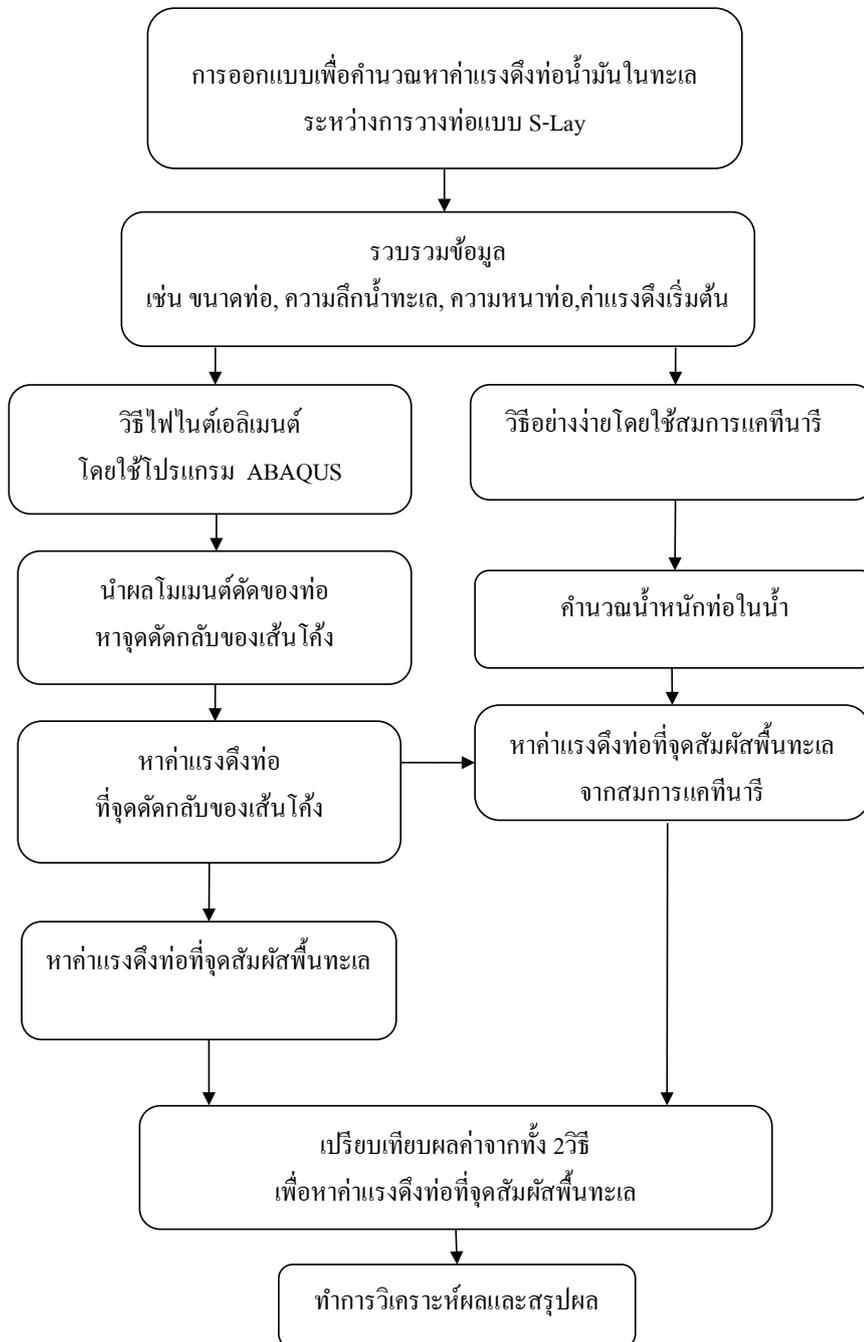


บทที่ 4 ผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์แรงดึงที่น้ำมันขณะติดตั้งแบบตัวเอสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยใช้สมการแคทีนารีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นจะทำการศึกษาผลกระทบของชุดตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อการวางท่อ ยกตัวอย่างเช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและความลึกน้ำทะเลเป็นต้น เนื้อหาในบทนี้ได้รวบรวมค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองรวมทั้งหมด 24 กรณี โดยผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือผลการวิเคราะห์ค่าแรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเลและรูปร่างของท่อบริเวณโค้งงอจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับสมการแคทีนารี ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.7



Formatted: Font: Angsana New, 16 pt, Complex Script Font: 16 pt

Formatted: Tab stops: 7.76 cm, Centered + 14.99 cm, Right + Not at 0 cm

4.1 ข้อมูลท่อและข้อมูลอื่นๆที่ใช้ในการวิเคราะห์

Formatted: Left, Indent: Left: 0 cm, First line: 0 cm, Tab stops: 7.76 cm, Centered + 14.99 cm, Right + Not at 0.49 cm + 0.7 cm

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 20 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 20 pt

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและความหนาท่อ ตามตารางที่ 4.1 [27] และอาศัยข้อมูลความลึกน้ำทะเลของอ่าวไทยและคุณสมบัติน้ำทะเลและข้อมูลอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 x ตามลำดับ

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, Complex Script Font: AngsanaUPC

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความหนาท่อเมื่ออัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาท่อ [28] (D/t) มีค่าตามขนาดท่อ

ขนาดท่อมาตรฐาน (NSP in.)	ค่าที่ใช้ในการศึกษา		อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาท่อ (D/t) (D/t)
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (in.) นิ้ว	ความหนาท่อ (in.) นิ้ว	
6	6.625	0.375	18
8	8.625	0.375	23
10	10.75	0.500	22
12	12.75	0.625	20
16	16	0.625	26
20	20	0.812	25

Formatted: Font:

Formatted: Font:

Formatted: Font:

Formatted: Font:

Formatted: Font:

Formatted: Font:

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลความลึกน้ำทะเลและข้อมูลอื่นๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อม

ลำดับ	คำอธิบาย	หน่วย	ค่าที่ใช้
1	ความลึกน้ำทะเลอ่าวไทย	เมตร m	60-80
2	ค่าความหนาแน่นของน้ำทะเล	Kg/m ³ กก/ม ³	1025
3	ค่าความหนืดของน้ำทะเล	m ² /sec วินาที	0.0000096

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt

4.2 ข้อมูลคุณสมบัติท่อน้ำมัน

คุณสมบัติของท่อเป็นไปตามข้อกำหนด API Spec 5L [8] มาตรฐานเกรดเหล็กที่ใช้ตามมาตรฐาน API Material Grade X52 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 จากนั้นเขียนโปรแกรมสำเร็จรูป Mathcad ช่วยคำนวณน้ำหนักท่อในน้ำ ความหนาแน่นของเหล็กเทียบเท่า (Equivalent steel density) โมเมนต์ความเฉื่อย

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt

และค่าความแข็งแรงแรงการดัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่ ความหนาแน่นของเหล็กเทียบเท่า หรือ Equivalent steel density

ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 8, 10, 12, 16, และ 20 นิ้ว ตามลำดับ ความหนาแน่นค่าเป็นอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาต่อ (D/t) = 17-26 และข้อมูลอื่น ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ข้อมูลคุณสมบัติท่อ และ ตารางที่ 3.3 ข้อมูลขนาดท่อและน้ำหนักท่อเมื่ออัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาต่อ (D/t) มีค่าตามขนาดท่อ (API Specification 5L, 2004) และ ตารางที่ 3.4 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองรวมทั้งหมด 12 กรณี

- Formatted: Left
- Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold
- Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold
- Formatted: Font: Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลคุณสมบัติท่อ [ASME-B36.10M-20048]

ลำดับ	คุณสมบัติท่อ	หน่วย	ค่าที่ใช้
4	Material Grade ตาม API 5L, 2004	API Grade	X52
1	Steel grade X52 (52 ksi) - Yield Strength	MPa	358
2	Pipe density	Kg/m ³	7850
3	Young's modulus of steel	GPa	207
4	Passion Ratio	ν	0.3
5	ความยาวท่อทั้งหมด	m	700

- Formatted: Font color: Auto
- Formatted: Font color: Auto
- Formatted: Font color: Auto
- Formatted Table
- Formatted: Font color: Auto
- Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt
- Formatted: Font: 16 pt, Complex Script Font: 16 pt

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าน้ำหนักท่อในน้ำ ความหนาแน่นของเหล็กเทียบเท่า โมเมนต์ความเฉื่อยและค่าความแข็งแรงแรงการดัด

ขนาดท่อมาตรฐาน (in.)	น้ำหนักท่อในน้ำ (N/m)	ความหนาแน่นของเหล็กเทียบเท่า (kg/m ³)	I (m ⁴)	EI (N·m ²)
6	142	3,051	0.0000150	3.1E+06
8	104	1,688	0.0000345	7.1E+06
10	211	2,072	0.0000882	1.8E+07
12	354	2,353	0.0001826	3.8E+07
16	195	1,023	0.0003719	7.7E+07
20	394	1,271	0.0009393	1.9E+08

- Formatted: Font: 16 pt, Complex Script Font: 16 pt

การศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 นิ้วเนื่องจาก ท่อน้ำมันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะมีค่าแรงดงตัวสูงทำให้ต้องใช้คอนกรีตหุ้มท่อส่งผลให้แรงดงตัวคลอความยาวท่อไม่สม่ำเสมอโดยที่ผลกระทบของคอนกรีตหุ้มท่อไม่อยู่ในขอบเขตของการศึกษานี้ ดังนั้นขนาดของท่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 นิ้ว จึงไม่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้

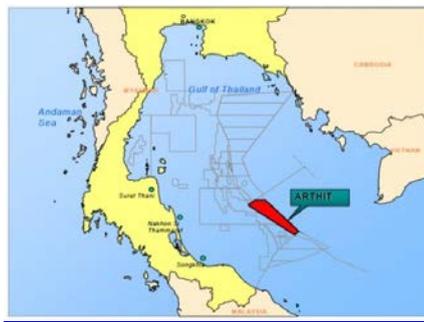
Formatted: Highlight

4.3 ข้อมูลแรงดึงท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมนอกฝั่งของไทย

การศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลค่าแรงดึงท่อเริ่มต้นที่ใช้ติดตั้งท่อก๊าซและท่อน้ำมัน ในระหว่างการวางท่ออุตสาหกรรมปิโตรเลียมนอกฝั่งของไทย จากโครงการวางท่อน้ำมันในทะเลที่ผ่านมาบริเวณอ่าวไทยบริเวณ โครงการอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3-24.1 โดยค่าแรงดึงเริ่มต้นใช้ในการวางท่อน้ำมัน ดังแสดงตามตารางที่ 4.5 xxx

Comment [C1]: ใส่ชื่อเกรดเฉพาะเป็น เหล็กอะไร

Comment [C2]: ใส่ชื่อเกรดเฉพาะเป็น เหล็กอะไร



Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Bold, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt, Bold

Formatted: Centered

รูปที่ 4.1 บริเวณ โครงการอาทิตย์

Formatted: Centered, Indent: Left: -0.02 cm, Hanging: 0.02 cm

3.2 ตัวแปรสำหรับการศึกษา

Formatted: Font: 16 pt, Complex Script Font: 16 pt

3.2.1 ตัวแปรทางด้านสิ่งแวดล้อม

Formatted: Thai Distributed Justification

ตัวแปรในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อม

Formatted: Font: 16 pt, Complex Script Font: 16 pt

Formatted: Font: 16 pt, Not Bold, Complex Script Font: 16 pt, Not Bold

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ขนาดท่อ มาตรฐานเส้น ผ่านศูนย์กลาง ท่อ (ม.นิ้ว)	ข้อมูลค่าแรงดึงท่อเริ่มต้นระหว่างกร วางท่อในอุทกสำหรับการวิเคราะห์ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (N)	ข้อมูลค่าแรงดึงท่อเริ่มต้นระหว่างกร วางท่อในอุทกสำหรับการวิเคราะห์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (N)
	ความลึกน้ำ 60 m	ความลึกน้ำ 80 m
6"	1.20E+05 12.0 Te	1.20E+05
8"	1.60E+05 16.0 Te	1.60E+05
10"	2.00E+05 18.0 Te	2.00E+05
12"	2.40E+05 28.0 Te	2.40E+05
16"	2.40E+05 17.0 Te	2.40E+05
20"	2.40E+05 17.0 Te	2.60E+05

โดยที่ ความหนาแน่นของเหล็กเทียบเท่า หรือ Equivalent steel density

ข้อมูลค่าแรงดึงท่อระหว่างกรวางท่อในอุตสาหกรรม หรือ Pipeline lay
tension Industrial data

Formatted: Font: 20 pt, Bold, Complex Script Font: 20 pt, Bold, Highlight

Formatted: Font: 20 pt, Bold, Complex Script Font: 20 pt, Bold, Highlight

Formatted: Font: 20 pt, Bold, Complex Script Font: 20 pt, Bold, Highlight

Formatted: Font: 20 pt, Bold, Complex Script Font: 20 pt, Bold, Highlight

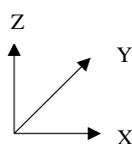
4.4 ผลจากการศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอาศัยโปรแกรม ABAQUS แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- การวิเคราะห์โมเมนต์ตัดและการหาค่าตำแหน่งจุดตัดกลับ
- การวิเคราะห์แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในท่อ

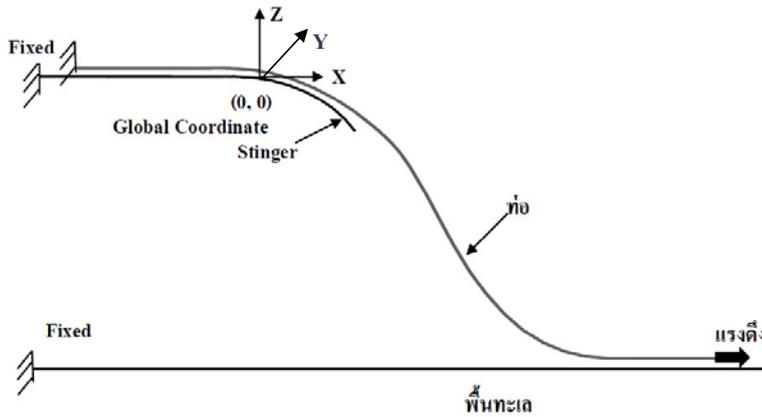
4.4.1 การวิเคราะห์โมเมนต์ตัดและการหาค่าตำแหน่งจุดตัดกลับ

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดการวางท่อน้ำมันตามรูปที่ 3.1 กำหนดความยาวของท่อเท่ากับ 700 เมตร เพื่อให้มุมที่ปลายล่างมีค่าประมาณ 0 องศา ในส่วนแรกจะวิเคราะห์ที่ความลึกของน้ำทะเลแตกต่างกัน 2 ค่า คือ 60 และ 80 เมตร การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม ABAQUS จะมีข้อกำหนดเครื่องหมายตามกฎมือขวาโดยทิศทางอ้างอิงเป็นไปตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การกำหนดทิศทางการวางตัวของท่อในระนาบ XZ

เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่งจุดตัดกลับของท่อจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของโมเมนต์คัตที่เริ่มจากพิกัดอ้างอิง (Global Coordinate) ในระนาบ XZ มีค่าเท่ากับ (0,0) ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 3.1.2 แบบจำลองการติดตั้งท่อแบบตัวเอส

ท่อวางตัวในทิศทางแกน X เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร จากกฎมือขวาสามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์คัตในทิศทาง Y (M_y) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ โมเมนต์คัตมีค่าเป็นบวกบริเวณโค้งคว่ำ คือ จุดที่ท่อยกตัวจนถึงจุดตัดกลับของท่อ โมเมนต์คัตมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งจุดตัดกลับของท่อและจุดที่ท่อสัมผัสพื้นทะเล และโมเมนต์คัตมีค่าติดลบบริเวณโค้งหงาย ดังแสดงผลตามรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.8

Formatted: Centered, Indent: Left: -0.02 cm, Hanging: 0.02 cm

Formatted: Font: (Default) AngsanaUPC, 16 pt, Bold, Complex Script Font: AngsanaUPC, 16 pt, Bold

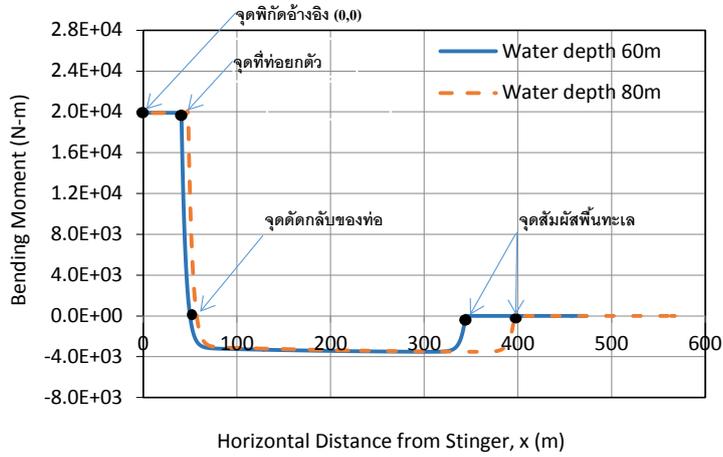
Formatted: Font: Bold, Font color: Auto, Complex Script Font: Bold

Formatted: Centered, Indent: Left: 0 cm, First line: 0 cm

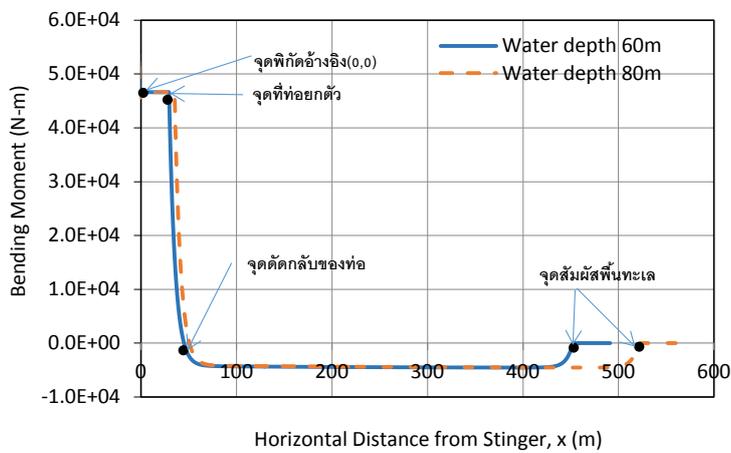
Formatted: Font: Bold, Font color: Auto, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font color: Auto

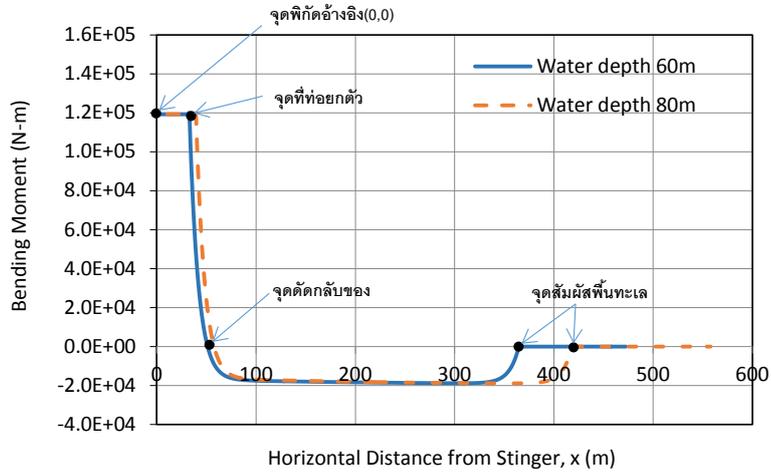
Formatted: Font color: Auto



รูปที่ 4.3 ค่าโมเมนต์คดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 6 นิ้ว ความหนา 0.375 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ

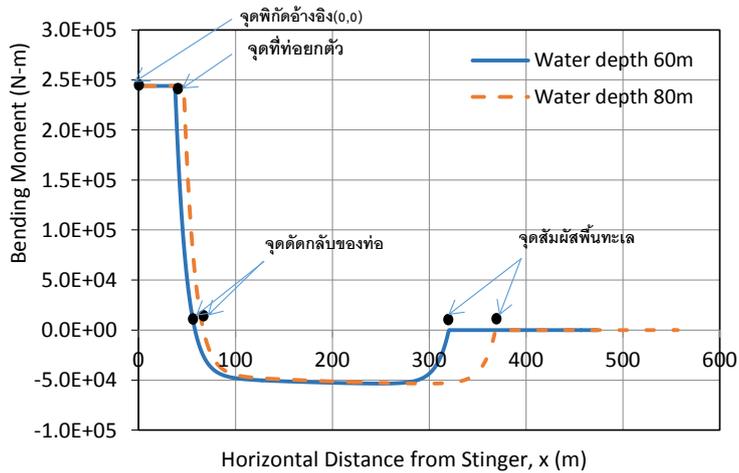


รูปที่ 4.4 ค่าโมเมนต์คดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 8 นิ้ว ความหนา 0.375 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ

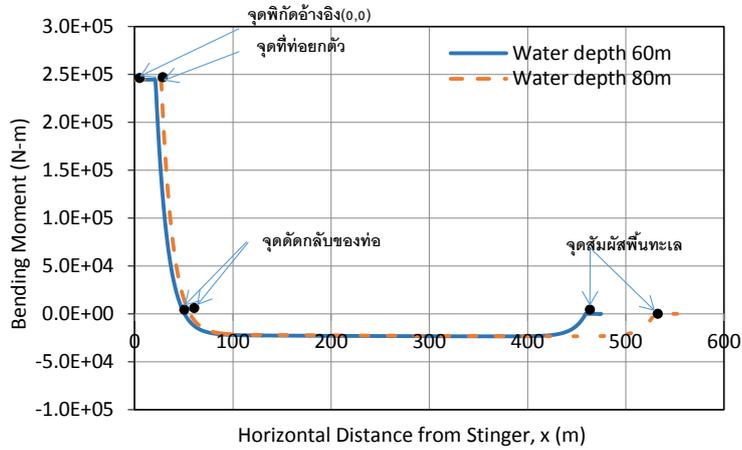


รูปที่ 4.5 ค่าโมเมนต์ดัดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 10 นิ้ว ความหนา 0.5 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ

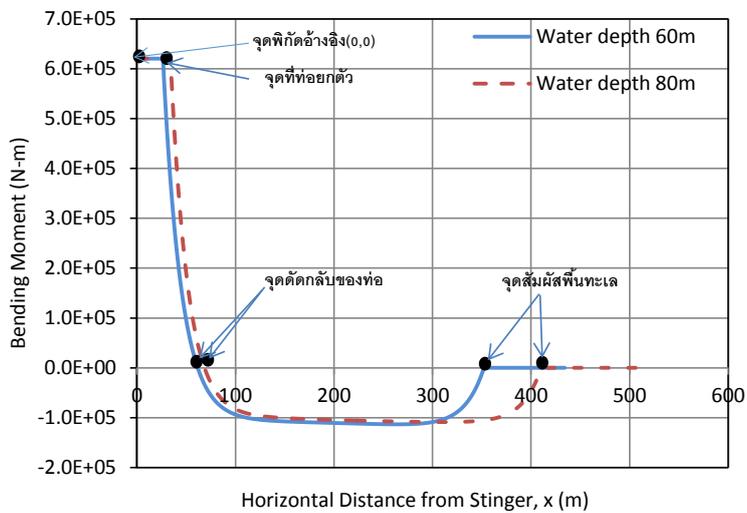
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวท่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ลักษณะการกระจายตัวของโมเมนต์ดัดมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.6 ค่าโมเมนต์ดัดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 12 นิ้ว ความหนา 0.625 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



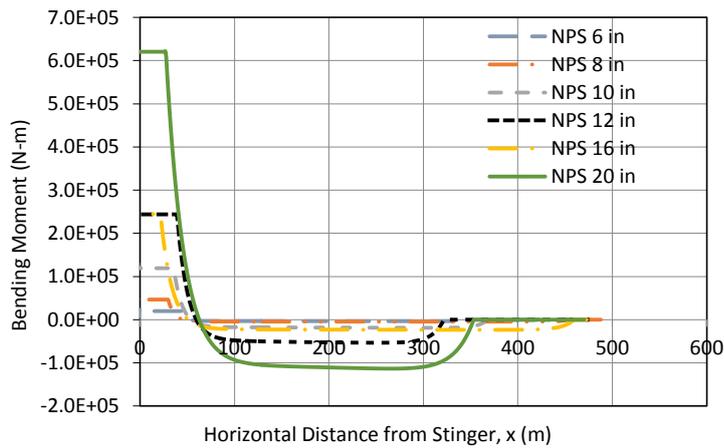
รูปที่ 4.7 ค่าโมเมนต์ตัดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 16 นิ้ว ความหนา 0.625 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



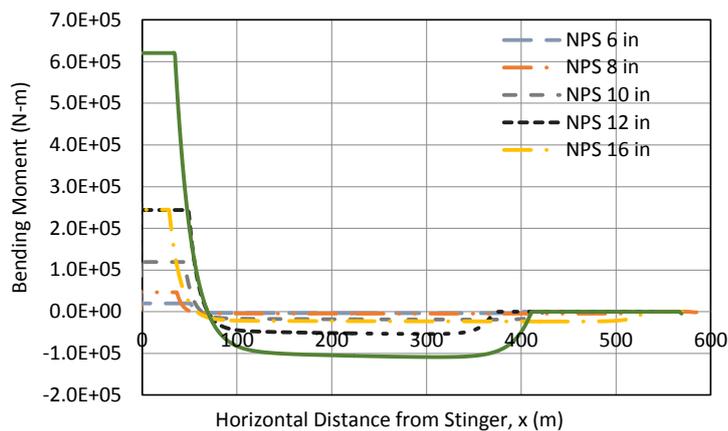
รูปที่ 4.8 ค่าโมเมนต์ตัดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 20 นิ้ว ความหนา 0.812 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของโมเมนต์ตัดมีลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับท่อทุกขนาด เมื่อพิจารณาที่จุดสัมผัสพื้นทะเลพบว่าโมเมนต์ตัดมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากการสัมผัสระหว่าง

ท่อกับพื้นทะเลถูกจำลองให้เป็นแบบพื้นผิวแข็งเกร็ง (Hard contact) ส่งผลให้ค่าความชันของท่อและการเปลี่ยนแปลงความชันของท่อที่จุดสัมผัสพื้นทะเลจะมีค่าเป็นศูนย์จึงไม่เกิดการโก่งคดของท่อบริเวณนี้ โดยสามารถเปรียบเทียบการกระจายตัวของโมเมนต์คดสำหรับท่อขนาดต่างๆ ที่ความลึก 2 ค่าคือ 60 และ 80 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ค่าโมเมนต์คดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 6, 8, 10, 12, 16, และ 20 นิ้ว ที่ความลึกในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



รูปที่ 4.10 ค่าโมเมนต์คดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 6, 8, 10, 12, 16 และ 20 นิ้ว ที่ความลึกในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 80$ เมตร และ X คือระยะในแนวราบ

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นสำหรับท่อ 6, 8, 10, 12, 16, และ 20 นิ้ว ที่ความลึก 60 และ 80 เมตร จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดบริเวณ โครงเหล็กวางท่อมักแตกต่างกัน เนื่องจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Second moment of area) ของท่อที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ค่าโมเมนต์ดัดในส่วนโค้งงายไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรงเนื่องจากค่าโมเมนต์ดัดขึ้นอยู่กับค่าแรงดึง โดยค่าแรงดึงที่กำหนดคมีผลส่วนหนึ่งจากแรงลอยตัวของท่อซึ่งช่วยพยุงท่อไว้ โดยท่อที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าแรงลอยตัวมากกว่า

โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในช่วงต่างๆเป็นผลมาจากค่าแรงดึงภายในท่อ โดยกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ท่อจะมีค่าความแข็งแรงดัดต่ำจะทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในท่อมีน้อย นอกจากนี้ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นยังขึ้นกับค่ารัศมีความโค้งของ โครงเหล็กวางท่อซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 เมตร

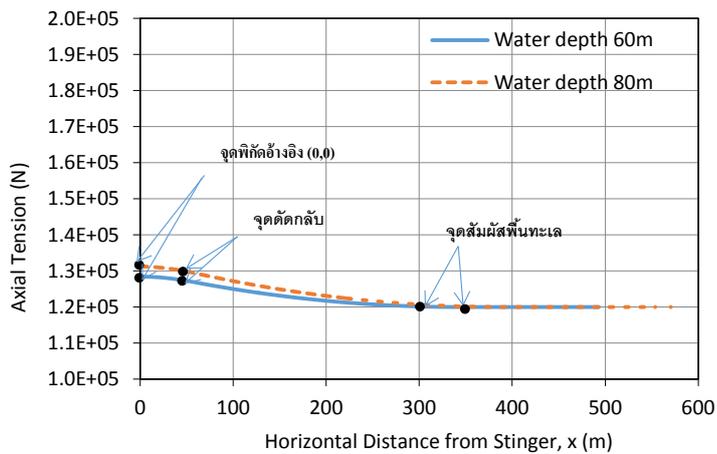
4.4.2 การวิเคราะห์แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในท่อ

จากการวิเคราะห์แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในท่อตลอดความยาวท่อพบว่าแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความยาวท่อนับจากพื้นทะเลถึง โครงเหล็กวางท่อและมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของน้ำที่ 60 และ 80 เมตร ตามลำดับ สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6,8,10,12,16, และ 20 นิ้ว สามารถสรุปผลแรงดึงที่จุดบน โครงเหล็กวางท่อเปรียบเทียบกับแรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเล ได้ดังในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงในท่อน โครงเหล็กวางท่อมักสูงกว่าค่าแรงดึงในท่อที่จุดสัมผัสพื้นทะเลเล็กน้อย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 4.0% ถึง 12%

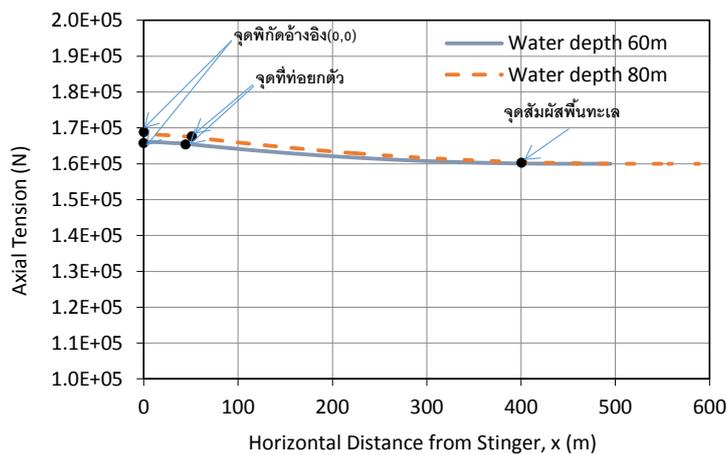
ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดึงที่ส่วนบนของ โครงเหล็กวางท่อและที่จุดสัมผัสพื้นทะเล

ขนาดท่อ (in.)	ค่าแรงดึงในท่อ (kN.)				เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแรงดึงที่โครงเหล็กวางท่อเทียบกับแรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเล(%)	
	บนสุดของโครงเหล็กวางท่อ		จุดสัมผัสพื้นทะเล		น้ำลึก 60 (m)	น้ำลึก 80 (m)
	น้ำลึก 60 (m)	น้ำลึก 80 (m)	น้ำลึก 60 (m)	น้ำลึก 80 (m)		
6	128.53	131.36	120.00	120.00	7.1	9.5
8	166.33	168.45	160.00	160.00	4.0	5.3
10	213.01	217.16	200.00	200.00	6.5	8.6
12	261.61	268.65	240.00	240.00	9.0	11.9
16	249.60	253.10	240.00	240.00	4.0	5.5
20	260.79	286.31	240.06	260.01	8.6	10.1

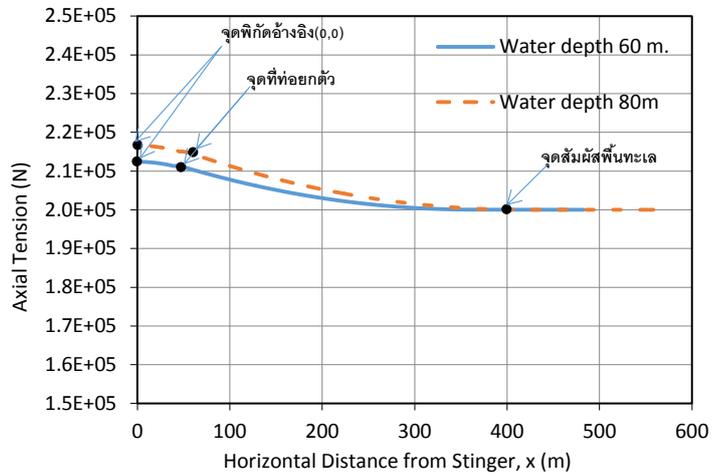
รูปที่ 4.11 ถึง 4.16 แสดงค่าแรงดึงในท่อสำหรับท่อขนาด 6, 8, 10, 12, 16 และ 20 นิ้ว ที่ความลึก 60 และ 80 เมตร ตามลำดับ โดยลักษณะการกระจายตัวของแรงดึงในท่อก็คงจะเป็นไปในทางเดียวกัน คือ ค่าแรงดึงที่ตำแหน่งโครงเหล็กวางท่อจะมีค่าสูงสุด จากนั้นจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งสัมผัสพื้นทะเล นอกจากนี้การวางท่อในทะเลที่มีความลึกมากมว่าจะต้องการค่าแรงดึงในการวางท่อมากกว่าเล็กน้อยสำหรับท่อที่มีขนาดเล็กกว่า 20 นิ้ว



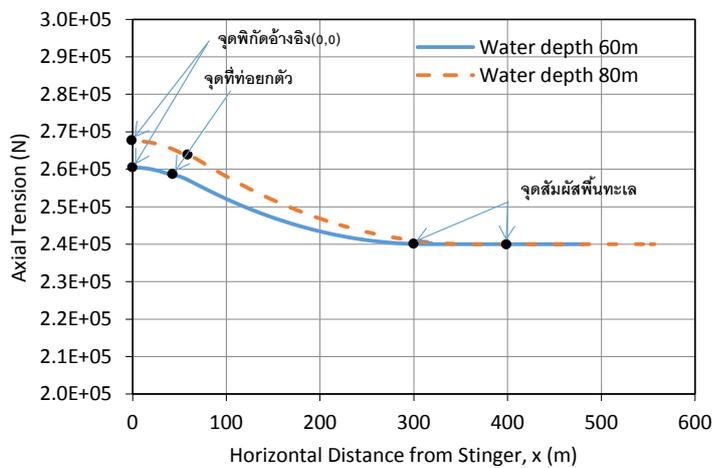
รูปที่ 4.11 ค่าแรงดึงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 6 นิ้ว ความหนา 0.375 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



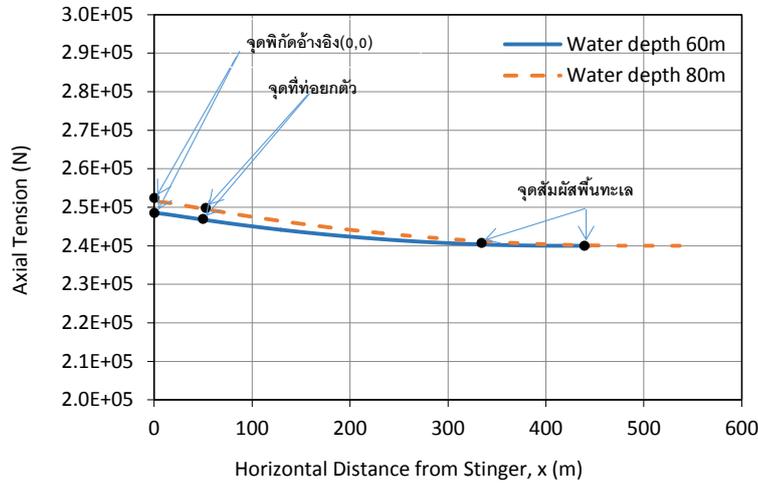
รูปที่ 4.12 ค่าแรงดึงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 8 นิ้ว ความหนา 0.375 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



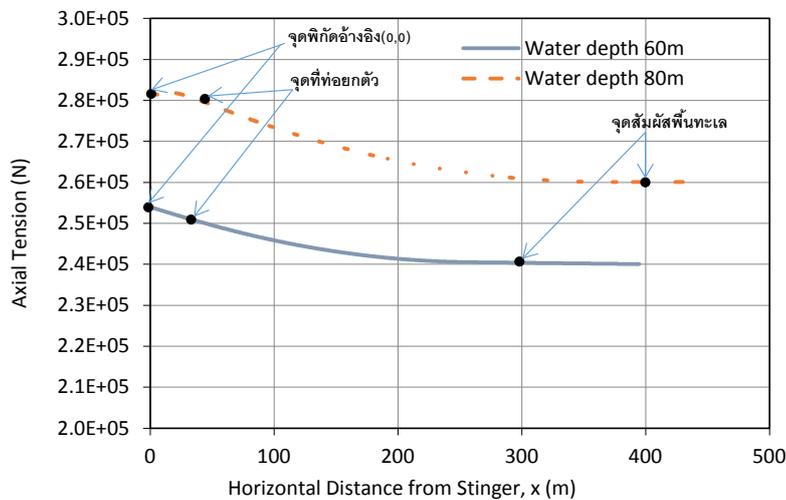
รูปที่ 4.13 ค่าแรงดึงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 10 นิ้ว ความหนา 0.5 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



รูปที่ 4.14 ค่าแรงดึงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 12 นิ้ว ความหนา 0.625 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



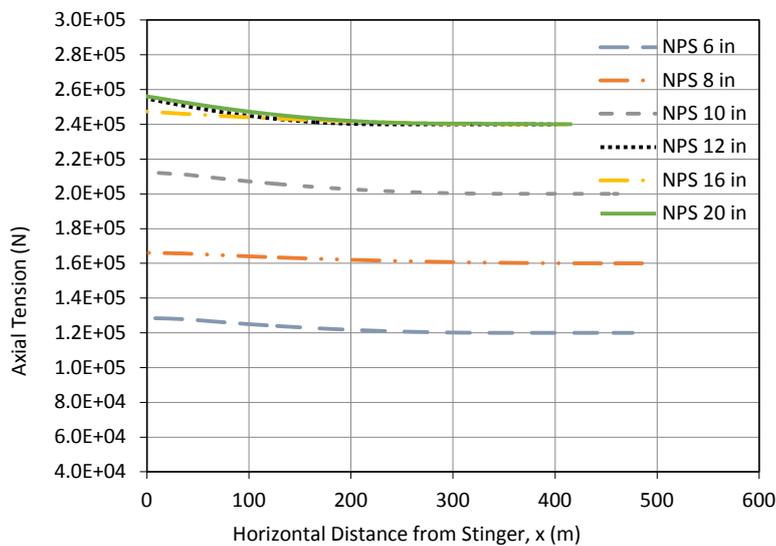
รูปที่ 4.15 ค่าแรงดึงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสำหรับขนาด 16 นิ้ว ความหนา 0.625 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



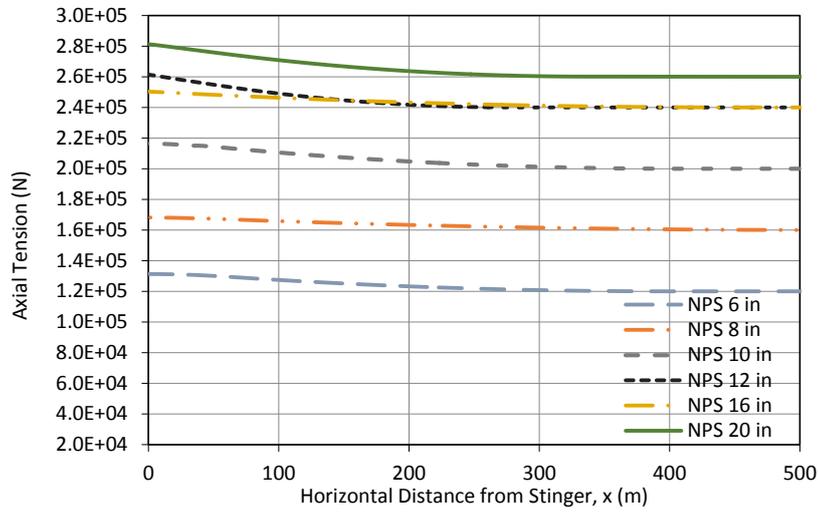
รูปที่ 4.16 ค่าแรงดึงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 20 นิ้ว ความหนา 0.812 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ Z = 60 และ 80 เมตร และ X คือระยะในแนวราบ

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าแรงดึงในท่อที่ความลึก 60 เมตร มีค่าน้อยกว่าแรงดึงในท่อที่ความลึก 80 เมตร อย่างเห็นได้ชัดสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้ว

รูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าค่าแรงดึงภายในท่อขนาด 6, 8, 10 และ 12 นิ้วจะเพิ่มขึ้นตามขนาดท่อ ยกเว้นท่อขนาด 16 นิ้ว ที่ค่าแรงดึงภายในท่อที่มีค่ามากกว่าท่อขนาด 12 นิ้ว เนื่องจากท่อขนาด 16 นิ้ว ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้นแต่ใช้ความหนาท่อเท่ากับท่อขนาด 12 นิ้ว ทำให้น้ำหนักท่อในน้ำมีค่าน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ดังนั้นจะเห็นว่าแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในท่อ ขึ้นกับน้ำหนักท่อในน้ำเป็นสำคัญ ซึ่งท่อที่มีขนาด 20 นิ้วจะมีแรงดึงภายในท่อสูงสุดเนื่องจากค่าน้ำหนักท่อในน้ำมีค่าสูงสุด



รูปที่ 4.17 ค่าแรงดึงในท่อจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 6, 8, 10, 12, 16 และ 20 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 60$ เมตร และ X คือระยะในแนวราบ



รูปที่ 4.18 ค่าแรงดึงท่อจากการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อ 6, 8, 10, 12, 16 และ 20 นิ้ว ในระนาบ XZ เมื่อ $Z = 80$ เมตร และ X คือระยะในแนวนอน

4.5 การเปรียบเทียบแรงดึงในท่อที่จุดสัมผัสพื้นทะเลจากการศึกษาทั้ง 2 วิธี

หัวข้อนี้แสดงการเปรียบเทียบผลค่าแรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเลจากการผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีแคทีนารีเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้สมการแคทีนารี ผลการคำนวณหาค่าแรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเลด้วยสมการแคทีนารี เมื่อกำหนดให้ค่าความเค้นวอน-มิส บริเวณโค้งงายต้องมีค่าน้อยกว่า 60% ของกำลังครากของท่อเหล็ก รวมผลการคำนวณทั้งหมด 12 กรณีเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์แรงดึงท่อที่จุดสัมผัสพื้นทะเลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบแรงดึงท่อที่จุดสัมผัสพื้นทะเลได้จากการศึกษาทั้ง 2 วิธี

ความลึกน้ำ (m)	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (in.)	ไฟไนต์เอลิเมนต์	สมการแคทีนารี	ค่าแรงดึงที่ต่างกัน
		แรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเล (N)	แรงดึงที่จุดสัมผัสพื้นทะเล (N)	
60	6	1.20E+05	1.19E+05	1.3%
	8	1.60E+05	1.59E+05	0.5%
	10	2.00E+05	1.98E+05	1.1%
	12	2.40E+05	2.35E+05	2.0%
	16	2.40E+05	2.36E+05	1.6%
	20	2.40E+05	2.32E+05	3.5%
80	6	1.20E+05	1.18E+05	1.6%
	8	1.60E+05	1.59E+05	0.7%
	10	2.00E+05	1.97E+05	1.5%
	12	2.40E+05	2.34E+05	2.6%
	16	2.40E+05	2.35E+05	2.1%
	20	2.60E+05	2.48E+05	4.6%

จากตารางที่ 4.7 พบว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการศึกษาทั้ง 2 วิธีสามารถเปรียบเทียบแรงดึงท่อน้ำมันที่จุดสัมผัสพื้นทะเล พบว่าค่าแรงดึงท่อที่จุดสัมผัสพื้นทะเลคำนวณจากวิธีแคทีนารีมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ระหว่าง 0.5% ถึง 2.6% สำหรับท่อขนาดระหว่างท่อขนาด 6 นิ้ว ถึง 16 นิ้ว ส่วนท่อขนาด 20 นิ้วค่าแรงดึงมีค่าต่างกันถึง 3.5% ถึง 4.6% ซึ่งน่าจะมีผลมาจากความแตกต่างของรูปร่างท่อส่วนโค้งงาย