

## บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์

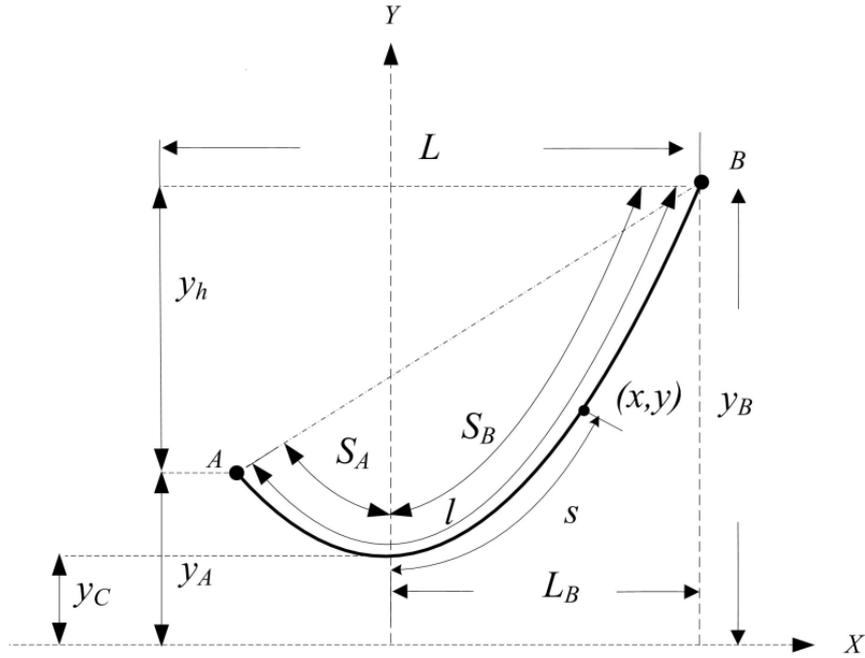
วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้คือการวิเคราะห์การยึดตัวในสถานะสมดุลทางสถิติของท่อลำเลียงของไหลแบบคาทีนารีในทะเลลึก โดยแนวทางการศึกษาจะใช้วิธีเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบางตัวเพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบของตัวแปรนั้นต่อสถานะสมดุลของท่อลำเลียงของไหลในทะเล โดยใช้หลักการแปรผันของสมการงานและพลังงานใช้ความโค้งเป็นตัวแปรอิสระ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ได้มาจากการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และกระบวนการทำซ้ำของนิวตัน-ราฟสันซึ่งจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่นเพื่อให้มั่นใจว่าผลที่ได้มีความถูกต้อง งานวิจัยนี้จะพิจารณาตัวอย่างทั้งในกรณีของการวิเคราะห์ของคานช่วงเดียวของท่อลำเลียงที่มีจุดรองรับในระดับเดียวกันและท่อลำเลียงที่มีจุดรองรับต่างระดับกัน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของแรงดึงในแนวราบที่กระทำที่ปลายบนและค่าความแข็งแรงของวัสดุต่อพิภคการวางตัวในสถานะสมดุลและความยาวส่วนโค้งทั้งหมด

### 4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการคำนวณเชิงตัวเลขกับสมการแคทีนารี

ก่อนที่จะทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสถานะสมดุลของท่อลำเลียงในทะเลจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับการคำนวณสมการแคทีนารีเพื่อตรงสอบความถูกต้องของสมการและแบบจำลอง การตรวจสอบจะตรวจสอบโดยการวิเคราะห์เคเบิลที่มีจุดรองรับต่างระดับกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 กำหนดแรงดึงที่ปลายบนและไม่คำนึงถึงการยึดตัวตามแนวแกน การเปรียบเทียบคำตอบเชิงตัวเลขกับงานวิจัย [6] ใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบการคำนวณเชิงตัวเลขกับสมการแคทีนารี

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
แรงดึงที่ปลายบน	$T_H$	8153.69	นิวตัน
ความลึกของระดับน้ำทะเล	$H$	36	เมตร
ความยาวส่วนโค้ง	$s_t$	305	เมตร
น้ำหนักสุทธิของเคเบิล	$w$	13	นิวตันต่อเมตร



รูปที่ 4.1 รายละเอียดของเส้นโค้งแบบแคทีนารีระดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบคำตอบเชิงตัวเลขกับการคำนวณเชิงตัวเลขกับสมการแคทีนารี

