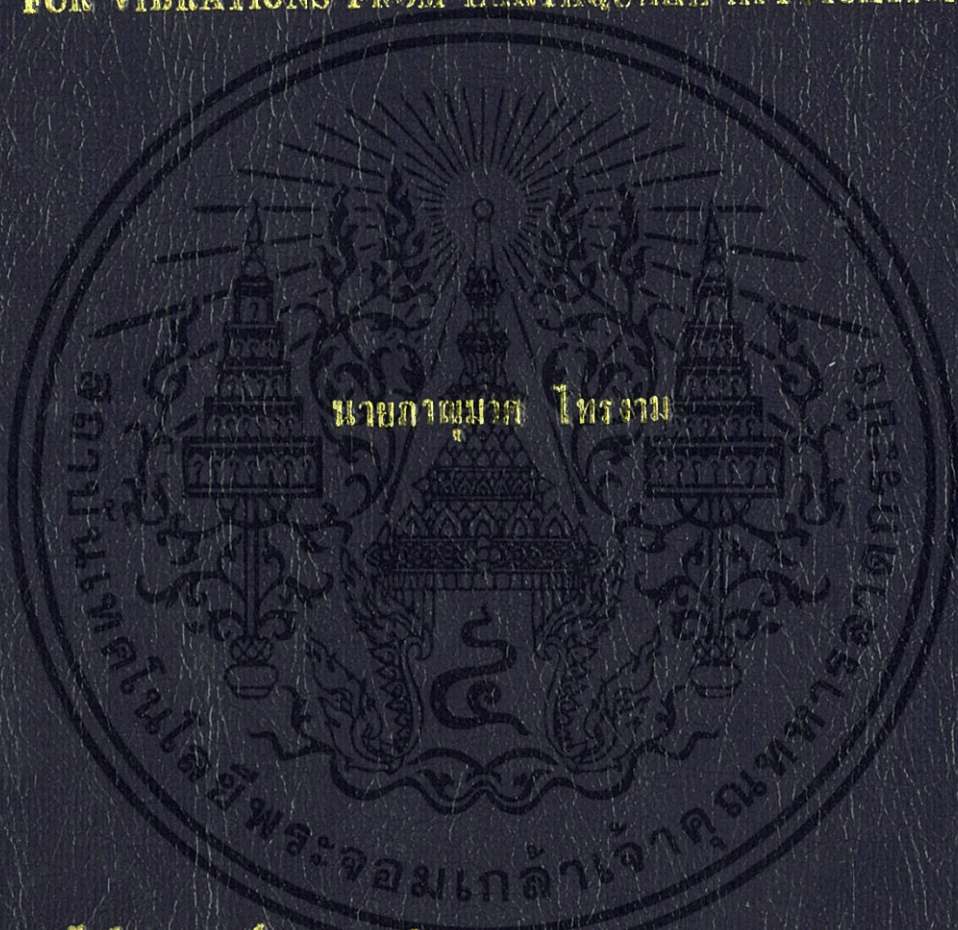


การศึกษานวัตกรรมของมวลตบ่วงสั่นสะเทือนโดยน้ำหนักน้ำ เพื่อประยุกต์ใช้
สำหรับตารเกิดการณ์ไหวที่เกิดจากธรณแผ่นดินไหว

A STUDY OF BEHAVIOR OF TUNED MASS DAMPERS USING WATER TANK
FOR VIBRATIONS FROM EARTHQUAKE APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมของมวลหน่วงลดแรงสั่นสะเทือนโดยแท่งน้ำ เพื่อประยุกต์ใช้
สำหรับการเกิดการสั่นไหวที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว

A STUDY OF BEHAVIOR OF TUNED MASS DAMPERS USING WATER TANK
FOR VIBRATIONS FROM EARTHQUAKE APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF BEHAVIOR OF TUNED MASS DAMPERS USING WATER TANK
FOR VIBRATIONS FROM EARTHQUAKE APPLICATIONS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมของมวลหน่วงลดแรงสั่นสะเทือนโดยแท่งค้ำน้ำ เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการเกิดการสั่นไหวที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว

A STUDY OF BEHAVIOR OF TUNED MASS DAMPERS USING WATER TANK FOR VIBRATIONS FROM EARTHQUAKE APPLICATIONS

นักศึกษา นาย ภาณุมาศ ไทรงาม รหัสประจำตัว 53011237

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
รศ.สุพจน์ ศรีนิล	
อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง	
ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร	
ดร.อภิวุฒิย์ สุจริตพงศ์	

วันที่ 19 มีนาคม 2557 เวลา 11.00 น. สถานที่สอบ อาคารเรียนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา CV202

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ สุพจน์ ศรีนิล)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 31 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมของมวลหน่วงลดแรงสั่นสะเทือนโดยทางค้ำน้ำ เพื่อ
ประยุกต์ใช้สำหรับการเกิดการสั่นไหวที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว
A STUDY OF BEHAVIOR OF TUNED MASS DAMPERS USING WATER
TANK FOR VIBRATIONS FROM EARTHQUAKE APPLICATIONS

นักศึกษา นาย ภาณุมาศ ไทรงาม รหัสประจำตัว 53011237

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโครงสร้างอาคารสูงมีความชะงืดมาก เนื่องจากน้ำหนักวัสดุก่อสร้างมีแนวโน้มที่จะมีขนาดเบาและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงทำให้วิศวกรรมโครงสร้างได้ตระหนักถึงปัญหาเกี่ยวกับการสั่นไหวของอาคารสูงเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจากการสั่นไหวที่มีผลมาจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหว เพื่อแก้ปัญหาจากการการสั่นไหวนี้ ระบบควบคุมการสั่นไหวจึงถูกนำมาใช้งาน โดยระบบควบคุมการสั่นไหวที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องคือระบบมวลหน่วงปรับค่า (Tuned mass damper) ซึ่งเป็นระบบควบคุมระบบหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้ในโครงสร้าง บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการตรวจสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ถังน้ำเป็นมวลหน่วงปรับค่า (Tuned Mass Damper) โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาอาคารคอนกรีต 3 มิติ ทำการศึกษาโครงสร้างอาคารคอนกรีต 4, 8 และ 12 ชั้น ในกรณีไม่พิจารณาค่าการหน่วง(Damping) ของอาคารโดยถังน้ำถูกนำมาวางบนหลังคาของอาคารคอนกรีต โดยมวลของทั้งระบบรวมมาจากน้ำ , คาน เสาและพื้น ที่มีค่าที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาพฤติกรรมของถังน้ำภายใต้ ข้อมูลแผ่นดินไหวได้แก่ El-Centro 1940 โดยศึกษาภายใต้เงื่อนไขระดับของน้ำในถังเต็มถังและตัวอาคารไม่มีค่าอัตราการหน่วง

TITLE A STUDY OF BEHAVIOR OF TUNED MASS DAMPERS USING WATER
TANK FOR VIBRATIONS FROM EARTHQUAKE APPLICATIONS

STUDENT MR. PANUMAS SAINGAM STUDENT ID 53011237

ADVISOR DR. ARTHIT PETCHSASITHON

FIELD CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT CIVIL ENGINEERING

ABSTRACT

Currently, The high-rise structures have high slenderness ratio according to the fact that the weight of construction materials tend to be lighter and more flexible. Structural engineer is interested in the problem relating to vibration of tall buildings resulting from wind and earthquake. To solve problem of vibration , stabilization control system was implemented . In this project , stabilization control system has been developed , the system continuously adjusts the TMD (Tuned mass damper) , a control system which is used in the structure This project presents an analysis and examination of TMD in order to study the possibility of using a water tank to adjust the TMD (Tuned Mass Damper) using finite element method. A study of three dimensional concrete building structures of four, eight , and twelve storey neglecting damping of building with water tank placing on the roof of the concrete building. The total mass of the whole system includes water , beams , columns and slabs. The behavior of the tank subjected to El-Centro 1940 earthquake data was studied under the condition of full water in a tank and the building without damping.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากหลายฝ่ายขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งในความกรุณาของ ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำที่ดี รวมทั้งคำแนะนำที่ดีในการปฏิบัติงาน ตลอดจนแนวความคิดต่างๆ รวมทั้งช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น และช่วยตรวจแก้ไขรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิ์ ประสาทวิชาความรู้ ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ศึกษาเล่าเรียน

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ข้าพเจ้ารัก ที่คอยเป็นกำลังใจยามที่ข้าพเจ้าเหนื่อยล้า และให้การสนับสนุนส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	หน้าอนุมัติ	ก
	บทคัดย่อภาษาไทย	ข
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
	กิตติกรรมประกาศ	ง
	สารบัญ	จ
	สารบัญตาราง	ช
	สารบัญรูป	ฅ
1	บทนำ	
	1.1 กล่าวนำ	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
	1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
	1.4 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย	3
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2	วรรณกรรมปริทัศน์	
	2.1 นิยาม Tuned Mass Damper	4
	2.2 น้ำหนักบรรทุก (Loading)	6
	2.3 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว(Earthquake Characteristics)	7
	2.4 ลักษณะของสถานที่เกิดแผ่นดินไหว (Site Characteristics)	10
	2.5 ลักษณะของโครงสร้างอาคาร (Structural Characteristics)	12
	2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
3	วิธีการดำเนินงาน	
3.1	ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ Tuned Mass Damper	19
3.2	ศึกษาการใช้โปรแกรมที่ใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์	19
3.3	ศึกษาข้อมูลแผ่นดินไหว El - Centro 1940	19
3.4	ทำการจำลองโมเดลอาคารสูง 4 , 8 , 12 ชั้น	19
4	ผลการทดลอง	
4.1	กรณีอาคารสูง 4 ชั้น	32
4.1.1	Deflection of Trans1 Point 175	32
4.1.2	Deflection of Trans2 Point 175	34
4.1.3	Deflection of Trans3 Point 175	36
4.1.4	Rotn1 Point 175	38
4.1.5	Rotn2 Point 175	40
4.1.6	Rotn1 Point 175	42
4.2	กรณีอาคารสูง 8 ชั้น	44
4.2.1	Deflection of Trans1 Point 398	44
4.2.2	Deflection of Trans2 Point 398	46
4.2.3	Deflection of Trans3 Point 398	48
4.2.4	Rotn1 Point 398	50
4.2.5	Rotn2 Point 398	52
4.2.6	Rotn3 Point 398	54
4.3	กรณีอาคารสูง 12 ชั้น	56
4.3.1	Deflection of Trans1 Point 320	56
4.3.2	Deflection of Trans2 Point 320	58
4.3.3	Deflection of Trans3 Point 320	60
4.3.4	Rotn1 Point 320	62
4.3.5	Rotn2 Point 320	64
4.3.6	Rotn3 Point 320	66

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
	5.1 สรุปผลการทดลอง	68
	5.2 ข้อเสนอแนะ	68



สารบัญตาราง

บทที่	เรื่อง	หน้า
4	ผลตอบสนองการทำวิจัย	
4.1	กรณีอาคารสูง 4 ชั้น	
	ตารางที่ 4.1.1 ผลการทดลอง Deflection of Trans1 Point 175	32
	ตารางที่ 4.1.2 ผลการทดลอง Deflection of Trans2 Point 175	34
	ตารางที่ 4.1.3 ผลการทดลอง Deflection of Trans3 Point 175	36
	ตารางที่ 4.1.4 ผลการทดลอง Rotn1 Point 175	38
	ตารางที่ 4.1.5 ผลการทดลอง Rotn2 Point 175	40
	ตารางที่ 4.1.6 ผลการทดลอง Rotn1 Point 175	42
4.2	กรณีอาคารสูง 8 ชั้น	
	ตารางที่ 4.2.1 ผลการทดลอง Deflection of Trans1 Point 398	44
	ตารางที่ 4.2.2 ผลการทดลอง Deflection of Trans2 Point 398	46
	ตารางที่ 4.2.3 ผลการทดลอง Deflection of Trans3 Point 398	48
	ตารางที่ 4.2.4 ผลการทดลอง Rotn1 Point 398	50
	ตารางที่ 4.2.5 ผลการทดลอง Rotn2 Point 398	52
	ตารางที่ 4.2.6 ผลการทดลอง Rotn3 Point 398	54
4.3	กรณีอาคารสูง 12 ชั้น	56
	ตารางที่ 4.3.1 ผลการทดลอง Deflection of Trans1 Point 320	58
	ตารางที่ 4.3.2 ผลการทดลอง Deflection of Trans2 Point 320	60
	ตารางที่ 4.3.3 ผลการทดลอง Deflection of Trans3 Point 320	62
	ตารางที่ 4.3.4 ผลการทดลอง Rotn1 Point 320	64
	ตารางที่ 4.3.5 ผลการทดลอง Rotn2 Point 320	66
	ตารางที่ 4.3.6 ผลการทดลอง Rotn3 Point 320	68

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงแบบจำลองของระบบ Tune Mass Damper	4
รูปที่ 2.2	การเปรียบเทียบผลกระทบของแผ่นดินไหวระหว่างอาคารสูงและอาคารธรรมดา 7	
รูปที่ 2.3	คลื่นแผ่นดินไหวของ El Centro ground motion (1940)	7
รูปที่ 2.4	แผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย	8
รูปที่ 2.5	คาบการสั่นไหวและค่าความถี่	12
รูปที่ 2.6	แบบจำลอง 2 มิติ อาคารสูง 3 ชั้น	14
รูปที่ 2.7	แบบจำลอง 3 มิติอาคาร 3 ชั้นกับแท่งค้ำน้ำสูง 2m	14
รูปที่ 2.8	แบบจำลอง 2 มิติ อาคารสูง 7 ชั้น	14
รูปที่ 2.9	แบบจำลอง 3 มิติอาคาร 7 ชั้นกับแท่งค้ำน้ำสูง 4m	14
รูปที่ 2.10	แบบจำลอง 2 มิติ อาคารสูง 10 ชั้น	14
รูปที่ 2.11	แบบจำลอง 3 มิติอาคาร 10 ชั้นกับแท่งค้ำน้ำสูง 6m	14
รูปที่ 2.12	ค่าความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro	15
รูปที่ 2.13	แสดงระยะการโก่งตัว & ค่าความเร่งของข้อมูล El-Centro Earthquake data สำหรับโมเดลอาคาร 3 ชั้น	15

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 2.14	แสดงระยะการโก่งตัว & ค่าความเร่งของข้อมูล El-Centro Earthquake data สำหรับโมเดลอาคาร 7 ชั้น	16
รูปที่ 2.15	แสดงระยะการโก่งตัว & ค่าความเร่งของข้อมูล El-Centro Earthquake data สำหรับโมเดลอาคาร 10 ชั้น	16
รูปที่ 3.1	แสดงการเลือกหน่วยตามที่ใช้ต้องการ	19
รูปที่ 3.2	แสดงรูปแบบโมเดลที่ใช้ต้องการวิเคราะห์	20
รูปที่ 3.3	แสดงการใส่ค่าจำนวนชั้นและระยะห่างระหว่างช่วง	21
รูปที่ 3.4	ผลลัพธ์ที่ได้จากการใส่ค่าต่างๆ	22
รูปที่ 3.5	แสดงการกำหนดชนิดของวัสดุ	22
รูปที่ 3.6	รูปแสดงหน้าต่างการใส่ค่าและชนิดของวัสดุที่ต้องการ	23
รูปที่ 3.7	แสดงการกำหนดขนาดหน้าตัดของวัสดุ	23
รูปที่ 3.8	รูปแสดงหน้าต่างชนิดของวัสดุและหน้าตัดของวัสดุชนิดต่างๆ	24
รูปที่ 3.9	รูปแสดงหน้าต่างการใส่ค่าขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริม	24
รูปที่ 3.10	รูปแสดงการลบวัตถุทั้งหมด	25
รูปที่ 3.11	รูปแสดงหน้าต่างการสร้างวัตถุที่ต้องการ	25
รูปที่ 3.12	ผลลัพธ์ที่ได้จากการวาดวัตถุ 1 ที่	26
รูปที่ 3.13	แสดงผลที่ได้จากการวาดวัตถุทั้งหมด	26
รูปที่ 3.14	แสดงผลการเลือก Joint Restraints เป็นแบบ Fixed	27
รูปที่ 3.15	ผลลัพธ์ที่ได้จากการวาดSupport ทั้งหมด	27
รูปที่ 3.16	รูปแสดงหน้าต่างการกำหนด Load Case กรณีต่างๆ	28
รูปที่ 3.17	รูปแสดงหน้าต่างกรณี Load Case ต่างๆ	28
รูปที่ 3.18	รูปแสดงหน้าต่างการกำหนด Time และ Value ของ Time History	29
รูปที่ 3.19	รูปแสดงการ Set Analysis Case	30
รูปที่ 3.20	แสดงการRun ของโปรแกรม	30
รูปที่ 3.21	แสดงรูปลักษณะวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป	31
รูปที่ 3.22	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง ณ จุดที่พิจารณา	31
รูปที่ 4.1	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran1 (cm) ของอาคาร 4 ชั้น	33
รูปที่ 4.2	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran2 (cm) ของอาคาร 4 ชั้น	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 4.3	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran3 (cm) ของอาคาร 4 ชั้น	37
รูปที่ 4.4	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn1 (Rad) ของอาคาร 4 ชั้น	39
รูปที่ 4.5	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn2 (Rad) ของอาคาร 4 ชั้น	41
รูปที่ 4.6	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn3 (Rad) ของอาคาร 4 ชั้น	43
รูปที่ 4.7	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran1 (cm) ของอาคาร 8 ชั้น	45
รูปที่ 4.8	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran2 (cm) ของอาคาร 8 ชั้น	47
รูปที่ 4.9	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran3 (cm) ของอาคาร 8 ชั้น	49
รูปที่ 4.10	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn1 (Rad) ของอาคาร 8 ชั้น	51
รูปที่ 4.11	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn2 (Rad) ของอาคาร 8 ชั้น	53
รูปที่ 4.12	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn3 (Rad) ของอาคาร 8 ชั้น	55
รูปที่ 4.13	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran1 (cm) ของอาคาร 12 ชั้น	57
รูปที่ 4.14	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran2 (cm) ของอาคาร 12 ชั้น	59
รูปที่ 4.15	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับDeflection of Tran3 (cm) ของอาคาร 12 ชั้น	61
รูปที่ 4.16	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn1 (Rad) ของอาคาร 12 ชั้น	63
รูปที่ 4.17	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn2 (Rad) ของอาคาร 12 ชั้น	65
รูปที่ 4.18	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถึงน้ำ(m) กับRotn3 (Rad) ของอาคาร 12 ชั้น	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันโครงสร้างในประเทศไทยพัฒนาไปอย่างมาก เห็นได้ว่าเราสามารถสร้างอาคารสูง ที่มีความสูงมากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักวัสดุก่อสร้างมีแนวโน้มที่จะมีขนาดเบาและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงทำให้วิศวกรโครงสร้างได้ตระหนักถึงปัญหาเกี่ยวข้องกับการสั่นไหวของอาคารสูงเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจากการสั่นไหวที่มีผลมาจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหว เพื่อแก้ปัญหาจากการการสั่นไหวนี้ ระบบควบคุมการสั่นไหวจึงถูกนำมาใช้งาน โดยระบบควบคุมการสั่นไหวที่มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องคือระบบมวลหน่วงปรับค่า(Tuned mass damper) ซึ่งเป็นระบบควบคุมระบบหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้ในโครงสร้าง โดยการออกแบบระบบนี้จะสมมติว่าโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติก (elastic) แม้ว่าโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่รุนแรงมากจะมีความเสียหายและมีพฤติกรรมแบบอินอีลาสติก (inelastic) แล้วก็ตาม ดังนั้น การทำการศึกษานิววิจยฉบับนี้จะศึกษาพฤติกรรมของอาคารจำลองโดยทำการติดตั้งแทงค์น้ำ(water tank)ไว้ชั้นบนสุดของอาคารจำลอง เพื่อใช้เป็นมวลหน่วงปรับลดค่าในการปรับลดแรงสั่นสะเทือนจากการสั่นไหวที่มีผลมาจากแรงแผ่นดินไหว ในกรงานวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาอาคารตัวอย่างที่เป็นโครงข้อแข็งที่มีชั้นความสูงที่แตกต่างกันออกไป โดยจำนวนชั้นความสูงที่ศึกษาคือ อาคาร 4 , 8 และ 12 ชั้น ในกรณีไม่พิจารณา ค่า Damping Ratio ของตัวอาคาร ทำการจำลองอาคารขึ้นโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาระยะการโก่งตัวด้านข้างที่มีความเกี่ยวข้องจากผลของการปรับลดแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากการวางถังน้ำเพื่อเป็นมวลหน่วงปรับลดค่าไว้บนอาคารสูง 4 , 8 , และ 12 ชั้น

1.2.2 เพื่อศึกษามวลที่เหมาะสมของแทงค์น้ำ ที่ใช้เป็นตัวปรับลดแรงสั่นสะเทือนจากการสั่นไหวที่มีผลมาจากคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro บนอาคารจำลองสูง 4 ,8 และ 12 ชั้น

1.3 ขอบเขตขอบของโครงการวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาระยะการโก่งตัวด้านข้างเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนเฉพาะอาคารตัวอย่างที่ใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 , 8 และ 12 ชั้นโดยอาคารที่ศึกษาเป็นอาคารที่จำลองขึ้นโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3.2 ทำการศึกษาเฉพาะคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro1940 North South Component (Peknold Version) จำนวน 1559 ช่วง 0.02 วินาที

1.3.3 ทำการศึกษาโดยกำหนดให้อาคารแบบจำลองเป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมมีจำนวนช่วงเสาเท่ากับ 5 ช่วงในแต่ละชั้นสูง1ชั้น และระยะช่วงเสาแต่ละห้องมีขนาดความกว้าง 4 m ความยาว 4 m และความสูง 3 m โดยทำการจำลองอาคารแบบที่ไม่มี Damping Ratio

1.3.4 ทำการศึกษาการปรับลดแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากการใช้แท่งค้ำน้ำที่ใส่น้ำเต็มแท่งเป็นมวลหน่วงปรับลดค่า(Tuned mass damper,TMD) โดยกำหนดให้แท่งค้ำน้ำมีขารองรับที่ฐาน 4ขาแต่ละขามีขนาดความกว้าง 20 cm , ความยาว 20 cm และความสูง 1 m นับจากชั้นบนสุดของอาคาร, กำหนดให้แท่งค้ำน้ำมีขนาดความกว้าง 4 m ความยาว 4 m และทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของแท่งค้ำน้ำ

1.3.5 ทำการศึกษาโดยใช้แท่งค้ำน้ำเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวางแท่งค้ำน้ำไว้ตรงกลางของบนยอดสุดของอาคารจำลองที่ทำการศึกษา

1.4 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย

1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ Tuned Mass Dampers (TMD)

1.4.2 ศึกษาพฤติกรรมและสมการของระบบ Tuned Mass Dampers (TMD)

1.4.3 ศึกษาหาข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro1940 North South Component (Peknold Version) 1559 points at equal spacing of 0.02 sec

1.4.4 ทำการจำลองโมเดลอาคารสูงที่ไม่มีค่า Damping Ratio 4 , 8 และ 12 ชั้น โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.5 ทำการใส่ค่าข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro1940 North South Component (Peknold Version) 1559 points at equal spacing of 0.02 sec ลงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.6 ทำการจำลองโมเดลแท่งค้ำน้ำโดยใช้ขนาดความสูงที่แตกต่างกัน

1.4.7 ทำการวิเคราะห์ผลของระยะการโก่งตัวด้านข้างเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro ทั้งในกรณีที่ไม่มีแท่งค้ำน้ำและกรณีที่มีแท่งค้ำน้ำ(น้ำเต็ม)จากการใช้ความสูงของแท่งค้ำน้ำที่แตกต่างกัน

1.4.8 ทำการสรุปผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อเข้าใจการลดแรงสั่นสะเทือนจากระบบTuned Mass Damper ที่มีผลต่อการลดแรงสั่นสะเทือนในโครงสร้างอาคาร

1.5.2 เพื่อหามวลที่เหมาะสมของแท่งค้ำน้ำสำหรับอาคารสูง 4 , 8 และ 12ชั้น

1.5.3 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคารโดยใช้แท่งค้ำน้ำเป็น Tuned Mass Damper

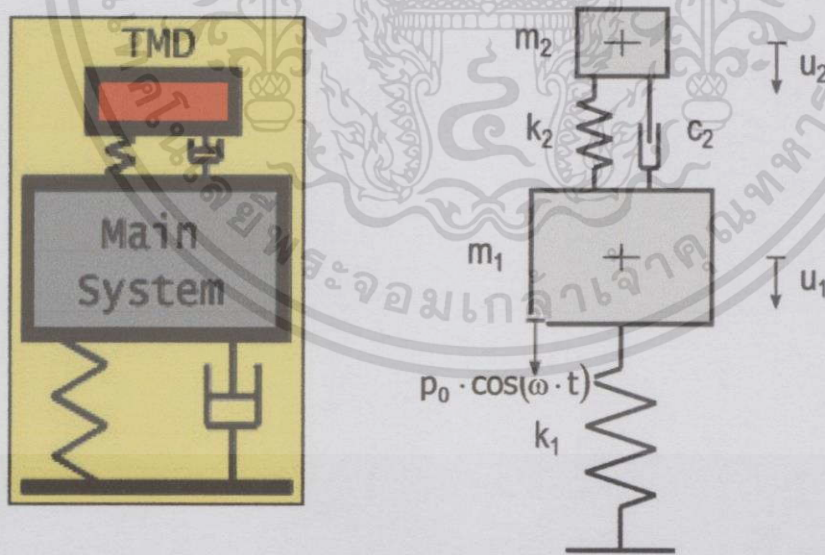
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 นิยาม Tuned Mass Damper

