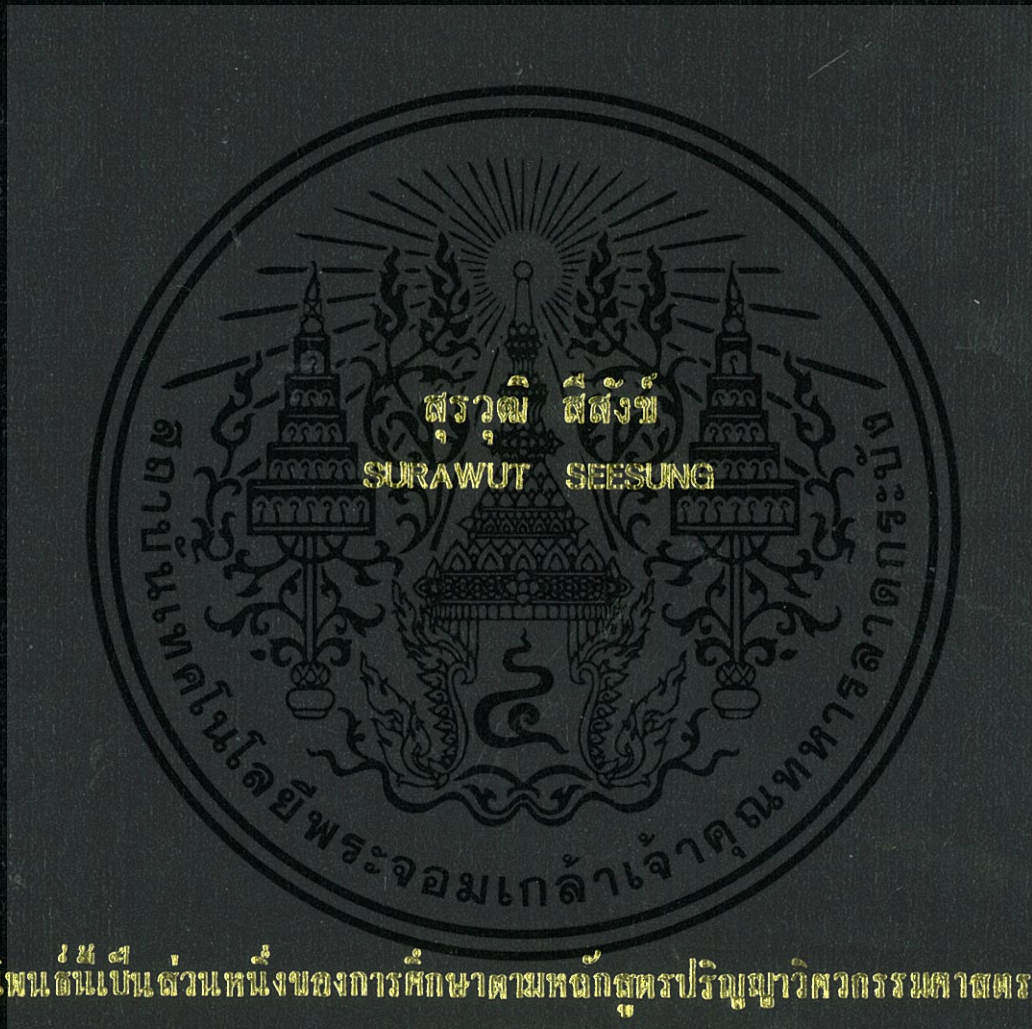


การวิเคราะห์โครงสร้างพิเศษถังน้ำทรงกระบอกขนาดใหญ่แบบมีช่องเปิดด้วย  
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ANALYSIS OF THE SPECIAL STRUCTURE ON LARGE CYLINDRICAL  
WATER TANK WITH OPENING FINITE ELEMENT METHOD



๕๕๘  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-018-001

การวิเคราะห์โครงสร้างพิเศษถังน้ำทรงกระบอกขนาดใหญ่แบบมีช่องเปิดด้วย  
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ANALYSIS OF THE SPECIAL STRUCTURE ON LARGE CYLINDRICAL  
WATER TANK WITH OPENING FINITE ELEMENT METHOD



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **148717**  
รับเดือนปี **23 มี.ค. 2560**

b. 00265398  
f. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาา KMITL-2016-EN-D-018-001 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF THE SPECIAL STRUCTURE ON LARGE CYLINDRICAL  
WATER TANK WITH OPENING FINITE ELEMENT METHOD



SURAWUT SEESUNG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

KMITL-2016-EN-D-018-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

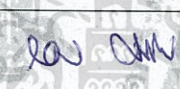
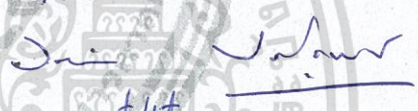
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

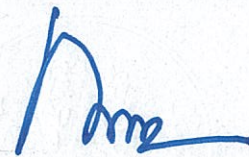
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์โครงสร้างพิเศษถังน้ำทรงกระบอกขนาดใหญ่แบบมีช่องเปิดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Thesis Title Analysis of Special Structure on Large Cylindrical Water Tank with Opening Finite Element Method  
นักศึกษา นายสุรวุฒิ สีสังข์  
รหัสประจำตัว 55613206  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-093-218

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	
ดร.อภินันท์	สุจริตพงศ์	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ดร.อำพน	จรัสรุ่งเกียรติ	
รศ.สุวัฒน์	ธีรเศรษฐ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์โครงสร้างพิเศษถึงน้ำทรงกระบอกขนาดใหญ่แบบมีช่องเปิดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายสุรวุฒิ สีสังข์
รหัสประจำตัว	55613206
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับโครงสร้างทรงกระบอกผนังบางขนาดใหญ่ที่มีช่องเปิดภายใต้ความดันน้ำลึก 13.20 เมตร รัศมีภายใน 11.00 เมตร ความหนา 0.60 เมตร ความสูงของถัง 13.80 เมตร รัศมีฐานราก 13.50 เมตร ฐานรากหนา 1.20 เมตร มีคานรับแรงดึงที่ความลึก 0.10 ของความสูงถัง ซึ่งคำนึงถึงพฤติกรรมของหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงบริเวณโดยรอบช่องเปิด ภายใต้เงื่อนไขการขยายตัวของฐานราก ผลของคานรับแรงดึงภายในถัง การเพิ่มปริมาณของช่องเปิด และผลจากการค้ำยันด้านข้างเพื่อหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ทรงกระบอกผนังหนา ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง และทฤษฎีความเค้นหนาแน่น โดยการจำลองแบบโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีข้างต้น ซึ่งผลออกมามีค่าใกล้เคียงเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นจึงพิจารณาผลของการขยายตัวของฐานรากในถังแบบไม่มีช่องเปิดภายใต้จุดรองรับแบบยึดหมุนและแบบลูกล้อ ปรากฏว่าการขยายตัวของฐานรากไม่มีนัยสำคัญ จึงทำการจำลองโครงสร้างจริงตามรูปแบบกรณีศึกษา ทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยันด้านข้าง กรณีแรกไม่มีช่องเปิด กรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด 2 ช่อง กรณีที่ 3 เพิ่มคานรับแรงดึงยึดระหว่างผนัง กรณีที่ 4 เพิ่มจำนวนช่องเปิด พบว่าหน่วยแรงสูงสุดจากแบบจำลองในกรณีที่ 1 มีค่าน้อยกว่าทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง หน่วยแรงสูงสุดจากกรณีที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีความเค้นหนาแน่น คานรับแรงดึงในกรณีที่ 3 มีผลทำให้หน่วยแรงบริเวณช่องเปิดลดลง จากกรณีที่ 4 การเจาะช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นตามกรณีตัวอย่างส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเพียงเล็กน้อยและจากทุกกรณีพบว่าค้ำยันด้านข้างมีผลทำให้หน่วยแรงสูงสุดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Analysis of the special structure on large cylindrical water Tank with opening finite element method
Student	Mr.Surawut Seesung
Student ID.	55613206
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Suwat Dhirasedh

## ABSTRACT

This article presents the application of finite element method and thin wall cylindrical structures with a large opening under water pressure, depth 13.20 meters, inner radius 11 meters, thickness 0.60 meters, height 13.88 meters, radius of foundation 13.50 meters, thickness of foundation 1.20 meters with beam with tension at a depth of 1/10 of the height of the tank, which consider the behavior of circumferential stress around the opening under the condition of expansion of the foundation and influence of the beam with tension inside the tank. Also Increase the amount of the opening and the result of bracing to determine the maximum stress. The analysis is based on thin wall cylindrical shell theory and stress concentration factor by model on finite element program. The result between mentioned theories above and finite element program are satisfactory nearly the same. Then consider influence of the expansion of foundation of tank with pin support and roller support. Those results show that the expansion of foundation has no effect. Then we model the structure of a case study both with and without bracing. The first case has no openings. The second case has 2 opening holes. The third case add beam with tension to hold between walls and the forth case add more opening. The result of maximum stress from the first case is less than thin wall cylindrical shell theory. The result from the second case has nearly the same result as stress concentration factor. The result of beam with tension from the third case decreases stress around the opening. The forth case result is that the more openings can increase maximum stresses but not much. The conclusions from all cases is bracing can reduce maximum stress

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สุวัฒน์ ธิรเศรษฐ์และ  
อาจารย์รัฐพล วัฒนมั่นคง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และ  
ประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่ง  
เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ  
ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุรวุฒิ สีสังข์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย.....	1
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โครงสร้างของเอลิเมนต์แบบเปลือก.....	3
2.1.1 ทฤษฎีเมมเบรน.....	3
2.1.2 ทฤษฎีโครงสร้างแบบแผ่น.....	3
2.1.2 ทฤษฎีโครงสร้างแบบเปลือก.....	4
2.2 ทฤษฎีความเค้นทรงกระบอกผนังบาง.....	5
2.3 ทฤษฎีความเค้นในทรงกระบอกผนังหนา.....	5
2.4 ทรงกระบอกเปลือกบางที่มีโหนดสมมาตรกระทำตามแนวแกน.....	9
2.4.1 ถังน้ำทรงกระบอกผนังบางสมำเสมอ.....	12
2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	14
2.5.1 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	14
2.6 ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น.....	21
2.7 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	22
2.7.1 การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	35
4.1 การเปรียบเทียบหน่วยแรงทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ขอบล่างเป็นแบบลูกกลิ้งภายใต้ความดันน้ำ.....	35
4.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางทรงกระบอกกับวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ขอบล่างเป็นแบบยึดแน่นภายใต้ความดันน้ำ.....	36
4.3 หน่วยแรงสูงสุดจากทฤษฎีตัวประกอบความเค้นหนาแน่น.....	38
4.4 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของฐานรากในถังแบบไม่มีช่องเปิดภายใต้ จุดรองรับแบบลูกกลิ้งและแบบยึดหมุน.....	39
4.5 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงของโครงสร้างที่มีและ ไม่มีค้ำยันด้านข้างรวม 4 กรณีที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุดทั้งผิวในและผิวนอก.....	42
4.5.1 การเปรียบเทียบผลของค้ำยันด้านข้างที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง.....	43
4.5.2 การเปรียบเทียบผลของช่องเปิดที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง.....	47
4.5.3 การเปรียบเทียบผลของคานรับแรงดิ่งที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง.....	52
4.5.4 การเปรียบเทียบผลของการเพิ่มจำนวนช่องเปิดที่มีต่อ หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	66

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของแรงภายในของเมมเบรน.....	3
2.2 องค์ประกอบของแรงภายในของโครงสร้างแบบแผ่น.....	4
2.3 องค์ประกอบของแรงภายในของโครงสร้างแบบเปลือก.....	4
2.4 แรงในทรงกระบอกผนังบาง.....	5
2.5 ทรงกระบอกผนังหนาภายใต้ความดันภายในและความดันภายนอก.....	6
2.6 หน่วยแรงในครึ่งหนึ่งของเปลือก.....	6
2.7 ชิ้นส่วนของเซลล์ทรงกระบอก.....	9
2.8 ชิ้นส่วนของเปลือกบางทรงกระบอกที่โหลดกระทำแบบสมมาตร.....	9
2.9 ถังน้ำทรงกระบอกความหนาคงที่.....	12
2.10 หน้าองค์ประกอบของเอลิเมนต์.....	14
2.11 แรงเมมเบรนในเอลิเมนต์.....	16
2.12 การแผ่กระจายของแรงเมมเบรน.....	16
2.13 โมเมนต์ในเอลิเมนต์.....	17
2.14 การแผ่กระจายของโมเมนต์ภายใน M11 , M22 และ M12=M21.....	17
2.15 การกระจายของหน่วยแรงภายในเอลิเมนต์.....	19
2.16 การกระจายของหน่วยแรงภายในเอลิเมนต์ทั้งผิวในและผิวนอก.....	20
2.17 หน่วยแรงภายใน.....	20
2.18 ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับรูเจาะแบบวงกลมใน ทรงกระบอกผนังบางภายใต้แรงดัน.....	22
3.1 ทรงกระบอกปลายล่างอิสระฐานเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ.....	25
3.2 ทรงกระบอกปลายล่างยึดแน่น.....	26
3.3 เอลิเมนต์แบบแผ่นบาง 3 โหนด.....	27
3.4 เอลิเมนต์แบบแผ่นบาง 4 โหนด.....	27
3.5 ถังทรงบอกแบบไม่มีช่องเปิด.....	27
3.6 แบบขยายฐานรากของถัง.....	28
3.7 แบบขยายรูปตัดฐานรากของถัง.....	28

รูปที่	หน้า
3.8 แบบขยายเหล็กเสริมในผนังถึง.....	29
3.9 ถังน้ำทรงกระบอกกำหนดให้จุดรองรับเป็นแบบลูกล้อ.....	29
3.10 ถังน้ำทรงกระบอกกำหนดให้จุดรองรับเป็นแบบยึดหมุน.....	30
3.11 กรณีที่ 1 ถังไม่มีการเจาะรู.....	30
3.12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังกรณีที่ 1 ถังไม่มีช่องเปิด.....	31
3.13 กรณีที่ 2 ถังมีการเจาะช่องเปิด.....	31
3.14 แบบขยายช่องเปิด.....	32
3.15 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังกรณีที่ 2 ถังมีการเจาะช่องเปิด.....	32
3.16 กรณีที่ 3 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง.....	33
3.17 ถังแบบมีช่องเปิดและคานรับแรงดึงภายใต้การค้ำยันด้านข้าง.....	33
3.18 กรณีที่ 4 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด.....	34
3.19 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกรณีที่ 4 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด.....	34
4.1 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงระหว่างทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	35
4.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงระหว่างทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	36
4.3 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงระหว่างทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	37
4.4 หน่วยแรงในแนวรัศมีฐานรากที่มีจุดรองรับแบบยึดหมุน.....	39
4.5 หน่วยแรงในแนวรัศมีฐานรากที่มีจุดรองรับแบบลูกล้อ.....	39
4.6 เปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวรัศมีฐานรากที่มีจุดรองรับแบบลูกล้อและยึดหมุน.....	40
4.7 การหาแรงดึงภายในหน้าตัดฐานราก.....	40
4.8 แบบจำลองถังน้ำทรงกระบอกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	42
4.9 บริเวณที่นำมาพิจารณาหน่วยแรง.....	42
4.10 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ไม่มีค้ำยัน.....	43
4.11 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ไม่มีค้ำยัน.....	43
4.12 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงผิวในและผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง.....	44
4.13 หน่วยแรงที่ผิวใน กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.14 หน่วยแรงที่ผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง.....	45
4.15 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงผิวในและผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง.....	45
4.16 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ระหว่างถังที่มีและไม่มีค้ำยันด้านข้าง.....	46
4.17 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน.....	47
4.18 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด.....	47
4.19 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน.....	48
4.20 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด.....	48
4.21 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด มีค้ำยัน.....	49
4.22 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด.....	49
4.23 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด มีค้ำยัน.....	50
4.24 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด.....	50
4.25 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก ระหว่างก่อนและหลังเจาะช่องเปิด ตัดตามแนวตั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวง 0.00 ม.....	51
4.26 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยัน.....	52
4.27 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด.....	52
4.28 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยัน.....	53
4.29 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด.....	53
4.30 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง มีค้ำยัน.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.31 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด.....	54
4.32 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง มีค้ำยัน.....	55
4.33 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด.....	55
4.34 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก ระหว่างก่อนและหลังการใส่คานรับแรงดึง ตัดตามแนวตั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวง 0.00 ม.....	56
4.35 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน.....	57
4.36 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน.....	57
4.37 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและ เพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มี หน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด.....	58
4.38 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยัน.....	59
4.39 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง และเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณ จุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด.....	59
4.40 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยัน.....	60
4.41 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง และเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุด ที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.42 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอกระหว่างก่อนและหลังการเพิ่มจำนวนช่องเปิด ตัดตามแนวตั้งที่ระยะตามแนวเส้นรอบวง 0.00 ม. ....	61
4.43 การหาแรงดึงภายในของผนังถัง.....	63



# สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงสูงสุด .....62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการการศึกษาพฤติกรรมของถ้งน้ำทรงกระบอกผนังบางขนาดใหญ่แบบมีช่องเปิดนั้นยังมีไม่มากนักซึ่งพฤติกรรมของหน่วยแรงบริเวณโดยรอบช่องเปิดมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสูงสุด โดยได้ทำการเปรียบเทียบการผลของการวิเคราะห์จาก 4 วิธีด้วยกันคือ ทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง ทฤษฎีความเค้นหนาแน่นและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบเหล็กเสริมและเป็นแนวทางอ้างอิงต่อการออกแบบต่อไป

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงโดยรอบช่องเปิดของถ้งเก็บน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กทรงกระบอกเพื่อนำไปออกแบบเหล็กเสริมบริเวณโดยรอบโดยทำการเปรียบเทียบกัน 4 วิธี ระหว่างทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง ทฤษฎีความเค้นหนาแน่นและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางซึ่งให้ค่าหน่วยแรงมากกว่าวิธีอื่นและทฤษฎีความเค้นหนาแน่นสามารถนำมาหาหน่วยแรงสูงสุดไปใช้การออกแบบได้อย่างปลอดภัย ค้ำยันด้านข้างมีผลทำให้หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงลดลง

### 1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาโดยหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงบริเวณโดยรอบช่องเปิดโดยการนำทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง ทฤษฎีความเค้นหนาแน่นและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาหน่วยแรงในแนวเส้นสูงสุด

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงบริเวณโดยรอบช่องเปิดของถ้งเก็บน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กทรงกระบอกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์แบบเปลือก เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยสูตรการวิเคราะห์โครงสร้างทรงกระบอกผนังบาง โดยนำค่าแรงกระทำต่อโครงสร้างมาออกแบบเหล็กเสริมบริเวณช่องเปิดตามมาตรฐาน ACI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ทำการศึกษาทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ทฤษฎีทรงกระบอกผนังหนา ทฤษฎีโครงสร้างแบบเปลือก ทฤษฎีความเค้นหนาแน่น หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.6.2 ทำการจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ของทรงกระบอกเปล่าๆภายใต้แรงดันน้ำโดยมีการยึดขอบล่าง 2 แบบคือ แบบขอบล่างลูกล่อเคลื่อนที่อิสระในแนวราบกับแบบขอบล่างยึดแน่น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องระหว่างค่าทางทฤษฎีและค่าจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

1.6.3 พิจารณาการขยายตัวของฐานรากโดยจำลองโครงสร้างถึงน้ำทรงกระบอกโดยมีฐานราก 2 แบบคือ แบบลูกล่อและแบบยึดหมุน จากนั้นเปรียบเทียบการขยายตัวของฐานรากทั้งสอง

1.6.4 พิจารณาผลของค้ำยันด้านข้าง โดยการจำลองโครงสร้างถึงน้ำทรงกระบอกโดยใช้กรณีตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรูใดๆ ทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยันด้านข้าง จากนั้นเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงของทั้งสองกรณีว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

1.6.5 พิจารณาผลของการเจาะช่องเปิด โดยทำการจำลองโครงสร้างถึงน้ำเป็นแบบเจาะช่องเปิดจากนั้นทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงกับแบบไม่มีการเจาะช่องเปิด

1.6.6 เปรียบเทียบหน่วยแรงของถึงน้ำแบบเจาะช่องเปิดกับทฤษฎีความเค้นหนาแน่น

1.6.7 พิจารณาผลของคานรับแรงดึง โดยการจำลองถึงน้ำที่เจาะช่องเปิดและมีการใส่คานรับแรงดึงเข้าไป นำแบบจำลองดังกล่าวเปรียบเทียบกับหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงกับแบบจำลองที่ไม่มีคานรับแรงดึง

1.6.8 พิจารณาการเพิ่มจำนวนของช่องเปิด โดยการจำลองโครงสร้างถึงน้ำต่อหลังจากใส่คานรับแรงดึงแล้วได้เพิ่มช่องเปิดเข้าไป หลังจากนั้นเปรียบเทียบหน่วยแรงก่อนเพิ่มจำนวนช่องเปิดกับหลังเพิ่ม

1.6.9 สรุปผล

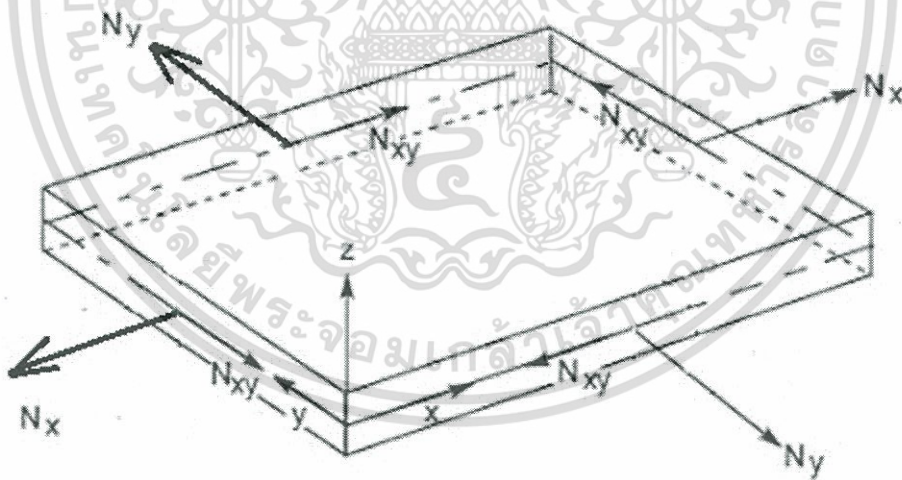
## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โครงสร้างของอีลิเมนต์แบบเปลือก

โครงสร้างเปลือกบางทำหน้าที่ต้านแรงภายนอกโดยหน่วยแรงในแนวราบ ทั้งแรงตั้งฉากและแรงเฉือนในระนาบร่วมกับโมเมนต์ดัด โมเมนต์บิดและแรงเฉือนตามขวาง โดยประกอบด้วยทฤษฎีเมมเบรนและทฤษฎีโครงสร้างแบบแผ่น

#### 2.1.1 ทฤษฎีเมมเบรน

ทฤษฎีเมมเบรนนั้นในหนึ่งอีลิเมนต์ประกอบด้วย แรงตั้งฉากในระนาบ  $N_x$ ,  $N_y$  และแรงเฉือนในระนาบ  $N_{xy} = N_{yx}$  ดังในรูปที่ 2.1 โดยบางครั้งโครงสร้างแบบเปลือกก็มีแรงดัดร่วมด้วย แต่ถ้าแรงดัดนั้นมีขนาดน้อยมากจนเราสามารถตัดทิ้งโดยสามารถทำการพิจารณาโครงสร้างดังกล่าวโดยทฤษฎีเมมเบรนได้อย่างปลอดภัย โดยบริเวณดังกล่าวยกตัวอย่างเช่น พื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากขอบของโครงสร้างแบบเปลือก แต่บ่อยครั้งโครงสร้างแบบเปลือกเกิดการเปลี่ยนรูปและแรงปฏิกิริยาเกิดขึ้นตลอดแนวขอบ อาจใช้ทฤษฎีเมมเบรนวิเคราะห์โครงสร้างแบบเปลือกนั้นอย่างคร่าวๆได้

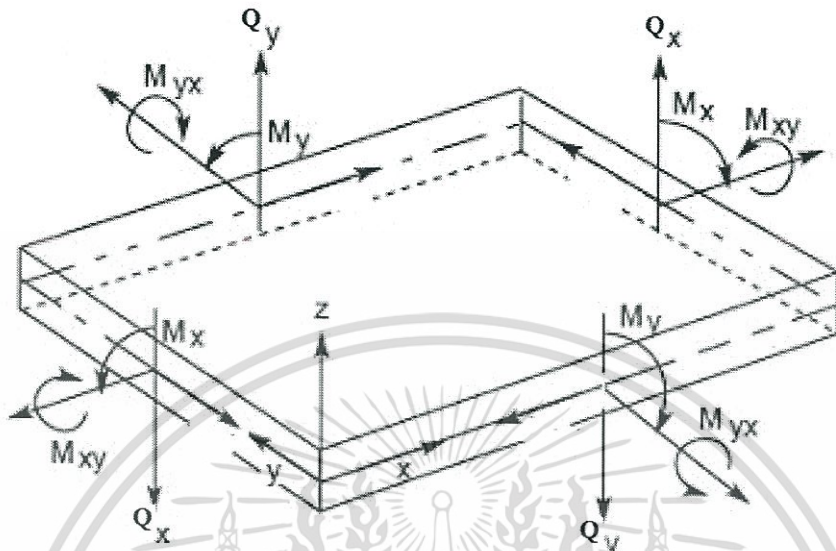


รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแรงภายในของเมมเบรน

#### 2.1.2 ทฤษฎีโครงสร้างแบบแผ่น

ในทางปฏิบัติแล้วโครงสร้างแบบเปลือกนั้นจะเกิดการเปลี่ยนรูปและแรงปฏิกิริยาตลอดแนวขอบ อย่างเช่น โมเมนต์ดัด การพิจารณาโครงสร้างดังกล่าวจะต้องใช้ทฤษฎีโครงสร้างแบบแผ่นเข้าทำการวิเคราะห์โดยองค์ประกอบของแรงในโครงสร้างแบบแผ่นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย โมเมนต์ดัดสองค่าคือ  $M_x$ ,  $M_y$  โมเมนต์บิด  $M_{xy} = M_{yx}$  แรงเฉือนตามขวางสองค่าคือ  $Q_x$  และ  $Q_y$  เป็นโดยปกติแล้วทฤษฎีโครงสร้างแบบแผ่นจะใช้วิเคราะห์แรงบริเวณขอบของโครงสร้างแบบเปลือก ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

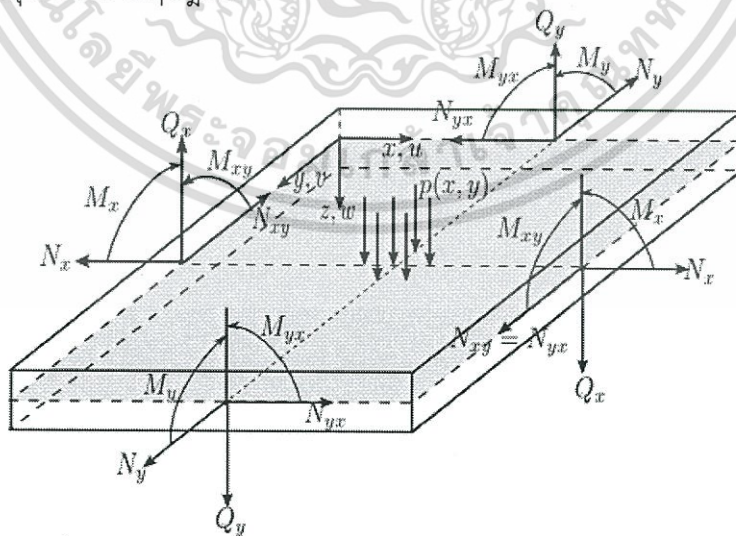
เรายังสามารถประยุกต์ทฤษฎีดังกล่าวนี้กับบริเวณที่มีแรงกระทำเป็นจุด บริเวณใกล้เคียงของบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งหรือเปลี่ยนแปลงความหนาอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของแรงภายในของโครงสร้างแบบแผ่น

### 2.1.2 ทฤษฎีโครงสร้างแบบเปลือก

ทฤษฎีโครงสร้างแบบเปลือกนั้นจะเป็นการรวมคุณสมบัติของทฤษฎีเมมเบรนและทฤษฎีโครงสร้างแบบแผ่นเข้าด้วยกัน โดยมีองค์ประกอบของแรงภายในดังนี้ แรงตั้งฉากในระนาบ  $N_x$ ,  $N_y$  และแรงเฉือนในระนาบ  $N_{xy} = N_{yx}$  โมเมนต์ดัดสองค่าคือ  $M_x$ ,  $M_y$  โมเมนต์บิด  $M_{xy} = M_{yx}$  แรงเฉือนตามขวางสองค่าคือ  $Q_x$  และ  $Q_y$  ดังรูปที่ 2.3 สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างแบบเปลือกได้ครอบคลุมกว่าสองทฤษฎีแรก



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของแรงภายในของโครงสร้างแบบเปลือก

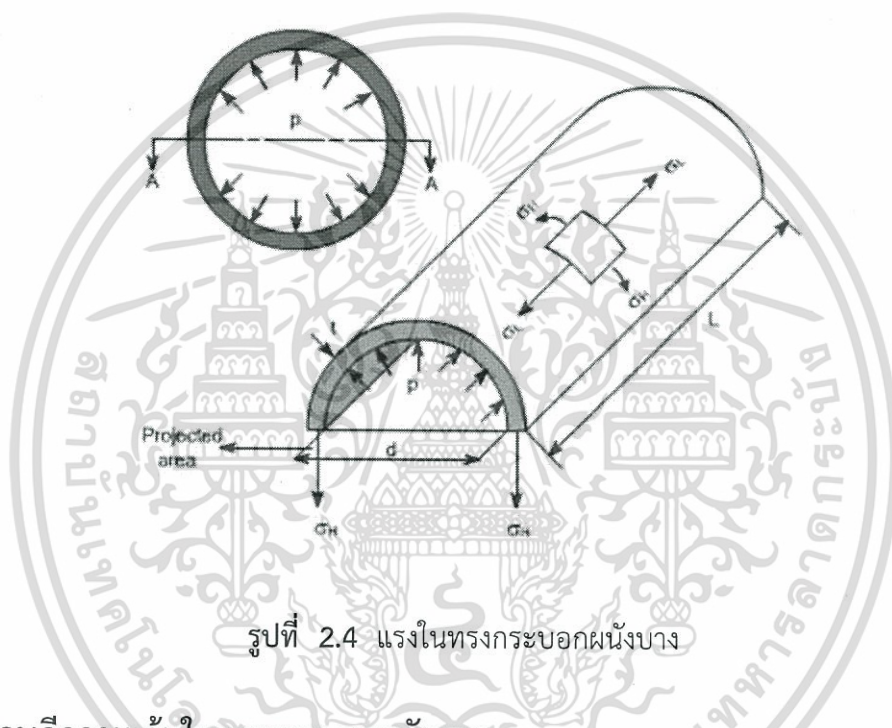
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีความเค้นทรงกระบอกผนังบาง

ทรงกระบอกผนังบาง หมายถึงทรงกระบอกที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน โดยทั่วไปความหนาที่ถือว่าเป็นผนังบางจะไม่เกิน  $1/20$  เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง( $\sigma_H$ ) คือ

$$\sigma_H = \frac{PD}{2t} \quad (2.1)$$

ซึ่ง P คือความดัน D คือเส้นผ่านศูนย์กลาง และ t คือความหนาของผนัง



รูปที่ 2.4 แรงในทรงกระบอกผนังบาง

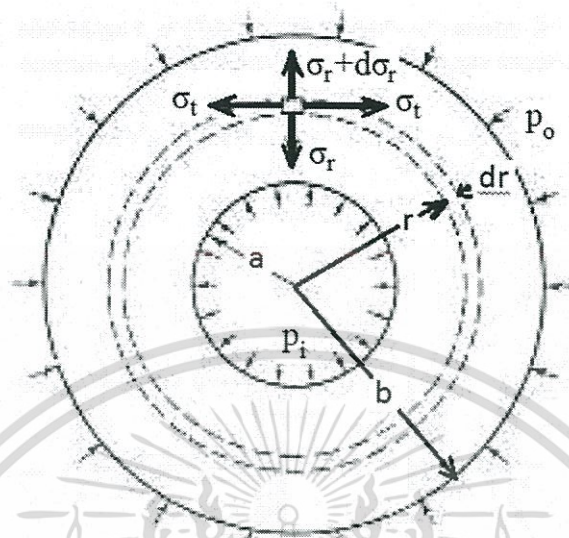
## 2.3 ทฤษฎีความเค้นในทรงกระบอกผนังหนา

ในการวิเคราะห์ทรงกระบอกผนังบาง แรงจะส่งถ่ายไปตลอดหน้าตัดตามแนวยาวที่พิจารณา วิธีการเดียวกันนี้สามารถใช้พิจารณาการส่งถ่ายแรงตลอดหน้าตัดตามยาวของถังทรงกระบอกผนังหนาได้ โดยข้อแตกต่างที่ทำให้ถังทรงกระบอกผนังบางต่างจากผนังหนาคือ ความหนาของถังผนังบางจะต้องมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า  $1/20$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หน่วยแรงที่ได้นี้มีค่าเท่ากับหน่วยแรงสัมผัสสูงสุด ในทางตรงข้ามหน่วยแรงที่ได้จากทรงกระบอกผนังหนามีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงสัมผัสสูงสุด นอกจากนี้แล้วหน่วยแรงที่กระจายตลอดความหนาของหน้าตัดยังไม่เป็นเส้นตรงอีกด้วย

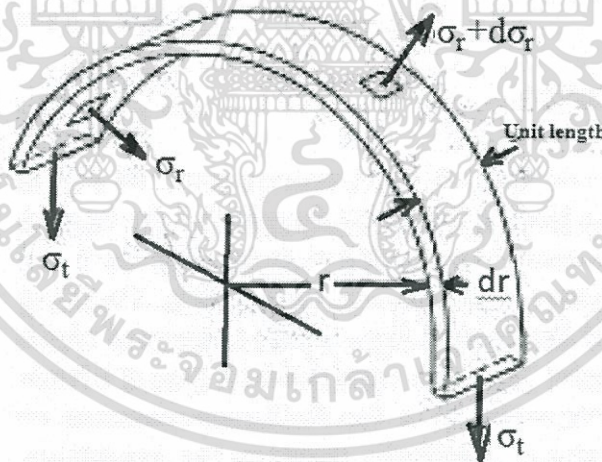
พิจารณาหน่วยแรงสัมผัส  $\sigma_r$  และหน่วยแรงในแนวรัศมี  $\sigma_r$  ที่ตำแหน่งใดๆบนถังทรงกระบอกผนังหนา จากทรงกระบอกในรูปที่ 2.5 ประกอบด้วย รัศมีภายใน a รัศมีภายนอก b ความดันที่กระทำภายนอก  $p_0$  และความดันภายใน  $p_i$  โดยทรงกระบอกนี้อาจสมมติให้ประกอบด้วยทรงกระบอกผนังบาง ดังรูปที่ 2.6 ได้แสดงครึ่งหนึ่งของหน้าตัดของเปลือกบางโดยมีรัศมี r ความหนา dr และมีความยาวหนึ่งหน่วย หน่วยแรงสัมผัสในผนังคือ  $\sigma_t$  หน่วยแรงในแนวรัศมีที่ผิวในคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_r$  และหน่วยแรงในแนวรัศมีที่ผิววนอกคือ  $\sigma_r + d\sigma_r$  หน่วยแรงในแนวรัศมีถูกสมมติให้เป็นแรงดึง ดังนั้นผลที่เป็นลบของ  $\sigma_r$  จะเป็นแรงอัด



รูปที่ 2.5 ทรงกระบอกผนังหนาภายใต้ความดันภายในและความดันภายนอก



รูปที่ 2.6 หน่วยแรงในครึ่งหนึ่งของเปลือก

เปลือกของถังอาจถูกพิจารณาให้เป็นทรงกระบอกผนังบาง สมการสมดุลของแรงในแนวตั้งแสดงได้ดังนี้

$$(\sigma_r + d\sigma_r)2(r + dr) - \sigma_r(2r) - 2\sigma_t dr = 0$$

พจน์  $dr d\sigma_r$  จะถูกพิจารณาให้เป็นศูนย์เพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอื่นๆ สมการจะถูกลดพจน์ลงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \quad (2.2)$$

จาก  $\sigma_r$  และ  $\sigma_t$  ที่ได้จากสมมติว่าระนาบของหน้าตัดยังคงระนาบไว้อยู่ ดังนั้นความเครียดตามยาว  $\epsilon_z$  จึงมีค่าคงที่ ประยุกต์กฎของฮุกสำหรับหน่วยแรงในแนวแกน 3 แกน จะได้

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)]$$

เนื่องจากค่า  $\epsilon_z$ ,  $E$ ,  $\sigma_z$  และ  $\nu$  ทั้งหมดคงที่ส่งผลให้  $\sigma_r + \sigma_t$  มีค่าคงที่ตลอดหน้าตัดแทนค่าคงที่นี้ด้วย  $2A$  ดังนั้น

$$\sigma_r + \sigma_t = 2A \quad (2.3)$$

รวมสมการ (2.2) และ (2.3) จะได้

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + 2\sigma_r = 2A$$

หรือ

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} = 2(A - \sigma_r)$$

ทำการจัดพจน์ใหม่จะได้

$$\frac{d\sigma_r}{A - \sigma_r} = 2 \frac{dr}{r}$$

หลังจากทำการอินทิเกรตจะได้

$$-\log_e(A - \sigma_r) = 2 \log_e r + C = \log_e r^2 + C$$

หรือ

$$\log_e(A - \sigma_r)r^2 = -C$$

และ

$$(A - \sigma_r)r^2 = e^{-C} = B$$

ซึ่ง  $B$  ใช้แทน  $e^{-C}$  เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา แก้สมการหาค่า  $\sigma_r$  จะได้

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $\sigma_r$  ในสมการ (2.3) จะได้

$$\sigma_t = A + \frac{B}{r^2} \quad (2.5)$$

ค่าคงที่ A และ B จะถูกนำไปแทนค่าในสมการ (2.4) หน่วยแรงในแนวรัศมีที่ผิวในและผิวนอกของทรงกระบอกที่รู้ค่าคือ

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -p_i \quad \text{ที่ } r = a \\ \sigma_r &= -p_o \quad \text{ที่ } r = b \end{aligned}$$

หลังจากแทนค่าจะได้

$$-p_i = A - \frac{B}{a^2}$$

$$-p_o = A - \frac{B}{b^2}$$

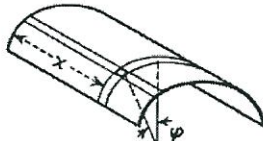
เมื่อแก้สมการหาค่า A และ B ในสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้  $\sigma_r$  และ  $\sigma_t$  ที่ตำแหน่งใดๆ จะได้ว่า

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{(b^2 - a^2) r^2}$$

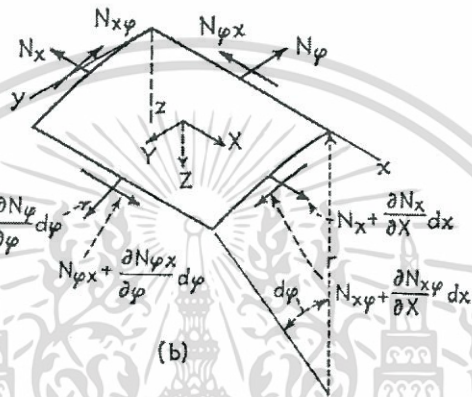
$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{(b^2 - a^2) r^2}$$

### 2.4 ทรงกระบอกเปลือกบางที่มีโหนดสมมาตรกระทำตามแนวแกน

ทรงกระบอกเปลือกบางที่มีแรงที่มีความเค้นกระทำอยู่ภายใน เช่นหม้อไอน้ำชนิดท่อกลม ท่อลม เป็นต้น ทรงกระบอกเปลือกบางดังกล่าว เราถือว่าโหนดที่กระทำจะกระจายสมมาตรเมื่อเทียบกับแกนของทรงกระบอก



(a)

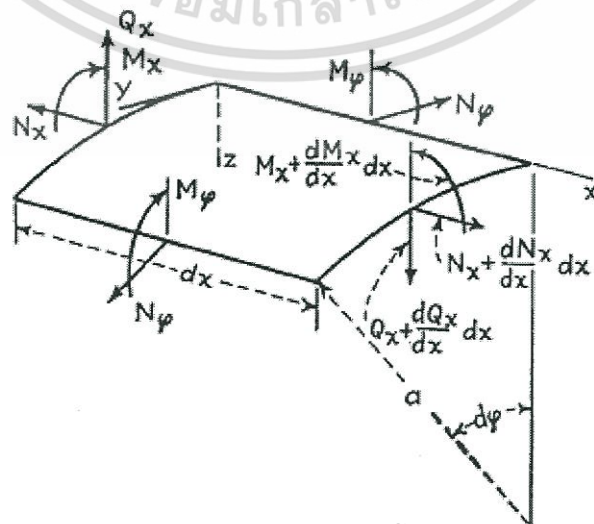


(b)

รูปที่ 2.7 ชิ้นส่วนของเปลือกบางทรงกระบอก

เมื่อพิจารณาหาสมการสมดุลของทรงกระบอกเปลือกบางเราจะพิจารณาชิ้นส่วนของทรงกระบอก เช่นในรูป 2.7 ตามทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง เราสมมติว่าไม่มีหน่วยแรงเนื่องจากการโค้งเกิดขึ้นบนเปลือกบางและทฤษฎีดังกล่าวว่า เมมเบรน แรง  $N_\phi$  ,  $N_x$  ,  $N_{x\phi}$  และ  $N_{\phi x}$  เรียกว่า แรงเมมเบรน

เนื่องจากเปลือกบางและโหนดที่กระทำสมมาตร ดังนั้นแรงเฉือนเมมเบรน  $N_{x\phi} = N_{\phi x} = 0$  และโมเมนต์เฉือน  $M_{x\phi} = M_{\phi x} = 0$  ส่วนแรงเฉือน  $N_\phi$  และ  $M_\phi$  จะมีค่าคงที่ตลอดเส้นรอบวง ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ชิ้นส่วนของเปลือกบางทรงกระบอกที่โหนดกระทำแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ความเค้นกระทำตั้งฉากกับผิวของ เอลิเมนต์เปลือกบางทรงกระบอกดิ่งนั้นสมการ สมดุล ในแนวแกน  $x$  และ  $z$  คือ

$$\frac{dN_x}{dx} a dx d\theta = 0, (F_x = 0)$$

$$\frac{dQ_x}{dx} a dx d\theta + N_\theta dx d\theta + z_a dx d\theta = 0, (F_z = 0)$$

และ 
$$\frac{dM_x}{dx} a dx d\theta + Q_x a dx d\theta + z_a dx d\theta = 0, (M_y = 0) \quad (2.6)$$

ซึ่ง  $a$  = รัศมีของเปลือกบางทรงกระบอก,  $z$  = โหลดที่กระทำที่ผิวในทิศทาง  $z$  จาก สมการแรก แสดงให้เห็นว่า  $N_x$  มีค่าคงที่ ส่วนสมการที่เหลือ เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dQ_x}{dx} + \frac{1}{a} N_\theta &= -z \\ \frac{dM_x}{dx} + Q_x &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

เนื่องจาก เปลือกบางทรงกระบอก สมมาตร ดังนั้นการกระจัดทางเส้นรอบวง,  $v = 0$  และ การกระจัด  $u$  และ  $w$  จะเป็นฟังก์ชันของ  $x$  เท่านั้น

เพราะว่า 
$$\epsilon_x = \frac{du}{dx}, \quad \epsilon_\phi = \frac{-w}{a} \quad (2.8)$$

จาก Hook's Law

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_\phi) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left( \frac{du}{dx} - \mu \frac{w}{a} \right) = 0 \\ N_\phi &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\epsilon_\phi + \mu\epsilon_x) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left( \mu \frac{du}{dx} - \frac{w}{a} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

จากสมการแรก  $\frac{du}{dx} = \frac{\mu w}{a}$  และจากสมการที่สอง

$$N_\phi = -\frac{Ehw}{a} \quad (2.10)$$

เนื่องจากความโค้งในทิศทางของเส้นรอบวงไม่เปลี่ยนแปลง และความโค้งในทิศทาง  $x$  เท่ากับ  $-\frac{d^2 w}{dx^2}$  ดังนั้นจากสมการของแผ่นโลหะ

$$M_\phi = \mu M_x$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.11)$$

ซึ่ง

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

จากสมการ (2.7)

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} - \frac{dV_x}{dx} = 0$$

และเพราะว่า

$$\frac{dV_x}{dx} = -Z - \frac{N_0}{a}$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{N_0}{a} = -Z$$

แทนค่าสมการ (2.10) และ (2.11) เราจะได้

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( D \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{Eh}{a^2} w = Z \quad (2.12)$$

ถ้าความหนา  $h$  ของเปลือกบางทรงกระบอก มีค่าคงที่

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Eh}{a^2} w = Z \quad (2.13)$$

ถ้าให้

$$\beta^4 = \frac{Eh}{4a^2 D} = \frac{3(1-\mu^2)}{a^2 h^2} \quad (2.14)$$

ดังนั้น

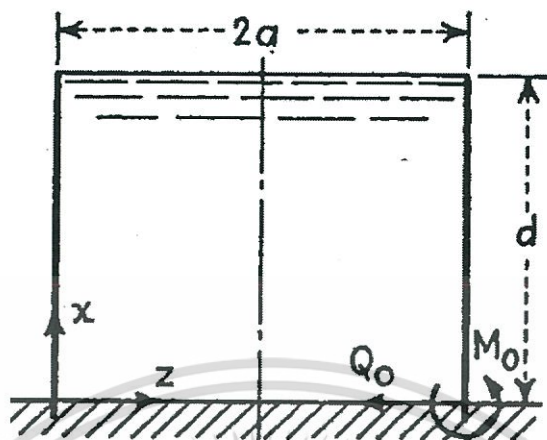
$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{Z}{D} \quad (2.15)$$

และผลเฉลยทั่วไปของสมการ (2.15) คือ

$$w = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f(x) \quad (2.17)$$

$f(x)$  คือผลเฉลยเฉพาะรายการของสมการ (2.15) ส่วน  $C_1, C_2, C_3$  และ  $C_4$  เป็นค่าคงที่ซึ่งหามาได้จากเงื่อนไขที่ปลายของเปลือกบางทรงกระบอก

## 2.4.1 ถังน้ำทรงกระบอกผนังบางสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.9 ถังน้ำทรงกระบอกความหนาคงที่

ถ้าถังน้ำถูกกระทำโดยแรงดันน้ำ ความเค้นในผนังสามารถหาได้จากสมการ 2.13 สมการของแรงดันน้ำที่กระทำคือ

$$(2.18) \quad Z = -\gamma(d-x)$$

ซึ่ง  $\gamma$  คือ น้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำจะได้

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{-\gamma(d-x)}{D} \quad (2.19)$$

ผลเฉลยเฉพาะรายการของสมการ คือ

$$w_1 = \frac{-\gamma(d-x)}{4\beta^4 D} = \frac{-\gamma(d-x)a^2}{Eh} \quad (2.20)$$

ผลเฉลยเฉพาะรายการข้างบนได้แทนการขยายตัวของถังทรงกระบอกในแนวรัศมี ภายใต้เงื่อนไขแบบขอบอิสระที่ถูกแรงดันน้ำกระทำ เมื่อแทนค่าลงไปในสมการทั่วไป (2.17) จะได้

$$w = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + \frac{-\gamma(d-x)a^2}{Eh}$$

ในทางปฏิบัติความหนาของผนังถัง  $h$  มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีของถัง  $a$  และความสูงของถัง  $d$  เราอาจจะพิจารณาให้ความสูงของถังมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  จึงมีค่าเป็นศูนย์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $w = e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + \frac{-\gamma(d-x)a^2}{Eh} \quad (2.21)$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่  $C_3$  และ  $C_4$  สามารถหาได้จากเงื่อนไขของขอบล่างของถัง โดยสมมติว่าผนังมีการยึดแน่นกับฐานรากที่มีค่าสตีเฟนสมหาคาล จากเงื่อนไขจะได้

$$(w)_{x=0} = C_3 - \frac{\gamma a^2 d}{Eh} = 0$$

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_{w=0} = \left[-\beta C_3 e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) + \beta C_4 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + \frac{\gamma a^2}{Eh}\right]_{x=0} = \beta(C_4 - C_3) + \frac{\gamma a^2}{Eh} = 0$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้

$$C_3 = \frac{\gamma a^2 d}{Eh} \quad C_4 = \frac{\gamma a^2}{Eh} \left(d - \frac{1}{\beta}\right)$$

นำไปแทนในสมการ (2.18) จะได้

$$w = -\frac{\gamma a^2}{Eh} \left\{ d - x - e^{-\beta x} \left[ d \cos \beta x + \left(d - \frac{1}{\beta}\right) \sin \beta x \right] \right\}$$

จะได้

$$w = -\frac{\gamma a^2 d}{Eh} \left[ 1 - \frac{x}{d} - \theta(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta d}\right) \zeta(\beta x) \right] \quad (2.22)$$

กำหนดให้

$$\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

$$\psi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)$$

$$\theta(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x$$

$$\zeta(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x$$

แรงดึงในแนวเส้นรอบวง  $N_\varphi$  คือ

$$N_\varphi = -\frac{Ehw}{a} = \gamma ad \left[ 1 - \frac{x}{d} - \theta(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta d}\right) \zeta(\beta x) \right] \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

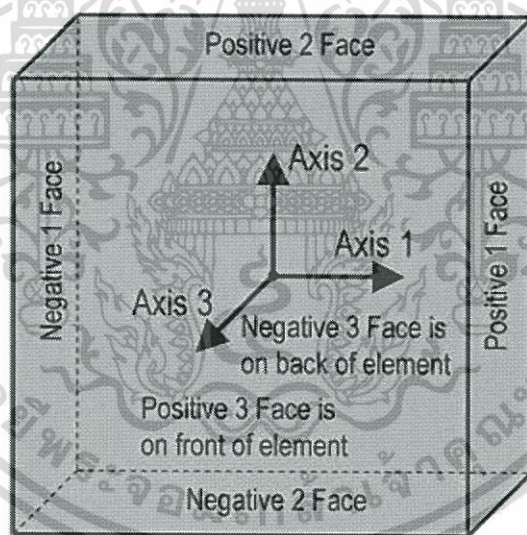
## 2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะแก้สมการด้วยการประมาณค่า จนกว่าจะครบทุกชิ้นส่วน แล้วนำมาประมวลผล ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. Preprocessing ถือว่าเป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ โดยข้อมูลตามมาตรฐานจะมีทั้งคุณสมบัติวัสดุ, แรงกระทำ, และการจับยึดเป็นต้น
2. Solution การคำนวณหาผลเฉลย
3. Postprocessing การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟ

### 2.5.1 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอลิเมนต์แบบเปลือกประกอบด้วยหน้าทั้งหมด 6 หน้าคือ หน้า 1, 2 และ 3 ซึ่งแต่ละหน้าของเอลิเมนต์ยังมีด้านบวกและลบดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยในการนิยามหมายเลขของหน้านั้นจะสอดคล้องกับแกนเฉพาะที่ของเอลิเมนต์ โดยหน้า 1 ที่เป็นบวกจะตั้งฉากกับแกน 1 ที่เป็นแกนเฉพาะที่ ในทางตรงข้ามหน้าที่ 1 ที่เป็นลบก็ตั้งฉากกับแกน 1 ที่เป็นแกนเฉพาะที่ด้านที่เป็นลบของเอลิเมนต์ หน้า 2 และ 3 ก็พิจารณาในแบบเดียวกัน



รูปที่ 2.10 หน้าองค์ประกอบของเอลิเมนต์

แกน 3 ที่เป็นแกนเฉพาะที่ของเอลิเมนต์จะตั้งฉากกับเอลิเมนต์ที่เป็นระนาบ 12 เสมอ หน้า 3 ที่เป็นบวกบางครั้งถูกเรียกว่า ด้านบนของเอลิเมนต์แบบเปลือก ส่วนหน้าที่เป็นลบบางครั้งถูกเรียกว่า ด้านล่างของเอลิเมนต์แบบเปลือก

แรงภายในของเอลิเมนต์แบบเปลือก

แรงภายในของเอลิเมนต์แบบเปลือกนั้นจากโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ จะเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วย ความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเปลือกซึ่งประกอบด้วยแรงทั้งหมด 8 แรงคือ  $F11, F22, F12 = F21, M11, M22, M12 = M21, V13$  และ  $V23$  ซึ่งหากเทียบตัวแปรกับทางทฤษฎีแล้วก็คือ  $N_x, N_y, N_{xy} = N_{yx}, M_x, M_y, M_{xy} = M_{yx}, Q_x$  และ  $Q_y$  ตามลำดับ

รูปที่ 2.11 แสดงแรงภายในที่อยู่ในทิศทางบวกของ  $F11, F22, F12 = F21, V13$  และ  $V23$  โดยแรงแต่ละแรงจะเป็นแรงต่อหน่วยความยาวที่กระทำที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์แบบเปลือก

คำอธิบายตัวแปรของแรงในเอลิเมนต์แบบเปลือก

$F11$  : แรงต่อหน่วยความยาวที่ตั้งฉากที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์แบบเปลือกบนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและลบในทิศทางแกน 1 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

$F22$  : แรงต่อหน่วยความยาวที่ตั้งฉากที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์แบบเปลือกบนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและลบในทิศทางแกน 2 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

$F12$  : แรงเฉือนต่อหน่วยความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์บนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและลบ ในทิศทางแกน 2 ที่เป็นแกนเฉพาะที่ และบนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและลบในทิศทางแกน 1 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

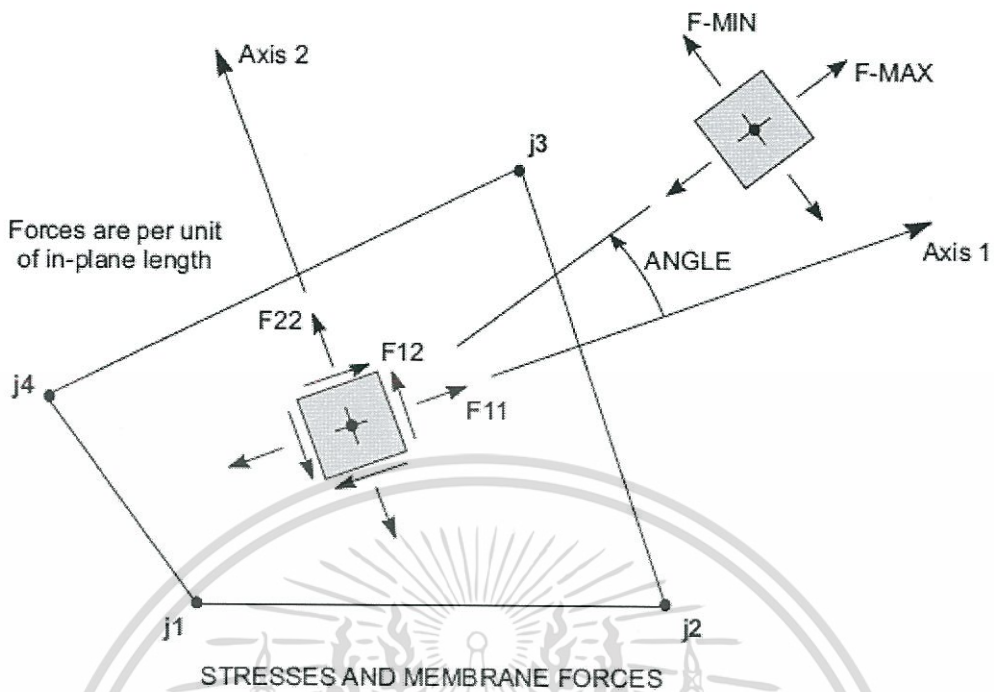
$V13$  : แรงเฉือนนอกระนาบต่อหน่วยความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์แบบเปลือกบนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและลบในทิศทางแกน 3 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

$V23$  : แรงเฉือนนอกระนาบต่อหน่วยความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์แบบเปลือกบนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและลบในทิศทางแกน 3 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

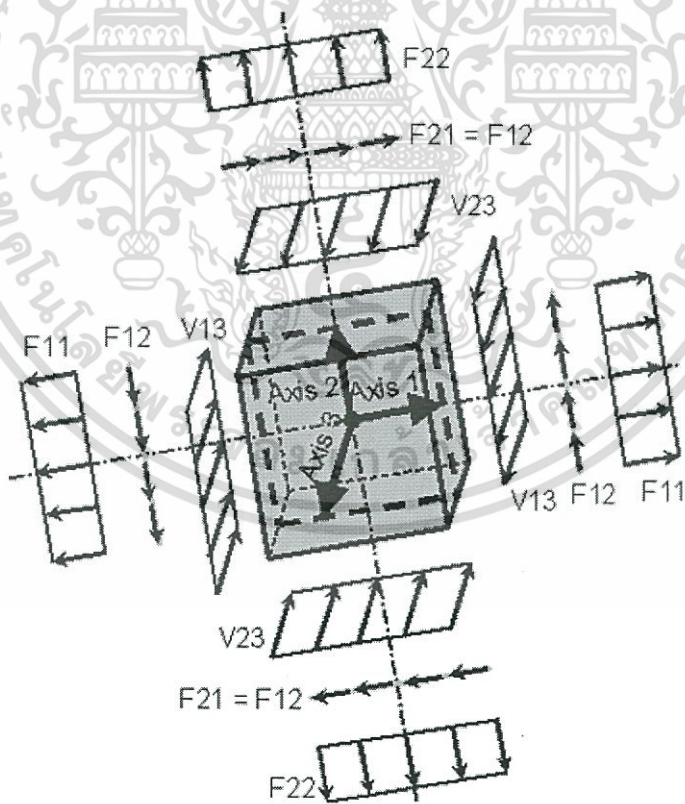
$M11$  : โมเมนต์ต่อหน่วยความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์บนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยโมเมนต์ดังกล่าวหมุนรอบแกน 2 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

$M22$  : โมเมนต์ต่อหน่วยความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์บนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยโมเมนต์ดังกล่าวหมุนรอบแกน 1 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

$M12$  : โมเมนต์บิดต่อหน่วยความยาวที่ระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์บนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยโมเมนต์ดังกล่าวหมุนรอบแกน 1 ที่เป็นแกนเฉพาะที่ และบนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและลบโดยโมเมนต์ดังกล่าวหมุนรอบแกน 2 ที่เป็นแกนเฉพาะที่

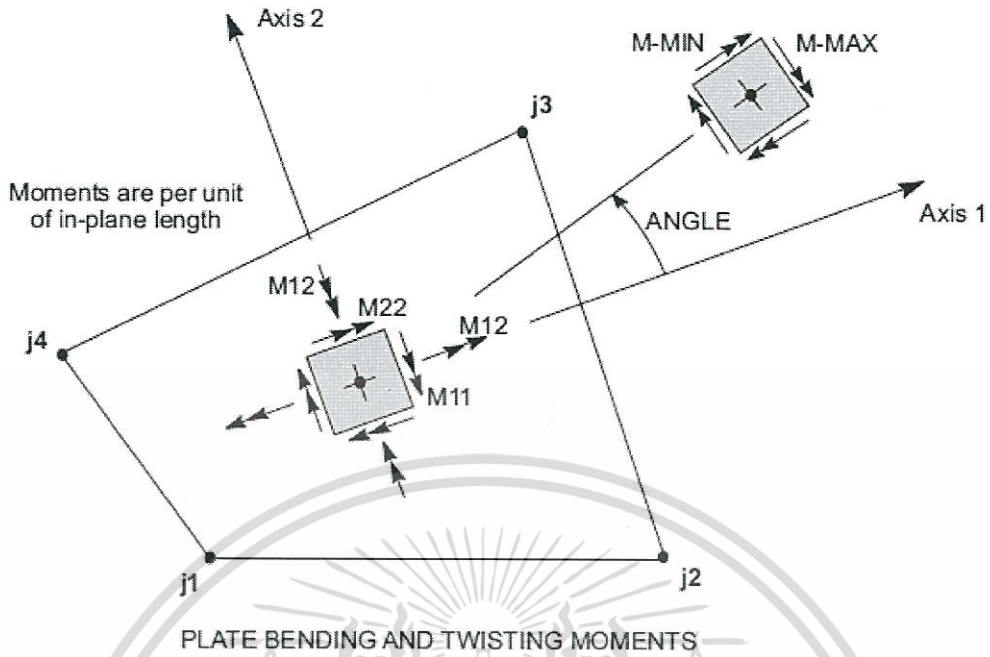


รูปที่ 2.11 แรงเมมเบรนในเอลิเมนต์

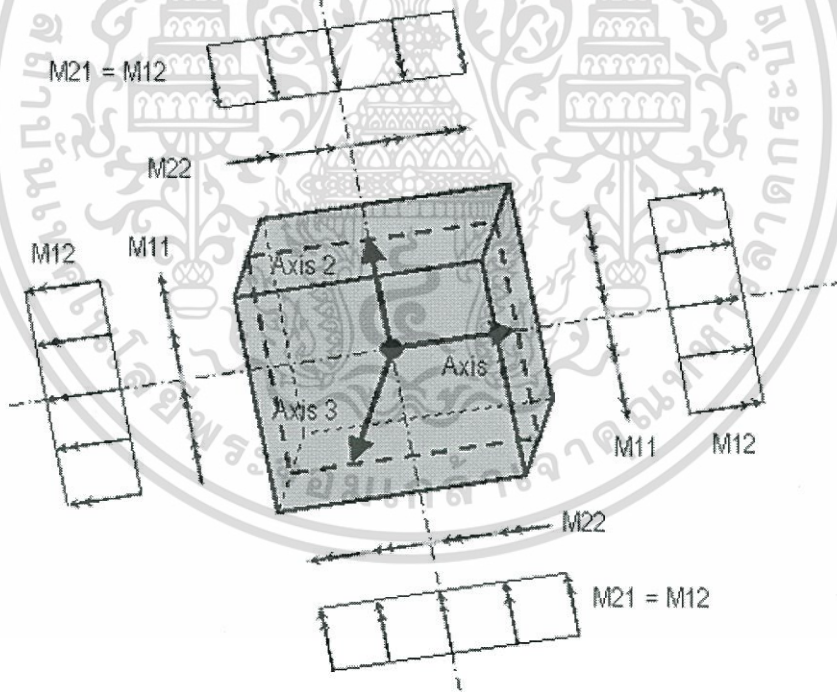


รูปที่ 2.12 การแผ่กระจายของแรงเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 โมเมนต์ในเอลิเมนต์



รูปที่ 2.14 การแผ่กระจายของโมเมนต์ภายใน  $M_{11}$ ,  $M_{22}$  และ  $M_{12}=M_{21}$

โมเมนต์ตามรูปที่ 2.13 สามารถพิจารณาได้โดยใช้กฎมือขวา

แรงภายในของเอลิเมนต์แบบเปลือกนี้ได้จากการอินทิเกรตตลอดความหนาของเอลิเมนต์  
แสดงได้ดังนี้ ดัง  
แรงตั้งฉากในเมมเบรน

$$F_{11} = \int_{-th/2}^{+th/2} \sigma_{11} dx_3$$

$$F_{22} = \int_{-th/2}^{+th/2} \sigma_{22} dx_3$$

แรงเฉือนในเมมเบรน

$$F_{12} = \int_{-th/2}^{+th/2} \sigma_{12} dx_3$$

โมเมนต์คดในแผ่น

$$M_{11} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} x_3 \sigma_{11} dx_3$$

$$M_{22} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} x_3 \sigma_{22} dx_3$$

โมเมนต์บิดในแผ่น

$$M_{12} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} x_3 \sigma_{12} dx_3$$

แรงเฉือนตามขวางในแผ่น

$$V_{13} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} \sigma_{13} dx_3$$

$$V_{23} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} \sigma_{23} dx_3$$

เมื่อ

$x_3$  : ตัวแปรแทนความหนาที่วัดจากระนาบกึ่งกลางของเอลิเมนต์

$th$  : ความหนาของเมมเบรน

$thb$  : ความหนาของแผ่นที่รับโมเมนต์คด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงภายในของเอลิเมนต์แบบเปลือก

หน่วยแรงพื้นฐานของเอลิเมนต์แบบเปลือกประกอบด้วย 6 หน่วยแรง คือ  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$  =  $S_{21}$ ,  $S_{13}$  และ  $S_{23}$  โดย  $S_{ij}$  แทนหน่วยแรงที่ปรากฏบนเอลิเมนต์หน้า  $i$  ในทิศทาง  $j$  โดยทิศทาง  $i$  และ  $j$  อ้างอิงตามแกนเฉพาะที่ 1, 2 และ 3 รูปที่ 2.17 ได้แสดงการกระจายของหน่วยแรง

คำอธิบายตัวแปรของแรงในเอลิเมนต์แบบเปลือก

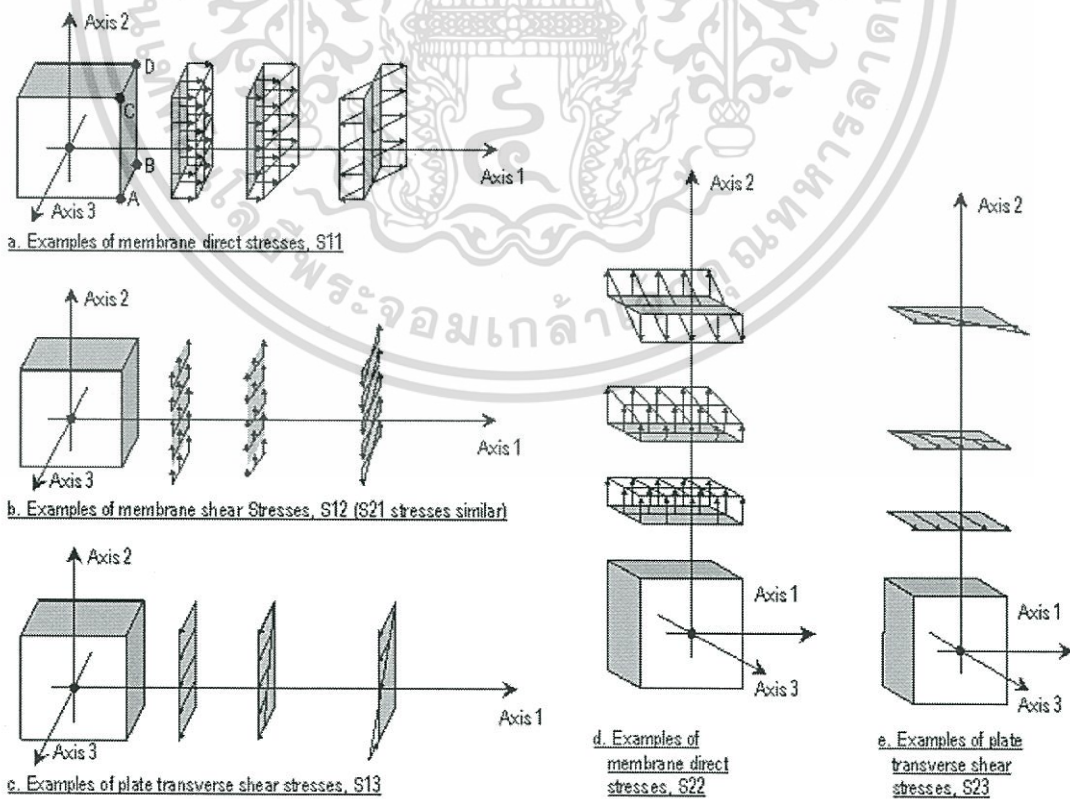
$S_{11}$  : หน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำบนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและด้านลบของเอลิเมนต์ ในทิศทางแกน 1 ซึ่งเป็นแกนเฉพาะที่

$S_{22}$  : หน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำบนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและด้านลบของเอลิเมนต์ ในทิศทางแกน 2 ซึ่งเป็นแกนเฉพาะที่

$S_{12}$  : หน่วยแรงเฉือนที่กระทำบนหน้า 1 ทั้งด้านบวกและด้านลบของเอลิเมนต์ ในทิศทางแกน 2 ซึ่งเป็นแกนเฉพาะที่ และบนหน้า 2 ทั้งด้านบวกและด้านลบในทิศทางแกน 1 ซึ่งเป็นแกนเฉพาะที่

$S_{13}$  : หน่วยแรงเฉือนนอกระนาบที่กระทำที่หน้า 1 ทั้งด้านบวกและด้านลบของเอลิเมนต์ ในทิศทางแกน 3 ซึ่งเป็นแกนเฉพาะที่

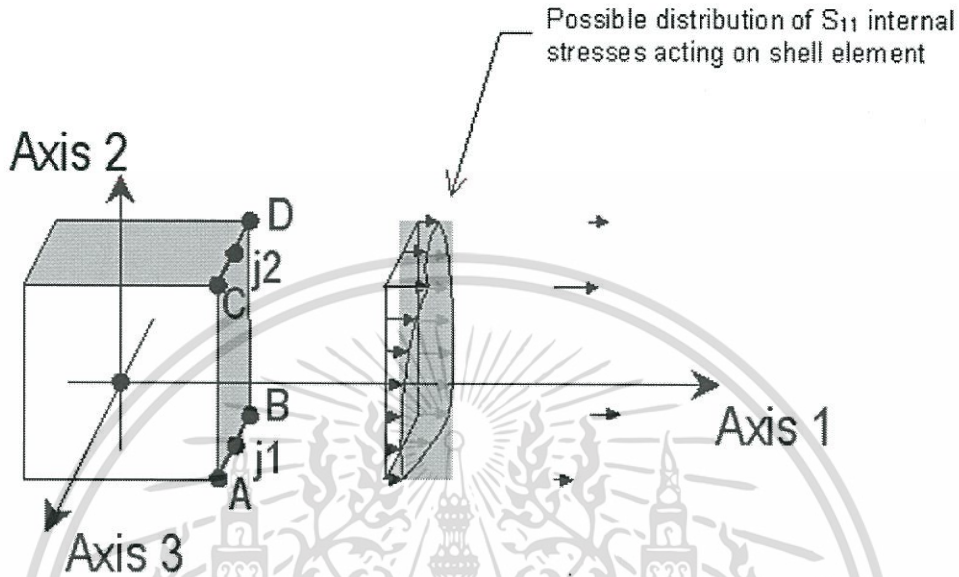
$S_{23}$  : หน่วยแรงเฉือนนอกระนาบที่กระทำที่หน้า 2 ทั้งด้านบวกและด้านลบของเอลิเมนต์ ในทิศทางแกน 3 ซึ่งเป็นแกนเฉพาะที่



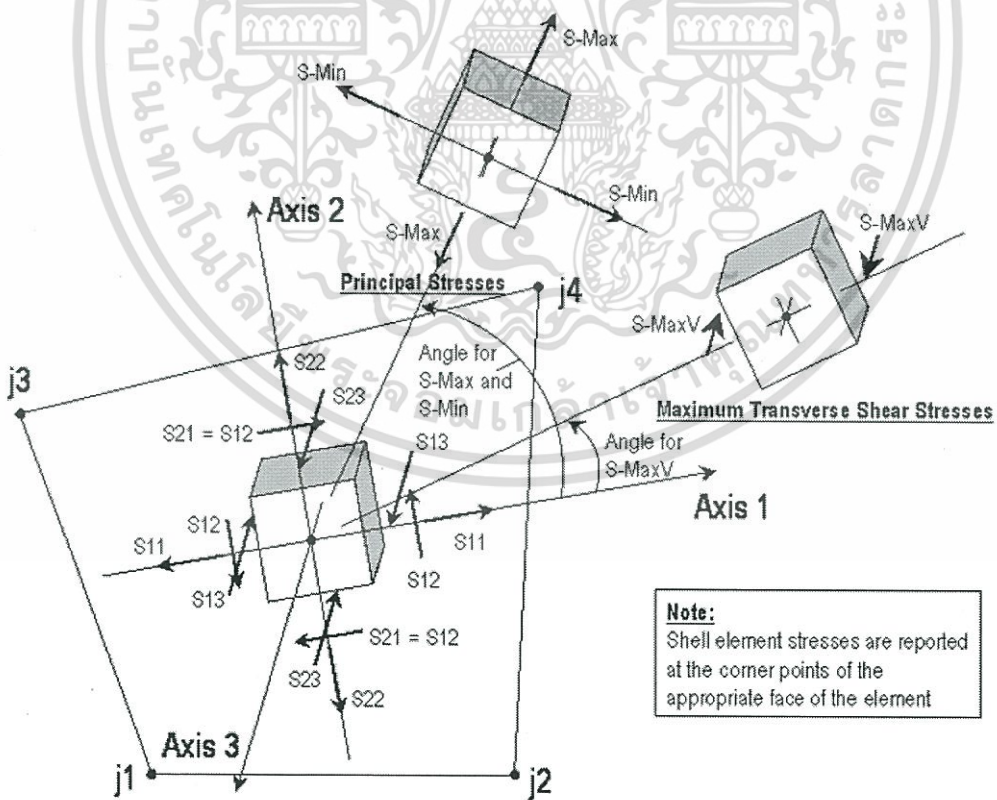
รูปที่ 2.15 การกระจายของหน่วยแรงภายในเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานซึ่งหากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอเชิญชวนให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงภายในเอลิเมนต์แบบเปลือกโปรแกรมจะแสดงออกมาทั้งหน่วยแรงที่ผิวบนและหน่วยแรงที่ผิวล่างของเอลิเมนต์ โดยยึดผิวบนและผิวล่างตามแนวแกนเฉพาะที่ 3 ของเอลิเมนต์ โดยแกนเฉพาะที่ 3 ในทิศทางบวกแทนผิวบน และทิศทางลบแทนผิวล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จุด A และ C แทนหน่วยแรงที่ผิวบน จุด B และ C แทนหน่วยแรงที่ผิวล่าง



รูปที่ 2.16 การกระจายของหน่วยแรงภายในเอลิเมนต์ทั้งผิวในและผิวนอก



รูปที่ 2.17 หน่วยแรงภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงภายในของเอลิเมนต์แบบเปลือกนั้นได้จากการอินทิเกรตตลอดความหนาของเอลิเมนต์ ดังแสดงได้ดังนี้

$$S_{11} = \frac{F_{11}}{th} - \frac{12M_{11}}{thb^3} x_3$$

$$S_{22} = \frac{F_{22}}{th} - \frac{12M_{22}}{thb^3} x_3$$

$$S_{12} = \frac{F_{12}}{th} - \frac{12M_{12}}{thb^3} x_3$$

$$S_{13} = \frac{V_{13}}{thb}$$

$$S_{23} = \frac{V_{23}}{thb}$$

$$S_{33} = 0$$

## 2.6 ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น

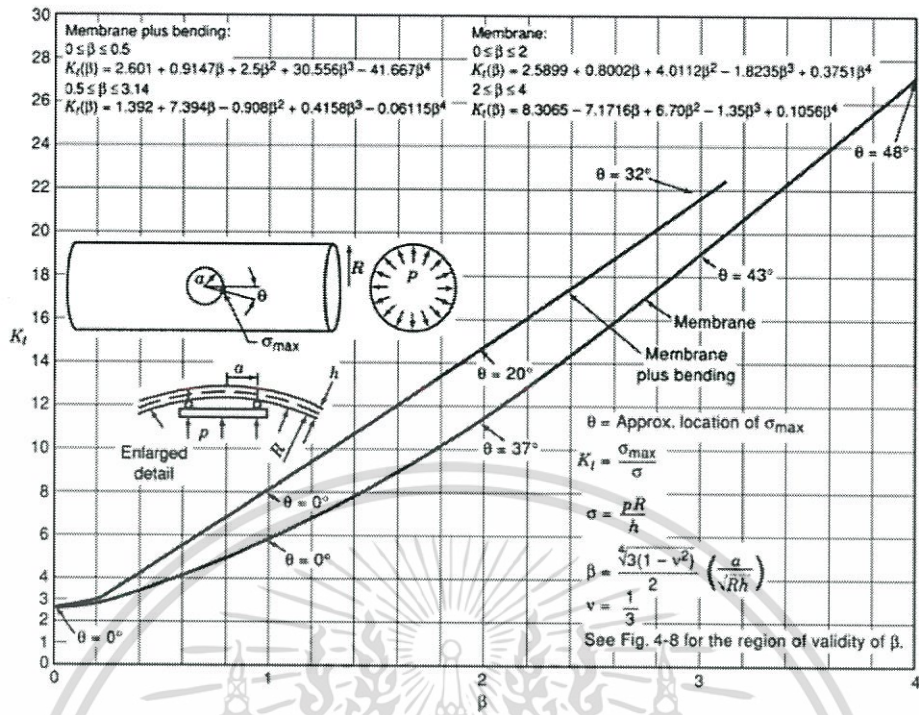
กรณีลักษณะโครงสร้างไม่มีความต่อเนื่อง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างกะทันหันหรือมีการเจาะช่องเปิด ความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่นๆ โดยเฉพาะความเค้นบริเวณขอบรูเจาะ อัตราส่วนความเค้นสูงสุดบริเวณรูเจาะ ( $\sigma_{max}$ ) กับความเค้นของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ( $\sigma$ ) มีชื่อเรียกว่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่น

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \quad (2.24)$$

งานวิจัยเกี่ยวกับตัวประกอบความเค้นหนาแน่นของถังกลมทรงกระบอกหนึ่งบางที่มีรูเจาะกลมภายใต้แรงดันภายใน พบว่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นได้ตามกราฟที่ 1 ซึ่งได้แสดงไว้ทั้ง 2 แบบคือ พิจารณาแรงเฉือนเบรน เพียงอย่างเดียวและ พิจารณาแรงเฉือนเบรนร่วมกับแรงดัด โดยจากกราฟพารามิเตอร์  $\beta$  คือ

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{2} \left( \frac{a}{\sqrt{Rh}} \right) \quad (2.25)$$

ซึ่ง R คือรัศมีเฉลี่ยของถังกลม h คือความหนา a คือรัศมีรูเจาะ และ  $\nu$  คืออัตราส่วนของปัวซอง



รูปที่ 2.18 ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับรูเจาะแบบวงกลมในทรงกระบอกผนังบางภายใต้แรงดัน

### 2.7 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ ให้ส่วนโครงสร้างต่างๆ มีกำลังสามารถต้านทานแรงหรือน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่กระทำตลอดอายุการใช้งานได้อย่างปลอดภัย ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน และมีราคาต่ำกว่าที่ประหยัด นอกจากนี้ส่วนโครงสร้างยังต้องมีความสามารถในสภาวะใช้งานได้ดีในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานตามปกติ โดยไม่แอ่นหรือโก่งตัวมากเกินไปกว่าพิกัดที่กำหนด

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีวิธีการเฉพาะตัวสำหรับแต่ละโครงสร้าง ทั้งนี้ขึ้นกับแรงหรือโมเมนต์ที่ส่วนโครงสร้างนั้นต้องการรับหรือต้านทาน ส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องพิจารณาออกแบบ ได้แก่ ส่วนโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกนซึ่งอาจเป็นแรงดึงหรือแรงอัด ส่วนโครงสร้างที่รับโมเมนต์ดัด โมเมนต์บิดและแรงเฉือน ส่วนโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดรวมกัน รวมถึงการพิจารณาให้รายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับส่วนโครงสร้างนั้น เพื่อให้ทุกๆ ส่วนของโครงสร้างร่วมกันทำหน้าที่รับแรงหรือน้ำหนักได้ตามต้องการอย่างประหยัดและปลอดภัย

ในการคำนวณและออกแบบโครงสร้างส่วนใด วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาออกแบบส่วนของโครงสร้างนั้นให้สอดคล้องเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานหรือข้อบัญญัติที่ได้กำหนดไว้ มาตรฐานหรือข้อบัญญัตินี้ส่วนใหญ่ได้มาจากผลของการวิเคราะห์และวิจัยสำหรับโครงสร้างส่วนนั้นๆ มาตรฐานสำหรับการออกแบบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศสหรัฐอเมริกาที่นิยมใช้ คือ มาตรฐาน ACI (American Concrete Institute) ซึ่งวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้นำมาเรียบเรียงเป็นมาตรฐาน ว.ส.ท. โดยยังมีได้มีกฎหมายรองรับแต่อย่างใด แต่วิศวกรนิยมใช้กัน ทั้งนี้ หากจะออกแบบให้ถูกต้องตามกฎหมายของประเทศไทยจะต้องพิจารณาจากพระราชบัญญัติ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมอาคาร ซึ่งมีทั้งกฎกระทรวงมหาดไทยและข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร

วิธีการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำได้ 2 วิธี คือ

1. โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน
2. โดยวิธีกำลัง

โดยงานวิจัยฉบับนี้จะใช้วิธีกำลังในการออกแบบ

### 2.7.1 การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

การคำนวณออกแบบโดยวิธีนี้ได้ใช้กันมานานตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 เป็นต้นมา โดยอาศัยหลักการของทฤษฎีเส้นตรง ซึ่งเดิมมาตรฐาน ACI หรือ วสท. เรียกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน วิธีนี้พิจารณาว่าหน้าตัดของส่วนโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ คอนกรีตกับเหล็กเสริม และอาศัยหลักความสมดุลของแรงภายในบนหน้าตัดหากำลังต้านทานของส่วนโครงสร้าง นอกจากนี้ ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือวิธีหน้าตัดแปลง ซึ่งพิจารณาว่าหน้าตัดของส่วนโครงสร้าง คสล. ประกอบด้วยวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งเทียบเท่า แล้วคำนวณหากำลังต้านทานของส่วนโครงสร้างจากทฤษฎีอิลาสติก แต่พบว่าวิธีหน้าตัดแปลงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ส่วนโครงสร้างมากกว่าอย่างไรก็ดี วิธีทั้งสองอาศัยข้อสมมติฐานที่คำนึงถึงพฤติกรรมยืดหยุ่นของส่วนโครงสร้าง คสล. ในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกใช้งานดังนี้

สมมติฐานการคำนวณออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

1. ระบุารูปตัดก่อนและหลังการรับโมเมนต์ดัดยังคงเป็นระนาบ นั่นคือสมมติให้การกระจายของหน่วยการยืด-หดตัวบนหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน
2. วัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปตามกฎของฮุก นั่นคือ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืด-หดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรง
3. การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ ให้อายุการยืดหดตัวของเหล็กเสริมกับของคอนกรีต ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีค่าเท่ากัน
4. ไม่คิดกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตได้แนวแกนสะเทิน นั่นคือ สมมติให้คอนกรีตร้าวที่ด้านรับแรงดึงจนถึงแนวแกนสะเทิน

5. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $E_c$ ) มีค่าเท่ากับ  $w^{1.5} 4270 \sqrt{f'_c}$  กก./ตร.ซม. ดังนั้นสำหรับคอนกรีตธรรมดา  $E_c = 15120 \sqrt{f'_c}$  กก./ตร.ซม.

6. โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ( $E_s$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.04 \times 10^6$  กก./ตร.ซม.

7. อัตราส่วนโมดูลัสมีค่าคงที่ และเป็นเลขจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงที่สุด แต่ต้องไม่น้อยกว่า 6 หลักเกณฑ์ของการคำนวณออกแบบ

หลักเกณฑ์ของการคำนวณออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน คือ หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นบนรูปตัด (๓) ของส่วนโครงสร้างที่พิจารณาให้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าของหน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ ( $F$ ) ตามข้อกำหนด นั่นคือ การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน จะพิจารณาให้  $f \leq F$  เสมอ

อย่างไรก็ดี ในการคำนวณออกแบบต้องพิจารณาจัดรวมน้ำหนักหรือแรงกระทำต่างๆ เพื่อให้ได้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คาดว่าจะกระทำต่อส่วนโครงสร้างนั้นตลอดอายุของการใช้งาน เช่น ถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

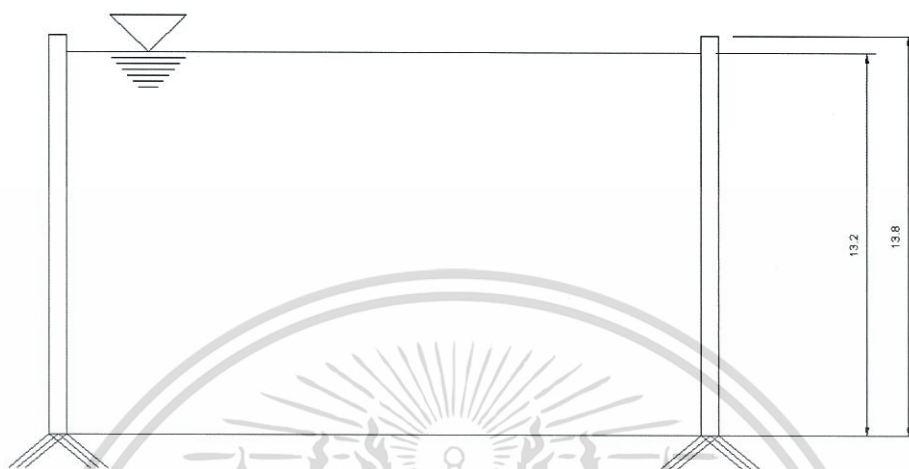
การวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางและทฤษฎีตัวประกอบความเค้น  
หนาแน่น โดยทำแบบจำลองถึงทรงกระบอกปลายอิสระฐานเคลื่อนที่ได้ในแนวราบดังรูปที่ 3.1 ขนาด  
ของโครงสร้างมีความสูงของถัง 13.80 เมตร ภายใต้อุณหภูมิความดันน้ำลึก 13.20 เมตร รัศมีภายใน 11.00  
เมตร ความหนา 0.60 เมตร ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้ทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ในการ  
เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของโปรแกรม



รูปที่ 3.1 ทรงกระบอกปลายล่างอิสระฐานเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

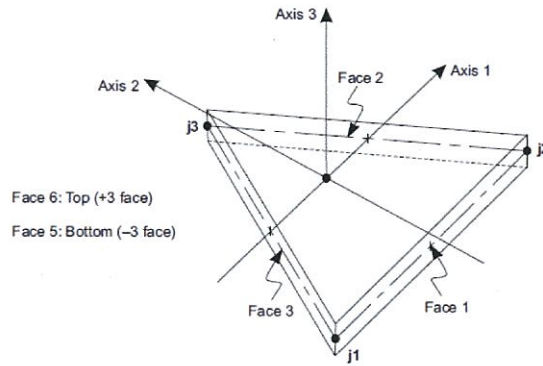
ทำแบบจำลองถังทรงกระบอกปลายยึดแน่นดังรูปที่ 3.2 ขนาดของโครงสร้างมีความสูงของถัง 13.80 เมตร ภายใต้อุณหภูมิที่ 13.20 เมตร รัศมีภายใน 11.00 เมตร ความหนา 0.60 เมตร ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง ในการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของโปรแกรม



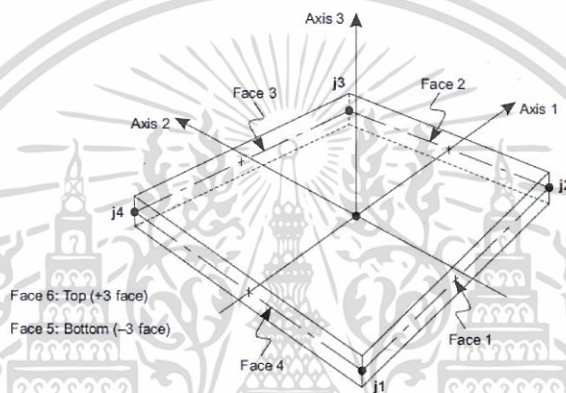
รูปที่ 3.2 ถังทรงกระบอกปลายยึดแน่น

ซึ่งโปรแกรมที่ใช้แต่ละโหนดของเอลิเมนต์จะประกอบด้วยการเคลื่อนที่อิสระอยู่ 6 ค่าด้วยกันคือ การเคลื่อนตัวในทิศทาง  $x$   $y$   $z$  และการหมุนตัวรอบแกน  $x$   $y$   $z$  ในแบบจำลองประกอบด้วยเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง 2 แบบด้วยกันคือ แบบสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.4 และสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.5 โดยแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยการเคลื่อนที่อิสระอยู่ 18 และ 24 ค่าตามลำดับ โดยเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมมีขนาด  $0.20$  ม.  $\times$   $0.20$  ม. ซึ่งมีเอลิเมนต์ทั้งหมด 70891 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เอลิเมนต์แบบแผ่นบาง 3 โหนด



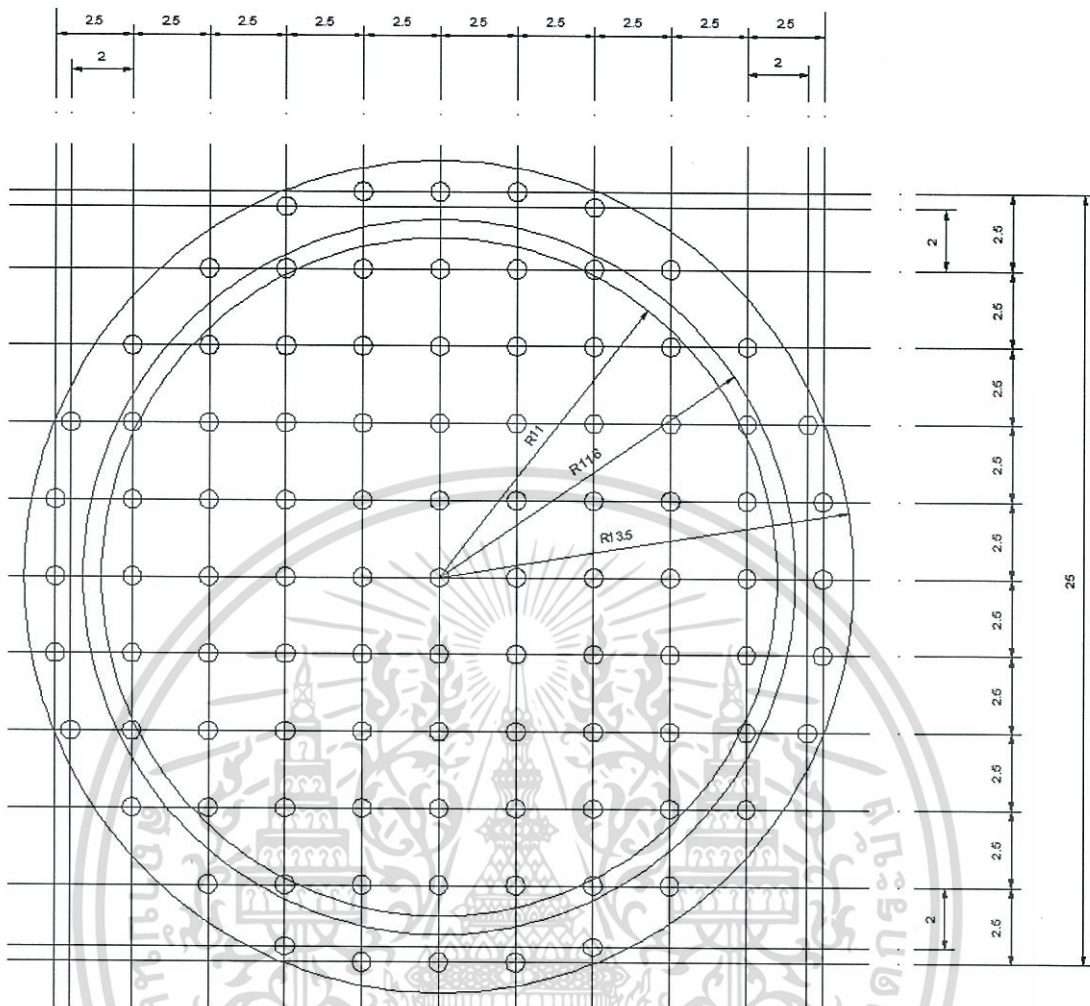
รูปที่ 3.4 เอลิเมนต์แบบแผ่นบาง 4 โหนด

จากนั้นจึงพิจารณาผลของการขยายตัวของฐานรากในถังแบบไม่มีช่องเปิดภายใต้จตุรกรับแบบยึดหมุนและแบบลูกล้อ(จำลองเพื่อดูการขยายตัวสูงสุด) โดยนำแบบจำลองดังรูปที่ 3.2 มาเพิ่มฐานรากรัศมี 13.5 เมตร ความหนา 0.60 เมตร ภายใต้ความดันน้ำลึก 13.20 เมตร ดังรูปที่ 3.6 แล้วสังเกตค่าการขยายตัวที่ได้

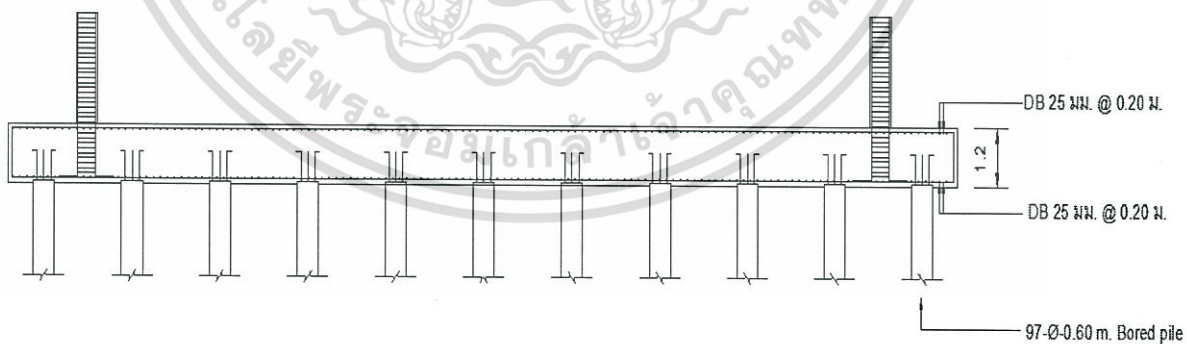


รูปที่ 3.5 ถังทรงบอกแบบไม่มีช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

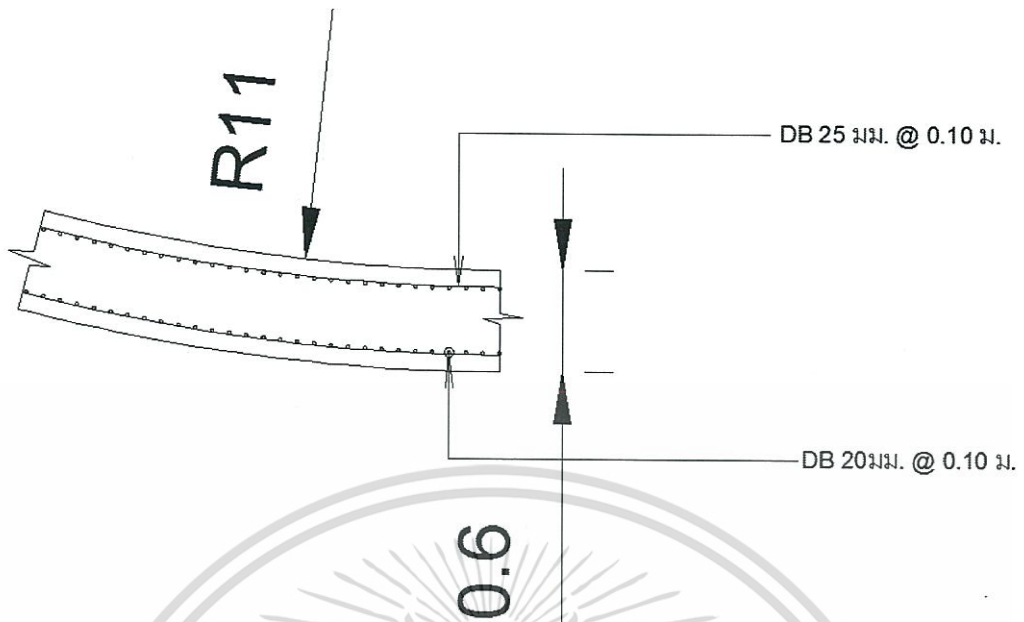


รูปที่ 3.6 แบบขยายฐานรากของถังก่ออัตราส่วน 1 : 250



รูปที่ 3.7 แบบขยายรูปตัดผ่านจุดศูนย์กลางฐานรากของถังก่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

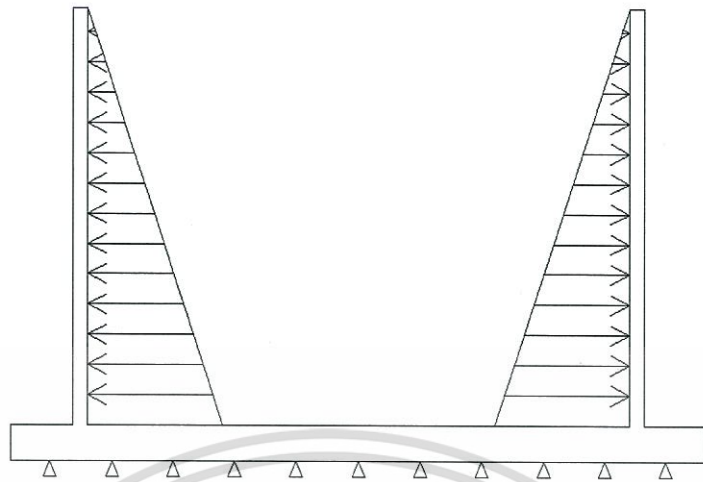


รูปที่ 3.8 แบบขยายเหล็กเสริมในผนังถ้ำ



รูปที่ 3.9 ถังน้ำทรงกระบอกกำหนดให้จุดรองรับเป็นแบบลูกล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ถังน้ำทรงกระบอกกำหนดให้จุดรองรับเป็นแบบยึดหมุน

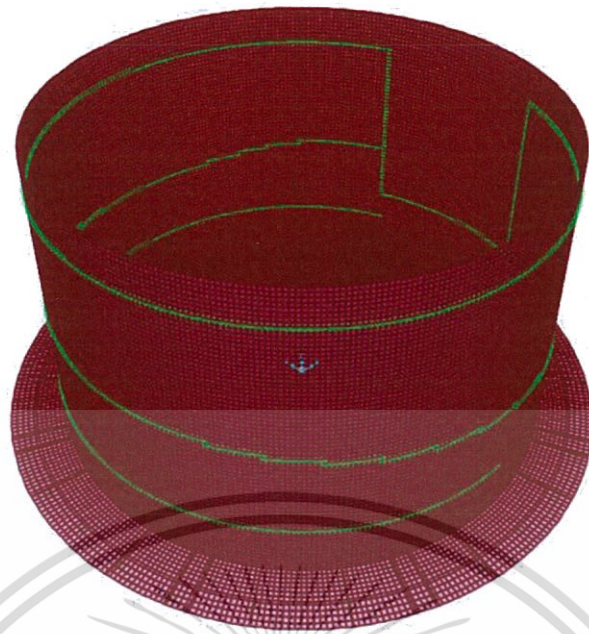
หลังจากนั้นจึงทำการจำลองโครงสร้างจริงตามรูปแบบกรณีศึกษา ทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยัน ด้านข้าง โดยใช้รายละเอียดของถังดังรูปที่ 3.7-3.9

กรณีที่ 1 แบบไม่มีช่องเปิด รัศมีภายใน 11.00 เมตร ความหนา 0.60 เมตร ความสูงของถัง 13.80 เมตร รัศมีฐานราก 13.5 เมตร ฐานรากหนา 1.20 เมตร ภายใต้ความดันน้ำลึก 13.20 เมตร ทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยันด้านข้างดังรูปที่ 3.11 - 3.12



รูปที่ 3.11 กรณีที่ 1 ถังไม่มีการเจาะรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



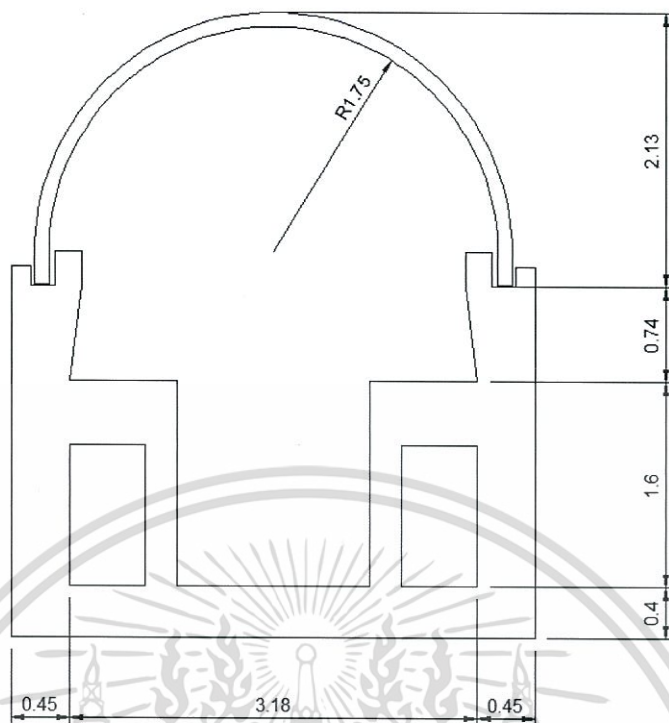
รูปที่ 3.12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังกรณีที่ 1 ถึงไม่มีช่องเปิด

กรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด 2 ช่อง โดยการนำแบบจำลองในกรณีที่ 1 มาเจาะช่องเปิดเพิ่มเข้าไปทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยันดังรูปที่ 3.13 - 3.15



รูปที่ 3.13 กรณีที่ 2 ถึงมีการเจาะช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



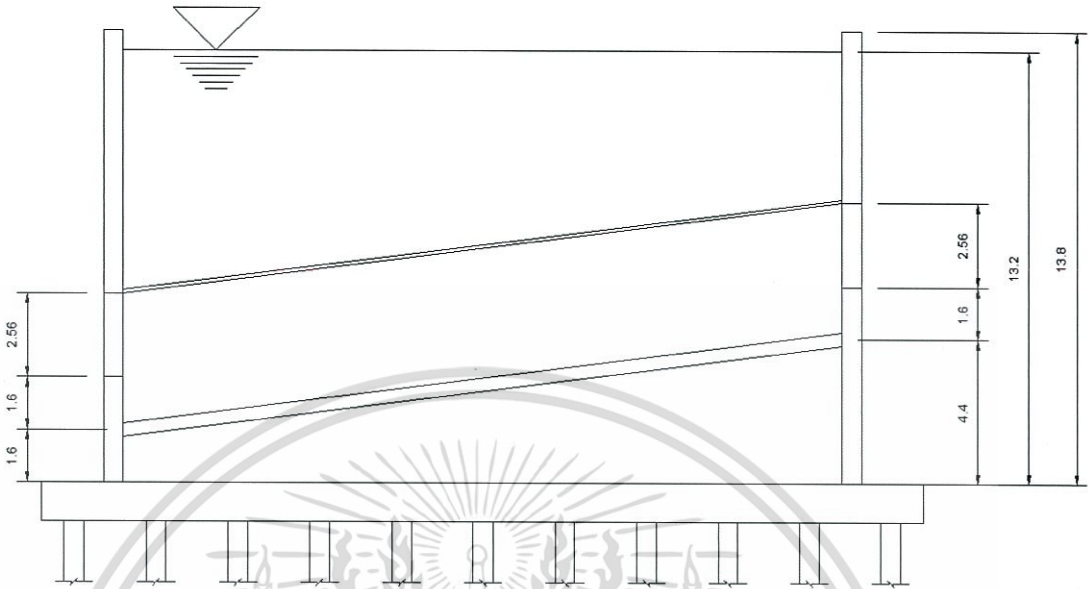
รูปที่ 3.14 แบบขยายช่องเปิด



รูปที่ 3.15 แบบจำลองไฟไนต์ของถังกรณีที่ 2 ถังมีการเจาะช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ 3 เพิ่มคานรับแรงดึงยึดระหว่างผนัง โดยนำแบบจำลองในกรณีนี้ 2 มาเพิ่มคานรับแรงดึงที่ความลึก 1/10 ของความสูงถึง ทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยันด้านข้างดังรูปที่ 3.16 – 3.17

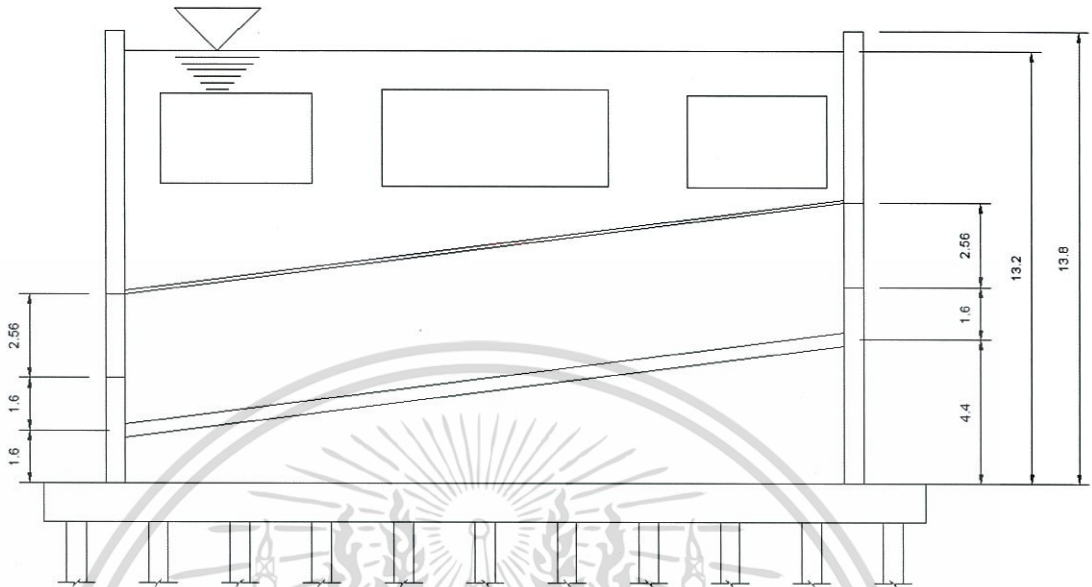


รูปที่ 3.16 กรณีที่ 3 ถึงเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง

รูปที่ 3.17 ถังแบบมีช่องเปิดและคานรับแรงดึงภายใต้การค้ำยันด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 4 เพิ่มจำนวนช่องเปิด โดยนำแบบจำลองในกรณีที่ 3 มาทำการเพิ่มช่องเปิดโดยรอบจำลองทั้งแบบมีและไม่มีค้ำยันด้านข้างดังรูปที่ 3.18 - 3.19



รูปที่ 3.18 กรณีที่ 4 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด



รูปที่ 3.19 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกรณีที่ 4 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด

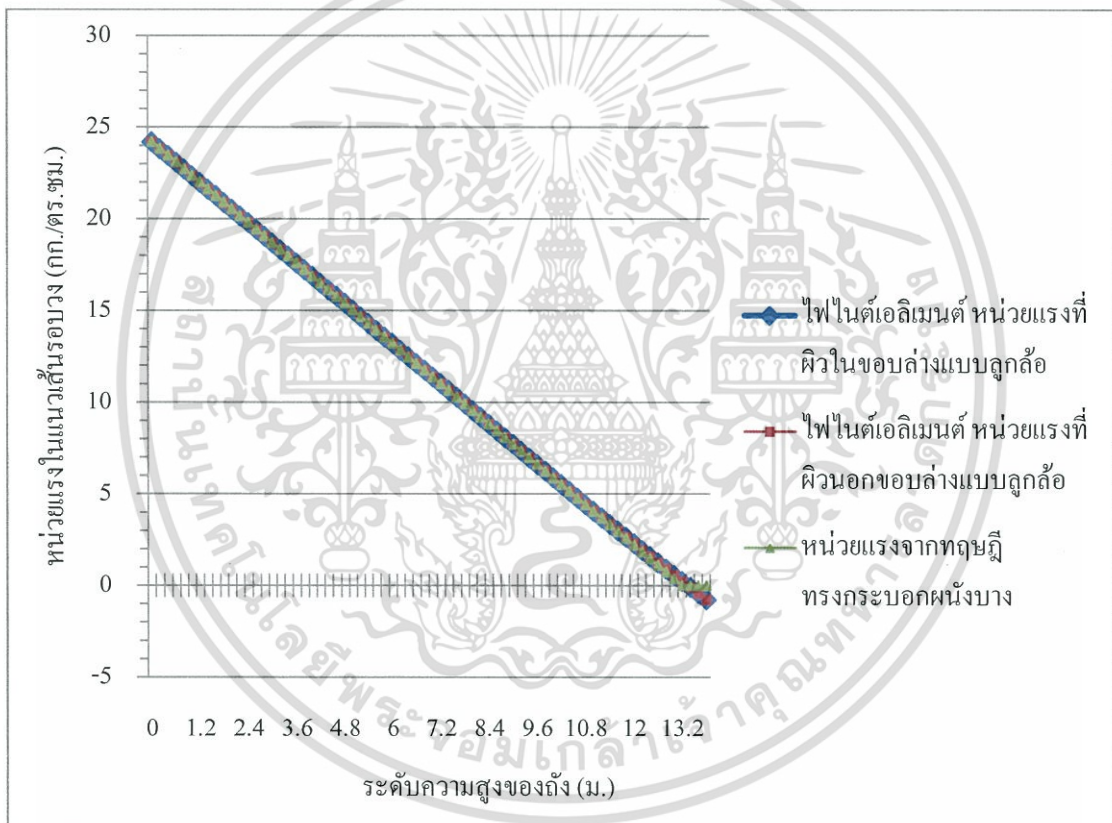
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1. การเปรียบเทียบหน่วยแรงทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ขอบล่างเป็นแบบลูกล้อภายใต้ความดันน้ำ

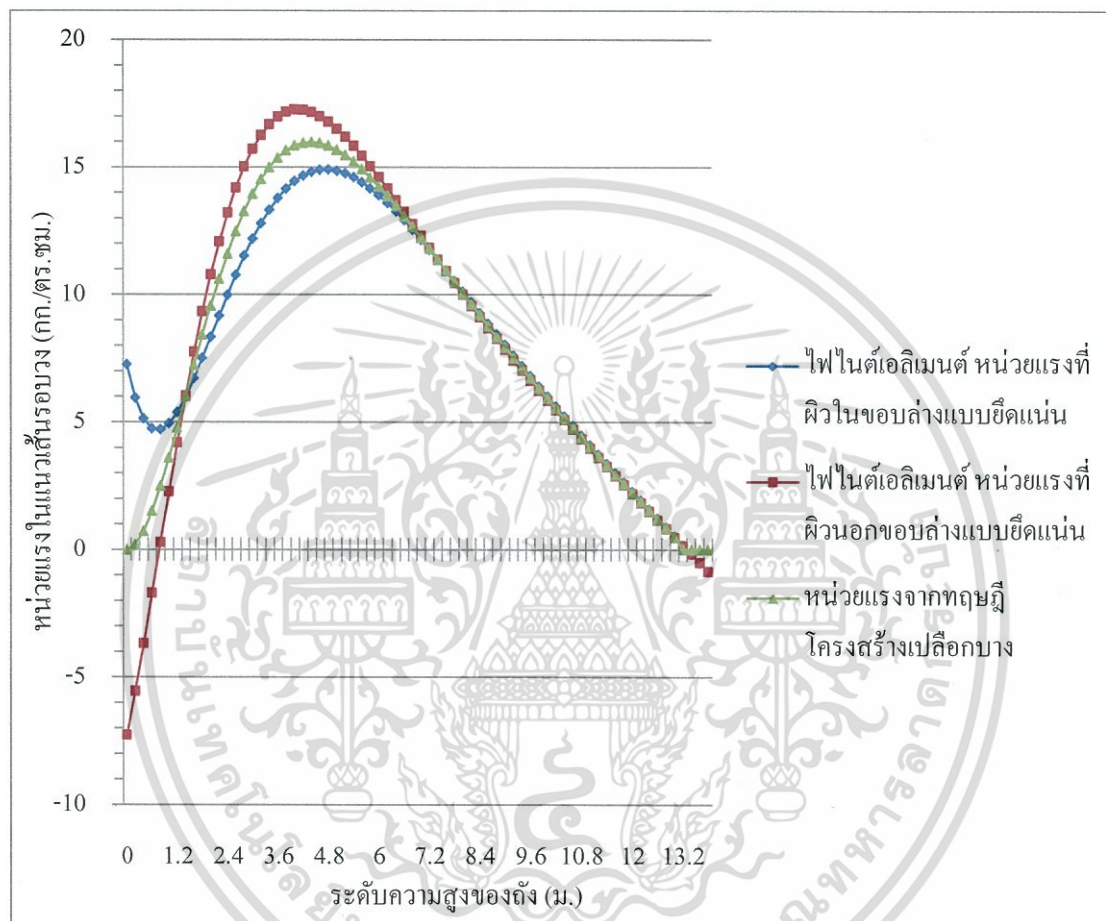
จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าค่าหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงสูงสุดที่ได้จากทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางมีค่าเท่ากับ 24.20 กก./ตร.ซม. จากไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งผิวในและผิวนอกมีค่าเท่ากับ 24.17 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าต่างกันเพียง 0.12 % เท่านั้น



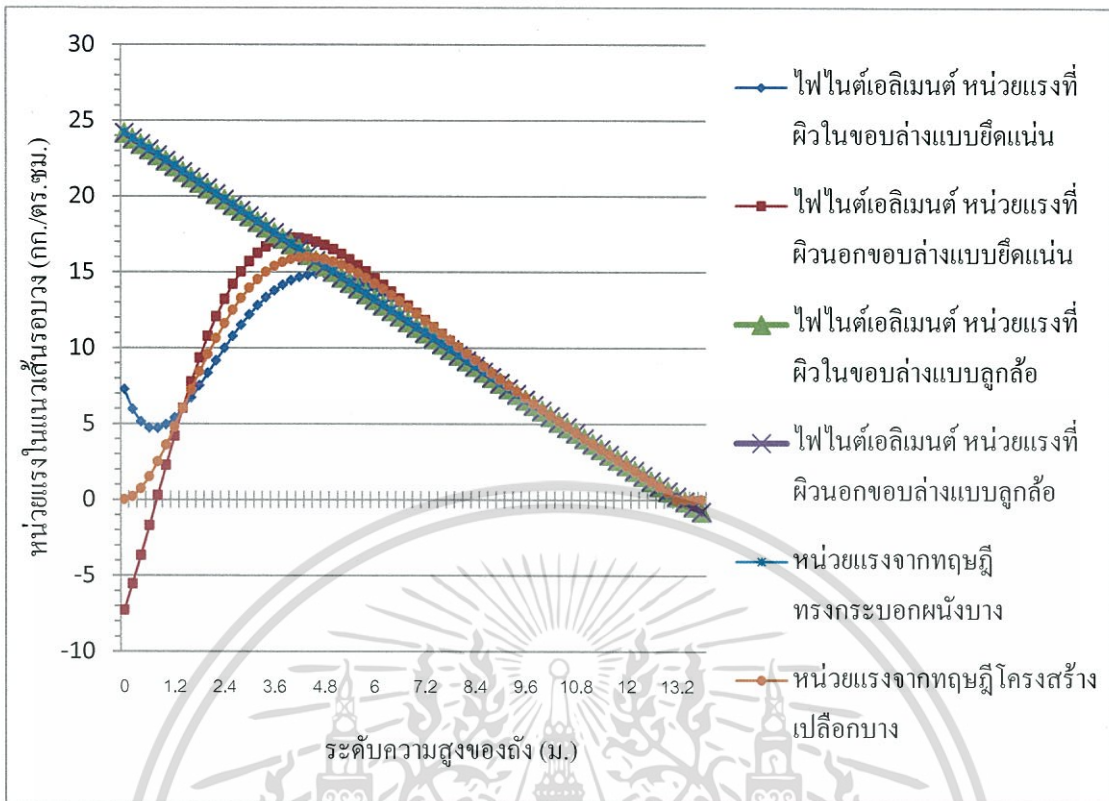
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงระหว่างทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 4.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางทรงกระบอกกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ขอบล่างเป็นแบบยึดแน่นภายใต้ความดันน้ำ

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าค่าหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงสูงสุดที่ได้จากทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 15.98 กก./ตร.ซม. จากไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งผิวในขอบล่างเป็นแบบยึดแน่น 14.29 กก./ตร.ซม. และผิวนอกขอบล่างเป็นแบบยึดแน่นมีค่าเท่ากับ 17.25 กก./ตร.ซม.



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงระหว่างทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงระหว่างทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าค่าหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงสูงสุดที่ได้จาก ทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง และไฟไนต์เอลิเมนต์แบบขอบล่างเป็นลูกล้อให้ค่าใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงจากทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง ยังให้ค่าสูงกว่าทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง 33.96 % การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างขอบล่างเป็นแบบลูกล้อและยึดแน่น ยังให้หน่วยแรงสูงสุดในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในต่างกันเท่ากับ 40.87% และผิวนอกต่างกัน 28.63 % โดยสมมติฐานแบบขอบล่างเป็นแบบแบบลูกล้อจะให้ค่าหน่วยแรงที่สูงกว่า

### 4.3 หน่วยแรงสูงสุดจากทฤษฎีตัวประกอบความเค้นหนาแน่น

จากสมการ (2.24) และ (2.25)  $a = 1.75$  เมตร  $R = 11.3$  เมตร  $v = 0.2$  นำไปแทนค่าในสมการ (2.25) จะได้  $\beta = 0.437$

พิจารณาเฉพาะแรงเฉือน

$$0 \leq \beta \leq 2$$

จาก

$$K_t(\beta) = 2.5899 + 0.8002\beta + 4.0112\beta^2 - 1.8235\beta^3 + 0.375\beta^4 \quad (2.24)$$

$$K_t(\beta) = 3.5694$$

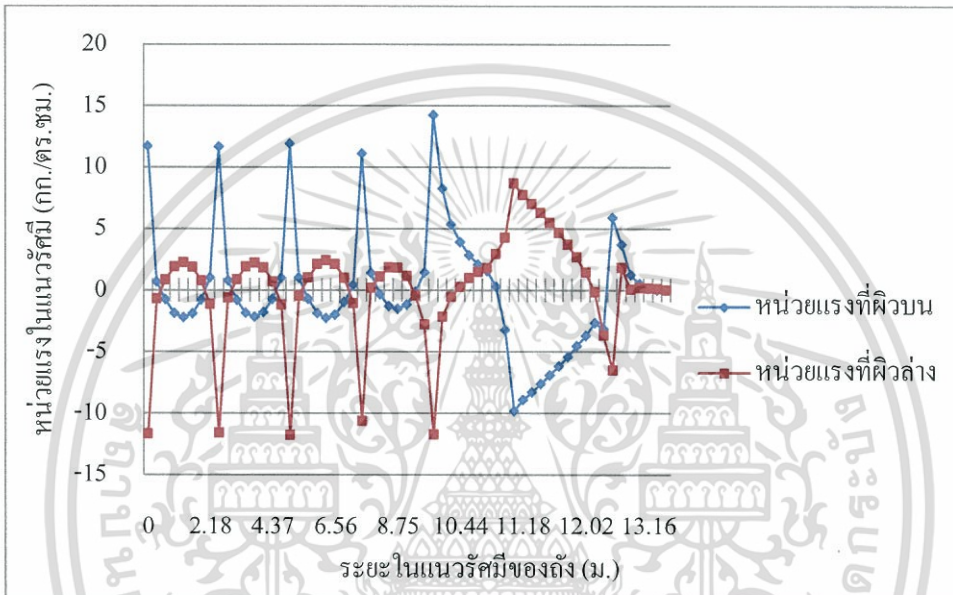
$$\sigma = \frac{PR}{h} = \frac{13.2 \times 1000 \times 11.3}{0.6 \times 100 \times 100} = 24.86 \text{ กก./ตร.ซม. นำไปแทนค่าใน (4) จะได้}$$

$$\sigma_{\max} = 88.73 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

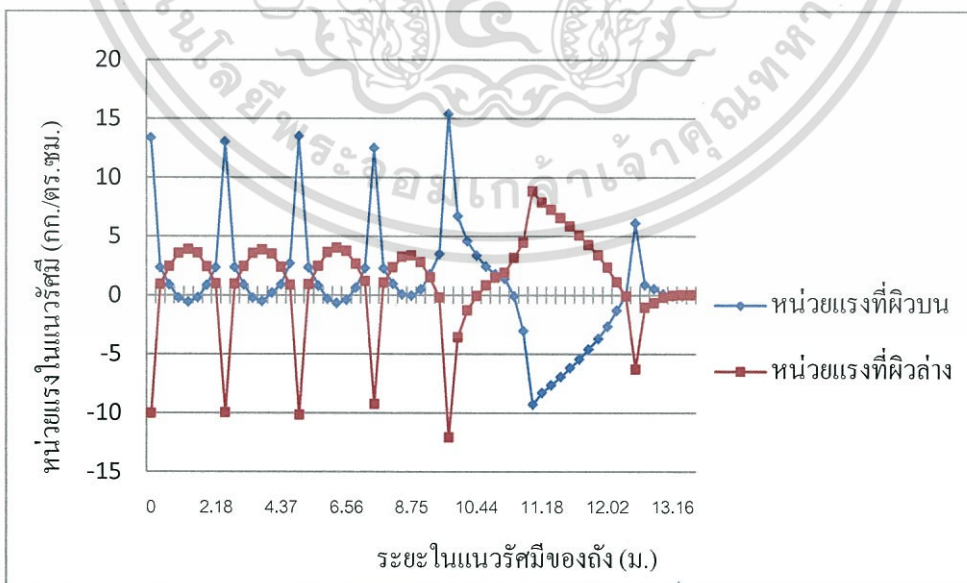


#### 4.4 การเปรียบเทียบการการขยายตัวของฐานรากในถังแบบไม่มีช่องเปิดภายใต้จุดรองรับแบบลูกกลิ้งและแบบยึดหมุน

ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวรัศมีของจุดรองรับแบบลูกกลิ้งดังรูปที่ 3.9 คือ 0.17 มิลลิเมตร และ ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวรัศมีของจุดรองรับแบบยึดหมุนดังรูปที่ 3.10 คือ 0.09 มิลลิเมตร ซึ่งการขยายตัวของฐานแบบลูกกลิ้งนั้นมากกว่าแบบยึดหมุนถึง 1.94 เท่า ทำให้เกิดหน่วยแรงในแนวรัศมีของฐานรากดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เมื่อดูตัวเลขแล้วถือว่ามีความการขยายตัวที่น้อยมากจนแทบไม่มีผลต่อโครงสร้างเลย

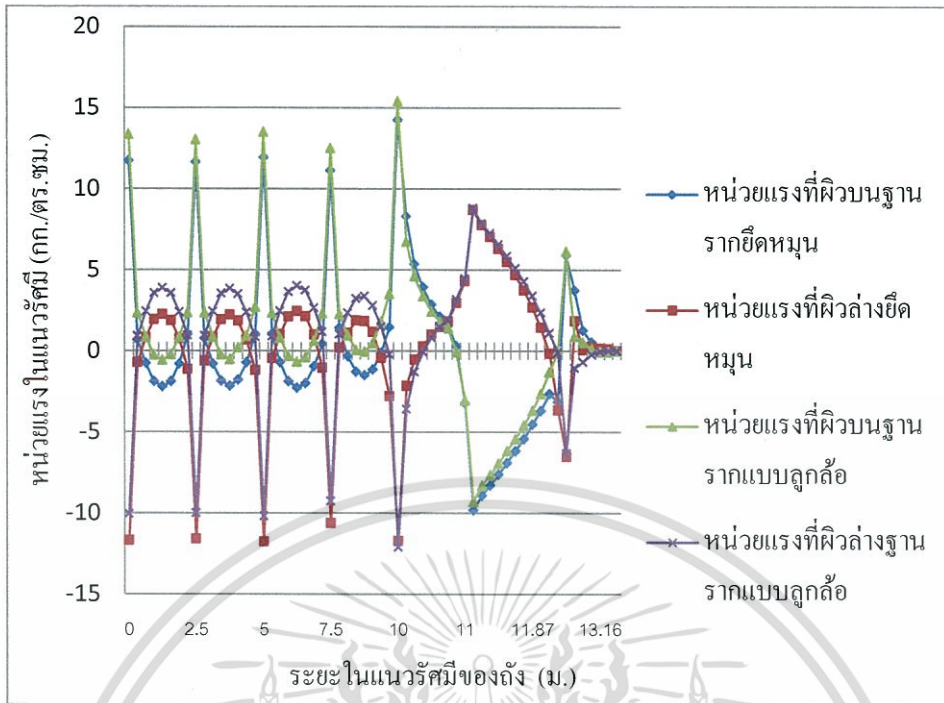


รูปที่ 4.4 หน่วยแรงในแนวรัศมีฐานรากที่มีจุดรองรับแบบยึดหมุน



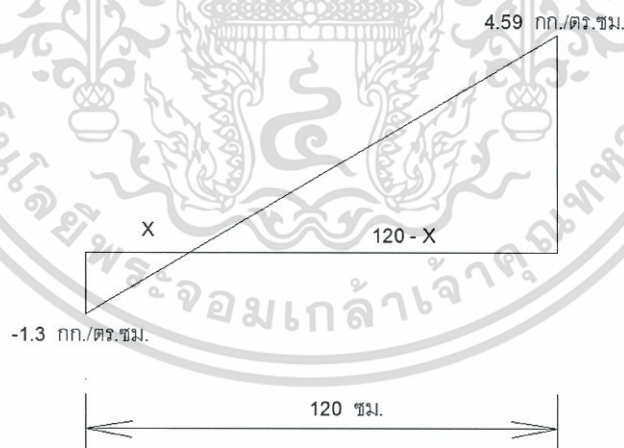
รูปที่ 4.5 หน่วยแรงในแนวรัศมีฐานรากที่มีจุดรองรับแบบลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวรัศมีฐานรากที่มีจุดรองรับแบบลูกล้อและยึดหมุน

คำนวณหาความสามารถในการรับแรงดึงของฐานราก โดยเอาค่าหน่วยแรงสูงสุดตรงตำแหน่งหน้าตัดวิกฤติในแบบจำลองที่ฐานรองรับแบบลูกล้อซึ่งมีค่าหน่วยแรงที่ผิวบน 4.59 กก.ตร.ซม. ที่ผิวล่าง -1.30 กก.ตร.ซม. ดังนี้



รูปที่ 4.7 การหาแรงดึงภายในหน้าตัดฐานราก

แก้สมการเพื่อหาค่า  $x$  ดังนี้

$$\frac{x}{1.3} = \frac{120-x}{4.59} \quad ; \quad x = 26.48 \text{ ซม.}$$

หาค่าแรงดึงลัพท์ต่อหน่วยความยาวบนหน้าตัดจาก

$$f = \frac{P}{A}$$

$$P = f.A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{1}{2} \times 4.59 \times (120 - 26.48) \times 100 = 21,462.84 \text{ กก./ชม.}$$

นำแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ไปหาหน่วยแรงต่อหน้าตัดเหล็กเสริม DB25 SD 40 @ 0.20 ม.  
ซึ่งมีหน่วยแรงที่ยอมให้เท่ากับ 1700 กก./ตร.ชม

$$f = \frac{P}{A}$$

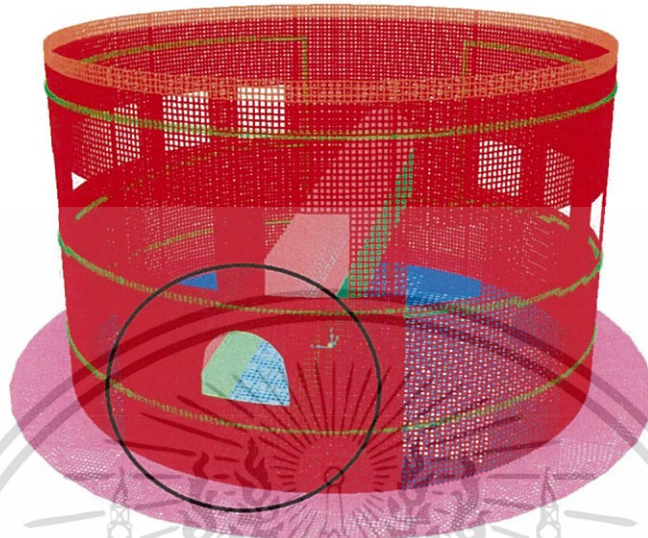
$$f = \frac{21,462.84}{4.901 \times 5} = 875.85 \text{ กก./ตร.ชม.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม ฐานรากไม่เกิดการฉีกขาด

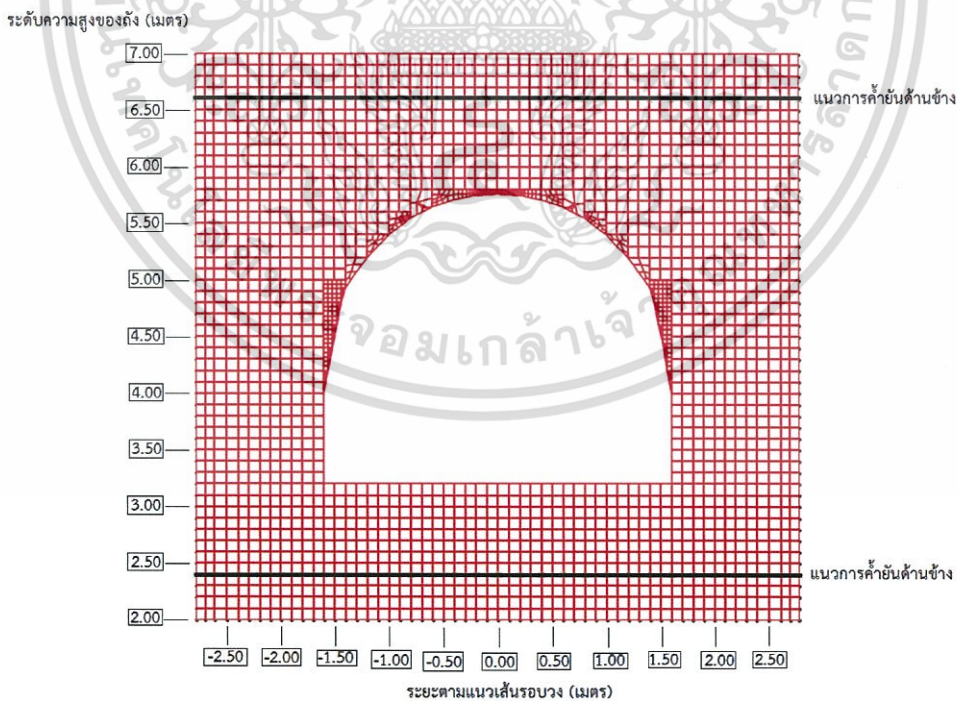


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงของโครงสร้างที่มีและไม่มีค้ำยัน ด้านข้างรวม 4 กรณีที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุดทั้งผิวในและผิวนอก



รูปที่ 4.8 แบบจำลองถังน้ำทรงกระบอกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

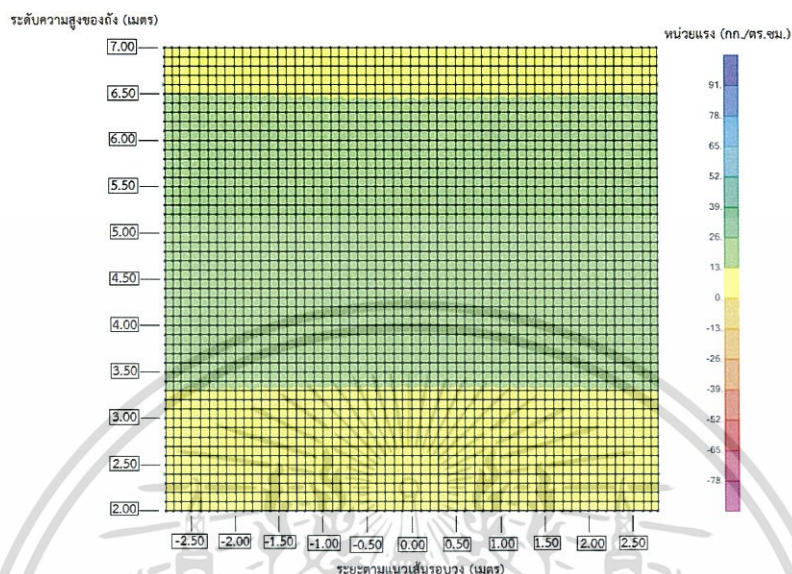


รูปที่ 4.9 บริเวณที่นำมาพิจารณาหน่วยแรง

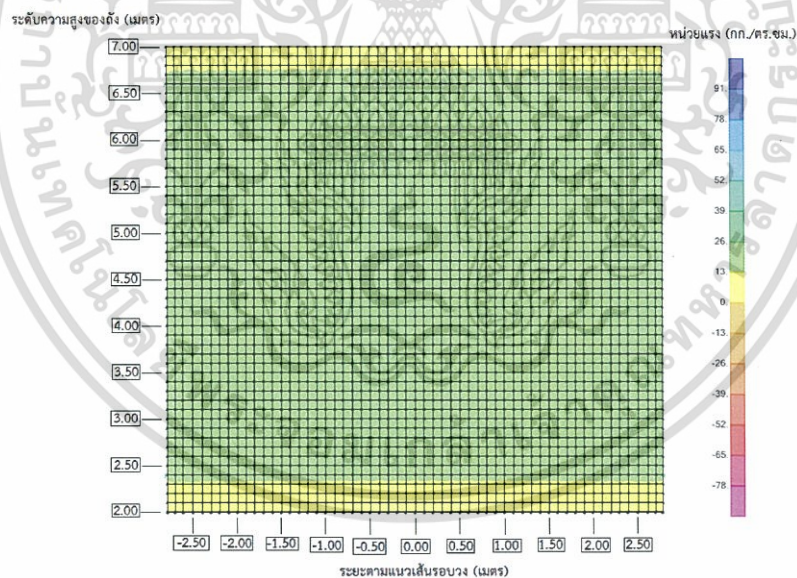
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1 การเปรียบเทียบผลของค้ำยันด้านข้างที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง

กรณีที่ 1 ถึงไม่มีการเจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง

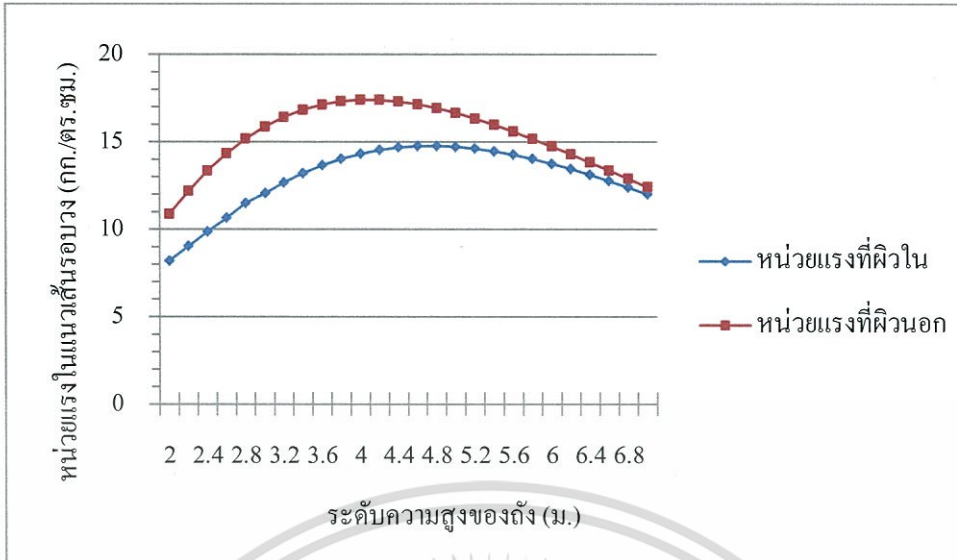


รูปที่ 4.10 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ไม่มีค้ำยัน



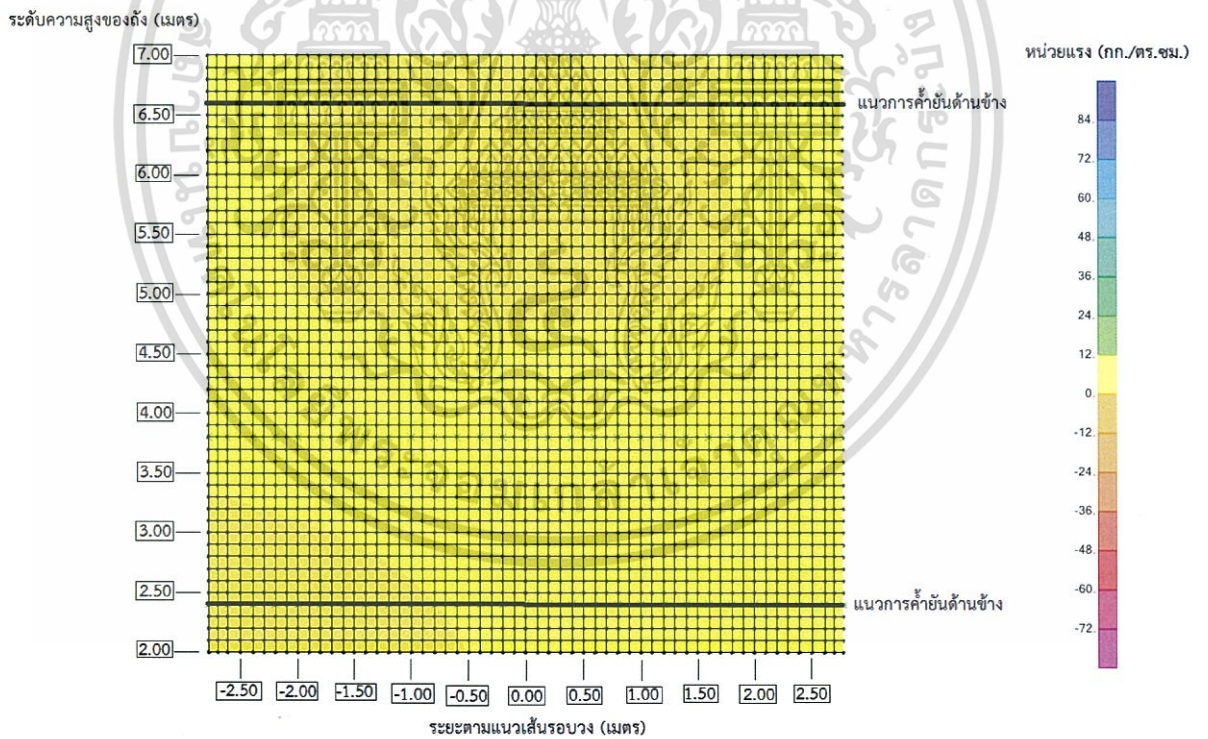
รูปที่ 4.11 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ไม่มีค้ำยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



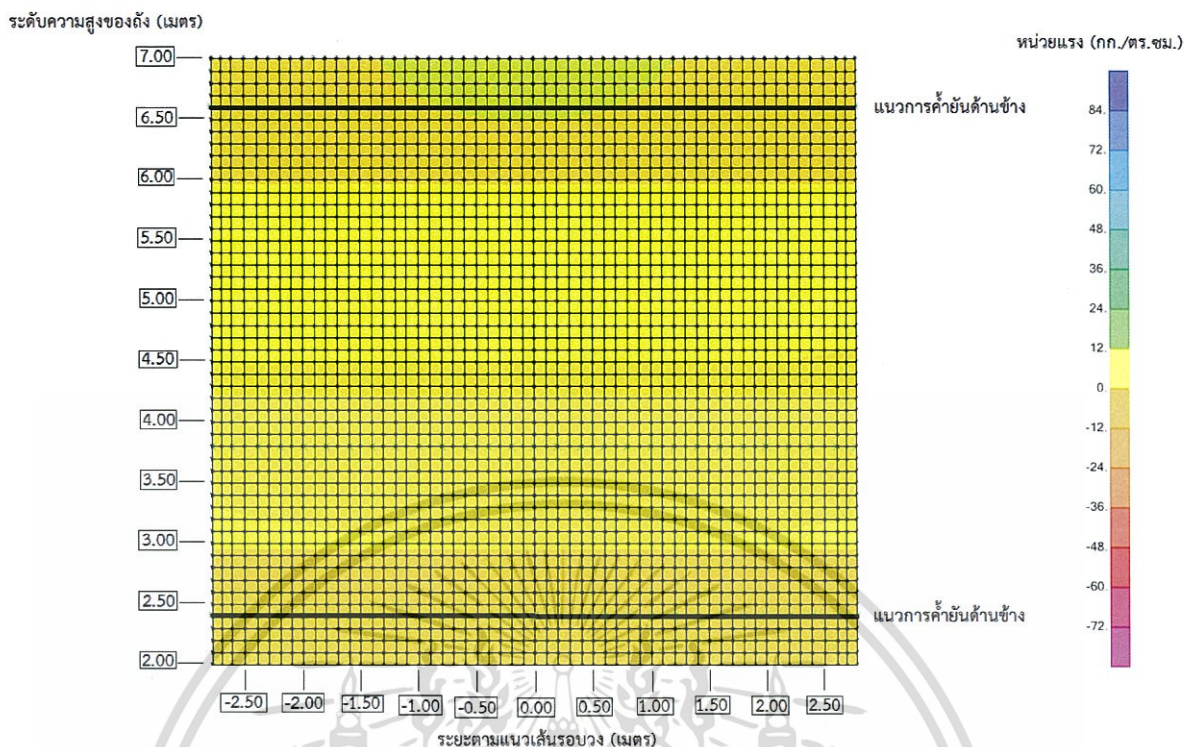
รูปที่ 4.12 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงผิวในและผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง

กรณีที่ 1 ถึงไม่มีการเจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง

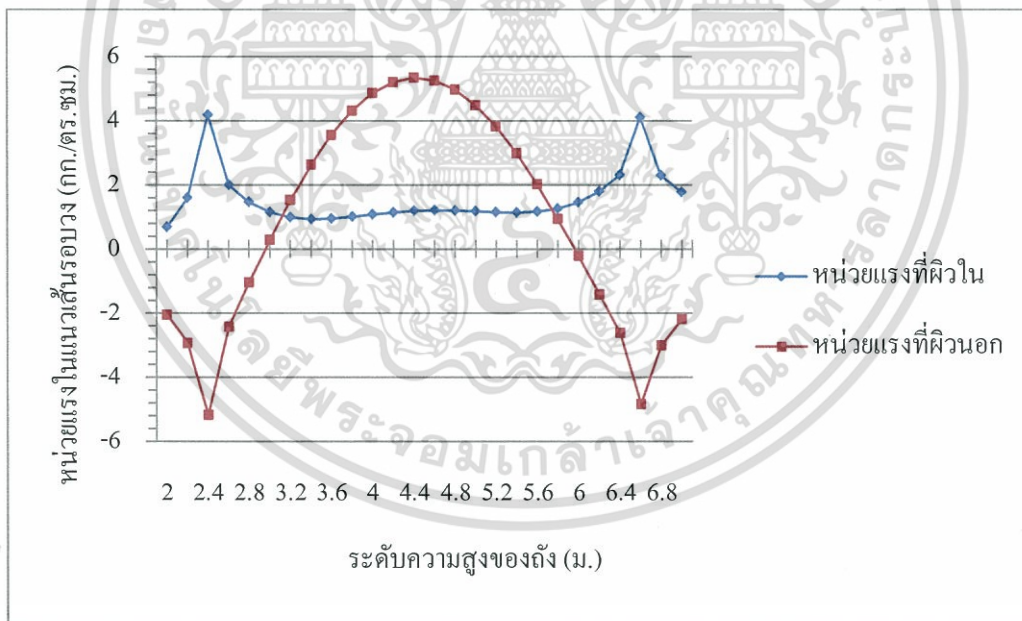


รูปที่ 4.13 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวใน กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



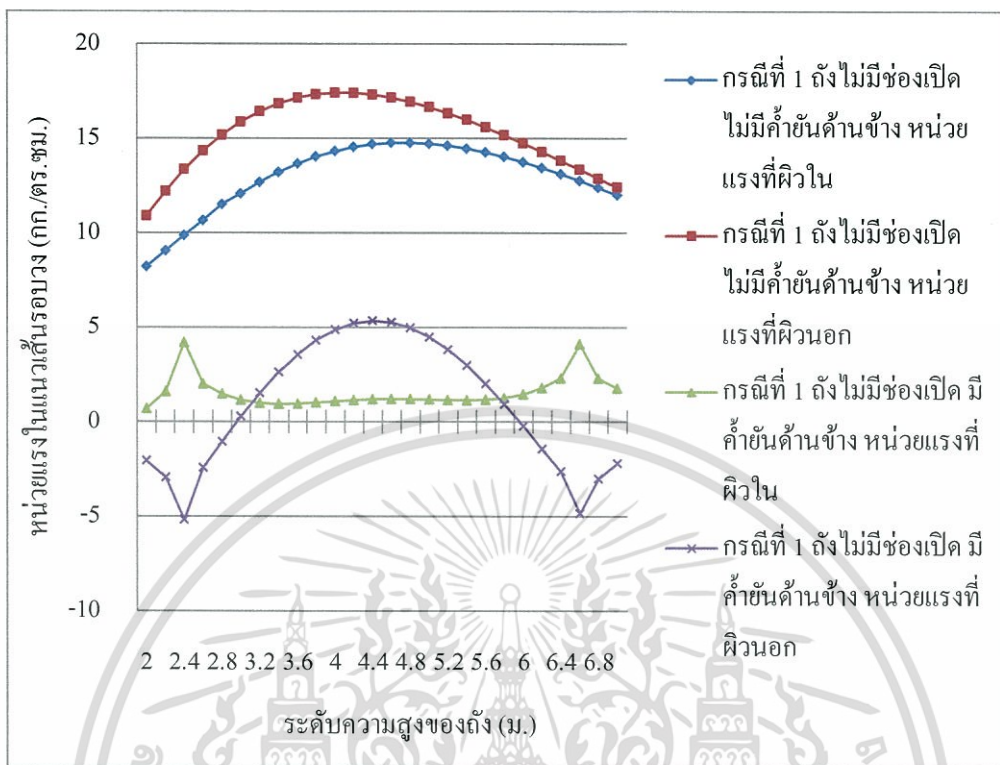
รูปที่ 4.14 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง



รูปที่ 4.15 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงผิวในและผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของค้ำยันด้านข้าง

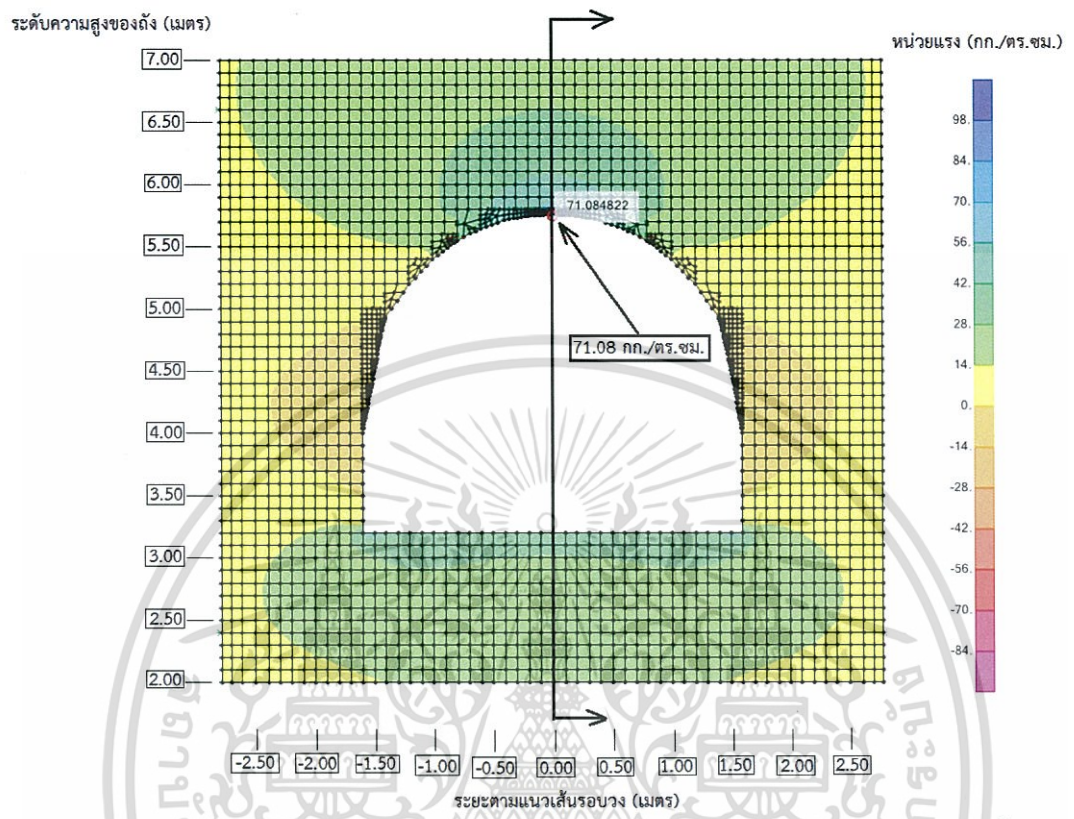


รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก กรณีที่ 1 ไม่เจาะรูระหว่างถ้งที่มีและไม่มีค้ำยันด้านข้าง

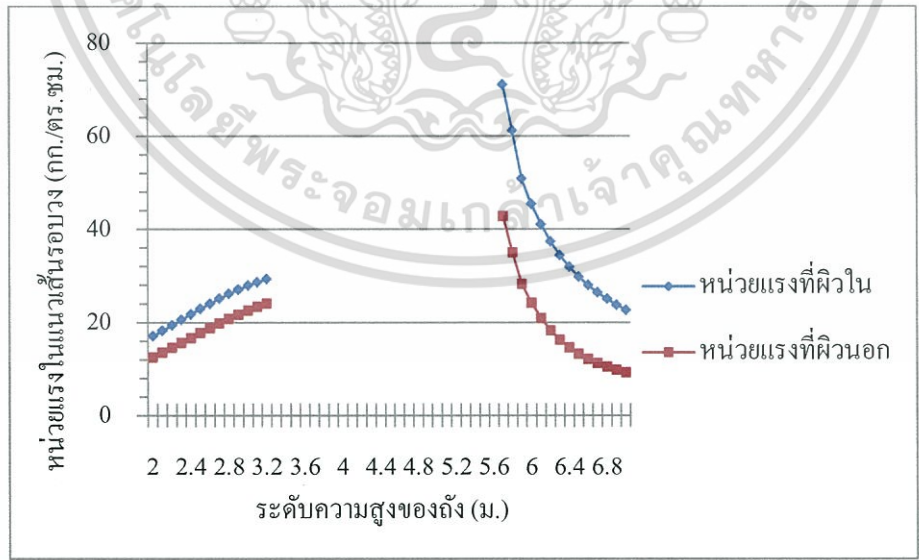
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.2 การเปรียบเทียบผลของช่องเปิดที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง

กรณีที่ 2 ถึงมีการเจาะช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง

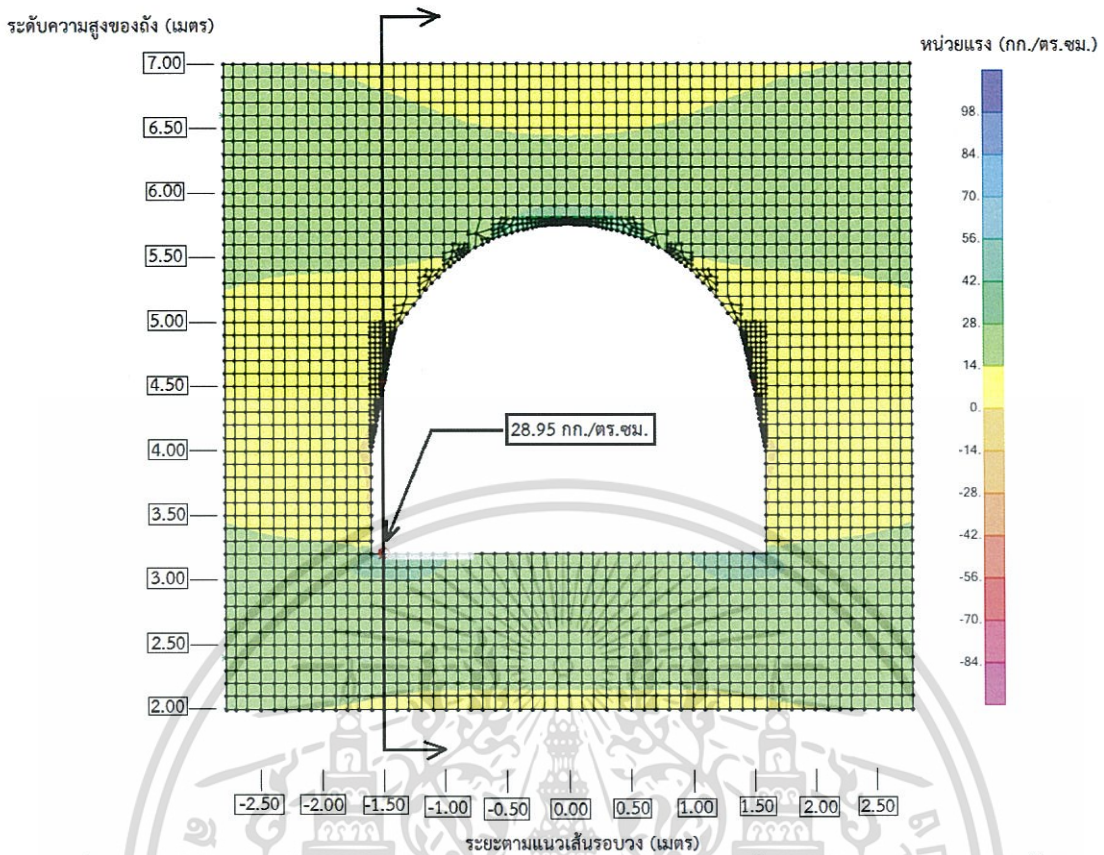


รูปที่ 4.17 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถ้งในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน

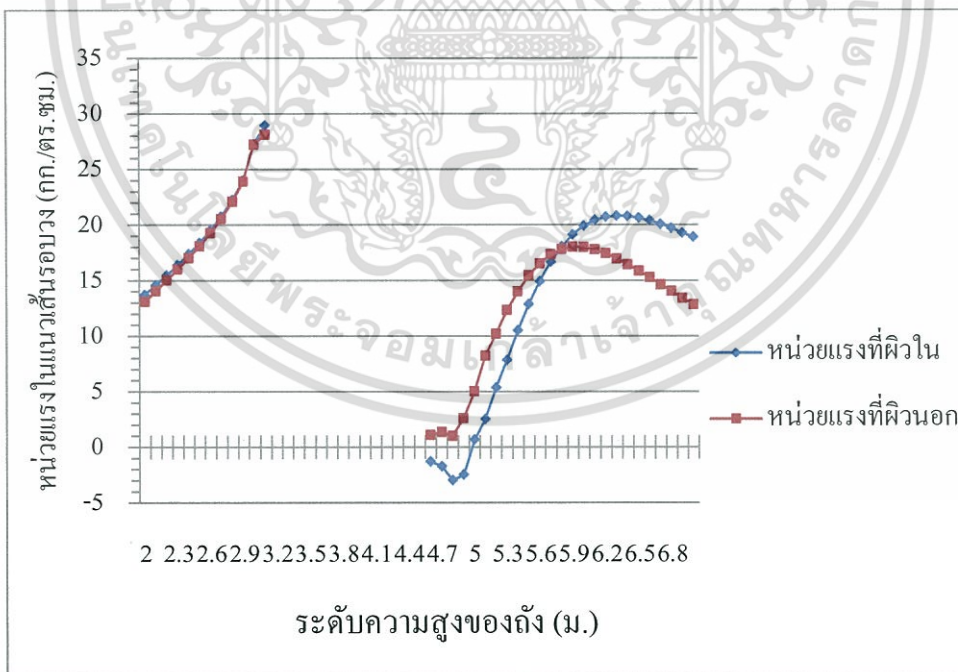


รูปที่ 4.18 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



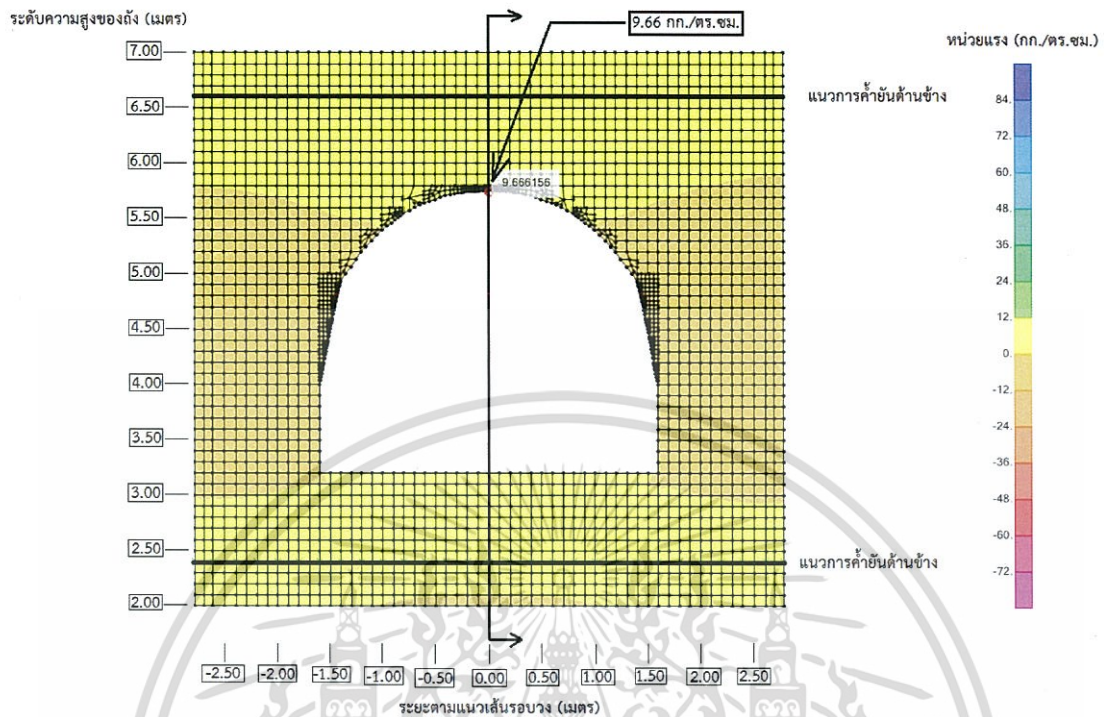
รูปที่ 4.19 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณี 2 เจาะช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน



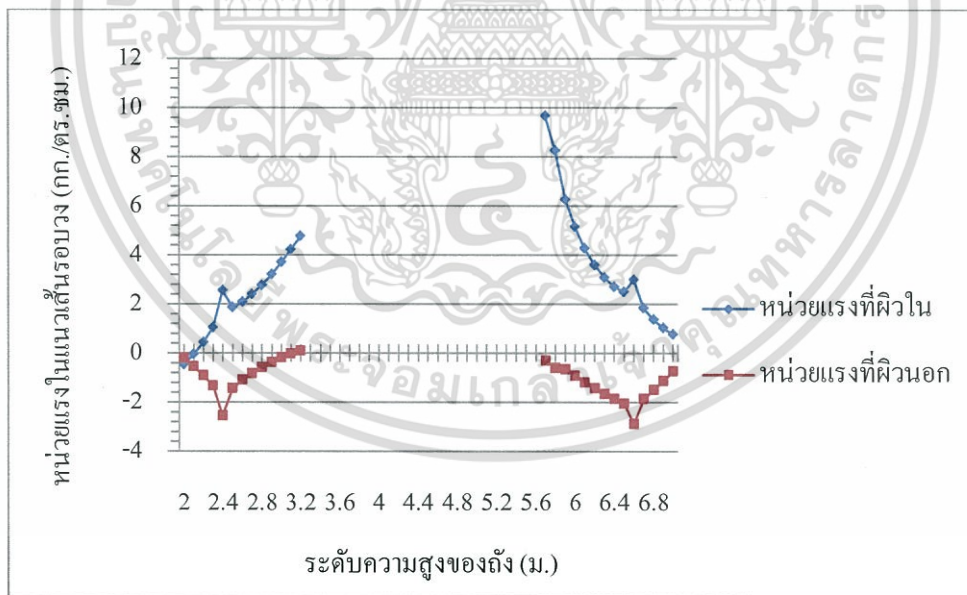
รูปที่ 4.20 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

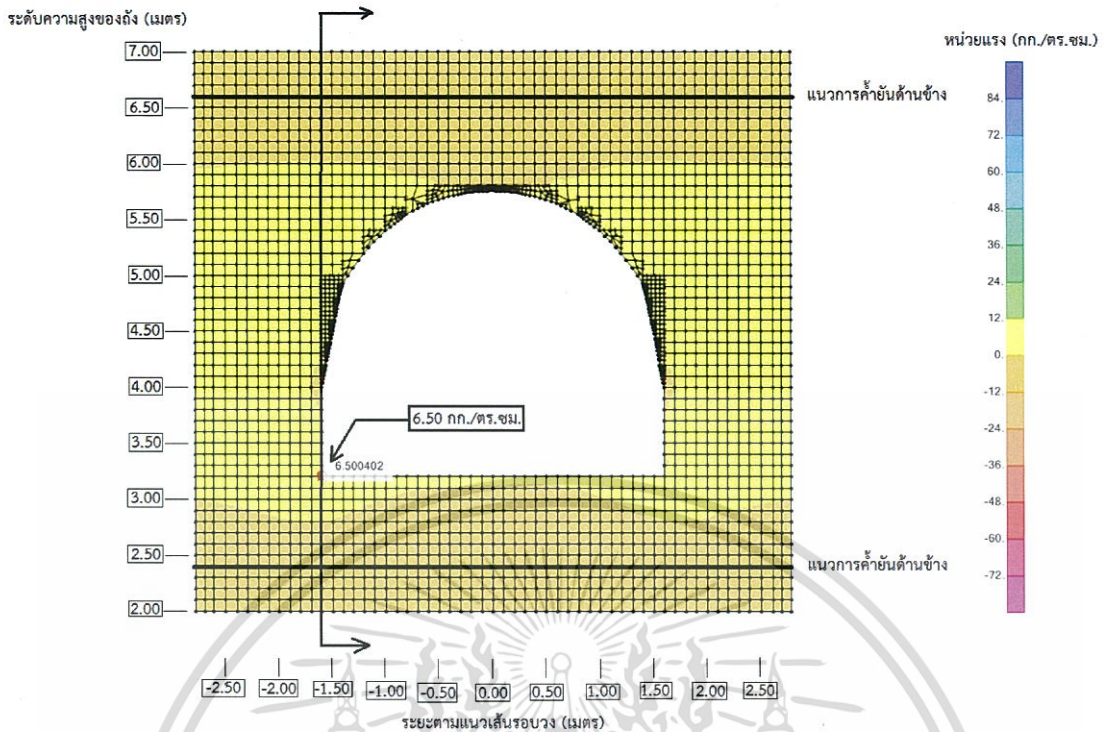
กรณีที่ 2 ถังมีการเจาะช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง



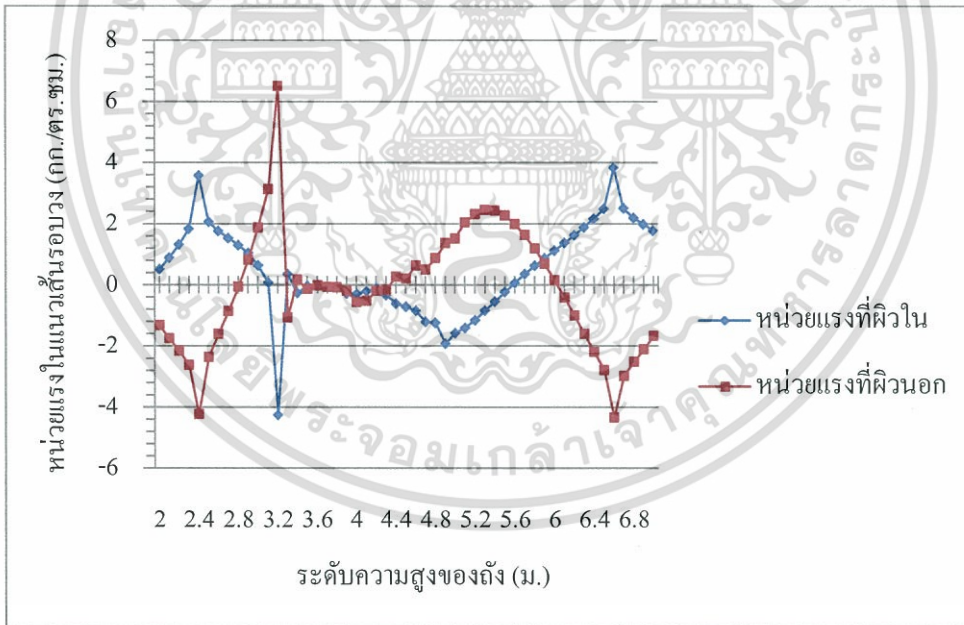
รูปที่ 4.21 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด มีค้ำยัน



รูปที่ 4.22 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด



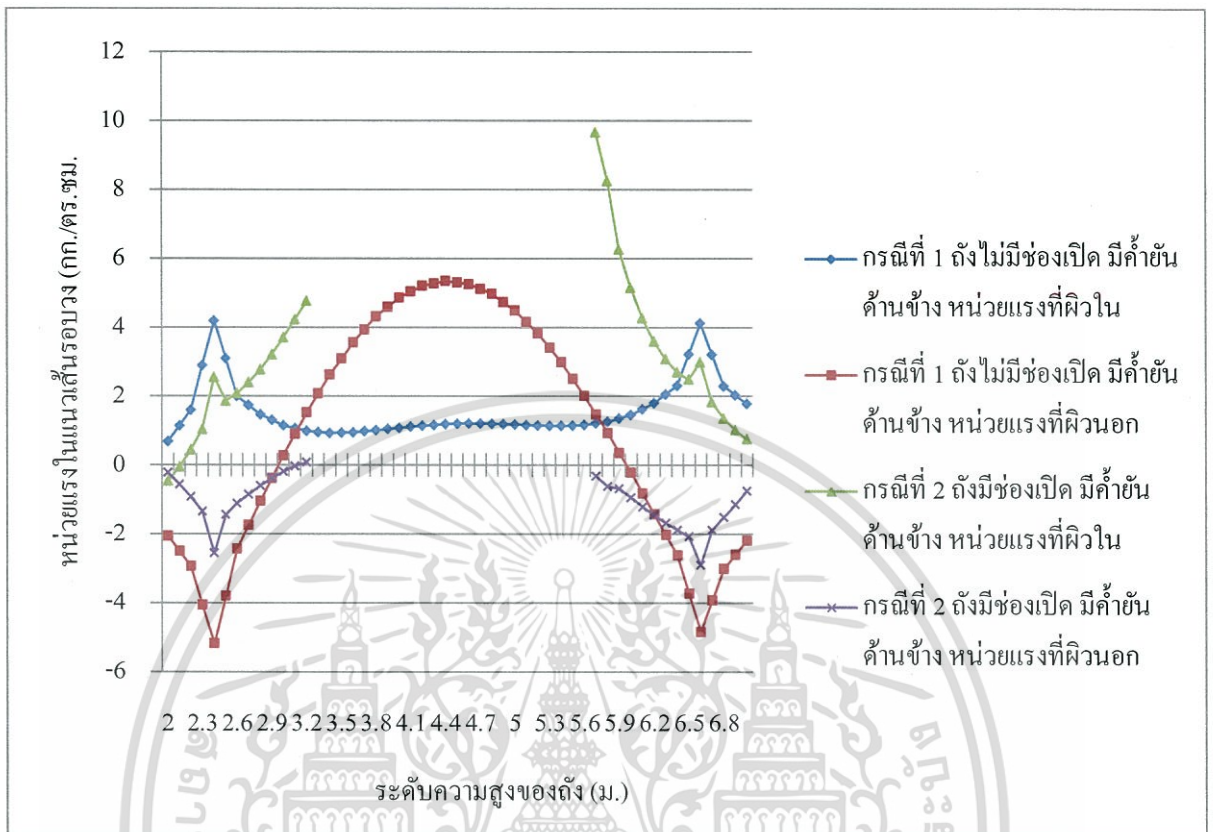
รูปที่ 4.23 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถ้ำในกรณีที่ 2 เจาะช่องเปิด มีค้ำยัน



รูปที่ 4.24 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 2 เจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด

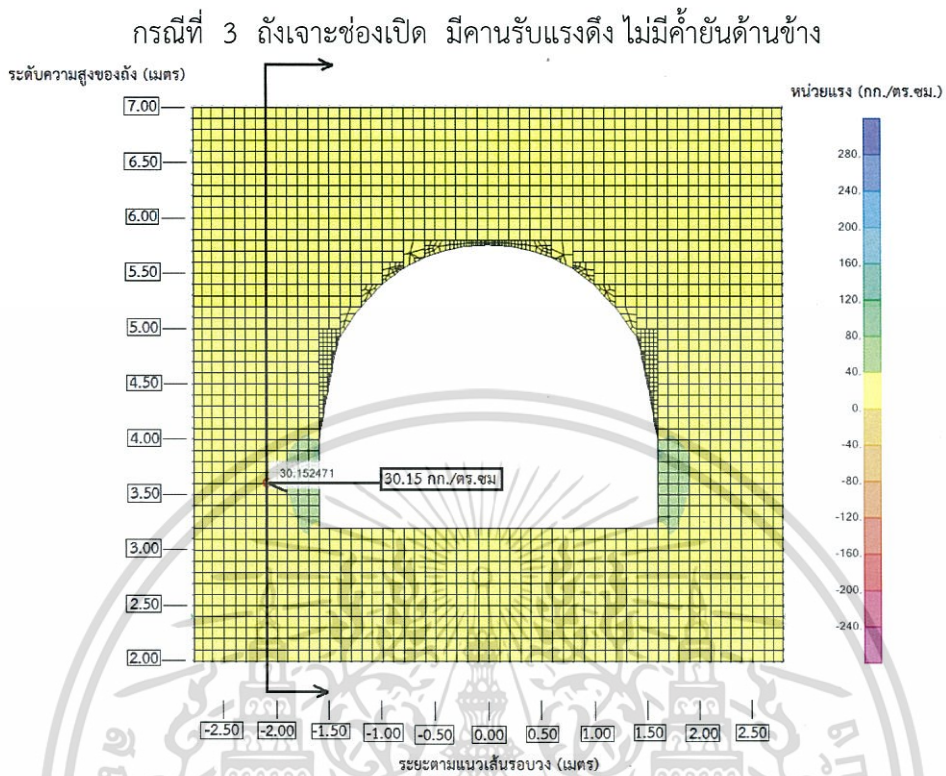
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลของการเจาะช่องเปิด

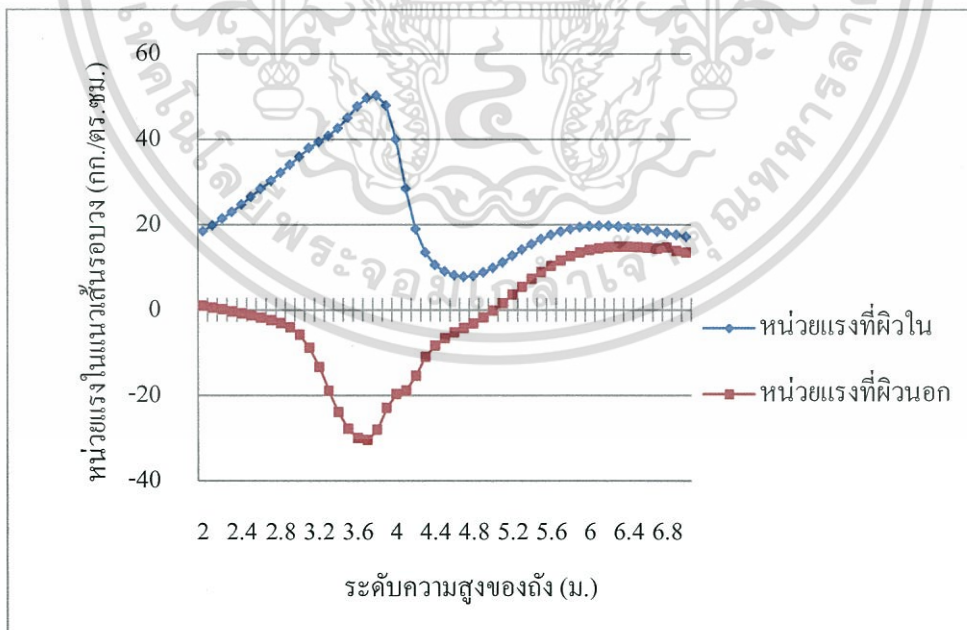


รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก ระหว่างก่อนและหลัง เจาะช่องเปิด ตัดตามแนวตั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวง 0.00 ม.

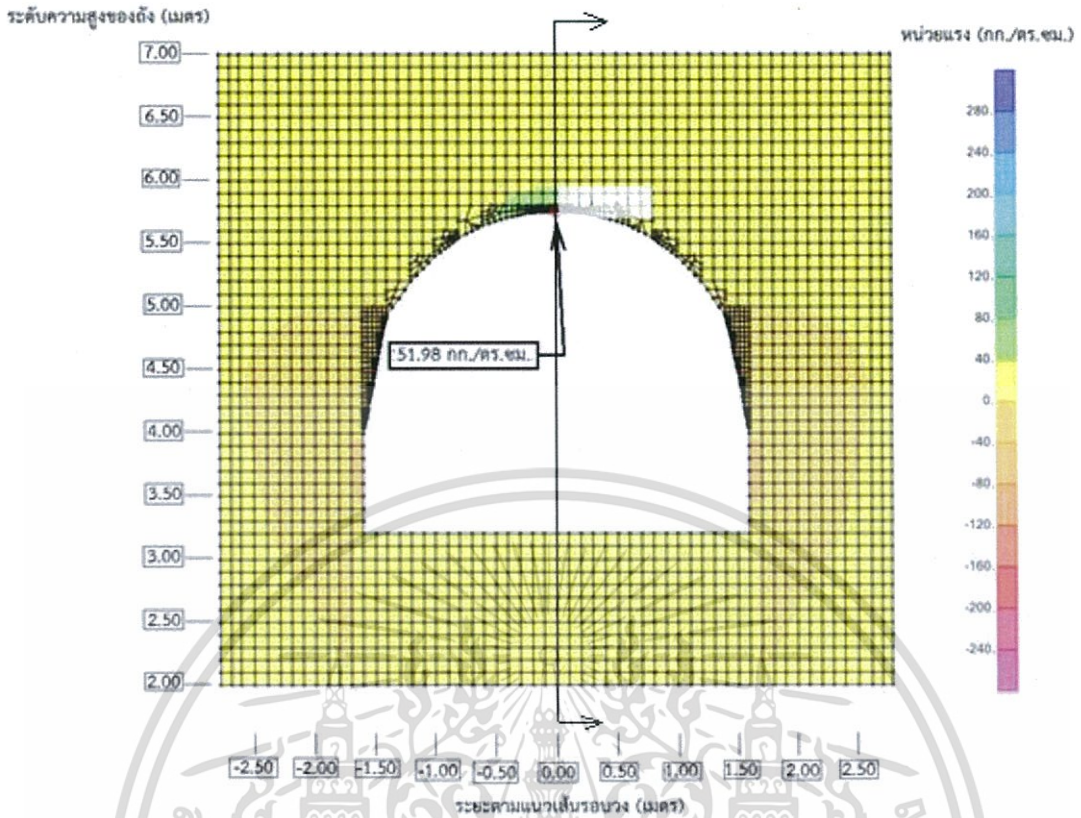
### 4.5.3 การเปรียบเทียบผลของคานรับแรงดึงที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง



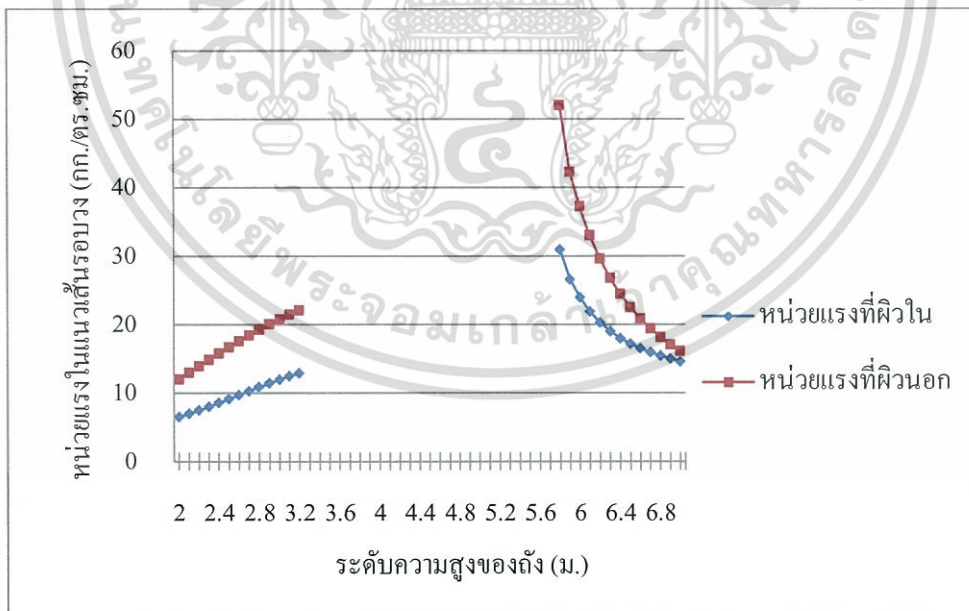
รูปที่ 4.26 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยัน



รูปที่ 4.27 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด



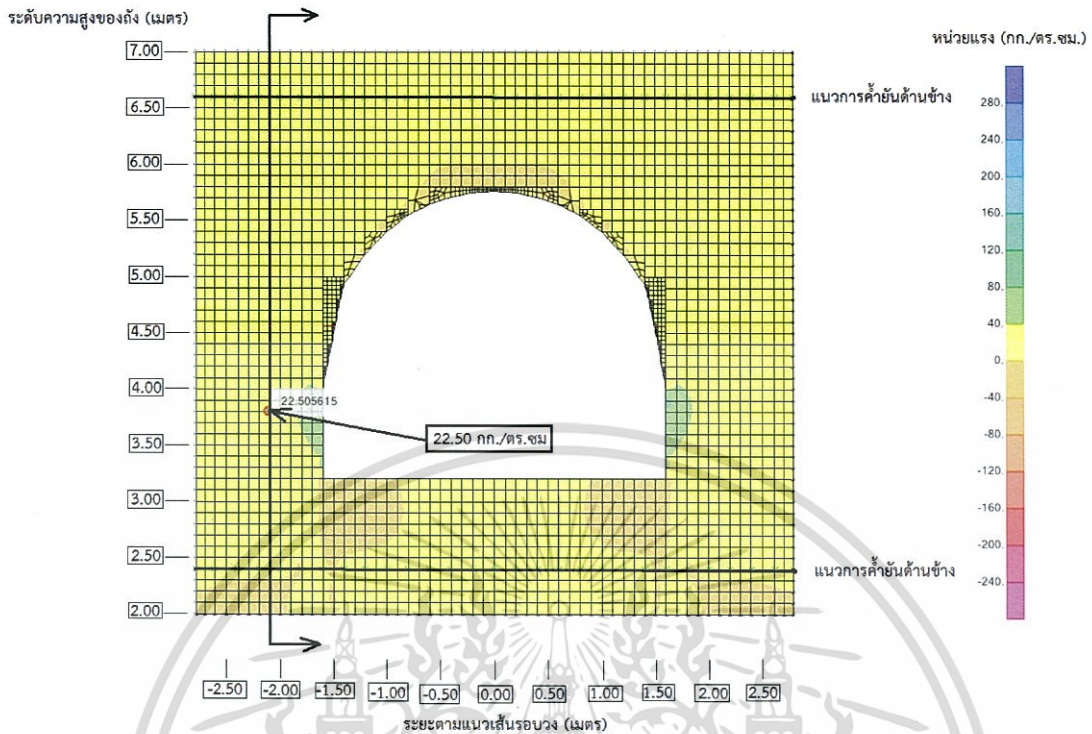
รูปที่ 4.28 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยัน



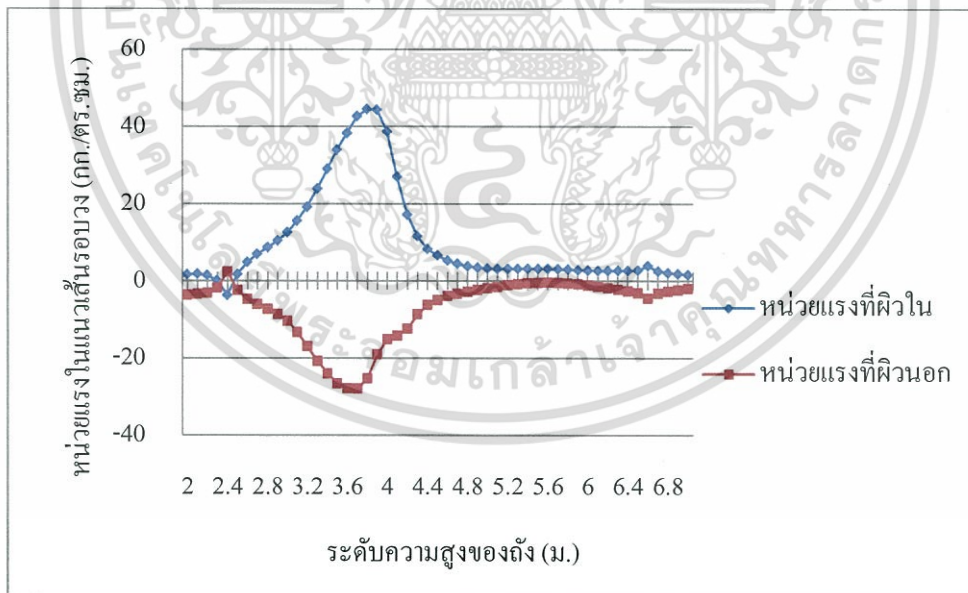
รูปที่ 4.29 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

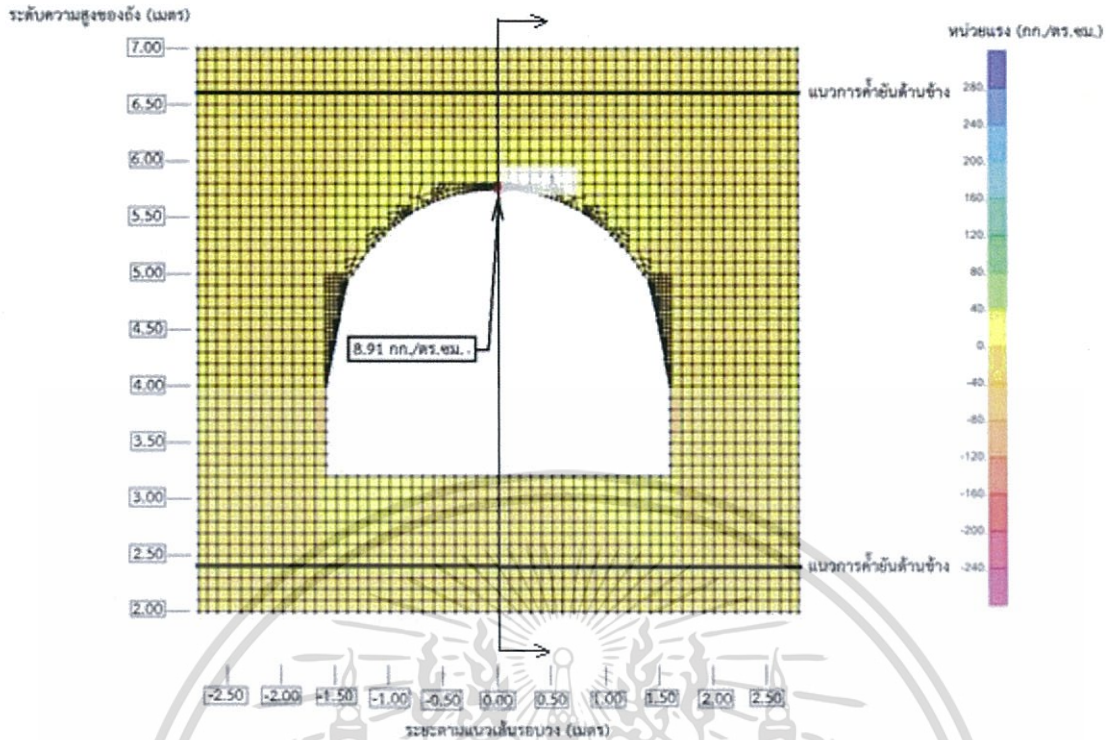
กรณีที่ 3 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง มีค้ำยันด้านข้าง



รูปที่ 4.30 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง มีค้ำยัน



รูปที่ 4.31 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด



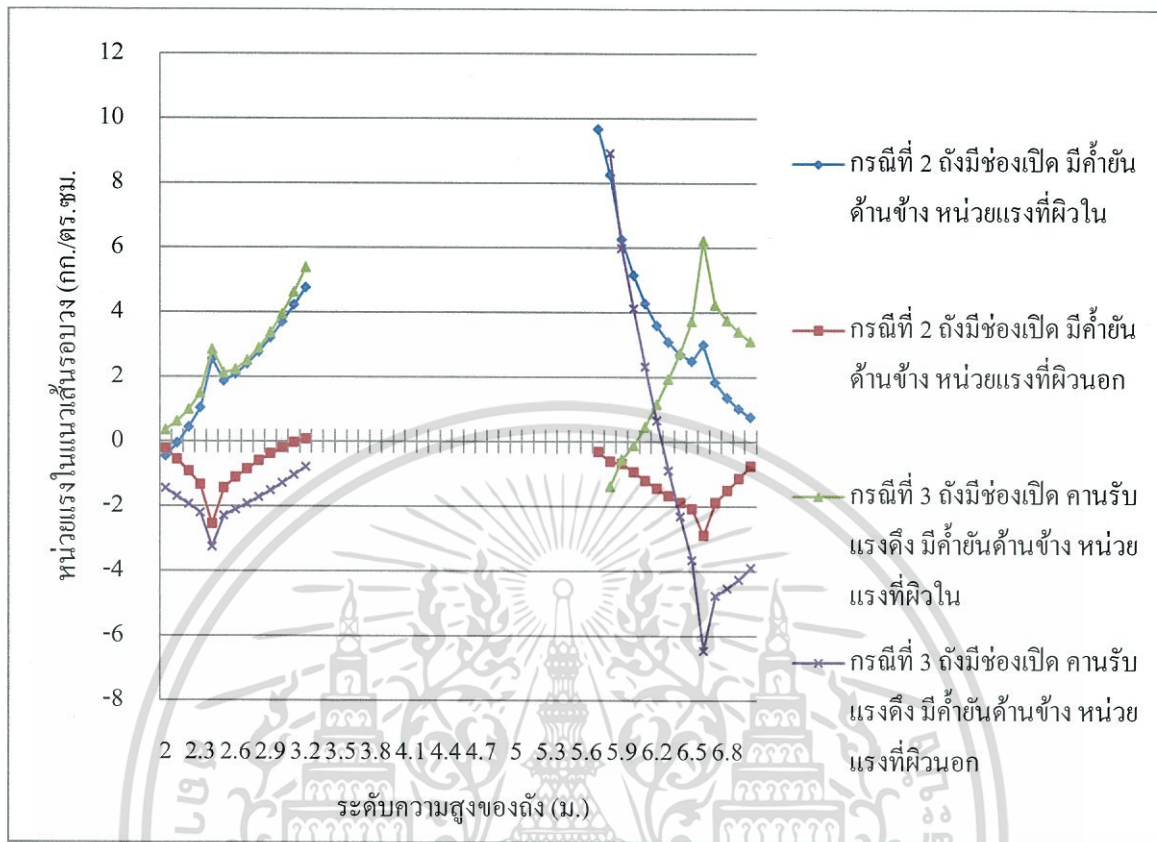
รูปที่ 4.32 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถ้งในกรณีที่ 3 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง มีค้ำยัน



รูปที่ 4.33 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 3 เจาะรู มีคานรับแรงดึง มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

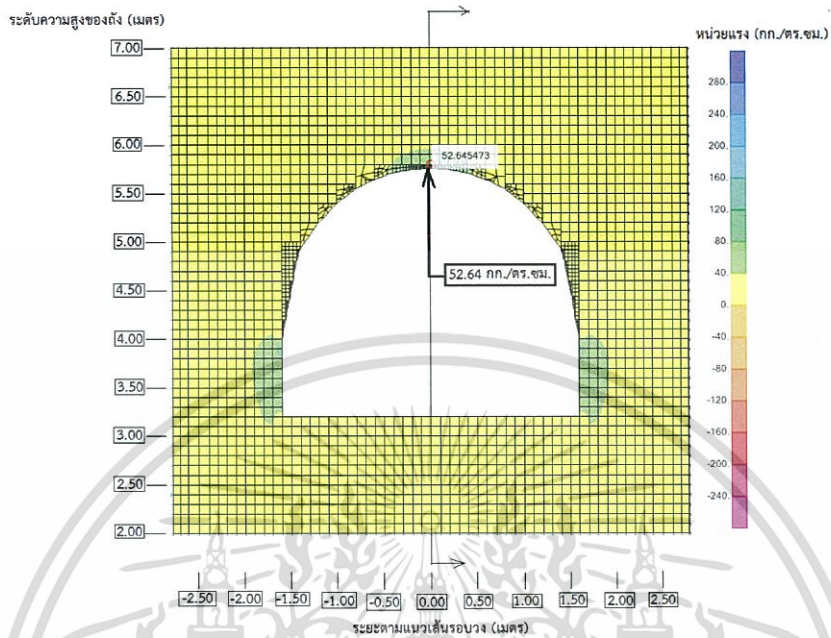
ผลของคานรับแรงดึง



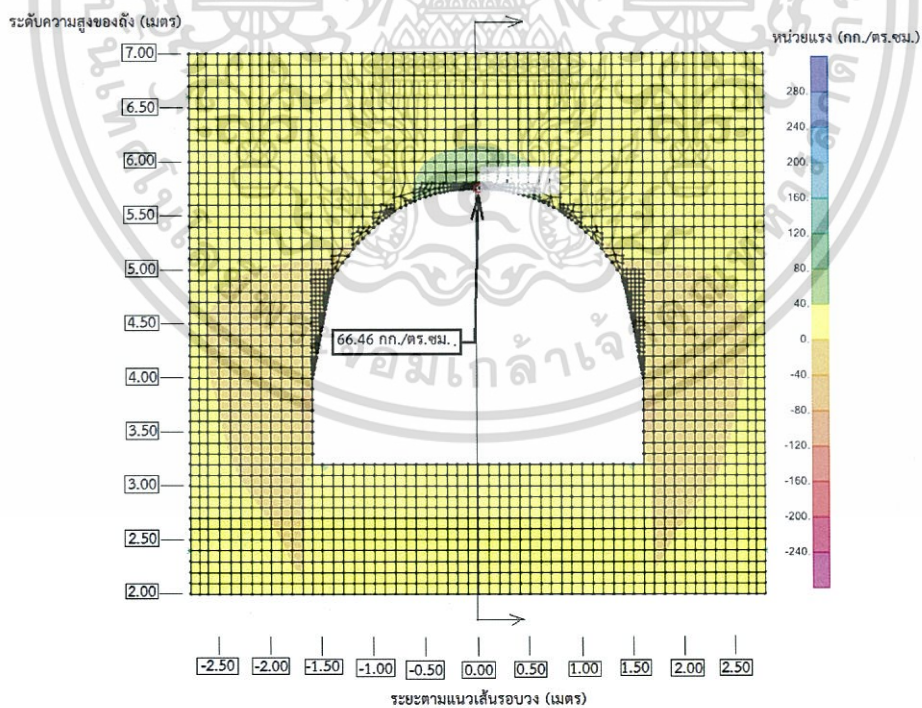
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก ระหว่างก่อนและหลังการใส่คานรับแรงดึง ตัดตามแนวตั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวง 0.00 ม.

#### 4.5.4 การเปรียบเทียบผลของการเพิ่มจำนวนช่องเปิดที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง

กรณีที่ 4 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง

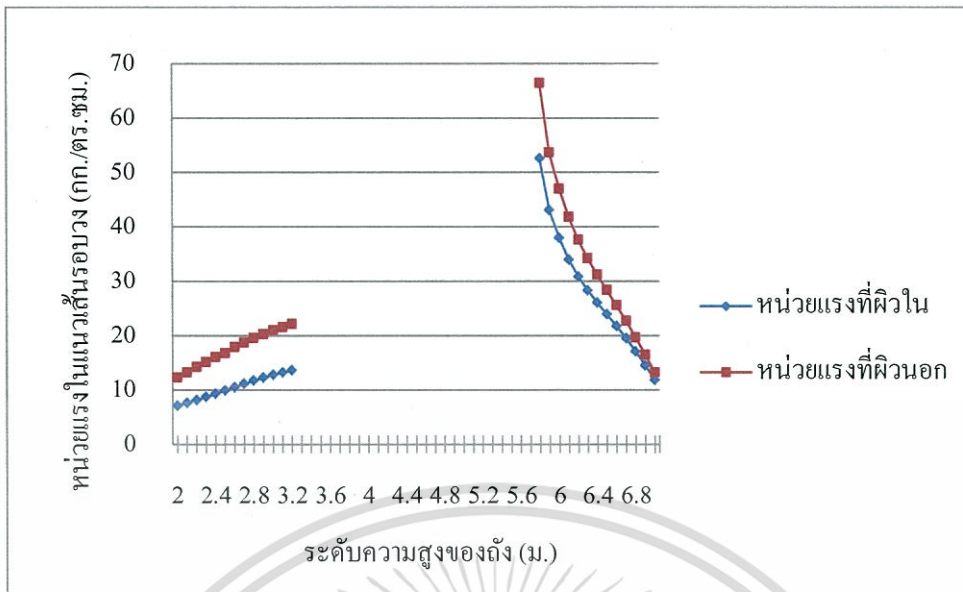


รูปที่ 4.35 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง และเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน



รูปที่ 4.36 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง และเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

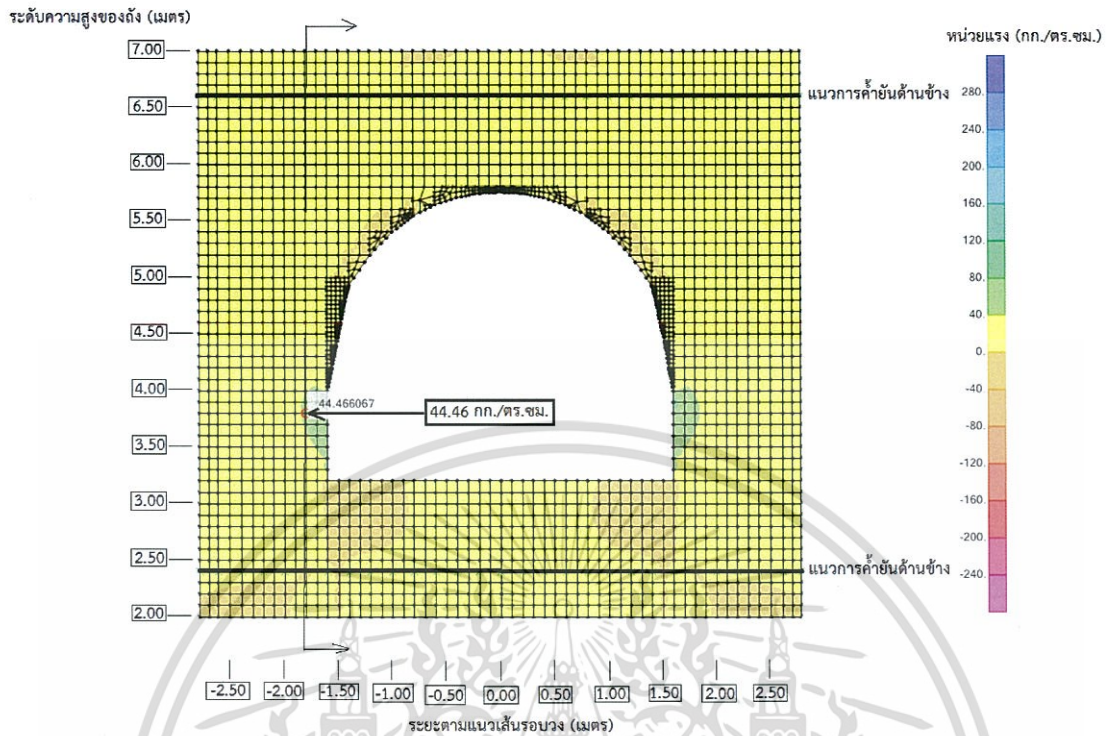


รูปที่ 4.37 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด

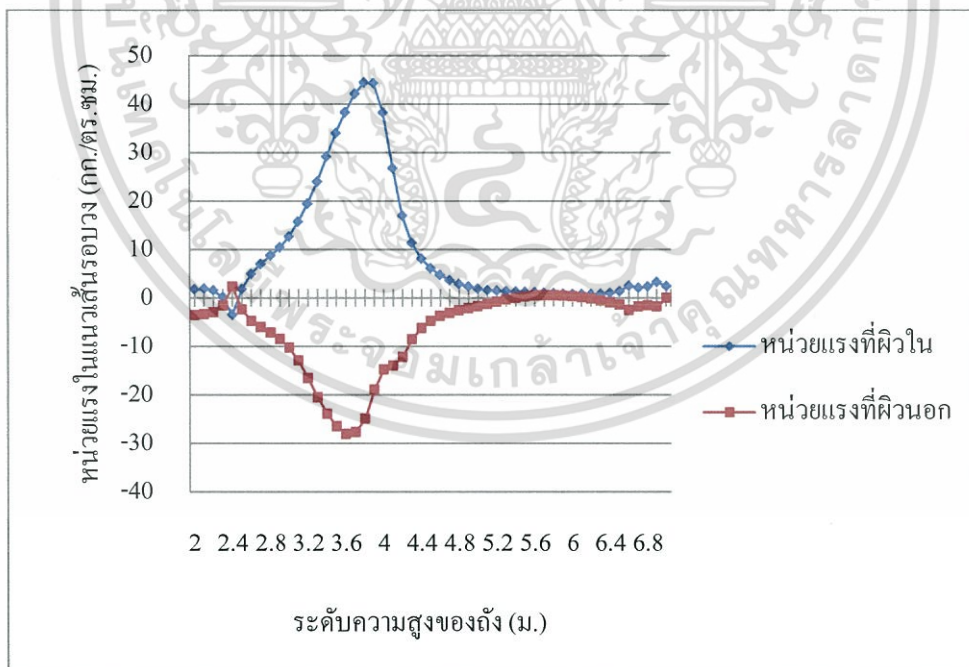


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 4 ถังเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง

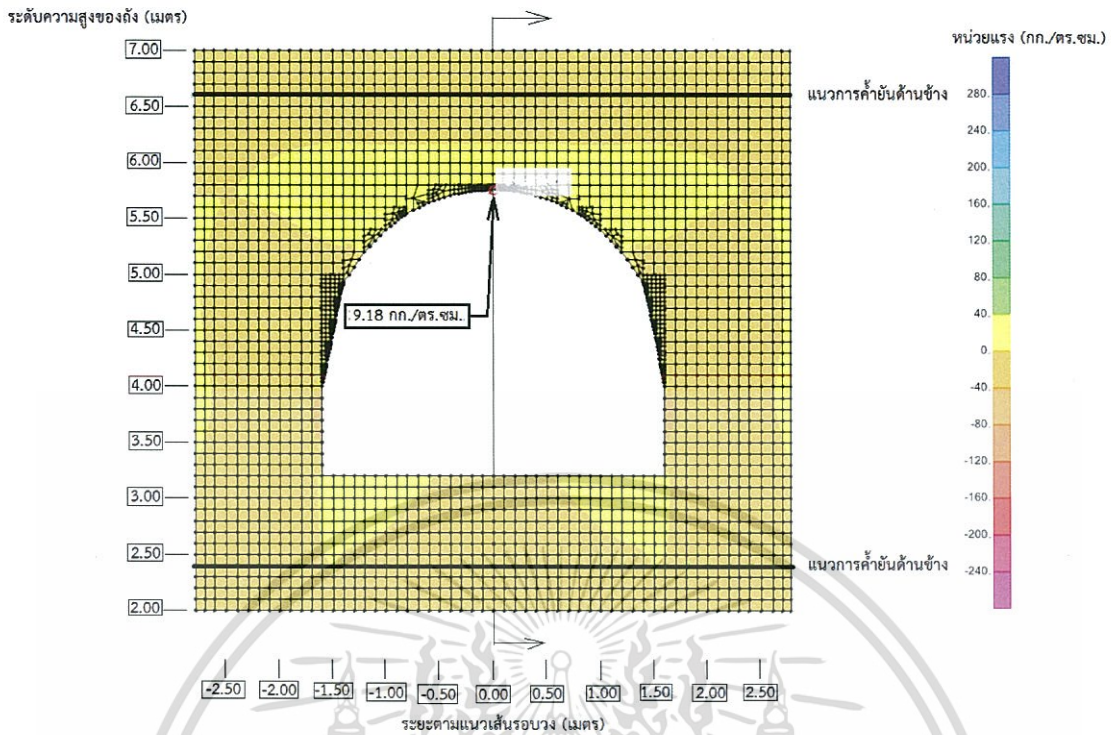


รูปที่ 4.38 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของถังในกรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยัน

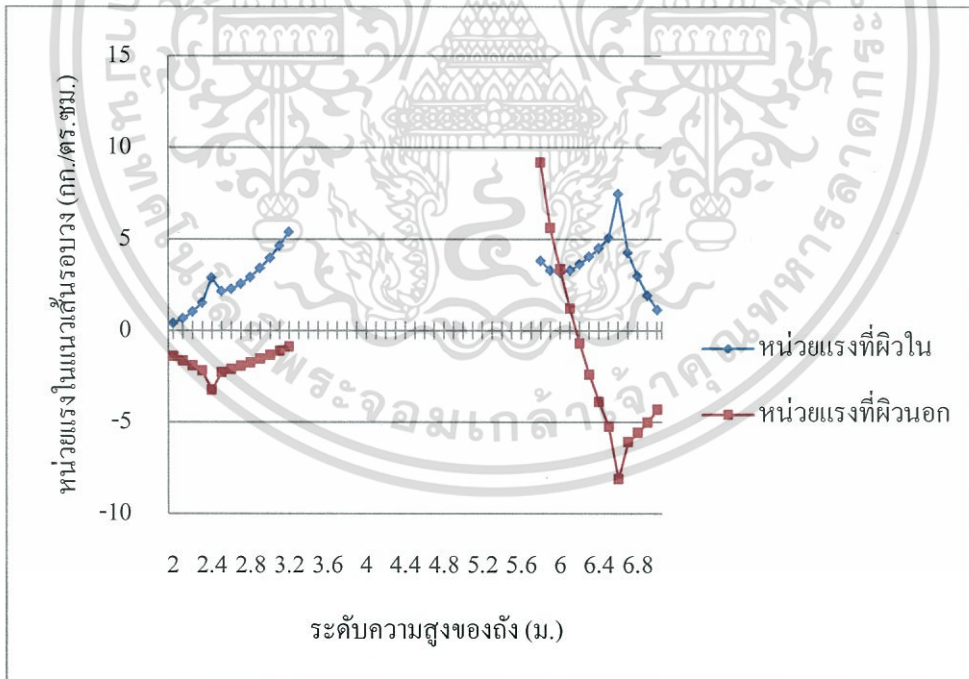


รูปที่ 4.39 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวในสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



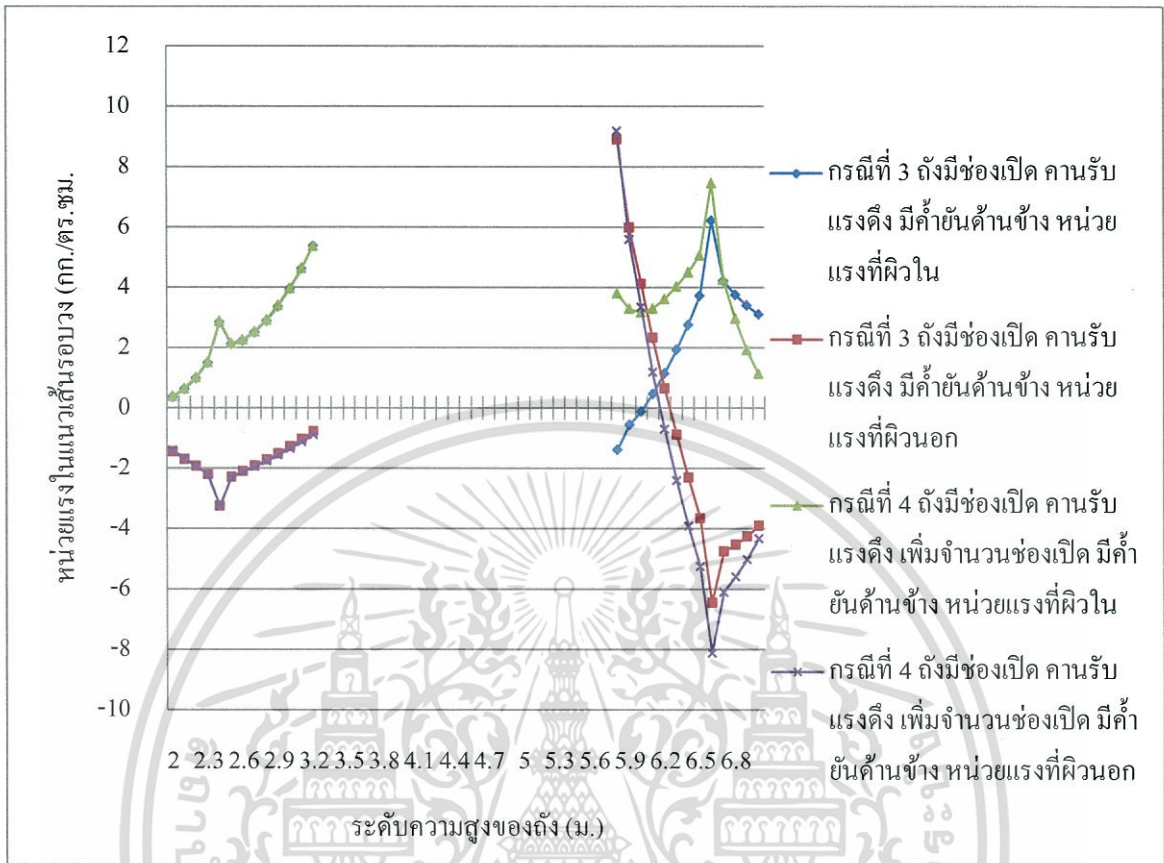
รูปที่ 4.40 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของถ้งในกรณี 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึง และเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยัน



รูปที่ 4.41 หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง กรณีที่ 4 เจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง ตัดตามตัดแสดงตามแนวตั้งบริเวณจุดที่มีหน่วยแรงที่ผิวนอกสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการเพิ่มจำนวนช่องเปิด



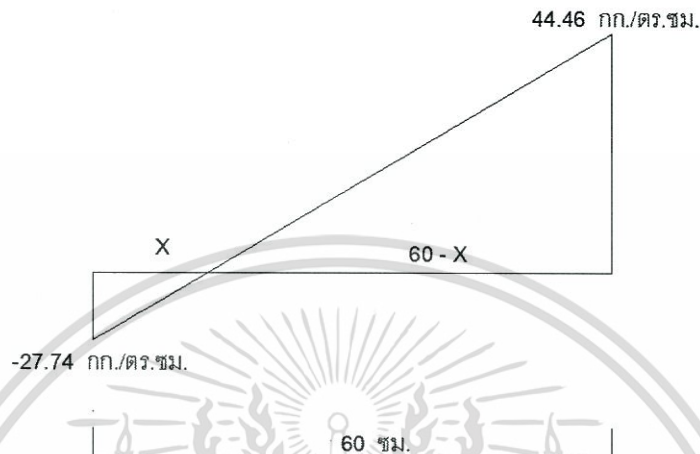
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวในและผิวนอก ระหว่างก่อนและหลังการเพิ่มจำนวนช่องเปิด ตัดตามแนวตั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวง 0.00 ม.

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงสูงสุด

หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง	ชนิด	กก./ตร. ซม.
ทฤษฎีทรงกระบอกผนังบาง	เฉลี่ย	24.2
ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง	เฉลี่ย	15.98
ทฤษฎีตัวประกอบความเค้นหนาแน่น		88.73
กรณีที่ 1 ถึงไม่มีการเจาะรู ไม่มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	14.31
	ผิวนอก	17.4
กรณีที่ 2 ถึงมีการเจาะช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	71.08
	ผิวนอก	42.75
กรณีที่ 3 ถึงเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดิ่ง ไม่มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	27.03
	ผิวนอก	-10.13
กรณีที่ 4 ถึงเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดิ่งและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	52.64
	ผิวนอก	66.46
กรณีที่ 1 ถึงไม่มีการเจาะรู มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	1.19
	ผิวนอก	5.34
กรณีที่ 2 ถึงมีการเจาะช่องเปิด มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	9.66
	ผิวนอก	-0.32
กรณีที่ 3 ถึงเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดิ่ง มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	22.5
	ผิวนอก	-9.08
กรณีที่ 4 ถึงเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดิ่งและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง	ผิวใน	44.46
	ผิวนอก	-27.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรณีที่ 4 ถึงเจาะช่องเปิด มีคานรับแรงดึงและเพิ่มจำนวนช่องเปิด ไม่มีค้ำยันด้านข้าง ซึ่งถือเป็นแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับกรณีตัวอย่างมากที่สุด มีหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงสูงสุดที่ผิวใน 44.46 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นแรงดึง หน่วยแรงที่ผิวนอกที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าเท่ากับ -27.74 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นแรงอัด



รูปที่ 4.43 การหาแรงดึงภายในของผนังถัง

แก้สมการเพื่อหาค่า  $x$  ดังนี้

$$\frac{x}{27.74} = \frac{60-x}{44.46} ; x = 23.05 \text{ ซม.}$$

หาค่าแรงดึงลัพท์ต่อหน่วยความยาวบนหน้าตัดจาก

$$f = \frac{P}{A}$$

$$P = f \cdot A$$

$$P = \frac{1}{2} \times 44.46 \times (60-23.05) \times 100 = 82,139.85 \text{ กก./ซม.}$$

นำแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ไปหาหน่วยแรงต่อหน้าตัดเหล็กเสริม DB25 SD 40 @ 0.10 ม. ซึ่งมีหน่วยแรงที่ยอมให้เท่ากับ 1700 กก./ตร.ซม

$$f = \frac{P}{A}$$

$$f = \frac{82,139.85}{4.901 \times 10} = 1,675.98 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม ผนังถังไม่เกิดการฉีกขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. การเปรียบเทียบทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าใกล้เคียงกันแตกต่างกันเพียง 0.12 % เท่านั้น ซึ่งหมายความว่า การแบ่งขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความเหมาะสม

2. หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ได้จากทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางมีค่าสูงสุด 24.20 กก./ตร.ซม. ส่วนที่ได้จากทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบางมีค่าสูงสุด 15.98 กก./ตร.ซม. ดังนั้นเราสามารถนำหน่วยแรงที่ได้จากทฤษฎีทรงกระบอกผนังบางไปออกแบบเหล็กเสริมในแนวเส้นรอบวงได้อย่างปลอดภัย

3. จากการสร้างแบบจำลองของถังเก็บน้ำโดยให้ฐานรากเป็นแบบลูกกล้อและแบบยึดหมุนเพื่อดูการขยายตัวและหน่วยแรงในฐานรากพบว่า การขยายตัวของฐานรากในถังแบบไม่มีช่องเปิดภายใต้จุดรองรับแบบยึดหมุนและแบบลูกกล้อภายใต้แรงดันน้ำ ได้ค่าการขยายตัวสูงสุดคือ 0.09 มม. และ 0.17 มม. ตามลำดับ ซึ่งการขยายตัวของฐานรากไม่มีนัยยะสำคัญ ไม่ส่งผลทำให้เกิดการฉีกขาดของฐานราก

4. จากการเปรียบเทียบผลของค้ำยันด้านข้างที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงพบว่า ก่อนใส่หน่วยแรงสูงสุดในแนวเส้นรอบวงที่ผิวใน 14.76 กก./ตร.ซม. ผิวนอก 17.4 กก./ตร.ซม. หลังใส่หน่วยแรงสูงสุดในแนวเส้นรอบวงที่ผิวใน 4.19 กก./ตร.ซม. ผิวนอก 5.34 กก./ตร.ซม. ค้ำยันด้านข้างส่งผลให้หน่วยแรงสูงสุดในแนวเส้นรอบวงผิวในลดลง 71.61 % และผิวนอกลดลง 69.31 %

5. จากการเปรียบเทียบผลของช่องเปิดที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง พบว่าหลังจากทำการเจาะช่องเปิดหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งผิวในและผิวนอก โดยในกรณีที่ไม่มีค้ำยันด้านข้าง หน่วยแรงที่ผิวในเพิ่มขึ้น 381.57 % ผิวนอกเพิ่มขึ้น 66.37 % ในกรณีที่มีค้ำยันด้านข้างหน่วยแรงที่ผิวในเพิ่มขึ้น หน่วยแรงที่ผิวในเพิ่มขึ้น 130.54 % ผิวนอกเพิ่มขึ้น 21.72 %

6. การเปรียบเทียบผลของคานรับแรงดึงที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง พบว่าคานรับแรงดึงช่วยให้หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงลดลงในกรณีที่ไม่มีค้ำยันด้านข้าง หน่วยแรงที่ผิวในลดลง 29.37 % ผิวนอกเพิ่มขึ้น 79.55 % ในทางกลับกันกลับทำให้หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงเพิ่มขึ้นในกรณีที่มีค้ำยันด้านข้าง หน่วยแรงที่ผิวในเพิ่มขึ้น 361.28 % ผิวนอกเพิ่มขึ้น 37.07 %

7. การเปรียบเทียบผลของการเพิ่มจำนวนช่องเปิดที่มีต่อหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง โดยในกรณีที่ไม่มีค้ำยันด้านข้าง หน่วยแรงที่ผิวในเพิ่มขึ้น 4.86 % ผิวนอกเพิ่มขึ้น 27.85 % ส่วนในกรณีที่มีค้ำยันด้านข้าง หน่วยแรงที่ผิวในลดลง 0.22 % ผิวนอกเพิ่มขึ้น 3.03 % พบว่าการเจาะช่องเปิดเพิ่มนั้นเมื่อเจาะอยู่บริเวณที่แรงดันนั้นกระทำไม่มากหรือบริเวณช่วงบนของถัง จะไม่ส่งผลต่อหน่วยแรงสูงสุดในแนวเส้นรอบวง

8. เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงกับแบบจำลองของถังเก็บน้ำที่เจาะเพียงช่องเปิดขนาดใกล้เคียงกันกับทฤษฎีตัวประกอบความเค้นหนาแน่นได้ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ผิวใน 71.08 กก./ตร.ซม. ที่ผิวนอก 28.95 กก./ตร.ซม. พบว่าจากทฤษฎีตัวประกอบความเค้นหนาแน่นให้ค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวเส้นรอบวงคือ 88.73 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่าแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ 24.83%

ดังนั้นหากช่องเปิดของถังมีค่าใกล้เคียงกันสามารถนำเอาทฤษฎีตัวประกอบความเค้นหนาแน่นไปวิเคราะห์ค่าเพื่อออกแบบได้อย่างปลอดภัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ผศ. ดร.วิโรจน์ ลิ้มตระการ, เสฏฐสรุทธ สุจริตภวัตสกุล และ ยศกร ประทุมวัลย์, การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วย SolidWorks Simulation, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), พ.ศ.2555, หน้า 122-123.

ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร, การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน, สำนักพิมพ์ ป. สัมพันธ์พาณิชย์, พ.ศ.2552, หน้า 33-36

ANDREW PYTEL, FERDINAND L. SINGER, STRENGTH OF MATERIALS, TOP PUBLISHING CO., LTD, 1987, pp.22-24, pp.489-492.

Computer & Structures, Inc. CSI Analysis Reference. Berkeley, Inc., 2014, pp. 30-31.

D. S. Houghton and A. Rothwell, "The Effect of Curvature on the Stress Concentrations Around

Holes in Shells", The Second International Conference on Stress Analysis, 1962, pp. 6.

K CHANDRASHEKHARA, ANALYSIS OF THIN CONCRETE SHELLS, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1986, pp. 12-13.

Mahdi Mirzagoltabarrosan, "Studying Decreased Methods of Stress Concentration around

Holes and Openings of Plate and Shell Structure' Body", International Research Journal of Applied and Basic, 2013, pp. 1008-1015.

S.TIMOSHENKO and S.WOINOWSKY-KRIEGER. THEORY OF PLATES AND SHELLS, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1989, pp. 123-132.

WALTER D. PILKEY. PETER'S STRESS CONCENTRATION FACTORS: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997, pp. 260.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสุรวุฒิ สีสังข์

วัน เดือน ปีเกิด 12 ตุลาคม 2532 ที่มหาสารคาม

ที่อยู่ 260 หมู่ 3 ตำบลบ่อใหญ่ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม 44130  
โทร.092-005-5145

ประวัติการศึกษา 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้