พารามิเตอร์ (เมตร)	สัญลักษณ์	Pual Cella [6]	งานวิจัยนี้
ระยะระหว่างจุดรองรับในแนวระนาบ	$L$	300	300
ระยะจากจุดต่ำสุดถึงปลายบนของเคเบิลในแนวระนาบ	$L_B$	224.1477	223.9334
ระยะจากจุดต่ำสุดถึงปลายบนของเคเบิลในแนวตั้ง	$y_H$	40.5644	40.5643

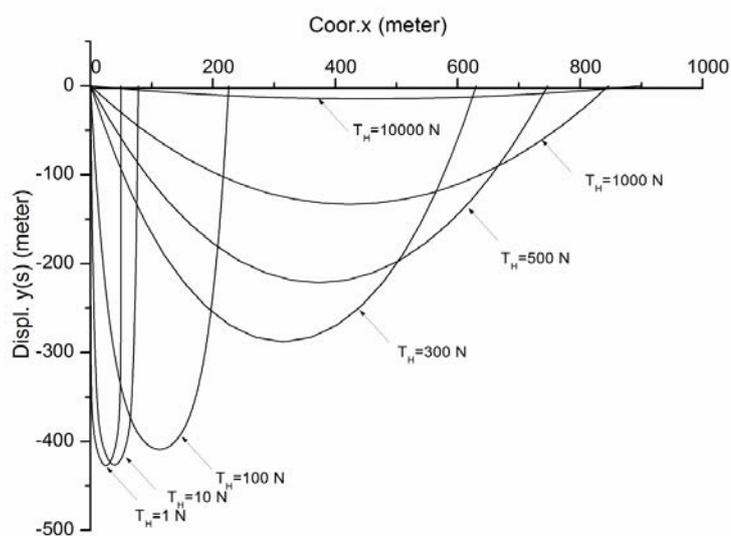
การเปรียบเทียบคำตอบเชิงตัวเลขจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับงานวิจัย Pual Cella [6]พบว่างานวิจัยนี้ได้คำตอบเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตัวอย่างการคำนวณของ Pual Cella [6] ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

## 4.2 สถานะสมดุลของเคเบิลเมื่อแปรเปลี่ยนแรงดึงในแนวราบที่ปลายบนของเคเบิลที่มีจุดรองรับระดับเดียวกันภายใต้สถานะสมดุล

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงในแนวราบที่ปลายบนของเคเบิลที่มีจุดรองรับในระดับเดียวกันต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยให้ความยาวก่อนการยึดตัวคงที่ น้ำหนักของเคเบิลคงที่ตลอดความยาว โดยให้เคเบิลนี้ไม่เกิดการยึดตัวตามแนวแกนใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์ดังนี้ ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดึงในแนวราบที่ปลายบน

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
แรงดึงที่ปลายบน	$T_H$	1, 10, 100, 300, 500, 1000, 10000	นิวตัน
ความยาวส่วนโค้ง	$S_t$	869	เมตร
น้ำหนักสุทธิของเคเบิล	$w$	9.48	นิวตันต่อเมตร
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$E$	$1.79 \times 10^6$	นิวตันต่อตารางเมตร
พื้นที่หน้าตัด	$A$	$4.15 \times 10^{-4}$	ตารางเมตร

จากกราฟรูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงในแนวราบที่ปลายบนของเคเบิลที่มีจุดรองรับในระดับเดียวกัน พบว่าเมื่อแรงดึงในแนวราบที่ปลายบนลดลง การแอ่นตัวของเคเบิลจะมีค่ามากขึ้น



