

ผลตอบสนองทางพลศาสตร์สำหรับเคเบิลยึดโยงแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำเมื่อรับการกระตุ้นที่ปลายด้านบน Dynamic Responses of a Floating Solar Mooring Cable with the Top End Excitation

ธนิยพรรณ ศรีมนตรีภักดี^{1,*} การันต์ คล้ายฉ่ำ² ชัยณรงค์ อธิสกุล³ สมชาย ชูชีพสกุล⁴ และ ชัยยุทธ ชินณะราศรี⁵

^{1,3,4,5} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: S.thaniyaphat@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลตอบสนองทางพลศาสตร์ เนื่องจากการกระตุ้นที่ปลายด้านบนของเคเบิลที่ใช้ในการยึดโยงระบบโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเคเบิลจะพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการงานเสมือน การวิเคราะห์หาสภาวะสมดุลสถิตแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเคเบิลจะทำโดยอาศัยกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ผลตอบสนองของเคเบิลเนื่องจากการกระตุ้นที่ปลายด้านบนจะคำนวณโดยวิธีการอินทิเกรตตามเวลาด้วยกระบวนการของ Newmark เงื่อนไขของการกระตุ้นที่ปลายด้านบนทั้งในแนวราบและแนวตั้งจะนำไปกำหนดรวมเข้ากับสมการการเคลื่อนที่ของระบบผ่านกระบวนการ penalty งานวิจัยนี้นำเสนอผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดการกระตุ้นและความถี่ของการกระตุ้นที่มีต่อค่าผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของเคเบิล

คำสำคัญ: การกระตุ้นที่ปลายด้านบน, เคเบิลยึดโยง, โซลาร์เซลล์ลอยน้ำ, ผลตอบสนองทางพลศาสตร์, วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research aims to investigate the effect of top end excitation on the dynamic responses of a mooring cable, which is installed in a floating photovoltaic system. The mathematical model formulation of the elastic cable is developed based on the principle of virtual work. The nonlinear static configurations of cables are evaluated by using the nonlinear finite element procedure. The Newmark's time integration is applied to determine the dynamic responses of a mooring cable due to the harmonic top end excitation. The constraint conditions of the top end excitation are imposed in the equation of motions by using the penalty method. According to the top end sway and heave excitation, the effects of amplitude and frequency of the top end excitation on the dynamic responses of cable are investigated.

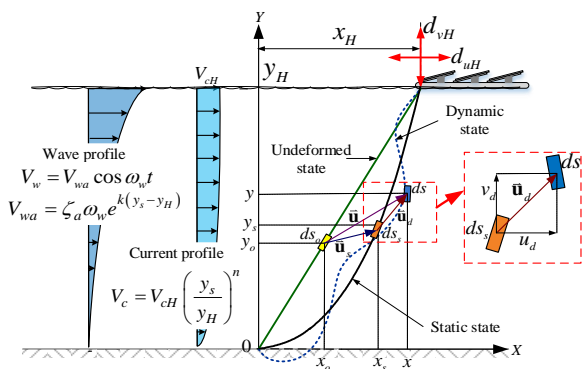
Keywords: Dynamic responses, Finite element method, Floating solar photovoltaic, Mooring Cable, Top end excitation

1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่น้ำและพื้นที่ชุ่มน้ำประมาณร้อยละ 30 ซึ่งบริเวณผิวน้ำนั้นไม่ได้ใช้ประโยชน์เท่าที่ควร ทำให้เกิดแนวคิดที่จะสร้างโซลาร์ฟาร์มลอยน้ำ โดยการสร้างโซลาร์ฟาร์มลอยน้ำจะเป็นการประหยัดพื้นที่บนดินขนาดใหญ่โดยการทำโซลาร์ฟาร์มบนผิวน้ำ เช่น เขื่อน อ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้พื้นที่ว่างเปล่าบนผิวน้ำให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดการระเหยของน้ำ เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์จะปกคลุมผิวน้ำ [1] และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยเนื่องจากการระเหยของน้ำช่วยลดอุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์ได้ [2] โดยทั่วไปโครงสร้างของโซลาร์ฟาร์มลอยน้ำจะทำเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ เพื่ออำนวยความสะดวก เคลื่อนย้ายและติดตั้ง จากงานวิจัยของ Lee และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการออกแบบและติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ โดยโครงสร้างทำจาก CFRP ซึ่งทนต่อการสึกและได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ CFRP เพื่อนำมาใช้กำหนดกำลังที่ยอมให้สำหรับใช้ในการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างโซลาร์ฟาร์มลอยน้ำต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น แรงลม แรงลอยตัว แรงคลื่นผิวน้ำ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะทำให้แผงโซลาร์เซลล์เกิดการเคลื่อนที่ จากการศึกษาพบว่า การออกแบบจุดต่อแบบยึดหมุนหรือแบบกึ่งแข็งจะช่วยลดผลตอบสนองจากคลื่นน้ำได้ดีกว่าจุดต่อแบบยึดแน่น [4] โครงสร้างที่ยึดด้วยสายยึดโยงที่ติดตั้งมีแอมพลิจูดการเคลื่อนที่น้อยกว่าสายยึดโยงแบบหย่อน [5-6] หรือการติดตั้งพุนติดกับสายยึดโยงจะช่วยลดแรงดึงในสายยึดโยงได้แต่จะทำให้โครงสร้างมีแอมพลิจูดการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น [6] ซึ่งการยึดโยงโครงสร้างโซลาร์ฟาร์มลอยน้ำด้วยเคเบิลในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานรองรับ โดยจากการศึกษาพบว่าความถี่ธรรมชาติของเคเบิลจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อโมดูลส์ยึดหยุ่นหรือสัมประสิทธิ์มวลเพิ่มเนื่องจากน้ำหนักค่าเพิ่มขึ้น [7] จากงานวิจัยของ สุวิทย์ รัตนศรีกุล [8] ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเลที่มีการกระตุ้นด้วยแรงสั่นฮาร์โมนิกที่จุดรองรับที่ผิวน้ำ โดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ซึ่งทำการอินทิเกรตด้วยวิธี Newmark พบว่าความถี่หย่อนของเคเบิลมีผลต่อความถี่มูลฐานของเคเบิลโดยที่แอมพลิจูดการสั่นมีผลเพียงเล็กน้อย จากงานวิจัยของ จิรพล เล็กโล่ง [9] ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของท่อลำเลียงของไหลใต้ทะเลภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกที่ปลายด้านบนโดยวิธีการอินทิเกรตของ

Newmark จากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์แรงลากมีจะทำให้ผลตอบสนองลดลงเข้าสู่ภาวะสม่ำเสมอ ความเร็วของของไหล แรงดึงที่ปลายบนและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ จากงานวิจัยของ Klaycham และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของท่อลำเลียงของเหลวใต้ทะเลเมื่อถูกกระตุ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเรือที่ปลายด้านบน โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นในการหาค่าการวางตัวในสภาวะสมดุลสถิตของท่อสร้างสมการการเคลื่อนที่โดยใช้หลักการของงานและพลังงานเสมือนและตัดแปลงสมการการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการ penalty เพื่อให้สมการการเคลื่อนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของเรือที่ปลายบน และวิเคราะห์หาผลตอบสนองโดยวิธีอินทิเกรตตามเวลาด้วยกระบวนการ Newmark ทั้งนี้จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่าการศึกษาผลตอบสนองของเคเบิลยึดโยงแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำยังมีจำนวนไม่มากนัก การศึกษานี้จึงมุ่งศึกษาผลตอบสนองของเคเบิลในระบบสายยึดโยงแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลตอบสนองของเคเบิลภายใต้การกระตุ้นที่ปลายด้านบน โดยอาศัยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการมาแล้ว [10] เป็นต้นแบบ และใช้วิธีการ penalty ในการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ที่ปลายด้านบนเข้ากับสมการการเคลื่อนที่ ร่วมกับวิธีการอินทิเกรตตามเวลาด้วยกระบวนการ Newmark สำหรับการศึกษาผลตอบสนองของเคเบิล โดยจะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากค่าความถี่และแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ที่มีต่อการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ของเคเบิล

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1 ลักษณะการวางตัวของเคเบิลในสภาวะสมดุล

ในงานศึกษาวิจัยนี้จะศึกษาเคเบิลที่วางตัวในน้ำโดยที่ปลายด้านล่างจะยึดอยู่ที่ระดับผิวดินใต้น้ำและปลายด้านบนจะยึดโยงกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ระดับผิวน้ำ โดยจุดรองรับที่ปลายด้านล่างและปลายด้านบนของเคเบิลจะเป็นแบบยึดหมุน (Hinge) ดังรูปที่ 1 ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเคเบิลและท้องน้ำ โดยการวิเคราะห์หาผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของเคเบิลภายใต้การกระตุ้นที่ปลายด้านบนจำเป็นต้องหาตำแหน่งเคเบิลในสภาวะสมดุลสถิตก่อนเพื่อใช้เป็นสภาวะเริ่มต้นก่อนที่จะมีแรงกระตุ้นทางพลศาสตร์ โดยการวิเคราะห์เคเบิลในสภาวะสมดุลสถิตจะใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Klaycham และคณะ [10]

2.1 สมการการเคลื่อนที่

การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของเคเบิล อาศัยหลักการพลังงาน โดยพิจารณาพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียรูปในแนวแกน งานภายนอกที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำของคลื่นน้ำ กระแสน้ำ และแรงเฉื่อยของเคเบิลจากมีการเคลื่อนที่โดยเขียนสมการการเคลื่อนที่ของเคเบิลดังนี้

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{D}}_d\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{D}}_d\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{D}_d\} = \{\mathbf{F}\} \quad (1)$$

โดยที่เมทริกซ์ $[\mathbf{M}]$ $[\mathbf{C}]$ และ $[\mathbf{K}]$ คือเมทริกซ์มวล เมทริกซ์ความหน่วง และสตีเฟนเมทริกซ์ ตามลำดับสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$[\mathbf{M}] = \sum_{i=1}^{nelem} \int_0^l \left\{ s'_s (m_p + C_a^*) [\mathbf{N}_d]^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{N}_d] \right\} dy_s \quad (2)$$

$$[\mathbf{C}] = \sum_{i=1}^{nelem} \int_0^l \left\{ [\mathbf{N}_d]^T s'_s \begin{bmatrix} C_{eqx}^* & C_{eqxy}^* \\ C_{eqxy}^* & C_{eqy}^* \end{bmatrix} [\mathbf{N}_d] \right\} dy_s \quad (3)$$

$$[\mathbf{K}] = \int_0^l \left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{N}'_d]^T \left(\frac{N_{as}}{s'_s} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{N}'_d] \\ + [\mathbf{N}'_d]^T \left(\frac{EA_p}{s'_s{}^3} \right) \begin{bmatrix} x'_s{}^2 & x'_s \\ x'_s & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{N}'_d] \end{array} \right\} dy_s \quad (4)$$

$\{\mathbf{F}\}$ คือเวกเตอร์ของแรงจากกระแสน้ำและคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\{\mathbf{F}\} = \sum_{i=1}^{nelem} \int_0^l [\mathbf{N}_d]^T s'_s \left\{ \begin{array}{l} C_{Dx}^* (2V_c V_w + V_w^2) \\ + C_M^* \dot{V}_w \\ C_{Dxy1}^* (2V_c V_w + V_w^2) \end{array} \right\} dy_s \quad (5)$$

$$\{\mathbf{D}_d\} = \sum_{i=1}^{nelem} \{\mathbf{d}_d\} \quad (6)$$

$$\{\dot{\mathbf{D}}_d\} = \sum_{i=1}^{nelem} \{\dot{\mathbf{d}}_d\} \quad (7)$$

$$\{\ddot{\mathbf{D}}_d\} = \sum_{i=1}^{nelem} \{\ddot{\mathbf{d}}_d\} \quad (8)$$

โดยที่ค่าคงที่และตัวแปรต่าง ๆ ในสมการข้างต้นสามารถหาได้โดย

$$C_M^* = \rho_e A_e C_M \quad (9)$$

$$C_M = C_a + 1 \quad (10)$$

$$C_a^* = \rho_e A_e C_a \quad (11)$$

$$m_p = \rho_p A_p \quad (12)$$

$$V_c = V_{cH} \left(\frac{y_s}{y_H} \right)^n \quad (13)$$

$$V_w = V_{wa} \cos \omega_w t \quad (14)$$

$$V_{wa} = \zeta_a \omega_w e^{k(y_s - y_H)} \quad (15)$$

$$k = \omega_w^2 / g \quad (16)$$

$$s'_s = (1 + x_s'^2)^{1/2} \quad (17)$$

เมื่อ ρ_e	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กก./ลบ.ม.)
A_e	คือ พื้นที่หน้าตัดของเคเบิล (ตร.ม.)
C_a	คือ สัมประสิทธิ์มวลเพิ่มเนื่องจากน้ำ
m_p	คือ มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเคเบิล (กก./ม.)
ρ_p	คือ ความหนาแน่นของเคเบิล (กก./ลบ.ม.)
A_p	คือ พื้นที่หน้าตัดของเคเบิล (ตร.ม.)
E	คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเคเบิล (นิวตัน/ตร.ม.)
V_{cH}	คือ ความเร็วกระแสที่ผิวหน้า (เมตร/วินาที)
ζ_a	คือ แอมพลิจูดของคลื่น (เมตร)
ω_w	คือ ความถี่ของคลื่น (เรเดียน/วินาที)
y_H	คือ ความลึกน้ำ (เมตร)
g	คือ ความเร่งเนื่องจากโน้มถ่วง (เมตร/วินาที ²)

สัญลักษณ์ (') ในงานวิจัยคืออนุพันธ์เทียบกับตัวแปร y_s โดยที่ x_s และ y_s คือพิกัดของเคเบิลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในสภาวะสมดุลสถิต N_{as} คือแรงดึงตามแนวแกน ตัวแปร C^*_{eqx} , C^*_{eqy} , C^*_{eqxy} , C^*_{Dx} และ C^*_{Dxy} คือสัมประสิทธิ์แรงลากและสัมประสิทธิ์แรงหน่วง ตัวแปร n ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1/7 ตามการกระจายความเร็วของกระแสในท่อน้ำ [10] $[N_d]$ คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันรูปร่างที่เป็นพหุนามดีกรี 5 $\{d_d\}$, $\{\dot{d}_d\}$ และ $\{\ddot{d}_d\}$ คือเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งที่ node ในแต่ละเอลิเมนต์ของเคเบิล โดยรายละเอียดสามารถดูได้จากงานของ Klaycham และคณะ [10]

2.2 สมการการเคลื่อนที่ของเคเบิลภายใต้การกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองโดยทั่วไปสามารถใช้สมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (1) ในการคำนวณหาผลตอบสนองเนื่องจากแรงกระแสน้ำและคลื่น แต่ไม่สามารถหาผลตอบสนองเนื่องจากการกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ได้โดยตรง จึงได้สร้างสมการเงื่อนไขสำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์โดยอาศัยวิธี penalty ซึ่งการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ในงานวิจัยนี้สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$d_{uH} = u_0 \sin(\omega_u t + \phi_u) \quad (18)$$

$$d_{vH} = v_0 \sin(\omega_v t + \phi_v) \quad (19)$$

เมื่อ d_{uH}	คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบของแผงโซลาร์เซลล์ (ม.)
d_{vH}	คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ (ม.)
u_0	คือ แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวราบ (ม.)
v_0	คือ แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (ม.)
ω_u	คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่ในแนวราบ (เรเดียน/วินาที)
ω_v	คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (เรเดียน/วินาที)
Φ_u	คือ มุมเฟสของการเคลื่อนที่ในแนวราบ (เรเดียน)
Φ_v	คือ มุมเฟสของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (เรเดียน)

โดยสมการการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากวิธีการ penalty เขียนในสมการเงื่อนไขให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\{t\} = [K_\alpha]^T \{D_d\} - \{P\} = \{0\} \quad (20)$$

เมทริกซ์ $[K_\alpha]$ คือเมทริกซ์ที่บ่งบอกถึงตำแหน่งของ node ที่ถูกยึดจึงสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[K_\alpha]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

เวกเตอร์ $\{P\}$ คือเงื่อนไขการยึดรั้งที่ปลายด้านบนของเคเบิลซึ่งก็คือฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} u_0 \sin(\omega_u t + \phi_u) \\ v_0 \sin(\omega_v t + \phi_v) \end{Bmatrix} \quad (22)$$

หลังจากการทำให้เงื่อนไขยึดรั้งตามสมการที่ (20) มีค่าต่ำสุด ($\partial t / \partial D_d = 0$) และรวมเข้ากับสมการการเคลื่อนที่ (สมการที่ (1)) จะได้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของเคเบิลภายใต้การกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$[M]\{\ddot{D}_d\} + [C]\{\dot{D}_d\} + [K]^* \{D_d\} = \{F\}^* \quad (23)$$

โดยที่

$$[K]^* = [K] + [K_\alpha][\alpha][K_\alpha]^T \quad (24)$$

$$\{F\}^* = \{F\} + [K_\alpha][\alpha]\{P\} \quad (25)$$

เมทริกซ์ $[\alpha]$ คือเมทริกซ์ตัวคูณ penalty ซึ่งเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[\alpha] = \alpha [I] \quad (26)$$

โดย α คือตัวคูณ penalty และ $[I]$ คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด 2x2 โดยการเคลื่อนที่ของเคเบิลที่ปลายด้านบนจะสอดคล้องกับเงื่อนไขการกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อค่า α เข้าใกล้อนันต์ ซึ่งรายละเอียดสามารถดูได้จากงานของ Klaycham และคณะ [10] โดยจะนำสมการที่ (23) ไปใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของเคเบิล โดยใช้วิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของ Newmark ในการคำนวณผลตอบสนอง จะกำหนดให้ค่าคงที่การอินทิเกรตเท่ากับ $\gamma = 1/2$, $\beta = 1/4$

3. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเชิงตัวเลข

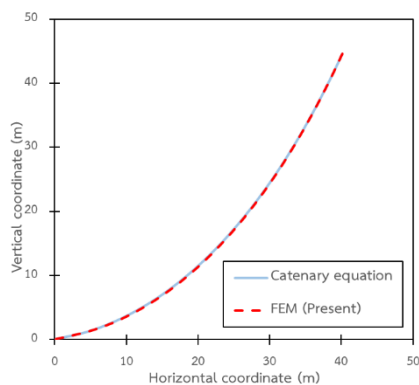
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เคเบิลในสภาวะสมดุลสถิต ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยสมการคานารี โดยพารามิเตอร์ของเคเบิลที่ใช้ แสดงใน

ตารางที่ 1 ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของเคเบิลในลำดับต่อไป

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่ากราฟของเคเบิลที่ได้จากผลการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้มาจากสมการคาทานารีมีความใกล้เคียงกันมาก โดยความคลาดเคลื่อนสูงสุดในแนวตั้งคิดเป็นร้อยละ 2.79 และความคลาดเคลื่อนสูงสุดในแนวราบคิดเป็นร้อยละ 1.98 ซึ่งมีความแม่นยำที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ของเคเบิลต่อไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเคเบิลและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ค่า
โมดูลัสยืดหยุ่น, E (นิวตัน/ตร.ม.)	1.5860×10^{12}
เส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิล, D_c (ม.)	0.0635
ความหนาแน่นของเคเบิล, ρ_p (กก/ลบ.ม.)	7916.8
ความหนาแน่นน้ำ, ρ_e (กก.ลบ.ม.)	997.0
ความลึกน้ำ, y_H (ม.)	44.57
ระยะเยื้องในแนวราบจากปลายบนถึงปลายล่าง, x_H (ม.)	44.12
แรงดึงที่ปลายบน, N_{aH} (นิวตัน)	15655
สัมประสิทธิ์แรงลากในแนวตั้งฉากเคเบิล, C_{Dn}	0.70
สัมประสิทธิ์แรงลากในแนวแกนเคเบิล, C_{Dt}	0.03
สัมประสิทธิ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำ, C_a	1.0
แอมพลิจูดของคลื่น, ζ_a (เมตร)	1.0
ความถี่ของคลื่น, ω_w (เรเดียน/วินาที)	1.6352



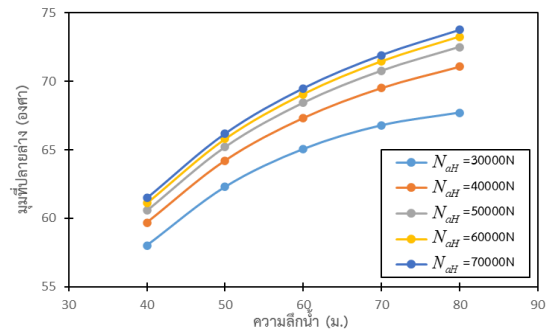
รูปที่ 2 การวางตัวของเคเบิลในสภาวะสมดุล

3.2 สภาวะสมดุลสถิตของเคเบิล

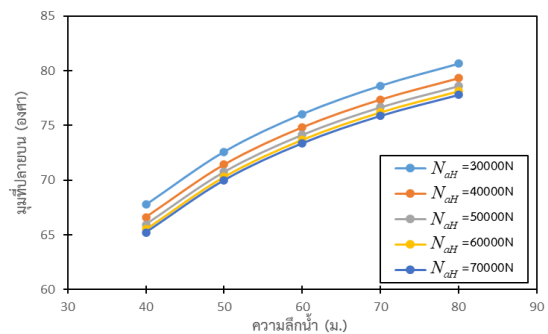
การหาสภาวะสมดุลสถิตของเคเบิลจะทำการวิเคราะห์โดยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเยื้องในแนวราบระหว่างปลายบนและปลายล่างของเคเบิล แรงดึงที่ปลายด้านบนและความลึกน้ำ เพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่ปลายบนและค่ามุมที่ปลายล่างของเคเบิล ซึ่งค่ามุมที่ทำการวิเคราะห์เป็นค่ามุมที่วัดจากแนวราบไปจนถึงแนวแกนหรือแนวสัมผัสของเคเบิล

จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อค่าความลึกน้ำมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมที่ปลายบนและปลายล่างมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง และเมื่อค่าแรงดึงที่ปลายบนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมที่

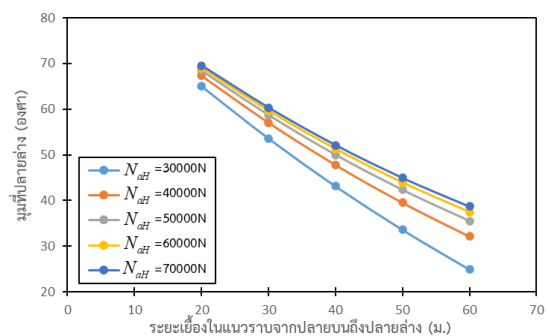
ปลายล่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง และส่งผลให้ค่ามุมที่ปลายบนมีแนวโน้มลดลงด้วยอัตราที่ลดลง จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าระยะเยื้องในแนวราบจากปลายบนถึงปลายล่างเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มุมที่ปลายล่างและมุมที่ปลายบนมีแนวโน้มลดลงด้วยอัตราที่ลดลง



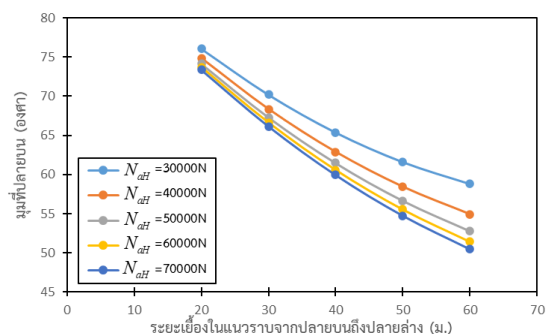
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมที่ปลายล่างของเคเบิลกับความลึกน้ำ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมที่ปลายบนของเคเบิลกับความลึกน้ำ

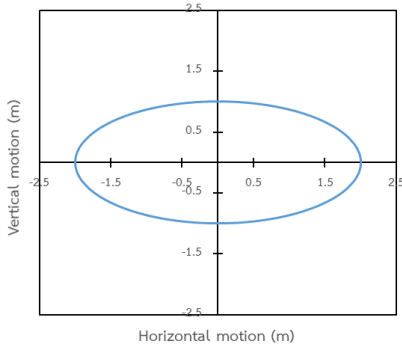


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมที่ปลายล่างของเคเบิลกับระยะเยื้องในแนวราบ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมที่ปลายบนของเคเบิลกับระยะเยื้องในแนวราบ

3.3 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของเคเบิลจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์

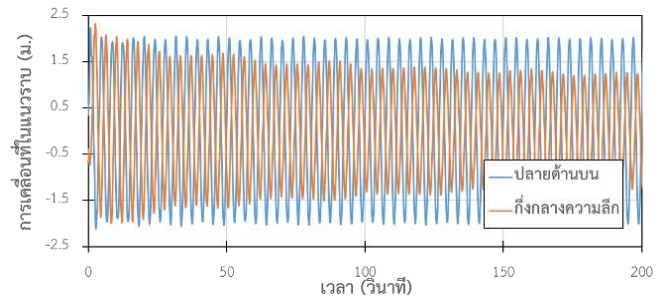


รูปที่ 7 ลักษณะการกระตุ้นที่ปลายด้านบนของเคเบิล

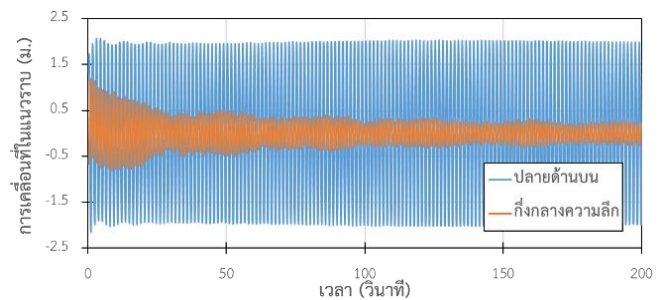
การวิเคราะห์ผลตอบสนองของเคเบิลเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ปลายด้านบน (การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ตามรูปที่ 7) จะทำการวิเคราะห์โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ ได้แก่ ความถี่และแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่จะมีทั้งสองทิศทางคือ การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและการเคลื่อนที่ในแนวราบ ซึ่งอัตราส่วนแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวราบต่อการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเท่ากับสอง และกำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งมีมุมเฟสนำการเคลื่อนที่ในแนวราบเท่ากับ 90 องศา กล่าวคือการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์จะเคลื่อนที่เป็นวงรีบนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งความถี่ของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 ค่าคือ ω_1 , ω_2 , ω_3 และ ω_4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.6352, 2.5761, 3.5981 และ 4.5182 เรเดียน/วินาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติ 4 โหมดแรกของเคเบิลที่จะทำการศึกษาวิจัย แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ที่จะทำการศึกษามีทั้งหมด 4 ค่าคือ A_1 , A_2 , A_3 และ A_4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เท่าของแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในรูปที่ 7 โดยที่อัตราส่วนแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวราบต่อแนวดิ่งยังคงเดิม (เท่ากับ 2) เช่น A_3 จะมีแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวราบเท่ากับ 3 เมตรและแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเท่ากับ 1.5 เมตร ซึ่งการวิเคราะห์ผลตอบสนองของเคเบิลจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์จะอธิบายด้วยประวัติเวลาการเคลื่อนที่ของเคเบิลที่ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกและที่ตำแหน่งปลายด้านบน

การศึกษามูลของความถี่การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ต่อการเคลื่อนที่ของเคเบิล จะกำหนดให้แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ A_2 จากรูปที่ 8(ก) และ 8(ข) พบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ในแนวราบของเคเบิลที่ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกมีค่าลดลง และเคเบิลที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่มาก แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของเคเบิลจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะคงที่ในเวลาต่อมา แต่เคเบิลที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่น้อยจะมีอัตราการลดลงของแอมพลิจูดที่ช้ากว่าและใช้เวลานานกว่าที่เคเบิลจะเข้าสู่สภาวะ Steady state จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ใน

แนวดิ่ง พบว่ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันดังรูปที่ 9(ก) และ 9(ข) แต่แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเคเบิลที่ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกจะมีขนาดใหญ่กว่าแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของเคเบิลที่ตำแหน่งปลายบน

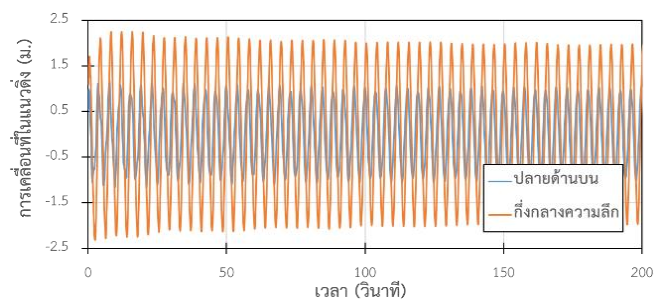


(ก) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ ω_1

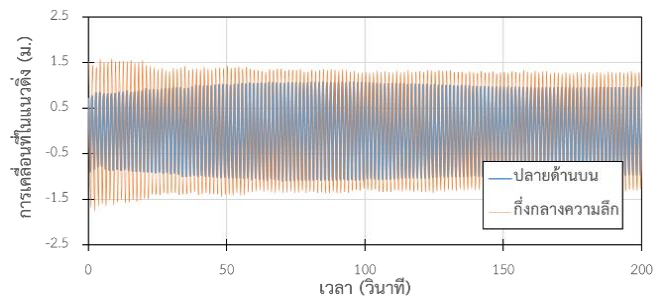


(ข) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ ω_4

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบกับเวลาเมื่อแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ต่าง ๆ

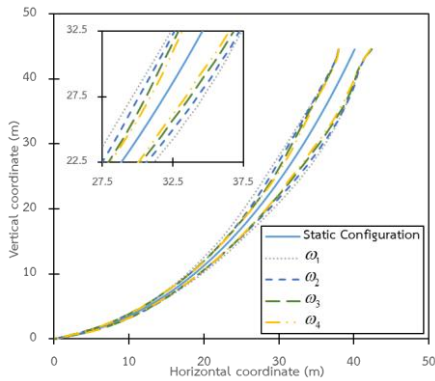


(ก) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ ω_1

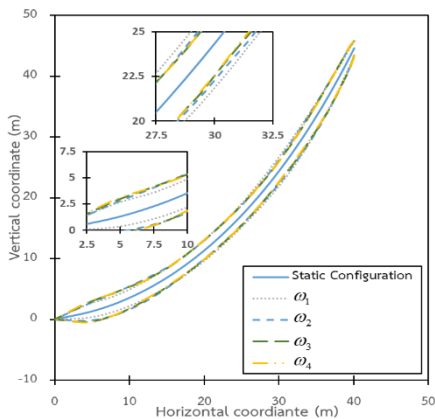


(ข) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ ω_4

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับเวลาเมื่อแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ต่าง ๆ



(ก) การเคลื่อนที่ในแนวราบของเคเบิล



(ข) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเคเบิล

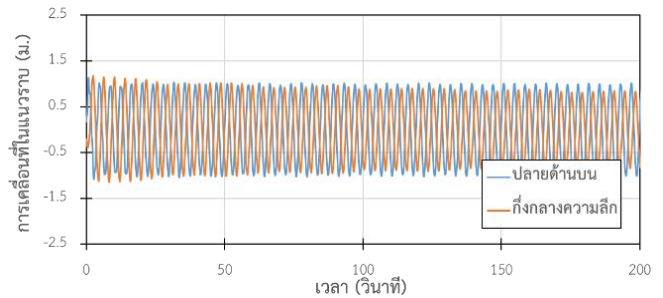
รูปที่ 10 ขอบเขตการเคลื่อนที่สูงสุดของเคเบิลเมื่อแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ดังแสดงในรูปที่ 10(ก) พบว่าในช่วงกึ่งกลางความลึกของเคเบิล ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวราบลดลงเมื่อความถี่การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาเคเบิลที่ตำแหน่งบริเวณปลายด้านบนหรือปลายด้านล่าง ในรูปที่ 10(ข) พบว่าเมื่อความถี่การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มมากขึ้น ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งสูงสุดของเคเบิลในบริเวณปลายด้านล่างจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่บริเวณปลายด้านบนของเคเบิลจะมีค่าลดลง

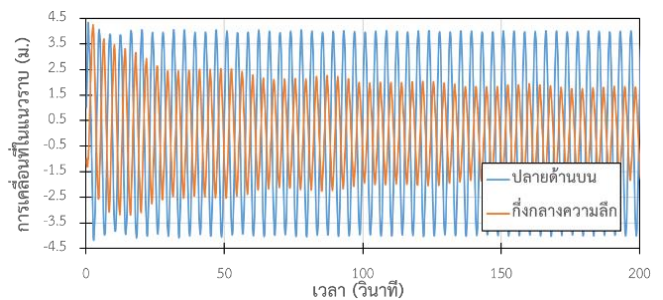
การศึกษาผลของแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ต่อการเคลื่อนที่ของเคเบิล จะกำหนดให้ความถี่การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ ω_1 ในรูปที่ 11(ก) และ 11(ข) พบว่าเมื่อแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ในแนวราบทั้งตำแหน่งกึ่งกลางความลึกและตำแหน่งปลายด้านบนของเคเบิลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ที่ปลายด้านบนจะเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่งกึ่งกลางความลึก สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเคเบิลตามรูปที่ 12(ก) และ 12(ข) จะมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่สูงสุดของเคเบิลที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ดังแสดงในรูปที่

13(ก) และ 13(ข) พบว่าเมื่อแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของเคเบิลเพิ่มขึ้นทั้งแนวราบและแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น

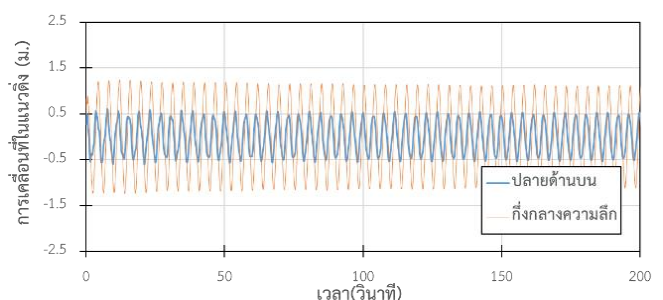


(ก) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาด A_1

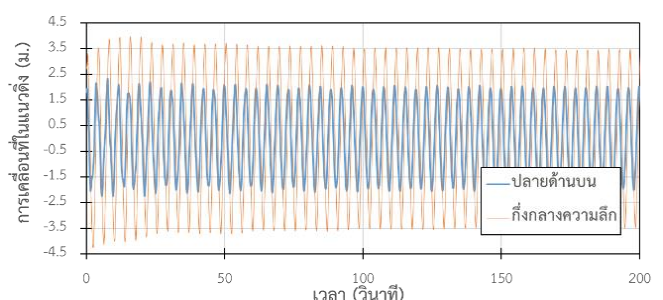


(ข) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาด A_4

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบกับเวลาเมื่อแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาดต่าง ๆ

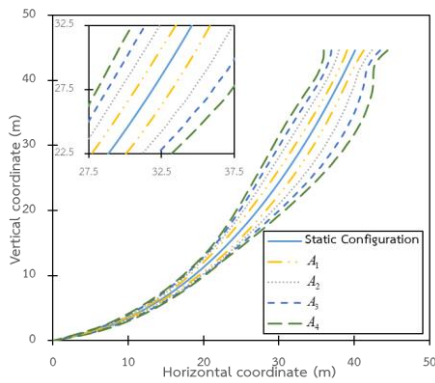


(ก) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาด A_1

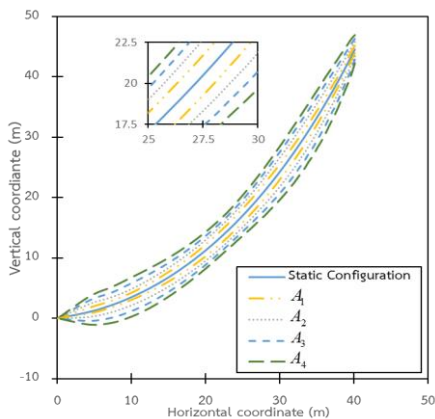


(ข) แผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาด A_4

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับเวลาเมื่อแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาดต่าง ๆ



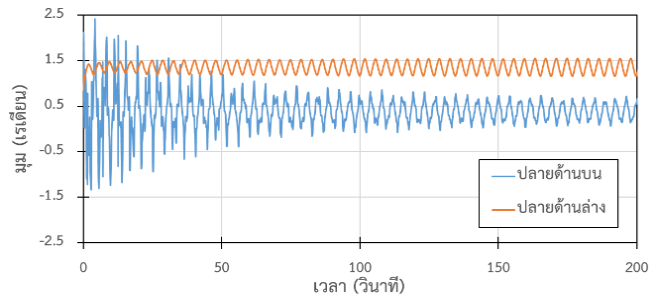
(ก) การเคลื่อนที่ในแนวราบของเคเบิล



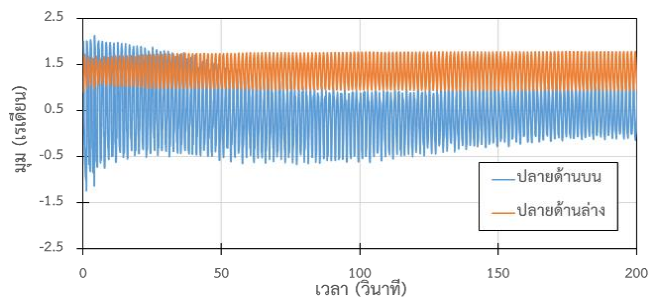
(ข) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเคเบิล

รูปที่ 13 ขอบเขตการเคลื่อนที่สูงสุดของเคเบิลเมื่อแรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาดต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของค่ามุมที่ปลายด้านบนและปลายด้านล่างของเคเบิลดังแสดงรูปที่ 14(ก) และ 14(ข) พบว่าเมื่อความถี่การเคลื่อนที่ของแรงแซลาเซลล์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แอมพลิจูดของค่ามุมที่บริเวณปลายด้านบนและปลายด้านล่างของเคเบิลมีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 15(ก) และ 15(ข) เมื่อแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแรงแซลาเซลล์มีค่าเพิ่มมากขึ้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่ปลายด้านบนและปลายด้านล่างมีแนวโน้มเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ดังแสดงในรูปที่ 14(ก) และ 14(ข) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมกับเวลาที่ปลายด้านบนและปลายด้านล่าง พบว่าแอมพลิจูดค่ามุมที่ปลายด้านบนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แต่แอมพลิจูดของค่ามุมที่ปลายด้านล่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 14(ก), 14(ข), 15(ก) และ 15(ข)

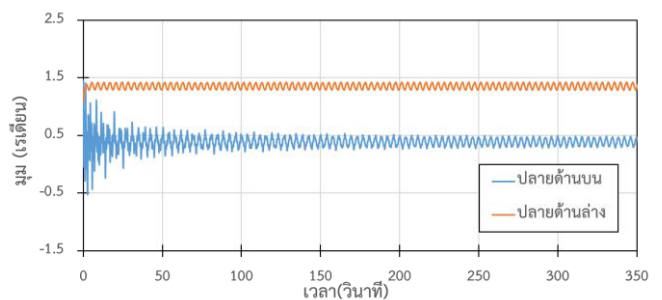


(ก) แรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ ω_1

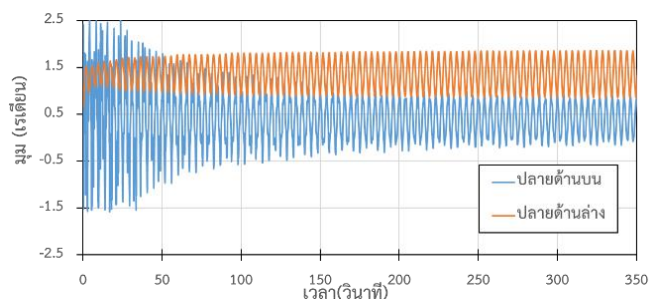


(ข) แรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ ω_4

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมกับเวลาเมื่อแรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ต่าง ๆ



(ก) แรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาด A_1



(ข) แรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาด A_4

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมกับเวลาเมื่อแรงแซลาเซลล์เคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดขนาดต่าง ๆ

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์เคเบิลในสภาวะสมดุลสถิต ระดับความลึกน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมที่ปลายด้านบนและปลายด้านล่างมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเยื้องในแนวราบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่ามุมที่ปลายด้านบนและปลายด้านล่างลดลง และเมื่อแรงดึงที่ปลายด้านบนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามุมที่ปลายบนเพิ่มขึ้นและทำให้มุมที่ปลายล่างลดลง จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของเคเบิลภายใต้การกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ พบว่าแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ในแนวราบที่ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของเคเบิลมีค่ามากกว่าที่ปลายด้านบนและแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งมีค่าน้อยกว่าตำแหน่งปลายด้านบนในสภาวะคงที่ และเมื่อเวลาผ่านไป แอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของเคเบิลและค่ามุมที่ปลายด้านบนจะลดลงแต่แอมพลิจูดของค่ามุมที่ปลายด้านล่างจะเพิ่มขึ้น โดยความถี่และแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์มีผลต่อระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของเคเบิล เมื่อความถี่มีค่ามากขึ้นส่งผลให้แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของเคเบิลลดลงแต่แอมพลิจูดของค่ามุมจะเพิ่มขึ้น และเมื่อแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่และแอมพลิจูดของค่ามุมที่ปลายทั้งสองด้านของเคเบิลเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Taboada, M.E., Cáceres, L., Graber, T.A., Galleguillos, H.R., Cabeza, L.F. and Rojas, R. (2017). Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modelling. *Renewable Energy*, 105, pp. 601-615.
- [2] Liu, L., Wang, Q., Lin, H., Li, H., Sun, Q. and Wennersten, R. (2017). Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems. *Energy Procedia*, 105, pp. 1136-1142.

- [3] Lee, Y., Joo, H. and Yoon, S. (2014) Design and installation of floating type photovoltaic energy generation system using FRP members. *Solar Energy*, 108, pp. 13-27.
- [4] Wang, C.M., and Tay, Z.Y. (2011). Very Large Floating Structures: Applications, Research and Development. *Procedia Engineering*, 14, pp. 62-72.
- [5] Wang, K., Er, G., and Lu, V.P. (2018). Nonlinear dynamical analysis of moored floating structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 98, pp. 189-197.
- [6] Ghafari, H. and Dardel, M. (2018). Parametric study of catenary mooring system on the dynamic response of the semi-submersible platform. *Ocean Engineering*, 153, pp. 319-332.
- [7] นรากร ศรีนิล (2543). การลั่นอิสระในสามมิติของเคเบิลในทะเลที่ยึดตัวได้. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [8] สุวิทย์ รัตนศรีกุล (2545). ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของเคเบิลใต้น้ำ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [9] จิรพล เล็กโล่ง (2549). ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของท่อลำเลียงของไหลใต้ทะเลจากแรงกระตุ้นที่ปลายบน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] Klaycham, K., Athisakul, C. and Chucheepsakul, S. (2020). Nonlinear Response of Marine Riser with Large Displacement Excited by Top-End Vessel Motion using Penalty Method. *International Journal of Structure Stability and Dynamics*, 20(4), pp. 1-25.