

ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาและการศึกษาที่ผ่านมา

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและการศึกษาที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับลักษณะคลื่นและการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งซึ่งประกอบไปด้วย กลศาสตร์ของคลื่น (wave mechanics) ที่เกี่ยวกับการกระทำของคลื่นต่อชายฝั่ง ทฤษฎีของคลื่น การเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง (wave transformation) กระแสน้ำและตะกอนชายฝั่ง (littoral transport) พลังงานของคลื่น (wave energy) รวมทั้งอ่าวและชายฝั่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล (equilibrium shoreline)

2.1 กลศาสตร์ของคลื่น

สิ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อการออกแบบโครงสร้างป้องกันชายฝั่งคือวิศวกรผู้ออกแบบต้องทราบถึงลักษณะรูปแบบต่างๆ ของคลื่นที่กระทำต่อชายฝั่ง ซึ่งมีหลายอย่างด้วยกัน เช่น คลื่นลม (wind wave) คลื่นที่เกิดจากเรือ (ship-generated waves) คลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว (tsunami) กระแสน้ำขึ้น-น้ำลง (tide current) ฯลฯ เพราะปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันในหลายๆ ด้าน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อคลื่นที่เกิดจากลมเคลื่อนที่เข้าใกล้ชายฝั่ง โดยทำมุมกับชายฝั่งจะทำให้เกิดกระแสน้ำตามแนวชายฝั่ง (longshore current) ในบริเวณที่คลื่นแตกตัว (surf zone) เป็นต้น

โดยส่วนใหญ่แล้วคลื่นในมหาสมุทรหรือทะเลนั้นเกิดจากลมที่ถ่ายเทพลังงานสู่ผิวน้ำ ทำให้เกิดเป็นคลื่นขึ้นมา ด้วยกระบวนการที่สลับซับซ้อนนี้เองที่ทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันทั้ง ความสูงคลื่น ความยาวคลื่น และคาบเวลาของคลื่น

2.1.1 การกระทำของคลื่นต่อชายฝั่ง

การกระทำของคลื่นต่อชายฝั่งขึ้นอยู่กับชนิดของคลื่นและวัสดุที่ประกอบกันขึ้นเป็นชายฝั่ง โดยที่วัสดุนั้นอาจจะเป็นทราย (sand) หรือเป็นกรวดเล็ก ๆ (shingle) โดยทั่วไปแล้วคลื่นมักจะเป็นคลื่นพายุ (storm wave) หรือ swell wave ซึ่งลักษณะคลื่นที่เกิดขึ้นในธรรมชาตินี้ยากที่จะอธิบายได้ด้วยนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากมีความเป็น nonlinearity สูงมาก และยังมีลักษณะเป็นขบวนการผันแปร (random process) ดังนั้น การอธิบายลักษณะของคลื่นทางคณิตศาสตร์จึงทำได้แต่

เพียงประมาณเท่านั้น และเพื่อนำไปสู่ความเข้าใจในลักษณะที่เกิดขึ้น จึงได้ให้นิยามและค่าตัวแปรต่าง ๆ ของคลื่น ดังแสดงในรูป 2-1

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งทะเล ความสูงคลื่น (H) และความยาวคลื่น (L) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการต่าง ๆ คือ การเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าดิน (shoaling) การหักเหของคลื่น (refraction) และการกระจายของคลื่น (diffraction) ก่อนที่คลื่นจะเกิดการแตกตัว (breaking) บนชายฝั่ง ดังนั้นจึงจำแนกคลื่นออกตามลักษณะความลึกของน้ำ โดยแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ คลื่นในน้ำลึก (deep water waves) คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง (transitional water waves) และคลื่นน้ำตื้น (shallow water waves) โดยคลื่นมีคุณสมบัติดังนี้คือ

การจำแนกตามความลึก	d/L	$2\pi d/L$	$\tanh(2\pi d/L)$
คลื่นในน้ำลึก	$> 1/2$	$> \pi$	≈ 1
คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง	$1/25$ to $1/2$	$1/4$ to π	$\tanh(2\pi d/L)$
คลื่นน้ำตื้น	$< 1/25$	$< 1/4$	$2\pi d/L$

(เมื่อ d = ความลึกของน้ำ และ L = ความยาวคลื่น)

จากการที่คลื่นในมหาสมุทรนั้นมีความผันแปร โดยมีความแตกต่างทั้งคาบเวลา ความสูงคลื่น และความยาวของคลื่น จากจุดนี้เองที่ทำให้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่ออธิบายถึงลักษณะของคลื่น เมื่อแรกเริ่มนั้นได้มีผู้ศึกษาทฤษฎีสำหรับคลื่นที่มีรูปแบบเดียวกัน คือมีคาบและความสูงของคลื่นเท่ากัน (monochromatic) โดยเคลื่อนที่ในน้ำที่มีความลึกคงที่ ทำให้ได้ทฤษฎีของคลื่นหลาย ๆ แบบเกิดขึ้น โดยทฤษฎีเหล่านี้ต่างก็มีความแตกต่างกันทั้งในความซับซ้อนและความถูกต้องในการที่จะอธิบายถึงคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในมหาสมุทร สำหรับทฤษฎีที่ง่ายและนิยมใช้กันมากคือทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory or linear wave theory)

2.1.2 ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย

ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) ที่คิดค้นโดย Airy, 1845 (US. CERC, 1990) เป็นทฤษฎีที่มีแนวความคิดมาจากการไหลแบบอุดมคติของของเหลวในสองมิติ โดยพัฒนามาจากสมการเชิงเส้นที่มีการกำหนดสภาวะขอบเขตผิวน้ำอิสระ (free surface condition) โดยไม่คำนึงถึงผลจากความหนืดหรือแรงตึงผิว ซึ่งทฤษฎีนี้จะใช้อธิบายลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึกได้ดีกว่า และมีข้อจำกัดมากขึ้นเมื่อคลื่นนั้นเข้ามาอยู่ในบริเวณน้ำตื้นและใกล้จะเกิดการแตกตัว

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งและผ่านเข้าไปในบริเวณความลึกเปลี่ยนแปลง การเคลื่อนที่ของคลื่นนั้นเริ่มได้รับผลกระทบจากท้องทะเล (seabed) หรือความลึกของน้ำดังแสดงในรูป 2-2 คุณลักษณะต่างๆ ของคลื่นนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่าน จากการอธิบายด้วยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

เมื่อ C = ความเร็วคลื่น (wave celerity)

L = ความยาวคลื่น (wave length)

d = ความลึกของน้ำ (water depth)

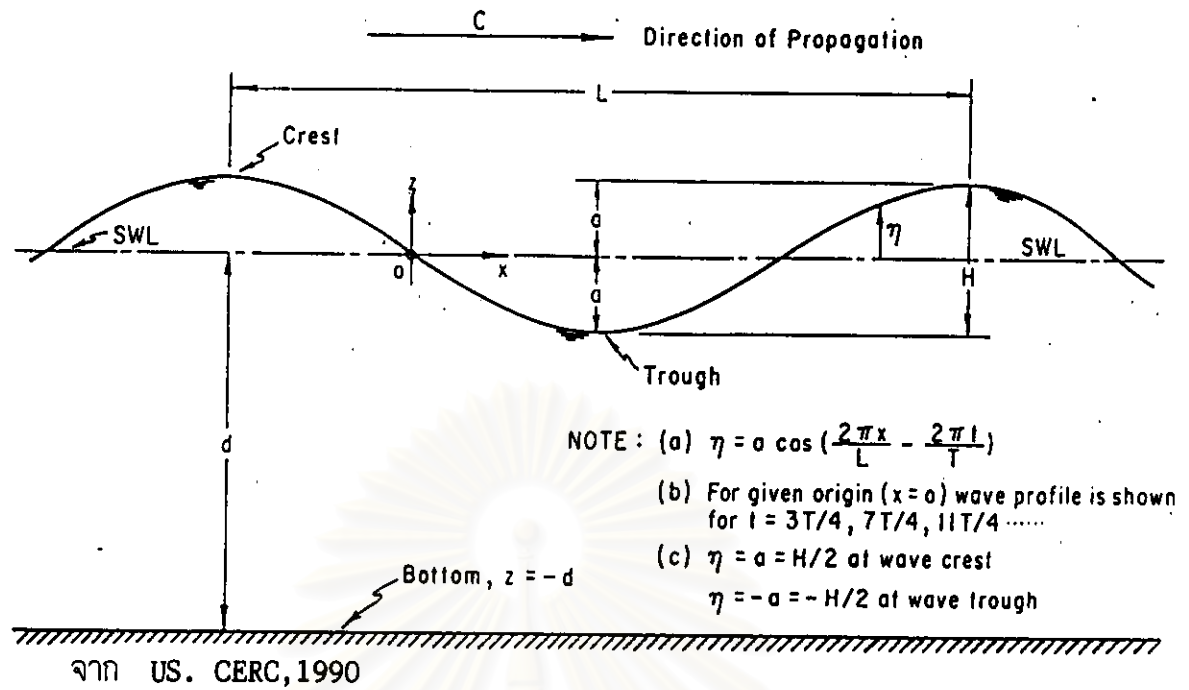
จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าความเร็วคลื่นขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำ (d) ดังนั้นเมื่อความลึกของน้ำลดลง ความเร็วคลื่น และความยาวคลื่นจะลดลงด้วยเช่นกัน และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่น (wave shoaling) และในขณะเดียวกันนั้นทิศทางของแนวสันคลื่นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน

2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่น

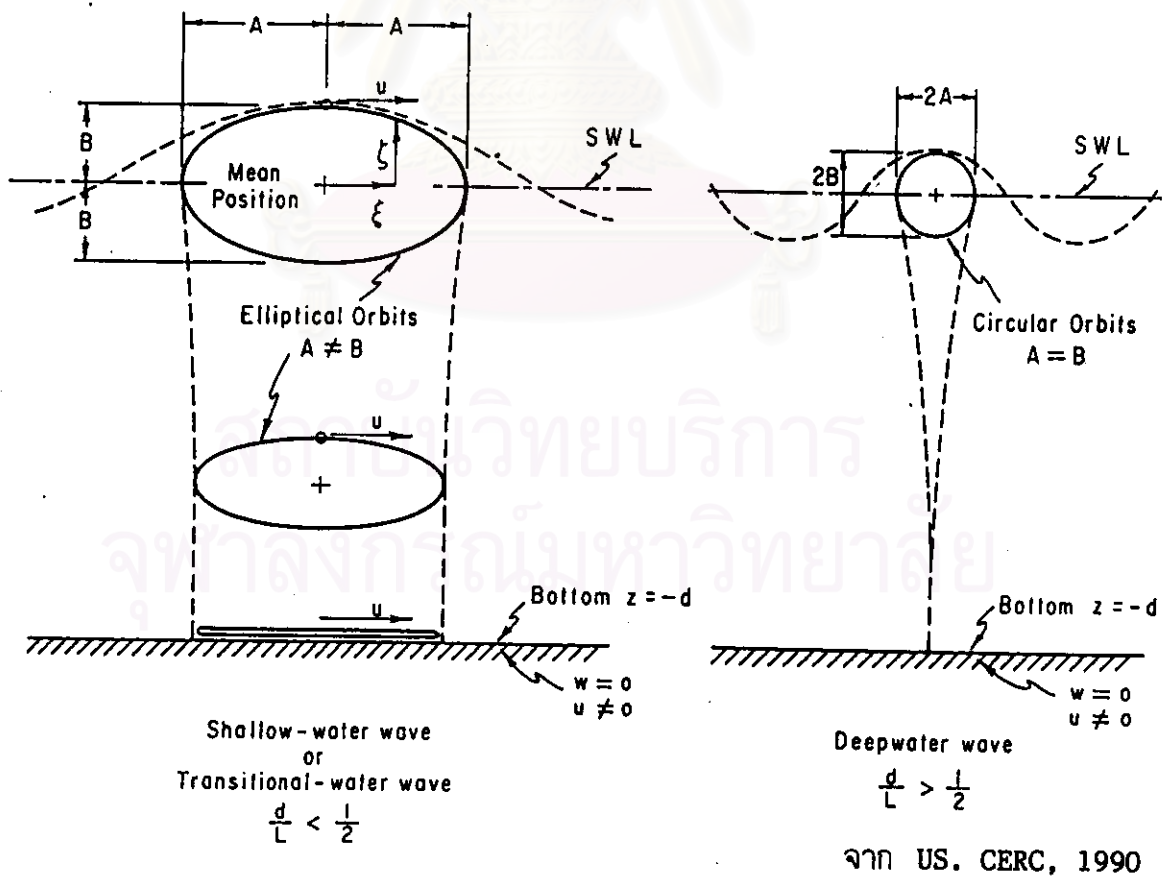
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลง (wave transformation) ก็ต่อเมื่อคลื่นนั้นเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีน้ำลึกเข้าสู่ในบริเวณที่มีน้ำตื้นกว่าโดยเกิดการเสียดทานกับท้องทะเลหรือคลื่นที่เข้าปะทะสิ่งกีดขวาง ทำให้ความยาวคลื่นลดลงในขณะที่ความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่าความชันคลื่น (wave steepness, H/L) เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งคลื่นไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ จึงเกิดการแตกตัวขึ้นแล้วเกิดคลื่นลูกใหม่เคลื่อนที่ตามกันไปสิ้นสุดที่ชายฝั่ง.

2.2.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่น้ำตื้น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดซึ่งมีลมพัดผ่านและไม่อยู่ภายใต้การกระทำของลมแล้ว (swell wave) คลื่นเริ่มจะมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง สันคลื่นและท้องคลื่นจะเริ่มปรากฏอย่างชัดเจนแต่ยังคงมีความสลับซับซ้อน เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งแต่ยังอยู่ในบริเวณนอกฝั่ง (offshore) คุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นยังคงเดิม แต่เมื่อคลื่นที่เข้ามาอยู่ในบริเวณชายฝั่ง (onshore) ที่ความลึกของน้ำตื้นขึ้น คุณสมบัติดังกล่าวจะเริ่มเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน (wave shoaling)



รูป 2-1 นิยามและค่าตัวแปรต่างๆ ของคลื่น



รูป 2-2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำสำหรับคลื่นในน้ำตื้น และคลื่นในน้ำลึก

เมื่อพิจารณาหน้าคลื่น (wave front) ที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง โดยหน้าคลื่นนั้นเคลื่อนที่ขนานกันกับเส้นชั้นความชันความลึกท้องทะเล (seabed contours) จะสมมติฐานได้ว่า พลังงานคลื่นที่ผ่านเข้ามาสู่ชายฝั่งนั้นจะไม่เกิดการสูญเสีย อันเนื่องมาจากความเสียดทานหรือความปั่นป่วนของท้องทะเล

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{P}{P_0} = \frac{EC_0}{E_0 C_0} = 1 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\text{และเมื่อแทนค่า } E = \frac{\rho g H^2}{8} \text{ ใน (2-2)}$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \frac{C_0}{C_0} = 1$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0}{C_0}} = K_s \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

โดยที่ K_s คือ Shoaling coefficient ซึ่งสามารถหาได้จากสมการของ wave group celerity

$$K_s = \sqrt{\frac{C_0}{C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right]}} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

เมื่อ H คือ ความสูงคลื่นในน้ำตื้น (wave height in shallow water)

H_0 คือ ความสูงคลื่นในน้ำลึก และไม่มีการหักเหของคลื่น
(unrefracted deepwater wave height)

d คือ ความลึกของน้ำ (water depth)

L คือ ความยาวคลื่น (wave length)

2.2.2 การหักเหของคลื่น

เมื่อความเร็วคลื่นขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำ จากสมการ (2-1) จะเห็นว่าเมื่อความลึกของน้ำลดลง ความเร็วคลื่นและความยาวคลื่นจะลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นตลอดสันคลื่นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ท่ามกับเส้นชั้นความลึกท้องน้ำ (bottom contour) จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้เองที่เป็นเหตุให้สันคลื่นเคลื่อนที่โค้งเข้าหาเส้นชั้นความลึกท้องน้ำ ดังแสดงในรูป 2-3 ปรากฏการณ์ที่เกิดการโค้งของสันคลื่นนี้เรียกว่า " การหักเห (refraction) "

โดยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความถี่และความยาวของคลื่นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการหักเหของแสงที่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของสเนลล์ (Snell's law) ดังแสดงในรูป 2-4 และสมการ

$$\frac{B_0}{\cos \alpha_0} = \frac{B_1}{\cos \alpha_1}$$

การหักเหของคลื่นก็เช่นเดียวกันคืออาจวิเคราะห์โดยใช้กฎของสเนลล์โดยตรงในกรณีที่ชายฝั่งมีแนวตรงและขนานไปกับเส้นชั้นความลึก

ดังนั้น $\sin \alpha = (C/C_0) \sin \alpha_0$ (2-5)

เมื่อ α คือ มุมระหว่างสันคลื่นกับแนวชายฝั่ง
 α_0 คือ มุมระหว่างสันคลื่นในน้ำลึกกับแนวชายฝั่ง
 C และ C_0 คือ ความเร็วคลื่นและความเร็วในน้ำลึกตามลำดับ

เมื่อสมมติให้พลังงานคลื่น (P) ระหว่างสันคลื่นนั้นมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$\frac{P}{P_0} = 1 = \frac{EB}{E_0 B_0} \cdot \frac{C_0}{C} \quad \dots \dots \dots (2-6)$$

แทนค่า E และ B

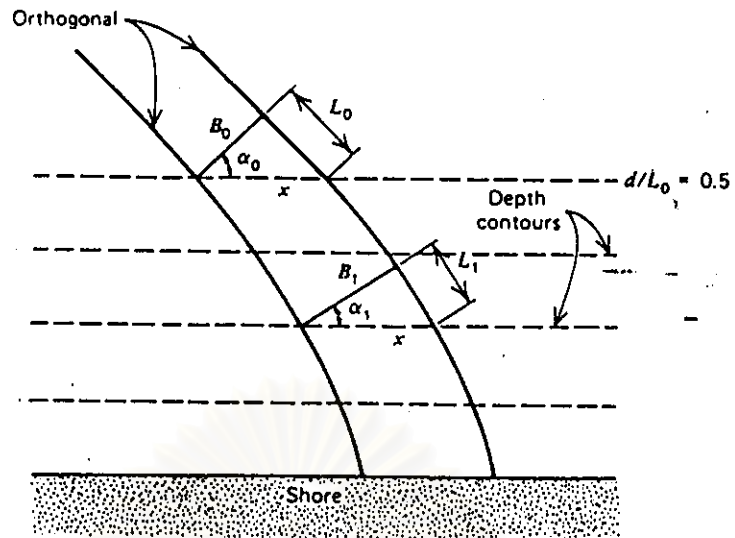
$$\left[\frac{H}{H_0} \right]^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \cdot \frac{C_0}{C} = 1$$

หรือ $\frac{H}{H_0} = \left[\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right]^{1/2} \left[\frac{C_0}{C} \right]^{1/2}$ (2-7)

ดังนั้น $\frac{H}{H_0} = K_r K_t$ (2-8)

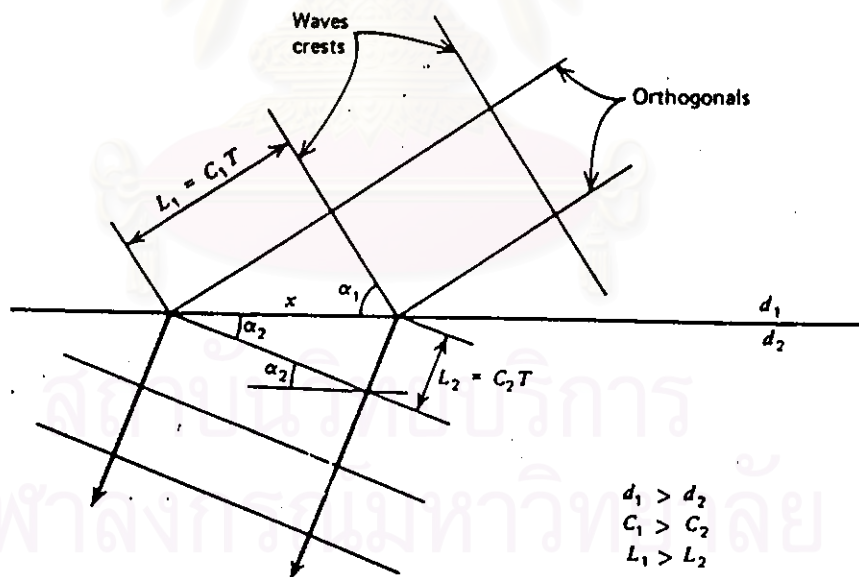
เมื่อ $K_r = \left[\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right]^{1/2}$ (2-9)

โดยที่ K_r คือ สัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น
 H และ H_0 คือ ความสูงคลื่นในน้ำตื้นและน้ำลึกตามลำดับ



จาก Sorensen, 1991

รูป 2-3 การหักเหของคลื่น



จาก Sorensen, 1991

รูป 2-4 การหักเหของคลื่นตามกฎของ Snell

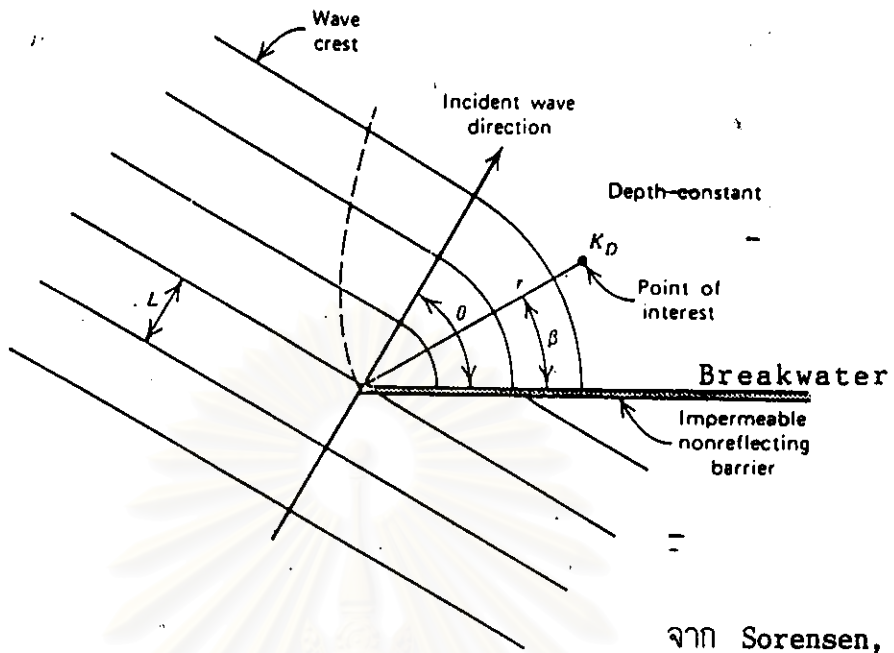
การหักเหของคลื่นมีความสำคัญต่อสภาพคลื่นและการเปลี่ยนแปลงบริเวณชายฝั่งหลายประการคือ

- 1) การหักเหของคลื่นและอิทธิพลของความตื้นของท้องน้ำ (shoaling effect) สามารถบ่งบอกถึงขนาดความสูงของคลื่นที่ความลึกใดๆ เมื่อทราบลักษณะของคลื่นในน้ำลึกและทิศทางของคลื่นที่เกิดในน้ำลึก นอกจากนี้การหักเหของคลื่นยังมีอิทธิพลต่อการกระจายพลังงานคลื่นตามแนวชายฝั่งซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงและเสถียรภาพของชายฝั่งทะเล
- 2) การหักเหของคลื่นในทิศทางที่แตกต่างกันมีผลทำให้เกิดการรวม (convergence) หรือการกระจาย (divergence) ของพลังงานคลื่นซึ่งมีผลต่อแรงกระทำต่อโครงสร้างชายฝั่ง
- 3) การหักเหของคลื่นมีส่วนในการเปลี่ยนแปลงลักษณะท้องน้ำ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการกัดเซาะและการทับถมของตะกอนชายฝั่ง
- 4) การหักเหของคลื่นสามารถอธิบายลักษณะท้องน้ำบริเวณใกล้ชายฝั่ง (nearshore bathymetry) โดยวิเคราะห์ได้จากรูปแบบการหักเหของคลื่นที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ
- 5) นอกจากนี้การหักเหของคลื่นอาจมีเหตุมาจากกระแสน้ำที่ไหลออกมาจากทางระบายน้ำลงสู่ทะเลกระแสน้ำนี้จะวิ่งปะทะแนวสันคลื่น เป็นเหตุให้คลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากันซึ่งทำให้เกิดการหักเหของคลื่นได้เช่นกัน

2.2.3 การกระจายของคลื่น

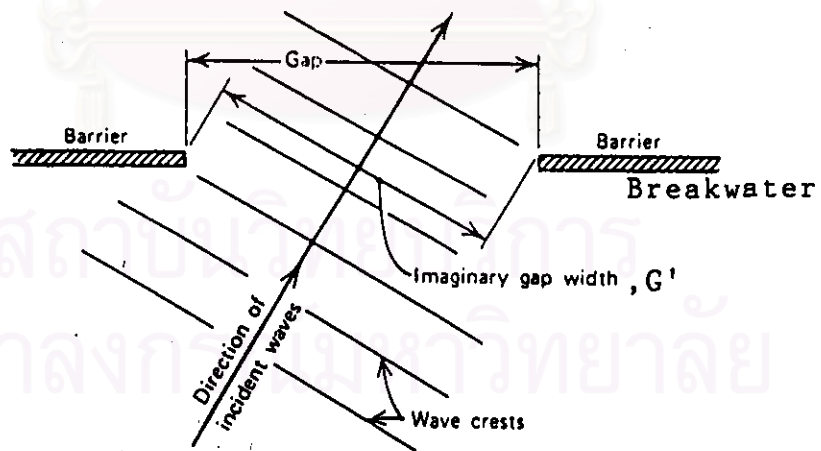
การกระจายของคลื่น (wave diffraction) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนเข้าปะทะสิ่งกีดขวาง เช่น เขื่อนกันคลื่น หรือ เกาะเล็กๆ เป็นต้น โดยคลื่นจะเกิดการกระจายเป็นรัศมีวงกลม โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายของโครงสร้างเข้าสู่ด้านหลังโครงสร้างที่คลื่นนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ ทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานคลื่นไปตามความยาวของแนวสันคลื่น เข้าสู่บริเวณหลังเขื่อนกันคลื่นดังแสดงในรูป 2-5 และ รูป 2-6

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น (diffraction coefficient, K_d) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นที่กระจาย ต่อความสูงคลื่นกระทบ (incident wave) โดยขึ้นอยู่กับลักษณะสำคัญของคลื่นดังสมการ



จาก Sorensen, 1991

รูป 2-5 การกระจายของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นหรือสิ่งกีดขวาง



จาก Sorensen, 1991

รูป 2-6 คลื่นที่ทำมุมกับชายฝั่งเมื่อเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น

$$K_d = f\left(\theta, \beta, \frac{r}{L}\right) \dots\dots\dots (2-9)$$

- เมื่อ θ = ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นกระทบทำมุมกับสิ่งกีดขวาง
 β = ทิศทางการกระจายของคลื่นทำมุมกับสิ่งกีดขวาง
 r/L = อัตราส่วนของรัศมีมีการกระจายต่อความยาวคลื่นที่กระทบ (incident wave)

การศึกษาถึงผลกระทบของการกระจายของคลื่นนั้น มีความสำคัญหลายๆ ประการเช่น

- 1) เพื่อออกแบบโครงสร้างป้องกันชายฝั่ง หรือ ท่าเรือ จากการกระทำของคลื่น
- 2) นำไปพิจารณาออกแบบวางแผนตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับทางเข้าออกท่าเรือ เพื่อลดปัญหาการสะสมของตะกอน และการเกิดคลื่นสะท้อนกลับไปมา (resonance) ในบริเวณท่าเรือ
- 3) ทำนายความสูงของคลื่นบริเวณใกล้ชายฝั่งที่เกิดจากการกระจาย ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางอุทกศาสตร์

2.2.4 การแตกตัวของคลื่น

การแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะด้วยกันคือ เกิดการแตกตัวในน้ำลึก และ เกิดการแตกตัวเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง

- 1) การแตกตัวของคลื่นในน้ำลึก

ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึกนั้นมีขอบเขตจำกัด ซึ่งจะถูกจำกัดด้วยความชันคลื่นค่าหนึ่งที่คลื่นยังสามารถรักษารูปทรงอยู่ได้ และเมื่อคลื่นมีความชันเข้าใกล้ความชันสูงสุดที่เรียกว่า "Limiting Steepness" คลื่นจึงเริ่มแตกตัว Michell (1893) ได้เสนอสูตร

$$\frac{H_0}{L_0} = 0.412 \approx \frac{1}{7} \dots\dots\dots (2-11)$$

หรือเมื่อสันคลื่นมีมุมประมาณ 120° ขณะนั้นอนุภาคของน้ำที่สันคลื่นจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วคลื่น (wave celerity) ทำให้ความชันคลื่นเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความเร็วของอนุภาคน้ำที่สันคลื่นมีมากกว่าความเร็วคลื่น ดังนั้นคลื่นจึงไม่สามารถคงรูปลักษณะคลื่นไว้ได้

2) การแตกตัวของคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่แผ่นดิน (shoaling water) ค่าความชันคลื่นสูงสุดนี้จะลดลง โดยการแตกตัวของคลื่นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความลึกน้ำสัมพัทธ์ (relative depth, d/L) และความลาดชันของชายฝั่ง (beach slope, $1:n$) ที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น คลื่นที่มีลักษณะของคลื่นน้ำลึกจะเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง จนกระทั่งเมื่อถึงระดับความลึกหนึ่งที่ดินเพียงพอคลื่นก็จะเริ่มแตกตัวความลึกที่คลื่นเกิดการแตกตัวนี้เรียกว่า "Breaking Depth, d_b "

Munk (1949) ได้เสนอการประมาณค่าความลึกการแตกตัวของคลื่นหรือความสูงคลื่นแตกตัว

$$\frac{H_b}{H'_0} = \frac{1}{3.3(H'_0/L_0)^{1/3}} \quad \text{และ} \quad \frac{d_b}{H_b} = 1.28 \quad \dots \dots \dots (2-12)$$

H_b/H'_0 มักจะเรียกว่า ดัชนีความสูงคลื่นแตกตัว (breaker height index)

เมื่อ H_b คือ ความสูงคลื่นแตกตัว (breaker height)

H'_0 คือ คลื่นในน้ำลึกที่ไม่มีการหักเห (unrefracted deepwater wave height)

L_0 คือ ความยาวคลื่นในน้ำลึก (deepwater wave length)

สมการดังกล่าวนี้ได้รับการพิจารณาตรวจสอบโดย Iversen (1953) Galvin (1969) และ Goda (1970) พบว่า H_b/H'_0 และ d_b/H_b ขึ้นอยู่กับความลาดชันของท้องน้ำและความชันคลื่น ซึ่ง Goda ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความสูงคลื่นแตกตัว (H_b/H'_0) กับความชันคลื่นในน้ำลึก (H'_0/L_0) สำหรับชายฝั่งที่มีความลาดชันต่าง ๆ กันในรูป 2-7

Weggel (1972) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง d_b/H_b กับ H_b/gT^2 สำหรับชายฝั่งที่มีความลาดชันต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูป 2-8 และแนะนำให้ใช้ร่วมกันกับรูป 2-7 และสมการ 2-12 ในการประมาณค่าความลึกของน้ำบริเวณคลื่นแตกตัว และความสูงคลื่นแตกตัว

3) ชนิดของการแตกตัว

การแตกตัวของคลื่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดตามลักษณะของการแตกตัว คือ Spilling breaker, Plunging breaker, Surging breaker และ Collapsing breaker ดังแสดงในรูป 2-9 ถึง รูป 2-12 ตามลำดับ โดยที่ชนิดของการแตกตัวนี้สามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติบางประการของคลื่น คือ ความชันคลื่นในน้ำลึก, H/L_0 และความลาดชันของท้องน้ำ ($\tan \beta$) ซึ่ง Battjes (1978) ได้เสนอไว้ดังสมการ

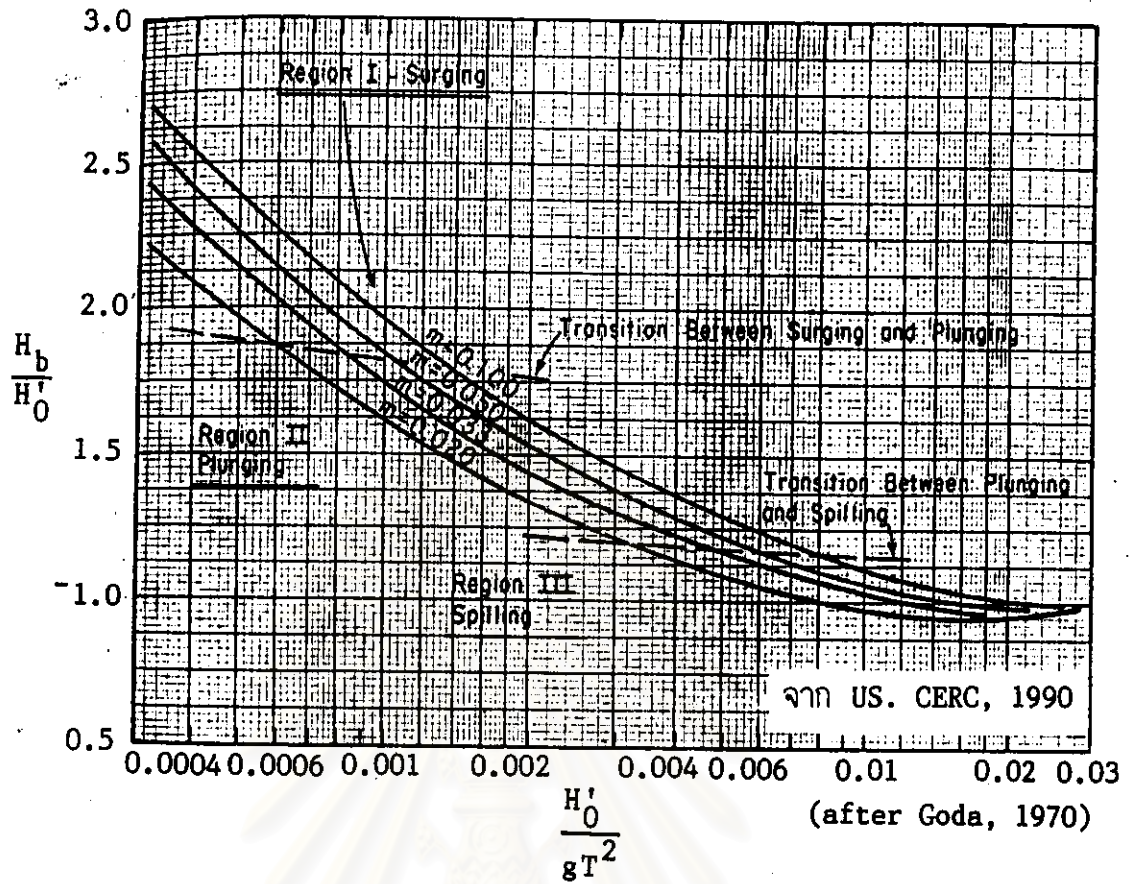
$$\xi_b = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_b/L_0}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_b/gT^2}} \dots\dots\dots(2-13)$$

- โดย
- a) Spilling Breaker ; $0.4 > \xi_b$
 - b) Plunging Breaker ; $0.4 < \xi_b < 2.0$
 - c) Surging Breaker ; $2.0 < \xi_b$

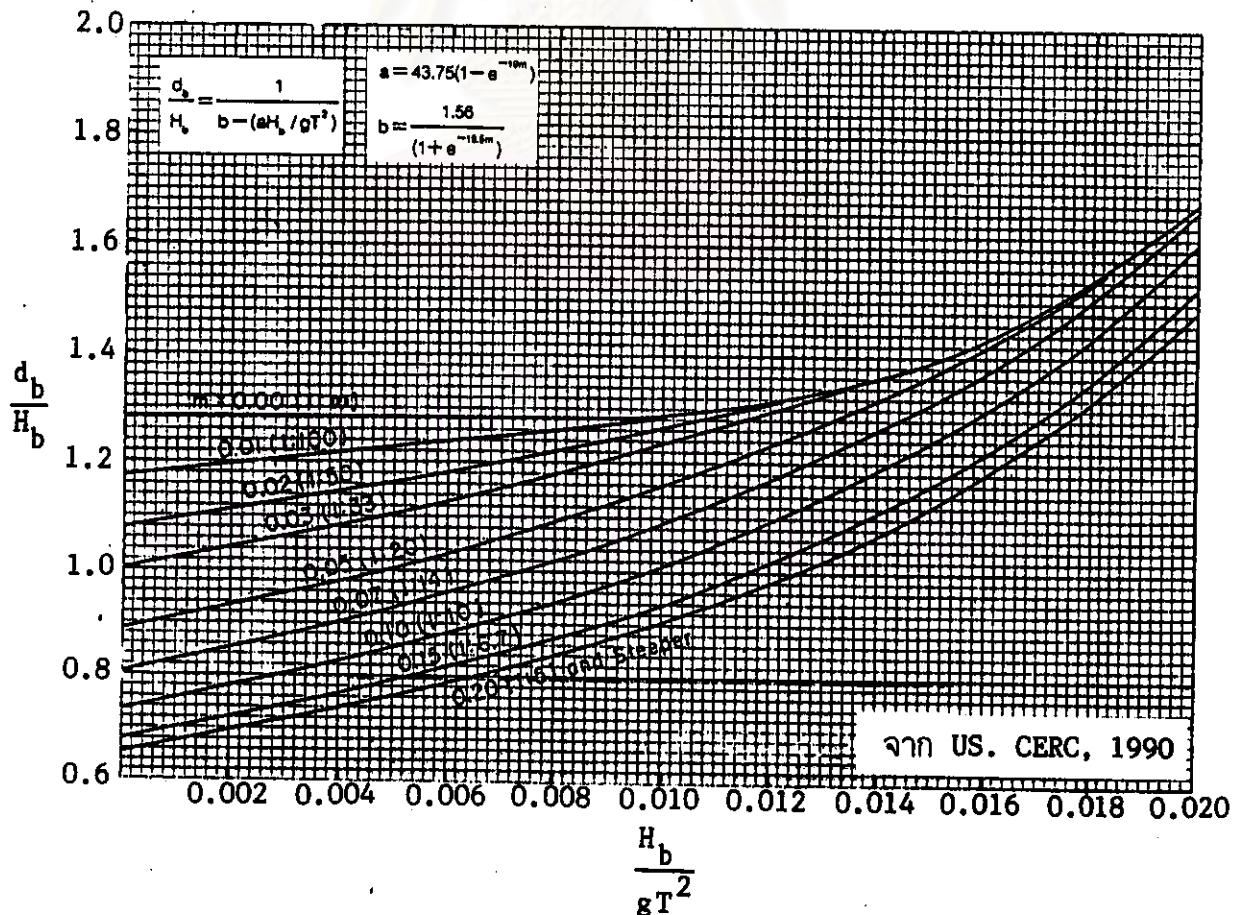
เมื่อ ξ_b คือ Surf Similarity Parameter (Iverse 1952 , Patric and Wiegel 1955)

อย่างไรก็ดีได้มีการจำแนกชนิดของการแตกตัวตามลักษณะความลาดชันของท้องน้ำและความชื้นคลื่นในน้ำลึก โดย Patric และ Wiegel (1955) ดังรูป 2-7 ซึ่งเส้นกราฟจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงสำหรับการแตกตัวแบบ Spilling breaker , Plunging breaker และ Surging breaker ส่วนการแตกตัวแบบ Collapsing นั้นเป็นการแตกตัวที่เปลี่ยนจากการแตกตัวแบบ Plunging ไปเป็น Surging (Galvin, 1968)

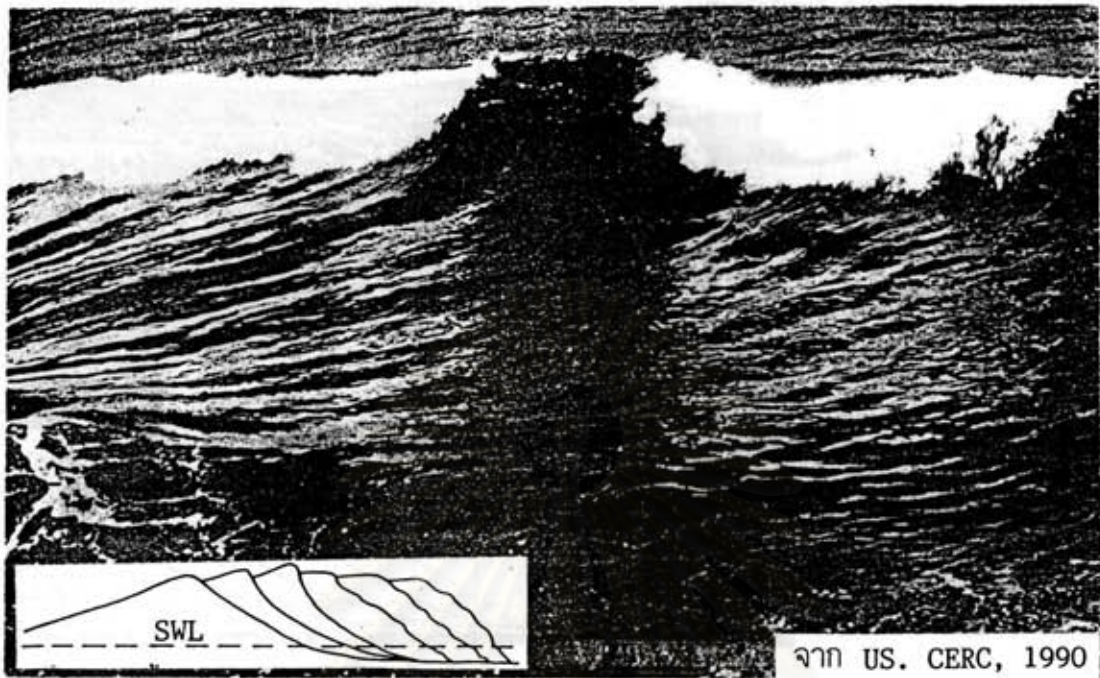
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



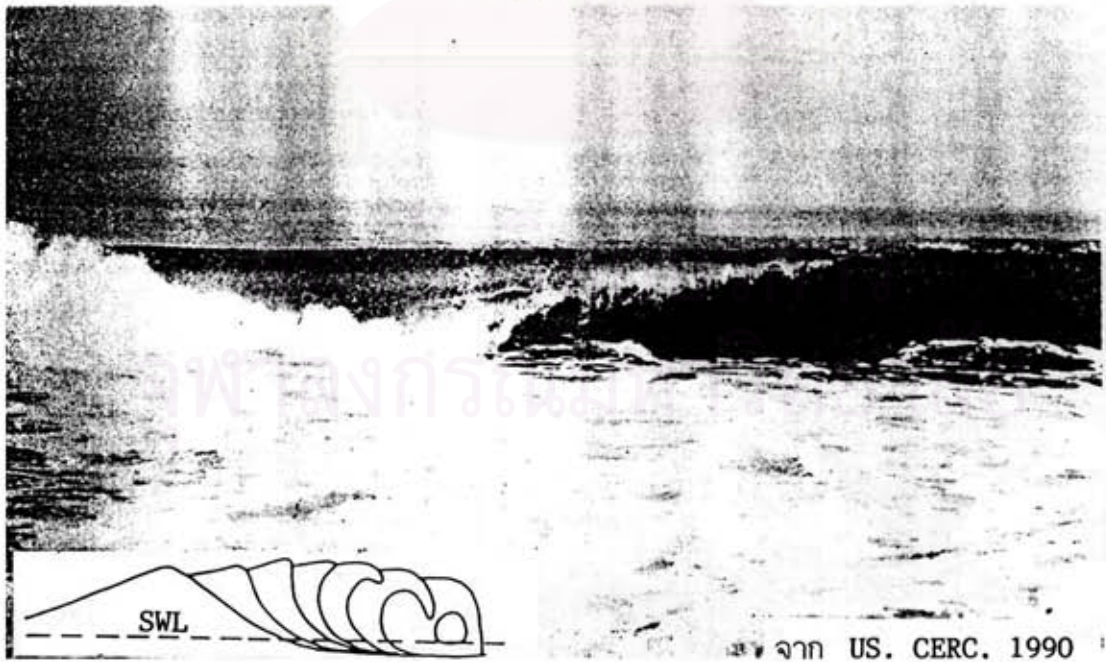
รูป 2-7 ดัชนีความสูงคลื่นแตกต่างกับความชันคลื่นในน้ำลึก



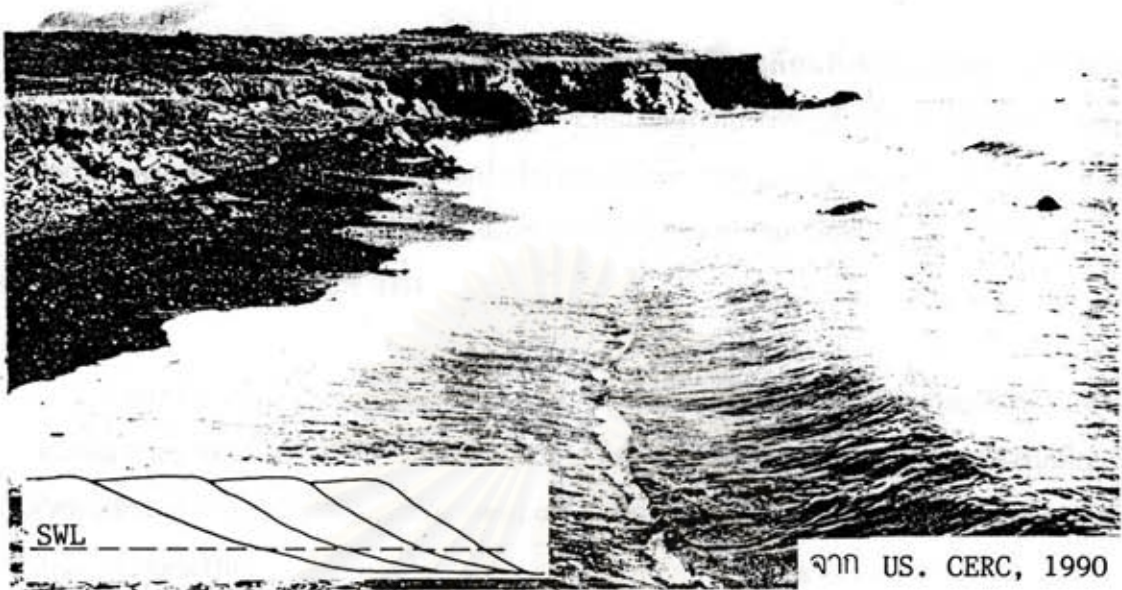
รูป 2-8 ความลึกน้ำบริเวณคลื่นแตกต่างกับความชันคลื่นแตกตัว



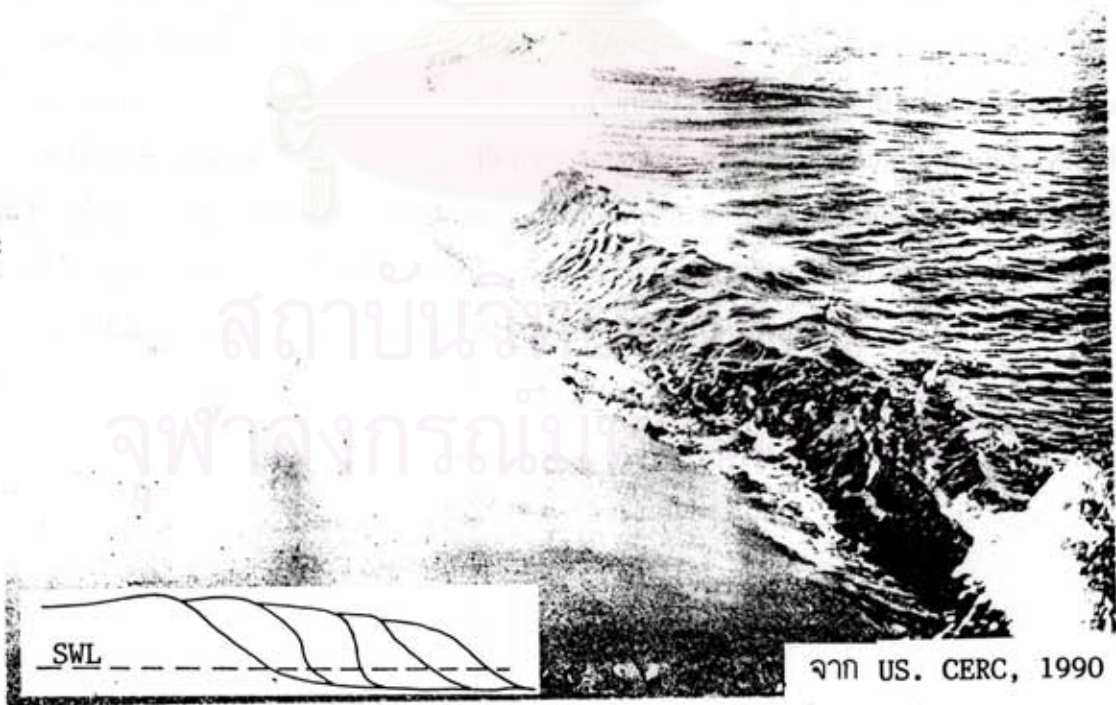
รูป 2-9 การแตกตัวของคลื่นแบบ Spilling



รูป 2-10 การแตกตัวของคลื่นแบบ Plunging



รูป 2-11 การแตกตัวของคลื่นแบบ Surging



รูป 2-12 การแตกตัวของคลื่นแบบ Collapsing

2.3 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำและตะกอนชายฝั่ง

ลักษณะทางกลศาสตร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณใกล้ชายฝั่งและแตกตัว คือ เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำและตะกอนในบริเวณใกล้ชายฝั่งเนื่องจากอิทธิพลของคลื่น (littoral transport) ดังนั้นชายฝั่งจะเกิดการกัดเซาะ ทับถม หรือยังคงสภาพเดิมอยู่นั้นขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่ง แต่โดยทั่วไปแล้วชายฝั่งมักมีการเปลี่ยนแปลงที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างชายฝั่ง และการใช้สอยบริเวณชายฝั่ง

การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งสามารถแบ่งออกตามทิศทางการเคลื่อนที่ได้ 2 ชนิดคือ การเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับชายฝั่ง (onshore-offshore transport) และการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ขนานกับชายฝั่ง (longshore transport) ส่วนวัสดุหรือตะกอนทรายที่เกิดการเคลื่อนที่จะเรียกว่า " Littoral Drift "

2.3.1 กระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง

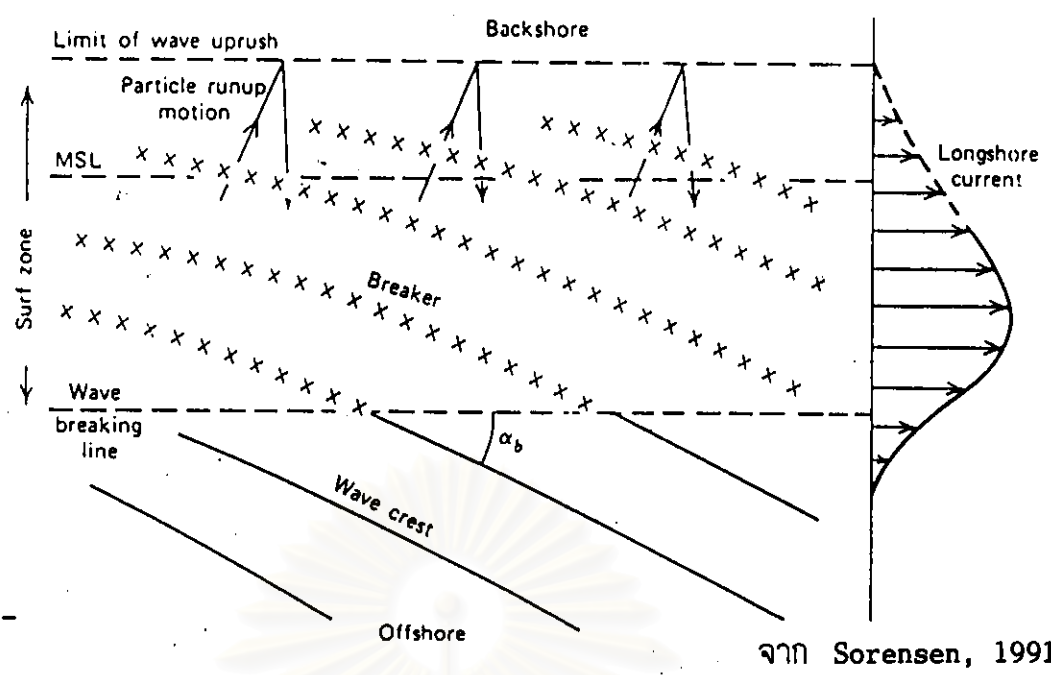
กระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง (onshore-offshore transport) ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคือ ความสูงของคลื่นและความชันคลื่น ในช่วงที่มีความสูงของคลื่นมากและความชันคลื่นมากก็จะมีพลังงานคลื่นมากด้วยเช่นกัน ซึ่งคลื่นที่ซัดเข้าปะทะชายฝั่งทะเลมีความรุนแรงมากจะทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่ง และเมื่อคลื่นนี้สะท้อนกลับออกไปจะนำพาเอาตะกอนทรายเคลื่อนออกสู่ทะเลไปด้วย ส่วนในช่วงที่มีความสูงของคลื่นต่ำและความชันคลื่นมีค่าน้อย คลื่นที่เคลื่อนเข้าหาฝั่งจะอ่อนกำลังลง ตะกอนทรายที่เคลื่อนที่เข้ามาตามคลื่นหลังคลื่นแตกตัวก็จะเกิดการตกจมในบริเวณชายฝั่ง จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากชายฝั่งจะมีลักษณะกลับไปกลับมาซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะสั้นและตะกอนเหล่านี้มิได้สูญหายไปไหน

2.3.2 กระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งที่เคลื่อนตามแนวชายฝั่ง

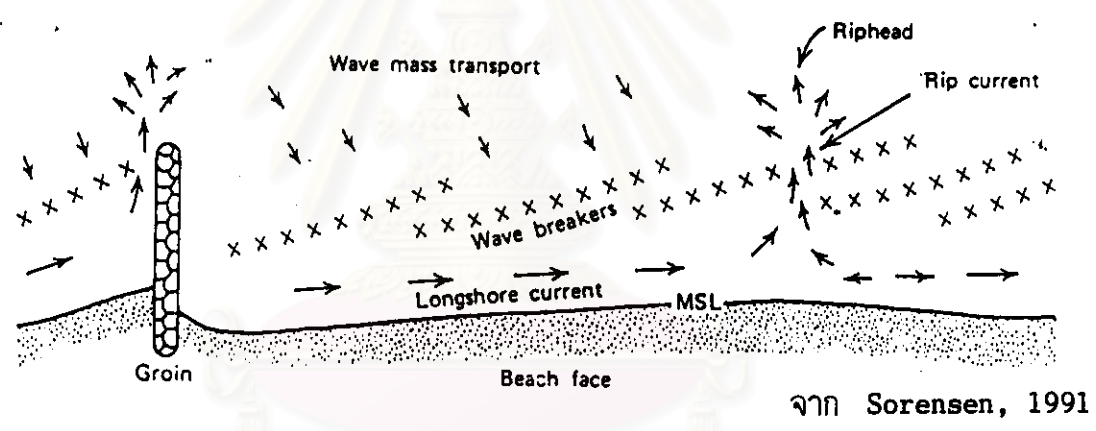
กระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งที่เคลื่อนตามแนวชายฝั่ง (longshore transport) เป็นผลโดยตรงมาจากการแตกตัวของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าทำมุมกับชายฝั่ง ซึ่งทิศทางของการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำและตะกอนตามแนวชายฝั่งนี้ จะสัมพันธ์กันกับทิศทางของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าทำมุมกับชายฝั่ง ดังนั้นทิศทางของกระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งที่เคลื่อนตามแนวชายฝั่งจึงเปลี่ยนไปตามฤดูกาลไม่แน่นอน เมื่อตะกอนบริเวณชายฝั่งมีความไม่สมดุล ณ ตำแหน่งใดๆ ในชายฝั่ง ชายฝั่งจะพยายามปรับตัวให้อยู่ในสภาพสมดุล ดังนั้นตะกอนจึงเริ่มมีการสูญหายหรือเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอน ดังแสดงการเกิดกระแสน้ำตามแนวชายฝั่งในรูป 2-13 และ รูป 2-14 ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการกัดเซาะหรือทับถมของชายฝั่ง และแสดงถึงผลกระทบของเขื่อนกันคลื่นต่อตะกอนชายฝั่งในรูป 2-15

2.3.3 อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่ง

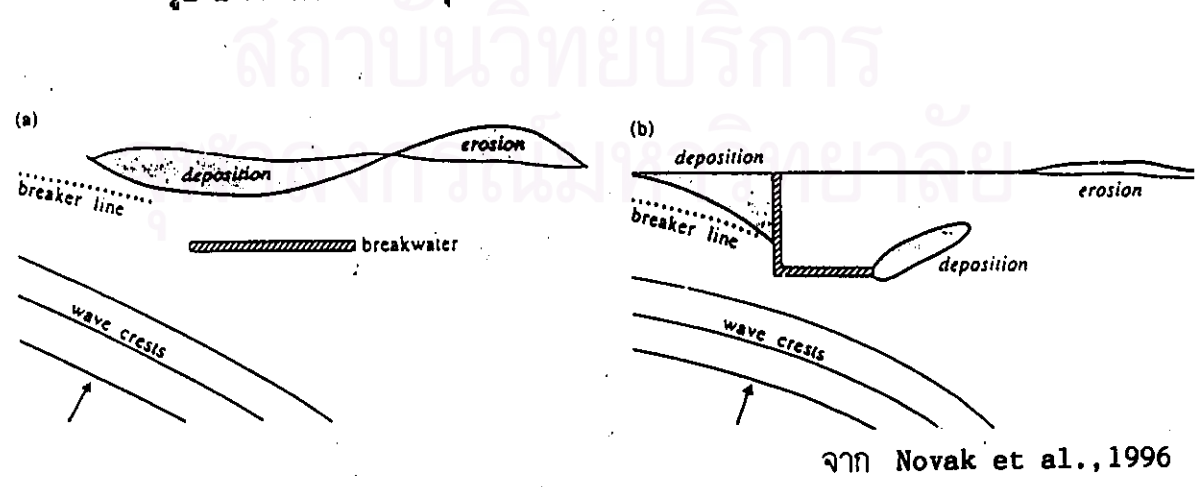
อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่ง (rate of longshore transport) ขึ้นอยู่กับมุมของคลื่นที่กระทำกับแนวชายฝั่งและพลังงานคลื่น ดังนั้นเมื่อคลื่นที่เกิดขึ้นในช่วงมีพายุรุนแรง (high storm wave) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนในอัตราที่มากกว่าคลื่นในช่วงพายุสงบ (swell wave) อย่างไรก็ตามคลื่นขนาดเล็กในช่วงปกติมักจะมีเวลายาวนานกว่าคลื่นที่เกิดขึ้นในช่วงมีพายุรุนแรง ดังนั้นคลื่นในยามปกติ (swell wave) มักจะเป็นตัวการหลักในการเคลื่อนย้ายตะกอนในระยะยาว



รูป 2-13 การเกิดกระแสน้ำตามแนวชายฝั่งเนื่องจากคลื่น



รูป 2-14 การเกิดการหมุนวนของตะกอนและกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งเนื่องจากคลื่น



รูป 2-15 ผลกระทบของเขื่อนกั้นคลื่นต่อตะกอนชายฝั่ง

2.4 พลังงานของคลื่น

พลังงานของคลื่นเป็นผลรวมของพลังงานที่เกิดจากพลังงานจลน์ (kinetic energy, E_k) และพลังงานศักย์ (potential energy, E_p) โดยที่พลังงานจลน์เกิดจากความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ และพลังงานศักย์นั้นได้แก่มวลของน้ำที่อยู่เหนือตำแหน่งที่พิจารณา โดยไม่คำนึงถึงแรงตึงผิวของน้ำ

จากทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย เมื่อคำนวณค่าพลังงานศักย์จากระดับน้ำนิ่ง (still water level) และคลื่นทั้งหมดเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน พลังงานศักย์และพลังงานจลน์นั้นมีค่าเท่ากัน และพลังงานคลื่นรวมใน 1 ความยาวคลื่นต่อความกว้างสันคลื่นหนึ่งหน่วย เท่ากับ

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} + \frac{\rho g H^2 L}{16} = \frac{\rho g H^2 L}{8} \dots\dots\dots (2-14)$$

เมื่อ E คือพลังงานรวมของคลื่นต่อ 1 หน่วยความกว้างสันคลื่น (total energy in a wave per unit crest width)

ดังนั้นพลังงานคลื่นเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (total average wave energy, \bar{E} per unit area)

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \dots\dots\dots (2-15)$$

กำลังคลื่น (wave power) คือ อัตราพลังงานของคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังนั้นกำลังคลื่นเฉลี่ยต่อความกว้าง 1 หน่วย (average wave power energy flux per unit wave crest width, \bar{P}) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \bar{E}nc \\ &= \bar{E} \frac{C}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] = \bar{E}C_0 \dots\dots\dots (2-17) \end{aligned}$$

ในน้ำลึก $\bar{P}_0 = \frac{1}{2} \bar{E}C_0$ เนื่องจาก $(\frac{d}{L} > 0.5 \Rightarrow C_0 = \frac{C}{2})$

ในน้ำตื้น $\bar{P} = \bar{E}C$ เนื่องจาก $(C_0 = C)$ (2-18)

2.5 หัวหาดและอ่าวสมดุล

หัวหาด (headland) มีความสำคัญคือเป็นโครงสร้างกำบังคลื่นให้แก่ชายฝั่ง หัวหาดอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น เกาะ แนวปะการัง หรือโขดหิน หรือเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น เขื่อนกันคลื่น (breakwater) หรือ โครงสร้างคั่นดักตะกอน (groin) จากการศึกษาพบว่า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะหัวหาดบางส่วนของพลังงานคลื่นจะถูกสลายไป ส่วนคลื่นที่เคลื่อนผ่านด้านข้างหัวหาดเข้าไปสู่แนวชายฝั่งจะเกิดการกระจาย และการหักเหของคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังของหัวหาด ทำให้พลังงานคลื่นที่เคลื่อนเข้าสู่ชายฝั่งลดลง ในกรณีที่หัวหาดตั้งอยู่บริเวณนอกชายฝั่ง (offshore) จะเกิดการทับถมของตะกอนทรายที่บริเวณชายฝั่งหลังหัวหาดที่เรียกว่า "Tombolo" การเกิด Tombolo นี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญได้แก่ คุณสมบัติต่างๆของคลื่น การเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง ขนาดและตำแหน่งของหัวหาด

ในสภาพธรรมชาติ บริเวณที่มีการกัดเซาะของชายฝั่งระหว่างหัวหาด จะเกิดการเข้าเป็นอ่าวขึ้นถ้าหัวหาดทั้งสองแห่งมีความแข็งแรงพอเพียงต่อการต้านทานแรงกระทำของคลื่น ชายฝั่งจะถูกกัดเซาะ และถดถอยจนเข้าสู่สภาพสมดุล เรียกว่า อ่าวสมดุล (equilibrium bay)

รูปร่างของอ่าวสมดุลขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปแบบของคลื่นและการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง จากการศึกษาของ Silvester (1974) ได้ทำการศึกษารูปแบบของอ่าวสมดุลโดยการทดลองในแบบจำลอง พบว่าตะกอนทรายที่บริเวณแนวชายฝั่งทางด้านเหนือน้ำได้ขาดหายไปและเกิดเป็นอ่าวสมดุลที่มีรูปร่างเป็นรูปครึ่งหัวใจ หรือที่เรียกว่า "crenulated bay" ส่วนที่กล่าวมาว่าอ่าวรูปครึ่งหัวใจนี้เป็นรูปร่างที่สมดุลนั้นเพราะว่าแนวของการแตกตัวของคลื่นขนานกันกับชายฝั่งตลอดทั้งอ่าว และไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอน ซึ่งทำให้อาวุนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป

ในช่วงแรกๆ ของการป้องกันชายฝั่งด้วยโครงสร้างหัวหาดนั้น เป็นการสร้างเขื่อนที่มีลักษณะเป็นเกาะเล็กๆ เพื่อใช้กำบังคลื่นและลดแรงกระทำของคลื่นบริเวณชายฝั่งและทำเรือเป็นวัตถุประสงค์หลัก แต่ต่อมาได้สังเกตพบว่าการทับถมของตะกอนทรายเกิดขึ้นบริเวณชายฝั่งหลังเขื่อนกันคลื่น จากปรากฏการณ์ของอ่าวสมดุลระหว่างหัวหาดและการเกิด Tombolo จึงได้มีการพยายามนำเอาหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับงานป้องกันชายฝั่งที่ประสบปัญหาการกัดเซาะและถดถอยของชายฝั่ง

2.6 การศึกษาที่ผ่านมา

2.6.1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการป้องกันชายฝั่งด้วยเขื่อนกันคลื่น

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการป้องกันชายฝั่งด้วยเขื่อนกันคลื่น ดังรายละเอียดในตาราง 2-1 สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ดังนี้คือ

1) สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเมื่อมีโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นคือ การเคลื่อนที่ของตะกอนทราย การหักเหของคลื่น การกระจายของคลื่น และการเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าดิน

2) การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจะมีมากขึ้นเมื่อคลื่นมีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชายฝั่งถูกกัดเซาะ

3) เขื่อนกันคลื่นสามารถป้องกันชายฝั่งได้โดยทำให้เกิดเป็น Tombolo ขึ้นบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น ซึ่งขนาดของ Tombolo ขึ้นอยู่กับความยาวของเขื่อนกันคลื่น

4) การเก็บกักตะกอนทรายหลังเขื่อนกันคลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคลื่นเพิ่มขึ้น เมื่อคาบเวลาของคลื่นเท่ากัน

5) ส่วนการศึกษาที่ผ่านมาในการออกแบบเขื่อนกันคลื่นแยกนั้นพบว่าเป็นการออกแบบที่ใช้ผลการศึกษาด้านสถิติและการวิเคราะห์ที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลการป้องกันชายฝั่งทะเลที่ผ่านมาแล้วนำมาเสนอเป็นเกณฑ์การออกแบบเท่านั้น

2.6.2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับชายฝั่งและอ่าวสมดุลง

การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับชายฝั่งและอ่าวสมดุลง ดังรายละเอียดในตาราง 2-2 สามารถสรุปได้คือ

1) ลักษณะของอ่าวสมดุลงไม่ขึ้นอยู่กับแนวชายฝั่งเดิม

2) ชายฝั่งและอ่าวสมดุลงมักเกิดขึ้นระหว่างหัวหาดที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนหรือมีการเคลื่อนที่ของตะกอนด้วยปริมาณที่แน่นอน

3) บริเวณชายฝั่งระหว่างหัวหาดจะมีลักษณะเป็นอ่าว และถ้ามีคลื่นลักษณะเอียงและเป็น Swell Wave มากจะทำให้รูปร่างของชายฝั่งสมดุกลนั้นจะเป็นอ่าวรูปครึ่งหัวใจ โดยทางชายฝั่งด้านเหนือน้ำมีส่วนของเส้นโค้ง ที่เกิดจากการหักเหของคลื่นและการกระจายของคลื่น และชายฝั่งด้านท้ายน้ำเป็นเส้นสัมผัสวงกลม โดยชายฝั่งบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่สัมผัสวงกลมนั้นจะขนานกันกับแนวสันคลื่น

4) การแตกตัวของคลื่นภายในอ่าวสมดุกลนี้จะเกิดพร้อม ๆ กันตลอดแนวชายฝั่ง

2.6.3 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับลักษณะของคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับลักษณะของคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง ดังแสดงในตาราง 2-3 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

- 1) ชายฝั่งจะถูกกัดเซาะเมื่อความชันคลื่นสูง และเกิดการทับถมเมื่อมีความชันคลื่นต่ำ
- 2) ความลาดชันชายฝั่งขึ้นอยู่กับขนาดความชันของคลื่นและขนาดของเม็ดทราย
- 3) ชายฝั่งที่เกิดการกัดเซาะมักเป็นชายฝั่งที่ประกอบด้วยเม็ดทรายขนาดปานกลาง ส่วนชายฝั่งที่เกิดการทับถมมักเป็นชายฝั่งที่มีขนาดเม็ดทรายละเอียดมาก

ตาราง 2-1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการป้องกันชายฝั่งด้วยเขื่อนกันคลื่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Adachi, 1959	การประมาณ การเปลี่ยนแปลง ชายฝั่งเนื่องจาก เขื่อนกันคลื่น	ทดลองด้วยแบบจำลอง โดยใช้ความชันคลื่นเท่ากับ 0.05 และ 0.02	ความยาวเขื่อนกันคลื่น ความลึกของน้ำ บริเวณที่ตั้งเขื่อนกันคลื่น และความชันคลื่นใน น้ำลึกนั้นมีผลต่อการเกิด Tombolo ทั้งสิ้น และยังพบว่า การเคลื่อนตัวของตะกอนทราย ด้วยความชันคลื่นที่น้อย (0.02) มีน้อยกว่า ความชันคลื่นที่มาก (0.05)
Shinohara และ Tsubaki, - 1966	การเปลี่ยนแปลง ชายฝั่ง และการ เคลื่อนที่ ของ ตะกอนทราย ใน บริเวณที่ป้องกัน ด้วยเขื่อนกันคลื่น	ทดลองด้วยแบบจำลอง โดยใช้ค่าความชันคลื่นเท่ากับ 0.0192 และ 0.0461 และ กำหนดให้ความยาวคลื่นมีค่า คงที่ตลอดการทดลอง	สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ชายฝั่ง และเกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย คือ การหักเหของคลื่น ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้ง ของเขื่อนกันคลื่น
Chew, Wong และ Chin, 1974	เรื่องระบบเขื่อน กันคลื่น และการ เปลี่ยนแปลงชายฝั่ง บริเวณเขื่อนกัน คลื่น	ศึกษาภาคสนามหลังจากที่ มีการก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นที่ ชายฝั่งประเทศสิงคโปร์ โดย ศึกษาที่ตำแหน่งต่างๆ กัน	ขนาดของตะกอนทรายที่พบบริเวณรอบๆ เขื่อนกันคลื่นมีขนาดที่หยาบกว่าตะกอนทราย ที่อยู่ในบริเวณอ่าวระหว่างเขื่อนกันคลื่น
Toyoshima, 1974	ศึกษาเกณฑ์ การออกแบบ ระบบเขื่อนกัน คลื่นแยก ที่ทำให้ เกิดการกัดเซาะ ของตะกอน ทรายและการก่อ รูปของ Tombolo	ศึกษาทางด้านสถิติ และ การวิเคราะห์ที่ได้จากการเก็บ ข้อมูลและรวบรวมการป้องกัน ชายฝั่งทะเลที่ผ่านมาเพื่อ เสนอเกณฑ์ในการออกแบบ เขื่อนกันคลื่นแยก จากเขื่อน กันคลื่นที่สร้างขึ้นแล้วจาก สถานที่ 86 แห่ง ซึ่งมีจำนวน เขื่อนรวมทั้งหมด 217 เขื่อน	จากการศึกษาทางสถิติไม่พบว่าองค์ ประกอบใดที่จะทำให้เกิดการทับถมของ ตะกอนทรายและการก่อรูป Tombolo การ ศึกษานี้จึงพยายามที่จะเสนอหลักเกณฑ์ ในการออกแบบ โดยอาศัยผลการดำเนินงาน ที่ผ่านมาดังนี้คือ การพิจารณาการออกแบบ เขื่อนกันคลื่นแยกควรแบ่งออกตามความลึก ของน้ำที่บริเวณก่อสร้างเขื่อน 1. ระบบใกล้ชายฝั่ง สร้างขึ้นเพื่อป้องกัน การกัดเซาะด้านหน้าของโครงสร้างกำแพงกัน คลื่น (sea wall) หรือเพื่อรักษาสภาพชายฝั่ง ให้มีลักษณะคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง การทับถม ของตะกอนทรายอาจเกิดขึ้นได้บ้าง ตำแหน่ง ของเขื่อนควรเป็นที่ๆ เริ่มมีความลาดชันของ ชายฝั่ง ความยาวของเขื่อนควรอยู่ระหว่าง

ตาราง 2-1 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการป้องกันชายฝั่งด้วยเขื่อนกันคลื่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Toyoshima, 1974 (ต่อ)	ศึกษาเกณฑ์การออกแบบระบบเขื่อนกันคลื่นแยก ที่ทำให้เกิดการกัดเซาะของตะกอนทรายและการก่อรูปของ Tombolo		<p>(ต่อ) 2-3 เท่าของความยาวคลื่น ช่องเปิดระหว่างเขื่อนควรมีค่าเท่ากับ ความยาวคลื่น ปัญหาคือมักจะเกิดการกัดเซาะเป็นปริมาณมากบริเวณหน้าเขื่อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สร้างเผชิญหน้ากับทะเลเปิด</p> <p>2. ระบบความลึกน้อย การสร้างเขื่อนระบบนี้ จะมีการทับถมของตะกอนทรายเกิดขึ้นอย่างแน่นอนแต่จะมีไม่มากนัก เขื่อนชนิดนี้สามารถตัดตะกอนทรายและสกัดกั้นกระแสน้ำตามแนวชายฝั่งได้ดีกว่าระบบใกล้ชายฝั่ง ควรสร้างบนชายฝั่งที่ค่อนข้างเรียบหรือบนชายฝั่งที่มีระยะการขึ้นลงของน้ำค่อนข้างมากหรือมีน้ำตื้นน้อยกว่า 1 ม. ความยาวของเขื่อนควรอยู่ระหว่าง 3-5 เท่าของความยาวคลื่น และช่องเปิดระหว่างเขื่อนควรมีค่าเท่ากับ ความยาวคลื่น</p> <p>3. ระบบความลึกปานกลาง เขื่อนระบบนี้มักไม่ก่อให้เกิดการทับถมของตะกอนทรายเท่าใดนักเนื่องจากคลื่นบริเวณด้านหลังเขื่อนไม่มีสภาพที่สงบพอที่จะชักนำให้เกิดการตกตะกอนและสะสมของตะกอนทรายได้ โดยทั่วไปมักใช้เป็นโครงสร้างลอยน้ำตำแหน่งที่วางเขื่อนควรเลือกให้อยู่ในบริเวณ Surf Zone มีความลึกของน้ำประมาณ 2-6 เมตร ความยาวของเขื่อนควรอยู่ระหว่าง 2 - 6 เท่าความยาวคลื่น และช่องเปิดระหว่างเขื่อนควรมีค่าประมาณ 0.3 - 1 เท่าของความยาวคลื่น</p> <p>4. ระบบความลึกมาก เขื่อนระบบนี้ควรก่อสร้างไว้นอกบริเวณ Surf Zone หน้าที่หลักของเขื่อนชนิดนี้คือสลายพลังงานคลื่น</p>

ตาราง 2-1 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการป้องกันชายฝั่งด้วยเขื่อนกันคลื่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Abeyasinghe , 1979	การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณระหว่างเขื่อนกันคลื่นแยก	ทดลองในแบบจำลอง โดยใช้คลื่นเรียงท่ามุมกับชายฝั่ง มีชายหาดที่ทำด้วยทรายละเอียดและมีความลาดชันสม่ำเสมอ	<ol style="list-style-type: none"> องค์ประกอบหลักที่ทำให้ชายฝั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงก็คือ การกระจายของคลื่น การหักเหของคลื่น และอิทธิพลของการเคลื่อนที่เข้าสู่หาด ความยาวของ Tombolo เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวของเขื่อนกันคลื่น การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายเพิ่มมากขึ้นเมื่อคลื่นมีพลังงานมากขึ้น
Chowdhury, 1980	การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น	ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองของ Abeyasinghe (1979) และ Devasiri (1980) แต่เปลี่ยนระยะช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ความยาวเขื่อนกันคลื่น และความสูงของคลื่น	<ol style="list-style-type: none"> ความสูงของคลื่นแตกตัวบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่นมีค่าน้อยกว่าบริเวณระหว่างเขื่อน และคลื่นบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนจะเกิดการแตกตัวก่อน การเก็บกักตะกอนทรายหลังเขื่อนกันคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคลื่นเพิ่มขึ้น เมื่อคาบเวลาของคลื่นเท่ากัน ขนาดของ Tombolo ขึ้นอยู่กับความยาวของเขื่อนกันคลื่น
Devasiri, 1980	การไหลเวียนของกระแสน้ำหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยก	ทดลองด้วยแบบจำลอง โดยกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดเฉลี่ยของตะกอนทราย 0.25 มม. ความลาดชันชายฝั่ง 1:15 มุมที่แนวสันคลื่นกระทำต่อเขื่อน 10° ความลึกของน้ำ 16 ซม. ระยะห่างระหว่างเขื่อน 225 ซม. ระยะทางจากเขื่อนถึงชายฝั่ง 225 ซม. ความยาวเขื่อน 100 ซม. และ 175 ซม.	<ol style="list-style-type: none"> การกีดขวางบริเวณแนวชายฝั่งมีลักษณะขนานกับแนวสันคลื่น การกระจายของคลื่นที่บริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น ทำให้เกิดกระแสน้ำหลังเขื่อนในทิศทางตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง การเกิด Tombolo มีสาเหตุหลักมาจากการกระจายของคลื่น ส่วนคลื่นแตกตัวจะทำให้เกิด sand bar ยื่นออกมาจากชายฝั่ง ความสูงคลื่นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อรูปแบบการไหลของน้ำบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น

ตาราง 2-1 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการป้องกันชายฝั่งด้วยเขื่อนกันคลื่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Nakatani, 1982	การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเมื่อมีโครงสร้างชายฝั่ง	ทดลองด้วยแบบจำลองโดยใช้แบบจำลอง 3 ชนิดคือ เขื่อนกันคลื่น คันดักตะกอนแบบตั้งฉากกับชายฝั่ง และ คันดักตะกอนแบบเอียง ในการทดลองใช้คลื่นที่มีความชันแบบ ordinary beach และ storm beach	1. การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ตั้งฉากกับแนวชายฝั่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง และการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจะเกิดมากขึ้นเมื่อความสูงของคลื่นเพิ่มขึ้น 2. การกระจายพลังงานคลื่น และการวางตำแหน่งเขื่อน-กันคลื่นเป็นองค์ประกอบสำคัญของการทำงานของรูป Tombolo
Rosen, 1982	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง การก่อรูปของ Tombolo กับ ตัวแปรต่างๆ	ทดลองด้วยแบบจำลองโดยกำหนดใช้ความชันคลื่น 3 ขนาด ได้แก่ 0.015, 0.025 และ 0.040	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างการก่อรูป Tombolo กับตัวแปรต่างๆ ได้ดังตาราง 2-4 จากนั้น Rosen ได้รวบรวมค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดลองศึกษาที่ผ่านมาและจากการป้องกันชายฝั่งไว้ในตาราง 2-5 และตาราง 2-6 เมื่อนำผลจากตารางทั้งสามมารวบรวมเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ กับอัตราส่วนระหว่างความยาวเขื่อนกันคลื่น กับระยะห่างจากชายฝั่ง สามารถสรุปเป็นกราฟได้ 2 รูป ซึ่งแสดงถึงชายฝั่งสมดุลที่ Tombolo ไม่ยื่นขีดเขื่อนและที่ยื่นขีดเขื่อน ดังในรูป 2-16 และ รูป 2-17 ตามลำดับ
Srinivasan, 1988	ความมั่นคงของชายฝั่งทะเลโดยใช้เขื่อนกันคลื่นและคันดักตะกอน	ทดลองใน Small wave basin มีคลื่นลักษณะเอียงทำมุมกับชายฝั่ง โดยกำหนดตัวแปรคือ ความยาวคลื่น คาบเวลาของคลื่น และ ตำแหน่งที่ตั้งของเขื่อนกันคลื่น และกำหนดความลึกน้ำ ความลาดชันของชายฝั่ง ทิศทางของคลื่น และขนาดของตะกอน เป็นค่าคงที่	1. การเปลี่ยนแปลงสภาพท้องน้ำเมื่อมีโครงสร้างชายฝั่งมีสูงมากบริเวณใกล้ๆ กับชายฝั่ง และจะลดน้อยลงในบริเวณน้ำลึกออกไป 2. การเกิด Tombolo นั้นได้รับอิทธิพลมาจากตำแหน่งที่ตั้งของเขื่อนกันคลื่น 3. ขนาดของ Tombolo จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของคลื่น

ตาราง 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จากการทดลองโดย Rosen (1982)

H/L	Test No.	H (cm.)	T (sec)	L (m.)	y (m.)	x (m.)	z (m.)	br (m.)	x/y	z/y	x _t (m.)	x-X _t /2x _{xy}	H/Vf+I
0.015	1	1.5	0.8	1.0	3.0	0.5	0.16	1.36	0.167	0.053	0.86	0.57	0.65
	2				3.0	1.0	0.26	1.36	0.333	0.087			
	3				3.0	2.0	0.38	1.36	0.667	0.127			
	4				2.0	0.5	2.00	1.36	0.250	1.000			
0.025	5	3.9	1.0	1.56	1.0	0.5	0.24	1.36	0.500	0.240	0.86	0.57	1.34
	6				1.0	1.0	0.56	1.36	1.000	0.560			
	7				1.0	2.0	0.82	1.36	2.000	0.820			
	8				2.5	1.0	0.35	1.70	0.400	0.140			
	9				2.0	0.5	0.23	1.70	0.250	0.115			
	10				2.0	1.0	0.42	1.70	0.500	0.210			
	11				2.0	2.0	0.66	1.70	1.000	0.330			
	12				1.0	0.5	0.26	1.70	0.500	0.260			
	13				1.0	1.0	0.55	1.70	1.000	0.550			
	14				1.0	2.0	1.00	1.70	2.000	1.000			
	15				1.0	0.5	0.25	1.70	0.500	0.250			
0.040	16	8.0	1.15	2.06	2.0	0.5	0.05	1.00	0.250	0.025	0.86	0.57	2.40
	17				2.0	1.0	0.24	1.00	0.500	0.120			
	18				2.0	2.0	0.23	1.00	1.000	0.115			

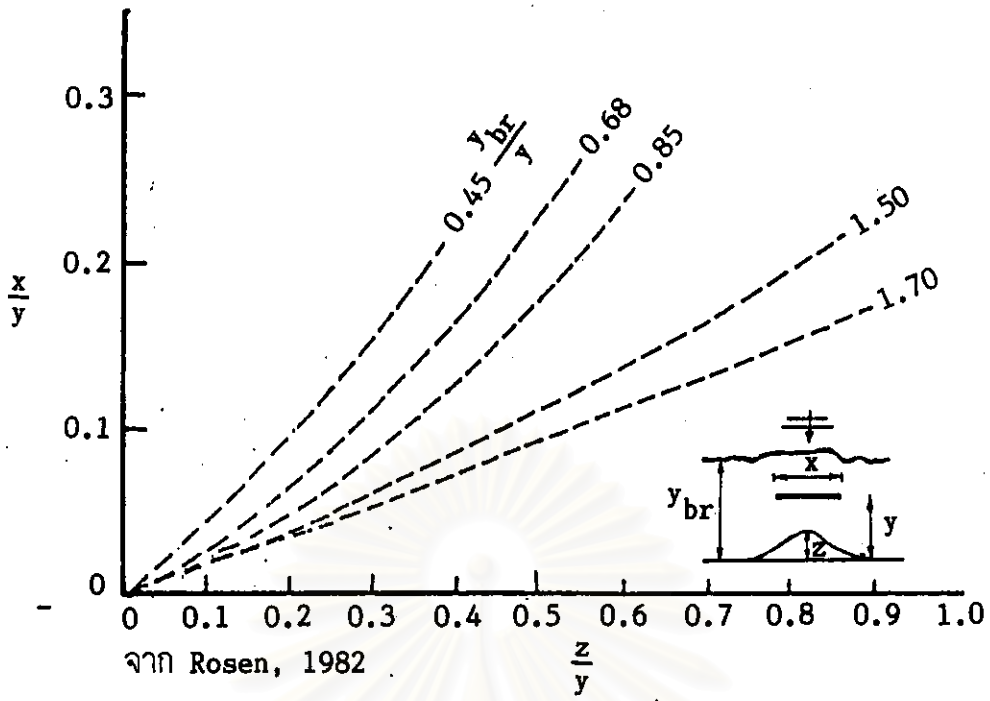
ตาราง 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จากแบบจำลองที่ผ่านมา โดย Rosen (1982)

Author	H/L	H (cm.)	T (sec)	L (m.)	y (m.)	x (m.)	z (m.)	Ybr (m.)	x/y	z/y
Shinohara and	0.0192	2.55	0.922	1.33	0.750	1.50	0.25		2.00	0.333
					1.500	1.50	0.30	1.00	0.200	
					2.625	1.50	0.375	0.57	0.140	
					3.750	1.50	0.250	0.40	0.067	
Tsubaki (1966)	0.0461	6.12	0.922	1.33	0.750	1.50	0.52		2.00	0.693
					1.500	1.50	0.500	1.00	0.333	
					2.625	1.50	0.425	0.57	0.160	
					3.750	1.50	0.100	0.40	0.027	
Horikawa and Koizumi (1974)	0.020	8.7 *	1.15	2.06	2.000	4.00	1.100		2.00	0.350
Sasaki (1976)	0.02 *	8.7 *	1.15	2.06	2.000	4.00	0.700		2.00	0.330
Perlin (1979)	0.0086*	86.0*	8.0	100.0	100.0	200.0	26		2	0.260
					100.0	300.0	48	3	0.480	
					100.0	400.0	35	4	0.350	
					100.0	600.0	28	6	0.280	
					400.0	800.0	50	2	0.125	
					200.0	400.0	96	2	0.240	
					50.0	100.0	18	2	0.180	
	0.0217	2170*	8.0	100.0	100.0	200.0	50		2	0.500
	0.0300	30*	8.0	100.0	100.0	200.0	11		2	0.110
Sauvage et al (1956)			0.8	1.00	1.00	0.80	1.0		0.80	1.00

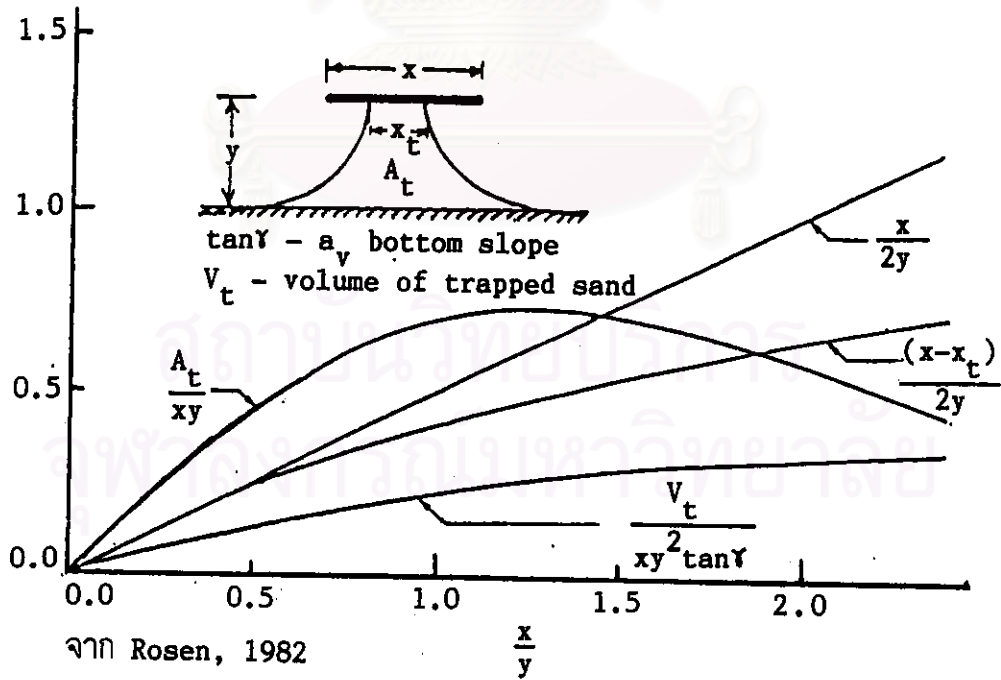
ตาราง 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จากการป้องกันชายฝั่ง โดย Rosen (1982)

Author	Location	Name of Structure	h (m.)	y (m.)	x (m.)	z (m.)	Xt (m.)	x/y	z/y	x-Xt/2+y	Remarks	
Innen et al (1966)	Venice	Venice breakwater	5.0	300	180	300	36	0.60	1.0	0.24	Groyne not removed	
Noble (1978)	St. Monica	St. Monica brwtr.	7.2	555	540	-250	-	0.97	0.45	-		
	Thun's Island	Island B	9.0	780	325	- 0	-	0.42	0	-		
	---	C	9.0	1,666	325	- 10	-	0.20	0.006	-		
	---	D	12.0	1,985	260	- 0	-	0.13	0	-		
	Rincon Island	Rincon Island	12.5	1,650	160	- 0	-	0.10	0	-		
Bruno et al (1979)	California	Channel Island	9.0	600	700	260	-	1.167	0.433	-		
Toyoshima (1974, 1976)	Ishizaki		-	35	60	35	50	1.714	1.0	0.143		
	Kaike		5.0	110	150	110	25	1.364	1.0	0.568		
Nic (1976)	Naharia	Naharia brwtr.	-	80	180	80	20	2.25	1.0	1.0	Groynes in its neighbourhood	
	Raifa	Haf Haramel	-	200	207	200	35	1.035	1.0	0.43		
	Hetanya	North brwtr.	-	200	207	200	35	1.035	1.0	0.430		
		South brwtr.	-	215	240	215	70	1.116	1.0	0.395		
	Tel Aviv	Tel Beruch		3.0	100	200	100	105	2.00	1.0	0.475	
		Sherator.		4.0	200	310	200	75	1.55	1.0	0.588	
Hilton			4.0	200	240	200	45	1.20	1.0	0.488		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง x/y กับ z/y



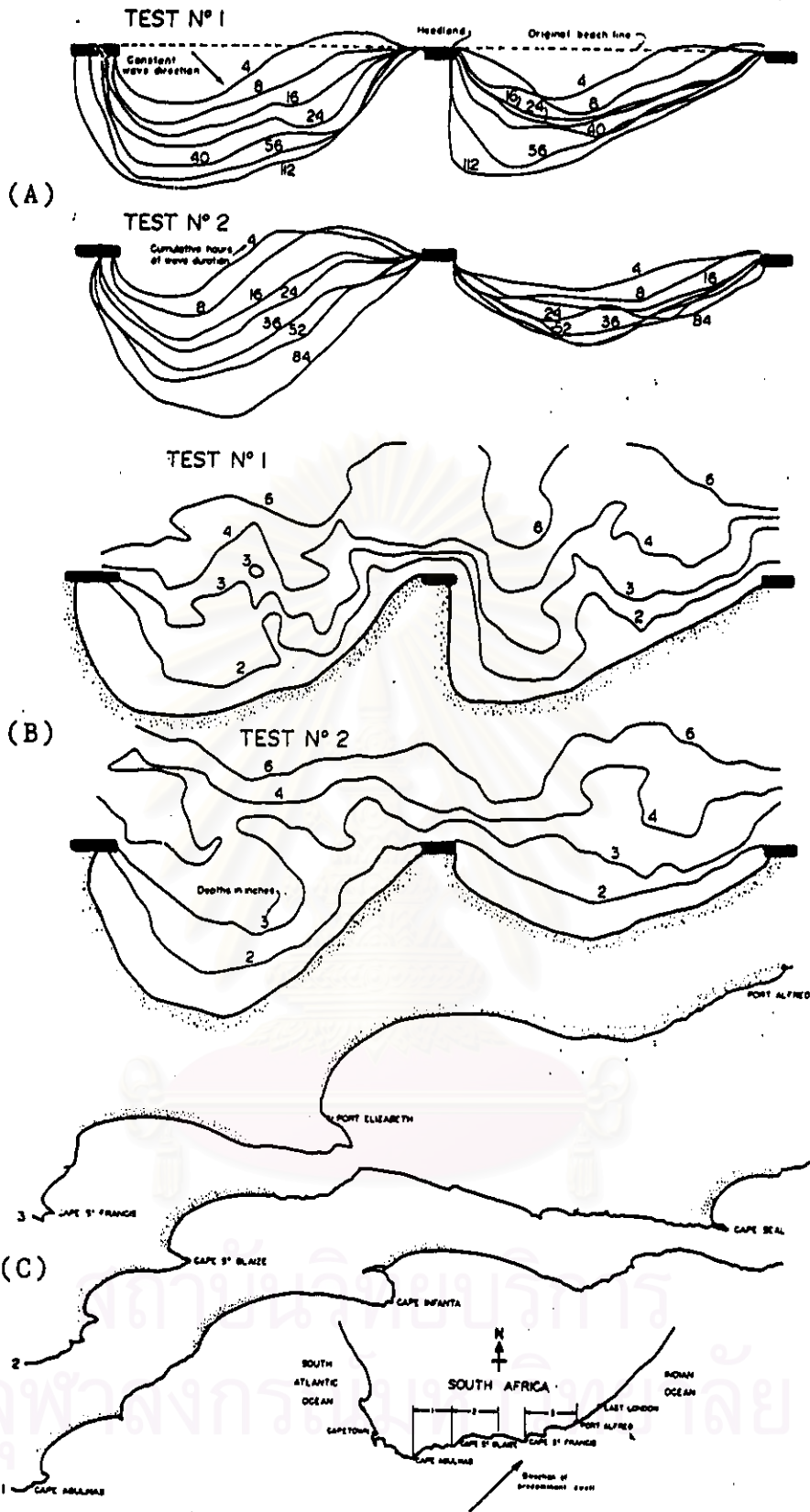
รูป 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กับ x/y

ตาราง 2-2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับชายฝั่งและอ่าวสมดุล

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Silvester, 1960	การเปลี่ยนแปลง ของชายฝั่งที่เข้าสู่ สภาพสมดุล	ศึกษาในแบบจำลองโดยใช้ คลื่นกระทำด้วยมุม 45° กับ ชายฝั่ง ไม่มีการเพิ่มตะกอน ทรายทางชายฝั่งด้านเหนือน้ำ ส่วนตะกอนทรายที่ถูกพัดพา มาสะสมทางด้านท้ายของ Wave Basin ก็จะถูกตัก ออกไป	รูปร่างของชายฝั่งสมดุลที่มีคลื่นลักษณะเฉียง และเป็น Swell Wave มากกระทำนั้นจะมีรูปร่าง เป็นอ่าวรูปครึ่งหัวใจโดยมีส่วนที่เป็นเส้นโค้งอยู่ ทางชายฝั่งด้านเหนือน้ำและเป็นเส้นสัมผัสวงกลม ที่ชายฝั่งด้านท้ายน้ำ โดยที่ชายฝั่งบริเวณที่เป็น เส้นตรงขนานกันกับแนวของสันคลื่น และส่วนที่ เป็นเส้นโค้งก็จะมีลักษณะเหมือนกับคลื่นที่ กระจายไปรอบๆ หัวหาดและเกิดการหักเหอยู่ ภายในอ่าวนั้นดังแสดงในรูป 2-18 และ รูป 2-19
Yasso, 1964	อ่าวสมดุลใน ธรรมชาติ	ศึกษาลักษณะของชายหาดใน ธรรมชาติ 4 แห่ง โดยใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์คำนวณหาสมการ รูปโค้งของอ่าวที่ศึกษาทั้ง 4 แห่ง ซึ่งได้แก่ - Spiral Beach Sandy Hook, New Jersey (รูป 2-25) - Half-moon Bay Beach, California (รูป 2-26) - Drakes Beach, California (รูป 2-27) - Limantour, California	ชายฝั่งจะเกิดการถดถอยจนเข้าสู่สมดุลและมีรูป อ่าวเป็นเส้นโค้งแบบ Logarithmic Spiral ดังแสดงใน รูป 2-20 ถึง รูป 2-23 ซึ่งจะมีรัศมีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตาม มุมที่กวาดออกไป ดังสมการ $r = e^{\theta \cot \alpha}$ เมื่อ $r =$ รัศมีเส้นโค้ง $\theta =$ มุมของรัศมีที่กวาดออกไป $\alpha =$ มุมของเส้นสัมผัสเส้นโค้ง โดยค่า α อยู่ในช่วงประมาณระหว่าง $41.26^\circ - 85.64^\circ$ ส่วนตำแหน่งของศูนย์กลางของ Log-Spiral จะใกล้ เคียงกับตำแหน่งที่เป็นหัวหาด
Vichetpan, 1969	รูปร่างของชายฝั่ง และอ่าวสมดุล	ทดลองดังแสดงในรูป 2-24 มีคลื่นทำมุมกับแนวชายฝั่ง (β) เท่ากับ 30° , 40° และ 60° ไม่มีการเติมทรายเพิ่ม การทดลองนี้เปลี่ยนค่าคาบ เวลาของคลื่น และกำหนดให้ ความสูงของคลื่น ความลึก ของน้ำ และความสูงของชาย หาดมีค่าคงที่ ตลอดการ ทดลอง	อ่าวสมดุลมีการเว้าเป็นรูปโค้งแบบ Logarithmic Spiral ดังแสดงในรูป 2-25 โดยเส้นโค้งดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ $\frac{R_1}{R_2} = e^{\theta \cot \alpha}$ จากรูปและสมการข้างต้น เมื่อสมมติให้ θ มี ค่า 10° ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง R_1/R_2 กับ α ได้ ดังแสดงในรูป 2-26 และรูปร่าง ของอ่าวสมดุลที่ได้จากการทดลองขึ้นอยู่กับมุมที่ คลื่นที่เข้าสู่ชายฝั่ง ซึ่งสามารถนำไปเขียน กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ β ได้ดัง รูป 2-27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

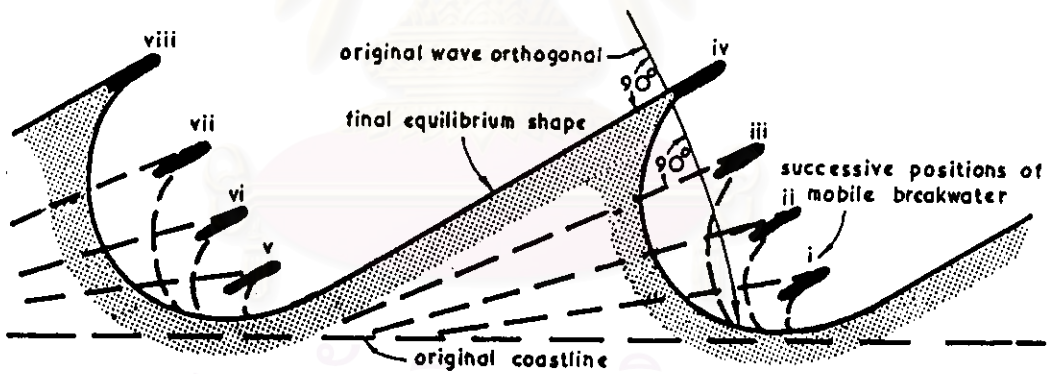
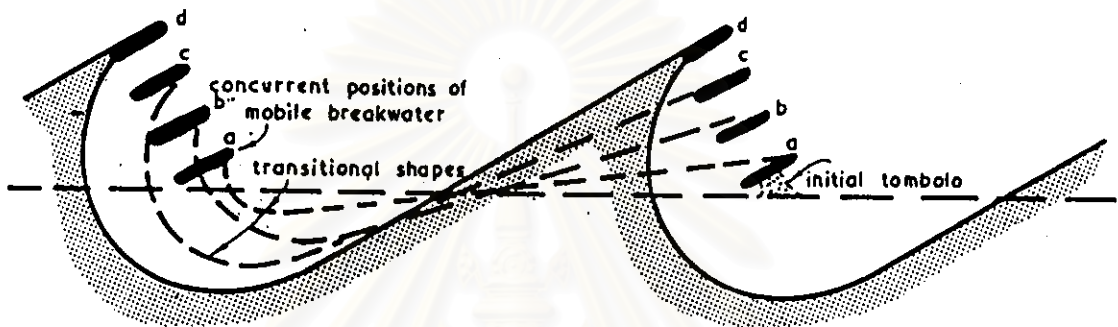
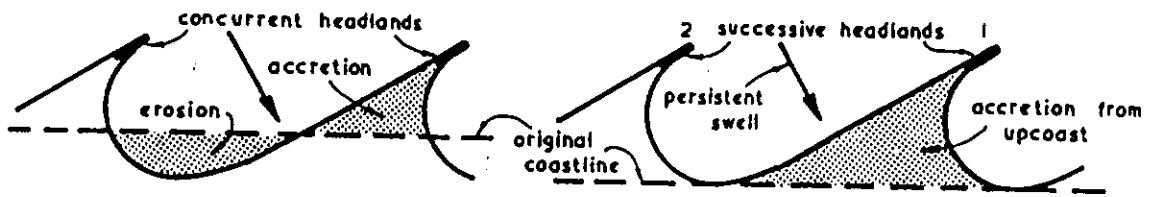
ตาราง 2-2 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับชายฝั่งและอ่าวสมดุลง

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Vichetpan, 1969 (ต่อ)	รูปร่างของชายฝั่ง และอ่าวสมดุลง		(ต่อ) อ่าวสมดุลงต้องมีความสัมพันธ์ ระหว่าง α กับ β อยู่บนเส้นนี้ และจากการตรวจสอบกับ Halfmoon Bay ในรูป 2-28 พบว่า β มีค่าเท่ากับ 52° และ α ที่ได้จากการทดลองของ Yasso (1964) มีค่า 41.26° เมื่อกำหนดจุดลง ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α ดังแสดงในรูป 2-29 ปรากฏว่าจุดดังกล่าวอยู่ใต้เส้นกราฟของอ่าวสมดุลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลจากแบบจำลองกับสภาพธรรมชาตินั้น สอดคล้องกัน
Ho, 1971	อ่าวสมดุลงรูปครึ่ง หัวใจ ซึ่งได้แก่ - Port Eyre , D'Estree Bay Anderson ออสเตรเลีย - St. Francis Bay แอฟริกาใต้	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางจากชายฝั่งกับความ ลึกของน้ำ และศึกษา ลักษณะอ่าวสมดุลงจากแบบ จำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างมุมที่สันคลื่นกระทำ กับแนวชายฝั่งเดิม (γ) กับ มุมคงที่ของเส้นสัมผัสเส้นโค้ง Logarithmic Spiral (α)	1. ลักษณะอ่าวสมดุลงไม่ขึ้นอยู่กับแนวชายฝั่งเดิม 2. อ่าวสมดุลงบริเวณชายฝั่งด้านท้ายน้ำที่เป็น เส้นตรงมีแนวขนานกับแนวสันคลื่นที่เคลื่อน ที่เข้าสู่ชายฝั่ง 3. อ่าวสมดุลงบริเวณชายฝั่งด้านเหนือน้ำที่เป็นรูปโค้ง เกิดจากการกระจายและการหักเหของคลื่นซึ่ง ขึ้นอยู่กับทิศทางของคลื่นที่กระทบปลายหัวหาด 4. ความชันคลื่นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการ ถดถอยของชายฝั่ง
Silvester และ Ho, 1972	การใช้อ่าวสมดุลง รูปครึ่งหัวใจ ใน งานป้องกันและ รักษาเสถียรภาพ ชายฝั่งทะเล ใน ประเทศสิงคโปร์	โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎี ของชายฝั่งสมดุลงรูปครึ่งหัวใจ ที่ชายฝั่งทะเล ในสิงคโปร์	1. อ่าวสมดุลงรูปครึ่งหัวใจเป็นลักษณะที่พบเห็นได้ ทั่วไป และอ่าวสมดุลงรูปครึ่งหัวใจนี้จะช่วยลด ปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง 2. อ่าวประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นสัมผัสที่ชายฝั่ง ด้านท้ายน้ำและเป็นส่วน Log-Spiral ทางชาย ฝั่งด้านเหนือน้ำ 3. เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอน แสดงว่าชาย ฝั่งนั้นเข้าสู่สภาพสมดุลง และมีสมการของ Log- Spiral สำหรับชายฝั่งนั้นๆ โดยเฉพาะ 4. การเกิดรูปร่างแบบ Log-Spiral เนื่องมาจาก การหักเหและการกระจายของคลื่นที่บริเวณด้าน หลังเชื่อมกันคลื่น



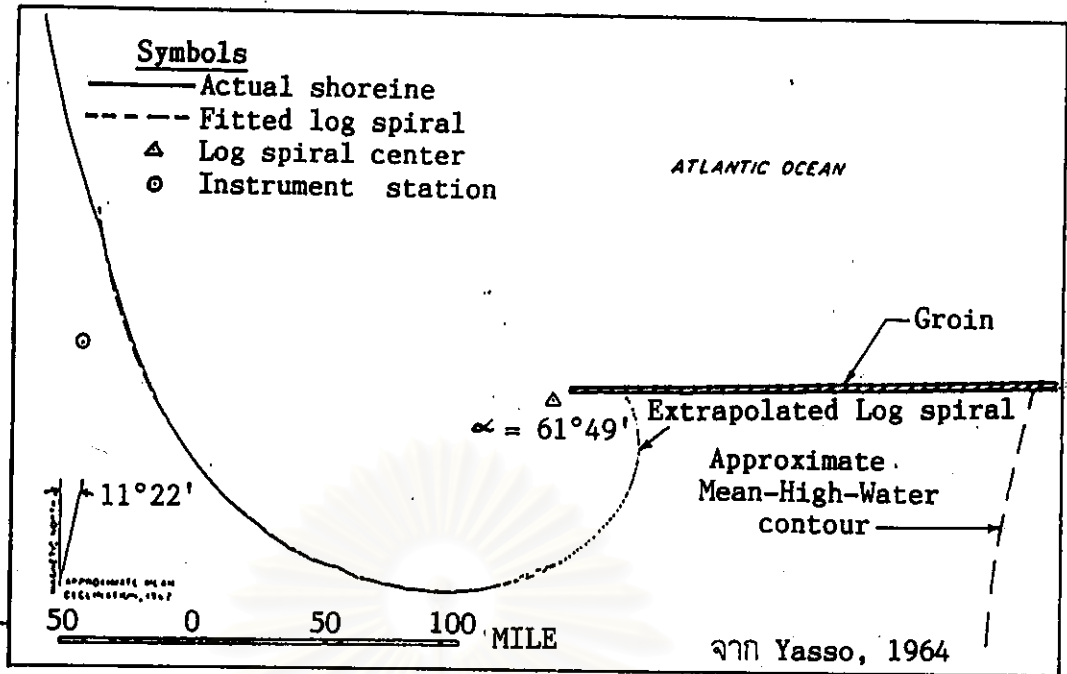
จาก Silvester, 1960

- รูป 2-18 (A) การเกิดอ่าวรูปครึ่งหัวใจจากการทดลองด้วยแบบจำลอง
- (B) เส้นชั้นความลึกในระหว่างการทดลอง
- (C) การเกิดอ่าวสมดุคที่ชายฝั่ง South Africa

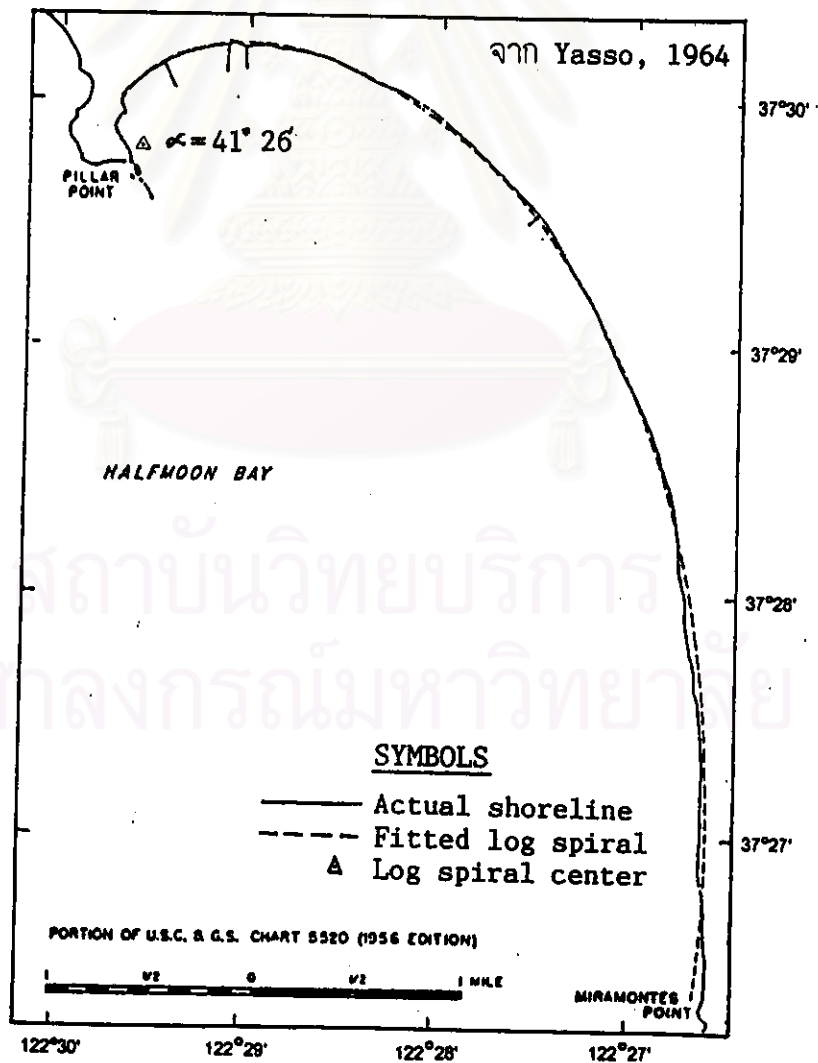


จาก Silvester, 1960

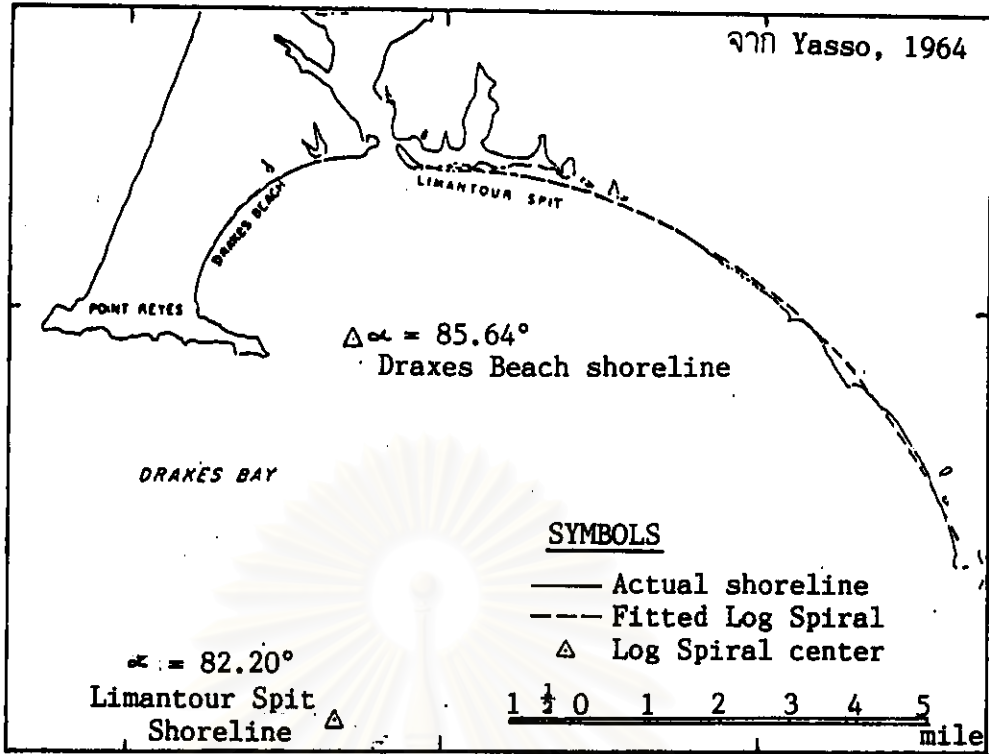
รูป 2-19 การเกิดช่่าวสมดุลโดยเขื่อนกันคลื่น



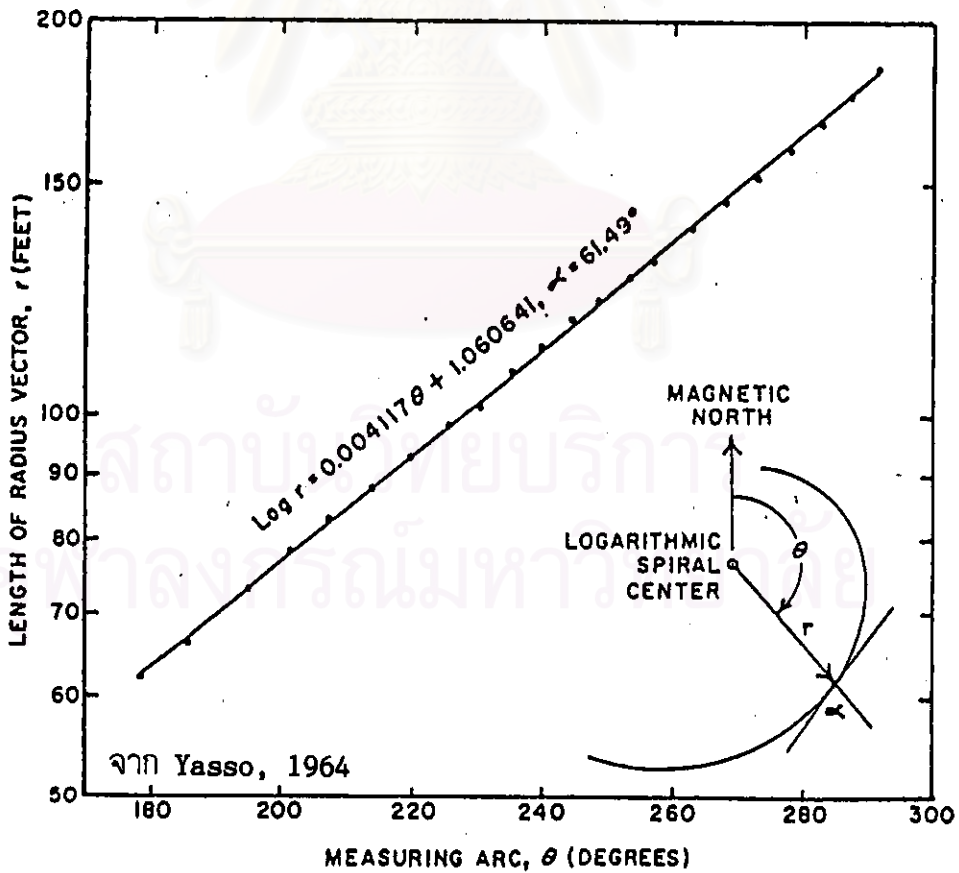
รูป 2-20 ลักษณะอ่าวสมดุคของ Sandy Hook ที่ New Jersey



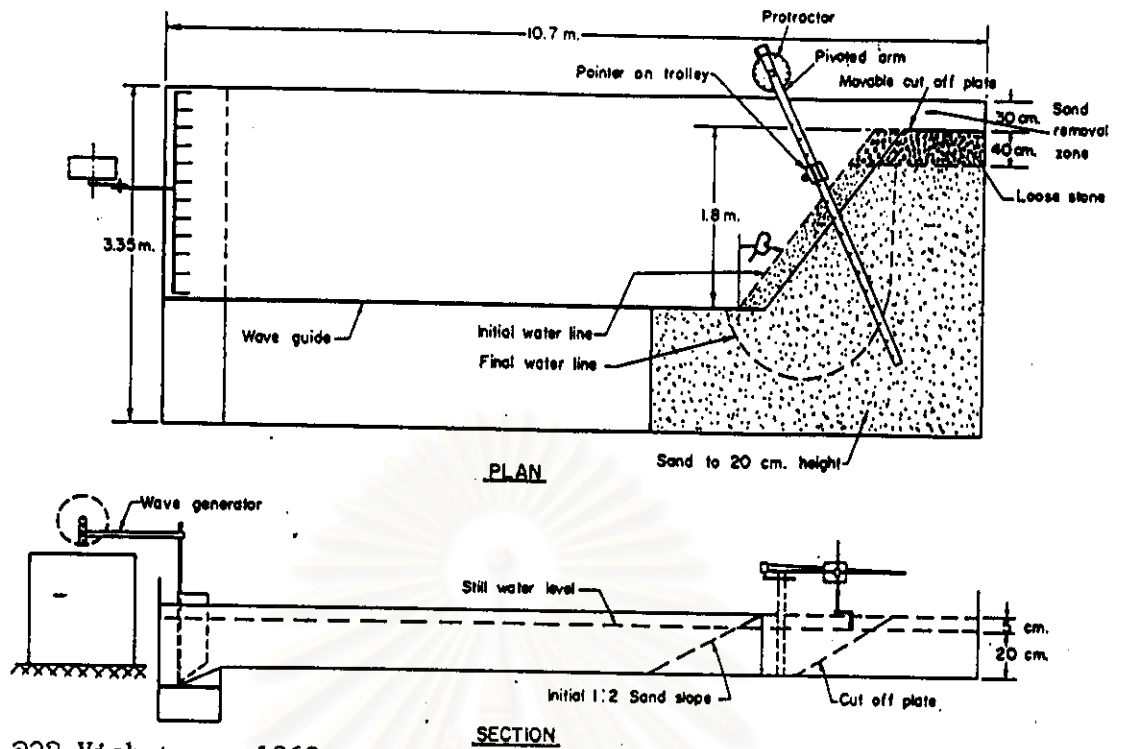
รูป 2-21 ลักษณะอ่าวสมดุค Halfmoon Bay ที่ California



รูป 2-22 ลักษณะอ่าวสมดุลาของ Drakes Beach และ Limantour ที่ California

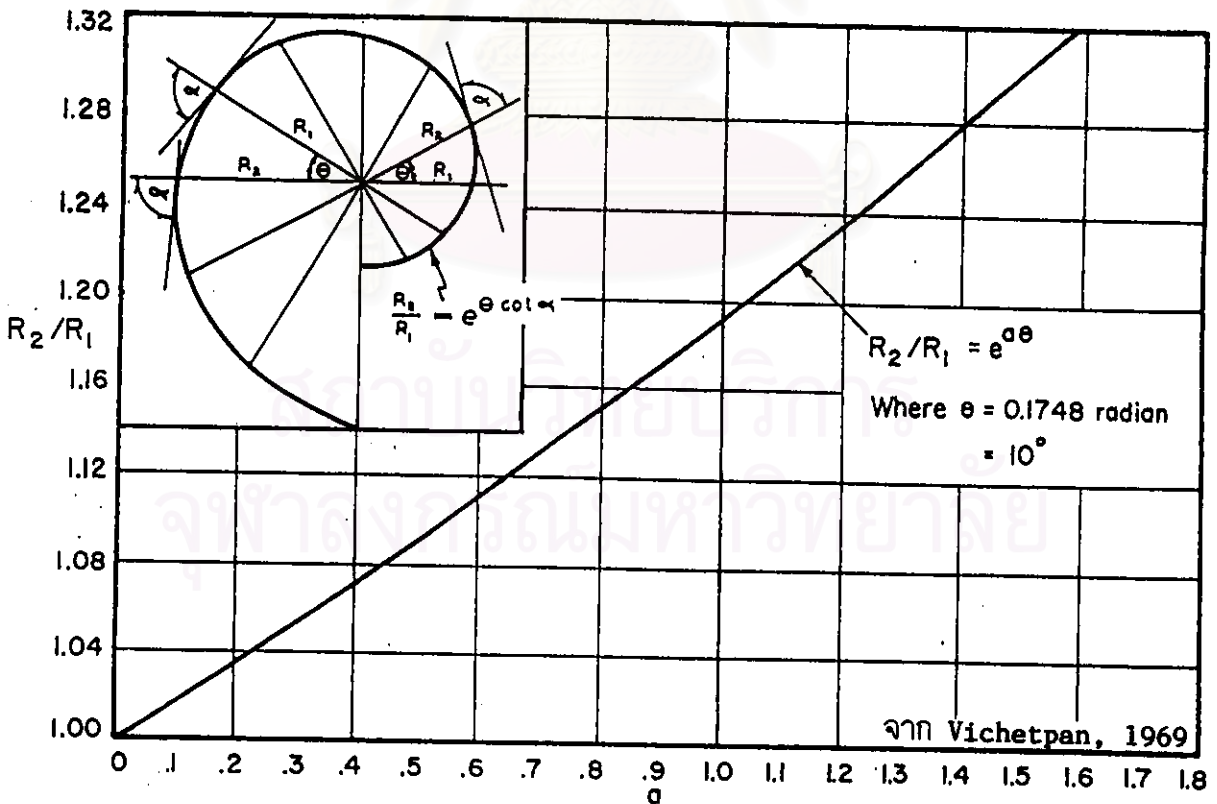


รูป 2-23 เส้นโค้ง Logarithmic Sprial

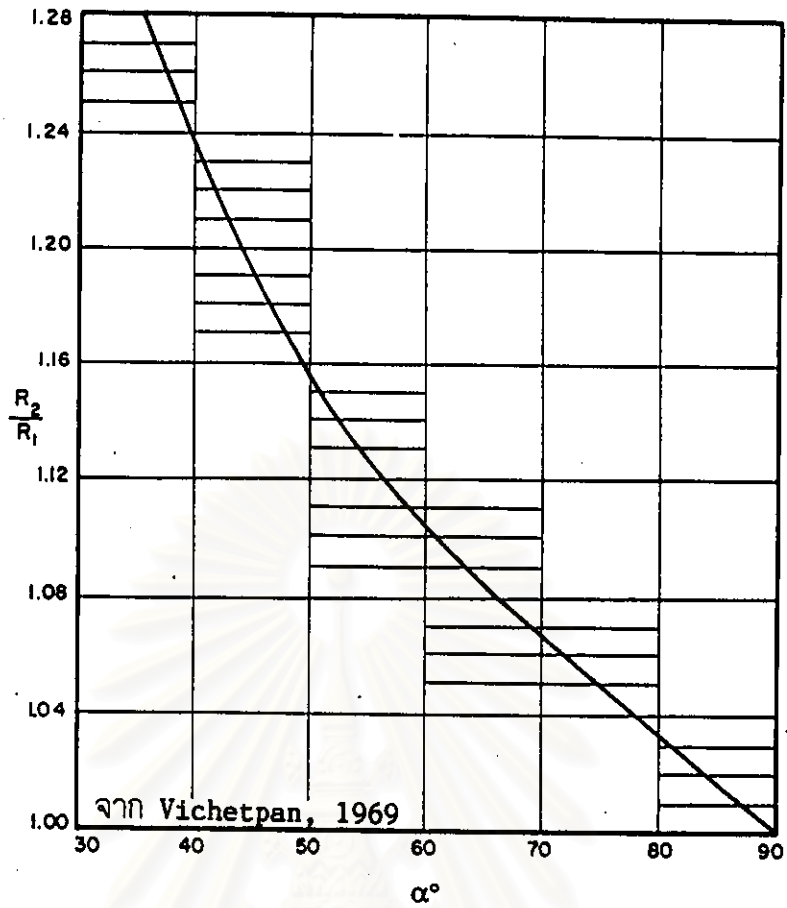


จาก Vichetpan, 1969

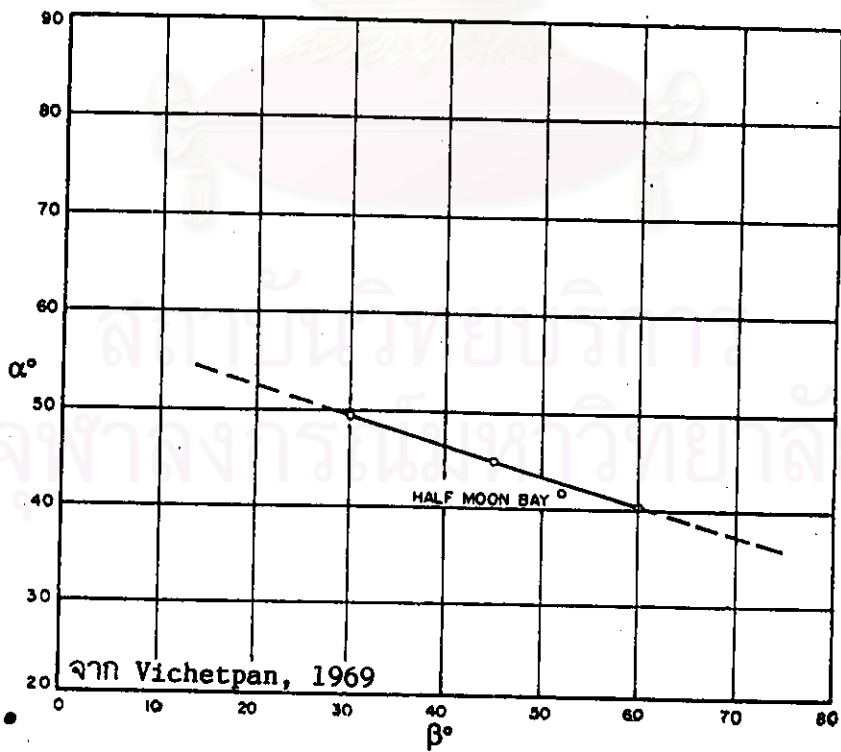
รูป 2-24 แบบจำลองที่ใช้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุ



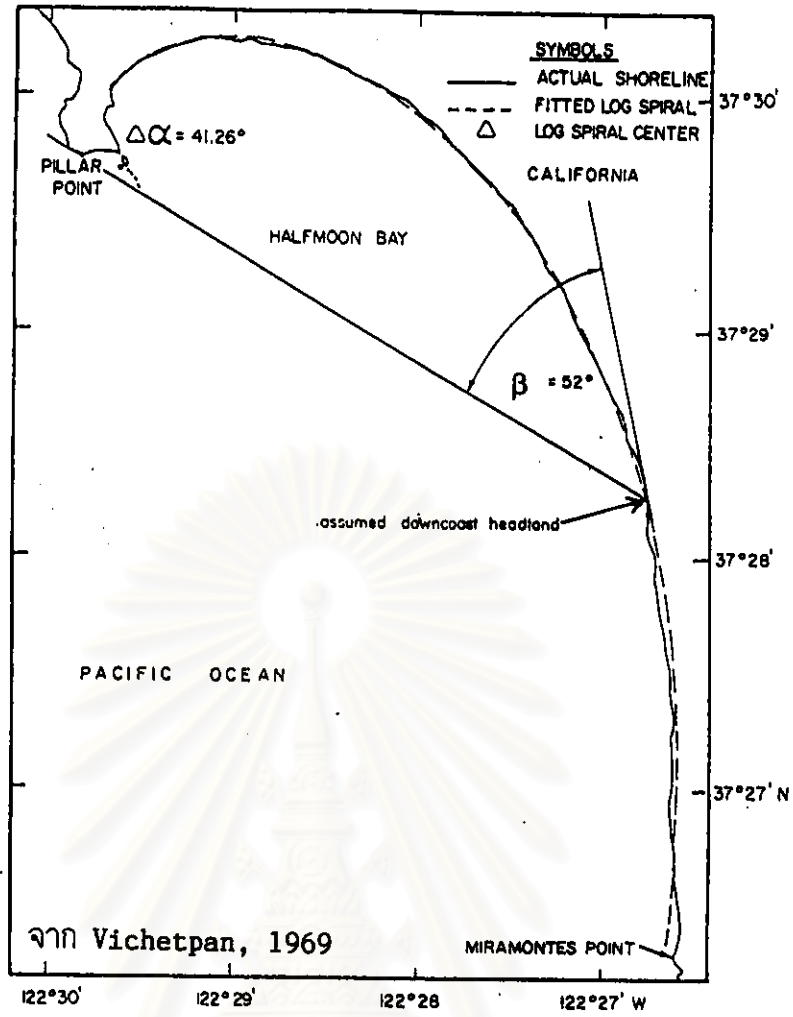
รูป 2-25 เส้นโค้ง Logarithmic Spiral และความสัมพันธ์ระหว่าง R_1 / R_2 กับค่าคงที่ a



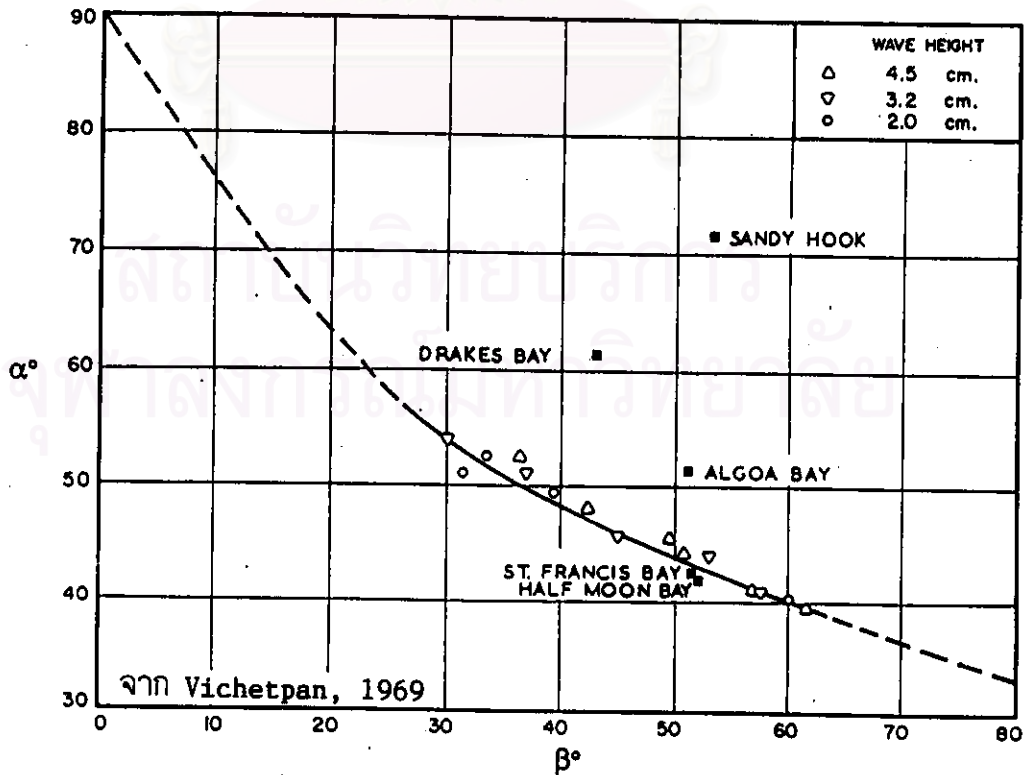
รูป 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_1 / R_2 กับค่าคงที่ α°



รูป 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่าง α° กับ β° เมื่อได้กำหนดจุดของ Halfmoon Bay



รูป 2-28 รูปแบบชายฝั่งของ Halfmoon Bay และการวาดเส้นโค้ง Logarithmic Sprial

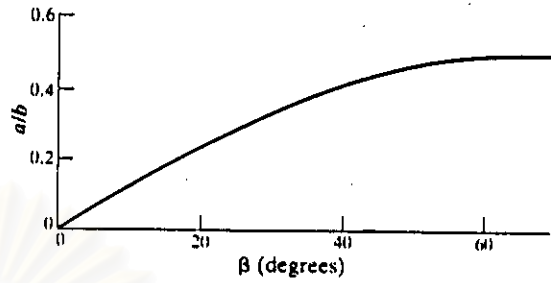
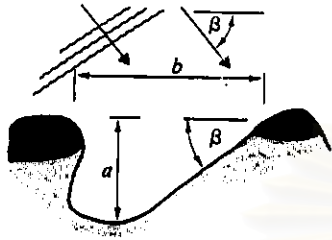


รูป 2-29 ความสัมพันธ์ระหว่าง α° กับ β° ของอ่าวสมดุลด

ตาราง 2-2 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับชายฝั่งและอ่าวสมดุลง

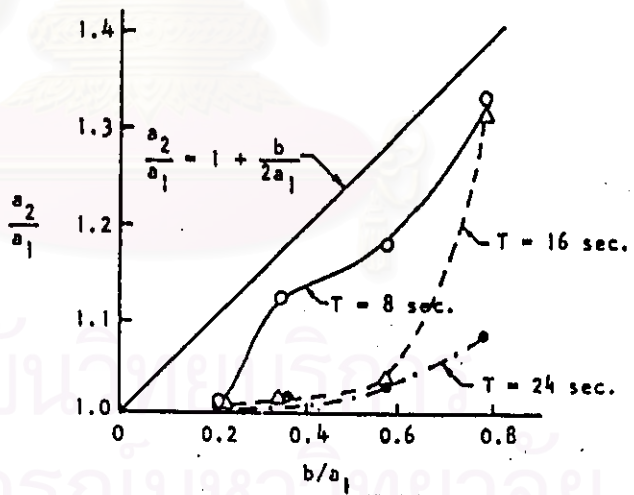
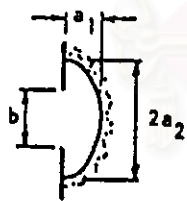
ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Silvester, 1976	ศึกษาการเว้า ของชายฝั่งระหว่าง หัวหาด	ทดลองด้วยแบบจำลอง และศึกษาจากอ่าวในธรรม ชาติที่มีสภาพสมดุลง	ชายฝั่งโดยทั่วไปในธรรมชาติจะเกิดการเว้า ระหว่างหัวหาดเป็นอ่าวรูปครึ่งหัวใจ การเว้าของ ชายฝั่งนี้เป็นผลจากการกระจายและหักเหของ คลื่นในบริเวณชายฝั่งด้านเหนือหน้า ดังแสดงในรูป 2-30 และ จากรูปเมื่อ β มีค่าลดลงทำให้ค่า a/b เข้าใกล้ศูนย์ หมายถึงการถดถอยชายฝั่งเกิด ขึ้นน้อย
Dean, 1978	ลักษณะของอ่าว สมดุลง และการ คำนวณรูปร่างของ อ่าวสมดุลง	หาสมการวิธีการคำนวณ รูปร่างของชายฝั่งระหว่าง หัวหาด	ความสัมพันธ์ระหว่างหัวหาดและระยะถดถอย ของชายฝั่งสามารถสรุปได้ดังในรูป 2-31 ซึ่งลาก เส้นแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยเส้นของเขต สูงสุด (upper limit) และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ $\frac{a_1}{a_2} = 1 + \frac{b}{2a_1}$
สกุล ท่อวิทยาน, 2531	การออกแบบ หัวหาดและการ ป้องกันชายฝั่ง ทะเลอ่าวไทยตอน ล่างในเขตจังหวัด นราธิวาส โดยวิธี การสร้างเขื่อนกัน คลื่นแยกเพื่อใช้ เป็นหัวหาดให้กับ ชายฝั่ง	รวบรวมผลการศึกษา ลักษณะอ่าวสมดุลง โครงสร้าง หัวหาด และการป้องกัน ชายฝั่งที่ผ่านมา นำมาสรุป เป็นบรรทัดฐานให้ออกแบบ หัวหาดโดยเขื่อนกันคลื่น และนำมาใช้ป้องกันชายฝั่ง ทะเลอ่าวไทยตอนล่าง	สามารถกำหนดตำแหน่งเขื่อนกันคลื่นทำหน้าที่ เป็นหัวหาดในบริเวณชายฝั่งที่ถูกกัดเซาะ โดยมี ความยาวเขื่อน 50 ม. ระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน 200 ม. ระยะเว้าของชายฝั่งทะเลจากแนวหัวหาด เกิดขึ้นประมาณ 45 ม. สำหรับชายฝั่งบริเวณ ปากแม่น้ำ กำหนดให้ระยะช่องว่างระหว่างเขื่อน ลดลงเหลือ 50 ม. เพื่อป้องกันแรงปะทะของ กระแสน้ำจากแม่น้ำไกลก ระยะเว้าของชายฝั่ง บริเวณนี้ประมาณ 25 ม. และพบว่าจะมีการ ก่อรูปของตะกอนทรายด้านหลังเขื่อนเป็นผืน ทรายหน้า (Tombolo) ยื่นออกจากชายฝั่งติด ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นตลอดแนวชายฝั่ง

- a = ระยะเข็วของชายฝั่ง
- b = ระยะช่องว่างระหว่างหัวหาด
- β = มุมที่คิดขึ้นกระทำกับแนวชายฝั่ง



จาก Silvester, 1976

รูป 2-30 ความสัมพันธ์ระหว่างการเข็วของชายฝั่ง

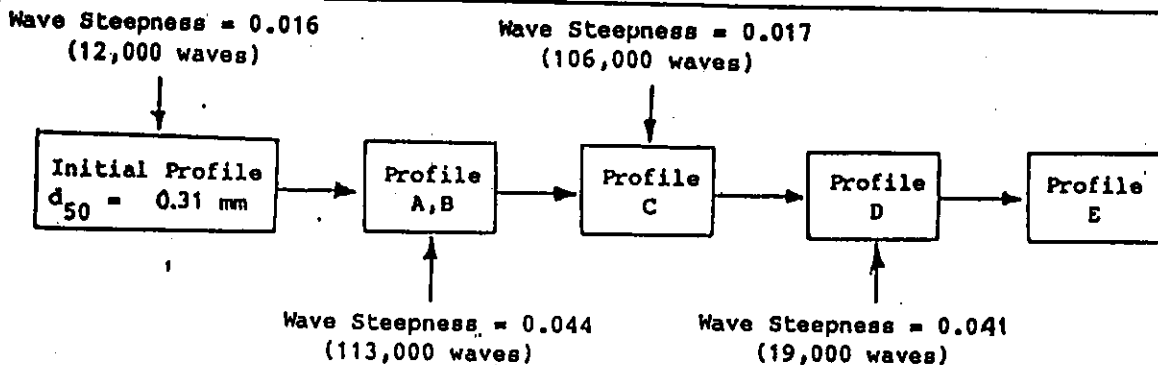


จาก Dean, 1978

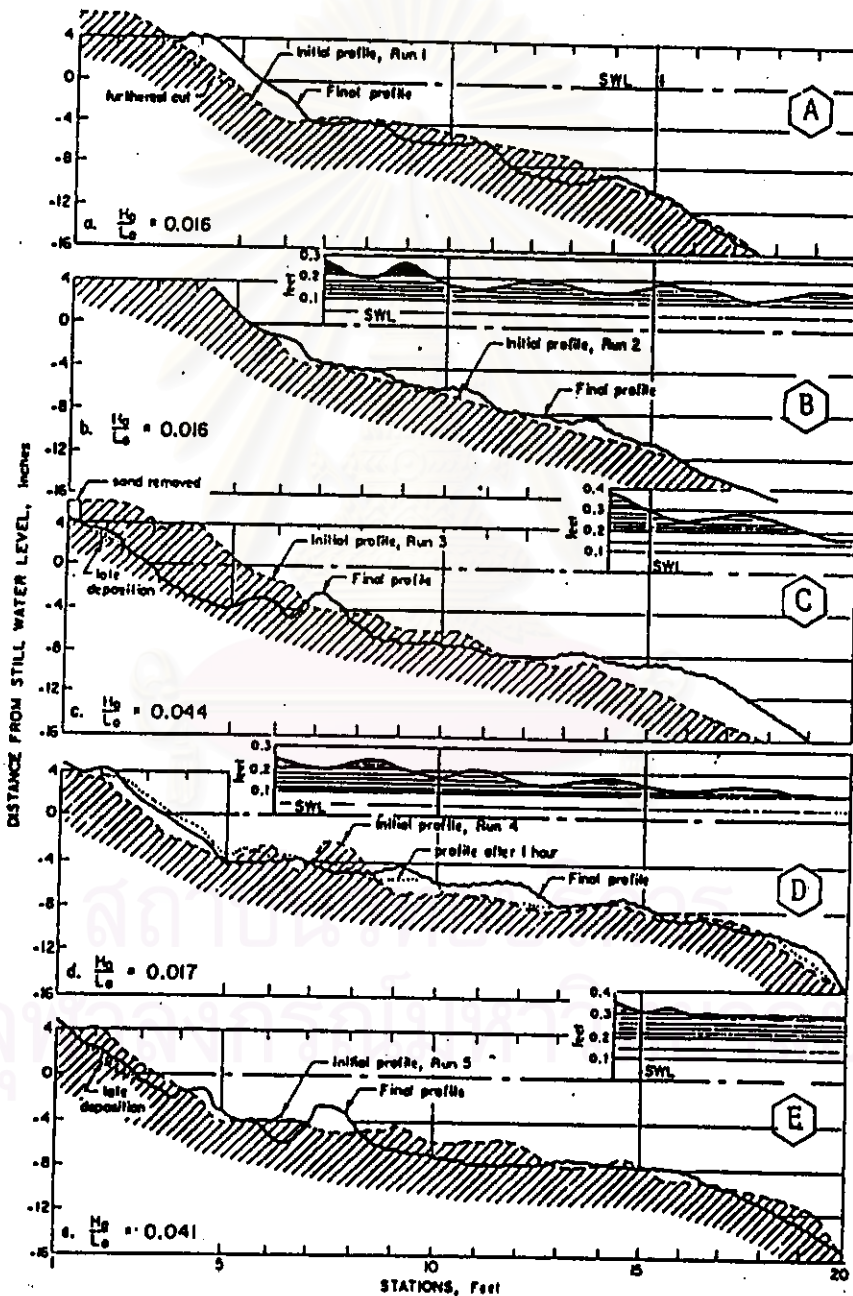
รูป 2-31 ความสัมพันธ์ของช่องว่างระหว่างหัวหาดและระยะถดถอยของชายฝั่ง

ตาราง 2-3 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับลักษณะคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Beach Erosion Board , 1936	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งกับคลื่นในลักษณะต่าง ๆ	ทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้คลื่น 2 ลักษณะ คือ - คลื่นสภาพปกติ (normal wave conditions) - คลื่นในสภาพพายุ (storm wave)	1. คลื่นในสภาพปกติ : คลื่นจะพัดพาตะกอนทรายในบริเวณนอกฝั่งให้เคลื่อนตัวเข้าหาฝั่ง 2. คลื่นในสภาพพายุ : จะก่อให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่ง และพัดพาตะกอนทรายไปตกทับถมบริเวณนอกชายฝั่ง เกิดเป็นสันดอนทรายใต้น้ำ (offshore bar) และจะถูกพัดพากลับเข้าสู่ฝั่งอีกครั้งเมื่อคลื่นอยู่ในสภาพปกติ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4-6 เท่าของเวลาในการเกิดสันดอนทราย
Meyer , 1936	อิทธิพลของคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง	ทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยแบบจำลอง Wave Basin	ความลาดชันของชายฝั่ง (foreshore slope) ขึ้นอยู่กับขนาดของเนินทราย และความชันคลื่นในน้ำลึก
Saville , 1950	การศึกษาอิทธิพลของคลื่นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง	ทดลองด้วยแบบจำลองใน wave channel โดยใช้เม็ดทรายที่มีขนาดเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.30 มม.	การเปลี่ยนแปลงความลาดชันของชายฝั่งขึ้นอยู่กับความชันคลื่น โดยการกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีความชันมากกว่า 0.03 และเกิดการทับถมเมื่อมีความชันน้อยกว่า 0.025 และผลการทดลองนี้ยังชี้ให้เห็นว่าความลาดชันของชายฝั่ง (foreshore slope) นอกฝั่ง (offshore slope) มีความสัมพันธ์กับขนาดของคลื่นด้วย
Johnson and Snay, 1950	ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของขนาดเม็ดทราย คลื่น ต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง	ทดลองในห้องปฏิบัติการ และใช้วิธีศึกษาแบบ 2 มิติ (two dimensional)	ชายฝั่งที่มีเสถียรภาพนั้นเกิดขึ้นเมื่อเม็ดทรายมีขนาดใกล้เคียงกัน (well-sorted) และเป็นไปได้ยากมากในการพยากรณ์รูปชายฝั่งว่าจะมีลักษณะเป็นอย่างไรเมื่อกำหนดเงื่อนไขของคลื่นมาให้ เพราะส่วนประกอบของเม็ดทรายในสภาพธรรมชาติมักจะไม่ค่อยแน่นอน
Scott , 1954	ความสัมพันธ์ของขนาดเม็ดทราย และขนาดของคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง	ทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้เม็ดทรายเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 มม. และได้สังเกตการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเมื่อเปลี่ยนค่าความชันคลื่นต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 2-32(ก) และ รูป 2-32(ข)	ชายฝั่งจะถูกกัดเซาะเมื่อความชันคลื่นสูง และทับถมเมื่อความชันคลื่นต่ำ และผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าไม่ว่าคลื่นในสภาพรุนแรงหรือราบเรียบที่กระทำต่อชายฝั่งมีโอกาสทำให้เกิดการสูญเสียตะกอนทรายไปยังน้ำลึกได้ทั้งสิ้น โดยเฉพาะทรายละเอียด



ก) แผนภูมิการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งกับความชันคลื่น



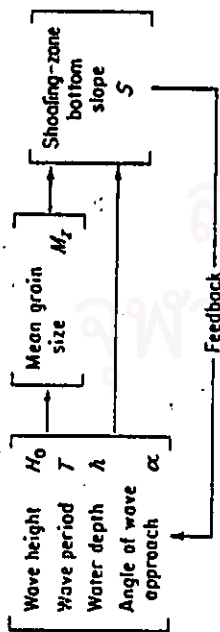
ข) การเปลี่ยนแปลงความลาดชันของชายฝั่ง (foreshore slope) เมื่อเปลี่ยนค่าความชันคลื่น จาก Scott, 1954

รูป 2-32 ผลของการเปลี่ยนแปลงความชันคลื่นที่ต่อชายฝั่ง

ตาราง 2-3 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับลักษณะคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีการศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Krumbein and Graybill , 1965	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคลื่น กับ ความลาดชันชายฝั่ง	โดยใช้แบบจำลองทางสถิติ โดยสร้างสมการความสัมพันธ์แบบเชิงกำหนดความลาดชันชายฝั่งเป็นตัวแปรอิสระ และขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยกับคุณสมบัติคลื่นเป็นตัวแปรตาม ดังแสดงในรูป 2-33(ก) หลังจากกำหนดสมการแล้ว ทำการวิเคราะห์โดยใช้ Stepwise regression analysis ระหว่างตัวแปรตามแต่ละตัวที่มีผลต่อความลาดชัน	จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความลาดชันชายฝั่งสูง (63.1%) ความสูงคลื่นมีความสัมพันธ์รองลงมา (11.0%) และมุมคลื่นมีความสัมพันธ์น้อยที่สุด (0.6%) ดังแสดงในรูป 2-33(ค)
Dan Cin , 1976	วิเคราะห์การกระจายของขนาดเม็ดทราย	ทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาความสัมพันธ์กับสภาพการทับถมและกัดเซาะชายฝั่ง	ชายฝั่งที่มีการทับถมมักจะเป็นชายฝั่งที่มีขนาดเม็ดทรายละเอียดมาก ส่วนชายฝั่งที่เกิดการกัดเซาะมักจะเป็นชายฝั่งที่ประกอบด้วยเม็ดทรายที่มีขนาดปานกลาง
ชัยวัฒน์ ผลพิรุฬห์, 2529	องค์ประกอบในการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลอำเภอ-ไทยดงล่าง โดยมีพื้นที่ศึกษาอยู่ในเขต จังหวัด นราธิวาส ระหว่างปากแม่น้ำโกลกถึงเขาคันหยง มีความยาวประมาณ 35 กม.	วิเคราะห์รายละเอียดโดยอาศัยข้อมูลข้างเคียง คือ - ภาพถ่ายทางอากาศ ปี พ.ศ. 2492 - 2526 - ข้อมูลคลื่นในทะเลจีนใต้ ปี พ.ศ. 2492 - 2525 - ข้อมูลฝน ปี พ.ศ. 2494 - 2526	องค์ประกอบหลักในการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งของพื้นที่ศึกษาคือ องค์ประกอบที่เกี่ยวกับการเคลื่อนไหวในทะเล อันได้แก่ คลื่น การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำและตะกอนชายฝั่ง และเหตุการณ์พิเศษในทะเลจีนใต้ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงตามขบวนการชายฝั่งทะเล และมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต จนกระทั่งมีลักษณะของอ่าวสมดุลง

PROCESS ELEMENTS **RESPONSE ELEMENTS**



π) Process-respond Model

In stepwise regression analysis, the coefficients, β 's in the regression equation, are derived from regression techniques or with multiple or correlation techniques based on the general linear model

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + C.$$

- Bottom slope—S Y
- Mean grain size—Mz X₁
- Wave period—T X₂
- Wave height—H₀ X₃
- Wave angle—A X₄
- Water depth—h X₅

ข) วิธีการวิเคราะห์

The three strongest combinations of X's taken one, two, three, and four at a time.

process element combinations		percentage of sum of squares of Y accounted for	
X ₁	X ₂ X ₃ X ₄ X ₅		
1	3	63.1	One at a time
	4	23.7	
		5.6	
1	3	74.1	Two at a time
1	5	66.4	
1	2	65.5	
1	2	75.9	Three at a time
1	3	74.8	
1	3	74.1	
1	2	78.1	Four at a time
1	2	75.9	
1	2	74.9	
1	2	78.7	
1	2	78.7	Five at a time

net contributions of ranked variables, %

- X₁ 63.1
- X₂ 11.0
- X₃ 1.8
- X₄ 2.2
- X₅ 0.6
- 78.7

ค) ผลจากการศึกษาโดยใช้วิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise regression