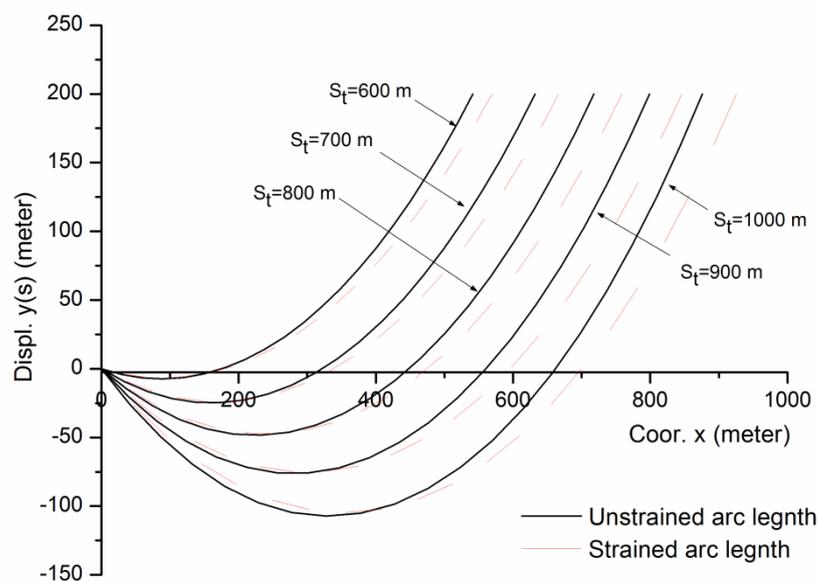
รูปที่ 4.2 สถานะสมดุลของเคเบิลต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดึงที่ปลายบน

### 4.3 สถานะสมดุลของเคเบิลเมื่อแปรเปลี่ยนความยาวส่วนโค้งของเคเบิลที่จุดรองรับต่างระดับ

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเคเบิลเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้ง โดยให้ ระยะจากจุดรองรับในแนวตั้ง แรงดึงในแนวราบที่ปลายบน น้ำหนักของเคเบิล และ โมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าคงที่และเท่ากันทุกเส้น โดยใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ในกรณีเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้งของเคเบิล

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
แรงดึงที่ปลายบน	$T_H$	5000	นิวตัน
ความยาวส่วนโค้ง	$S_t$	600, 700, 800, 900, 1000	เมตร
น้ำหนักสุทธิของเคเบิล	$w$	9.48	นิวตันต่อเมตร
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$E$	$1.79 \times 10^6$	นิวตันต่อตารางเมตร
ระยะทางจากจุดรองรับในแนวตั้ง	$y_H$	200	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	$A$	$4.15 \times 10^{-4}$	ตารางเมตร



รูปที่ 4.3 พฤติกรรมของเคเบิลที่มีจุดรองรับต่างระดับกันเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้งของเคเบิล

จากกราฟรูปที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้งของเคเบิลจะได้รูปร่างการวางตัวของเคเบิลไปในแนวทางเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้งเพิ่มมากขึ้นมุมที่ปลายล่างจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของเส้นทางเดินที่จุดต่ำสุดของเส้นโค้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาว และเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของเคเบิลที่เกิดการยืดตัวและไม่เกิดการยืดตัว จะพบว่าเคเบิลที่เกิดการยืดตัวก็ยังวางตัวไปในแนวทางเดียวกันกับเคเบิลก่อนการยืดตัว ความยาวส่วนโค้งของเคเบิลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุมุมที่ปลายล่างไม่มีความเปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากจุดรองรับของเคเบิลที่ปลายบนมีการเคลื่อนที่ในแนวราบได้จากกราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่าเคเบิลเกิดการยืดตัวและความยาวส่วนโค้งเพิ่มขึ้น

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ในกรณีเปลี่ยนแปลงระยะทางในแนวดิ่งจากจุดรองรับของเคเบิล

