

บทที่ 3
ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา



ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลม การเปลี่ยนแปลงของคลื่น เมื่อเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง ประกอบด้วย ความลึกของน้ำที่มีผลต่อคลื่น การหักเหของคลื่น การเลี้ยวเบนของคลื่น การแตกตัวของคลื่น และลักษณะการเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากและขนานชายฝั่ง

3.1 ทฤษฎีการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลม

ในการศึกษาด้านวิศวกรรมชายฝั่ง คลื่นเป็นสาเหตุสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสภาพชายฝั่ง นอกจากนี้ ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบท่าเรือ และออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อป้องกันชายฝั่ง คลื่นที่เกิดขึ้นในทะเลหรือมหาสมุทร ส่วนใหญ่จะเป็นคลื่นลม (Wind Wave) เพราะเกิดจากการก่อกวนจากอิทธิพลของลม โดยการถ่ายเทพลังงานจากลมสู่พื้นผิวน้ำ ทำให้เกิดคลื่น ซึ่งมีความสลับซับซ้อน และมีการเปลี่ยนแปลงของสันคลื่น (Wave Crest) และท้องคลื่น (Wave Trough) ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจากความไม่ทรงตัวของลักษณะของคลื่น (Irregularity of Wave Shape) และการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการเคลื่อนที่ (Propagation) แต่อย่างไรก็ตาม มีการศึกษา ทฤษฎีของการกำเนิดคลื่นในเขตน้ำลึก รวมทั้งการสลายตัว (Decay) ของคลื่น หลังจากการก่อกวนของคลื่นหลายทฤษฎี ซึ่งทฤษฎีดังกล่าว อาศัยหลักการถ่ายเทพลังงานลมมาเป็นคลื่น โดยสมมุติฐานว่า ความเร็วลม คงที่สม่ำเสมอ (Steady Wind Speed) ทิศทางลมคงที่สม่ำเสมอ (Steady Wind direction) องค์ประกอบของการเกิดคลื่น จากทฤษฎี ทำนายคลื่น ได้แก่ ความเร็วลม ระยะทางที่ลมพัดผ่านจากแหล่งกำเนิดคลื่นถึงบริเวณขอบเขตที่ต้องการวัดความสูงคลื่น (Fetch) และระยะเวลาที่เกิดลมพัดผ่าน (Duration) ลักษณะการเกิดของคลื่นมี 3 ลักษณะ คือ ความเร็วลมที่พัดมีระยะเวลาพอที่ทำให้เกิดคลื่นขึ้น จะถูกจำกัดด้วยช่วงระยะเวลาที่เกิดลม ลักษณะนี้เรียกว่า Duration Limit ถ้าหากลมที่พัดนานจนทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานตลอดระยะทางที่ลมเคลื่อนที่ จะถูกจำกัดด้วยระยะทางของลมที่เคลื่อนที่ผ่าน ลักษณะนี้เรียกว่า Fetch Limit และลมที่พัดผ่านความยาวเฟซและระยะเวลาที่เกิดลมที่มีความยาวพอที่จะทำให้เกิดความสูงคลื่นสูงสุด จนกระทั่งขนาดคลื่นอยู่สถานะคงที่ (Steady Wave) โดยพลังงานที่ถ่ายเทจากลมสู่คลื่น เท่ากับพลังงานที่สลายตัวออก เนื่องจากคลื่นแตกตัว ลักษณะนี้เรียกว่าคลื่นก่อกวนเต็มที่ (Fully Arisen Sea, FAS) สำหรับทฤษฎีการทำนายคลื่นของการศึกษาดังนี้ มี 3 ทฤษฎี มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1.1 วิธี SMB Method

Sverdrup Munk และ Bretschneider (1947) สำนักงานอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สหรัฐอเมริกา เป็นผู้ทำการศึกษา วิธีการทำนายคลื่น เป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย เรียกว่า "SMB Method" โดยอาศัยหลักการคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Method) ของการถ่ายเทพลังงานจากลมเป็นคลื่น ด้วยการกำหนดองค์ประกอบของคลื่นลม (Wind Wave) ในเขตน้ลึก ประกอบด้วย พารามิเตอร์ของลม ได้แก่ ความเร็วลม (Wind Speed, U), ความยาวเฟซ (Fetch Length, F) และระยะเวลาที่เกิดลม (Duration, t) และส่วนพารามิเตอร์ของคลื่น ได้แก่ ความสูงของคลื่น (Wave Height, H) และคาบเวลาคลื่น (Wave Period, T) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชัน คือ

$$C = f_1(U, F, t, g) \quad (3-1)$$

$$H = f_2(U, F, t, g) \quad (3-2)$$

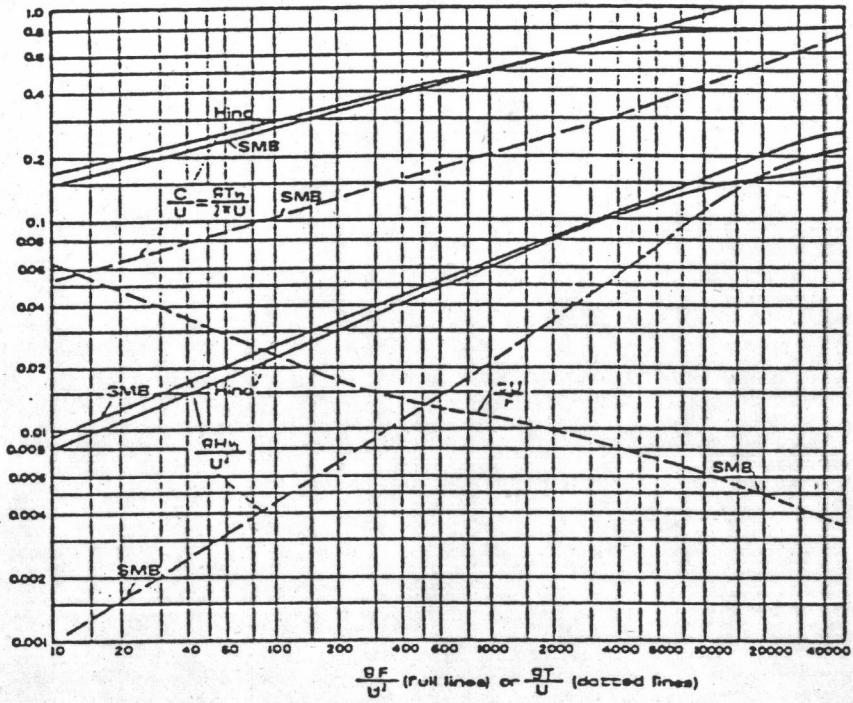
เมื่อ C คือ ความเร็วคลื่น (Wave Celerity), $C = gT/2\pi$ จะเห็นได้ว่า คลื่นในเขตน้ลึก จะขึ้นอยู่กับความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g) จากสมการ (3-1) และ (3-2) ค่า C และ H จะเป็นฟังก์ชัน f_1 และ f_2 ของ U, F, t, g ตามลำดับ โดยมี U คือ ความเร็วลม, F คือความยาวเฟซ, t คือระยะเวลาที่เกิดลม และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

จากสมการ (3-1) และ (3-2) มาวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis) ด้วยทฤษฎีของ Buckingham- π ได้

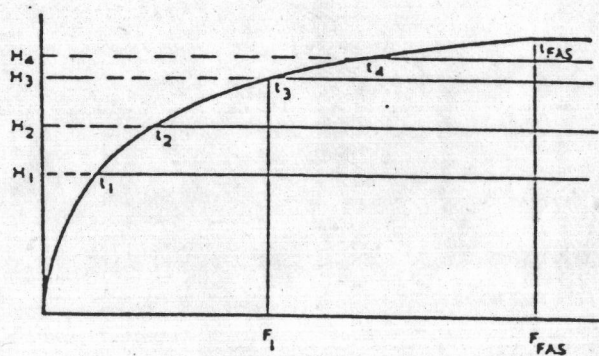
$$\frac{C}{U} = \psi_1 \left[\frac{gF}{U^2}, \frac{gt}{U} \right] \quad (3-3)$$

$$\frac{H}{U^2} = \psi_2 \left[\frac{gF}{U^2}, \frac{gt}{U} \right] \quad (3-4)$$

เมื่อ ψ_1 และ ψ_2 เป็นฟังก์ชันของความสัมพันธ์ หาได้จากข้อมูลคลื่นจากผลการทดลองหรือการบันทึกคลื่น ดังแสดงในรูป 3-1 ในสมการ (3-3) และ (3-4) ในเขตน้ลึก สามารถแทนด้วยตัวแปรของแหล่งกำเนิดคลื่น (Wave Generation) และพิจารณาที่อัตราส่วน C/U เท่ากับ $gT/2\pi U$ เห็นได้ว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ กับแหล่งกำเนิดพลังงาน (Energy Source) และการก่อดำของพลังงาน (Energy Sink) โดยมีความเร็วลมเป็นตัวแปร กล่าวคือ องค์ประกอบของแหล่งกำเนิดพลังงาน ได้แก่ ความยาวเฟซ และระยะเวลาที่เกิดลม ส่วนองค์ประกอบของก่อดำพลังงาน ความสูงคลื่น และคาบเวลาหรือความเร็วคลื่น $gT/2\pi U$ หรือ C/U



รูป 3-1 ความสัมพันธ์ $C/U = \psi_1\left(\frac{gF}{U^2}, \frac{gT}{U}\right)$ และ $\frac{gH}{U^2} = \psi_2\left(\frac{gF}{U^2}, \frac{gT}{U}\right)$
 จาก Sverdrup Munk และ Bretschneider (1947)



รูป 3-2 การก่อดั้วของความสูงคลื่นนัยสำคัญ ตลอดความยาวเฟสที่ความเร็วลมหนึ่ง
 จาก Silvester (1979)

จากรูป 3-2 แสดงการเกิดความสูงคลื่น ตลอดความยาวเฟส F เห็นได้ว่า แต่ละจุดบนส่วนโค้ง ความยาวเฟสแสดงความสัมพันธ์กับค่าเวลา t คือ ที่เวลา t_1 ความสูงคลื่น H_1 ระยะความยาวเฟสยังไม่ถึง F_1 และความสูงคลื่นจะถูกจำกัดด้วยช่วงระยะเวลาที่เกิดลม (Duration limit) เมื่อเวลาผ่านไป t_2 ความสูงคลื่น H_2 จากจุดเดิมไปข้างหน้า จากจุดนี้ ความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความยาวเฟสเพิ่มขึ้น เมื่อช่วงเวลา t_3 ทำให้ความสูงคลื่น H_3 ที่ความยาว F_1 จะเป็นช่วงเวลา t น้อยที่สุด ที่มี ความสูงคลื่นสูงสุด ลักษณะนี้เรียกว่า Fetch limit แต่ถ้าช่วงเวลา t_4 มีค่ามากกว่า t_3 จะทำให้ H_4 มีค่ามากกว่า H_3 และเมื่อความเร็วลมที่พัดผ่านระยะทาง F_{FAS} และ t_{FAS} ความสูงคลื่นจะไม่สูงกว่า H_{FAS} ซึ่งสภาพนี้เรียกว่า สภาพการก่อตัวของคลื่นเต็มที่ (Fully Arisen Sea) และค่าความสูงคลื่น H_{FAS} ขึ้นอยู่กับความเร็วลมเท่านั้น และไม่เกี่ยวข้องกับ ความยาวเฟสและระยะเวลาที่เกิดลม

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาของ Sverdrup Munk และ Bretschneider (1947) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ ไร่นวดยดังนี้

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.283 \tanh \left(0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right) \quad (3-5)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U} = 1.20 \tanh \left(0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right) \quad (3-6)$$

$$\frac{gt}{U} = K \exp \left\{ \left[A \left(\ln \left(\frac{gF}{U^2} \right) \right)^2 - B \ln \left(\frac{gF}{U^2} \right) + C \right]^{1/2} + D \ln \left(\frac{gF}{U^2} \right) \right\} \quad (3-7)$$

โดยที่ K, A, B, C, D เป็นค่าคงที่

$$A = 0.0161$$

$$B = 0.3692$$

$$C = 2.2024$$

$$D = 0.8798$$

$$K = 6.5882$$

และ $H_{1/3}$ คือ ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height)

$T_{1/3}$ คือ คาบเวลาคคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Period)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

t คือ ระยะเวลาที่เกิดลม

F คือ ความยาวเฟส

U คือ ความเร็วลม ที่ระดับความสูง 10 ม. จากระดับน้ำทะเล

ค่าความสูงและคาบเวลาคคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการ (3-5) และ (3-6) วิธีการทำนายนคลื่นแบบ SMB นี้ ศูนย์วิจัยวิศวกรรมชายฝั่ง (Coastal Engineering Research

Center) ของ US.Army Corps of Engineer ได้ใช้เป็นวิธีมาตรฐานในการทำนายคลื่นด้วย ข้อมูลลม และได้จัดพิมพ์รายละเอียดเผยแพร่อยู่ใน คู่มือการป้องกันชายฝั่ง (Shore Protection Manual) ครั้งที่ 3 ปี ค.ศ.1977

3.1.2 วิธี PM Method

Pierson และ Moskowitz (1964) เป็นผู้ทำการศึกษา การทำนายคลื่น โดยอาศัย ความสัมพันธ์จากการบันทึกข้อมูลคลื่นกับความเร็วลมในขณะทะเลกำลังก่อตัวเต็มที่ (Fully Developing Sea) มาทำการวิเคราะห์รูปแบบของพลังงานคลื่นสเปกตรัม โดยการใช้การ กระจายความเร็วลม ที่ระดับความสูง 19.5 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง ซึ่งพลังงาน สเปกตรัมของ PM ได้แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ สเปกตรัมความถี่ของ PM (The PM Frequency Spectrum) และ สเปกตรัม คาบเวลาของ PM (The PM Period Spectrum)

1. สเปกตรัมความถี่ของ PM (The PM Frequency Spectrum)

รูปแบบของพลังงานสเปกตรัม ในสภาพของ Fully Arisen Sea (FAS) แสดง ได้ดังสมการที่ (3-8) และ (3-9)

$$S_{H^2}(f)df = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp -\beta \left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f} \right)^4 df \quad (3-8)$$

หรือ

$$S_{H^2}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp -\left(\beta \frac{g}{2\pi U_{19.5} f} \right)^4 \quad (3-9)$$

เมื่อ $S_{H^2}(f)$ คือ พลังงานต่อหน่วยความถี่ f หรือ df

f คือ ความถี่ของคลื่น $f = 1/T = \omega/2\pi$

ω คือ ความเร็วเชิงมุม $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$

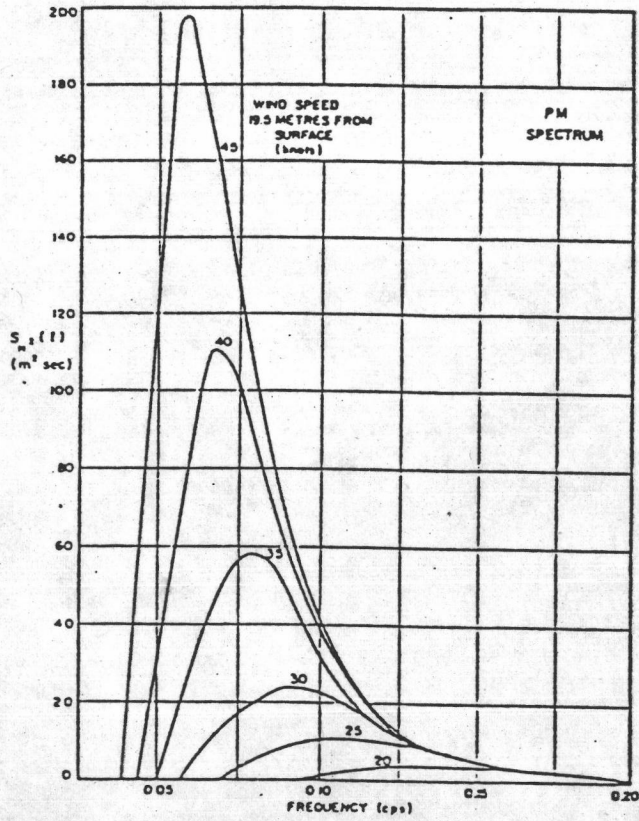
α คือ ค่าคงที่ไม่มีมิติ = 8.10×10^{-3}

β คือ ค่าคงที่ไม่มีมิติ = 0.74

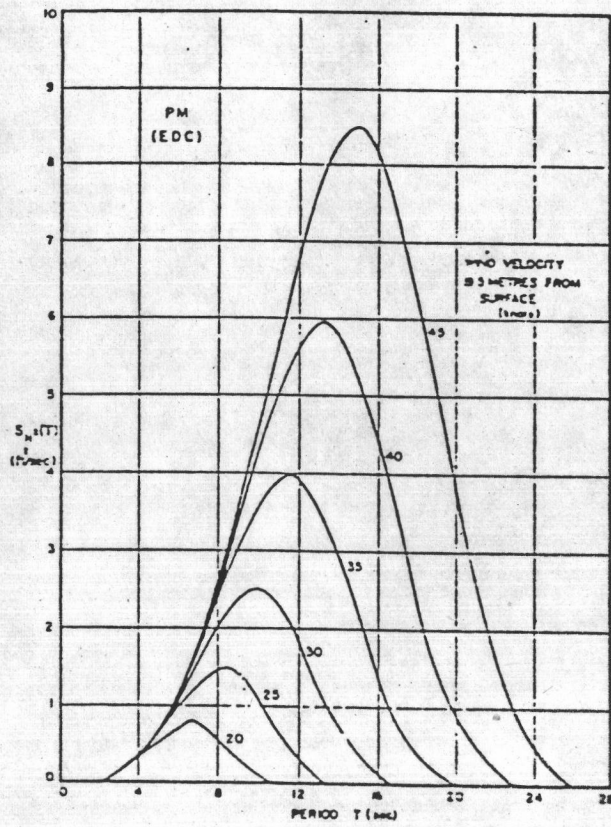
$U_{19.5}$ คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูง 19.5 ม. จากระดับน้ำทะเลมีหน่วย เป็น น็อต

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีค่า 32.2 ฟุตต่อวินาที²
จากสมการ (3-9) สามารถเขียนรูปสเปกตรัมไม่มีมิติ ได้

$$\frac{S_{H^2}(f)g^3}{U_{19.5}^5} = \frac{\alpha}{(2\pi)^4} \left(\frac{f}{U_{19.5}} \right)^5 \exp - \frac{\beta}{(2\pi)^4} \left[\frac{f}{U_{19.5}} \right]^4 \quad (3-10)$$



รูป 3-3 สเปกตรัมของคลื่น PM ที่ความเร็วลม $U_{19.5} = 20-40$ นอต จาก Silvester (1979)



รูป 3-4 โฉงการกระจายพลังงาน (EDC) โดย สเปกตรัม-คาบเวลาของ PM จาก Silvester (1979)

สมการ (3-9) ได้แสดงในรูป 3-3 สเปกตรัมของความสูงคลื่นที่ความเร็วต่าง ๆ กัน และสมการ (3-10) ได้แสดงในรูป 3-5 แสดงความสัมพันธ์ของสเปกตรัมที่ไม่มีมิติกับความเร็วลม

2. สเปกตรัมคาบเวลาของ PM (The PM Period Spectrum)

Bretschneider (1963) ใช้หลักการของ Roll และ Fischer (1956) โดยใช้คาบเวลาของคลื่นเป็นแกนนอน แทนการใช้ความถี่ และสามารถเขียนสมการสเปกตรัมของคาบเวลา คือ

$$S_{H^2}(T)dT = \frac{\alpha g^2 T^3}{(2\pi)^4} \exp - \beta \left(\frac{gT}{2\pi U_{19.5}} \right)^4 dT \quad (3-11)$$

หรือ

$$S_{H^2}(T) = \frac{\alpha g^2 T^3}{(2\pi)^4} \exp - \beta \left(\frac{gT}{2\pi U_{19.5}} \right)^4 \quad (3-12)$$

จากสมการ (3-12) ค่า และ มีค่าเช่นเดียวกับ สมการ (3-9) ในสมการ (3-12) แสดงในรูป 3-4 สเปกตรัมของคาบเวลาคลื่น ที่ความเร็วต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า โค้งกระจายพลังงาน (Energy Distribution Curve, EDC) จะเห็นได้ว่า พื้นที่ภายใต้รูป 3-3 และ 3-4 จะมีลักษณะรูปร่างเกือบเป็นรูปสามเหลี่ยม และในรูป 3-4 จะพบว่า จุดที่พลังงานสูงสุดจะเป็นคาบเวลามากที่สุด (T_{max}) ซึ่งสอดคล้องกับ f_{max} ในรูป 3-3 คือ $T_{max} = 1/f_{max}$ จากสมการ (3-12) แสดงอยู่ในสเปกตรัมไม่มีมิติ ดังนี้

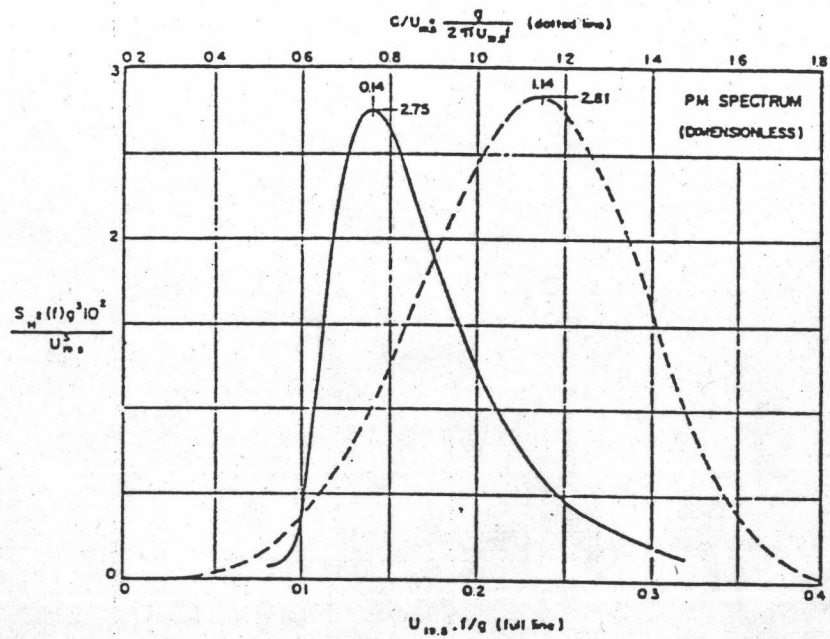
$$\frac{S_{H^2}(T)g}{U_{19.5}^2} = \frac{\alpha}{2\pi} \left(\frac{C}{U_{19.5}} \right)^3 \exp \left[- \beta \left(\frac{C}{U_{19.5}} \right)^4 \right] \quad (3-13)$$

เมื่อ C คือ ความเร็วคลื่น (Wave Celerity) = $gT/2\pi$ จากสมการ (3-12) ได้แสดงลักษณะของสเปกตรัมไม่มีมิติ ดังแสดงในรูป 3-6 จะเห็นว่าที่จุดมุดยอดของสามเหลี่ยม ค่า $C/U_{19.5}$ เท่ากับ 1.0 สำหรับการหาค่าพลังงานสูงสุด (Peak Energy) ที่คาบเวลาสูงสุด (T_{max}) ในรูป 3-4 สามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการ (3-10) ที่มี T เป็นตัวแปร และให้ค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

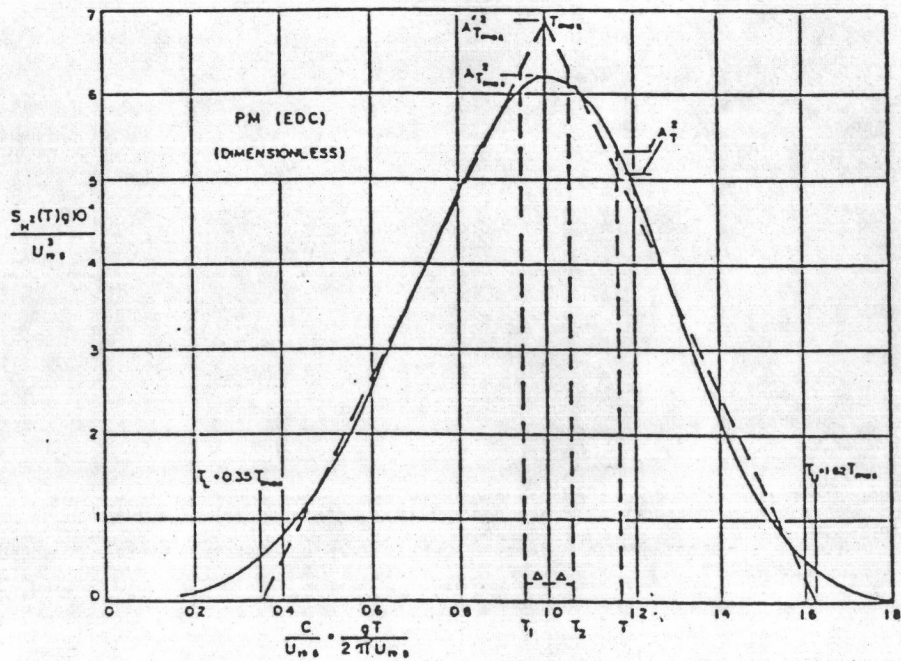
$$\frac{gT_{max}}{2\pi U_{19.5}} = \left(\frac{3}{4\beta} \right)^{1/4} \quad (3-14)$$

B = 0.74 ในกรณีที่ เป็น FAS

$$\frac{gT_{max}}{2\pi U_{19.5}} = 1.003 \quad (3-15)$$



รูป 3-5 แสดงความสัมพันธ์ ไม่มีมิติระหว่าง $U_{19.5} f/g$ หรือ $C/U_{19.5}$ กับ $S_{H_2}(f) g^3 10^2 / U_{19.5}^5$ จาก Silvester (1979)



รูป 3-6 กราฟ EDC ของ PM ไม่มีมิติ และการกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยม ในสภาวะ FAS จาก Silvester และ Vongvissessomjai (1971)

$$\text{ดังนั้น } T_{\max} = \frac{2\pi U_{19.5}}{g}$$

$$\text{หรือ } T_{\max} = 0.33 U_{19.5} \quad (3-16)$$

เมื่อ T_{\max} มีหน่วย วินาที และ $U_{19.5}$ คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็น น็อต

จากสมการ (3-11) ทำการ อินทิเกรต (Integrate) T จาก 0 ถึง Infinity ได้

$$\frac{1}{4} \left(H_{1/3} \right)^2 = \frac{\alpha U_{19.5}^4}{4\beta g^2} \quad (3-17)$$

$$H_{1/3} = \frac{2 U_{19.5}^2}{g} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (3-18)$$

สำหรับในกรณี FAS $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$ และ $\beta = 0.74$ จากสมการ (3-18) จะได้

$$H_{1/3} = 0.0185 U_{19.5}^2 \quad (3-19)$$

เมื่อ $H_{1/3}$ คือ ความสูงคลื่นสำคัญ ที่ FAS มีหน่วยเป็น ฟุต และ $U_{19.5}$ คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็น น็อต

เมื่อแทนค่า สมการ (3-16) ลงในสมการ (3-19) จะได้

$$H_{1/3} = 0.17 T_{\max}^2 \quad (3-20)$$

$$\text{หรือ } T_{\max} = 2.43 H_{1/3} \quad (3-21)$$

เมื่อ $H_{1/3}$ มีหน่วยเป็นฟุต และ T_{\max} มีหน่วยเป็นวินาที

สมการ (3-20) และ (3-21) แสดงว่า ในกรณีที่คลื่นในทะเลหรือมหาสมุทร อยู่ในสภาวะคลื่นก่อกำเนิดเต็มที่ (FAS) แล้ว ความสูงคลื่นสำคัญ มีความสัมพันธ์กับคาบเวลาคลื่นสูงสุด โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วลม

สำหรับสมการ (3-18) นี้ ใช้ในการหาความสูงคลื่นในสภาวะคลื่นกำลังก่อกำเนิดเต็มที่ (Developing Sea) ของการศึกษาที่ โดยค่าของ α และ β สามารถคำนวณมาจาก

$$\alpha = 0.0081 \left[\frac{F}{F_{FAS}} \right]^{-0.1944} \quad (3-22)$$

$$\beta = 0.1 \exp \left[(\ln 7.4) \left[\frac{F}{F_{FAS}} \right]^{-0.284} \right] \quad (3-23)$$

รูป 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วน F/F_{FAS} กับค่า α, β และ α/β สำหรับในสถานะเลก่อดำเต็มๆ จากผลการศึกษาของ Silvester และ Vongvissessomjai (1971) โดยอาศัยหลักการจาก Inoue (1967) ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$F_{FAS} = 3.19 U_{19.5} \quad (3-24)$$

เมื่อ F_{FAS} คือ ความยาวเพช่น้อยที่สุดที่เกิดใน FAS มีหน่วยเป็น ไมล์ทะเล (Nautical Mile)

$U_{19.5}$ คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูง 19.5 เมตร จากระดับน้ำทะเล มีหน่วยเป็น น็อต

Silvester และ Vongvissessomjai (1971) ได้ศึกษา ความเร็วกลุ่มคลื่น (Wave Group Velocity, $\bar{C}_{T_{max}}$) ที่มีคาบเวลา T_{max} เคลื่อนที่ผ่านตลอด ความยาวเพช่น FAS ได้ดังนี้

$$\frac{\bar{C}_{T_{max}}}{U_{19.5}} = \frac{0.7^{F/F_{FAS}} \left[\frac{C_{T_{max}}}{U_{19.5}} \right]^{d(F/F_{FAS})}}{F/F_{FAS}} \quad (3-25)$$

และ

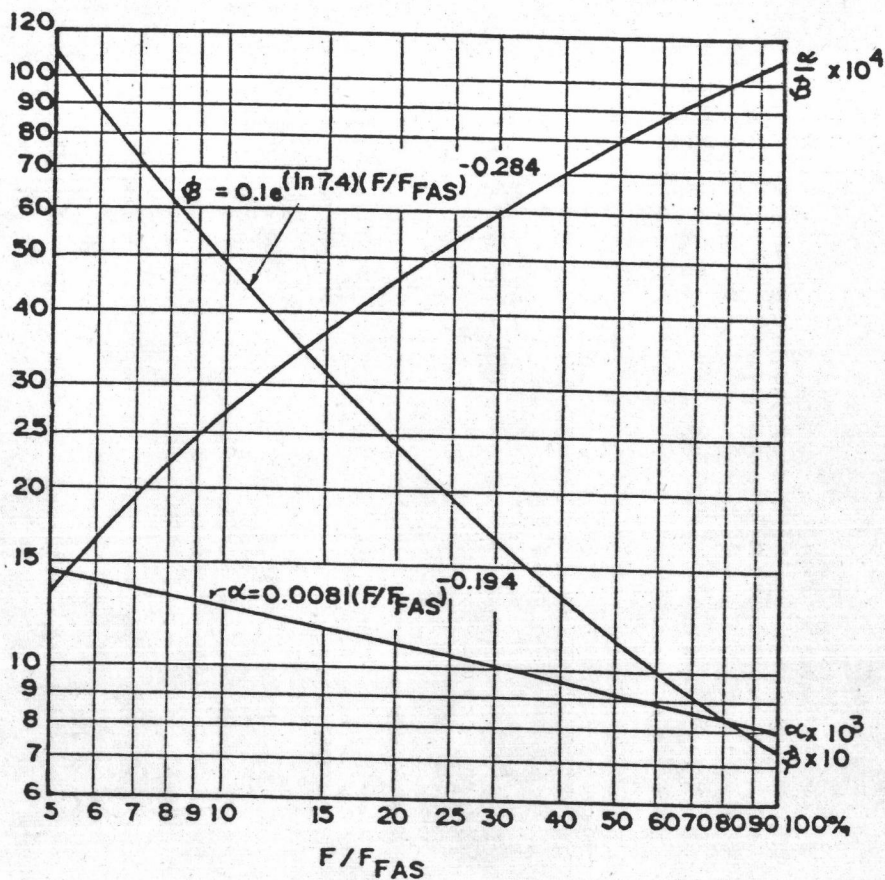
$$\frac{\bar{C}_{T_{max}}}{U_{19.5}} = \frac{g T_{max}}{2\pi U_{19.5}} = \left[\frac{3}{4\beta} \right]^{1/2} = 1.003 \quad (3-26)$$

และระยะเวลาที่เกิดลมน้อยที่สุด ที่ต้องการใน สภาวะ FAS

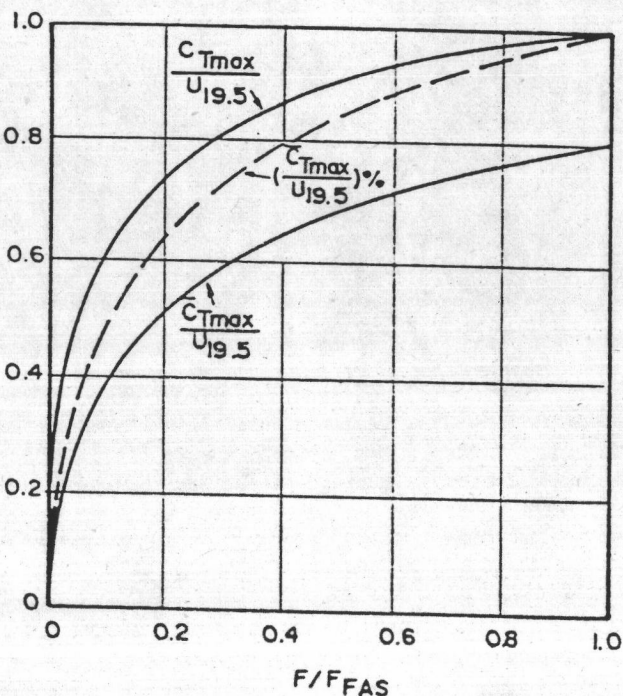
$$t_{FAS} = \frac{F_{FAS}}{(\bar{C}_g)_{T_{max}}} \quad (3-27)$$

เมื่อ $(\bar{C}_g)_{T_{max}}$ คือ ค่าความเร็วกลุ่มคลื่นเฉลี่ย ที่มีคาบเวลา T_{max} จากสมการ (3-25) แสดงในรูป 3-8 พบว่า อัตราส่วนของความเร็ว $\bar{C}_{T_{max}}/U_{19.5}$ ที่ปลายเพช่นในกรณีที่อยู่ในสภาวะ FAS จะมีค่า 0.8 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วกลุ่มคลื่น ที่ $(T_{FAS})_{T_{max}}$ มีค่าเท่ากับ 0.8 เท่าของความเร็วลมที่ระดับความสูง 19.5 เมตร

$$(\bar{C}_g)_{T_{max}} = 0.8 U_{19.5} \quad (3-28)$$



รูป 3-7 ค่า α และ β ในสภาวะคลื่นกำลังก่อดัว
จาก Muangman (1973)



รูป 3-8 กลุ่มความเร็วคลื่นต่าง ๆ ตลอดความยาวเฟตซ์
จาก Silvester และ Wongvissessomjai (1971)

แทนสมการ (3-23), (3-27) ลงในสมการ (3-26) ได้

$$t_{FAS} = 7.95 U_{19.5}^{\frac{1}{2}} \quad (3-29)$$

เมื่อ t_{FAS} คือ ระยะเวลาที่เกิดลมน้อยที่สุด ที่เกิด FAS มีหน่วยเป็น ชั่วโมง
 $U_{19.5}$ คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูง 19.5 เมตร จากระดับน้ำทะเล มีหน่วยเป็น นอต

รูป 3-9 แสดงอัตราส่วน $\bar{C}_{Tmax} / U_{19.5}$ เป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้หาอัตราส่วน t/t_{FAS} และ F/F_{FAS} ได้ดังนี้

$$\frac{t}{t_{FAS}} = \frac{F/F_{FAS}}{\bar{C}_{Tmax} / U_{19.5}} \times 100 \% \quad (3-30)$$

เมื่อ t คือระยะเวลาที่เกิดลมจริง, F คือ ความยาวเพนซ์ที่วัดได้ จากสมการ (3-30) ได้ แสดงอยู่ในรูป 3-9

กล่าวโดยสรุปได้ว่าเมื่อทะเลอยู่ในสภาวะคลื่นกำลังก่อตัว (Developing Sea) การคำนวณหาความสูงคลื่น ใช้สมการ (3-18) และสำหรับในกรณีคลื่นก่อตัวเต็มที่ ความสูงคลื่นใช้สมการ (3-19) โดยการจำแนกสภาพทะเล จะใช้สมการ (3-24), (3-27) หรือสมการ (3-30)

Silvester และ Vongvisessomjai (1971) ได้เสนอการหาคาบเวลาของคลื่นที่เกิดใน FAS ที่มีพลังงานสูงสุด (T_{FASmax}) มีค่าเท่ากับ $0.33 U_{19.5}$ เมื่อ (T_{FASmax}) คือ คาบเวลาของคลื่น ที่เกิดใน FAS มีหน่วยเป็นวินาที สำหรับคาบเวลาของคลื่นหาได้จากความสัมพันธ์ F/F_{FAS} และ (T/T_{FASmax}) ส่วนคาบเวลาของคลื่นนี้สำคัญ มีค่าประมาณ $0.929 T_{max}$ สำหรับรายละเอียดของ วิธี PM ดูเพิ่มเติมจาก Silvester (1979) Silvester and Vongvisessomjai (1971) และ Muangman (1973)

3.1.3 วิธี JONSWAP Method

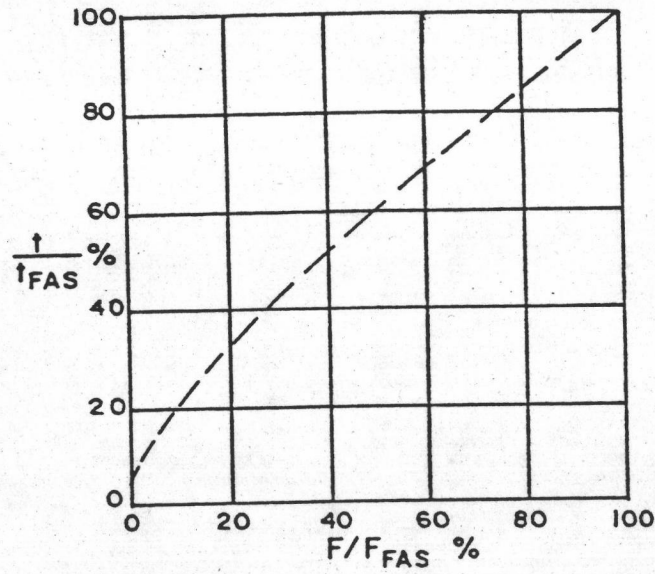
Hasselmann et al (1973) ทำการศึกษาวิจัยคลื่นในบริเวณทะเลเหนือในโครงการ Joint of North Sea Wave Project (JONSWAP) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นในเขตน้ำลึก การก่อตัวของคลื่น แสดงอยู่ในลักษณะของสเปกตรัมพลังงานของคลื่น (Wave Energy Spectrum) ด้วยวิธีของ Pierson-Moskowitz (1964) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ ดังนี้

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{a \cdot b} \quad (3-31)$$

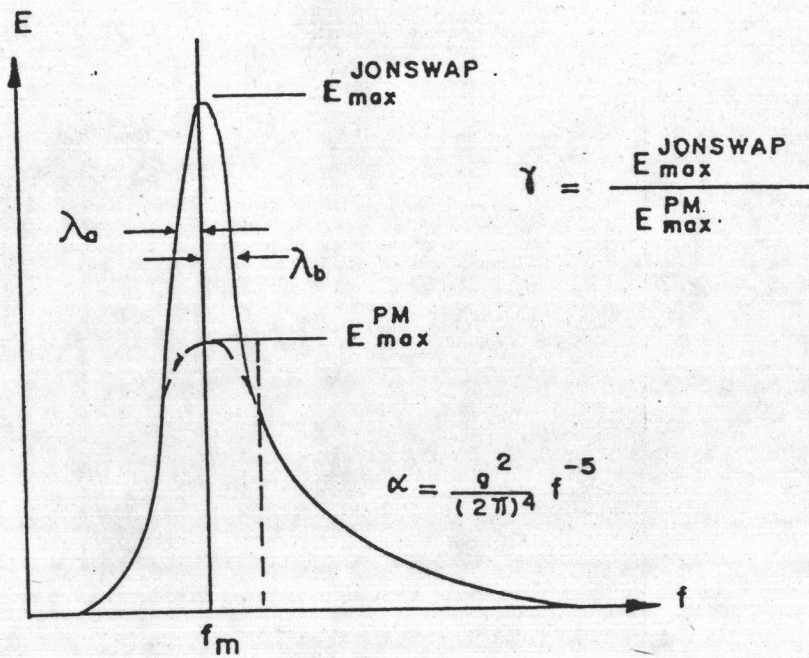
$$a = - \left[\frac{5}{4} \left(\frac{f_m}{f} \right)^4 \right]$$

$$b = \exp \left[- \frac{f - f_m}{2\lambda^5 f_m^5} \right]$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_a = 0.07 & f \leq f_m \\ \lambda_b = 0.09 & f > f_m \end{cases}$$



รูป 3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน t/t_{FAS} กับ F/F_{FAS} จาก Silvester และ Vongvissessomjai (1971)



รูป 3-10 ค่าพารามิเตอร์ของสเปกตรัม JONSWAP (after Houmb and Overvik, 1977)

เมื่อ f_m คือ ความถี่สูงสุด ของ สเปกตรัม (Spectral Peak Frequency) และ α, γ และ λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ได้จากข้อมูลการวัดสเปกตรัม หรือ คำนวณจากสมการที่ขึ้นกับ ความยาว เพชช์ไม่มีมิติ (Dimensionless fetch) ดังแสดงในรูป 3-10

การวิเคราะห์พารามิเตอร์หารูปร่าง สเปกตรัม จากผลการทดลองในสนาม สามารถ วิเคราะห์ด้วยคณิตศาสตร์ และเขียนแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{gH_{1/3}}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-3} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2} \quad (3-32)$$

$$\frac{gT_m}{U_A} = 2.857 \times 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3} \quad (3-33)$$

$$\frac{gt}{U_A} = 6.88 \times 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{2/3} \quad (3-34)$$

เมื่อ $H_{1/3}$ คือ ความสูงคลื่นนัยสำคัญ

T_m คือ คาบเวลาค้นสูงสุดของคลื่นสเปกตรัม

U_A คือ Wind-Stress Factor ที่ถูกปรับแก้แล้ว

t คือ ระยะเวลาที่เกิดลม

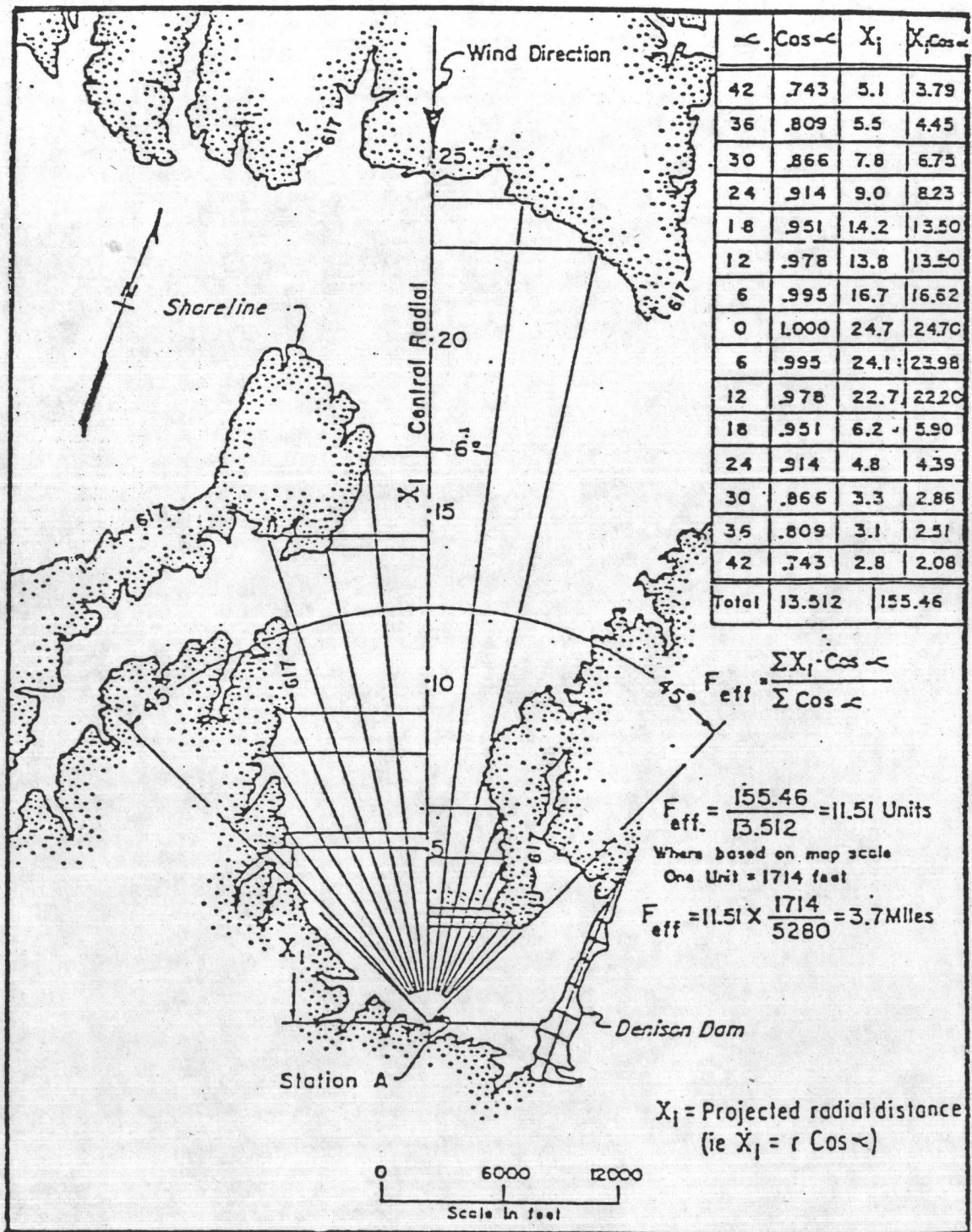
F คือ ความยาวเพชช์

ในการศึกษานี้ การคำนวณความสูงและคาบเวลาของคลื่น ใช้สมการ (3-32) และ (3-33) รายละเอียดเพิ่มเติมดูจาก Shore Protection Manual (1984)

3.1.4 ความยาวเพชช์ประสิทธิ์ผล (Effective Fetch)

ปัญหาที่ประสบทั่วไปในการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลม คือ การหาระยะทางความยาวเพชช์ (Fetch) คือ ระยะที่ลมพัดออกจากแหล่งกำเนิดมายังบริเวณที่ต้องการวัดความสูงคลื่นหรือจุดสังเกตการณ์ เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของลม จะแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ระยะทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลม จึงใช้ค่าความยาวเพชช์ประสิทธิ์ผล (Effective Fetch)

Saville (1954) เป็นผู้เสนอวิธีการหาค่าความยาวเพชช์ประสิทธิ์ผล โดยพิจารณาจากแหล่งกำเนิดคลื่นในพื้นผิวน้ำ (Inland Water) ดังแสดงในรูป 3-11 ความยาวเพชช์ ถูกจำกัดด้วยลักษณะสภาพแวดล้อมของผิวน้ำ และพื้นที่แหล่งกำเนิดคลื่น ทิศทางการเคลื่อนที่ในแหล่งกำเนิดคลื่น จะไม่ได้มีทิศทางเดียวกันกับลมโดยตรง แต่จะแปรเปลี่ยน ตามมุมของทิศทางการเคลื่อนที่ของลม ด้วยเหตุนี้การหาความยาวเพชช์ จึงสมมุติฐานว่า ในขณะที่ลมเคลื่อนที่บนผิวน้ำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่หน้าตามทิศทางลม ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นลักษณะของคลื่น มีค่าเต็มที่ใน



(U.S. Army, B.E.B. Tech. Memo No 132, 1962)

รูป 3-11 การหาค่าความยาวเฟิร์ชประสิทธิผล (Effective fetch)

ทิศทาง 30-45 องศา ทั้งสองด้านของทิศทางลม และค่าความเค้น (Stress) ของน้ำผิวหน้าจะแปรเปลี่ยนไปตาม cosine ของทิศทางลม ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของความยาวเฟ้นท์ประสิทธิ์ผลสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{eff} = \frac{\Sigma X_1 \cos \alpha_1}{\Sigma \cos \alpha_1} \quad (3-35)$$

เมื่อ F_{eff} คือ ค่าความยาวเฟ้นท์ประสิทธิ์ผล

X_1 คือ ส่วนย่อยของความยาวเฟ้นท์ ที่ได้จากการวัดจากจุดที่ขี้ออกไป จนถึงจุดตัดของเส้นขอบฝั่ง

α_1 คือ ทิศทางย่อยของการหักเห ทั้งสองด้านของทิศทางลม

3.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง

คลื่นลมที่เกิดในทะเล เกิดจากการส่งผ่านพลังงานจากลมมาสู่น้ำอิสระ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจาก บริเวณแหล่งกำเนิด (Generating Area) แล้ว จะมีลักษณะเป็นระเบียบ และสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง ยอดคลื่นและท้องคลื่น จะเริ่มปรากฏให้เห็นเด่นชัด แต่มีความสลับซับซ้อน ในระหว่างที่คลื่นเคลื่อนตัวสู่ฝั่ง พลังงานคลื่นจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสูญเสียพลังงาน จากการเสียดทานกับพื้นท้องทะเล และขบวนการภายในต่าง ๆ อาทิเช่น การหักเหของคลื่น (Wave Refraction) การเลี้ยวเบนของคลื่น (Wave Diffraction) ในที่สุดคลื่นก็ไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ จะเกิดการแตกตัวขึ้น และเกิดเป็นคลื่นลูกใหม่เคลื่อนที่ไปสิ้นสุดที่ชายฝั่ง สิ่งที่มีอิทธิพลต่อคลื่นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งมีดังต่อไปนี้

3.2.1 อิทธิพลของความลึกของน้ำที่มีต่อคลื่น

ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่อยู่ภายนอกชายฝั่ง คุณสมบัติต่าง ๆ ของคลื่น เช่น ความเร็วของคลื่น ความยาวและความสูงคลื่น ยังคงสภาพเดิม และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง คุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าว จะเริ่มเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีความสูงน้อย (Small Amplitude Theory) ได้ดังนี้

เมื่อ คลื่นเคลื่อนที่ในเขตนํ้าลึกหรือนอกชายฝั่ง (Deep Water $h/L > 0.5$)

$$\text{ความเร็วคลื่น} \quad C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (3-36)$$

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่อยู่ในค่าน้ำลึกปานกลาง (Intermediate Depth $0.04 < h/L < 0.5$)

$$\text{ความเร็วคลื่น } c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (3-37)$$

และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่อยู่ในน้ำตื้น (Shallow Water $h/L < 0.04$)

$$\text{ความเร็วคลื่น } c = \sqrt{gh} \quad (3-38)$$

ดังนั้น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากน้ำลึกเข้าสู่ น้ำตื้น ความเร็วคลื่นจะลดลง และความยาวคลื่นจะสั้นลงส่วนค่าความสูงคลื่นคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การเข้าสู่ น้ำตื้น (Shoaling Coefficient, K_s) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการจาก Horikawa (1978) ได้ดังนี้

$$K_s = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{C_0}{C}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{1}{\tanh kh}} \quad (3-39)$$

เมื่อ H คือ ความสูงของคลื่นในช่วงน้ำตื้น

H_0 คือ ความสูงของคลื่นในน้ำลึก ที่ยัง ไม่มีการหักเหของคลื่น

n คือ อัตราส่วนของความเร็วกลุ่มคลื่น ต่อ ความเร็วคลื่น $= C_g/C$

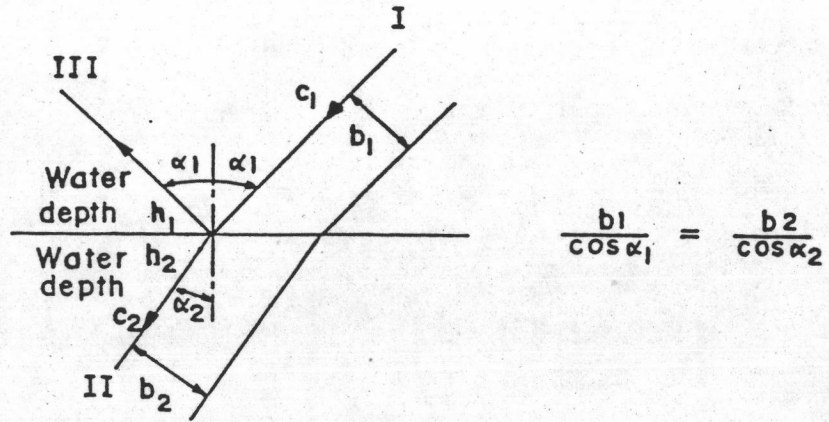
$$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]$$

L_0 คือ ความยาวคลื่นในน้ำลึก $L_0 = gT^2/2\pi$

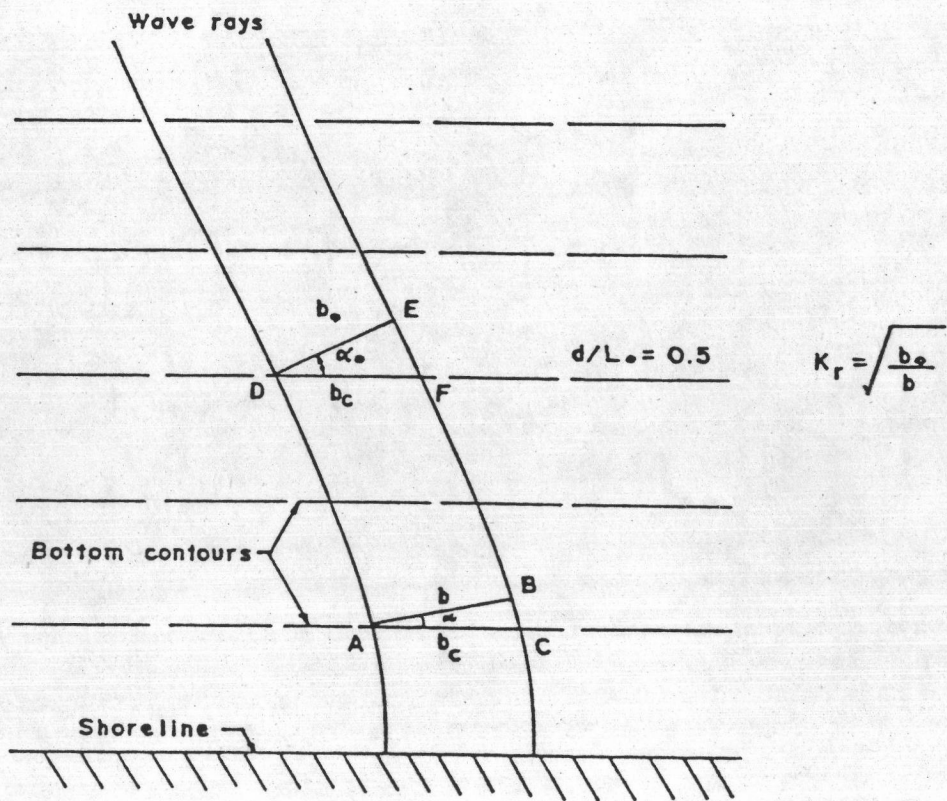
3.2.2 การหักเหของคลื่น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง ความลึกของท้องน้ำทะเล จะลดลงตามลำดับ ทำให้ความเร็วคลื่น และความยาวคลื่น ลดลงตามสัดส่วน ความเร็วคลื่นที่เกิดขึ้นตามสันคลื่น (Wave Crest) จะเคลื่อนที่ท่ามุมกับเส้นชั้นความลึกท้องน้ำ (Bottom Contour) เป็นสาเหตุให้สันคลื่นโค้งเข้าหาเส้นชั้นความลึกของน้ำ ผลของปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การหักเห ความลึกของท้องน้ำมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ปรากฏการณ์ดังกล่าว มีลักษณะคล้ายกับการหักเหของแสง และสามารถอธิบายด้วยกฎของ สเนลล์ (Snell's Law) ดังแสดงรูป 3-12 และสมการดังนี้

$$\frac{b_1}{\cos \alpha_1} = \frac{b_2}{\cos \alpha_2} \quad (3-40)$$



ก. นิยามการหักเหของคลื่น (Snell)



ข. การหักเหของคลื่น ซึ่งความชันท้องน้ำขนานกับชายฝั่ง (McClenan, 1975)

รูป 3-12 การหักเหของคลื่น ตามกฎของสเนลล์

โดย α_1, α_2 คือ มุมหักเหของคลื่น
 b_1, b_2 คือ ความกว้างของ Wave Ray

เมื่อ b_1 และ b_2 เป็นระยะห่างระหว่างคลื่น 2 แนว ในความลึก d_1 และ d_2 จากสมการ (3-40) สามารถพิสูจน์โดยหลักการทางเรขาคณิต ได้ว่า

$$\sin \alpha_2 = \frac{C_2}{C_1} \sin \alpha_1 \quad (3-41)$$

โดยที่ C_1 และ C_2 คือ ความเร็วคลื่น

ดังนั้น เมื่อทราบค่ามุมเริ่มต้นที่แนวคลื่นกระทำกับเส้นชั้นความลึกของท้องน้ำ และลักษณะของคลื่นในเขตน้ำลึกแล้ว ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจากเขตน้ำลึกเข้าสู่ตื้นคำนวณได้จากสมการ (3-41) ส่วนความสูงคลื่นในเขตน้ำตื้นคำนวณได้สัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น (Refraction Coefficient, K_r) ดังนี้

$$K_r = \frac{H_2}{H_1} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} = \sqrt{\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2}} \quad (3-42)$$

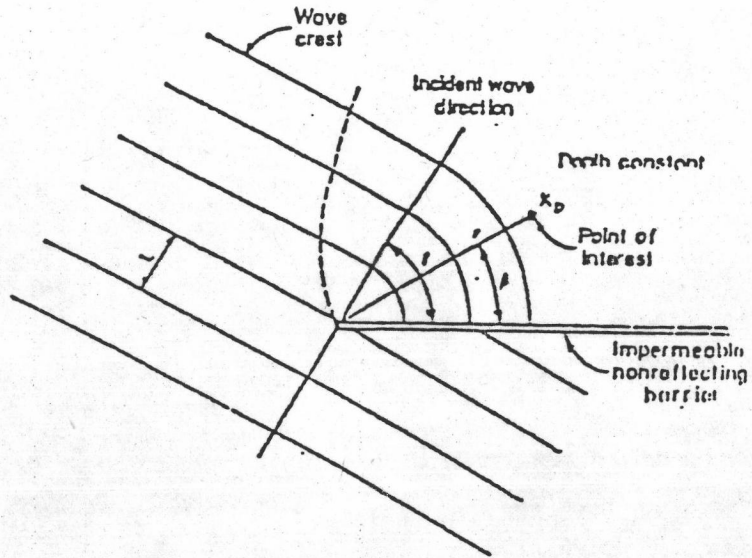
เมื่อ H_2 และ H_1 คือ ความสูงคลื่น ที่น้ำลึกและน้ำตื้น ตามลำดับ

3.2.3 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Wave Diffraction)

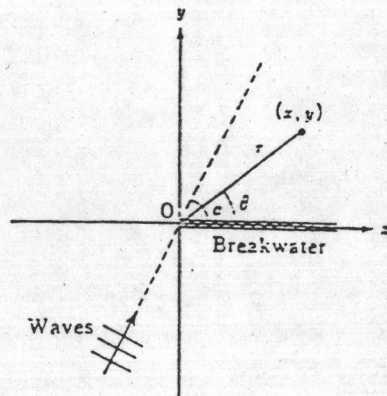
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวาง เช่น เขื่อนกันคลื่น (Breakwater) หรือหัวหาด (Head Land) หรือ เกาะ หรือ ช่องทางเข้าออกของท่าเรือ (Gap) คลื่นจะเลี้ยวเบนออกเป็นรูปรีศมีวงกลม เข้าสู่บริเวณด้านในที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไม่ได้ ทำให้เกิดคลื่นส่งผ่าน หรือการกระจายพลังงานคลื่นตามความยาวคลื่น เรียกว่า "การเลี้ยวเบนของคลื่น (Wave Diffraction)" ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ ดังแสดงในรูป 3-13

Penny และ Price (1952) ได้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของคลื่นบริเวณเขื่อนกันคลื่นแบบ Semi-infinite Breakwater โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงและจากผลการวิเคราะห์ของ Sommerfield (1896) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction Coefficient, K_d) คือ อัตราส่วนของความสูงคลื่นเลี้ยวเบน ต่อความสูงคลื่นตกกระทบ และสามารถอธิบายในเทอมของ Polar Coordinates r และ θ ดังแสดงในรูป 3-13

$$K_d = \frac{\text{ความสูงคลื่นเลี้ยวเบน}}{\text{ความสูงคลื่นตกกระทบ}} = |K(r, \theta)| \quad (3-43)$$



ก. นิยามการเลี้ยวเบนของคลื่น



ข. ระบบค่าพิกัด

รูป 3-13 การเลี้ยวเบนของคลื่น

$$K(r, \theta) = \left| I - \sqrt{\frac{4kr}{\pi}} \sin \frac{\alpha - \theta}{2} e^{-ikr \cos(\alpha - \theta)} \right. \\ \left. + I - \sqrt{\frac{4kr}{\pi}} \sin \frac{\alpha + \theta}{2} e^{-ikr \cos(\alpha + \theta)} \right| \quad (3-44)$$

เมื่อ $I(\lambda) = \frac{1+i}{2} \int_0^\lambda e^{-i\pi\lambda^2/2} d\lambda \quad (3-45)$

หา $I(\lambda) = \frac{1+C(\lambda)+S(\lambda)}{2} + i \left(\frac{C(\lambda)-S(\lambda)}{2} \right) \quad (3-46)$

ค่า $C(\lambda)$, และ $S(\lambda)$ หาได้จาก Fresnel Integrals คือ

$$C(\lambda) = \int_0^\lambda \cos \frac{\pi\lambda^2}{2} d\lambda \quad (3-47)$$

$$S(\lambda) = \int_0^\lambda \sin \frac{\pi\lambda^2}{2} d\lambda$$

r, θ คือ ค่าพิกัด Polar Coordinates

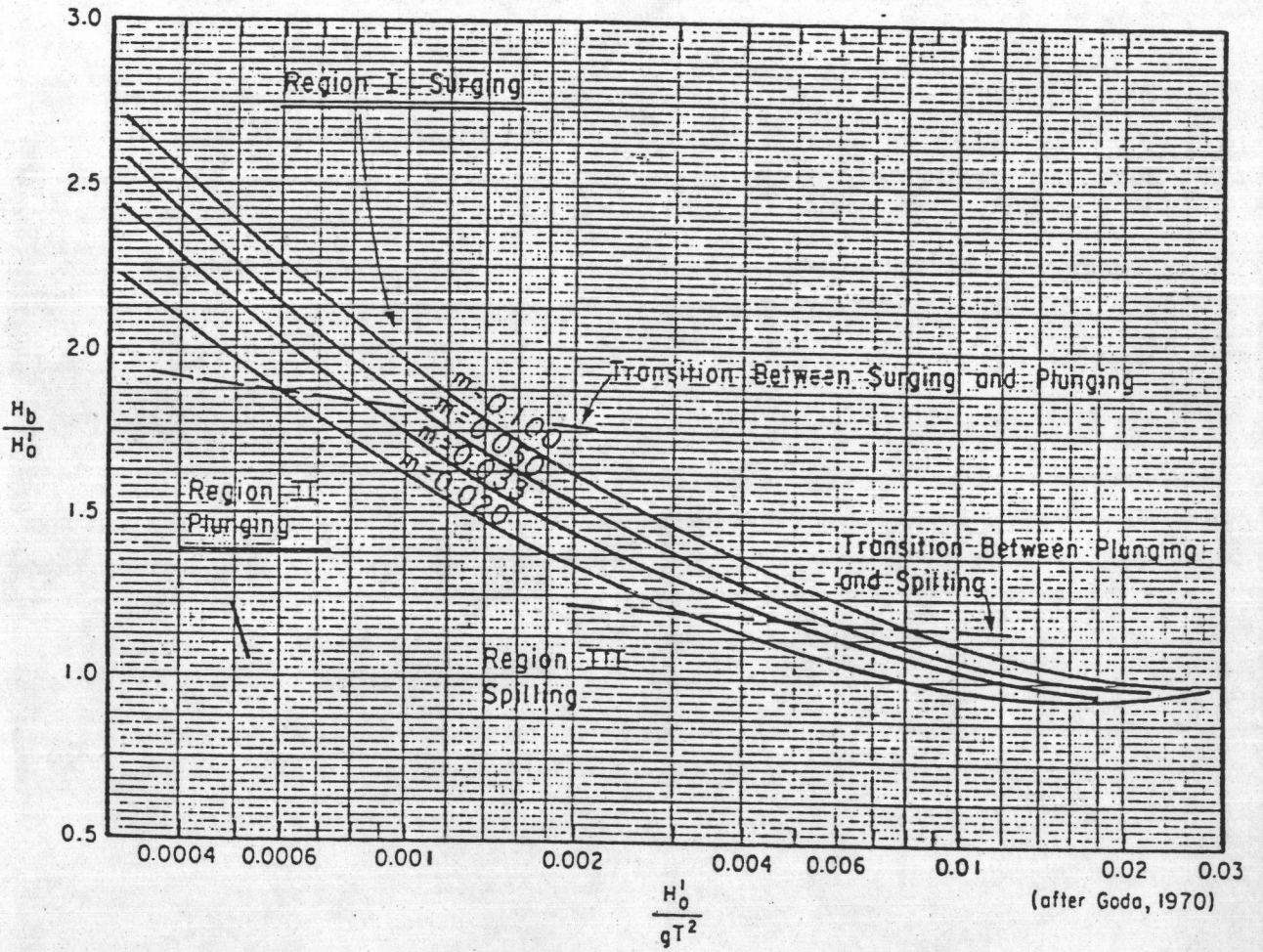
L คือ ความยาวคลื่น (Wave Length)

k คือ จำนวนคลื่น (Wave Number)

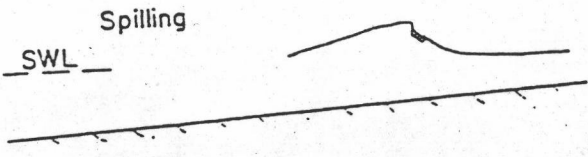
3.2.4 การแตกตัวของคลื่น (Wave Breaking)

ขณะที่คลื่นเคลื่อนเข้าหาฝั่ง ความลึกของท้องน้ำจะลดลงตามลำดับ มีผลให้คุณลักษณะของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ความเร็วและความยาวคลื่นลดลง ความสูงคลื่นจะสูงขึ้น และความชันคลื่น (Wave Steepness, H/L) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งคลื่นไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ จนความเร็ว ของมวลน้ำบริเวณสันคลื่น (Wave Crest) มากกว่า ความเร็วคลื่นจึงเกิดการแตกตัวของคลื่นเกิดขึ้น บริเวณที่คลื่นแตกตัวจะก่อให้เกิดการปั่นป่วน (Turbulence) ท้องน้ำมาก ตะกอนขนาดเล็กจะถูกยกตัวขึ้น และถูกคลื่นพัดพาอยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspension)

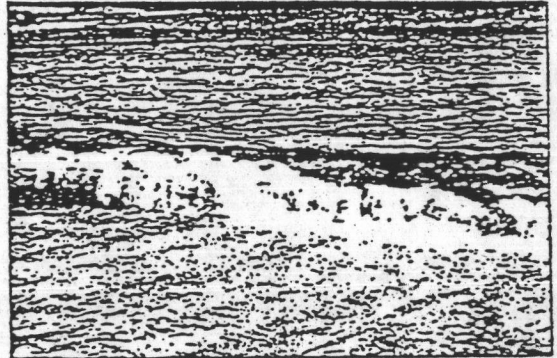
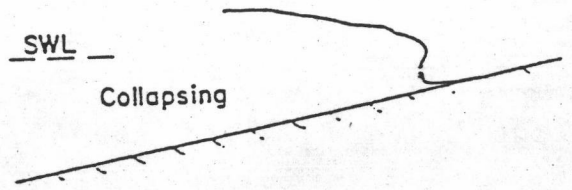
ชนิดการแตกตัวของคลื่น จะขึ้นอยู่กับ ความสูงและคาบเวลาของคลื่น ความลาดชันของท้องน้ำ และสามารถจำแนกออกเป็น 4 ชนิด คือ spilling, plunging collapsing และ surging ดังแสดงในรูป 3-14 และ รูป 3-15 แสดงการจำแนกคลื่น ตามความชันของคลื่น และ



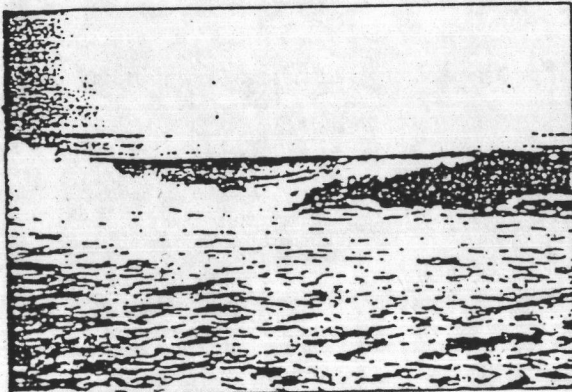
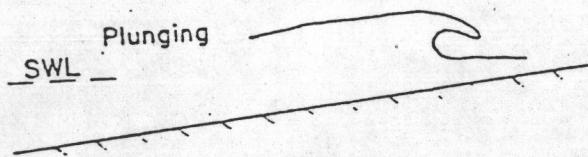
รูป 3-14 การจำแนกชนิดการแตกตัวของคลื่น



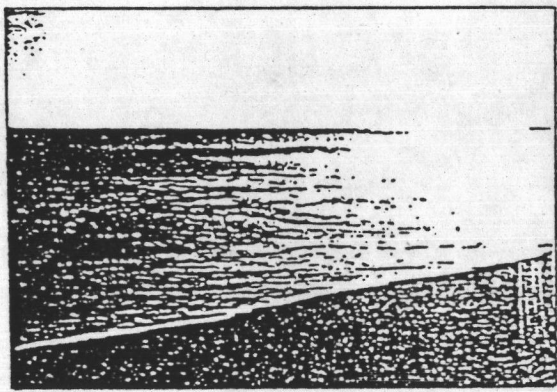
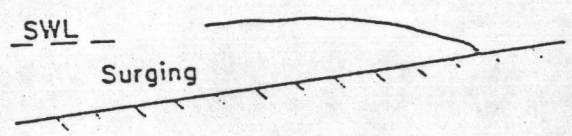
Spilling



Collapsing



Plunging



Surging

รูป 3-15 ลักษณะการแตกตัวของคลื่นแบบต่าง ๆ

ความลาดชันของท้องน้ำ

การแตกตัวของคลื่นในบริเวณเขตนํ้าลึก Mitchell (1893) พบว่า ความชันคลื่นที่เคลื่อนจะเริ่มแตกตัว สามารถเขียนอยู่ในสมการ (3-48) และมุมของสันคลื่น α จะมีค่าเท่ากับ 120° ดังแสดงในรูป 3-16

$$\frac{H_o}{L_o} = 0.147 = \frac{1}{7} \quad (3-48)$$

สำหรับการแตกตัวของคลื่นในบริเวณเขตนํ้าลึก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ความชันคลื่น และความลาดชันของชายฝั่ง ซึ่งสามารถคำนวณโดยอาศัยหลักการของ Munk (1949), Galvin (1969) และ Goda (1970) ดังแสดงในสมการ

$$\frac{H_b}{H_o} = \frac{1}{3.3(H_o/L_o)^{1/3}} \quad (3-49)$$

$$\frac{h_b}{H_b} = \frac{1}{b - (aH_b/gT^2)} \quad (3-50)$$

เมื่อ	H_b	คือ ความสูงคลื่นแตกตัว
	H_o	คือ ความสูงคลื่นในนํ้าลึกที่ไม่มีการหักเห = $K_r H_o$
	L_o	คือ ความยาวคลื่นในนํ้าลึก
	h_b	คือ ความลึกที่ตำแหน่งคลื่นแตกตัว
	T	คือ คาบเวลาคลื่น

และค่า a และ b เป็นฟังก์ชันของ ความลาดชันชายฝั่ง ซึ่งมีค่า

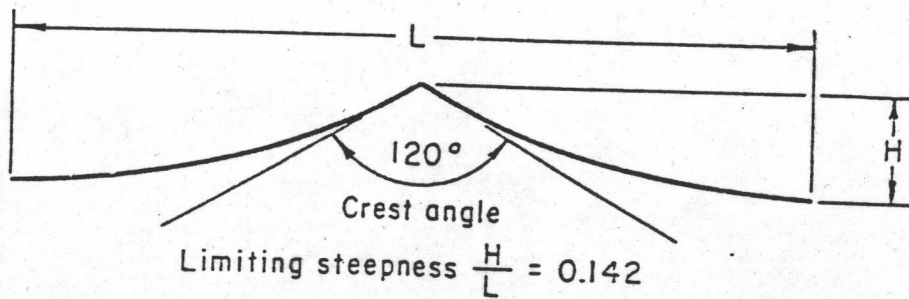
$$a = 43.75(1 - e^{-19m}) \quad (3-51)$$

$$b = \frac{1.55}{(1 + e^{-19.5m})} \quad (3-52)$$

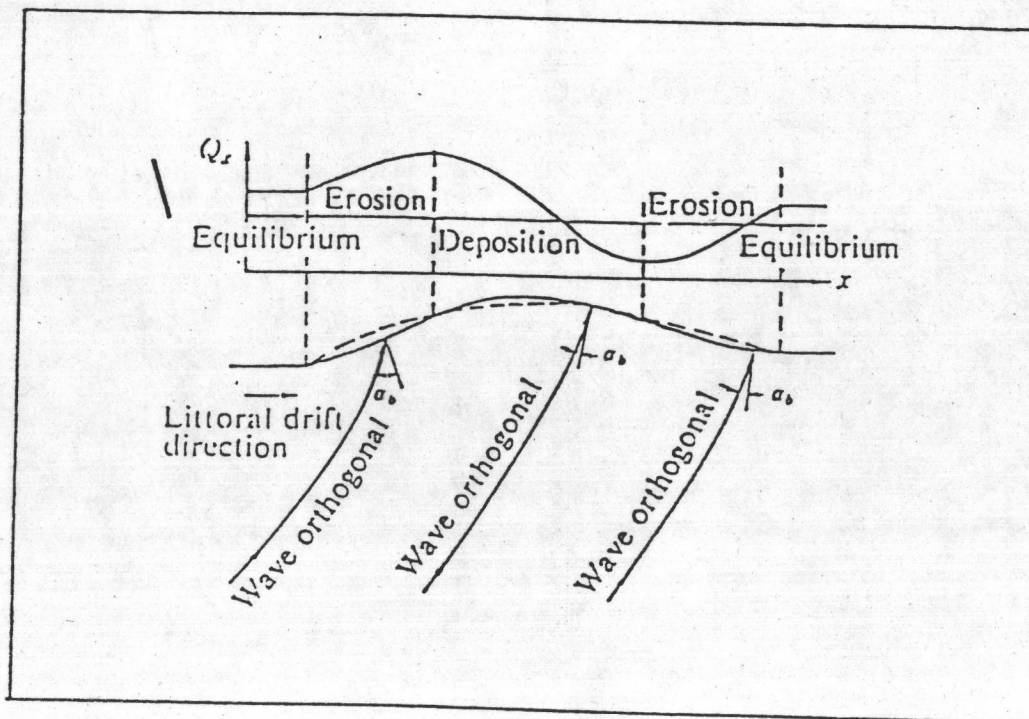
โดยทั่วไปการแตกตัวของคลื่น จะใช้ ดัชนีการแตกตัวของคลื่น (Breaking Index, H_b/h_b) = 0.78

3.3 การเคลื่อนของตะกอนของชายฝั่ง

กระแสนํ้าบริเวณใกล้ชายฝั่ง มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่ง ชายฝั่งจะเกิดการกัดเซาะหรือทับถม หรือคงสภาพเดิมอยู่ได้ ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่เข้าออกของตะกอนชายฝั่ง



รูป 3-16 ความชันของคลื่นในเขตน้ำลึก



รูป 3-17 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในระยะยาว

โดยทั่วไป การเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง (Longshore Sediment Transport) การเคลื่อนที่ของตะกอนชนิดนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่น เข้ามาทำมุมกับชายฝั่ง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนขนานกับเส้นชายฝั่ง ตะกอนบริเวณชายฝั่งใด ๆ จะเริ่มมีการสูญหาย หรือ พอกพูนขึ้นตามปริมาณของการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่งที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 3-17 ซึ่งมีผลทำให้ เกิดการกัดเซาะหรือทับถมของชายฝั่งในระยะยาว

สำหรับสมการที่ใช้ในการคาดคะเน อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง จากการศึกษาของ Coastal Engineering Research Center (CERC) โดยใช้ Energy Flux method พบว่า

$$Q = \frac{K\rho H_b^2 \sqrt{gd_b}}{16(\rho_s - \rho)(1-P)} \sin 2\alpha_b \quad (3-53)$$

- เมื่อ
- Q คือ อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง มีหน่วย ปริมาตรต่อเวลา
 - ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำทะเล
 - ρ_s คือ ความหนาแน่นของตะกอน
 - g คือ อัตราการเร่ง จากแรงดึงดูดของโลก
 - H_b คือ ความสูงของคลื่น ที่เกิดการแตกตัว
 - d_b คือ ความลึกของน้ำ ที่เกิดการแตกตัว
 - P คือ ความพรุนของตะกอน (~ 0.40)
 - α_b คือ มุมของสันคลื่น ทำมุมกับชายฝั่งในบริเวณที่เกิดการแตกตัว
 - K คือ ค่าคงที่

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ค่าคงที่ (K) มีค่าแตกต่างกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 3-1 ค่า K อยู่ระหว่าง 0.38-1.63 ค่าที่นิยมใช้กันมาก คือ 0.77 ได้จากการศึกษาของ Komar และ Inman (1970)

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาขั้นนี้ ค่า K จะหาได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ และ ปรับค่า K (calibration) จากข้อมูลวัดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจริงในสนาม เพื่อได้ค่า K ที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการนี้ ถูกเสนอแนะโดย Kraus, (1989) ในการใช้สูตร Longshore Sediment Transport ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง แบบ one line รายละเอียดของการหาค่า K ที่เหมาะสมในขั้นที่ศึกษาอยู่ในบทที่ 5

ตารางที่ 3-4 สรุปค่า K จากการศึกษาที่ผ่านมา

รายชื่อผู้ศึกษา	K	หมายเหตุ
Galvin (1969)	1.60	
Komar and Inman (1970)	0.77	ใช้ Hrms ในสมการ (5-34)
SPM (1977, 1984)	0.38	ใช้ $H_{1/3}$ ในสมการ (5-34)
Kraus et al (1989)	0.58	ได้ค่า K จากการศึกษา calibrate model
Dean et al (1989)	0.84-1.63	ค่าเฉลี่ย K = 0.93 สำหรับ Linear Fit และ 1.23 สำหรับ logarithmic Fit

2. การเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง (Onshore-Offshore Sediment Transport) ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงคลื่น และความชันคลื่น ในบางที่คลื่นมีความสูงและความชันมาก ทำให้คลื่นมีพลังงานมาก เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ซัดเข้าปะทะชายฝั่ง ทำให้ชายฝั่งเกิดการกัดเซาะ และในขณะเดียวกันเมื่อจังหวะย้อนกลับจะนำเอาตะกอนทรายเคลื่อนที่ออกสู่ทะเล ส่วนในช่วงที่คลื่นมีความสูงน้อยและความชันคลื่นต่ำ คลื่นที่เคลื่อนเข้าหาฝั่งจะอ่อนกำลังลง จะเกิดการพัดพาตะกอนมาทับถมตามบริเวณชายฝั่ง จะเห็นได้ว่า การเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากจะมีลักษณะกลับไปกลับมา และเป็นการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในระยะสั้น และตะกอนเหล่านี้จะไม่สูญหายไปไหน

Bakker (1971) ได้เสนอสมการของอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากชายฝั่ง (Cross-Shore Transport Rate) ดังนี้

$$Q_y = C_{OFF} \Delta x (y_1 - y_2 + W_{EQ}) \quad (3-54)$$

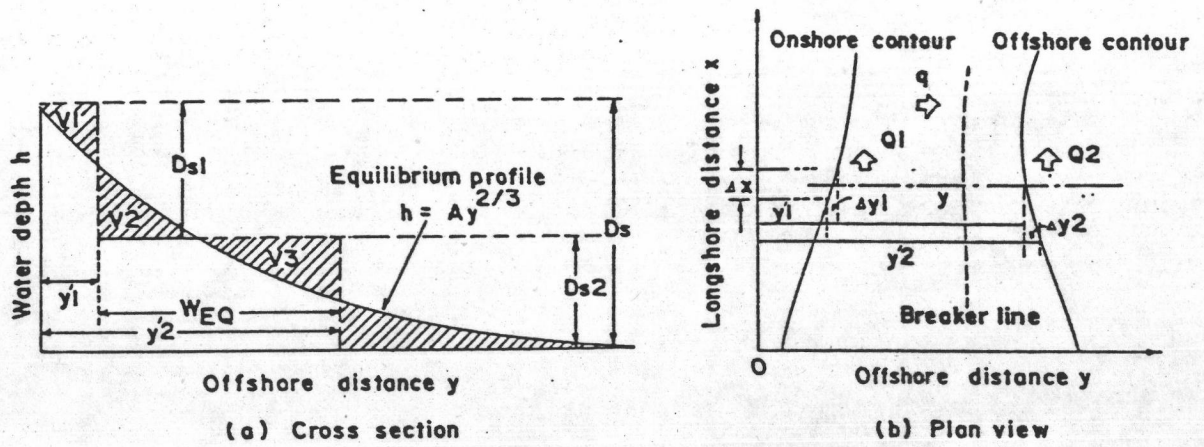
เมื่อ Q_y คือ อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง มีหน่วย $m^3/ปี$

C_{OFF} คือ Coastal Constant หรือ Activity factor เนื่องจากการสลายตัวของพลังงาน การแตกตัวของคลื่นและการเสียดทานของท้องน้ำ มีหน่วยเป็น เมตร/ปี

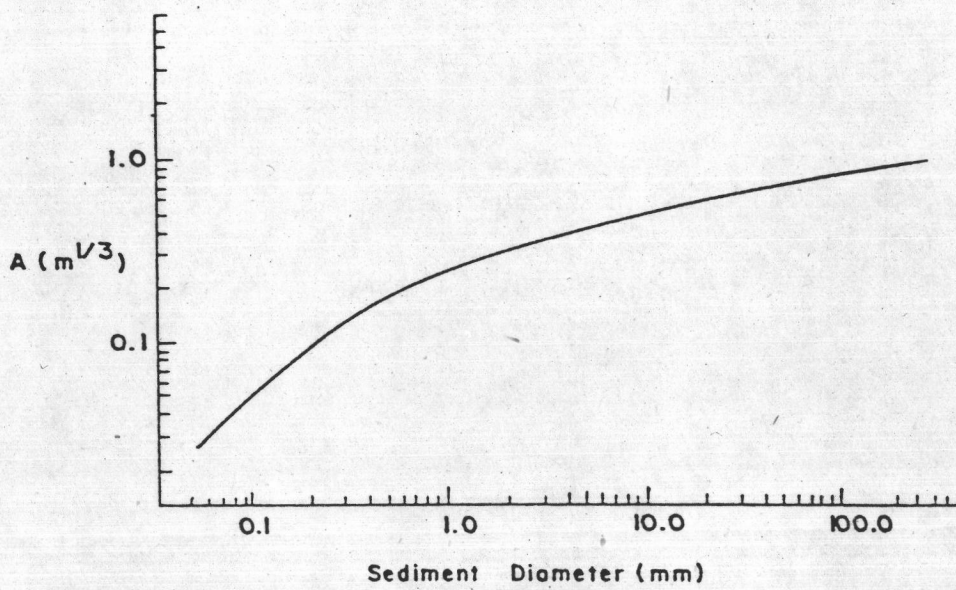
W_{EQ} คือ เป็นระยะทางเฉลี่ยระหว่าง y_1 และ y_2 เมื่อสภาวะชายฝั่งสมดุลย์ (Equilibrium Beach Profile) = $y_2 - y_1$ มีหน่วยเป็น เมตร

คือ ระยะห่างระหว่างแนวชายฝั่ง มีหน่วยเป็น เมตร

สมการ (5-24) อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง ขึ้นกับ ค่าความแตกต่างของระยะทางจากเส้นชายฝั่ง $y_1 - y_2$ ในปัจจุบัน กับค่า $y_2 - y_1$ ที่ Equilibrium



รูป 3-18 แบบจำลองพาราเมเตอร์ของการกัดกร่อนเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากชายฝั่ง



รูป 3-19 ความสัมพันธ์ A กับขนาดของเม็ดทราย (after Moore, 1982)

Beach Profile และ ค่า activity factor C_{OFF} สำหรับ Equilibrium Beach Profile นั้นหมายถึง ชายหาดซึ่งมีรูปร่างเข้าสู่สภาพสมดุลย์ เมื่อคลื่นที่มีความสูง และมีคาบเวลาหนึ่งกระทำต่อชายหาดนั้นเป็นเวลานานมาก ในธรรมชาตินั้น ชายหาดจะมีรูปร่างไม่สมดุลย์ มีเพียงเข้าสู่สภาพสมดุลย์เท่านั้น เนื่องจาก ลักษณะของคลื่นที่กระทบชายหาดไม่คงที่ เมื่อ y_1 และ y_2 คือ ระยะทางจากเส้นชายฝั่งสำหรับความลึกท้องน้ำ h_1 และ h_2 ตามลำดับ

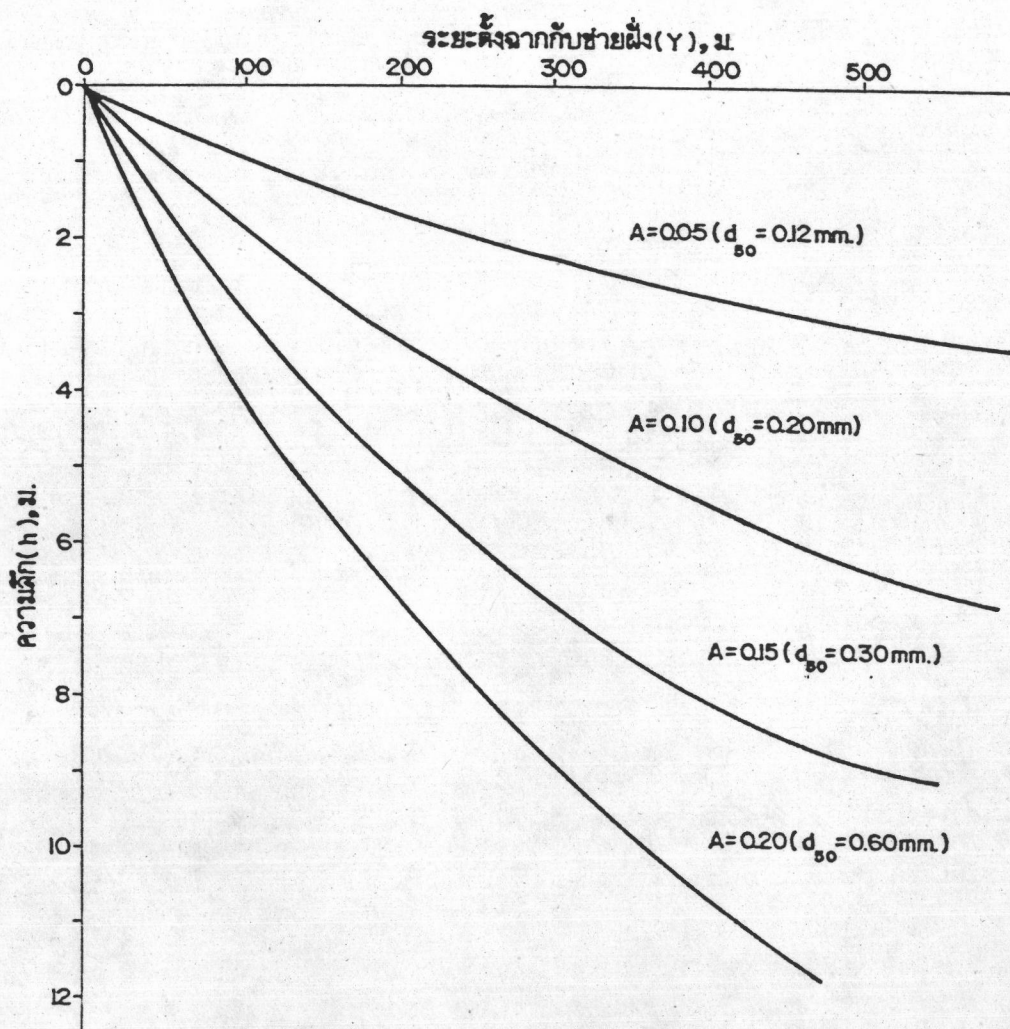
สำหรับการหา Equilibrium Beach Profile ในบริเวณใกล้ชายฝั่ง Dean (1977) ได้เสนอสมการ

$$h(y) = Ay^{2/3} \quad (3-55)$$

h คือ ความลึกท้องน้ำ มีหน่วยเป็น เมตร

เมื่อ A คือ Scale Parameter จากผลการทดลองในห้องทดลองของ Dean (1977) พบว่า A จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของตะกอน ดังแสดงในรูป 3-19 และ รูป 3-20 แสดงลักษณะของ Equilibrium Beach Profile เมื่อค่า Scale Parameter (A) มีค่าต่าง ๆ

ค่า Coastal Constant, C_{OFF} จากการศึกษาที่ผ่านมา Bakker (1968) ประมาณค่า $C_{OFF} = 1-10$ เมตร/ปี สำหรับชายฝั่งประเทศเนเธอร์แลนด์ และจากข้อมูลในห้องปฏิบัติการ Perlin (1978) ได้ค่า $C_{OFF} = 1.8 \times 10^{-2} - 2.7 \times 10^{-4}$ cm/s และ Horikawa, Harikai and Krous (1979) ได้ค่า $C_{OFF} = 9 \times 10^{-4}$ cm/s ในการศึกษาครั้งนี้ค่า C เป็นค่าตัวแปรเพื่อปรับเทียบให้การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งใกล้กับข้อมูลวัดจริงในภาคสนามมากที่สุด รายละเอียดอยู่ในบทที่ 5



ที่มา : Dean, 1977

รูป 3-20 ความสัมพันธ์ ลักษณะของ Equilibrium beach profile เมื่อค่า Scale parameter (A) มีค่าต่าง ๆ กัน