาติที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในระยะยาว

**ตารางที่ 2.3** แสดงค่า  $G_1$  (Storage modulus),  $G_2$  (loss modulus) และ  $\eta$  (loss factor) ของยางธรรมชาติและวิสโคอีลาสติกจาก 3M

Type of VE Material	$G_1$ , N/mm <sup>2</sup>	$G_2$ , N/mm <sup>2</sup>	$\eta = \frac{G_2}{G_1}$ , loss factor
Natural Rubber	1.2987	0.2385	0.183
3 M Viscoelastic [16]	0.883379	0.717087	0.811



**รูปที่ 2.40** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดของอาคารกับประวัตเวลา ของ damper ทั้งสองแบบกับอาคารเดิม

## 2.7 ตัวอย่างกรณีศึกษา

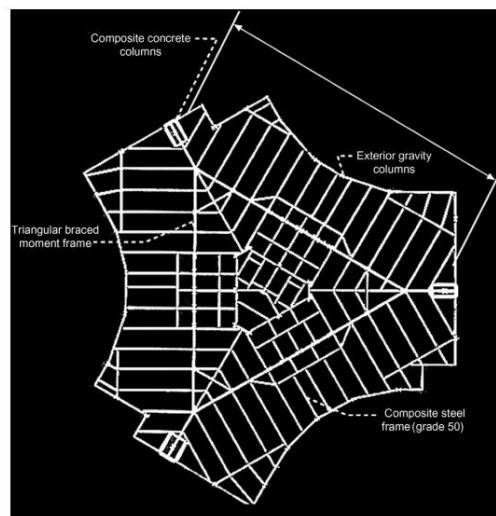
Lago et al. (2019) ได้กล่าวถึงตัวอย่างกรณีศึกษาเกี่ยวกับอาคารที่มีการติดตั้งใช้งานจริงของ Viscoelastic damper ไว้ดังนี้

### 2.7.1 Columbia tower

Columbia Seafirst Center เป็นอาคารที่สูงที่สุดใน Seattle และเป็นอันดับที่ 10 ของโลก ณ ตอนที่สร้างเสร็จด้วยความสูง 76 ชั้น 248m และพื้นที่ 139,354 ตารางเมตร โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างเหล็กประกอบด้วยเสาหน้าตัดประกอบกำลังสูง



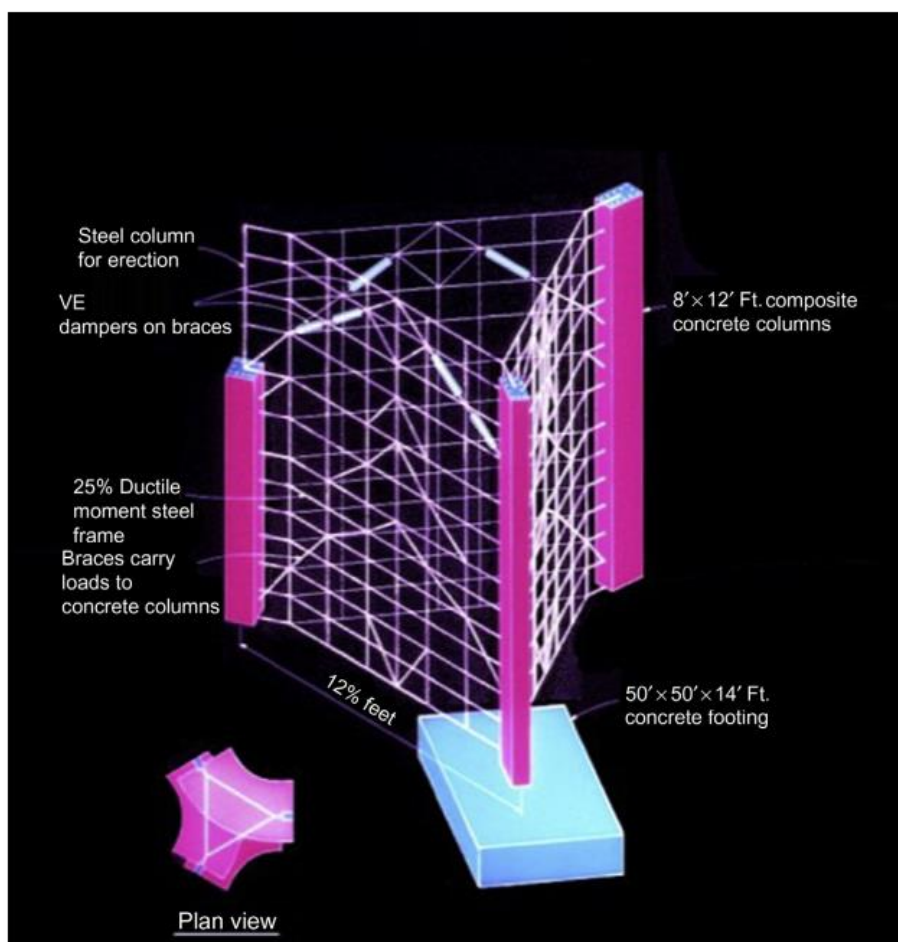
รูปที่ 2.41 อาคาร Columbia tower



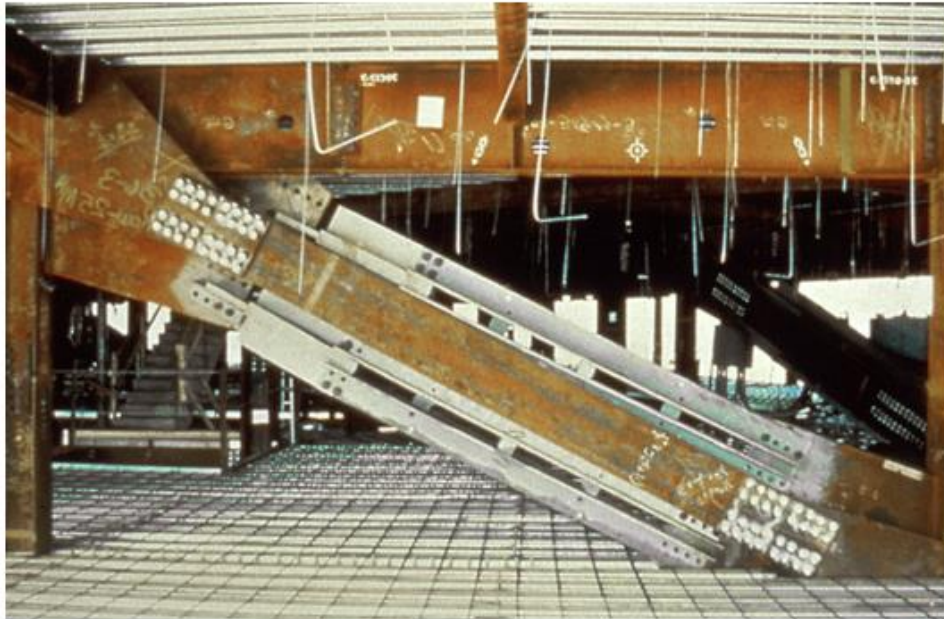
รูปที่ 2.42 Columbia tower floor plan

ตัวอาคารมีการประเมินว่ามีค่าความหน่วงอยู่ที่ 1% ซึ่งไม่เพียงพอต่อการต้านแรงลมซึ่งผลจากอุโมงค์ลมพบว่าต้องการความหน่วงอยู่ที่ 3.5% จึงมีการเลือกใช้ VE dampers ในการเพิ่มความหน่วงของอาคาร เนื่องจากเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในแง่ของความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับการเพิ่มขนาดเสา และข้อจำกัดด้านพื้นที่

VE dampers จำนวน 260 ตัวได้ติดตั้งกับโครงเหล็กต้านทานแรงด้านข้างโดยมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็ก 3 ชั้นประกบกับตัววัสดุ viscoelastic จากบริษัท 3M ซึ่งสามารถเพิ่มความหน่วงของตัวอาคาร ด้วยค่าก่อสร้างของ dampers ที่ไม่ถึง 0.5% ของค่าก่อสร้างอาคาร และไม่จำเป็นต้องมีค่าบำรุงรักษาอีกด้วย



รูปที่ 2.43 ตำแหน่งการติดตั้ง VE dampers ในตัวอาคาร



รูปที่ 2.44 ภาพการติดตั้งจริงของตัว VE dampers ในตัวอาคาร

### 2.7.2 Two union square

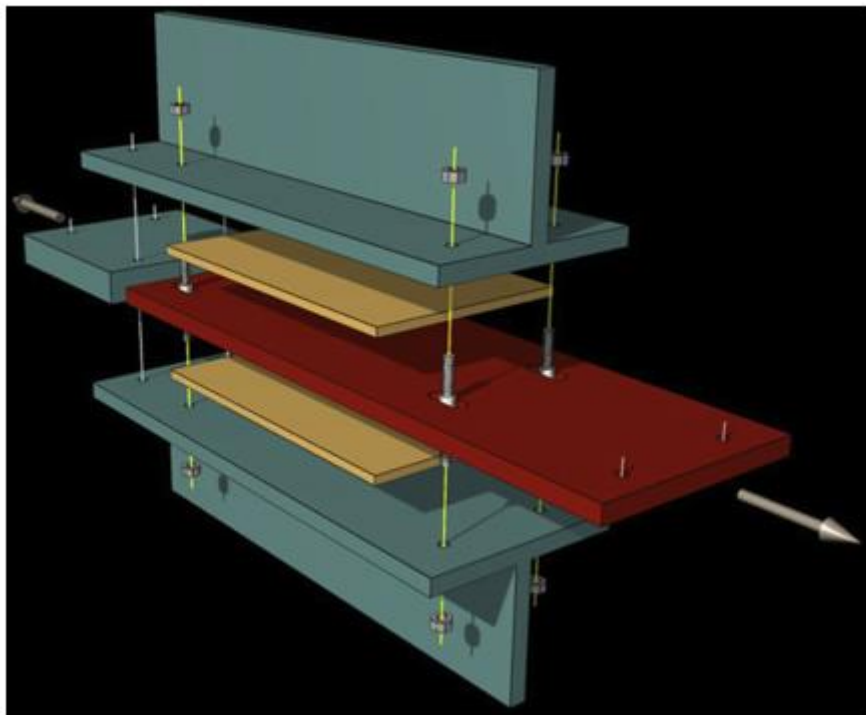
Two union square เป็นอาคารสำนักงานจำนวน 56 ชั้นด้วยความสูง 222.5 ม. เป็นโครงการก่อสร้างที่ได้รับรางวัลว่าเป็นอาคารสูงที่สุดที่ใช้ขังการก่อสร้างประหยัดที่สุดเท่าที่เคยก่อสร้างมา โดยโครงสร้างที่ใช้เป็นโครงสร้างเหล็กประกอบด้วยคอนกรีตกำลังสูง (131 Mpa)



รูปที่ 2.45 อาคาร Two Union Square

ตัวอาคารมีการประเมินว่ามีค่าความหน่วงอยู่ที่ 1% ซึ่งไม่เพียงพอต่อการต้านแรงลมซึ่งผลจากอุโมงค์ลมพบว่าต้องการความหน่วงอยู่ที่ 2.5% จึงมีการเลือกใช้ VE dampers ในการเพิ่มความหน่วงของอาคาร เนื่องจากเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในแง่ของความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับการเพิ่มขนาดเสา และข้อจำกัดด้านพื้นที่ และมีตัวอย่างที่ประสบความสำเร็จในการใช้งานมาแล้ว (Columbia tower)

VE dampers ประสิทธิภาพสูง จำนวน 16 ตัวได้ติดตั้งระหว่าง outrigger และเสาของตัวอาคารโดยมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็ก 3 ชั้นประกบกับตัววัสดุ viscoelastic จากบริษัท 3M ซึ่งประสบความสำเร็จในการเพิ่มความหน่วงของตัวอาคารด้วยต้นทุนของ dampers ที่ไม่ถึง 0.25% ของค่าก่อสร้างอาคาร และยังสามารถลดเวลาการก่อสร้างและค่าก่อสร้างได้ถึง 36% เมื่อเทียบกับการก่อสร้างที่ไม่ติดตั้ง VE dampers อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีค่าการบำรุงการก่อสร้างอีกด้วย



รูปที่ 2.46 ลักษณะ VE dampers ที่ติดตั้งในอาคาร Two union square

โดยสรุปแล้ว VE dampers นั้นประสบความสำเร็จในการปรับปรุงสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวในอาคารให้ดีขึ้น ทั้งในอาคารคอนกรีตและโครงสร้างเหล็ก ถึงแม้ในประเทศไทยนั้นจะยังไม่พบการเลือกใช้อุปกรณ์ตัวหน่วงชนิดนี้ในการติดตั้งในอาคารเพื่อลดผลกระทบจากแผ่นดินไหว แต่ก็ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ซึ่งหลายอาคารก็พบว่าให้ประสิทธิภาพได้ดีและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเสริมกำลังแบบอื่นดังที่กล่าวไปข้างต้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านการออกแบบติดตั้งและราคาที่สูงมากเมื่อต้องนำเข้าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ เราอาจแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการพัฒนาออกแบบ VE dampers ในรูปแบบของผนังและทำการทดสอบวัสดุวัสดุศาสตร์ชนิดอื่นที่มีราคาถูกลง เพื่อเป็นวัสดุตัวเลือกในการลดต้นทุนการผลิต แต่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการสลายพลังงานได้อย่างเหมาะสม



### บทที่ 3

#### การพัฒนาและออกแบบผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก

การทดสอบคุณสมบัติของยางมะตอยเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสติฟเนสเทียบเท่า (Equivalent stiffness) ของยางมะตอยเมื่อถูกใช้เป็นตัววัสดุตัวเลือกในตัวยางสลายพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการประมาณความหน่วงที่ใช้ในโมเดลทางคณิตศาสตร์ของ Viscoelastic damper

#### 3.1 การทดสอบเบื้องต้นของวัสดุ Asphalt

ยางมะตอย (Asphalt Cement) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นยางมะตอยเกรด AC60-70 ซึ่งเป็นยางมะตอยที่หาซื้อและใช้กันทั่วไปในงานก่อสร้าง เป็นผลิตภัณฑ์ส่วนที่หนักที่สุดที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมมีลักษณะสีดำ มีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก ซึ่งเกรด 60-70 นั้นบ่งบอกถึงค่าความแข็งของตัวยางมะตอย หากค่ายิ่งน้อยแปลว่ายางมะตอยนั้นมีความแข็งที่มากโดยมีคุณลักษณะที่กำหนดดังนี้

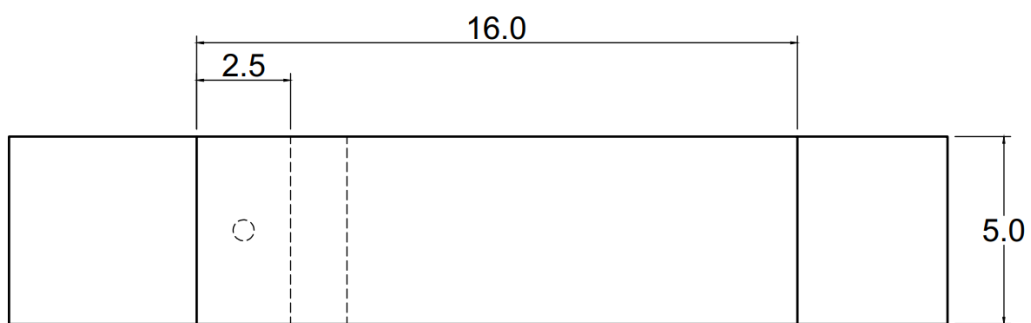
#### ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของ Asphalt เกรด AC60-70

คุณลักษณะที่ต้องการ	หน่วย	มาตรฐานที่กำหนด
1. Penetration ที่ 25°C น้ำหนักกด 100 g เวลา 5 วินาที	0.1mm	60-70
2. Softening Point ไม่น้อยกว่า	°C	44-55
3. จุดวาบไฟ ไม่น้อยกว่า	°C	232
4. การละลายใน Trichloroethylene ไม่น้อยกว่า	cm	99
5. การยืดตัว (Ductility) ที่ 25°C อัตราความเร็ว ของเครื่องดึง 5 cm/นาที ไม่น้อยกว่า	cm	100
<u>กากที่เหลือจากการอบ</u>		
6. น้ำหนักสูญหายไปเมื่อให้ความร้อน ไม่เกิน	%	0.8
7. Penetration ร้อยละของ Penetration เดิม ไม่น้อยกว่า	%	54
8. การยืดตัว (Ductility) ที่ 25°C อัตราความเร็ว ของเครื่องดึง 5 cm/นาที ไม่น้อยกว่า	cm	50



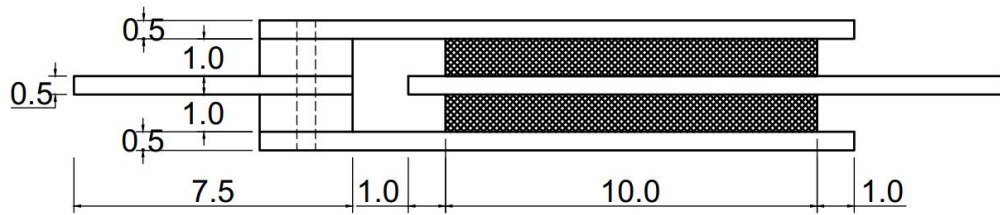
รูปที่ 3.1 Asphalt สำเร็จรูปเกรด AC60/70

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในการหาค่าความแข็งเทียบเท่า (Equivalent stiffness) เป็นแผ่นเหล็กเกรด A36 ขนาดกว้าง 5 ซม. ยาว 16 ซม. และมีความหนา 0.5 ซม. จำนวน 3 แผ่นประกบกับยางมะตอยยาว 10 ซม. ความหนา 1 ซม. โดยเจาะรูสำหรับขันยึดสลักเกลียว ไว้ที่ปลายด้านหนึ่งกับแผ่นเหล็กขนาด กว้าง 5 ซม. ยาว 7.5 ซม. และมีความหนา 1 ซม. ดังรูป



รูปที่ 3.2 มุมมองด้านบนของตัวอย่างทดสอบ (unit : cm)





รูปที่ 3.3 มุมมองด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ (unit : cm)

แผ่นเหล็กทั้ง 3 จะถูกประกอบด้วยสลักเกลียว M16 ที่ปลายด้านที่จะนำไปยึดจับกับเครื่องทดสอบ Amsler ขนาด 20 ตัน โดยจะทำการประกอบตัวอย่างทดสอบและทำแบบไว้สำหรับเตรียมพร้อมสำหรับการเทียงมะตอยดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 โครงตัวอย่างทดสอบสำหรับการเทียงมะตอย

สำหรับยางมะตอยจะทำการอุ่นร้อนที่อุณหภูมิ 200°C เพื่อให้เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว แล้วจึงนำมาเทในตัวอย่างทดสอบแล้วนำไปแช่น้ำแข็งทันทีเพื่อให้เปลี่ยนเป็นสถานะของแข็งอีกครั้ง



รูปที่ 3.5 การเทยางมะตอยอุ่นร้อนในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างทดสอบแช่น้ำแข็ง

### 3.1.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง กับค่าการขจัด (displacement) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสติฟเนสเทียบเท่า (Equivalent stiffness) การทดสอบจะใช้เครื่อง Amsler 20 tons ในการให้แรงโดยจะอ่านค่าแรงจากมาตรอ่านหน้าปัดบนเครื่อง และติดอุปกรณ์วัดค่าการขจัด (LVDT) เพื่อใช้วัดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ แล้วทำการวัดอุณหภูมิของตัวอย่างมาตอยก่อนให้แรงเพื่อเป็นตัวแปรควบคุม



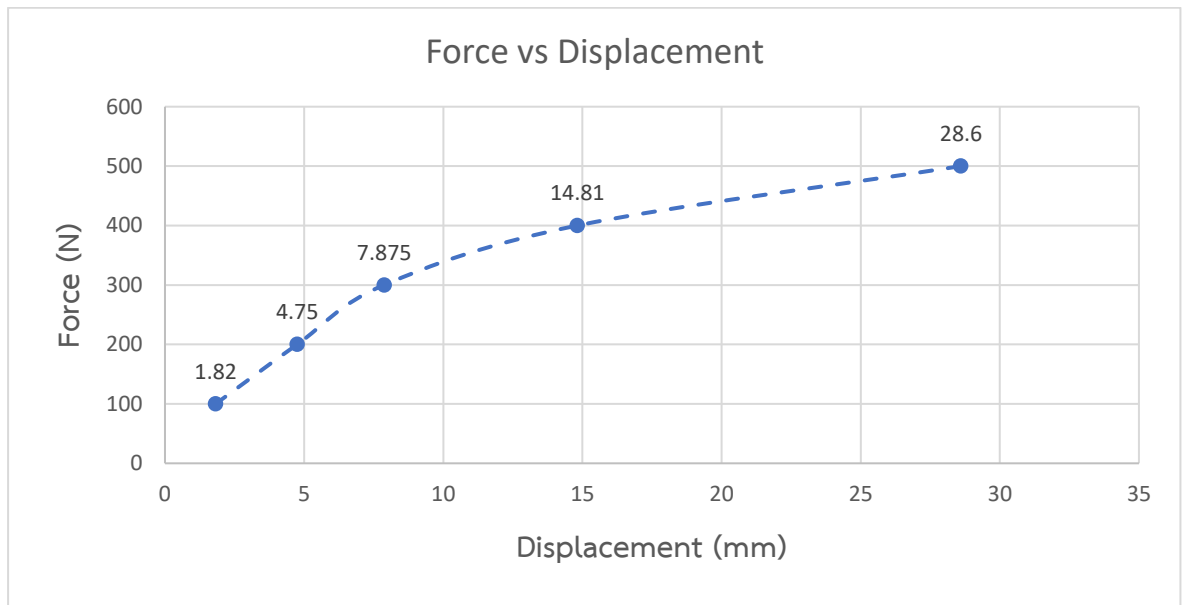
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดการขจัด LVDT



รูปที่ 3.8 เครื่อง Amsler ขนาด 20 tons

### 3.1.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเมื่อได้ค่า load จากเครื่อง Amsler และค่าการขจัดจากอุปกรณ์ LVDT ที่อุณหภูมิ 25°C จะสามารถนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเคลื่อนที่





รูปที่ 3.10 ยางมะตอยหลังการทดสอบด้วยเครื่อง Amsler

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.1.3 สรุปผลการทดสอบ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาถึงผลของความชันในช่วงแรกของการทดสอบ (ที่แรงน้อยกว่า 300 N) จะพบว่า มีลักษณะที่ค่อนข้างจะคงที่หรือยังอยู่ในช่วงที่ยังไม่ผ่านจุดครากของตัววัสดุ จึงนำผลการทดลองในช่วงนี้มาคำนวณหาค่าสตีเฟนเทียบเท่า ซึ่งจากการหาค่าความชันในช่วงนี้ซึ่งได้ผลเท่ากับ 37.37 kN/m แล้วทำการคำนวณย้อนกลับไปหาค่า Storage modulus ตามสูตรการคำนวณสมการ (4) จะได้ค่า Storage modulus ของยางมะตอยอยู่ที่ 0.019 MPa ซึ่งพบว่า มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Storage modulus ที่ได้จากวัสดุวิสโคอิลาสติกของผลิตภัณฑ์ 3M ที่มีค่าเท่ากับ 0.88 MPa ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า มีผลที่แตกต่างกันอย่างมาก (46 เท่า)

จากผลการทดสอบพบว่ายางมะตอยเกรด AC60/70 นั้นอาจมีประสิทธิภาพต่ำที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุวิ斯科อิลาสติกแทนที่ผลิตภัณฑ์จาก 3M เนื่องจากยังมีค่าความแข็ง และค่า Storage modulus ที่น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ และเนื่องจากตัวอย่างยางมะตอยเกรด AC60/70 ที่อุณหภูมิห้อง มีความแข็งที่ไม่มากเพียงพอทำให้เมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งจะพบพฤติกรรมที่อ่อนเหลวและไม่สามารถยึดเกาะตัวกับแผ่นเหล็กที่มากเพียงพอต่อการใช้งานในระยะยาว หากต้องการนำมาใช้งานจริงต้องทำการใส่สารผสมอื่นเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติความเป็นของแข็งขึ้น หรือทำการเปลี่ยนวัสดุวิ斯科อิลาสติกเป็นตัวเลือกอื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีมากกว่าซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณา Polyisobutene หรือ PIB ที่มีค่าโมดูลัสสูงที่ต่ำกว่าแต่ก็มีราคาที่สูงกว่าเช่นกัน

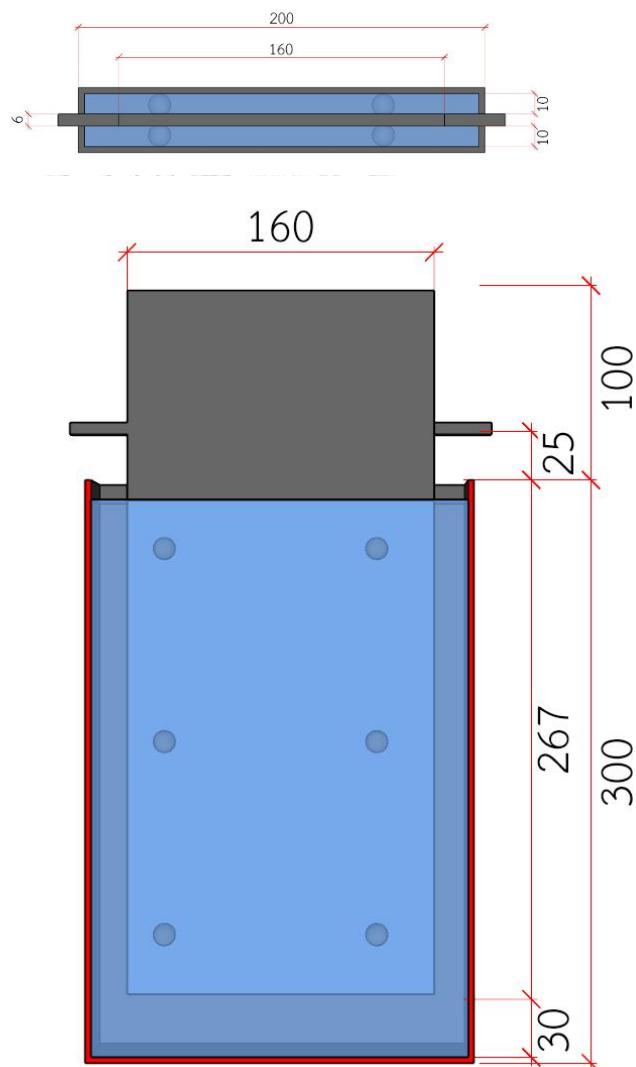


**รูปที่ 3.11** สภาพการอ่อนเหลวของยางมะตอยเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน

อย่างไรก็ดีรูปแบบของผนังสลายพลังงานที่พัฒนาขึ้น มีลักษณะเป็นห้องปิดทำให้ของเหลวที่ใช้ไม่สามารถไหลออกจากห้องปิดได้และคุณสมบัติ loss modulus ที่เป็นคุณสมบัติหลักที่ใช้ในการสลายพลังงานของ Asphalt ยังไม่ได้ทำการทดสอบ การประยุกต์ใช้ Asphalt จึงยังมีความเป็นไปได้ แม้ว่าอาจมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นในตลาด แต่ด้วยราคาวัสดุที่ถูกกว่าจึงอาจชดเชยได้ด้วยการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากกว่าปกติได้ ดังจะได้ทำการศึกษารายละเอียดต่อไป

### 3.2 ตัวห่วงสลายพลังงานรูปแบบผนังสลายพลังงานวิสโคอิลาสติก

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวห่วงสลายพลังงานที่ถูกพัฒนาขึ้นมาอยู่ในรูปแบบย่อยส่วนของกำแพง โดยมีลักษณะเป็นแบบย่อยส่วนขนาด 30x20x3.2 ซม. ประกอบไปด้วยสองส่วนคือกล่องที่บรรจุวัสดุวิสโคอิลาสติกไว้ภายใน และแผ่นเหล็กระหว่างกลางที่สามารถขยับขึ้นลงได้ ดังรูปที่ 3.12 ผนังสลายพลังงานที่ศึกษาพัฒนานี้ เลือกใช้วัสดุวิสโคอิลาสติก 2 ชนิดได้แก่ ยางมะตอยและ Polyisobutene (PIB) โดยยางมะตอยที่ศึกษาทดสอบเกรด AC60/70 ดังรูปที่ 3.13 ส่วน PIB ที่ศึกษาจะเป็นเกรดความหนืดสูง PIB-HV และความหนืดปานกลาง PIB-MV ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวกึ่งแข็งใสดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.12 แบบย่อยส่วนของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก (unit : cm)



รูปที่ 3.13 Asphalt สำเร็จรูปเกรด AC60/70



รูปที่ 3.14 วัสดุวิสโคอิลาสติก PIB

### 3.2.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบอุปกรณ์ความหน่วงแบบวิสโคอิลาสติกจะทำการทดสอบแบบวัฏจักร โดยยึดรูปแบบการทดสอบตามมาตรฐานของ ASCE 7-16 ขนาดการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาได้จากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้นของอาคารด้วยค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ( $MCE_R$ ) โดยจะทำการทดสอบด้วย Fully reversed sinusoidal cycle ด้วยความถี่ของการทดสอบเท่ากับ  $1/(1.5T)$  โดย  $T$  คือคาบของโหมดการเคลื่อนที่หลักของอาคารที่พิจารณาซึ่งในการศึกษานี้สมมติ  $T = 7.77$  s และมีลำดับการทดสอบดังนี้

- 10 รอบการเคลื่อนที่ด้วยขนาดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.33 เท่าของ ( $MCE_R$ )
- 5 รอบการเคลื่อนที่ด้วยขนาดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.67 เท่าของ ( $MCE_R$ )
- 3 รอบการเคลื่อนที่ด้วยขนาดการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.0 เท่าของ ( $MCE_R$ )



และในด้านของแรงลม ASCE 7-16 ได้ระบุให้ทดสอบที่ขนาดการเคลื่อนที่ของอาคารที่วิเคราะห์ได้จากแรงลมด้วย Fully reversed sinusoidal cycle ที่จำนวนรอบไม่น้อยกว่า 2,000 รอบที่ความถี่เท่ากับ  $1/T$  โดยสำหรับอุปกรณ์ความหน่วงต้องทดสอบที่อุณหภูมิต่างกันอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ

การทดสอบจะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่เกิดขึ้นของตัวผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก โดยใช้เครื่องทดสอบแบบวัฏจักรขนาด 20 ตัน (Servopulser) ในการควบคุมการเคลื่อนที่และความถี่ที่กำหนด โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบตามค่าผลตอบสนองของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งจากแบบจำลองอาคารตัวอย่างด้วย ETABS ดังอภิปรายในบทที่ 4.1 ทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขการทดสอบผนังสลายพลังงานเมื่อพิจารณาด้านแผ่นดินไหวและแรงลม ดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ ทั้งนี้การทดสอบจะทำที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35°C โดยใช้อุปกรณ์ STC-1000 ประกอบกับเตาไฟฟ้าในการควบคุมอุณหภูมิ

**ตารางที่ 3.2** เงื่อนไขการทดสอบกรณีแผ่นดินไหว

Level	Cycle (N)	Max. Disp. (cm)	Period (seconds)	Freq. (Hz)
33%	10	0.88	11.55	0.087
60%	5	1.78	11.55	0.087
100%	3	2.66	11.55	0.087

**ตารางที่ 3.3** เงื่อนไขการทดสอบกรณีแรงลม

Level	Cycle (N)	Max. Disp. (cm)	Period (seconds)	Freq. (Hz)
100%	2,000	2.4	7.77	0.129



**รูปที่ 3.15** เครื่องทดสอบแบบวัฏจักรขนาด 20 ตัน (Servopulser)



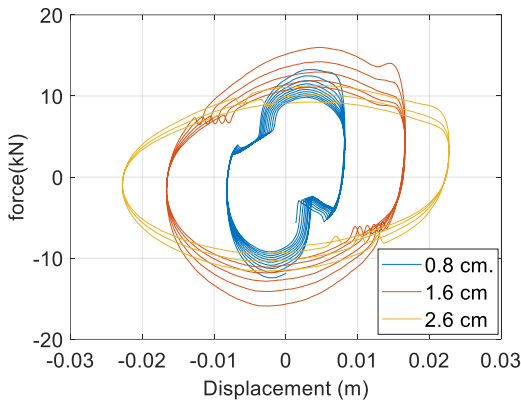
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ STC-1000



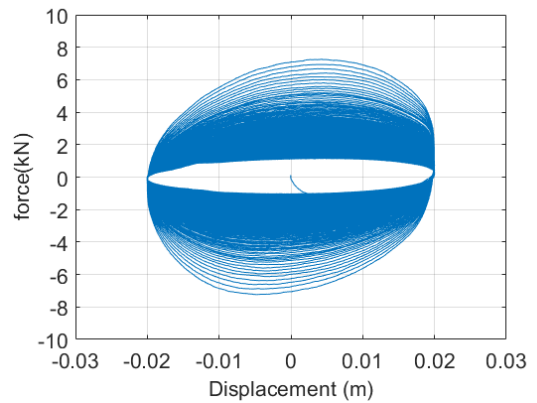
รูปที่ 3.17 การควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างย่อยส่วนของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก

### 3.2.2 ผลการทดสอบ

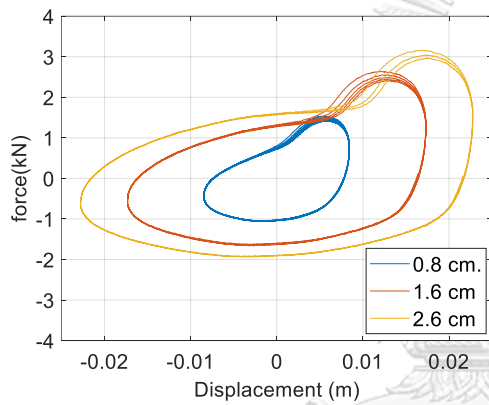
ผลการทดสอบผนังสลายพลังงานย่อยส่วนแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านจากวัสดุวิสโคอิลาสติกกับการเคลื่อนที่ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยขนาดพื้นที่ภายในวงรอบจะสะท้อนถึงอัตรา การสลายพลังงานผนังตัวอย่าง รูปที่ 3.18-3.23 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 25°C รูปที่ 3.24-3.29 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 30°C และรูปที่ 3.30-3.35 แสดง ตัวอย่างผลการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 35°C สำหรับกรณีของวัสดุยางมะตอย และ PIB ทั้ง PIB-MV และ PIB-HV ตามเงื่อนไขการทดสอบด้านแผ่นดินไหวและแรงลมตามมาตรฐาน ASCE7-16



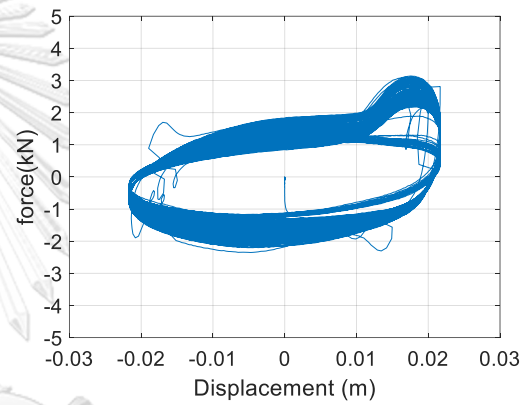
รูปที่ 3.18 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย:  
แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 25°C



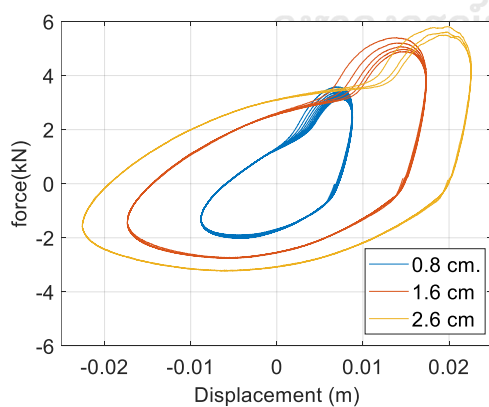
รูปที่ 3.21 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย:  
แรงลม ที่อุณหภูมิ 25°C



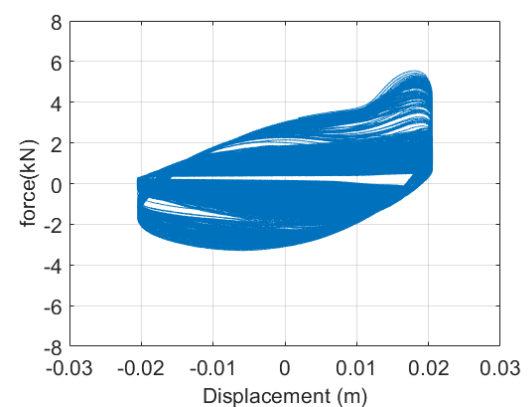
รูปที่ 3.19 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรง  
แผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 25°C



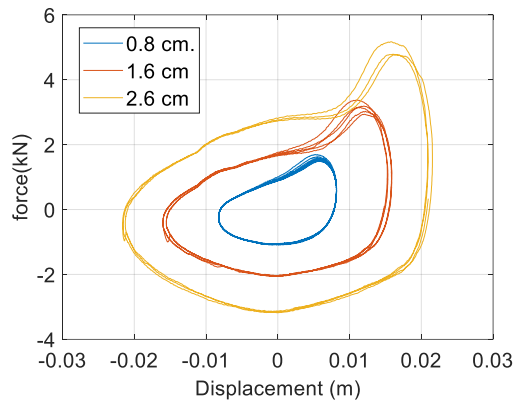
รูปที่ 3.22 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV:  
แรงลม ที่อุณหภูมิ 25°C



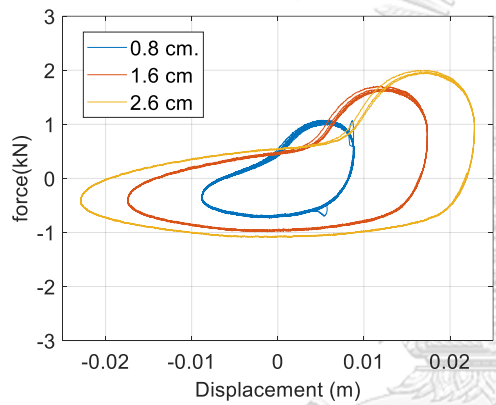
รูปที่ 3.20 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรง  
แผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 25°C



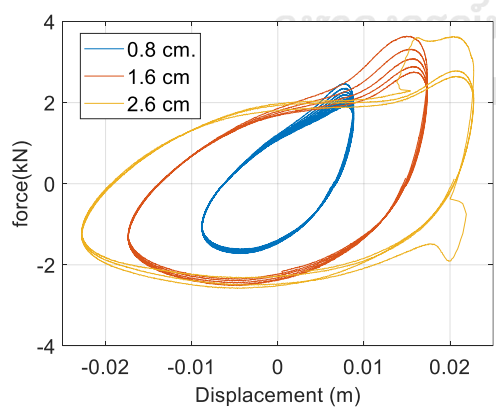
รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV:  
แรงลมที่อุณหภูมิ 25°C



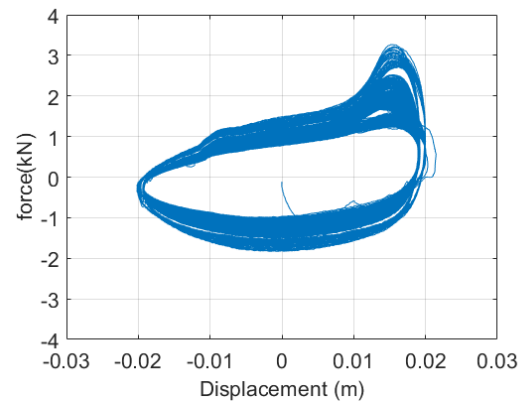
รูปที่ 3.24 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย:  
แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 30°C



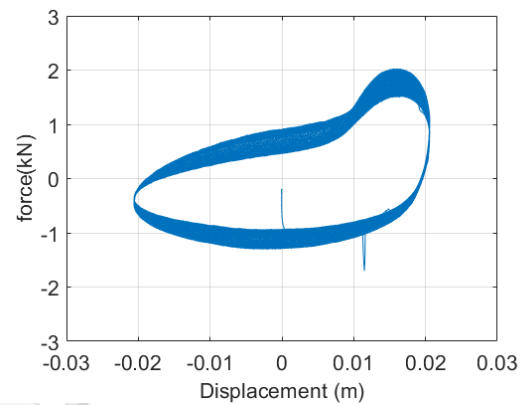
รูปที่ 3.25 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรง  
แผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 30°C



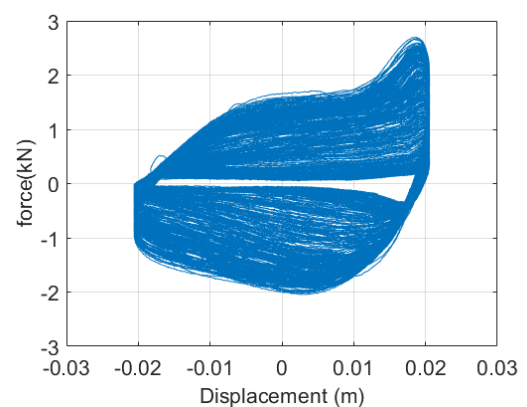
รูปที่ 3.26 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรง  
แผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 30°C



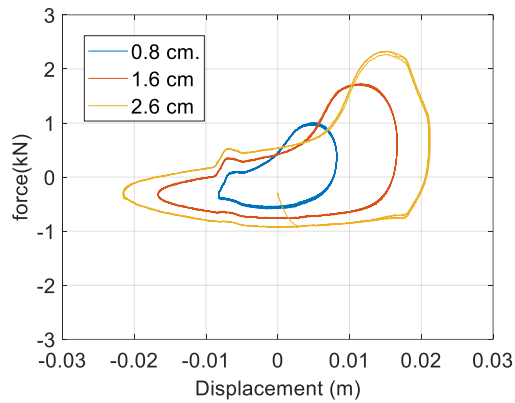
รูปที่ 3.27 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย:  
แรงลม ที่อุณหภูมิ 30°C



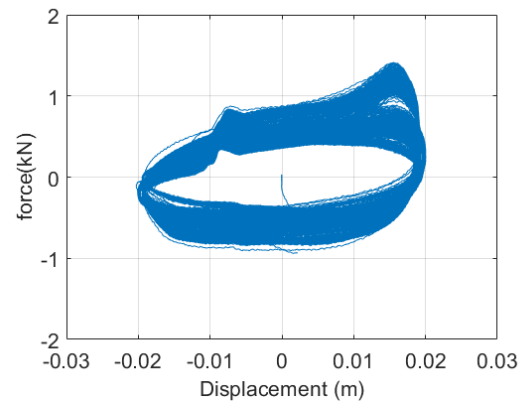
รูปที่ 3.28 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV:  
แรงลม ที่อุณหภูมิ 30°C



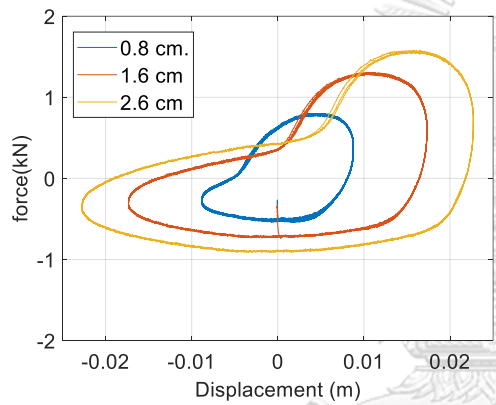
รูปที่ 3.29 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV:  
แรงลมที่อุณหภูมิ 30°C



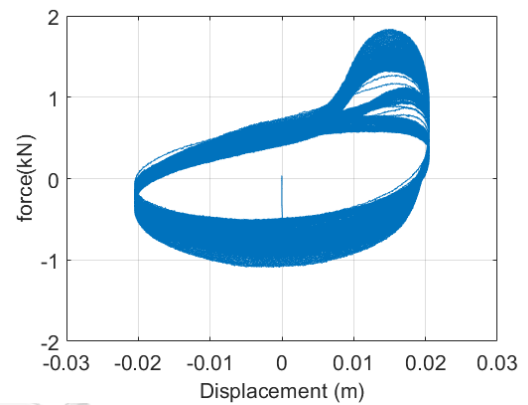
รูปที่ 3.30 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย:  
แรงแผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 35°C



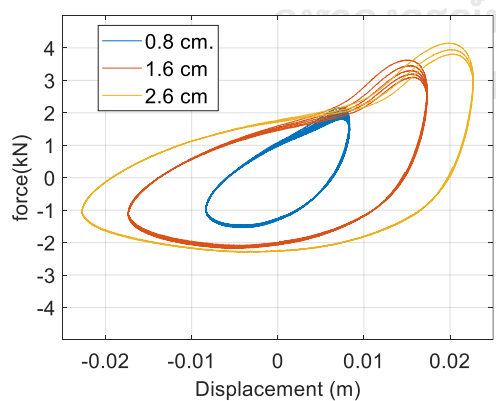
รูปที่ 3.33 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย:  
แรงลม ที่อุณหภูมิ 35°C



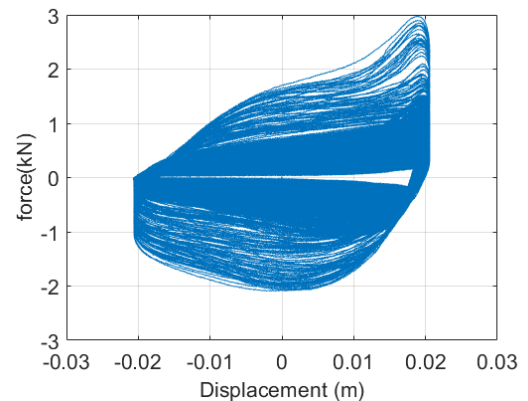
รูปที่ 3.31 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรง  
แผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 3.34 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV:  
แรงลม ที่อุณหภูมิ 35°C



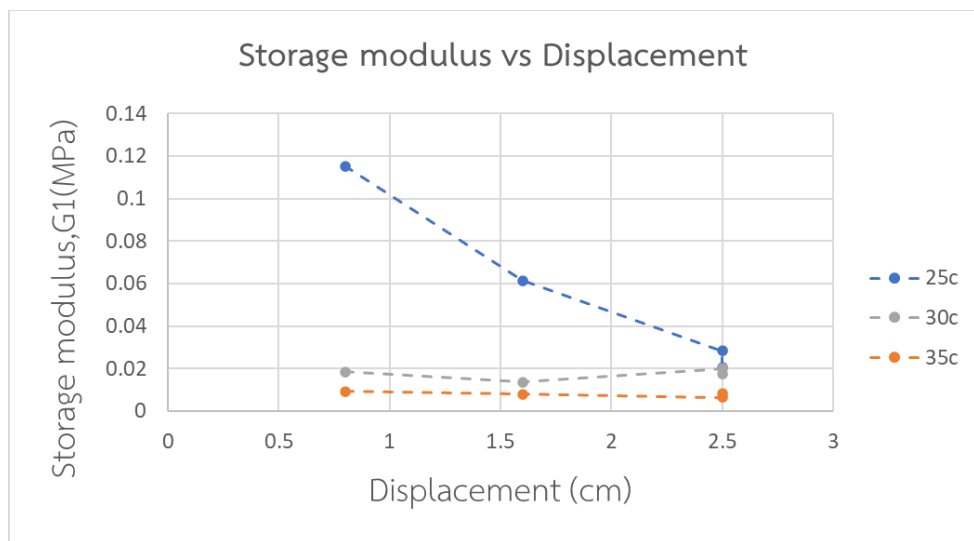
รูปที่ 3.32 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรง  
แผ่นดินไหว ที่อุณหภูมิ 35°C



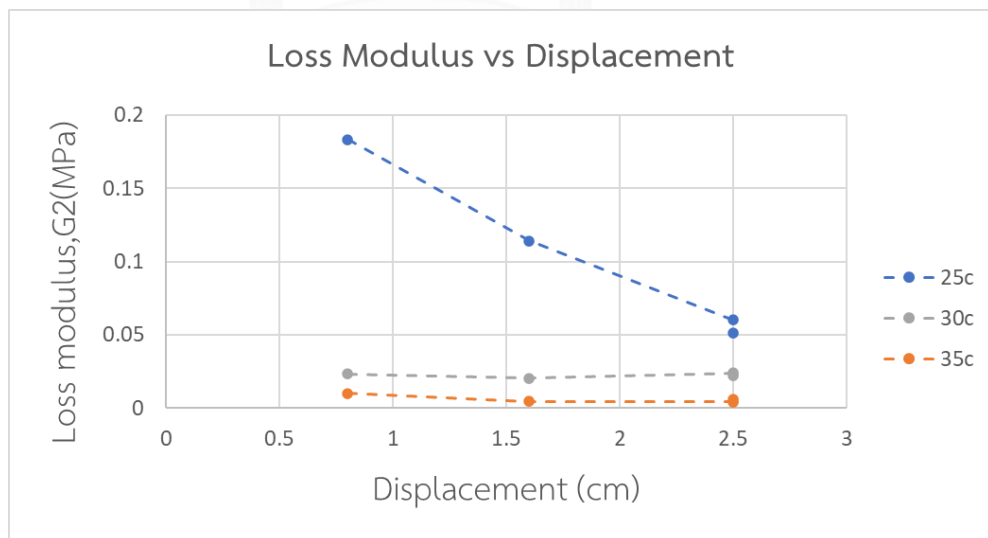
รูปที่ 3.35 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV:  
แรงลมที่อุณหภูมิ 35°C

### 3.2.3 ประสิทธิภาพการสลายพลังงาน

จากผลการทดสอบผนังสลายพลังงานย่อส่วนในห้องปฏิบัติการจะสามารถคำนวณหาค่า Storage modulus ( $G_1$ ) และ Loss Modulus ( $G_2$ ) ของผนังที่ใช้วัสดุยางมะตอยที่ความถี่ 0.27 Hz ได้ดังรูปที่ 3.36 และ 3.37 ตามลำดับ

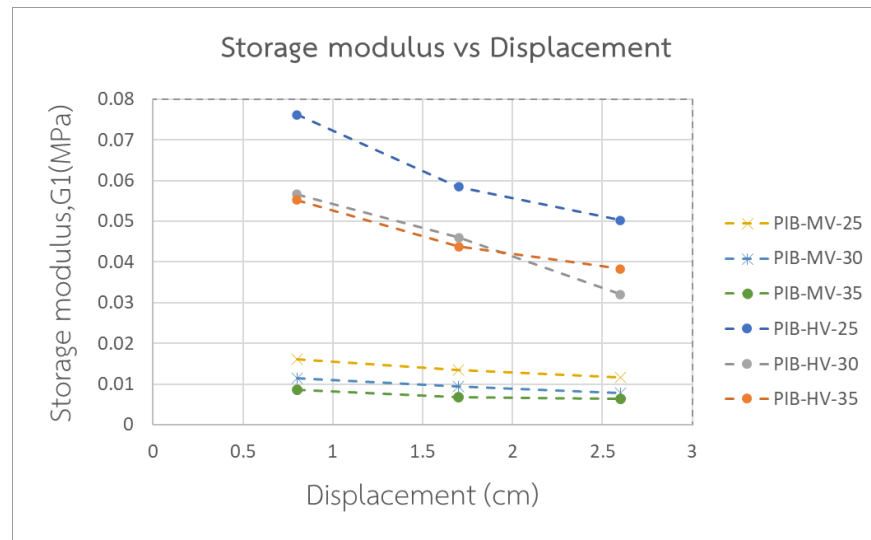


รูปที่ 3.36 Storage modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของยางมะตอย



รูปที่ 3.37 Loss modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของยางมะตอย

จากผลการทดสอบผนังสลายพลังงานย่อยส่วนในห้องปฏิบัติการจะสามารถคำนวณหาค่า Storage modulus ( $G_1$ ) และ Loss Modulus ( $G_2$ ) ของผนังที่ใช้วัสดุ PIB ที่ความถี่ 0.087 Hz ได้ดังรูปที่ 3.38 และ 3.39 ตามลำดับ

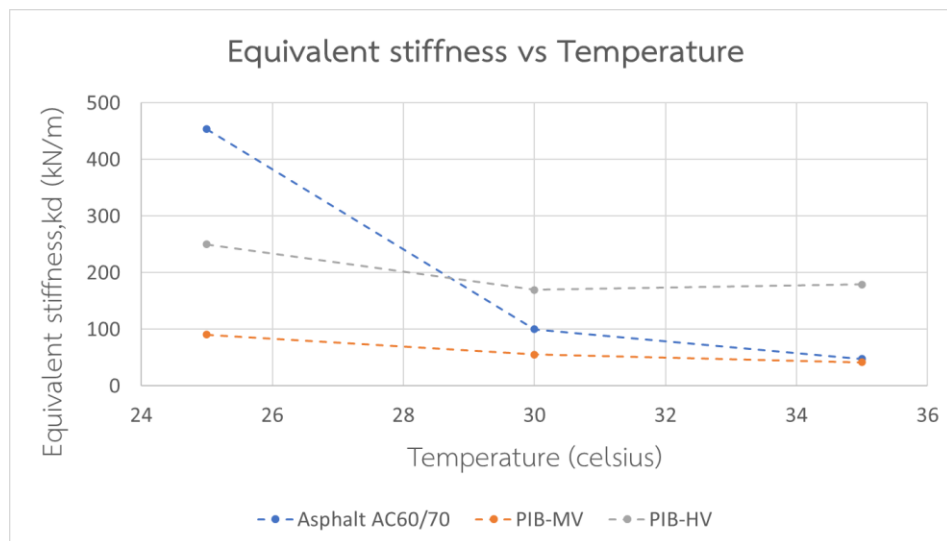


รูปที่ 3.38 Storage modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของ PIB

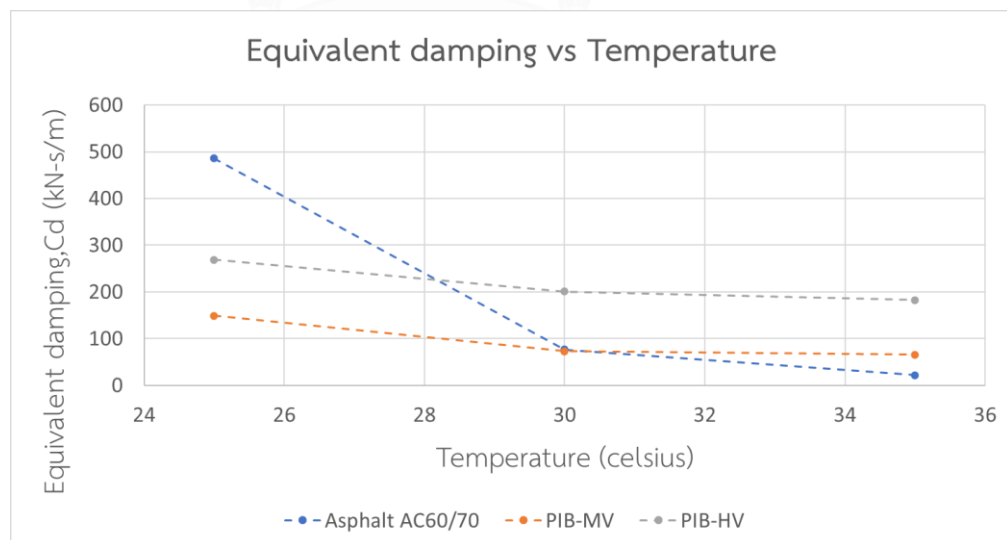


รูปที่ 3.39 Loss modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของ PIB

ค่าของ Storage modulus และ Loss modulus ที่ได้จากการทดสอบข้างต้น จะนำมาเฉลี่ยเพื่อนำไปประมาณค่า Equivalent stiffness และ Equivalent damping เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผนังสลายพลังงานแต่ละประเภท เพราะถือเป็นปัจจัยหลักบ่งบอกถึงคุณสมบัติการต้านทานการเคลื่อนที่ของผนังและความสามารถในการสลายพลังงานให้กับอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 3.40 และ 3.41 ตามลำดับ



รูปที่ 3.40 Equivalent stiffness ของผนังสลายพลังงาน



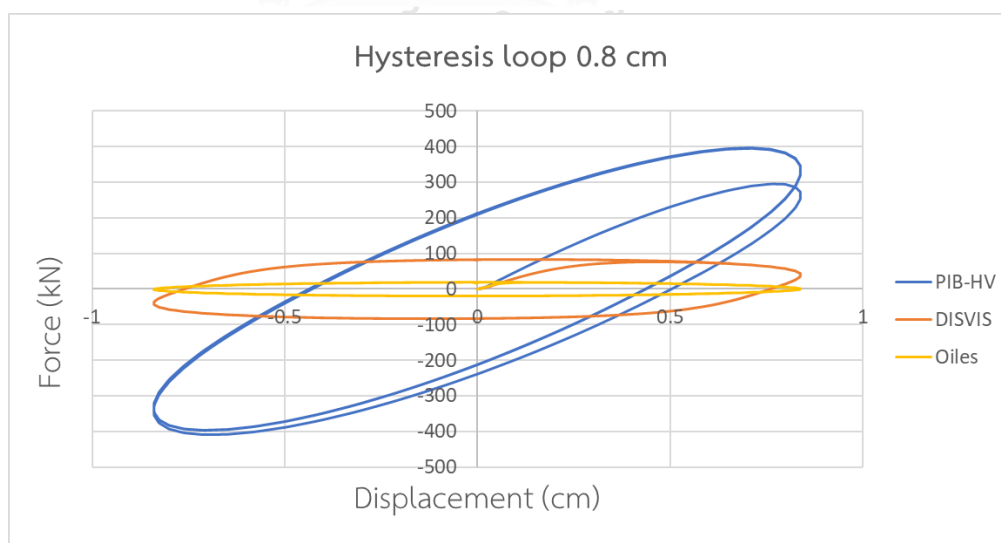
รูปที่ 3.41 Equivalent damping ของผนังสลายพลังงาน



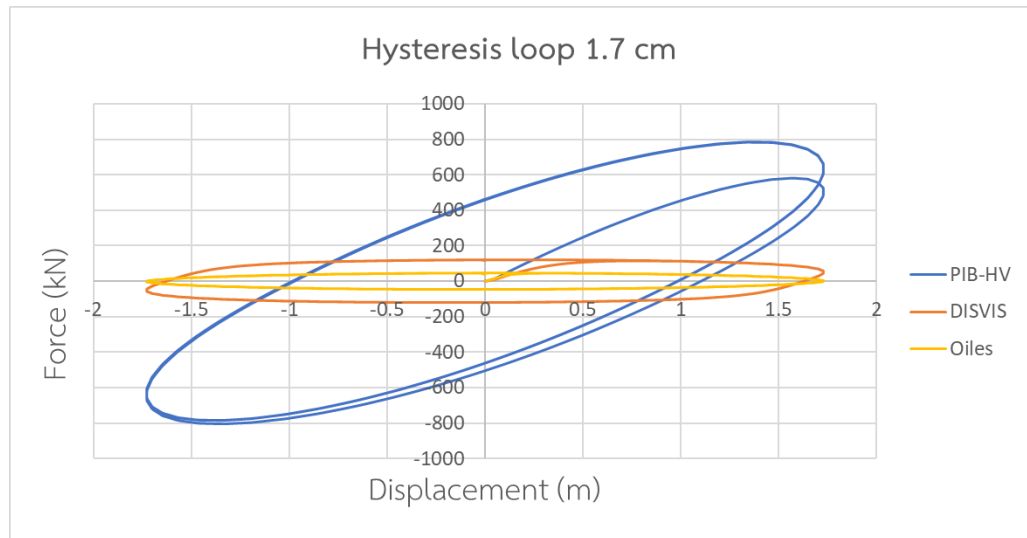
รูปที่ 3.40 แสดงให้เห็นว่าทั้งยางมะตอยและ PIB มีคุณสมบัติเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติกที่ค่อนข้างชัดเจน เพราะมีค่าสตีเฟนส์ที่มีนัยสำคัญ โดยพบว่าค่าสตีเฟนส์เทียบเท่าของยางมะตอยลดลง 500% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 25°C เป็น 35°C ในขณะที่ PIB จะมีความเสถียรกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า

ส่วนคุณสมบัติด้านการสลายพลังงานตามรูปที่ 3.41 นั้น เห็นได้ว่าถึงแม้ค่า Equivalent damping ที่ได้จากยางมะตอยจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิ 25°C แต่ก็มีค่าที่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิค่อนข้างมาก โดยพบการลดลงกว่า 500% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 35°C คล้ายกรณีของสตีเฟนส์ ในขณะที่ PIB นั้นมีเสถียรภาพที่ดีกว่า โดยหากเปรียบเทียบระหว่าง PIB-HV กับ PIB-MV ก็จะพบว่า PIB-HV มีค่า Equivalent damping ที่สูงกว่าทุกอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.80-2.25 เท่า จึงเป็นวัสดุที่ให้ประสิทธิภาพด้านการสลายพลังงานที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดในการศึกษา

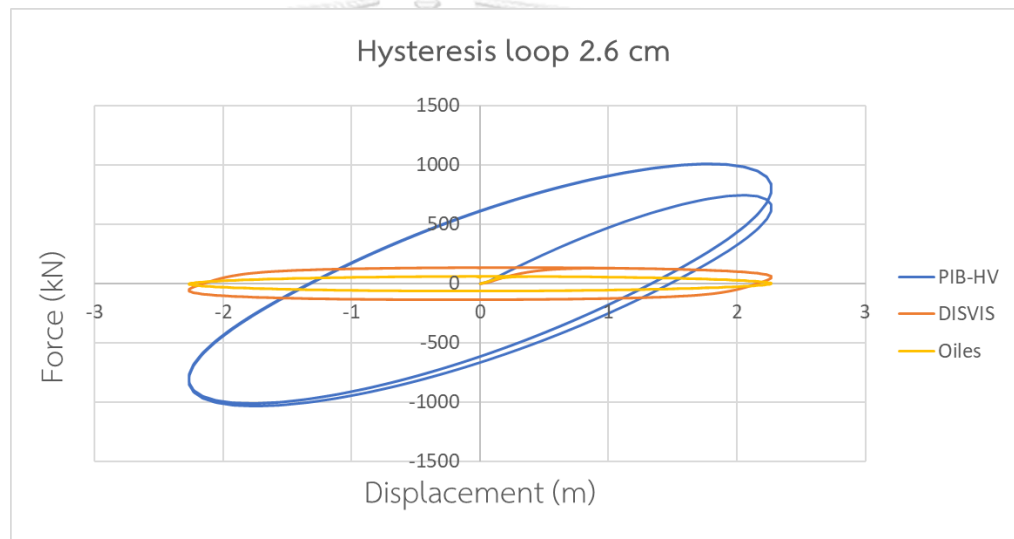
เมื่อนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานที่ใช้วัสดุ PIB-HV ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการข้างต้น ไปเปรียบเทียบกับผนังสลายพลังงานแบบ Viscous wall damper ที่มีจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกาของบริษัท DIS (Dynamic Isolation Systems, 2017) และในประเทศญี่ปุ่นของบริษัท OILES (Lu et al., 2008) โดยสมมติให้ผนังสลายพลังงานมีขนาดเท่ากับ 1,800 มม. x 2,100 มม. พบว่าผนังสลายพลังงานที่ใช้วัสดุ PIB-HV จะให้อัตราการสลายพลังงานภายใต้ระยะการเคลื่อนที่เดียวกันสูงกว่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศทั้งสองบริษัทมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.42-3.44



รูปที่ 3.42 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.8 ซม.



รูปที่ 3.43 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.7 ซม.



รูปที่ 3.44 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 2.6 ซม.