Tuned Mass Damper หรือ TMD คือมวลหน่วงปรับลดค่าการสั่นสะเทือนเป็นระบบตัวหน่วงที่มีแนวคิดการนำ oscillator ตัวที่ 1 (มวลของระบบเดิมหรือโครงสร้างเดิม) มาเชื่อมต่อกับ oscillator ตัวที่สอง(มวลหน่วงปรับลดค่าการสั่นสะเทือน,TMD) โดยถ้าทำการปรับจูนค่าอย่างถูกต้อง ค่าแอมพลิจูดสูงสุด(maximum amplitude) ของ oscillator ตัวที่ 1 จะมีผลลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นระยะๆ โดยการสั่นสะเทือนจะถูกถ่ายโอนไปยัง oscillator ตัวที่สอง

ตัวอย่างการใช้ Tuned Mass Damper , TMD เช่นใช้ในอาคารสูงใช้เพื่อลดการแกว่ง (swaying) ของตึกที่มีผลมาจากแรงแผ่นดินไหว โดยปกติบุคคลทั่วไปจะมีความรู้สึกไวต่อการแกว่ง (swaying) เมื่อมีการกระทำจากแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นการเพิ่ม TMD ทำให้อาคารหลักมีการแกว่งน้อยลงและลดการสั่นสะเทือนจนผู้คนที่อยู่บนอาคารไม่รู้สึกถึงแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของระบบ Tuned Mass Damper

จากรูปที่ 2.1 ระบบสปริงของ m_1, k_1, c_1 มี oscillator ที่เป็นตัวที่ถูกหน่วง (เปรียบเสมือนอาคารหลัก) และ m_2, k_2, c_2 เป็น oscillator ที่เป็นตัวหน่วง (เปรียบเสมือนการนำมวลที่มีขนาดมาติดกับอาคารหลัก) โดยที่ U_2 คือค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของ m_2 โดยบ่อยครั้งจะถูกแทนที่ด้วยตำแหน่งความสัมพันธ์ของ m_2 กับ m_1 ตัวอย่างเช่น $U_2 - U_1$

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบ Tuned Mass Damper โดยสมมติให้แรงการสั่นสะเทือนเป็นสัดส่วนกับความเร็ว และมีฟังก์ชันของแรงเป็น $p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$ ใน m_1 และทำผลลัพธ์ที่ออกมาของสมการให้ง่ายขึ้นโดยแสดงในรูปแบบสมการอนุพันธ์(differential equations)

ทำให้สมการวิเคราะห์ง่ายขึ้นโดยกำหนดการ $c_1 = 0$ (กำหนดให้ระบบอาคารหลักไม่มีค่า Damping) และทำการหาสมการอนุพันธ์ของระบบ U_1 และ U'_1

ทำการวิเคราะห์โดยการตัด Freebody Diagram ของระบบ

คิดมวล m_1 ทำการวิเคราะห์ 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1) $t = 0$

$$\text{สมการที่ได้คือ } (k_1 - m_1 \omega^2)A - m_2 \omega^2 C = P_0 \tag{ก}$$

กรณีที่ 2) $t = \pi/2$

$$\text{สมการที่ได้คือ } (k_1 - m_1 \omega^2)B - m_2 \omega^2 D = 0 \tag{ข}$$

คิดมวล m_2 ทำการวิเคราะห์ 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1) $t = 0$

$$\text{สมการที่ได้คือ } -k_2 A - c_2 \omega B + (k_2 - m_2 \omega^2)C + c_2 \omega D = 0 \tag{ค}$$

กรณีที่ 2) $t = \pi/2$

$$\text{สมการที่ได้คือ } c_2 \omega A - k_2 B - c_2 \omega C + (k_2 - m_2 \omega^2)D = 0 \tag{ง}$$

เขียนสมการ (ก) , (ข) , (ค) และ (ง) ให้อยู่ในรูปของ Matrix ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} k_1 - m_1 \omega^2 & 0 & -m_2 \omega^2 & 0 \\ 0 & k_1 - m_1 \omega^2 & 0 & -m_2 \omega^2 \\ -k_2 & -c_2 \omega & k_2 - m_2 \omega^2 & c_2 \omega \\ c_2 \omega & -k_2 & -c_2 \omega & k_2 - m_2 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.2 น้ำหนักบรรทุก(Loading)

ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคารนั้น แรงที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามทิศทางของแรงกระทำ คือประเภทแรก แรงกระทำในแนวดิ่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Load) ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ซึ่งคำนวณได้จากขนาดและความหนาแน่นของวัสดุ น้ำหนักของผู้ใช้อาคาร และ ประเภทที่ 2 แรงกระทำด้านข้าง(Lateral Load) เนื่องจากภัยพิบัติ ได้แก่แรงลม และแรงแผ่นดินไหว สำหรับแรงกระทำประเภทนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ อากาศ และลักษณะทางธรณีวิทยา ซึ่งมีความแปรปรวนและคาดการณ์ได้ยากกว่าแรงกระทำประเภทแรก โหลดที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการวิจัยนี้คือ

2.2.1 Dead Load

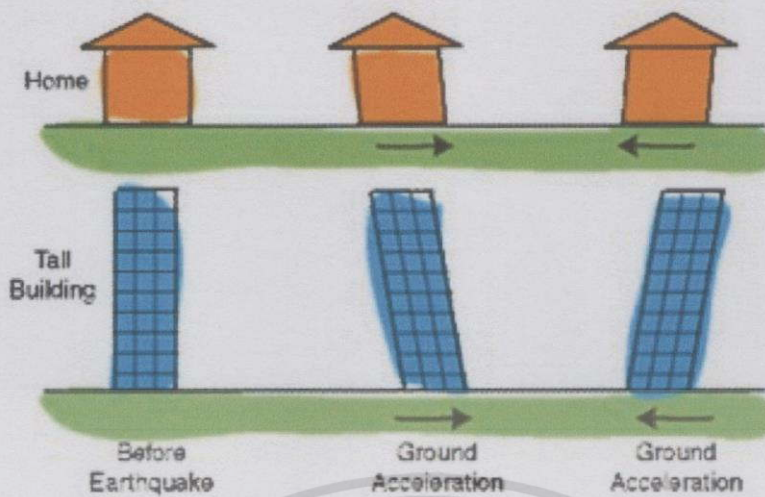
น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load , DL) หมายถึงน้ำหนักบรรทุกที่กระทำอยู่กับที่ คงที่ตายตัว ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก ถ้าจะให้เห็นลักษณะที่ชัดเจนก็คือชิ้นส่วนของโครงสร้างของอาคารนั่นเอง ซึ่งได้แก่ เสา คาน พื้น หลังคา ผนัง บันได กระเบื้องปูพื้น พื้นสำเร็จรูป และคอนกรีตทับหน้าของพื้นสำเร็จรูป เป็นต้น

2.2.2 Live Load

น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load , LL) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่สามารถเคลื่อนย้าย เคลื่อนที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้ำหนักอยู่ตลอดเวลา หรืออยู่ชั่วคราว เช่น น้ำหนักผู้ใช้อาคาร รถยนต์ หิมะแรงลม วัสดุอุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้นซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาเราจะสามารถสังเกตได้ว่า แรงกระทำเหล่านี้จะเกิดขึ้นเป็นครั้งคราว และเมื่อมีการเคลื่อนย้ายออกไป ก็จะไม่มีความกระทำคงค้าง

2.2.3 Earthquake Load

แผ่นดินไหวคือแรงกระทำที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เป็นแรงกระทำที่ยากจะเตือนภัยล่วงหน้า และโดยส่วนใหญ่จะเกิดและสิ้นสุดลงในระยะเวลาประมาณ 10-20 วินาที ทำให้บริเวณที่ได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว ได้แก่ แถบ California, Seattle ของอเมริกา แถบอเมริกาใต้ แถบริมมหาสมุทรแปซิฟิก เช่นบริเวณประเทศ ชิลี, เปรู, เม็กซิโก ,แถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน เช่นบริเวณประเทศโมร็อกโก, กรีซ, อิตาลี, ตุรกี ,แถบเทือกเขาหิมาลัย เช่น บริเวณ จีน, อินเดีย และอิหร่าน วิศวกรโครงสร้างต้องออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวเพื่อว่าจะได้ออกแบบโครงสร้างที่แข็งแรงเพียงพอที่จะรับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้



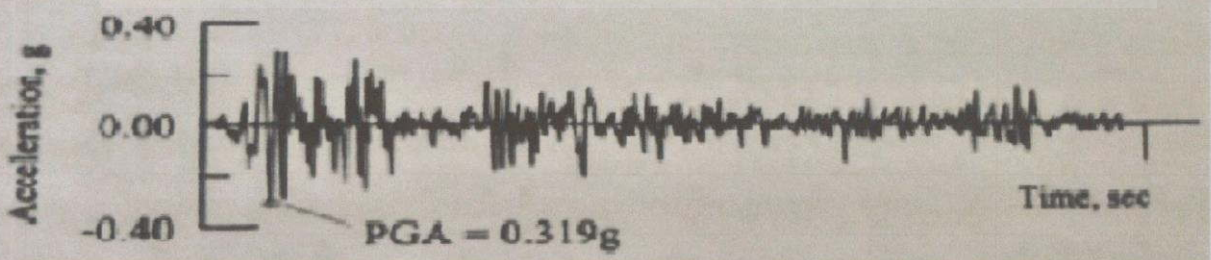
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบผลกระทบของแผ่นดินไหวระหว่างอาคารสูงและอาคารธรรมดา

2.3 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว (Earthquake Characteristics)

นอกจากการวัดขนาดของแผ่นดินไหวแล้ว เครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในปัจจุบันสามารถบันทึกคลื่นของแผ่นดินไหวที่เรียกว่า strong ground motion ได้ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ของพื้นดินที่มีความรุนแรงเพียงพอที่จะมีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยนิยามวัดค่าเป็นอัตราเร่งของพื้นดินกับเวลา (acceleration time history หรือ acceclerogram) จากการบันทึกคลื่นแผ่นดินไหวนี้ วิศวกรแผ่นดินไหวจำแนกลักษณะที่สำคัญของคลื่นของแผ่นดินไหว (strong ground motion) โดยใช้พารามิเตอร์ ดังนี้

ก) ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration , PGA)

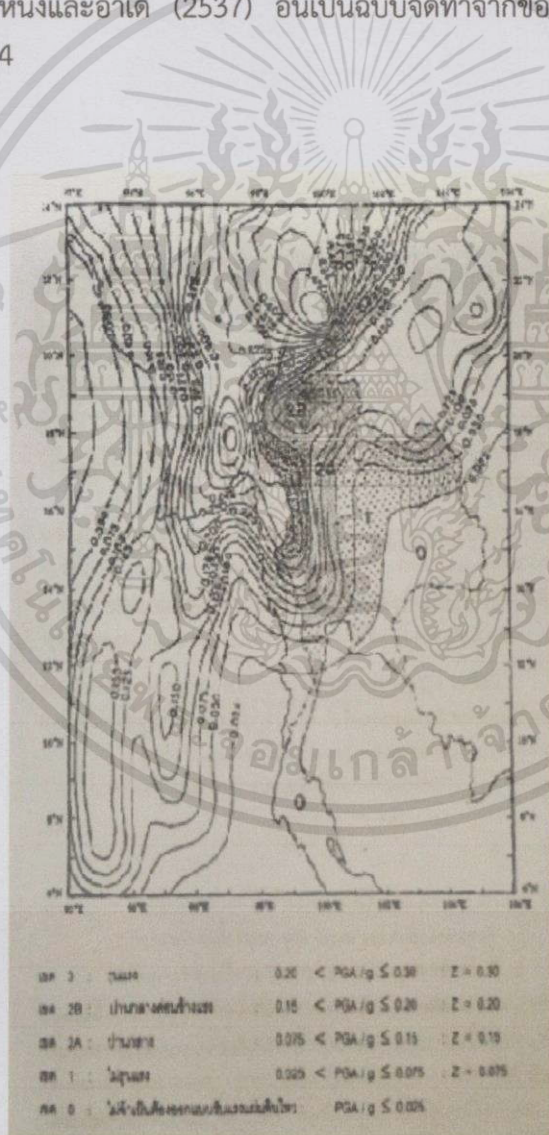
ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินเป็นลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของคลื่นแผ่นดินไหว ที่วัดได้จากค่าของ acceclerogram ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงคลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้บริเวณ Imperial Valley รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา วัดอัตราเร่งสูงสุดได้ 0.319g (g คืออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตร/วินาที²)



รูปที่ 2.3 คลื่นแผ่นดินไหวของ El Centro ground motion (1940) (Panyakap P. , 1999)

ในปัจจุบันได้มีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) กับขนาดแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude) และระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว ซึ่งเรียกว่า Attenuation Model จำนวนมากกว่า 30 แบบซึ่งใช้ในหลายๆพื้นที่ทั่วโลก สำหรับแบบที่ให้ผลสอดคล้องกับค่า PGA ที่วัดในประเทศไทย คือ Attenuation Model ของ Esteva ซึ่งได้มีการนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า PGA เพื่อการจัดทำเขตแผ่นดินไหว (เป็นหนึ่งและอาเด , 2537) เรียกว่า **แผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหว** ซึ่งแสดงเขตพื้นที่ที่รุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว โดยจัดเป็นโซนต่างๆกันตามลักษณะเส้น Contour line ของค่าระดับ PGA โดยที่ PGA เป็นค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน ที่มีค่าความน่าจะเป็นที่ค่า PGA จะเกินไปกว่ากำหนดนี้มีเพียง 1 ใน 10 ในคาบเวลา 50 ปี หรือเทียบเท่ากับโอกาสที่ค่า PGA จะเกินไปกว่าที่กำหนดนี้เพียงครั้งเดียวในรอบ 500ปี

สำหรับในประเทศไทย ได้มีการจัดทำแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวหลายครั้ง ในที่นี้ได้นำเอาแผนที่ฉบับที่จัดทำขึ้นโดย เป็นหนึ่งและอาเด (2537) อันเป็นฉบับจัดทำจากข้อมูลที่ละเอียดสมบูรณ์กว่าฉบับก่อนๆ มาแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย (เป็นหนึ่ง และอาเด , 2537)

ข) ระยะเวลาของการสั่นรุนแรงของพื้นดิน (Duration of Strong Ground Motion , T_d)
 นิยามของระยะเวลาของการสั่นรุนแรงของพื้นดินมีนักวิจัยหลายคนเสนอไว้ ในที่นี้จะนำ
 นิยามที่เสนอโดย Trifunac และ Brady (1975) มาใช้เนื่องจากเป็นที่ยอมรับในวงวิชาการ
 อย่างกว้างขวาง อีกทั้งง่ายในการคำนวณ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$T_d = t_{0.95} - t_{0.05} \quad (1)$$

โดยที่ T_d = ระยะเวลาของการสั่นรุนแรงของพื้นดิน ส่วน $t_{0.05}$ และ $t_{0.95}$ คือเวลาที่ค่าอินทิเกรตขั้นของ
 Arias intensity , I_a , ถึง 5% และ 95% ตามลำดับ ค่า Arias intensity , I_a มีนิยามดังนี้ (Arias ,
 1970) :

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} \ddot{u}_g^2(t) dt \quad (2)$$

โดยที่ t_d และ \ddot{u}_g เป็นระยะเวลาทั้งหมดและค่าอัตราเร่งของพื้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ตามลำดับ
 โดยค่าทั่วไป ค่าระยะเวลาของการสั่นรุนแรงของพื้นดิน T_d ขึ้นกับระยะห่างของศูนย์กลางแผ่นดินไหว นั่น
 คือค่า T_d จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างของศูนย์กลางแผ่นดินไหวไกลขึ้น จากประสบการณ์ที่ผ่านมาของ
 แผ่นดินไหว พบว่าหากระยะเวลาการสั่นสะเทือนของพื้นดินเกิดขึ้นอย่างยาวนานโดยเฉพาะบนสภาพดิน
 อ่อน เช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศเม็กซิโกเมื่อปี ค.ศ.1985 และเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศ
 ซิลีเมื่อปีค.ศ.1985 มีส่วนส่งผลให้เกิดความเสียหายสะสม (cumulative damage) ต่อโครงสร้างอาคาร
 สูงกว่าเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อื่น

ค) คาบเวลาการสั่นสำคัญของพื้นดิน (Predominant Period of Ground Motion , T_g)

คาบเวลาการสั่นสำคัญของพื้นดิน เป็นคาบเวลาซึ่งพื้นดินสั่นโดยมีคาบเวลาการสั่นที่เด่นอยู่อย่างแน่นอนคาบเวลาหนึ่ง ลักษณะการสั่นของพื้นดินนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่าเป็นการสั่นแบบมี Narrowband frequency content ในทางกลับกันหากพื้นดินมีการสั่นแบบที่ไม่มีคาบเวลาการสั่นที่แน่นอน อาจเรียกได้ว่าเป็นการสั่นแบบมี Broadband frequency content สำหรับการสั่นของพื้นดินแบบ Narrowband มักจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างอาคารได้มาก หากคาบเวลาการสั่นสำคัญของพื้นดินนั้น (T_g) ไปสอดคล้องกันกับคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างอาคารทั้งนี้เนื่องมาจากผลกระทบของการกำทอน

2.4 ลักษณะของสถานที่เกิดแผ่นดินไหว (Site Characteristics)

ก) ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางแผ่นดินไหวไปยังสถานที่ตั้งของอาคาร (Epicentral Distance)

โดยทั่วไปความรุนแรงของแผ่นดินไหวจะลดทอนลงตามระยะห่างจากศูนย์กลางของแผ่นดินไหว ซึ่งแสดงด้วยค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) ที่บันทึกได้ ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินอาจคำนวณได้จาก Attenuation Model ของ Esteva L. และ Villaverde, R. (1972)

$$PGA = \frac{5828e^{0.8M}}{(R_e + 40)^2} \quad (3)$$

โดยที่

PGA คือ อัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน , ซม./วินาที²

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหว , ริกเตอร์

R_e คือ ระยะห่างจากศูนย์กลางของแผ่นดินไหว , กม.

จากการตรวจสอบค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินที่คำนวณได้จาก สมการ (3) นี้ให้ค่าใกล้เคียงกับ PGA ที่บันทึกได้บนสภาพชั้นหินหรือชั้นดินแข็ง ไม่เหมาะกับการคำนวณสำหรับสภาพชั้นดินอ่อน

ข) สภาพชั้นดินของที่ตั้งอาคาร

ในกรณีที่โครงสร้างตั้งอยู่บนชั้นสภาพดินอ่อน ผลของการสั่นไหวของชั้นดินอ่อนจะขยายกำลังคลื่นแผ่นดินไหว เหตุการณ์สำคัญที่แสดงผลของการขยายกำลังคลื่นแผ่นดินไหวบนชั้นดินอ่อนมาก คือ การเกิดแผ่นดินไหวที่เม็กซิโก ปี ค.ศ. 1985 เมืองเม็กซิโกตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อนมาก เนื่องจากเคยเป็นทะเลสาบมาก่อนและตั้งอยู่ในแนวรอยเลื่อนที่มีพลัง แผ่นดินไหวครั้งสำคัญเกิดเมื่อเดือนกันยายน ค.ศ. 1985 มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากกรุงเม็กซิโกซิตีประมาณ 380กม. วัดขนาดได้ 8.1 ริกเตอร์ บันทึกค่า PGA บนชั้นหินซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้เมืองได้ 0.033g แต่บันทึกค่า PGA บนชั้นดินอ่อนได้ถึง 0.17g ซึ่งชี้ให้เห็นว่าชั้นดินอ่อนมีโอกาสขยายกำลังคลื่นได้ถึง 5 เท่า

ผลงานวิจัยในปัจจุบัน (Warnitchai P., Sangarayakul, C. and Ashford, S.A., 2000) ยังชี้ว่าสภาพชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีลักษณะเป็นดินอ่อนคล้ายกับกรุงเม็กซิโกซิตี และมีโอกาสที่จะขยายกำลังคลื่นได้ 3 ถึง 6 เท่าเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งเมืองที่อยู่ห่างจากรอยเลื่อนที่มีพลัง รัศมี 200-400 กม. ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวขนาดกลางได้ตั้งนั้น พื้นที่ของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจึงถือว่าเป็นเขตไม่ปลอดภัยมากนัก

ค) คาบการสั่นธรรมชาติของสถานที่ตั้งของอาคาร (Natural Period of Site)

คาบการสั่นตามธรรมชาติของสภาพชั้นดินอ่อนอาจคำนวณได้จาก

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \quad (4)$$

โดยที่

T_s คือ คาบการสั่นตามธรรมชาติของชั้นดินอ่อน, วินาที

H_s คือ ความลึกของชั้นดินอ่อน, เมตร

V_s คือ ความเร็วของคลื่น S - Wave (หรือ Shear Wave), เมตร/วินาที

ในกรณีที่คาบเวลาการสั่นสำคัญของพื้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว สอดคล้องกับคาบการสั่นตามธรรมชาติของชั้นดิน จะทำให้พื้นดินเกิดการสั่นอย่างรุนแรง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกำทอน (Resonance) ดังนั้น อาคาร

2.5 ลักษณะของโครงสร้างอาคาร (Structural Characteristics)

ก) คาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างอาคาร (Natural Period of Structural)

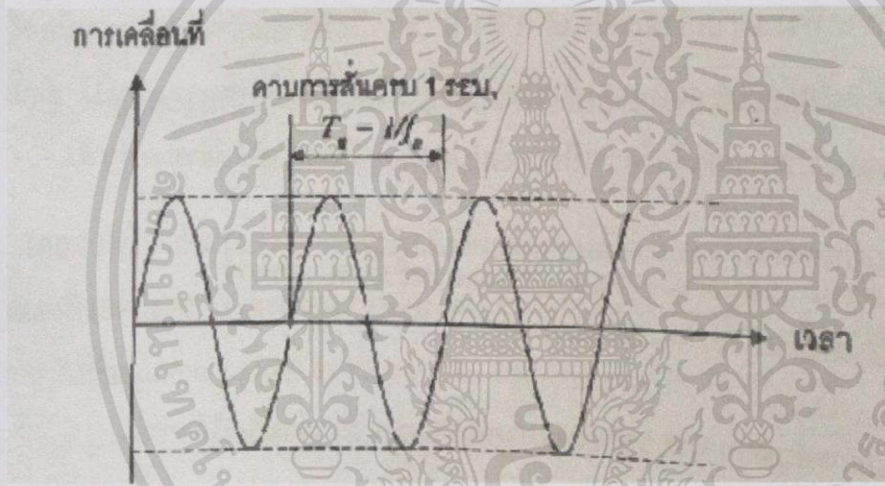
คาบการสั่นตามธรรมชาติ (T_n) คือระยะเวลาการแกว่งตัวของโครงสร้างตามธรรมชาติครบ 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และเป็นส่วนกลับของความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหว คือ

$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (5)$$

โดยที่

f_n คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอาคาร , รอบ/วินาที (Hertz)

ω_n คือ ความถี่เชิงมุมธรรมชาติของโครงสร้างอาคาร , เรเดียน/วินาที



รูปที่ 2.5 คาบการสั่นไหวและค่าความถี่

คาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างเป็นองค์ประกอบที่สำคัญค่าหนึ่ง ในกรณีที่คาบการสั่นสำคัญของพื้นดินสอดคล้องกันกับคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้าง ก็จะทำให้เกิดการสั่นที่รุนแรงมากขึ้น เป็นผลให้อาคารที่มีความสูงในช่วงคาบการสั่นนี้เกิดความเสียหายได้มาก เนื่องจากการเกิดกำทอน (Resonance) และหากคาบการสั่นสำคัญของพื้นดินสอดคล้องกันกับคาบการสั่นตามธรรมชาติของชั้นดินด้วย ก็จะทำให้เกิดการกำทอนซ้อนขึ้นไปอีก ซึ่งเรียกว่าว่าการเกิดกำทอนซ้อน (Double Resonance)

ข) Damping ของโครงสร้างอาคาร (Damping of Structural)

ค่า Damping ของโครงสร้างเป็นการกระจายพลังงานของโครงสร้างจากการแกว่งไหวตัว ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะกระจายผ่านการเสียดสีของรอยต่อขององค์อาคารในรูปของพลังงานความร้อนและเสียง ค่า damping นิยมแสดงในรูปของ Damping Ratio , ζ เมื่อ

$$\zeta = \frac{C}{C_r} \quad (6)$$

โดยที่ C คือ ค่า damping ที่แท้จริง

C_r คือ ค่า Critical damping

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) Tejashri S.Gulve, Pranesh Murnal (2013) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แท่งค้ำเก็บน้ำเพื่อเป็น Tune Mass Damper แบบ Passive

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และดำเนินการเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แท่งค้ำเก็บน้ำเพื่อเป็น Tuned mass damper, TMD โดยใช้โปรแกรม SAP2000 ทำการศึกษาอาคารโครงสร้างคอนกรีต 3 มิติ ทำการศึกษาโครงสร้างคอนกรีต 3, 7 และ 10 ชั้น และทำการวางถังน้ำวางที่หลังคาของอาคาร โดยมวลและความถี่ของถังน้ำรวมมาจากทั้งน้ำ, ผนัง, คานหลังคาและเสา โดยทำการหาค่ามวลที่ถูกปรับจนให้ได้ค่าที่ดีที่สุด โดยทำการศึกษาพฤติกรรมของถังน้ำจากข้อมูลแผ่นดินไหว 5 ข้อมูลแผ่นดินไหวได้แก่ El-centro, Bhuj, Kobe, Chichi และ N-Plam และทำการการศึกษาภายใต้เงื่อนไขทั้งหมดสี่เงื่อนไข

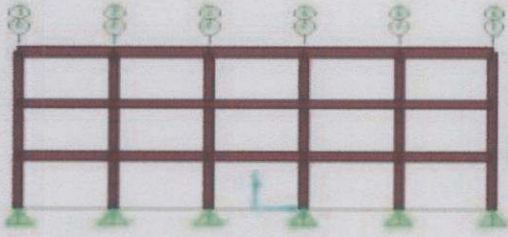
เงื่อนไขที่ 1 คัดampingจากเฉพาะตัวอาคาร

เงื่อนไขที่ 2 คัดampingจากตัวอาคารโดยวางถังเปล่าไว้บนหลังคาของอาคาร

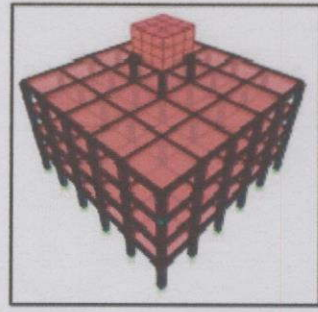
เงื่อนไขที่ 3 คัดampingจากตัวอาคารโดยวางถังน้ำที่มีเต็มไว้บนหลังคาของอาคาร

