

## ศึกษาค่าตัวประกอบปรับผลการตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับห้องสูง ที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกวางในประเทศไทย

### Evaluation of Response Modification Factor of RC Shaft Support of Elevated Tank in Thailand

ธนากร ใจปิติ<sup>1\*</sup>, ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์<sup>2</sup> และ พิสนธ์ อุดมวรรัตน์<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: tanagonja29@gmail.com

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61) ซึ่งได้กำหนดค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( $R$ ) ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบโครงสร้างต่าง ๆ ไว้ แต่ยังไม่ครอบคลุมถึงระบบโครงสร้างห้องสูงรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะห้องสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกวาง มีเพียงค่า  $R$  ที่ใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร เช่น ค่า  $R$  สำหรับระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนธรรมดาซึ่งมีค่าเท่ากับ 4 แต่จากผลการศึกษาพบว่าค่า  $R$  ของห้องสูงจากแบบก่อสร้างมาตรฐานในประเทศไทยทั้งแบบขนาดความจุ 300 ลูกบาศก์เมตร และขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เมตรซึ่งมีโครงสร้างรองรับเป็นระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือน ได้ค่า  $R$  เท่ากับ 6.46 และ 6.27 ตามลำดับ ซึ่งได้ค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับค่า  $R$  ที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนที่ใช้สำหรับในอาคาร

คำสำคัญ: ห้องสูงคอนกรีตเสริมเหล็ก, ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง, วิธีการวิเคราะห์แบบสถิติไม่เชิงเส้น

#### Abstract

Nowadays, building structures are designed to resist earthquakes in Thailand based on the Seismic resistant building design standards (DPT 1301/ 1302-61). They determine the response modification factor,  $R$ , which is an essential variable in the design of various structural systems but not including the elevated tank structure, especially the reinforced concrete shaft support of elevated tank. There is only  $R$  value as a guideline for the analysis of buildings. For example,  $R$  values of the ordinary reinforced concrete shear wall equaled to 4. From the study, the  $R$  values of elevated tank from the standard

construction in Thailand, both 300 cubic meters and 500 cubic meters, which is reinforced concrete shear wall system, were 6.46 and 6.27, respectively. These values are greater than  $R$  value that is recommended for reinforced concrete shear wall system in design standards.

Keywords: elevated RC tank, response modification factor, pushover analysis

#### 1. คำนำ

ห้องสูงที่ใช้สำหรับบรรจุน้ำประปาเพื่อใช้ในงานสาธารณสุขโกกชั้นพื้นฐานของชุมชน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของห้องสูงที่ใช้ในปัจจุบันโดยทั่วไปจะเป็นถังเก็บน้ำด้านบนและรองรับด้วยเสามากกว่าหนึ่งต้นและมีความรัดรอบเพื่อยึดโยงเสาโดยมีลักษณะเหมือนโครงเฟรมในอาคาร และยังมีอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการก่อสร้างเนื่องจากมีความแข็งแรงและมีขนาดความจุมากกว่ารูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นคือ ห้องสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกวาง

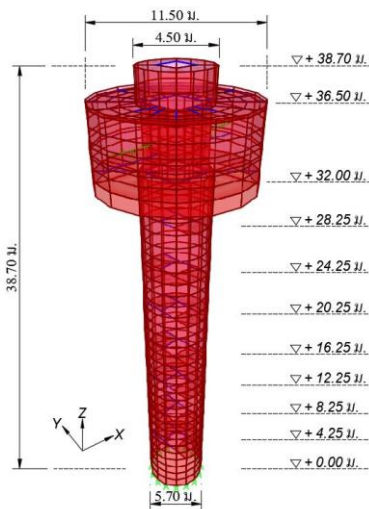
เมื่อถังเก็บน้ำอยู่ในสถานะที่บรรจุน้ำที่วางอยู่บนห้องสูงได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว จะเกิดการกระเพื่อม (Sloshing) ของน้ำไปมาแบบพลศาสตร์ ซึ่งก่อให้เกิดแรงกระทำเพิ่มขึ้นกับโครงสร้าง การออกแบบโครงสร้างหากไม่ให้ความสำคัญกับแรงกระทำเพิ่มที่กล่าวมาข้างต้นก็อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบโครงสร้างภายหลังได้ ดังนั้นการวิเคราะห์หาพฤติกรรมพลศาสตร์ของโครงสร้างที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวของอาคารประเภทห้องสูงจึงแตกต่างจากประเภทของโครงสร้างอาคารทั่วไป โดยการคำนวณหาแรงของแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างนั้น วิศวกรผู้ออกแบบต้องทราบถึงค่าตัวประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ซึ่งค่าตัวประกอบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะที่ตั้งอาคาร ประเภทของอาคาร โดยหนึ่งในค่าตัวประกอบที่มีความสัมพันธ์กับประเภทของอาคารโดยตรงที่มาตรฐานต่าง ๆ กำหนดไว้ คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( $R$ ) ซึ่งมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61) [1] ที่ถูกกำหนดโดยกรมโยธาธิการและ

ผังเมือง ก็ยังไม่ได้แนะนำค่าตัวประกอบผลตอบแทน ( $R$ ) ของระบบโครงสร้างหอดังสูงรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงที่นิยมก่อสร้างในประเทศไทยในปัจจุบัน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาค่าตัวประกอบผลตอบแทนที่เหมาะสมสำหรับหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวง สำหรับรูปแบบโครงสร้างในประเทศไทย