เมื่อนำค่าอัตราการสลายพลังงานในรูปของ Hysteresis area ที่ได้จากผนังทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในตารางที่ 3.4 พบว่า PIB-HV สามารถสลายพลังงานได้ดีกว่า DIS ประมาณ 2.5-4.1 เท่า และดีกว่า OILES ถึงกว่า 10 เท่า โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ DIS พบว่าความได้เปรียบเชิงประสิทธิภาพดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อผนังมีค่าระยะการเคลื่อนที่มากขึ้น

ตารางที่ 3.4 การสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานชนิดต่างๆ

Disp.	Hysteresis area (KN-m)				
	PIB-HV	DIS	ratio	OILES	ratio
0.8	5.54	2.21	2.51	0.52	10.64
1.7	24.71	6.83	3.62	2.42	10.22
2.6	43.17	10.38	4.16	4.20	10.29

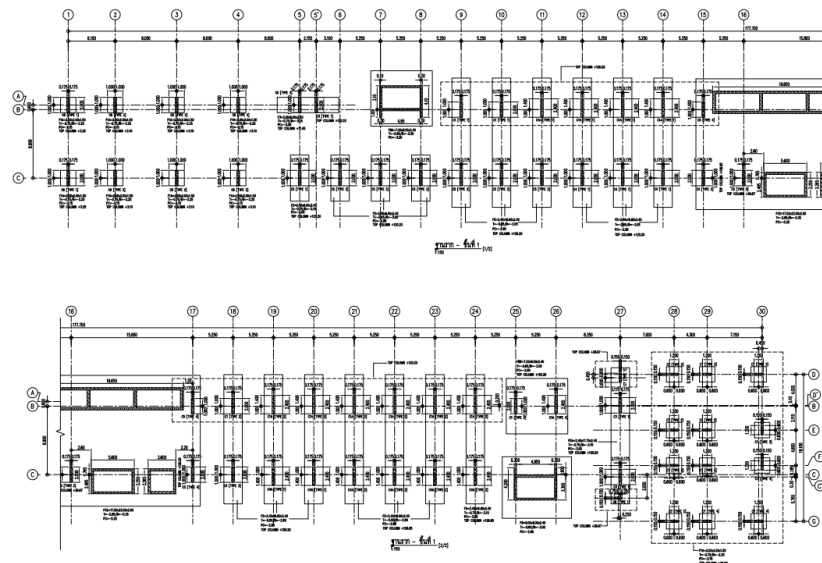


## บทที่ 4

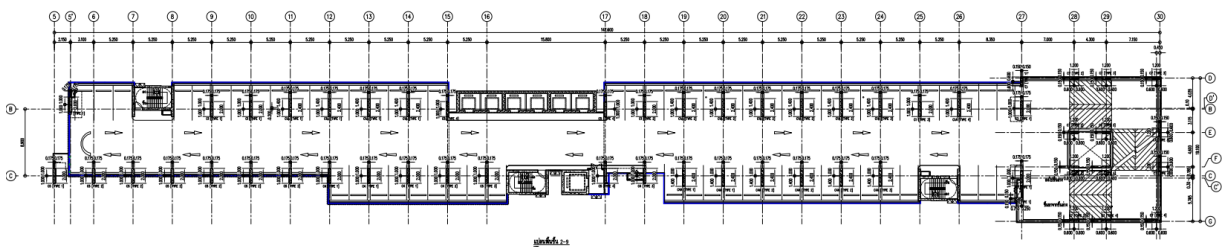
### การจำลองอาคารตัวอย่างในโปรแกรม ETABS

#### 4.1 แบบจำลองอาคารตัวอย่าง

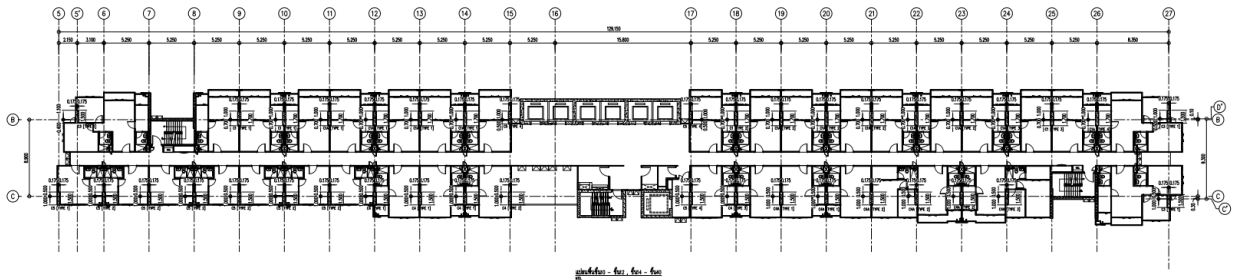
อาคารที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารที่ลักษณะเป็นอาคารชุดที่พักอาศัยสูง 127 เมตร จำนวน 41 ชั้น (ด้านล่างเป็นส่วนจอดรถจำนวน 8 ชั้น เหนือขึ้นไปเป็นส่วนพักอาศัยจำนวน 32 ชั้น) มีพื้นที่ใช้สอยรวมมากกว่า 60,000 ตารางเมตร เนื่องจากอาคารมีลักษณะชะลูดมาก ผังอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความกว้างด้านแคบเพียงประมาณ 10 เมตร เมื่อเทียบกับความสูงอาคารแล้วจึงมีสัดส่วนความชะลูดมากทำให้โครงสร้างอาคารอาจมีความอ่อนไหวในการรับแรงด้านข้างอันได้แก่ แรงลม และแรงแผ่นดินไหว มากกว่าอาคารสูงปกติ มากเป็นพิเศษ แสดงรายละเอียดตามรูปแปลงของอาคารตามรูปที่ 4.1-4.3 และรูปด้านข้างของอาคารตามรูปที่ 4.4-4.6



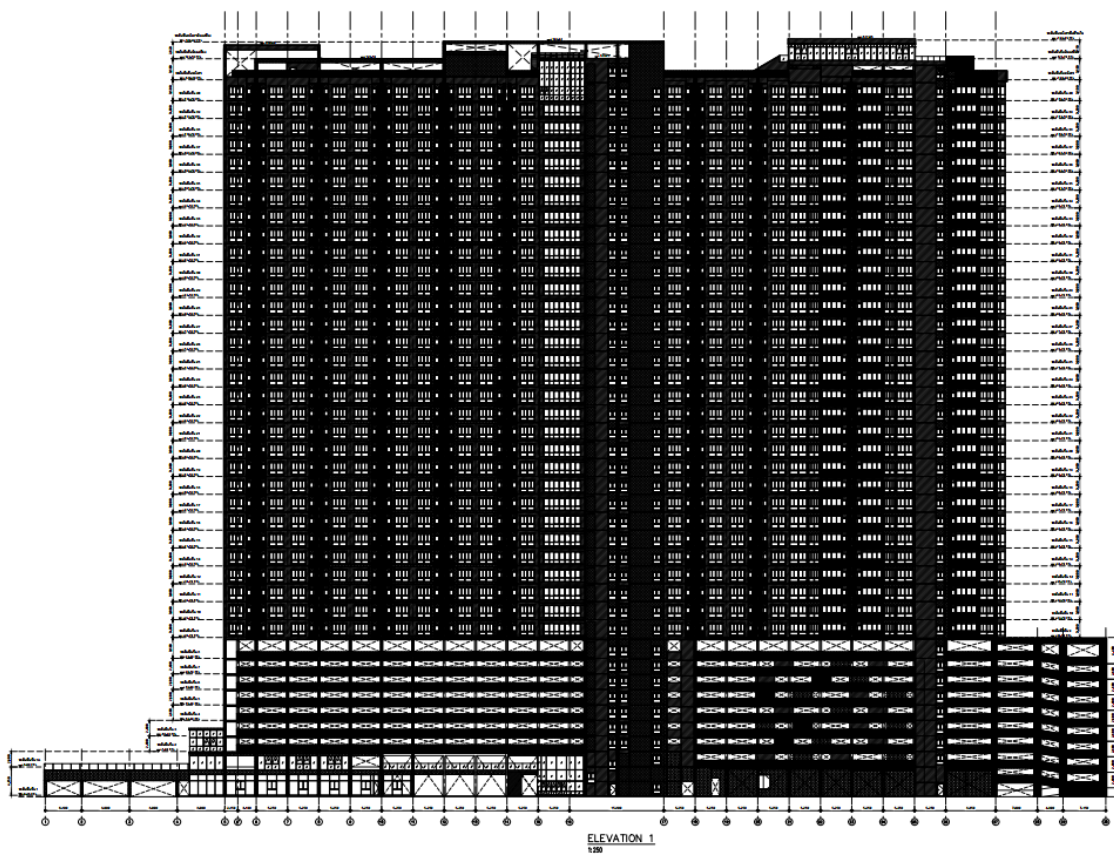
รูปที่ 4.1 แปลงอาคารชั้นฐานราก - ชั้น 1



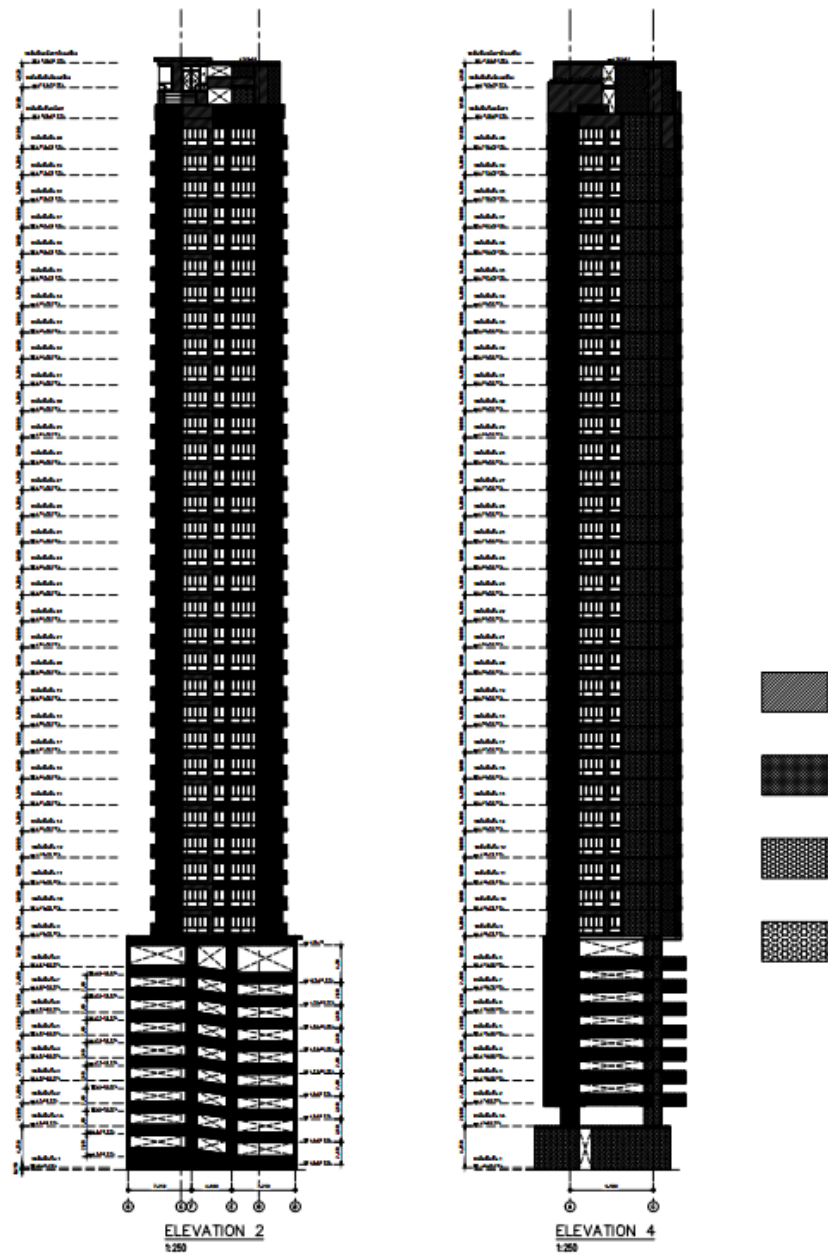
รูปที่ 4.2 แปลงอาคารชั้น 2 - ชั้น 9



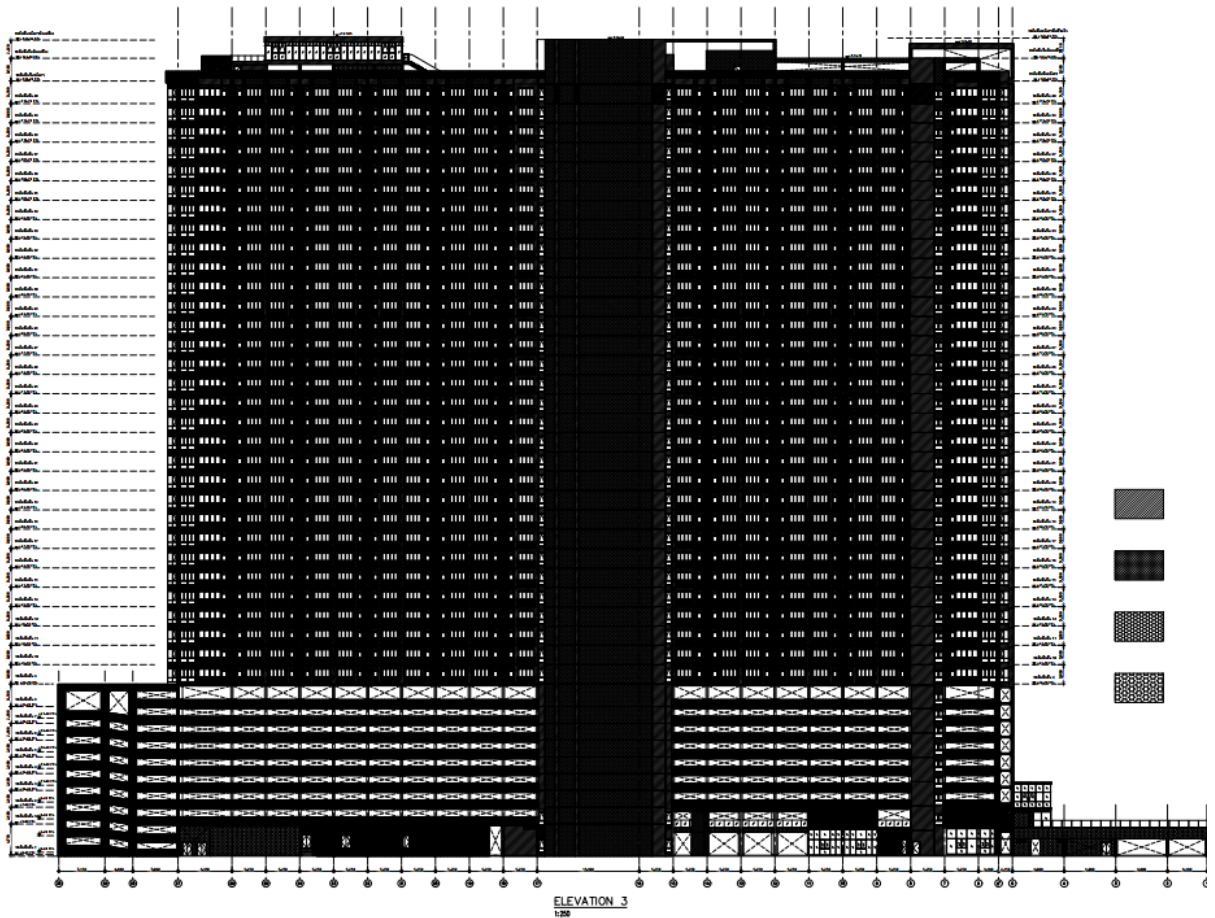
รูปที่ 4.3 แพลนอาคารชั้น 10 - ชั้น 12, ชั้น 14 - ชั้น 40



รูปที่ 4.4 ด้านข้างของอาคาร 1



รูปที่ 4.5 ด้านข้างของอาคาร 2 และ 4



รูปที่ 4.6 ด้านข้างของอาคาร 3

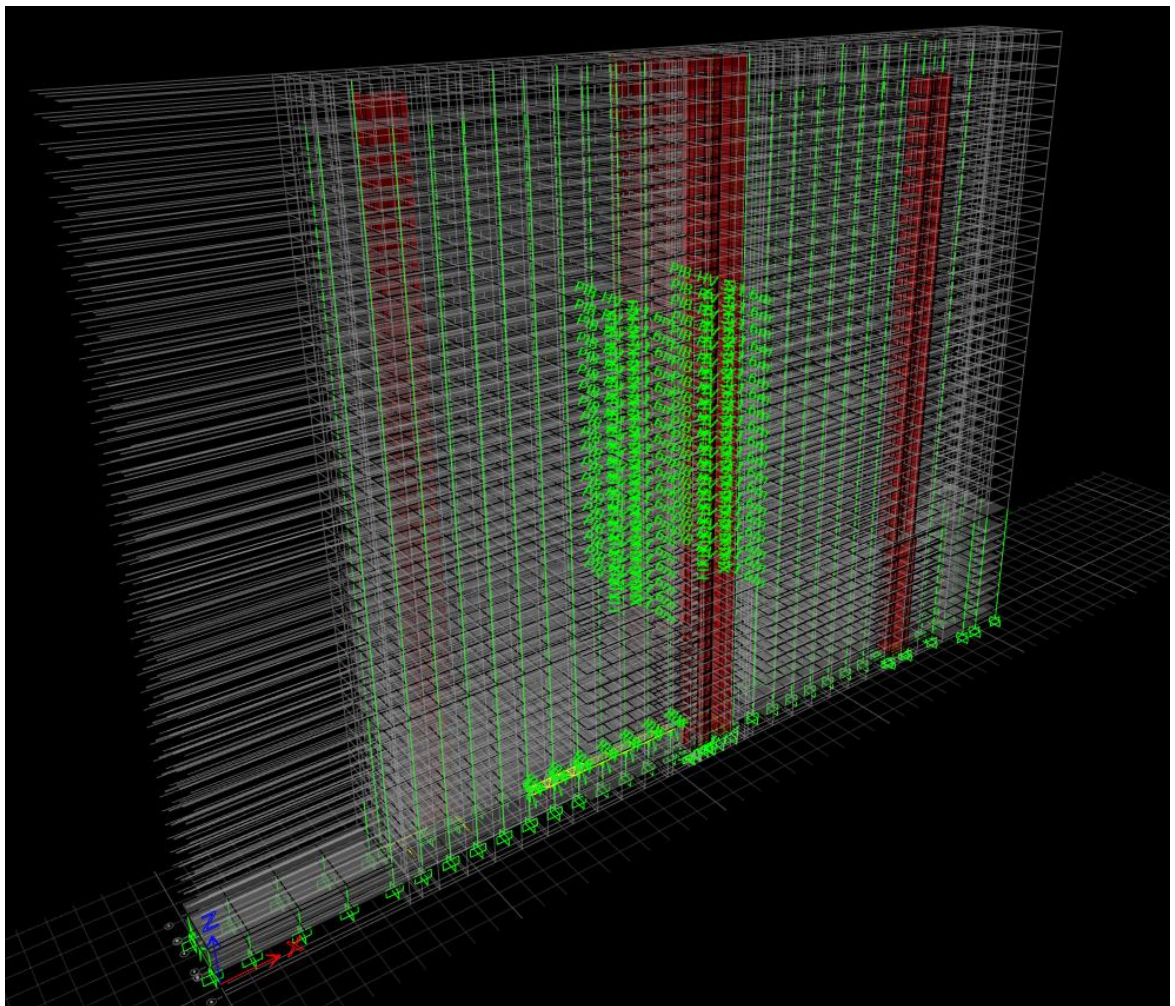
โครงสร้างอาคารเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยเสาหลายขนาด พื้นของอาคารเป็นระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คานความหนา 0.23 เมตรในชั้นลานจอดรถและ 0.24 ในโซนที่พักอาศัย และมีกำแพงรับแรงเฉือนจำนวน 5 กลุ่มกระจายอยู่ในอาคาร อาคารออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรได้ตามตารางที่ 4.1 และกำหนดคุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการออกแบบในอาคาร

น้ำหนักบรรทุกจร		
ชั้น	ประเภทน้ำหนักบรรทุกจร	LL(kN/m <sup>2</sup> )
1-7	ลานจอดรถ	4.0
8-40	ที่พักอาศัย	2.0
หลังคา	หลังคาโครงเหล็ก	0.5

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอาคาร

คุณสมบัติของวัสดุ	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	$f_c'$ 40 MPa
เหล็กข้ออ้อย DB20 ขึ้นไป	$f_y$ 500 MPa
เหล็กข้ออ้อย DB12-16	$f_y$ 400 MPa
เหล็กกลม	$f_y$ 240 MPa

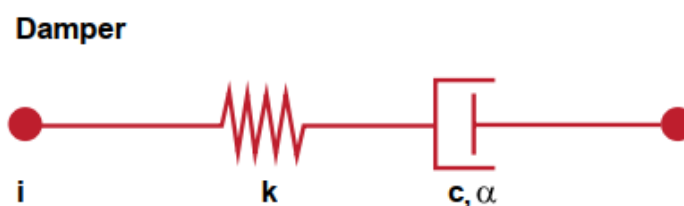


รูปที่ 4.7 แบบจำลองของอาคารตัวอย่างในโปรแกรม ETABS



## 4.2 แบบจำลองตัวหน่วงสลายพลังงาน

CSI (2016b) ได้แนะนำว่าแบบจำลองแบบ Exponential Maxwell เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดในการจำลอง Viscoelastic damper โดยมีลักษณะของแบบจำลองดังรูป



รูปที่ 4.8 แบบจำลอง Exponential Maxwell

ในโปรแกรม ETABS การจำลองชิ้นส่วนผนังสลายพลังงานนี้จะใช้ชิ้นส่วนที่เรียกว่า NLLINK (Nonlinear link) ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนของ linear spring กับ exponential damper ( $C, \alpha$ ) เพื่อให้ความสัมพันธ์ของแรงและความเร็วเป็นไปตามสมการ  $F = CV^\alpha$  และเพื่อเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองนี้มีประสิทธิภาพเพียงพอในการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง จึงทำการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองกับการทดสอบของ Dynamic isolation system (Dynamic Isolation Systems, 2017) ที่ทำการทดสอบ damper ที่ U.C. San Diego ขนาด 7'x9' โดยมีคุณสมบัติค่า Stiffness และ damping ดังตารางที่ 4.3 และทำการทดสอบทางพลวัตโดยกำหนดจำนวนรอบ, ขนาดการเคลื่อนที่ และคาบของการทดสอบดังตารางที่ 4.4

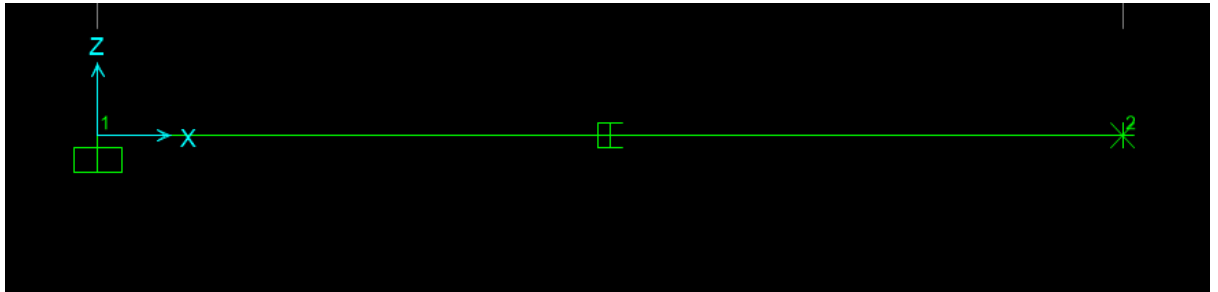
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของ Wall Damper ตัวอย่าง

Damper size	K (k/in)	C (k-(sec/in) <sup>α</sup> )	α (dimensionless)
7 x 9	410	108	0.5

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดการทดสอบที่ 8 และ 9

Test ID	Test type	N cycle	Max. Disp. (inches)	Period (seconds)
8	multi-velocity	2,2,2,2	0.5	3.2,1.6,0.8,0.4
9	multi-velocity	2,2,2,2	1	3.2,1.6,0.8,0.4

ซึ่งในโปรแกรม ETABS จะกำหนดค่าคุณสมบัติของชิ้นส่วน NLLINK ตามที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.3 และให้การเคลื่อนที่ด้วยความถี่ตามตารางที่ 4.4 ด้วยกราฟฟังก์ชัน sine แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธี Direct integration



รูปที่ 4.9 แบบจำลองชิ้นส่วนสลายพลังงาน

ET Link Property Data

**General**

Link Property Name:  P-Delta Parameters:

Link Type:  Acceptance Criteria:

Link Property Notes:  None specified

**Total Mass and Weight**

Mass:  lb-s<sup>2</sup>/ft Rotational Inertia 1:  kip-ft-s<sup>2</sup>

Weight:  kip Rotational Inertia 2:  kip-ft-s<sup>2</sup>

Rotational Inertia 3:  kip-ft-s<sup>2</sup>

**Factors for Line and Area Springs**

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property:  ft

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property:  ft<sup>2</sup>

**Directional Properties**

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U1..."/>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R1..."/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U2..."/>	<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R2..."/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U3..."/>	<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R3..."/>

**Stiffness Options**

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

รูปที่ 4.10 การระบุพฤติกรรมในแต่ละแกนของชิ้นส่วน NLLINK

**ET** Link/Support Directional Properties ×

**Identification**

Property Name: damp 7x9  
 Direction: U1  
 Type: Damper - Exponential  
 NonLinear: Yes

**Linear Properties**

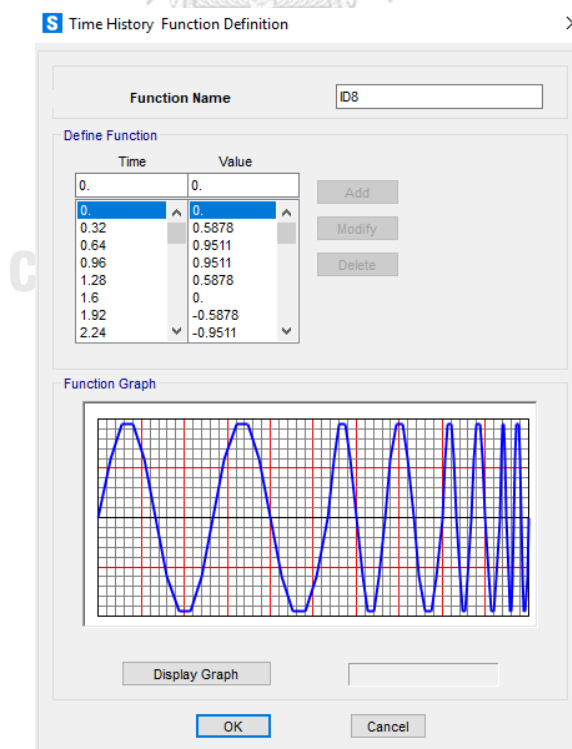
Effective Stiffness: 0 kip/in  
 Effective Damping: 0 kip-s/in

**Nonlinear Properties**

Stiffness: 410 kip/in  
 Damping: 108 kip\*(s/in)<sup>Cexp</sup>  
 Damping Exponent: 0.5

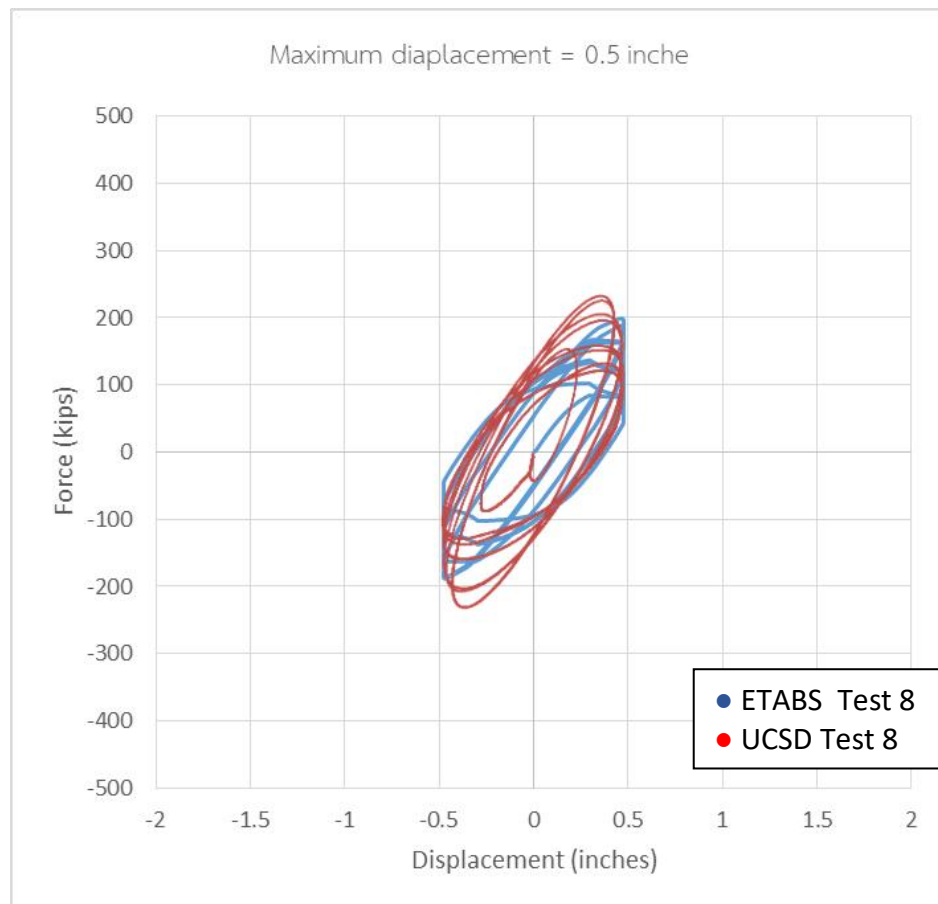
OK Cancel

รูปที่ 4.11 พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วน NLLINK

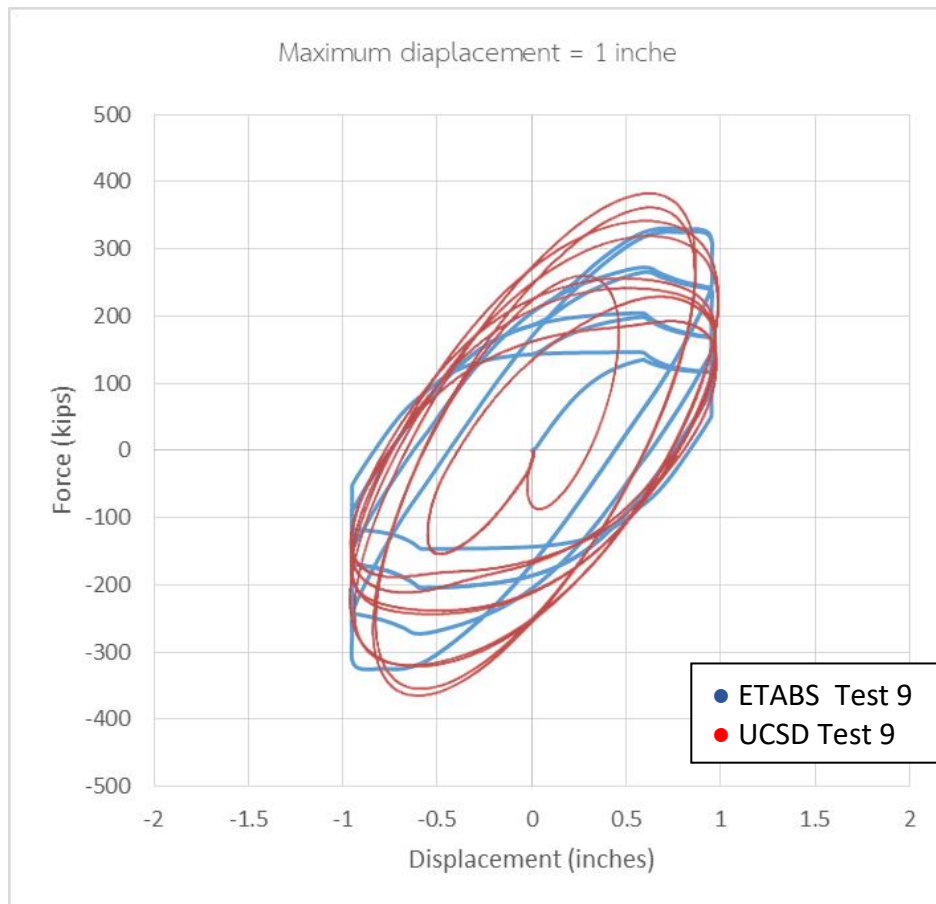


รูปที่ 4.12 กราฟประวัติเวลาที่ใช้การกำหนดความถี่ในการทดสอบ

โดยผลการวิเคราะห์เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ แล้วนำมาสร้างกราฟ Hysteresis ซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ETABS นั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ทดสอบจริงที่ห้องปฏิบัติการในระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ขนาด 1.27 ซม. ของการทดสอบที่ 8



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ขนาด 2.54 ซม. ของการทดสอบที่ 9

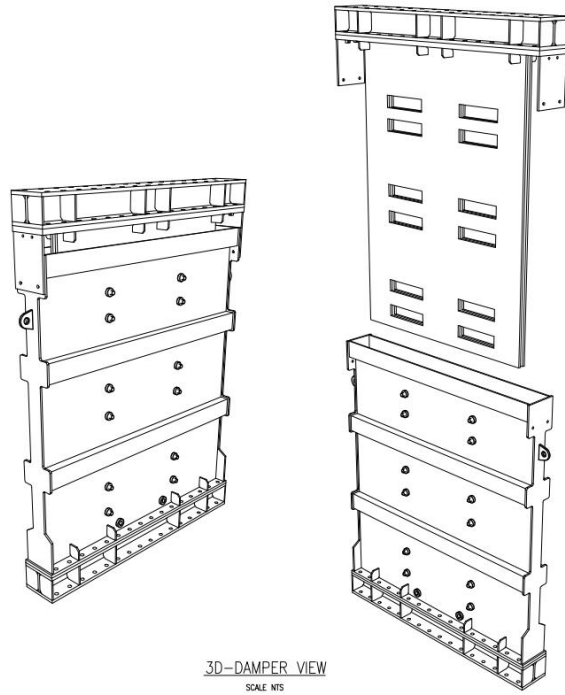
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.3 ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติค Viscoelastic Wall Damper

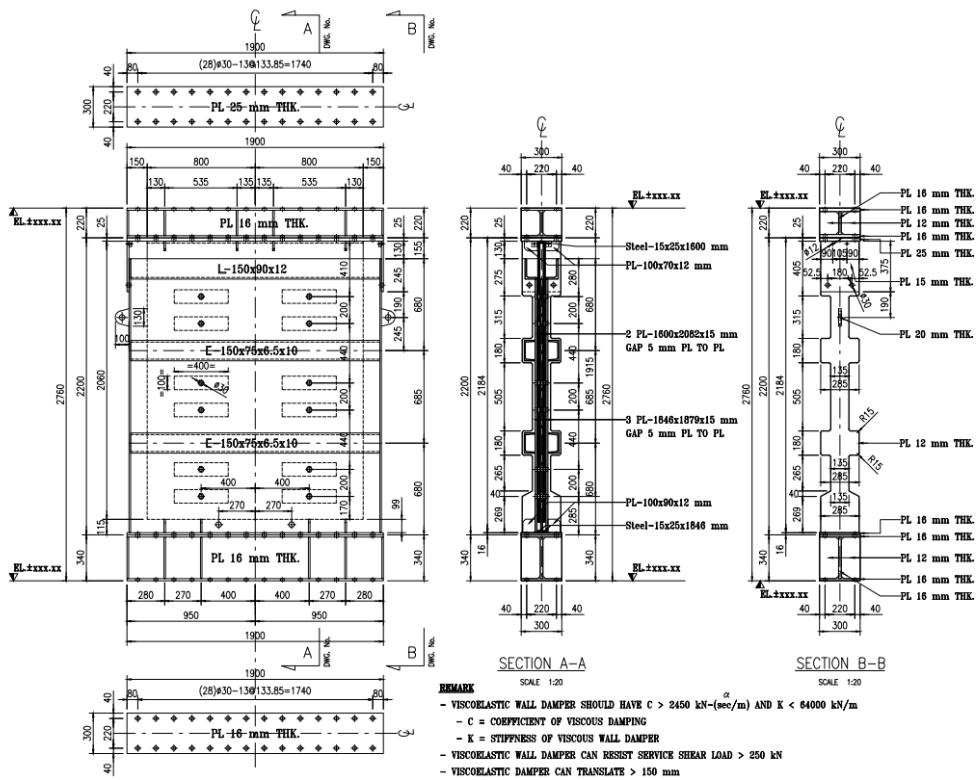
##### 4.3.1 ต้นแบบผนังสลายพลังงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบผนังสลายพลังงานต้นแบบ โดยคำนึงถึงการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคาร (มีความสูงระหว่างชั้น 2.5-3.5 ม.) แรงเฉือนทางด้านข้าง เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมของตัว Viscoelastic wall damper ที่ทำให้เกิดความสวยงามและไม่กระทบต่อรูปแบบของอาคารเดิมแต่ยังมีความสามารถในการสลายพลังงานและการรับแรงที่เพียงพอ โดยมีลักษณะเป็นกล่องเหล็กที่บรรจุวัสดุวิสโคอีลาสติค และมีแผ่นเหล็กจำนวน 2 ชั้นแทรกอยู่ระหว่างกลางเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ ซึ่งเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง แผ่นเหล็กจะเกิดการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุวิสโคอีลาสติคและเกิดการสลายพลังงาน



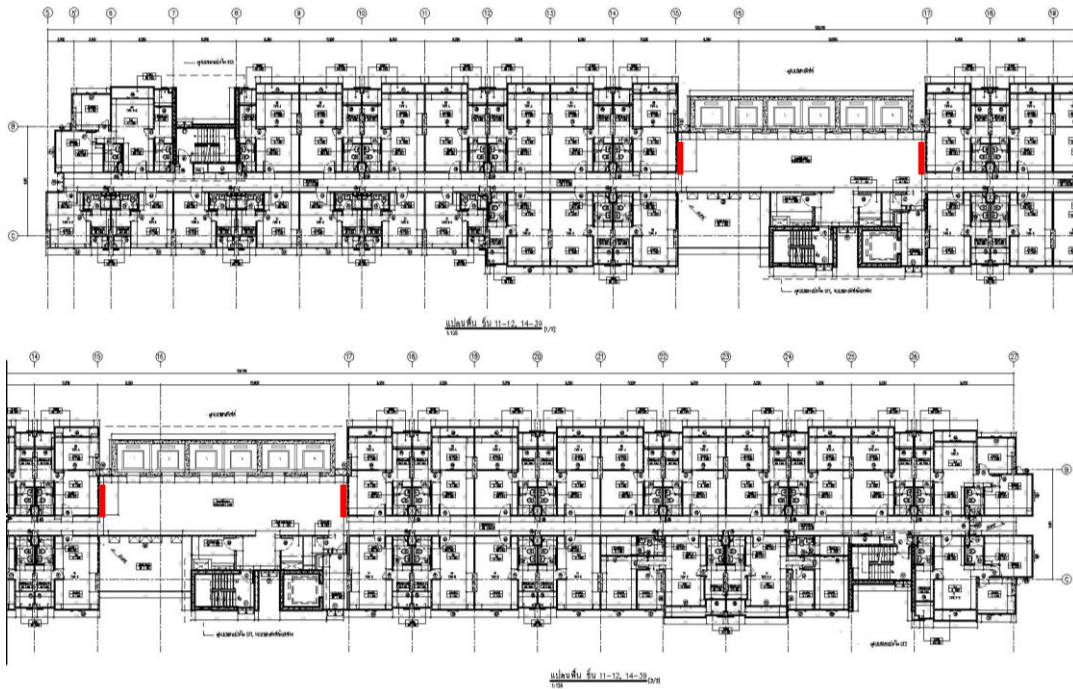
3D-DAMPER VIEW  
SCALE NTS

รูปที่ 4.15 มุมมองสามมิติของ Viscoelastic wall damper

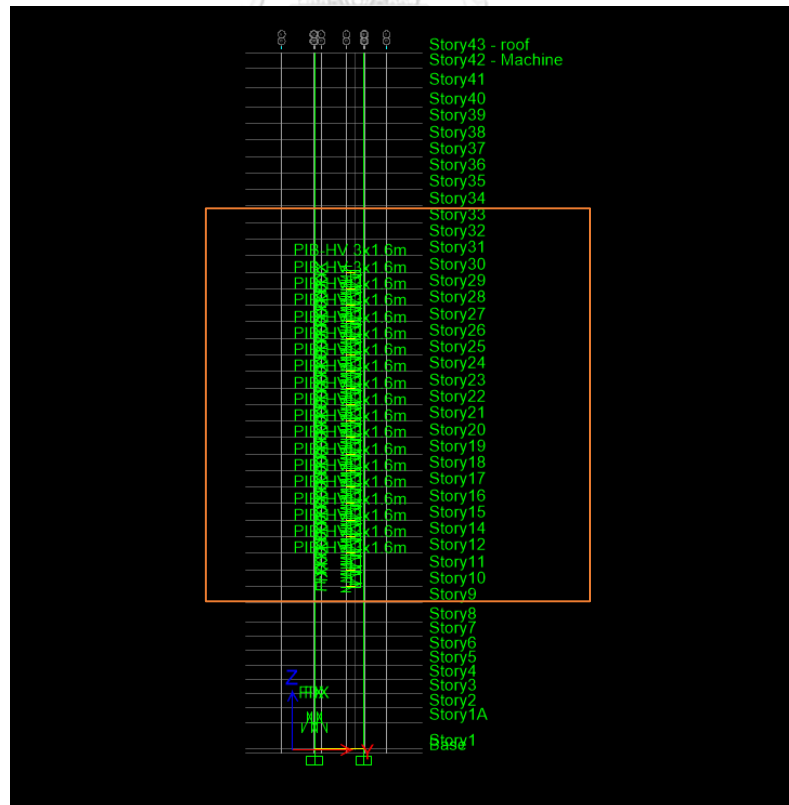


รูปที่ 4.16 มุมมองด้านข้างของ Viscoelastic wall damper

4.3.2 แบบจำลองผนังสลายพลังงานในโปรแกรม ETABS



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Viscoelastic damper



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Viscoelastic damper ในแบบจำลอง

ตำแหน่งที่ทำการเลือกติด Viscoelastic damper แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 โดยเลือกใช้ HV-Viscoelastic damper มีขนาด 1.6 ม. สูง 3.0 ม. แล้วทำการเลือกติดตั้งแต่ชั้นที่ 10 - ชั้นที่ 30 ซึ่งเป็นโซนที่พักอาศัยชั้นละ 2 ตัวรวม 38 ตัวและจากผลการทดสอบคุณสมบัติของ HV-PIB ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณคุณสมบัติของ Damper ที่ขนาดจริงได้โดยต้องมีการปรับแก้ค่า Equivalent stiffness และ Equivalent damping ตามมาตรฐาน ASCE-16 ดังสมการที่ (13) และ (14)

$$\lambda_{\max} = [(1 + (0.75 \times (\lambda_{(ae,\max)} - 1))) \times \lambda_{(test,\max)} \times \lambda_{(spec,\max)}] \geq 1.2 \quad (13)$$

$$\lambda_{\min} = [(1 - (0.75 \times (1 - \lambda_{(ae,\min)}))) \times \lambda_{(test,\min)} \times \lambda_{(spec,\min)}] \leq 0.85 \quad (14)$$

- โดยที่  $\lambda_{(ae)}$  คือ ค่าปรับแก้จากผลของการเสื่อมสภาพและสภาพแวดล้อม  
 $\lambda_{(test)}$  คือ ค่าปรับแก้จากผลของการทดสอบแบบจำลองขนาดย่อส่วน  
 $\lambda_{(spec)}$  คือ ค่าปรับแก้จากผู้ผลิตที่ยอมให้  
 max คือ ค่าปรับแก้ที่สูงกว่าค่าเฉลี่ย  
 min คือ ค่าปรับแก้ที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย

โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาคุณสมบัติของผนังสลายพลังงานที่ค่าสูงสุดโดยมีค่า  $\lambda_{(ae)} = 1.05$ ,  $\lambda_{(test)} = 1.25$  และค่า  $\lambda_{(spec)} = 1.1$  ทำให้ได้ค่า  $\lambda_{(max)} = 1.426$  โดยหลังปรับแก้จะได้ค่า Equivalent stiffness = 162,176.2 kN/m, Equivalent damping = 117,497.1 kN-(sec/m) $^{\alpha}$  และ  $\alpha = 0.84$  ซึ่งจะนำไปใช้ในการป้อนข้อมูลใน NLLINK ของโปรแกรม ETABS ที่จะเป็นตัวแทนของ Viscoelastic damper ดังภาพที่ 4.19



ET Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name	PIB-HV 3x1.6m
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes

Linear Properties

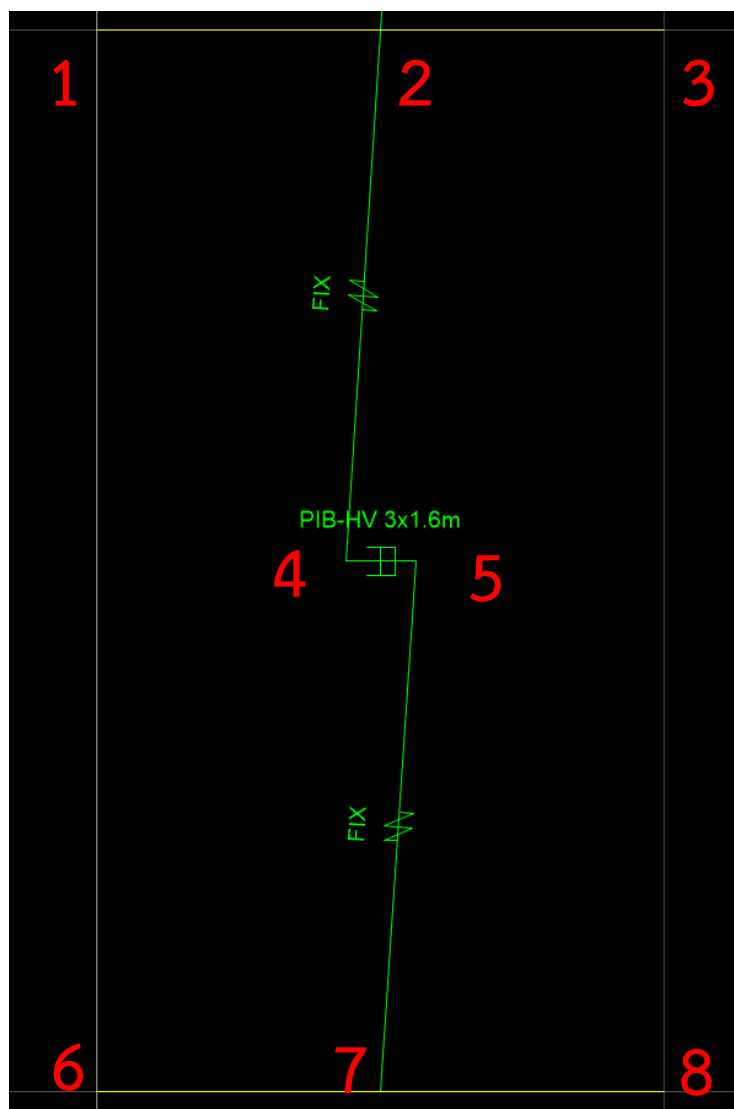
Effective Stiffness	0	kN/m
Effective Damping	0	kN-s/m

Nonlinear Properties

Stiffness	162176.2	kN/m
Damping	117497.1	$\text{kN}^*(\text{s}/\text{m})^{\text{Cexp}}$
Damping Exponent	0.84	

OK Cancel

รูปที่ 4.19 พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วน NLLINK ของ HV-Damper



รูปที่ 4.20 แบบจำลอง HV-Viscoelastic damper ในโปรแกรม ETABS

ในช่วงของคานที่ทำการติดตั้ง Viscoelastic wall damper จะทำการแบ่งคานออกเป็นสองส่วนที่กึ่งกลาง (ตำแหน่งที่ 2 และ 7) และเนื่องจาก Viscoelastic wall damper นั้นมีค่า stiffness และน้ำหนักที่จะส่งผลกับคานช่วงบนและช่วงล่าง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้คุณสมบัติ moment of inertia ให้คานในช่วงความกว้างของ Viscoelastic damper นั้น (ตำแหน่ง 1-2-3 ในคานช่วงบน และ 6-7-8 ในคานช่วงล่าง) ให้มีความแข็งที่มากเพียงพอและรับน้ำหนักของ damper โดยแบ่งไปอย่างละครึ่งหนึ่งของน้ำหนัก damper และในตำแหน่งกึ่งกลางของความสูงระหว่างชั้นจะทำการสร้าง node 1 คู่ (ตำแหน่ง 4 และ 5) ที่ห่างกันเพียงเล็กน้อยโดยจะใช้ Element ที่มีความแข็งเกร็งสูง (high stiffness) ในการเชื่อมไปหาคานด้านบนและด้านล่าง (FIX) และใช้ NLLINK (PIB-HV 3x1.6m.) ซึ่งเป็นตัวแทนของ damper เชื่อมระหว่างจุดทั้งสองนี้

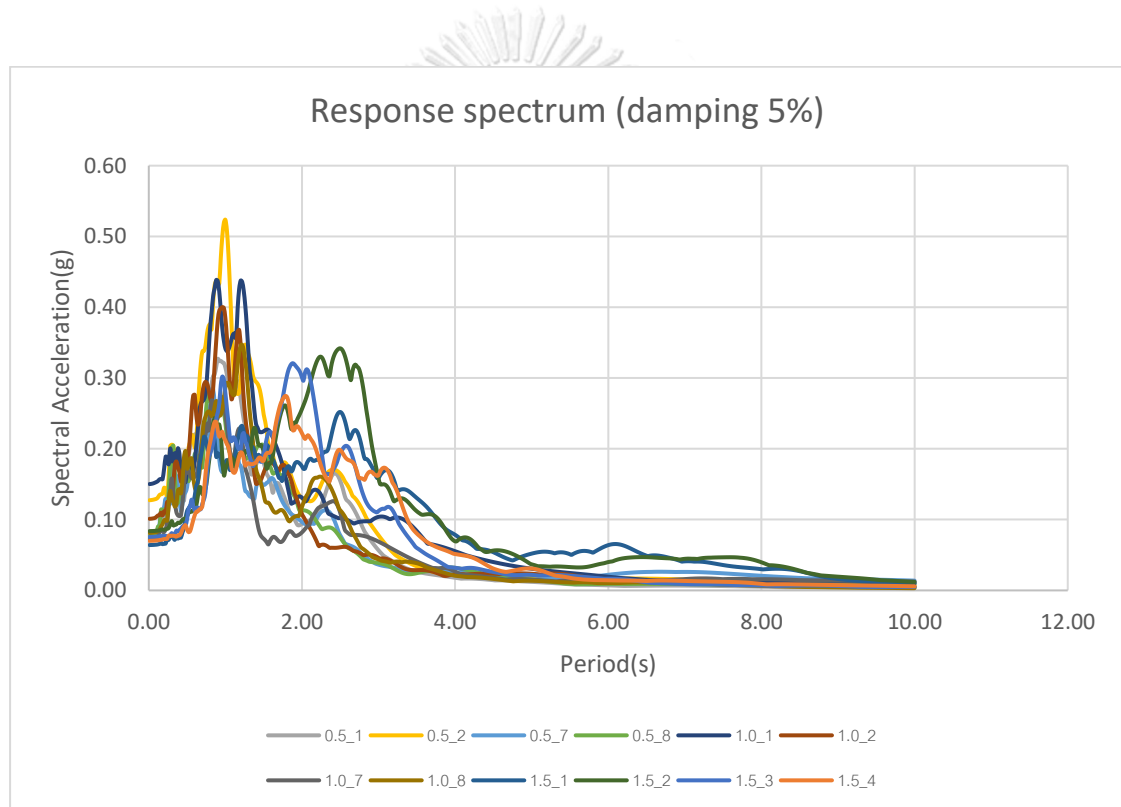
คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานและไม่ติดตั้งจากโปรแกรม ETABS แสดงค่า คาบธรรมชาติ (Period) และ Participation mass ratio ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ในแกนที่สนใจ (แกน Y) อยู่ที่ Mode ที่ 2 และ 1 ของอาคารที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งผนังสลายพลังงานตามลำดับ โดยแสดงค่า 20 Modes แรกที่วิเคราะห์

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน

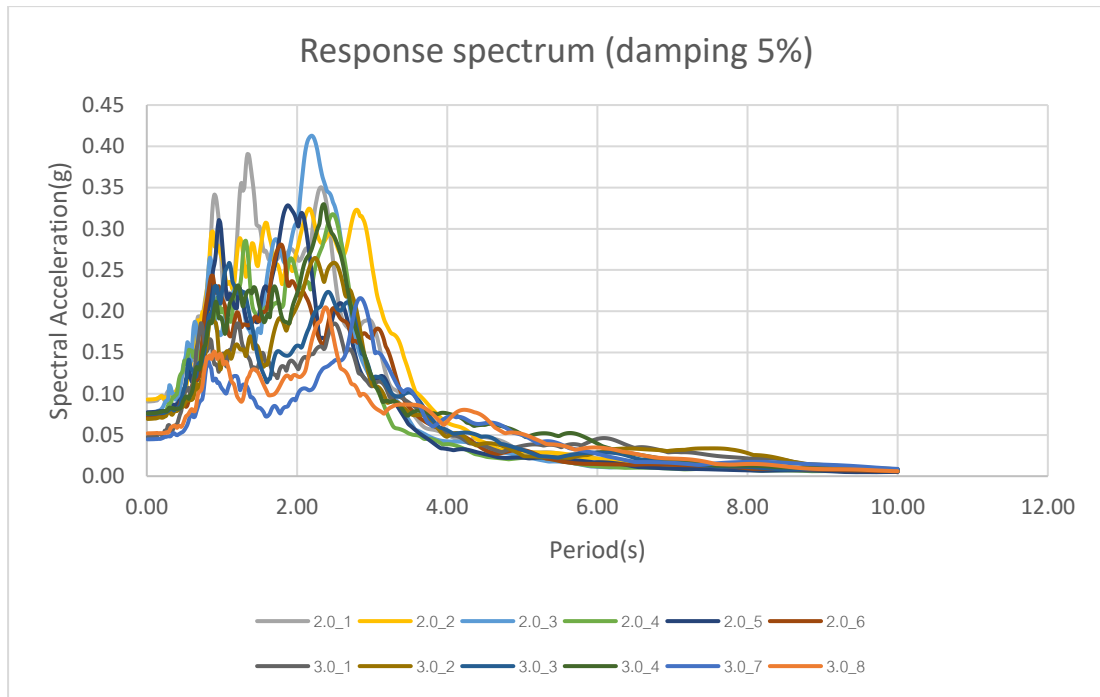
No damper				PIB-HV damper			
Mode	Period	Participating Mass Ratio		Mode	Period	Participating Mass Ratio	
		Sum Ux	Sum Uy			Sum Ux	Sum Uy
1	7.881	0.0057	0.2988	1	10.389	0.0000	0.4059
2	7.745	0.0144	0.6161	2	6.588	0.0132	0.4277
3	3.577	0.5934	0.6165	3	3.25	0.4722	0.4281
4	1.968	0.5961	0.6831	4	3.078	0.4759	0.4291
5	1.929	0.5971	0.7691	5	1.884	0.4759	0.4320
6	0.885	0.5972	0.7989	6	1.369	0.4768	0.4858
7	0.827	0.7722	0.7995	7	1.284	0.4886	0.5239
8	0.798	0.7752	0.8396	8	0.961	0.4896	0.5289
9	0.525	0.7753	0.858	9	0.722	0.4916	0.5313
10	0.436	0.7757	0.8788	10	0.654	0.4948	0.5363
11	0.427	0.8346	0.8791	11	0.645	0.8130	0.5363
12	0.337	0.8348	0.8888	12	0.45	0.8130	0.5363
13	0.303	0.8677	0.8889	13	0.442	0.8130	0.5363
14	0.287	0.8678	0.8889	14	0.432	0.8130	0.5364
15	0.287	0.8688	0.889	15	0.422	0.8130	0.5364
16	0.276	0.8689	0.901	16	0.406	0.8130	0.5364
17	0.245	0.8799	0.9011	17	0.4	0.8134	0.5366
18	0.236	0.8957	0.9025	18	0.395	0.8134	0.5370
19	0.229	0.9	0.9083	19	0.393	0.8144	0.5389
20	0.193	0.9	0.9154	20	0.378	0.8151	0.5389

#### 4.4 คลื่นแผ่นดินไหว

ข้อมูลแผ่นดินไหวที่เลือกใช้จะอ้างอิงตามคลื่นแผ่นดินไหวของ มยพ.1301/1302-61 ซึ่งเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีคาบการเกิดแผ่นดินไหวที่ 2475 ปีโดยการสร้าง Conditional Mean Spectrum (CMS) ซึ่งแสดงค่าสเปกตรัมผลตอบแทนที่คาบการสั่นของอาคารที่ 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 วินาทีตามลำดับ ซึ่งในแต่ละคาบการสั่นจะมีคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 8 คลื่น ยกเว้นที่คาบการสั่น 1.5 วินาที จะมีคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 6 คลื่น โดยเลือกใช้คลื่นที่มีผลตอบแทนความเร่งสูงสุดที่คาบของอาคารจำนวน 12 คู่คลื่นในโซนที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตั้งของอาคารดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 โดยมีคำอธิบายดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ชุดที่ 1



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ชุดที่ 2

ตารางที่ 4.6 คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ในการศึกษา

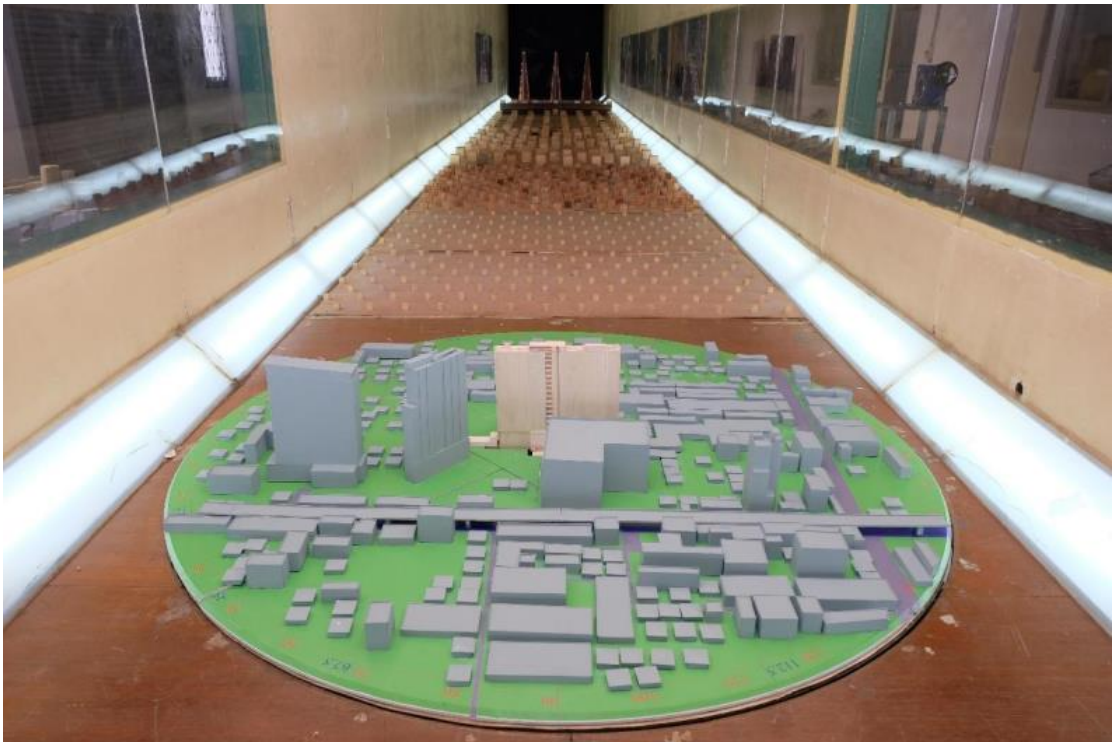
Wave name	Description	Wave name	Description
0.5_1	EQ period 0.5 wave1_X	2.0_1	EQ period 2.0 wave1_X
0.5_2	EQ period 0.5 wave1_Y	2.0_2	EQ period 2.0 wave1_Y
0.5_7	EQ period 0.5 wave4_X	2.0_3	EQ period 2.0 wave2_X
0.5_8	EQ period 0.5 wave4_Y	2.0_4	EQ period 2.0 wave2_Y
1.0_1	EQ period 1.0 wave1_X	2.0_5	EQ period 2.0 wave3_X
1.0_2	EQ period 1.0 wave1_Y	2.0_6	EQ period 2.0 wave3_Y
1.0_7	EQ period 1.0 wave4_X	3.0_1	EQ period 3.0 wave1_X
1.0_8	EQ period 1.0 wave4_Y	3.0_2	EQ period 3.0 wave1_Y
1.5_1	EQ period 1.5 wave1_X	3.0_3	EQ period 3.0 wave2_X
1.5_2	EQ period 1.5 wave1_Y	3.0_4	EQ period 3.0 wave2_Y
1.5_3	EQ period 1.5 wave2_X	3.0_7	EQ period 3.0 wave4_X
1.5_4	EQ period 1.5 wave2_Y	3.0_8	EQ period 3.0 wave4_Y

#### 4.5 แรงลม

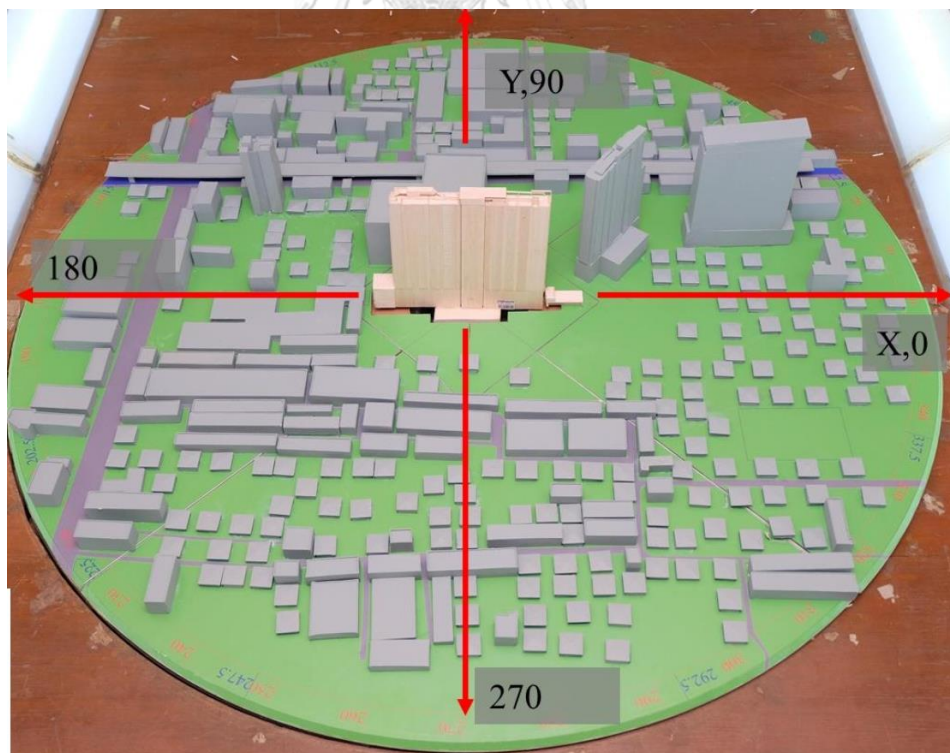
สำหรับสภาวะใช้งานของโครงสร้างจะพิจารณาแรงลมคาบเวลาย้อนกลับ 10 ปีและมีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.0075 โดยใช้ผลการทดสอบจากวิธีการทดสอบแบบ High Frequency Force Balance ด้วยอุโมงค์ลมตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ของห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เพื่อใช้ในการจำลองแบบจำลอง โดยคำนึงถึงทิศทางแรงลมที่ทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุดมีทิศทางในแนวแกน Y ทั้งหมด 5 กรณีดังตารางที่ 4.7 และขนาดของแรงที่อัตราส่วนความหน่วง 0.0075 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 รูปแบบการรวมผลแรงลมสำหรับตรวจสอบที่สภาวะใช้งาน

Load case	Direction (degree)	Equivalent Incoming Wind Direction (Parallel)	Description	My	Mx	Mz
				(MN-m) (%) <sup>1</sup>	(MN-m) (%) <sup>1</sup>	(MN-m) (%) <sup>1</sup>
1	50	Y	Peak(+) My	171	477	-113.24
				(100)	(-43)	(69)
2	110	Y	Peak(-) My	-166	583	-68.96
				(-97)	(-52)	(42)
3	100	Y	Peak(+) Mx	-52	1,054	-59.89
				(-31)	(-94)	(36)
4	260	Y	Peak(-) Mx	-64	-1,117	46.03
				(-37)	(100)	(-28)
5	320	X	Peak(+) Mz	-69	-449	146.93
				(-40)	(40)	(-89)
6	50	Y	Peak(-) Mz	98	477	-164.90
				(57)	(-43)	(100)
7	80	Y	Max. vector resultant in Q1	42	976	-74.22
				(25)	(-87)	(45)
8	100	Y	Max. vector resultant in Q2	-52	1,054	-59.89
				(-31)	(-94)	(36)
9	260	Y	Max. vector resultant in Q3	-64	-1,117	46.03
				(-37)	(100)	(-28)
10	270	Y	Max. vector resultant in Q4	-55	-1,105	65.78
				(-32)	(99)	(-40)



รูปที่ 4.23 การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ 4.24 รูปแบบการกำหนดทิศทางลมในอุโมงค์ลม

ตารางที่ 4.8 ขนาดของแรงที่อัตราส่วนความหน่วง 0.0075

Load KN							
Elev. (m)	Px	Py	Rz	Elev. (m)	Px	Py	Rz
126.8	24	168	-1776	59.7	45	345	-3922
123.7	29	194	-1981	56.7	42	331	-3734
120.2	100	629	-6931	53.7	39	316	-3546
116.7	104	590	-6885	50.7	36	302	-3362
113.7	100	575	-6724	47.7	34	288	-3178
110.7	97	565	-6613	44.7	31	274	-2996
107.7	94	554	-6502	41.7	28	260	-2821
104.7	91	542	-6365	38.7	25	246	-2649
101.7	88	531	-6253	35.7	23	232	-2486
98.7	85	519	-6115	32.7	21	218	-2326
95.7	82	507	-5977	29.7	18	205	-2176
92.7	79	495	-5814	26.7	20	252	-2788
89.7	76	482	-5675	23.2	14	178	-1962
86.7	73	469	-5511	20.55	12	162	-1776
83.7	70	456	-5347	17.95	10	150	-1633
80.7	67	443	-5182	15.35	9	138	-1489
77.7	64	429	-5017	12.75	8	125	-1341
74.7	61	416	-4829	10.15	6	111	-1188
71.7	58	402	-4661	7.55	5	95	-1014
68.7	54	388	-4479	4.95	7	137	-1465
65.7	51	374	-4294	0.25	0	1	-9
62.7	48	359	-4108				

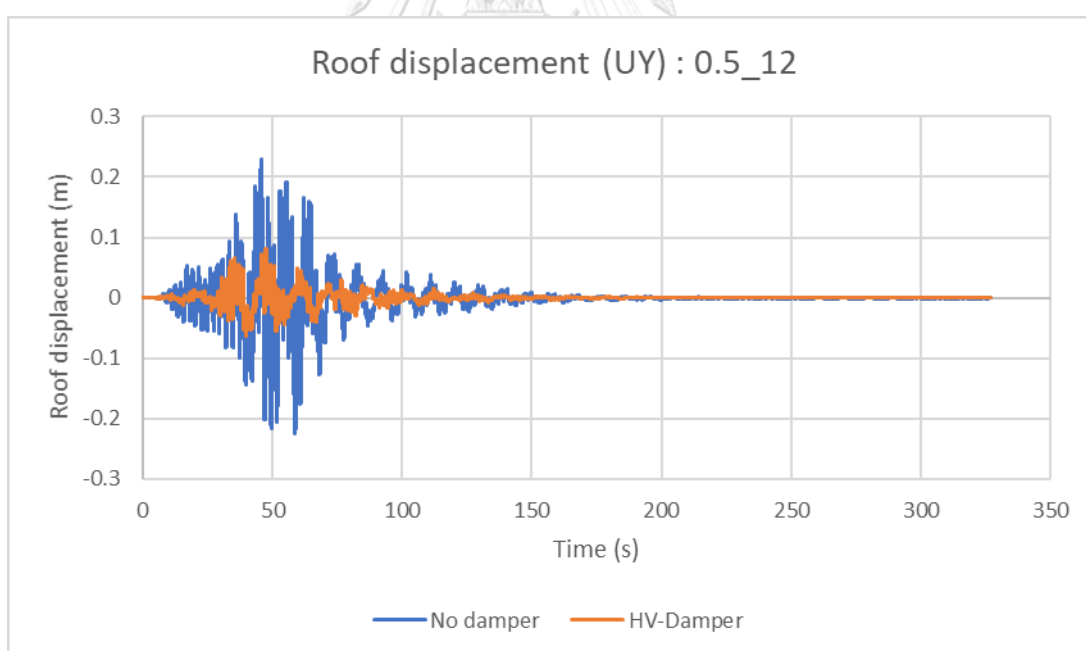


## 4.6 ผลการวิเคราะห์

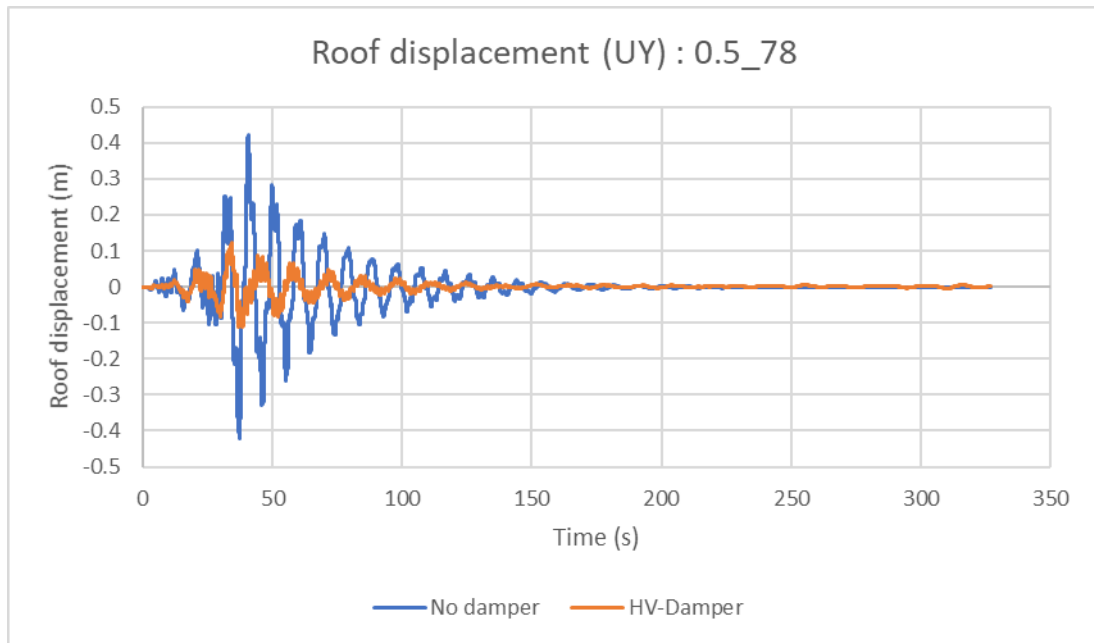
ผลการวิเคราะห์เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงาน (HV-Damper) และอาคารที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงาน (No damper) โดยการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 12 คู่คลื่น ด้วยวิธีแบบประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นและผลตอบสนองจากแรงลมด้วยวิธีแบบเชิงเส้นด้วยโปรแกรม ETABS

### 4.6.1 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร

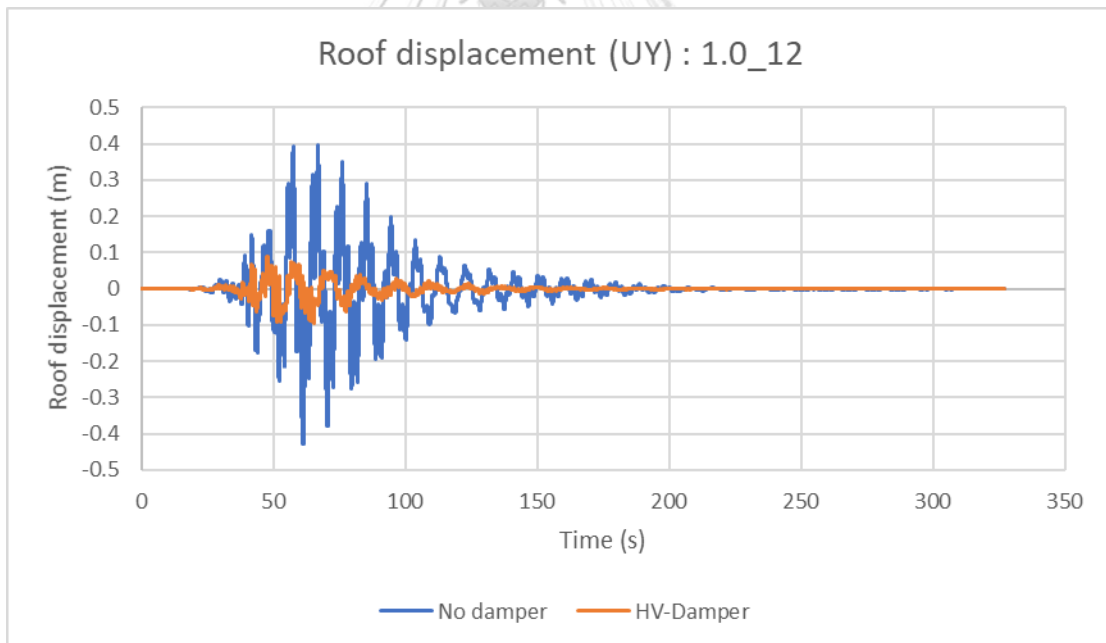
รูปที่ 4.25-4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ที่ยอดของอาคารกับเวลาที่คู่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การเคลื่อนที่ของยอดอาคารในแนวเดียวกับที่ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกัน (แกน Y) สามารถลดขนาดการเคลื่อนที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงาน ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.35 คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_34 ที่การติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานสามารถลดการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารจาก 0.8 ม. ลงมาเป็น 0.2 ม.หรือประมาณ 4 เท่า



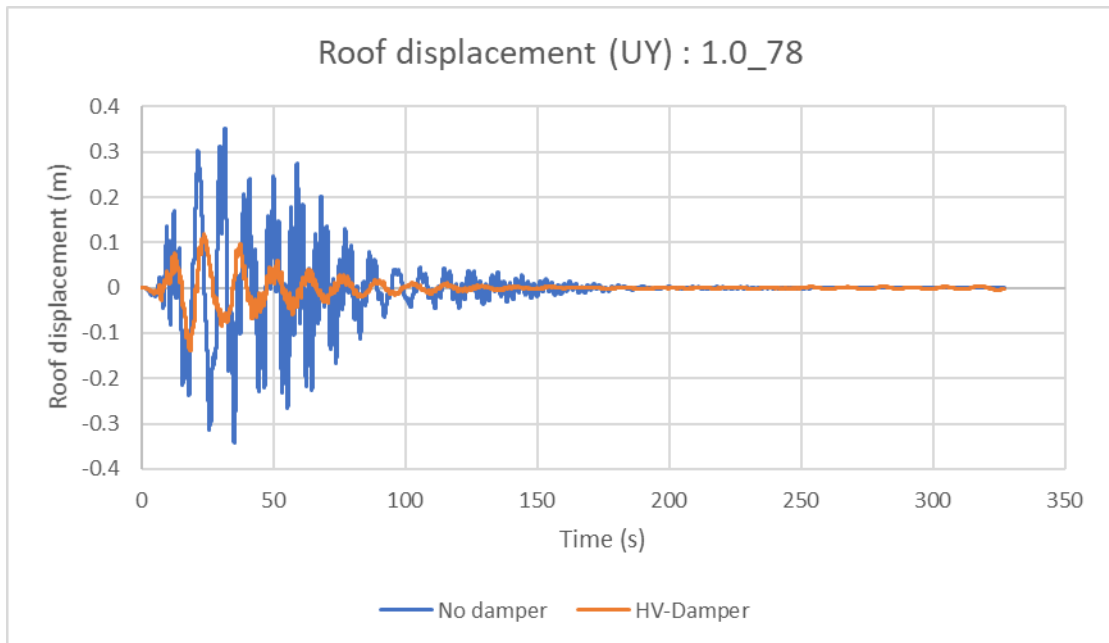
รูปที่ 4.25 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_12



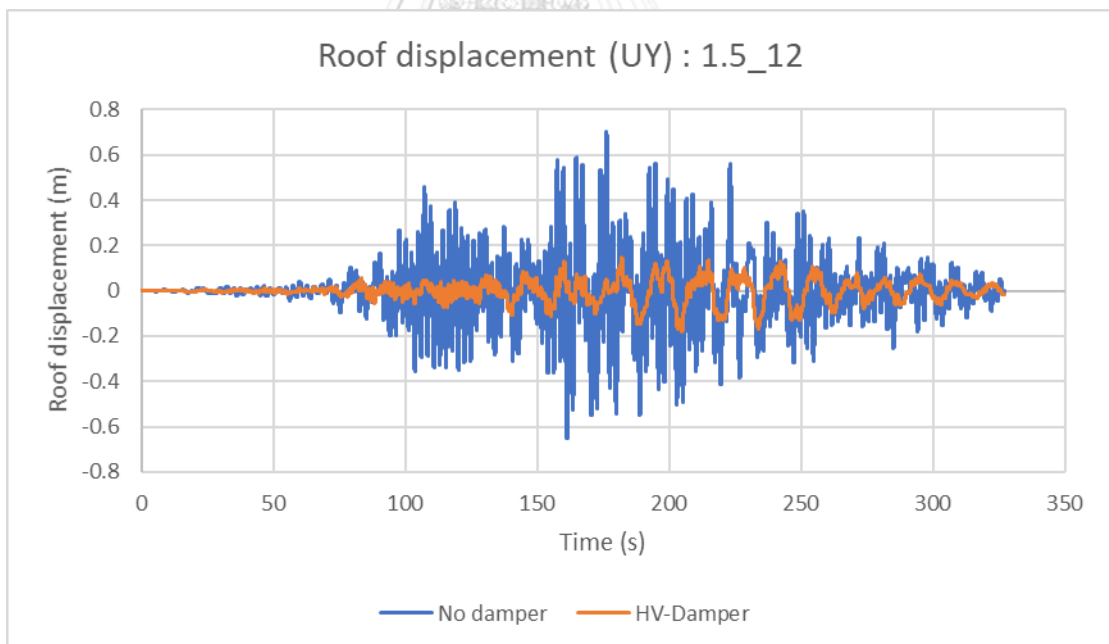
รูปที่ 4.26 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_78



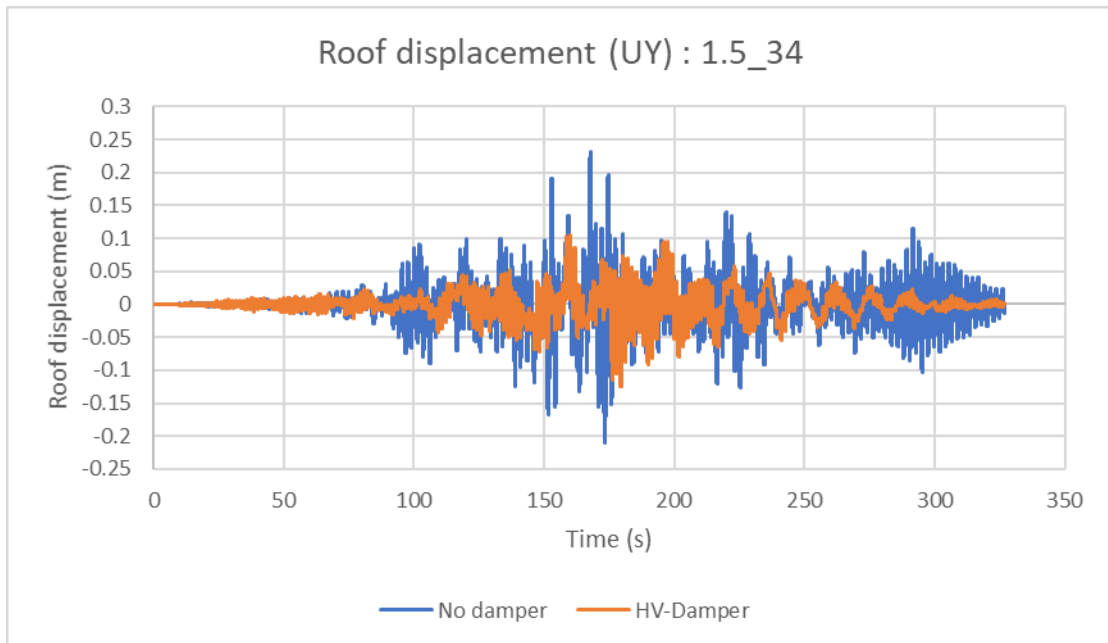
รูปที่ 4.27 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0\_12



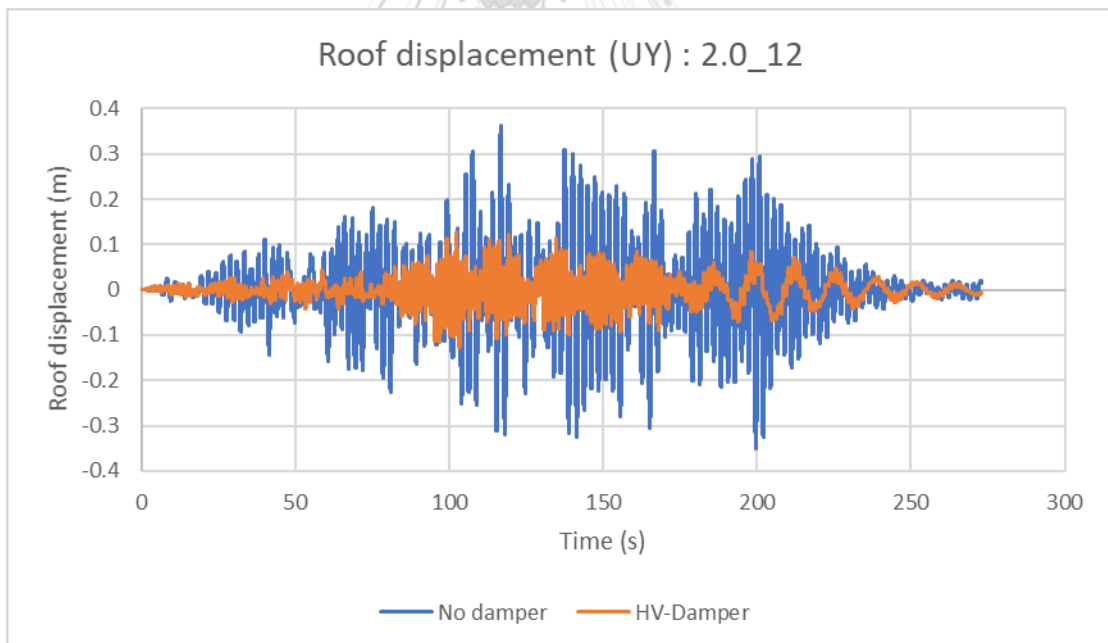
รูปที่ 4.28 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0\_78



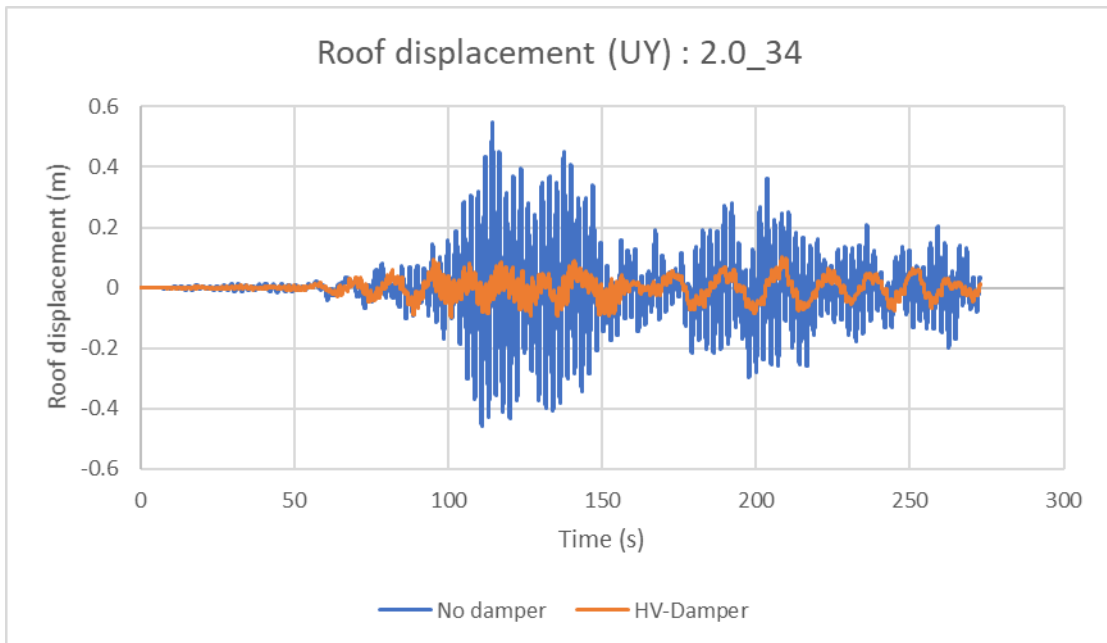
รูปที่ 4.29 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5\_12



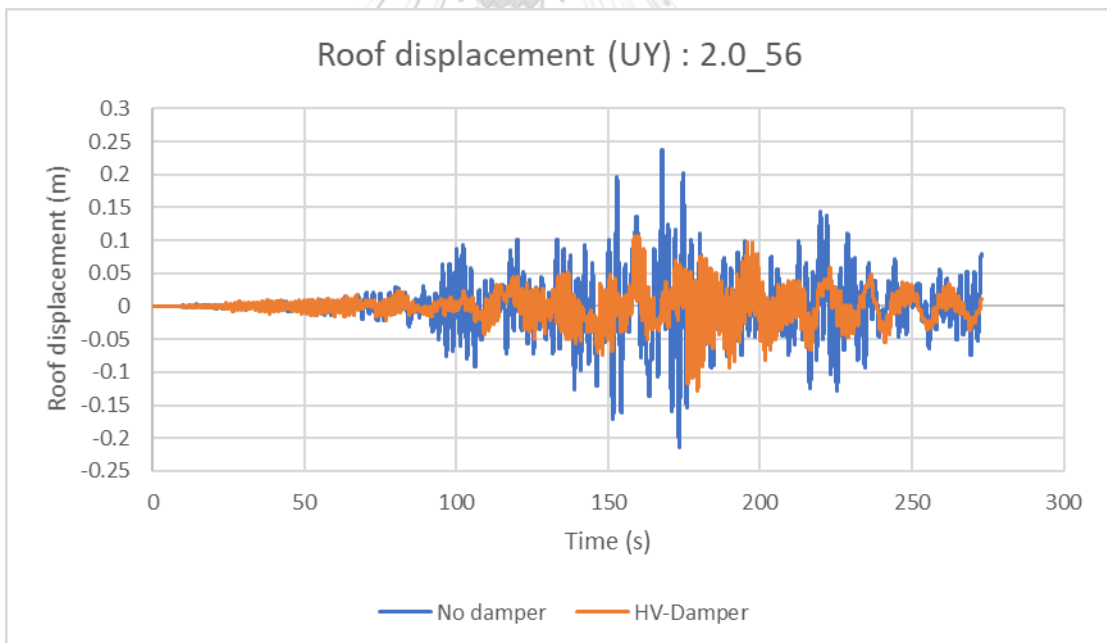
รูปที่ 4.30 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5\_34



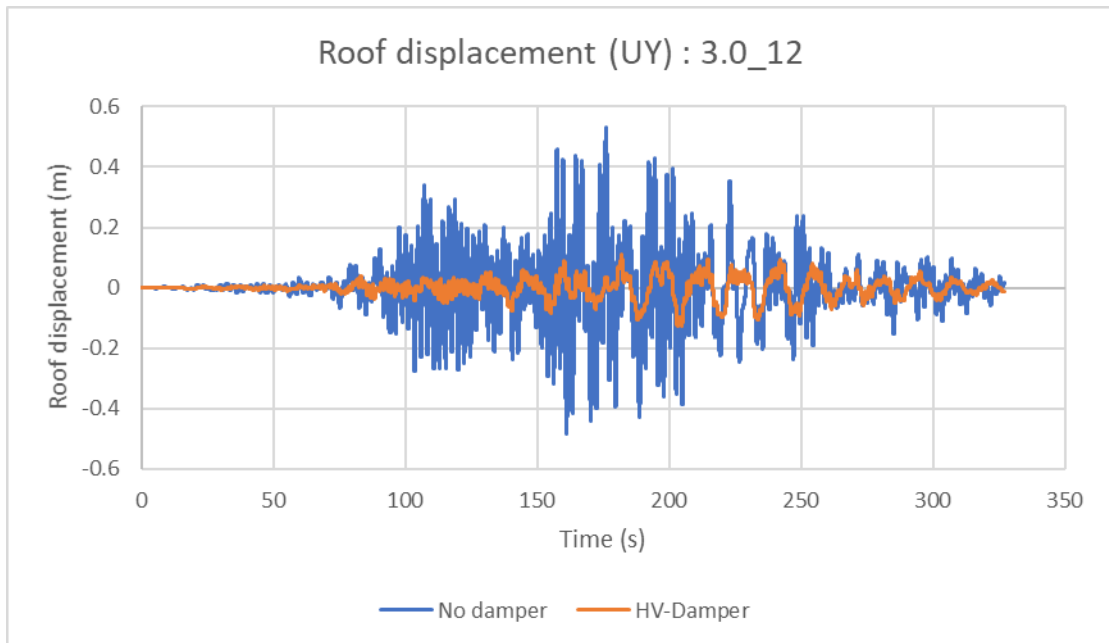
รูปที่ 4.31 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_12



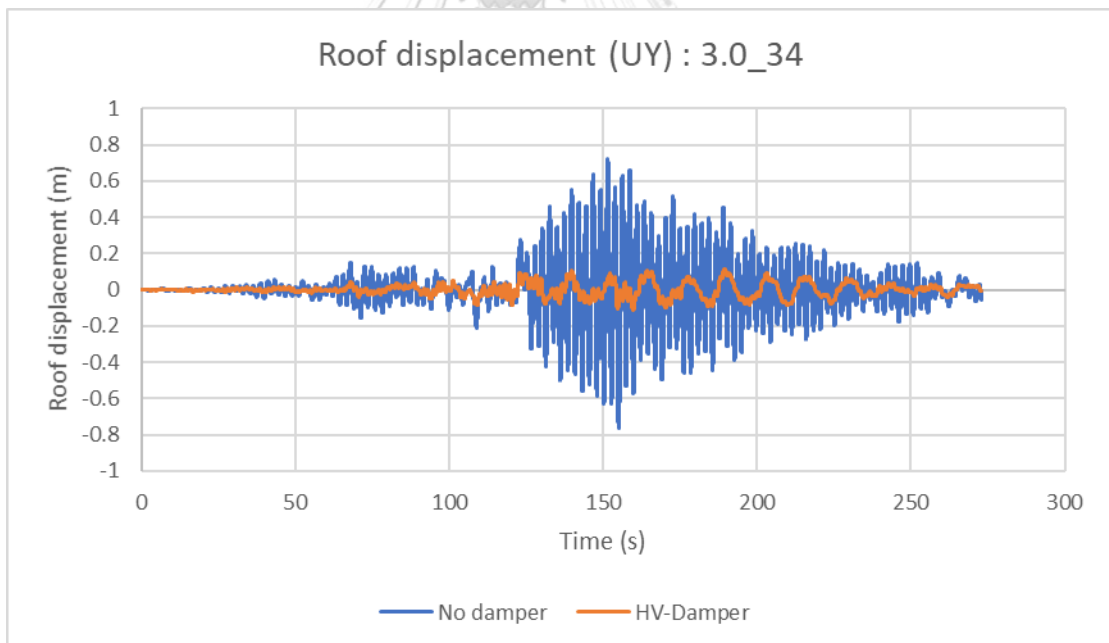
รูปที่ 4.32 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_34



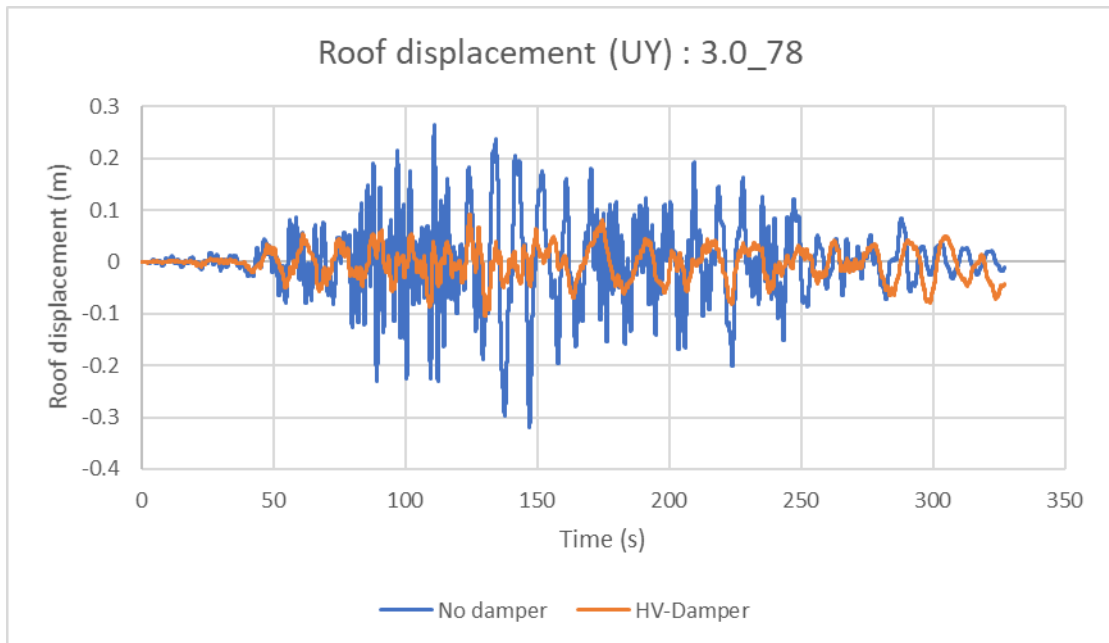
รูปที่ 4.33 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_56



รูปที่ 4.34 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_12

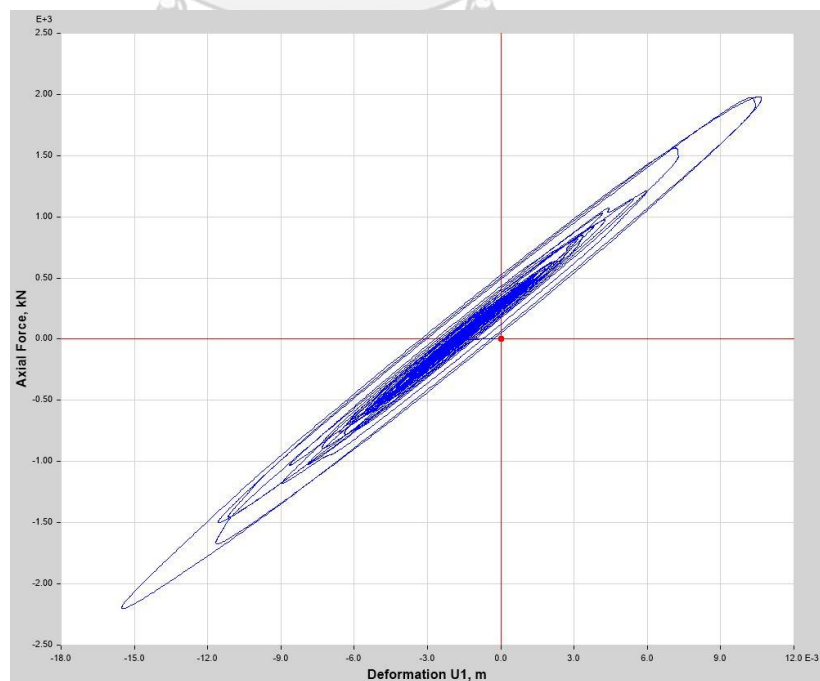


รูปที่ 4.35 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_34

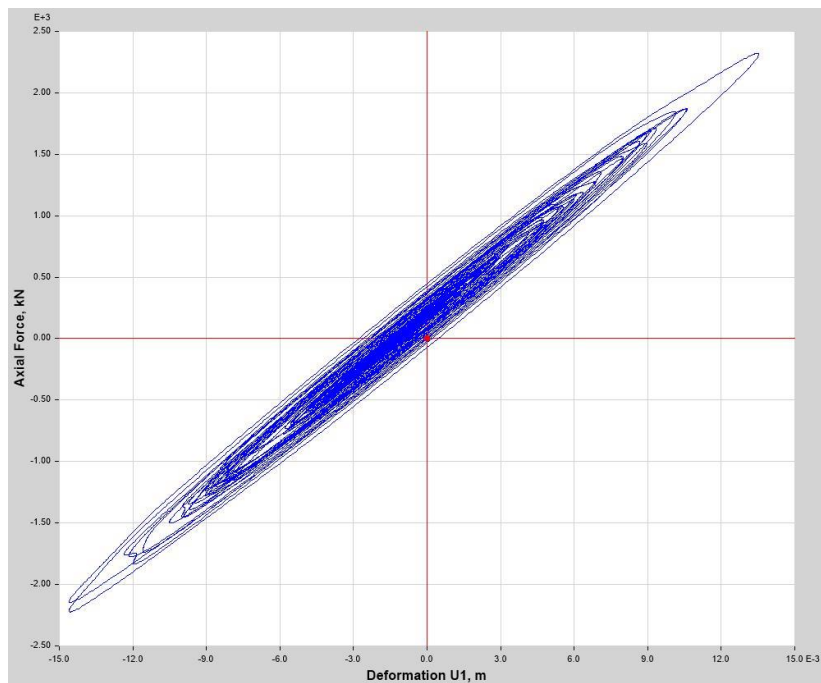


รูปที่ 4.36 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_78

เพื่อเป็นการยืนยันว่า Damper สามารถทำงานและสลายพลังงานได้จริงภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคารจึงแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่หรือ Hysteresis loop ของตัวหน่วงสลายพลังงานที่ติดตั้งที่ตำแหน่งสูงสุดและล่างสุดของอาคารของคลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_12 ดังแสดงในรูปที่ 4.37 และ 4.38 ซึ่งจะเห็นว่าตัว Damper นั้นเกิดการ ทำงานและสลายพลังงานได้จริง



รูปที่ 4.37 กราฟ Hysteresis loop ของตัวหน่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกที่ตำแหน่งสูงสุด

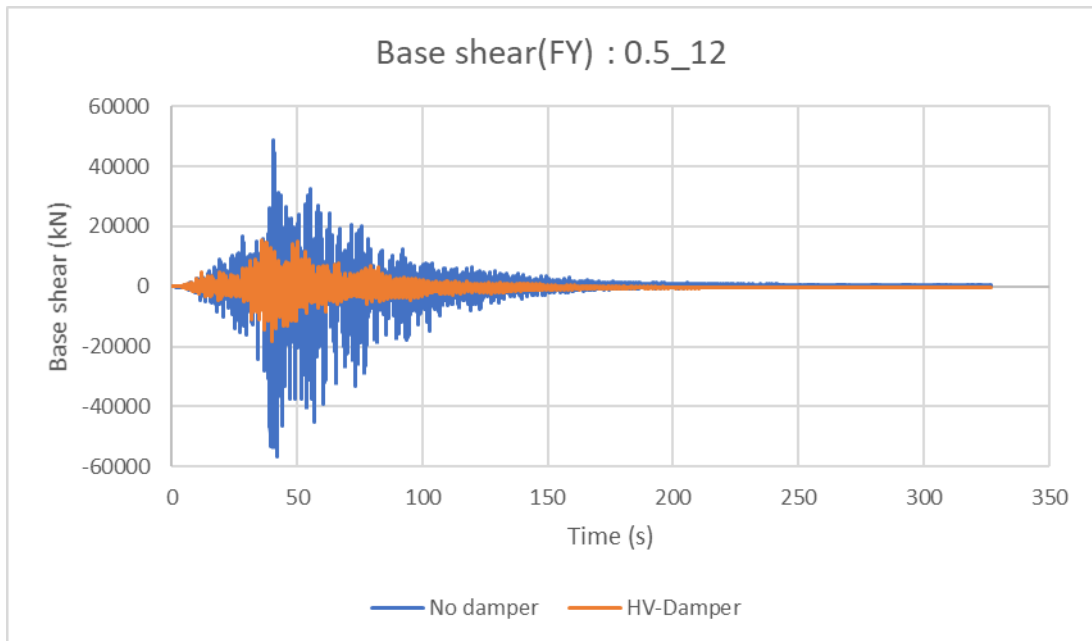


รูปที่ 4.38 กราฟ Hysteresis loop ของตัวผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกที่ตำแหน่งล่างสุด

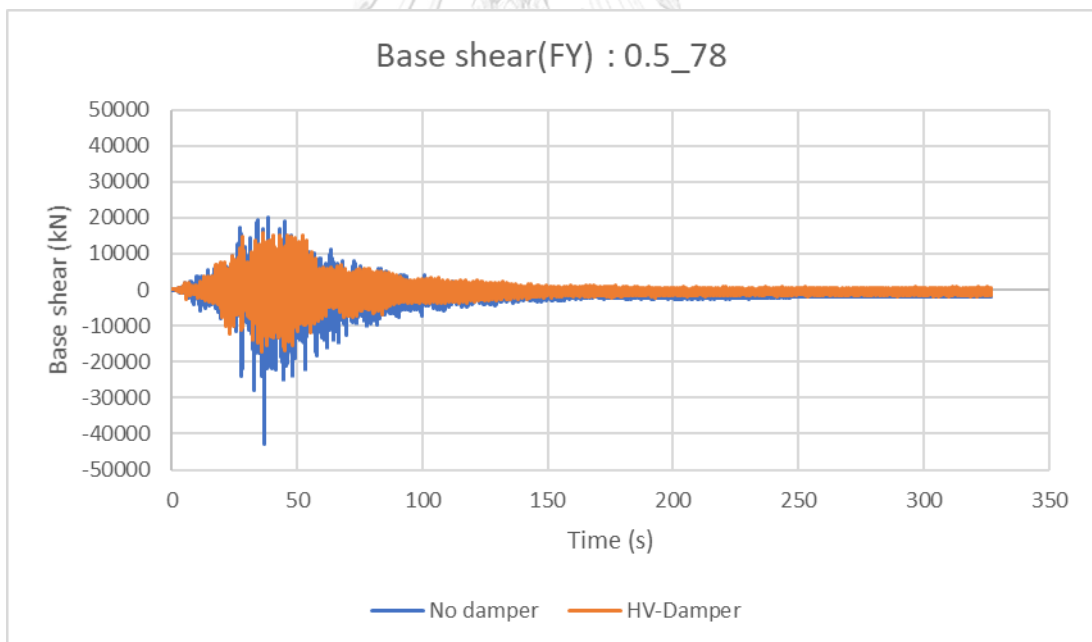
#### 4.6.2 แรงเฉือนที่ฐาน

รูปที่ 4.39-4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการผลการตอบสนองของแรงเฉือนที่ฐานของอาคารกับเวลา ที่คู่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงเฉือนที่ฐานของยอดอาคารในแนวเดียวกับที่ติดตั้งตัวผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกนั้น (แกน Y) สามารถลดขนาดของแรงได้เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่ติดตั้งตัวผนังสลายพลังงานโดยจะมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นเมื่อเป็นแรงแผ่นดินไหวที่มีคาบที่ยาวตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.50 คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_78 ที่การติดตั้งตัวผนังสลายพลังงานสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานของอาคารจาก 80,000 kN ลงมาเป็น 20,000 kN. หรือประมาณ 4 เท่า

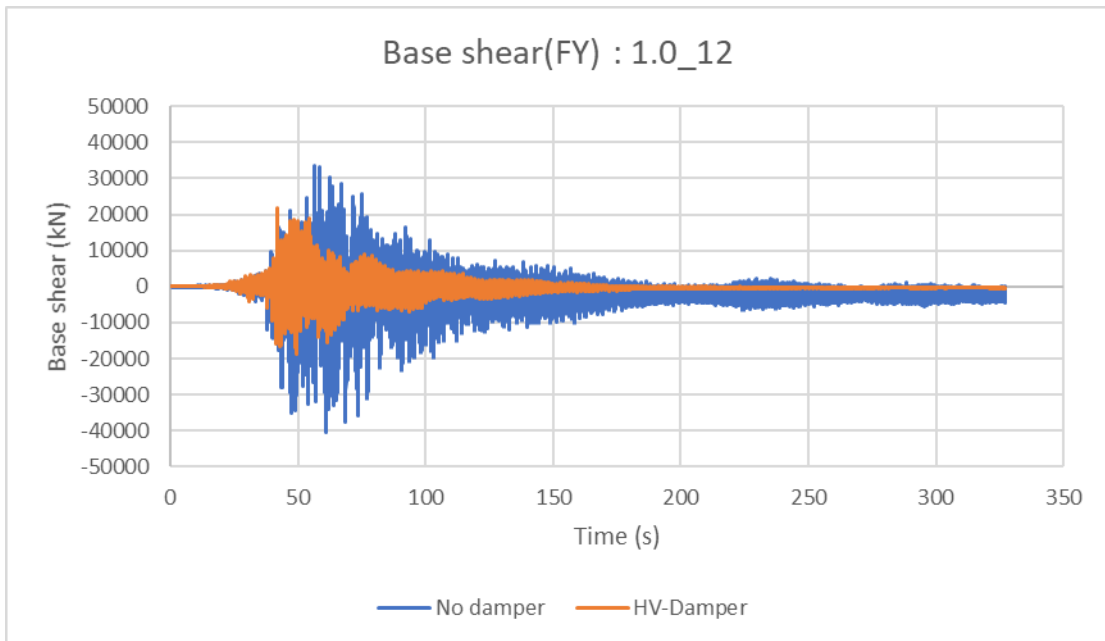




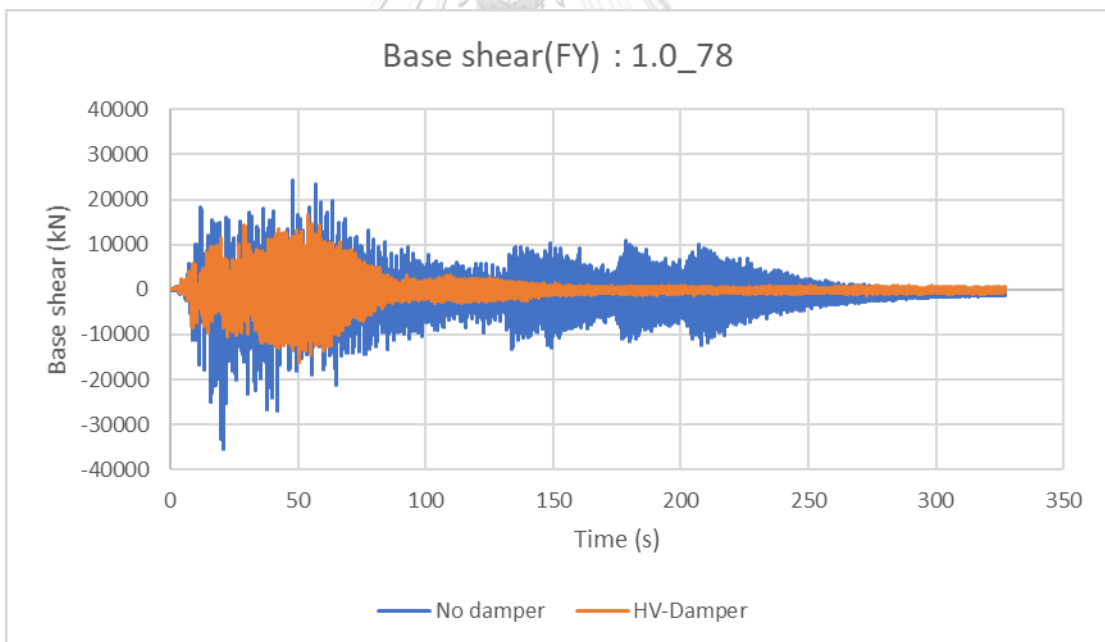
รูปที่ 4.39 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_12



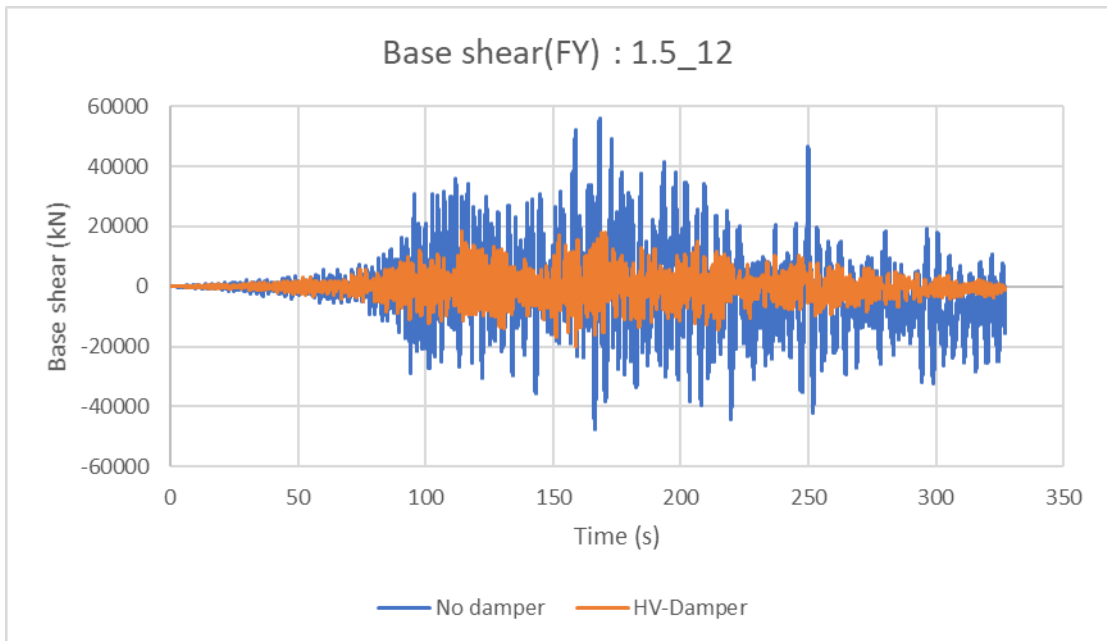
รูปที่ 4.40 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_78



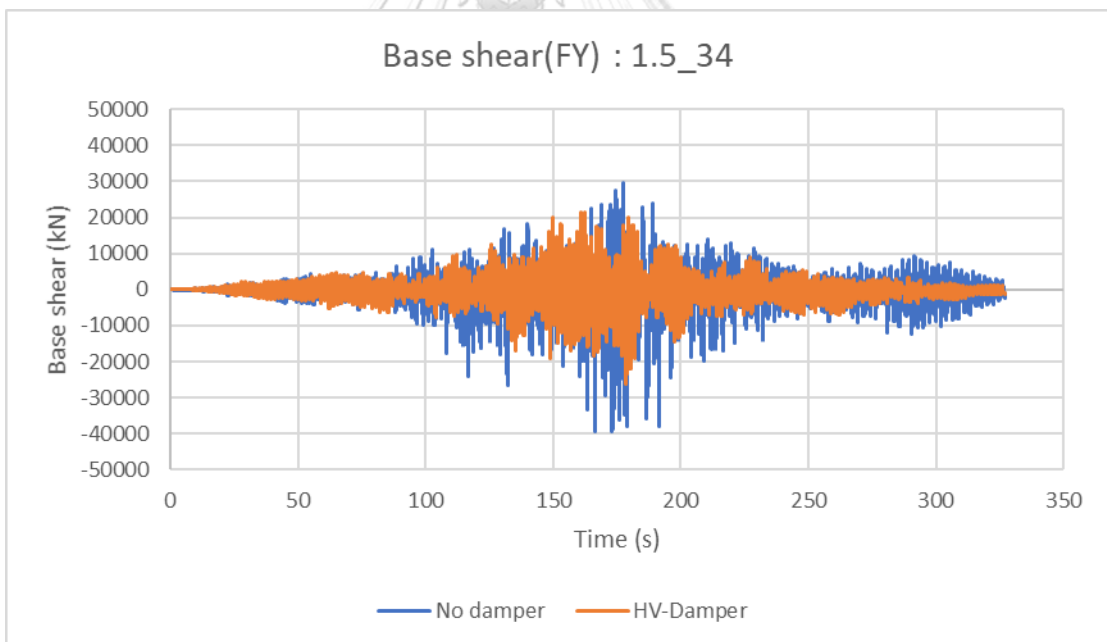
รูปที่ 4.41 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0\_12



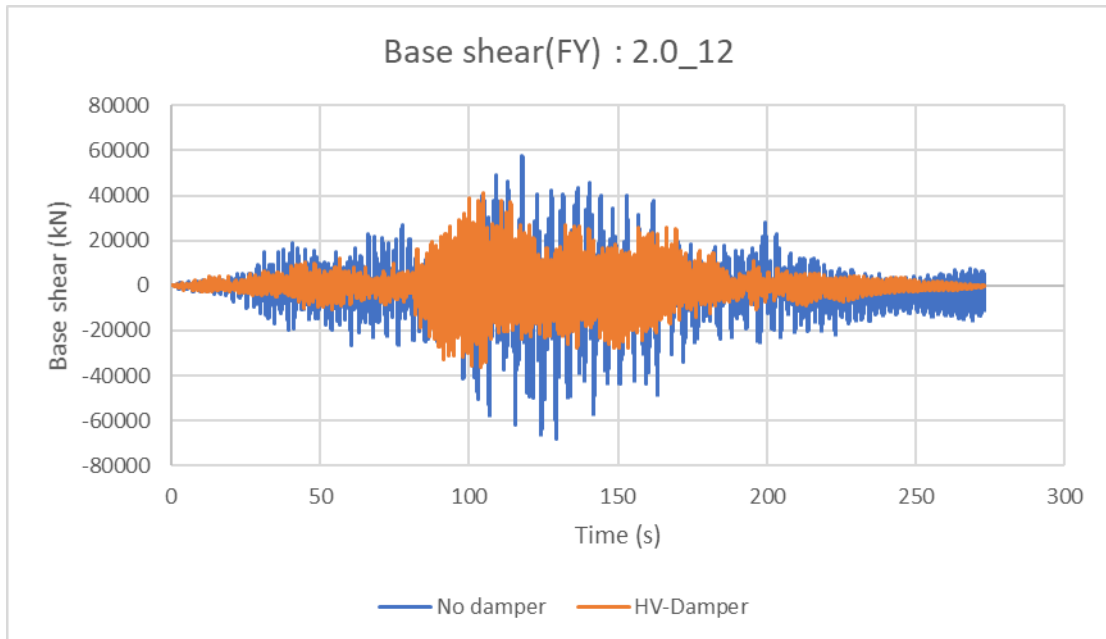
รูปที่ 4.42 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0\_78



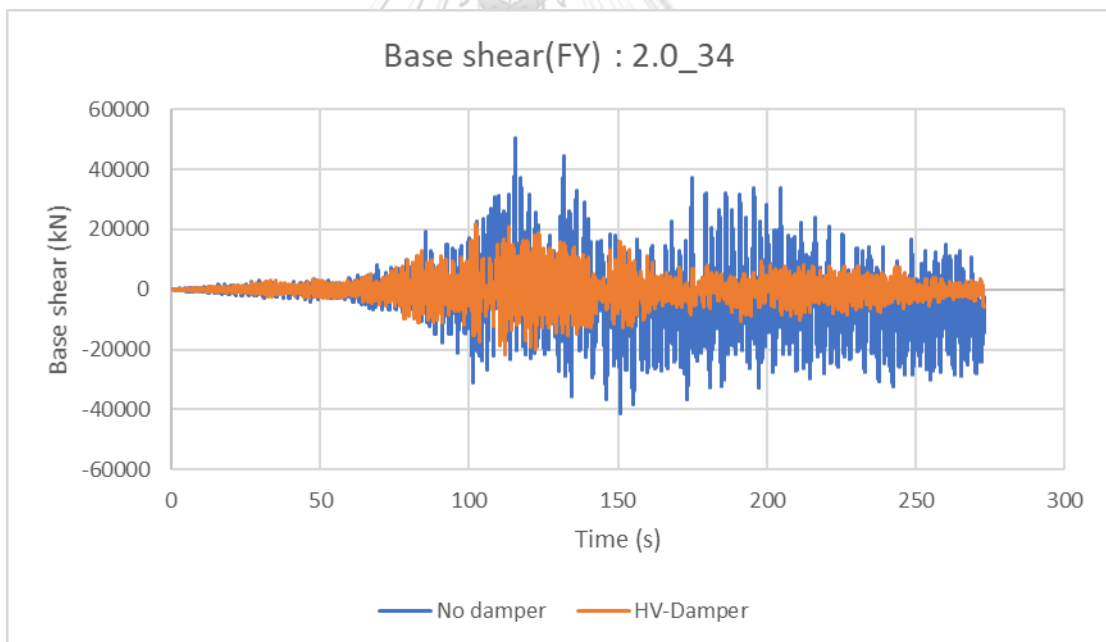
รูปที่ 4.43 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5\_12



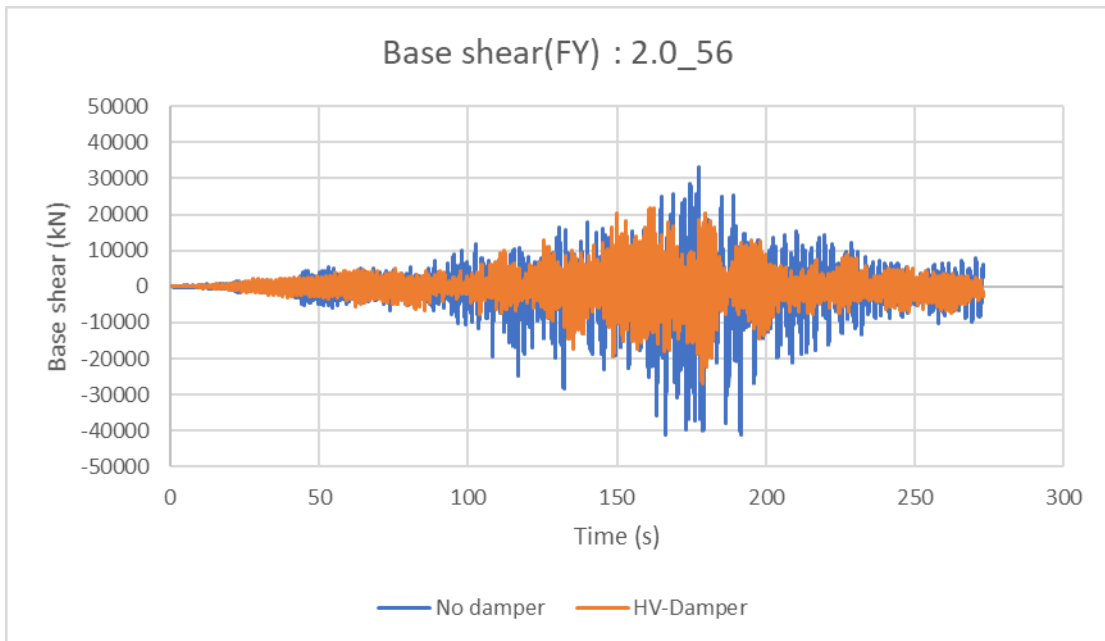
รูปที่ 4.44 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5\_34



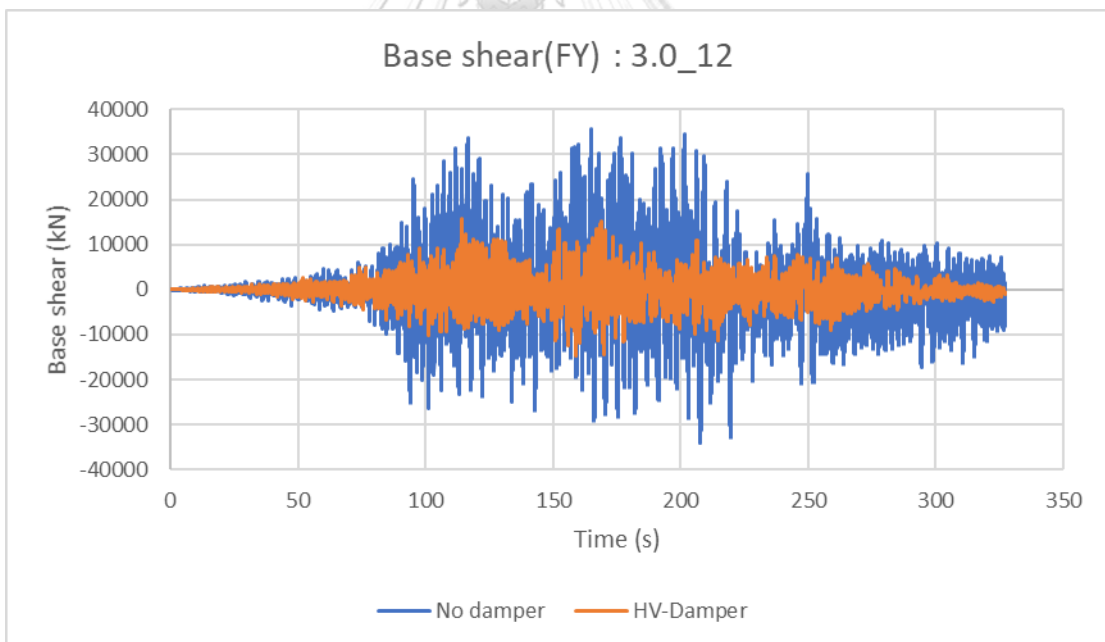
รูปที่ 4.45 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_12



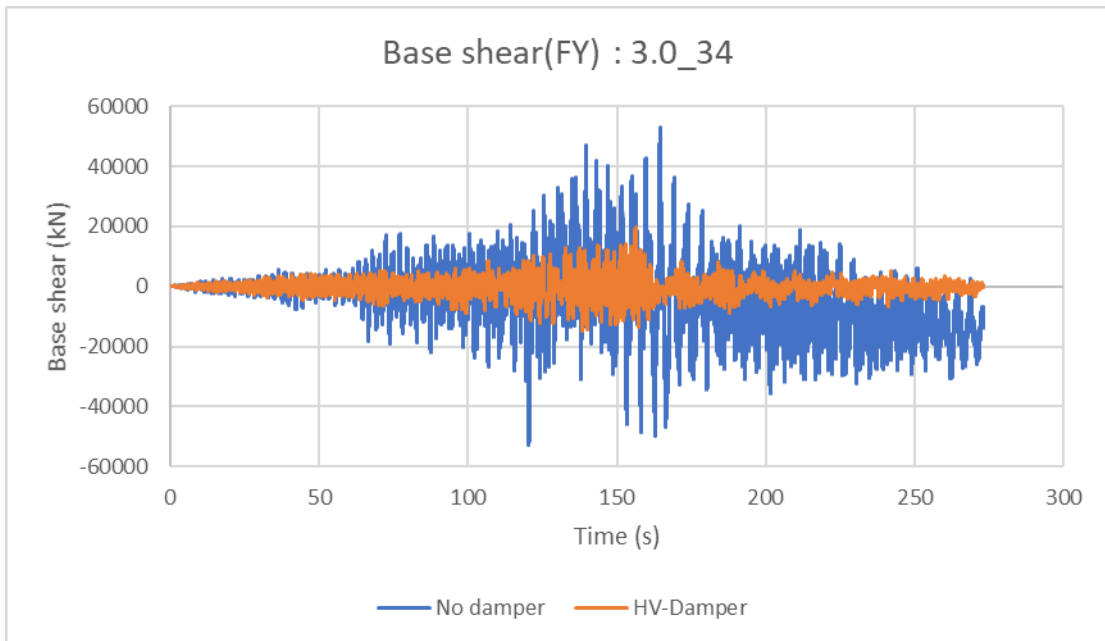
รูปที่ 4.46 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_34



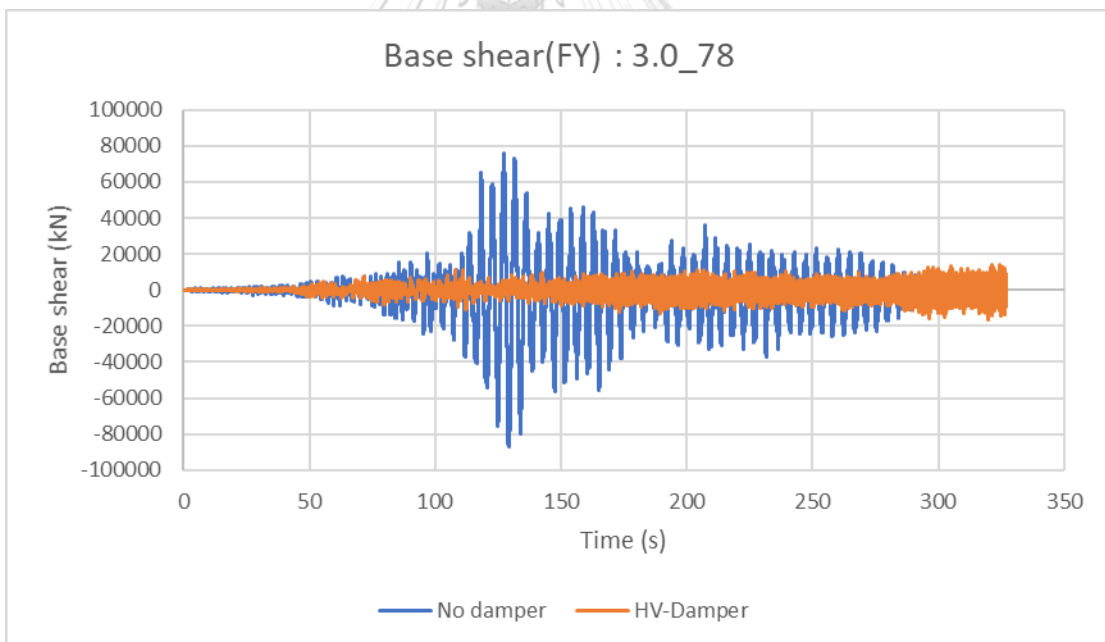
รูปที่ 4.47 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_56



รูปที่ 4.48 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_12



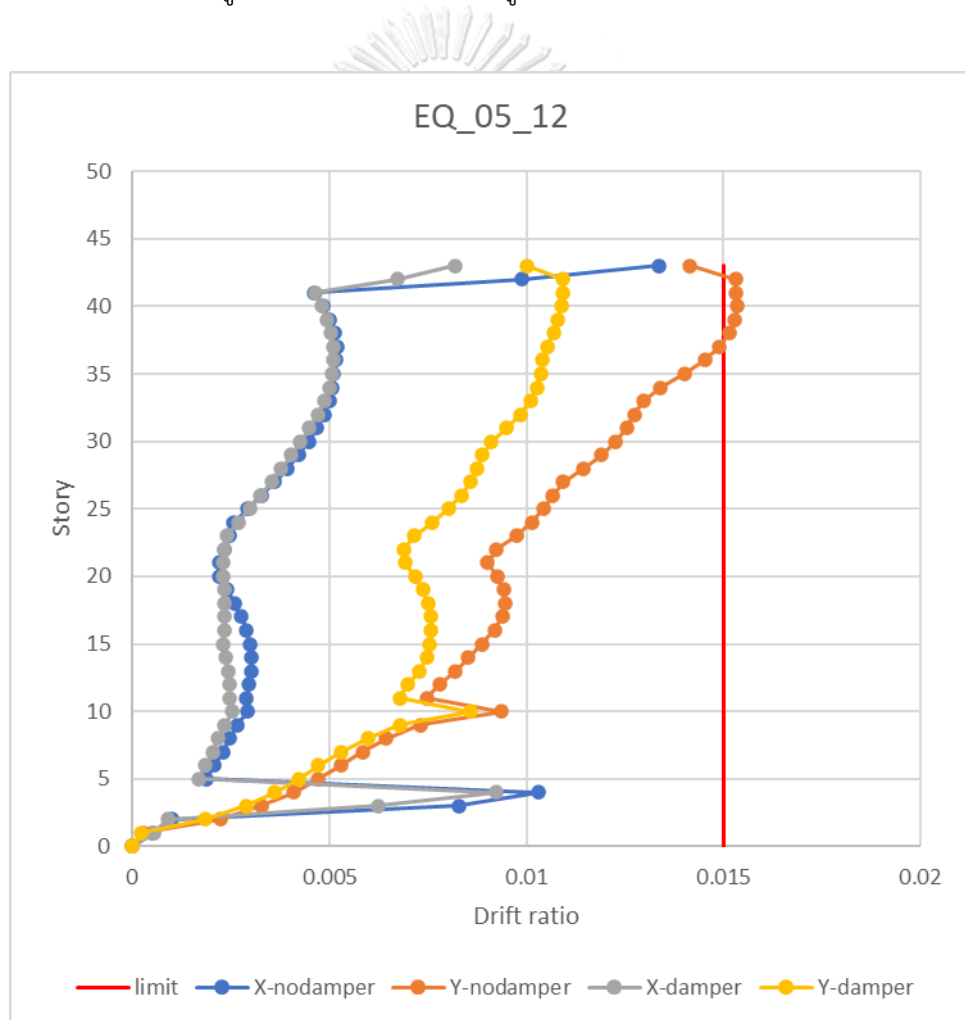
รูปที่ 4.49 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_34



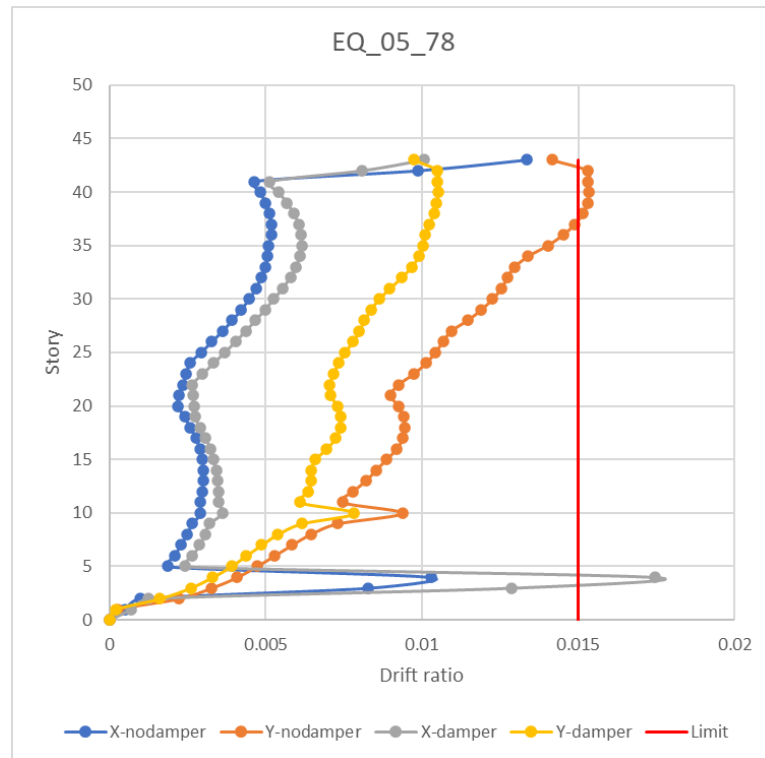
รูปที่ 4.50 แรงเฉือนที่ฐานอาคารที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_78

#### 4.6.3 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

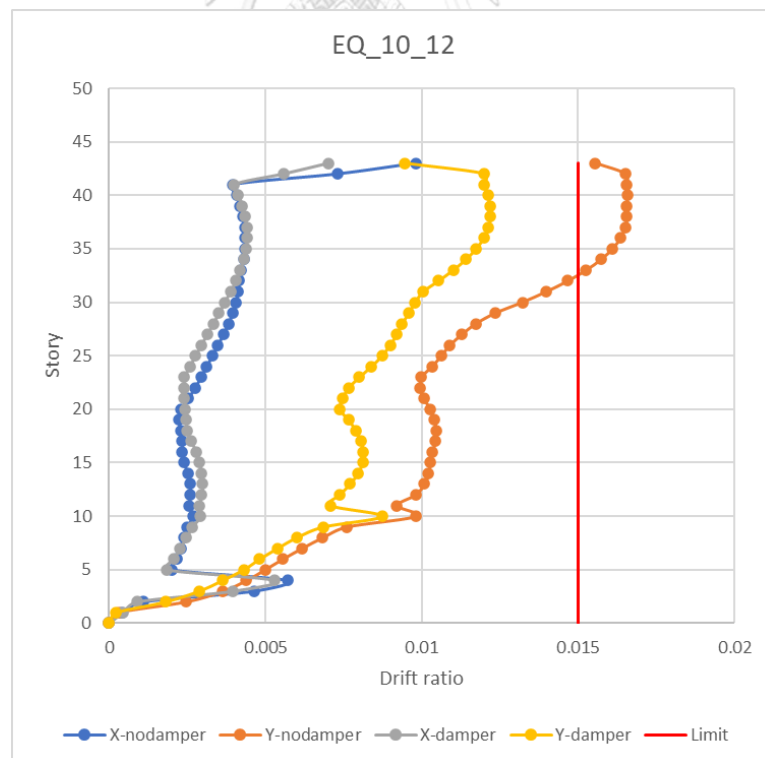
การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Interstory drift) ของรูปที่ 4.51-4.62 แสดงให้เห็นว่าอาคารที่มีการติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติคสามารถลดการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นได้อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะคลื่นแผ่นดินไหวที่มีคาบแผ่นดินไหวที่ยาวดังรูปที่ 4.61 จะเห็นได้ว่าอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานมี Interstory drift สูงสุดอยู่ที่ 0.0121 เปรียบเทียบกับอาคารเดิมที่มี Interstory drift สูงสุดอยู่ที่ 0.036 ซึ่งสามารถลดไปได้ถึง 2.97 เท่า และถึงแม้ว่าในบางกรณีเช่นรูปที่ 4.56, 4.57 และ 4.59 Interstory drift ในบางชั้นของอาคารที่มีการติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นมีค่าที่สูงกว่าอาคารเดิมแต่ก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยและยอมรับได้



รูปที่ 4.51 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_12

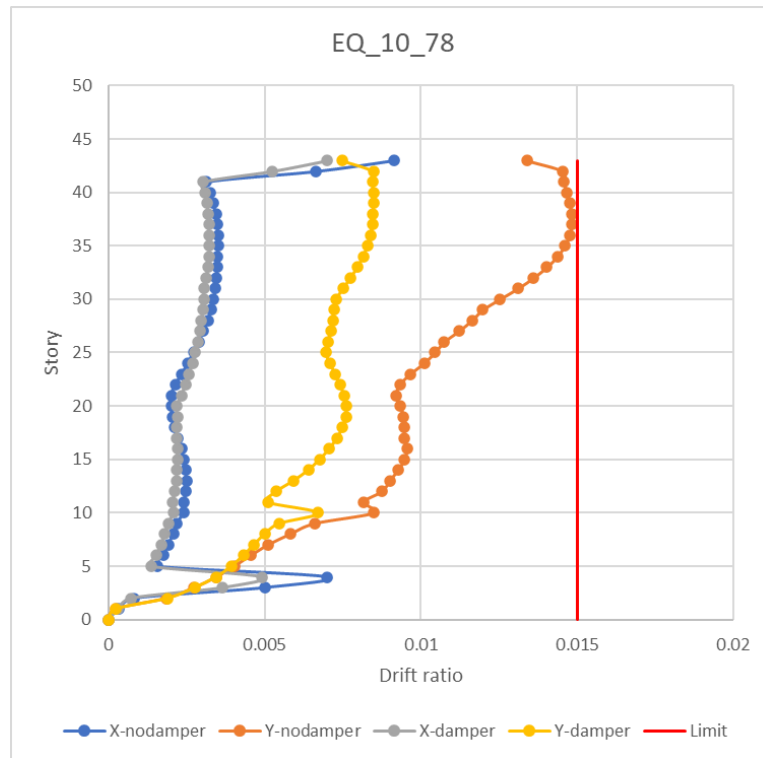


รูปที่ 4.52 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 0.5\_78

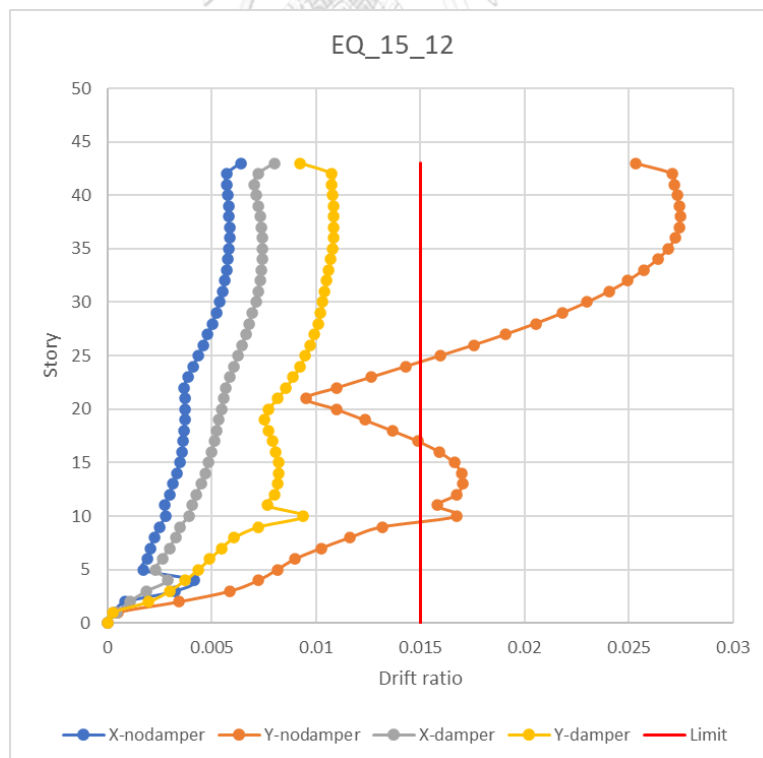


รูปที่ 4.53 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0\_12

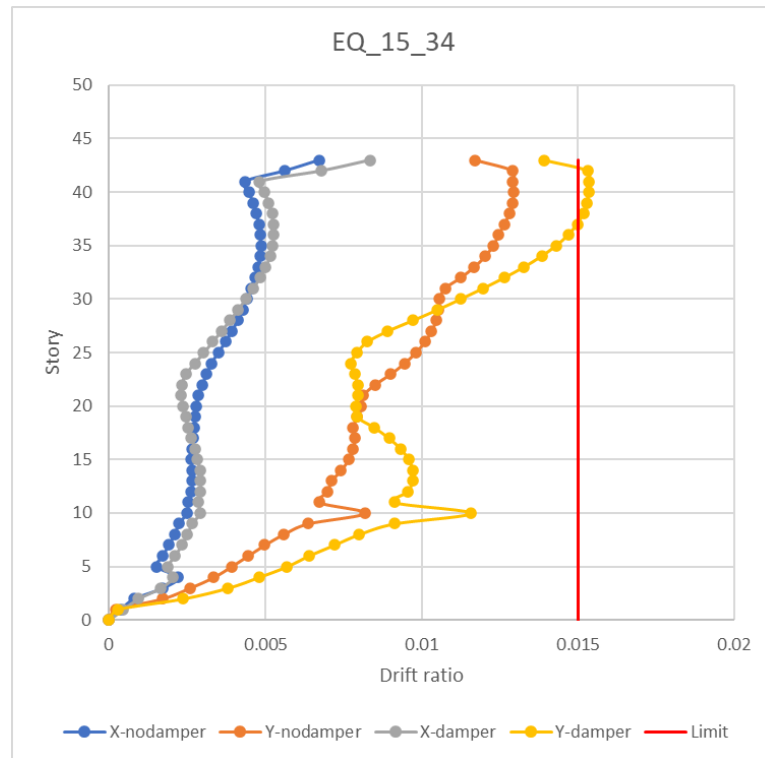




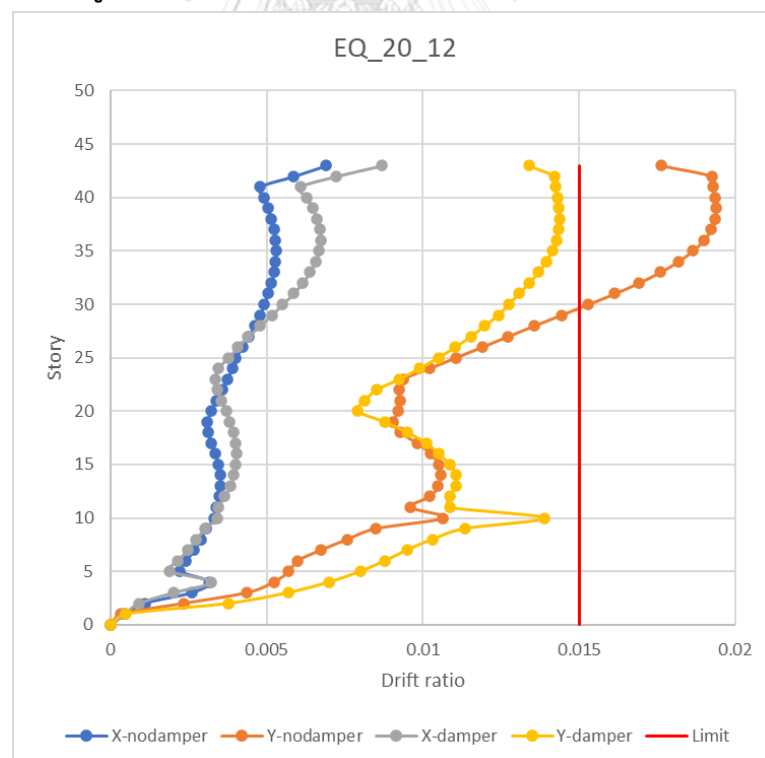
รูปที่ 4.54 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.0\_78



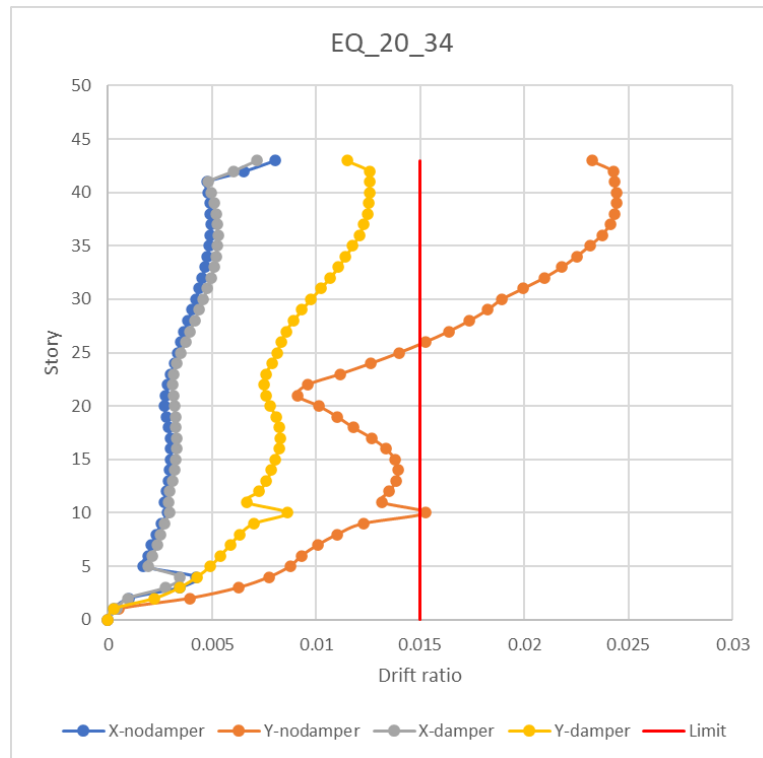
รูปที่ 4.55 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5\_12



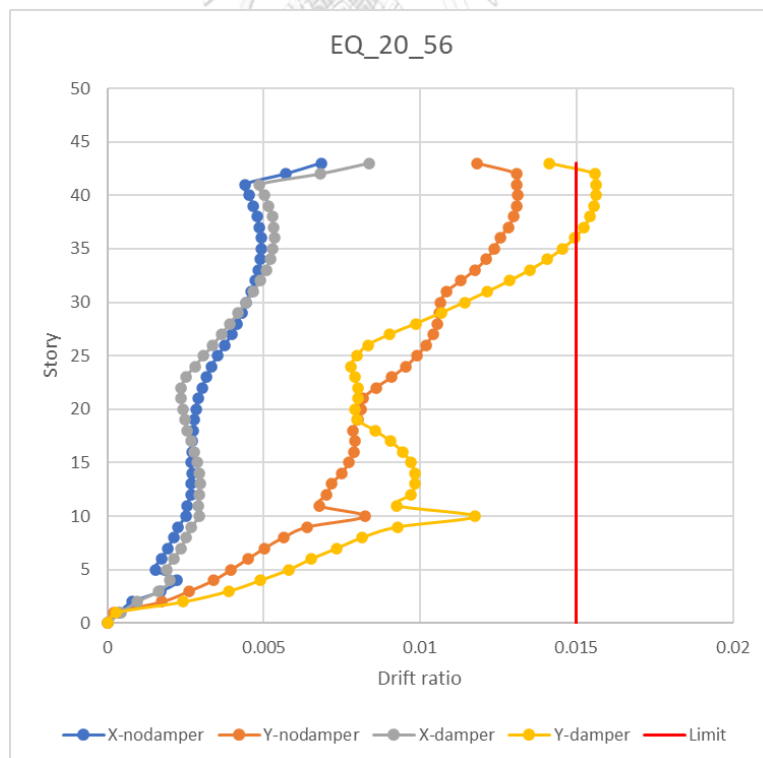
รูปที่ 4.56 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 1.5\_34



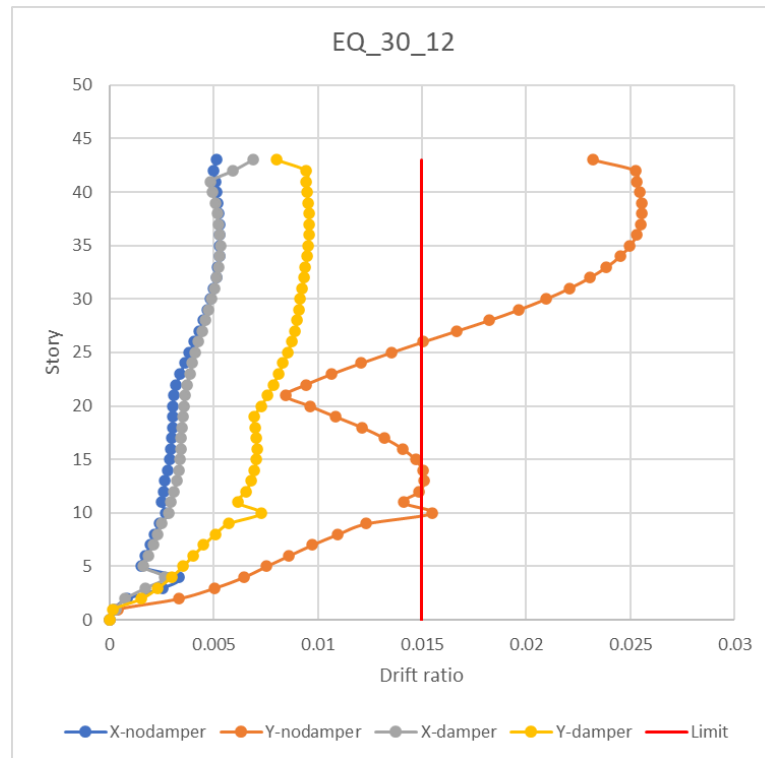
รูปที่ 4.57 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_12



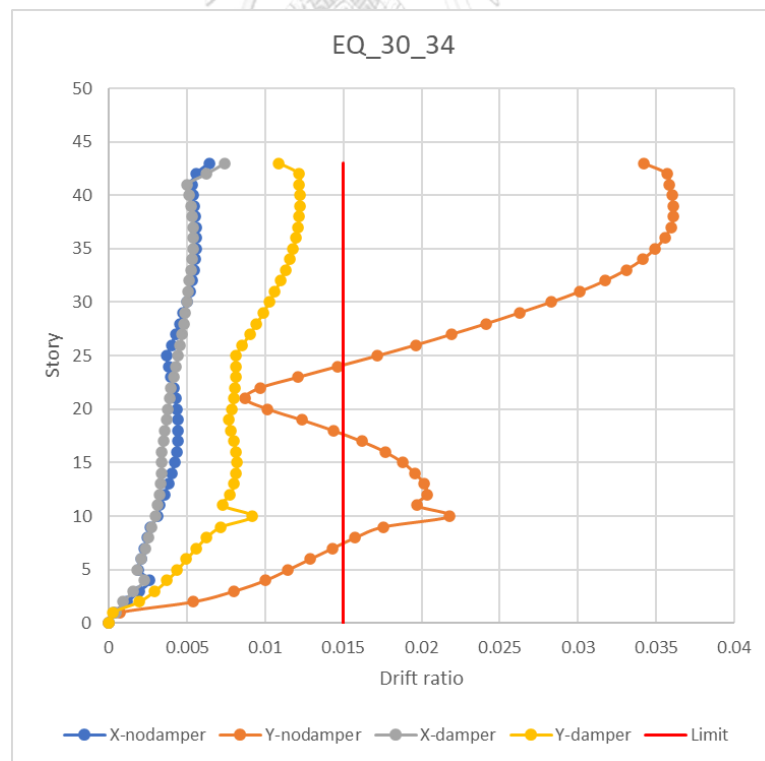
รูปที่ 4.58 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_34



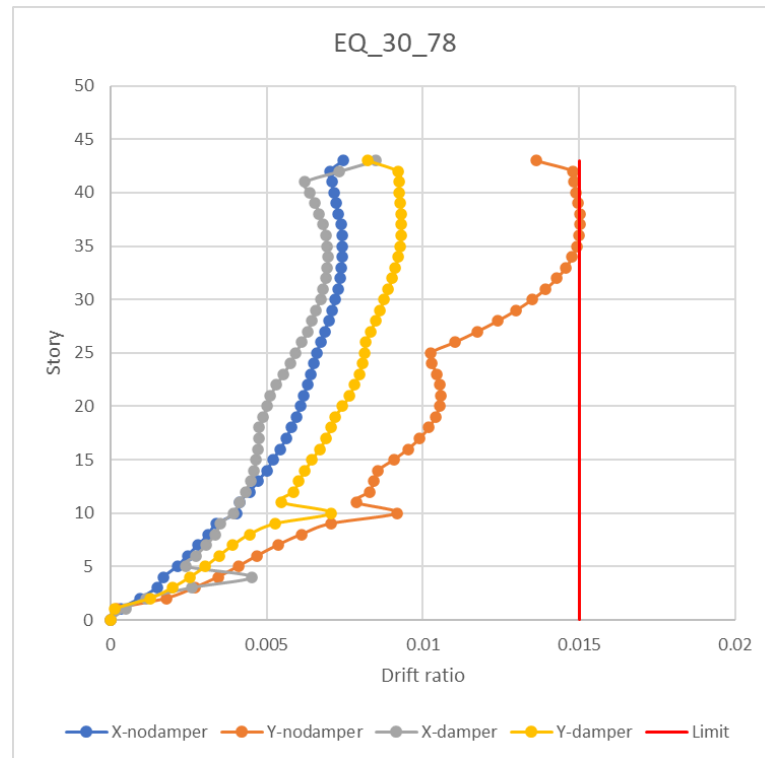
รูปที่ 4.59 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 2.0\_56



รูปที่ 4.60 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_12



รูปที่ 4.61 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_34



รูปที่ 4.62 Interstory drift ที่คลื่นแผ่นดินไหว 3.0\_78

#### 4.6.4 ผลการตอบสนองจากแรงลม

เนื่องด้วยการวิเคราะห์แรงลมด้วยวิธีแบบเชิงเส้นจำเป็นต้องรู้อัตราส่วนความหน่วงของอาคารถึงจะสามารถคาดการณ์ผลตอบสนองจากผลการทดสอบจากอุโมงค์ลม จึงทำการทดสอบให้การเคลื่อนที่ของอาคารด้วยโหมดการเคลื่อนที่หลัก (แกน Y) โดยการตั้งค่าความหน่วงแบบ Rayleigh Damping (C) ที่ 0.75% ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$C = \mu m + \lambda k \quad (15)$$

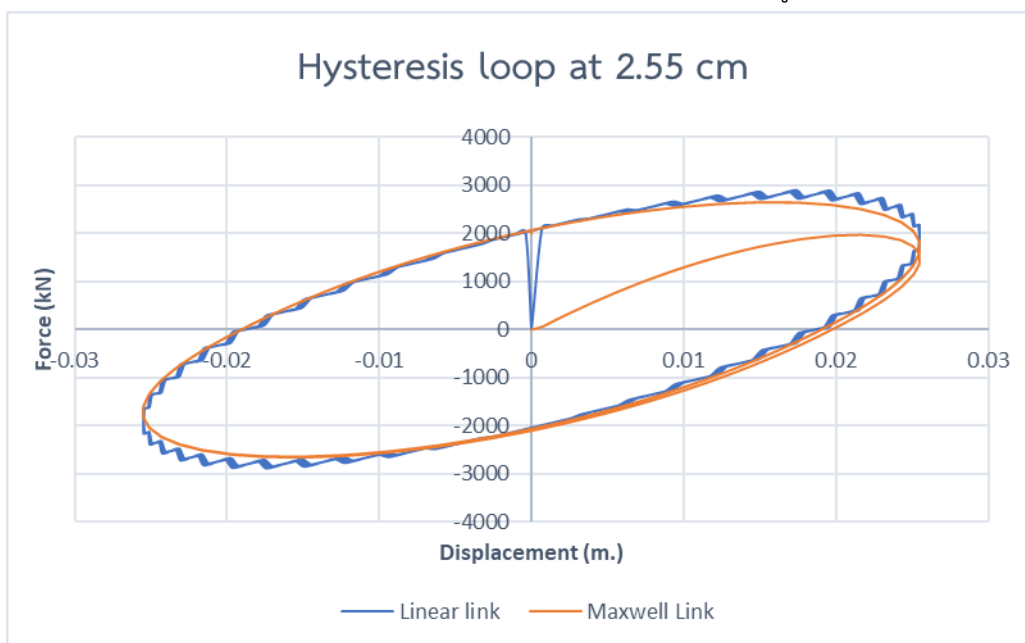
โดยที่

- $\mu$  คือ Mass Proportional Coefficient
- $\lambda$  คือ Stiffness Proportional Coefficient
- m คือ น้ำหนักโดยรวมของโครงสร้าง
- k คือ สติฟเนสของโครงสร้าง

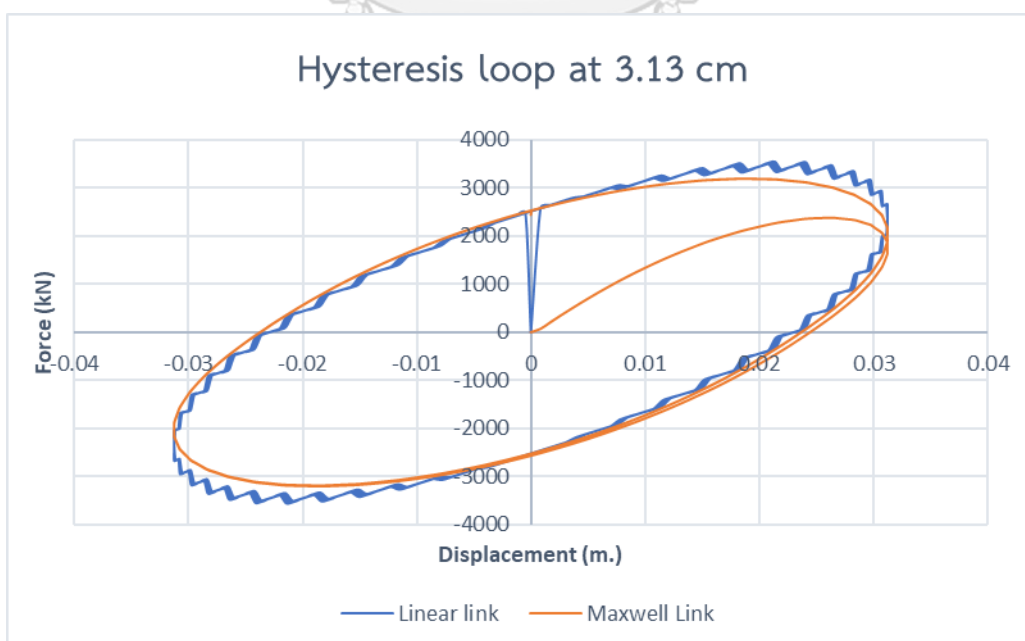
โดยการตั้งค่าความหน่วงแบบ Rayleigh damping ของโครงสร้างในโปรแกรม ETABS ทำได้โดยการระบุค่าการเคลื่อนที่หลักของ mode ที่ 1 และ 2 และกำหนดค่า damping ดังแสดงในรูปที่ 4.63

รูปที่ 4.63 การตั้งค่า Damping ratio ของโปรแกรม ETABS

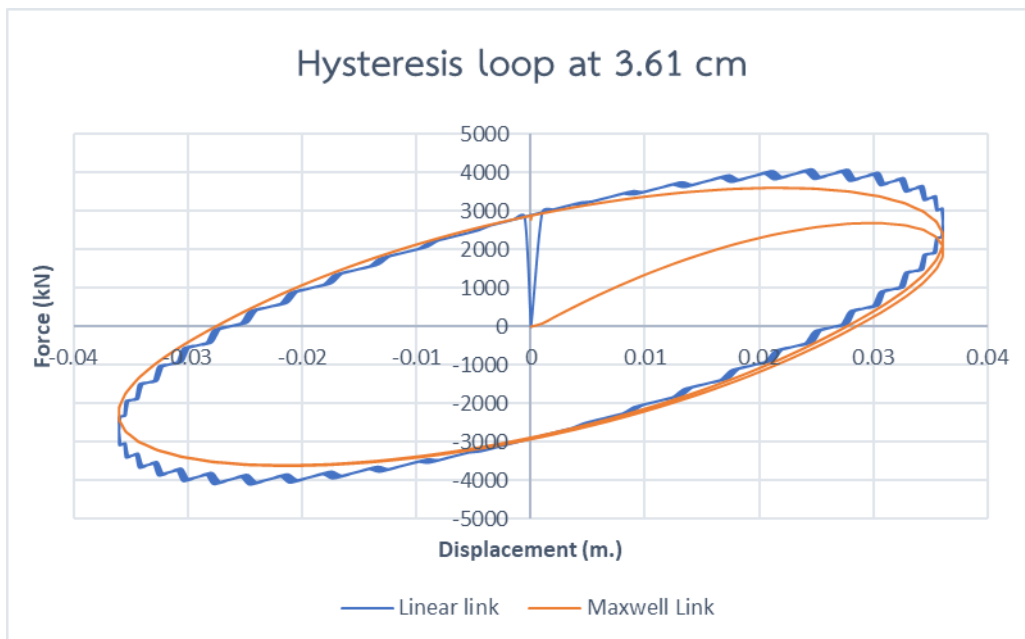
เนื่องจากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนประเภทของแบบจำลองจาก Exponential maxwell เป็น Linear link ในอาคารที่ติดตั้ง damper ซึ่งต้องทำการปรับแก้ค่าของแบบจำลองผนังสลายพลังงานแบบ Linear link ให้ได้พื้นที่ Hysteresis loop ที่ใกล้เคียงกับ Exponential maxwell ที่ขนาดการเคลื่อนที่เดียวกัน โดยมีค่า Equivalent stiffness = 75,176.2 kN-m และ Equivalent damping = 147,497 kN-(sec/m) แสดงดังรูปที่ 4.64-4.66



รูปที่ 4.64 กราฟ Hysteresis loop เปรียบเทียบระหว่าง Linear และ Maxwell link ที่ 2.55 ซม.



รูปที่ 4.65 กราฟ Hysteresis loop เปรียบเทียบระหว่าง Linear และ Maxwell link ที่ 3.13 ซม.



รูปที่ 4.66 กราฟ Hysteresis loop เปรียบเทียบระหว่าง Linear และ Maxwell link ที่ 3.61 ซม.

ในอาคารที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติคจะใช้ค่า Rayleigh damping เดียวกับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง โดยตัวโปรแกรมจะรวมผลของค่า damping และ stiffness ที่เพิ่มขึ้นมาจากตัวผนังสลายพลังงานให้โดยอัตโนมัติ แล้วใส่แรงด้วยเวกเตอร์ของ mode ที่ 1 แบบฮาร์โมนิค ให้เกิดการ resonance กับอาคาร แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธี History Linear Analysis จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ ณ Steady state ของอาคารที่เกิดการ resonance กับผลการเคลื่อนที่แบบ Static ของอาคารตั้งสมการที่ (16) และ (17)

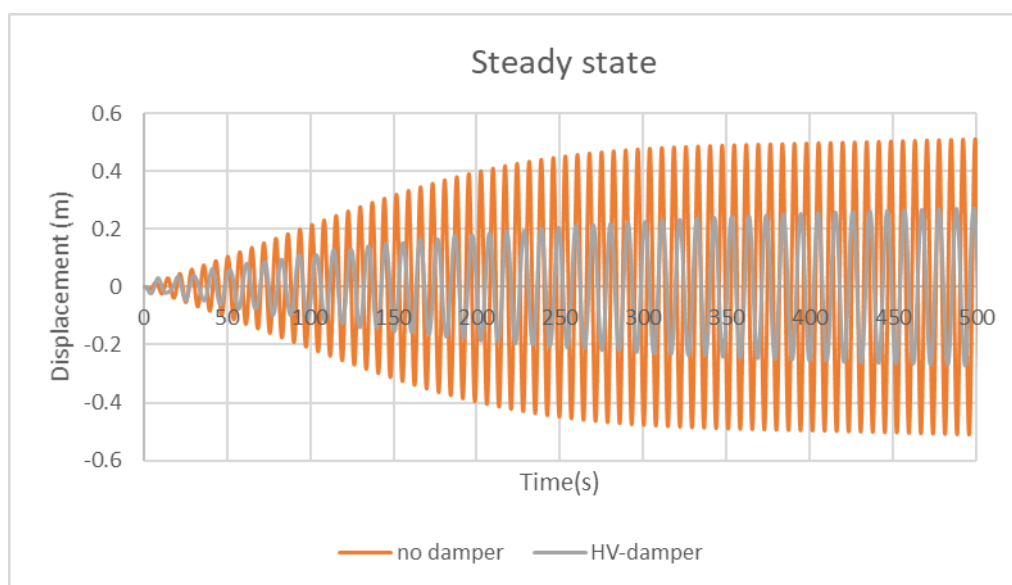
$$X_D = X_S \cdot DAF \quad (16)$$

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{[1 - \beta^2] + [2\zeta\beta]^2}} \quad (17)$$

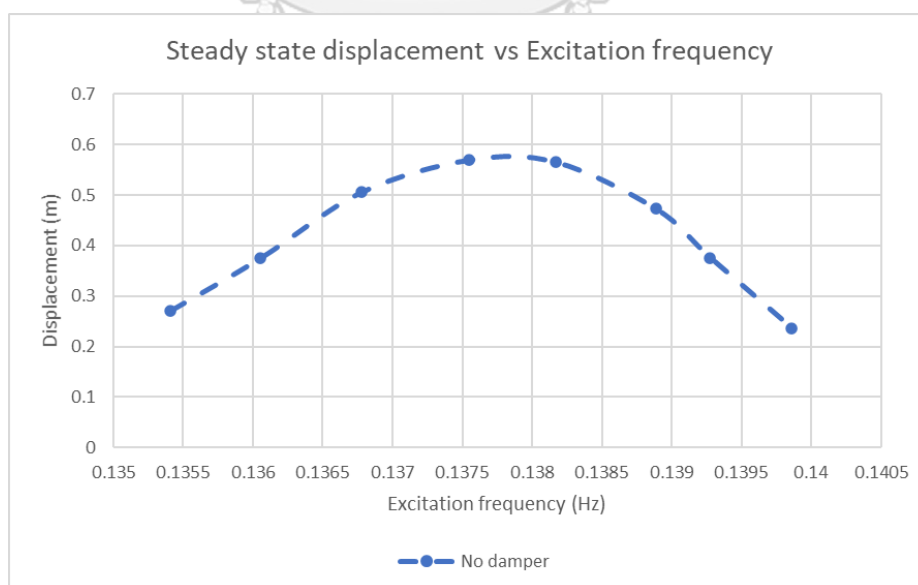
โดยที่	$X_D$	คือ ผลการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ (Dynamic deflection)
	$X_S$	คือ ผลการเคลื่อนที่แบบสถิตย์ (Static deflection)
	DAF	คือ Dynamic Amplification Factor
	$\beta$	คือ อัตราส่วนความถี่ของอาคารกับแรง (Frequency ratio)



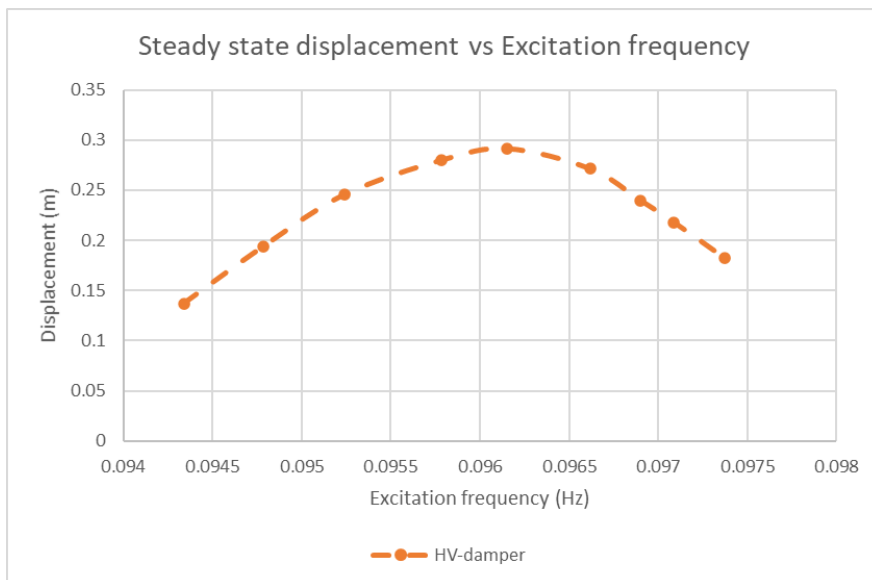
เมื่ออาคารเกิดการ resonance ค่า  $\beta = 1$  จึงสามารถประมาณค่า DAF ได้เท่ากับ  $1/2\zeta$  จากผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.67-4.69 ค่าการเคลื่อนที่ของอาคารที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงานแบบ Static มีค่าเท่ากับ 0.008 ม. และอาคารที่ติดตั้งเท่ากับ 0.014 ม. จึงสามารถประมาณอัตราส่วนความหน่วงของอาคารที่ไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานได้เท่ากับ 0.7% และ อาคารที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานเท่ากับ 2.37 %



รูปที่ 4.67 ผลการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ที่ Steady state เมื่อเกิดการ Resonance ของอาคาร



รูปที่ 4.68 การเคลื่อนที่ ณ Steady state ที่ความถี่ของแรงที่กระทำต่างๆ ของอาคารที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน

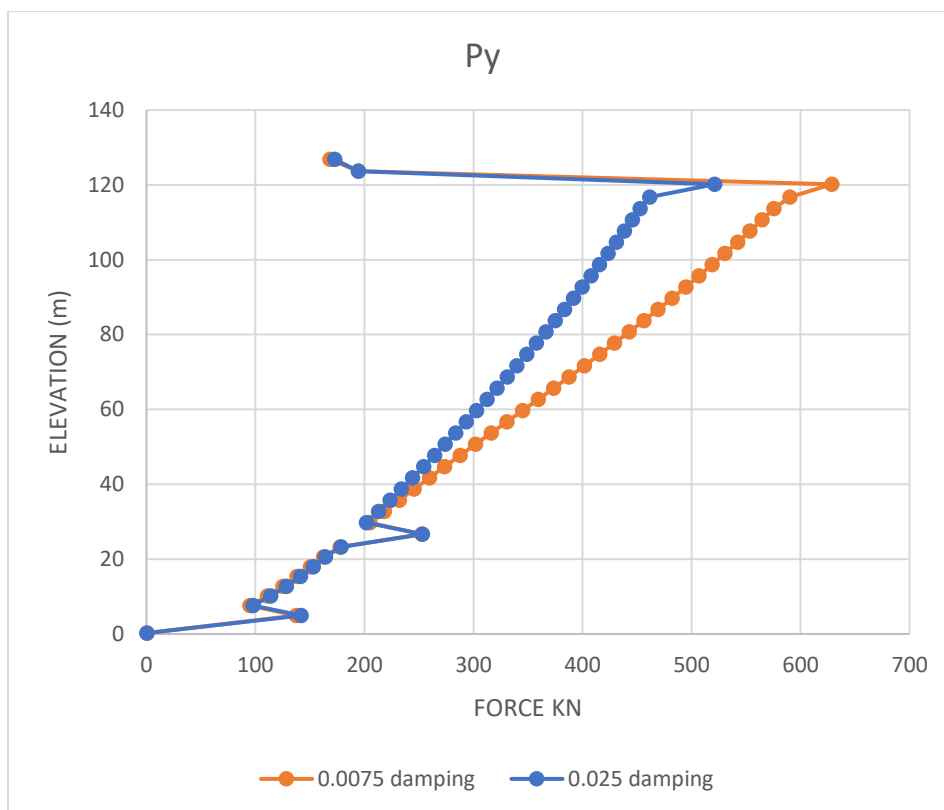


รูปที่ 4.69 การเคลื่อนที่ ณ Steady state ที่ความถี่ของแรงที่กระทำต่างๆ ของอาคารที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน

อาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงสลายพลังงานมีอัตราส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นมาเป็น 2.37% จึงเลือกใช้ข้อมูลขนาดของแรงลมที่อัตราส่วนความหน่วงของอาคารเท่ากับ 0.025 จากข้อมูลการประเมินแรงลมตามอัตราส่วนความหน่วงของอาคารจากผลการทดสอบของอุโมงค์ลม ดังตารางที่ 4.9

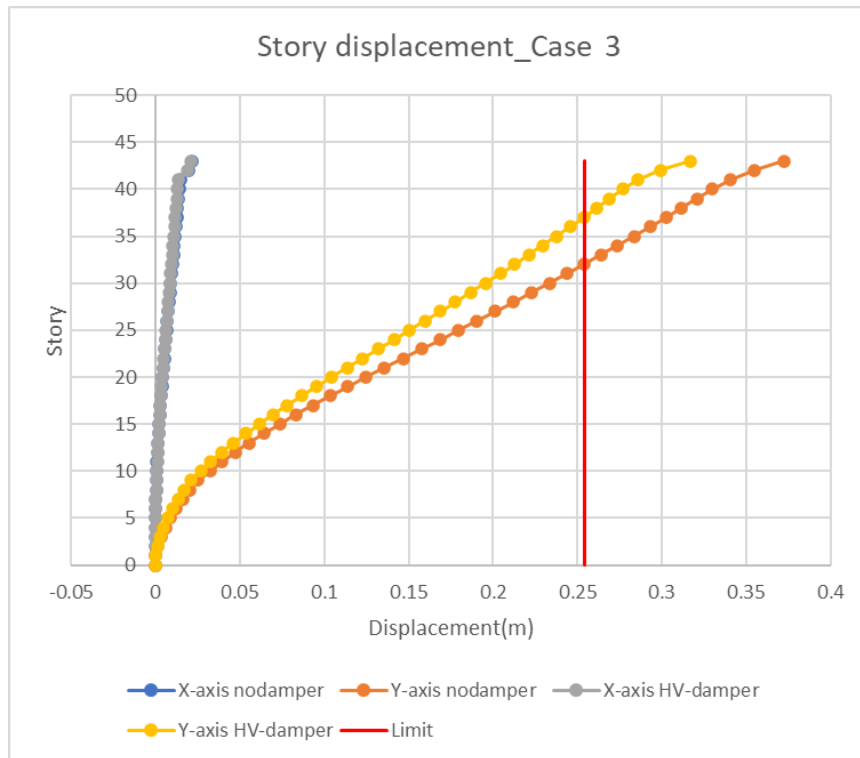
ตารางที่ 4.9 ขนาดของแรงที่อัตราส่วนความหน่วง 0.025

Load KN							
Elev. (m)	Px	Py	Rz	Elev. (m)	Px	Py	Rz
126.8	40	173	-1785	59.7	32	303	-3280
123.7	45	194	-1990	56.7	31	293	-3162
120.2	60	521	-5612	53.7	30	284	-3043
116.7	56	462	-5188	50.7	28	274	-2924
113.7	55	453	-5088	47.7	27	264	-2805
110.7	54	446	-5011	44.7	26	254	-2686
107.7	52	438	-4933	41.7	25	244	-2568
104.7	51	431	-4843	38.7	23	234	-2450
101.7	50	423	-4764	35.7	22	223	-2332
98.7	49	416	-4673	32.7	21	213	-2214
95.7	47	408	-4582	29.7	20	202	-2096
92.7	46	400	-4479	26.7	22	253	-2661
89.7	45	392	-4387	23.2	15	179	-1875
86.7	44	383	-4283	20.55	14	164	-1719
83.7	42	375	-4178	17.95	13	153	-1597
80.7	41	366	-4073	15.35	12	141	-1469
77.7	40	358	-3968	12.75	11	128	-1333
74.7	39	349	-3852	10.15	10	114	-1184
71.7	37	340	-3744	7.55	8	98	-1015
68.7	36	331	-3630	4.95	12	142	-1471
65.7	35	322	-3514	0.25	0	0	-5
62.7	33	312	-3397				

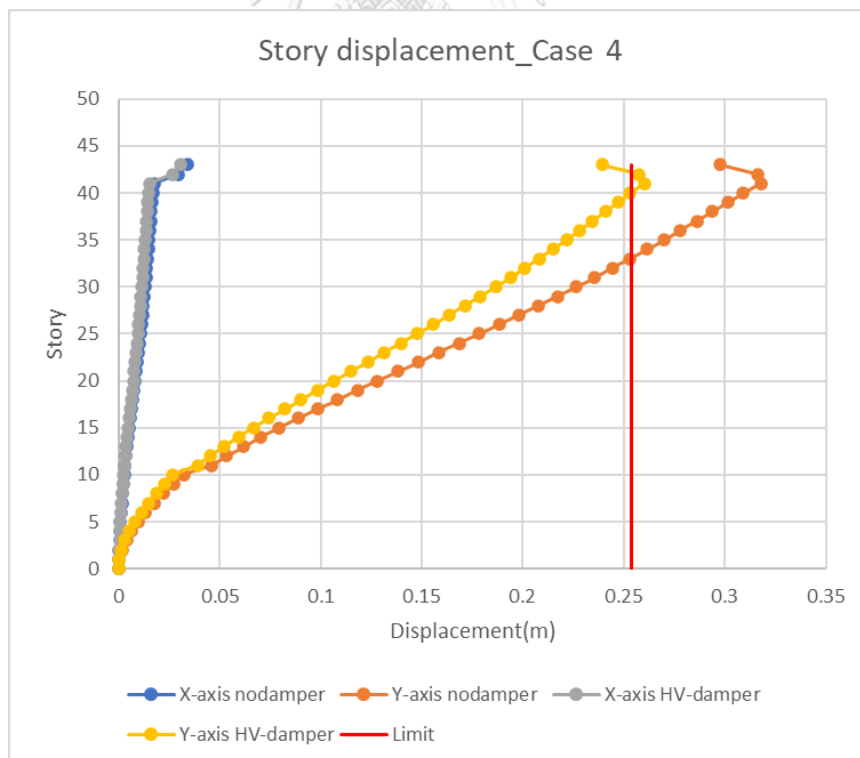


รูปที่ 4.70 กราฟเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางแกน Y  
ระหว่างอัตราส่วนความหน่วง 0.0075 และ 0.025

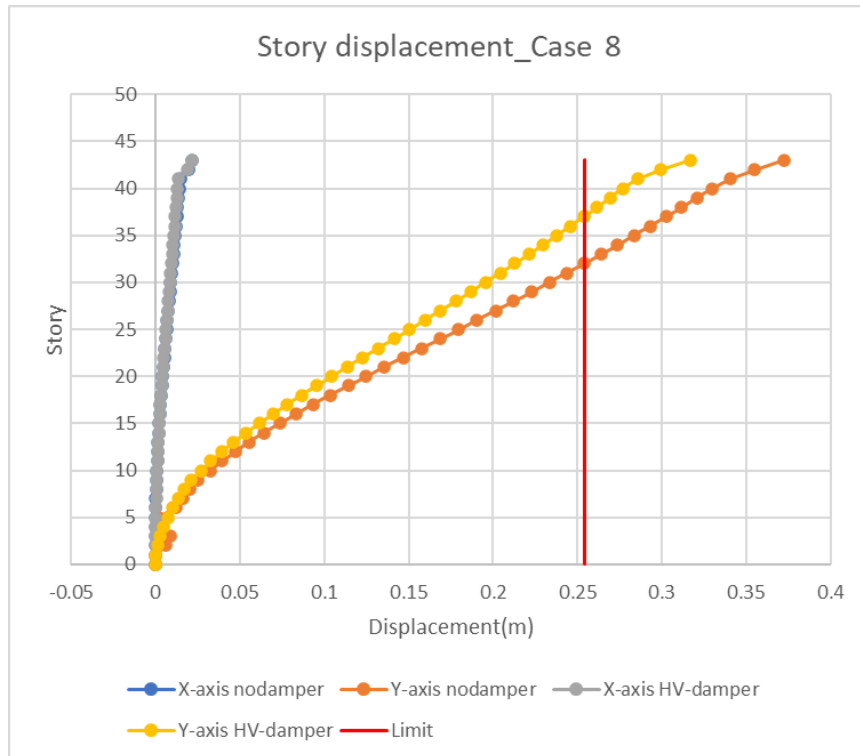
ผลการเปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนที่ที่ยึดของอาคารทั้ง 5 กรณีดังอภิปรายไว้ในหัวข้อ 4.5 ที่ทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุดมีทิศทางในแนวแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 4.71-4.75 พบว่าการติดตั้งห่วงสลวยพลังงานแบบวิสโคอีลาสติคนั้น สามารถลดขนาดการเคลื่อนที่ของอาคารได้ประมาณ 15% ซึ่งสอดคล้องกับแรงที่ลดลงเมื่อมีอัตราส่วนความหน่วงที่สูงขึ้นดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.71 การเคลื่อนที่ที่ข้อยอดของอาคารกรณีแรงลม 3



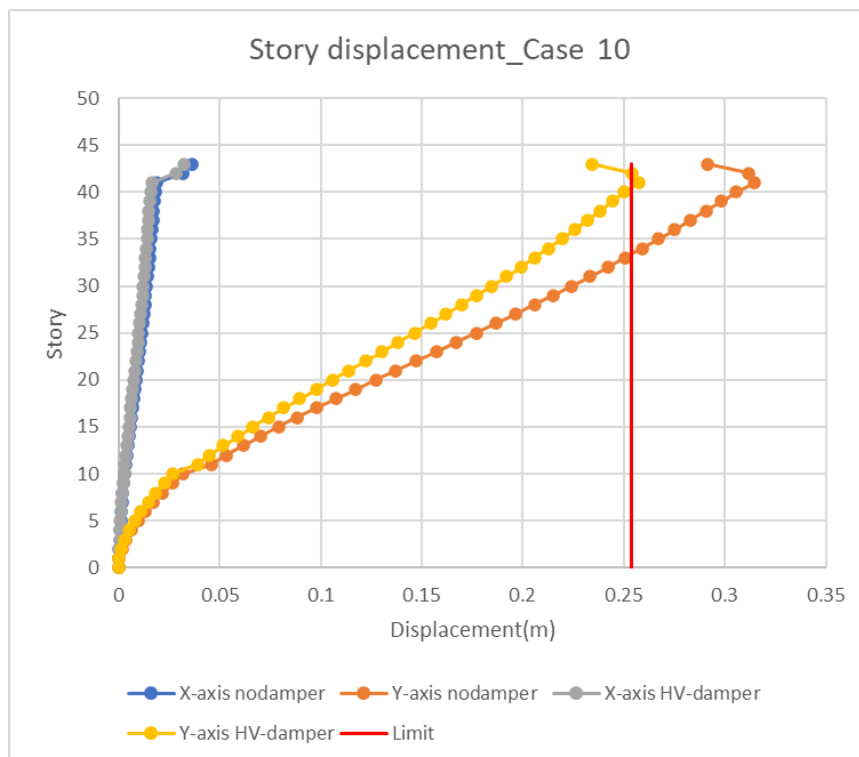
รูปที่ 4.72 การเคลื่อนที่ที่ข้อยอดของอาคารกรณีแรงลม 4



รูปที่ 4.73 การเคลื่อนที่ที่ยืดของอาคารกรณีแรงลม 8



รูปที่ 4.74 การเคลื่อนที่ที่ยืดของอาคารกรณีแรงลม 9



รูปที่ 4.75 การเคลื่อนที่ที่ยืดของอาคารกรณีแรงลม 10

และในด้านของความเร่งสูงสุดในแกน Y ที่ยอดของอาคารเมื่อพิจารณาที่แรงลมคาบเวลาย้อนกลับ 10 ปี โดยมีค่าความหน่วง 0.75% ของอาคารที่ไม่ได้ติดตั้งผนังสลายพลังงาน และความหน่วง 2.5% ของอาคารที่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน พบว่าอาคารที่ไม่ได้ติดตั้งผนังสลายพลังงาน มีค่าความเร่งอยู่ที่ 24.04 mG ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 ที่กำหนดให้ความเร่งไม่ควรเกิน 15 mG สำหรับอาคารที่พักอาศัย โดยอาคารที่ติดตั้งมีค่าอยู่ที่ 13.17 mG ซึ่งผ่านเกณฑ์ดังที่แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความเร่งสูงสุดที่ยืดของอาคารภายใต้แรงลม

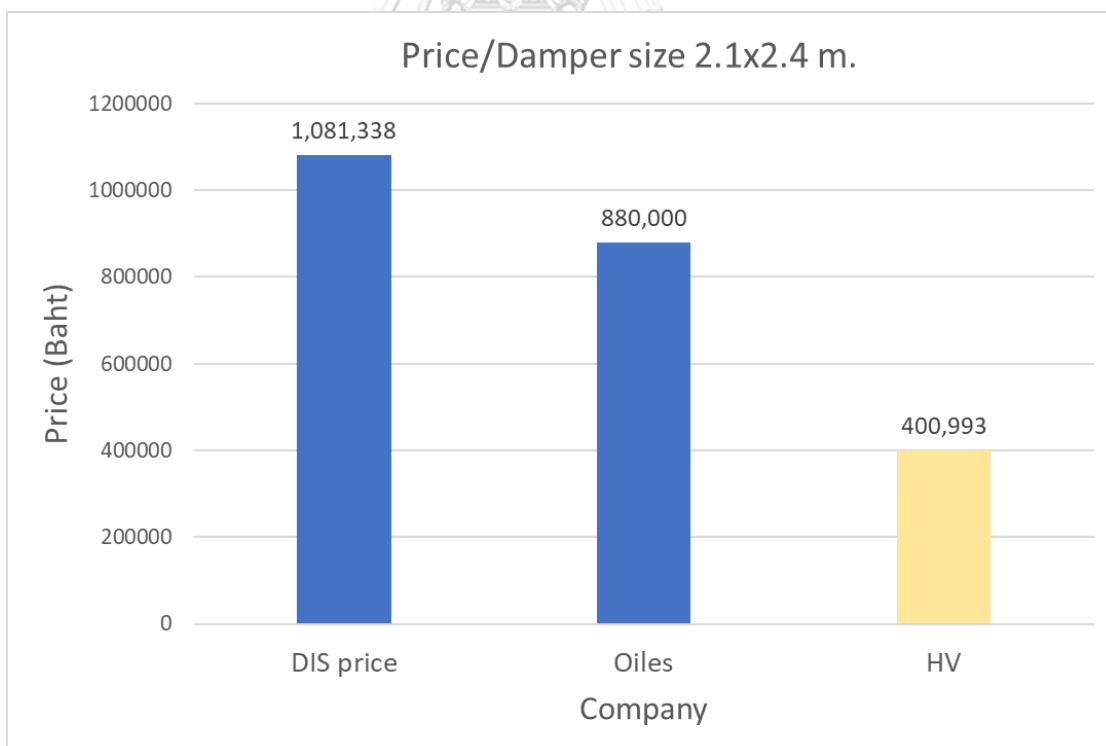
Case	Damping Ratio	Accerelation(mG)
No Damper	0.0075	24.04
Hv-damper	0.025	13.17

#### 4.6.5 การประเมินราคาเบื้องต้น

เพื่อเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกกับผนังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous wall damper) ที่มีจำหน่ายอยู่ในต่างประเทศจึงทำการประเมินราคาที่เหมาะสมของผนังสลายพลังงานเท่ากับ 2.4 m. x 2.1 m. โดยมีค่าวัสดุตั้งตารางที่ 4.11 พบว่าราคาของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกที่ใช้ PIB ชนิดความหนืดสูงนั้น มีราคาที่ถูกกว่าทั้งสองบริษัทดังรูปที่ 4.76 โดยมีราคาที่ถูกกว่าบริษัท DIS 2.7 เท่าและบริษัท OILES 2.2 เท่า อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อมีขนาดที่เท่ากันดังแสดงในหัวข้อ 3.2.3

ตารางที่ 4.11 ราคาวัสดุของตัวหน่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติก

วัสดุ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย
PIB-HV	500	บาท/ลิตร
เหล็ก (รวมทำสี)	100	บาท/กิโลกรัม
ค่าประกอบ	150,000	บาท/ชิ้น



รูปที่ 4.76 กราฟเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยของผนังสลายพลังงาน



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

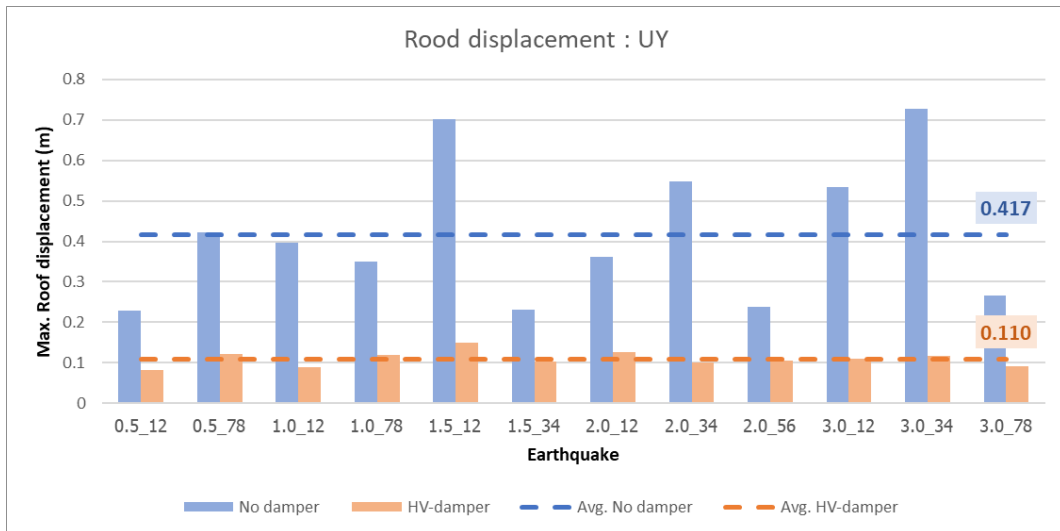
#### 5.1 วัสดุวิสโคอิลาสติกชนิด PIB-HV

เพื่อพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกด้วยวัสดุที่หาซื้อได้ในราคาประหยัด จึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานจากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างขนาดย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าวัสดุวิสโคอิลาสติกชนิด PIB-HV มีคุณสมบัติในการสลายพลังงานที่ดี มีเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งดีกว่าวัสดุยางมะตอยที่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิเป็นอย่างมาก และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายพลังงานกับผลิตภัณฑ์ผนังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous Wall Damper) ที่มีจำหน่ายของต่างประเทศ พบว่าผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานได้ดีกว่ามาก จึงสามารถลดขนาดหรือจำนวนผนังสลายพลังงานที่ต้องติดตั้งในอาคารได้ ทำให้ต้นทุนการติดตั้งผนังสลายพลังงานในอาคารลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบางกรณีอาจทำให้ราคาโครงสร้างโดยรวมประหยัดกว่าอาคารที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน

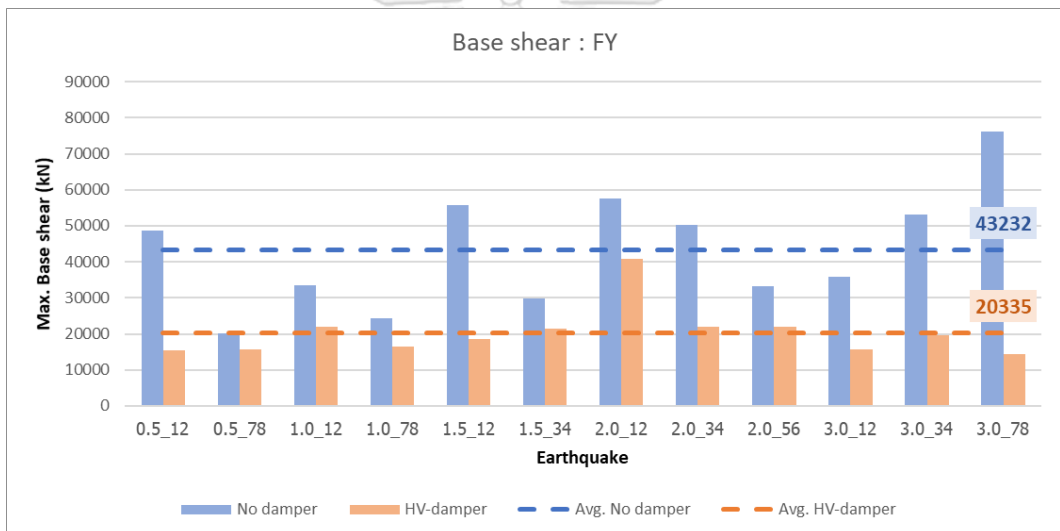
อย่างไรก็ดีการใช้วัสดุวิสโคอิลาสติกมีผลทำให้ผนังสลายพลังงานที่ได้มีค่าสติเฟนสูงกว่่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ ดังนั้นการออกแบบติดตั้งต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อจัดการแรงภายในอาคารหรือในฐานรากที่อาจเพิ่มมากขึ้นในบางบริเวณอย่างเหมาะสม

#### 5.2 ประสิทธิภาพด้านแผ่นดินไหว

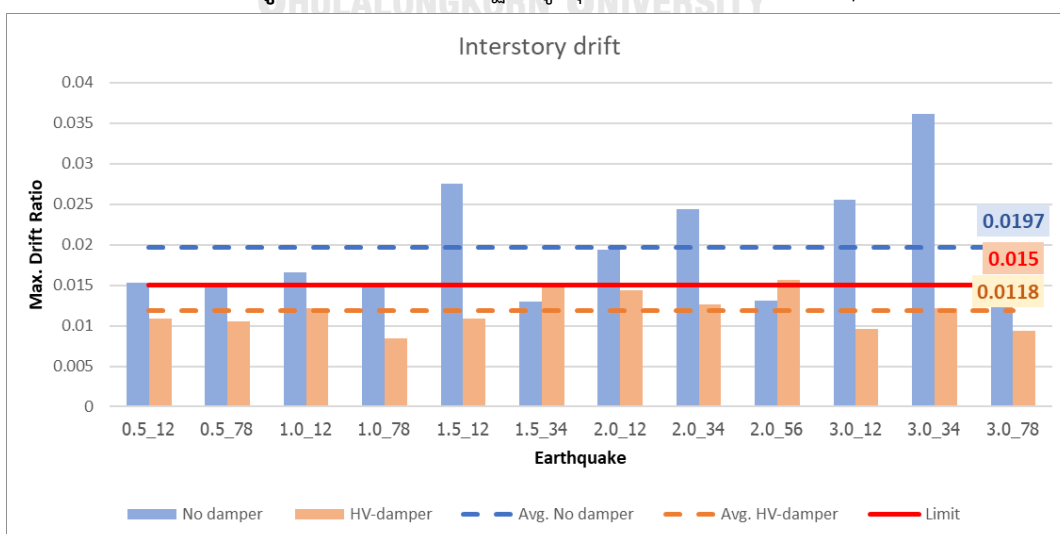
ตามมาตรฐานของ ASCE 7-16 เมื่อมีการวิเคราะห์ห้เคลื่อนแผ่นดินไหวมากกว่า 7 ครั้งสามารถสรุปเป็นผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของค่าเฉลี่ยได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1-5.3 ซึ่งพบว่าในด้านของการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร ตัวผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกสามารถลดผลการตอบสนองลงกว่า 400% และในด้านของแรงเฉือนที่ฐานลดลงกว่า 200% และภายใต้มาตรฐาน มยพ.1301/1302-61 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ม้ค่าเท่ากับ 0.015 ซึ่งอาคารเดิมที่ไม่ได้มีการติดตั้งตัวผนังสลายพลังงานนั้น มีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่เกินค่าที่ยอมรับได้ซึ่งส่งผลให้อาคารนั้นไม่มีความปลอดภัยและเป็นอันตรายต่อชีวิต แต่ภายหลังจากติดตั้งตัวผนังสลายพลังงานสามารถลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์จนอยู่ภายใต้ข้อกำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารสูงสุดที่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ

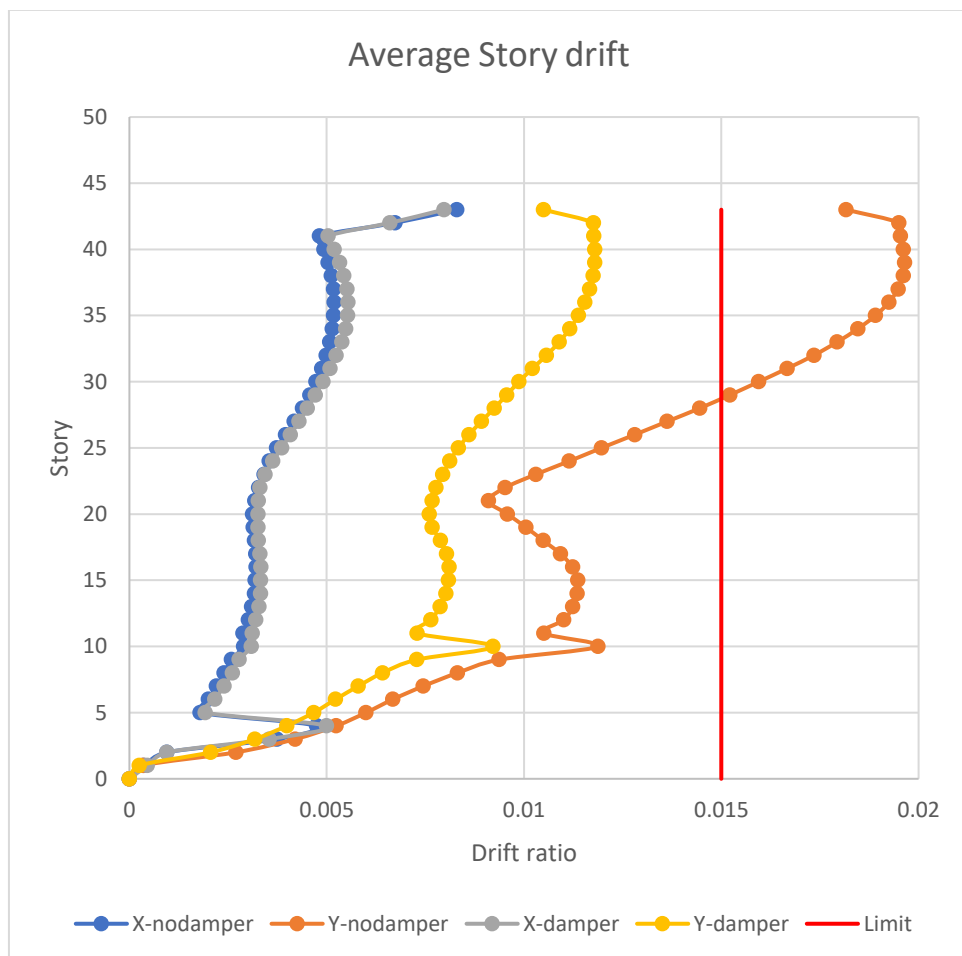


รูปที่ 5.2 แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดที่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ



รูปที่ 5.3 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่คลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ

จากผลการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของทุกคลื่นแผ่นดินไหวแสดงดังรูปที่ 5.4 พบว่าตำแหน่งชั้นที่ 20-40 มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่สูงกว่าชั้นที่ 10-30 ที่ได้ทำการเลือกติดตั้งผนังสลายพลังงาน จึงอาจพิจารณาเลือกติดตั้งผนังสลายพลังงานในบริเวณชั้นที่ 20-40 ที่มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่สูงแทน เพื่อประสิทธิภาพการสลายพลังงานที่ดีขึ้น



รูปที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

### 5.3 ประสิทธิภาพด้านแรงลม

จากผลการทดสอบผนังสลายงานแบบวิสโคอิลาสติกมีความสามารถในการลดการเคลื่อนตัวและความเร่งที่ยอดอาคารได้ดังที่แสดงในหัวข้อ 4.6.4 และถึงแม้เกณฑ์การเคลื่อนตัวที่ยอมรับได้ที่ยอดของอาคารตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 จะมีค่าอยู่ที่  $H/500 = 0.254$  m. ซึ่งในบางกรณียังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานบ้าง แต่ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มจำนวนของตัวหน่วงสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกเพื่อเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงของอาคารจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ซึ่งต้องวิเคราะห์แรงตอบสนองของอาคารด้วยอัตราส่วนความหน่วงที่สูงขึ้นจากผลการทดสอบจากอุโมงค์ลมเพิ่มเติมอีกครั้ง

โดยสรุปแล้วผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกโดยมีวัสดุวิสโคอิลาสติกเป็น PIB-HV นั้นมีความสามารถในการลดผลการตอบสนองของอาคารต่อแรงลมและแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Viscous wall damper ที่มีจำหน่ายของต่างประเทศ นอกจากนี้ยังมีความสะดวกในการติดตั้งในอาคาร และเป็นรูปแบบที่ไม่กระทบต่อความสวยงามหรือการใช้สอยอาคารมากนัก ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอิลาสติกจึงเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่สามารถนำมาพิจารณาใช้ในการก่อสร้างหรือการ Retrofit อาคารให้ได้สมรรถนะของโครงสร้างในการต้านทานแรงลมและแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพต่อไป