มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)

ประจำปีงบประมาณ 2554 - 2555

เรื่อง การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล

Development of Computer Program for Static Analysis of Marine Riser

คณะผู้วิจัย

ผศ. ดร. ชัยณรงค์ อธิสกุล — หัวหน้าโครงการ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ดร. วราภรณ์ จาตนิล — ผู้ร่วมโครงการ
ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 2 โปรแกรมที่มีชื่อว่า MarineRiser 2013 และ Driser 2013 โดยจะใช้สำหรับวิเคราะห์ผลทางสถิตศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่มีการวางตัวในแนวดิ่งและวางตัวเป็นเส้นโค้งคาร์ทีนารีตามลำดับ ในกรณีที่ท่อมีการวางตัวในแนวดิ่งนั้นสมการครอบคลุมปัญหาจะพัฒนาขึ้นภายใต้ทฤษฎีการเคลื่อนที่น้อยและใช้วิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอร์เร้นท์ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาตร์ของท่อที่มีการวางตัวเป็นเส้นโค้งคาร์ทีนารีจะพัฒนาขึ้นจากทฤษฎีการเคลื่อนที่มากร่วมกับหลักการงานและพลังงาน จากนั้นจะอาศัยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นช่วยในการหาคำตอบเชิงตัวเลขของท่อที่มีการวางตัวเป็นเส้นโค้งคาร์ทีนารี โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณหาคำตอบเชิงตัวเลขจะพัฒนาขึ้นจากภาษา Fortran 90 และเพื่อประโยชน์ของรูปแบบการใช้งานที่ง่ายต่อผู้ใช้จึงทำการพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้แบบกราฟฟิกขึ้นโดยอาศัยโปรแกรม Visual C# ตัวอย่างคำตอบเชิงวิเคราะห์ของปัญหาคานและคำตอบจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลจะใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษานี้ ผลการตรวจสอบพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงที่ปลายบน ค่าระยะเยื้องในแนวราบ แรงกระแสน้ำ และความต้านทานการดัดของท่อต่อสภาวะสมดุลสถิตและค่าโมเมนต์ดัดของท่อจะได้รับการศึกษาและนำเสนอไว้ในงานวิจัยฉบับนี้

คำสำคัญ : ท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล / โปรแกรมคอมพิวเตอร์ / การวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ / ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เร้นท์

Abstract

The purpose of this research is to develop the computer program for static analysis of marine riser. Two particular computer programs, namely MarineRiser 2013 and Driser 2013, are developed for static analysis of vertical marine riser and catenary riser respectively. In case of vertical marine riser, the governing equation is developed based on the small displacement theory and the finite difference method is used to obtain the numerical solutions. On the contrary, the model formulation of the catenary riser is developed based on the large displacement theory and the work-energy principle. The nonlinear finite element technique is used to evaluate the numerical solutions of the catenary riser. The computer program for numerical calculation is developed in Fortran90. For the sake of user-friendly features, the graphical user interface is also developed by using the Visual C#. The examples of the analytical solutions of beam and the finite element solutions of the marine riser are used to validate the numerical results obtained from this study. The results indicate that the programs developed in this study have an adequate accuracy for static analysis of the marine riser. The effects of the applied top tension, the horizontal offset, the current forces, and the bending rigidity on the static configuration and the bending moment of the riser are also investigated.

Keywords : Marine riser / Computer Program / Static Analysis / Finite Difference Method

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนที่ได้รับการจัดสรรจากรัฐ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย ทำให้การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะผู้วิจัย

29 กรกฎาคม 2556

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ จ
รายการตาราง ซ
รายการรูปประกอบ ญ
รายการสัญลักษณ์ ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาของปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง 3
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 8
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 9

บทที่ 2 ท่อที่วางตัวเกือบตรงในแนวดิ่ง (Near-Vertical Riser) 10
2.1 ทฤษฎีและสมมติฐาน 10
2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 11
2.2.1 สมการคลอบคลุมปัญหา 11
2.2.2 เงื่อนไขขอบเขต 13
2.2.3 แรงลาก 13
2.2.4 แรงดึงประสิทธิผลและน้ำหนักเสมือน 14
2.3 การหาคำตอบเชิงตัวเลข 15
2.3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เร้นท์ 15
2.3.2 ตัวอย่างการสร้างเมตริกส์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขของระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เร้นท์ 21

บทที่ 3 การแอ่นตัวมากของท่อในกรณีที่ท่อมีการวางตัวคล้ายเส้นโค้งคาร์ทีนารี (Catenary Risers) **27**