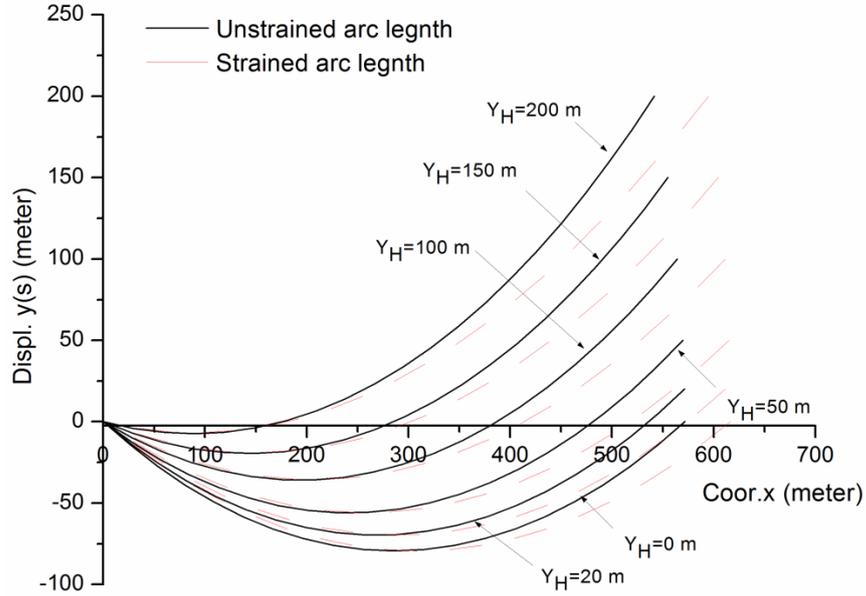
การวิเคราะห์พฤติกรรมของเคเบิลเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทางจากจุดรองรับในแนวดิ่งโดยให้ความยาวส่วนโค้งก่อนเกิดการยืดตัว แรงดึงในแนวราบที่ปลายบน น้ำหนักของเคเบิล และโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าคงที่และเท่ากันทุกเส้น โดยใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ในกรณีเปลี่ยนแปลงระยะทางในแนวดิ่งจากจุดรองรับ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
แรงดึงที่ปลายบน	$T_H$	5000	นิวตัน
ความยาวส่วนโค้ง	$s_t$	600	เมตร
น้ำหนักสุทธิของเคเบิล	$w$	9.48	นิวตันต่อเมตร
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$E$	$1.79 \times 10^{13}$	นิวตันต่อตารางเมตร
ระยะทางจากจุดรองรับในแนวดิ่ง	$y_H$	0, 20, 50, 100, 150, 200	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	$A$	$4.15 \times 10^{-4}$	ตารางเมตร

จากกราฟรูปที่ 4.4 แสดงการวางตัวของเคเบิลที่มีจุดรองรับที่ปลายบนในระดับต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าเมื่อมีการยกระดับมากขึ้นมุมที่ปลายล่างจะมีค่าลดลง การแอ่นตัวก็จะมีค่าน้อยลงสอดคล้องกันและมีแนวโน้มการเรียงตัวของเคเบิลแต่ละเส้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อกำหนดให้เคเบิลมีความสามารถในการยืดตัวเปรียบเทียบกับเคเบิลที่ไม่เกิดการยืดตัว ผลที่ได้คือ การวางตัวของเคเบิลเป็นไปในทิศทางเดียวกันมุมที่ปลายล่างไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก จากกราฟจะเห็นว่า ความยาวของ

เคเบิลมีค่าเพิ่มขึ้นและจุดรองรับที่ปลายขยับเคลื่อนที่ไปในแนวราบในระดับเดียวกันกับเคเบิลที่ยังไม่ยืดตัว



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมของเคเบิลที่จุดรองรับเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทางในแนวนิ่ง

#### 4.5 ผลของค่าความสามารถในการยึดตัวของท่อลำเลียงกรณีที่กำหนดแรงดึงที่ปลายบน

ค่าความสามารถในการยึดตัวของท่อลำเลียงของไหลเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่บ่งบอกว่าท่อลำเลียงของไหลนั้นมีความสามารถในการยึดตัวมากหรือน้อย เช่นถ้าค่าความสามารถในการยึดตัวสูง ท่อลำเลียงของไหลนั้นจะมีความสามารถในการยึดตัวสูง

การวิเคราะห์ในกรณีที่กำหนดแรงดึงที่ปลายบนของท่อลำเลียงของไหลของจะกำหนดให้ค่าความสามารถในการยึดตัวของท่อลำเลียงคือ  $T_H / EA$

ข้อมูลทางกายภาพเบื้องต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของค่าความสามารถในการยึดตัวของท่อลำเลียงของไหลที่มีต่อสถานะสมดุลมีดังนี้

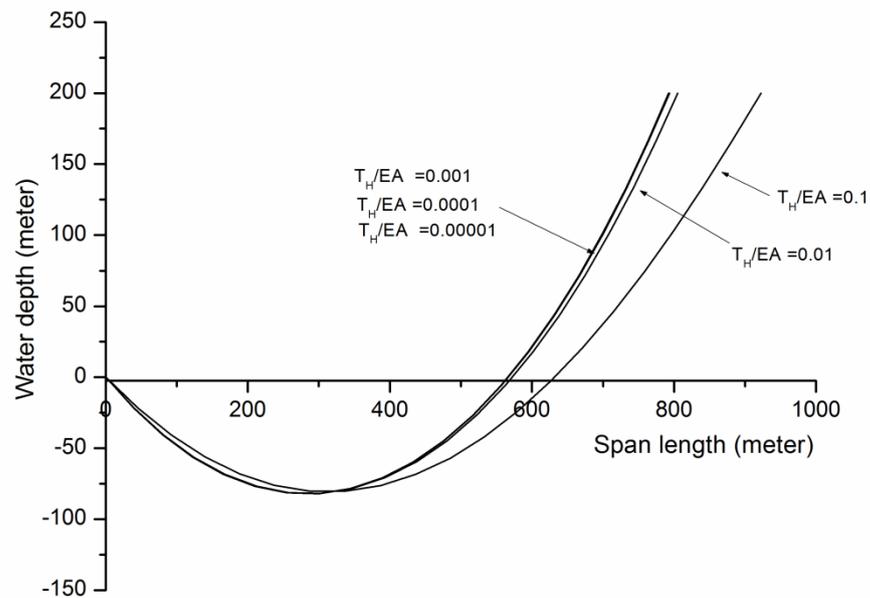
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์กรณีกำหนดให้แรงดึงที่ปลายบนคงที่

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
แรงดึงที่ปลายบน	$T_H$	5000	นิวตัน
น้ำหนักสุทธิของเคเบิล	$w$	9.48	นิวตันต่อเมตร
ระยะทางจากจุดรองรับในแนวตั้ง	$y_H$	200	เมตร
ความยาวส่วนโค้ง	$s_t$	900	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	$A$	$7.068 \times 10^{-2}$	ตารางเมตร
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$E$	$7.074 \times 10^5$ - $7.074 \times 10^9$	นิวตันต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการยืดตัวของเคเบิลในกรณีกำหนดแรงดึงที่ปลายบน

$T_H / EA$	แรงดึงที่ปลายบน	โมดูลัสความยืดหยุ่น	ความยาวของท่อน้ำเคเบิลหลังเกิดการยืดตัวตามแนวแกน
0.1	5000	$7.074 \times 10^5$	1011.46
0.01	5000	$7.074 \times 10^6$	910.5641
0.001	5000	$7.074 \times 10^7$	901.0503
0.0001	5000	$7.074 \times 10^8$	900.1049
0.00001	5000	$7.074 \times 10^9$	900.0105

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ในกรณีที่กำหนดแรงดึงปลายบนของท่อน้ำเคเบิลของไหล ถ้าท่อน้ำเคเบิลของไหลมีค่าความสามารถในการยืดตัวเพิ่มขึ้น พบว่าความยาวของท่อน้ำเคเบิลของไหลก่อนและหลังเกิดการยืดตัวตามแนวแกนมีค่าลดลง มุมที่ปลายล่างมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนมุมที่ปลายบนมีค่าลดลง ผลการวิเคราะห์ที่ได้ นำมาเขียนกราฟระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวระดับกับความลึกของน้ำทะเลโดยทำการแปรเปลี่ยนค่าความสามารถในการยืดตัว ดังแสดงในรูป 4.5



รูปที่ 4.5 ผลของการยึดตัวที่มีต่อตำแหน่งสมดุลของท่อลำเลียงกรณีกำหนดแรงดึงในแนวราบที่ปลายบน

จากลักษณะการวางตัวของท่อลำเลียงในรูป 4.5 จะเห็นได้ว่า ท่อลำเลียงที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นน้อย ๆ จะทำให้เกิดการยึดตัวได้มากแบบจำลองนี้ให้จุดรองรับที่ปลายบนสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระในแนวระดับ จุดปลายบนของท่อลำเลียงจึงเคลื่อนตัวเข้าเพราะที่จุดต่ำสุดของท่อลำเลียงเกิดการยึดและหย่อนตัวลง เมื่อเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากขึ้นค่าความสามารถในการยึดตัวของท่อลำเลียงจะลดลงจนเข้าใกล้ค่าศูนย์ หรือไม่เกิดการยึดตัว ลักษณะการวางตัวของท่อลำเลียงจะวางตัวเสมือนว่าไม่เกิดการยึดตัว จุดปลายบนมีการเคลื่อนที่น้อยมาก หรือสรุปได้ว่าถ้าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงมาก ๆ จะไม่มีผลกับการแปรเปลี่ยนตำแหน่งสมดุลของท่อลำเลียง