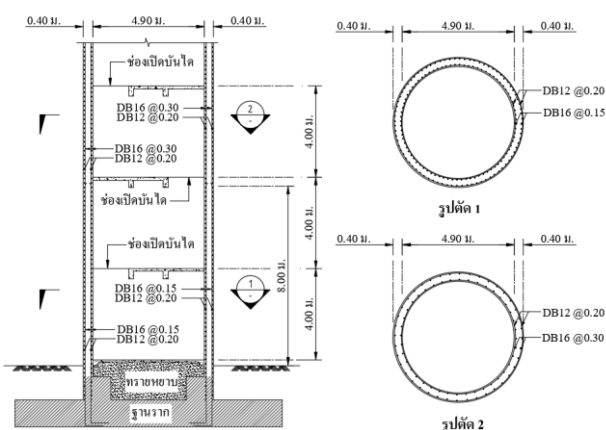
## 2. การจำลองและการวิเคราะห์โครงสร้างหอดังสูง

### 2.1 หอดังสูงตัวอย่าง

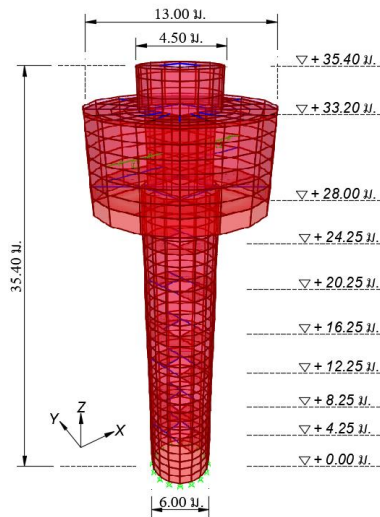
งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างโครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวง 2 ตัวอย่าง คือ หอดังสูงขนาดความจุ 300 ลูกบาศก์เมตร ความสูง 38.70 เมตร และหอดังสูงขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เมตร ความสูง 35.40 เมตร โดยมีมิติและรายละเอียดเหล็กเสริมดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 4 ตามลำดับ และค่ากำลังวัสดุที่ใช้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 24.5 เมกะปาสกาลและเหล็กเสริมเกรด SD30 มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 294 เมกะปาสกาล



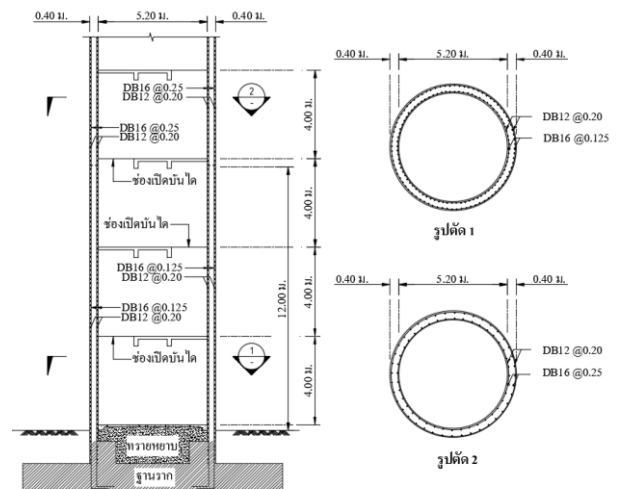
รูปที่ 1 หอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงขนาดบรรจุ 300 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2 รายละเอียดเหล็กเสริมบริเวณโคนเสาหอดังสูงขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3 หอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงขนาดบรรจุ 500 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4 รายละเอียดเหล็กเสริมบริเวณโคนเสาหอดังสูงขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างหอดังสูงจำเป็นต้องพิจารณาจากหลายปัจจัยหลัก เช่น พฤติกรรมพลศาสตร์ของถังเก็บน้ำ และพฤติกรรมพลศาสตร์ของโครงสร้างหอดังสูง เพื่อให้ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างหอดังสูงใกล้เคียงกับความเป็นจริงและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 2.2 การจำลองพฤติกรรมพลศาสตร์ของถังเก็บน้ำ

W. Housner [2] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของถังเก็บน้ำเมื่อมีแรงกระทำจากแผ่นดินไหว โดยการแบ่งมวลของโครงสร้างและมวลของน้ำในถังออกเป็น 2 ประเภทคือ Impulsive Mass ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยให้มวลของโครงสร้างกับมวลของน้ำเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกัน และอีกประเภทคือ Convective Mass ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยให้มวลของโครงสร้างกับมวลของน้ำเคลื่อนตัวไปในทิศทางที่ตรงกันข้าม เพื่อพิจารณาผลของการกระชก (Sloshing) ภายในถังเก็บน้ำ โดยสมมติฐานให้มวลของน้ำกับถังเก็บน้ำยึดโยงกันในรูปแบบของสปริงติดกับโครงสร้างของถังน้ำ

เรียกว่า Spring Mass Model ในเวลาต่อมาได้พัฒนาเป็นมาตรฐานที่ยอมรับและใช้กันทั่วไป คือ มาตรฐาน ACI 350.3-06 [3] ดังแสดงในรูปที่ 5 และตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) ถึง (8)

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh\left[0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right]}{0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)} \quad (1)$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.23\left(\frac{D}{H_L}\right)\tanh\left[3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right] \quad (2)$$

$$m_i = W_i \times \frac{1,000}{9.81} \quad (3)$$

$$m_c = W_c \times \frac{1,000}{9.81} \quad (4)$$

$$\frac{h'_i}{H_L} = 0.45 \quad \text{กรณีที่} \quad \frac{D}{H_L} < 0.75 \quad (5)$$

$$\frac{h'_i}{H_L} = \frac{0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)}{2 \tanh\left[0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right]} - \frac{1}{8} \quad \text{กรณีที่} \quad \frac{D}{H_L} \geq 0.75 \quad (6)$$

