บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เคเบิลเป็นโครงสร้างพื้นฐานอย่างหนึ่งที่ถูกนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ทั้งโครงสร้างที่อยู่บนชายฝั่งทะเล และโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเล ลักษณะของเคเบิลที่ถูกนำไปใช้งานกันในปัจจุบันได้แก่ เคเบิลที่ใช้ยึดทุ่นลอยในทะเล เคเบิลที่ใช้ลากวัตถุในทะเล เคเบิลที่ใช้ยึดแท่นขุดเจาะน้ำมันในทะเล สะพานขึง สะพานแขวนเคเบิล สายจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างเคเบิลใต้ทะเล จะมีลักษณะเป็นสายยาว มีความยืดหยุ่น และรับแรงตามแนวแกนอย่างเดียว กล่าวคือไม่มีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นในสายเคเบิล โดยจะถูกแรงจากภายนอกมากระทำ คือ แรงลากเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำ แรงลอยตัว น้ำหนักของเคเบิลเอง และแรงดันน้ำที่ระดับความลึกที่พิจารณา เมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเคเบิล และเกิดการยืดตัวตามแนวแกน ทั้งนี้ภายใต้การเคลื่อนที่ของเคเบิลจะอยู่ภายใต้สามสภาวะคือ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable equilibrium state), สภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ (Unstable equilibrium state), และสภาวะวิกฤต (Critical state) ในการศึกษาปัญหาของเคเบิลนั้น ก็เพื่อต้องการที่จะหาตำแหน่งการวางตัวของเคเบิล หาแรงดึงวิกฤต (Critical tension) ที่ยังคงทำให้เคเบิลอยู่ในสภาวะที่สมดุล และหาความยาวที่เหมาะสม เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

โครงสร้างเคเบิลที่อยู่ในทะเล ส่วนใหญ่จะรับแรงที่มีทิศทางไม่อยู่ในแนวระนาบเดียวกับเคเบิลมากระทำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเลด้วยระบบพิกัดสามมิติ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ทิศทางของแรงที่มากระทำได้ทุกทิศทาง โดยจะใช้ระบบพิกัดทรงกระบอกเป็นระบบพิกัดที่ใช้ในการอ้างอิง ปัญหาของเคเบิลนั้นเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear problem) ซึ่งการหาคำตอบที่มีรูปแบบแน่นอน (Closed-form solution) จะทำได้ยาก แต่ก็สามารถหาคำตอบได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

1.2 การวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเล

เคเบิลใต้ทะเลที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จะเป็นเคเบิลที่แขวนอยู่บนจุดรองรับที่ต่างระดับกัน (Inclined cable) โดยจำเป็นต้องทราบจุดยึดรั้งของเคเบิลทั้งปลายบนและปลายล่าง ซึ่งถ้าแยกตามประเภทการรับน้ำหนักของเคเบิลสามารถแบ่งเคเบิลได้ออกเป็นสามลักษณะคือ เคเบิลใต้ทะเลภายใต้น้ำหนักกระทำของตัวเอง (Catenary marine cables), เคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว (Neutrally buoyant marine cables), และเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป (General marine cables) ในการวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเลแบ่งได้เป็นสองประเภทตามลักษณะเงื่อนไขทางกายภาพ คือ กรณีทราบค่าความยาวของ

เคเบิลก่อนเกิดการยืดตัวตามแนวแกน และกรณีทราบค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล เพื่อเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม

1.2.1 กรณีทราบค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัวตามแนวแกน

กรณีนี้จะทราบตำแหน่งจุดยึดรั้งที่ปลายบน ปลายล่าง และความยาวทั้งหมดของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัวตามแนวแกน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล และตำแหน่งการวางตัวของเคเบิลในสภาวะสมดุล การวิเคราะห์นั้นจะใช้ระเบียบวิธียิงเป้า (Shooting method) กรณีนี้จะใช้ความยาวส่วนโค้งของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัวตามแนวแกนเป็นตัวแปรอิสระ

1.2.2 กรณีทราบค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล

กรณีนี้จะทราบตำแหน่งจุดยึดรั้งที่ปลายบน ปลายล่าง และแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล ซึ่งจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความยาวทั้งหมดของเคเบิลก่อน และหลังเกิดการยืดตัวตามแนวแกน รวมถึงตำแหน่งการวางตัวของเคเบิลในสภาวะสมดุล การวิเคราะห์นั้นจะใช้ระเบียบวิธียิงเป้า กรณีนี้จะใช้แรงดึงที่ปลายบนของเคเบิลเป็นตัวแปรอิสระ