ในกรณีที่ท่อลำเลียงมีค่าความสามารถในการยึดตัวน้อย ๆ เช่น  $T_H/EA = 0.001$  และ  $0.0001$  พบว่าผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นสรุปได้ว่า เมื่อท่อลำเลียงมีค่าความสามารถในการยึดตัวน้อยกว่า  $0.001$  จะไม่มีผลกระทบต่อสภาวะ สมดุลของท่อลำเลียงของไหล

#### 4.6 สถานะสมดุลของเคเบิลเมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัวคงที่

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเคเบิลเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยให้ความยาวส่วนโค้งก่อนการยึดตัวคงที่และระยะทางจากจุดรองรับในแนวราบหลังการยึดตัวคงที่ ระยะทางจากจุดรองรับในแนวตั้งคงที่ และระยะทางจากจุดรองรับในแนวราบหลังการยึดตัวคงที่ น้ำหนักของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าคงที่และเท่ากันทุกเส้น โดยใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ดังนี้

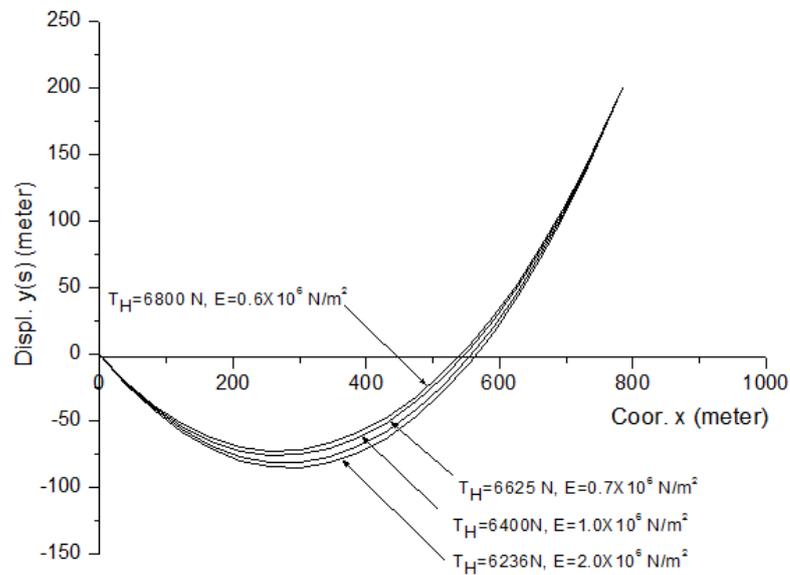
ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์กรณีกำหนดให้ระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัวคงที่

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ระยะทางจากจุดรองรับในแนวตั้ง	$Y_H$	200	เมตร
น้ำหนักสุทธิของเคเบิล	$w$	13	นิวตันต่อเมตร
ความยาวส่วนโค้ง	$S_t$	900	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	$A$	$4.15 \times 10^{-4}$	ตารางเมตร

ตารางที่ 4.9 ผลของการยึดตัวของเคเบิลเมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัวคงที่

โมดูลัสความยืดหยุ่น (นิวตันต่อตารางเมตร)	แรงดึงในแนวราบที่ปลายบน (นิวตัน)	ความยาวส่วนโค้งของเคเบิลก่อนการยึดตัว (เมตร)	ระยะทางในแนวราบก่อนการยึดตัว (เมตร)	ระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัว (เมตร)
$0.6 \times 10^6$	6800	900	575.3660	782.7667
$0.7 \times 10^6$	6625	900	603.8569	782.6454
$1.0 \times 10^6$	6400	900	655.6948	782.6842
$2.0 \times 10^6$	6236	900	718.3346	783.2312

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ในกรณีที่กำหนดระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัว ถ้าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าของแรงดึงในแนวราบที่ปลายบนที่ทำให้ระยะทางจากจุดรองรับในแนวราบหลังการยึดตัวมีค่าเท่ากันในแต่ละค่าของโมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง ระยะทางในแนวราบก่อนการยึดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น มุมที่ปลายล่างมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนมุมที่ปลายบนมีค่าลดลง ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในรูป 4.6



รูปที่ 4.6 ผลของการยึดตัวที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่างๆ ที่ระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัวคงที่

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อระยะทางในแนวราบหลังการยึดตัวมีค่าคงที่ที่ต่อลำเลียงมีการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันแรงดึงในแนวราบก่อนข้างคงที่หรือมีการแปรเปลี่ยนเล็กน้อยโดยแรงดึงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6515.15 นิวตัน