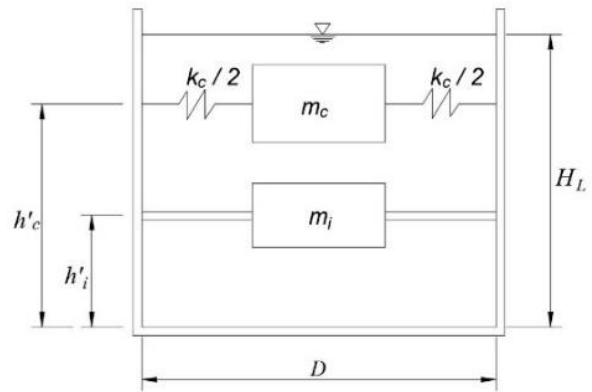
$$\frac{h'_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh\left[3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right] - 2.01}{3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\sinh\left[3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right]} \quad (7)$$

$$K_c = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H_L}{D}\right)}} \quad (8)$$

โดยที่  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังเก็บน้ำ (เมตร),  $W_i$  คือน้ำหนักรวมเทียบเท่าประเภท Impulsive (กิโลนิวตัน),  $W_c$  คือน้ำหนักรวมเทียบเท่าประเภท Convective (กิโลนิวตัน),  $W_L$  คือน้ำหนักรวมของน้ำภายในถังเก็บน้ำ (กิโลนิวตัน),  $H_L$  คือความสูงของระดับน้ำภายในถังเก็บน้ำ (เมตร),  $m_c$  คือมวลรวมเทียบเท่าประเภท Convective (กิโลกรัม),  $m_i$  คือมวลรวมเทียบเท่าประเภท Impulsive (กิโลกรัม),  $K_c$  คือสติเฟนสเทียบเท่าในโหมด Convective (กิโลกรัม),  $h'_c$  คือระยะความสูงเทียบเท่าประเภท Convective (โดยพิจารณาแรงดันที่ก้นถัง) (เมตร) และ  $h'_i$  คือระยะความสูงเทียบเท่าประเภท Impulsive (โดยพิจารณาแรงดันที่ก้นถัง) (เมตร)

เมื่อได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติกรรมพลศาสตร์ของถังเก็บน้ำดังแสดงผลการคำนวณค่าตัวแปรไว้ในตารางที่ 1 หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมพลศาสตร์โครงสร้างหอถังสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนอกเหนือจากจำลองโครงสร้างหอถังสูงตามรูปที่ 1 และรูปที่ 3 แล้ว ต้องจำลองพฤติกรรมของมวลน้ำภายในถังเก็บน้ำตามหัวข้อที่ 2.2 ใน

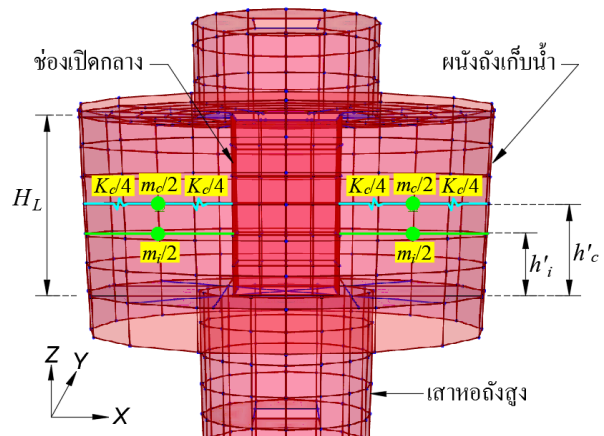
แบบจำลองของโปรแกรมด้วย เพื่อให้พฤติกรรมของโครงสร้างใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6



รูปที่ 5 พฤติกรรมพลศาสตร์ของถังเก็บน้ำ ACI 350.3-06 [3]

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของถังเก็บน้ำตัวอย่าง

ตัวแปร	หน่วย	หอถังสูงขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร	หอถังสูงขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร
$W_L$	กิโลนิวตัน	3,247	5,092
$H_L$	เมตร	4.0	4.7
$W_i / W_L$	-	0.413	0.426
$h'_i / H_L$	-	1.086	1.050
$W_c / W_L$	-	0.551	0.539
$h'_c / H_L$	-	0.989	0.957
$m_i$	กิโลกรัม	136,642	220,893
$m_c$	กิโลกรัม	182,410	279,953
$K_c$	กิโลกรัม/เมตร	598,650	808.521

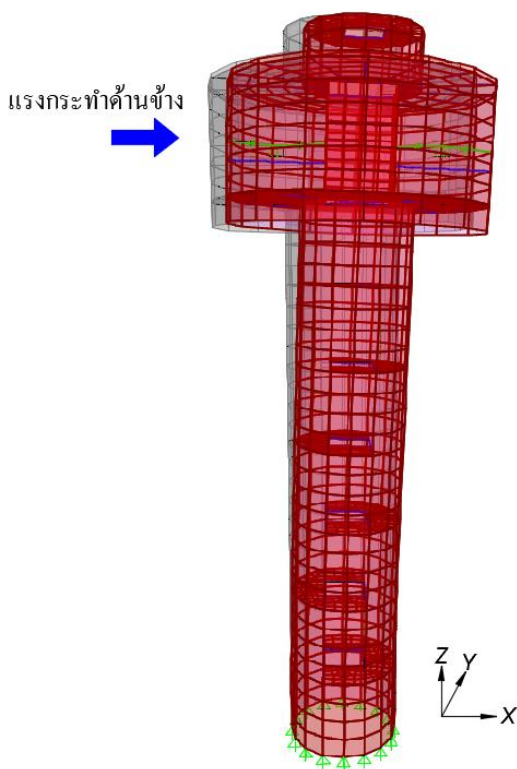


รูปที่ 6 แบบจำลองพฤติกรรมของมวลน้ำภายในถังเก็บน้ำของโปรแกรม

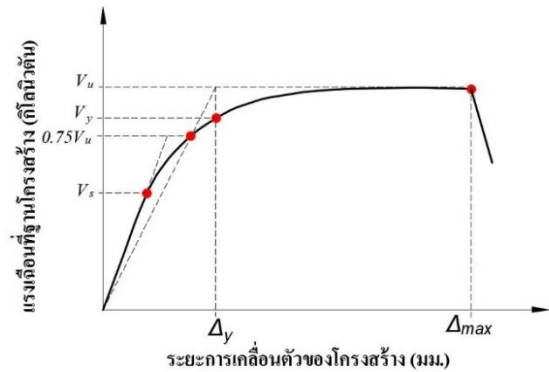
### 2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างหอดังสูง

ในประเทศไทยได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างหอดังสูงคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทโครงเฟรมแบบฐานรองรับสี่เสาและหกเสา รวมทั้งการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างถังเก็บน้ำแบบที่มีช่องเปิดตรงกลาง และไม่มีช่องเปิดตรงกลาง ทั้งในวิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์เชิงเส้น (Linear dynamics) และวิธีการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Analysis) [4-5] สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้นกับโครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลาง (ระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือน) กล่าวคือ การให้แรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral Load) ดังแสดงในรูปที่ 7 กระทำกับโครงสร้างและเพิ่มขนาดของแรงไปจนกระทั่งโครงสร้างเคลื่อนตัวไปจนเกิดจุด First yield ในชิ้นส่วนของโครงสร้าง และเคลื่อนตัวไปอย่างต่อเนื่องจนถึงระยะที่กำหนดไว้ (Target Displacement) หรือถึงสถานะที่โครงสร้างเกิดการวิบัติ จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลตอบสนองของหอดังสูงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของจุดบนสุดของโครงสร้าง และใช้วิธีจากงานวิจัยของ Park [6] มาใช้เพื่อคำนวณหาสถานะที่จุดครากของโครงสร้าง (Yield Point) และจุดที่โครงสร้างสามารถรับแรงได้สูงสุด (Ultimate Point) ดังแสดงในรูปที่ 8

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตไม่เชิงเส้น จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักที่สำคัญคือ การกำหนดรูปแบบของแรงที่กระทำ (Load Pattern) และการกำหนดพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้น (Non-linear Behavior)



รูปที่ 7 วิธีการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Analysis)



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างและสถานะของโครงสร้างที่ตำแหน่งต่าง ๆ

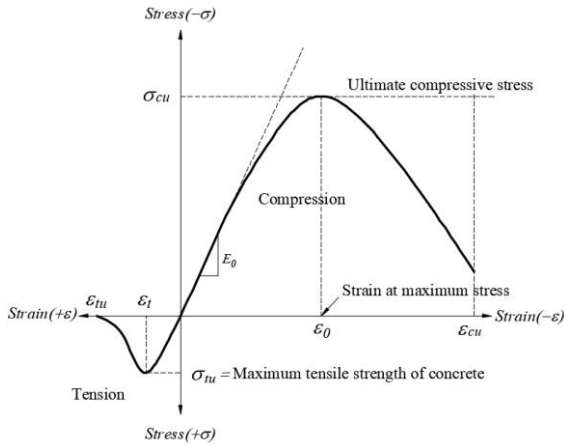
### 2.4 การกำหนดรูปแบบของแรงที่กระทำ (Load Pattern)

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างหอดังสูงเมื่อได้รับแรงจากแผ่นดินไหวจะมีผลของการสั่นไหวเนื่องจากมวลของโครงสร้างและมวลของน้ำ (Impulsive Mass และ Convective Mass) แต่รูปแบบของแรงที่กระทำสามารถกำหนดได้เพียงแบบเดียว ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยจึงได้เลือกใช้รูปแบบของแรงที่กระทำแบบโหมด (Modal Load Pattern) โดยเลือกใช้โหมดที่มีผลของมวลประสิทธิผลเชิงโหมด (Modal Mass Participation) ที่มีค่ามากที่สุดซึ่งเป็นโหมดที่ 1 ที่พิจารณาเฉพาะผลมวลของโครงสร้างและ Impulsive Mass (มวลของน้ำที่เคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกับโครงสร้าง) นอกจากนี้ในโหมดการสั่นสูง ๆ ของโครงสร้างจะมีการสลายพลังงานหรือมีความหน่วงที่มากขึ้น ส่งผลทำให้การสั่นไหวในโหมดที่สูงจะมีขนาดน้อยกว่า จึงใช้การสั่นไหวในโหมดที่ 1 ในการกำหนดรูปแบบของแรงที่กระทำสำหรับการวิเคราะห์หอดังสูงทั้งสองขนาด