3.1 ทฤษฎีและสมมติฐาน 27

3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 28

3.2.1 จลนศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลใน 2 มิติ (Kinematics of 2-D Marine Riser) 28

3.2.2 สมการการแปรผัน (Variational Formulation) 30

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) 34

บทที่ 4 วิธีการติดตั้งและการใช้งานโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น **38**

4.1 ข้อกำหนดของการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น 39

4.2 ภาษาที่ใช้พัฒนาโปรแกรม 39

4.3 โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ท่อที่วางตัวเกือบตรงในแนวดิ่ง (Near-Vertical Riser) 39

4.3.1 คุณสมบัติและขีดความสามารถของโปรแกรม “MarineRiser 2013” 39

4.3.2 วิธีการติดตั้งโปรแกรม “MarineRiser 2013” 40

4.3.3 วิธีการใช้งานโปรแกรม “MarineRiser 2013” 42

4.4 โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์การแอ่นตัวมากของท่อในกรณีที่ท่อมีการวางตัวคล้ายเส้นโค้งคาร์ทีนารี (Catenary Risers) 46

4.4.1 คุณสมบัติและขีดความสามารถของโปรแกรม “Driser 2013” 46

4.4.2 วิธีการติดตั้งโปรแกรม “Driser 2013” 46

4.4.3 วิธีการใช้งานโปรแกรม “Driser 2013” 50

บทที่ 5 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล **52**

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรม 52

5.1.1 ปัญหาของคานที่รับน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวคาน 52

5.1.2 ปัญหาของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล 54

5.2 การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสภาวะสมดุลสถิตศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหล 59

5.2.1 ผลกระทบเนื่องจากแรงดึงที่ปลายบนของท่อ 59

5.2.2 ผลกระทบของแรงลากเนื่องจากกระแสน้ำทะเล 61
5.2.3 ผลกระทบของระยะเยื้องตามแนวราบระหว่างหลุมขุดเจาะใต้ทะเลกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำ 64
5.2.4 ผลกระทบเนื่องจากประเภทวัสดุของท่อ 66
5.2.5 ผลกระทบเนื่องจากความแข็งเชิงดัด 69
5.3 การศึกษาข้อจำกัดของโปรแกรม 78

บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ **83**
6.1 สรุปผล 83
6.2 ข้อเสนอแนะ 84

บรรณานุกรม **85**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	แสดงจำนวนแท่นขุดเจาะและผลิตปิโตรเลียมภายในอ่าวไทยตามแหล่งต่างๆแบ่งตามประเภทการใช้งาน สิ้นปีพุทธศักราช 2550 อ้างอิงจากกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติกระทรวงพลังงาน	7
2.1	การค่าอนุพันธ์จากการแบ่งย่อยแบบตรงกลาง	20
2.2	แสดงผลการจัดรูปเพื่อสร้างเมตริกซ์	26
4.1	สมรรถนะของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถรองรับการใช้งานของโปรแกรม	38
5.1	ข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของคานที่รับน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวคาน	53
5.2	เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวและค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” และโปรแกรม “Driser 2013” กับคำตอบแม่นตรง	53
5.3	ข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล	54
5.4	เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” และโปรแกรม “Driser 2013”	55
5.5	เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” และโปรแกรม “Driser 2013”	56
5.6	เปรียบเทียบค่ามุมซึ่งวัดจากแนวดิ่งไปยังเส้นโค้งการแอ่นตัวของท่อที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” และโปรแกรม “Driser 2013”	57
5.7	เปรียบเทียบค่าแรงดึงภายในท่อ (True Wall Tension) ที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” และโปรแกรม “Driser 2013”	58
5.8	แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหล	66
5.9	แสดงค่ามุมที่ปลายบน (α) และค่ามุมที่ปลายล่าง (β) โดยการเปรียบเทียบระหว่างการศึกษานี้ (คิด EI) กับสมการคาร์ทีนารี (ไม่คิด EI) ที่ระดับความลึกจากผิวน้ำ 1000 เมตร	70

5.10 แสดงการเปรียบเทียบการแอ่นตัวและโมเมนต์ดัดที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” กับโปรแกรม “Driser 2013” ที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อกำหนดให้มุมเอียง (ϕ) ระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำเท่ากับ 9 องศา 78

5.11 แสดงการเปรียบเทียบการแอ่นตัวและโมเมนต์ดัดที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” กับโปรแกรม “Driser 2013” ที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อกำหนดให้มุมเอียง (ϕ) ระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำเท่ากับ 10 องศา 79

5.12 แสดงการเปรียบเทียบการแอ่นตัวและโมเมนต์ดัดที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” กับโปรแกรม “Driser 2013” ที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อกำหนดให้มุมเอียง (ϕ) ระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำเท่ากับ 11 องศา 80

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	ท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล (Marine Riser)	2
1.2	ท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลแบบเส้นโค้งคาร์ทีนารี	2
1.3	แสดงภาพตัวอย่างโปรแกรม Orca Flex	4
1.4	แสดงภาพตัวอย่างโปรแกรม RiserDYN	5
1.5	แสดงภาพตัวอย่างโปรแกรม Optilay	5
2.1	แสดงภาพของชิ้นส่วนของท่อที่รับแรงดึงแล้วเกิดการแอ่นตัวน้อย ๆ	11
2.2	แสดงลักษณะการกระจายความเร็วของกระแสน้ำที่ระดับความลึกต่างๆ	14
2.3	ความหมายของค่าอนุพันธ์โดยประมาณและค่าอนุพันธ์แท้จริง	16
2.4	การเปรียบเทียบระหว่างค่าอนุพันธ์แม่นตรงกับค่าอนุพันธ์โดยประมาณแบบต่าง ๆ	18
2.5	แสดงภาพตัวอย่างการแบ่งส่วนของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล	21
3.1	ท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล (Marine Riser)	28
3.2	การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของท่อตามระยะที่วัดตามแนวดิ่ง	35
4.1	แสดงหน้าต่างแรกเมื่อเข้าสู่การติดตั้งโปรแกรม “MarineRiser 2013”	40
4.2	แสดงหน้าต่างสำหรับเลือกไดร์ที่ต้องการติดตั้งโปรแกรม	40
4.3	แสดงหน้าต่างยืนยันเพื่อที่จะเริ่มทำการลงโปรแกรม	41
4.4	แสดงหน้าต่างเมื่อการติดตั้งโปรแกรมเสร็จสมบูรณ์	41
4.5	แสดงไอคอนของโปรแกรม “MarineRiser 2013” ที่พร้อมใช้งาน	42
4.6	แสดงหน้าต่างของโปรแกรม “MarineRiser 2013” เพื่อป้อนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	42
4.7	แสดงหน้าต่างสำหรับการนำเข้าไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	43
4.8	แสดงผลการคำนวณจากโปรแกรม “MarineRiser 2013”	44
4.9	กราฟแสดงการแอ่นตัว (Displacement) ที่ตำแหน่งต่างๆของท่อ	44
4.10	กราฟแสดงโมเมนต์ดัด (Moment) ที่ตำแหน่งต่างๆของท่อ	45
4.11	กราฟแสดงมุม (Angle) ของแนวสัมผัสท่อที่กระทำกับแนวราบในตำแหน่งต่างๆของท่อ	45
4.12	กราฟแสดงแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงที่ผนังท่อ (True Wall Tension)	46

4.13	แสดงหน้าต่างแรกเมื่อเข้าสู่การติดตั้งโปรแกรม “Driser 2013”	47
4.14	แสดงหน้าต่างสำหรับเลือกไดร์ทีต้องการติดตั้งโปรแกรม	47
4.15	แสดงหน้าต่างยืนยันเพื่อที่จะเริ่มทำการลงโปรแกรม	48
4.16	แสดงหน้าต่างขณะเครื่องคอมพิวเตอร์กำลังทำการลงโปรแกรม	48
4.17	แสดงหน้าต่างเมื่อการติดตั้งโปรแกรมเสร็จสมบูรณ์	49
4.18	แสดงไอคอนของโปรแกรม “Driser 2013” ที่พร้อมใช้งาน	49
4.19	แสดงหน้าต่างของโปรแกรม “Driser 2013” เพื่อป้อนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	50
4.20	แสดงหน้าต่างสำหรับการนำเข้าไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	51
4.21	แสดงผลการคำนวณจากโปรแกรม “Driser 2013” และวิธีการบันทึกผลการวิเคราะห์	51
5.1	แสดงคานรับน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ 1000 kg/m ตลอดความยาวคาน	52
5.2	ลักษณะการวางตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลเมื่อกำหนดให้แรงดึงที่ปลายบนมีค่าเท่ากับ 1000 kN, 1500 kN และ 2000 kN	59
5.3	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้แรงดึงที่ปลายบนมีค่าเท่ากับ 1000 kN, 1500 kN และ 2000 kN	60
5.4	มุมซึ่งวัดจากแนวดิ่งไปยังเส้นโค้งการแอ่นตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้แรงดึงที่ปลายบนมีค่าเท่ากับ 1000 kN, 1500 kN และ 2000 kN	60
5.5	แรงดึงจริงที่ผนัง (True Wall Tension) ที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้แรงดึงที่ปลายบนมีค่าเท่ากับ 1000 kN, 1500 kN และ 2000 kN	61
5.6	ลักษณะการวางตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลเมื่อกำหนดให้ความเร็วของกระแสน้ำที่ผิวน้ำมีค่าเท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที 1.0 เมตร/วินาที และ 1.5 เมตร/วินาที	62
5.7	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ความเร็วของกระแสน้ำที่ผิวน้ำมีค่าเท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที1.0 เมตร/วินา	62
5.8	มุมซึ่งวัดจากแนวดิ่งไปยังเส้นโค้งการแอ่นตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ความเร็วของกระแสน้ำที่ผิวน้ำมีค่าเท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที 1.0 เมตร/วินาที และ 1.5 เมตร/วินาที	63
5.9	แรงดึงจริงที่ผนัง (True Wall Tension) ที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ความเร็วของกระแสน้ำที่ผิวน้ำมีค่า	63

	เท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที 1.0 เมตร/วินาที และ 1.5 เมตร/วินาที	
5.10	ลักษณะการวางตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ระยะเยื้องที่ผิวน้ำเท่ากับ 50 เมตร 100 เมตร และ 150 เมตร	64
5.11	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อกำหนดให้ระยะเยื้องที่ผิวน้ำเท่ากับ 50 เมตร 100 เมตร และ 150 เมตร	65
5.12	มุมซึ่งวัดจากแนวดิ่งไปยังเส้นโค้งการแอ่นตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ระยะเยื้องที่ผิวน้ำเท่ากับ 50 เมตร 100 เมตร และ 150 เมตร	65
5.13	แรงดึงจริงที่ผนัง (True Wall Tension) ที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ระยะเยื้องที่ผิวน้ำเท่ากับ 50 เมตร 100 เมตร และ 150 เมตร	66
5.14	ลักษณะการว่างตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลสำหรับท่อที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าและไทเทเนียมอัลลอยด์	67
5.15	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับท่อที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าและไทเทเนียมอัลลอยด์	67
5.16	มุมซึ่งวัดจากแนวดิ่งไปยังเส้นโค้งการแอ่นตัวของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับท่อที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าและไทเทเนียมอัลลอยด์	68
5.17	แรงดึงจริงที่ผนัง (True Wall Tension) ที่เกิดขึ้นภายในท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับท่อที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าและไทเทเนียมอัลลอยด์	68
5.18	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม α) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 1,000 เมตร	72
5.19	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายล่าง (มุม β) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 1,000 เมตร	72
5.20	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม α) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 300 เมตร	73
5.21	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม α) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 500 เมตร	73
5.22	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม α) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF	74

	และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 900 เมตร	
5.23	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม β) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 300 เมตร	74
5.24	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม β) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 500 เมตร	75
5.25	ผลการวิเคราะห์มุมที่ปลายบน (มุม β) กับระยะเยื้องต่อความลึก (O/D) ในแต่ละ TTF และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 900 เมตร	75
5.26	กราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 1,000 เมตร สำหรับมุมที่ปลายบน (มุม α) และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึก 1,000 เมตร สำหรับมุมที่ปลายล่าง (มุม β) โดยเปรียบเทียบระหว่างการศึกษานี้ (คิด Flexural Rigidity) กับกรณีศึกษาของเส้นโค้งคาร์ทีนารี (ไม่คิด Flexural Rigidity)	76
5.27	กราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับมุมที่ปลายบน (มุม α) และกราฟฟังก์ชันความชันของ TTF ที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับมุมที่ปลายล่าง (มุม β) โดยเปรียบเทียบระหว่างการศึกษานี้ (คิด Flexural Rigidity) กับกรณีศึกษาของเส้นโค้งคาร์ทีนารี (ไม่คิด Flexural Rigidity)	77
5.28	กราฟแสดงค่ามุมที่ปลายบนและปลายล่างที่เปลี่ยนไป ทำให้ท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเลนั้นหย่อนน้อยลง	77
5.29	กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างความลึกและค่าการแอ่นตัวของท่อขุดเจาะโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” กับโปรแกรม “Driser 2013” เมื่อกำหนดให้มุมเอียง (ϕ) ระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำเท่ากับ 9, 10 และ 11 องศา ตามลำดับ	80
5.30	กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างความลึกและค่าโมเมนต์ดัดของท่อขุดเจาะโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม “MarineRiser 2013” กับโปรแกรม “Driser 2013” เมื่อกำหนดให้มุมเอียง (ϕ) ระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำเท่ากับ 9, 10 และ 11 องศา ตามลำดับ	81
5.31	กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงวิกฤตและระยะเยื้องที่ผิวน้ำที่ระดับความลึกต่างๆที่ได้จากโปรแกรม “Driser 2013”	82

รายการสัญลักษณ์

ϕ	=	มุมเอียงระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำในสภาวะสมดุล
θ	=	มุมเอียงระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำในสภาวะที่มีแรงกระทำ
T	=	แรงดึงที่ปลายบน
T_e	=	แรงดึงที่ปลายบนเสมือน
M	=	โมเมนต์
Q	=	แรงเฉือน
w	=	น้ำหนักของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล
ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ
ρ_p	=	ความหนาแน่นของท่อขุดเจาะ
ρ_e	=	ความหนาแน่นของน้ำทะเล
ρ_i	=	ความหนาแน่นของของไหลภายในท่อขุดเจาะ
C_d	=	สัมประสิทธิ์ของแรงลาก
f_D	=	แรงลาก
V	=	ความเร็วของกระแสน้ำ
V_t	=	ความเร็วของกระแสน้ำในทิศขนานกับแนวแกนของท่อ
V_n	=	ความเร็วของกระแสน้ำในทิศตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ
V_i	=	ความเร็วของไหลภายในท่อ
X_i	=	ระยะที่วัดจากใต้ท้องทะเลถึงจุดที่พิจารณา
X_h	=	ความลึกทั้งหมดของน้ำทะเลวัดจากใต้ท้องทะเลถึงผิวน้ำ
n	=	ตัวเลขชี้กำลังที่ใช้กระจายความเร็วของกระแสน้ำ
w_A	=	น้ำหนักเสมือน
A_p	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ
A_e	=	พื้นที่หน้าตัดภายนอกของท่อ
A_i	=	พื้นที่หน้าตัดภายในของท่อ
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
s	=	ระยะตามแนวส่วนโค้งของท่อ
x	=	ระยะตามแนวดิ่งของท่อ

E	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
e	=	จำนวนชิ้นส่วน
α	=	มุมที่วัดจากแท่นขุดเจาะไปยังแกนอ้างอิงในแนวดิ่ง ในสภาวะที่มีแรงกระทำ
β	=	มุมเอียงระหว่างหลุมเจาะกับแท่นขุดเจาะที่ผิวน้ำ ในสภาวะที่มีแรงกระทำ
		กรณีวิเคราะห์แบบสมการเส้นโค้งคาร์ทีนารี
TTF	=	อัตราส่วนระหว่างแรงที่ปลายบนต่อน้ำหนักประสิทธิผลของท่อตลอดความยาว
δU_a	=	พลังงานความเครียดเสมือนเนื่องจากการยืดตัวตามแนวแกน
δU_b	=	พลังงานความเครียดเสมือนเนื่องจากการดัด
δW_W	=	งานเสมือนเนื่องจากน้ำหนักปรากฏของท่อ
δW_H	=	งานเสมือนเนื่องจากแรงกระแสน้ำ
δW_I	=	งานเสมือนเนื่องจากการขนถ่ายของไหลภายในท่อ
S_t	=	ความยาวส่วนโค้งทั้งหมดของท่อขุดเจาะและลำเลียงของไหลใต้ทะเล
ε	=	ค่าความเครียด ณ สภาวะสมดุลสถิตศาสตร์
ν	=	อัตราส่วนปัวซอง
p_n	=	แรงเนื่องจากแรงกระแสน้ำในทิศตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ
p_t	=	แรงเนื่องจากแรงกระแสน้ำในทิศขนานกับแนวแกนของท่อ
D_0	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ
C_{Dn}	=	สัมประสิทธิ์ของแรงลากในทิศตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ
C_{Dt}	=	สัมประสิทธิ์ของแรงลากในทิศขนานกับแนวแกนของท่อ
$\{d_i\}$	=	เวกเตอร์ของดีกรีอิสระของชิ้นส่วนย่อย
$\{Q_i\}$	=	เวกเตอร์ของดีกรีอิสระของระบบรวมทั้งหมด
h	=	ความยาวที่วัดในแนวดิ่งในแต่ละชิ้นส่วนย่อย
N	=	จำนวนชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด
y_{top}	=	ความยาวท่อขุดเจาะทั้งหมด
π_k	=	ฟังก์ชันพลังงานของชิ้นส่วนย่อย
k	=	ลำดับของชิ้นส่วนย่อย
i	=	ลำดับที่ของดีกรีอิสระ
O	=	ระยะเยื้องที่ผิวน้ำ

D = ความลึกของท่อวัดในแนวดิ่ง

L = ความยาวของท่อขุดเจาะ

T_n = ความหนาของท่อขุดเจาะ