1.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

Berteaux [1] ปี 1976 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสองมิติ ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนเช่น เคเบิลใต้ทะเลภายใต้น้ำหนักกระทำของตัวเอง, เคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว, และทั้งสองกรณีรวมกันเรียกว่า เคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป โดยทำการกำหนดค่าแรงดึงที่ปลายบน และคำนวณหาความยาวของเคเบิล โดยไม่คำนึงถึงการยืดตัวตามแนวแกน นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์หาสมการสมดุลทางสถิตยศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติในระบบพิกัดฉาก อีกทั้งยังทำการวิเคราะห์พลศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเลอีกด้วย

Goodman และ Breslin [2] ปี 1976 ได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเล โดยคำนึงถึงการยืดตัวตามแนวแกนแต่ไม่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนป๋วซองเพราะมีค่าน้อยมาก กล่าวคือ กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลก่อน และหลังเกิดการยืดตัวตามแนวแกนมีค่าเท่ากัน

Henghold และ Russell [3] ปี 1976 ได้ทำการวิเคราะห์สภาวะสมดุลและหาค่าความถี่ธรรมชาติของเคเบิลในอากาศ โดยที่ทราบค่าความยาวของเคเบิล และคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล แต่ไม่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนป๋วซอง โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์อิลิเมนต์แบบไม่

เชิงเส้น (Nonlinear finite element method) ช่วยในการหาคำตอบเชิงตัวเลข พร้อมทั้งศึกษาสภาวะสมดุลของเคเบิลที่มีค่าความยืดตัวสูงภายใต้น้ำหนักกระทำของเคเบิลเอง

De Zoysa [4] ปี 1978 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ ด้วยระเบียบวิธียิงเป้า เป็นกรณีที่ทราบค่าความยาวของเคเบิล และไม่คำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกน

Huddleston [5] ปี 1981 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลในอากาศในสองมิติ และสามมิติ โดยระเบียบวิธียิงเป้า เป็นกรณีที่ทราบค่าความยาวของเคเบิล และคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกน โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องจากอัตราส่วนป๋วซอง สามารถวิเคราะห์ได้ในกรณีของน้ำหนักกระทำแบบต่างๆ เช่น แบบแผ่กระจาย และแบบกระทำเป็นจุด

Seck-Hong [6] ปี 1983 ได้ทำการวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเลในสองมิติ ภายใต้น้ำหนักแผ่กระทำคงที่ตลอดความยาวของเคเบิลทั้งในแนวราบ และแนวดิ่ง โดยแสดงคำตอบที่มีรูปแบบแน่นอน เฉพาะกรณีเคเบิลภายใต้น้ำหนักกระทำของตัวเอง

Banjwu และ Iradj [7] ปี 1984 ได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ของเคเบิลในอากาศ โดยทราบค่าความยาวของเคเบิล และคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกน แต่ไม่คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องจากอัตราส่วนป๋วซอง ทำการศึกษาถึงค่าความสามารถในการยืดตัวของเคเบิลที่มีผลต่อแรงดึงที่ปลาย และช่วงพาด

Ogawa [8] ปี 1984 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ โดยวิธี Linearisation method เป็นกรณีที่ทราบค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัวตามแนวแกน และแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล โดยคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนแต่ไม่คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องจากอัตราส่วนป๋วซอง ทำการศึกษาค่าความสามารถในการยืดตัวของเคเบิลที่มีต่อสภาวะสมดุล

Chucheepsakul และ Huang [9] ปี 1990 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสองมิติ โดยทราบค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล และไม่คำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกน โดยใช้วิธีการแปรผัน (Variational method) ในการวิเคราะห์สมการของเคเบิล และใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข

Chucheepsakul และ Subwonglee [10] ปี 1991 ได้ทำการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับงานวิจัย [9] โดยทำการวิเคราะห์ในสามมิติ และพิจารณาว่าแรงลากในแนวสัมผัสกับเคเบิลมีค่าน้อยจึงไม่นำมาพิจารณา

Huang [11] ปี 1992 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสองมิติ และคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล แต่ไม่คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากอัตราส่วนปัวซอง ทำการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีคือ กรณีที่ทราบค่าแรงดึงที่ปลายบน และกรณีที่ทราบค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัว วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ วิธีการแปรผัน

Wang, Cheong, และ Chucheepsakul [12] ปี 1993 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ โดยพิจารณาผลของแรงลากในแนวสัมผัส แต่ไม่คำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล ใช้วิธี Shooting-optimization ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข

Huang และ Chucheepsakul [13] ปี 1994 ได้ทำการวิเคราะห์เคเบิลในกรณีทั่วไป โดยคำนึงถึงการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล ผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งวิเคราะห์ตามนิยามของ Lagrange ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับ งานวิจัยโดยทั่วไปซึ่งมักจะวิเคราะห์ตามนิยามของ Euler

Huddleston และ Ham [14] ปี 1994 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลในอากาศในสองมิติ เป็นกรณีที่ทราบค่าความยาวของเคเบิล และคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล รวมทั้งคำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากอัตราส่วนปัวซองอีกด้วย โดยใช้ระเบียบวิธีรุงเง-คุตตา (Runge-Kutta method) ช่วยในการหาคำตอบ