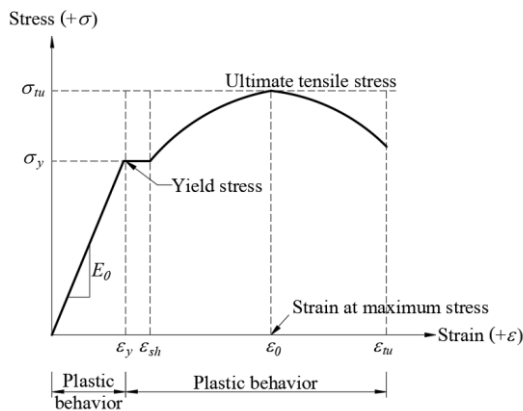
### 2.5 การกำหนดพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้น (Non-linear Behavior) โดยใช้ชั้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ (Shell Layer Element)

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลางได้เลือกใช้ชั้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ (Shell Layer Element) ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้าง ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงได้ทั้งแรงในแนวระนาบและตั้งฉากกับแนวระนาบรวมถึงโมเมนต์ดัด และสามารถพิจารณาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นโดยการจำลองพฤติกรรมของหน้าตัดเชิงประกอบระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมได้ โดยการกำหนดคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมแสดงดังตารางที่ 2 และมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความหนาของวัสดุที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น (Multi-Layer Shell Element) แสดงดังรูปที่ 11(a) และการกระจายของชั้นเหล็กเสริม (Distribution of the bar layers) แสดงดังรูปที่ 11(b) โดยคุณสมบัติของชั้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถจำลองพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้น (Non-linear Behavior) ของชิ้นส่วนโครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กได้

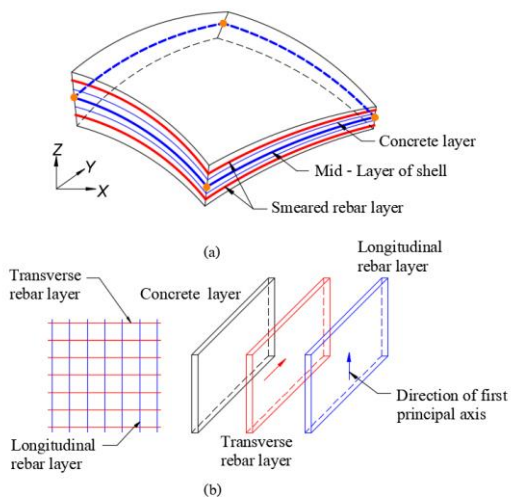
[7] โดยกำหนดให้อยู่เฉพาะในชั้นส่วนผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงที่รองรับถึงเก็บน้ำเท่านั้น เนื่องจากพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้เป็นหลัก ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้างอีกด้วย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม



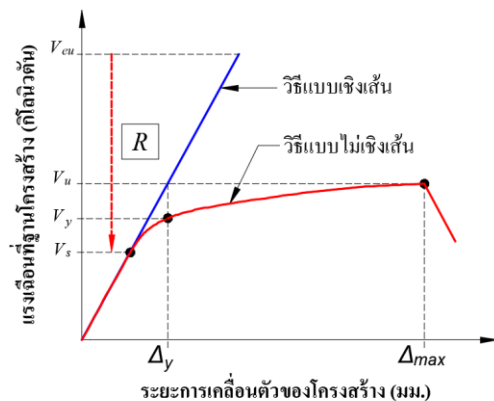
รูปที่ 11 องค์ประกอบของ Multi-Layer Shell Element (a) และการกระจายของชั้นเหล็กเสริม Distribution of the Bar Layers (b)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง

วัสดุ	ตัวแปร	หน่วย	หอดังสูงขนาด 300 และ 500 ลูกบาศก์เมตร
Concrete in compression	$\sigma_{cu}$	เมกะปาสคาล	24.5
	$E_0$	เมกะปาสคาล	23,414
	$\epsilon_0$	-	0.002
	$\epsilon_{cu}$	-	0.0045
Concrete in tension	$\sigma_{tu}$	เมกะปาสคาล	3.0
	$E_0$	เมกะปาสคาล	23,414
	$\epsilon_t$	-	0.00013
	$\epsilon_{tu}$	-	0.00145
Reinforcement bar in tension	$\sigma_y$	เมกะปาสคาล	294
	$\sigma_{tu}$	เมกะปาสคาล	441
	$E_0$	เมกะปาสคาล	200,000
	$\epsilon_y$	-	0.0015
	$\epsilon_{sh}$	-	0.01
	$\epsilon_0$	-	0.09
	$\epsilon_{tu}$	-	0.108

### 3. การคำนวณค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (R)

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้สามารถต้านทานแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวจะพิจารณาโครงสร้างให้มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงเชิงเส้น (Elastic Behavior) เพื่อพิจารณาแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) ที่ได้จากความเร่งของแผ่นดินไหวตามข้อบัญญัติหรือมาตรฐานต่าง ๆ และลดทอนแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor,  $R$ ) เพื่อให้แรงที่ได้จากการวิเคราะห์อยู่ในระดับที่ใช้ออกแบบ (Design Level) ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับโครงสร้างอาคาร ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารแบบเชิงเส้นจะให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานของอาคารที่สูง เนื่องจากโครงสร้างไม่เกิดความเสียหายตลอดช่วงที่พิจารณา ซึ่งค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทนนั้นขึ้นอยู่กับความเหนียวของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การปรับค่าแรงเฉือนที่ฐานด้วยค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน

จากรูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นได้ว่าค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน ( $R$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงเฉือนที่กระทำสูงสุดที่เกิดจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแบบเชิงเส้น ( $V_{eu}$ ) กับค่าแรงเฉือนพื้นฐานของโครงสร้างอาคารในสถานะที่โครงสร้างเกิดจุดครากจุดแรก (First Yield,  $V_s$ ) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (9)

$$R = \frac{V_{eu}}{V_s} \quad (9)$$

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน ( $R$ ) ที่ผ่านมาพบว่ามีการวิจัยเพื่อศึกษาค่า  $R$  เฉพาะโครงสร้างหอดังสูงและโครงสร้างชนิดอื่น ๆ [8-13] ตามวิธีการของ ATC-19 [14] และมีงานวิจัย [5,15] เพื่อศึกษาค่า  $R$  เฉพาะโครงสร้างหอดังสูงและโครงสร้างชนิดอื่น ๆ ตามวิธีการของ Uang [16] สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหาค่า  $R$  ตามวิธีการของ Uang เนื่องจากวิธี ATC-19 มีข้อจำกัดในการหาค่าตัวแปรบางตัวทำให้ไม่สามารถนำมาใช้กับโครงสร้างหอดังสูงได้

การวิเคราะห์หาค่า  $R$  ของโครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงในประเทศไทย โดยการหาค่า  $R$  ตามวิธีการของ Uang [16] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (10)

$$R = R_\mu \Omega \quad (10)$$

โดยที่  $R_\mu$  คือค่าตัวประกอบเนื่องจากความเหนียวของโครงสร้าง (Ductility Response Factor) และ  $\Omega$  คือค่าตัวประกอบเนื่องจากกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง (Over strength Factor)

### 3.1 ค่าตัวประกอบเนื่องจากความเหนียวของโครงสร้าง ( $R_\mu$ )

โครงสร้างอาคารเมื่อได้รับแรงกระทำทางด้านข้าง จะเกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่กระทำและสติฟเนส (Stiffness) ของโครงสร้าง เมื่อมีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างจนไปถึงสถานะที่โครงสร้างถึงจุดคราก (Yield Displacement,  $\Delta_y$ ) ไปจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ (Ultimate Displacement,  $\Delta_u$ ) ความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัว ณ จุดครากของโครงสร้างที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เรียกว่าสัดส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Ductility Factor,  $\mu$ ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (11)

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (11)$$

เมื่อได้ค่าสัดส่วนของการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ( $\mu$ ) แล้วก็สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรเนื่องจากความเหนียวของโครงสร้าง ( $R_\mu$ ) ได้ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยถึงแนวทางของวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างไว้หลายวิธี เช่น วิธีการคำนวณหาค่าตัวแปรเนื่องจากความเหนียว ( $R_\mu$ ) จากพฤติกรรมของโครงสร้างที่วางอยู่บนดิน 3 ประเภท [17] และสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้นำวิธีการของ Newmark [18] มาใช้ในการหาค่า  $R_\mu$  โดยพิจารณาจากคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้าง

( $T$ ) กับค่าสัดส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ( $\mu$ ) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (12) ถึง (14)

- เมื่อ  $T < 0.03$  วินาที

$$R_\mu = 1 \quad (12)$$

- เมื่อ  $0.12 < T < 0.5$  วินาที

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad (13)$$

- เมื่อ  $T > 1.0$  วินาที

$$R_\mu = \mu \quad (14)$$

### 3.2 ค่าตัวประกอบเนื่องจากกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง ( $\Omega$ )

ค่าตัวประกอบเนื่องจากกำลังส่วนเกินของโครงสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนพื้นฐานของโครงสร้างขณะที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างถึงจุดครากจุดแรก (First Yield,  $V_s$ ) กับค่าแรงเฉือนพื้นฐานในสถานะที่โครงสร้างถึงจุดคราก ( $V_y$ ) สามารถเขียนในความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (15)

$$\Omega = \frac{V_y}{V_s} \quad (15)$$

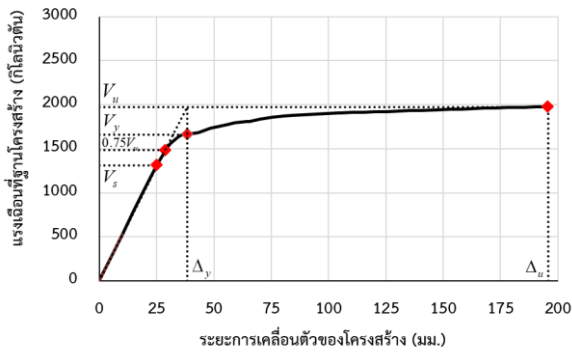
## 4. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหอดังสูง

ผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างหอดังสูง ตามแบบมาตรฐานหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวง ทั้งขนาดความจุ 300 ลูกบาศก์เมตร และขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เมตร โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างหอดังสูงซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบสถิตไม่เชิงเส้น และผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลการตอบสนองด้วยวิธีการหาค่า  $R$  ตามสมการที่กล่าวมาข้างต้น

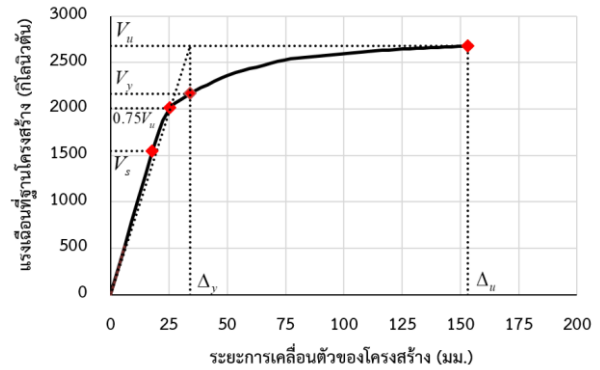
### 4.1 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างหอดังสูง

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงขนาดความจุ 300 ลูกบาศก์เมตร ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 13 โดยแสดงสถานะที่โครงสร้างหอดังสูงเกิด First Yield กับสถานะที่โครงสร้างหอดังสูงสามารถรับกำลังได้สูงสุด (Ultimate) ไว้ดังรูปที่ 14 และได้้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลของค่าตัวประกอบต่าง ๆ ที่นำมาใช้วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน ( $R$ ) สามารถแสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

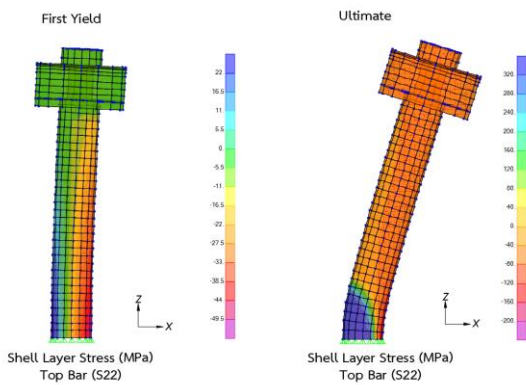
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เมตร ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 15 โดยแสดงสถานะที่โครงสร้างหอดังสูงเกิด First Yield กับสถานะที่โครงสร้างหอดังสูงสามารถรับกำลังได้สูงสุด (Ultimate) ไว้ดังรูปที่ 16 และได้้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลของค่าตัวประกอบต่าง ๆ ที่นำมาใช้วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน ( $R$ ) สามารถแสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 4



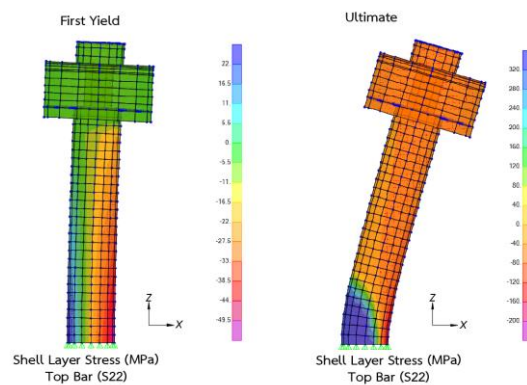
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างหอดังสูงขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างหอดังสูงขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 14 ผลการตอบสนองและค่าความเค้นตามแนวตั้งของโครงสร้าง ณ สภาวะที่โครงสร้างเกิดจุดครากจุดแรก (รูปซ้าย) และสภาวะโครงสร้างหอดังสูงสามารถรับกำลังได้สูงสุด (รูปขวา) ของหอดังสูงขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 16 ผลการตอบสนองและค่าความเค้นตามแนวตั้งของโครงสร้าง ณ สภาวะที่โครงสร้างเกิดจุดครากจุดแรก (รูปซ้าย) และสภาวะโครงสร้างหอดังสูงสามารถรับกำลังได้สูงสุด (รูปขวา) ของหอดังสูงขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของหอดังสูงขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ขนาด
$V_u$	กิโลนิวตัน	1,975
$0.75V_u$	กิโลนิวตัน	1,481
$V_y$	กิโลนิวตัน	1,663
$V_s$	กิโลนิวตัน	1,312
$\Delta_y$	มิลลิเมตร	38
$\Delta_u$	มิลลิเมตร	196

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของหอดังสูงขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ขนาด
$V_u$	กิโลนิวตัน	2,678
$0.75V_u$	กิโลนิวตัน	2,009
$V_y$	กิโลนิวตัน	2,164
$V_s$	กิโลนิวตัน	1,574
$\Delta_y$	มิลลิเมตร	34
$\Delta_u$	มิลลิเมตร	153

#### 4.2 ผลของค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (R)

การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (R) ของหอดังสูงตัวอย่างในการศึกษานี้ ได้นำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างในหัวข้อ 4.1 มาคำนวณต่อตามวิธีการที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3 พบว่าค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (R) ของหอดังสูงที่ขนาดความจุ 300 ลูกบาศก์เมตรและ 500 ลูกบาศก์เมตร มีค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (R) เท่ากับ 6.46 และ 6.27 ตามลำดับ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ตั้งตารางที่ 5 ซึ่งผลจากการศึกษาเห็นได้ว่าค่า R สำหรับโครงสร้างหอดังสูงทั้งสองขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (R) ของหอดังสูง

ตัวแปร	หอดังสูง ขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร	หอดังสูง ขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร
T โบนัสที่ 1 (วินาที)	0.79	0.71
$\mu$	5.10	4.48
$R_\mu$	5.10	4.48
$\Omega$	1.27	1.40
R	6.46	6.27

สำหรับค่าความเหนียวของระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น [19] จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกตามแนวตั้งที่เกิดขึ้นกับค่ากำลังต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าแรงเฉือนเกิดขึ้นกับค่ากำลังต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 6

จากผลที่ได้พบว่าค่าอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกตามแนวตั้งที่เกิดขึ้นกับค่ากำลังต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าแรงเฉือนเกิดขึ้นกับค่ากำลังต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับหอดังสูงขนาด 300 และ 500 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการหาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( $R$ ) และมีค่าที่น้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจะมีค่าความเหนียวที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $R$  ที่ได้มีค่ามากกว่าที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนที่ใช้สำหรับในอาคาร ( $R=4$ )

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( $R$ ) ของหอดังสูง

ตัวแปร	หอดังสูงขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร	หอดังสูงขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร
น้ำหนักบรรทุกตามแนวตั้ง $P$ (กิโลนิวตัน)	10,606	12,194
ค่ากำลังต้านทานตามแนวตั้ง $A_g f'_c$ (กิโลนิวตัน)	163,174	172,411
อัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกตาม แนวตั้ง	0.065	0.071
ค่าแรงเฉือนที่ฐาน $V_s$ (กิโลนิวตัน)	1,312	1,574
ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน $A_g \sqrt{f'_c}$ (กิโลนิวตัน)	32,966	34,832
ค่าอัตราส่วนของแรงเฉือน	0.040	0.045

## 5. บทสรุป

ปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย ได้อ้างอิงถึงมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมถึงค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ( $R$ ) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของโครงสร้างหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงไว้โดยเฉพาะ มีเพียงแต่ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองสำหรับระบบโครงสร้างแบบกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดาซึ่งมีค่าเท่ากับ 4 ที่อาจนำมาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เนื่องจากที่รองรับของโครงสร้างหอดังสูงมีลักษณะเป็นผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง และจากผลการศึกษาหอดังสูงที่รองรับด้วยผนังคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทรงกระบอกกลวงจากแบบก่อสร้างมาตรฐานภายในประเทศไทย ทั้งขนาดความจุ 300 และ 500 ลูกบาศก์เมตรพบว่าค่า  $R$  ที่ได้มีค่าเท่ากับ 6.46 และ 6.27 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการศึกษาเห็นได้ว่าค่า  $R$  สำหรับโครงสร้างหอดังสูงทั้ง

สองขนาดนั้น มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากค่าอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกตามแนวตั้งที่เกิดขึ้นกับค่ากำลังต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าแรงเฉือนเกิดขึ้นกับค่ากำลังต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับหอดังสูงขนาด 300 และ 500 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใกล้เคียงกัน และค่า  $R$  ที่ได้มีค่ามากกว่าที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนที่ใช้สำหรับในอาคาร ( $R=4$ )

## เอกสารอ้างอิง

- [1] มยผ.1301/1302-61 (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย
- [2] Housner, G.W. (1963). The dynamic behaviour of water tanks. Bulletin of the seismological. Society of America, 53, pp. 381-387
- [3] ACI 350.3-06 (2006). Seismic design of liquid – containing concrete structures and commentary. American Concrete Institute.
- [4] ทรงพล จารุวิศิษฐ์ และ วิศิษฐ์ ภิญญ (2557). การประเมินผลการตอบสนองของหอดังสูงของการประปาส่วนภูมิภาคภายใต้แรงแผ่นดินไหว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, ขอนแก่น, 14-16 พฤษภาคม 2557, หน้า 343-350.
- [5] ณัฐพล กองสุข และ ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์ (2560). ศึกษาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับหอดังสูงคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22, ขอนแก่น, 18-20 นครราชสีมา 2560, หน้า 50-56.
- [6] Park, R. (1988). Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 2-9 August 1988, pp. 605-616.
- [7] Xie, L.L., Lu, X., Lu, X.Z., Huang, Y. and Ye, L.P. (2014). Multi-Layer Shell Element for Shear Walls in OpenSees. Computing in Civil and Building Engineering (ASCE 2014), pp.1190-1197.
- [8] Patel, B. and Shah, D. (2010). Formulation of Response Reduction Factor for RCC Framed Staging of Elevated Water Tank using Static Pushover Analysis. Proceedings of The World Congress on Engineering, 3, pp. 913-1916.
- [9] Patel, T., Amin. J and Patel, B. (2014). Evaluation response reduction factor of RC framed staging elevated water tank using static pushover analysis. International journal of civil and structural engineering, 4, pp. 215-226.
- [10] Roja, M., Sahana. T.S., Naveen G.M. and Sagar, S. (2016). Performance Based Evaluation of Response Reduction



- Factor for Elevated Rectangular Water Tank. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3, pp. 1499-1504.
- [11] Amin, J.A., and Soni, D.P. (2017). Assessment Response Reduction Factor of Elevated Tanks with Alternate RC Frame Staging Configurations. *International Journal of Engineering Technology Science and Research (IJETS)*, 4, pp. 1250-1257.
- [12] Masoudi, M., Eshghi, S. and Ghafory-Ashtiany M. (2012). Evaluation of response modification factor (R) of elevated concrete tanks. *Engineering Structures*, pp. 199-209.
- [13] Ghateh, R. (2014). Nonlinear seismic response of reinforced concrete pedestals in elevated water tanks. Ph.D. Dissertation, Ryerson University, Canada.
- [14] ATC-19 (1995). Structural response modification factors. *ATC Applied Technology Council*.
- [15] Talaeitaba, S. B., Tahvilian, H. and Saeedi, B. (2014). The Effect of the Arrangement and Length of the Concrete Shear Walls on the Response Modification Factor (R) for RC Building Structures. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*, 10.
- [16] Chia-Ming Uang. (1991). Establishing R (or  $R_w$ ) and  $C_d$  factors for Building Seismic Provisions. *Journal of Structural Engineering*, 117, pp. 19-28.
- [17] Miranda, E. and Bertero, V. (1994). Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake – Resistant Design. *Earthquake Spectra*, 10, pp. 357-379.
- [18] Newmark, N.M. and Hall, W.J. (1982), *Earthquake spectra and design. EERI Monograph Series, EERI, Oakland*.
- [19] มยผ.1303-57 (2557). มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย