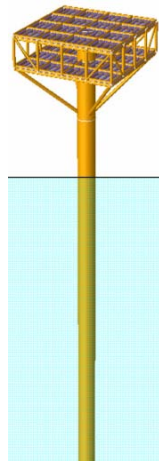


บทที่ 2 ทฤษฎีและข้อกำหนดในการออกแบบ

2.1 โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็ก

โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็ก (Minimum offshore structures) มีหลายชนิดให้เลือกใช้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน จำนวนหลุมเจาะ (wells) ความลึกของน้ำทะเล และน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กจะมีหลุมเจาะตั้งแต่ 1-6 หลุม [6] มีน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 50 – 150 ตัน[6] และมีช่วงระดับความลึกของน้ำทะเลตั้งแต่ 0-60 เมตร[6] ซึ่งสามารถจำแนกชนิดโครงสร้างแท่นหลุมผลิตปิโตรเลียมขนาดเล็กตามรูปทรงภายนอกของโครงสร้างได้ดังนี้

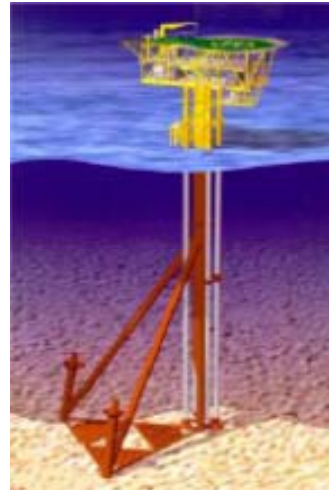


รูปที่ 2.1 โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบขาเดี่ยว (Monopod) [1]

โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบขาเดี่ยว เป็นโครงสร้างอย่างง่ายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอ่าวเม็กซิโก ตัวของโครงสร้างประกอบไปด้วยเสากลมกลวง (Caisson) โดยส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.2 เมตร ถึง 3 เมตร ขึ้นอยู่กับการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างและสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ โดยโครงสร้างในส่วนที่เป็นเสาเข็มและฐานรองรับจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าตำแหน่งอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนโครงสร้างส่วนบน (Topside Structure) จะมีลักษณะที่ไม่แตกต่างไปจากโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กอื่นๆ มากนัก ขึ้นอยู่กับการใช้งานที่แตกต่างกันไป โครงสร้างชนิดนี้จะมีปัญหาเรื่องความแข็งแรงของโครงสร้าง ซึ่งจะมีความอ่อนไหวต่อแรงกระทำจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการคิดผลกระทบทางด้านพลศาสตร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบเสาเดี่ยวที่มีค้ำยัน (Braced monopod) [7]

โครงสร้างหลุมผลิตแบบเสาเดี่ยวที่มีค้ำยันตามรูปที่ 2.2 นี้สามารถจำแนกตามลักษณะการค้ำยันได้สองแบบ โดยในรูปที่ 2.2 (ก) จะเป็นการค้ำยันแบบสามทิศทางที่ทำมุมเท่าๆ กัน ซึ่งในกรณีนี้จะใช้กับการค้ำยันที่ไม่รู้ทิศทางของคลื่นที่แน่นอนและนิยมใช้ฐานรากเป็นแบบเข็มดูด (Suction pile) ส่วนในรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งเป็นการค้ำยันเพียงสองทิศทาง จะใช้ในกรณีที่ทราบทิศทางของคลื่นที่แน่นอนแล้ว และนิยมใช้ฐานรากเป็นแบบเสาเข็มตอก จากการศึกษาวิจัยของหลายๆ ท่านพบว่า โครงสร้างชนิดนี้เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงจากสิ่งแวดล้อมได้ดีที่สุด และเป็นโครงสร้างที่สามารถรื้อถอนเคลื่อนย้ายไปติดตั้งที่อื่นได้ง่าย เหมาะสำหรับใช้เป็นโครงสร้างหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมที่มีปริมาณสำรองที่ไม่มากนัก ซึ่งคาดว่าจะมีปริมาณสำรองที่สามารถผลิตได้ 5-10 ปี จากนั้นจะทำการย้ายโครงสร้างชนิดนี้ไปที่แหล่งผลิตอื่น ที่มีระดับความลึกน้ำทะเลใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบเสาเดี่ยวที่มีค้ำยันตามรูปที่ 2.2 (ก) โดยโครงสร้างชนิดนี้ได้เริ่มมีการนำมาใช้งานครั้งแรกที่อ่าวแม็กซีโก ในปี ค.ศ.1995 โดยบริษัทอะโมโค (Amoco) ได้เป็นผู้คิดค้นทำการออกแบบและติดตั้งโดยบริษัทเปโตรมารินเอ็นจิเนียริงเท็กซ์ต (PME) และตั้งชื่อโครงสร้างชนิดนี้ว่า Davy และ Bessemer ซึ่งได้ตั้งชื่อตามผู้คิดค้นออกแบบ โครงสร้างชนิดนี้ขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [10] เป็นรูปตัวอย่างการติดตั้งโครงสร้างแทนหลุมผลิตปิโตรเลียมแบบเสาเดี่ยวที่มีค้ำยัน โดยเรือเครน (Crane vessel) ขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ที่มีชื่อว่า Micoperi 7000 โดยโครงสร้างที่มีชื่อว่า Davy ได้ติดตั้งที่ระดับความลึกน้ำทะเล 43 เมตร ส่วนโครงสร้างของ Bessemer ได้ติดตั้งที่ระดับความลึกน้ำทะเล 23 เมตร ซึ่งการติดตั้งด้วยเรือเครนขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพดีกว่า Jack-up เป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการติดตั้ง โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบเสาเดี่ยวที่มีค้ำยัน [9]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบสามขา (Tripod) [8], [10]

โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบ 3 ขา เป็นโครงสร้างที่มีฐานรากเป็นทั้งแบบเสาเข็มตอกและเสาเข็มคูด โดยในรูปที่ 2.4 (ก) จะใช้ฐานรากเป็นแบบเสาเข็มตอกและรู้ทิศทางของคลื่นที่แน่นอน ซึ่งในส่วนของเขาโครงสร้างทั้งสามขา จะถูกเชื่อมโยงกันเป็นโครงข้อแข็ง มีลักษณะเป็นรูป

สามเหลี่ยมด้านเท่า ส่วนรูปที่ 2.4 (ข) จะเป็นโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบ 3 ขา ที่มีการค้ำยัน และมีการค้ำยันเหมือนกับในรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งโครงสร้างที่มีการค้ำยันจะมีขีดความสามารถในการต้านทานแรงจากสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่า



รูปที่ 2.5 โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบ 4 ขา (Tetra-pod) [7]

โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเลขนาดเล็กแบบ 4 ขา ตามรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าตัวโครงสร้างของขาทั้ง 4 ขา จะถูกเชื่อมโยงกันด้วยค้ำยันมากมาย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างชนิดนี้จะใช้วัสดุในการก่อสร้างที่สิ้นเปลืองกว่าโครงสร้างชนิดอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ไม่นิยมใช้กันมากนัก เพราะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงกว่าแบบอื่นๆ

2.2 แรงกระทำจากสิ่งแวดล้อม

การออกแบบโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเล สิ่งที่แตกต่างกันไปจากโครงสร้างทั่วไปที่อยู่ตั้งอยู่บนดินก็คือ แรงที่กระทำจากลมพายุ โดยประกอบไปด้วยแรงจากคลื่น (Wave force) แรงลม (Wind force) และแรงกระแสน้ำ (Current force) ที่กระทำพร้อมๆ กัน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะแรงจากคลื่นทะเล ในการวิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมนั้นมีหลายทฤษฎี แต่ในการศึกษานี้ จะอ้างอิงตามมาตรฐาน API RP 2A-WSD (2007) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 แรงลม

สำหรับโครงสร้างที่อยู่เหนือจากผิวน้ำขึ้นมาจะได้รับผลกระทบจากแรงลม โดยแรงลมจะขึ้นอยู่กับความเร็วของลมเป็นหลัก ตามมาตรฐาน API RP 2A-WSD (2007) ได้กำหนดให้ความเร็วของลมมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความสูง z (m) เนื่องจากระดับน้ำทะเล และคาบเวลาเฉลี่ย t (s) (Averaging time -

period) เมื่อ $t \leq t_0$ โดยที่ค่า t_0 ชื่อนแนะนำการออกแบบ API RP2A-WSD (2007) กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 3600 วินาที ซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วของลมได้จากสมการต่อไปนี้

$$u(z,t) = U(z) \times \left[1 - 0.41 \times I_u \times \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (2.3)$$

โดยที่ความเร็วลมเฉลี่ย $U(z)$ (m/s) ที่หนึ่งชั่วโมงที่ระดับความสูง z (m) สามารถคำนวณได้จาก

$$U(z) = U_0 \times \left[1 + C \times \ln \left(\frac{z}{10} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$C = 5.73 \times 10^{-2} \times (1 + 0.15 U_0)^{1/2} \quad (2.5)$$

และความเข้มปั่นป่วน $I_u(z)$ (Turbulence intensity) ที่ระดับความสูง z (m) สามารถหาได้โดย

$$I_u(z) = 0.06 \times [1 + 0.043 \times U_0] \times \left(\frac{z}{10} \right)^{-0.22} \quad (2.6)$$

เมื่อ U_0 (m/s) เป็นความเร็วลมเฉลี่ยในเวลา 1 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 10 เมตรและแรงลมที่กระทำกับโครงสร้าง (Wind drag force) สามารถคำนวณได้สมการต่อไปนี้

$$F = \frac{1}{2} C_s \rho_a (u(z))^2 A \quad (2.7)$$

โดยที่

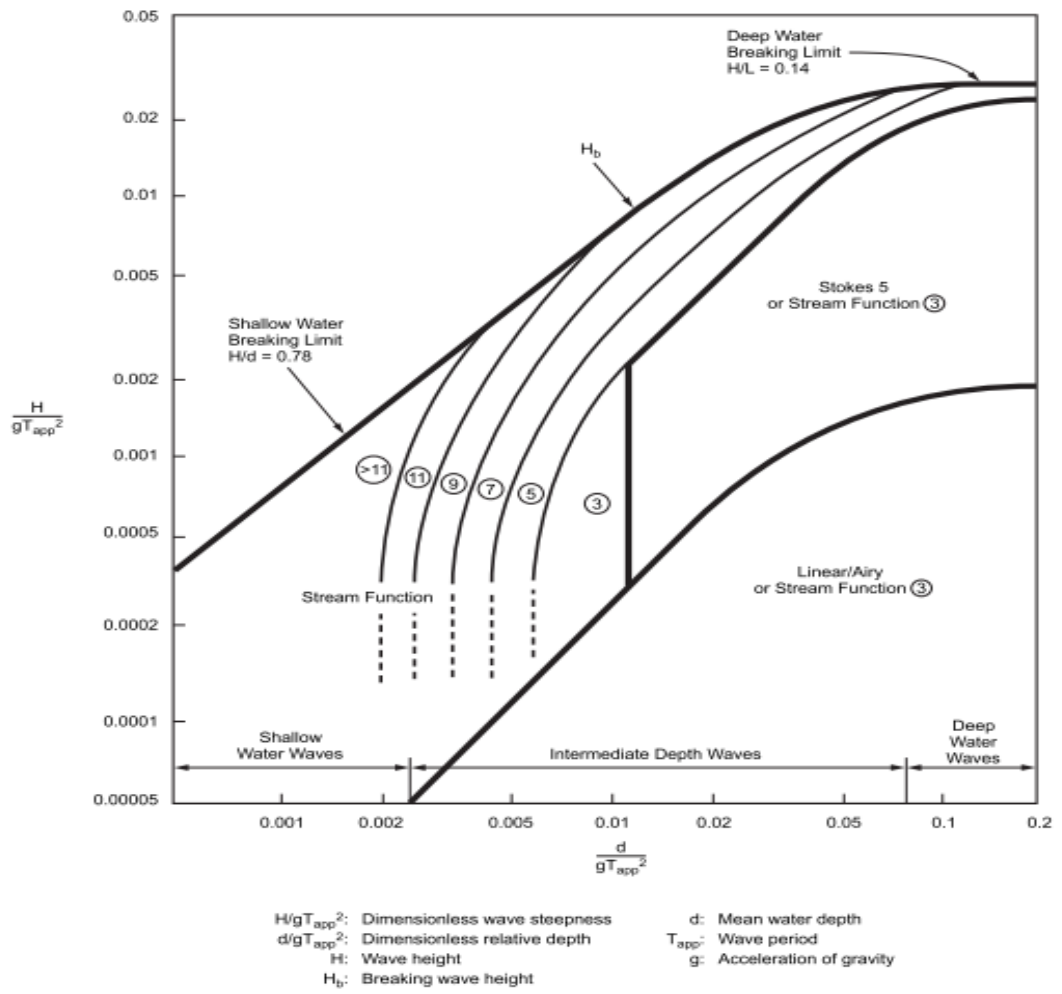
- ρ_a คือค่าความหนาแน่นของมวลอากาศ (Mass density of air) เมื่อความดันและอุณหภูมิของอากาศปกติจะได้ว่า $\rho_a = 1.25$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- C_s คือค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นส่วนโครงสร้าง (Shape coefficient) ตามมาตรฐาน API RP 2A-WSD (2007) ดังตารางที่ 2.2
- A คือคุณลักษณะพื้นที่ของชิ้นส่วนในโครงสร้าง (Area of object)
- $u(z)$ คือค่าความเร็วลม (Wind speed) ที่ความสูง z

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วน โครงสร้าง [5]

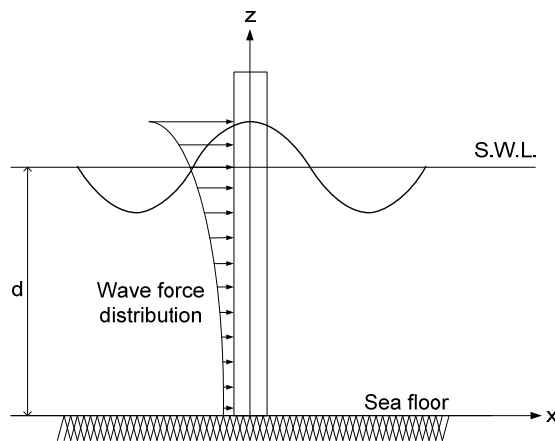
Object	Shape coefficients C_s
Beams	1.5
Sides of buildings	1.5
Cylindrical sections	0.5
Overall projected area of platform	1.0

2.2.2 แรงกระทำจากคลื่น

แรงกระทำจากคลื่นที่กระทำต่อโครงสร้างนอกชายฝั่งทะเล สามารถคำนวณหาได้จากสมการของมอริสัน (Morison's equation, API 2007) ดังสมการที่ 2.8 ซึ่งก่อนที่จะใช้สมการของมอริสันได้นั้นจะต้องคำนวณหาความเร็วและความเร่งของคลื่นก่อน โดยอาจจะคำนวณหาได้จากทฤษฎีคลื่น (Wave theory) ต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของคลื่น (Wave height), คาบคลื่น (Wave period) และความลึกของระดับน้ำทะเล (Water depth) เช่น ทฤษฎีคลื่นแบบเชิงเส้น (Linear or Airy wave theory) ทฤษฎีคลื่นแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear or Stokes's 5th order wave theory) และทฤษฎีคลื่นสตรีมฟังก์ชัน (Stream function theory) เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมในอ่าวไทยที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ มาพิจารณาตามรูปที่ 2.6 ต้องใช้ทฤษฎีคลื่นสตรีมฟังก์ชันมาใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าความแรงกระทำจากทฤษฎีคลื่นสตรีมฟังก์ชันมีความซับซ้อนมาก สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะใช้โปรแกรมไฟไนต์อีเลเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยจะมีแรงกระจายตัวจากการกระทำของคลื่นตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การเลือกประยุกต์ใช้ทฤษฎีคลื่นสถิตย์ฟังก์ชัน สโตคห้า และทฤษฎีคลื่นแบบเส้นตรง [5]



รูปที่ 2.7 การกระจายของแรงกระทำจากคลื่น [11]

$$F = F_D + F_I = C_D \frac{w}{2g} A U |U| + C_m \frac{w}{g} V \frac{\delta U}{\delta t} \quad (2.8)$$

โดยที่	F	คือแรงกระทำจากคลื่นต่อหน่วยความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้าง
	F_D	เวกเตอร์แรงลาก (drag force vector) ต่อหน่วยความยาวที่กระทำกับแนวแกนของชิ้นส่วนในระนาบของแกนชิ้นส่วน และส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็ว (U)
	F_I	เวกเตอร์แรงเฉื่อยต่อหน่วยความยาวที่กระทำกับแนวแกนของชิ้นส่วนในระนาบของแกนชิ้นส่วน และส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร่งของน้ำตามแนวแกนของชิ้นส่วน
	C_D	คือค่าสัมประสิทธิ์การรูด (Drag coefficient) อ้างอิงตามมาตรฐาน API RP 2A-WSD (2007) ดังตารางที่ 2.2
	C_m	คือค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย (Inertia coefficient) อ้างอิงตามมาตรฐาน API RP 2A-WSD (2007) ดังตารางที่ 2.2
	w	หน่วยน้ำหนักความหนาแน่นของน้ำทะเล
	g	ความเร่งโน้มถ่วงของโลก
	A	พื้นที่ที่ฉาย (projected area) ของท่อทรงกระบอกต่อหนึ่งหน่วยความยาว
	V	ปริมาตรแทนที่ของทรงกระบอกต่อหนึ่งหน่วยความยาว
	D	คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของชิ้นส่วนโครงสร้าง
	U	ส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็ว (เนื่องจากคลื่นหรือกระแส) ตามแนวแกนของชิ้นส่วน
	$ U $	ค่าสัมบูรณ์ของค่าส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็วตามแนวแกนของชิ้นส่วน
	$\frac{\delta U}{\delta t}$	ส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร่งของน้ำตามแนวแกนของชิ้นส่วน

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดและค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย [5]

Physical state of tubular	C_D	C_m
No marine growth	0.65	1.60
Marine growth	1.05	1.20

2.2.3 แรงลอยตัว

เมื่อวัตถุหรือโครงสร้างที่จมอยู่ในน้ำ จะทำให้เกิดแรงต้านหรือแรงพยุงเกิดขึ้น เนื่องจากแรงดันของน้ำ ทำให้วัตถุเกิดการลอยตัวขึ้นได้ เรียกว่าแรงลอยตัว (Buoyant force) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_B = \gamma_w B \quad (2.9)$$

โดยที่ F_B คือแรงลอยตัว (Buoyant force)
 B คือค่าปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ถูกแทนที่โดยวัตถุ

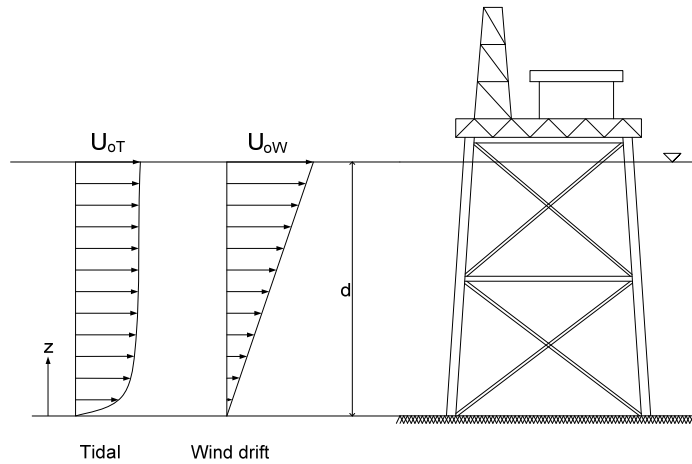
ในการคำนวณหาว่าวัตถุที่ในน้ำนั้นจมหรือลอยสามารถคำนวณหาได้จากการหาน้ำหนักประสิทธิผล (Effective weight) ในน้ำ ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$W' = W - \gamma_w B' \quad (2.10)$$

โดยที่ W' คือน้ำหนักประสิทธิผล (Effective weight)
 W คือน้ำหนักของโครงสร้างในอากาศ
 B' คือค่าปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ถูกแทนที่โดยโครงสร้าง

2.2.4 แรงเนื่องจากกระแสน้ำ

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสน้ำ สามารถเกิดได้ 2 กรณี คือ เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นลง (Tidal current) และจากแรงลม (Wind drift current) ซึ่งการกระจายตัวของแรงมีการเปลี่ยนแปลงตามรูปที่



รูปที่ 2.8 การกระจายของแรงกระแสน้ำ [11]

โดยแรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นลง สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$U_T = U_{oT} \left(\frac{z}{d} \right)^{1/7} \quad (2.11)$$

โดยที่ U_T คือค่าความเร็วกระแสน้ำเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นลง (Tidal current)
 U_{oT} คือค่าความเร็วกระแสน้ำที่ระดับผิวน้ำทะเล

ส่วนกระแสน้ำเนื่องจากลมที่ตำแหน่งผิวน้ำทะเล จะมีค่าประมาณร้อยละ 1.0 ของกระแสน้ำที่ระดับความสูง 10 เมตร จากผิวน้ำทะเลซึ่งจะมีค่าการกระจายตามกฎเชิงเส้น (Linear law) ดังสมการต่อไปนี้

$$U_w = U_{ow} \left(\frac{z}{d} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่ U_w คือค่าความเร็วกระแสน้ำเนื่องจากลม (Wind drifts current)
 U_{ow} คือค่าความเร็วลมร้อยละ 1.0 ที่ระดับความสูง 10 เมตร จากผิวน้ำทะเล

2.3 ข้อเสนอแนะในการออกแบบ

ในการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่มีหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ที่ไม่ใช่หน้าตัดทรงกระบอก โดยทั่วไปแล้วจะทำการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานตามข้อเสนอแนะมาตรฐาน AISC ASD 9th ED ส่วนชิ้นส่วนโครงสร้างที่เป็นรูปทรงกระบอกจะทำการออกแบบและตรวจสอบด้วยมาตรฐาน API RP2A-WSD (20007) ซึ่งมีข้อเสนอแนะในการออกแบบดังต่อไปนี้

2.3.1 ความเค้นที่ยอมให้ (Allowable stresses)

ตามข้อแนะนำมาตรฐาน API RP2A-WSD (2007) ได้กำหนดให้ความเค้นที่ยอมให้ของชิ้นส่วนรูปทรงกระบอกมีค่าดังนี้

ก) แรงดึงตามแนวแกน (Axial Tension)

หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของชิ้นส่วนทรงกระบอก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_t = 0.6 F_y \quad (2.13)$$

โดยที่ F_y คือค่ากำลังจุดกลางของเหล็กโครงสร้าง

ข) แรงอัดตามแนวแกน (Axial Compression)

- การโก่งเดาะที่เสา (Column Buckling)

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (F_a) ตามมาตรฐาน AISC ค่าอัตราส่วน D/t จะต้องมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 60 ซึ่งหน่วยแรงอัดที่ยอมให้สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$F_a = \frac{\left[\frac{1 - (Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + 3 \frac{(kl/r)}{8C_c} - \frac{(kl/r)^3}{8C_c^3}} \quad \text{สำหรับ } \frac{kl}{r} \leq C_c \quad (2.14)$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \quad \text{สำหรับ } \frac{kl}{r} > C_c \quad (2.15)$$

เมื่อ

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

K = ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิภาพ

l = ความยาวของเสาที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง

r = รัศมีไจเรชั่นที่น้อยที่สุด

สำหรับชิ้นส่วนที่มีค่า D/t มากกว่า 60 การวิบัติจะเกิดขึ้นเนื่องจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local buckling)

- การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local buckling)

การโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนของชิ้นส่วนรูปทรงกระบอกที่มีค่าอัตราส่วน D/t มากกว่า 60 แต่น้อยกว่า 300 สามารถคำนวณหาค่าความเค้นยืดหยุ่น (F_{xe}) และค่าความเค้นไม่ยืดหยุ่นของการโก่งเดาะเฉพาะที่ (F_{xc}) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_{xe} = \frac{2CEt}{D} \quad (2.16)$$

เมื่อ

C = ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะเฉพาะที่

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ

t = ความหนาของท่อ

โดยค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะเฉพาะที่ ปกติแล้วจะมีค่าเท่ากับ 0.60 แต่ตามมาตรฐาน API Spec.2B แนะนำให้ใช้ค่า C เท่ากับ 0.3 และค่าความเค้นแบบไม่ยืดหยุ่นของการโก่งเดาะเฉพาะที่ (F_{xc}) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{xc} = F_y [1.64 - 0.23(D/t)^{1/4}] \leq F_{xe}$$

$$F_{xc} = F_y \quad \text{สำหรับ } (D/t) \leq 60 \quad (2.17)$$

ก) ความเค้นดัดที่ยอมให้ (Allowable bending stress)

หน่วยความเค้นดัด (F_b) ที่ยอมให้ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_b = 0.75 F_y \quad \text{สำหรับ } \frac{D}{t} \leq \frac{1500}{F_y} \quad (2.18)$$

$$F_b = \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{สำหรับ } \frac{1500}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{3000}{F_y} \quad (2.19)$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{สำหรับ } \frac{3000}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 \quad (2.20)$$

เมื่อค่า

F_b = หน่วยความเค้นดัดที่ยอมให้

F_y = คือค่ากำลังจุดคานงของเหล็กโครงสร้าง

ง) แรงเฉือน (Shear force)

- แรงเฉือนของคาน (Beam shear)

ความเค้นเฉือนของคานสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง (f_v) สำหรับหน้าตัดทรงกระบอกคำนวณได้จาก

$$f_v = \frac{V}{0.5A} \quad (2.21)$$

เมื่อ

f_v = ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง

V = แรงเฉือนตามแนวขวางของท่อที่เกิดขึ้นจริง

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน

และหน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้ F_v คำนวณได้จาก

$$F_v = 0.4 F_y \quad (2.22)$$

- แรงเฉือนบิด (Torsion shear)

ความเค้นเฉือนบิดสูงสุด (f_{vt}) สำหรับชิ้นส่วนรูปทรงกระบอกสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f_{vt} = \frac{M_t(D/2)}{I_p} \quad (2.23)$$

เมื่อ

f_{vt} = ความเค้นเฉือนบิดสูงสุด (maximum torsion shear stress)

M_t = โมเมนต์บิด (torsional moment)

I_p = โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (polar moment of inertia)

และหน่วยแรงเฉือนบิดที่ยอมให้ (Allowable torsion shear stress, F_{vt})

$$F_{vt} = 0.4 F_y \quad (2.24)$$

2.3.2 ความเค้นผสม (Combined stress)

ก) ความเค้นผสมในแนวแกนและแรงดัด(Combine axial compression and bending)

สำหรับชิ้นส่วนทรงกระบอกที่เกิดแรงอัดร่วมกับแรงดัดพร้อมกัน พฤติกรรมของโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแรงอัดที่เกิดขึ้นจริง (f_a) กับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (F_a) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากสมการดังนี้

เมื่อ $\frac{f_a}{F_a} > 0.15$:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_a}\right) F_b} \leq 1.0 \quad (2.25)$$

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (2.26)$$

เมื่อ $\frac{f_a}{F_a} \leq 0.15$:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (2.27)$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{\left[\frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right)}\right]^2 + \left[\frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)}\right]^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (2.28)$$

เมื่อ

f_a = ความเค้นอัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นจริง

f_{bx} = ความเค้นดัดตามแนวแกน x

f_{by} = ความเค้นดัดตามแนวแกน y

C_m = แฟกเตอร์ลดค่า (หัวข้อ 3.3.1e, API RP2A-WSD)

$$F_e' = \frac{12\pi^2 E}{23 \left(\frac{Kl}{r}\right)^2}$$

ข) ความเค้นผสมของแรงดึงตามแนวแกนร่วมกับแรงดัด (Combined axial tension and bending)

สามารถคำนวณตรวจสอบได้จากสมการ (2.29)

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (2.29)$$

2.3.3 อัตราส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable interaction ratio OR Unity check)

สำหรับอัตราส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ (Unity check) นั้น จะพิจารณาเลือกชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงต่อหน่วยแรงที่ยอมให้สูงสุด (Maximum unity check) มาทำการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งอัตราส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ ได้จากการรวมความเค้นของสมการที่ 2.25 ถึง 2.29 โดยเลือกสมการที่มีค่าสูงสุดกรณีใดกรณีหนึ่งตามเงื่อนไขของแรงที่มากกระทำกับโครงสร้าง