Friswell [15] ปี 1995 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ โดยไม่คำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล และพิจารณาผลของแรงลากอันเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำได้ถูกต้องยิ่งขึ้น ด้วยระเบียบวิธีรุงเง-คุตตาอันดับที่สี่ (Forth-order Runge-Kutta method) นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัวตามแบบจำลองของงานวิจัย [1] ซึ่งสามารถหาค่าแรงดึงวิกฤตได้ โดยใช้ระเบียบวิธียิงเป้าในการหาคำตอบเชิงตัวเลข

Chucheepsakul, Haung, และ Laohapotjanart [16] ปี 1995 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสองมิติ โดยวิเคราะห์ทั้งในกรณีที่ทราบค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล และกรณีทราบค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัว โดยคำนึงถึงผลกระทบของการยืดตัวตามแนวแกน และ

อัตราส่วนปัวซองที่มีผลต่อสภาวะสมดุลของเคเบิล โดยใช้วิธีการแปรผัน ในการวิเคราะห์หาสมการของเคเบิล และใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข

Chucheepsakul และ Wang [17] ปี 1997 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว ในสองมิติโดยพิจารณาแรงลากเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำในทิศทางขนานกับผิวน้ำทะเล ไม่คำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกนของเคเบิล สามารถหาค่าแรงดึงวิกฤตที่ยังคงทำให้เคเบิลอยู่ในสภาวะที่สมดุลได้

Chucheepsakul, Srinil, และ Petchpeart [18] ปี 2003 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ โดยวิเคราะห์ทั้งในกรณีที่ทราบค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล และกรณีทราบค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัว โดยคำนึงถึงผลกระทบของการยืดตัวตามแนวแกน โดยใช้วิธีการแปรผันในการวิเคราะห์หาสมการของเคเบิล และใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์กับระเบียบวิธียิงเป้าในการหาคำตอบเชิงตัวเลข

ชัยนันทน์ มะชรา [19] ปี 2546 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติด้วยระบบพิกัดทรงกระบอก โดยวิเคราะห์ทั้งในกรณีที่ทราบค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล และกรณีทราบค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัว โดยคำนึงถึงผลกระทบของการยืดตัวตามแนวแกน โดยใช้วิธีการแปรผันในการวิเคราะห์หาสมการของเคเบิล และใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข

Wang, Huang, และ Deng [20] ปี 2008 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลใต้ทะเล ซึ่งเป็นเคเบิลลากจูง (Towed cable) ในสามมิติ โดยคำนึงถึงผลของการยืดตัวตามแนวแกน แต่ไม่คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากอัตราส่วนปัวซอง โดยใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection method)

จะเห็นว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับเคเบิลใต้ทะเลในอดีต ส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเลในระบบพิกัดฉาก มีเพียงงานวิจัย [19] เท่านั้นที่ใช้ระบบพิกัดทรงกระบอกเป็นพิกัดอ้างอิงในการวิเคราะห์สมดุลทางสถิตยศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเล ซึ่งใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข และการวิเคราะห์ในอดีตส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งการวางตัวของเคเบิลที่สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาทั้งสามสภาวะได้แก่ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ และสภาวะวิกฤต โดยใช้ระเบียบวิธียิงเป้า ซึ่งสามารถทำการคำนวณได้รวดเร็วและแม่นยำ ไม่ต่างจากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ เหมาะสมกับผู้ที่สนใจ อีกทั้งยังเป็นอีกหนึ่งแนวทางเลือกในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรม

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์สมดุลสถิตของเคเบิลในระบบพิกัดทรงกระบอก เพื่อหาสมการในสภาวะสมดุลของเคเบิล

2. ศึกษาปัญหาของเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัวที่สามารถยึดตัวตามแนวแกนได้คือ เคเบิลที่ไม่คิดแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง คิดแต่แรงลากที่มากระทำในแนวราบ เพื่อหาตำแหน่งการวางตัวของเคเบิลในสภาวะสมดุล

3. ศึกษาปัญหาของเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไปที่สามารถยึดตัวตามแนวแกนได้คือ เคเบิลที่คิดแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง และแรงลากเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำที่มากระทำ เพื่อหาตำแหน่งการวางตัวของเคเบิลในสภาวะสมดุล

4. ศึกษาผลของแรงกระทำที่ไม่อยู่ในแนวระนาบเดียวกับการวางตัวของเคเบิลในสามมิติ

5. ศึกษาผลกระทบของการยึดตัวตามแนวแกนที่มีต่อสภาวะสมดุลของเคเบิลใต้ทะเล

6. ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธียิงเป้าในการหาคำตอบเชิงตัวเลข