เงื่อนไขที่ 4 คัดถังเก็บน้ำอย่างเดียวไม่คิดamping จากตัวอาคาร

ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้กำหนดให้อาคารแบบจำลองเป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมมีจำนวนห้องเท่ากับ 25 ห้องต่ออาคารสูง 1 ชั้น และขนาดของห้องแต่ละห้องมีขนาดความกว้าง 4 m ความยาว 4 m และความสูงแต่ละชั้นเท่ากับ 3 เมตร และทำการแท่งค้ำน้ำมีขารองรับที่ฐาน 4 ขา โดยขาแท่งค้ำน้ำมีความสูง 1m นับจากหลังคาของอาคาร กำหนดให้แท่งค้ำน้ำมีขนาดความกว้าง 4 เมตร ความยาว 4 เมตร และความสูงของแท่งค้ำน้ำถูกกำหนดโดยจำนวนชั้นของอาคารโดยอาคารสูง 3 , 7 และ 10 จะมีความสูงของแท่งค้ำน้ำเป็น 2 เมตร , 4 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ



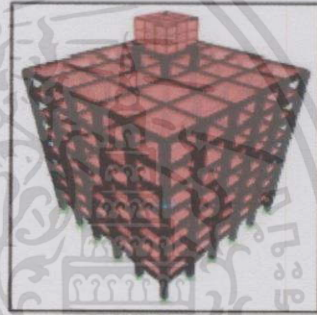
รูปที่ 2.6 แบบจำลอง 2 มิติ อาคารสูง 3 ชั้น



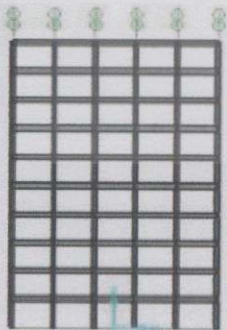
รูปที่ 2.7 แบบจำลอง 3 มิติอาคาร 3 ชั้นกับแท่งค้ำสูง 2 เมตร



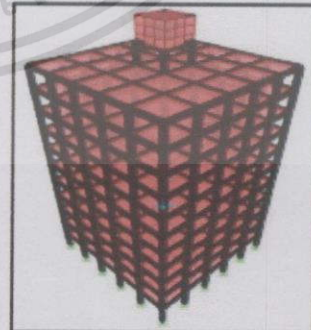
รูปที่ 2.8 แบบจำลอง 2 มิติ อาคารสูง 7 ชั้น



รูปที่ 2.9 แบบจำลอง 3 มิติอาคาร 7 ชั้นกับแท่งค้ำสูง 4 เมตร

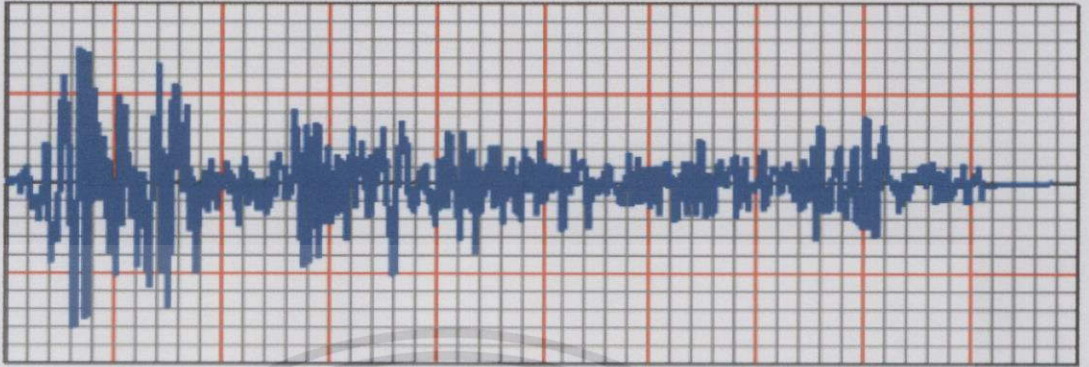


รูปที่ 2.10 แบบจำลอง 2 มิติ อาคารสูง 10 ชั้น



รูปที่ 2.11 แบบจำลอง 3 มิติอาคาร 10 ชั้นกับแท่งค้ำสูง 6 เมตร

Time History ของแผ่นดินไหว El-Centro ที่พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งและเวลา ช่วงละ 0.005 วินาที



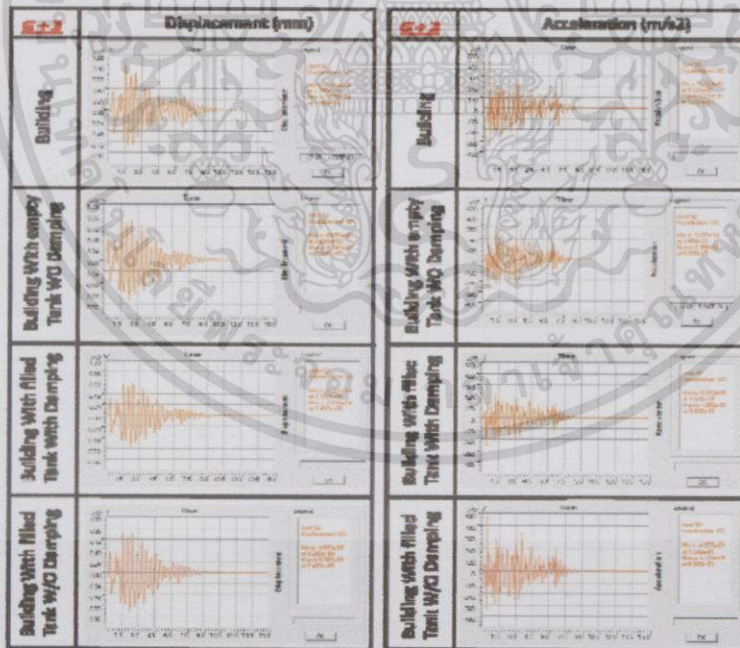
รูปที่ 2.12 ค่าความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Displacement และ Acceleration ของคลื่นแผ่นดินไหว

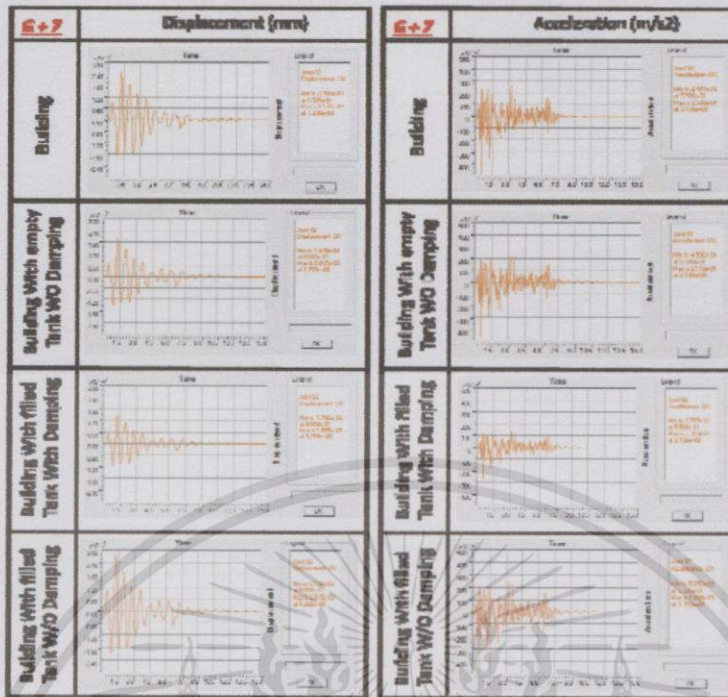
โดยที่

แกนในแนวดิ่ง คือ ค่าความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว , g

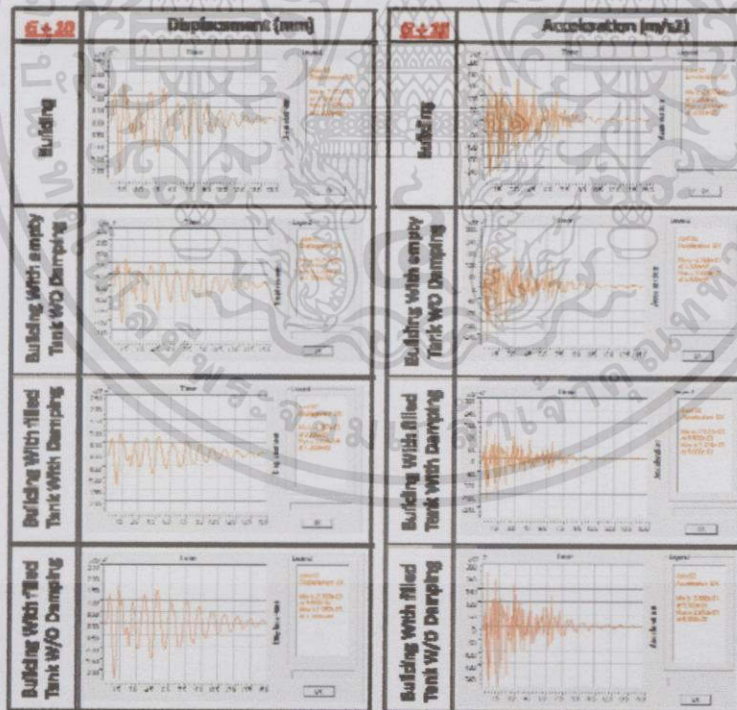
แกนในแนวนอน คือ เวลา , วินาที



รูปที่ 2.13 แสดงระยการโก่งตัว & ค่าความเร่งของข้อมูล El-Centro Earthquake data สำหรับโมเดลอาคาร 3 ชั้น



รูปที่ 2.14 แสดงระยะการโก่งตัว & ค่าความเร่งของข้อมูล El-Centro Earthquake data สำหรับโมเดลอาคาร 7 ชั้น



รูปที่ 2.15 แสดงระยะการโก่งตัว & ค่าความเร่งของข้อมูล El-Centro Earthquake data สำหรับโมเดลอาคาร 10 ชั้น

จากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยความเป็นไปได้ของการใช้ถังเก็บน้ำเป็น Tune Mass Damper แบบ Passive และระดับที่เหมาะสมของน้ำในการวิเคราะห์ ได้ข้อสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1) แทงค์เก็บน้ำสามารถออกแบบเพื่อใช้เป็น Tuned Mass Damper , TMD ได้ โดยทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราส่วนมวลและอัตราส่วนความถี่เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม

2) สำหรับการปรับจูน (Tuned) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากผลกระทบ น้ำหนักรวมทั้งหมดหมายถึง น้ำหนักของน้ำ , น้ำหนักของถังน้ำและน้ำหนักที่ฐานของแทงค์น้ำ(ขาของแทงค์น้ำ) จากการพิจารณาเมื่อมีถังน้ำวางอยู่บนสุดเหนือหลังของอาคารจะแสดงให้เห็นการลดลงของผลตอบสนองที่เกิดจากข้อมูลแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการศึกษา

3) ขนาดของแทงค์ควรจะคงที่โดยกรณีที่เกิด damping จากตัวอาคารโดยวางถังน้ำที่มีเต็มไว้บนหลังคาของอาคารเป็นกรณีที่เกิดผลตอบสนองจากการสั่นไหวได้ดีที่สุด และถ้าระดับน้ำในแทงค์น้ำยังถูกเก็บสะสมไว้ก็จะสามารถลดการตอบสนองสูงสุดของกำลังแผ่นดินไหวได้

4) สำหรับถังน้ำทั้ง 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่คิด damping จากตัวอาคารโดยวางถังเปล่าไว้บนหลังคาของอาคาร และรูปแบบที่คิดถังเก็บน้ำอย่างเต็มไม่คิด damping จากตัวอาคารมีรูปแบบการตอบสนองที่สอดคล้องกัน

5) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า TMD เป็นระบบ ที่สามารถนำมาใช้ลดแรงสั่นสะเทือนได้อย่างน่าพอใจโดยผลการตอบสนองของแทงค์น้ำที่มีระดับน้ำเต็ม ควรจะมีน้ำหนักเพียงครึ่งหนึ่งของน้ำหนักโครงสร้างเท่านั้น เพื่อที่จะสามารถแสดงประสิทธิภาพของแทงค์น้ำเป็น TMD แบบ Passive ควรรักษาระดับน้ำของแทงค์น้ำให้คงที่เพื่อลดการตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างภายใต้กำลังแผ่นดินไหว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

การศึกษาพฤติกรรมของมวลหน่วงลดแรงสั่นสะเทือนโดยทางค้ำ เพื่อประยุกต์ใช้ในการเกิดสันไหวที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว มีขั้นตอนดังนี้

ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ Tuned Mass Dampers(TMD)

ศึกษาพฤติกรรมและสมการของระบบ Tuned Mass Dampers(TMD)

ศึกษาหาข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro1940 North South Component (Peknold Version) 1559 points at equal spacing of 0.02 sec

ทำการจำลองโมเดลอาคารสูง 4 , 8 และ 12 ชั้น โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการใส่ค่าข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro1940 ลงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการจำลองโมเดลทางค้ำโดยใช้ขนาดความสูงที่แตกต่างกัน

ทำการวิเคราะห์ผลของระยะการโก่งตัวด้านข้างเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro ทั้งในกรณีที่ไม่มีทางค้ำ และกรณีที่มีทางค้ำ(น้ำเต็ม)จากการใช้ความสูงของทางค้ำที่แตกต่างกัน

ทำการสรุปผลงานวิจัย

3.1 ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ Tuned Mass Dampers(TMD)

Tuned Mass Damper หรือ TMD คือมวลท่วงปรับลดค่าการสั่นสะเทือนเป็นระบบตัวหน่วงที่มีแนวคิดที่หามวลอีกหนึ่งมวล(m_2)มาหน่วง เพื่อลดการแกว่ง (swaying) ของมวลอาคารสูง (m_1) ที่มีผลมาจากแรงแผ่นดินไหว

3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรมที่ใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการศึกษาโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ โดย

เลือกรูปแบบโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์โดยเลือกโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างประเภทที่ใช้งานไม่ซับซ้อนและมีความถูกต้องมากที่สุด

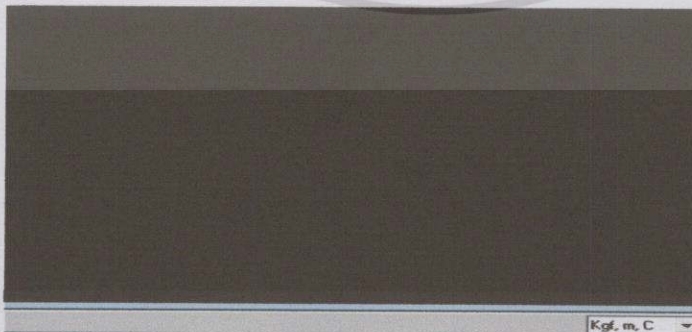
3.3 ศึกษาหาข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro1940

เอลเซนโตรเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม ค.ศ.1940 ในเวลา 21:35 (ตามเวลามาตรฐานแปซิฟิก) บริเวณหุบเขาราชินี ทางตะวันออกเฉียงใต้ของแคลิฟอร์เนียตอนใต้ใกล้ชายแดนระหว่างประเทศสหรัฐอเมริกากับประเทศเม็กซิโก เอลเซนโตรเป็นแผ่นดินไหวใหญ่ครั้งแรกที่จะถูกบันทึกไว้โดยมีเหตุการณ์การทำลายล้างขนาดปานกลางที่มีขนาดความรุนแรงเท่ากับ 6.9 ริคเตอร์ ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างกว้างขวางกับระบบชลประทาน โดยเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวสามารถบันทึกคลื่นแผ่นดินไหวไว้ได้เพียง 5-6 นาทีจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวย่อยๆทั้งหมด 13 เหตุการณ์

3.4 ทำการจำลองโมเดลอาคารสูง 4 , 8 และ 12 ชั้น โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

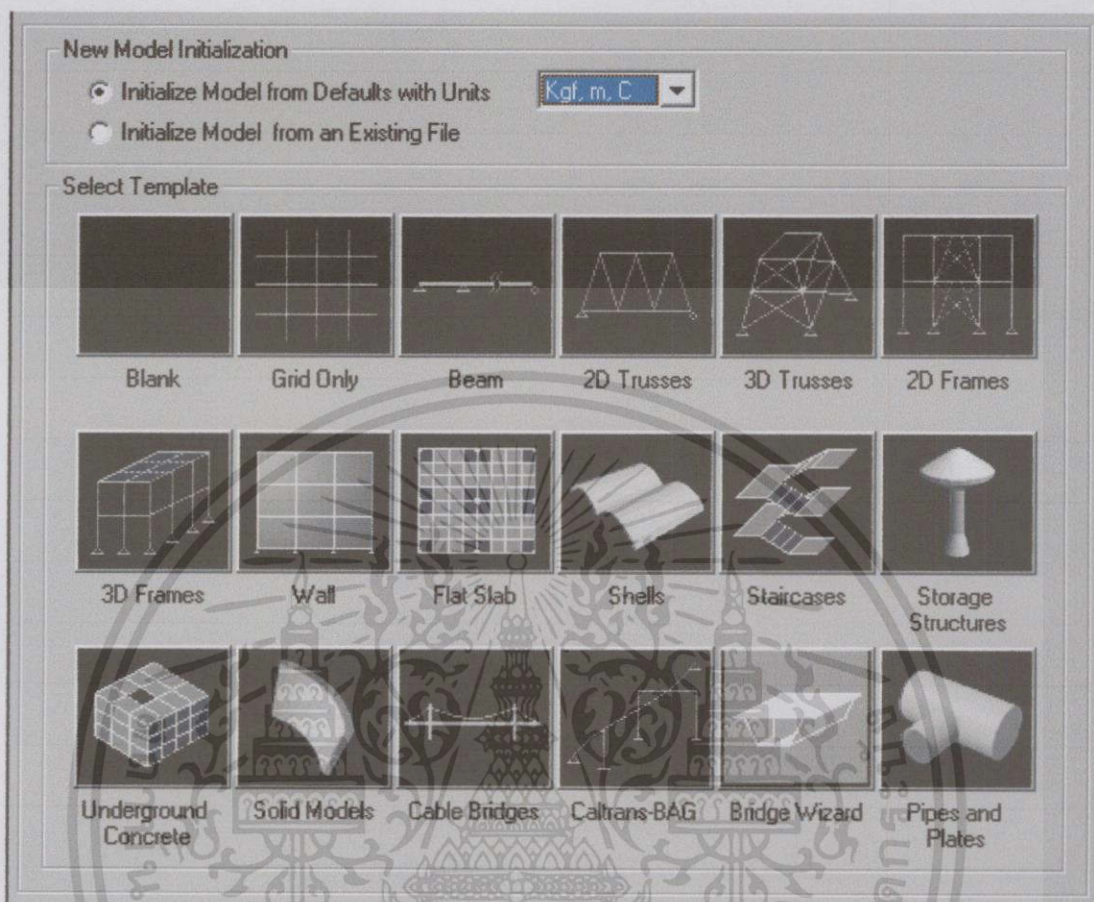
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม

3.4.1 เลือกหน่วยตามที่ใช้ต้องการ



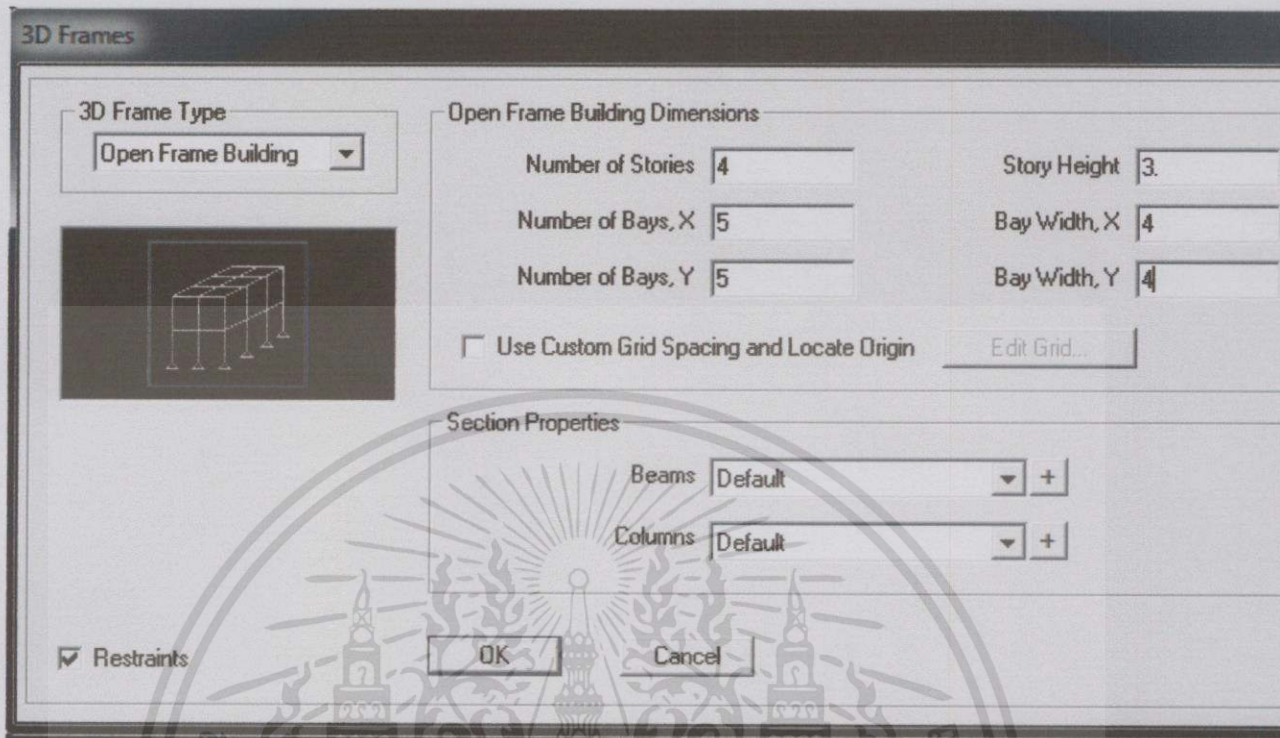
รูปที่ 3.1 แสดงการเลือกหน่วยตามที่ใช้ต้องการ

3.4.2 เลือกรูปแบบโมเดลที่ผู้ใช้งานต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบโมเดลที่ผู้ใช้งานต้องการวิเคราะห์

3.4.3 ทำการใส่ค่าจำนวนชั้นและระยะห่างระหว่างช่วงลงในโปรแกรม



รูปที่ 3.3 แสดงการใส่ค่าจำนวนชั้นและระยะห่างระหว่างช่วง

Number of Stories คือ จำนวนชั้นของอาคารตามที่ต้องการ

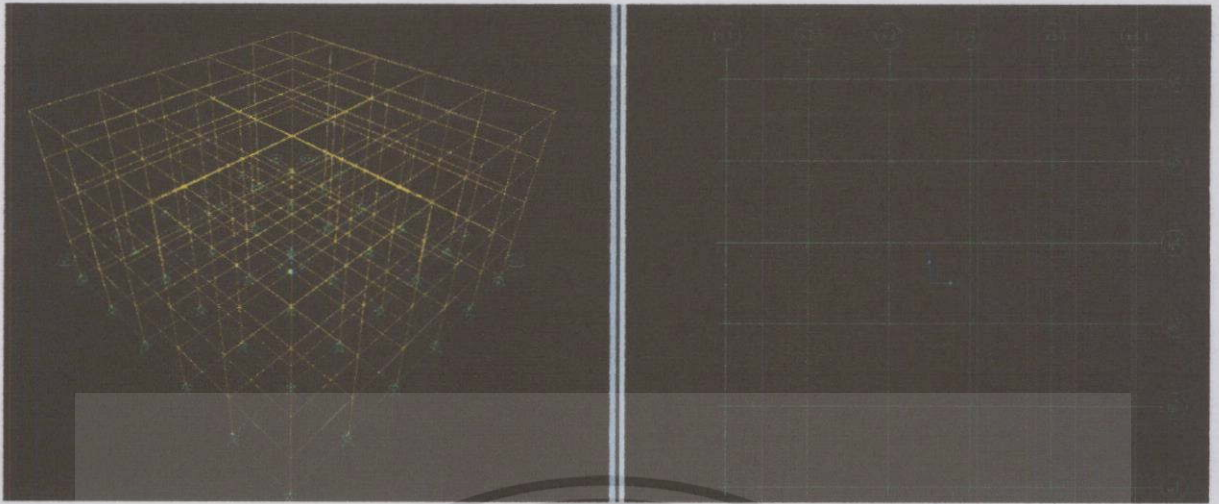
Story Height คือ ความสูงระหว่างชั้น

Number of Bays , X คือ จำนวนช่วงในแนวแกน X

Bay Width , X คือ ความกว้างระหว่างช่วงในแนวแกน X

Number of Bays , Y คือ จำนวนช่วงในแนวแกน Y

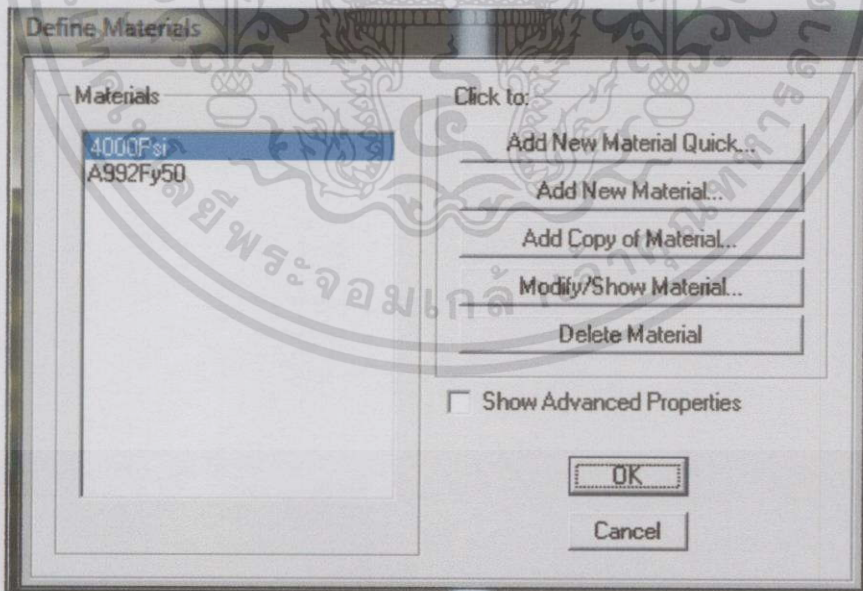
Bay Width , Y คือ ความกว้างระหว่างช่วงในแนวแกน Y



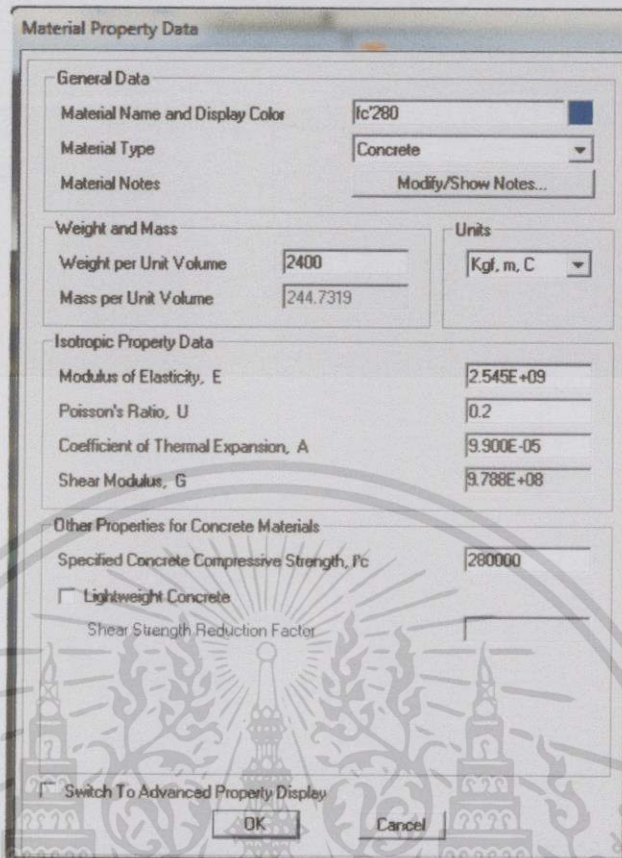
รูปที่ 3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใส่ค่าต่างๆ

3.4.4 ทำการกำหนดชนิดของวัสดุที่ต้องการทำโดย เลือกที่คำสั่ง Define >> Materials >>

Add New Material

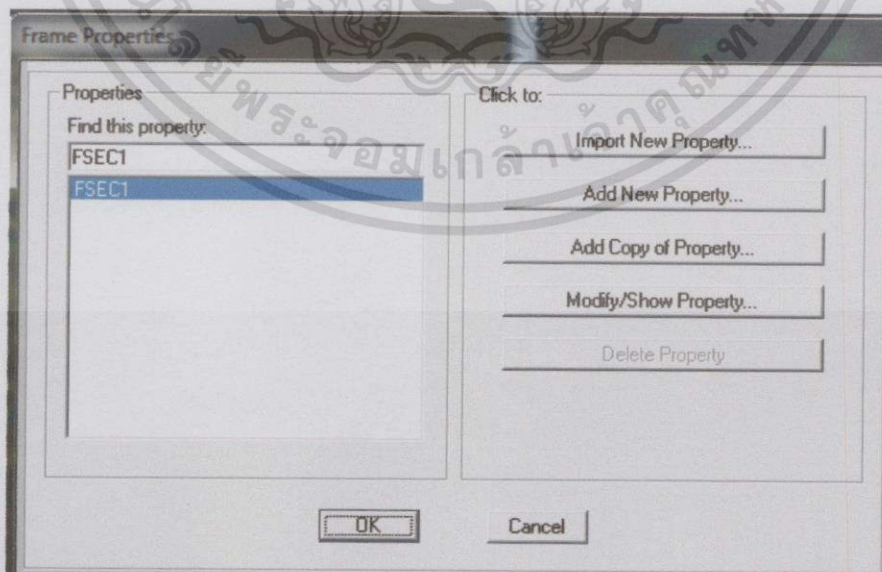


รูปที่ 3.5 แสดงการกำหนดชนิดของวัสดุ

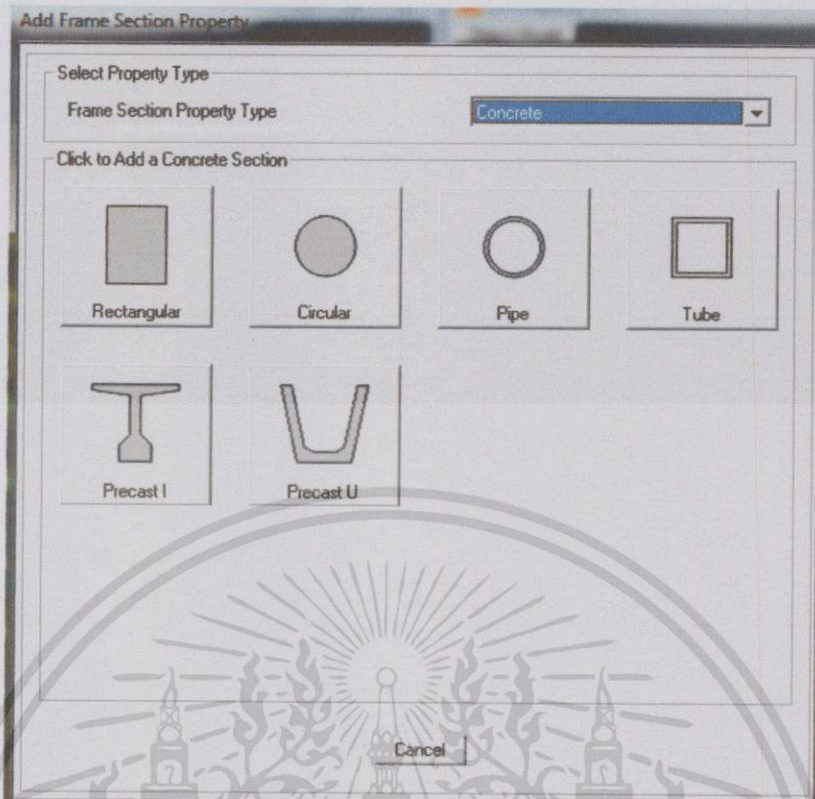


รูปที่ 3.6 รูปแสดงหน้าต่างการใส่ค่าและชนิดของวัสดุที่ต้องการ

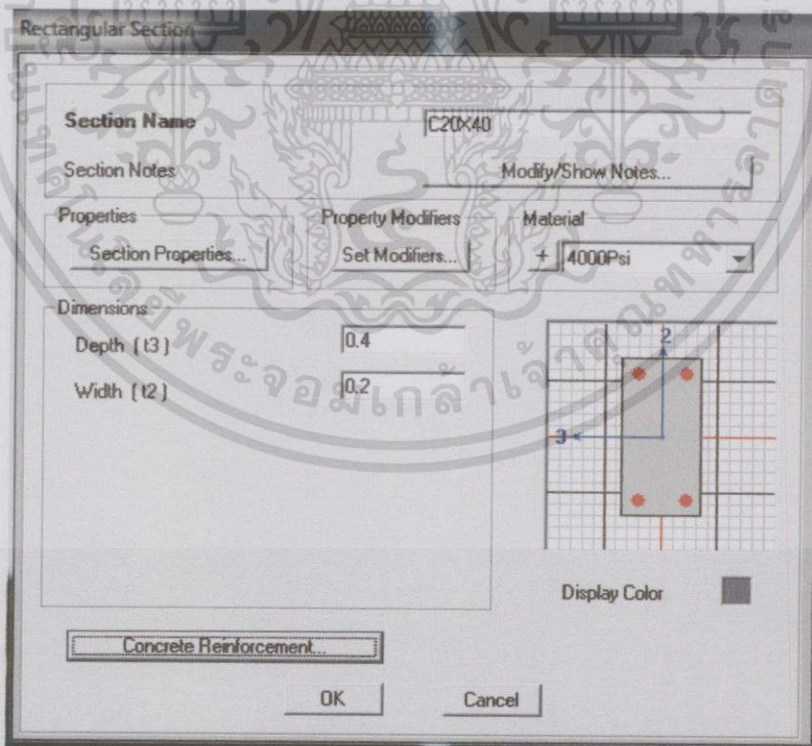
3.4.5 ทำการกำหนดขนาดหน้าตัดของวัสดุที่ต้องการทำโดย เลือกที่คำสั่ง Define >> Frame Properties >> Add New Properties



รูปที่ 3.7 แสดงการกำหนดขนาดหน้าตัดของวัสดุ

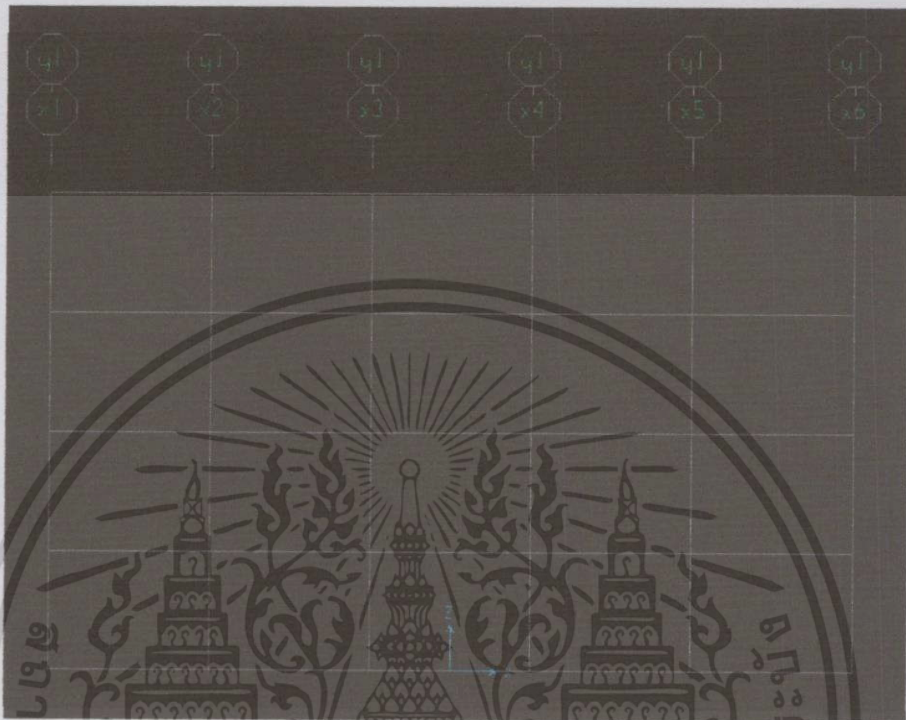


รูปที่ 3.8 รูปแสดงหน้าต่างชนิดของวัสดุและหน้าต่างตัดของวัสดุชนิดต่างๆ

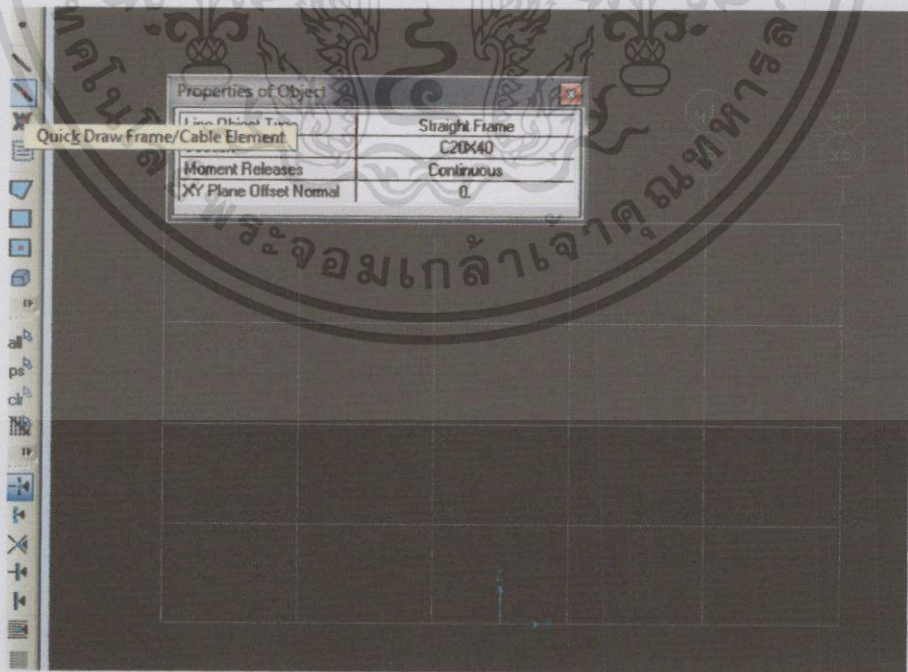


รูปที่ 3.9 รูปแสดงหน้าต่างการใส่ค่าขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริม

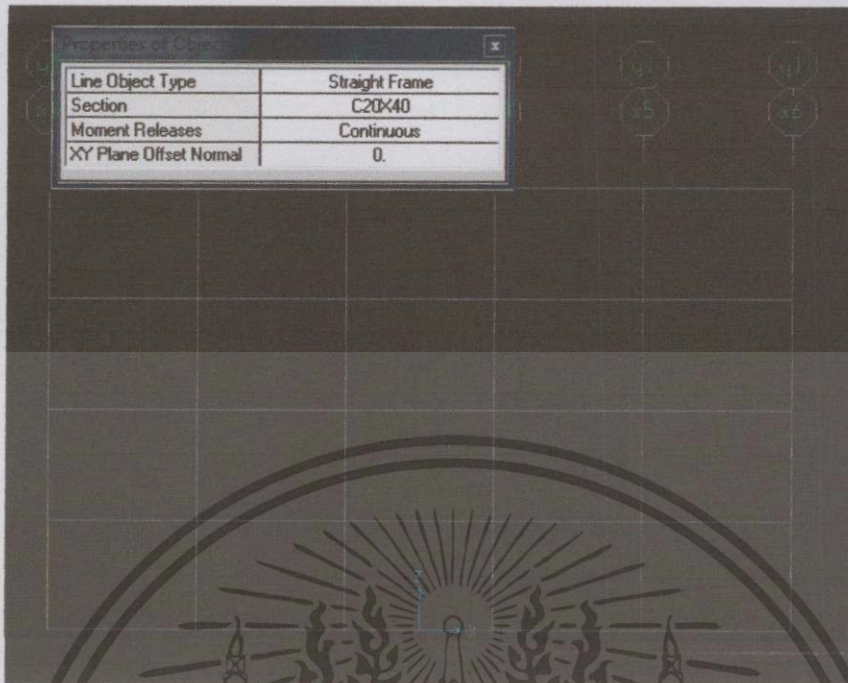
3.4.6 ทำการวาดตามที่ต้องการ >> ไปที่ Quick Draw Frame >> Straight Frame >> วัดลวดที่ต้องการเช่น C20X40 >> Continuous >> กดพิกัดที่ต้องการสร้าง >> ทำทุกส่วนที่ต้องการจนได้ผลลัพธ์ในรูปที่ 3.12



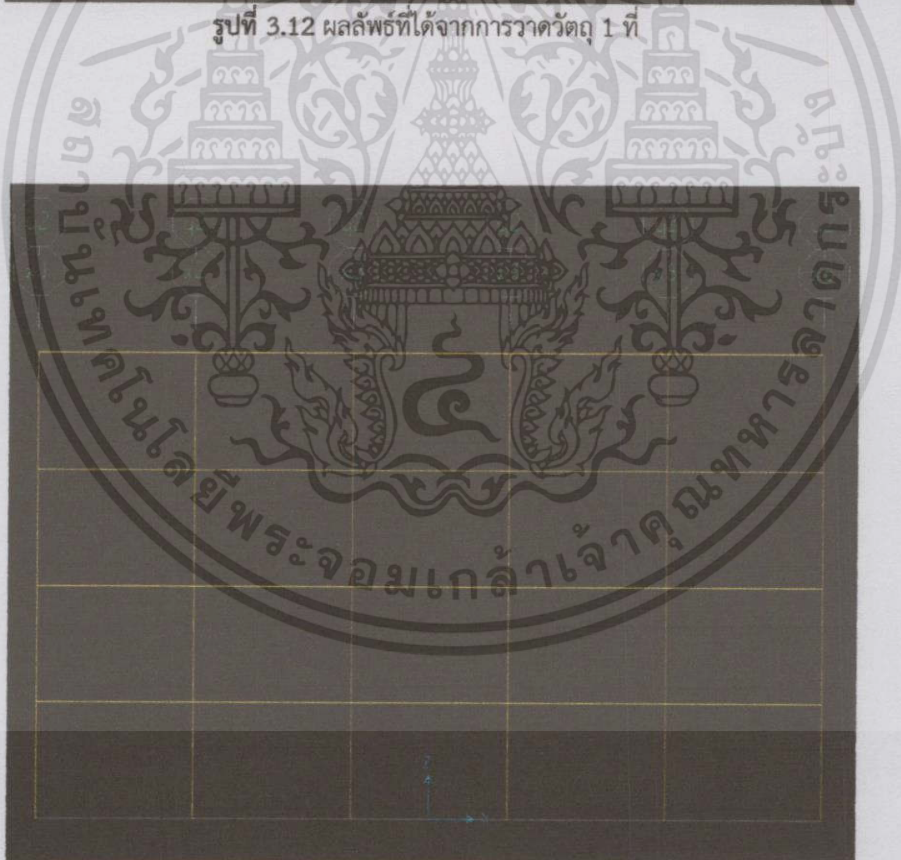
รูปที่ 3.10 รูปแสดงการลบวัดลวดทั้งหมด



รูปที่ 3.11 รูปแสดงหน้าต่างการสร้างวัดลวดที่ต้องการ

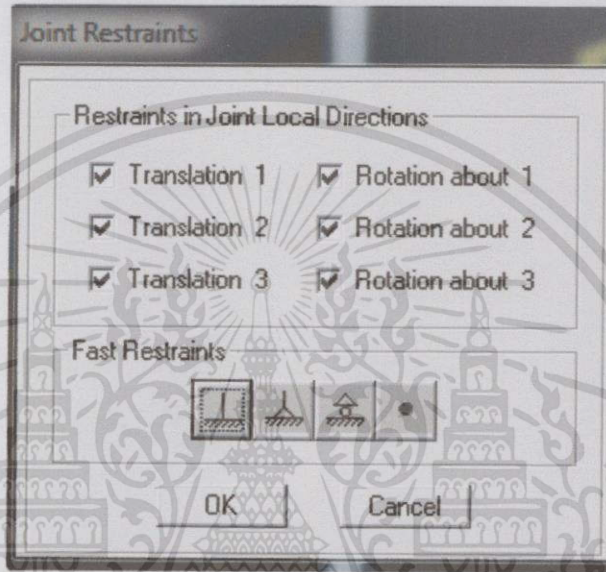


รูปที่ 3.12 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวาดวัตถุ 1 ที่

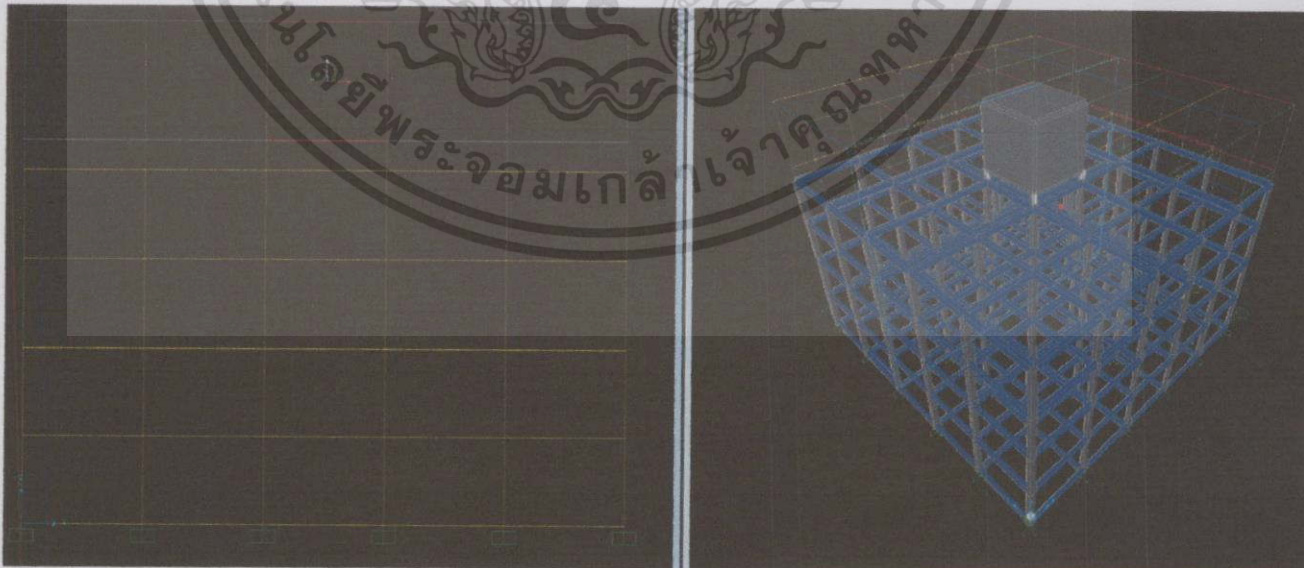


รูปที่ 3.13 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวาดวัตถุทั้งหมด

3.4.7 ทำการวาดSupport ตามที่ต้องการ เลือกจุดที่ต้องการใส่ Support >> ไปที่ Assign >> Joint >> Restraints >> กำหนด Joint Restraints เป็นแบบ Fixed ดังรูปที่ 3.13 >> ทำทุกจุดที่ต้องการจนได้ผลลัพธ์ในรูปที่ 3.14

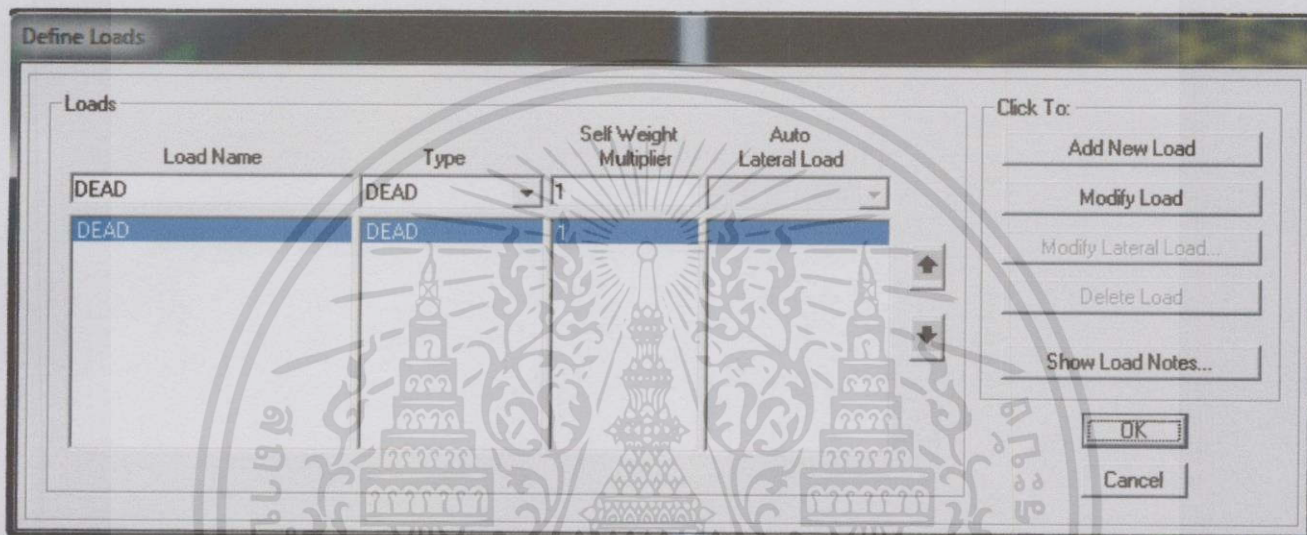


รูปที่ 3.14 แสดงผลลัพธ์การเลือก Joint Restraints เป็นแบบ Fixed

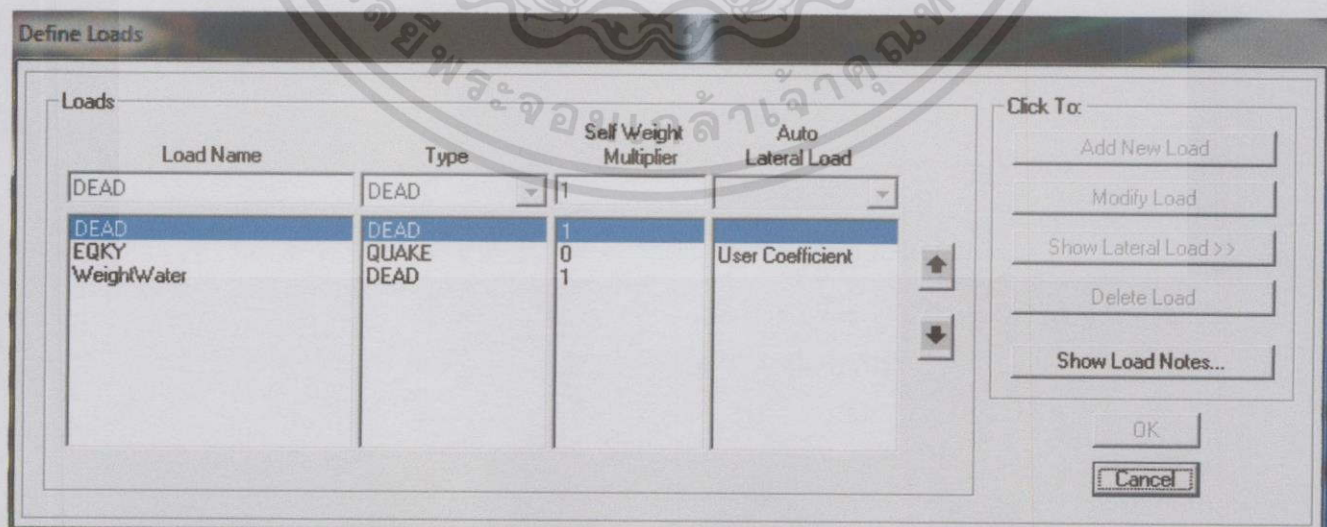


รูปที่ 3.15 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวาดSupport ทั้งหมด

3.4.8 ทำการกำหนดโหลดที่ต้องการ กดที่ Define >> Load Case >> ใส่ Load Name ที่ต้องการเช่น EQKY >> กำหนด Self Weight Multiplier >> Add New Load >> ทำทุก Load ที่ต้องการจนได้ผลลัพธ์ในรูปที่ 3.16

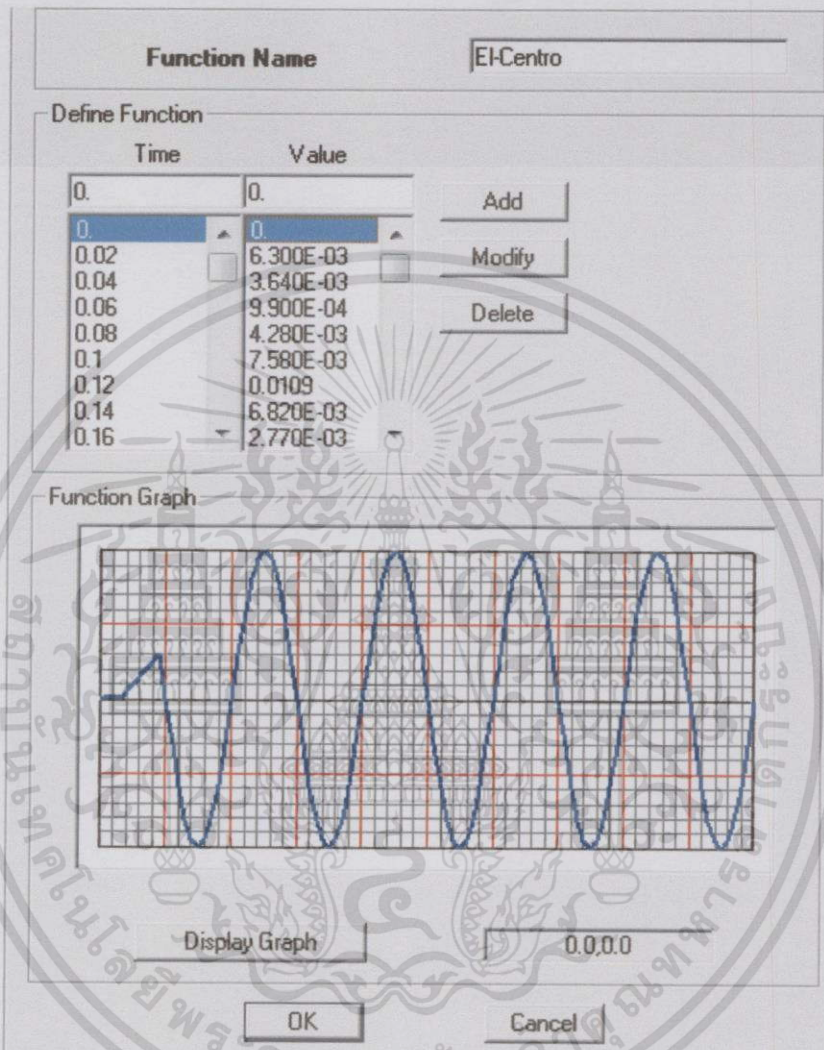


รูปที่ 3.16 รูปแสดงหน้าต่างการกำหนด Load Case กรณีต่าง ๆ



รูปที่ 3.17 รูปแสดงหน้าต่างกรณี Load Case ต่าง ๆ

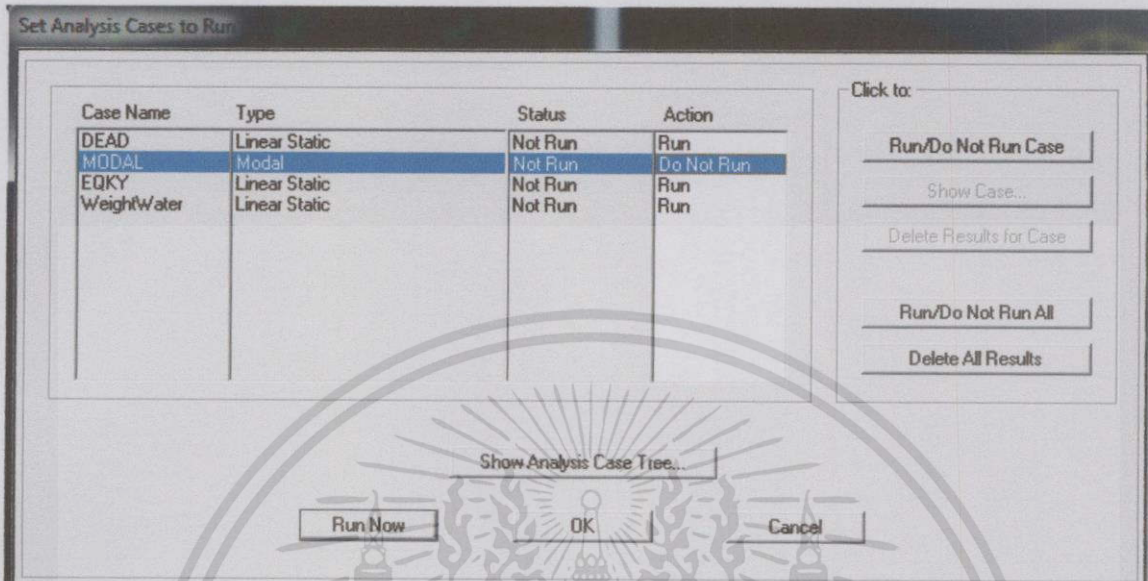
3.4.9 ทำการกำหนด Time History ที่ต้องการ กดที่ Define >> Function >> Time History >> Add New Function >> กดที่ Convert >> ใส่ค่า Time และ Value ตามต้องการดังรูปที่ 3.17



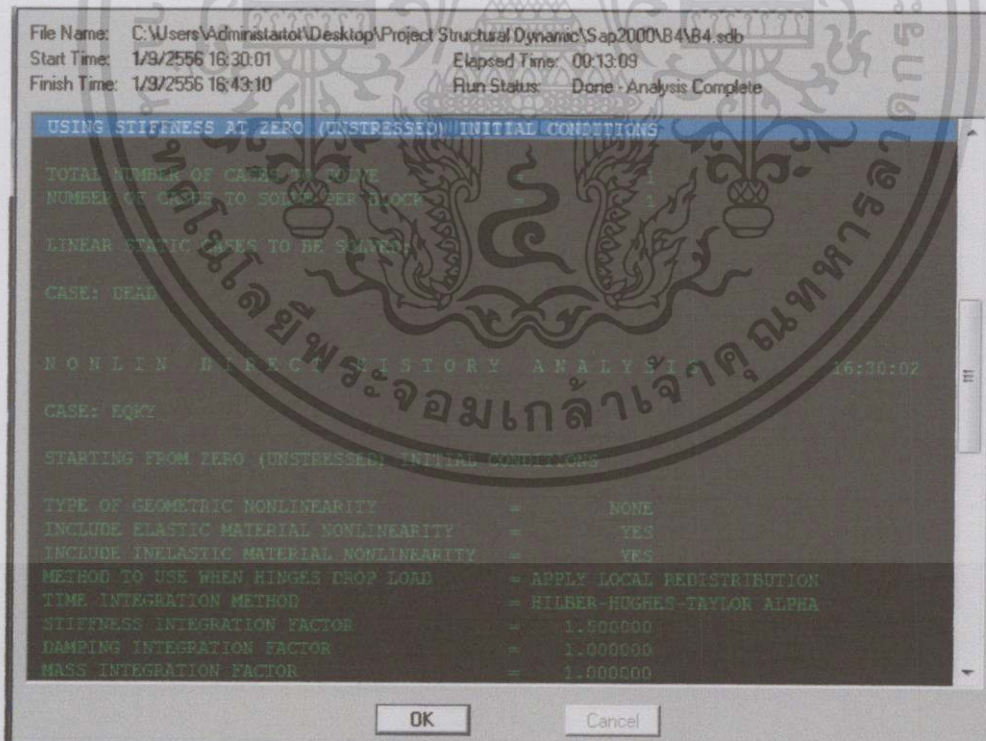
รูปที่ 3.18 รูปแสดงหน้าต่างการกำหนด Time และ Value ของ Time History

3.4.10 ทำRun โปรแกรม กดที่Run Analysis >> Set Analysis Case แบบรูปที่ 3.18>>

กด Run Now >> >> โปรแกรมจำทำการ Run แบบรูปที่ 3.19

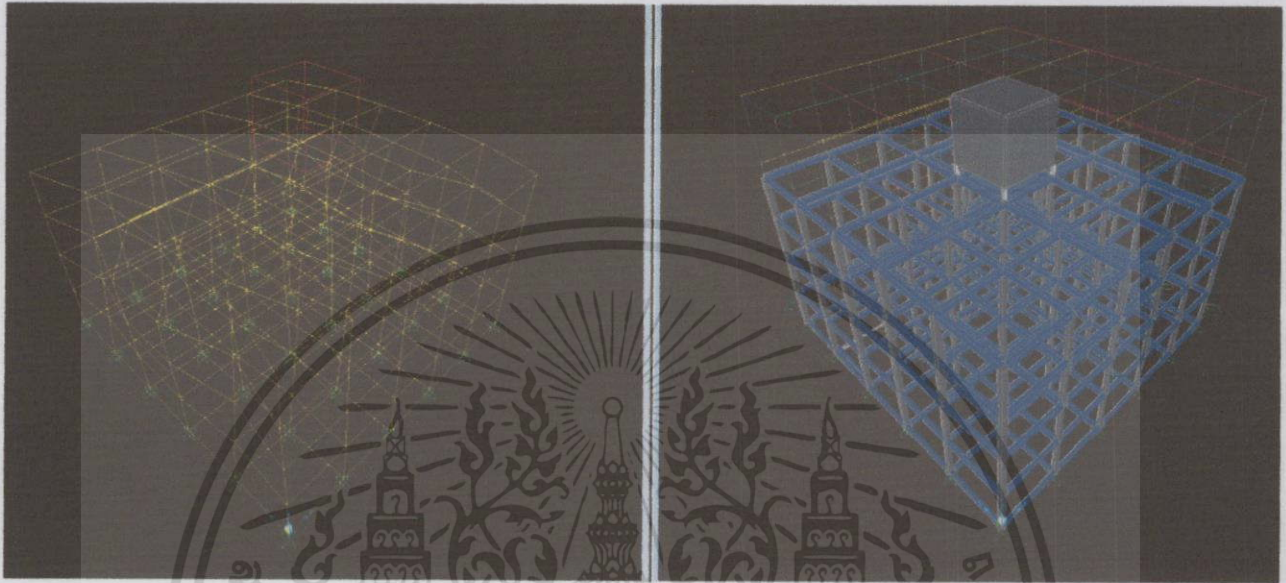


รูปที่ 3.19 รูปแสดงการ Set Analysis Case

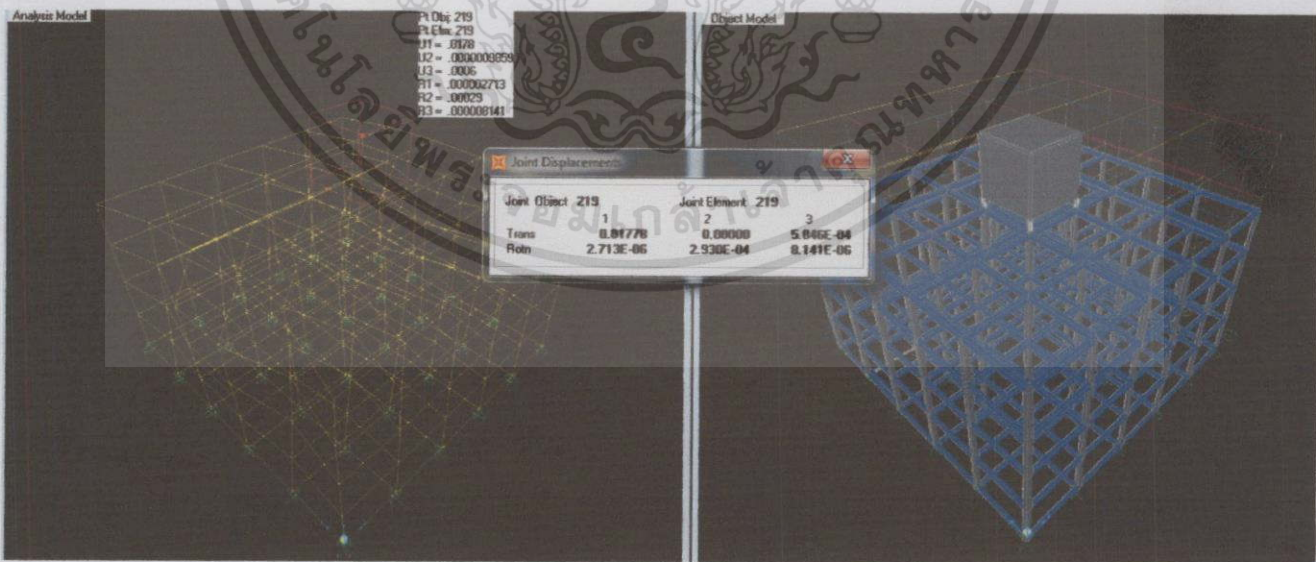


รูปที่ 3.20 แสดงการRun ของโปรแกรม

3.4.11 ทำการแสดงการเปลี่ยนรูปของวัตถุ กดที่ Display >> Show Deform Case >> ได้รูปลักษณะวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 3.20 >> คลิกขวาตรงจุดที่สนใจจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลง >> แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง ณ จุดที่พิจารณาดังรูป 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงรูปลักษณะวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.22 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง ณ จุดที่พิจารณา

บทที่ 4

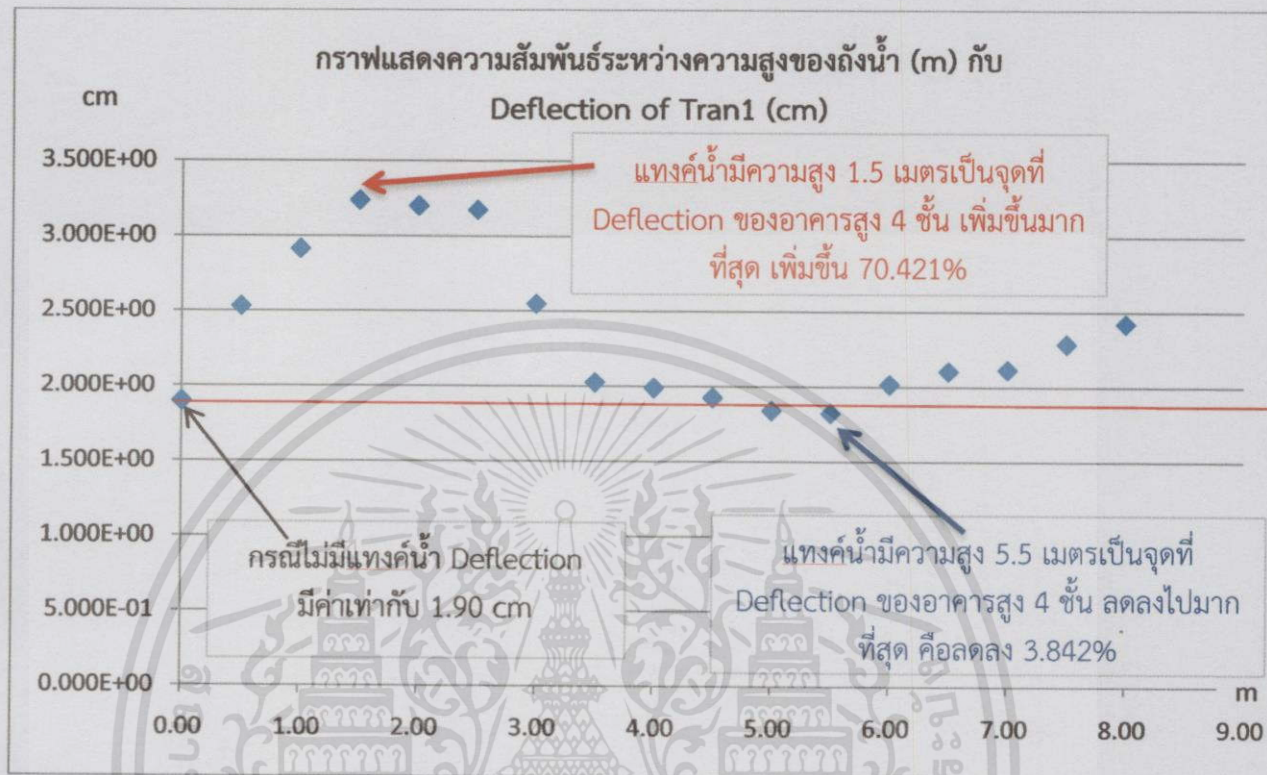
ผลการทดลอง

4.1 กรณีอาคารสูง 4 ชั้น

ตารางที่ 4.1.1 Deflection of Trans1 Point 175 ของอาคารสูง 4 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถ้ง 4*4*H (m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Deflection of Trans1 Point 175(cm)	% การลดลงของDeflection of Trans1 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถ้งน้ำกับกรณีถ้งน้ำความสูง ใดๆ
1	0.00	1.900E-00	-
2	0.50	2.532E-00	-33.263%
3	1.00	2.916E-00	-53.474%
4	1.50	3.238E-00	-70.421%
5	2.00	3.201E-00	-68.474%
6	2.50	3.174E-00	-67.053%
7	3.00	2.550E-00	-34.211%
8	3.50	2.026E-00	-6.632%
9	4.00	1.991E-00	-4.789%
10	4.50	1.928E-00	-1.474%
11	5.00	1.844E-00	2.947%
12	5.50	1.827E-00	3.842%
13	6.00	2.017E-00	-6.158%
14	6.50	2.105E-00	-10.789%
15	7.00	2.116E-00	-11.368%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ (m) กับ Deflection of Tran1 (cm)



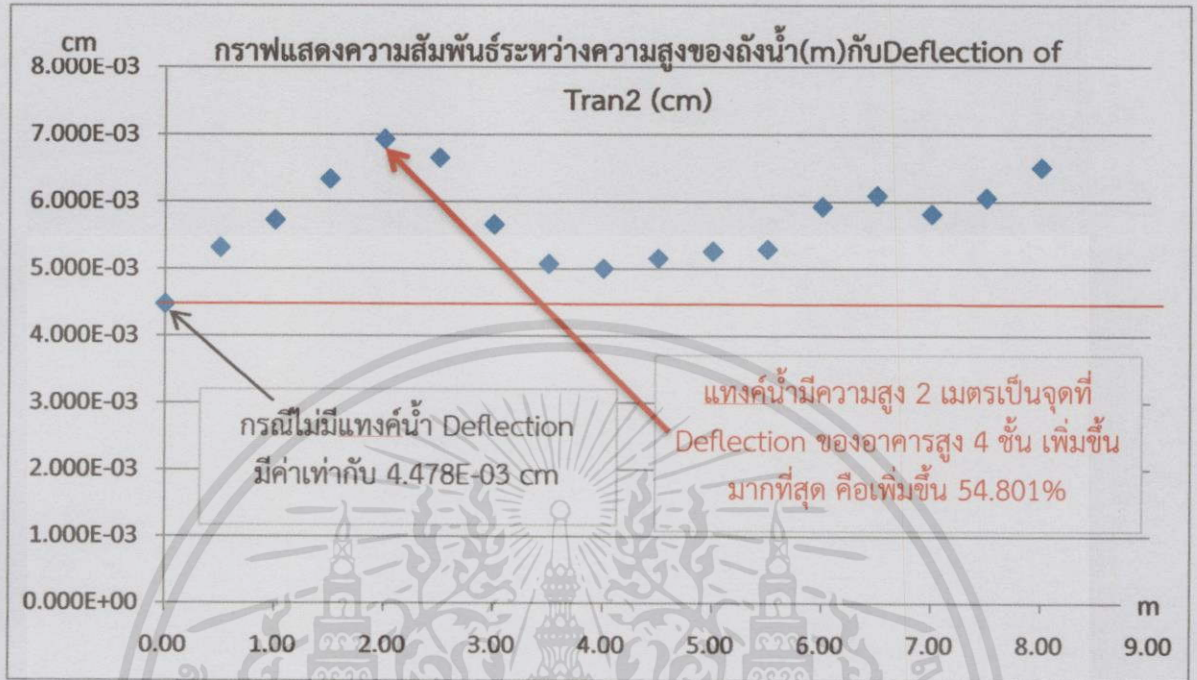
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran1 (cm) ของอาคาร 4 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 4 ชั้น กรณีไม่มีถังน้ำ Deflection of Tran1 มีค่าเท่ากับ 1.90 cm หลังทำการจูนค่าถังน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่ถังน้ำมีความสูง 1.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 4 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้น 70.421% และที่ถังน้ำมีความสูง 5.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection ของอาคารสูง 4 ชั้น ลดลงไปมากที่สุด คือลดลง 3.842%

ตารางที่ 4.1.2 ผลDeflection of Trans2 Point 175 ของอาคารสูง 4 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถ้ำ 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Deflection of Trans2 Point 175(cm)	% การลดลงของDeflection of Tran2 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถ้ำกับกรณีถ้ำน้ำความสูง ใดๆ
1	0.00	4.478E-03	-
2	0.50	5.318E-03	-18.758%
3	1.00	5.732E-03	-28.004%
4	1.50	6.338E-03	-41.536%
5	2.00	6.932E-03	-54.801%
6	2.50	6.656E-03	-48.638%
7	3.00	5.663E-03	-26.463%
8	3.50	5.075E-03	-13.332%
9	4.00	5.004E-03	-11.746%
10	4.50	5.156E-03	-15.141%
11	5.00	5.264E-03	-17.552%
12	5.50	5.295E-03	-18.245%
13	6.00	5.933E-03	-32.492%
14	6.50	6.094E-03	-36.088%
15	7.00	5.823E-03	-30.036%
16	7.50	6.060E-03	-35.328%
17	8.00	6.508E-03	-45.333%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ (m) กับ Deflection of Tran2 (cm)



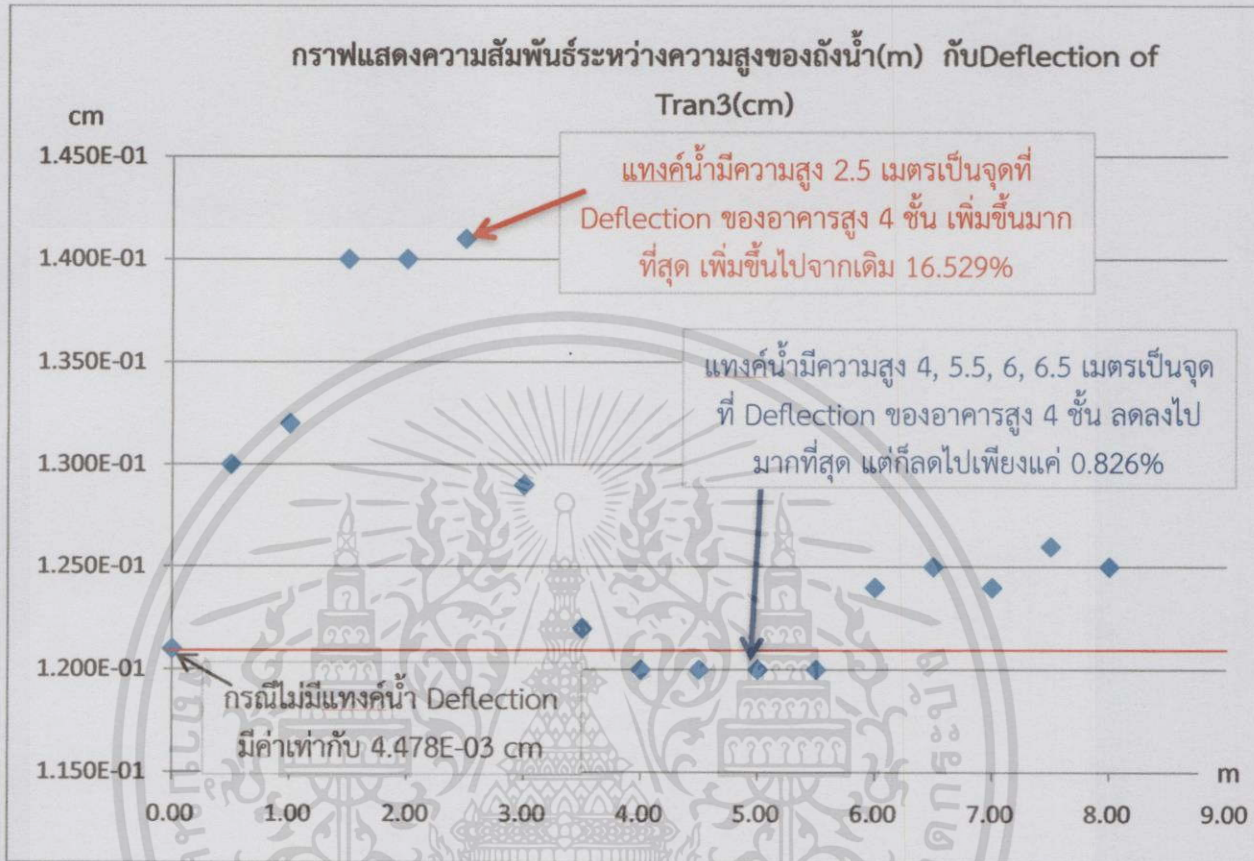
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran2 (cm) ของอาคาร 4 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 4 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Deflection of Tran2 มีค่าเท่ากับ 4.478E-03 cm หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 1.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 4 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้น 54.801% และไม่มี ความสูงใดที่ทำให้ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 4 ชั้น ลดลง

ตารางที่ 4.1.3 ผลDeflection of Trans3 Point 175 ของอาคารสูง 4 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถ้ง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Deflection of Trans3 Point 175(cm)	% การลดลงของDeflection of Tran3 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถ้งน้ำกับกรณีถ้งน้ำความ สูงใดๆ
1	0.00	1.210E-01	-
2	0.50	1.300E-01	-7.438%
3	1.00	1.320E-01	-9.091%
4	1.50	1.400E-01	-15.702%
5	2.00	1.400E-01	-15.702%
6	2.50	1.410E-01	-16.529%
7	3.00	1.290E-01	-6.612%
8	3.50	1.220E-01	-0.826%
9	4.00	1.200E-01	0.826%
10	4.50	1.200E-01	0.826%
11	5.00	1.200E-01	0.826%
12	5.50	1.200E-01	0.826%
13	6.00	1.240E-01	-2.479%
14	6.50	1.250E-01	-3.306%
15	7.00	1.240E-01	-2.479%
16	7.50	1.260E-01	-4.136%
17	8.00	1.250E-01	-3.306%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m) กับ Deflection of Tran3 (cm)



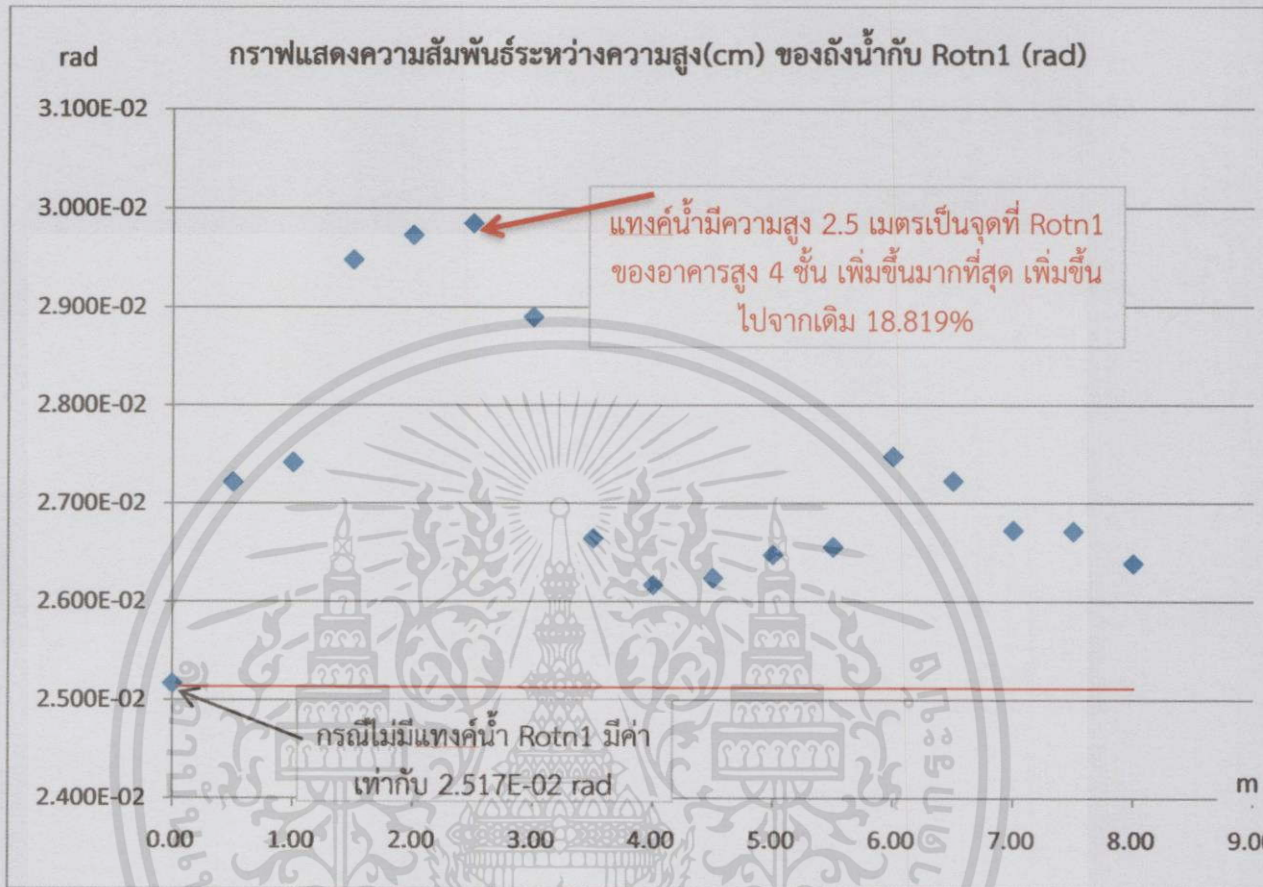
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Deflection of Tran3 (cm) ของอาคาร 4 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 4 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Deflection of Tran3 มีค่าเท่ากับ 1.210E-01 cm หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 2.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 4 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 16.529% และที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 4 , 4.5 , 5 , 5.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection ของอาคารสูง 4 ชั้น ลดลงไปมากที่สุด คือก็ลดลง 0.826%

ตารางที่ 4.1.4 Rotn1 Point 175 ของอาคารสูง 4 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Rotn1 Point 175 (rad)	% การลดลงของ Rotn1 เปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	2.517E-02	-
2	0.50	2.722E-02	-8.145%
3	1.00	2.742E-02	-8.939%
4	1.50	2.948E-02	-17.124%
5	2.00	2.973E-02	-18.117%
6	2.50	2.985E-02	-18.594%
7	3.00	2.890E-02	-14.819%
8	3.50	2.665E-02	-5.880%
9	4.00	2.617E-02	-3.973%
10	4.50	2.624E-02	-4.251%
11	5.00	2.648E-02	-5.205%
12	5.50	2.656E-02	-5.522%
13	6.00	2.748E-02	-9.178%
14	6.50	2.723E-02	-8.184%
15	7.00	2.673E-02	-6.198%
16	7.50	2.672E-02	-6.158%
17	8.00	2.639E-02	-4.847%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง(cm) ของถังน้ำกับ Rotn1 (rad)



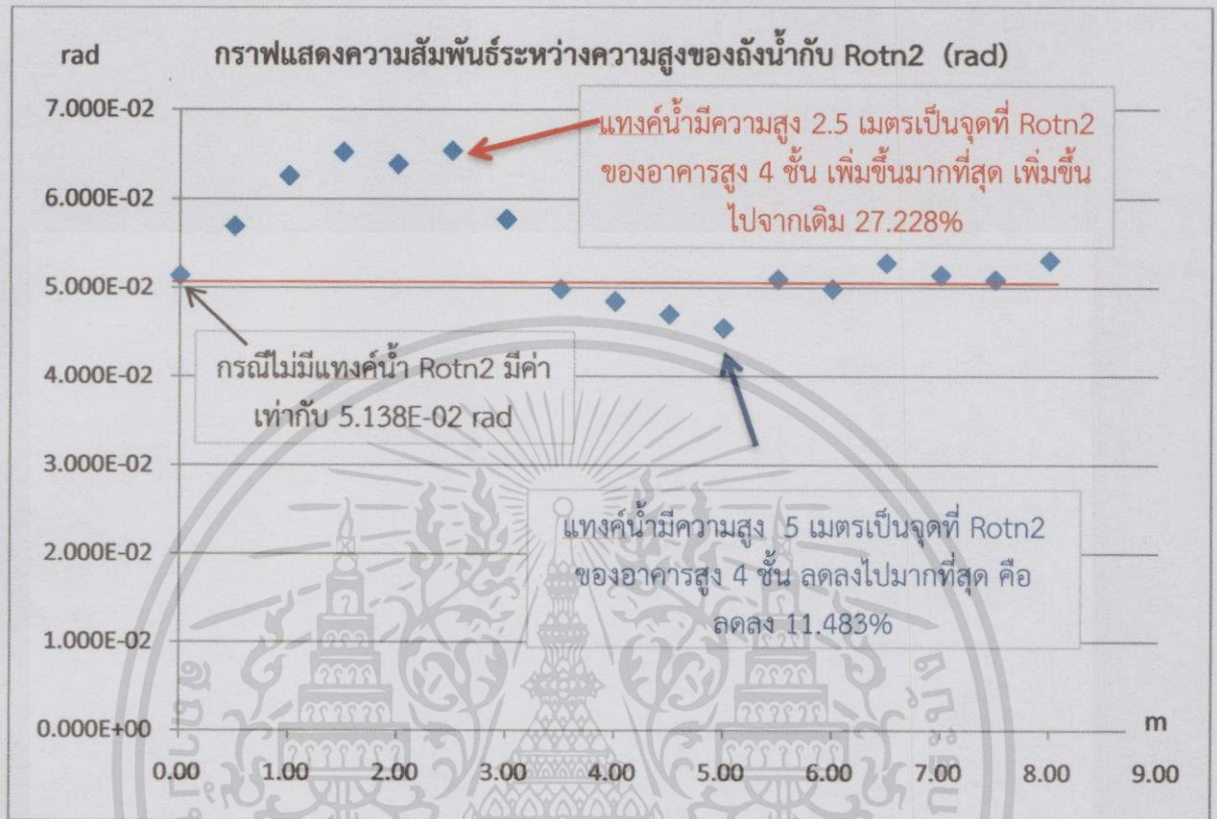
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn1 (rad) ของอาคาร 4 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงไปของ Rotn1 ของอาคารสูง 4 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Rotn1 มีค่าเท่ากับ $1.210E-01$ rad หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 2.5 เมตรเป็นจุดที่ Rotn1 ของอาคารสูง 4 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้นไปจากเดิม 16.529% และที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 4 , 4.5 , 5 , 5.5 เมตรเป็นจุดที่ Rotn1 ของอาคารสูง 4 ชั้น ลดลงไปมากที่สุด คือลดไป 0.826%

ตารางที่ 4.1.5 Rotn2 Point 175 ของอาคารสูง 4 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึงน้ำ สูงH (m)	Rotn2 Point 175(rad)	% การลดลงของ Rotn2 เปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	5.138E-02	-
2	0.50	5.695E-02	-10.841%
3	1.00	6.257E-02	-21.779%
4	1.50	6.521E-02	-26.917%
5	2.00	6.388E-02	-24.329%
6	2.50	6.537E-02	-27.228%
7	3.00	5.773E-02	-12.359%
8	3.50	4.986E-02	2.958%
9	4.00	4.850E-02	5.605%
10	4.50	4.704E-02	8.447%
11	5.00	4.548E-02	11.483%
12	5.50	5.096E-02	0.817%
13	6.00	4.989E-02	2.900%
14	6.50	5.279E-02	-2.744%
15	7.00	5.142E-02	-0.078%
16	7.50	5.090E-02	0.934%
17	8.00	5.307E-02	-3.289%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง (m) ของถังน้ำกับ Rotn2 (rad)



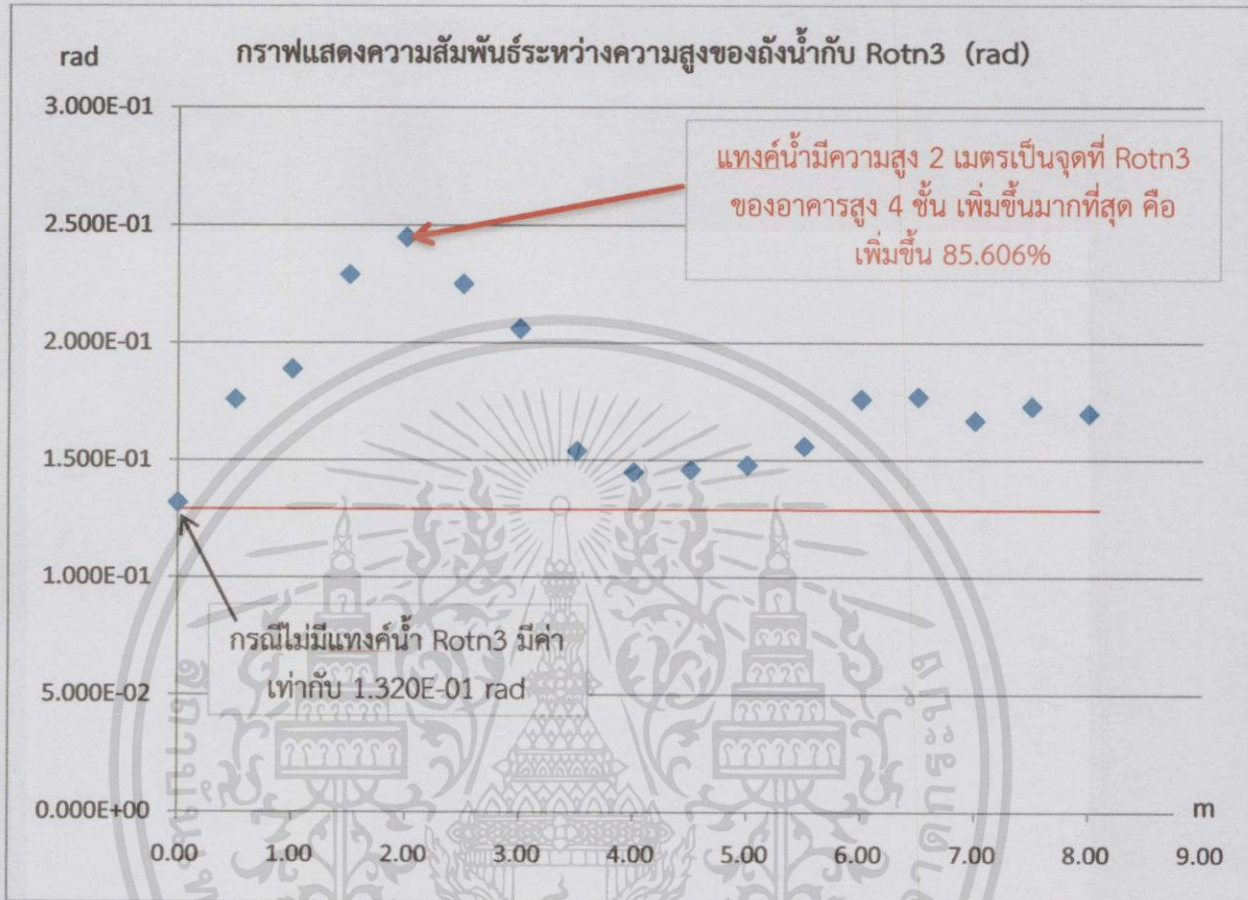
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn2 (rad) ของอาคาร 4 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn2 ของอาคารสูง 4 ชั้น กรณีไม่มีแก๊สน้ำ Rotn2 มีค่าเท่ากับ 5.138E-02 rad หลังทำการจูนค่าแก๊สน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แก๊สน้ำมีความสูง 2.5 เมตรเป็นจุดที่ Rotn2 ของอาคารสูง 4 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้นไปจากเดิม 27.228% และที่แก๊สน้ำมีความสูง 5 เมตรเป็นจุดที่ Rotn2 ของอาคารสูง 4 ชั้น ลดลงไปมากที่สุด คือลดลง 11.483%

ตารางที่ 4.1.6 Rotn3 Point 175 ของอาคารสูง 4 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Rotn3 Point 175(rad)	% การลดลงของRotn3 เมื่อเปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	1.320E-01	-
2	0.50	1.760E-01	-33.333%
3	1.00	1.890E-01	-43.182%
4	1.50	2.290E-01	-73.485%
5	2.00	2.450E-01	-85.606%
6	2.50	2.250E-01	-70.455%
7	3.00	2.060E-01	-56.061%
8	3.50	1.540E-01	-16.667%
9	4.00	1.450E-01	-9.848%
10	4.50	1.460E-01	-10.606%
11	5.00	1.480E-01	-12.121%
12	5.50	1.560E-01	-18.182%
13	6.00	1.760E-01	-33.333%
14	6.50	1.770E-01	-34.091%
15	7.00	1.670E-01	-26.515%
16	7.50	1.730E-01	-31.061%
17	8.00	1.700E-01	-28.788%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำกับ Rotn3



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn3 (rad) ของอาคาร 4 ชั้น

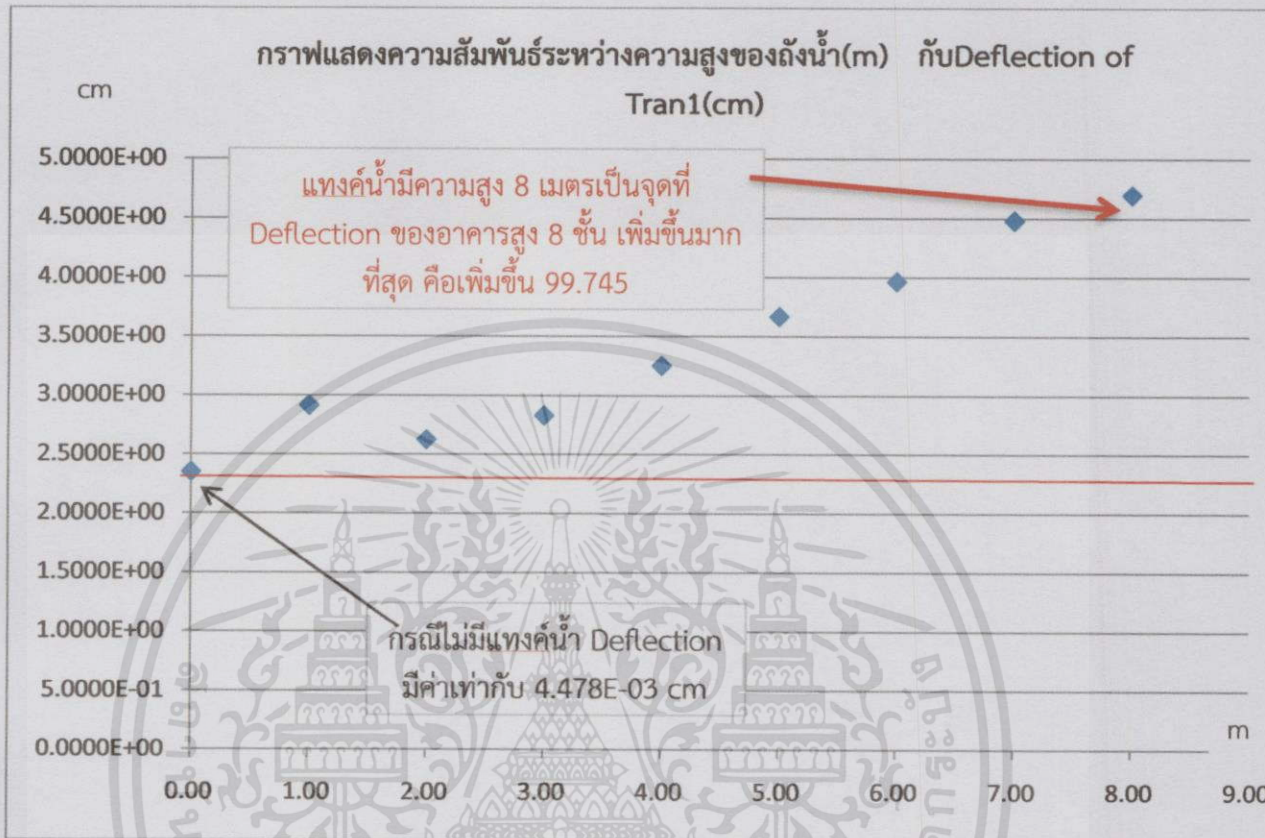
กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn3 ของอาคารสูง 4 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Rotn3 มีค่าเท่ากับ 1.320E-01 rad พอทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 2 เมตรเป็นจุดที่ Rotn3 ของอาคารสูง 4 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้นไปจากเดิม 85.606% และไม่มีความสูงใดที่ทำให้ Rotn3 ของอาคารสูง 4 ชั้น ลดลง

4.2 กรณีอาคารสูง 8 ชั้น

ตารางที่ 4.2.1 Deflection of Trans1 Point 398 ของอาคารสูง 8 ชั้น

ลำดับที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็ม ถึงน้ำสูงH (m)	Deflection of Trans1 Point 398(cm)	% การลดลงของDeflection of Tran1 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีถังน้ำความ สูงใดๆ
1	0.00	2.3510E+00	-
2	0.50	2.285E+00	2.807%
3	1.00	2.916E+00	-24.032%
4	1.50	2.732E+00	-16.206%
5	2.00	2.627E+00	-11.740%
6	2.50	2.664E+00	-13.313%
7	3.00	2.832E+00	-20.459%
8	3.50	3.002E+00	-27.690%
9	4.00	3.253E+00	-38.367%
10	4.50	3.508E+00	-49.213%
11	5.00	3.668E+00	-56.019%
12	5.50	3.730E+00	-58.656%
13	6.00	3.966E+00	-68.694%
14	6.50	4.427E+00	-88.303%
15	7.00	4.481E+00	-90.600%
16	7.50	4.642E+00	-97.448%
17	8.00	4.696E+00	-99.745%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m) กับ Deflection of Tran1 (cm)



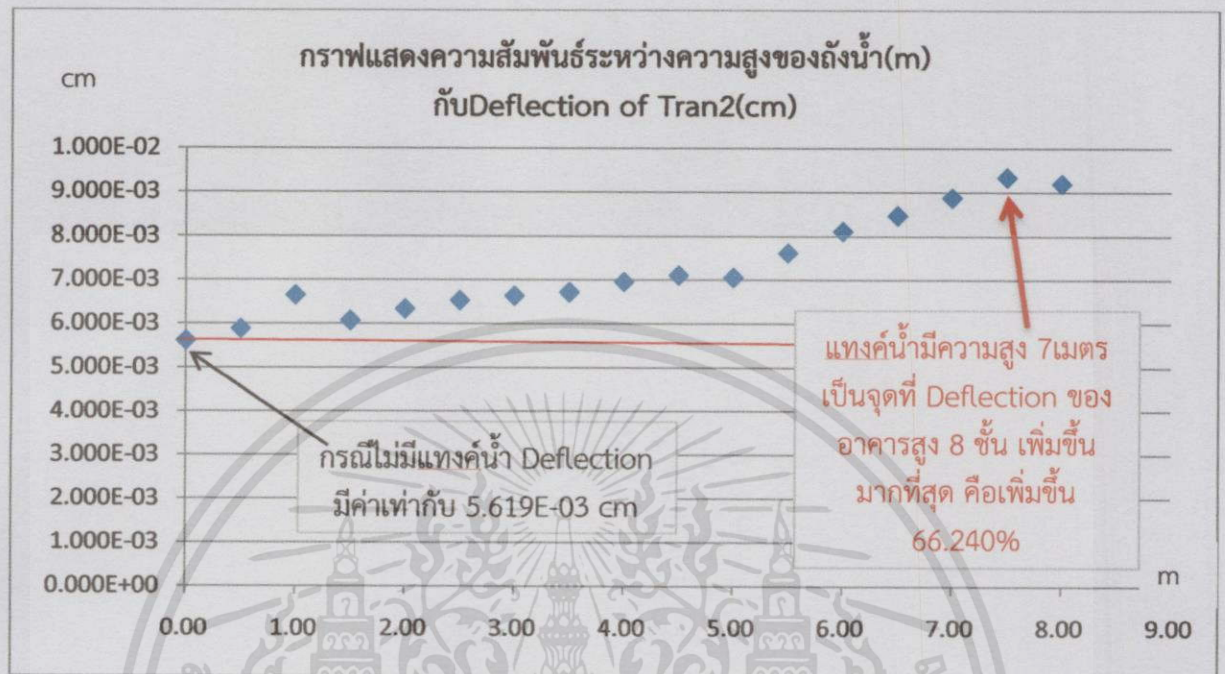
รูปที่ 4.7 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran1 (cm) ของอาคาร 8 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 8 ชั้น กรณีไม่มีแทงค์น้ำ Deflection of Tran1 มีค่าเท่ากับ 2.351E-01 cm พอทำการจูนค่าแทงค์น้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แทงค์น้ำมีความสูง 8 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 8 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 99.745% และไม่มี ความสูงใดๆที่ทำให้ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 8 ชั้น ลดลง

ตารางที่ 4.2.2 Deflection of Trans2 Point 398 ของอาคารสูง 8 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3)	Deflection of Trans2 Point 398(cm)	% การลดลงของDeflection of Tran1 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีถังน้ำ ความสูงใดๆ
1	0.00	5.619E-03	-
2	0.50	5.887E-03	-4.770%
3	1.00	6.650E-03	-18.348%
4	1.50	6.072E-03	-8.062%
5	2.00	6.340E-03	-12.831%
6	2.50	6.532E-03	-16.248%
7	3.00	6.637E-03	-18.117%
8	3.50	6.720E-03	-19.594%
9	4.00	6.956E-03	-23.794%
10	4.50	7.106E-03	-26.464%
11	5.00	7.053E-03	-25.521%
12	5.50	7.620E-03	-35.611%
13	6.00	8.115E-03	-44.421%
14	6.50	8.473E-03	-50.792%
15	7.00	8.877E-03	-57.982%
16	7.50	9.341E-03	-66.240%
17	8.00	9.196E-03	-63.659%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran2(cm)



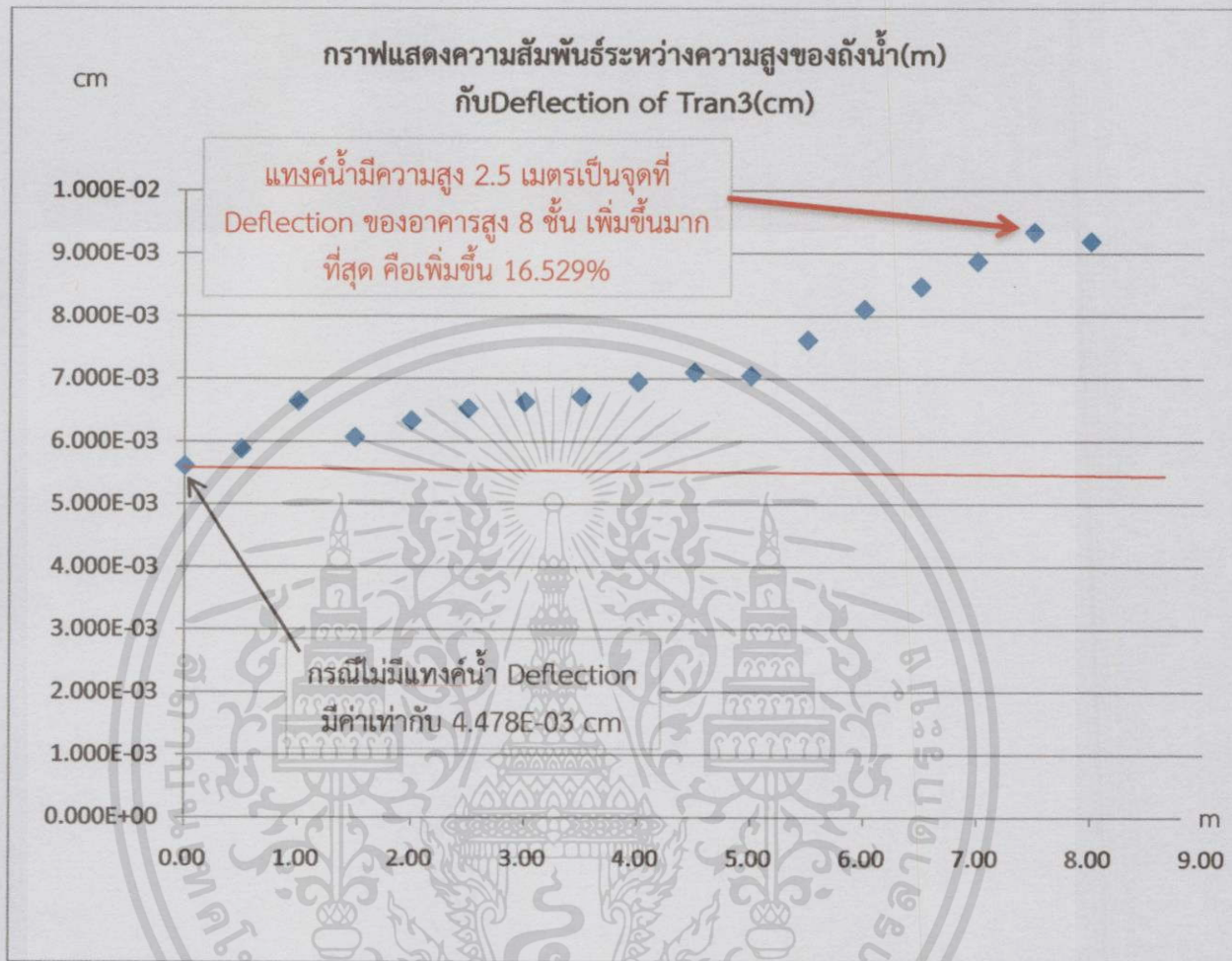
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran2 (cm) ของอาคาร 8 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 8 ชั้น กรณีไม่มีแทงค์น้ำ Deflection of Tran2 มีค่าเท่ากับ $5.619E-03$ cm พอทำการจูนค่าแทงค์น้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แทงค์น้ำมีความสูง 7 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 8 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 66.240% และไม่มีความสูงใดที่ทำให้ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 8 ชั้น ลดลง

ตารางที่ 4.2.3 Deflection of Trans3 Point 398 ของอาคารสูง 8ชั้น

ลำดับที่	ขนาดถ้ง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Deflection of Trans3 Point 398(cm)	% การลดลงของDeflection of Tran3 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถึงน้ำกับกรณีถึงน้ำ ความสูงใดๆ
1	0.00	2.960E-01	-
2	0.50	3.000E-01	-1.351%
3	1.00	3.030E-01	-2.365%
4	1.50	3.080E-01	-4.054%
5	2.00	3.010E-01	-1.689%
6	2.50	3.050E-01	-3.041%
7	3.00	3.090E-01	-4.392%
8	3.50	3.110E-01	-5.068%
9	4.00	3.160E-01	-6.757%
10	4.50	3.220E-01	-8.784%
11	5.00	3.260E-01	-10.135%
12	5.50	3.280E-01	-10.811%
13	6.00	3.420E-01	-15.541%
14	6.50	3.440E-01	-16.216%
15	7.00	3.410E-01	-15.541%
16	7.50	3.390E-01	-14.527%
17	8.00	3.420E-01	-15.541%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m) กับ Deflection of Tran3 (cm)



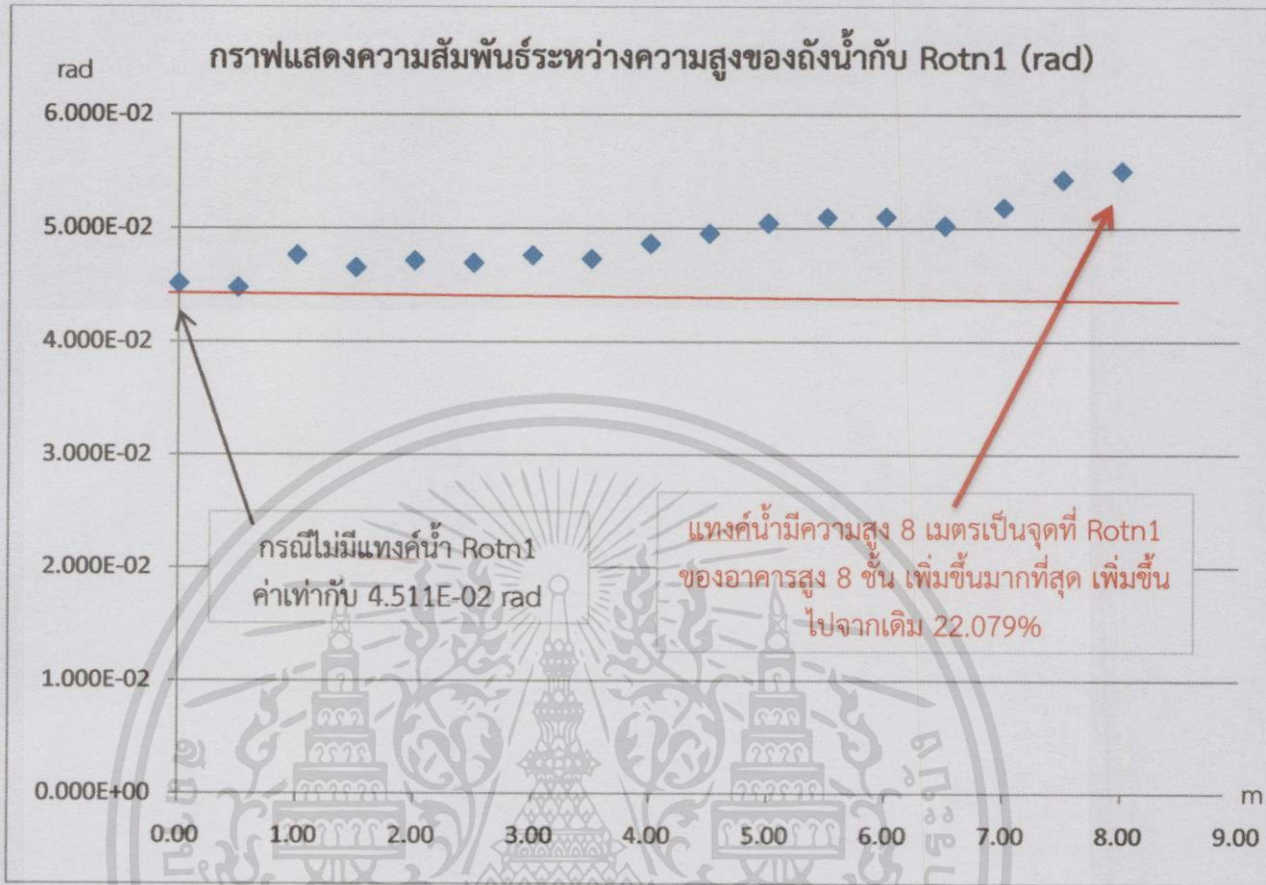
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Deflection of Tran3 (cm) ของอาคาร 8 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 8 ชั้น กรณีไม่มีถังน้ำ Deflection of Tran3 มีค่าเท่ากับ 4.478E-03 cm พอทำการจูนค่าถังน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่ถังน้ำมีความสูง 7.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 8 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 66.659% และไม่มีความสูงใดที่ทำให้ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 8 ชั้น ลดลง

ตารางที่ 4.2.4 Rotn1 Point 398 ของอาคารสูง 8 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึงน้ำ สูงH (m)	Rotn1 Point 398 (rad)	% การลดลงของ Rotn1 เปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	4.511E-02	-
2	0.50	4.475E-02	0.798%
3	1.00	4.761E-02	-5.542%
4	1.50	4.650E-02	-3.081%
5	2.00	4.712E-02	-4.456%
6	2.50	4.691E-02	-3.990%
7	3.00	4.759E-02	-5.498%
8	3.50	4.729E-02	-4.833%
9	4.00	4.863E-02	-7.803%
10	4.50	4.955E-02	-9.843%
11	5.00	5.046E-02	-11.860%
12	5.50	5.098E-02	-13.013%
13	6.00	5.102E-02	-13.101%
14	6.50	5.024E-02	-11.372%
15	7.00	5.185E-02	-14.941%
16	7.50	5.431E-02	-20.395%
17	8.00	5.507E-02	-22.079%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำกับ Rotn1



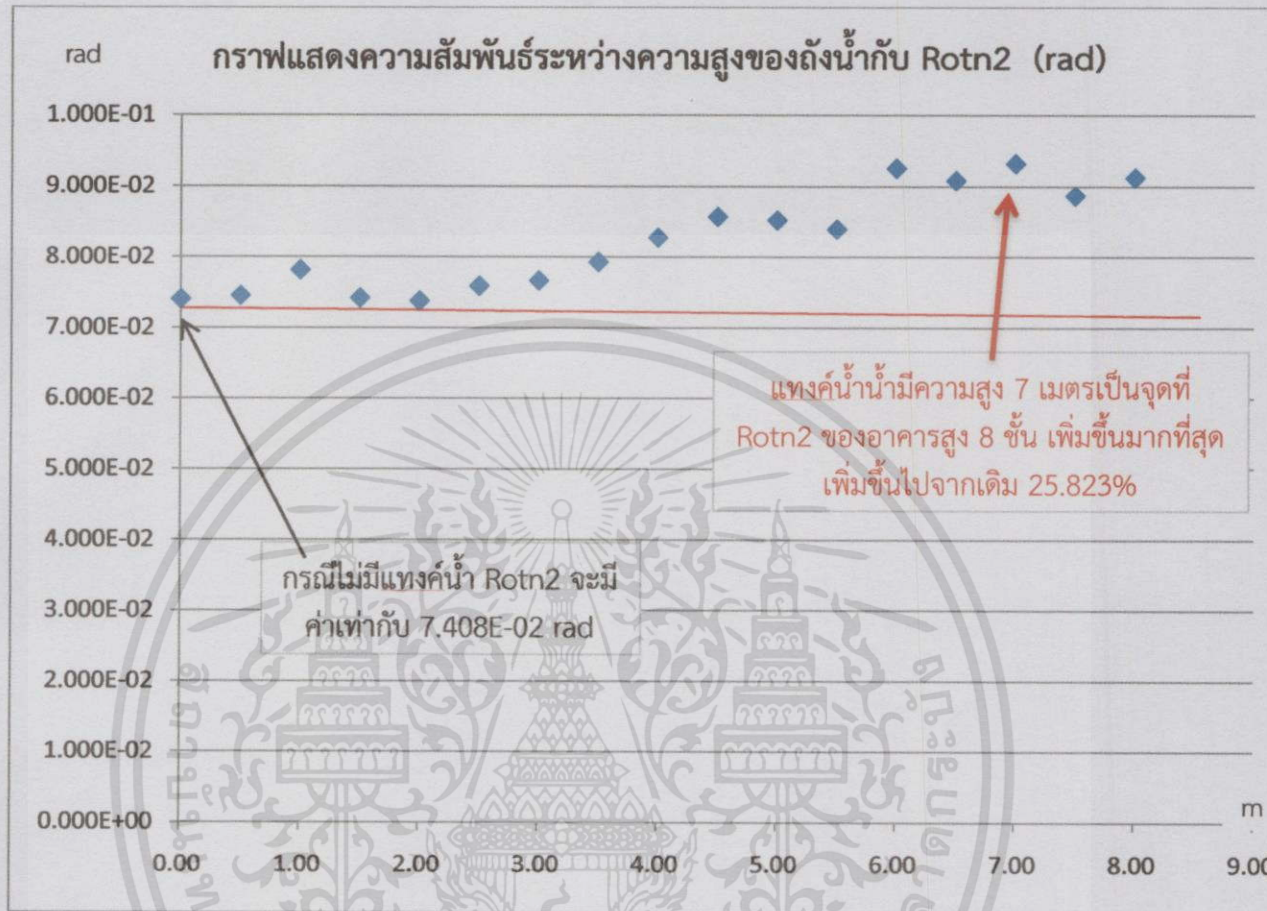
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn1 (rad) ของอาคาร 8 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn1 ของอาคารสูง 8 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Rotn1 มีค่าเท่ากับ 4.511E-02 rad หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 8 เมตร เป็นจุดที่ Rotn1 ของอาคารสูง 8 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 22.079% และไม่มี ความสูงใดที่ทำให้ Rotn1 ของอาคารสูง 8 ชั้น ลดลง

ตารางที่ 4.2.5 Rotn2 Point 398 ของอาคารสูง 8 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึงน้ำ สูงH (m)	Rotn2 Point 398(rad)	% การลดลงของ Rotn2 at Point 398 กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	7.408E-02	-
2	0.50	7.456E-02	-0.648%
3	1.00	7.819E-02	-5.548%
4	1.50	7.422E-02	-0.189%
5	2.00	7.381E-02	0.364%
6	2.50	7.593E-02	-2.497%
7	3.00	7.670E-02	-3.537%
8	3.50	7.932E-02	-7.073%
9	4.00	8.276E-02	-11.717%
10	4.50	8.571E-02	-15.699%
11	5.00	8.522E-02	-15.038%
12	5.50	8.395E-02	-13.323%
13	6.00	9.254E-02	-24.919%
14	6.50	9.084E-02	-22.624%
15	7.00	9.321E-02	-25.823%
16	7.50	8.868E-02	-19.708%
17	8.00	9.125E-02	-23.178%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ (m) กับ Rotn2 (rad)



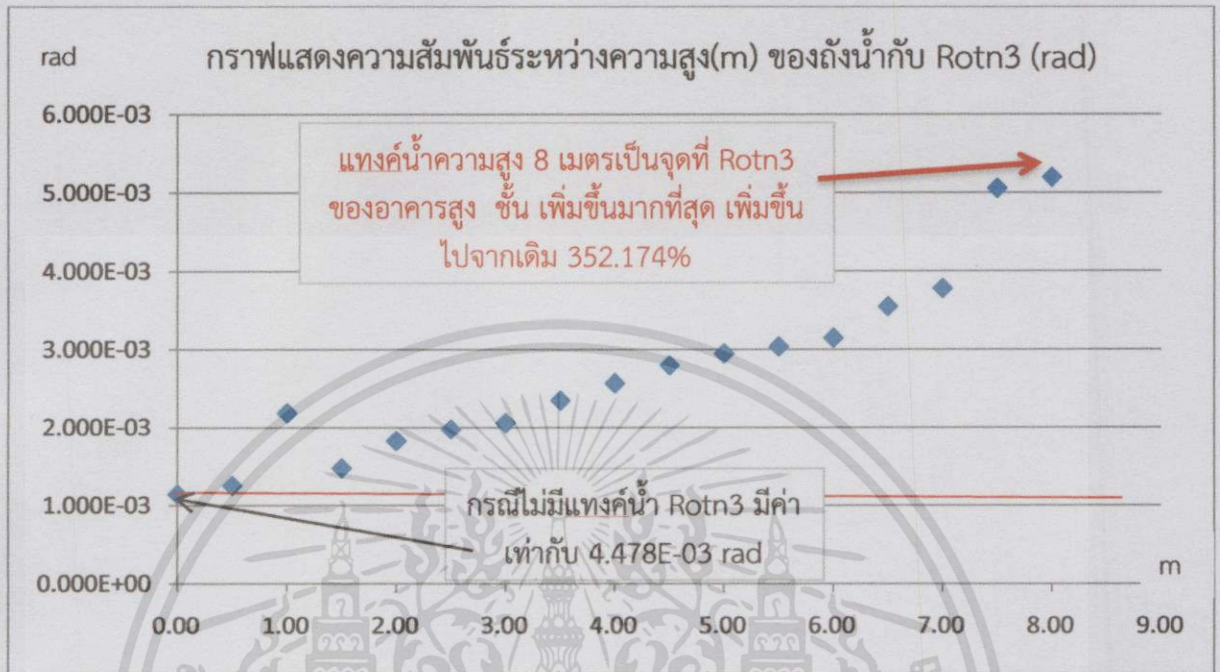
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn2 (rad) ของอาคาร 8 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn2 ของอาคารสูง 8 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Rotn2 มีค่าเท่ากับ 7.408E-02 cm หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำน้ำมีความสูง 7 เมตรเป็นจุดที่ Rotn2 ของอาคารสูง 8 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้นไปจากเดิม 25.823%และไม่มีความสูงใดที่ทำให้ Rotn2 ของอาคารสูง 8 ชั้น ลดลงจากเดิม

ตารางที่ 4.2.6 Rotn3 Point 398 ของอาคาร 8 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึงน้ำ สูงH (m)	Rotn3 Point 398(rad)	% การลดลงของRotn3 เปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	1.150E-01	-
2	0.50	1.260E-01	-9.565%
3	1.00	2.990E-01	-72.174%
4	1.50	1.480E-01	-28.696%
5	2.00	1.830E-01	-59.130%
6	2.50	1.980E-01	-72.174%
7	3.00	2.060E-01	-79.130%
8	3.50	2.350E-01	-104.348%
9	4.00	2.570E-01	-123.478%
10	4.50	2.800E-01	-143.478%
11	5.00	2.950E-01	-156.522%
12	5.50	3.040E-01	-164.348%
13	6.00	3.150E-01	-173.913%
14	6.50	3.550E-01	-208.696%
15	7.00	3.780E-01	-228.696%
16	7.50	5.060E-01	-340.000%
17	8.00	5.200E-01	-352.174%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง(m) ของถังน้ำกับ Rotn3 (rad)



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn3 (rad) ของอาคาร 8 ชั้น

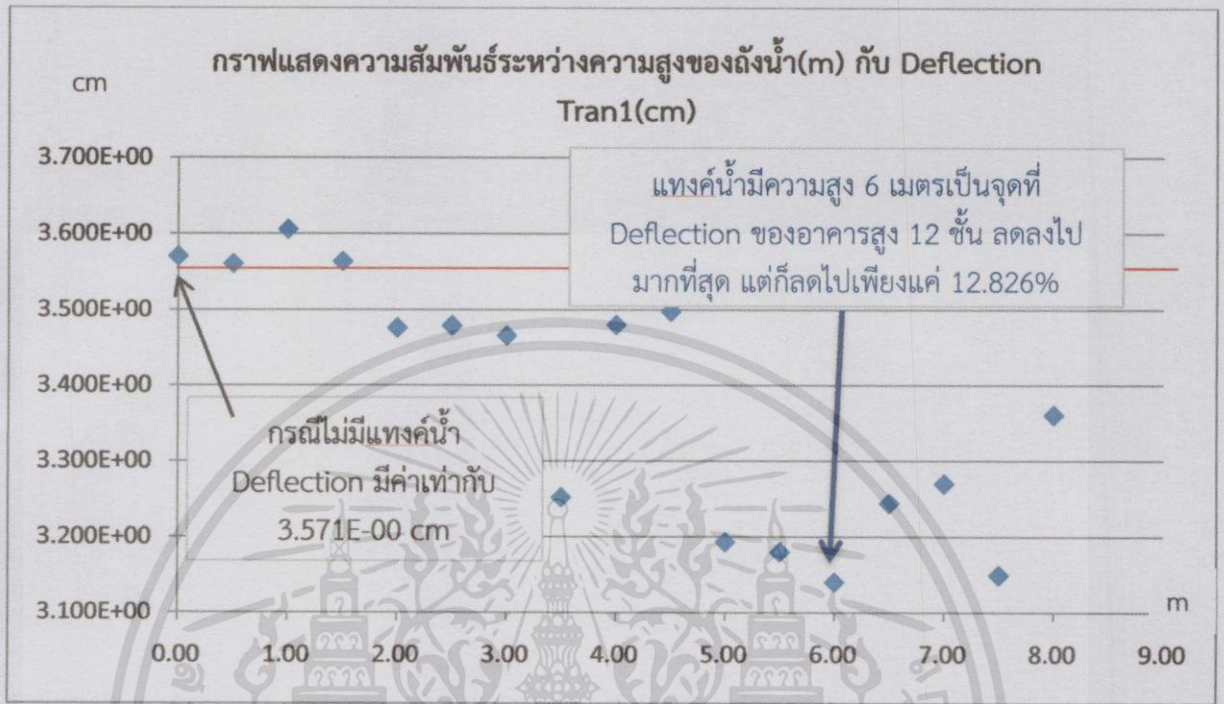
กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn3 ของอาคารสูง 8 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Rotn3 มีค่าเท่ากับ 4.478×10^{-3} cm พอทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 8 เมตรเป็นจุดที่ Rotn3 ของอาคารสูง 8 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้นไปจากเดิม 352.174% และไม่มีความสูงใดที่ทำให้ Rotn3 ของอาคารสูง 8 ชั้น ลดลงจากเดิม

4.3 กรณีอาคารสูง 12 ชั้น

ตารางที่ 4.3.1 Deflection of Trans1 Point 320 ของอาคาร 12 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถ้ง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็ม ถ้งน้ำสูงH (m)	Deflection of Trans1 (cm)	% การลดลงของDeflection of Trans1 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถ้งน้ำกับกรณีมีถ้งน้ำที่ ความสูงใดๆ
1	0.00	3.571E+00	-
2	0.50	3.561E+00	0.280%
3	1.00	3.606E+00	-0.980%
4	1.50	3.564E+00	0.196%
5	2.00	3.476E+00	2.660%
6	2.50	3.479E+00	2.576%
7	3.00	3.466E+00	2.940%
8	3.50	3.252E+00	8.933%
9	4.00	3.480E+00	2.548%
10	4.50	3.498E+00	2.044%
11	5.00	3.193E+00	10.585%
12	5.50	3.180E+00	10.949%
13	6.00	3.140E+00	12.069%
14	6.50	3.244E+00	9.157%
15	7.00	3.270E+00	8.429%
16	7.50	3.149E+00	11.817%
17	8.00	3.361E+00	5.881%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m) กับ Deflection Tran1 (cm)



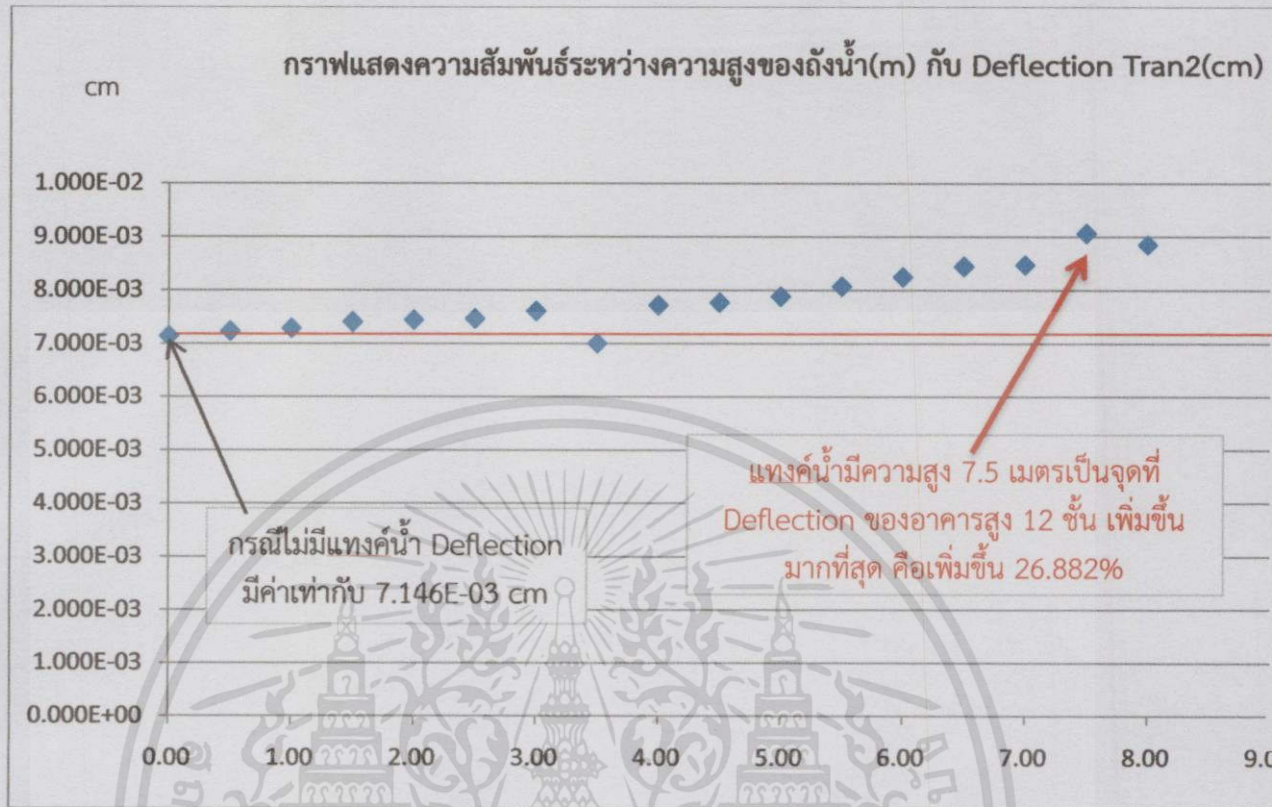
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran1 (cm) ของอาคาร 12 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 12 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Deflection of Tran1 มีค่าเท่ากับ 3.571E-00 cm หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 1 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 12 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 0.980% และที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 6 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran1 ของอาคารสูง 12 ชั้น ลดลงไปมากที่สุด คือลดลง 12.826%

ตารางที่ 4.3.2 Deflection of Trans2 Point 320 ของอาคาร 12 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถึง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Deflection of Trans2 (cm)	% การลดลงของDeflection of Trans2 เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีถึงน้ำกับกรณีมีถึงน้ำที่ความสูงใด
1	0.00	7.146E-03	-
2	0.50	7.238E-03	-1.287%
3	1.00	7.292E-03	-2.043%
4	1.50	7.409E-03	-3.680%
5	2.00	7.448E-03	-4.226%
6	2.50	7.473E-03	-4.576%
7	3.00	7.611E-03	-6.507%
8	3.50	7.010E-03	1.903%
9	4.00	7.724E-03	-8.088%
10	4.50	7.773E-03	-8.774%
11	5.00	7.886E-03	-10.335%
12	5.50	8.074E-03	-12.986%
13	6.00	8.249E-03	-15.435%
14	6.50	8.447E-03	-18.206%
15	7.00	8.473E-03	-18.570%
16	7.50	9.067E-03	-26.882%
17	8.00	8.851E-03	-23.860%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m) กับ Deflection Tran2 (cm)



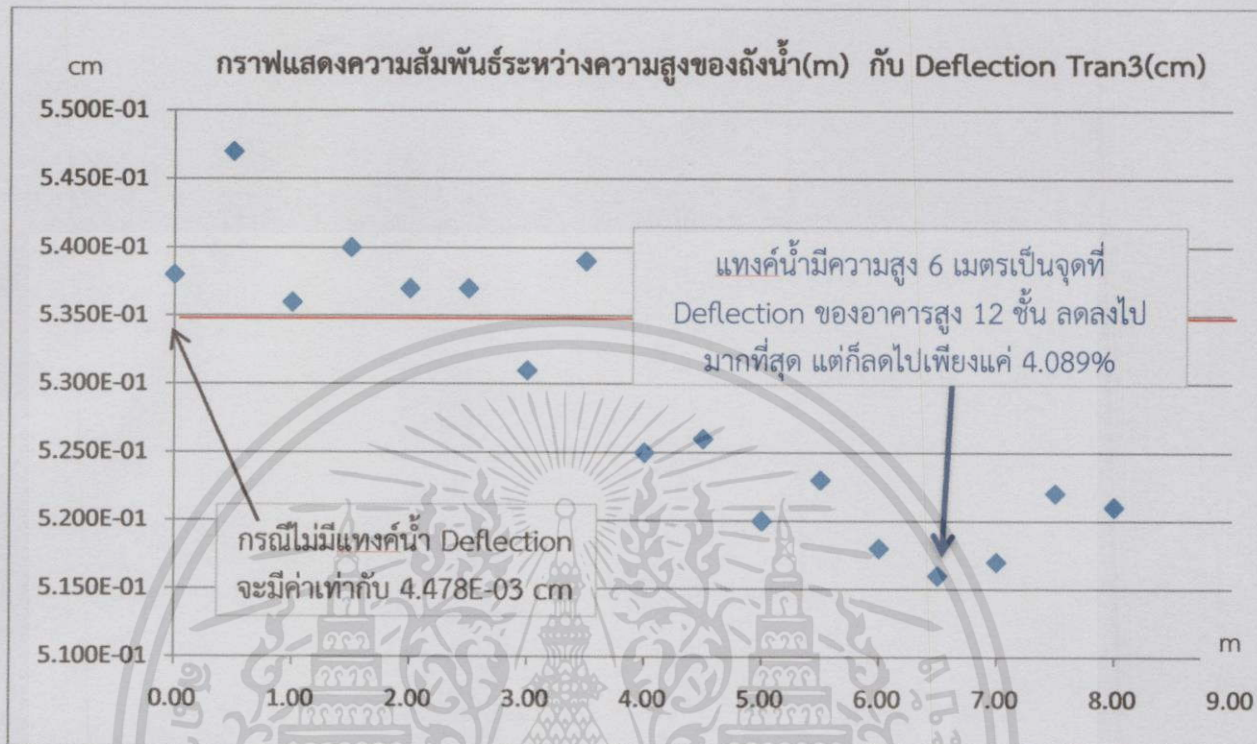
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran2 (cm) ของอาคาร 12 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 12 ชั้น โดยกรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Deflection of Tran2 มีค่าเท่ากับ 7.146E-03 cm หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 7.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran2 ของอาคารสูง 12 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 26.882%

ตารางที่ 4.3.3 Deflection of Trans3 Point 320 ของอาคารสูง 12 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดตั้ง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Deflection of Trans3 (cm)	% การลดลงของDeflection of Trans3 เปรียบเทียบกรณีไม่มีถึงน้ำกับกรณีมีถึงน้ำที่ ความสูงใดๆ
1	0.00	5.380E-01	-
2	0.50	5.470E-01	-1.673%
3	1.00	5.360E-01	0.372%
4	1.50	5.400E-01	-0.372%
5	2.00	5.370E-01	0.186%
6	2.50	5.370E-01	0.186%
7	3.00	5.310E-01	1.301%
8	3.50	5.390E-01	-0.186%
9	4.00	5.250E-01	2.416%
10	4.50	5.260E-01	2.230%
11	5.00	5.200E-01	3.346%
12	5.50	5.230E-01	2.788%
13	6.00	5.180E-01	3.717%
14	6.50	5.160E-01	4.089%
15	7.00	5.170E-01	3.903%
16	7.50	5.220E-01	2.974%
17	8.00	5.210E-01	3.160%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m) กับ Deflection Tran3 (cm)



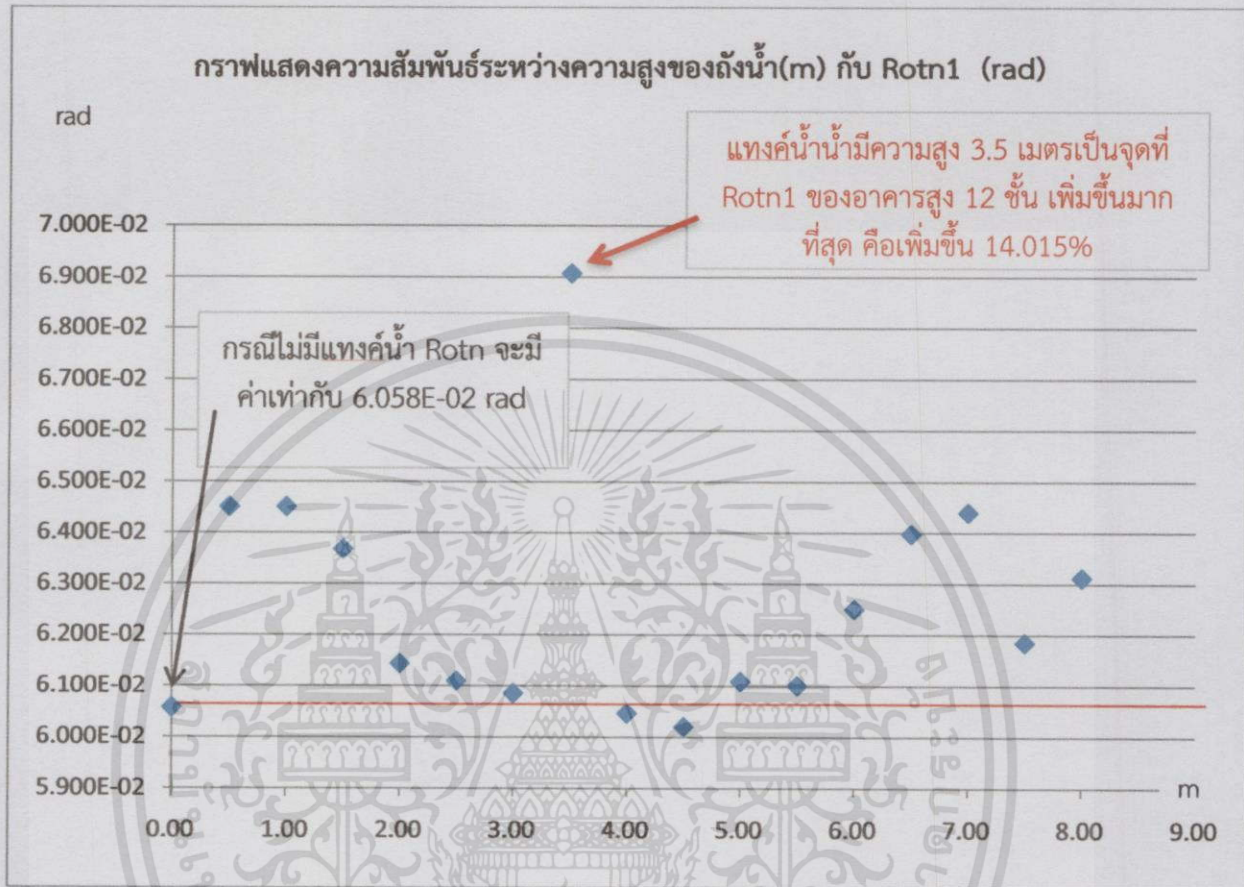
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับDeflection of Tran3 (cm) ของอาคาร 12 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 12 ชั้น กรณีไม่มีแท่งค้ำน้ำ Deflection of Tran3 มีค่าเท่ากับ 5.380E-01 cm หลังทำการจูนค่าแท่งค้ำน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 1.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 12 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด เพิ่มขึ้นไปจากเดิม 0.372% และที่แท่งค้ำน้ำมีความสูง 6.5 เมตรเป็นจุดที่ Deflection of Tran3 ของอาคารสูง 12 ชั้น ลดลงไปมากที่สุดคือลดไป 4.089%

ตารางที่ 4.3.4 Rotn1 Point 320 ของอาคารสูง 12 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Rotn1 (rad)	% การลดลงของ Rotn1 เมื่อเปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	6.058E-02	-
2	0.50	6.451E-02	-6.487%
3	1.00	6.451E-02	-6.487%
4	1.50	6.368E-02	-5.117%
5	2.00	6.144E-02	-1.420%
6	2.50	6.110E-02	-0.858%
7	3.00	6.086E-02	-0.462%
8	3.50	6.907E-02	-14.015%
9	4.00	6.047E-02	0.182%
10	4.50	6.021E-02	0.611%
11	5.00	6.109E-02	-0.842%
12	5.50	6.101E-02	-0.710%
13	6.00	6.251E-02	-3.186%
14	6.50	6.398E-02	-5.612%
15	7.00	6.440E-02	-6.306%
16	7.50	6.185E-02	-2.096%
17	8.00	6.312E-02	-4.193%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง(m) ของถังน้ำกับ Rotn1 (rad)



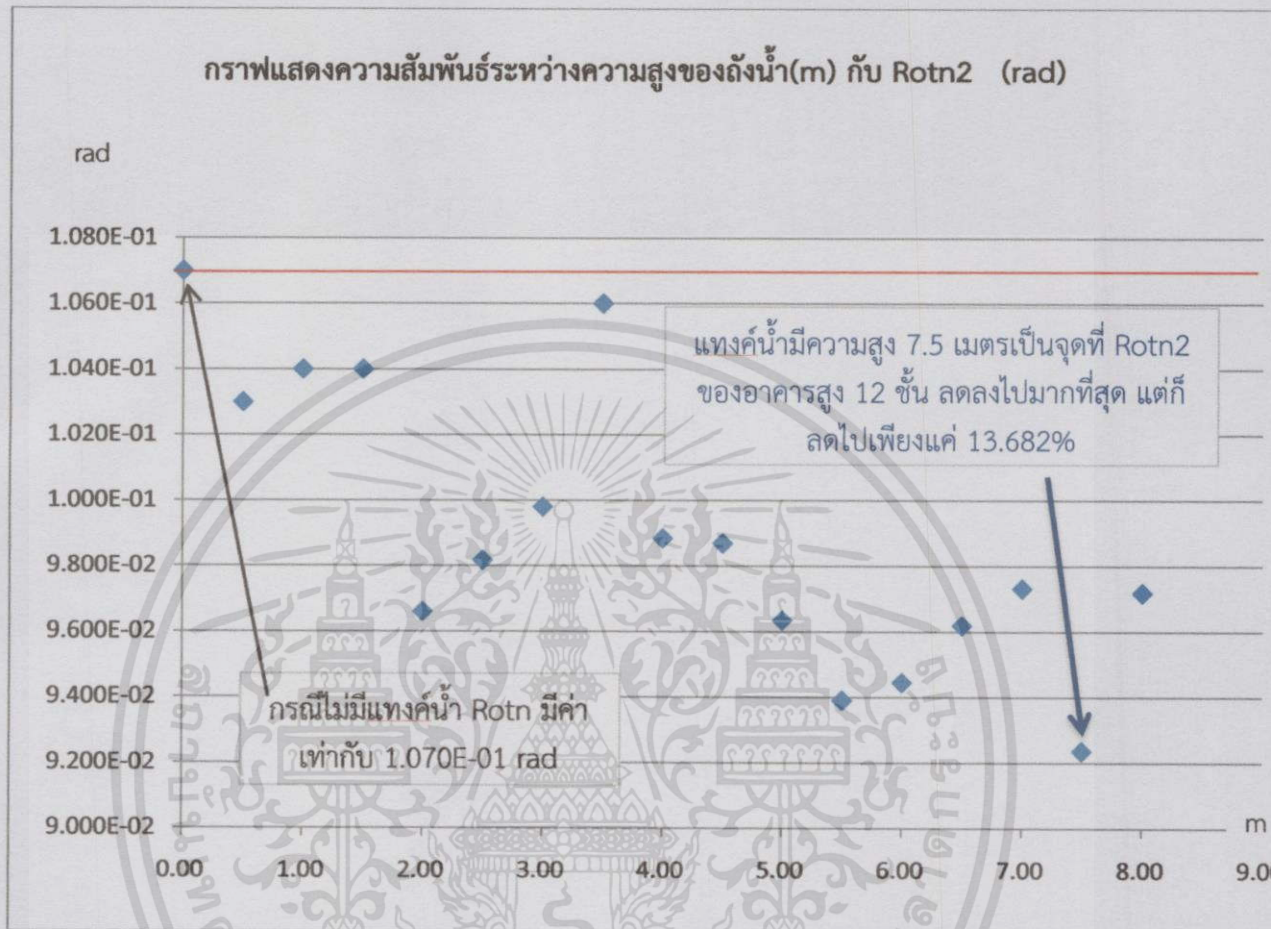
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn1 (rad) ของอาคาร 12 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn1 ของอาคารสูง 12 ชั้น โดยกรณีไม่มีแทงค์น้ำ Rotn1 มีค่าเท่ากับ 6.058E-02 rad หลังทำการจูนค่าแทงค์น้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แทงค์น้ำมีความสูง 0.50 เมตรเป็นจุดที่ Rotn1 ของอาคารสูง 12 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 14.015% และที่แทงค์น้ำมีความสูง 4.50 เมตรเป็นจุดที่ Rotn1 ของอาคารสูง 12 ชั้น ลดลงไปมากที่สุด คือลดลง 0.611%

ตารางที่ 4.3.5 Rotn2 Point 320 ของอาคาร 12 ชั้น

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึง น้ำสูงH (m)	Rotn2 (rad)	% การลดลงของ Rotn2 เปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	1.070E-01	-
2	0.50	1.030E-01	3.738%
3	1.00	1.040E-01	2.804%
4	1.50	1.040E-01	2.804%
5	2.00	9.661E-02	9.710%
6	2.50	9.817E-02	8.252%
7	3.00	9.980E-02	6.729%
8	3.50	1.060E-01	0.935%
9	4.00	9.884E-02	7.626%
10	4.50	9.869E-02	7.766%
11	5.00	9.635E-02	9.953%
12	5.50	9.391E-02	12.234%
13	6.00	9.445E-02	11.729%
14	6.50	9.619E-02	10.103%
15	7.00	9.732E-02	9.047%
16	7.50	9.236E-02	13.682%
17	8.00	9.719E-02	9.168%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง(m) ของถังน้ำกับ Rotn2 (rad)



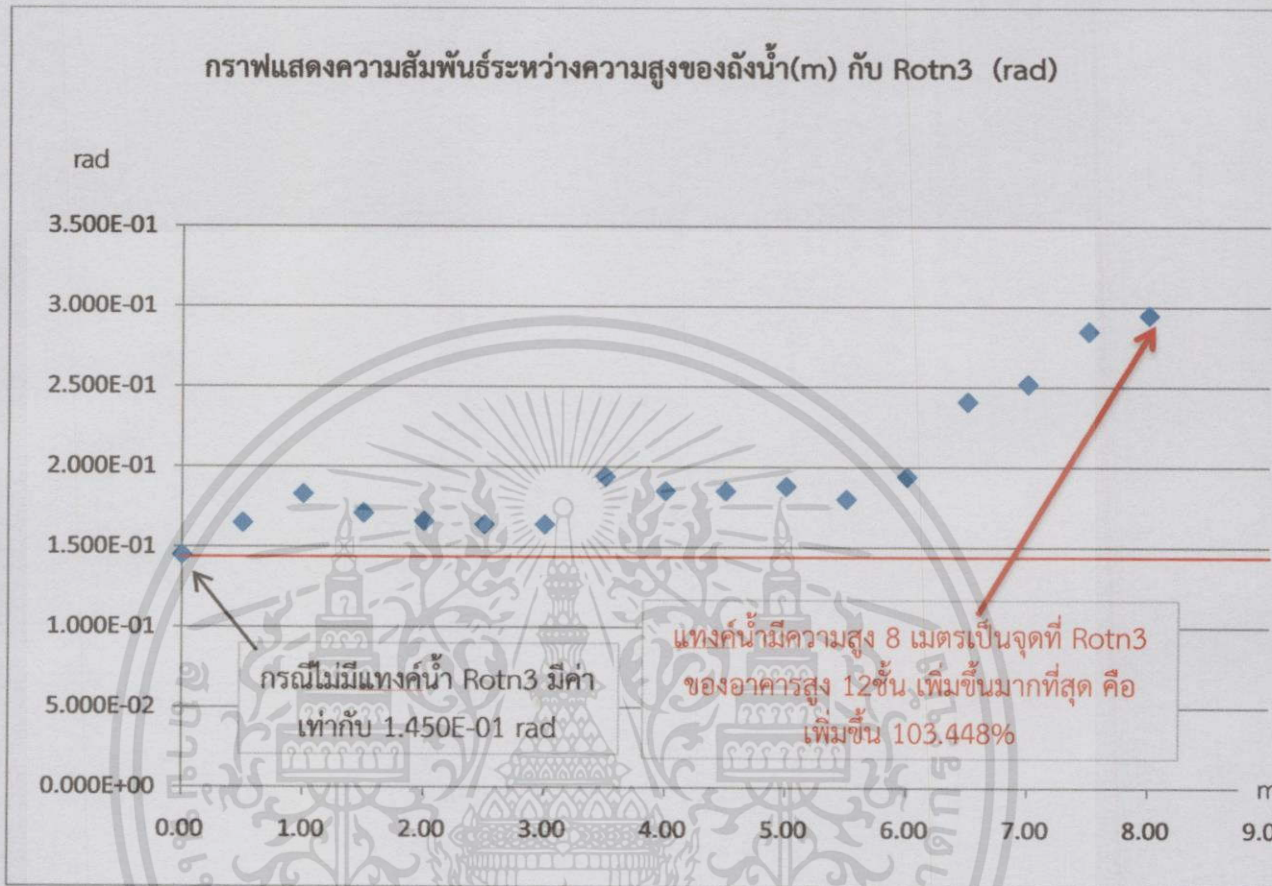
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn2 (rad) ของอาคาร 12 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn2 ของอาคารสูง 12 ชั้น โกรธี่ไม่มีแทงค์น้ำ Rotn2 มีค่าเท่ากับ 1.070E-01 rad หลังทำการจูนค่าแทงค์น้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แทงค์น้ำน้ำมีความสูง 7.5 เมตรเป็นจุดที่ Rotn2 ของอาคารสูง 12 ชั้น ลดลงมากที่สุด คือลดลง 13.682%

ตารางที่ 4.3.6 Rotn3 Point 320 ของอาคารสูง 12 ชั้น (rad)

ลำดับ ที่	ขนาดถัง 4*4*H(m3) ความสูงของน้ำเต็มถึงน้ำ สูงH (m)	Rotn3 (rad)	% การลดลงของRotn3 เปรียบเทียบ กรณีไม่มีถังน้ำกับกรณีมีถังน้ำที่ความสูงใดๆ
1	0.00	1.450E-01	-
2	0.50	1.650E-01	-13.793%
3	1.00	1.830E-01	-26.207%
4	1.50	1.710E-01	-17.931%
5	2.00	1.660E-01	-14.483%
6	2.50	1.640E-01	-13.103%
7	3.00	1.640E-01	-13.103%
8	3.50	1.940E-01	-33.793%
9	4.00	1.850E-01	-27.586%
10	4.50	1.850E-01	-27.586%
11	5.00	1.880E-01	-29.655%
12	5.50	1.800E-01	-24.138%
13	6.00	1.940E-01	-33.793%
14	6.50	2.410E-01	-66.207%
15	7.00	2.520E-01	-73.793%
16	7.50	2.850E-01	-96.552%
17	8.00	2.950E-01	-103.448%

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง(m) ของถังน้ำกับ Rotn3 (rad)



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของถังน้ำ(m)กับ Rotn3 (rad) ของอาคาร 12 ชั้น

กราฟนี้เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Rotn3 ของอาคารสูง 12 ชั้น ไม่มีแท่งน้ำ Rotn3 มีค่าเท่ากับ $1.450E-01$ rad หลังทำการจูนค่าแท่งน้ำที่ความสูงใดๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ที่แท่งน้ำมีความสูง 8 เมตรเป็นจุดที่ Rotn3 ของอาคารสูง 12 ชั้น เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 103.448% และไม่มี ความสูงใดที่ทำให้ Rotn3 ของอาคารสูง 12 ชั้น ลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทำวิจัย

จากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยความเป็นไปได้ของการใช้แท่งค้ำเก็บน้ำเป็น Tuned Mass Damper หลังจุนหารระดับความสูงของถ้ำน้ำที่เหมาะสม ในการวิเคราะห์ ได้ข้อสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1.1 จากการทำการวิจัยในกรณีแผ่นดินไหว El - Centro กระทำต่ออาคาร แท่งค้ำเก็บน้ำสามารถออกแบบเพื่อใช้เป็น Tuned Mass Damper , TMD ได้เพียงบางกรณีเท่านั้น สำหรับการปรับจูน (Tuned) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากผลกระทบ น้ำหนักรวมทั้งหมดหมายถึงการปรับจูนขนาดความสูงของแท่งค้ำน้ำ จากการพิจารณาเมื่อมีถ้ำน้ำวางอยู่บนสุดตรงกลางของอาคาร

5.1.2 จากการทำการวิจัยในกรณีของอาคารสูง 4 และ 8 ชั้น แท่งค้ำเก็บน้ำที่มีความสูงระหว่าง 0.5-8 เมตร ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการปรับจูน (Tuned) เพื่อลดการเคลื่อนตัวของอาคาร

5.1.3 จากการทำการวิจัยในกรณีของอาคารสูง 12 ชั้น ที่ขนาดถ้ำน้ำสูง 6m เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการทำการปรับจูน (Tuned) เพื่อลดการเคลื่อนตัวของอาคาร มีผลทำให้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 1 จากเดิม 3.571 cm (ในกรณีไม่มีถ้ำน้ำ) ลดลงเหลือ 3.140 cm (ในกรณีวางถ้ำน้ำไว้บนสุดของอาคาร) เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือลดลงไปจากเดิม 12.069% แสดงให้เห็นการลดลงของผลตอบสนองที่เกิดจากข้อมูลแผ่นดินไหว El-Centro ที่นำมาใช้ในการศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรจะทำการศึกษาให้ดีกว่าที่จะนำแท่งค้ำเก็บน้ำมาใช้เป็น Tuned Mass Damper เพราะในบางครั้งถ้าทำการจูนมวลที่ผิดพลาดอาจจะส่งผลเสียมีผลทำให้เกิดระยะการเคลื่อนตัว (Displacement) มากขึ้นกว่าเดิม

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองและศึกษาเฉพาะกรณีตัวอาคารไม่มีค่า Damping Ratio จึงควรศึกษาอาคารที่มีค่า Damping Ratio ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tejashri S. Gulve, Pranesh Murna, 2013. Feasibility of Implementing Water Tank as Passive Tuned Mass Damper. *Interantion Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*
- [2] G.Hemalatha* and K.P.Jaya, 2008. Water Tank as Passive TMD For Seismically Excited Structures. *Structural Engineering Division , Anna University, Chennai-600 025, India.*
- [3] A.Petchsasithon, P.D. Gosling, 2005. A locking – free hexahedral element for the geometrically nonlinear analysis of arbitrary shells. Ph.D.School of Civil Engineering and Geosciences, University of Newcastle-upon-Tyne.
- [4] นิตศน์ แผ้ววัด. เอกชัย ปรีดา. บวร ชุตินพทยวิภา. (2553). การศึกษาความแม่นยำของการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นและเปลือกหอยด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] ผศ.ดร.ไพบุลย์ ปัญญาคะโป. การออกแบบอาคาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ, 2545
- [6] รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ . กรุงเทพฯ, 2548
- [7] ผ.ศ.จรัญพัฒน์ ภูวนันท์, อาคารสูง, เอกสารคำสอน รายวิชา 263 112 การก่อสร้างอาคาร 4 มหาวิทยาลัยศิลปากร, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2540
- [8] Tuned Mass Dampers . <http://www.14.informatik.tu-muenchen.de/konferenzen/Jass06/courses/4/Stroscher/Stroscher.ppt> , 10 สิงหาคม 2556
- [9] Data for El Centro 1940 North South Component (Peknold Version) 1559 points at equal spacing 0.02 sec .
http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/a.k.chopra/el_centro_data , 24 สิงหาคม 2556
- [10] พิสิฐ หอมเกษร. (2551). ผลตอบสนองต่อการสั่นไหวของเขื่อนภูมิพล สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง