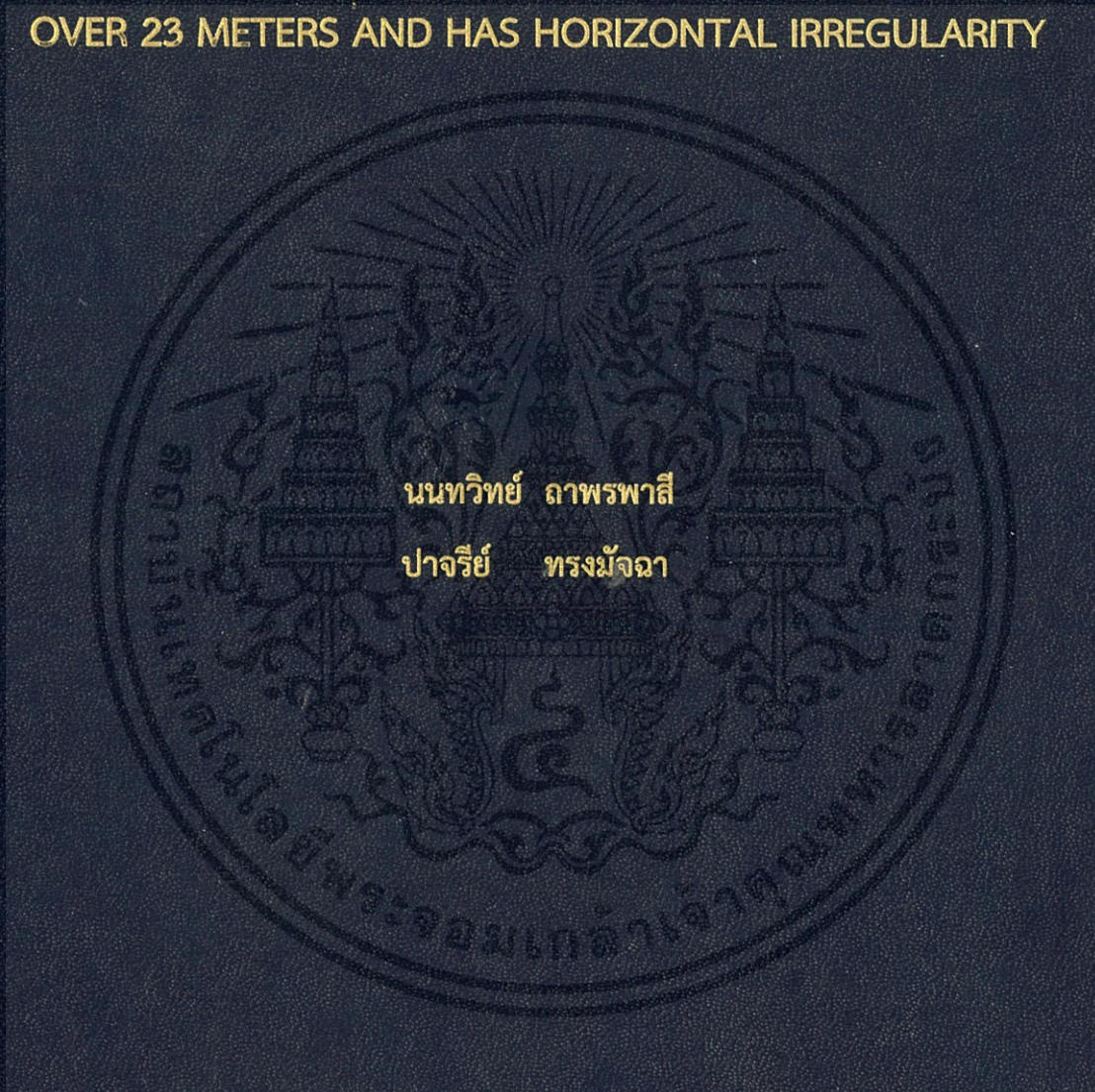


การศึกษาและเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของ  
อาคารที่มีความสูงไม่เกิน 23 เมตรและมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ

THE STUDY AND COMPARISON OF STRENGTHENING  
EARTHQUAKE RESISTANCE THAT HEIGHT OF BUILDING NOT  
OVER 23 METERS AND HAS HORIZONTAL IRREGULARITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาและเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของ  
อาคารที่มีความสูงไม่เกิน 23 เมตรและมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ

THE STUDY AND COMPARISON OF STRENGTHENING  
EARTHQUAKE RESISTANCE THAT HEIGHT OF BUILDING NOT  
OVER 23 METERS AND HAS HORIZONTAL IRREGULARITY



นนทวิทย์ ถาวรพาสี  
ปาจรีย์ ทรงมัจฉา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

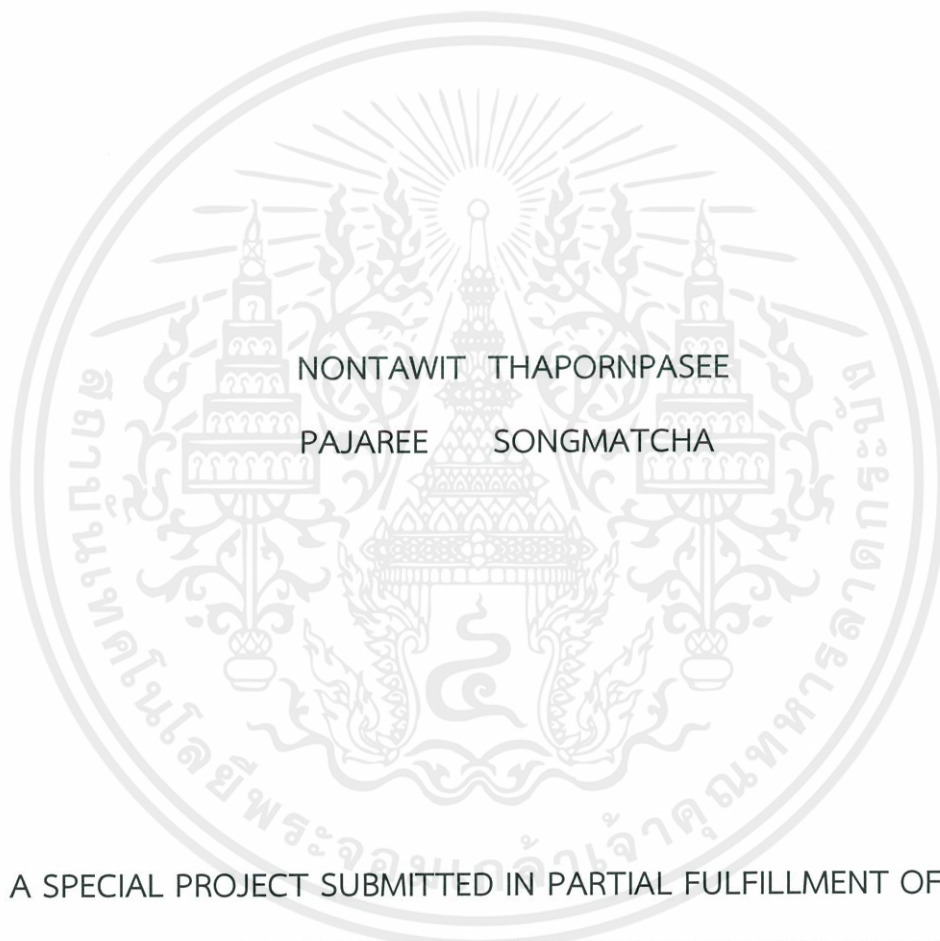
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY AND COMPARISON OF STRENGTHENING  
EARTHQUAKE RESISTANCE THAT HEIGHT OF BUILDING NOT  
OVER 23 METERS AND HAS HORIZONTAL IRREGULARITY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาและเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 23 เมตร และมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ

นักศึกษา นายนนทวิทย์ ภาพรพาสี รหัสประจำตัว 58010629  
นางสาวปาจริย์ ทรงมัจฉา รหัสประจำตัว 58010774

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร	
รศ. สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
ผศ.ดร. อำพน จรัสจรวงเกียรติ	
ผศ.ดร. อัญญาวิทย์ สุจริตพงศ์	
อ. ทรงกลด แซ่อึ้ง	
ดร. ญัฐดนัย สีนสมุทรผดุง	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ .....

# การศึกษาและเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่มี ความสูงไม่เกิน 23 เมตรและมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ

นายนวนทวิทย์ ภาพรพาสี รหัสประจำตัว 58010629

นางสาวปาจริย์ ทรงมัจฉา รหัสประจำตัว 58010774

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร

ปีการศึกษา 2561

## บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันมีการเกิดแผ่นดินไหวมากขึ้นทั้งภายในและภายนอกประเทศ กรมโยธาธิการและผังเมืองได้เล็งเห็นความสำคัญนี้ จึงได้ทำการจัดตั้งมาตรฐานการออกแบบอาคาร พ.ศ. 2550 เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาแผ่นดินไหว ในที่นี้จึงได้นำอาคารที่ทำการก่อสร้างก่อนกฎหมายรองรับแผ่นดินไหวถูกบังคับใช้ มาวิเคราะห์โครงสร้างภายในอาคารและนำมาศึกษาหาวิธีการเสริมกำลังของโครงสร้างอาคาร เพื่อให้สามารถรองรับการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวได้ และเป็นไปตามมาตรฐานกฎกระทรวงการออกแบบอาคาร วิธีเสริมกำลังที่นำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบคือวิธีพอกโครงสร้างเสาหรือจุดต่อที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก, คอนกรีตเสริมเหล็ก, วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย, วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน และ การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน

# THE STUDY AND COMPARISON OF STRENGTHENING EARTHQUAKE RESISTANCE THAT HEIGHT OF BUILDING NOT OVER 23 METERS AND HAS HORIZONTAL IRREGULARITY

Mr. Nontawit Thapornpasee Student ID. 58010629

Ms. Pajaree Songmatcha Student ID. 58010774

Advisor Asst. Prof. Dr. Arthit Petchsasithon

Academic Year 2018

## ABSTRACT

At present, there are many earthquakes occurring around the world including Thailand. Department of Public Works and Town & Country Planning has recognized this importance. They have prepared for the earthquake by establishing building design standards B.E.2550 (2007) to prevent earthquake problems. In this research, we use the building that was constructed before the earthquake law was enforced to analyze the structure of the building and to find out how to strengthening the structure to be able to resist the vibration from the earthquake according to the Ministerial Regulation standards. We have studied and compared the 5 strengthening methods which are Steel Jacketing Method, reinforced concrete jacketing Method, Fiber Reinforced Polymer Method, Bracing Method and Dampers Method.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ วิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการทำปริญญาโทเล่มนี้ โดยคณาจารย์ทุกท่าน ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการสอบปริญญาโทเล่มนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำปริญญาโท รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้และศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรัก กำลังใจ และสนับสนุนการศึกษาของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นนทวิทย์ ภาพรพาสี

ปจกรีย์ ทรงมัจฉา

# สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ .....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์ .....	4
2.1 การเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย .....	4
2.2 หลักเกณฑ์การออกแบบอาคารต้านแรงแผ่นดินไหว.....	5
2.2.1 ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว.....	5
2.2.2 พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ.....	5
2.2.3 ตัวประกอบความสำคัญและประเภทของอาคาร.....	9
2.2.4 ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว.....	10
2.3 ข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว .....	11
2.3.1 การจำแนกระบบโครงสร้างและข้อจำกัด .....	11
2.3.2 การจำแนกลักษณะและความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้าง .....	15
2.3.3 ข้อจำกัดและข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับอาคารที่รูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ.....	20
2.3.4 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง .....	20
2.3.5 ทิศทางของแรงแผ่นดินไหว.....	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.6 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง .....	23
2.3.7 ข้อกำหนดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง .....	24
2.3.8 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นและการโก่งตัวของโครงสร้าง.....	25
2.4 การเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหว .....	26
2.4.1 วิธีพอกโครงสร้างเสา หรือจุดต่อที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แผ่นเหล็ก หรือวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย.....	26
2.4.2 การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้กำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต รวมถึงโครงแกนงเหล็ก (Bracing) .....	33
2.4.3 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน.....	34
2.5 อาคารที่นำมาศึกษา.....	45
2.5.1 อาคารเจ้าคุณทหาร.....	45
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	46
2.6.1 การศึกษาและเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารสูง .....	46
2.6.2 Characteristics & Applications of Different Types of Dampers as Seismic Energy Dissipater .....	46
2.6.3 Seismic Response Study of Multi-Storied Reinforced Concrete Building with Fluid Viscous Dampers .....	47
2.6.4 Retrofitting of Reinforced Concrete Frames using Steel Bracing .....	47
2.6.5 Seismic Evaluation and Strengthening of RC Frames with FRP Composites.....	47
2.7 คุณสมบัติของวัสดุและข้อมูลประกอบการออกแบบโครงสร้าง.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	48
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ .....</b>	<b>49</b>
3.1 รูปแบบงานวิจัย .....	49
3.2 การรวบรวมข้อมูล .....	49
3.3 เครื่องมือวิจัย .....	49
3.4 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย .....	49
3.5 การสร้างแบบจำลองอาคารและการวิเคราะห์อาคารด้วยโปรแกรม ETABS .....	50
3.5.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอาคาร.....	50
3.5.2 การตั้งค่าแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม ETABS ตามมาตรฐาน มยผ.1302 .....	59
3.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม ETABS.....	69
3.5.4 การเสริมกำลังของอาคารเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม ETABS.....	72
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา.....</b>	<b>80</b>
4.1 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing) .....	80
4.2 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing).....	83
4.3 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Jacketing).....	86
4.4 การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกว่ง (Bracing) .....	89
4.5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper).....	93
<b>บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>95</b>

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	95
5.1.1 การคงรูปลักษณะอาคารเดิม .....	95
5.1.2 ด้านเศรษฐศาสตร์ .....	96
5.1.3 การลดลงของระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น.....	97
5.1.4 ด้านการติดตั้งและซ่อมบำรุง .....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
บรรณานุกรม.....	101
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	116
ภาคผนวก ค.....	119
ภาคผนวก ง.....	143

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1-1	ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
ตารางที่ 2.2-1	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ในโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น $g$ ) .....	7
ตารางที่ 2.2-2	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับพื้นที่ในโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น $g$ ) .....	8
ตารางที่ 2.2-3	การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคาร และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร ...	9
ตารางที่ 2.2-4	การแบ่งประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวโดยพิจารณาจากค่า $S_{D5}$ .....	10
ตารางที่ 2.2-5	การแบ่งประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวโดยพิจารณาจากค่า $S_{D1}$ .....	11
ตารางที่ 2.3-1	ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( <i>Response Modification Factor, R</i> ) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( <i>System Overstrength Factor, <math>\Omega_0</math></i> ) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว ( <i>Deflection Amplification Factor, <math>C_d</math></i> ) .....	12
ตารางที่ 2.3-2	วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อคำนวณผลของแรงแผ่นดินไหวที่อนุญาตให้ใช้ได้ .....	23
ตารางที่ 2.3-3	การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ ( $\Delta_o$ ) .....	25
ตารางที่ 2.4-1	คุณสมบัติวัสดุคอกมโพลีเอสเตอร์ประเภทพอลิเมอร์แผ่นเสริมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว ....	31
ตารางที่ 2.7-1	คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็กและข้อมูลประกอบการออกแบบ .....	48
ตารางที่ 4.1-1	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแนวแกน X และ แกน Y ของการเสริมกำลังที่ความหนาคอนกรีต 5 และ 10 เซนติเมตร .....	81
ตารางที่ 4.2-1	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังที่ความหนาของแผ่นเหล็ก 1.0 1.1 1.2 1.3 และ 1.5 เซนติเมตร .....	83
ตารางที่ 4.3-1	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย .....	86
ตารางที่ 4.3-1	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ต่อ) .....	87

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.4-1	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยโครงแกนด้วยขนาดเหล็ก Wide Flange ขนาด WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 1,2,3 และ 4.....	89
ตารางที่ 4.4-2	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยโครงแกนด้วยขนาดเหล็ก Wide Flange ขนาด WF 300x300 และ WF 400x400 ที่ชั้นอาคาร 2.....	91
ตารางที่ 4.5-1	ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และแกน Y ของการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 1,2,3 และ 4.....	93
ตารางที่ 5.1-1	ตารางการเปรียบเทียบราคาของวิธีเสริมกำลังแต่ละวิธี.....	96
ตารางที่ ข-1	การจำแนกประเภทชั้นดิน.....	117
ตารางที่ ข-2	การคำนวณค่าการทดสอบฝั่งจมมาตรฐานเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรแรก.....	118
ตารางที่ ค-1	คาบการสั่นของแต่ละโหนดและโหนดที่พิจารณาที่ทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหนดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของแผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน.....	120
ตารางที่ ค-1	คาบการสั่นของแต่ละโหนดและโหนดที่พิจารณาที่ทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหนดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของแผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน (ต่อ).....	121
ตารางที่ ค-1	คาบการสั่นของแต่ละโหนดและโหนดที่พิจารณาที่ทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหนดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของแผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน (ต่อ).....	122
ตารางที่ ค-2	แรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์วิธีเชิงพลศาสตร์.....	123
ตารางที่ ค-3	แรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์วิธีแรงสถิตเทียบเท่า.....	123
ตารางที่ ค-4	ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y ก่อนการเสริมกำลัง.....	123

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค-5 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต โดยมีความหนาคอนกรีต 5 เซนติเมตร .....	124
ตารางที่ ค-6 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต โดยมีความหนาคอนกรีต 10 เซนติเมตร .....	125
ตารางที่ ค-7 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1 เซนติเมตร .....	126
ตารางที่ ค-8 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.1 เซนติเมตร .....	127
ตารางที่ ค-9 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.2 เซนติเมตร .....	128
ตารางที่ ค-10 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.3 เซนติเมตร .....	129
ตารางที่ ค-11 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.5 เซนติเมตร .....	130
ตารางที่ ค-12 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP) ความหนา 0.7 เซนติเมตร .....	131

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค-13 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP) ความหนา 1.0 เซนติเมตร.....	132
ตารางที่ ค-14 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP) ความหนา 1.3 เซนติเมตร.....	133
ตารางที่ ค-15 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างด้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนงด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 1 .....	134
ตารางที่ ค-16 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างด้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนงด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 2 .....	135
ตารางที่ ค-17 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างด้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนงด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 3 .....	136
ตารางที่ ค-18 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างด้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนงด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 4 .....	137
ตารางที่ ค-19 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างด้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนงด้วยเหล็ก WF 400x400 ที่ชั้นอาคาร 2 .....	138
ตารางที่ ค-20 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 1 .....	139

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค-21	ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้ อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 2.....	140
ตารางที่ ค-22	ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้ อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 3.....	141
ตารางที่ ค-23	ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้ อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 4.....	142
ตารางที่ ง-1	รายละเอียดของเหล็กแผ่นดำ HOT ROLLED STEEL PLATE AND SHEET Grade : SS400, SS490, SS540, SM400A, SM490YA, SPHC, SG295, A36, A572Gr50, A283C โดยผ่านมาตรฐาน มอก. 528-2540, มอก. 1479-2541 และ มอก. 1499-2541.....	144
ตารางที่ ง-2	รายละเอียดของเหล็กแผ่นดำ HOT ROLLED STEEL PLATE AND SHEET Grade : SS400, SS490, SS540, SM400A, SM490YA, SPHC, SG295, A36, A572Gr50, A283C โดยผ่านมาตรฐาน มอก. 528-2540, มอก. 1479-2541 และ มอก. 1499-2541 (ต่อ) .	145
ตารางที่ ง-3	รายละเอียดข้อมูลคุณสมบัติของ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) จาก Shanghai Horse Construction Co., Ltd.....	146
ตารางที่ ง-4	รายละเอียดของเหล็ก Wide Flange หรือ H-Beam แสดงขนาดหน้าตัดและน้ำหนักต่อ เมตรของเหล็ก grade : SS400 และ SS540 โดยผ่านมาตรฐาน TIS 1227-1996 จาก บริษัท ทักษิณาเมทัล จำกัด.....	147
ตารางที่ ง-5	รายละเอียดของเหล็ก Wide Flange หรือ H-Beam แสดงขนาดหน้าตัดและน้ำหนักต่อ เมตรของเหล็ก grade : SS400 และ SS540 โดยผ่านมาตรฐาน TIS 1227-1996 จาก บริษัท ทักษิณาเมทัล จำกัด (ต่อ).....	148

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.2-1 การแบ่งโซนพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพเพื่อการออกแบบอาคารด้านทานแผ่นดินไหว.....	6
รูปที่ 2.2-2 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	7
รูปที่ 2.2-3 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ.....	8
รูปที่ 2.3-1 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ.....	16
รูปที่ 2.3-2 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวตั้ง.....	19
รูปที่ 2.4-1 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก.....	26
รูปที่ 2.4-2 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	28
รูปที่ 2.4-3 การพอกโครงสร้างเสาและคานที่มีอยู่เดิมด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....	30
รูปที่ 2.4-4 Dampers ประเภทต่างๆ .....	44
รูปที่ 2.5-1 ภาพอาคารเจ้าคุณทหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .....	45
รูปที่ 2.5-2 ภาพการแบ่งส่วนอาคารเจ้าคุณทหาร.....	45
รูปที่ 3.5-1 กำหนดคุณสมบัติคอนกรีตให้มีค่า $f_c'$ เท่ากับ 280 ksc.....	51
รูปที่ 3.5-2 กำหนดคุณสมบัติคอนกรีตให้มีค่า $f_c'$ เท่ากับ 240 ksc .....	52
รูปที่ 3.5-3 การกำหนดคุณสมบัติของเหล็ก .....	53
รูปที่ 3.5-4 การกำหนดขนาดของ CFRP .....	54
รูปที่ 3.5-5 การกำหนดขนาดหน้าตัดของเสา.....	55
รูปที่ 3.5-6 การกำหนดขนาดหน้าตัดของคาน .....	56
รูปที่ 3.5-7 การกำหนดความหนาของพื้น.....	57
รูปที่ 3.5-8 การกำหนดความหนาของกำแพงรับแรงเฉือน .....	58
รูปที่ 3.5-9 การกำหนดค่า Degrees of Freedom.....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.5-10 การเลือกช่อง Base Shear เพื่อดูผลการทดลอง.....	60
รูปที่ 3.5-11 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	61
รูปที่ 3.5-11 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ).....	62
รูปที่ 3.5-12 การตั้งค่าน้ำหนักต่างๆ ที่กระทำกับอาคาร.....	63
รูปที่ 3.5-13 การตั้งค่า Lateral Load ของ Seismic.....	63
รูปที่ 3.5-14 การตั้งค่า Load Cases .....	64
รูปที่ 3.5-15 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	65
รูปที่ 3.5-15 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ).....	66
รูปที่ 3.5-16 การตั้งค่า Response Spectrum.....	67
รูปที่ 3.5-17 การตั้งค่า Load Cases .....	67
รูปที่ 3.5-17 การตั้งค่า Load Cases (ต่อ).....	68
รูปที่ 3.5-18 การตั้งค่าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	69
รูปที่ 3.5-19 การตั้งค่าวิธีการวิเคราะห์.....	70
รูปที่ 3.5-20 การเลือกช่อง Story Drift เพื่อดูผลการทดลอง.....	71
รูปที่ 3.5-21 การเพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาสำหรับการพอกเสาด้วยคอนกรีต.....	72
รูปที่ 3.5-21 การเพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาสำหรับการพอกเสาด้วยคอนกรีต (ต่อ).....	73
รูปที่ 3.5-22 การกำหนดค่าหน้าตัดเสาที่พอกด้วยเหล็กแผ่นหนา 1.1 เซนติเมตร.....	74
รูปที่ 3.5-23 การกำหนดค่าหน้าตัดเสาที่พอกด้วย CFRP หนา 1 เซนติเมตร.....	75
รูปที่ 3.5-24 ขนาดหน้าตัดโครงแกนแบบ WF300x300 .....	76
รูปที่ 3.5-25 ขนาดหน้าตัดโครงแกนแบบ WF400x400 .....	77
รูปที่ 3.5-26 ลักษณะของโครงแกนแบบที่ถูกติดตั้ง .....	77
รูปที่ 3.5-27 การกำหนดข้อมูลของ Viscous Damper.....	78
รูปที่ 3.5-28 ลักษณะของ Viscous Damper ที่ถูกติดตั้ง.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตในแนวแกน X และแกน Y .....	82
รูปที่ 4.2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กในแนวแกน X .....	84
รูปที่ 4.2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กในแนวแกน Y .....	85
รูปที่ 4.3-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแนวแกน X .....	87
รูปที่ 4.3-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแนวแกน Y .....	88
รูปที่ 4.4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน WF 300x300 ในแนวแกน X และแกน Y .....	90
รูปที่ 4.4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน WF 300x300 และ WF 400x400 ที่ชั้นอาคาร 2 ในแนวแกน X และ แกน Y .....	92

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานในแนวแกน X และแกน Y.....	94
รูปที่ 5.1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแกน X ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการต่างๆ .....	97
รูปที่ 5.1-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแกน Y ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการต่างๆ .....	98
รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นฐานราก.....	104
รูปที่ ก-2 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 1 .....	105
รูปที่ ก-3 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 2 .....	106
รูปที่ ก-4 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 3 .....	107
รูปที่ ก-5 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 4 .....	108
รูปที่ ก-6 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 5 .....	109
รูปที่ ก-7 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นดาดฟ้า .....	110
รูปที่ ก-8 แบบขยายเสาอาคารเจ้าคุณทหาร .....	111
รูปที่ ก-9 แบบขยายพื้นอาคารเจ้าคุณทหาร .....	112
รูปที่ ก-10 แบบขยายคานอาคารเจ้าคุณทหาร (1).....	113
รูปที่ ก-11 แบบขยายคานอาคารเจ้าคุณทหาร (2).....	114
รูปที่ ก-12 แบบขยายผนังคสล.อาคารเจ้าคุณทหาร.....	115
รูปที่ ข-1 ข้อมูล Log of Boring อาคารเจ้าคุณทหาร.....	117

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

เนื่องจากปัจจุบันมีการเกิดแผ่นดินไหวมากขึ้นทั้งภายในและภายนอกประเทศกระทรวงมหาดไทยโดยกรมโยธาธิการและผังเมืองได้เล็งเห็นความสำคัญนี้ จึงได้มีการเตรียมพร้อมในเรื่องของแผ่นดินไหวมากขึ้น โดยทางกรมโยธาธิการและผังเมืองได้ทำการจัดตั้งมาตรฐานการออกแบบอาคาร พ.ศ. 2550 เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาแผ่นดินไหวซึ่งปรับปรุงและแก้ไขจากกฎกระทรวงฉบับที่ 49 (พ.ศ. 2540)

ในที่นี้จึงได้นำอาคารที่ทำการก่อสร้างก่อนกฎหมายรองรับแผ่นดินไหวถูกบังคับใช้ ซึ่งมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 มาวิเคราะห์โครงสร้างภายในอาคารและนำมาศึกษาหาวิธีการเสริมกำลังของโครงสร้างอาคารเพื่อให้สามารถรองรับการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวได้ และเป็นไปตามมาตรฐานกฎกระทรวงการออกแบบอาคาร

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารที่นำมาศึกษา
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่ศึกษา

### 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1.3.1 ศึกษาเฉพาะแบบจำลองโครงสร้างอาคารเจ้าคุณทหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ด้วยโปรแกรม ETABS เท่านั้น
- 1.3.2 แรงกระทำด้านข้างเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์ใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ( มยผ.1302-52 ) เท่านั้น

- 1.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร (Lateral Displacement) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ( Inter-story Drift ) โดยมีได้คำนึงถึงผลของความเค้นและความเครียด (Stress-Strain) เดิมของอาคาร เสมือนอาคารยังไม่ผ่านการใช้งาน
- 1.3.4 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยแผ่นเหล็ก และด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังแก่ตัวอาคารที่ศึกษา
- 1.3.5 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของโครงแกนเหล็ก โดยใช้เหล็ก Wide Flange เพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังแก่ตัวอาคารที่ศึกษา
- 1.3.6 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนชนิด Viscous Damper เพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังแก่ตัวอาคารที่ศึกษา
- 1.3.7 ศึกษาโดยกำหนดแบบจำลองโครงสร้างอาคารเป็นรูปทรงไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

NO.	TASK NAME	DURATION	2018					2019				
			AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	
1	หาข้อมูลของอาคารที่นำมาศึกษา	12 weeks										
2	ศึกษาวิธีการเสริมแรงต้านทานแผ่นดินไหว	6 weeks										
3	สร้างโมเดลของอาคาร	8 weeks										
4	วิเคราะห์โครงสร้างอาคาร	4 weeks										
5	เสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวแก่อาคาร	10 weeks										
6	เปรียบเทียบวิธีการเสริมกำลัง	2 weeks										
7	สรุปผลการศึกษา	2 weeks										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เรียนรู้วิธีการตรวจสอบอาคารด้วยโปรแกรม ETABS
- 1.5.2 ได้ทราบพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว
- 1.5.3 ได้เรียนรู้วิธีการประยุกต์ใช้โปรแกรม ETABS ในการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่นำมาศึกษา
- 1.5.4 ได้ทราบถึงวิธีการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสมที่สุดของอาคารที่นำมาศึกษา



## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 การเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก ทำให้ชั้นหินขนาดใหญ่เกิดการเลื่อน เคลื่อนที่ หรือแตกหักซึ่งทำให้เกิดการโอนถ่ายพลังงานศักย์ผ่านชั้นหินซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นไหวสะเทือน อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อระบายความเครียดที่สะสมไว้ภายในโลก ออกมาอย่างฉับพลันเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ ดังนั้นเมื่อแผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Intensity) มากน้อยต่างกัน โดยความรุนแรงของแผ่นดินไหวนั้นขึ้นอยู่กับความรุนแรงที่รู้สึกได้และระยะทางจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว ความเสียหายจะลดหลั่นลงไปตามระยะทางที่ห่างออกไป

ปัจจุบันการเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยไม่ถือเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นใหม่ เนื่องจากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาประเทศไทยต้องประสบกับเหตุการณ์แผ่นดินไหวมาแล้วหลายครั้ง ทั้งในภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศไทย แผ่นดินไหวล่าสุดที่มีความรุนแรงในไทยมีความรุนแรง 6.3 แมกนิจูด ในวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 โดยมีจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวอยู่ที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ซึ่งรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนได้ที่จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำพูน รวมถึงอาคารสูงในกรุงเทพมหานครฯ อย่างไรก็ตามแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในไทยถือว่ามีระดับการสั่นสะเทือนที่ไม่รุนแรงมากเทียบเท่ากับประเทศอื่นๆ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวมักเป็นการแตกหัก การร้าว การหักโค่นและการพังทลายของอาคาร บ้านเรือน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ เช่น ถนน เป็นต้น ดังนั้นประเทศไทยจึงจำเป็นที่จะต้องมีการเตรียมพร้อมรับมือกับภัยพิบัติประเภทนี้ ซึ่งการเตรียมความพร้อมที่สามารถทำได้และเกิดประสิทธิภาพคือการออกแบบและก่อสร้างอาคารบ้านเรือนให้มีความทนทานต่อการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้

ประเทศไทยได้เตรียมการรับมือกับเหตุการณ์แผ่นดินไหวโดยมีการออกกฎกระทรวงฉบับที่ 49 ( พ.ศ.2540 ) ภายใต้พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ซึ่งได้กำหนดให้มีการออกแบบอาคารที่ต้านแผ่นดินไหวขึ้นในเขตของพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดทางภาคเหนือ และในเวลาต่อมากระทรวงมหาดไทยโดยกรมโยธาธิการและผังเมืองได้นำกฎกระทรวงฉบับดังกล่าวมาปรับปรุงและแทน

ใหม่ด้วยกฎกระทรวง พ.ศ. 2550 ซึ่งการปรับปรุงนี้ได้เพิ่มพื้นที่ที่ทำการครอบคลุมให้ครอบคลุมในส่วน  
ของกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล และในเขตพื้นที่ของจังหวัดภาคใต้

## 2.2 หลักเกณฑ์การออกแบบอาคารต้านแรงแผ่นดินไหว

มาตรฐานการออกแบบการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1302  
[1] ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย โดยมาตรฐานนี้กำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการ  
ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยที่ค่าแรงแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการออกแบบอาคารได้ถูก  
กำหนดขึ้นโดยสมมุติว่าอาคารได้รับการออกแบบให้มีความเหนียว สามารถโยกไหวตัวเกิดพิบัติภัยใหญ่  
ของโครงสร้างและสามารถสลายพลังงานของการสั่นไหวในระดับที่เหมาะสม

### 2.2.1 ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว อาคารต่างๆจะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือน  
แตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร และปัจจัยประกอบอื่นๆ ดังนั้น  
ผลตอบสนองของอาคารจึงแสดงในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม” ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปตาม  
คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา  
(Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาทีและคาบการสั่น 1 วินาที ณ อำเภอ  
และจังหวัดต่างๆในพื้นที่นอกแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งในกรณีของพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯที่มีลักษณะดินอ่อนพิเศษ  
ผลตอบสนองของอาคารได้ถูกแสดงในรูปของ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้  
รวมผลเนื่องจากสภาพดินอ่อนในพื้นที่นี้เข้าไปแล้ว และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้โดยตรง ดัง  
รายละเอียดในหัวข้อ 2.2.2

### 2.2.2 พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ

พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯครอบคลุมกรุงเทพมหานครและจังหวัดปริมณฑลหลายจังหวัด พื้นที่นี้ได้ถูก  
แบ่งย่อยเป็น 7 โซน ดังรูปที่ 2.2-1 โดยค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่ 7  
โซนนี้ขึ้นกับวิธีการออกแบบ

สำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ให้ใช้ตามสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการ  
ออกแบบที่กำหนดในรูปที่ 2.2-2 หรือใช้ตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2.2-1

สำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ ให้ใช้ตามสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบที่กำหนดในรูปที่ 2.2-3 หรือใช้ตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2.2-2

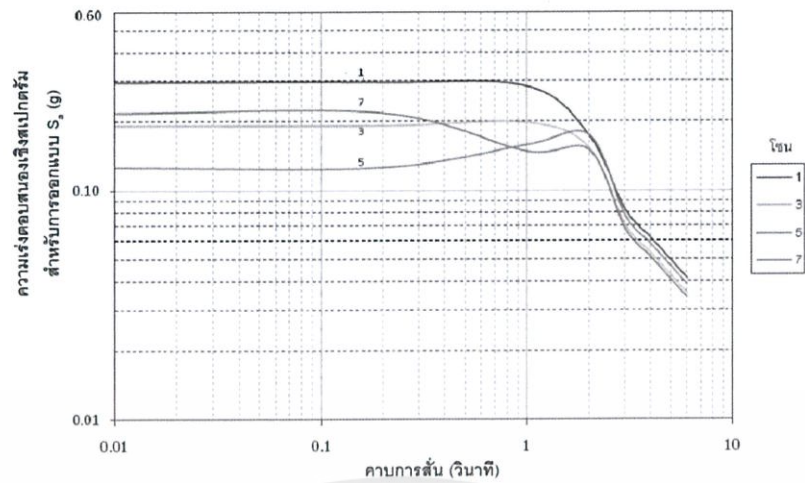


แผนที่แสดงการแบ่งโซนพื้นที่ในกรุงเทพมหานครเพื่อการออกแบบ อาคารด้านทานแผ่นดินไหว

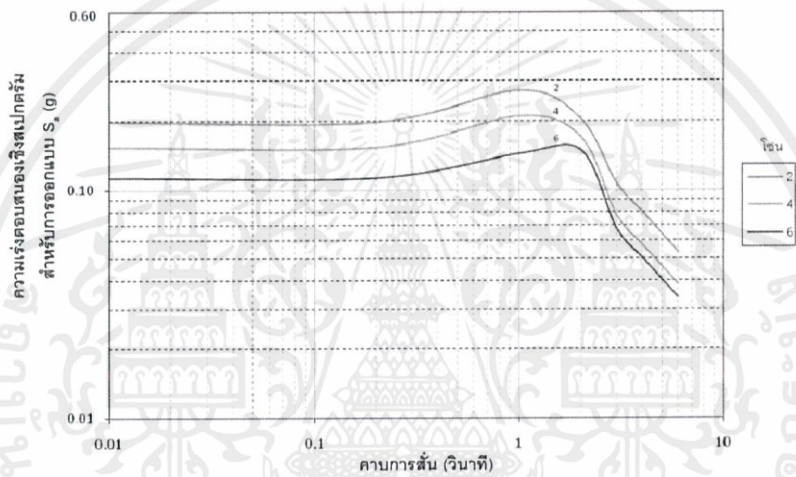
โซน 1	โซน 3	โซน 5	เขตบางนา	เขตสวนหลวง	โซน 6
จังหวัดเพชรบุรี	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	กรุงเทพมหานคร	เขตบางบอน	เขตสะพานสูง	จังหวัดละโว้
อ.เขายี่สิบ	อ.บางปะอิน	เขตคลองสาม	เขตบางพลัด	เขตสัมพันธวงศ์	กิ่งก.คลองเขื่อน
จังหวัดนครปฐม	อ.บางโพธิ์	เขตคลองสามวา	เขตบางรัก	เขตสาทร	อ.บางกล้า
อ.ดำเนินชุม	อ.ลาดบัวหลวง	เขตคลองเตย	เขตบางเขน	เขตสาขุใหม่	อ.บางน้ำเปรี้ยว
อ.บางเลน	อ.วังน้อย	เขตคันนายาว	เขตบางกอก	เขตหนองจอก	อ.บ้านโพธิ์
อ.เมืองนครปฐม	อ.คูขันธ์	เขตจตุจักร	เขตปทุมวัน	เขตหนองแขม	อ.ราชสาส์น
จังหวัดราชบุรี	อ.อัมพวา	เขตจอมทอง	เขตประเวศ	เขตหลักสี่	อ.เมืองจะเข้
อ.ดำเนินสะดวก	โซน 4	เขตดอนเมือง	เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย	เขตราชวัชวง	จังหวัดนครนายก
อ.บางแพะ	จังหวัดนครปฐม	เขตดินแดง	เขตห้วยทอง	จังหวัดละโว้	อ.บ้านนา
อ.ปากท่อ	อ.นครชัยศรี	เขตจตุรทิศ	เขตพระนคร	อ.บางปะกง	อ.ปากท่อ
อ.วัดเพลง	อ.พุทธมณฑล	เขตคันธาระ	เขตบางกอกใหญ่	จังหวัดสมุทรปราการ	อ.องครักษ์
อ.เมืองราชบุรี	อ.สามพราน	เขตคันธาระ	เขตบางกอกน้อย	กิ่งก. บางกลาง	อ.เมืองนครนายก
โซน 2	จังหวัดนนทบุรี	เขตทุ่งครุ	เขตบางกอกน้อย	อ.บางเสาธง	จังหวัดปทุมธานี
จังหวัดนครปฐม	อ.บางกรวย	เขตบางขุนเทียน	เขตบางกอกน้อย	อ.บางพลี	อ.คลองหลวง
อ.นครชัยศรี	อ.บางบัวทอง	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่	อ.พระประแดง	อ.ธัญบุรี
อ.พุทธมณฑล	อ.บางใหญ่	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่	อ.พระสมุทรเจดีย์	อ.ลำลูกกา
อ.สามพราน	อ.ปากเกร็ด	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่	อ.เมืองสมุทรปราการ	อ.หนองเสือ
จังหวัดสมุทรสงคราม	อ.เมืองนนทบุรี	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		จังหวัดปทุมธานี
อ.บางคนที	อ.ไทรน้อย	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.คลองหลวง
อ.อัมพวา	จังหวัดปทุมธานี	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.ธัญบุรี
อ.เมืองสมุทรสงคราม	อ.ลาดหลุมแก้ว	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.ลำลูกกา
จังหวัดสมุทรสาคร	อ.สามโคก	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.หนองเสือ
อ.กระทุ่มแบน	อ.เมืองปทุมธานี	เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		จังหวัดปทุมธานี
อ.บ้านแพ้ว		เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.บ้านสร้าง
อ.เมืองสมุทรสาคร		เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		จังหวัดชลบุรี
		เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.พานทอง
		เขตบางกอกใหญ่	เขตบางกอกใหญ่		อ.เมืองชลบุรี

รูปที่ 2.2-1 การแบ่งโซนพื้นที่ในกรุงเทพมหานครเพื่อการออกแบบอาคารด้านทานแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สำหรับโซน 1, 3, 5 และ 7

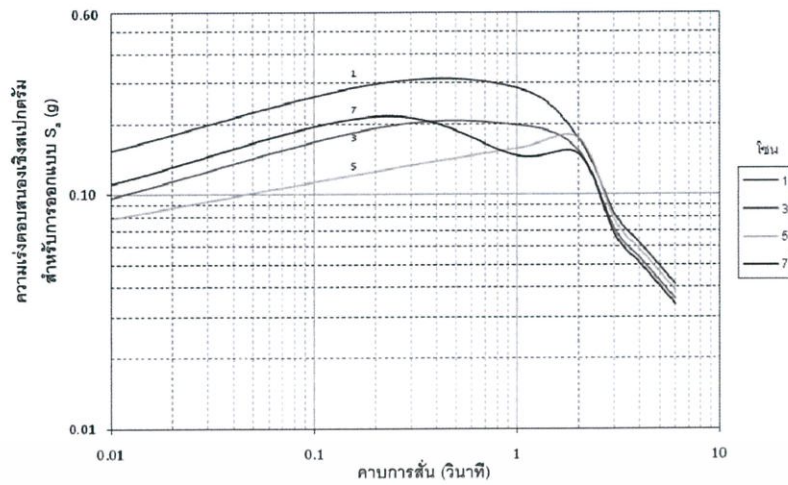


(ข) สำหรับโซน 2, 4 และ 6

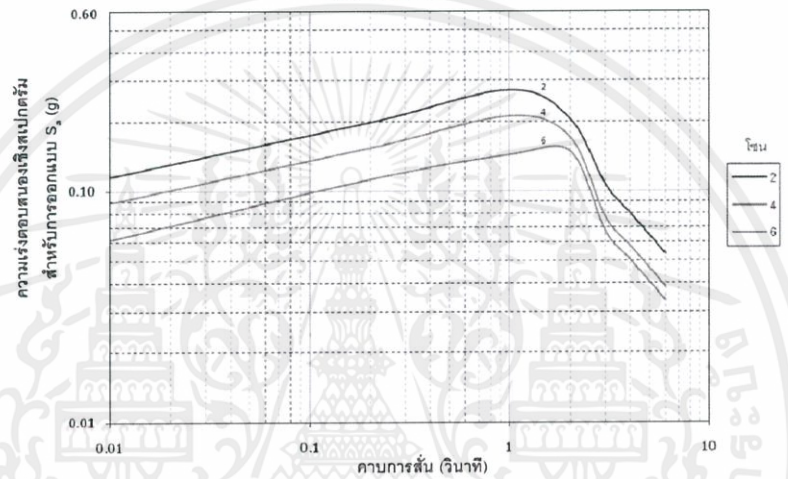
รูปที่ 2.2-2 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

ตารางที่ 2.2-1 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ในโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น g)

โซน	$S_a(0.1s)$	$S_a(0.2s)$	$S_a(1s)$	$S_a(2s)$	$S_a(3s)$	$S_a(4s)$	$S_a(5s)$	$S_a(6s)$
1	0.297	0.297	0.284	0.174	0.083	0.062	0.050	0.041
2	0.199	0.199	0.274	0.205	0.107	0.080	0.064	0.054
3	0.192	0.192	0.198	0.154	0.071	0.053	0.043	0.036
4	0.154	0.154	0.211	0.170	0.077	0.058	0.046	0.039
5	0.126	0.126	0.158	0.174	0.078	0.058	0.047	0.039
6	0.113	0.113	0.144	0.149	0.067	0.050	0.040	0.034
7	0.217	0.217	0.147	0.149	0.068	0.051	0.041	0.034



(ก) สำหรับโซน 1, 3, 5 และ 7



(ข) สำหรับโซน 2, 4 และ 6

รูปที่ 2.2-3 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับโซนต่างๆของพื้นที่  
ในแอ่งกรุงเทพ

ตารางที่ 2.2-2 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับ  
พื้นที่ในโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น g)

โซน	$S_a$ (0.1s)	$S_a$ (0.2s)	$S_a$ (1s)	$S_a$ (2s)	$S_a$ (3s)	$S_a$ (4s)	$S_a$ (5s)	$S_a$ (6s)
1	0.154	0.297	0.284	0.174	0.083	0.062	0.050	0.041
2	0.116	0.199	0.274	0.205	0.107	0.080	0.064	0.054
3	0.097	0.192	0.198	0.154	0.071	0.053	0.043	0.036
4	0.089	0.154	0.211	0.170	0.077	0.058	0.046	0.039
5	0.079	0.126	0.158	0.174	0.078	0.058	0.047	0.039
6	0.062	0.113	0.144	0.149	0.067	0.050	0.040	0.034
7	0.111	0.217	0.147	0.149	0.068	0.051	0.041	0.034

### 2.2.3 ตัวประกอบความสำคัญและประเภทของอาคาร

อาคารได้ถูกจำแนกตามลักษณะการใช้งานและความสำคัญของอาคารที่มีต่อสาธารณชนและการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุออกเป็น 4 ประเภท (Occupancy Category) คือประเภท I, II, III, และ IV โดยอาคารแต่ละประเภทมีค่าตัวประกอบความสำคัญ (Importance Factor) เพื่อใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2-3

ตารางที่ 2.2-3 การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคาร และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ	ตัวประกอบความสำคัญ
อาคารและ โครงสร้างอื่นๆ ที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายคือชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อยเมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้นๆ เช่น <ul style="list-style-type: none"> <li>- อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร</li> <li>- อาคารชั่วคราว</li> <li>- อาคารเก็บของเล็กๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ</li> </ul>	I (น้อย)	1.0
อาคารและ โครงสร้างอื่นๆ ที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภท ความสำคัญ น้อย มาก และสูงมาก	II (ปกติ)	1.0
อาคารและ โครงสร้างอื่นๆ ที่หากเกิดการพังทลาย จะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสาธารณชนอย่างมาก เช่น <ul style="list-style-type: none"> <li>- อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในที่หนึ่งๆ มากกว่า 300 คน</li> <li>- โรงเรียนประถมหรือมัธยมศึกษาที่มีความจุมากกว่า 250 คน</li> <li>- มหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัย ที่มีความจุมากกว่า 500 คน</li> <li>- สถานรักษาพยาบาลที่มีความจุคนไข้มากกว่า 50 คน แต่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้</li> <li>- เรือจำและสถานกักกันนักโทษ</li> </ul>	III (มาก)	1.25
อาคารและ โครงสร้างที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน หรือ อาคารที่จำเป็นต่อการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุ เช่น <ul style="list-style-type: none"> <li>- โรงพยาบาลที่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้</li> <li>- สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง และ โรงเก็บรถฉุกเฉินต่างๆ</li> <li>- โรงไฟฟ้า</li> <li>- โรงผลิตน้ำประปา ดึงเก็บน้ำ และ สถานีสูบน้ำที่มีความดันสูงสำหรับการดับเพลิง</li> <li>- อาคารศูนย์สื่อสาร</li> <li>- อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย</li> <li>- ท่าอากาศยาน ศูนย์บังคับการบิน และ โรงเก็บเครื่องบิน ที่ต้องใช้เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉิน</li> <li>- อาคารศูนย์บัญชาการแห่งชาติ</li> </ul> อาคารและ โครงสร้างในส่วนของการผลิต การจัดการ การจัดเก็บ หรือการใช้สารพิษ เชื้อเพลิง หรือสารเคมี อันอาจก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้	IV (สูงมาก)	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

มาตรฐานนี้ได้กำหนดให้มีการแบ่งประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวออกเป็น 4 ประเภท คือ ประเภท ก ข ค และ ง โดยเริ่มจากระดับที่ไม่จำเป็นต้องออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว (ประเภท ก) ไปจนถึง ระดับที่ต้องออกแบบอย่างเข้มงวดที่สุด (ประเภท ง) การกำหนดประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวจะพิจารณาจากประเภทความสำคัญของอาคาร (ตารางที่ 2.2-3) และความรุนแรงของแผ่นดินไหว ณ ที่ตั้งอาคาร ซึ่งแสดงโดยค่า  $S_{DS}$  และ  $S_{D1}$  โดยใช้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2-4 และ 2.2-5

สำหรับพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ ค่า  $S_{DS}$  และ  $S_{D1}$  มีค่าเท่ากับความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ( $S_a$ ) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที และ 1.0 วินาที ตามลำดับ

ในกรณีที่ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวที่กำหนดตามเกณฑ์ในตารางที่ 2.2-4 แตกต่างจากที่กำหนดตามเกณฑ์ในตารางที่ 2.2-5 ให้ยึดถือประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวที่รุนแรงกว่า ในกรณีที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร ( $T$ ) ในทั้งสองทิศทางที่ตั้งฉากกันที่คำนวณโดยใช้สมการดังนี้

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก  $T=0.02H$  หรือ

อาคารโครงสร้างเหล็ก  $T=0.03H$  โดยที่  $H$  คือความสูงของอาคารวัดจากพื้นดิน หน่วยเมตร

หากค่า  $T$  จากสมการมีค่าน้อยกว่า  $0.8T_s$  วินาที โดยที่  $T_s$  มีค่าเป็นไปตามที่กำหนด อนุญาตให้กำหนดประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวโดยใช้เฉพาะเกณฑ์ในตารางที่ 2.2-4 เท่านั้น

ตารางที่ 2.2-4 การแบ่งประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวโดยพิจารณาจากค่า  $S_{DS}$

ค่า $S_{DS}$	ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว		
	ประเภทความสำคัญ I	ประเภทความสำคัญ III	ประเภทความสำคัญ IV
$S_{DS} < 0.167$	ก (ไม่ต้องออกแบบ)	ก (ไม่ต้องออกแบบ)	ก (ไม่ต้องออกแบบ)
$0.167 \leq S_{DS} < 0.33$	ข	ข	ค
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	ค	ค	ง
$0.50 \leq S_{DS}$	ง	ง	ง

ตารางที่ 2.2-5 การแบ่งประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวโดยพิจารณาจากค่า  $S_{D1}$

ค่า $S_{D1}$	ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว		
	ประเภทความสำคัญ I	ประเภทความสำคัญ III	ประเภทความสำคัญ IV
$S_{D1} < 0.067$	ก (ไม่ต้องออกแบบ)	ก (ไม่ต้องออกแบบ)	ก (ไม่ต้องออกแบบ)
$0.067 \leq S_{D1} < 0.133$	ข	ข	ค
$0.133 \leq S_{D1} < 0.20$	ค	ค	ง
$0.20 \leq S_{D1}$	ง	ง	ง

## 2.3 ข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โครงสร้างอาคารจะต้องประกอบด้วยระบบต้านแรงด้านข้าง (Lateral Load Resisting System) และระบบรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง (Gravity Load Resisting System) ที่มีกำลังต้านทาน สติฟเนส และความสามารถในการสลายพลังงานในระดับที่สูงเพียงพอ ที่จะทำให้อาคารนั้นสามารถต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับการออกได้ ในการออกแบบอาคารจะต้องสมมุติว่าแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกทิศทางตามแนวราบ วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบว่า แรงที่เกิดในองค์อาคารต่างๆและการเสียรูปที่เกิดขึ้นในโครงสร้างอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

### 2.3.1 การจำแนกระบบโครงสร้างและข้อจำกัด

ระบบต้านแรงด้านข้างและระบบรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งของโครงสร้างอาคารอาจเป็นระบบใดระบบหนึ่งที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.3-1 หรือเป็นระบบผสมที่ได้จากการรวมระบบโครงสร้างหลายแบบ ระบบโครงสร้างที่สามารถเลือกใช้ได้จะขึ้นกับประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.3-1

ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( Response Modification Factor,  $R$  ) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( System Overstrength Factor,  $\Omega_0$  ) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว ( Deflection Amplification Factor,  $C_d$  ) ของระบบโครงสร้างแต่ละแบบให้เป็นไปตามที่กำหนดในตารางที่ 2.3-1 ค่าตัวประกอบเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) แรงในองค์อาคารเพื่อการออกแบบ (Element Design Force) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ด้านข้างระหว่างชั้น (Story Drift)

ระบบโครงสร้างที่เลือกใช้ จะต้องได้รับการออกแบบและกำหนดรายละเอียดของโครงสร้างให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานอ้างอิงที่เกี่ยวข้องและข้อกำหนดเพิ่มเติมตามที่ระบุในมาตรฐานฉบับนี้

ในกรณีที่วิศวกรผู้ออกแบบต้องการเลือกใช้ระบบโครงสร้างแบบอื่นที่มีได้มีระบุไว้ในตารางที่ 2.3-1 จะต้องดำเนินการพิสูจน์ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้าง และ/หรือ การทดสอบตัวอย่างโครงสร้างในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบโครงสร้างนั้นๆ มีพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ ความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้าง และความสามารถในการสลายพลังงานเทียบเท่าระบบโครงสร้างแบบใดแบบหนึ่งในตาราง 2.3-1 ที่มีค่าตัวประกอบ  $R$   $\Omega_0$  และ  $C_d$  เท่าเทียมกันกับระบบที่เลือกใช้

ตารางที่ 2.3-1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน ( *Response Modification Factor, R* ) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( *System Overstrength Factor,  $\Omega_0$*  ) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว ( *Deflection Amplification Factor,  $C_d$*  )

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	$\Omega_0$	$C_d$	ข	ค	ง
1. ระบบกำแพงรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง (Bearing Wall System)	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	4	2.5	4	√	√	X
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	5	2.5	5	√	√	√
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall)	3	2.5	3	√	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall)	4	2.5	4	√	√	X
2. ระบบ โครงอาคาร (Building Frame System)	โครงแกนเหล็กแบบเอียงศูนย์ที่ใช้จุดต่อแบบรับแรงคดได้ (Steel Eccentrically Braced Frame with Moment-Resisting Connections)	8	2	4	√	√	√
	โครงแกนเหล็กแบบเอียงศูนย์ที่ใช้จุดต่อแบบรับแรงเฉือน (Steel Eccentrically Braced Frame with Non-Moment-Resisting Connections)	7	2	4	√	√	√
	โครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบให้รายละเอียดพิเศษ (Special Steel Concentric Braced Frame)	6	2	5	√	√	√
	โครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame)	3.5	2	3.5	√	√	X
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	6	2.5	5	√	√	√
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	5	2.5	4.5	√	√	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall)	4	2.5	4	√	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall)	5	2.5	4.5	√	√	X

หมายเหตุ √ = ใช้ได้ x = ห้ามใช้

ตารางที่ 2.3-1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน ( Response Modification Factor, R ) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( System Overstrength Factor,  $\Omega_0$  ) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว ( Deflection Amplification Factor,  $C_d$  ) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	$\Omega_0$	$C_d$	ข	ค	ง
3. ระบบโครงสร้างดัด (Moment Resisting Frame)	โครงสร้างดัดเหล็กที่มีความเหนียว(Ductile Special Steel Moment-Resisting Frame)	8	3	5.5	√	√	√
	โครงสร้างดัดเหล็กที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวเป็นพิเศษ (Special Truss Moment Frame)	7	3	5.5	√	√	√
	โครงสร้างดัดเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Steel Moment Resisting Frame)	4.5	3	4	√	√	X
	โครงสร้างดัดเหล็กธรรมดา (Ordinary Steel Moment Resisting Frame)	3.5	3	3	√	√	X
	โครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียว (Ductile/Special Reinforced Concrete Moment Resisting Frame)	8	3	5.5	√	√	√
	โครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวจำกัด (Ductile RC Moment-Resisting Frame with Limited Ductility Intermediate RC Moment-Resisting Frame)	5	3	4.5	√	√	X
	โครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Moment Resisting Frame)	3	3	2.5	√	X	X
4. ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงสร้างดัดที่มีความเหนียวที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด (Dual System with Ductile/Special Moment Resisting Frame)	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบครงศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Centrically Braced Frame)	7	2.5	5.5	√	√	√
	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบเอียงศูนย์ (Steel Eccentrically Braced Frame)	8	2.5	4	√	√	√
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	7	2.5	5.5	√	√	√
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	6	2.5	5	√	√	X

หมายเหตุ √ = ใช้ได้ X = ห้ามใช้

ตารางที่ 2.3-1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( Response Modification Factor, R ) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( System Overstrength Factor,  $\Omega_0$  ) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว ( Deflection Amplification Factor,  $C_d$  ) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	$\Omega_0$	$C_d$	ข	ค	ง
5. ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด (Dual System with Moment Resisting Frame with Limited Ductility/ Dual System with Intermediate Moment Resisting Frame)	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบค้ำตรงศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Concentrically Braced Frame)	6	2.5	5	√	√	X
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	6.5	2.5	5	√	√	√
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	5.5	2.5	4.5	√	√	X
6. ระบบปฏิสัมพันธ์ (Shear Wall Frame Interactive System)	ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำแพงรับแรงเฉือนและโครงสร้างดัดแบบธรรมดาที่ไม่มีการให้รายละเอียดความเหนียว (Shear Wall Frame Interactive System with Ordinary Reinforced Concrete Moment Frame and Ordinary Concrete Shear Wall)	4.5	2.5	4	√	X	X
7. ระบบโครงสร้างเหล็กที่ไม่มีการให้รายละเอียดสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว (Steel Systems Not Specifically Detailed for Seismic Resistance)	ระบบโครงสร้างเหล็กที่ไม่มีการให้รายละเอียดสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว	3	3	3	√	√	X

หมายเหตุ √ = ใช้ได้ X = ห้ามใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การจำแนกลักษณะและความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้าง

อาคารสามารถจำแนกเป็นอาคารที่มีรูปทรงโครงสร้างที่สม่ำเสมอ (Regular) และอาคารที่มีรูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) โดยอาคารในกลุ่มหลังยังสามารถจำแนกแยกย่อยออกเป็นอาคารที่มีรูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ (Horizontal Irregularity) และไม่สม่ำเสมอในแนวตั้ง (Vertical Irregularity) ตามเกณฑ์ดังต่อไปนี้

#### 2.3.2.1 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ (Horizontal Irregularity)

(1ก) ความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด (Torsional Irregularity) คือ กรณีที่ค่าสูงสุดของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ขอบด้านหนึ่งของอาคาร ที่คำนวณจากแรงแผ่นดินไหวที่รวมผลของแรงบิดโดยบังเอิญ (Accidental Torsion) เข้าไปแล้วมีค่ามากกว่า 1.2 เท่าของค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ขอบทั้ง 2 ด้านของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 2.3-1ก อนึ่งเกณฑ์พิจารณานี้ใช้ได้เฉพาะกับอาคารที่มีไดอะแฟรมแข็งหรือกึ่งแข็งเท่านั้น

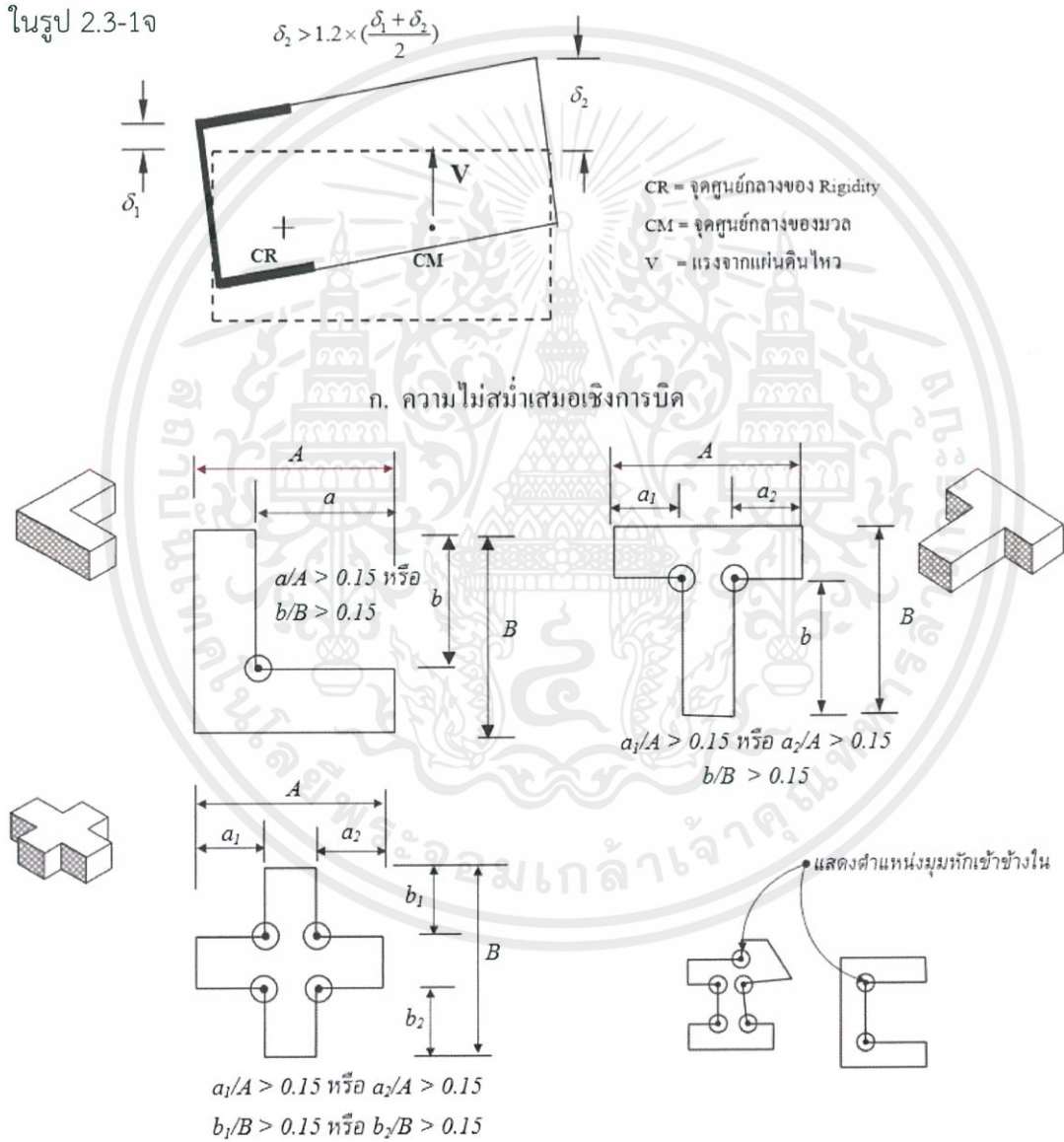
(1ข) ความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิดอย่างมาก (Extreme Torsional Irregularity) คือ กรณีที่ค่าสูงสุดของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ขอบด้านหนึ่งของอาคาร ที่คำนวณจากแรงแผ่นดินไหวที่รวมผลของแรงบิดโดยบังเอิญ (Accidental Torsion) เข้าไปแล้วมีค่ามากกว่า 1.4 เท่าของค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ขอบทั้ง 2 ด้านของอาคาร อนึ่งเกณฑ์พิจารณานี้ใช้ได้เฉพาะกับอาคารที่มีไดอะแฟรมแข็งหรือกึ่งแข็งเท่านั้น

(2) ความไม่สม่ำเสมอจากการมีมุมหักเข้าข้างใน (Reentrant Corner Irregularity) คือ กรณีที่ผังอาคารมีลักษณะหักมุมเข้าข้างใน ทำให้เกิดส่วนยื่น โดยที่ส่วนยื่นนั้นมีระยะฉายในแต่ละทิศทางมากกว่าร้อยละ 15 ของมิติของผังในทิศทางนั้น ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.3-1ข

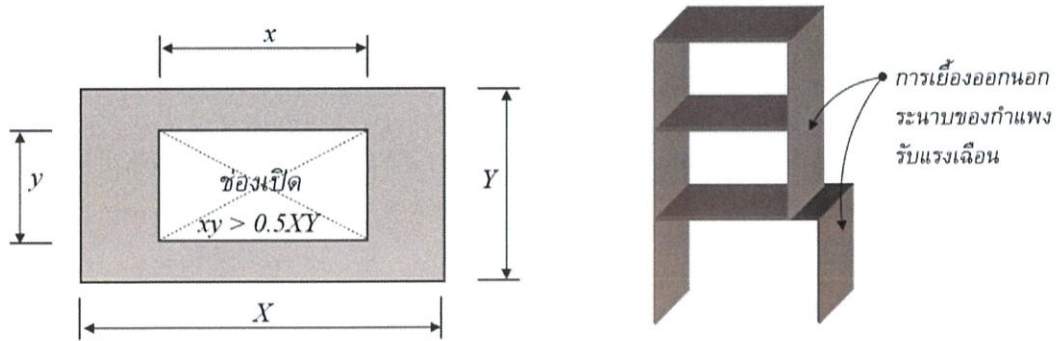
(3) ความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่องของไดอะแฟรม (Diaphragm Discontinuity Irregularity) คือ กรณีที่ไดอะแฟรมมีความไม่ต่อเนื่อง หรือมีการเปลี่ยนค่าสติเฟนสอย่างฉับพลันในบางบริเวณ ซึ่งรวมถึงกรณีที่พื้นที่มีช่องเปิดมากกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่พื้นที่ทั้งหมด ดังแสดงในรูป 2.3-1ค หรือกรณีที่ค่าสติเฟนสประสิทธิผลโดยรวมของไดอะแฟรม 5 องค์ชั้นใดชั้นหนึ่ง มีการเปลี่ยนแปลงค่ามากกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับชั้นถัดไป

(4) ความไม่สม่ำเสมอจากการเยื้องออกนอกระนาบ (Out-of-Plane Offset Irregularity) คือ กรณีที่โครงสร้างแนวตั้งที่ต้านแรงด้านข้าง เช่น กำแพงรับแรงเฉือนมีความไม่ต่อเนื่อง กำแพงในชั้นใดชั้นหนึ่งเยื้องออกจากระนาบของกำแพงในชั้นถัดไป ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.3-1ง

(5) ความไม่สม่ำเสมอจากระบบที่ไม่ขนานกัน (Nonparallel System Irregularity) คือ กรณีที่แนวตั้งที่ต้านทานแรงด้านข้าง เช่น กำแพงรับแรงเฉือน วางตัวในแนวที่ไม่ขนานกัน หรือไม่สมมาตรกันเมื่อเทียบกับแกนหลัก 2 แกน (ซึ่งตั้งฉากกัน) ของระบบต้านแรงด้านข้างของอาคาร ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.3-1จ



ข. ความไม่สม่ำเสมอแบบมีมุมหักเข้าข้างในอาคาร  
รูปที่ 2.3-1 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ



ค. ความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่อง ของโคเอเฟรม

ง. ความไม่สม่ำเสมอจากการ เยื้องออกนอกระนาบ



ค. ความไม่สม่ำเสมอจากระบบที่ไม่ขนานกัน

รูปที่ 2.3-1 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ

### 2.3.2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง (Vertical Structural Irregularity)

(1ก) ความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนสหรือมีชั้นที่อ่อน (Stiffness-Soft Story Irregularity)

คือ กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral Stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป หรือน้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.3-2ก

(1ข) ความไม่สม่ำเสมออย่างมากของสติฟเนส หรือมีชั้นที่อ่อนอย่างมาก (Stiffness-Extreme Soft Story Irregularity) คือ กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral Stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 60 ของค่าในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป หรือน้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป

(2) ความไม่สม่ำเสมอของมวล (Mass Irregularity) คือ กรณีที่ค่ามวลประสิทธิภาพ (Effective Mass) ของชั้นหนึ่งชั้นใดมีค่ามากกว่าร้อยละ 150 ของมวลประสิทธิภาพของชั้นบนหรือชั้นล่างที่อยู่ถัดไป ดังตัวอย่างแสดงในรูป 2.3-2ข อาคารที่มีหลังคาที่มีมวลน้อยกว่าพื้นชั้นถัดลงมา ไม่ถือว่าเป็นอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของมวล

(3) ความไม่สม่ำเสมอทางเรขาคณิตของรูปทรงในแนวตั้ง (Vertical Geometric Irregularity) คือ กรณีที่มีมิติในแนวราบของระบบต้านแรงด้านข้าง ณ ชั้นหนึ่งชั้นใด มีค่ามากกว่าร้อยละ 130 ของค่าในชั้นบนหรือชั้นล่างที่อยู่ถัดไป ดังตัวอย่างแสดงในรูป 2.3-2ค

(4) ความไม่ต่อเนื่องภายในระนาบตั้งขององค์อาคารต้านแรงด้านข้าง (In-Plane Discontinuity in Vertical Lateral Force-Resisting Element Irregularity) คือ กรณีที่องค์อาคารในแนวตั้งที่ต้านแรงด้านข้าง เช่น กำแพงรับแรงเฉือนมีความไม่ต่อเนื่องโดยมีการเอียงตัวภายในระนาบตั้งขององค์อาคาร เกินกว่ามิติในแนวราบขององค์อาคารนั้น ดังตัวอย่างแสดงในรูป 2.3-2ง

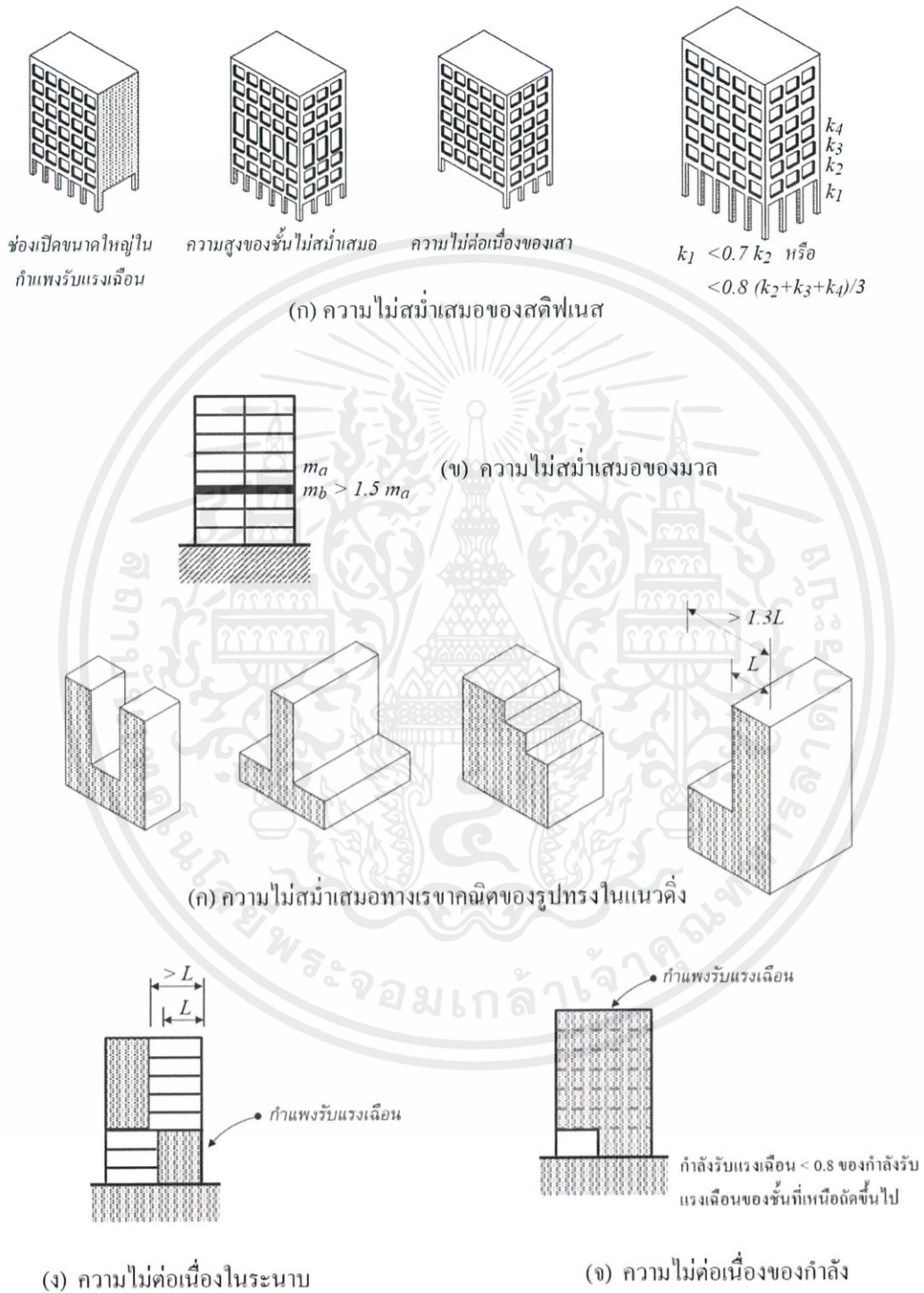
(5ก) ความไม่ต่อเนื่องของกำลังต้านแรงด้านข้างหรือมีชั้นที่อ่อนแอ (Discontinuity in Lateral Strength-Weak Story Irregularity) คือ กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีกำลังต้านแรงด้านข้างน้อยกว่าร้อยละ 80 ของกำลังในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.3-2จ กำลังต้านแรงด้านข้างของชั้นในที่นี้คือ ผลรวมของกำลังต้านทานแรงด้านข้างของทุกๆ องค์อาคารที่แบกรับแรงเฉือนของอาคารในชั้นนั้น ในทิศทางที่พิจารณา

(5ข) ความไม่ต่อเนื่องอย่างมากของกำลังต้านแรงด้านข้างหรือมีชั้นที่อ่อนแอมาก (Discontinuity in Lateral Strength-Extreme Weak Story Irregularity) คือ กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีกำลังต้านแรงด้านข้างน้อยกว่าร้อยละ 65 ของกำลังในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป

#### ข้อยกเว้น

- (1) อาคารจะไม่ถือว่าเป็นความสม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวตั้งแบบ 1ก 1ข หรือ 2 หากค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของชั้นใดๆ ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่า มีค่าไม่เกินร้อยละ 130 ของชั้นที่อยู่เหนือถัดขึ้นไป ทั้งนี้การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวดังกล่าว ไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลของการบิดตัวของอาคาร (Torsional Effect) และไม่จำเป็นต้องพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวของสองชั้นบนสุดของอาคาร

(2) ในการออกแบบอาคาร 1 ชั้นและ 2 ชั้น ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวตั้งแบบ 1ก 1ข หรือ



รูปที่ 2.3-2 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ข้อจำกัดและข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับอาคารที่รูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ

(1) อาคารที่มีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ง จะต้องไม่เป็นอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งแบบ 5ข

(2) อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งแบบ 5ข จะมีความสูงได้ไม่เกิน 2 ชั้นหรือ 9 เมตร เว้นแต่อาคารนั้นสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( $\Omega_0$ ) ได้

(3) อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบแบบ 4 หรือในแนวตั้งแบบ 4 จะต้องได้รับการออกแบบให้อาคารต่างๆที่รองรับกำแพงหรือโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่อง มีกำลังเพียงพอที่จะต้านทานแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุก กระทำร่วมกับแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ( $\Omega_0$ )

(4) อาคารที่มีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ง และมีความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบแบบ 1ก 1ข 2 3 หรือ 4 หรือมีความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งแบบ 4 จะต้องได้รับการออกแบบให้ (ก) จุดต่อระหว่างไดอะแฟรมกับโครงสร้างแนวตั้งต้านแรงด้านข้าง (ข) จุดต่อระหว่างไดอะแฟรมกับองค์อาคารเชื่อม (Collector) และ (ค) จุดต่อระหว่างองค์อาคารเชื่อมกับโครงสร้างแนวตั้งต้านแรงด้านข้างสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วย 1.25 องค์อาคารเชื่อม และจุดต่อระหว่างองค์อาคารเชื่อมก็ต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงดังกล่าว เว้นแต่ว่าได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำร่วมกับแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกินเรียบร้อยแล้ว

### 2.3.4 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง

#### 2.3.4.1 กรณีที่ต้องพิจารณาการรวมผลของแรง

องค์อาคารทุกส่วนในโครงสร้าง รวมทั้งส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างต้านทานแรงด้านข้างจะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงในแนวแกน แรงเฉือน แรงดัดที่เกิดกับองค์อาคารนั้นๆ เมื่อโครงสร้างถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดินไหวร่วมกับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.3.4.2 ในบางกรณีที่มีมาตรฐานกำหนด การรวมผลของแรงจะต้องคำนึงถึงกำลังส่วนเกินของโครงสร้างด้วยตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.3.4.3

#### 2.3.4.2 วิธีรวมผลของแรง

(ก) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีกำลัง ให้ใช้วิธีรวมผลของแรงดังต่อไปนี้

$$1.2D + 1.0L + 1.0E \quad (2.3-1)$$

$$0.9D + 1.0E \quad (2.3-2)$$

โดยที่ E คือ ผลที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว (Seismic Load Effects) ตามที่คำนวณในมาตรฐาน

D คือ ผลที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

L คือ ผลที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

อนึ่ง ตัวคูณผลของแรง (Load Factor) ของ L ในวิธีรวมผลแบบ 2.3-1 สามารถลดค่าจาก 1.0 ลงเหลือ 0.5 ได้ หากน้ำหนักบรรทุกจรมีค่าน้อยกว่า 5,000 นิวตันต่อตารางเมตร เว้นแต่อาคารนั้นเป็นอาคารจอดรถยนต์หรืออาคารสาธารณะที่มีผู้มาชุมนุมเป็นจำนวนมาก

(ข) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ ให้ใช้วิธีรวมผลของแรงดังต่อไปนี้

$$1.0D + 0.7E \quad (2.3-3)$$

$$1.0D + 0.525E + 0.75L \quad (2.3-4)$$

$$0.6D + 0.7E \quad (2.3-5)$$

#### 2.3.4.3 วิธีรวมผลของแรงที่คำนึงถึงกำลังส่วนเกิดของโครงสร้าง

ในกรณีที่มาตรฐานกำหนดให้คำนึงถึงกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง ให้ใช้วิธีรวมผลของแรงดังต่อไปนี้

(ก) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีกำลัง

$$1.2D + 1.0L + \Omega_0 E \quad (2.3-6)$$

$$0.9D + \Omega_0 E \quad (2.3-7)$$

อนึ่ง ตัวคูณผลของแรง (Load Factor) ของ L ในวิธีรวมผลแบบ 2.3-6 สามารถลดค่าจาก 1.0 ลงเหลือ 0.5 ได้ หากน้ำหนักบรรทุกจรมีค่าน้อยกว่า 5,000 นิวตันต่อตารางเมตร เว้นแต่อาคารนั้นเป็นอาคารจอดรถยนต์หรืออาคารสาธารณะที่มีผู้มาชุมนุมเป็นจำนวนมาก

(ข) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้

$$1.0D + 0.7 \Omega_0 E \quad (2.3-8)$$

$$1.0D + 0.525 \Omega_0 E + 0.75L \quad (2.3-9)$$

$$0.6D + 0.7 \Omega_0 E \quad (2.3-10)$$

#### 2.3.4.4 การเพิ่มค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

ในการออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ อนุญาตให้เพิ่มค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ร้อยละ 20 จากค่าปกติเมื่อพิจารณาการรวมแรงที่มีการค้ำึงถึงกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง

#### 2.3.5 ทิศทางของแรงแผ่นดินไหว

##### 2.3.5.1 การกำหนดทิศทางของแรง

ทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบอาคาร จะต้องเป็นทิศทางที่ทำให้เกิดผลตอบสนองในโครงสร้างที่รุนแรงที่สุด หรือเป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.3.5.2 หรือ 2.3.5.3 แล้วแต่กรณี

##### 2.3.5.2 แรงแผ่นดินไหวในแต่ละทิศกระทำต่ออาคารแยกกัน

ในกรณีของอาคารที่มีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ข และแบบ ค ยกเว้นแบบ ค ที่มีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบแบบ 5 สามารถกำหนดให้แรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางของแกนหลักของโครงสร้างอาคารซึ่งมี 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน โคนแยกกระทำที่ละทิศทางไม่พร้อมกัน และไม่จำเป็นต้องรวมผลของแรงทั้ง 2 ทิศทางเข้าด้วยกัน

##### 2.3.5.3 แรงแผ่นดินไหวใน 2 ทิศทางหลักกระทำต่ออาคารร่วมกัน

ในกรณีของอาคารที่มีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ง ทั้งที่มีรูปทรงโครงสร้างสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ หรือแบบ ค ที่มีรูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบแบบที่ 5 ให้เลือกใช้วิธีใด วิธีหนึ่งใน 2 วิธีดังต่อไปนี้

##### (1) วิธีรวมผลของแรงที่กระทำใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน

ในขั้นแรกกำหนดให้แรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางของแกนหลักของโครงสร้างที่ละทิศทางไม่พร้อมกัน โดยวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างอาจเป็นวิธีแรงสถิตเทียบเท่า หรือวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด หรือวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติเวลา จากนั้นจึงรวมผลของแรงทั้ง 2 ทิศทางหลักในรูปแบบดังต่อไปนี้

(1ก) ร้อยละ 100 ของผลของแรงในทิศทางที่ 1 + ร้อยละ 30 ของผลของแรงในทิศทางที่ 2

(1ข) ร้อยละ 30 ของผลของแรงในทิศทางที่ 1 + ร้อยละ 100 ของผลของแรงในทิศทางที่ 2

ผลรวมในรูปแบบใดก่อให้เกิดผลที่รุนแรงที่สุดในองค์อาคารของโครงสร้าง ให้นำผลรวมรูปแบบนั้นไปใช้ในการออกแบบกำลังต้านทานขององค์อาคารนั้นๆ องค์อาคารในที่นี้รวมถึงฐานรากของอาคาร

## (2) วิธีที่ให้แรงทั้ง 2 ทิศทางกระทำต่ออาคารพร้อมกัน

ในวิธีนี้การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลาจะต้องกำหนดให้เกิดแผ่นดินไหวในทั้ง 2 ทิศทางหลักของอาคารพร้อมกัน ผลการตอบสนองที่วิเคราะห์ได้คือ ผลรวมของแรงแผ่นดินไหวทั้ง 2 ทิศทาง

### 2.3.6 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อคำนวณผลของแรงแผ่นดินไหววิธีหนึ่งวิธีใด ตามเกณฑ์ที่แสดงโดยตารางที่ 2.3-2 ซึ่งขึ้นกับประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ และความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงอาคาร

ตารางที่ 2.3-2 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อคำนวณผลของแรงแผ่นดินไหวที่อนุญาตให้ใช้ได้

ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว	ลักษณะโครงสร้าง	วิธีแรงสถิตเทียบเท่า	วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด	วิธีวิเคราะห์การตอบสนองแบบประวัติเวลา
ข, ค	โครงสร้างอาคารทุกรูปแบบ	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
ง	อาคารที่มีประเภทความสำคัญ แบบ I หรือ II ที่มีโครงสร้างอาคารแบบน้ำหนักเบา (เช่น โครงสร้างไม้ หรือ โครงสร้างเหล็กกรีตเย้น) และมีความสูงไม่เกิน 3 ชั้น	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารแบบอื่น ๆ ที่มีประเภทความสำคัญ แบบ I หรือ II และมีความสูงไม่เกิน 2 ชั้น	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารที่มีรูปทรงโครงสร้างสม่ำเสมอ และมีคาบการสั่นพื้นฐานน้อยกว่า 3.5T <sub>g</sub>	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารที่มีคาบการสั่นพื้นฐานน้อยกว่า 3.5T <sub>g</sub> และมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ แบบ 2, 3, 4, หรือ 5 หรือในแนวตั้ง แบบ 4, 5 ก หรือ 5ข	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารแบบอื่น ๆ	ไม่อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต

## 2.3.7 ข้อกำหนดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

### 2.3.7.1 น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล

น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล คือ น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งของอาคารที่ต้องนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล ( $W$ ) จะต้องรวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดของอาคาร และน้ำหนักบรรทุกประเภทอื่นๆดังต่อไปนี้

- (1) ร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกจร (Floor Live Load) ในกรณีของอาคารที่ใช้เก็บพัสดุ อนึ่งอาคารจอดรถยนต์ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงน้ำหนักในข้อนี้
- (2) น้ำหนักของผนังอาคาร และผนังกันห้องต่างๆหรือน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่าจากน้ำหนักของผนังอาคาร ที่กระจายลงพื้นทั่วทั้งชั้นอย่างน้อย 480 นิวตันต่อตารางเมตร โดยให้เลือกใช้ค่าที่มากกว่า
- (3) น้ำหนักของเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ซึ่งติดตั้งถาวรในอาคาร

### 2.3.7.2 แบบจำลองโครงสร้าง

แบบจำลองโครงสร้างจะต้องถูกสร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์คำนวณหาแรงภายในองค์อาคารและการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นในแบบจำลองนี้จะต้องมีการจำลองค่าสติเฟเนสและกำลังขององค์อาคารที่มีความสำคัญต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว รวมถึงจำลองลักษณะการกระจายของมวลทั่วทั้งอาคารอย่างถูกต้อง

ในกรณีที่อาคารมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบแบบ 1ก, 1ข, 4 หรือ 5 แบบจำลองโครงสร้างจะต้องเป็นแบบ 3 มิติที่สามารถจำลองการเคลื่อนตัวโครงสร้างในแนวราบได้ทั้งทิศทางหลัก 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน และการบิดตัวรอบแกนในแนวตั้งของโครงสร้าง

การกำหนดค่าสติเฟเนสขององค์อาคารคอนกรีตและอิฐก่อจะต้องคำนึงถึงผลของการแตกร้าวที่มีต่อค่าสติเฟเนส โดยในกรณีที่ไม่สามารถทำการวิเคราะห์อย่างละเอียด อนุญาตให้ประมาณค่าสติเฟเนสจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล  $I_{eff}$  และค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล  $A_{eff}$  ดังต่อไปนี้

$$\text{คาน} : I_{eff} = 0.35 I_g$$

$$\text{เสา} : I_{eff} = 0.70 I_g$$

$$A_{eff} = 1.00 A_g$$

กำแพงที่ไม่แตกร้าว :	$I_{eff} = 0.70 I_g$
กำแพงที่มีการแตกร้าว :	$I_{eff} = 0.35 I_g$
แผ่นพื้นไร้คาน :	$I_{eff} = 0.25 I_g$

โดยที่  $I_g$  และ  $A_g$  คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และพื้นที่หน้าตัดที่คำนวณจากหน้าตัดเต็ม

### 2.3.8 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นและการโก่งตัวของโครงสร้าง

#### 2.3.8.1 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้

การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากแผ่นดินไหวสำหรับออกแบบ (Design Story Drift,  $\Delta$ ) ที่คำนวณได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าหรือวิธีเชิงพลศาสตร์ จะต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ (Allowable Story Drift,  $\Delta_a$ ) ดังแสดงในตารางที่ 2.3-3

ในกรณีที่อาคารมีการบิดตัวรอบแกนตั้งอย่างชัดเจน เมื่อถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ( $\Delta$ ) นี้จะต้องรวมผลของการบิดตัวของอาคารเข้าไปด้วย

ในกรณีที่อาคารมีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ค หรือ ง และมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบแบบ 1ก หรือ 1ข ค่า  $\Delta$  จะเป็นค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น ณ ขอบด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร ณ ชั้นที่พิจารณาที่มีค่ามากที่สุด

ตารางที่ 2.3-3 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ ( $\Delta_a$ )

ลักษณะโครงสร้าง	ประเภทความสำคัญของอาคาร		
	I หรือ II	III	IV
โครงสร้างที่ไม่ใช่ผนังอิฐก่อรับแรงเฉือนและสูงไม่เกิน 4 ชั้น ซึ่งผนังภายใน ลากกันห้อง ฝ้าเพดาน และผนังภายนอกถูกออกแบบให้สามารถทนต่อการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้มาก	$0.025h_{sx}$	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$
โครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนแบบยื่นจากฐานรองรับ	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$
โครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนแบบอื่น ๆ	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$
โครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมด	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.010h_{sx}$

## หมายเหตุ

- (1)  $h_{sx}$  คือความสูงระหว่างชั้นที่อยู่ใต้พื้นชั้นที่  $x$
- (2) อาคารชั้นเดียวที่มีผนังภายใน ฉากกันห้อง ฝ้าเพดาน และผนังภายนอกที่ถูกออกแบบให้สามารถทนต่อการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้มาก จะมีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเท่าใดก็ได้ไม่จำกัด แต่ยังคงต้องพิจารณาการเว้นระยะห่างระหว่างโครงสร้าง
- (3) โครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนแบบยื่นจากฐานรองรับ หมายถึง อาคารที่ถูกออกแบบให้ใช้กำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนเป็นชั้นส่วนโครงสร้างในแนวตั้งซึ่งยื่นขึ้นมาจากฐานรองรับ และถูกก่อสร้างในลักษณะที่มีถ่ายโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนระหว่างกำแพงข้างเคียง (แบบ Coupling Beam) น้อยมาก

## 2.4 การเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหว

2.4.1 วิธีพอกโครงสร้างเสา หรือจุดต่อที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แผ่นเหล็ก หรือวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

### 2.4.1.1 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

การพอกโครงสร้างเสาด้วยแผ่นเหล็กเป็นวิธีการเสริมให้ชั้นส่วนเสามีกำลังต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวหรือมีความเหนียวของหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีกระทำต่อโครงสร้างได้ แผ่นเหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กเป็นวิธีเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่สามารถทำได้ไม่ยาก โดยช่างก่อสร้างทั่วไปคุ้นเคยวิธีนี้ดีและวัสดุที่ใช้ก็สามารถหาได้ง่าย แต่วิธีนี้เป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับชั้นส่วนเสา และมีการรบกวนโครงสร้างเดิมค่อนข้างมาก



รูปที่ 2.4-1 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก

การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กต้องเป็นไปตามข้อมูลเอกสารวิชาการที่ได้รับการยอมรับหรืออ้างอิงจากผลการทดสอบที่เป็นที่น่าเชื่อถือ และเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ดังนี้

(1) ลักษณะการติดตั้งและหุ้มเสาด้วยแผ่นเหล็ก (steel plate and steel encasement)

การพอกโครงสร้างเสาด้วยแผ่นเหล็กรอบเสาให้กระทำโดยรอบตลอดความสูงของเสาเพื่อให้เกิดพฤติกรรมร่วม (composite action) ขณะใช้งาน โดยความหนาแผ่นเหล็กที่ติดตั้งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4.5 มิลลิเมตร และไม่เกิดการเสียรูปนอกระนาบ (out of plate deformation) ระหว่างการอัดฉีดประสานด้วยน้ำปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์

(2) การอัดฉีดประสานด้วยน้ำปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ (grouting mortar)

ในการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ทำให้เกิดการยึดเกาะประสานระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีตเก่า ค่ากำลังรับแรงอัดของน้ำปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ที่นำมาอัดฉีดต้องไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาล และไม่น้อยกว่ากำลังอัดคอนกรีตเก่าของโครงสร้างเสาเดิม การเตรียมผิวก่อนการซ่อม การอัดฉีดประสานด้วยน้ำปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดในเอกสาร มยผ.1901-51[15] หรือที่ปรากฏในเอกสารวิชาการที่เป็นที่อมรับตามมาตรฐานสากล ภายหลังจากฉีดประสานต้องไม่ปรากฏช่องว่างระหว่างผิวคอนกรีตของโครงสร้างเดิมกับแผ่นเหล็ก และการฉีดประสานต้องเว้นระยะห่างบริเวณรอยต่อหัวเสากับโครงสร้างใกล้เคียงที่ยึดกับเสาเพื่อป้องกันการแตกร้าวเมื่อโครงสร้างให้ตัว

(3) วิธีการยึดฝังกรณีใช้สายเหล็กรัดรอบ (steel strap jacketing)

การใช้สายเหล็กรัดรอบแผ่นเหล็กรอบเสาทำได้โดยการเชื่อมสายเหล็กรัดรอบเข้ากับเหล็กฉากที่ยึดแน่นเข้ากับมุมทั้งสี่ด้านของเสา สายเหล็กรัดรอบควรมีขนาดความกว้างไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร มีระยะเว้นระหว่างสายรัดรอบเสาตามแนวตั้งไม่เกิน 300 มิลลิเมตร นอกจากนี้ควรจัดให้มีการเจาะยึดด้วยสลักเกลียว (bolt) ชนิดฝังแน่น เพื่อยึดสายเหล็กรัดรอบแนบติดเข้ากับเนื้อคอนกรีตเสาเดิม ปริมาณสลักเกลียว ระยะฝังและระยะห่างสลักเกลียวควรออกแบบให้มีการยึดฝังกระจายทั่วบนหน้าตัดเสาเดิมและเพียงพอที่ให้เกิดประสิทธิภาพของการโอบรัดเสาภายหลังการติดตั้ง หรือให้เป็นไปตามหลักการออกแบบเพื่อให้เสาสามารถต้านทานแผ่นดินไหว วิธีการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่า สลักเกลียวและวัสดุซ่อมให้เป็นไปตามปรากฏแสดงไว้ใน มยผ.1901-51[15] หรือที่ปรากฏในเอกสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล

### 2.4.1.2 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete jacketing)

การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete jacketing) ประกอบด้วยเหล็กแกนเหล็กปลอก และคอนกรีตหุ้ม ซึ่งเป็นการเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัด แรงเฉือน และเสริมความเสริมความแข็งแรงที่บริเวณรอยต่อที่ทำการทาบเหล็ก ข้อพิจารณาที่สำคัญในการออกแบบและก่อสร้างองค์อาคารที่ต้องการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้องคำนึงถึงการถ่ายเทแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างหน้าตัดคอนกรีตเดิมและส่วนที่ทำการหุ้ม ซึ่งอาจต้องออกแบบเหล็กเดือย (dowel bars) เพื่อยึดวัสดุใหม่และวัสดุเดิมเข้าไว้ด้วยกันเป็นหน้าตัดเชิงประกอบ (composite section) และสามารถเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด กำลังต้านทานแรงเฉือน และกำลังที่รอยต่อทาบเหล็กเสริมแล้ว ยังช่วยเพิ่มความเหนียว(Ductility) ให้แก่ชิ้นส่วนโดยกลไกการโอบรัดหน้าตัด (confinement action) อีกด้วย



รูปที่ 2.4-2 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กต้องเป็นไปตามข้อมูลเอกสารวิชาการที่ได้รับการยอมรับหรืออ้างอิงจากผลการทดสอบที่เป็นที่น่าเชื่อถือ และเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานดังนี้

#### (1) คุณสมบัติของกริตใหม่ที่นำมาพอก

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตใหม่ที่นำมาพอกคาดทับชั้นเหล็กเสริม ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อเสาเดิม นอกจากนี้คอนกรีตใหม่ควรมีคุณสมบัติอื่นๆเช่นเดียวกับวัสดุซ่อมทั่วไป

ตามที่กำหนดในมาตรฐานมยผ.1901-51[15] เช่น การซึมผ่านน้ำ ความต้านทานต่อการหดตัวแตกร้าว ควรมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุหล่อเสาเดิมมากที่สุด

(2) ความหนาของคอนกรีตใหม่ที่นำมาพอก

ความหนาของคอนกรีตใหม่ที่นำมาพอกคาดทับชั้นเหล็กเสริมต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร สำหรับการพอกหล่อในที่และไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตรสำหรับการพอกด้วยวิธีการพ่น การพอกด้วยคอนกรีตใหม่ให้ทำโดยรอบเสาทั้งสี่ด้านเพื่อให้เกิดพฤติกรรมร่วมระหว่างคอนกรีตเก่าและวัสดุที่พอกโดยการพอกควรเว้นระยะห่างเล็กน้อยช่วงจุดต่อระหว่างโครงสร้างข้างเคียงบริเวณเสาที่พอกเพื่อป้องกันการแตกร้าวเมื่อโครงสร้างให้ตัวขณะรับแรงดัด

(3) พื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นชั้นต่ำบริเวณที่ทำการพอก

การเพิ่มเหล็กเสริมเพิ่มเติมก่อนการดัดด้วยคอนกรีตใหม่ให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมยผ.1901-51[15] และให้เป็นไปตามหลักการออกแบบที่ให้เสาสามารถต้านทานแผ่นดินไหว โดยพื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นของเหล็กเสริมควรอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.04 ของพื้นที่ทั้งหมดที่พอก ยกเว้นกรณีที่พอกคอนกรีตใหม่เพื่อการโอบรัดหรือเพื่อการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนเท่านั้น กำหนดให้ใช้เหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มิลลิเมตรขึ้นไปบริเวณมุมเสา และควรเจาะเหล็กยื่นให้ทะลุผ่านโครงสร้างข้างเคียง เช่น พื้น คาน ตลอดแนวความสูงของเสาทุกชั้นก่อนการดัดพอกด้วยคอนกรีตใหม่

(4) พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกชั้นต่ำบริเวณที่ทำการพอก

ในการเสริมเหล็กปลอกเพิ่มเติมบริเวณที่มีการดัดทับด้วยคอนกรีตใหม่ เหล็กปลอกที่ใช้ต้องมีขนาดผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือหนึ่งในสามของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยื่นที่ใหญ่ที่สุดของหน้าตัดเสา ยกเว้นกรณีใช้ลวดตาข่าย (wire mesh) ควรมีของอทำมุม 135 องศา กรณีมีเหล็กปลอกประกอบกันมากกว่าหนึ่งชั้น ทั้งนี้การออกแบบพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกชั้นต่ำหรือลวดตาข่ายให้เป็นไปตามหลักการออกแบบเสา เพื่อให้มีความเหนียวเพียงพอ

(5) วิธีการยึดฝัง

ชั้นเหล็กเสริมและเหล็กปลอกที่ติดตั้งเพิ่มเติมก่อนการดัดด้วยคอนกรีตใหม่ต้องยึดฝังเข้ากับคอนกรีตเก่าเพื่อทำให้เกิดกลไกการถ่ายแรงเฉือนที่สมบูรณ์ภายหลังการซ่อม โดยระยะฝังต้องออกแบบให้ทะลุผ่านจากชั้นวัสดุซ่อมไปจนถึงเนื้อคอนกรีตเก่าและเพียงพอที่ให้เกิดประสิทธิภาพของการโอบรัดเสาภายหลังการติดตั้ง วิธีการเตรียมผิวก่อนการซ่อมพื้นผิวระหว่างบริเวณเนื้อคอนกรีตเก่าและใหม่ และวิธีการยึดฝังให้เป็นไปตามมาตรฐานมยผ.1901-51[15] หรือที่ปรากฏในเอกสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล

### 2.4.1.3 การพอกโครงสร้างเสาและคานที่มีอยู่เดิมด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer)

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP Sheet) ทำขึ้นจากเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงสูงฝังตัวอยู่ในพอลิเมอร์เรซิน ซึ่งทำหน้าที่ประสานเส้นใยให้ทำงานร่วมกัน เส้นใยที่นำมาใช้ในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด และเส้นใยแก้ว ซึ่งเส้นใยทั้งสามมีความแตกต่างกันในด้านกำลังรับน้ำหนัก ความคงทนและราคาเป็นอย่างมาก การเลือกใช้เส้นใยประเภทใดนั้น จึงควรต้องศึกษาให้รอบคอบ

ข้อดีของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คือเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานต่อการผุกร่อน มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูง จึงเหมาะสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีข้อเสียคือมีราคาที่แพง



รูปที่ 2.4-3 การพอกโครงสร้างเสาและคานที่มีอยู่เดิมด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การใช้งานวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย นิยมใช้งานใน 3 รูปแบบ ได้แก่

- (1) แบบเพลทหรือลามิเนต (FRP Plate หรือ FRP Laminate) เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 1.0-1.5 มม. เหมาะสำหรับการเสริมกำลังพื้นและคานโดยการติดแผ่นเข้ากับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง
- (2) แบบชีทหรือฟาบริค (FRP Sheet หรือ FRP Fabric) เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 มม. ซึ่งถือว่าเป็นแผ่นบางจึงสามารถนำไปพันรอบโครงสร้าง
- (3) แบบแท่ง (FRP Rod) มีลักษณะเป็นแท่งกลมคล้ายเหล็กเส้นแต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าเหล็กเส้นทั่วไป

คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย วัสดุรองพื้น วัสดุฉาบ วัสดุเรซิน ตลอดจนข้อปฏิบัติในการติดตั้งและการทดสอบ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล ดังนี้

- (1) คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์ชนิดแผ่นเสริมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว

ตารางที่ 2.4-1 กำหนดค่าคุณสมบัติกำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความหนาแน่นของเส้นใยเสริมกำลังของวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์ชนิดแผ่นเสริมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วที่เหมาะสมกับงานเสริมความแข็งแรง

ตารางที่ 2.4-1 คุณสมบัติวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์ชนิดแผ่นเสริมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว

คุณสมบัติ	เส้นใยคาร์บอนโมดูลัสสูงประเภทพอลิอะคริโลไนทริล		เส้นใยอะรามิด
	ชนิด 3,400	ชนิด 2,900	โมโนเมอร์ชนิดเดียว
กำลังรับแรงดึง (เมกะปาสกาล)	มากกว่า 3,400	มากกว่า 2,900	มากกว่า 2,060
โมดูลัสยืดหยุ่น (กิกะปาสกาล)	230+45 หรือ 230-15		118±20
ความหนาแน่นเส้นใย เสริมกำลัง (กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.80±0.05		1.45±0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) วัสดุรองพื้นและวัสดุฉาบ

การเลือกใช้ชนิดของวัสดุรองพื้นและวัสดุฉาบควรเลือกให้สัมพันธ์กับระบบการติดตั้งวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทั้งนี้เพื่อให้การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างในด้านกำลังรับแรงดึง แรงเฉือน การโอบรัด ความสามารถในการเคลื่อนที่หรือความเหนียวเป็นไปตามหลัก การออกแบบให้ ด้านทานแผ่นดินไหว

วัสดุรองพื้นต้องเป็นวัสดุที่เข้ากันได้กับวัสดุยึดประสาน สารเคลือบเส้นใย วัสดุฉาบและสารเคลือบป้องกันผิว เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและการยึดเหนียวที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นได้ระหว่างการติดตั้ง

ชนิดของวัสดุรองพื้นและวัสดุฉาบที่นำมาใช้ซ่อมแซมและเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการติดหรือการหุ้มภายนอกโครงสร้างปกติด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้ เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1508-51[16] มยผ.1901-51[15] หรือมาตรฐานอื่นใดที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากลโดยมีผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือรองรับ

## (3) คุณสมบัติความหนืดของวัสดุเรซิน

กรณีการลงแผ่นเส้นใยและสารเคลือบเส้นใย วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาเลือกใช้วัสดุเรซินที่มีคุณสมบัติความหนืด (viscosity) ให้เหมาะสม ซึ่งการเลือกใช้วัสดุเรซินที่มีความหนืดมากหรือน้อย ขึ้นกับข้อพิจารณาทางเทคนิคในการติดตั้ง เช่น หากเป็นที่คาดเดาได้ว่าการหย่อนขึ้นในช่วงการติดหรือหุ้มวัสดุเสริมเส้นใยภายนอก โครงสร้างผู้ออกแบบควรกำหนดใช้วัสดุเรซินที่มีความหนืดสูง หรือหากการติดตั้งต้องการให้เกิดความแนบสนิทระหว่างเนื้อคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อม เรซินที่ใช้ควรมีความหนืดต่ำ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจได้ว่าเรซินชุ่มตัวเส้นใยอย่างทั่วถึงขณะทำการรีดติดตั้ง และทำให้สามารถรีดอากาศที่ขังอยู่ระหว่างคอนกรีตเก่าและแผ่นเส้นใยออกมาได้ทั้งหมด ชนิดของเรซินที่ควรนำมาใช้ซ่อมแซมและเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการติดหรือการหุ้มภายนอกโครงสร้างปกติด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้ เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1508-51[16] มยผ.1901-51[15] หรือมาตรฐานอื่นใดที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานโดยมีผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือรองรับ

## (4) การติดตั้งวัสดุคอมโพสิต

วิธีการเตรียมผิวก่อนการซ่อมพื้นผิวระหว่างบริเวณเนื้อคอนกรีตเก่าและใหม่ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1901-51[15] หรือเอกสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล สำหรับเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยม ให้ทำการลบมุมทั้งสี่มุมโดยควรให้มีรัศมีมุมโค้งไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร และ

ค่าความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ต้องพันรอบเสาควรวัดเป็น 2 เท่าของค่าที่คำนวณได้จากสูตรเสากลมที่คำนวณด้วยค่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า

#### (5) การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1901-51[51] หรือเอกสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล

### 2.4.2 การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้กำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต รวมถึงโครง แกงแนงเหล็ก (Bracing)

การเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือนรวมถึงโครงแกงแนงเหล็กในโครงสร้างอาคาร จัดเป็นอีกหนึ่งวิธีการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโดยรวมให้กับอาคาร โดยอาศัยการเพิ่มโครงสร้างใหม่ที่ช่วยต้านทานแรงด้านข้างภายใต้แผ่นดินไหวที่พิจารณา การเสริมโครงสร้างในลักษณะนี้สามารถใช้กับกรณีที่โครงสร้างโดยรวมอ่อนแอและมีการเคลื่อนที่ไปมากภายใต้แผ่นดินไหวที่ใช้ประเมิน หรือในกรณีที่ชิ้นส่วนวิกฤติไม่มีความเหนียวเพียงพอในการรองรับการเสีรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว สามารถใช้การเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือนรวมถึงโครงแกงแนงเหล็กเพื่อเพิ่มสติฟเนสและกำลังโดยรวมให้แก่โครงสร้างอาคารได้

การเสริมโครงสร้างโดยการเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือนรวมถึงโครงแกงแนงเหล็กในลักษณะที่เหมาะสมสามารถลดความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงอาคารได้ และสามารถช่วยลดปัญหาโครงสร้างอาคารที่มีชั้นที่อ่อนหรือชั้นที่อ่อนแอ สำหรับกรณีที่อาคารมีความไม่สม่ำเสมอในด้านการบิด หากจัดให้มีการเสริมกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงเหล็กในตำแหน่งที่เหมาะสม สามารถช่วยลดความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวได้

ในการวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างอาคารที่มีการเสริมกำแพงรับแรงเฉือน รวมถึงโครงแกงแนงเหล็กในโครงสร้างอาคาร สามารถใช้โปรแกรม ETABS ในการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยมีการจำลองชั้นส่วนกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังในแบบจำลอง หลังจากที่ได้แรงหรือค่าการเสีรูปในองค์อาคารจากการวิเคราะห์แล้ว สามารถนำค่าเหล่านั้นไปทำการประเมินองค์อาคารกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงเหล็กที่เป็นโครงสร้างใหม่ โดยใช้หลักการและเกณฑ์การยอมรับสำหรับการประเมินกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงเหล็กตามที่กำหนด

ในการจัดทำแบบจำลองเพื่อประเมินและวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการเสริมกำแพงรับแรงเฉือนหรือ โครงสร้างแกนเหล็กมีข้อพิจารณาคือ ส่วนของโครงสร้างที่เพิ่มใหม่อาจไม่ได้ช่วยรับแรงในแนวตั้งที่กระทำ กับส่วนของอาคารเดิมอยู่ ในการจำลองโครงสร้างจึงต้องพิจารณาการกระจายแรงในแนวตั้งให้เหมาะสม ตามขั้นตอนวิธีการก่อสร้างและเสริมกำลัง ในการเสริมกำลังต้องทำให้โครงสร้างสามารถถ่ายแรงไปสู่ส่วน ของโครงสร้างใหม่ได้ตามที่สมมติในแบบจำลอง

การเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือนรวมถึงโครงสร้างแกนเหล็กอาจไม่เหมาะสมใน กรณีที่ทำการซ่อมแซมอาคารโบราณสถาน เนื่องจากวิธีนี้ก่ออาคารพื้นหรือจุดต่อต้องได้รับการประเมิน ให้แน่ใจว่ามีเส้นทางการถ่ายแรงอย่างสมบูรณ์ไปสู่กำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างแกนเหล็กที่ได้เพิ่มเข้า มาในระบบโครงสร้าง

### 2.4.3 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน

อุปกรณ์สลายพลังงานต้องได้รับการออกแบบโดยพิจารณาภาวะแวดล้อมในการใช้งาน ประกอบด้วย ความล่าช้า ความคืบ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือความชื้นประกอบด้วย ในการสร้าง แบบจำลองต้องพิจารณาค่าแห่งของอุปกรณ์สลายพลังงานในทางแปลนและตามความสูงของอาคาร อย่างครบถ้วน ในการวิเคราะห์ต้องพิจารณาคุณสมบัติที่อาจเปลี่ยนไปตามความถี่ อุณหภูมิ ความเร็วและ แรงภายในที่แบกทานอยู่ โดยอาศัยการวิเคราะห์หลายๆกรณีที่ครอบคลุมช่วงคุณสมบัติของอุปกรณ์สลาย พลังงาน

#### 2.4.3.1 แบบจำลองอุปกรณ์สลายพลังงาน

##### 2.4.3.1.1 อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่

[2] อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่สามารถแสดงคุณสมบัติได้ด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างปลายสองข้าง โดยไม่ขึ้นกับความเร็วหรือ ความถี่ของแรง ในแบบจำลองต้องสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ได้ แรง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$F = k_{\text{eff}} D \quad (2.4-1)$$

โดยที่  $k_{\text{eff}}$  = สติฟเนสประสิทธิผลของอุปกรณ์ (นิวตันต่อมิลลิเมตร)

$D$  = การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างปลายสองข้างของอุปกรณ์ (มิลลิเมตรต่อ วินาที)

### 2.4.3.1.2 อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับความเร็ว

#### (1) อุปกรณ์แบบหนีดยืดหยุ่นชนิดแข็ง

อุปกรณ์แบบหนีดยืดหยุ่นชนิดแข็งสามารถจำลองด้วยแบบจำลองสปริงและตัวหน่วงที่ต่อขนานกัน (แบบจำลองเคลวิน) โดยค่าคงที่ของแบบจำลองต้องเลือกโดยพิจารณาช่วงอุณหภูมิและความถี่ที่ใช้งาน หากไม่สามารถใช้ค่าคงที่เพียงค่าเดียวเป็นตัวแทนได้ ให้ทำการวิเคราะห์หลายกรณี เพื่อให้ครอบคลุมค่าขอบบนและค่าขอบล่างของค่าคงที่

แรงในอุปกรณ์แบบหนีดยืดหยุ่นชนิดแข็งแสดงได้ดังสมการ

$$F = k_{\text{eff}} D + CD' \quad (2.4-2)$$

โดยที่  $C$  = สัมประสิทธิ์ความหน่วง  
 $D$  = การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้างของอุปกรณ์ (มิลลิเมตร)  
 $D'$  = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้างของอุปกรณ์ (มิลลิเมตรต่อวินาที)  
 $k_{\text{eff}}$  = สติฟเนสประสิทธิผลของอุปกรณ์ (นิวตันต่อมิลลิเมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$C = \frac{W_D}{\pi \omega D_{\text{ave}}^2} \quad (2.4-3)$$

โดยที่  $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)  
 $D_{\text{ave}}$  = การเคลื่อนที่สูงสุดเฉลี่ยทางด้านดึงและอัด (มิลลิเมตร)  
 $W_D$  = พื้นที่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ใน 1 รอบ (นิวตัน x มิลลิเมตร)

#### (2) อุปกรณ์แบบหนีดยืดหยุ่นชนิดของเหลว

อุปกรณ์แบบหนีดยืดหยุ่นชนิดของเหลวสามารถจำลองด้วยแบบจำลองสปริงและตัวหน่วงที่ต่ออนุกรมกัน (แบบจำลองแมกซ์เวล) โดยค่าคงที่ของแบบจำลอง ต้องเลือกโดยพิจารณา

ช่วงอุณหภูมิและความถี่ที่ใช้งาน หากไม่สามารถใช้ค่าคงที่เพียงค่าเดียวเป็นตัวแทนได้ ให้ทำการวิเคราะห์หลายกรณีเพื่อให้ครอบคลุมค่าขอบบนและค่าขอบล่างของค่าคงที่

### (3) อุปกรณ์แบบของเหลวหนืด

อุปกรณ์แบบของเหลวหนืดสามารถจำลองได้ด้วยสมการ

$$F = C|D'|^\alpha \text{sign}(D') \quad (2.4-4)$$

โดยที่ C = สัมประสิทธิ์ความหน่วง  
 D' = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้างของอุปกรณ์ (มิลลิเมตรต่อวินาที)  
 $\alpha$  = กำลังของความเร็วสัมพัทธ์ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น

อุปกรณ์แบบของเหลวหนืดที่มีสติฟเนสในช่วงความถี่ 0.5f ถึง 2f ต้องจำลองเป็นอุปกรณ์แบบหนืดยืดหยุ่นชนิดของเหลว (fluid viscoelastic device)

### (4) อุปกรณ์แบบอื่น

สำหรับอุปกรณ์แบบอื่น ต้องจำลองความสัมพันธ์ของแรง การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้าง และความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้างให้ถูกต้อง

#### 2.4.3.2 วิธีวิเคราะห์แบบเชิงเส้น

การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นใช้ได้เฉพาะในกรณีต่อไปนี้

- (1) โครงข้อแข็งยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น
- (2) อัตราส่วนความหน่วงประสิทธิผลที่ได้จากอุปกรณ์สลายพลังงานไม่เกิน 0.3 ในโหมดการสั่นพื้นฐาน
- (3) ในแบบจำลองได้ใช้ค่าสติฟเนสแบบเซคแคนท์ (secant stiffness) ที่คำนวณจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของอุปกรณ์สลายพลังงาน
- (4) ในแบบจำลองมีอุปกรณ์สลายพลังงานในการพิจารณาความสม่ำเสมอของอาคาร
- (5) ผลของโหมดสูงไม่มีนัยสำคัญ

### 2.4.3.2.1 วิธีวิเคราะห์แบบสวิตเชิงเส้น

#### (1) อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่

การใช้วิธีวิเคราะห์แบบสวิตเชิงเส้นกับอุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่ มีเงื่อนไขดังนี้

- (1) โครงข้อแข็งยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น
- (2) อัตราส่วนความหน่วงประสิทธิผลที่ได้จากอุปกรณ์สลายพลังงานไม่เกิน 0.3 ในโหมดการสั่นพื้นฐาน
- (3) ในแบบจำลองได้ใช้ค่าสติเฟนสแบบเซคแคนท์ (secant stiffness) ที่คำนวณจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของอุปกรณ์สลายพลังงานแรงกระทำทางด้านข้าง ให้คำนวณจากตัวประกอบปรับค่าความหน่วงโดยพิจารณาความหน่วงที่ได้จากอุปกรณ์สลายพลังงานตามสมการ

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (2.4-5)$$

- โดยที่  $\beta$  = อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 0.05
- $W_j$  = งานที่ทำโดยอุปกรณ์สลายพลังงาน  $j$  ใน 1 รอบ (นิวตัน × มิลลิเมตร)
- $W_k$  = พลังงานความเครียดสูงสุดของโครงสร้างโดยคำนวณจากสมการ 2.4-6 (นิวตัน × มิลลิเมตร)

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (2.4-6)$$

- โดยที่  $F_i$  = แรงเฉื่อยที่ชั้น  $i$  (นิวตัน)
- $\delta_i$  = การเคลื่อนที่ของชั้น  $i$  (มิลลิเมตร)

## (2) อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับความเร็ว

การใช้วิธีวิเคราะห์แบบสถิติเชิงเส้นกับอุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับความเร็วมุ่งเน้นไขเพิ่มเติมจาก 2.4.3.2 ดังนี้

- (1) แรงต้านสูงสุดจากอุปกรณ์สลายพลังงานในชั้นหนึ่งๆ ต้องไม่เกินร้อยละ 50 ของแรงต้านจากโครงสร้างส่วนอื่น
- (2) พิจารณาการเสื่อมสภาพจากอายุใช้งานและสภาพแวดล้อมในการคำนวณแรงต้านสูงสุดจากอุปกรณ์สลายพลังงาน

แรงกระทำทางด้านข้างให้คำนวณจากตัวประกอบปรับค่าความหน่วงโดยพิจารณาความหน่วงที่ได้จากอุปกรณ์สลายพลังงานตามสมการ

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (2.4-7)$$

โดยที่  $\beta$  = อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 0.05

$W_j$  = งานที่ทำโดยอุปกรณ์สลายพลังงาน  $j$  ใน 1 รอบ (นิวตัน x มิลลิเมตร) คำนวณจากสมการ 2.4-8

$W_k$  = พลังงานความเครียดสูงสุดของโครงสร้างโดยคำนวณจากสมการ 2.4-6 (นิวตัน x มิลลิเมตร)

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T_d} C_j \delta_j^2 \quad (2.4-8)$$

โดยที่  $T_d$  = คาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่รวมสติเฟเนสของอุปกรณ์สลายพลังงานแล้ว (วินาที)

$C_j$  = สัมประสิทธิ์ความหน่วงของอุปกรณ์  $j$

$\delta_j$  = การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแกนของอุปกรณ์สลายพลังงาน  $j$  (มิลลิเมตร)

### (3) สภาพที่พิจารณา

การวิเคราะห์อาคารโดยวิธีสถิตเชิงเส้น ต้องพิจารณาสภาพดังต่อไปนี้

- (1) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุด (maximum drift)
- (2) ความเร็วสูงสุดและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เป็นศูนย์
- (3) ความเร่งของชั้นสูงสุด

#### 2.4.3.2.2 วิธีวิเคราะห์แบบพลศาสตร์เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมผลตอบสนอง กำหนดให้มีอัตราส่วนความหน่วงประสิทธิภาพของโหมดการสั่นพื้นฐานไม่เกิน 0.30

##### (1) อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมผลตอบสนอง ต้องมีการปรับค่าสเปกตรัมผลตอบสนองตามอัตราส่วนความหน่วง โดยคำนวณอัตราส่วนความหน่วงประสิทธิภาพตามข้อ 2.4.3.2.1(1)

หากวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานต่ำกว่าร้อยละ 80 ของวิธีสถิตเชิงเส้น ต้องปรับผลตอบสนองเพิ่มขึ้นให้เป็นร้อยละ 80 ของวิธีสถิตเชิงเส้น

##### (2) อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับความเร็ว

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมผลตอบสนอง ต้องมีการปรับค่าสเปกตรัมผลตอบสนองตามอัตราส่วนความหน่วง โดยลดค่าสเปกตรัมผลตอบสนองที่ความหน่วงร้อยละ 5 ที่คาบในช่วงของโหมด

อัตราส่วนความหน่วงประสิทธิภาพของโหมด  $m$  คำนวณได้จาก

$$\beta_{eff-m} = \beta_m + \frac{\sum W_{mj}}{4\pi W_{mk}} \quad (2.4-9)$$

โดยที่  $\beta_m$  = อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างที่โหมด  $m$

$W_{mj}$  = งานที่ทำโดยอุปกรณ์สลายพลังงาน  $j$  ใน 1 รอบ (นิวตัน x มิลลิเมตร)

$W_{mk}$  = พลังงานความเครียดสูงสุดของโครงสร้าง (นิวตัน x มิลลิเมตร) โดยคำนวณจาก

$$W_{mk} = \frac{1}{2} \sum_i F_{mi} \delta_{mi} \quad (2.4-10)$$

โดยที่  $F_{mi}$  = แรงเฉื่อยของโหมต  $m$  ที่ชั้น  $i$  (นิวตัน)

$\delta_{mi}$  = การเคลื่อนที่ของโหมต  $m$  ที่ชั้น  $i$  (มิลลิเมตร)

งานที่ทำโดยอุปกรณ์สลายพลังงาน  $j$  ใน 1 รอบ คำนวณจาก

$$W_{mj} = \frac{2\pi^2}{T_m} C_j \delta_{mj}^2 \quad (2.4-11)$$

โดยที่  $T_m$  = คาบของโหมต  $m$  ของอาคารที่รวมสติฟเนสของอุปกรณ์สลายพลังงานแล้ว (วินาที)

$C_j$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของอุปกรณ์  $j$

$\delta_{mj}$  = การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแกนของอุปกรณ์  $j$  ในโหมต  $m$  (มิลลิเมตร)

หากวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นให้ค่าแรงเฉื่อยที่ฐานต่ำกว่าร้อยละ 80 ของวิธีสถิตเชิงเส้น ต้องปรับผลตอบสนองเพิ่มขึ้นให้เป็นร้อยละ 80 ของวิธีสถิตเชิงเส้น

### 2.4.3.3 วิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น

#### 2.4.3.3.1 วิธีวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น

สำหรับวิธีวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดยกเว้นกรณีที่มีการระบุเป็นอย่างอื่น ในการสร้างแบบจำลองต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของแรง การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้าง และความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้างได้อย่างถูกต้อง

#### (1) อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่

ในการสร้างแบบจำลอง ต้องพิจารณาสติฟเนสและความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างปลายสองข้าง

#### (2) อุปกรณ์สลายพลังงานที่มีคุณสมบัติขึ้นกับความเร็ว

สำหรับการเคลื่อนที่เป้าหมายและสเปกตรัมความเร่ง ต้องแปลงให้สอดคล้องกับค่าความหน่วงเพื่อติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานแล้ว โดยพิจารณาความหน่วงที่ได้ตามสมการ

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$\beta$	=	อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 0.05
	$W_j$	=	งานที่ทำโดยอุปกรณ์สลายพลังงาน $j$ ใน 1 รอบ (นิวตัน x มิลลิเมตร) คำนวณจากสมการ 2.4-13
	$W_k$	=	พลังงานความเครียดสูงสุดของโครงสร้างโดยคำนวณจากสมการ 2.4-6 (นิวตัน x มิลลิเมตร)

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T_{ss}} C_j \delta_j^2 \quad (2.4-13)$$

โดยที่	$T_{ss}$	=	คาบการสั่นแบบเซคแคนท์ (secant fundamental period) ของอาคารที่รวมสติเฟเนสแบบเซคแคนท์ของอุปกรณ์สลายพลังงานแล้ว(วินาที)
	$C_j$	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของอุปกรณ์ $j$
	$\delta_j$	=	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแกนของอุปกรณ์ $j$ เมื่อการเคลื่อนที่ที่หลังคาเท่ากับการเคลื่อนที่เป้าหมาย (มิลลิเมตร)

#### 2.4.3.3.2 วิธีวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

หากเลือกใช้วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนด ในการสร้างแบบจำลอง ต้องพิจารณาตำแหน่งของอุปกรณ์สลายพลังงานในทางแปลนและตามความสูงของอาคารอย่างครบถ้วน ในการวิเคราะห์ต้องพิจารณาคุณสมบัติที่อาจเปลี่ยนไปตามความถี่ อุณหภูมิ ความเร็ว และแรงภายในที่แบกทานอยู่ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์หลายๆกรณีที่ครอบคลุมช่วงคุณสมบัติของอุปกรณ์สลายพลังงาน

#### 2.4.3.4 ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Dampers)

ในการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว หนึ่งในวิธีที่ช่วงลดกำลังของแรงดันด้านข้าง คือการใช้อุปกรณ์สลายพลังงานตัวหน่วงการสั่นสะเทือน หรือ Dampers การเกิดแผ่นดินไหวจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง โดยพลังงานที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของพลังงานจลน์และความเครียด เมื่อพลังงานเกิดการถ่ายโอนไปยังโครงสร้าง Dampers จะทำหน้าที่กระจายพลังงานจลน์

ซึ่ง Dampers ที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนสลายพลังงานแบบ Active มีการใช้งานหลักๆ 5 วิธี ดังนี้

1. Friction Dampers.
2. Viscous Dampers.
3. Yielding Dampers (Hysteretic, Metallic, X-Plate or Elasto-Plastic).
4. Magnetic Dampers.
5. Tuned Mass Dampers. (TMD) (harmonic absorber)

### (1) Friction Dampers

Friction Dampers เป็นตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีประสิทธิภาพ เชื่อถือได้ และประหยัดที่สุดในการกระจายพลังงาน พลังงานจากแผ่นดินไหวจะถูกแปรสภาพให้อยู่ในรูปของแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวแต่ละพื้นผิว Friction Dampers สามารถกำจัดพลังงานได้ในปริมาณที่มากกว่าวิธีอื่นๆ (เช่น Viscous damper หรือ Yielding damper) สมรรถนะในการใช้งานมีผลกระทบน้อยมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความเร็ว และอื่นๆ และด้วยความที่วิธีนี้เป็นวิธีที่มีการทำงานที่เรียบง่ายรวมถึงการติดตั้งที่ง่าย ทำให้เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป สำหรับ damper ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว สามารถใช้งานได้กับอาคารที่มีอยู่แล้วได้ โดยวิธีนี้มีราคาต้นทุนที่ต่ำและไม่จำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุง ดังรูป 2.4-4(ก)

### (2) Viscous Dampers

Viscous damper เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการกระจายพลังงานสู่ระบบโครงสร้างด้านข้างของอาคาร โดยที่ทำการกระจายพลังงานโดยการดันให้ของเหลวผ่านช่องเปิดและทำการสร้างความดันตัวหน่วงซึ่งจะเกิดเป็นแรงต้านต่อไป Viscous damper มีนัยสำคัญอย่างมากในการลดลงของแรงแผ่นดินไหวหรือพลังงานจากแผ่นดินไหว การเสริมกำลังด้วย Viscous damper ทำให้โครงสร้างสามารถลดความเร่งในแนวราบและลดการการหดตัวด้านข้างถึง 50% หรือมากกว่า Viscous damper มีลักษณะการทำงานคล้ายกับตัวดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ แต่จะมีการให้แรงที่สูงกว่า อุปกรณ์นี้ถูกสร้างขึ้นด้วยเหล็ก ดังนั้นจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความทนทาน ของเหลวที่อยู่ใน Viscous damper เป็นน้ำมันซิลิกอน ที่มีความเฉื่อย ไม่ติดไฟ ไม่มีพิษ และมีความเสถียรเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน และเนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งและดัดแปลง รวมถึงมีขนาดที่

หลากหลาย Viscous damper จึงมีการใช้งานทั้งในการออกแบบและการติดตั้งเพิ่มเติม ดังรูป 2.4-4(ข)

### (3) Yielding Dampers

สำหรับ Yielding Damper เป็นการถ่ายโอนพลังงานให้กับโครงสร้างโดยตรงและใช้กับองค์ประกอบของตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์นี้มีการหดรัดตัวในวัสดุที่ไม่ยืดหยุ่น เช่น วัสดุที่ขึ้นรูป (เหล็ก ตะกั่ว) เพื่อกระจายพลังงาน ในการค้ำยันโดยปกติแล้วจะได้เป็น metallic dampers ในการใช้งานมากกว่า Yielding Damper มักถูกสร้างโดยการใส่แผ่นเหล็กวางขนาน และผสมผสานเข้ากับระบบค้ำยัน วิธีนี้มีบทบาทในการดูดซึมและกระจายพลังงาน ดังรูป 2.4-4(ค)

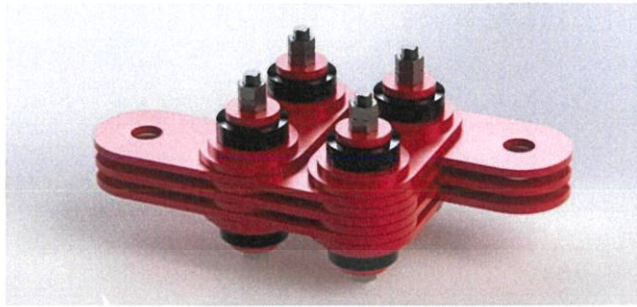
### (4) Magnetic Dampers

Magnetic Dampers ซึ่งประกอบด้วยแม่เหล็ก Nd Fe B มีราคาที่ไม่สูงและไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สะอาด ง่ายต่อการปรับเปลี่ยน และมีประสิทธิภาพสูง Magnetic Damper มีความแข็งแรงไม่มากนัก จึงมีประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับแรงสั่นสะเทือนกลศาสตร์ที่มีความต้องการดูดซับน้อย Magnetic Damper ประกอบไปด้วย สองขั้ว สองเฟือง จานทองแดง และแม่เหล็กโลกหายาก เมื่อความสัมพันธ์ในการเคลื่อนไหวยเชิงเส้นถูกสร้างขึ้นระหว่างปลายเชือกทั้งสอง จานทองแดงจะเกิดการหมุนตัวเนื่องจากการทำงานของเฟืองและขั้วแม่เหล็ก ดังรูป 2.4-4(ง)

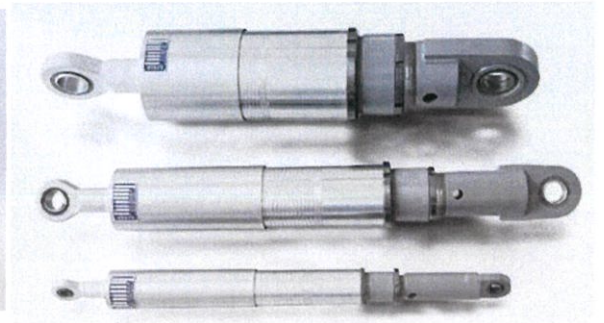
### (5) Tuned Mass Dampers

Tuned Mass Dampers ถูกสร้างขึ้นด้วยมวลและสปริงที่ถูกยึดติดกันเป็นโครงสร้าง มีการทำงานที่ขึ้นกับความถี่ เช่น การเคลื่อนไหวยแบบฮาร์โมนิค มันทำหน้าที่ลดการสั่นเชิงกลโดยการต่อต้านความถี่สั่นพ้อง ประกอบไปด้วย มวลขนาดใหญ่ สปริง และ Viscous-damper

ส่วนประกอบเหล่านี้ล้วนมีน้ำหนักที่เบา ซึ่งทำหน้าที่เป็นสปริงและช่วงลดความสั่นสะเทือนจากแรงสั่นสะเทือนที่มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดสำหรับการใช้งานคือ Taipei 101 ดังรูป 2.4-4(จ)



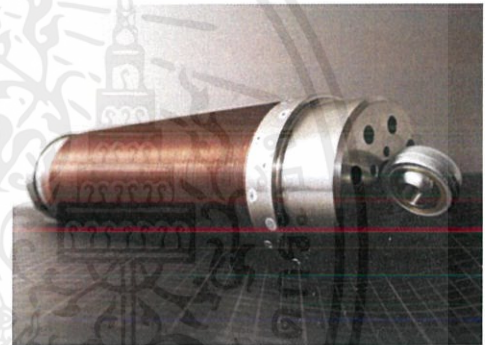
ข. Friction Damper



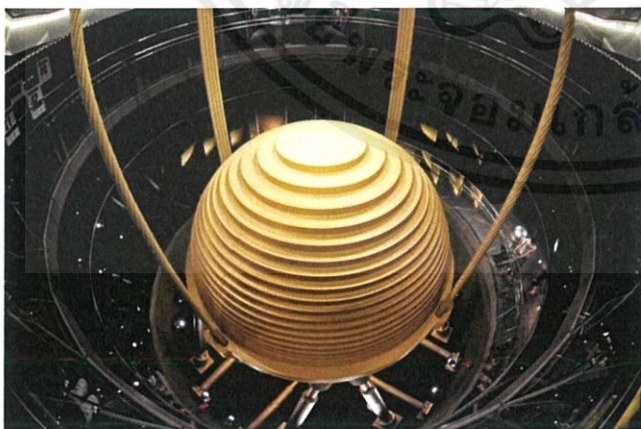
ก. Viscous Damper



ค. Yielding Damper



ง. Magnetic Damper



จ. Tuned Mass Damper

รูปที่ 2.4-4 Dampers ประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การศึกษาและเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารสูง

[3] สุวานทัศน์ อนันตริย, กุศลณภูมิ ศังขะศิลป์ และพิชาเชษฐ์ พันธุ์พรหมา, (2561) กล่าวถึงการศึกษาและวิเคราะห์วิธีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารชื้อ อื้อจื่อเหลียง โดยมีวัตถุประสงค์คือศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหว ศึกษาวิธีการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารศึกษา และเปรียบเทียบวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารที่ศึกษา โดยวิธีการที่นำมาศึกษาคือ วิธีการพอกโครงสร้างอาคารด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แผ่นเหล็ก แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และการติดตั้งโครงแกน ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า วิธีการพอกโครงสร้างอาคารให้ความเหมาะสมในด้านสถาปัตยกรรมได้มากกว่าการติดตั้งโครงแกน และการพอกโครงสร้างอาคารด้วยคอนกรีตให้ราคาที่น้อยที่สุดในการติดตั้ง

### 2.6.2 Characteristics & Applications of Different Types of Dampers as Seismic Energy Dissipater

[4] Dharmesh Chandnani, Riddhi Joshi, Kumarpal Trivedi, (2016) กล่าวถึงวิธีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานทั้งแบบพาสซีฟและแอคทีฟ โดยบทความกล่าวว่าวิธีการใช้อุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ ซึ่งจะถูกลดหรือโอนถ่ายไปยังโครงสร้าง อุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอุปกรณ์สลายพลังงานสามารถเรียกโดยรวมได้ว่า Seismic Dampers บทความนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะการใช้งาน รวมถึงประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานของอุปกรณ์สลายพลังงานแต่ละประเภท ประกอบด้วย Friction Dampers, Viscous Dampers, Yielding Dampers, Magnetic Dampers และ Turned Mass Dampers ซึ่งจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าการใช้ Seismic Dampers สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของอาคารได้, อัตราส่วนประสิทธิภาพต่อต้นทุนมีค่ามากสำหรับโครงสร้างอาคารที่ใช้ Seismic Dampers, Seismic Dampers จำเป็นต้องรับการบำรุงรักษาเพื่อให้การทำงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด และการใช้ Seismic Dampers เป็นการลดค่าความเค้นในวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.6.3 Seismic Response Study of Multi-Storied Reinforced Concrete Building with Fluid Viscous Dampers

[5] Shaik Qamaruddin, (2017) กล่าวถึงการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารโดยอุปกรณ์ประเภท Fluid Viscous Damper (FVD) โดยงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์อาคารที่มีรูปทรงอาคารและหน้าตัดเสาเป็นรูปสี่เหลี่ยม ผ่านโปรแกรม ETABS 2015 จากการศึกษาและวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนและหลังเสริมกำลังด้วย FVD พบว่าการใช้ FVD แบบ FVD250 ทำให้สามารถลดค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างลงได้ถึง 70% และสรุปได้ว่าอุปกรณ์ FVD250 สามารถใช้ในการลดค่าการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพในอาคารสูงกลายเป็นได้

### 2.6.4 Retrofitting of Reinforced Concrete Frames using Steel Bracing

[6] Mohammed Hyderuddin, Md Mubassir, Imran Syed Mohsin, (2016) กล่าวถึงการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารโดยใช้โครงแกงแนงในรูปแบบ V, X และ K โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคือ ประเมินผลการตอบสนองภายใต้แรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารที่เสริมและไม่เสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยโครงแกงแนง เพื่อเปรียบเทียบค่าระยะการเคลื่อนตัว ค่าระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ในการใช้โครงแกงแนงรูปแบบต่างๆ เปรียบเทียบความสามารถในการลดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของอาคาร และระบบค้ำยันที่เหมาะสมกับอาคารและมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยนี้ ได้สรุปผลออกมาได้ว่า ระบบค้ำยันที่เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือระบบโครงแกงแนงแบบ X ซึ่งวิเคราะห์ได้จากค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สามารถลดได้มากที่สุด การเกิด bending moment ที่น้อยกว่าระบบอื่น และงานวิจัยนี้กล่าวว่า น้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการติดตั้งโครงแกงแนง

### 2.6.5 Seismic Evaluation and Strengthening of RC Frames with FRP Composites

[7] Mohamed Husain, Hilal Hassan, Mahmoud Abd Elhamid and Eman Said Elgharbawy, (2017) กล่าวถึงการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการเสริมด้วยวัสดุ FRP หรือ Fiber Reinforced Polymer ซึ่งในที่นี้คือการพอกโครงสร้างอาคารด้วย CFRP หรือ Carbon Fiber Reinforced Polymer ซึ่งจากการวิจัยนี้ได้สรุปว่าการพอกโครงสร้างด้วยแผ่น CFRP 1 รอบ (ที่ความหนา 0.166 mm) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ 35% และสรุปได้ว่าการ

ใช้ CFRP ในการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพในการเพิ่ม chord rotation และกำลังต้านทานรับแรงเฉือนของคอนกรีต

## 2.7 คุณสมบัติของวัสดุและข้อมูลประกอบการออกแบบโครงสร้าง

การตรวจสอบความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเจ้าคุณทหาร อ้างอิงกับแบบวิศวกรรมโครงสร้างของอาคารและทำการจำลองแบบโครงสร้างอาคารด้วยวิธี Finite Element โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุซึ่งในที่นี้เป็นวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กและข้อมูลประกอบการออกแบบโครงสร้างอาคาร ดังต่อไปนี้

### 2.7.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2.7-1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็กและข้อมูลประกอบการออกแบบ

คุณสมบัติของเหล็กเสริม	เหล็กกลม	เหล็กข้ออ้อย
Grade	SR-24	SD-40
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, $f_y$ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	2400	4000
Modulus of Elasticity, $E_s$ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	$2.04 \times 10^6$	

คุณสมบัติของคอนกรีต	
กำลังรับแรงอัดประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, $f_c'$ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	280 (0.15x0.30m, cylinder)
กำลังรับแรงอัดประลัยของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก, $f_c'$ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	280 (0.15x0.30m, cylinder)
กำลังรับแรงอัดประลัยของพื้นและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก, $f_c'$ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	240 (0.15x0.30m, cylinder)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการ

#### 3.1 รูปแบบงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของวิธีพอกโครงสร้างเสาหรือจุดต่อที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็ก วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย, วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนและการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน เพื่อที่จะให้ผ่านมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยศึกษาและเปรียบเทียบจากการพิจารณาระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง

#### 3.2 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลได้ทำการค้นคว้าจากวิทยานิพนธ์ หนังสือ และเอกสารวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยรายละเอียดได้แสดงไว้ในบทก่อนหน้า

#### 3.3 เครื่องมือวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารก่อนเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยใช้วิธีการเสริมกำลังตามที่ได้กล่าวไว้ และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ETABS โดยใช้วิธีเชิงพลศาสตร์

#### 3.4 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง จาก มยผ.1302
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว จาก มยผ. 1303 และเอกสารวิชาการต่างประเทศ
3. ศึกษาข้อมูลวิธีการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ETABS
4. สร้างแบบจำลองของอาคารเจ้าคุณทหาร โดยใช้โปรแกรม ETABS
5. คำนวณหาแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร โดยใช้โปรแกรม ETABS

6. สร้างแบบจำลองระบบวิธีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหววิธีต่างๆ ซึ่งได้แก่ วิธีพอกโครงสร้างเสาหรือจุดต่อที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็ก วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย, วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงต้านข้างโดยใช้โครงแกน และการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน
7. เสริมกำลังให้แบบจำลองอาคาร เพื่อให้ผ่านเกณฑ์ของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง
8. วิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบข้อมูลของการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหววิธีต่างๆ
9. สรุปผลการวิจัย และทำการจัดทำรูปเล่ม

### 3.5 การสร้างแบบจำลองอาคารและการวิเคราะห์อาคารด้วยโปรแกรม ETABS

#### 3.5.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอาคาร

ผู้ทดลองได้ทำการจำลองอาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม ETABS ซึ่งมีขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองดังนี้

1. กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ ในที่นี้ผู้ทดลองจะใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัย ( $f_c'$ ) ที่ 280 ksc. สำหรับเสา คาน และกำแพงรับแรงเฉือน และ 240 ksc. สำหรับพื้น โดยเริ่มจากการเข้า Define → Material Properties → Add new material → เลือก Region เป็น User → เลือก Material Type เป็น Concrete → กำหนดค่าต่างๆตามรูปที่ 3.5-1 และ 3.5-2 → OK

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name: Concrete280

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color:  Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density  Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 2402.77 kgf/m<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 2402.77 kg/m<sup>3</sup>

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 253456.36 kgf/cm<sup>2</sup>

Poisson's Ratio, U: 0.15

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000099 1/C

Shear Modulus, G: 110198.42 kgf/cm<sup>2</sup>

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

OK Cancel

---

**Material Property Design Data**

**Material Name and Type**

Material Name: Concrete280

Material Type: Concrete, Isotropic

**Design Properties for Concrete Materials**

Specified Concrete Compressive Strength,  $f_c$ : 280 kgf/cm<sup>2</sup>

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor: \_\_\_\_\_

OK Cancel

รูปที่ 3.5-1 กำหนดคุณสมบัติคอนกรีตให้มีค่า  $f_c'$  เท่ากับ 280 ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material Property Data

**General Data**

Material Name: Concrete240

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color:  Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density       Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 2402.77 kgf/m<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 2402.77 kg/m<sup>3</sup>

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 253456.36 kgf/cm<sup>2</sup>

Poisson's Ratio, U: 0.15

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000099 1/C

Shear Modulus, G: 110198.42 kgf/cm<sup>2</sup>

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data...      Material Damping Properties...

Time Dependent Properties...

OK      Cancel

**Material Property Design Data**

**Material Name and Type**

Material Name: Concrete240

Material Type: Concrete, Isotropic

**Design Properties for Concrete Materials**

Specified Concrete Compressive Strength, f<sub>c</sub>: 240 kgf/cm<sup>2</sup>

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor: \_\_\_\_\_

OK      Cancel

รูปที่ 3.5-2 กำหนดคุณสมบัติคอนกรีตให้มีค่า  $f'_c$  เท่ากับ 240 ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ ในที่นี้ผู้ทดลองจะใช้เหล็กตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ มอก. (TIS.) โดยเริ่มจากการเข้า Define → Material Properties → Add new material → เลือก Region เป็น User → เลือก Material Type เป็น Steel → กำหนดค่าต่างๆตามรูปที่ 3.5-3 → OK

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name: TIS

Material Type: Steel

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color:   Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density  Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 7851.03 kgf/m<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 7851.03 kg/m<sup>3</sup>

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 2100000 kgf/cm<sup>2</sup>

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.000012 1/C

Shear Modulus, G: 807692.31 kgf/cm<sup>2</sup>

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

OK Cancel

**Material Property Design Data**

**Material Name and Type**

Material Name: TIS

Material Type: Steel, Isotropic

**Design Properties for Steel Materials**

Minimum Yield Stress, Fy: 3515.35 kgf/cm<sup>2</sup>

Minimum Tensile Strength, Fu: 4569.95 kgf/cm<sup>2</sup>

Effective Yield Stress, Fye: 3866.88 kgf/cm<sup>2</sup>

Effective Tensile Strength, Fue: 5026.95 kgf/cm<sup>2</sup>

OK Cancel

รูปที่ 3.5-3 การกำหนดคุณสมบัติของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดคุณสมบัติของ CFRP ที่ใช้ ในที่นี้ผู้ทดลองจะใช้ CFRP เพื่อเสริมกำลังรับแรงแผ่นดินไหวที่หน้าตัดเสา เข้า Define → Material Properties → Add new material → เลือก Region เป็น User → เลือก Material Type เป็น Other → กำหนดค่าต่างๆตามรูปที่ 3.5-4 → OK

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name: CFRP

Material Type: Other

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color: █ Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density  Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 1800 kgf/m<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 1800 kg/m<sup>3</sup>

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 2344546.38 kgf/cm<sup>2</sup>

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000083 1/C

Shear Modulus, G: 976894.33 kgf/cm<sup>2</sup>

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

OK Cancel

รูปที่ 3.5-4 การกำหนดขนาดของ CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กำหนดขนาดหน้าตัดเสาตามแบบก่อสร้างอาคาร เข้า Define → Section Properties → Frame Sections → Add New Property → เลือก Section Shape เป็น Concrete Rectangular/Circle ตามในแบบก่อสร้างอาคาร → กำหนดค่าต่างๆตามแบบก่อสร้างอาคาร → OK

Frame Section Property Data

General Data

Property Name: C1 1

Material: Concrete280

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 45 cm

Width: 45 cm

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...  
Currently User Specified

Reinforcement

Modify/Show Rebar...

Show Section Properties...

Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

Property/Stiffness Modification Factors

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	Value
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.7
Moment of Inertia about 3 axis	0.7
Mass	1
Weight	1

OK Cancel

รูปที่ 3.5-5 การกำหนดขนาดหน้าตัดของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กำหนดขนาดหน้าตัดคานตามแบบก่อสร้างอาคาร เข้า Define → Section Properties → Frame Sections → Add New Property → เลือก Section Shape เป็น Concrete Rectangular → กำหนดค่าต่างๆตามแบบก่อสร้างอาคาร → OK

**Frame Section Property Data**

**General Data**

Property Name: B0.20x0.60

Material: Concrete280

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

**Shape**

Section Shape: Concrete Rectangular

**Section Property Source**

Source: User Defined

**Section Dimensions**

Depth: 60 cm

Width: 20 cm

**Property Modifiers**

Modify/Show Modifiers...  
Currently User Specified

**Reinforcement**

Modify/Show Rebar...

Show Section Properties...

Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

**Property/Stiffness Modification Factors**

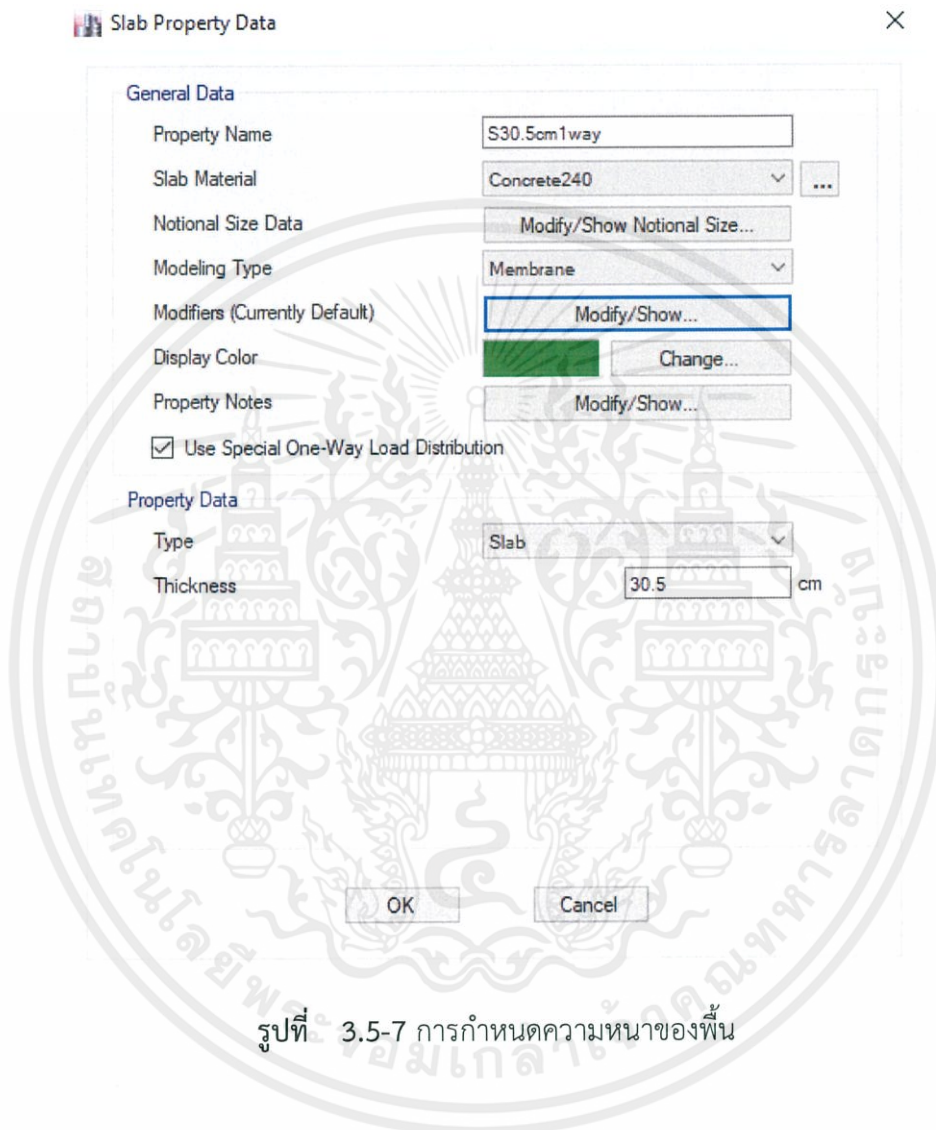
Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.35
Moment of Inertia about 3 axis	0.35
Mass	1
Weight	1

OK Cancel

รูปที่ 3.5-6 การกำหนดขนาดหน้าตัดของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

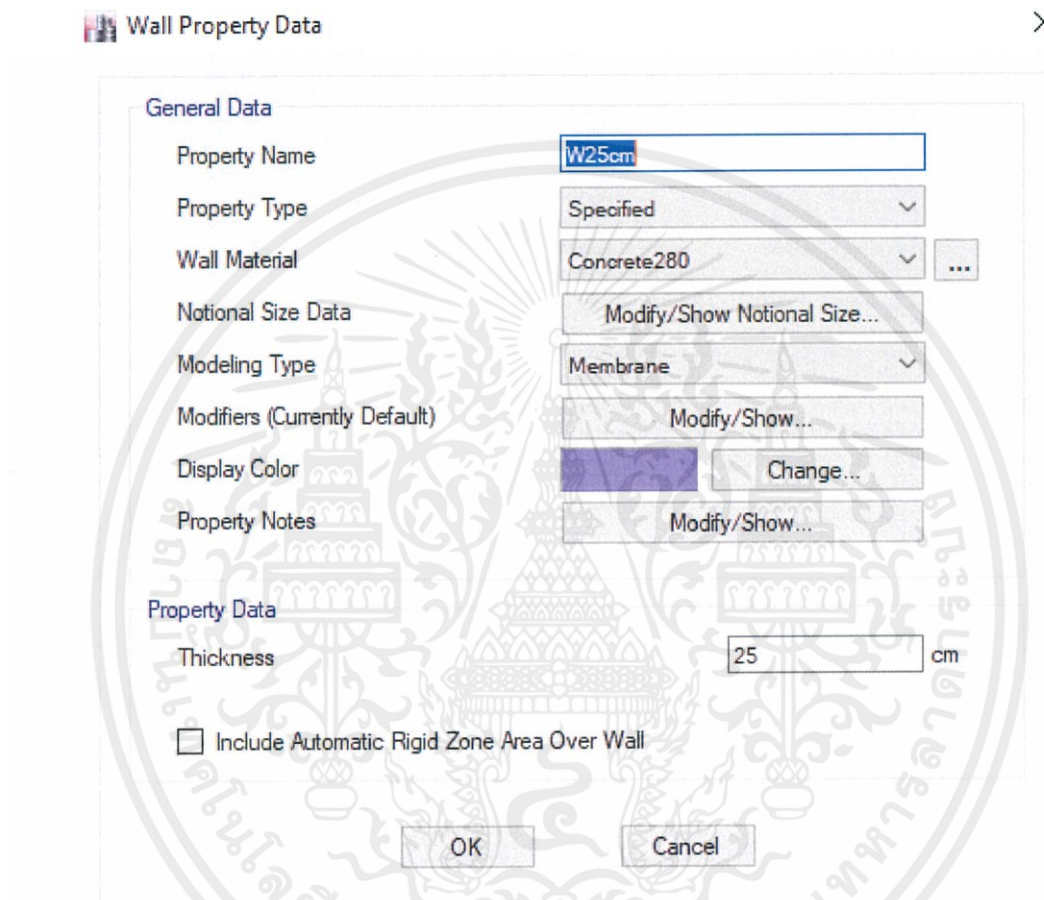
6. กำหนดความหนาพื้นตามแบบก่อสร้างอาคาร เข้า Define → Section Properties → Slab Sections → Add New Property → กำหนดค่าต่างๆตามแบบก่อสร้างอาคาร → OK



รูปที่ 3.5-7 การกำหนดความหนาของพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.กำหนดความหนากำแพงรับแรงเฉือนตามแบบก่อสร้างอาคาร เข้า Define → Section Properties → Wall Sections → Add New Property → กำหนดค่าต่างๆตามแบบก่อสร้างอาคาร → OK

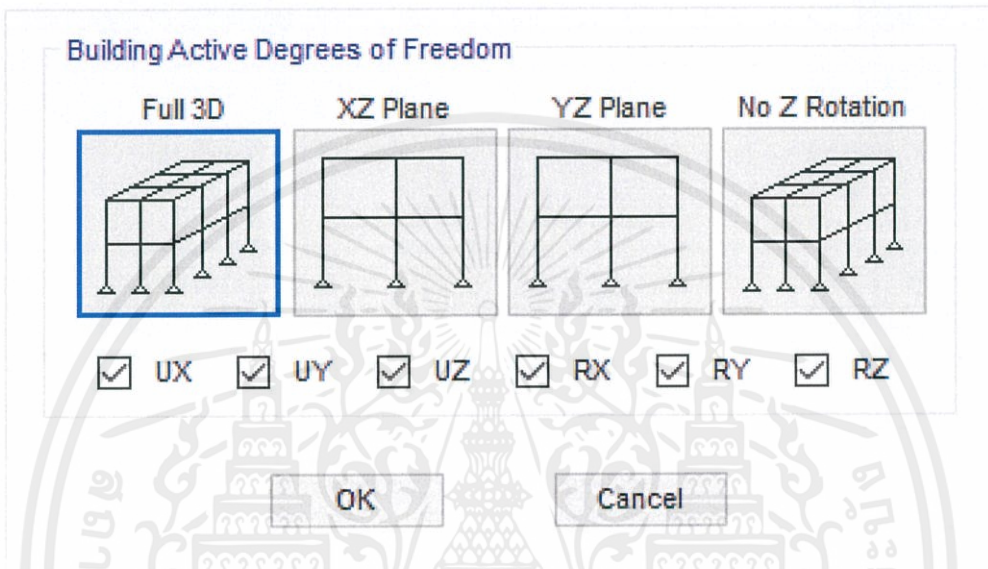


รูปที่ 3.5-8 การกำหนดความหนาของกำแพงรับแรงเฉือน

8.วาดแบบอาคารจากค่าต่างๆ ที่เรากำหนดตามแบบก่อสร้างลงในโปรแกรม ETABS

9.เมื่อสร้างโมเดลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการตั้งค่า Degrees of Freedom โดยเริ่มจากการเข้า Analyze → Set Active Degrees of Freedom → ตั้งค่าตามรูปที่ 3.5-9 → OK

 Active Degrees of Freedom ✕



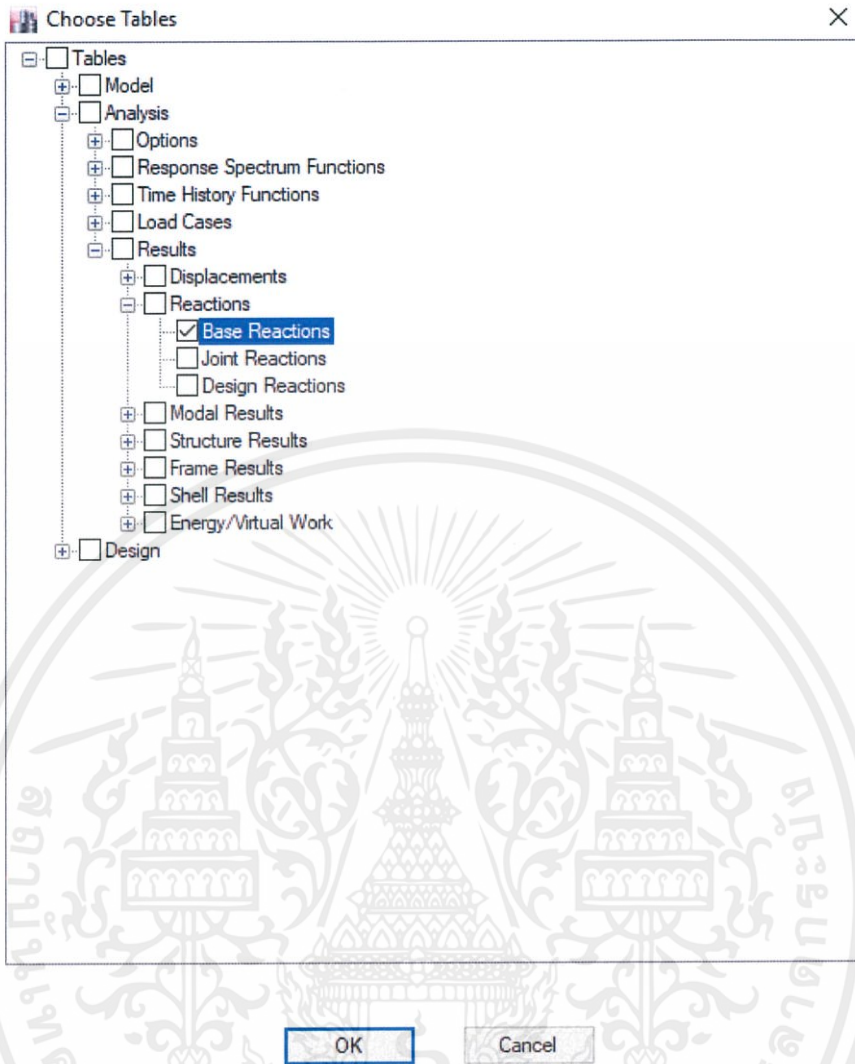
รูปที่ 3.5-9 การกำหนดค่า Degrees of Freedom

3.5.2 การตั้งค่าแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม ETABS ตามมาตรฐาน มยผ.

1302

ผู้ทดลองได้ตั้งค่าต่างๆของแรงแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์อาคาร ในที่นี้ผู้ทำการทดลองได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ระยะการโยกตัวของอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ แต่จะต้องผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดที่อ้างอิงถึงวิธีแรงสถิตเทียบเท่า กล่าวคือ ค่าแรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ ( Model Base Shear,  $V_t$  ) ซึ่งคำนวณจากการรวมการตอบสนองของโหมดต่างๆ มีค่าน้อยกว่า 85% ของค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จากวิธีสถิตเทียบเท่า ( Base Shear ,  $V$  ) ให้ปรับค่าแรงภายในที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์คูณด้วยค่า  $0.85 \frac{V}{V_t}$  ซึ่งจะสามารถดูค่าแรงเฉือนที่ฐานได้โดยเริ่มจากการเข้าไปที่คำสั่ง Display → Show Table → Analyze → Results → Reactions → Base Reactions → OK → ดูค่า Base Shear ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5-10 การเลือกช่อง Base Shear เพื่อดูผลการทดลอง

### 3.5.2.1 วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

ในหัวข้อนี้ผู้ทำการทดลองได้กำหนดค่าต่างๆ ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวมากำหนดในโปรแกรมดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากผลของการแตกร้าว ( $I_{eff}$ ) โดยสำหรับเสาจะเท่ากับ  $0.70I_g$  และสำหรับคานจะเท่ากับ  $0.35I_g$  โดยเริ่มจากการเข้า Define → Section Properties → Frame Section → เลือกเสา/คานที่ต้องการ → Modify/Show Property → Modify/Show Modifiers → Moment of Inertia about 2 และ 3 axis ให้เป็น  $0.70$  (สำหรับเสา) และ  $(0.35$  สำหรับคาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frame Section Property Data

**General Data**

Property Name: C1.1

Material: Concrete280

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color:   Change...

Notes: Modify/Show Notes...

**Shape**

Section Shape: Concrete Rectangular

**Section Property Source**

Source: User Defined

**Section Dimensions**

Depth: 45 cm

Width: 45 cm

**Property Modifiers**

Modify/Show Modifiers...  
Currently User Specified

**Reinforcement**

Modify/Show Rebar...

Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

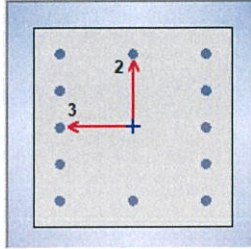
Show Section Properties...

**Property/Stiffness Modification Factors**

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.7
Moment of Inertia about 3 axis	0.7
Mass	1
Weight	1

OK Cancel



รูปที่ 3.5-11 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frame Section Property Data

**General Data**

Property Name: B0.20x0.60

Material: Concrete280

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

**Shape**

Section Shape: Concrete Rectangular

**Section Property Source**

Source: User Defined

**Section Dimensions**

Depth: 60 cm

Width: 20 cm

**Property Modifiers**

Modify/Show Modifiers...  
Currently User Specified

**Reinforcement**

Modify/Show Rebar...

Show Section Properties...

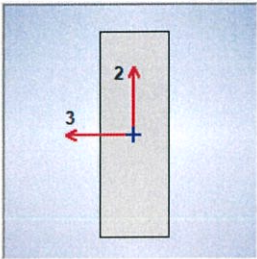
Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

**Property/Stiffness Modification Factors**

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.35
Moment of Inertia about 3 axis	0.35
Mass	1
Weight	1

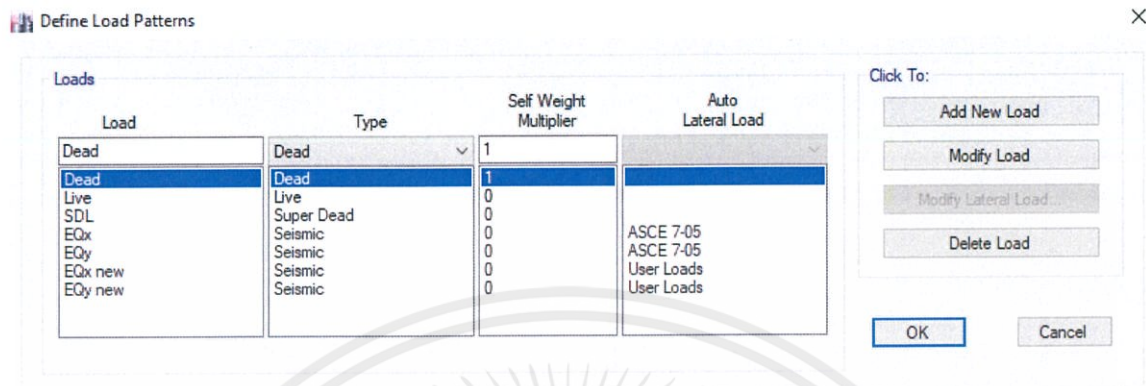
OK Cancel



รูปที่ 3.5-11 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

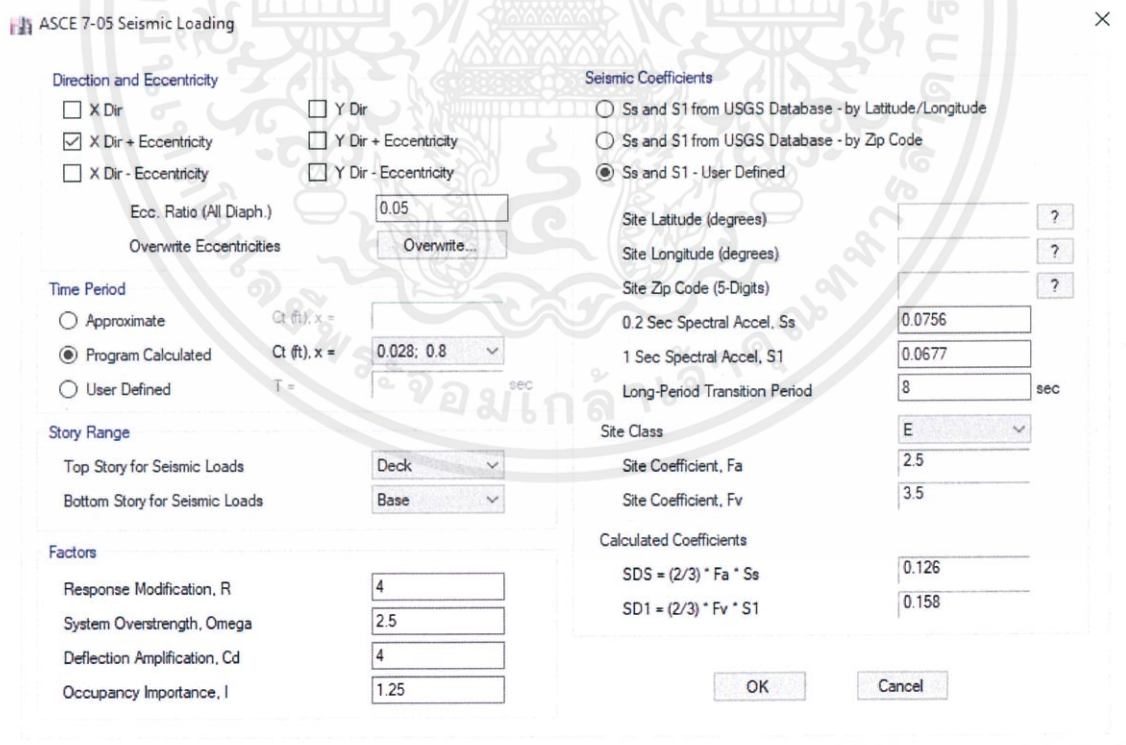
2. กำหนดค่าน้ำหนักต่างๆ ที่เข้ามากระทำกับอาคาร เข้า Define → Load Patterns → Add New Load → กำหนดน้ำหนักบรรทุกต่างๆ → OK



รูปที่ 3.5-12 การตั้งค่าน้ำหนักต่างๆ ที่กระทำกับอาคาร

หมายเหตุ - สำหรับค่า Dead Load ต้อง x1 ในช่อง Self-Weight Multiplier เพื่อให้โปรแกรมคำนวณน้ำหนักของโครงสร้าง

- สำหรับค่า Seismic ต้องทำการ Modify Lateral Load ด้วยตามตารางด้านล่างนี้



รูปที่ 3.5-13 การตั้งค่า Lateral Load ของ Seismic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดค่าแรงที่มากระทำด้วยวิธีรวมผลแรง ซึ่งจะมียู่ด้วยกัน 4 วิธี ประกอบไปด้วย

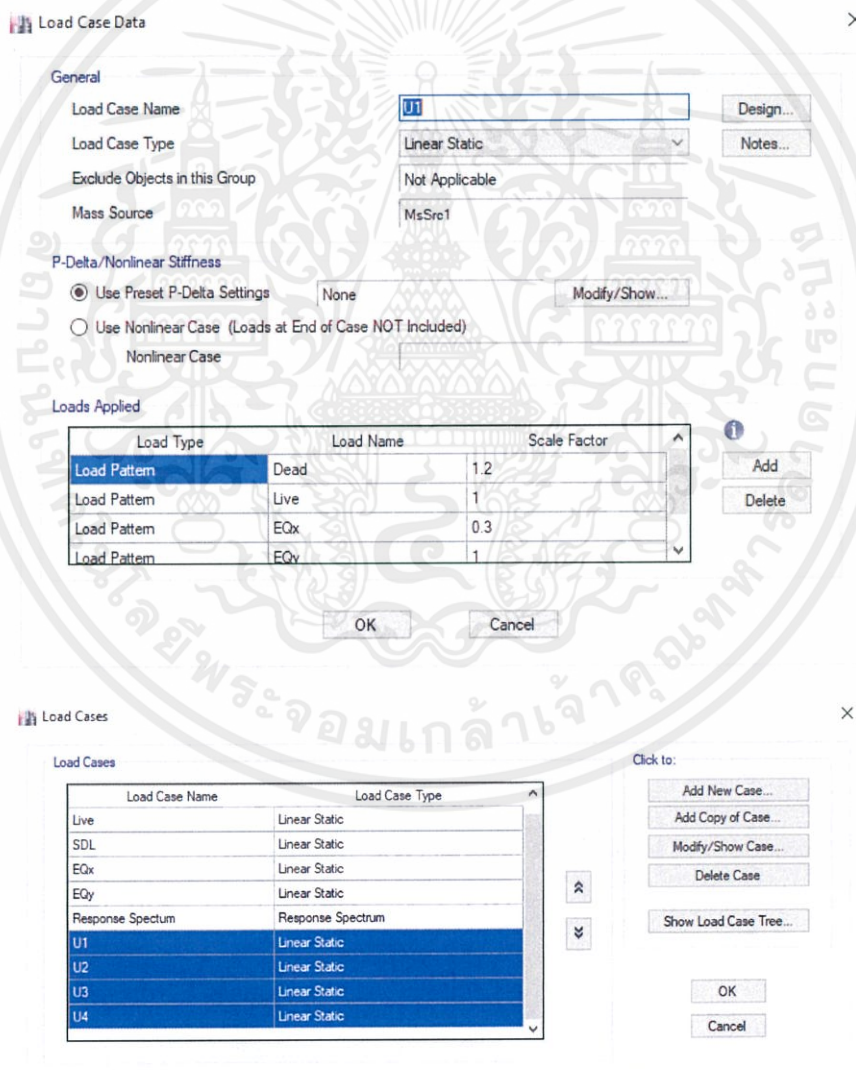
$$U1 = 1.2D + 1.0L + 0.3EQ_x + 1.0EQ_y$$

$$U2 = 1.2D + 1.0L + 1.0EQ_x + 0.3EQ_y$$

$$U3 = 0.9D + 0.3EQ_x + 1.0EQ_y$$

$$U4 = 0.9D + 1.0EQ_x + 0.3EQ_y$$

ขั้นตอนการกำหนดค่าแรง เริ่มจากเข้า Define → Load Cases → Add New Load → กำหนดน้ำหนักบรรทุกต่างๆ → OK



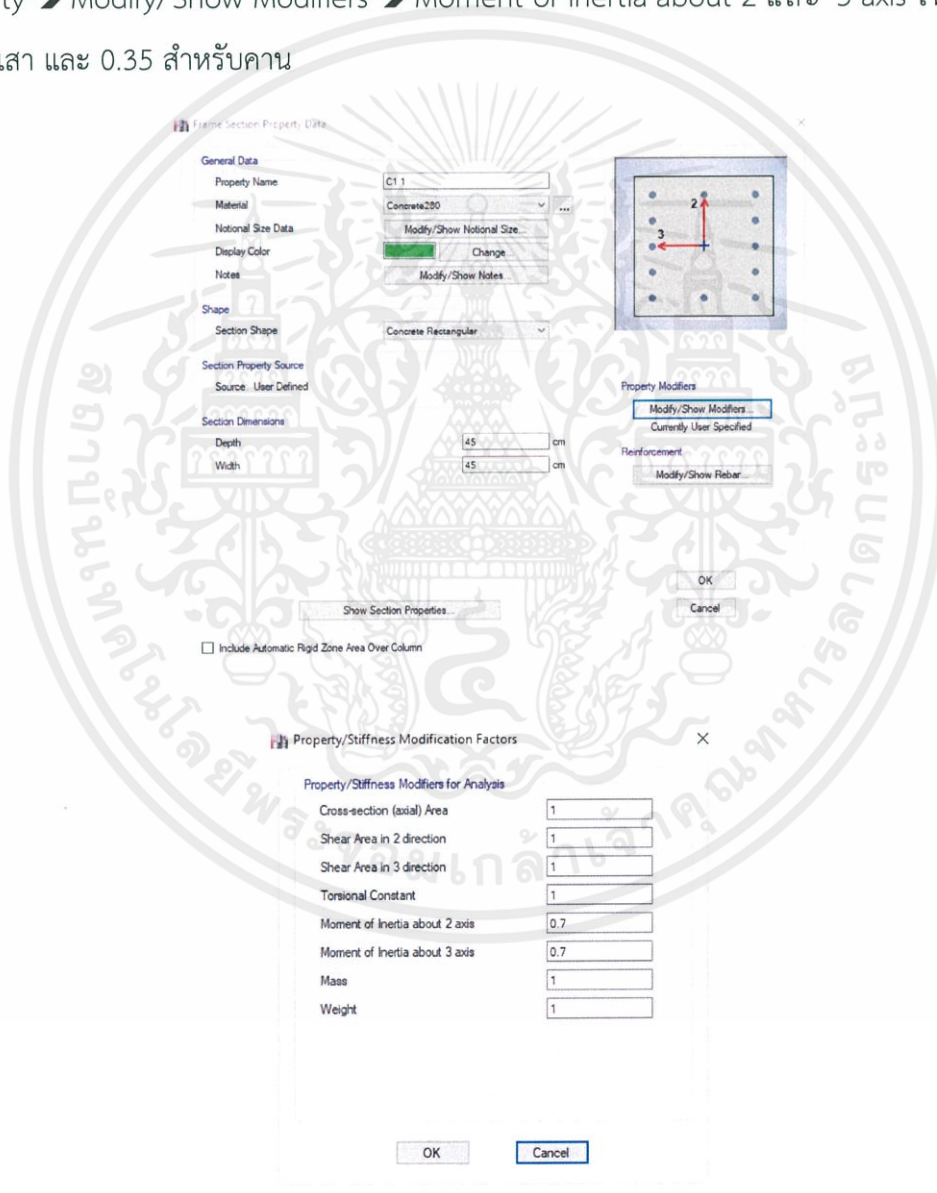
รูปที่ 3.5-14 การตั้งค่า Load Cases

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2.2 วิธีเชิงพลศาสตร์

ในหัวข้อนี้ผู้ทำการทดลองได้กำหนดค่าต่างๆ ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวมากำหนดในโปรแกรมดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากผลของการแตกร้าว ( $I_{eff}$ ) โดยสำหรับเสาจะเท่ากับ  $0.70I_g$  และสำหรับคานจะเท่ากับ  $0.35I_g$  โดยเข้า Define → Section Properties → Frame Section → เลือกเสา/คานที่ต้องการ → Modify/Show Property → Modify/Show Modifiers → Moment of Inertia about 2 และ 3 axis ให้เป็น  $0.70$  สำหรับเสา และ  $0.35$  สำหรับคาน



รูปที่ 3.5-15 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

Frame Section Property Data

Property Name: B0.20x0.60

Material: Concrete280

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source: User Defined

Section Dimensions: Depth 60 cm, Width 20 cm

Property Modifiers: Currently User Specified

Reinforcement: Modify/Show Rebar...

OK Cancel

Show Section Properties...

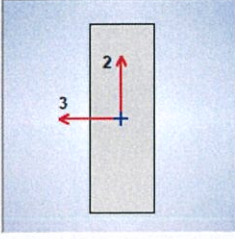
Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

Property/Stiffness Modification Factors

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.35
Moment of Inertia about 3 axis	0.35
Mass	1
Weight	1

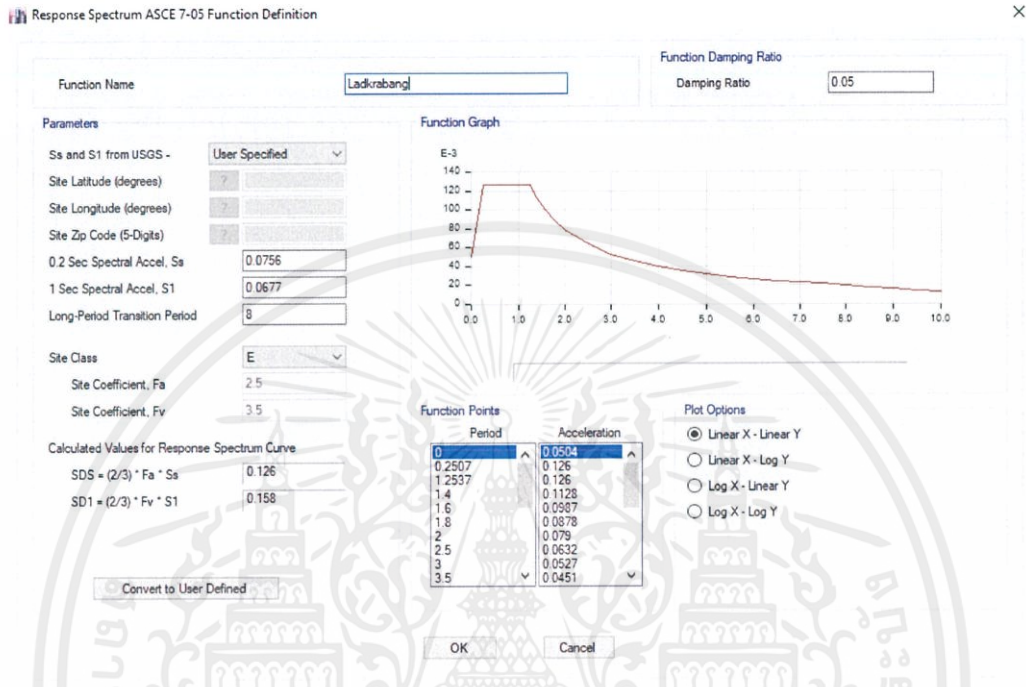
OK Cancel



รูปที่ 3.5-15 การตั้งค่าประสิทธิภาพของสติฟเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

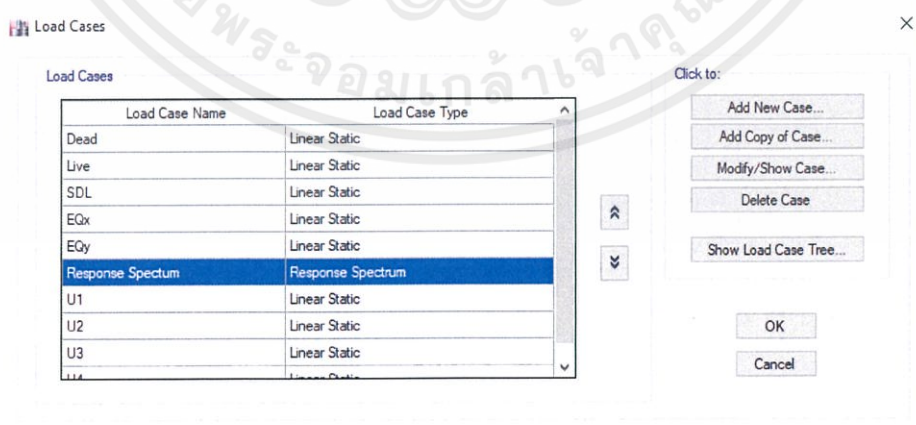
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดค่า Response Spectrum ของพื้นที่ที่อาคารตั้งอยู่ โดยเริ่มจากการเข้าไปที่คำสั่ง Define → Functions → Response Spectrum → Add New Function → ใส่ค่าต่างๆ ให้เหมือนกับดินบริเวณที่ตั้งของอาคาร → OK



รูปที่ 3.5-16 การตั้งค่า Response Spectrum

3. ตั้งค่า Load Case ที่จะใช้วิเคราะห์ให้กับโปรแกรม เข้า Define → Load Cases → Add New Case → ให้ Load Case Type เป็น Response Spectrum → ใส่ค่าต่างๆ ตามรูปที่ 3.5-17 → OK



รูปที่ 3.5-17 การตั้งค่า Load Cases

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load Case Data

General

Load Case Name: Response Spectrum [Design...]

Load Case Type: Response Spectrum [Notes...]

Exclude Objects in this Group: Not Applicable

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Ladkrabang	9178.74
Acceleration	U2	Ladkrabang	6491.48

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Modal Combination Method: SRSS

Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1: [ ]

Rigid Frequency, f2: [ ]

Periodic + Rigid Type: [ ]

Earthquake Duration, td: [ ]

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor: [ ]

Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]

Diaphragm Eccentricity: 0 for All Diaphragms [Modify/Show...]

OK Cancel

รูปที่ 3.5-17 การตั้งค่า Load Cases (ต่อ)

หมายเหตุ การวิเคราะห์จะต้องพิจารณารวมการตอบสนองจากหลายโหมดโดยจำนวนโหมดที่พิจารณาจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของแผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน

### 3.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม ETABS

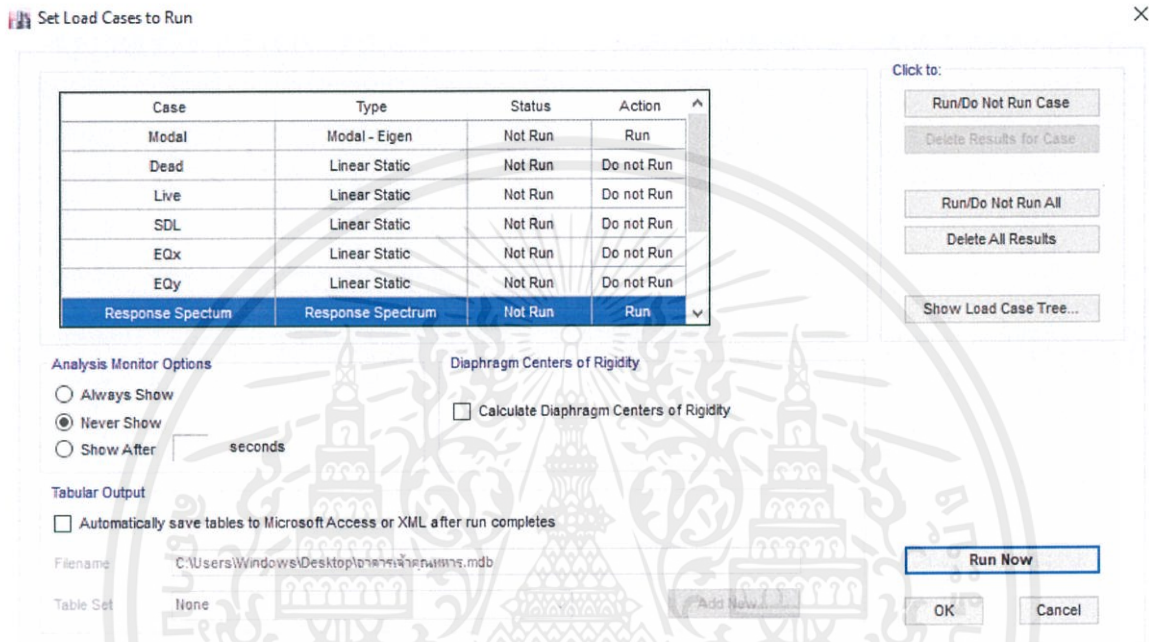
ผู้ทดลองได้ใช้โปรแกรม ETABS ในการวิเคราะห์ระยะการโยกตัวของอาคารซึ่งสามารถทำได้ตั้งขั้นตอนต่อไปนี้

1. ตรวจสอบความถูกต้องเมื่อสร้างแบบจำลองและตั้งค่าแรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับตัวอาคารเรียบร้อยแล้วให้เข้า Analyze → Check Model → Run Now



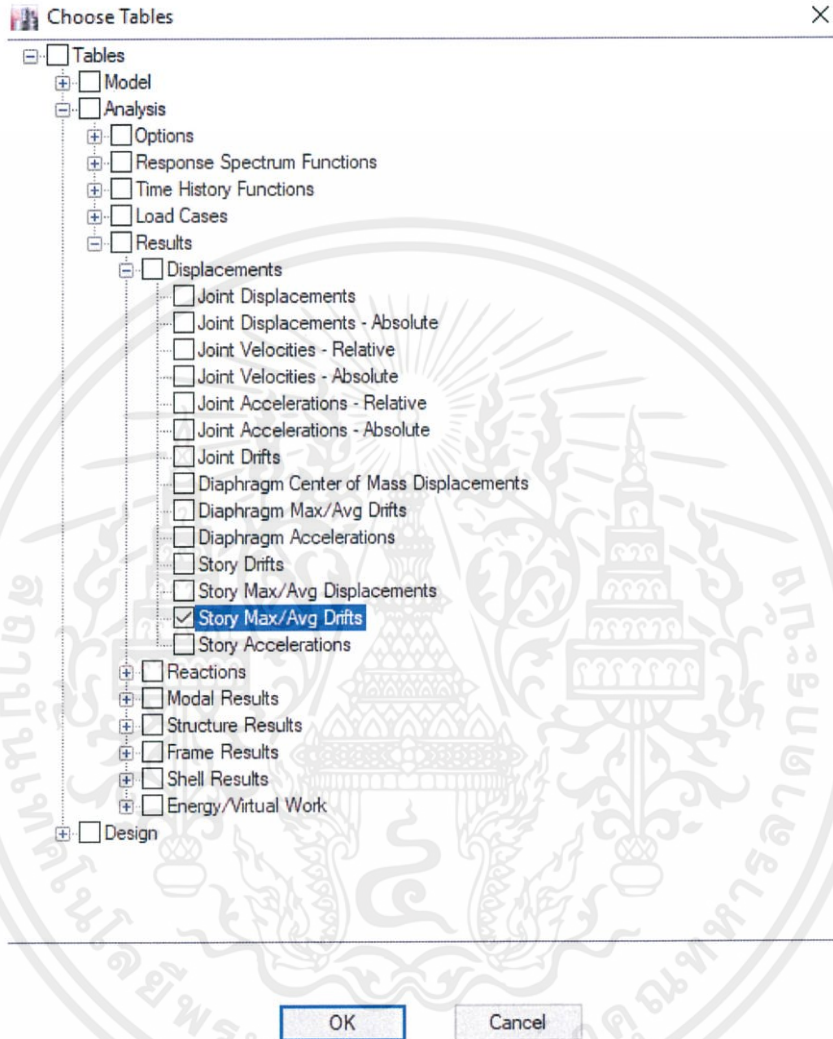
รูปที่ 3.5-18 การตั้งค่าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

2.เมื่อทำการสร้างแบบจำลองและตั้งค่าแรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับตัวอาคารเรียบร้อยแล้ว ให้  
 เข้า Analyze → Set Load Case To Run → เลือก Equivalent Static/Response Spectrum ให้  
 Run → Run Now



รูปที่ 3.5-19 การตั้งค่าวิธีการวิเคราะห์

3. หลังจากที่ได้โปรแกรมได้วิเคราะห์เสร็จ เราสามารถดูผลการวิเคราะห์ได้โดยเข้า Display → ShowTable → Analyze → Results → Displacement → StoryMax/AvgDrifts → OK → ดูค่า Max Drift ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น



รูปที่ 3.5-20 การเลือกช่อง Story Drift เพื่อดูผลการทดลอง

3. ผลที่ได้จากข้อ 2. เป็นค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ดังนั้นเราจะต้องทำการคูณด้วย  $\frac{Cd}{I}$  เพื่อปรับค่าให้เป็นค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสำหรับการออกแบบ

4. ตรวจสอบการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ โดยดูจากตารางที่ 2.3-3 พบว่าอาคารที่ใช้ในการทดลองตรงกับลักษณะโครงสร้างแบบโครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเหวี่ยงแบบยื่นจากฐานรองรับ ซึ่งมีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้เท่ากับ  $0.01h_{sx}$

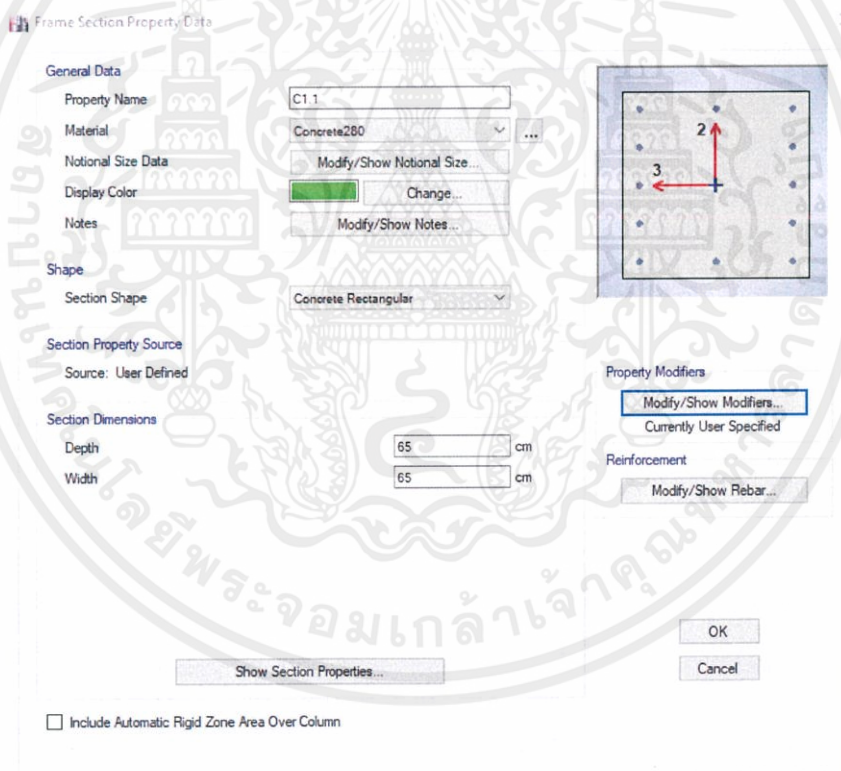
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.4 การเสริมกำลังของอาคารเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม ETABS

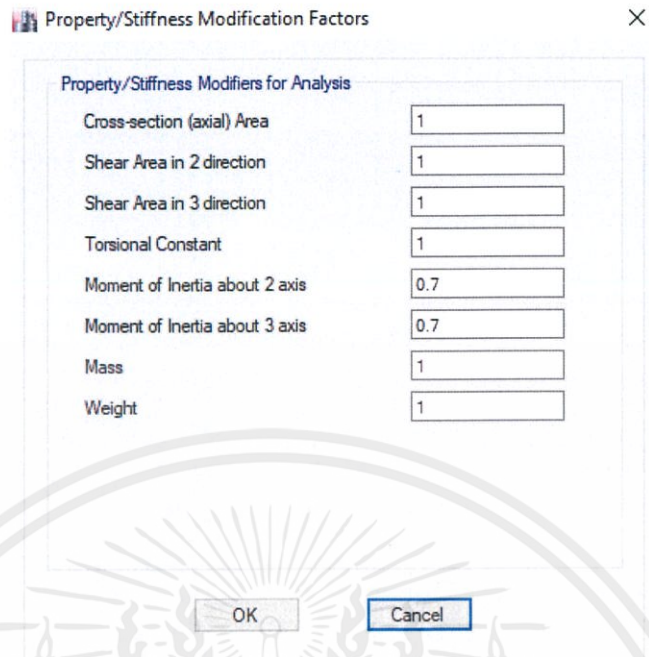
#### 3.5.4.1 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete jacketing)

ผู้ทำการทดลองจะทำการพอกคอนกรีตเพื่อเพิ่มค่าความแข็งตัวของโครงสร้าง ( Stiffness ) ซึ่ง จะทำการพอกโครงสร้างบริเวณเสาส่วนใหญ่ที่รับน้ำหนักกระทำมาก คือ C1 , C3 และ C5 ตั้งแต่ชั้นที่1 ถึงชั้นที่5 โดยเลือกที่จะพอกคอนกรีตความหนา 5 และ 10 เซนติเมตร เพื่อดูค่าระยะการโยกตัวของ อาคารไม่ให้เกิดตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งจะได้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. เข้า Define → Section Properties → Frame Section → เลือกหน้าตัดเสาที่ต้องการ → Modify/Show Property → เพิ่มขนาดหน้าตัดเสาเข้าไปด้านละ 5 หรือ 10 เซนติเมตร ตามที่ ต้องการคำนวณ → OK



รูปที่ 3.5-21 การเพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาสำหรับการพอกเสาด้วยคอนกรีต



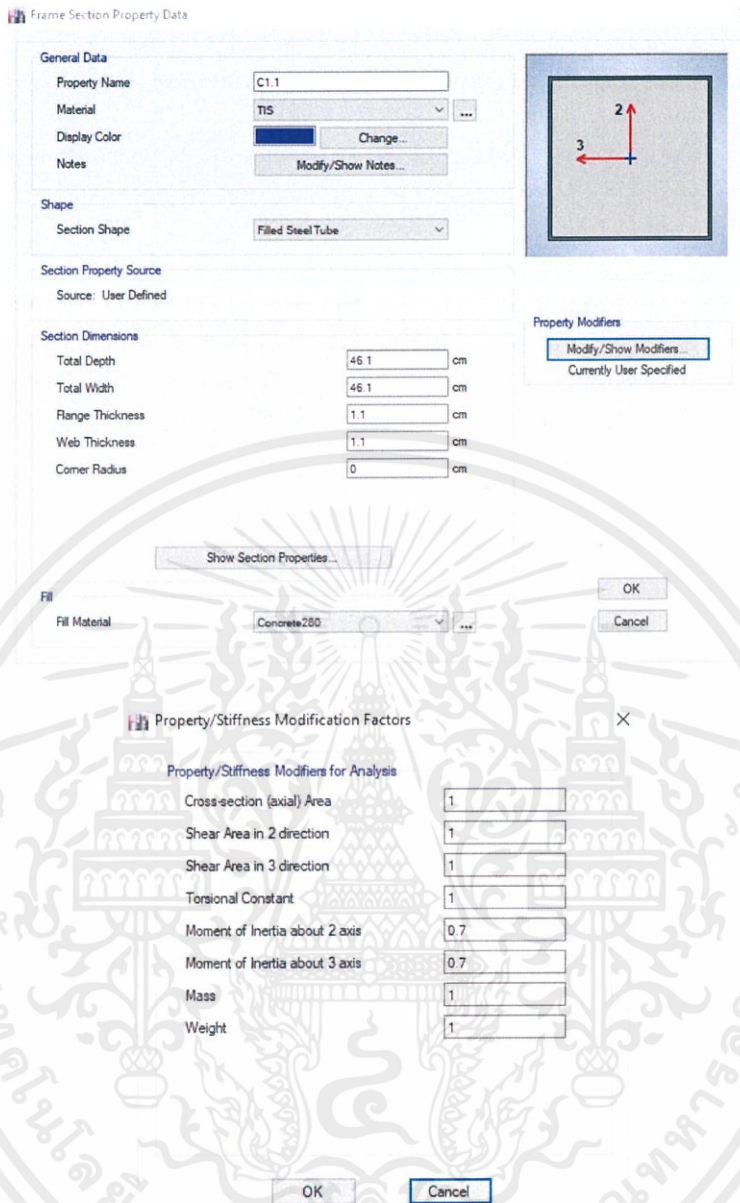
รูปที่ 3.5-21 การเพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาสำหรับการพอกเสาด้วยคอนกรีต (ต่อ)

2. เมื่อทำการปรับขนาดหน้าตัดเสาตามที่ต้องการคำนวณครบทุกเสาแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ตามหัวข้อที่ 3.5.3 เพื่อดูผลของการเสริมกำลัง

#### 3.5.4.2 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

ผู้ทำการทดลองจะทำการพอกเหล็กเพื่อเพิ่มค่าความแข็งตัวของโครงสร้าง ( Stiffness ) ซึ่งจะทำให้การพอกโครงสร้างบริเวณเสาส่วนใหญ่ที่รับน้ำหนักกระทำมาก คือ C1, C3 และ C5 ตั้งแต่ชั้นที่1 ถึงชั้นที่5 โดยเลือกที่จะพอกเหล็กที่มีความหนา 1.0,1.1,1.2,1.3 และ 1.5 เซนติเมตร เพื่อดูค่าระยะการโยกตัวของอาคารไม่ให้เกิดตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งจะได้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

เข้า Define → Section Properties → Frame Section → เลือก หน้าตัด เสา ที่ ต้องการ → Modify/Show Property → เลือก Section Shape เป็น Filled steel tube (สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม) หรือ Filled steel pipe (สำหรับเสาหน้าตัดวงกลม) → กำหนดค่าต่างๆตามขนาดเสาที่ต้องการเพิ่ม → OK



รูปที่ 3.5-22 การกำหนดค่าหน้าตัดเสาที่พอกด้วยเหล็กแผ่นหนา 1.1 เซนติเมตร

### 3.5.4.3 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของการพอกโครงสร้างเสาและคานที่มีอยู่เดิมด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer)

ผู้ทำการทดลองจะทำการพอก CFRP เพื่อเพิ่มค่าความแข็งตัวของโครงสร้าง ( Stiffness ) ซึ่งจะทำให้การพอกโครงสร้างบริเวณเสาส่วนใหญ่ที่รับน้ำหนักกระทำมาก คือ C1 , C3 และ C5 ตั้งแต่ชั้นที่1 ถึงชั้นที่5 โดยเลือกที่จะพอก CFRP ที่มีความหนา 0.7,1 และ 1.3 เซนติเมตร เพื่อดูค่าระยะการโยกตัวของอาคารไม่ให้เกินตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งจะทำให้ได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้า Define → Section Properties → Frame Section → เลือกหน้าตัดเสาที่ต้องการ  
 → Modify/Show Property → เลือก Section Shape เป็น Filled steel tube (สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม)  
 หรือ Filled steel pipe (สำหรับเสาหน้าตัดวงกลม) → กำหนดค่าต่างๆตามขนาดเสาที่ต้องการเพิ่ม → OK

**Frame Section Property Data**

**General Data**

Property Name: C1.1

Material: CFRP

Display Color: [Color Selection] Change...

Notes: [Text Area] Modify/Show Notes...

**Shape**

Section Shape: Filled Steel Tube

**Section Property Source**

Source: User Defined

**Section Dimensions**

Total Depth: 45 cm

Total Width: 45 cm

Flange Thickness: 1 cm

Web Thickness: 1 cm

Corner Radius: 0 cm

**Property Modifiers**

Modify/Show Modifiers...  
Currently User Specified

**Fill**

Fill Material: Concrete280

**Property/Stiffness Modification Factors**

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.7
Moment of Inertia about 3 axis	0.7
Mass	1
Weight	1

OK Cancel

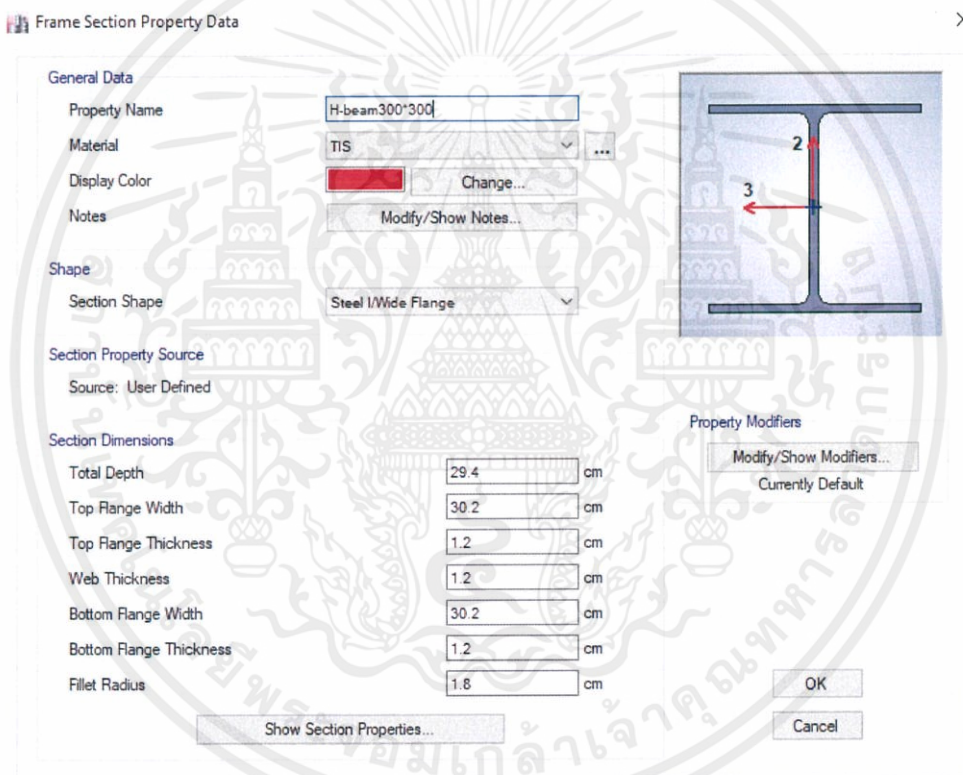
รูปที่ 3.5-23 การกำหนดค่าหน้าตัดเสาที่พอกด้วย CFRP หน้า 1 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

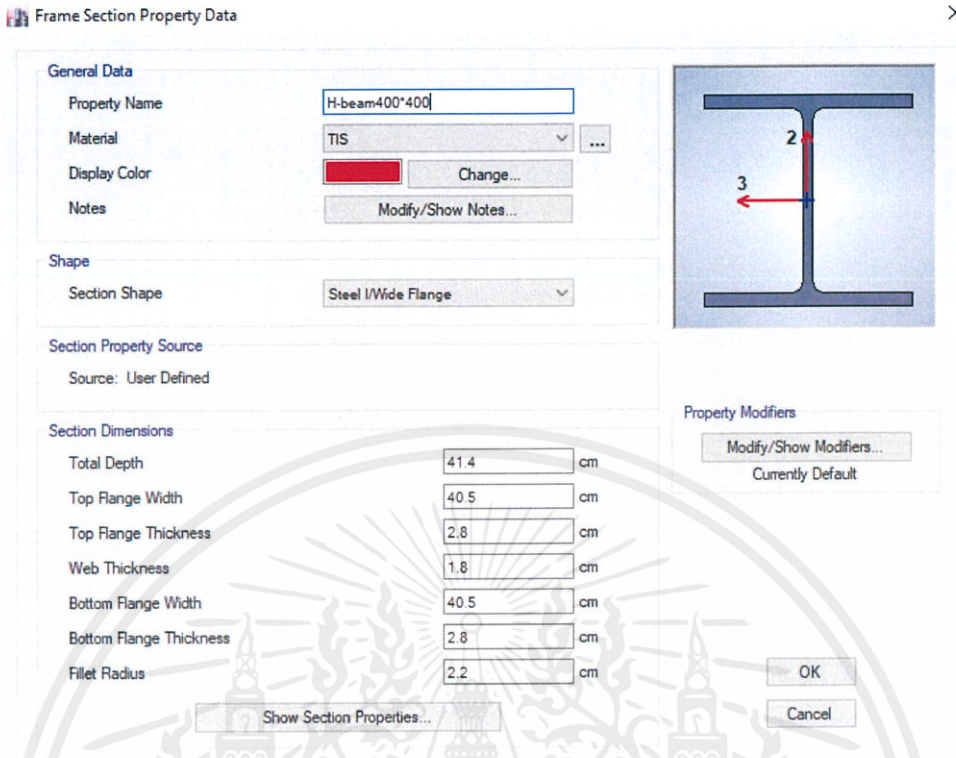
### 3.5.4.4 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครง แก่งแนงเหล็ก (Bracing)

ผู้ทำการทดลองจะทำการเสริมทำการเสริมโครงแก่งแนงเพื่อเพิ่มค่าความแข็งตัวของโครงสร้าง (Stiffness) เพื่อลดค่าระยะการโยกตัวของอาคารให้ไม่เกินมาตรฐานกำหนด โดยจะทำการถักโครงแก่งแนงเป็นรูปตัว X ตลอดช่วงเสาโดยรอบด้านในของอาคาร ในที่นี้ผู้ทำการทดลองได้ทดลองโครงแก่งแนง 2 ขนาด คือเหล็ก WF 300x300 และ WF 400x400 ซึ่งจะได้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

1.เข้า Define → Section Properties → Frame Section → Add New Property → เลือก Steel I/Wide Flange ในช่อง Shape Type → ใส่ขนาดตามที่ต้องการวิเคราะห์ → OK



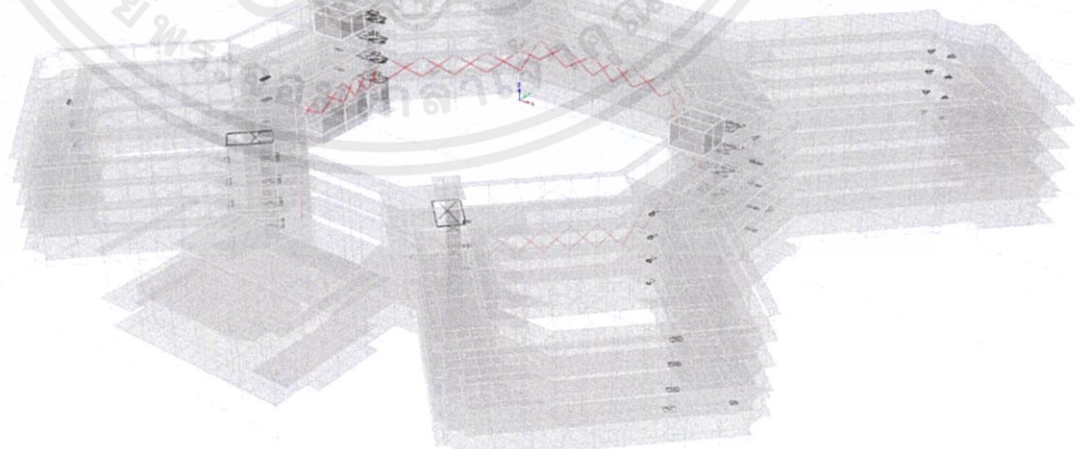
รูปที่ 3.5-24 ขนาดหน้าตัดโครงแก่งแนงแบบ WF300x300



รูปที่ 3.5-25 ขนาดหน้าตัดโครงแกนแบบ WF400x400

2. กด  ที่ Toolbars ด้านบนแล้วเลือก Gridline ที่เราต้องการเสริม

3. กด  เพื่อวาดโครงแกน



รูปที่ 3.5-26 ลักษณะของโครงแกนที่ถูกติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.เมื่อทำการวาดโครงแกงแนงครบรอบอาคารแล้วให้ทำการวิเคราะห์ตามหัวข้อที่ 3.5.3 เพื่อดูผลของการเสริมกำลัง

### 3.5.4.5 ศึกษาโครงสร้างระบบทำงานของการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้ อุปกรณ์สลายพลังงาน (Dampers)

ผู้ทำการทดลองเลือกใช้อุปกรณ์สลายพลังงานแบบ Viscous Damper เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สลายพลังงานที่ได้ความนิยมในการใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งจะทำให้การติดตั้ง Viscous Damper ขนาด FVD250 บริเวณริมเสาทั้งสองด้านของเสาต้นมุม ตั้งแต่ชั้นที่1 ถึงชั้นที่ 5 เพื่อกระจายพลังงานจากเสาเข้าสู่ระบบโครงสร้างด้านข้างของอาคาร และลดความเร่งในแนวราบได้เป็นอย่างมาก ซึ่งวิธีการติดตั้งจะทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.เริ่มโดยการเข้าไปที่ Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property → ใส่ขนาดตามที่ต้องการวิเคราะห์ → OK

Link Property Data

General

Link Property Name: FVD

Link Type: Damper - Exponential

Link Property Notes: Modify/Show Notes...

P-Delta Parameters: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 44 kg

Weight: 25484.2 kgf

Rotational Inertia 1: 0 kgf-m-s<sup>2</sup>

Rotational Inertia 2: 0 kgf-m-s<sup>2</sup>

Rotational Inertia 3: 0 kgf-m-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: 1 m

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: 1 m<sup>2</sup>

Directional Properties

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

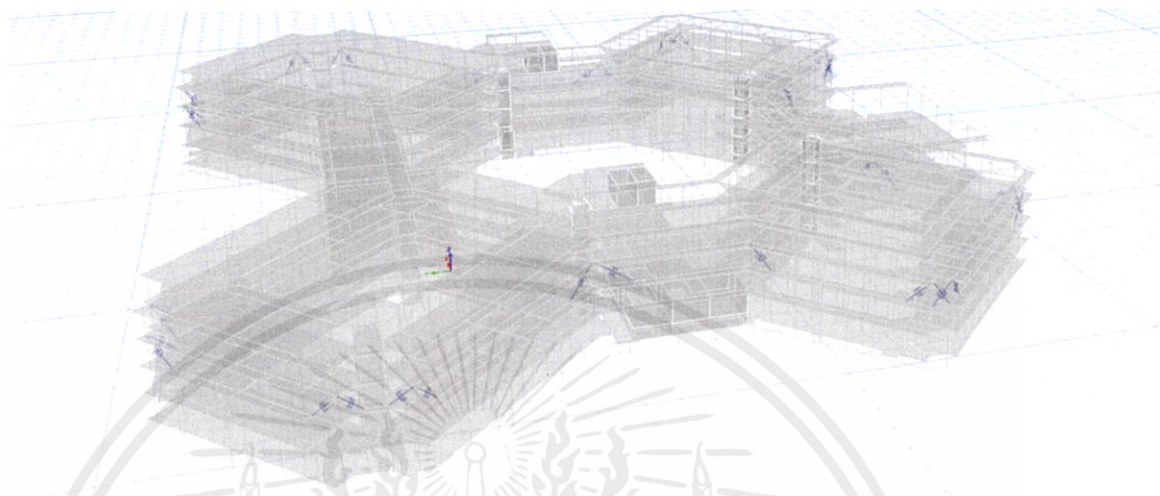
Fix All Clear All

OK Cancel

รูปที่ 3.5-27 การกำหนดข้อมูลของ Viscous Damper

2. กด  ที่ Toolbars ด้านบน แล้วเลือก Gridline ที่เราต้องการเสริม

3. กด  เพื่อวาด Viscous Damper



รูปที่ 3.5-28 ลักษณะของ Viscous Damper ที่ถูกติดตั้ง

4. เมื่อทำการวาด Viscous Damper ครบทุกเสาต้นริมเรียบร้อยแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ตามหัวข้อที่ 3.5.3

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

ผลจากการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารและศึกษาวิธีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้แก่อาคาร โดยวิธีการที่นำมาเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว ประกอบด้วย วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing), วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing), วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Jacketing), วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนง (Bracing) และวิธีสุดท้าย การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper) โดยเสริมกำลังเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารเจ้าคุณทหาร ซึ่งอยู่ในพื้นที่เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เพื่อให้สามารถรับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ของอาคาร

#### 4.1 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing)

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างอาคาร ด้วยการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเฉพาะเสาที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักให้แก่อาคาร ในที่นี้คือ เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม C1.1 C1.2 C3.1 C3.2 และ เสาหน้าตัดวงกลม C5 ซึ่งมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.45x0.45m, 0.40x0.40m, 0.35x0.35m, 0.30x0.30m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสา 0.25 m ตามลำดับ จากการทดสอบได้ทำการพอกโครงสร้างเสาด้วยคอนกรีตด้วยความหนา 5 และ 10 เซนติเมตร ตลอดความสูงเสา

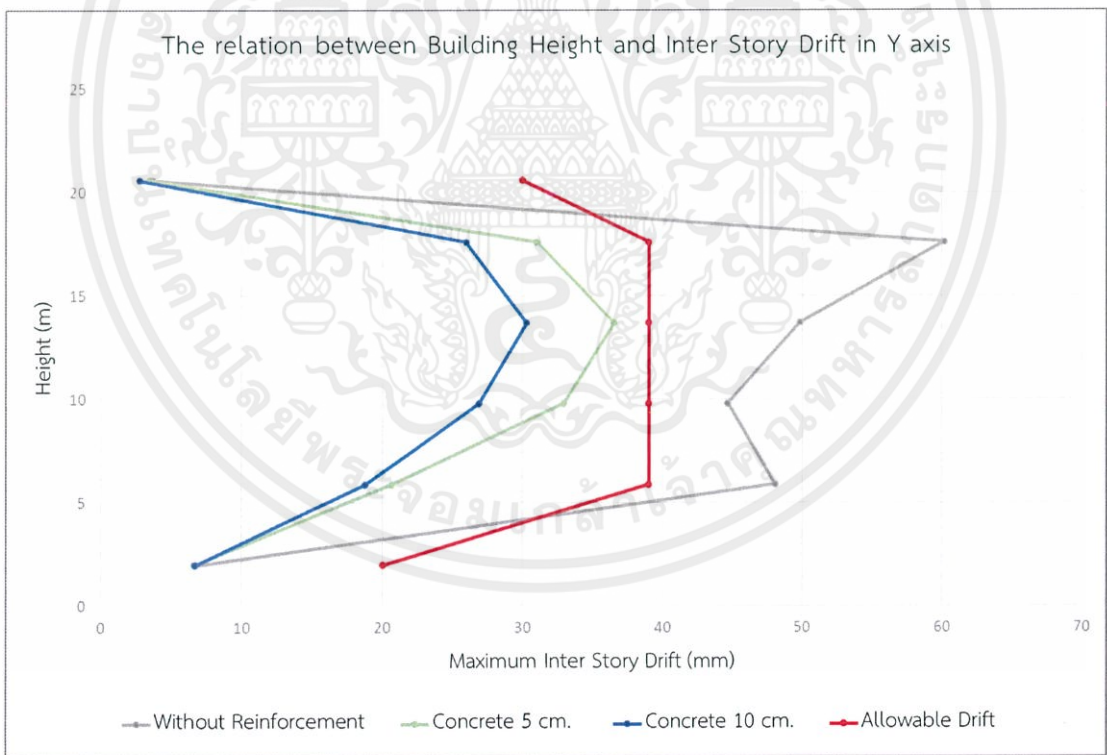
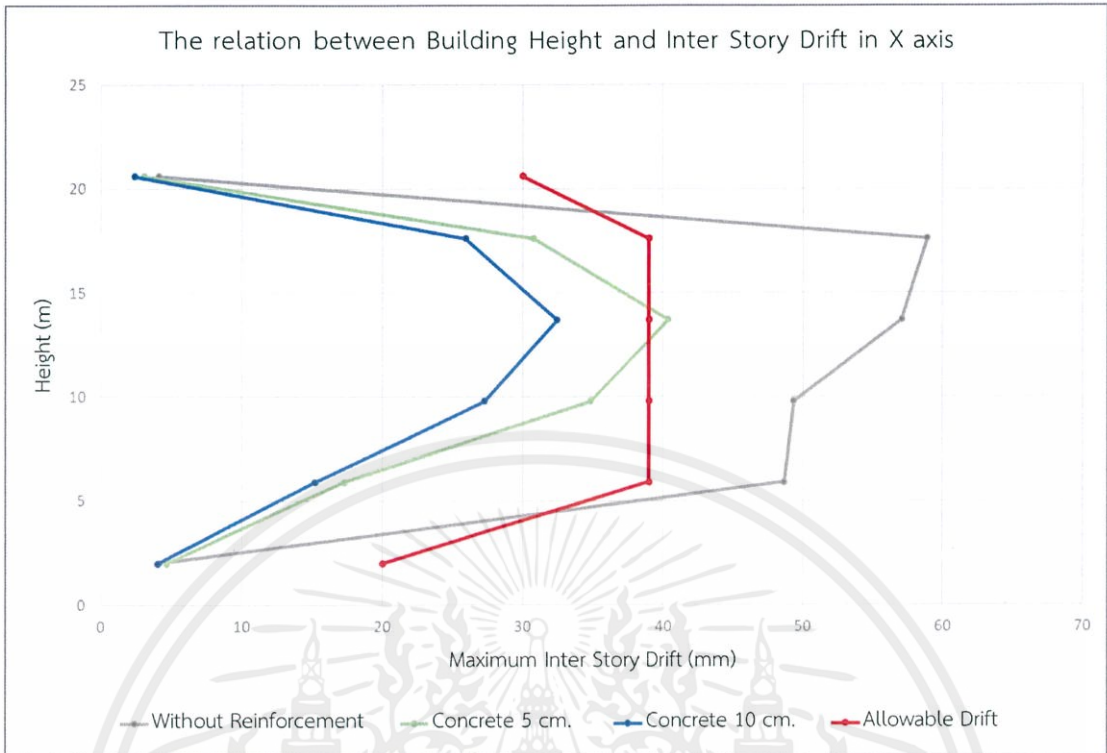
สรุปผลระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ของการเสริมกำลังที่ความหนาต่างๆได้ดังตารางที่ 4.1-1 และรูปที่ 4.1-1 ทำให้ได้ความหนาของการเสริมกำลังด้วยการพอกเสาด้วยคอนกรีตที่เหมาะสมคือ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.1-1 ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแนวแกน X และ แกน Y ของการเสริมกำลังที่ความหนาคอนกรีต 5 และ 10 เซนติเมตร

Direction	Story	Height	Allowable Drift	Without Reinforcement	Concrete	Concrete
				Maximum Design Story Drift	5 cm.	10 cm.
					Maximum Design Story	Maximum Design Story
m	mm	mm	mm	mm		
X	Deck	20.6	30	4.106	3.034	2.365
	Floor5	17.6	39	58.928	30.822	25.926
	Floor4	13.7	39	57.075	40.381	32.454
	Floor3	9.8	39	49.363	34.829	27.299
	Floor2	5.9	39	48.701	17.290	15.267
	Floor1	2	20	4.016	4.640	4.019

Direction	Story	Height	Allowable Drift	Without Reinforcement	Concrete	Concrete
				Maximum Design Story Drift	5 cm.	10 cm.
					Maximum Design Story	Maximum Design Story
m	mm	mm	mm	mm		
Y	Deck	20.6	30	3.677	3.462	2.746
	Floor5	17.6	39	60.170	31.021	25.971
	Floor4	13.7	39	49.834	36.550	30.301
	Floor3	9.8	39	44.707	32.947	26.925
	Floor2	5.9	39	48.077	20.675	18.781
	Floor1	2	20	6.710	6.566	6.653

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตในแนวแกน X และแกน Y

## 4.2 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

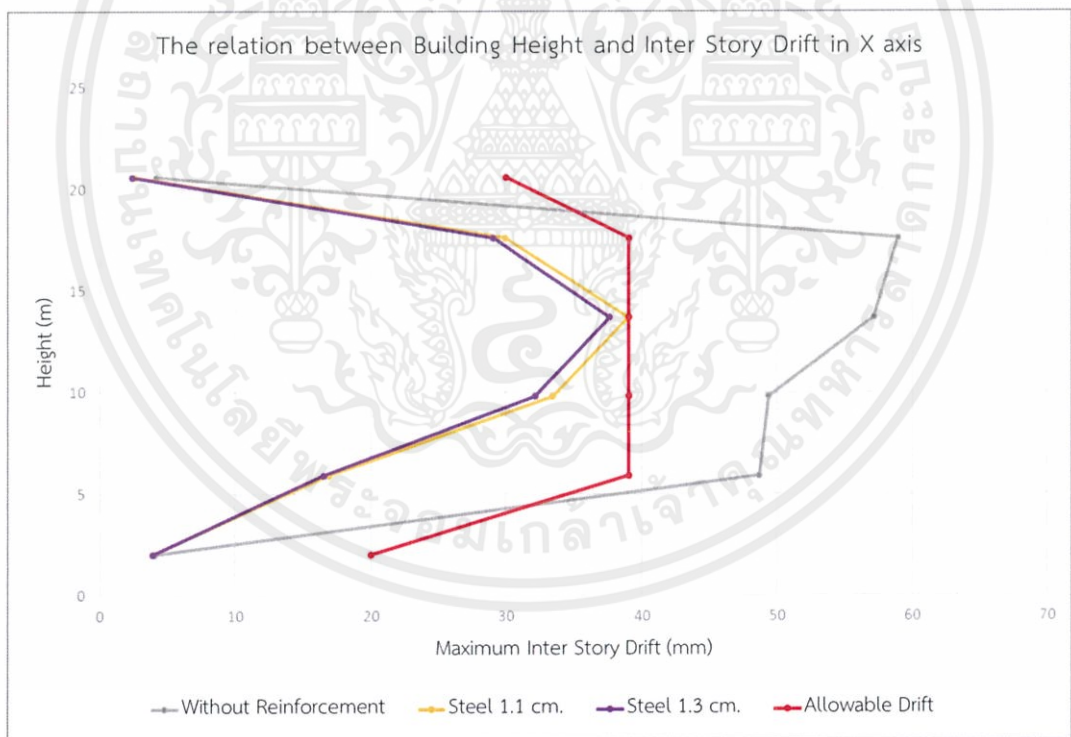
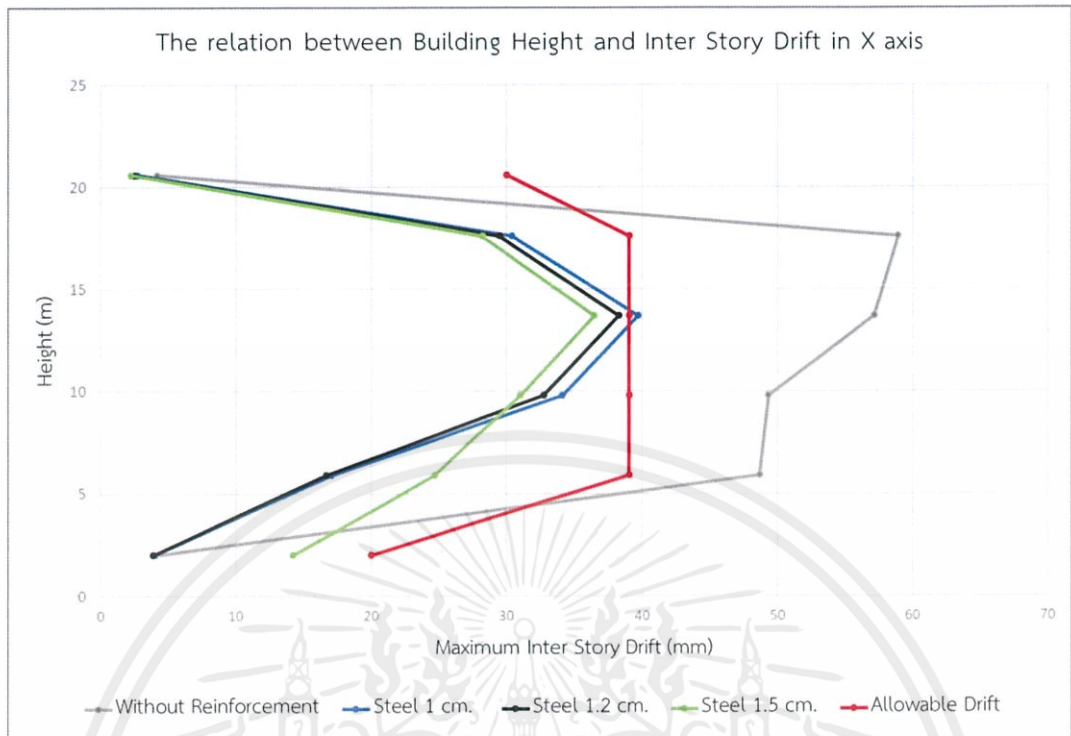
จากการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างอาคาร ด้วยการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กเฉพาะเสาที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักให้แก่อาคาร เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม C1.1 C1.2 C3.1 C3.2 และ เสาหน้าตัดวงกลม C5 ซึ่งมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.45x0.45m, 0.40x0.40m, 0.35x0.35m, 0.30x0.30m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสา 0.25 m ตามลำดับ การทดสอบได้ทำการพอกโครงสร้างเสาด้วยแผ่นเหล็กขนาดความหนา 1.0 1.1 1.2 1.3 และ 1.5 เซนติเมตร ตลอดความสูงเสา

สรุปผลระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ของการเสริมกำลังที่ความหนาต่างๆได้ดังตารางที่ 4.2-1 รูปที่ 4.2-1 และรูปที่ 4.2-2 ทำให้ได้ความหนาของแผ่นเหล็กที่เหมาะสมที่ความหนาเท่ากับ 1.1 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.2-1 ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังที่ความหนาของแผ่นเหล็ก 1.0 1.1 1.2 1.3 และ 1.5 เซนติเมตร

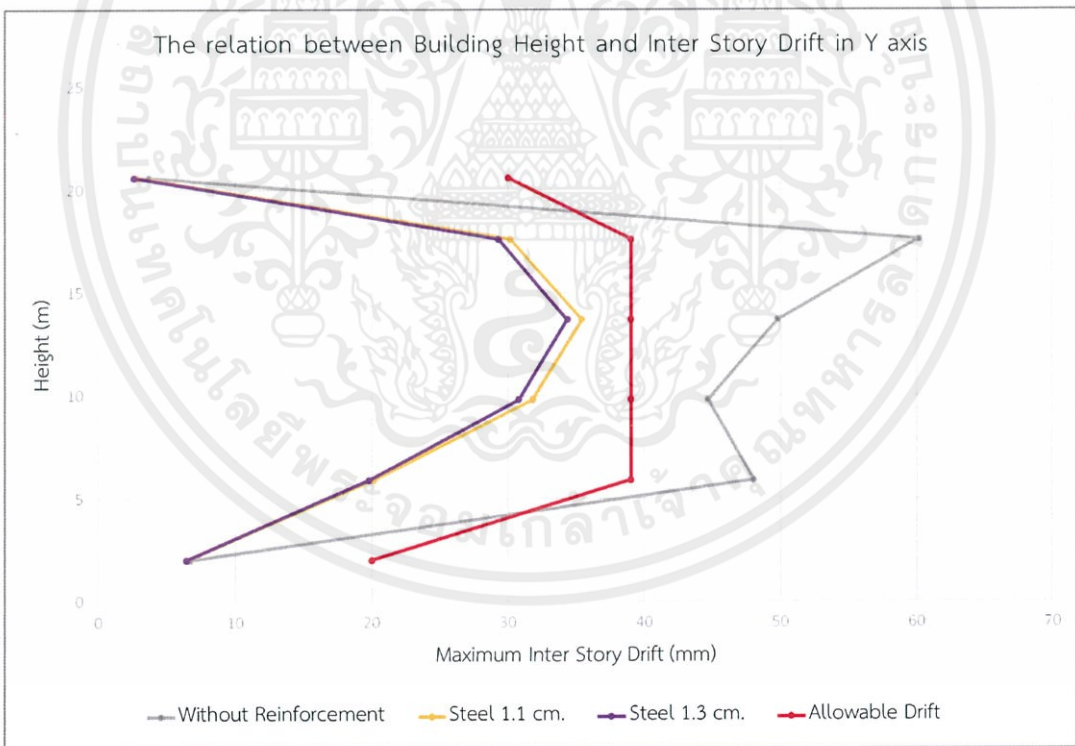
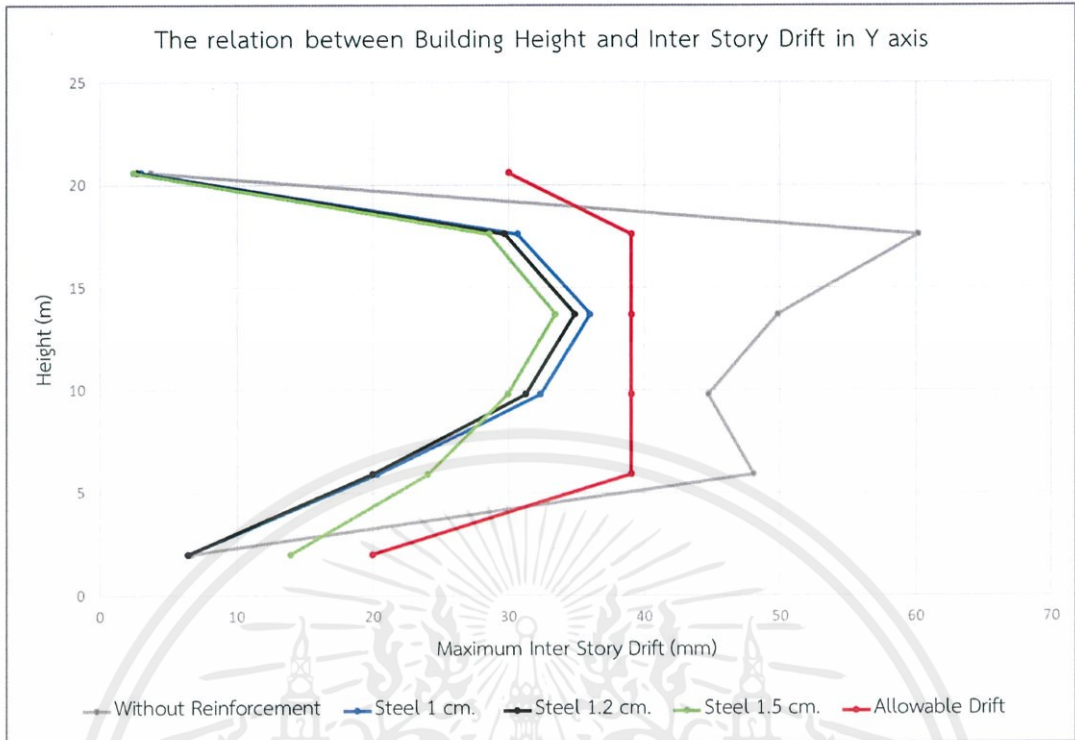
Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Steel 1 cm.	Steel 1.1 cm.	Steel 1.2 cm.	Steel 1.3 cm.	Steel 1.5 cm.
				Maximum Design Story Drift	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story
				mm	mm	mm	mm	mm	mm
X	Deck	20.6	30	4.106	2.666	2.541	2.438	2.349	2.208
	Floor5	17.6	39	58.928	30.445	29.936	29.485	29.072	28.240
	Floor4	13.7	39	57.075	39.677	38.915	38.221	37.584	36.435
	Floor3	9.8	39	49.363	34.106	33.389	32.736	32.134	31.059
	Floor2	5.9	39	48.701	17.053	16.870	16.666	16.512	24.662
	Floor1	2	20	4.016	3.882	3.878	3.875	3.869	14.269

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Steel 1 cm.	Steel 1.1 cm.	Steel 1.2 cm.	Steel 1.3 cm.	Steel 1.5 cm.
				Maximum Design Story Drift	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story
				mm	mm	mm	mm	mm	mm
Y	Deck	20.6	30	3.677	2.966	2.822	2.710	2.605	2.429
	Floor5	17.6	39	60.170	30.694	30.189	29.731	29.315	28.547
	Floor4	13.7	39	49.834	36.013	35.411	34.864	34.365	33.469
	Floor3	9.8	39	44.707	32.387	31.814	31.290	30.810	29.958
	Floor2	5.9	39	48.077	20.330	20.144	19.971	19.814	24.051
	Floor1	2	20	6.710	6.458	6.448	6.445	6.435	13.981



รูปที่ 4.2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กในแนวแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็กในแนวแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Jacketing)

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างอาคาร ด้วยการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใยเฉพาะเสาที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักให้แก่อาคาร เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม C1.1 C1.2 C3.1 C3.2 และ เสาหน้าตัดวงกลม C5 ซึ่งมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.45x0.45m, 0.40x0.40m, 0.35x0.35m, 0.30x0.30m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสา 0.25 m การทดสอบได้ทำการพอกโครงสร้างเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยขนาดความหนา 0.333 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 20 30 และ 40 รอบตลอดความสูงเสา

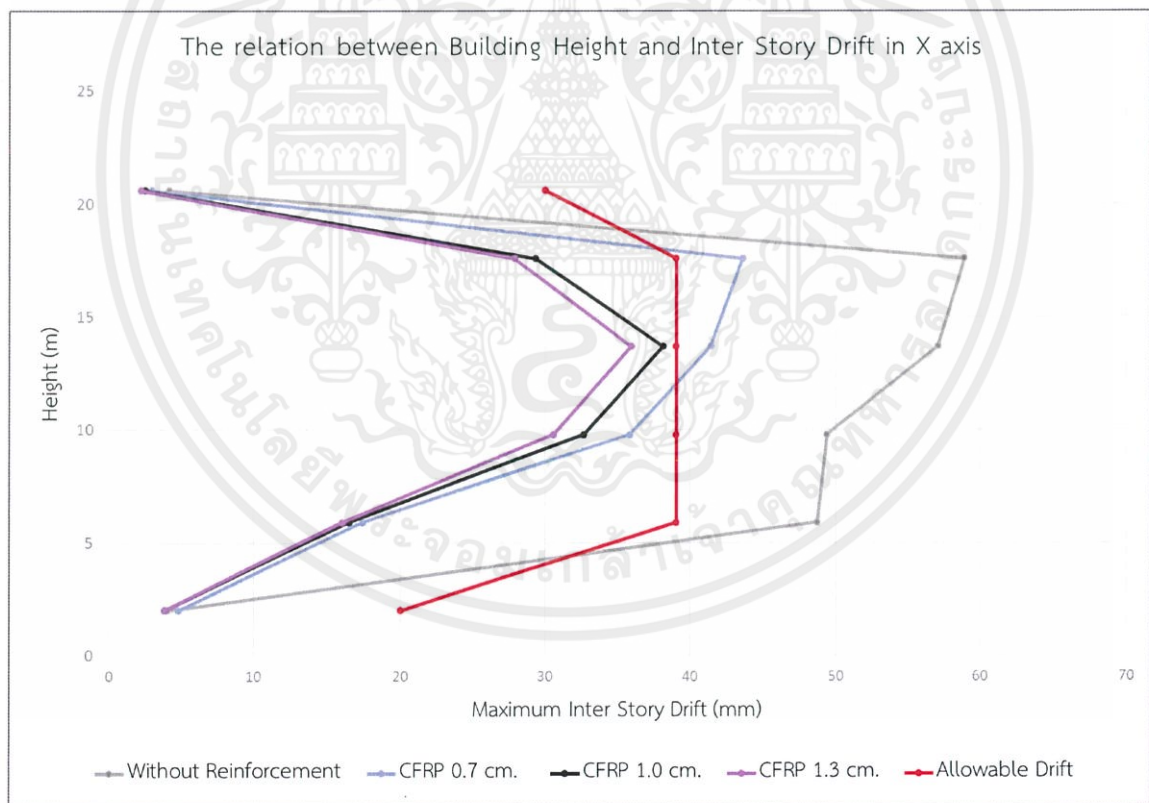
สรุปผลระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ของการเสริมกำลังที่ความหนาต่างๆได้ดังตารางที่ 4.3-1 และรูปที่ 4.3-1 ทำให้ได้ความหนาของแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เหมาะสมที่ความหนาเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.3-1 ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without	CFRP	CFRP	CFRP
				Reinforcement	0.7 cm.	1.0 cm.	1.3 cm.
				Maximum Design Story Drift mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm
X	Deck	20.6	30	4.106	2.925	2.448	2.160
	Floor5	17.6	39	58.928	43.661	29.354	27.917
	Floor4	13.7	39	57.075	41.450	38.083	35.862
	Floor3	9.8	39	49.363	35.763	32.637	30.554
	Floor2	5.9	39	48.701	17.370	16.467	16.003
	Floor1	2	20	4.016	4.768	3.808	3.786

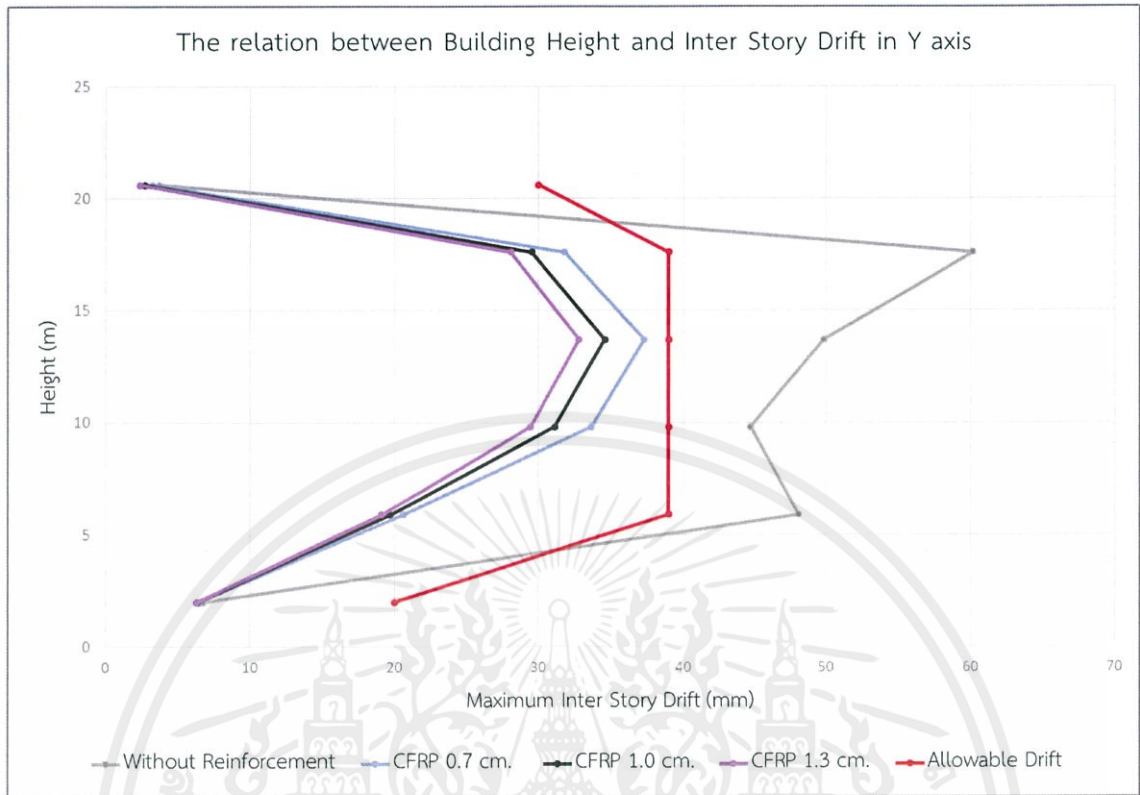
ตารางที่ 4.3-1 ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ต่อ)

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	CFRP 0.7 cm.	CFRP 1.0 cm.	CFRP 1.3 cm.
				Maximum Design Story Drift mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm
				mm	mm	mm	mm
Y	Deck	20.6	30	3.677	3.245	2.736	2.416
	Floor5	17.6	39	60.170	31.818	29.530	28.054
	Floor4	13.7	39	49.834	37.299	34.611	32.822
	Floor3	9.8	39	44.707	33.670	31.139	29.453
	Floor2	5.9	39	48.077	20.608	19.738	19.133
	Floor1	2	20	6.710	6.397	6.330	6.285



รูปที่ 4.3-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแนวแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการพอกเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแนวแกน Y

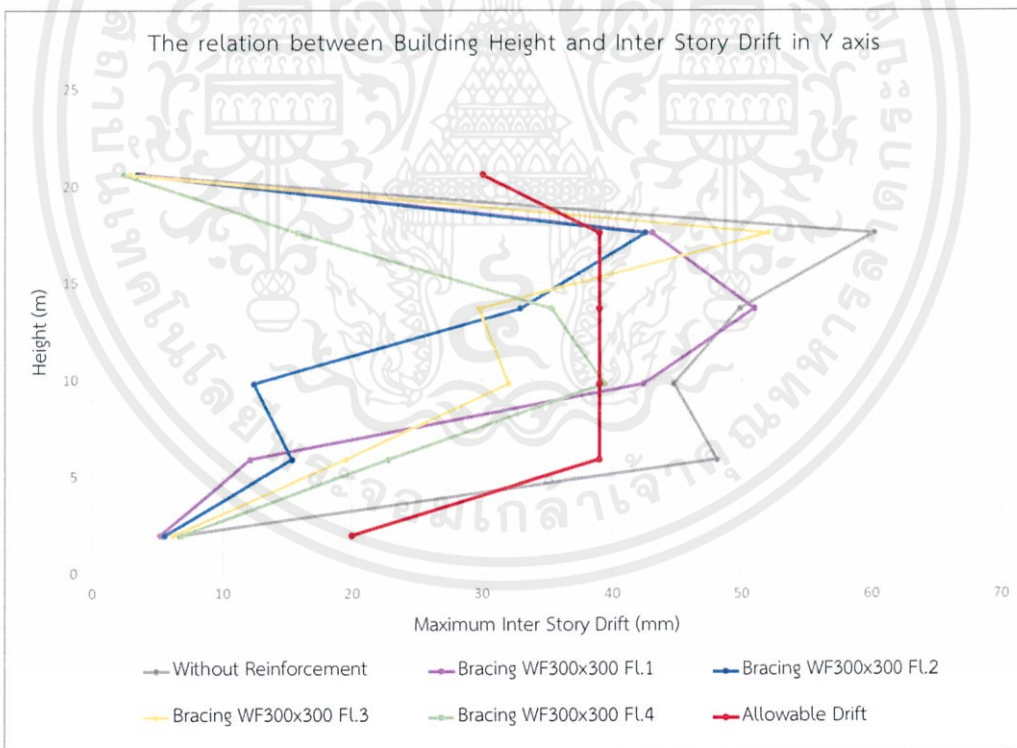
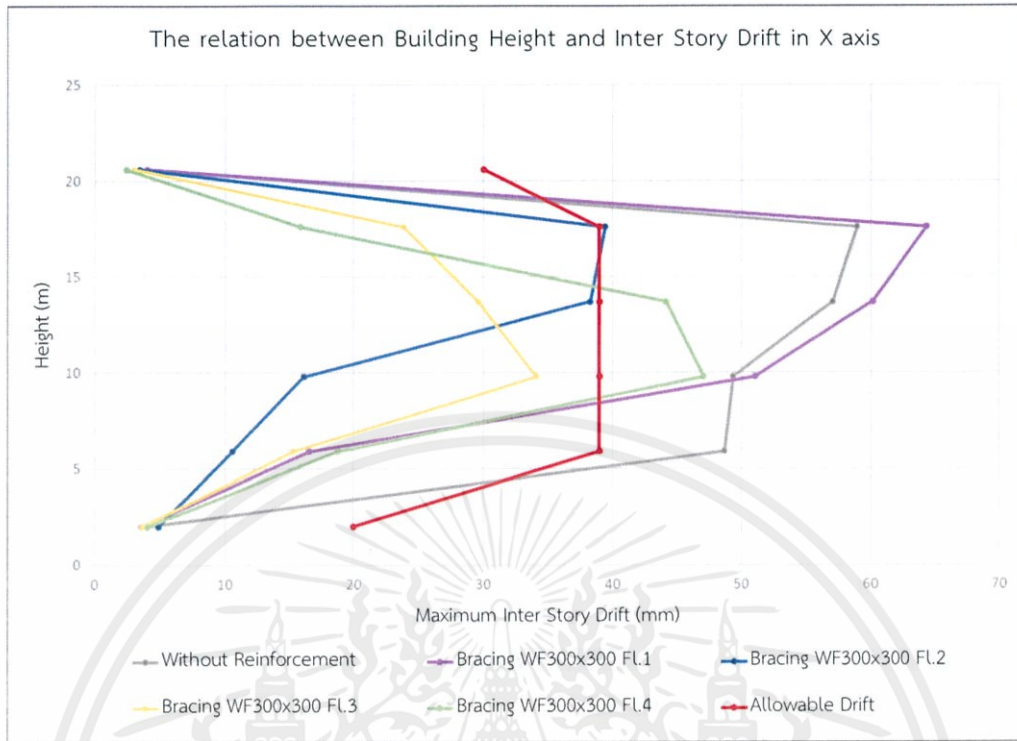
#### 4.4 การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงต้านข้างโดยใช้โครงแกนง (Bracing)

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างอาคาร ด้วยการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงต้านข้างโดยใช้โครงแกนง โดยเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังที่ตำแหน่งรอบขอบอาคารด้านในของชั้นอาคารที่ 1,2,3 และ4 โดยโครงแกนงที่ใช้เสริมกำลังคือเหล็ก Wide Flange ขนาด WF 300x300 ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4-1

ตารางที่ 4.4-1 ระยะเวลาเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยโครงแกนงด้วยขนาดเหล็ก Wide Flange ขนาด WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 1,2,3 และ 4

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Bracing WF300x300 FL.1	Bracing WF300x300 FL.2	Bracing WF300x300 FL.3	Bracing WF300x300 FL.4
				Maximum Design Story Drift mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm
				X	Deck	20.6	30	4.106
	Floor5	17.6	39	58.928	64.339	39.440	23.856	15.926
	Floor4	13.7	39	57.075	60.138	38.304	29.574	44.125
	Floor3	9.8	39	49.363	51.098	16.170	34.134	47.050
	Floor2	5.9	39	48.701	16.589	10.541	15.331	18.720
	Floor1	2	20	4.016	3.610	4.896	3.654	4.077

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Bracing WF300x300 FL.1	Bracing WF300x300 FL.2	Bracing WF300x300 FL.3	Bracing WF300x300 FL.4
				Maximum Design Story Drift mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm
				Y	Deck	20.6	30	3.677
	Floor5	17.6	39	60.170	43.037	42.509	52.058	15.798
	Floor4	13.7	39	49.834	50.960	32.954	29.709	35.357
	Floor3	9.8	39	44.707	42.416	12.397	32.016	39.402
	Floor2	5.9	39	48.077	12.163	15.398	19.546	22.816
	Floor1	2	20	6.710	5.203	5.542	6.208	6.861



รูปที่ 4.4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน WF 300x300 ในแนวแกน X และแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบจากตารางที่ 4.4-1 และรูปที่ 4.4-1 สรุปได้ว่าการเสริมโครงแกนด้วยเหล็ก WF 300x300 มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ชั้น 2 แต่ยังคงเกิดการเคลื่อนตัวของอาคารเล็กน้อย จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเพิ่มขนาดเหล็กเป็น WF 400x400 และทำการเสริมโครงแกนที่ชั้นอาคาร 2 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้เหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร

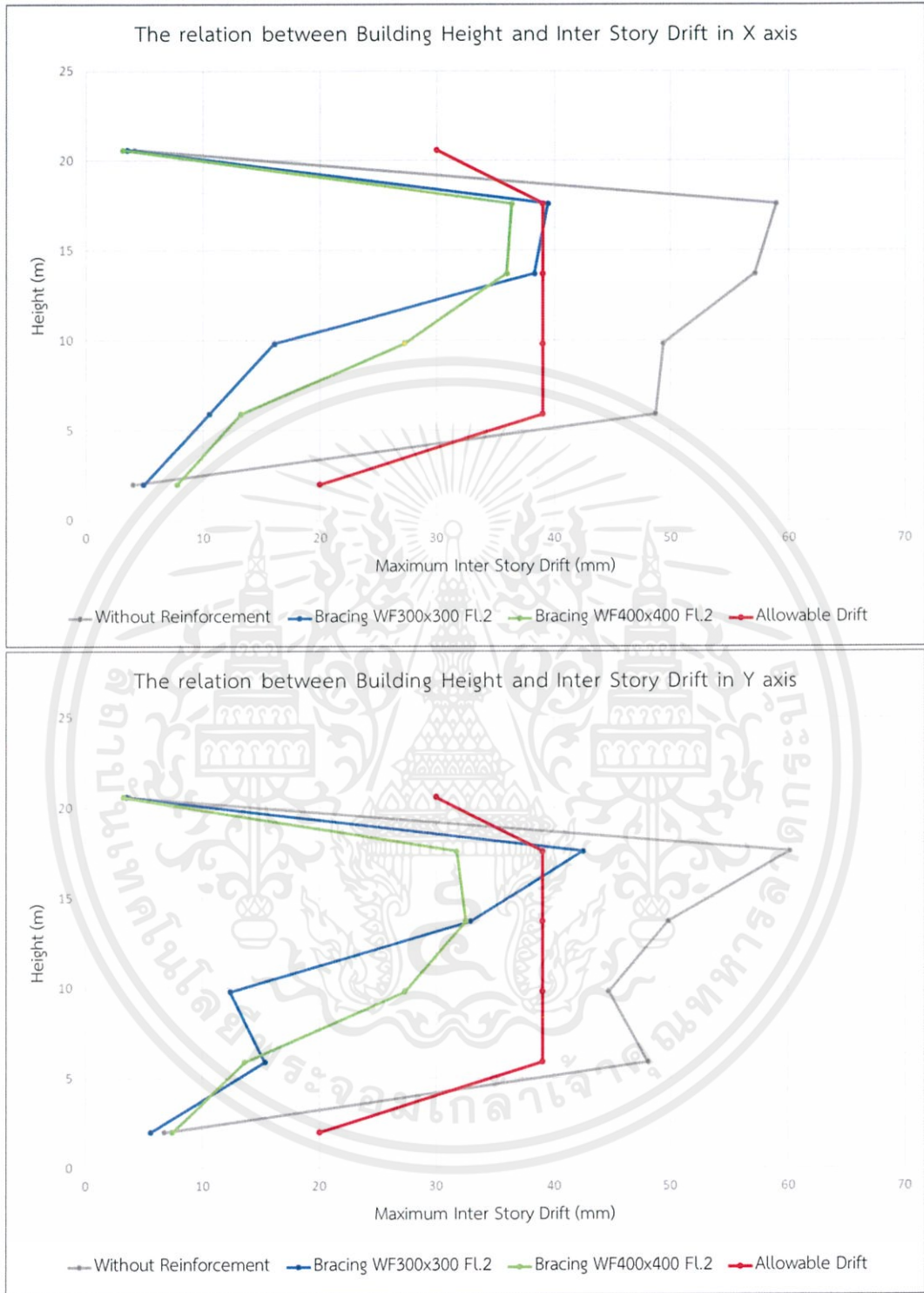
จากตารางที่ 4.4-2 และ รูปที่ 4.4-2 สรุปได้ว่า การเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด คือการเสริมกำลังที่ชั้นอาคาร 2 โดยใช้โครงแกนเป็นเหล็ก Wide Flange ขนาด WF 400x400

ตารางที่ 4.4-2 ระยะเวลาการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และ Y ของการเสริมกำลังด้วยโครงแกนด้วยขนาดเหล็ก Wide Flange ขนาด WF 300x300 และ WF 400x400 ที่ชั้นอาคาร 2

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Bracing WF300x300 FL.2	Bracing WF400x400 FL.2
				Maximum Design Story Drift mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm
				X	Deck	20.6
	Floor5	17.6	39	58.928	39.440	36.397
	Floor4	13.7	39	57.075	38.304	35.984
	Floor3	9.8	39	49.363	16.170	27.251
	Floor2	5.9	39	48.701	10.541	13.277
	Floor1	2	20	4.016	4.896	7.754

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Bracing WF300x300 FL.2	Bracing WF400x400 FL.2
				Maximum Design Story Drift mm	Maximum Design Story mm	Maximum Design Story mm
				Y	Deck	20.6
	Floor5	17.6	39	60.170	42.509	31.760
	Floor4	13.7	39	49.834	32.954	32.550
	Floor3	9.8	39	44.707	12.397	27.315
	Floor2	5.9	39	48.077	15.398	13.664
	Floor1	2	20	6.710	5.542	7.411

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน WF 300x300 และ WF 400x400 ที่ชั้นอาคาร 2 ในแนวแกน X และ แกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper)

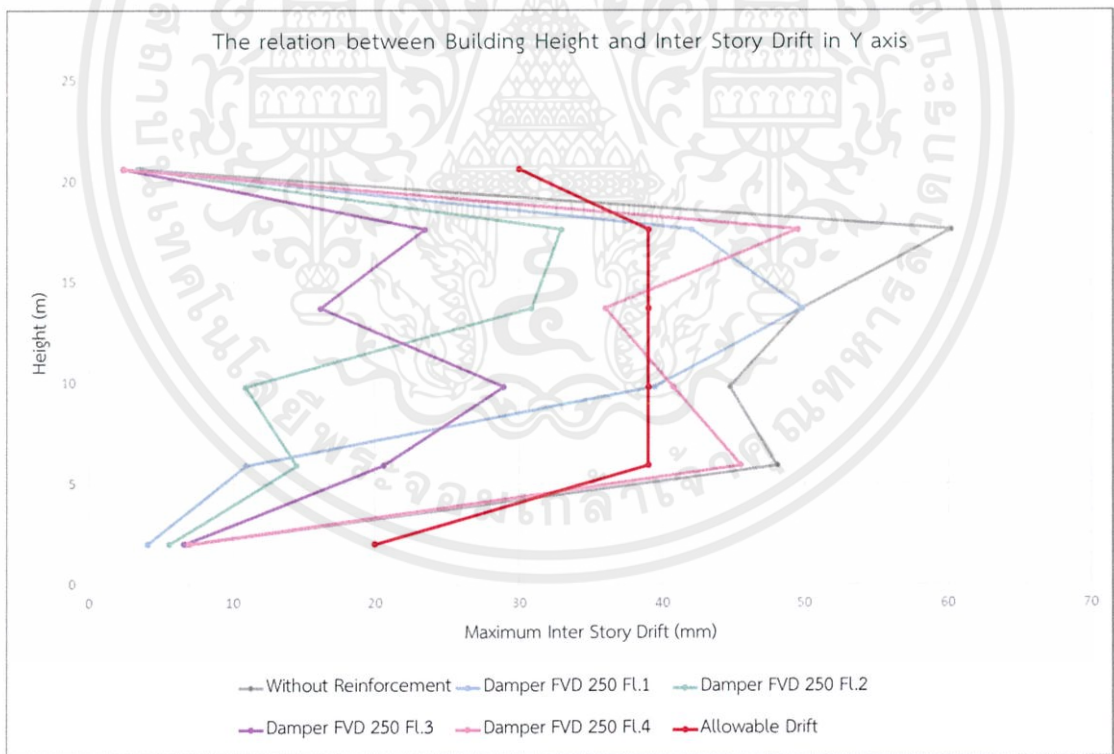
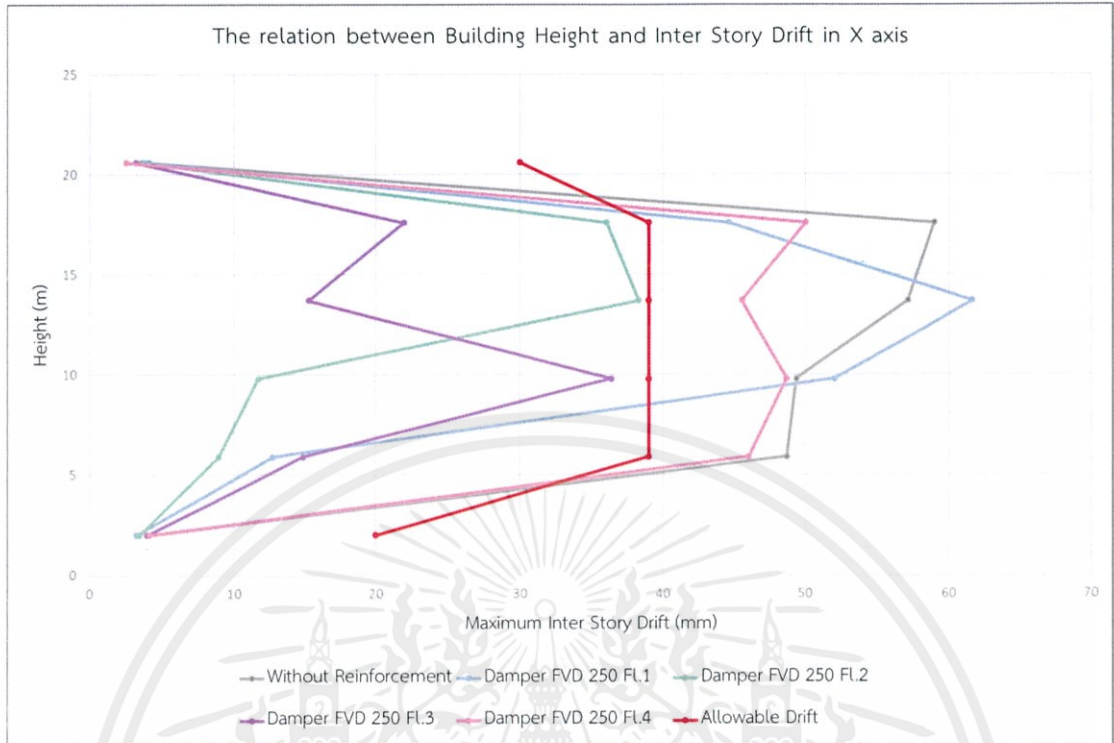
จากการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างอาคาร ด้วยการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน ในที่นี้ใช้อุปกรณ์สลายพลังงานประเภท Viscous Damper ขนาด FVD 250 ซึ่งทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ตำแหน่งเสาต้นมุมของอาคาร โดยรอบตลอดความสูงของอาคาร ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) จากการเสริมกำลังแสดงดังตาราง

สรุปผลระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ของการเสริมกำลังที่ชั้นอาคารต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.5-1 และรูปที่ 4.5-1 ทำให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง Viscous Damper คือ การติดตั้งที่เสาต้นมุมของอาคารชั้น 3

ตารางที่ 4.5-1 ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) ในแกน X และแกน Y ของการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 1,2,3 และ 4

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Damper	Damper	Damper	Damper
				Maximum Design Story Drift	FVD 250 FL1	FVD 250 FL2	FVD 250 FL3	FVD 250 FL4
				mm	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story
X	Deck	20.6	30	4.106	3.866	3.594	3.216	2.557
	Floor5	17.6	39	58.928	44.582	36.067	21.926	50.000
	Floor4	13.7	39	57.075	61.654	38.272	15.290	45.510
	Floor3	9.8	39	49.363	52.016	11.706	36.403	48.672
	Floor2	5.9	39	48.701	12.755	8.947	14.886	46.022
	Floor1	2	20	4.016	3.261	3.453	3.974	4.163

Direction	Story	Height m	Allowable Drift mm	Without Reinforcement	Damper	Damper	Damper	Damper
				Maximum Design Story Drift	FVD 250 FL1	FVD 250 FL2	FVD 250 FL3	FVD 250 FL4
				mm	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story	Maximum Design Story
Y	Deck	20.6	30	3.677	3.552	3.360	2.410	2.461
	Floor5	17.6	39	60.170	42.045	32.982	23.443	49.507
	Floor4	13.7	39	49.834	49.821	30.890	16.179	36.035
	Floor3	9.8	39	44.707	39.456	10.867	28.941	40.736
	Floor2	5.9	39	48.077	10.909	14.506	20.579	45.498
	Floor1	2	20	6.710	4.064	5.571	6.605	6.950



รูปที่ 4.5-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานในแนวแกน X และแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาโครงสร้างอาคารและวิธีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเจ้าคุณทหาร เมื่อโครงสร้างรับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง ผลคืออาคารเกิดการเคลื่อนตัวเกินค่ามาตรฐานที่กรมโยธาธิการและผังเมืองกำหนด จึงจำเป็นต้องมีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารเพิ่มเติม ประกอบไปด้วย 5 วิธีการ คือ วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing), วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing), วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Jacketing), วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนง (Bracing) และวิธีสุดท้าย การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper) เมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (inter-story drift) ให้ผ่านเกณฑ์ของมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง และนำมาเปรียบเทียบผลการศึกษาของแต่ละวิธี ทำให้สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

##### 5.1.1 การคงรูปลักษณะอาคารเดิม

##### 5.1.1.1 วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต, แผ่นเหล็ก และแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย

จากการศึกษาวิธีเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิม พบว่าเป็นการติดตั้งโครงสร้างภายในอาคาร ไม่ส่งผลกระทบต่อและยังคงรูปลักษณะของอาคารเดิม เพียงแต่ขนาดหน้าตัดเสา มีความหนาขึ้นเล็กน้อยตามความหนาของคอนกรีต, แผ่นเหล็ก และแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้าง

##### 5.1.1.2 วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนง

จากการศึกษาวิธีเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกงแนง พบว่าเป็นการติดตั้งกับโครงสร้างภายนอกอาคาร ทำให้รูปลักษณะอาคารเมื่อมองจากภายนอกเปลี่ยนไป และอาจบดบังทัศนียภาพเดิมของชั้นอาคารที่ทำการติดตั้งโครงแกงแนง

### 5.1.1.3 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน

จากการศึกษาวิธีเสริมกำลังด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน พบว่าเป็นการติดตั้งโครงสร้างภายนอกอาคารเช่นกันเดียวกันกับวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนแข็ง เพียงแต่วิธีนี้เป็นการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานบริเวณด้านมุมของอาคารทุกชั้นความสูง นั่นคือทำให้รูปลักษณะของอาคารเมื่อมองจากภายนอกเปลี่ยนไป และอาจบดบังทัศนียภาพเดิมของห้องมุมอาคาร ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงาน

จึงสรุปได้ว่าวิธีเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต, แผ่นเหล็ก และพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับอาคารหากต้องการคงรูปลักษณะภายนอก

### 5.1.2 ด้านเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 5.1-1 ตารางการเปรียบเทียบราคาของวิธีเสริมกำลังแต่ละวิธี

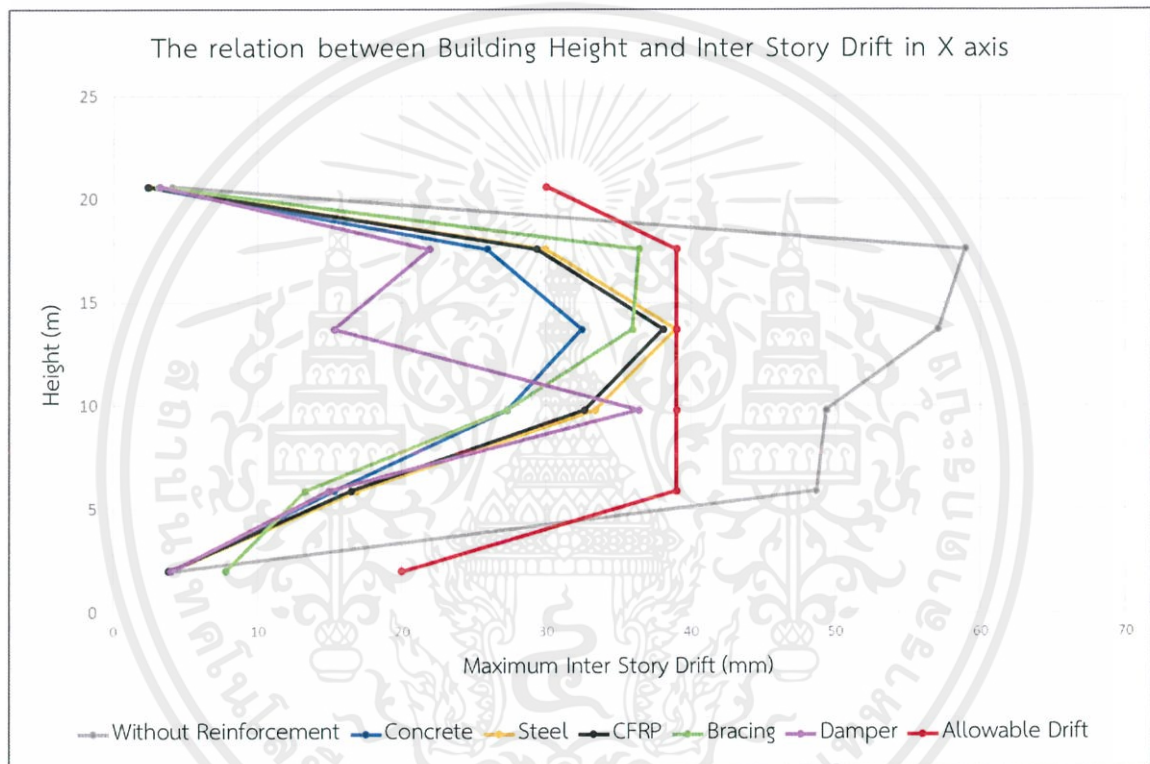
วิธีการเสริมกำลัง	จำนวนหน่วย	หน่วย	ราคา/หน่วย	หน่วย	ราคารวม (บาท)
การพอก โครงสร้างเสา เดิมด้วยวัสดุ	คอนกรีตเสริม เหล็ก	567.37	ลูกบาศก์เมตร	3,000.00 บาท/ลูกบาศก์เมตร	1,702,118.48
	เหล็กแผ่น	2,615.57	ตารางเมตร	2,051.17 บาท/ตารางเมตร	5,364,992.51
	แผ่นโพลีเมอร์ เสริมเส้นใย	2,255.92	ตารางเมตร	16,500.00 บาท/ตารางเมตร	37,222,689.37
โครงแกนแข็ง (WF 400x400)	496.25	เมตร	25,839.22	บาท/6เมตร	2,137,129.16
Viscous Damper (FVD250)	43.00	ตัว	252,148.25	บาท/ตัว	10,842,374.75

หมายเหตุ ความหนาของแผ่นโพลีเมอร์หนา 0.33 mm จึงทำการพันรอบเสา 30 รอบ เพื่อให้ได้ความหนา 1 cm ตามการวิเคราะห์โครงสร้าง

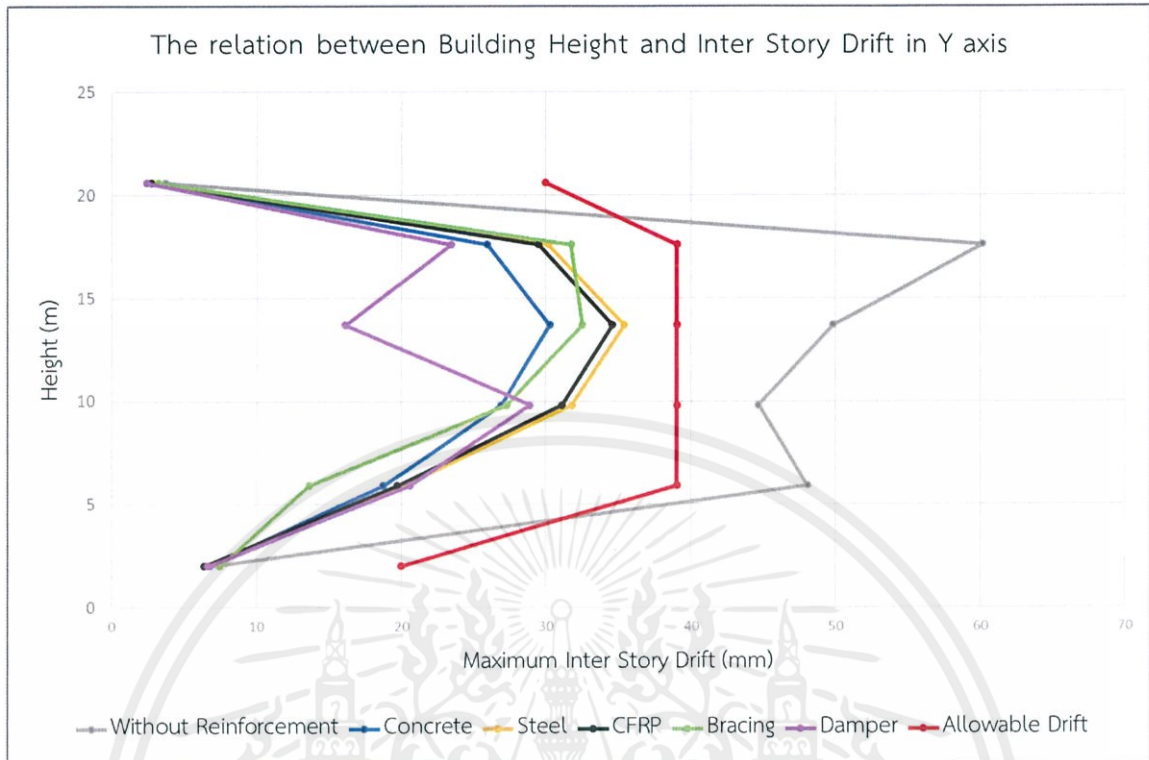
จากตารางที่ 5.1-1 พบว่าจำนวนเงินที่ต้องการใช้สำหรับเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารเจ้าคุณทหารน้อยที่สุดคือวิธีการพอกโครงสร้างเสาเดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และมากที่สุดคือวิธีเสริมกำลังด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน ดังนั้น วิธีการพอกโครงสร้างเสาเดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นวิธีการที่สมเหตุสมผลในด้านของเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

### 5.1.3 การลดลงของระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารเจ้าคุณทหาร ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (inter-story drift) ขององค์อาคารก่อนและหลังการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีต่างๆที่นำมาศึกษา สามารถสรุปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชั้นความสูงและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้รูปที่ 5.1-1 และ 5.1-2



รูปที่ 5.1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแกน X ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการต่างๆ



รูปที่ 5.1-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแกน Y ของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการต่างๆ

จากรูปที่ 5.1-1 และ 5.1-2 สามารถสรุปได้ว่าวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนด้วย damper และวิธีการพอกโครงสร้างเสาสามารถลดค่าระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารได้มากพอๆ แต่เมื่อเทียบในแกน Y แล้ว วิธีการเสริมกำลังด้วย damper มีประสิทธิภาพในการลดค่าระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารมากที่สุด

#### 5.1.4 ด้านการติดตั้งและซ่อมบำรุง

##### 5.1.4.1 วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต, แผ่นเหล็ก และแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย

จากการศึกษาพบว่า วิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต, แผ่นเหล็ก และโพลีเมอร์เสริมเส้นใย มีการติดตั้งที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ช่วงก่อสร้างทั่วไปคุ้นเคยวิธีนี้ดีและวัสดุที่ใช้สามารถหาได้ง่าย แต่วิธีนี้เป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับชิ้นส่วนเสาและมีการรบกวนโครงสร้างเดิมค่อนข้างมาก โดยมีน้ำหนักของวัสดุคอนกรีตเท่ากับ 1361.69 ตัน (2.4 ตัน/ลูกบาศก์เมตร) น้ำหนักของแผ่นเหล็กเท่ากับ 233.37 ตัน (89.22 กิโลกรัม/ตารางเมตร) และน้ำหนักของแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยเท่ากับ 40.61 ตัน (0.6 กิโลกรัม/ตารางเมตร)

##### 5.1.4.2 วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน

จากการศึกษาพบว่า วิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกน มีข้อจำกัดในการติดตั้งคือ น้ำหนักของเหล็ก Wide Flange ที่ค่อนข้างมาก ซึ่งเท่ากับ 115.13 ตัน (232 กิโลกรัม/เมตร) ทำให้การขนส่งและการติดตั้งค่อนข้างลำบาก รวมถึงการเชื่อมเหล็กเข้ากับโครงสร้างอาคารเดิมที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กต้องใช้ความชำนาญการในการดำเนินการ

##### 5.1.4.3 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน

จากการศึกษาพบว่า วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน เป็นวิธีการเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่ยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย เนื่องจากยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย จึงทำให้มีผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ประเภทนี้ค่อนข้างน้อย ทำให้การติดตั้งและการซ่อมบำรุงเป็นไปได้ยากกว่าวิธีอื่นๆ และมีน้ำหนักของอุปกรณ์โดยประมาณเท่ากับ 3.44 ตัน (80 กิโลกรัม/ตัว)

จึงสรุปได้ว่าวิธีเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต, แผ่นเหล็ก และโพลีเมอร์เสริมเส้นใยเป็นวิธีที่ดีที่สุดในด้านของการติดตั้งและการซ่อมบำรุง เนื่องจากขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน และสามารถหาช่างก่อสร้างที่มีความชำนาญการได้ไม่ยาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลของการเสริมกำลังในวิธีต่างๆของงานวิจัยนี้ ไม่สามารถนำไปอ้างอิงเพื่อใช้สำหรับอาคารอื่นที่ไม่ใช่อาคารที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งในที่นี้คืออาคารเจ้าคุณทหาร เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างมีความแตกต่างกัน

5.2.2 สำหรับงานวิจัยนี้ ไม่ได้คำนึงถึงวิธีการติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง ซึ่งรวมถึงการออกแบบรายละเอียดจุดต่อ เหล็กเสริมภายในคอนกรีตสำหรับวิธีการพอกเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และการเชื่อมประสานวัสดุระหว่างโครงสร้างเดิมกับโครงสร้างที่เสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว อนึ่ง สามารถศึกษามาตรฐานการติดตั้งวัสดุได้จากกรมโยธาธิการและผังเมือง หรือข้อมูลจากผู้ผลิตวัสดุนั้นๆประกอบ

5.2.3 ราคาของวัสดุอาจมีการปรับเปลี่ยน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาวะทางเศรษฐกิจในขณะนั้น หรืออาจขึ้นกับผู้จัดจำหน่ายวัสดุ ทั้งนี้ ควรศึกษาราคาของวัสดุเสริมกำลังก่อนทำการตัดสินใจเลือกใช้วิธีเสริมกำลังแบบใดแบบหนึ่ง

## บรรณานุกรม

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร. (2552). มยผ.1302 มาตรฐานการ ออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรุงเทพมหานคร: กรมโยธาธิการ และผังเมือง.
- [2] กรมโยธาธิการและผังเมือง สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร. (2557). มยผ.1303-57 มาตรฐาน การประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับ แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรุงเทพมหานคร: กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [3] ฐานทัศน์ อนันตริย, กุลธณภูมิ ศังขะศิลป์ และพิชาเชษฐ์ พันธุ์พรหมา. (2561). การศึกษาและ เปรียบเทียบการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารสูง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม ศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- [4] Dharmesh Chandnani, Riddhi Joshi, Kumarpal Trivedi. (2016). Characteristics & Applications of Different Types of Dampers as Seismic Energy Dissipater. (Civil Engineering Department, A D Patel Institute of Technology, New Vallabh Vidyanagar, Gujarat, India).
- [5] Shaik Qamaruddin. (2017). Seismic Response Study of Multi-Storied Reinforced Concrete Building with Fluid Viscous Dampers. (M.E Structural Engineering, Chaitanya Bharathi Institute of Technology).
- [6] Mohammed Hyderuddin, Md Mubassir, Imran Syed Mohsin. (2016). Retrofitting of Reinforced Concrete Frames using Steel Bracing. (Department of Structural Engineering, Lords Institute of Engineering and Technology Hyderabad, Telangana, India).

## บรรณานุกรม

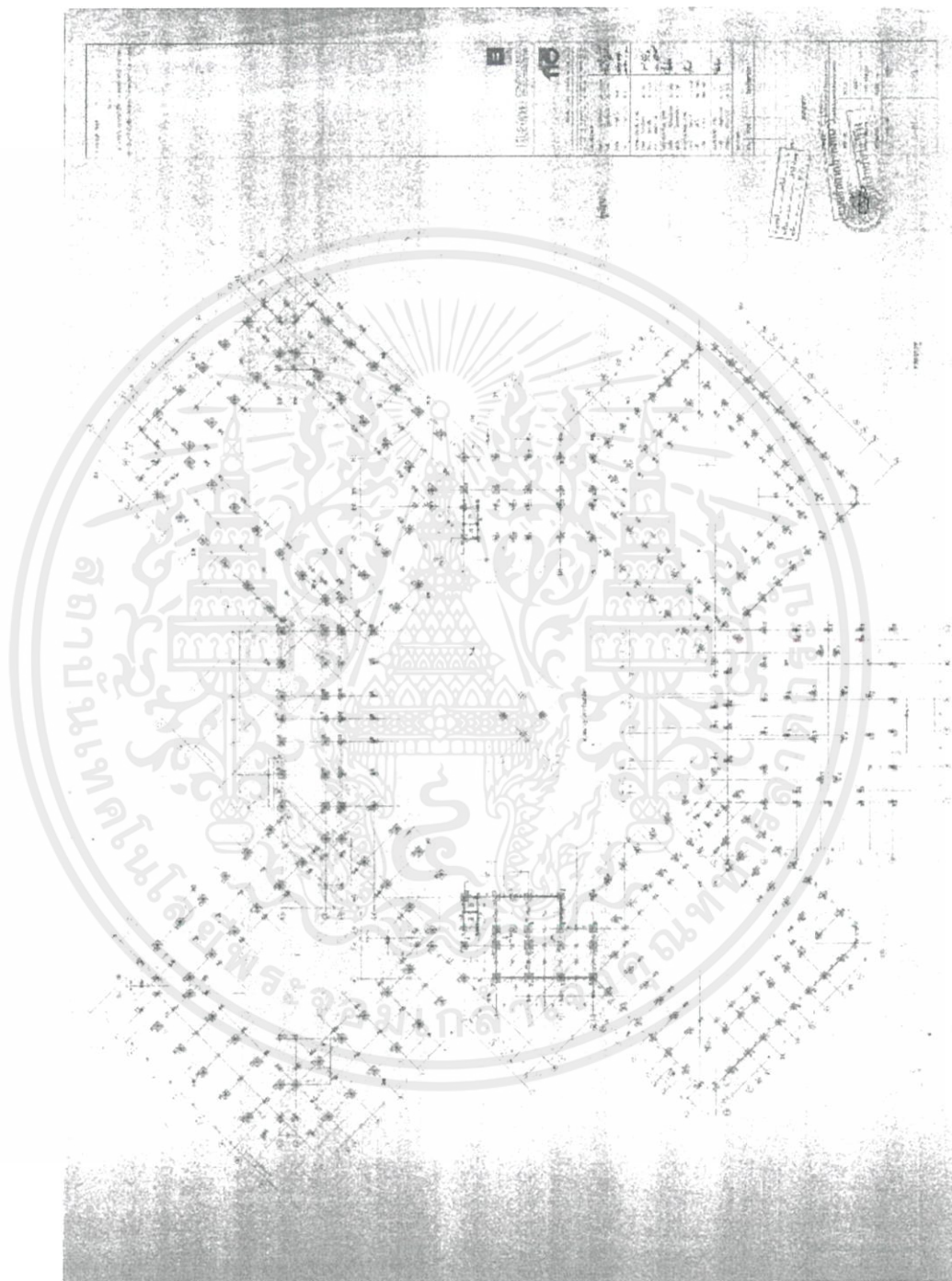
- [7] Mohamed Husain, Hilal Hassan, Mahmoud Abd Elhamid and Eman Said Elgharbawy. (2017). *Seismic Evaluation and Strengthening of RC Frames with FRP Composites*. (Structural Engineering, Faculty of Engineering, Zagazig University, Egypt).
- [8] บริษัท วันสต็อกโฮม จำกัด. (2562, มกราคม 2). ราคาเหล็ก H-BEAM มอก. 1227-2536. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.onestockhome.com/th/steel/h-beam/>
- [9] บริษัท วันสต็อกโฮม จำกัด. ราคาเหล็กแผ่นดำ. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.onestockhome.com/th/products/>
- [10] บริษัท เชียงไฮ้ออสคอนสตรัคชั่น จำกัด. คาร์บอนไฟเบอร์เสริมแรงพอลิเมอร์. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://thai.alibaba.com/product-detail/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

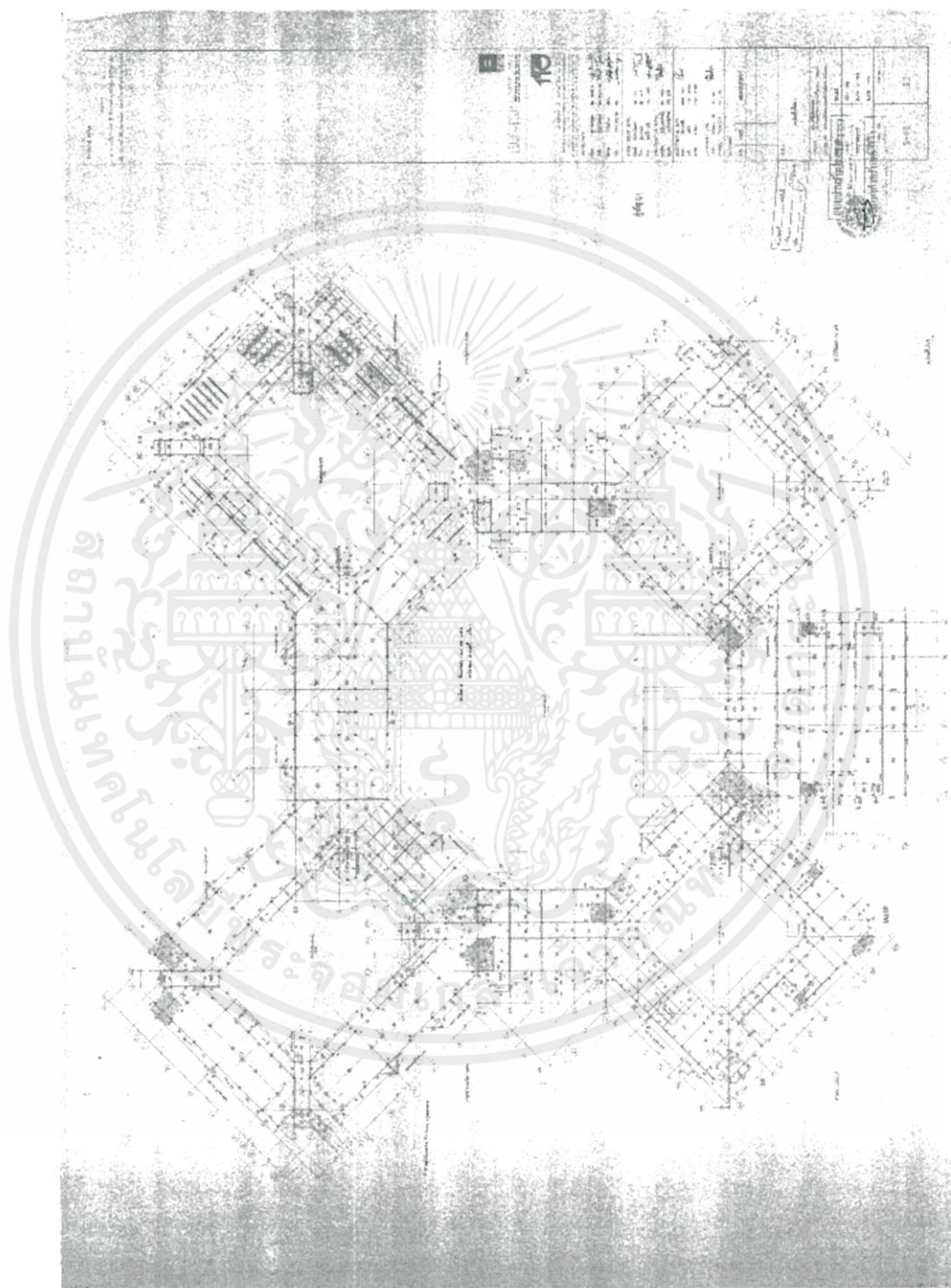
## ภาคผนวก ก

## หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหาร



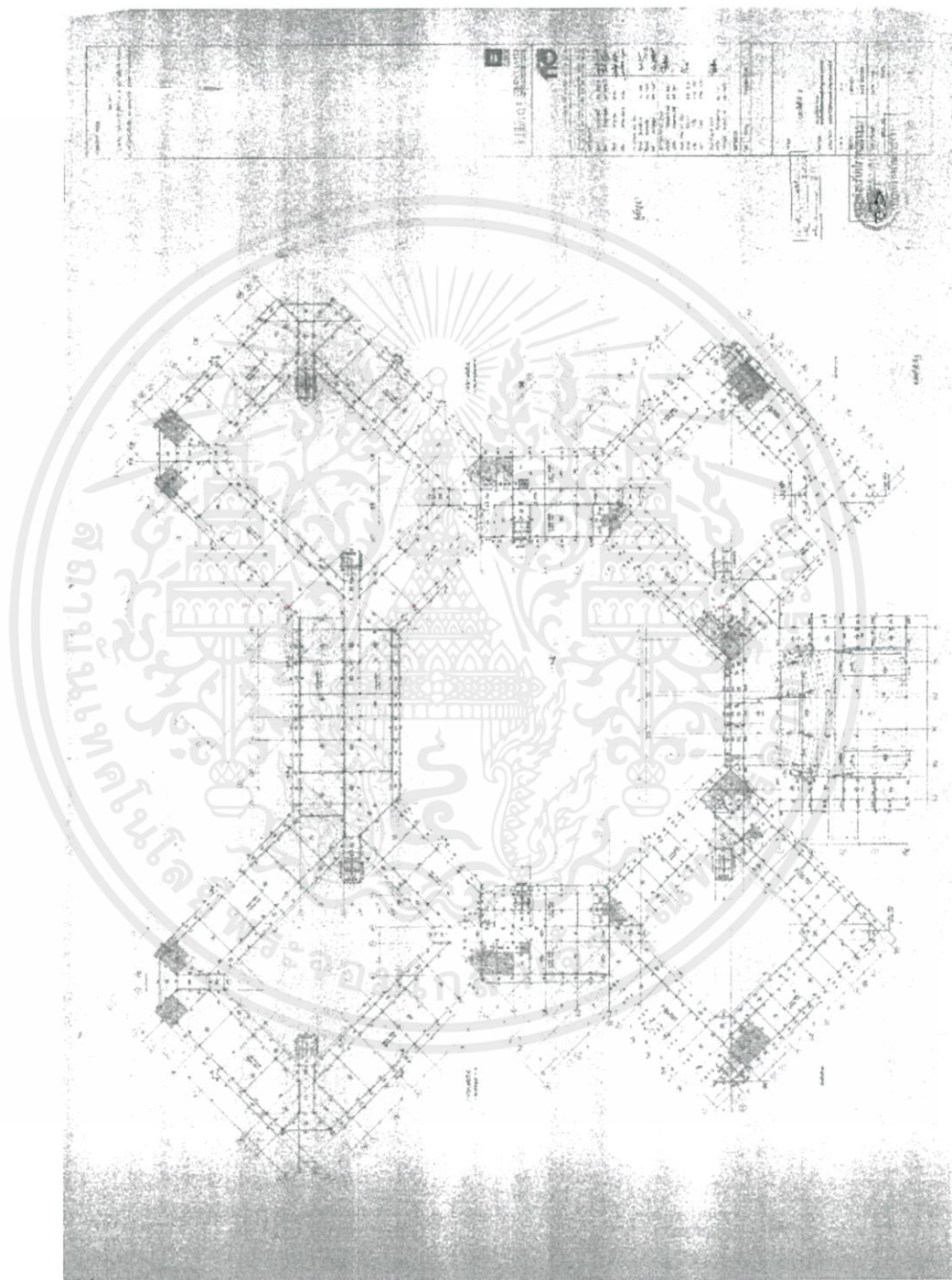
รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นฐานราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



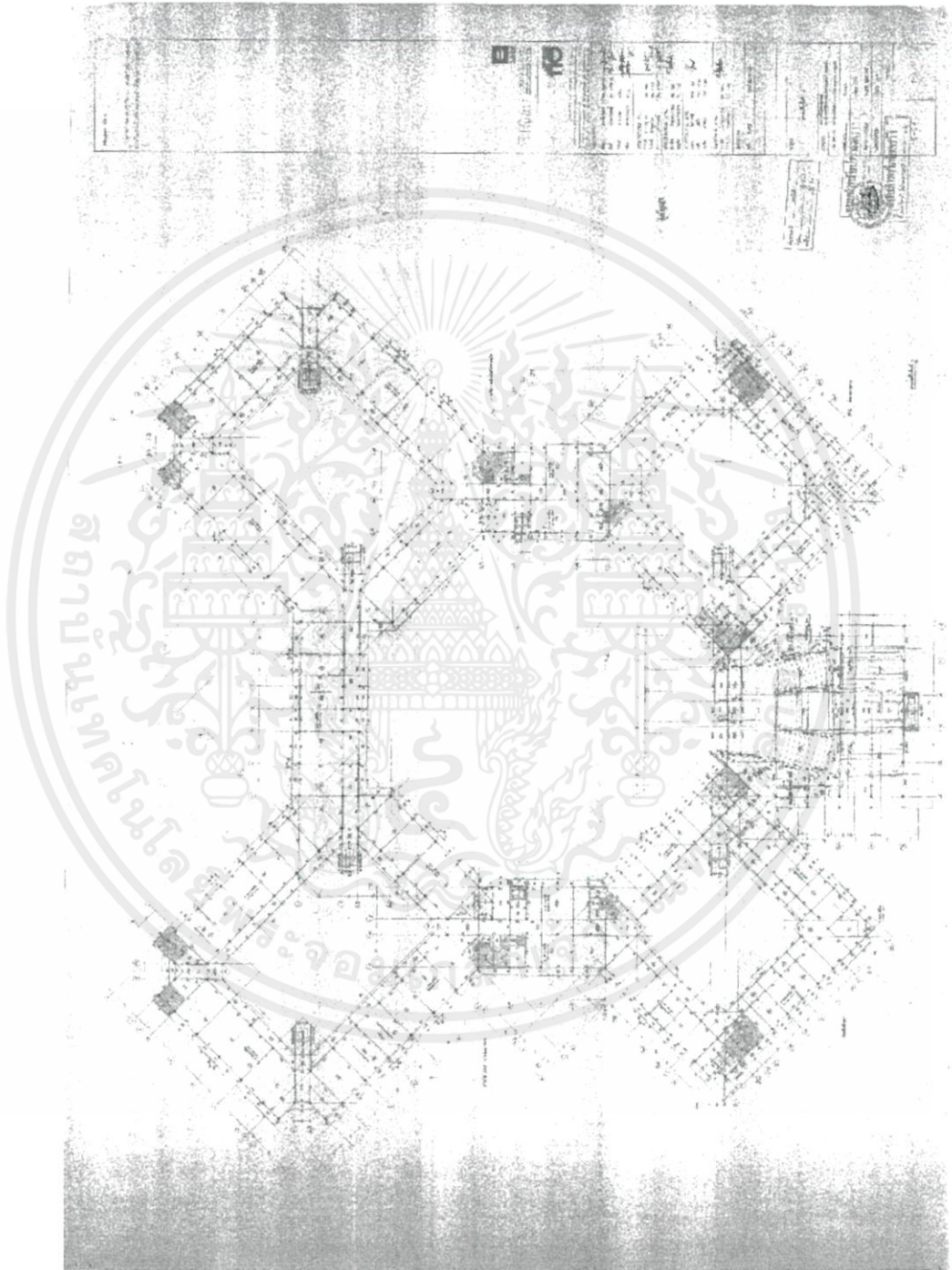
รูปที่ ก-2 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



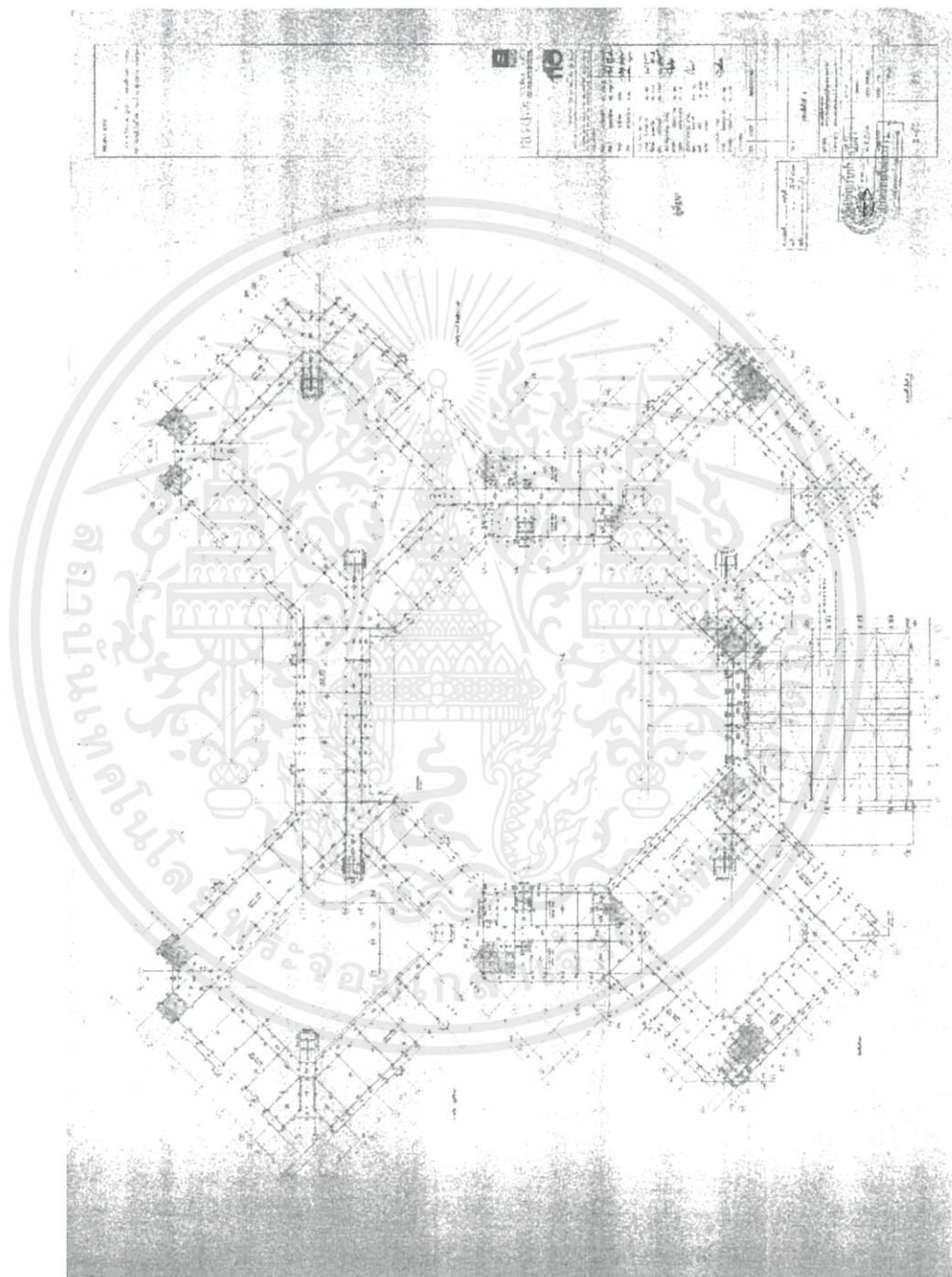
รูปที่ ก-3 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



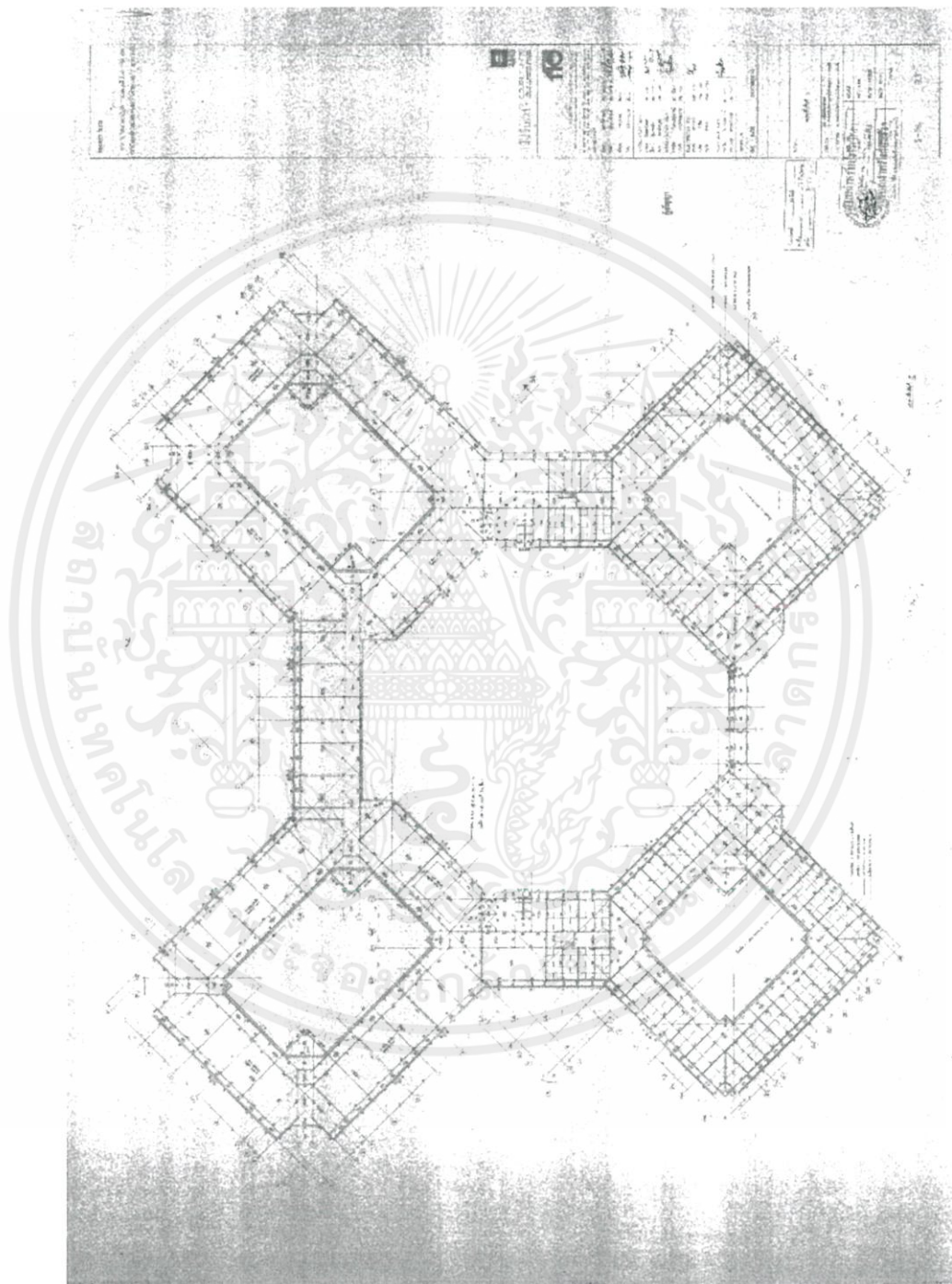
รูปที่ ก-4 หน้าที่ดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



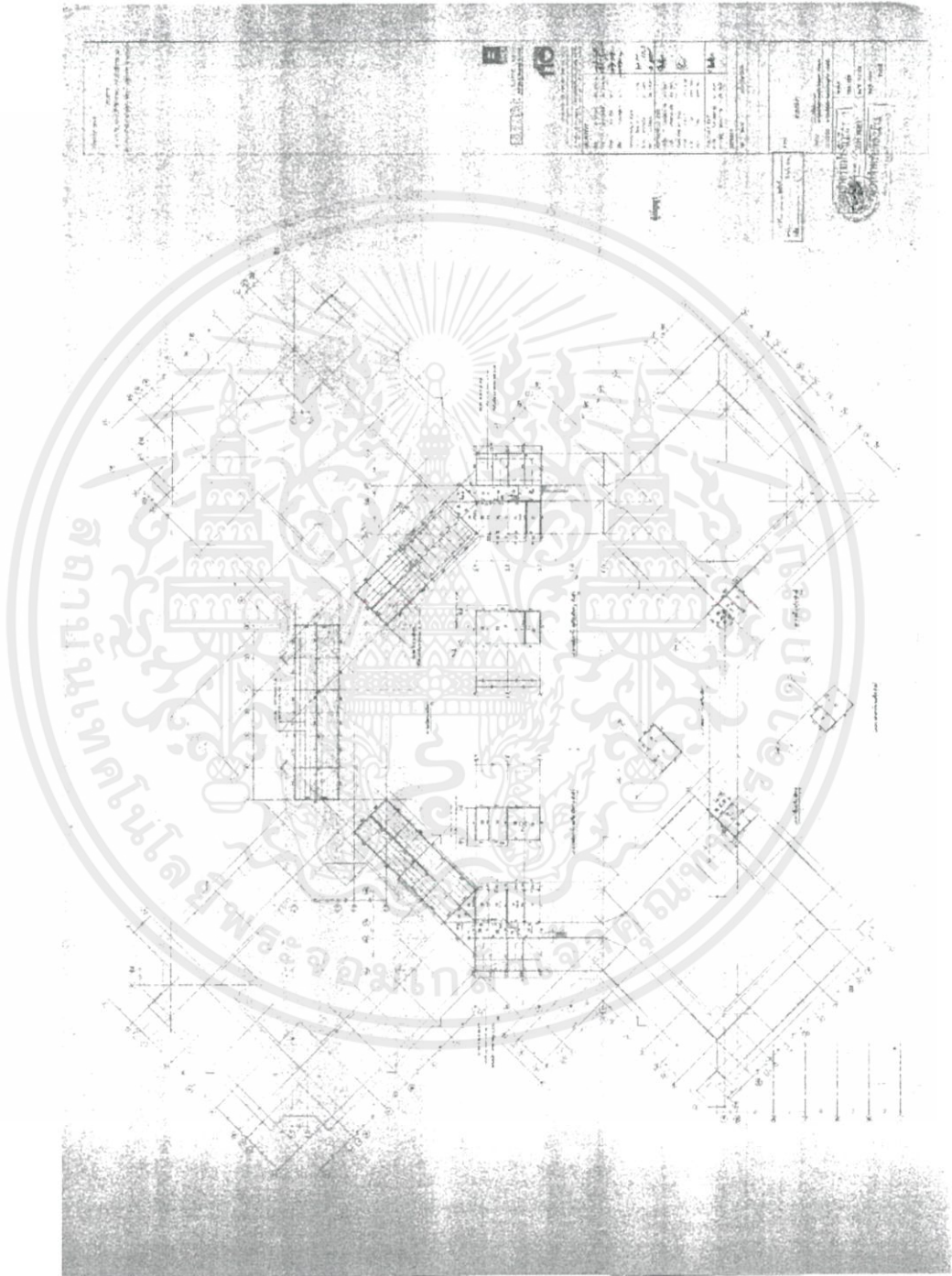
รูปที่ ก-5 หน้าที่อาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



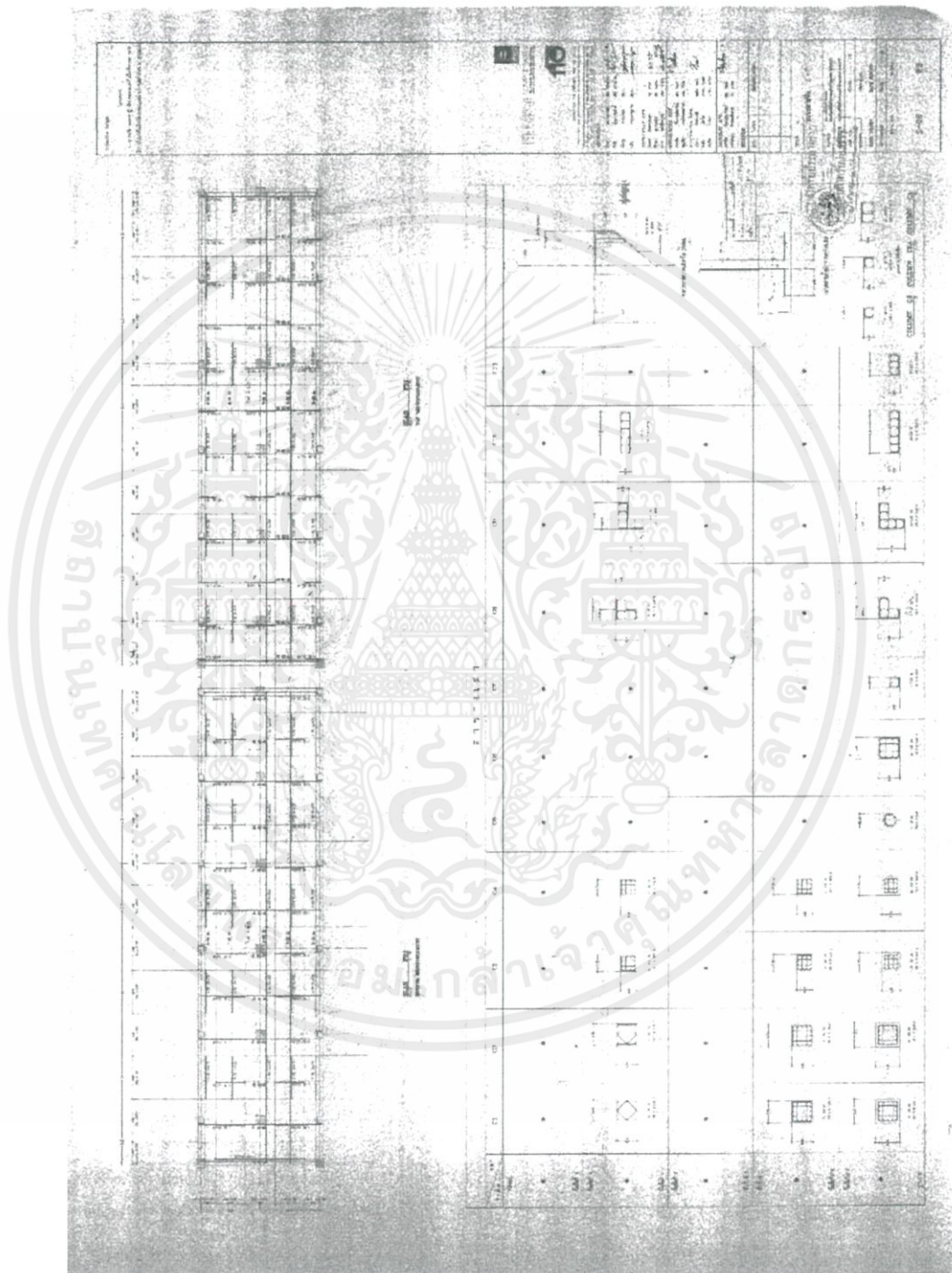
รูปที่ ก-6 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



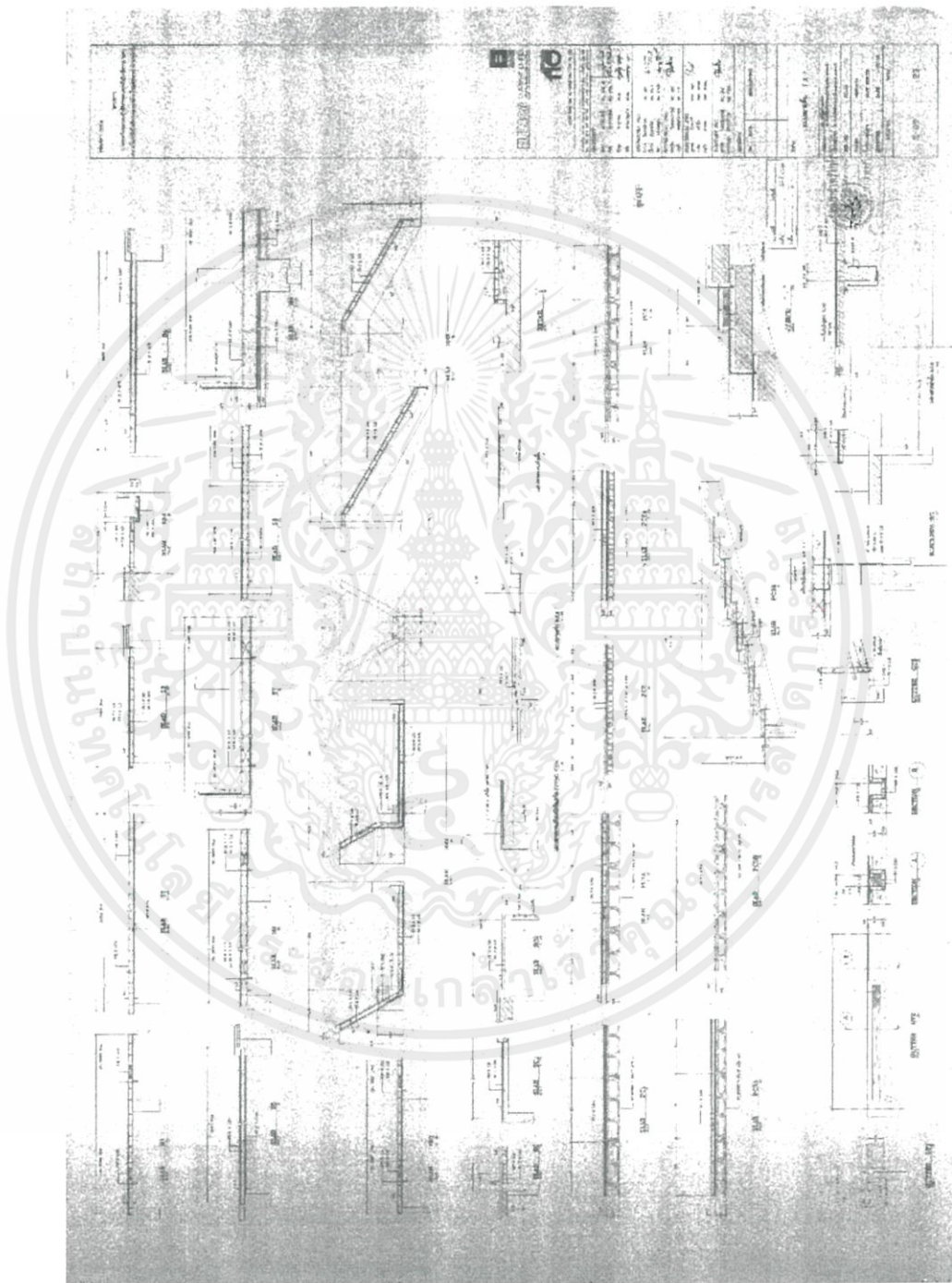
รูปที่ ก-7 หน้าตัดอาคารเจ้าคุณทหารชั้นดาดฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-8 แบบขยายเสาอาคารเจ้าคุณทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



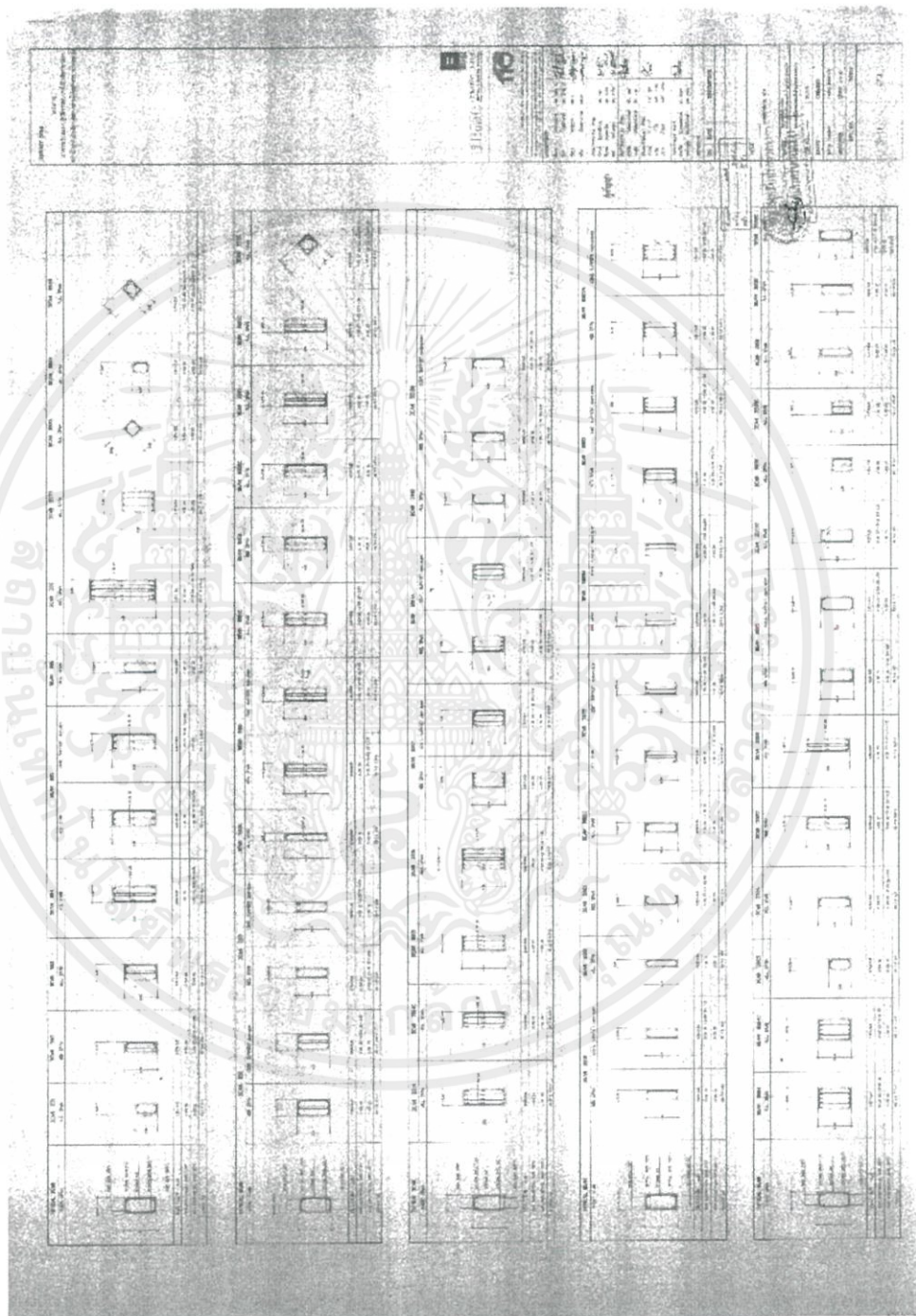
รูปที่ ก-9 แบบขยายพื้นอาคารเจ้าคุณทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The image shows a detailed architectural floor plan of a building, oriented vertically. The plan features a central corridor system connecting several rooms of varying sizes. The drawing is highly technical, with numerous lines, dimensions, and annotations. A large, circular watermark is centered over the drawing, partially obscuring the details. In the top right corner, there is a legend or key with several entries, likely defining the symbols used in the drawing. The overall appearance is that of a professional architectural drawing.

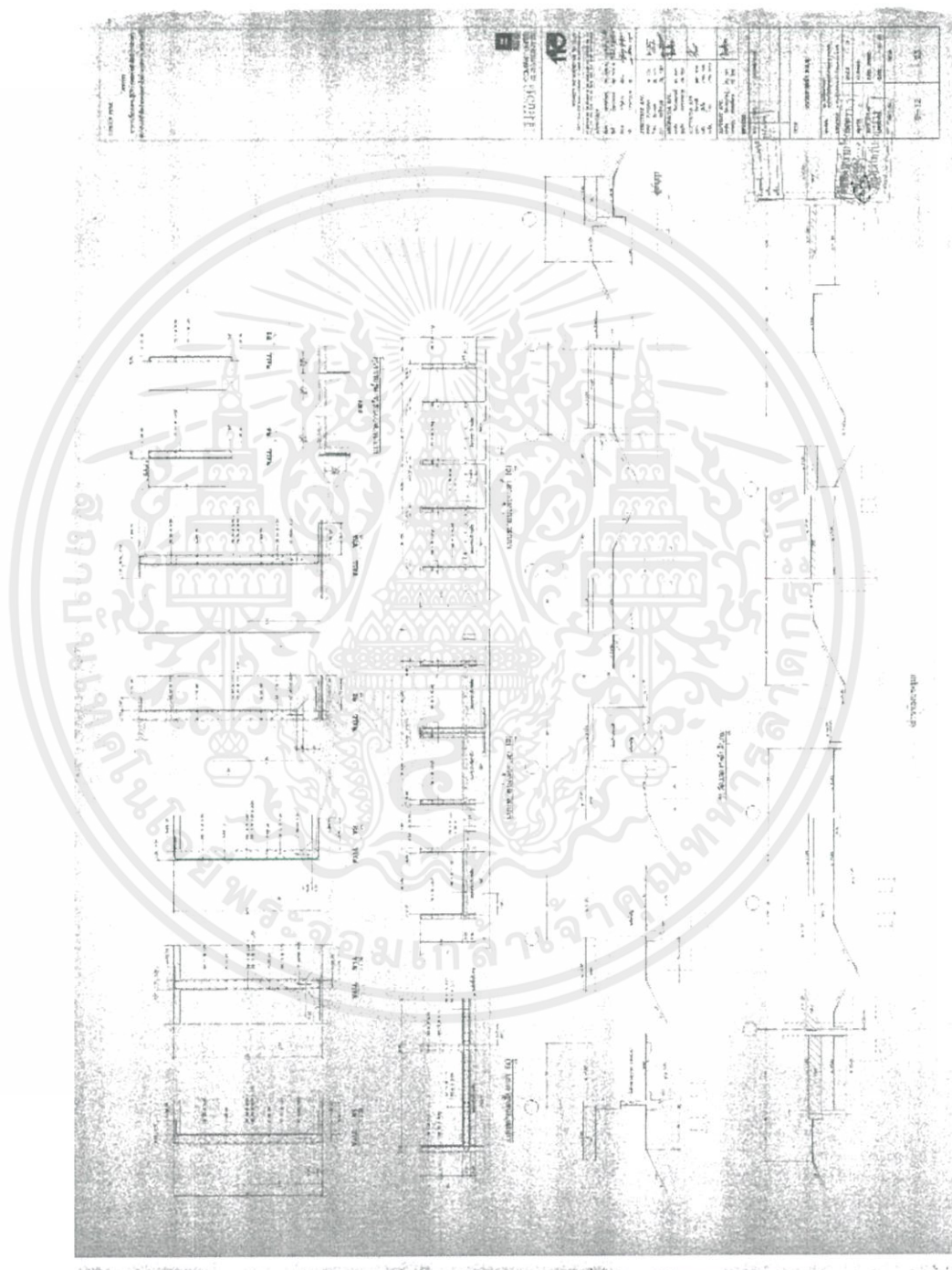
รูปที่ ก-10 แบบขยายคานอาคารเจ้าคุณทหาร (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 แบบขยายคานอาคารเจ้าคุณทหาร (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-12 แบบขยายผนังคสล.อาคารเจ้าคุณทหาร

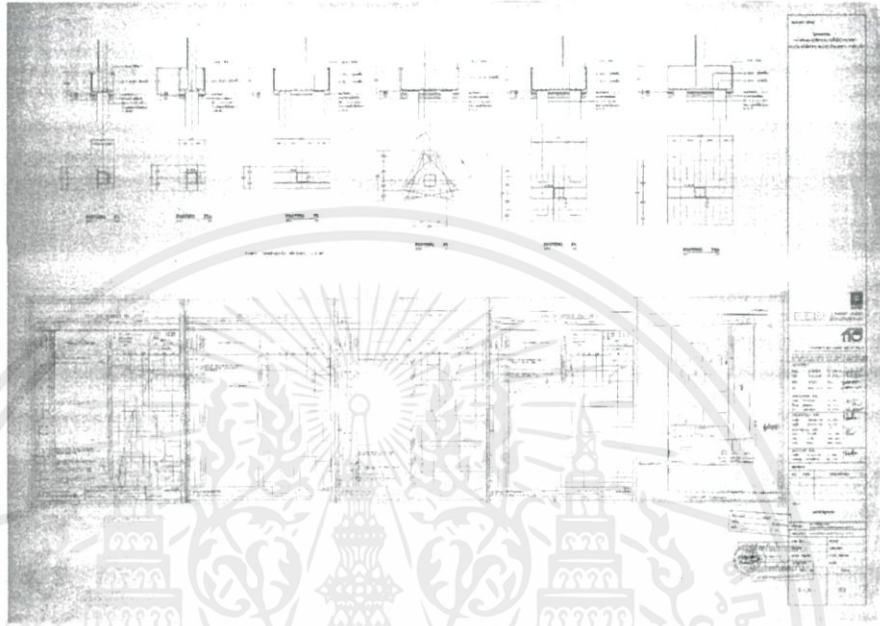
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## Log of Boring



รูปที่ ข-1 ข้อมูล Log of Boring อาคารเจ้าคุณทหาร

มยผ. 1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้  
กำหนดการจำแนกชั้นดินที่ตั้งอาคารสำหรับการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวไว้ ดังนี้  
ตารางที่ ข-1 การจำแนกประเภทชั้นดิน

ประเภทชั้นดิน	$\bar{V}_s$	$\bar{N}$ หรือ $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$
A	>1500 เมตร/วินาที	-	-
B	750-1500 เมตร/วินาที	-	-
C	360-750 เมตร/วินาที	>50	>100 กิโลปาสคาล
D	180-360 เมตร/วินาที	15-50	50-100 กิโลปาสคาล
E	<180 เมตร/วินาที	<15	<50 กิโลปาสคาล
	มีชั้นดินที่มีความหนามากกว่า 3 เมตร ที่มีคุณสมบัติดังนี้ Plasticity Index (PI) > 20 Moisture Content (w) > 40% $\bar{S}_u < 25$ กิโลปาสคาล		
F	เกณฑ์ตามมยผ.1302		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของการทดสอบผิงจมมาตรฐานเฉลี่ย ( $\bar{N}$ ) ในช่วงความลึก 30 เมตรแรก สามารถคำนวณได้จาก

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}}$$

โดยที่  $N_i$  เป็นค่าการทดสอบผิงจมมาตรฐาน สำหรับชั้นดินทราย ดินเหนียว และหิน ชั้นดินที่  $i$

$d_i$  เป็นความหนา สำหรับชั้นดินทราย ดินเหนียว และหิน ชั้นดินที่  $i$

$n$  เป็นจำนวนชั้นดิน ในช่วงความลึก 30 เมตร

ตารางที่ ข-2 การคำนวณค่าการทดสอบผิงจมมาตรฐานเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรแรก

ความลึกจากผิวดิน (m)	ค่าการทดสอบผิงจมมาตรฐาน, $N_i$	ความหนาของชั้นดิน, $d_i$ (m)	$d_i/N_i$
2	3	2	0.67
3.5	2	1.5	0.75
8	2	4.5	2.25
9.5	2	1.5	0.75
11	2	1.5	0.75
12.5	2	1.5	0.75
17	4	4.5	1.13
18.5	6	1.5	0.25
20	17	1.5	0.09
21.5	19	1.5	0.08
23	20	1.5	0.08
24.5	46	1.5	0.03
26	28	1.5	0.05
27.5	49	1.5	0.03
29	10	1.5	0.15
30	10	1	0.10
	$\sum$	30	7.90
	$\bar{N}$	3.80	

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าอาคารเจ้าคุณทหารตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ตารางค่าแรงเฉือนและตารางการคำนวณค่า Inter Story Drift

ตารางที่ ค-1 คาบการสั่นของแต่ละโหมดและโหมดที่พิจารณาที่ทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิง  
 โหมดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของ  
 แผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	1	1.245	0.1618	0.0387	0	0.1618	0.0387	0	0.0194	0.1732	0.3927	0.0194	0.1732	0.3927
Modal	2	0.948	0.1051	0.4273	0	0.2669	0.466	0	0.3317	0.1118	0.0092	0.3511	0.2849	0.402
Modal	3	0.772	0.2272	0.0761	0	0.494	0.5421	0	0.0962	0.2034	0.1838	0.4473	0.4883	0.5858
Modal	4	0.371	0.0374	0.0071	0	0.5314	0.5492	0	0.0292	0.0086	0.0921	0.4765	0.4969	0.6779
Modal	5	0.288	3.29E-06	4.70E-05	0	0.5314	0.5492	0	4.95E-05	1.05E-05	4.30E-06	0.4765	0.497	0.6779
Modal	6	0.276	0.0007	0.0075	0	0.5321	0.5567	0	0.005	0.0007	0.0013	0.4815	0.4977	0.6791
Modal	7	0.267	0.0048	0.0406	0	0.5369	0.5973	0	0.0369	0.0049	0.014	0.5184	0.5026	0.6932
Modal	8	0.265	0.0072	0.0587	0	0.5441	0.656	0	0.0532	0.0073	0.0231	0.5716	0.51	0.7162
Modal	9	0.256	1.56E-05	1.65E-05	0	0.5441	0.656	0	1.28E-05	1.02E-05	2.57E-06	0.5716	0.51	0.7162
Modal	10	0.255	0.0002	7.20E-06	0	0.5443	0.656	0	0	0.0001	0.0001	0.5716	0.5101	0.7164
Modal	11	0.245	2.19E-05	0.0001	0	0.5443	0.6561	0	0.0001	2.92E-05	2.98E-06	0.5717	0.5101	0.7164
Modal	12	0.243	0	0	0	0.5443	0.6561	0	0	0	0	0.5717	0.5101	0.7164
Modal	13	0.241	0	0	0	0.5443	0.6561	0	0	0	0	0.5717	0.5101	0.7164
Modal	14	0.238	8.76E-06	8.51E-06	0	0.5443	0.6561	0	2.46E-05	5.78E-06	9.82E-06	0.5717	0.5101	0.7164
Modal	15	0.215	0	0	0	0.5443	0.6561	0	9.60E-06	0	7.56E-07	0.5717	0.5101	0.7164
Modal	16	0.209	0.0001	0.0001	0	0.5444	0.6563	0	1.68E-05	2.66E-05	0.0002	0.5717	0.5101	0.7166
Modal	17	0.204	8.10E-06	0.0002	0	0.5444	0.6565	0	0.0001	3.12E-06	0.0002	0.5718	0.5102	0.7168
Modal	18	0.198	0.0432	0.0604	0	0.5876	0.7169	0	0.0184	0.0217	0.0708	0.5902	0.5319	0.7876
Modal	19	0.187	0	0	0	0.5876	0.7169	0	0	0	7.23E-07	0.5902	0.5319	0.7876
Modal	20	0.18	0.0639	0.0017	0	0.6515	0.7186	0	7.12E-06	0.0231	0.0095	0.5902	0.5549	0.7971
Modal	21	0.168	1.12E-05	7.51E-07	0	0.6515	0.7186	0	1.08E-05	1.80E-05	3.77E-06	0.5902	0.555	0.7971
Modal	22	0.158	0.0001	0	0	0.6516	0.7186	0	3.65E-06	4.93E-05	0.0001	0.5902	0.555	0.7972
Modal	23	0.15	0.0168	0.009	0	0.6684	0.7276	0	0.0225	0.0098	0.0481	0.6127	0.5648	0.8453
Modal	24	0.145	3.60E-06	5.84E-06	0	0.6684	0.7277	0	1.54E-05	1.01E-05	0	0.6127	0.5648	0.8453
Modal	25	0.137	4.20E-06	1.82E-06	0	0.6684	0.7277	0	2.52E-06	4.70E-06	9.33E-07	0.6127	0.5648	0.8453
Modal	26	0.127	3.99E-05	0.0002	0	0.6684	0.7279	0	0.0002	2.12E-05	4.76E-05	0.6129	0.5648	0.8454
Modal	27	0.119	0	0	0	0.6684	0.7279	0	0	0	0	0.6129	0.5648	0.8454
Modal	28	0.115	0.0085	0.0016	0	0.6769	0.7294	0	0.0002	0.0046	0.0023	0.6132	0.5694	0.8477
Modal	29	0.109	2.54E-05	0.0015	0	0.6769	0.731	0	0.0011	2.50E-05	0.0005	0.6143	0.5694	0.8482
Modal	30	0.108	3.71E-05	2.50E-05	0	0.677	0.731	0	4.93E-06	2.77E-05	4.27E-05	0.6143	0.5694	0.8482

ตารางที่ ค-1 คาบการสั่นของแต่ละโหมดและโหมดที่พิจารณาที่ทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิง  
โหมดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของ  
แผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน (ต่อ)

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	31	0.107	0.0003	0.0309	0	0.6773	0.7618	0	0.0094	1.46E-05	0.0211	0.6237	0.5694	0.8694
Modal	32	0.102	0.0978	0.0231	0	0.7751	0.785	0	0.0202	0.0568	0.004	0.6439	0.6262	0.8733
Modal	33	0.099	0.0034	0.0471	0	0.7784	0.8321	0	0.0465	0.0007	0.0269	0.6904	0.6269	0.9002
Modal	34	0.095	2.86E-06	0	0	0.7784	0.8321	0	1.94E-06	1.64E-06	2.91E-05	0.6904	0.6269	0.9002
Modal	35	0.094	0.0066	0.0014	0	0.7851	0.8335	0	0.0023	0.008	0.0023	0.6927	0.6348	0.9025
Modal	36	0.093	0.0002	0	0	0.7852	0.8335	0	4.97E-05	0.0003	0.0004	0.6927	0.6351	0.903
Modal	37	0.092	0.0694	0.0007	0	0.8547	0.8342	0	0.0022	0.0745	0.0139	0.6949	0.7096	0.9169
Modal	38	0.092	0.0006	0	0	0.8552	0.8342	0	8.97E-06	0.0006	0.0002	0.6949	0.7103	0.917
Modal	39	0.089	0.0042	0.0625	0	0.8595	0.8967	0	0.0958	0.001	0.018	0.7908	0.7113	0.9351
Modal	40	0.084	0.0011	0.0002	0	0.8605	0.8969	0	0.0004	0.001	1.20E-05	0.7911	0.7122	0.9351
Modal	41	0.084	0	0	0	0.8605	0.8969	0	0	0	0	0.7911	0.7122	0.9351
Modal	42	0.08	0.0001	0.0003	0	0.8606	0.8973	0	0.0002	0.0001	0.0007	0.7914	0.7124	0.9358
Modal	43	0.08	0.0001	3.50E-05	0	0.8607	0.8973	0	4.75E-05	0.0001	1.47E-06	0.7914	0.7124	0.9359
Modal	44	0.079	0.0162	0.0043	0	0.8769	0.9016	0	0.0022	0.0189	0.0174	0.7936	0.7313	0.9533
Modal	45	0.078	0.0023	0.0184	0	0.8793	0.9201	0	0.0182	0.0021	0.0169	0.8118	0.7334	0.9702
Modal	46	0.078	0	0.0001	0	0.8793	0.9202	0	0.0001	0	0.0001	0.8119	0.7334	0.9704
Modal	47	0.078	0	1.80E-05	0	0.8793	0.9202	0	1.59E-05	0	2.25E-05	0.8119	0.7334	0.9704
Modal	48	0.077	0.008	0.0066	0	0.8873	0.9268	0	0.0073	0.0081	0.0042	0.8192	0.7416	0.9746
Modal	49	0.077	0.0392	0.0194	0	0.9265	0.9462	0	0.0254	0.044	0.0038	0.8446	0.7856	0.9784
Modal	50	0.074	0.0001	0.0001	0	0.9266	0.9462	0	0.0001	0.0001	4.48E-06	0.8447	0.7857	0.9784
Modal	51	0.074	7.82E-06	0.001	0	0.9266	0.9472	0	0.001	4.35E-06	0.0009	0.8457	0.7857	0.9793
Modal	52	0.074	4.84E-06	1.09E-06	0	0.9266	0.9472	0	9.95E-07	6.75E-06	6.03E-06	0.8457	0.7858	0.9793
Modal	53	0.072	2.52E-05	0	0	0.9267	0.9472	0	8.12E-07	3.81E-05	0.0001	0.8457	0.7858	0.9794
Modal	54	0.072	7.33E-07	0	0	0.9267	0.9472	0	0	1.89E-06	0	0.8457	0.7858	0.9794
Modal	55	0.071	1.32E-05	0	0	0.9267	0.9472	0	0	1.65E-05	0	0.8457	0.7858	0.9794
Modal	56	0.071	1.01E-05	5.94E-06	0	0.9267	0.9472	0	2.48E-05	3.90E-05	3.12E-05	0.8458	0.7858	0.9794
Modal	57	0.071	1.13E-05	0	0	0.9267	0.9472	0	7.10E-07	1.89E-05	4.20E-05	0.8458	0.7859	0.9795
Modal	58	0.07	5.13E-07	0	0	0.9267	0.9472	0	4.24E-06	7.37E-06	6.94E-06	0.8458	0.7859	0.9795
Modal	59	0.07	2.69E-05	1.56E-05	0	0.9267	0.9472	0	4.77E-05	0.0001	4.44E-05	0.8458	0.786	0.9795
Modal	60	0.04	0.0237	0.0376	0	0.9504	0.9848	0	0.1102	0.0705	0.0079	0.956	0.8565	0.9874
Modal	61	0.039	0.0496	0.0152	0	1	1	0	0.044	0.1435	0.0126	1	1	1
Modal	62	0.036	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	63	0.036	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	64	0.028	0	5.07E-06	0	1	1	0	1.41E-05	0	1.95E-06	1	1	1
Modal	65	0.023	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1

ตารางที่ ค-1 คาบการสั่นของแต่ละโหมดและโหมดที่พิจารณาที่ทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิง  
 โหมดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร สำหรับแต่ละทิศทางของ  
 แผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน (ต่อ)

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	66	0.022	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	67	0.022	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	68	0.022	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	69	0.022	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	70	0.017	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	71	0.017	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	72	0.017	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	73	0.017	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	74	0.017	0	0	0	1	1	0	0	1.70E-06	0	1	1	1
Modal	75	0.017	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	76	0.014	0	0	0	1	1	0	0	8.44E-07	0	1	1	1
Modal	77	0.013	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	78	0.013	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	79	0.012	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	80	0.012	4.70E-06	0	0	1	1	0	0	1.23E-05	0	1	1	1
Modal	81	0.011	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	82	0.011	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	83	0.011	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	84	0.011	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	85	0.011	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	86	0.01	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	87	0.01	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	88	0.01	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	89	0.01	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	90	0.01	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	91	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	92	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	93	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	94	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	95	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	96	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	97	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	98	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	99	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Modal	100	0.009	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 แรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์วิธีเชิงพลศาสตร์

Load Case/Combo	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	X	Y	Z
	kgf	kgf	kgf	kgf-m	kgf-m	kgf-m	m	m	m
Response Spectrum Max	1306430.949	1464266.02	2.04E-06	20237024	18214108	88678810	0	0	0

ตารางที่ ค-3 แรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

Load Case/Combo	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	X	Y	Z
	kgf	kgf	kgf	kgf-m	kgf-m	kgf-m	m	m	m
U1	-351449.078	-1171496	24315789	-272582127	-393900747	-31608584	0	0	0
U2	-1171497	-351448.678	24315789	-283310660	-404474736	-21584454	0	0	0
U3	-351449.078	-1171496	18236842	-200604976	-296558488	-31608584	0	0	0
U4	-1171497	-351448.678	18236842	-211333509	-307132477	-21584454	0	0	0

ตารางที่ ค-4 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y ก่อนการเสริมกำลัง

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	1.283	1.106	1.160	4.106
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.149	1.000	1.149	3.677
Floor5	Response Spectrum Max	X	18.415	11.686	1.576	58.928
Floor5	Response Spectrum Max	Y	18.803	11.045	1.702	60.170
Floor4	Response Spectrum Max	X	17.836	12.874	1.385	57.075
Floor4	Response Spectrum Max	Y	15.573	11.699	1.331	49.834
Floor3	Response Spectrum Max	X	15.426	10.763	1.433	49.363
Floor3	Response Spectrum Max	Y	13.971	9.062	1.542	44.707
Floor2	Response Spectrum Max	X	15.219	7.906	1.925	48.701
Floor2	Response Spectrum Max	Y	15.024	7.902	1.901	48.077
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.255	0.708	1.772	4.016
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.097	1.154	1.818	6.710

ตารางที่ ค-5 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต โดยมีความหนา คอนกรีต 5 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.948	0.768	1.233	3.034
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.082	0.896	1.207	3.462
Floor5	Response Spectrum Max	X	9.632	7.596	1.268	30.822
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.694	6.604	1.468	31.021
Floor4	Response Spectrum Max	X	12.619	9.4	1.342	40.381
Floor4	Response Spectrum Max	Y	11.422	7.566	1.51	36.550
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.884	7.903	1.377	34.829
Floor3	Response Spectrum Max	Y	10.296	6.871	1.498	32.947
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.403	3.004	1.799	17.290
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.461	3.626	1.782	20.675
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.45	0.804	1.803	4.640
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.052	1.133	1.811	6.566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีต โดยมีความหนา คอนกรีต 10 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.739	0.613	1.206	2.365
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.858	0.76	1.129	2.746
Floor5	Response Spectrum Max	X	8.102	6.372	1.272	25.926
Floor5	Response Spectrum Max	Y	8.116	6.005	1.352	25.971
Floor4	Response Spectrum Max	X	10.142	7.71	1.315	32.454
Floor4	Response Spectrum Max	Y	9.469	6.573	1.441	30.301
Floor3	Response Spectrum Max	X	8.531	6.401	1.333	27.299
Floor3	Response Spectrum Max	Y	8.414	5.697	1.477	26.925
Floor2	Response Spectrum Max	X	4.771	2.714	1.758	15.267
Floor2	Response Spectrum Max	Y	5.869	3.358	1.748	18.781
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.256	0.709	1.772	4.019
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.079	1.149	1.809	6.653

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-7 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.833	0.674	1.236	2.666
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.927	0.777	1.194	2.966
Floor5	Response Spectrum Max	X	9.514	6.976	1.364	30.445
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.592	6.228	1.54	30.694
Floor4	Response Spectrum Max	X	12.399	9.255	1.34	39.677
Floor4	Response Spectrum Max	Y	11.254	7.401	1.521	36.013
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.658	7.758	1.374	34.106
Floor3	Response Spectrum Max	Y	10.121	6.754	1.499	32.387
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.329	2.963	1.799	17.053
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.353	3.565	1.782	20.330
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.213	0.684	1.772	3.882
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.018	1.114	1.812	6.458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-8 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.1 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.794	0.647	1.228	2.54
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.882	0.749	1.178	2.82
Floor5	Response Spectrum Max	X	9.355	6.921	1.352	29.94
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.434	6.191	1.524	30.19
Floor4	Response Spectrum Max	X	12.161	9.088	1.338	38.92
Floor4	Response Spectrum Max	Y	11.066	7.274	1.521	35.41
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.434	7.616	1.37	33.39
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.942	6.644	1.496	31.81
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.272	2.935	1.796	16.87
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.295	3.537	1.78	20.14
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.212	0.684	1.772	3.88
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.015	1.113	1.812	6.45

ตารางที่ ค-9 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.2 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.762	0.623	1.223	2.438
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.847	0.725	1.168	2.710
Floor5	Response Spectrum Max	X	9.214	6.873	1.341	29.485
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.291	6.356	1.462	29.731
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.944	8.945	1.335	38.221
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.895	7.16	1.522	34.864
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.23	7.482	1.367	32.736
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.778	6.537	1.496	31.290
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.208	2.904	1.793	16.666
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.241	3.511	1.777	19.971
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.211	0.683	1.773	3.875
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.014	1.112	1.811	6.445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-10 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.3 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.734	0.602	1.22	2.349
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.814	0.704	1.156	2.605
Floor5	Response Spectrum Max	X	9.085	6.818	1.333	29.072
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.161	7.457	1.228	29.315
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.745	8.808	1.333	37.584
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.739	7.058	1.522	34.365
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.042	7.363	1.364	32.134
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.628	6.442	1.495	30.810
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.16	2.881	1.791	16.512
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.192	3.487	1.775	19.814
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.209	0.682	1.773	3.869
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.011	1.11	1.812	6.435

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-11 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก โดยมีความหนาแผ่นเหล็ก 1.5 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.69	0.568	1.214	2.208
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.759	0.671	1.133	2.429
Floor5	Response Spectrum Max	X	8.825	6.75	1.307	28.240
Floor5	Response Spectrum Max	Y	8.921	6.132	1.455	28.547
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.386	8.563	1.33	36.435
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.459	6.865	1.524	33.469
Floor3	Response Spectrum Max	X	9.706	7.148	1.358	31.059
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.362	6.278	1.491	29.958
Floor2	Response Spectrum Max	X	7.707	4.156	1.855	24.662
Floor2	Response Spectrum Max	Y	7.516	4.152	1.81	24.051
Floor1	Response Spectrum Max	X	4.459	2.307	1.933	14.269
Floor1	Response Spectrum Max	Y	4.369	2.289	1.909	13.981

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-12 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP) ความหนา 0.7 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.914	0.74	1.235	2.925
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.014	0.842	1.203	3.245
Floor5	Response Spectrum Max	X	13.644	9.666	1.412	43.661
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.943	6.286	1.582	31.818
Floor4	Response Spectrum Max	X	12.953	9.609	1.348	41.450
Floor4	Response Spectrum Max	Y	11.656	7.687	1.516	37.299
Floor3	Response Spectrum Max	X	11.176	8.068	1.385	35.763
Floor3	Response Spectrum Max	Y	10.522	6.994	1.504	33.670
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.428	3.006	1.806	17.370
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.44	3.602	1.788	20.608
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.49	0.822	1.813	4.768
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.999	1.103	1.812	6.397

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-13 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP) ความหนา 1.0 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.765	0.626	1.222	2.45
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.855	0.727	1.177	2.74
Floor5	Response Spectrum Max	X	9.173	6.422	1.428	29.35
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.228	5.923	1.558	29.53
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.901	8.894	1.338	38.08
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.816	7.103	1.523	34.61
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.199	7.438	1.371	32.64
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.731	6.494	1.498	31.14
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.146	2.866	1.795	16.47
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.168	3.466	1.779	19.74
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.19	0.671	1.774	3.81
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.978	1.092	1.812	6.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-14 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP) ความหนา 1.3 เซนติเมตร

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.675	0.557	1.213	2.160
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.755	0.661	1.143	2.416
Floor5	Response Spectrum Max	X	8.724	6.2	1.407	27.917
Floor5	Response Spectrum Max	Y	8.767	5.822	1.506	28.054
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.207	8.421	1.331	35.862
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.257	6.763	1.517	32.822
Floor3	Response Spectrum Max	X	9.548	7.042	1.356	30.554
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.204	6.165	1.493	29.453
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.001	2.795	1.789	16.003
Floor2	Response Spectrum Max	Y	5.979	3.373	1.773	19.133
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.183	0.667	1.775	3.786
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.964	1.084	1.812	6.285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-15 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 1

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	1.254	1.074	1.168	4.013
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.22	1.017	1.2	3.904
Floor5	Response Spectrum Max	X	20.106	41.745	1.829	64.339
Floor5	Response Spectrum Max	Y	13.449	10.569	1.273	43.037
Floor4	Response Spectrum Max	X	18.793	13.173	1.427	60.138
Floor4	Response Spectrum Max	Y	15.925	10.131	1.572	50.960
Floor3	Response Spectrum Max	X	15.968	10.42	1.532	51.098
Floor3	Response Spectrum Max	Y	13.255	8.229	1.611	42.416
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.184	2.838	1.827	16.589
Floor2	Response Spectrum Max	Y	3.801	2.217	1.715	12.163
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.128	0.642	1.758	3.610
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.626	0.912	1.783	5.203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-16 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 2

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	1.091	0.894	1.22	3.49
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.084	0.921	1.177	3.47
Floor5	Response Spectrum Max	X	12.325	8.923	1.381	39.44
Floor5	Response Spectrum Max	Y	13.284	9.503	1.398	42.51
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.97	8.567	1.397	38.30
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.298	6.457	1.595	32.95
Floor3	Response Spectrum Max	X	5.053	3.421	1.477	16.17
Floor3	Response Spectrum Max	Y	3.874	2.677	1.447	12.40
Floor2	Response Spectrum Max	X	3.294	1.842	1.789	10.54
Floor2	Response Spectrum Max	Y	4.812	2.653	1.814	15.40
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.53	0.839	1.824	4.90
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.732	0.959	1.806	5.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-17 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงต้านข้างโดยใช้โครงแกนด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 3

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.955	0.782	1.221	3.056
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.919	0.814	1.13	2.941
Floor5	Response Spectrum Max	X	7.455	5.677	1.313	23.856
Floor5	Response Spectrum Max	Y	16.268	20.646	1.848	52.058
Floor4	Response Spectrum Max	X	9.242	5.742	1.609	29.574
Floor4	Response Spectrum Max	Y	9.284	5.527	1.68	29.709
Floor3	Response Spectrum Max	X	10.667	7.121	1.498	34.134
Floor3	Response Spectrum Max	Y	10.005	6.323	1.582	32.016
Floor2	Response Spectrum Max	X	4.791	2.667	1.796	15.331
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.108	3.394	1.8	19.546
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.142	0.659	1.733	3.654
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.94	1.08	1.796	6.208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-18 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนด้วยเหล็ก WF 300x300 ที่ชั้นอาคาร 4

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.758	0.596	1.272	2.426
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.761	0.547	1.391	2.435
Floor5	Response Spectrum Max	X	4.977	3.267	1.523	15.926
Floor5	Response Spectrum Max	Y	4.937	3.229	1.529	15.798
Floor4	Response Spectrum Max	X	13.789	9.554	1.443	44.125
Floor4	Response Spectrum Max	Y	11.049	7.408	1.491	35.357
Floor3	Response Spectrum Max	X	14.703	9.996	1.471	47.050
Floor3	Response Spectrum Max	Y	12.313	7.874	1.564	39.402
Floor2	Response Spectrum Max	X	5.85	3.214	1.82	18.720
Floor2	Response Spectrum Max	Y	7.13	3.936	1.812	22.816
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.274	0.723	1.762	4.077
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.144	1.183	1.813	6.861

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-19 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้โครงแกนด้วยเหล็ก WF 400x400 ที่ชั้นอาคาร 2

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.975	0.778	1.254	3.120
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.998	0.838	1.191	3.194
Floor5	Response Spectrum Max	X	11.374	8.081	1.407	36.397
Floor5	Response Spectrum Max	Y	9.925	7.072	1.404	31.760
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.245	7.564	1.487	35.984
Floor4	Response Spectrum Max	Y	10.172	6.054	1.68	32.550
Floor3	Response Spectrum Max	X	8.516	4.662	1.827	27.251
Floor3	Response Spectrum Max	Y	8.536	4.667	1.829	27.315
Floor2	Response Spectrum Max	X	4.149	2.249	1.845	13.277
Floor2	Response Spectrum Max	Y	4.27	2.346	1.82	13.664
Floor1	Response Spectrum Max	X	2.423	1.285	1.886	7.754
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.316	1.248	1.856	7.411

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-20 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 1

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	1.208	1.019	1.186	3.866
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.11	0.925	1.2	3.552
Floor5	Response Spectrum Max	X	13.932	8.765	1.59	44.582
Floor5	Response Spectrum Max	Y	13.139	8.292	1.585	42.045
Floor4	Response Spectrum Max	X	19.267	13.234	1.456	61.654
Floor4	Response Spectrum Max	Y	15.569	9.517	1.636	49.821
Floor3	Response Spectrum Max	X	16.255	10.026	1.621	52.016
Floor3	Response Spectrum Max	Y	12.33	7.431	1.659	39.456
Floor2	Response Spectrum Max	X	3.986	2.152	1.852	12.755
Floor2	Response Spectrum Max	Y	3.409	1.855	1.838	10.909
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.019	0.582	1.751	3.261
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.27	0.721	1.762	4.064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-21 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 2

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	1.123	0.911	1.233	3.59
Deck	Response Spectrum Max	Y	1.05	0.898	1.17	3.36
Floor5	Response Spectrum Max	X	11.271	8.029	1.404	36.07
Floor5	Response Spectrum Max	Y	10.307	7.192	1.433	32.98
Floor4	Response Spectrum Max	X	11.96	7.826	1.528	38.27
Floor4	Response Spectrum Max	Y	9.653	5.815	1.66	30.89
Floor3	Response Spectrum Max	X	3.658	2.475	1.478	11.71
Floor3	Response Spectrum Max	Y	3.396	2.298	1.478	10.87
Floor2	Response Spectrum Max	X	2.796	1.584	1.765	8.95
Floor2	Response Spectrum Max	Y	4.533	2.473	1.833	14.51
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.079	0.614	1.758	3.45
Floor1	Response Spectrum Max	Y	1.741	0.96	1.814	5.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-22 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 3

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	1.005	0.872	1.153	3.216
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.753	0.684	1.1	2.410
Floor5	Response Spectrum Max	X	6.852	4.66	1.47	21.926
Floor5	Response Spectrum Max	Y	7.326	5.299	1.383	23.443
Floor4	Response Spectrum Max	X	4.778	3.489	1.369	15.290
Floor4	Response Spectrum Max	Y	5.056	3.62	1.397	16.179
Floor3	Response Spectrum Max	X	11.376	7.361	1.545	36.403
Floor3	Response Spectrum Max	Y	9.044	5.867	1.542	28.941
Floor2	Response Spectrum Max	X	4.652	2.601	1.789	14.886
Floor2	Response Spectrum Max	Y	6.431	3.547	1.813	20.579
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.242	0.707	1.756	3.974
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.064	1.141	1.808	6.605

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-23 ตารางแสดงค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกน X และ Y หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานที่ชั้นอาคาร 4

Story	Load Case/Combo	Direction	Max Story Drift	Avg Story Drift	Ratio	Max Design Story Drift
			mm	mm		mm
Deck	Response Spectrum Max	X	0.799	0.654	1.22	2.557
Deck	Response Spectrum Max	Y	0.769	0.601	1.28	2.461
Floor5	Response Spectrum Max	X	15.625	8.823	1.771	50.000
Floor5	Response Spectrum Max	Y	15.471	8.831	1.752	49.507
Floor4	Response Spectrum Max	X	14.222	9.736	1.461	45.510
Floor4	Response Spectrum Max	Y	11.261	7.432	1.515	36.035
Floor3	Response Spectrum Max	X	15.21	10.218	1.489	48.672
Floor3	Response Spectrum Max	Y	12.73	8.111	1.569	40.736
Floor2	Response Spectrum Max	X	14.382	7.479	1.923	46.022
Floor2	Response Spectrum Max	Y	14.218	7.475	1.902	45.498
Floor1	Response Spectrum Max	X	1.301	0.734	1.771	4.163
Floor1	Response Spectrum Max	Y	2.172	1.195	1.817	6.950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## รายละเอียดวัสดุเสริมกำลัง

ตารางที่ ง-1 รายละเอียดของเหล็กแผ่นดำ HOT ROLLED STEEL PLATE AND SHEET Grade : SS400, SS490, SS540, SM400A, SM490YA, SPHC, SG295, A36, A572Gr50, A283C โดยผ่านมาตรฐาน มอก. 528-2540, มอก. 1479-2541 และ มอก. 1499-2541 [8]

## เหล็กแผ่นดำ HOT ROLLED STEEL PLATE AND SHEET

Grade : SS400, SS490, SS540, SM400A, SM490YA, SPHC, SG295  
A36, A572Gr50, A283C



ความหนา (mm.)	น้ำหนัก (Kg.)				
	4' x 8' [1219x 2438mm.]	5' x 10' [1524x 3048mm.]	5' x 20' [2524x 6096mm.]	6' x 20' [1829x 6096mm.]	8' x 20' [2438 x 6096mm.]
1.2	28.03	43.80	87.60	105.12	140.16
1.4	32.70	51.10	102.20	122.64	163.52
1.5	35.04	54.75	109.50	131.40	175.20
1.6	37.38	58.40	116.80	140.16	186.88
1.8	42.05	65.70	131.40	157.68	210.24
2.0	46.72	73.00	146.00	175.20	233.60
2.3	53.73	83.95	167.90	201.48	268.64
2.5	58.40	91.25	182.50	219.00	292.00
2.8	65.41	102.20	204.40	245.28	327.04
3.0	70.08	109.50	219.00	262.80	350.04
3.2	74.75	116.80	233.60	280.00	373.76
3.5	81.76	127.75	255.50	306.60	408.80
4.0	93.44	146.00	292.00	350.40	467.20
4.5	105.12	164.25	328.50	394.20	525.60
5.0	116.80	182.50	365.00	438.00	584.00
5.5	128.48	200.75	401.50	481.80	642.40
6.0	140.16	219.00	438.00	525.60	700.80
7.0	163.52	255.50	511.00	613.20	817.60
8.0	186.88	292.00	584.00	700.80	934.40
9.0	210.24	328.50	657.00	788.40	1051.20
10.0	233.60	365.00	730.00	876.00	1168.00
11.0	256.96	401.50	803.00	963.60	1284.80
12.0	280.32	438.00	876.00	1051.20	1401.60
12.7	296.67	463.55	927.10	1112.52	1483.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 รายละเอียดของเหล็กแผ่นดำ HOT ROLLED STEEL PLATE AND SHEET Grade :  
SS400, SS490, SS540, SM400A, SM490YA, SPHC, SG295, A36, A572Gr50, A283C โดยผ่าน  
มาตรฐาน มอก. 528-2540, มอก. 1479-2541 และ มอก. 1499-2541 (ต่อ)

### เหล็กแผ่นดำ HOT ROLLED STEEL PLATE AND SHEET [ต่อ]

Grade : SS400, SS490, SS540, SM400A, SM490YA, SPHC, SG295

• A36, A572Gr50, A283C



มอก. 528-2540  
มอก. 1479-2541  
มอก. 1499-2541



ความหนา (mm.)	น้ำหนัก (Kg.)				
	4' x 8' [1219x 2438mm.]	5' x 10' [1524x 3048mm.]	5' x 20' [2524x 6096mm.]	6' x 20' [1829x 6096mm.]	8' x 20' [2438 x 6096mm.]
13	303.68	474.50	949.00	1138.80	1518.40
14	327.04	511.00	1022.00	1226.40	1635.20
15	350.40	547.50	1095.00	1314.00	1752.00
16	373.76	584.00	1168.00	1401.60	1868.80
19	443.84	693.50	1387.00	1664.40	2219.20
20	467.20	730.00	1460.00	1752.00	2336.00
22	513.92	803.00	1606.00	1927.20	2579.60
25	584.00	912.50	1825.00	2190.00	2920.00
28	654.08	1022.00	2044.00	2452.80	3270.40
30	700.80	1095.00	2190.00	2628.00	3504.00
32	747.52	1168.00	2336.00	2803.20	3737.60
34	794.24	1241.00	2482.00	2978.40	3971.20
35	817.60	1277.50	2555.00	3066.00	4088.00
36	840.96	1314.00	2628.00	3153.60	4204.08
38	887.68	1387.00	2774.00	3328.80	4438.40
40	934.40	1460.00	2920.00	3504.00	4672.00
45	1051.20	1642.50	3285.00	3942.00	5256.00
50	1168.00	1825.00	3650.00	4380.00	5840.00
60	1401.60	2190.00	4380.00	5256.00	7008.00
70	1635.20	2555.00	5110.00	6132.00	8176.00
80	1868.80	2920.00	5840.00	7008.00	9344.00
90	2102.40	3285.00	6570.00	7884.00	10512.00
100	2336.00	3650.00	7300.00	8760.00	11680.00

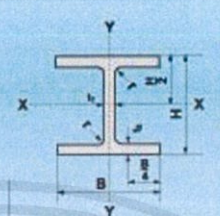
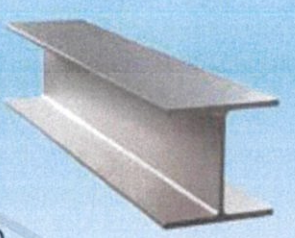
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 รายละเอียดข้อมูลคุณสมบัติของ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) จาก Shanghai Horse Construction Co., Ltd. [10]

Weight	600 g/cm <sup>2</sup>
Thickness	0.333 mm
Tensile Strength	4.93 x 10 <sup>5</sup> psi
	3400 MPa
Modulus of Elasticity	34 x 10 <sup>5</sup> psi
	234500 MPa
Elongation	> 1.7 %
Density	1.8 g/cc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ตารางที่ ง-4 รายละเอียดของเหล็ก Wide Flange หรือ H-Beam แสดงขนาดหน้าตัดและน้ำหนักต่อเมตรของเหล็ก grade : SS400 และ SS540 โดยผ่านมาตรฐาน TIS 1227-1996 จากบริษัท ทักซิณาเมทัล จำกัด [9]

## H-BEAMS TIS 1227-1996 TIS STANDARD

Nominal size	Weight	Sectional Dimension						Sectional Area	Moment of Inertia			Radius of Gyration		Modulus of Section	
		H	B	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	r	I <sub>x</sub>		I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	r <sub>x</sub>	r <sub>y</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>	
mm	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	
100x50	9.30	100	50	5.0	7	8	11.85	187	14.8	3.98	1.12	37.5	5.91		
100x100	17.2	100	100	6.0	8	10	21.90	383	134	4.2	2.47	77	27		
125x125	23.8	125	125	6.5	9	10	30.31	847	293	5.3	3.11	136	47		
150x75	14.0	150	75	5.0	7	8	17.85	666	50	6.1	1.66	89	13		
150x100	21.1	148	100	6.0	9	11	26.84	1,020	151	6.2	2.37	138	30		
150x150	31.5	150	150	7.0	10	11	40.14	1,640	563	6.4	3.75	219	75		
175x175	40.2	175	175	7.5	11	12	51.21	2,880	984	7.5	4.38	330	112		
200x100	▽18.2	198	99	4.5	7	11	23.18	1,580	114	8.3	2.21	160	23		
	21.3	200	100	5.5	8	11	27.16	1,840	134	8.2	2.22	184	27		
200x150	30.6	194	150	6.0	9	13	39.01	2,690	507	8.3	3.61	277	68		
	49.9	200	200	8.0	12	13	63.53	4,720	1,600	8.6	5.02	472	160		
200x200	* 56.2○	200	204	12.0	12	13	71.53	4,980	1,700	8.4	4.88	498	167		
	* 65.7	208	202	10.0	16	13	83.69	6,530	2,200	8.8	5.13	628	218		
250x125	▽25.7	248	124	5.0	8	12	32.68	3,540	255	10.4	2.79	285	41		
	29.6	250	125	6.0	9	12	37.66	4,050	294	10.4	2.79	324	47		
250x175	44.1	244	175	7.0	11	16	56.24	6,120	984	10.4	4.18	502	113		
250x250	▽64.4○	244	252	11.0	11	16	82.06	8,790	2,940	10.3	5.98	720	233		
	* 66.5	248	249	8.0	13	16	84.70	9,930	3,350	10.8	6.29	801	269		
	72.4	250	250	9.0	14	16	92.18	10,800	3,650	10.8	6.29	867	292		
	* 82.2○	250	255	14.0	14	16	104.70	11,500	3,880	10.5	6.09	919	304		
300x150	▽32.0	298	149	5.5	8	13	40.80	6,320	442	12.4	3.29	424	59		
	36.7	300	150	6.5	9	13	46.78	7,210	508	12.4	3.29	481	68		
300x200	56.8	294	200	8.0	12	18	72.38	11,300	1,600	12.5	4.71	771	160		
	* 65.4	298	201	9.0	14	18	83.36	13,300	1,900	12.6	4.77	893	189		
300x250	▽84.5○	294	302	12.0	12	18	107.70	16,900	5,520	12.5	7.16	1,150	365		
	* 87.0	298	299	9.0	14	18	110.80	18,800	6,240	13.0	7.51	1,270	417		
300x300	94.0○	300	300	10.0	15	18	119.80	20,400	6,750	13.1	7.51	1,360	450		
	*106.0○	300	305	15.0	15	18	134.80	21,500	7,100	12.6	7.26	1,440	466		
	*106.0	304	301	11.0	17	18	134.80	23,400	7,730	13.2	7.57	1,540	514		
350x175	▽41.4	348	174	6.0	9	14	52.68	11,100	792	14.5	3.88	641	91		
	49.6	350	175	7.0	11	14	63.14	13,600	984	14.7	3.95	775	112		
	* 57.8	354	176	8.0	13	14	73.68	16,100	1,180	14.8	4.01	909	134		
350x250	* 69.2	336	249	8.0	12	20	88.15	18,500	3,090	14.5	5.92	1,100	248		
	79.7	340	250	9.0	14	20	101.50	21,700	3,650	14.6	6.00	1,280	292		
350x350	*106.0○	338	351	13.0	13	20	135.30	28,200	9,380	14.4	8.33	1,670	534		
	▽115.0	344	348	10.0	16	20	146.00	33,300	11,200	15.1	8.78	1,940	646		
	*131.0	344	354	16.0	16	20	166.60	35,300	11,800	14.6	8.43	2,050	669		
	137.0	350	350	12.0	19	20	173.90	40,300	13,600	15.2	8.84	2,300	776		
	*156.0	350	357	19.0	19	20	198.40	42,800	14,400	14.7	8.53	2,450	809		

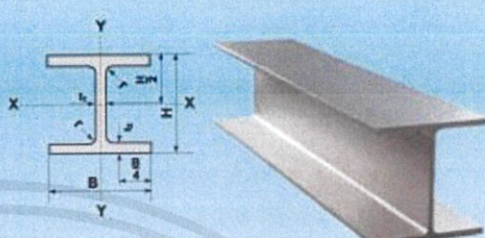
**Note** \* Please contact us in advance for these items  
 ○ These sizes can also be used for H-Piles  
 ▽ VALUE SERIES



**บริษัท ทักซิณาเมทัล จำกัด**  
**ตัวแทนจำหน่ายเหล็กรูปพรรณรีดร้อน SYS จ.ภูเก็ต**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ตารางที่ ง-5 รายละเอียดของเหล็ก Wide Flange หรือ H-Beam แสดงขนาดหน้าตัดและน้ำหนักต่อเมตรของเหล็ก grade : SS400 และ SS540 โดยผ่านมาตรฐาน TIS 1227-1996 จากบริษัท ทักซิมา เมทัล จำกัด (ต่อ)



### H-BEAMS TIS1227-1996 TIS STANDARD

Nominal size	Weight	Sectional Dimension					Sectional Area	Moment of Inertia		Radius of Gyration		Modulus of Section	
		H	B	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	r		I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	r <sub>x</sub>	r <sub>y</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>
mm	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
400x200	56.6	396	199	7.0	11	16	72.16	20,000	1,450	16.7	4.48	1,010	145
	66.0	400	200	8.0	13	16	84.12	23,700	1,740	16.8	4.54	1,190	174
	75.5	404	201	9.0	15	16	96.16	27,500	2,030	16.9	4.60	1,360	202
400x300	94.3	386	299	9.0	14	22	120.10	33,700	6,240	16.7	7.21	1,740	418
	107.0	390	300	10.0	16	22	136.00	38,700	7,210	16.9	7.28	1,980	481
	140.0	388	402	15.0	15	22	178.50	49,000	16,300	16.8	9.54	2,520	809
400x400	147.0	394	398	11.0	18	22	186.80	56,100	18,900	17.3	10.10	2,850	951
	172.0	400	400	13.0	21	22	218.70	66,600	22,400	17.5	10.10	3,330	1,120
	197.0	400	408	21.0	21	22	250.70	70,900	23,800	16.8	9.75	3,540	1,170
450x200	232.0	414	405	18.0	28	22	295.40	92,800	31,000	17.7	10.20	4,480	1,530
	66.2	448	199	8.0	12	18	84.30	28,700	1,580	18.5	4.33	1,290	159
	76.0	450	200	9.0	14	18	96.78	33,500	1,870	18.6	4.40	1,490	187
450x300	88.9	456	201	10.0	17	18	113.30	40,400	2,310	18.9	4.51	1,770	230
	106.0	434	299	10.0	15	24	135.00	46,800	8,690	18.6	7.04	2,160	448
	124.0	440	300	11.0	18	24	157.40	56,100	8,110	18.9	7.18	2,550	541
500x200	145.0	446	302	13.0	21	24	184.30	66,400	9,660	19.0	7.24	2,980	639
	79.5	496	199	9.0	14	20	101.30	41,900	1,840	20.3	4.27	1,690	185
	89.6	500	200	10.0	16	20	114.20	47,800	2,140	20.5	4.33	1,910	214
500x300	103.0	506	201	11.0	19	20	131.30	56,500	2,580	20.7	4.43	2,230	257
	114.0	482	300	11.0	15	26	145.50	60,400	6,760	20.4	6.82	2,500	451
	128.0	488	300	11.0	18	26	163.50	71,000	8,110	20.8	7.04	2,910	541
600x200	150.0	494	302	13.0	21	26	191.40	83,800	9,660	20.9	7.10	3,390	640
	94.6	596	199	10.0	15	22	120.50	68,700	1,980	23.9	4.05	2,310	199
	106.0	600	200	11.0	17	22	134.40	77,600	2,280	24.0	4.12	2,590	228
600x300	120.0	606	201	12.0	20	22	152.50	90,400	2,720	24.3	4.22	2,980	271
	134.0	612	202	13.0	23	22	170.70	103,000	3,180	24.6	4.31	3,380	314
	137.0	582	300	12.0	17	28	174.50	103,000	7,670	24.3	6.63	3,530	511
700x300	151.0	588	300	12.0	20	28	192.50	118,000	9,020	24.8	6.85	4,020	601
	175.0	594	302	14.0	23	28	222.40	137,000	10,600	24.9	6.90	4,620	701
	166.0	692	300	13.0	20	28	211.50	172,000	9,020	26.6	6.53	4,980	602
800x300	185.0	700	300	13.0	24	28	235.50	201,000	10,800	29.3	6.78	5,760	722
	191.0	792	300	14.0	22	28	243.40	254,000	9,930	32.3	6.39	6,410	662
	210.0	800	300	14.0	26	28	267.40	292,000	11,700	33.0	6.62	7,290	782
900x300	213.0	890	299	15.0	23	28	270.90	345,000	10,300	35.7	6.16	7,760	688
	243.0	900	300	16.0	28	28	309.80	411,000	12,600	36.4	6.39	9,140	843
	286.0	912	302	18.0	34	28	364.00	498,000	15,700	37.0	6.56	10,900	1,040

**Note** \* Please contact us in advance for these items  
 ○ These sizes can also be used for H-Piles  
 ◐ VALUE SERIES



บริษัท ทักซิมาเมทัล จำกัด

ตัวแทนจำหน่ายเหล็กgrupพรรณริศร้อน SYS จ.ภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้