



ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการศึกษา

4.1 การทำนายคลื่นน้ำลึกด้วยข้อมูลลม

เนื่องจากไม่มีการวัดข้อมูลคลื่นจริงในบริเวณพื้นที่ศึกษาดังนั้นในการศึกษาคั้งนี้ใช้การทำนายคลื่นน้ำลึกจากข้อมูลลมเป็นหลัก ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาเป็นแบบจำลองชื่อ WINDWAVE หัวข้อนี้จะอธิบายทฤษฎีและขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองดังกล่าว

4.1.1 ทฤษฎีการทำนายคลื่นน้ำลึกด้วยข้อมูลลม

ในการศึกษาด้านวิศวกรรมชายฝั่ง คลื่นเป็นสาเหตุสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสภาพชายฝั่ง นอกจากนี้ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบท่าเรือและออกแบบโครงสร้างต่างๆ เพื่อป้องกันชายฝั่ง คลื่นที่เกิดขึ้นในทะเลหรือมหาสมุทร ส่วนใหญ่จะเป็นคลื่นลม (Wind Wave) เพราะเกิดจากการก่อดัวจากอิทธิพลของลม โดยการถ่ายเทพลังงานจากลมสู่พื้นผิวน้ำ ทำให้เกิดคลื่นซึ่งมีความสลับซับซ้อน และมีการเปลี่ยนแปลงของสันคลื่น (Wave Crest) และท้องคลื่น (Wave Trough) ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจากความไม่ทรงตัวของลักษณะของคลื่น (Irregularity of Wave Shape) และการเปลี่ยนแปลงของทิศทางเคลื่อนที่ (Propagation) แต่อย่างไรก็ตามมีการศึกษาทฤษฎีของการกำเนิดคลื่นในเขตนน้ำลึก รวมทั้งการสลายตัว (Decay) ของคลื่นหลังจากการก่อดัวของคลื่นหลายทฤษฎี ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวอาศัยหลักการถ่ายเทพลังงานลมมาเป็นคลื่น โดยสมมุติฐานว่า ความเร็วลมคงที่สม่ำเสมอ (Steady Wind Speed) ทิศทางลมคงที่สม่ำเสมอ (Steady Wind direction) องค์ประกอบของการเกิดคลื่นจากทฤษฎีทำนายคลื่นได้แก่ ความเร็วลม ระยะทางที่ลมพัดผ่าน (Duration) ลักษณะการเกิดของคลื่นมี 3 ลักษณะ คือ ความเร็วลมที่พัดมีระยะเวลาพอที่ทำให้เกิดคลื่นขึ้น จะถูกจำกัดด้วยช่วงระยะเวลาที่เกิดลม ลักษณะนี้เรียกว่า Duration Limit ถ้าหากลมที่พัดนานจนทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานตลอดระยะทางที่ลมเคลื่อนที่ จะถูกจำกัดด้วยระยะทางของลมที่เคลื่อนที่ผ่าน ลักษณะนี้เรียกว่า Fetch Limit และลมที่พัดผ่านความยาวเฟซและระยะเวลาที่เกิดลมที่มีความยาวพอที่จะทำให้เกิดความสูงคลื่นสูงสุด จนกระทั่ง

ขนาดคลื่นอยู่สภาพคงที่ (Steady Wave) โดยพลังงานที่ถ่ายเทจากลมสู่คลื่นเท่ากับพลังงานที่สลายตัวออกเนื่องจากคลื่นแตกตัว ลักษณะนี้เรียกว่าคลื่นก่อตัวเต็มที่ (Fully Arisen Sea, FAS)

สำหรับทฤษฎีการทำนายคลื่นของการศึกษาครั้งนี้ จะกล่าวถึงการทำนายคลื่นโดยวิธี JONSWAP Method ซึ่งเป็นวิธีที่เสนอแนะในคู่มือป้องกันชายฝั่ง (Shore Protection Manual, 1984) และเป็นวิธีที่ สุพจน์ จารุลักขณา (1991) ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลสนามที่บริเวณเขื่อนกันทรายจังหวัดสงขลาแล้วให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี SMB Method และ PM Method

เนื่องจากข้อมูลลมที่ใช้ในการทำนายคลื่นมีสมมุติฐานว่า ขนาดของความเร็วลมและทิศทางที่ลมพัดตลอดความยาวเฟซมีค่าคงที่สม่ำเสมอ (Steady Wind Speed and Direction) และค่าความเร็วลมเป็นค่าคงที่ ความสูงอ้างอิงระดับหนึ่ง นอกจากนี้ค่าความเร็วลมต้องเป็นค่าที่วัดในทะเลอีกด้วย ดังนั้น ข้อมูลลมจึงต้องมีการปรับแก้เสียก่อน

ถึงแม้ค่าความเร็วลมที่สถานีตรวจอากาศนาร่องเป็นความเร็วลม ณ จุดปลายของอ่าวลมที่ก่อให้เกิดคลื่นอาจจะไม่คงที่และขนาดไม่เท่ากับที่สถานีนาร่องได้แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลลมที่วัดในแนวที่ลมพัดผ่าน ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลลมที่สถานีตรวจอากาศนาร่องเป็นตัวแทนของลมที่ก่อให้เกิดคลื่นน้ำลึก

4.1.1.1 การปรับค่าคงที่ของข้อมูลลม

ในการปรับค่าความเร็วลมนั้นแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อย่อยคือ การปรับความเร็วลมเนื่องจากความสูง และการปรับความเร็วลมเนื่องจากค่าบดที่ดังของสถานีตรวจอากาศ

ก) การปรับความเร็วลมเนื่องจากความสูง (Elevation Effect)

Pierson (1964) ได้เสนอการกระจายของความเร็วลม (Wind Profile) เหนือระดับน้ำทะเลเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงหนึ่งไปยังอีกความสูงหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากทฤษฎีการทำนายคลื่นใช้ความเร็วลมที่ระดับความสูงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

วิธี SMB Method ใช้ความเร็วลมที่ระดับความสูง 10 เมตรจากระดับน้ำทะเล

วิธี PM Method ใช้ความเร็วลมที่ระดับความสูง 19.5 เมตรจากระดับน้ำทะเล
 วิธี JONSWAP Method ใช้ความเร็วลมที่ระดับความสูง 10 เมตรจากระดับน้ำทะเล
 โดยรูปแบบของสมการการกระจายของความเร็วลม ดังนี้

$$U(10) = U(y) \left(\frac{10}{y} \right)^{\frac{1}{7}} \text{-----(4-1)}$$

และ

$$\frac{U_y}{U_{10}} = 1 + \frac{(C_{10})^2}{K} \ln \left(\frac{y}{10} \right) \text{-----(4-2)}$$

เมื่อ	U_y	คือ	ความเร็วลมที่ระดับความสูงใดๆ ที่ y เมตร
	U_{10}	คือ	ความเร็วลมที่ระดับความสูง 10 เมตร
	y	คือ	ความสูง ของความเร็วลมที่ระดับใดๆ ที่ y เมตร
	K	คือ	ค่าคงที่ Karman = 0.4
	C_{10}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงฉุด (Drag Coefficient) ที่ระดับความสูง 10 เมตร

Wu (1969) ได้เสนอค่า C_{10} ดังนี้

$$\begin{aligned} C_{10} &= 1.25 \times 10^{-3} U_{10}^{-\frac{1}{5}} && \text{เมื่อ } U_{10} < 1 \text{ เมตร/วินาที} \\ C_{10} &= 1.25 \times 10^{-3} U_{10}^{\frac{1}{5}} && \text{เมื่อ } 1 < U_{10} < 15 \text{ เมตร/วินาที} \\ C_{10} &= 2.6 \times 10^{-3} && \text{เมื่อ } U_{10} > 15 \text{ เมตร/วินาที} \end{aligned} \text{-----(4-3)}$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง C_{10} และ U_{10} สามารถหาได้จาก สมการ (4-2) และ (4-3) ส่วนความเร็วลมที่ระดับความสูง 19.5 เมตร หาได้จากสมการ (4-2) ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สมการในการปรับความเร็วลมที่ความสูง 10 เมตรจากระดับน้ำทะเล (ใช้วิธี JONSWAP)

ข) ผลจากค่าบดที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศ (Location Effect)

เนื่องจากการตรวจวัดข้อมูลลมในทะเลหรือบนผิวน้ำ เป็นสิ่งที่มีความยุ่งยากลำบากและต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการปฏิบัติ ข้อมูลที่ทำการตรวจวัดส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลที่วัดได้บนฝั่ง ดังนั้นข้อมูลความเร็วที่วัดได้จึงจำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อแปลงข้อมูลให้เป็นข้อมูลลมที่วัดได้ในทะเล Resio และ Vincone (1977) ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลลมที่วัดได้จากบนฝั่ง(สนามบิน) กับข้อมูลลมที่วัดได้จากทะเลสาบ Great Lake ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_L = \frac{U_w}{U_L} \text{-----(4-4)}$$

เมื่อ	R_L	คือ	อัตราส่วนความเร็วลมในทะเลต่อความเร็วลมฝั่ง
	U_w	คือ	ความเร็วลมในทะเล
	U_L	คือ	ความเร็วลมบนฝั่ง

สุทัศน์ วิสกุล (2536) วิจัยเปรียบเทียบการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลมสถานีตรวจอากาศนาร่อง (Pilot Station) กับค่าที่วัดได้จริงในเดือน พฤศจิกายน ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2536 พบว่าค่า $R_L = 0.8$ จะให้ค่าความผิดพลาดการทำนายความสูงคลื่นต่ำสุดคือ 14.8 % ดังแสดงในรูป 4-1

4.1.1.2 ความยาวเฟทช์ประสิทธิผล (Effective Fetch)

ปัญหาที่ประสบทั่วไปในการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลมคือ การหาระยะทางความยาวเฟทช์ (Fetch) คือระยะที่ลมพัดออกจากแหล่งกำเนิดมายังบริเวณที่ต้องการวัด ความสูงคลื่นหรือจุดสังเกตการณ์ เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของลม จะแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ระยะทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลม จึงใช้ค่าความยาวเฟทช์ประสิทธิผล (Effective Fetch)

Saville (1954) เป็นผู้เสนอวิธีการหาความยาวเฟทช์ประสิทธิผล โดยพิจารณาจากแหล่งกำเนิดคลื่นในพื้นที่ผิวน้ำ (Inland Water) ดังแสดงในรูป 4-2 ความยาวเฟทช์ถูกจำกัดด้วยลักษณะสภาพแวดล้อมของผิวน้ำและพื้นที่แหล่งกำเนิดคลื่น ทิศทางการเคลื่อนที่ใน

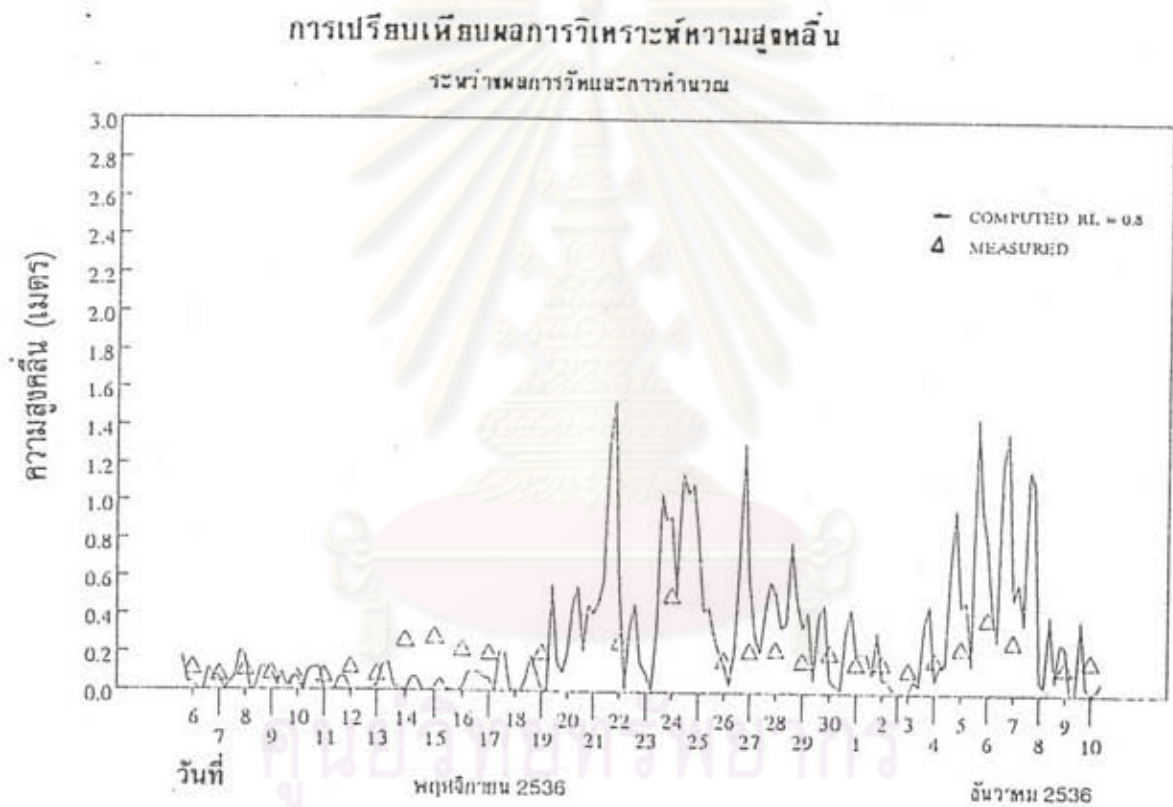
แหล่งกำเนิดคลื่นจะไม่ได้มีทิศทางเดียวกันกับลมโดยตรง แต่จะแปรเปลี่ยนตามมุมของทิศทาง การเคลื่อนที่ของลม ด้วยเหตุนี้การหาความยาวเฟซจึงมีสมมุติฐานว่า ในขณะที่ลมเคลื่อนที่บนผิวน้ำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่ น้ำตามทิศทางลม ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นลักษณะของคลื่น มีค่าเต็มที่ ในทิศทาง 30° - 45° ทั้งสองด้านของทิศทางลม (ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ 45°) และค่าความเค้น τ (Stress) ของผิวน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตาม cosine ของทิศทางลม ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความยาวเฟซประสิทธิผลสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{eff} = \frac{\sum x_i \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \text{-----(4-5)}$$

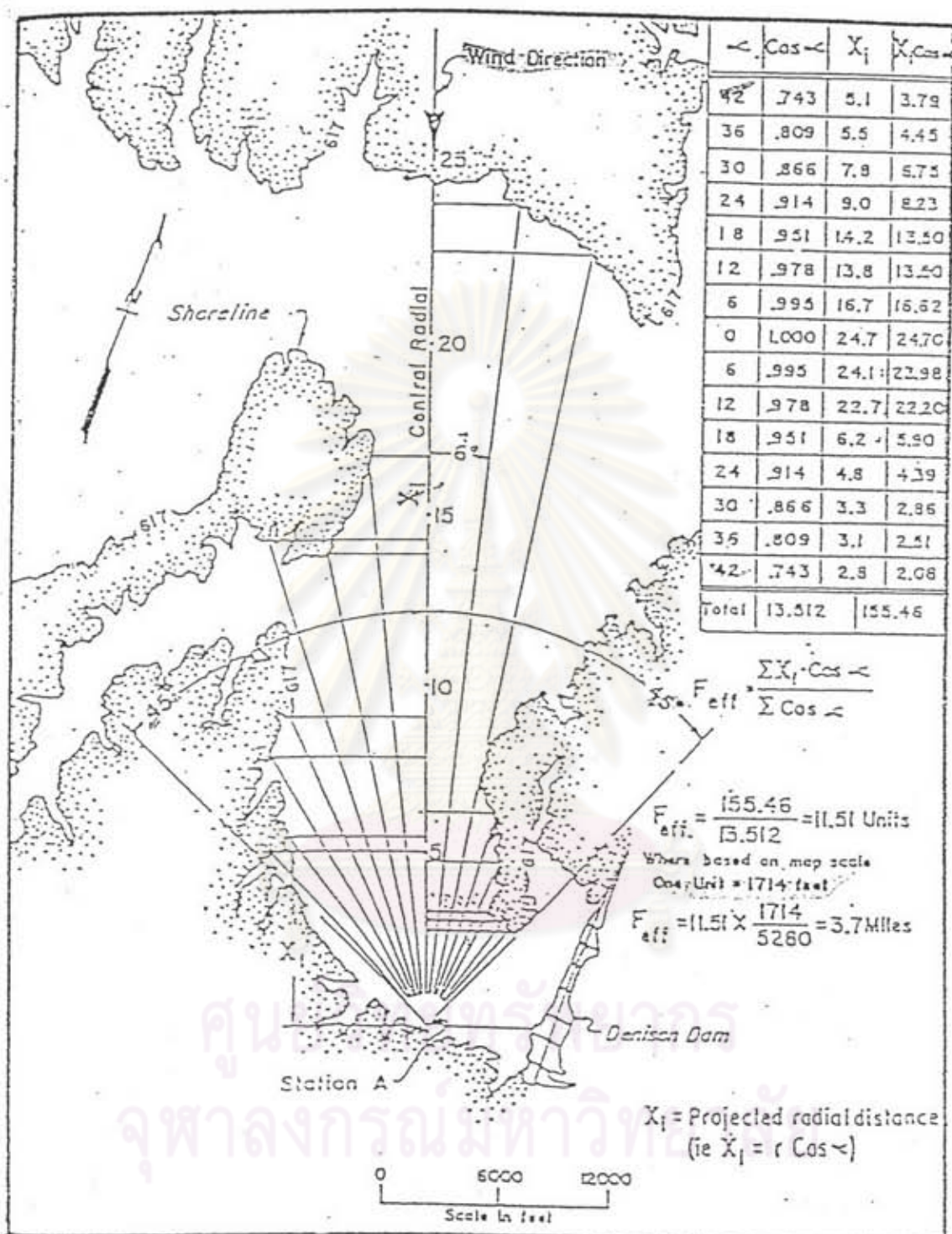
เมื่อ	F_{eff}	คือ	ค่าความยาวเฟซประสิทธิผล
	x_i	คือ	ส่วนย่อยของความยาวเฟซที่ได้จากการวัดจากจุดที่ยึดออกไปจนถึงจุดตัดของเส้นขอบฝั่ง
	α_i	คือ	ทิศทางย่อยของการหักเห ทั้งสองด้านของทิศทางลม

รูป 4-3 แสดงการวัดระยะเฟซของลมที่พัดเข้าสู่สถานีน้ำร่อง และตาราง 4-1 แสดงผลการวัดความยาวเฟซคำนวณจากสถานีน้ำร่องตามมุมต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



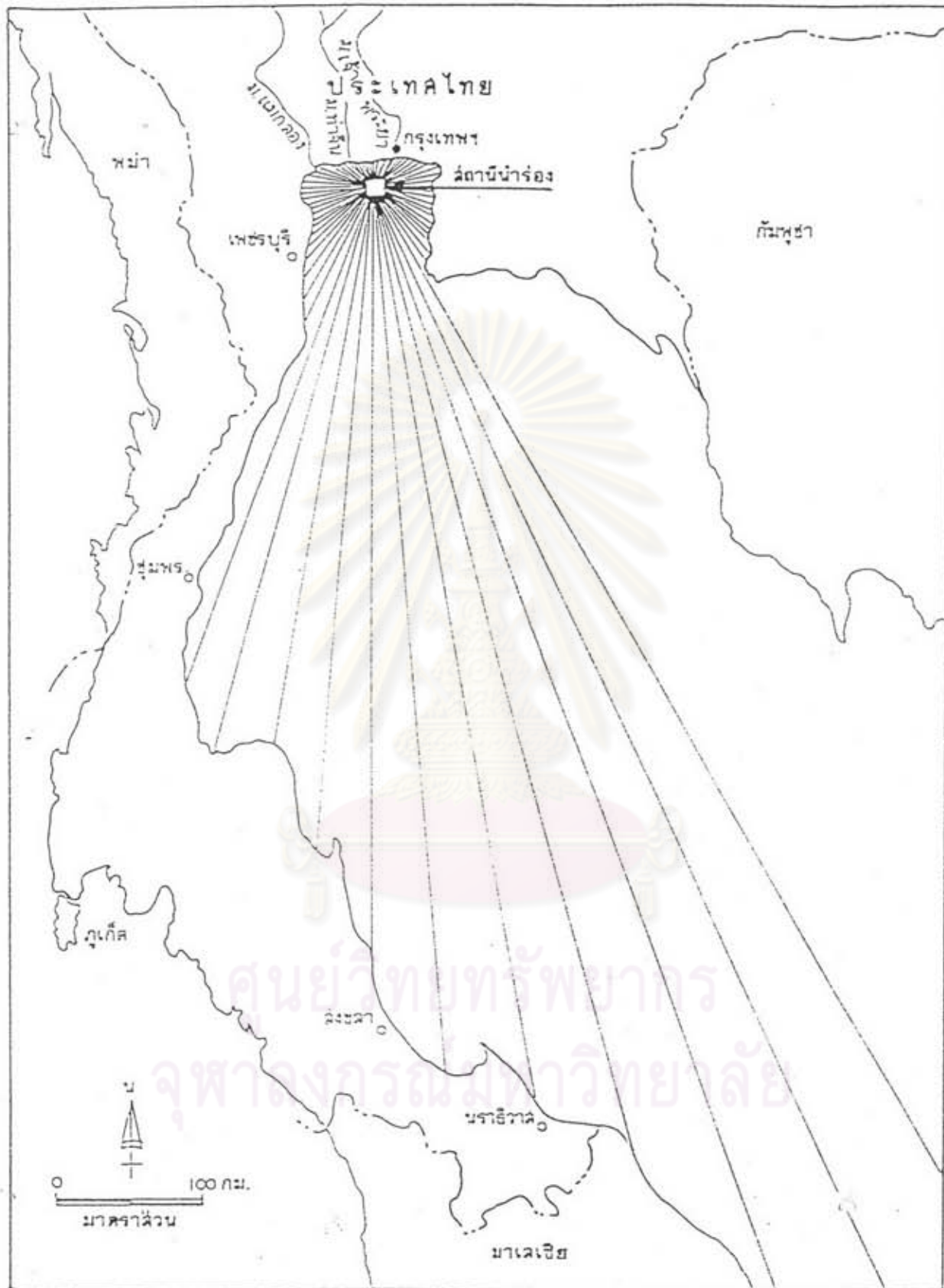
รูป 4-1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความสูงคลื่นระหว่างผลการวัดและผลการคำนวณ
(จาก : สุทัศน์ วิสกุล, พ.ศ.2536)



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

รูป 4-2 ตัวอย่างการคำนวณ Effective fetch

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



รูป 4-3 ระยะ Fetch จากสถานีน้ำร่อง

ตาราง 4-1 ความยาวเฟทซ์ (กิโลเมตร) จำนวนจากสถานีนำร่อง (มุมนับจากทิศเหนือ)

มุม (องศา)	ความยาวเฟทซ์ตามแนวมุม (กิโลเมตร)	ความยาวเฟทซ์ประสิทธิผล ตามสมการ (4-5) (กิโลเมตร)
0	20.0	22.0
5	21.0	21.6
10	22.0	22.2
15	22.0	22.8
20	22.0	24.0
25	21.5	25.5
30	21.0	27.3
35	20.0	29.2
40	22.0	30.9
45	22.0	32.6
50	24.0	34.3
55	37.5	36.1
60	40.5	37.9
65	46.0	39.5
70	52.5	41.2
75	58.0	43.2
80	57.0	45.2
85	50.0	47.2
90	48.0	49.3
95	49.0	51.8
100	52.0	54.2
105	52.0	94.7
110	50.0	138.3
115	50.0	184.7
120	58.0	225.2
125	60.0	264.4
130	60.0	303.3
135	64.0	340.2
140	75.5	372.8
145	73.0	400.9
150	1000.0	428.6
155	1000.0	453.1
160	1000.0	463.3
165	806.0	470.2
170	740.0	473.3
175	710.0	472.8
180	640.0	468.6

ตาราง 4-1 ความยาวเฟรซ (กิโลเมตร) คำนวณจากสถานีนำร่อง
(มุดน้ำจากทิศเหนือ) (ต่อ)

มุม (องศา)	ความยาวเฟรซตามแนวมุม (กิโลเมตร)	ความยาวเฟรซประสิทธิภาพ ตามสมการ (4-5) (กิโลเมตร)
185	536.0	461.0
190	442.0	449.4
195	464.0	434.9
200	420.0	382.3
205	114.0	330.7
210	104.0	280.7
215	94.0	240.0
220	82.0	203.5
225	66.0	169.6
230	60.0	139.8
235	50.0	115.3
240	50.0	95.6
245	48.0	76.1
250	45.0	59.2
255	50.0	55.3
260	52.0	51.8
265	56.0	48.8
270	56.0	46.4
275	52.0	44.3
280	47.0	42.6
285	45.0	41.0
290	40.0	39.5
295	34.0	38.0
300	34.0	36.5
305	31.0	34.7
310	30.0	32.9
315	32.0	31.0
320	24.0	29.2
325	26.0	27.6
330	22.0	26.3
335	22.0	25.1
340	22.0	24.2
345	20.0	23.5
350	20.0	22.9
355	20.0	22.4
360	20.0	22.0

4.1.1.3 การทำนายคลื่นโดยวิธี JONSWAP

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ทฤษฎี JONSWAP ในการทำนายคลื่นจากลม โดยสรุปได้ดังนี้

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

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{a\gamma^b}$$

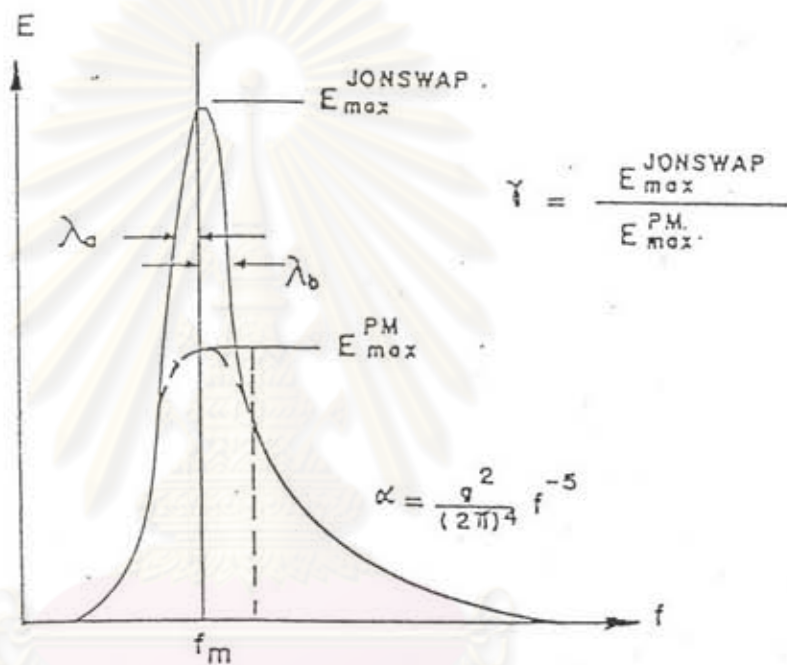
$$a = \left[\frac{5}{4} \left(\frac{f_m}{f} \right)^4 \right]$$

$$b = \exp \left[-\frac{f - f_m}{2\lambda^5 f_m^3} \right]$$

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

----- (4-6)

เมื่อ f_m คือความถี่สูงสุดของสเปกตรัม (Spectral Peak Frequency) และ α , γ และ λ คือค่าสัมประสิทธิ์ได้จากข้อมูลการวัดสเปกตรัม หรือ คำนวณจากสมการที่ขึ้นกับความยาวfetchไม่มีมิติ (Dimensionless fetch) ดังแสดงในรูป 4-4



รูป 4-4 ค่าพารามิเตอร์ของสเปกตรัม JONSWAP

(จาก : สุพจน์ จารุติกขณา, 2534)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์พารามิเตอร์หารูปร่าง สเปกตรัม จากผลการทดลองในสนาม สามารถวิเคราะห์ด้วยคณิตศาสตร์ และ เขียนแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{gH_1}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-3} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{-----(4-7)}$$

$$\frac{gT_m}{U_A} = 2.857 \times 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{-----(4-8)}$$

$$\frac{gt}{U_A} = 6.88 \times 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{-----(4-9)}$$

เมื่อ	$H_{1/3}$	คือ	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ
	T_m	คือ	คาบเวลาค้นสูงสุดของคลื่นสเปกตรัม
	U_A	คือ	Wind-Stress Factor ที่ถูกปรับแก้แล้ว
	t	คือ	ระยะเวลาที่เกิดลม
	F	คือ	ความยาวเฟทซ์

ในการศึกษานี้ การคำนวณความสูงและคาบเวลาของคลื่นใช้สมการ (4-7) และ (4-8) (Shore Protection Manual , 1984)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4-5 ผังการคำนวณความสูงและคาบเวลาของคลื่นด้วยวิธี JONSWAP

4.1.2 ลักษณะแบบจำลอง WINDWAVE

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำนายคลื่นด้วยข้อมูลลม WINDWAVE Model นี้พัฒนาขึ้นโดย สุพจน์ จารุลักษณะ (2534) เขียนด้วยภาษา FORTRAN 77 เพื่อใช้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ PC ลักษณะข้อมูลลมที่นำเข้าไปประมวลผลได้อ้างอิงรูปแบบ (Format) การบันทึกข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525-2534 ในรูป 3-6 แสดงแผนผังการควบคุมการทำงานของโปรแกรมหลัก โดยได้รวบรวมขั้นตอนต่างๆไว้สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของคลื่น เช่นการหาความยาวเฟตช์ประสิทธิผล (Effective Fetch) การจัดการข้อมูลลม การทำนายคลื่นด้วยทฤษฎีต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้ว และการคำนวณการกระจายความถี่ของข้อมูล (Distribution) เป็นต้น การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ ประกอบด้วย โปรแกรมหลัก (Main Program) และ โปรแกรมย่อย 3 โปรแกรม คือ SFETCH, WINDD และ WAVE และในแต่ละโปรแกรมย่อยจะแบ่งการทำงานออกเป็นโปรแกรมย่อยๆ ออกไปอีก ในแต่ละโปรแกรมย่อยจะแบ่งหน้าที่การคำนวณโดยการควบคุมของโปรแกรมหลัก ซึ่งคุณสมบัติการทำงานของโปรแกรมมีดังต่อไปนี้

(1) โปรแกรมหลักจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน 3 ส่วนด้วยกัน คือ การหาความยาวเฟตช์ประสิทธิผล การจัดการข้อมูลลมและวิธีการทำนายคลื่นประกอบด้วยโปรแกรมย่อยคือ SFETCH, WINDD และ WAVE ตามลำดับ

(2) โปรแกรมย่อย SFETCH ทำหน้าที่คำนวณหาความยาวเฟตช์ประสิทธิผล สำหรับการนำข้อมูลเข้าจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การนำข้อมูลเข้าทาง Keyboard หรืออ่านจากแฟ้มข้อมูล ข้อมูลที่นำเข้าได้แก่ ระยะทางความยาวเฟตช์ ทุก 5 องศา

(3) โปรแกรมย่อย WINDD ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของ โปรแกรมย่อย LOCAT1, LOCAT2, OPERAT1 และ OPERAT2 สำหรับข้อมูลลมจากกรมอุตุนิยมวิทยา มีโปรแกรมควบคุมการทำงานคือ OPERAT1 และโปรแกรมนี้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ การนำข้อมูลเข้า และการจัดการข้อมูล

ก) การนำข้อมูลเข้า

- LOCAT1 ทำหน้าที่เลือกค่าบลที่ดึงของสถานีต่างๆในบริเวณอ่าวไทยตอนล่าง ได้แก่ สุราษฎร์ธานี เกาะสมุย นครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และนราธิวาส ซึ่งจะทำการอ่านค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆในบริเวณดังกล่าว เช่น ความสูงของ Wind Vane ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจาก Location Effect, ความยาวเฟทซ์ประสิทธิผล และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่ฝั่ง

- LOCAT2 ทำหน้าที่บอกค่าบลที่อื่นๆนอกเหนือจากโปรแกรมได้กำหนด สำหรับข้อมูลที่ต้องนำเข้าได้แก่ ชื่อของสถานี ความสูงของ Wind Vane ค่าสัมประสิทธิ์ของ Location Effect ความยาวเฟทซ์ประสิทธิผล และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่ฝั่ง

- OPERAT2 เป็นข้อมูลอื่นๆซึ่งไม่จำเป็นต้องมีรูปแบบเหมือนข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา และการนำข้อมูลเข้าสามารถนำเข้าได้ 2 วิธี คือทาง keyboard หรืออ่านจากแฟ้มข้อมูลพร้อมกันนี้จะมีการตรวจสอบและแก้ไขข้อมูลก่อนที่จะนำไปประมวลผล สำหรับข้อมูลที่นำเข้าได้แก่ ความเร็วลม ทิศทาง และระยะเวลาที่เกิดลม

ข) การจัดการข้อมูล ขึ้นอยู่กับการนำเข้าของแหล่งข้อมูล แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ถ้าหากการนำเข้าของแหล่งข้อมูล จากกรมอุตุนิยมวิทยา จะมีการจัดการข้อมูล อยู่ 3 ลักษณะ คือ ราย 3 ชั่วโมง ราย 24 ชั่วโมง (เฉลี่ยรายวัน) และ Moving Average สำหรับการจัดการด้วย Moving Average นั้น จะพิจารณาตามขนาดของความเร็วม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับที่กำหนดขนาดความแตกต่างของลม (Delta U) แต่ละลูก

ส่วนที่ 2 เป็นแหล่งข้อมูลอื่นๆ นอกเหนือจากกรมอุตุนิยมวิทยา จะมีการจัดการข้อมูล 2 ลักษณะ คือ Moving Average และข้อมูลลมไม่เปลี่ยนแปลง

(4) โปรแกรมย่อย WAVE ทำหน้าที่ปรับแก้ข้อมูลลม และควบคุมการคำนวณลักษณะของคลื่นด้วย ด้วยทฤษฎีที่กล่าวมาแล้ว และการกระจายของข้อมูล ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมต่อไปนี้

- SMB ทำหน้าที่คำนวณลักษณะของคลื่นด้วยวิธี SMB Method และการถ่ายเทพลังงานด้วยโปรแกรมย่อย SMBDUR
- PM ทำหน้าที่คำนวณลักษณะของคลื่นด้วย PM Method ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมย่อย PMWAVE, DISPM, FFAOB และ DDFE
- JONSWAP ทำหน้าที่คำนวณลักษณะของคลื่นด้วยวิธี JONSWAP Method และการถ่ายเทพลังงานด้วยโปรแกรมย่อย ENERGY ตามหลักการของ Newton-Raphson
- OCCUR ทำหน้าที่คำนวณการกระจายของข้อมูลในช่วงต่างๆ ประกอบด้วย ความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบเวลาคลื่นนัยสำคัญ และความเร็วลม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับทิศทาง การเคลื่อนที่ของลม
- PRINT ทำหน้าที่พิมพ์ผลลัพธ์ของการคำนวณ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขนาดคลื่นบริเวณปากแม่น้ำ

ในการศึกษาการตกตะกอนในร่องน้ำ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลคลื่นในบริเวณใกล้เคียงกับร่องน้ำจึงต้องทำการวิเคราะห์ ลักษณะของคลื่นบริเวณปากแม่น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกแบบจำลอง RCPWAVE ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของคลื่นบริเวณปากแม่น้ำ

4.2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลอง RCPWAVE

แบบจำลอง RCPWAVE เป็นแบบจำลองคำนวณคลื่นที่ใช้หาทิศทาง การเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Direction) ความสูงคลื่น (Wave Height) และตำแหน่งที่คลื่นแตกตัว (Wave Breaking Location) เพื่อเป็นข้อมูลนำไปใช้ป้อนแบบจำลอง Shoreline Model ต่อไป

สมการของแบบจำลอง RCPWAVE ใช้กับการหักเหและการเลี้ยวเบนของคลื่น (Refraction - Diffraction Wave) ซึ่งนำเสนอ โดย Berkhoff (1972) โดยการใช้สมการ Elliptic เพื่อประมาณค่าหาลักษณะการเปลี่ยนของคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง โดยมีเงื่อนไขว่าค่าความชันท้องน้ำมีค่าน้อย (Mild Bottom Slopes) ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial \left(Ccg \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(Ccg \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}{\partial y} + \sigma^2 \cdot \frac{Cg}{C} \cdot \phi = 0 \quad \text{-----(4-10)}$$

$$\phi = ae^{is} \quad \text{----- (4-11)}$$

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad \text{----- (4-12)}$$

$$a(x, y) = \frac{gH(x, y)}{2\sigma} \quad \text{----- (4-13)}$$

โดยที่	$a(x,y)$	คือ	Wave Amplitude Function
	ϕ	คือ	Velocity Potential
	x,y	คือ	พิกัดในแนวราบ
	$C(x,y)$	คือ	ความเร็วคลื่น
	$\sigma = \frac{2\pi}{T}$	คือ	Angular Wave Frequency
	$k(x,y)$	คือ	Wave Number หามาจากสมการ (4-12)
	$C_g(x,y)$	คือ	$\frac{\partial \sigma}{\partial k}$ (ความเร็วกลุ่มคลื่น)
	g	คือ	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง
	$h(x,y)$	คือ	ความลึกของน้ำนิ่ง
	$H(x,y)$	คือ	ความสูงคลื่น
	$S(x,y)$	คือ	Wave Phase Function

Velocity Potential แบ่งออกได้เป็น Forward Scattered Component และ Reflected Component แต่เมื่อไม่นำส่วนของ Reflected Component มาคิด และสมมติว่า Diffractive Effect ในทิศทางของคลื่นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Diffractive Effect ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น ดังนั้น สมการสำหรับ Forward Scattered Wave จะได้เป็น

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left[ik - \frac{1}{2kCCg} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \cdot (kCCg) \right] \phi + \frac{1}{2kCCg} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(CCg \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (4-14)$$

4.2.1.1 การเปลี่ยนรูปร่างของคลื่นภายนอกเขตคลื่นแตกตัว

นำสมการ (4-14) แทนค่าในสมการ (4-10) จะได้สมการเป็น 2 สมการ คือ

$$\frac{1}{a} \left\{ \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{1}{CCg} (\nabla a \nabla (CCg)) \right\} + k^2 - |\nabla S|^2 = 0 \dots \dots \dots (4-15)$$

$$\nabla (a^2 CCg \nabla S) = 0 \dots \dots \dots (4-16)$$

โดยสัญลักษณ์ ∇ หมายถึง Horizontal Gradient Operator
บนสมมติฐานว่าไม่มีสภาพการหมุนของ Wave Phase Function Gradient
จะได้

$$\nabla_x(\nabla S) = 0 \text{-----}(4-17)$$

ค่า Phase Function Gradient สามารถเขียนในรูปของ Vector ได้ดังนี้

$$\nabla S = |\nabla S| \cos \theta \vec{i} + |\nabla S| \sin \theta \vec{j} \text{-----}(4-18)$$

โดย \vec{i} และ \vec{j} คือ Unit Vector ในทิศทาง x และ y
 $\theta(x,y)$ คือ Local Wave Direction

เมื่อนำสมการ (4-17) และ (4-18) มารวมกันจะได้

$$\frac{\partial(|\nabla S| \sin \theta)}{\partial x} - \frac{\partial(|\nabla S| \cos \theta)}{\partial y} = 0 \text{-----}(4-19)$$

ถ้าทราบค่าขนาดของ Wave Phase Gradient ก็สามารถคำนวณหาค่า Local Wave Angle ได้จากสมการ (4-18) และในทำนองเดียวกัน เมื่อแทนค่าสมการ (4-17) เข้าไปในสมการ (4-15) จะ ได้

$$\frac{\partial(a^2 CCg |\nabla S| \cos \theta)}{\partial x} + \frac{\partial(a^2 CCg |\nabla S| \sin \theta)}{\partial y} = 0 \text{-----}(4-20)$$

จากรูปแบบของสมการพลังงานนี้ทำให้เมื่อทราบค่า Wave Phase Characteristics ∇S และ θ แล้วสามารถคำนวณหา Wave Amplitude Function ได้ ซึ่งใช้คำนวณหาความสูงของคลื่นได้ต่อไป เนื่องจากเป็นสัดส่วนกับ Amplitude Function และคลื่นที่มีความถี่คงที่ สมการ (4-15),(4-19) และ (4-20) ใช้อธิบายขบวนการ Refraction และ Diffraction สำหรับคลื่นเส้นตรงแนวราบตามสมมติฐานที่ว่า ความลาดชันของท้องทะเลน้อย ไม่มีการสะท้อนของคลื่นและการสูญเสียพลังงานน้อยมากจนไม่นำมาคิด ดังนั้นสมการทั้งสามนี้จึงใช้ได้ภายนอกเขตคลื่นแตกตัว

4.2.1.2 การเปลี่ยนรูปร่างของคลื่นภายในเขตคลื่นแตกตัว

คลื่นที่เคลื่อนตัวเข้าใกล้ฝั่งจะมีความชันของคลื่นมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการแตกตัวเนื่องจากความลึกของน้ำลดลง ซึ่งตามแนวชายฝั่งที่คลื่นแตกตัวจะมีการสูญเสียพลังงานมากจึงไม่สามารถใช้ทฤษฎีคลื่นแนวราบเส้นตรงมาใช้สำหรับหาค่าแห่งการแตกตัวของคลื่นหรือการเปลี่ยนรูปร่างของคลื่นตามแนวคลื่นแตกตัว ดังนั้นจึงใช้วิธีประมาณจากการทดลอง (Empirical and Approximate Method) มาใช้กับขบวนการแตกตัวของคลื่น

สูตรที่ใช้คำนวณ Wave Characteristics ที่ตำแหน่งคลื่นแตกตัว คือ

$$(Goda) \quad H_b = 0.17L_o \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{h_b}{L_o} \left(1 + 15m^4 \right) \right] \right\} \text{-----(4-21)}$$

$$(Weggle, 1972) \quad Hb = \frac{\bar{b} h_b}{1 + \left(\frac{\bar{b} \bar{a}}{gT^2} \right)} \text{-----(4-22)}$$

โดย

$$\bar{a} = 43.75(1 - e^{-19m}) \text{-----(4-23)}$$

$$\bar{b} = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5m})} \text{-----(4-24)}$$

โดย

Hb = ความสูงของคลื่นแตกตัว

h_b = ความลึกของน้ำที่ตำแหน่งคลื่นแตกตัว

L_o = ความยาวคลื่นในเขตน้ำลึก

เมื่อกำหนดตำแหน่งคลื่นเริ่มแตกตัว ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนรูปของคลื่นแตกตัวตามแนวคลื่นแตกตัว ซึ่งมีผู้พัฒนาสูตรขึ้นมาหลายสูตร ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปดังนี้

$$\frac{\partial(ECg)}{\partial x} = -\delta \text{-----(4-25)}$$

โดย ECg คือ Energy Flux ของคลื่นแตกตัว และ δ คือเทอมที่ใช้แทนอัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความฝืดของท้องทะเล ความปั่นป่วนของกระบวนการต่างๆ จากสูตร Energy Flux ของคลื่นแตกตัวใน RCPWAVE model ให้สูตร

$$\frac{\partial(ECg)}{\partial x} = -\frac{k}{h}(ECg - (ECg)_s) \text{-----(4-26)}$$

โดย k = สัมประสิทธิ์ของอัตราการสลายพลังงาน (เท่ากับ 0.2 ใน RCPWAVE)

$(ECg)_s$ = ระดับพลังงานเสถียรของ Energy Flux ที่ขบวนการเปลี่ยนรูปคลื่นจะลดลงไปถึง

แทนค่า $E = \frac{\rho g H^2}{8}$ ในสมการ (4-26) จะได้

$$\frac{\partial(H^2 Cg)}{\partial x} = -\frac{k}{h}(H^2 Cg - (H^2 Cg)_s) \text{-----(4-27)}$$

จากการทดลองในสนามและห้องปฏิบัติการหลายแห่งพบว่าได้ผลดีในเขตคลื่นแตกตัว พบว่าความสูงของคลื่นจะเข้าสู่เสถียรภาพซึ่งเป็นสัดส่วนกับความลึกของน้ำ โดยความสัมพันธ์แสดงได้เป็น

$$H_s = \gamma h \text{-----(4-28)}$$

โดย H_s = ความสูงคลื่นเสถียรภาพ
 γ = สัมประสิทธิ์ของสัดส่วน (เท่ากับ 0.4 ใน RCPWAVE)
 h = Local water depth

สมการ (4-27) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial(H^2 Cg)}{\partial x} = -\frac{k}{h}[H^2 Cg - (\gamma^2 h^2 Cg)_s] = D \text{-----(4-29)}$$

จากสูตรการเปลี่ยนของคลื่นในคลื่นแตกตัว สามารถนำมาใช้กับสมการคงที่ของพลังงาน (สมการ (4-16)) ได้โดยเพิ่มเทอมของพลังงานที่สลายไปเข้าในด้านขวาของสมการ ซึ่ง D คือพลังงานที่สลายไปในการเคลื่อนตัวของคลื่นและเพื่อให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เทอม D ต้องคูณด้วย Wave Celerity และขนาดของ Wave Phase Gradient ต่อจากนั้นความสูงของคลื่นจะแทนด้วย Wave Amplitude Function เมื่อเขียนในรูปเวกเตอร์สมการพลังงานจะได้

$$\nabla(a^2 CCg \nabla S) = -\frac{k}{h} \left\{ a^2 CCg |\nabla S| - \left[\left(\frac{g}{2\sigma} \right)^2 \gamma^2 h^2 CCg |\nabla S|_r \right] \right\} \text{-----(4-30)}$$

จะเห็นว่าสมการนี้สามารถใช้ได้ทั้งในและนอกเขตคลื่นแตกตัวโดยที่ภายนอกเขตคลื่นแตกตัวนั้น สัมประสิทธิ์ k มีค่าเป็นศูนย์ และสมการจะลดรูปเป็นสมการ (4-16)

4.2.2 ลักษณะแบบจำลอง RCPWAVE

4.2.2.1 สมการที่ใช้ภายนอกเขตคลื่นแตกตัว

สมการ 3 สมการ คือ สมการ (4-15),(4-19), และ (4-20) จะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาโดยใช้ Numerical method โดย Partial Derivatives ในสมการต่างๆจะประมาณด้วย Finite Difference Operators วิธีการแก้ปัญหาโดย Finite Difference จะเริ่มด้วยการสร้างระบบกริดในการคำนวณหรือที่เรียกว่า Mesh โดยในรูป 4-7 จะแสดงถึงเซลล์สี่เหลี่ยม 9 เซลล์ ซึ่งประกอบขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของ Mesh ทุกๆเซลล์ จะมีความยาวเท่ากับ Δx ในทิศทาง x และ Δy ในทิศทาง y โดยค่าสูงสุดของ i และ j คือ M และ N ตามลำดับ

ตัวแปรทุกตัวซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางจะกำหนดเป็นค่าที่ศูนย์กลางเซลล์สำหรับตัวแปรตามใดๆ (F) นั้น Finite Difference Operator จะใช้ประมาณค่า F ที่ตำแหน่ง (i,j) โดย

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{2F_{i,j} - 5F_{i+1,j} + 4F_{i+2,j} - F_{i+3,j}}{(\Delta x)^2} \text{-----(4-31)}$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \frac{F_{i,j+1} - 2F_{i,j} + F_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \text{-----(4-32)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{-3F_{i,j} + 4F_{i+1,j} - F_{i+2,j}}{2\Delta x} \text{-----(4-33)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{F_{i,j+1} - F_{i,j-1}}{2\Delta y} \text{-----(4-34)}$$

สมการ (4-32) และ (4-34) เป็น Central Differences ส่วนสมการ (4-31) และ (4-33) เป็น Backward Differences แต่ทั้ง 4 สมการนี้มีดีกรีของความถูกต้องเท่ากัน

จากสมการ (4-15) ขนาดของ Wave Phase Function Gradient ที่ตำแหน่ง (i, j) คำนวณจาก

$$\begin{aligned} |\nabla S|_{i,j}^2 = & k_{i,j}^2 + \frac{1}{a_{i,j}} \left[\left(\frac{2a_{i,j} - 5a_{i+1,j} + 4a_{i+2,j} - a_{i+3,j}}{(\Delta x)^2} \right) + \left(\frac{a_{i,j+1} - 2a_{i,j} + a_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \right) \right] \\ & + \frac{1}{CCg_{i,j}} \left(\frac{-3a_{i,j} + 4a_{i+1,j} - a_{i+2,j}}{2\Delta x} \right) \left(\frac{-3CCg_{i,j} + 4CCg_{i+1,j} - CCg_{i+2,j}}{2\Delta x} \right) \\ & + \left(\frac{a_{i,j+1} - a_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) + \left(\frac{CCb_{i,j+1} - CCg_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) \end{aligned} \text{-----(4-35)}$$

จากสมการ (4-19) ค่า Local Wave Angle ที่ตำแหน่ง $(i-1, j)$ คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \sin \theta_{i-1,j} = & \frac{1}{|\Delta S|_{i-1,j}} \{ \alpha |\Delta S|_{i,j+1} \sin \theta_{i,j+1} + (1-2\alpha) |\Delta S|_{i,j} \sin \theta_{i,j} + \alpha |\Delta S|_{i,j-1} \sin \theta_{i,j-1} \} \\ & - \frac{W\Delta x}{2\Delta y} (|\Delta S|_{i-1,j} \cos \theta_{i-1,j+1} - |\Delta S|_{i-1,j-1} \cos \theta_{i-1,j-1}) \\ & - \frac{(1-W)\Delta x}{2\Delta y} (|\Delta S|_{i,j+1} \cos \theta_{i,j+1} - |\Delta S|_{i,j-1} \cos \theta_{i,j-1}) \end{aligned} \text{-----(4-36)}$$

จากสมการ (4-20) ค่า Wave Amplitude Function ที่ตำแหน่ง $(i-1, j)$ คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 a_{i-1,j}^2 = & \frac{1}{A_{i-1,j}} \left(\alpha a_{i,j+1}^2 A_{i,j+1} + (1-2\alpha) a_{i,j}^2 A_{i,j} + \alpha a_{i,j-1}^2 A_{i,j-1} \right) \\
 & + \frac{W\Delta x}{2\Delta y} \left(a_{i-1,j+1}^2 B_{i-1,j+1} - a_{i-1,j-1}^2 B_{i-1,j-1} \right) \\
 & + \frac{(1-W)\Delta x}{2\Delta y} \left(a_{i,j+1}^2 B_{i,j+1} - a_{i,j-1}^2 B_{i,j-1} \right) \dots\dots\dots (4-37)
 \end{aligned}$$

โดย

$$A = CCg|\Delta S|\cos\theta \dots\dots\dots(4-38)$$

$$B = CCg|\Delta S|\sin\theta \dots\dots\dots(4-39)$$

W = Weighting Factor ในทิศทาง X = 1.0

α = Weighting Factor ในทิศทาง Y = 0.167

ข้อมูลต่างๆที่ต้องใช้เป็นข้อมูลเข้า(input) ของแบบจำลอง คือ ความสูงของคลื่นน้ำลึก (H_0) ในทิศทางคลื่น (θ_0) และคาบของคลื่น รวมทั้งระดับท้องทะเลตามกริดต่างๆทุกเซลล์ จากนั้นจะมีการคำนวณ Wave Number ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคาบของคลื่นและความลึกของน้ำโดยคำนวณในทุกๆเซลล์ ค่า Wave Number จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการประมาณขนาดของ Wave Phase Function Gradient จากนั้นคำนวณความเร็วคลื่น (C) และความเร็วของกลุ่มคลื่น (C_g) ในทุกๆเซลล์เช่นกัน

ในกรณีที่เส้นชั้นความสูงของท้องทะเลชายฝั่งไม่ขนานกับแกน Y ทำให้ไม่สามารถในกฎของ Snell ในการคำนวณ Local Wave Angle (θ) ได้ ดังนั้นแบบจำลอง RCPWAVE Model จะประมาณค่าใหม่โดย

$$\theta = \pi - \sin^{-1} \left[\frac{\sin(\theta_0 - \theta_c)}{\frac{C_0}{C}} \right] + \theta_c \dots\dots\dots(4-40)$$

โดย $C_0 = \frac{gT}{2\pi}$ คือ ความเร็วคลื่นน้ำลึก

θ_c คือ Offshore Contour Angle

θ คือ Local Wave Angle

ซึ่งนิยามเครื่องหมายของมุมที่ใช้ใน RCPWAVE Model แสดงในรูป 4-7 ความสูงของคลื่นที่ทุกเซลล์คำนวณได้จากความสูงของคลื่นน้ำลึก H_0 , Shoaling Coefficient k_s , และ Refraction Coefficient k_r โดย

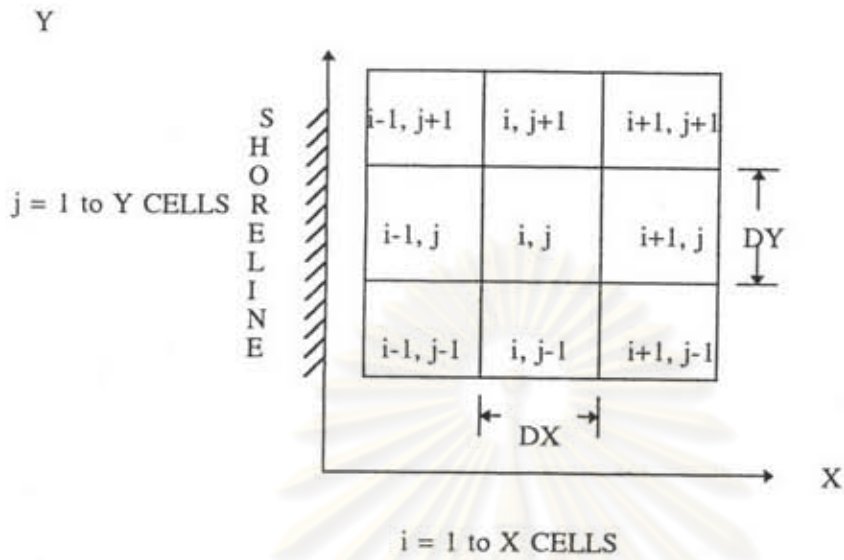
$$H = H_0 k_s k_r \quad \text{----- (4-41)}$$

โดย $k_r = \left[\frac{\cos \theta_c}{\cos \theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{----- (4-42)}$

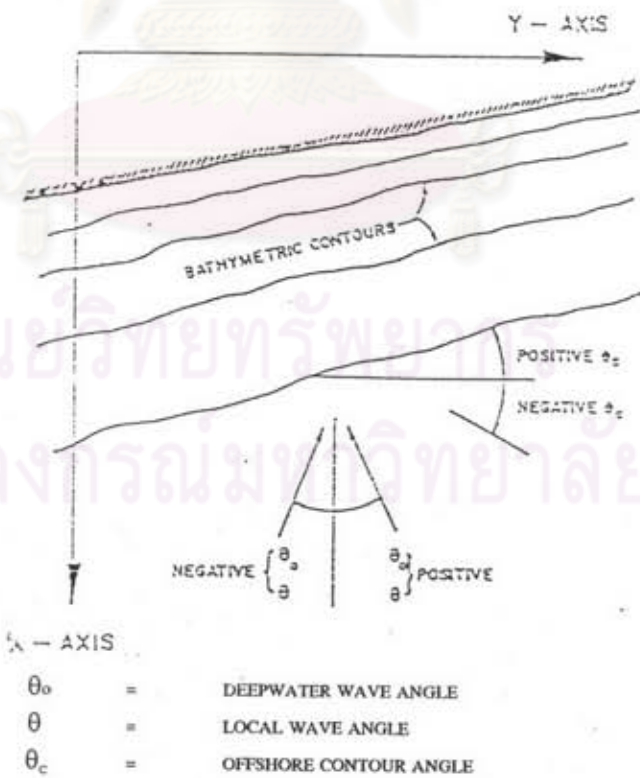
$$k_s = \left\{ \frac{1}{\left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \tanh kh} \right\} \quad \text{----- (4-43)}$$

ในการคำนวณนี้จะเริ่มคำนวณโดยใช้ค่าเริ่มต้นที่ประมาณได้ จากนั้นจึงเริ่มที่แถว $i = M-3$ ด้วยสมการ (4-36) และ (4-37) โดยคำนวณซ้ำๆ เพื่อหามุมคลื่นของความสูงคลื่นตามแถวทั้งหมด (จาก $j = 2$ ถึง $j = N-1$)

ในการคำนวณนี้พิจารณาเฉพาะ Refraction เพราะค่า Wave Number k ใช้ประมาณค่าขนาดของ Phase Function Gradient โดยสมการ (4-35) ใช้คำนวณหาค่าขนาดที่แท้จริงของ Wave Phase Gradient ค่า Wave Number ใหม่ซึ่งเป็นผลมาจาก Diffraction แล้วใช้ Backward Difference ในการคำนวณ x-Derivatives เนื่องจากต้องการข้อมูลที่คำนวณมาแล้ว ต่อจากนั้นจึงใช้สมการ (4-36) และ (4-37) มาคำนวณหามุมคลื่นและความสูงคลื่นโดยใช้ค่า Wave Number ใหม่ ขั้นตอนเหล่านี้วนเวียนไปตามแถวจนกระทั่ง Wave Number ใหม่ที่ได้มาแตกต่างจากค่า Wave Number ในรอบที่แล้วน้อยกว่า 0.5 %



รูป 4-6 นิยามของระบบพิกัดจุดที่ใช้ในการคำนวณ



รูป 4-7 นิยามของมุมที่ใช้ในแบบจำลอง

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแถวที่พิจารณาคำนวณนี้ ค่าของตัวแปรต่างๆที่เซลล์ $j = 2$ และ $j = N$ จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับเซลล์ $j = 2$ และ $j = N-1$ ตามลำดับ

4.2.2.2 สมการที่ใช้ภายในเขตคลื่นแตกตัว

ขั้นตอนทาง Numerical ในการคำนวณมุมคลื่นภายในและภายนอกเขตคลื่นแตกตัวจะเหมือนกัน แต่จะต้องเพิ่มการคำนวณความสูงของคลื่นแตกตัวและเทอมของการสลายตัว

รูปแบบ Finite Difference ของสมการพลังงานคลื่นภายนอกเขตคลื่นแตกตัวคือ

$$a_{i-1,j}^2 = \frac{\bar{F} + Ax\bar{G}}{A_{i-1,j}} \quad \text{-----(4-44)}$$

โดย

$$\bar{F} = \alpha a_{(i,j+1)}^2 A_{(i,j+1)} + (1-2\alpha) a_{(i,j)}^2 A_{(i,j)} + \alpha a_{(i,j-1)}^2 A_{(i,j-1)} \quad \text{-----(4-45)}$$

$$\bar{G} = (1-W) \left[\frac{a_{i,j+1}^2 B_{i,j+1} - a_{i,j-1}^2 B_{i,j-1}}{2\Delta y} \right] + W \left[\frac{a_{i-1,j+1}^2 B_{i-1,j+1} - a_{i-1,j-1}^2 B_{i-1,j-1}}{2\Delta y} \right] \quad \text{-----(4-46)}$$

เมื่อรวมเทอมของการสลายตัว สมการ (4-44) กลายเป็นสมการพลังงานคลื่นภายในเขตคลื่นแตกตัว

$$a_{i-1,j}^2 = \frac{\bar{F} + \Delta x \bar{G}}{A_{i-1,j}} + \frac{\Delta x D^*}{A_{i-1,j}} \quad \text{-----(4-47)}$$

โดย

D^* คือ เทอมของการสลายตัวซึ่งอยู่ในด้านขวาของสมการ (4-47) ซึ่งเขียนได้เป็น

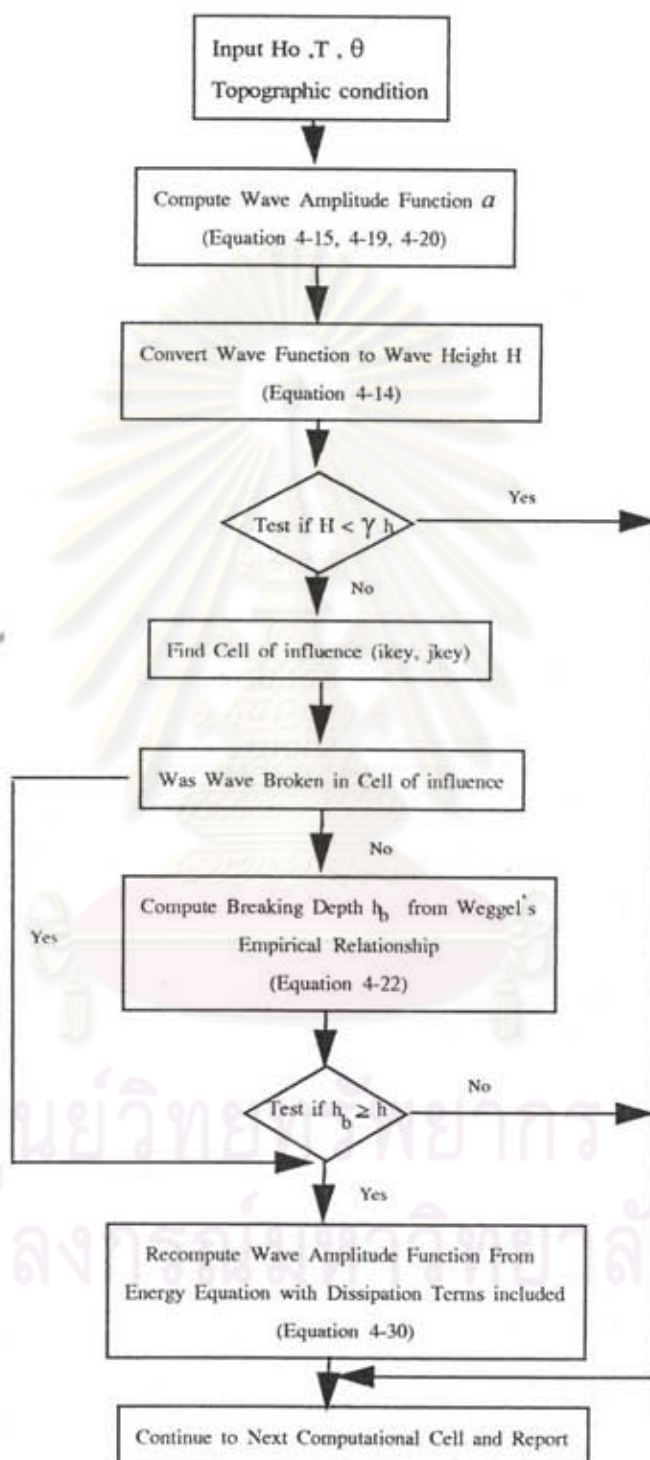
$$D^* = \frac{k}{h} \left\{ \frac{(a^2 CCg|\nabla S|)_{ikey, jkey} + (a^2 CCg|\nabla S|_{i-1, j})}{2} \right. \\ \left. - \left(\frac{g}{2\sigma} \right)^2 \left[\frac{\gamma^2 h^2 CCg|\nabla S|_{ikey, jkey} + (\gamma^2 h^2 CCg|\nabla S|_{i-1, j})}{2} \right] \right\} \quad \text{-----(4-48)}$$

โดย

$$\bar{h} = \frac{h_{i-1, j} + h_{ikey, jkey}}{2} \quad \text{-----(4-49)}$$

สัญลักษณ์ห้อยท้าย (ikey, jkey) แสดงถึงตำแหน่งเซลล์ที่อยู่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งตามทางเดินคลื่นผ่านเซลล์ (i-1, j) ดังแสดงในผังการทำงานของแบบจำลอง RCPWAVE ในรูป 4-8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4-8 ผังการทำงานของแบบจำลอง RCPWAVE



4.3 ทฤษฎีการเคลื่อนและการตกตะกอน

4.3.1 ลักษณะตะกอนและความเร็วในการตกตะกอน

ก) ลักษณะตะกอนในพื้นที่ศึกษาโดยส่วนใหญ่จะเป็นดินโคลน ความหนาแน่นของดินบริเวณสันดอนโดยทั่วไปอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ดินที่ผิวพื้นมีความหนาแน่นระหว่าง 1,250-1,500 kg/m³ การตรวจทางโลหวิทยา แสดงว่าดินนี้ประกอบด้วยแร่ Illite 60-75 % , Montmorillonite 5-20 % , Kaolinite 10 % มี Quartz อีกล็กน้อย และสารอินทรีย์วัตถุมีน้อยมาก Medium Size (D₅₀) ของดินโคลนประมาณ 0.002 mm. (NEDECO, 1965)

ตะกอนเหลว (Soft Silt) ก่อรูปขึ้นโดยการจมอย่างรวดเร็วของตะกอนที่รวมตัวกัน และมีความอยู่ตัวดีกว่ากลุ่มตะกอนที่แขวนลอยอยู่มาก ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,100-1,250 kg/m³ ตะกอนเหลวจะค่อยๆจับกันแน่นขึ้นอย่างช้าๆภายใต้น้ำหนักกดของมวลน้ำ ซึ่งตะกอนเหลวในที่นี้เป็นตะกอนท้องน้ำ หลังจากเมื่อความหนาแน่นของตะกอนมากกว่า 1,300 kg/m³ ตะกอนนั้นก็กลายเป็นดินที่เรียกว่า ตะกอนแข็ง (Hard Mud) ซึ่งถือเป็นท้องน้ำ และจากการทดสอบคุณภาพดิน โดย NEDECO (1965) ปรากฏว่าความจับแน่นของดินขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นดินกับความสงบปราศจากการรบกวนในกระบวนการ ตะกอนชั้นบนๆจะยังอยู่ในรูป Soft Silt ไปอีกนาน และระยะเวลาที่จะเปลี่ยนสภาพจากตะกอนเหลวเป็นตะกอนแข็งนั้นกินเวลาหลายสัปดาห์

ข) ค่าความเร็วในการตก (Settling velocity, w_s) ค่านี้มีความสำคัญในเรื่องการตกตะกอนในขณะที่ลอยตัวอยู่ และมีความเกี่ยวข้องกับความเร็วของกระแสที่พัดพาตะกอนให้เคลื่อนตัวไปตามท้องน้ำ

น้ำซึ่งไหลในลำน้ำ จะมีผลทำให้เกิดแรงดึงพัดพาตะกอนไปนั้น มีสิ่งที่เป็นส่วนสัมพันธ์อยู่ด้วยคือ สัมประสิทธิ์ของแรงดึง (Drag Coefficient) และพื้นที่แนวตัด (Projected area) ดังนั้นเราอาจจะเขียนเป็นสมการของแรงดึงได้ดังนี้คือ

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A u^2 \text{-----(4-50)}$$

โดย C_d = drag coefficient ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและดัชนีเรโนลด์ (Re , เป็นค่าไม่มีมิติ)
 A = พื้นที่หน้าตัด
 F = แรงดึง
 u = ค่าความเร็วกระแส

ถ้า F = แรงดึงดูดของโลก และจะเกิดความสมดุล เมื่อค่าความเร็วกระแส (u) เท่ากับความเร็วของการตกตะกอน (w_f)

โดยทั่วไปค่าความเร็วของการตกตะกอน (w_f) อาจแสดงได้ดังนี้

$$w_f = f (R_e, \text{รูปร่าง, ความหนาแน่นของสารตะกอน, } \eta, s/d, \rho) \text{---(4-51)}$$

ซึ่งจะเห็นว่าเป็นสิ่งที่ขึ้นอยู่กับตัวองค์ประกอบหลายอย่างเช่น

$$R_e = \frac{w_f d}{\nu}$$

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดตะกอน

s/d = ระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างสารตะกอนหรือขอบเขตโดยรอบ

η = Dynamic Viscosity

ν = kinematic viscosity

สำหรับค่าความเร็วในการตกตะกอนของสารลูกทรงกลม (คิดเฉพาะลูกเดียว) ในน้ำ ตามสูตรของ Stoke เป็นดังนี้

$$w_f = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\eta} \right) g d^2 \text{---(4-52)}$$

ค่านี้ใช้ได้เฉพาะ $R_e < 1$ ($F = 3 \pi \eta w_f d$)

สูตรโดยทั่วไปเป็นดังนี้

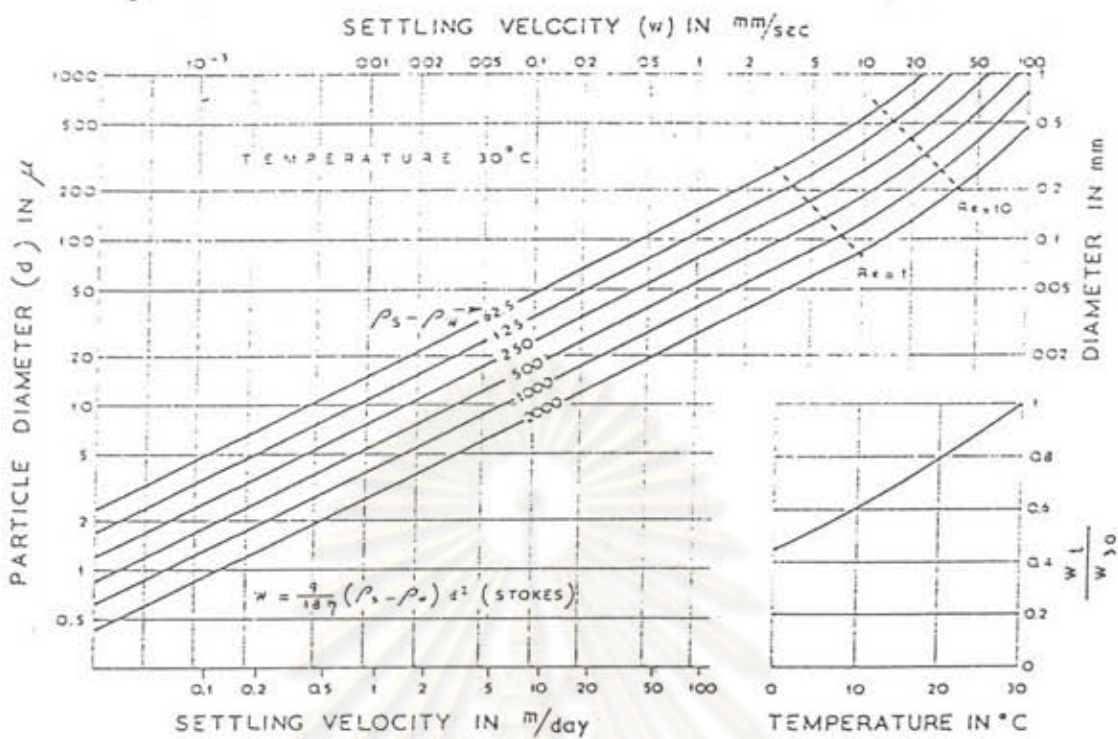
$$w_f^2 = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_d} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \text{-----(4-53)}$$

สำหรับตะกอนที่พบในปากแม่น้ำ ค่าความเร็วการตกสำหรับ 1 เม็ดตะกอนเหมาะสมกับสมการของ Stoke (สมการ 4-52) ดังแสดงในรูป 4 -10

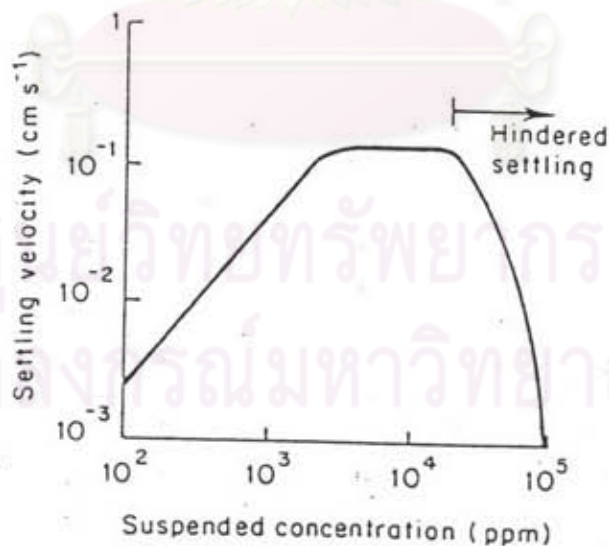
เนื่องจากตะกอนอยู่ในบริเวณน้ำกร่อยซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Flocculation ซึ่งเม็ดตะกอนรวมตัวกันใหญ่ขึ้น และมีค่า w_f ที่สูงขึ้นอย่างมากตามความเข้มข้นของตะกอนที่มี ซึ่ง NEDECO (1965) ได้ทำการทดลองวัดค่า w_f ของ flocc จากตะกอนในร่องน้ำกรุงเทพฯ ได้ค่าประมาณ 0.5-0.7 มิลลิเมตรต่อวินาที

และเนื่องจากค่า w_f ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของตะกอนซึ่งได้มีค่า w_f เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเข้มข้นตะกอน เนื่องจากโอกาสการชนกันของอนุภาค flocc ซึ่งทำให้มันติดกันใหญ่ขึ้นมีมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อค่าความเข้มข้นมีมากจนถึง 10,000 ppm (โดยประมาณ) จะเกิดการลดลงของ w_f อย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Hindered Settling Odd (1982) ได้ทำการทดลองกับตัวอย่างจากแม่น้ำ Thames ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ Settling Velocity กับค่าความเข้มข้นตะกอน ที่ไหลเข้าดังรูป 4-10 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรก ($c < 1,000$ ppm) ค่า w_f จะแปรตามความเข้มข้น และเมื่อค่าความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1,000-10,000 ppm ค่าจะค่อนข้างคงที่ และเมื่อ $c > 10,000$ ppm จะเกิดปรากฏการณ์ Hindered Settling ทำให้ค่า Velocity ลดลงอย่างรวดเร็ว

สรุปได้ว่าค่าความเร็วในการตกตะกอนของตะกอน 1 เม็ดจะแปรผันตามสมการของ Stoke ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอน นอกจากนี้ตะกอนที่อยู่ในบริเวณน้ำกร่อย จะเกิดปรากฏการณ์ Flocculation ทำให้ค่าความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้น และค่าความเร็วในการตกตะกอนนี้ยังขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของตะกอนอีกด้วย สำหรับการศึกษานี้เนื่องจากไม่ทราบค่าความเข้มข้นของตะกอน จึงจะใช้ค่าความเร็วในการตกของตะกอน (w_f) เป็นค่าเฉลี่ยคงที่เท่ากับ 0.7 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามค่าทดลองที่ NEDECO (1965) ได้ทำไว้



รูป 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตก ความหนาแน่น และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (จาก : NEDECO, 1965)



รูปที่ 4-10 แสดงความแปรผันของ Settling Velocity กับค่าความเข้มข้น ตะกอนแขวนลอยสำหรับดินเลน (mud) (จาก: Severn Estuary Odd ,1982)

4.3.2 การเคลื่อนที่ของตะกอนอันเนื่องมาจากคลื่นและกระแสน้ำ

Sawaragi et al (1984) เสนอ ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยอันเนื่องมาจากคลื่นและกระแสน้ำ(อันเนื่องมาจากคลื่น) สามารถแสดงได้จากผลต่างของตะกอนฟุ้งลอยและตะกอนที่ตกค้างนี้

$$Q_{sw} = (1-\gamma)C_o w_f \left(1 - \frac{u_{cw}^*}{w_f}\right) + \alpha_s \bar{C} w_f \quad (4-54)$$

โดย Q_{sw} = ตะกอนแขวนลอยอันเนื่องมาจากคลื่นและกระแสน้ำ

γ = ค่าคงที่ที่จะเป็นตัวชี้ว่าตะกอนจะลอยอยู่หรือตกลง

$$\gamma = 0 \text{ เมื่อ } \frac{u_{cw}^*}{w_f} > 1$$

$$\gamma = 1 \text{ เมื่อ } \frac{u_{cw}^*}{w_f} < 1$$

\bar{C} = ค่าความเข้มข้นของตะกอนเฉลี่ยตามแนวตั้ง (ดูสมการ 4-71)

C_o = ค่าความเข้มข้นของตะกอนที่ท้องน้ำ (ดูสมการ 4-72)

w_f = ค่าความเร็วการตกตะกอน (setting velocity) (ซึ่งให้ค่าเท่ากับ 0.7 mm /sec (NEDECO,1965))

α_s = ค่าคงที่สำหรับปรับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกอนตามแนวตั้ง (ในการศึกษาครั้งนี้ สมมติให้ค่าความเข้มข้นตามแนวตั้งกระจายแบบเอ็กซ์โปแทนเชียล α_s มีค่าเท่ากับ 1.0)

นอกจากนี้ยังได้เสนอค่าการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ อันเนื่องมาจากคลื่นและกระแสน้ำ ดังนี้

$$Q_{bw} = \left(47\sigma \pi d_{50}^2 (\psi - \psi_c)^2 \frac{\bar{u}_c}{\bar{u}_w}\right) \quad (4-55)$$

โดยที่
$$\bar{u}_w = \frac{\pi H}{T \sinh\left(\frac{2\pi Z_h}{L}\right)} \quad (4-56)$$

Z_h = ความลึกน้ำ (เมตร)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \text{-----(4-57)}$$

Shield number $\psi = \frac{u_{cw}^2}{(\Delta g d_{50})} \text{-----(4-58)}$

Dang Van To (1993) เสนอว่า $\psi_c = 0.055\{1 - \exp(-0.095S_*^{0.58})\} + 0.09S_*^{-0.72} \text{-----(4-59)}$

$$S_* = \frac{d_{50}}{4\nu} \sqrt{\Delta g d_{50}} \text{-----(4-60)}$$

โดยที่ $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$

$T =$ คาบความเร็วของคลื่น sec

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = 1.65$$

$\rho_s =$ ความหนาแน่นของเม็ดตะกอน $= 2700 \text{ kg/m}^3$ (NEDECO,1965)

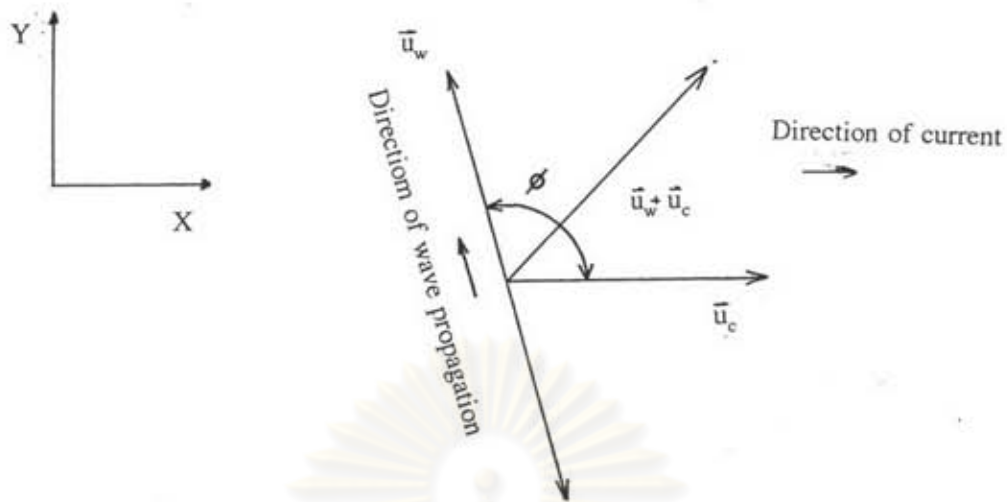
$\rho =$ ความหนาแน่นของน้ำ $= 1020 \text{ kg/m}^3$ (NEDECO,1965)

ถ้า $\psi < \psi_c$ นั่นคือจะไม่มี Bed Load Transport

ค่า u_{cw}^* คือค่า Shear Velocity อันเนื่องมาจากอิทธิพลร่วมของ Wave และ Current ซึ่ง
เป็นความเร็วที่จะเคลื่อนตะกอนให้เคลื่อนที่หาได้จาก

$$\tau_{cw}^* = \rho u_{cw}^{*2} = \frac{1}{2} f_{cw} u_w^2 \text{-----(4-61)}$$

ซึ่งค่า f_{cw} จะเป็นค่าของ f_w, f_c ร่วมกันซึ่งอธิบายปรากฏการณ์ใกล้เคียงกับความเป็นจริง
มากกว่า



รูป 4-11 คำนิยามในสภาพคลื่นที่มีกระแส

สมการที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ของ f_{cw} , f_w , f_c , \hat{u}_{cw} , \hat{u}_w การหาค่า friction coefficient สำหรับการเคลื่อนที่ร่วมของคลื่นและกระแสน้ำบน Smooth Turbulent ; (Thu, 1992)

$$f_{cw} = f_c + 2\sqrt{f_c \beta f_w} \cos \phi + \beta f_w \text{-----(4-62)}$$

โดยที่ $f_w = \exp\left(-7.94 + 7.35\left(\frac{\hat{u}_w a_m}{\nu}\right)^{-0.0748}\right) \text{-----(4-63)}$

$$f_c = \exp\left(-7.60 + 5.98\left(\frac{\bar{u}_c Z_h}{\nu}\right)^{-0.0977}\right) \text{-----(4-64)}$$

Thu (1992) เสนอค่า β ดังนี้

$$\beta = \frac{1 + 0.871 R_c^{-0.0362} f_c^{0.177} \left(\frac{2\phi}{\pi}\right)^{2.5}}{1 + 5.04 R_c^{0.0303} f_c^{0.379}} \text{-----(4-65)}$$

(Reynold Number under steady flow) $R_c = \frac{\bar{u}_c Z_h}{\nu}$ -----(4-66)

$\nu = 0.8 \times 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที (NEDECO,1965)

$Z_h =$ ความลึกน้ำ (เมตร)

$a_m = \frac{\dot{u}_w}{\sigma}$ -----(4-67)

$\sigma = \frac{2\pi}{T}$

(Modified Longnet-Higgins (1970)) $\bar{u}_c =$ ความเร็วกระแสน้ำอันเนื่องมาจากคลื่นตามแนวชายฝั่ง (longshore current)

$= 20.7m(gH_b)^{\frac{1}{2}} \sin(2\alpha_b)$ -----(4-68)

$m =$ beach slope $= 2.5 \times 10^{-4}$ (วัดจากแผนที่)

การหาค่าความเข้มข้นของตะกอนเฉลี่ยในแนวตั้ง(C)ในสมการที่(4-54)จะหาได้จากสมการการกระจายความเข้มข้น ถ้าความเข้มข้นของตะกอนที่ความสูง y (เหนือท้องน้ำ) เท่ากับ C และความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค $= w_f$ ดังนั้นอัตราที่อนุภาคตก ตลอดหน่วยพื้นที่ (ในแนวราบ) ที่ความสูงนั้นจะเท่ากับ $w_f C$

เมื่อ Vertical gradient ของ ตะกอน $= \frac{dc}{dy}$

อัตราการเคลื่อนขึ้นเนื่องจาก turbulent mixing $= D \frac{dc}{dy}$

อัตราการเคลื่อนที่แนวตั้งลัพท์ (T_v) ในทาง upward จะเท่ากับ

$T_v = -w_f C - D \frac{dc}{dy}$ -----(4-69)

ในสภาวะสมดุลย์ $T_v = 0$

อินทิเกรตจะได้ $C = C_0 e^{\frac{-w_f y}{D}}$ -----(4-70)

ดังนั้นความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ

$$\bar{C} = \frac{\int C dy}{Z_h} \quad \text{-----(4-71)}$$

ซึ่งเป็น profile ที่ใช้ในร่องน้ำสม่ำเสมอด้วย permanent flow เช่น แม่น้ำหรือร่องน้ำ

- D = diffusion coefficient = $\alpha_z k u_{cw}^* \delta_w$
 k = Karman constant = 0.4
 α_z = Schmidt Number = 1.0
 δ_w = thickness of boundary layer = $4k u_{cw}^* / \sigma$

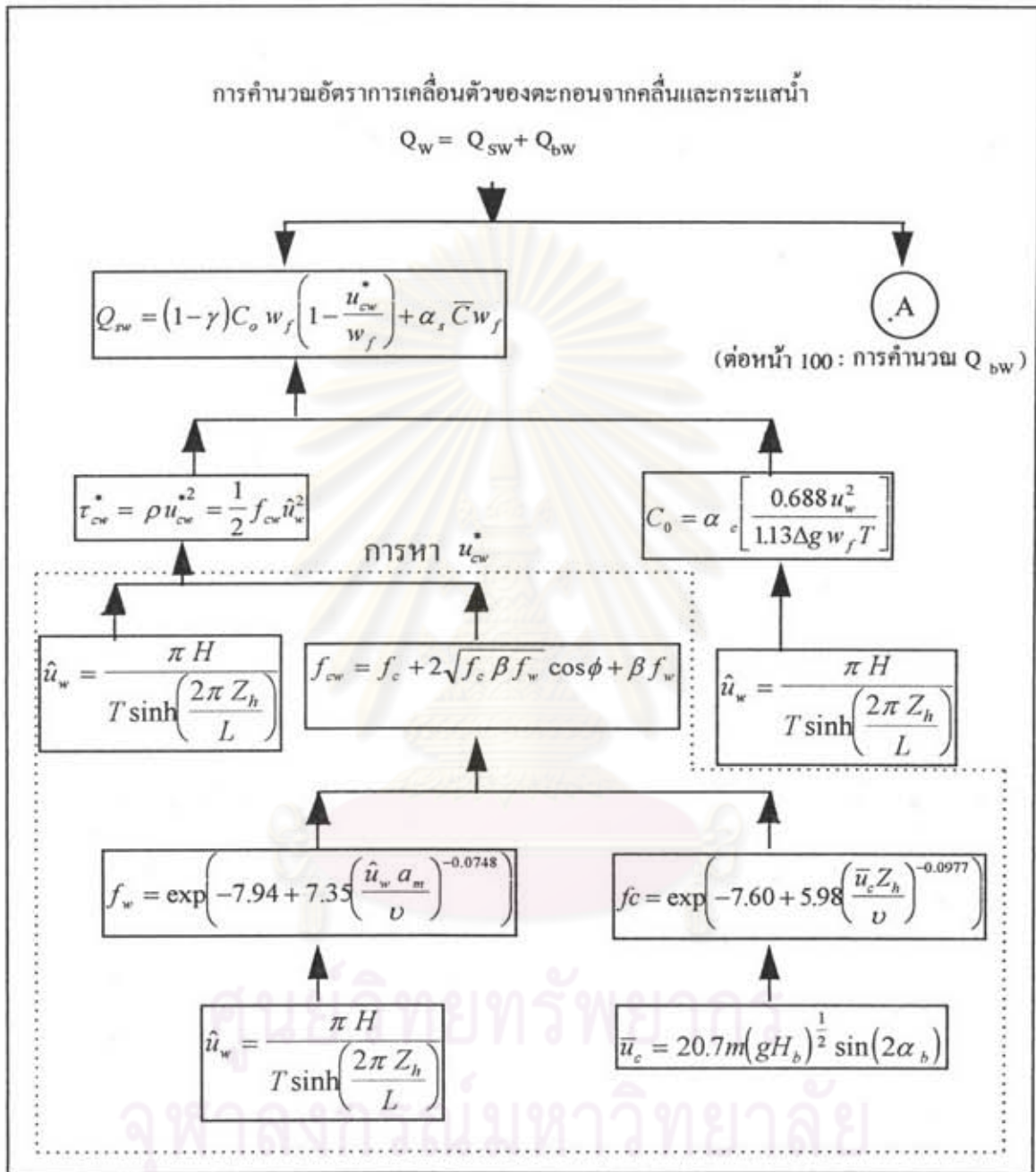
สำหรับค่า C_0 ในสมการที่(4-54) Sawaragi(1984) ได้เสนอสมการคือ

$$C_0 = \alpha_c \left[\frac{0.688 \hat{u}_w^2}{1.13 \Delta g w_f T} \right] \quad \text{-----(4-72)}$$

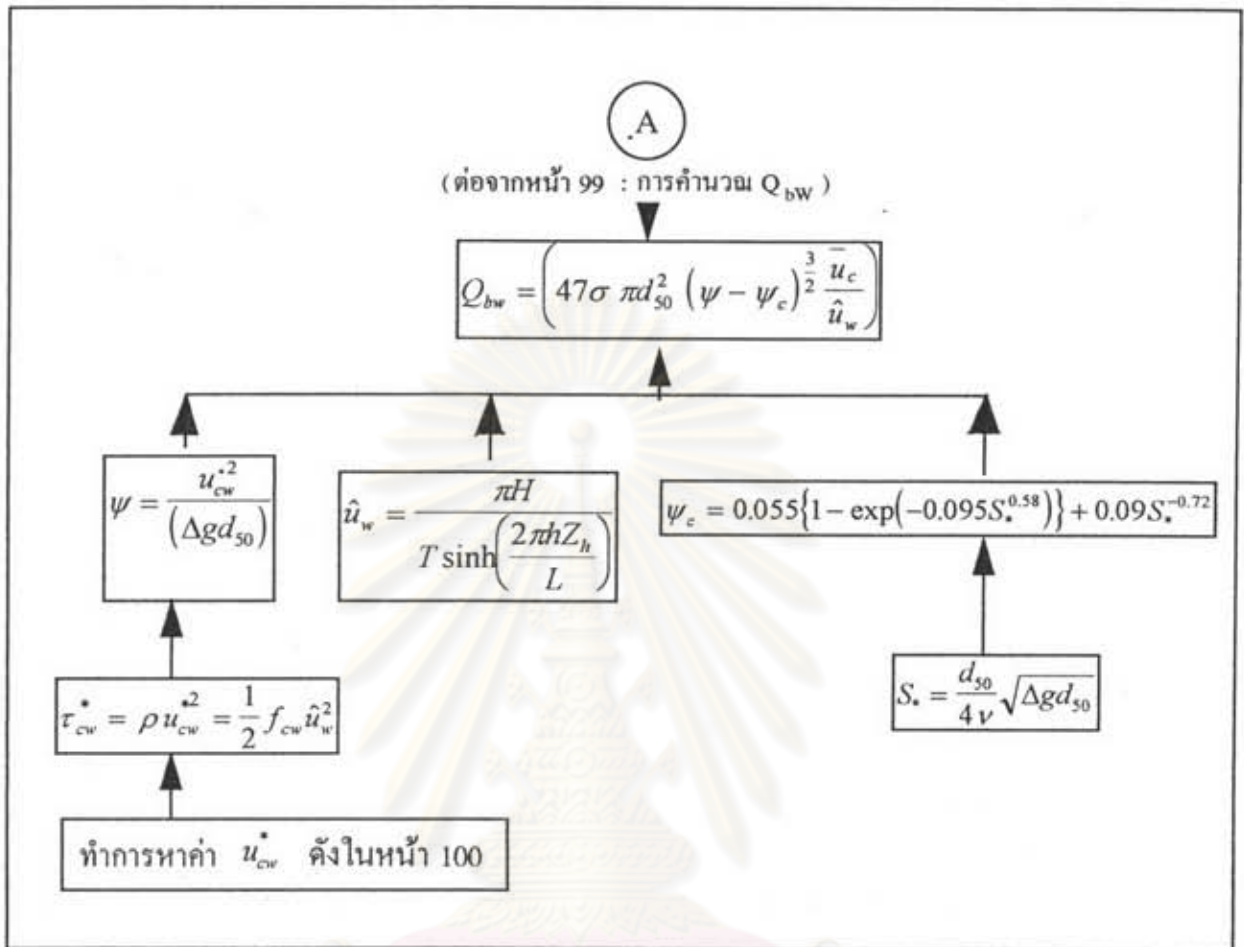
- T = คาบเวลาคลิ้น
 α_c = ค่าคงที่ที่หามาจากข้อมูลสนามหรือการทดลอง
 = 0.0003 จากการคำนวณด้วยข้อมูลสนามบริเวณร่องน้ำกรุงเทพฯ
 (อุภาคผนวก ข)

ผังสรุปการใช้สมการต่างๆในการคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนจากคลิ้นและกระแสน้ำ
แสดงไว้ในรูป 4-12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4-12 ผังสรุปสมการต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนจากคลื่นและกระแสน้ำ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 4-12 ผังสรุปสมการต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนจากคลื่นและกระแสน้ำ (ต่อ)

4.3.3 การเคลื่อนตัวของตะกอนเนื่องจากการไหลของแม่น้ำ

(1) การเคลื่อนตัวของตะกอนแขวนลอย

การเคลื่อนตัวของตะกอนในบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาที่จะไหลลงสู่ปากแม่น้ำ ในธรรมชาติจะเป็นการไหล เข้า-ออกตามอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ในการศึกษาค้างนี้ จะพิจารณาจากปริมาณตะกอนสุทธิที่ไหลออก (Net Sediment Transport) เป็นรายเดือน ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการไหลเข้าและไหลออกของตะกอนแขวนลอยจึงนำรูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง (Empirical) ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยสุทธิต่อปีกับปริมาณการไหลสุทธิ ที่ใช้สำหรับแม่น้ำทั่วไป มาใช้กับการศึกษาค้างนี้ดังนี้

$$Q_s = aQ^b \text{ -----(4-73)}$$

โดย Q_s = ปริมาณตะกอนแขวนลอยสุทธิต่อปีรายเดือนจากแม่น้ำ
 Q = ปริมาณการไหลสุทธิสู่ปากแม่น้ำรายเดือน
 a, b = ค่าคงที่

ในที่นี้จะพิจารณาอัตราการไหลสุทธิของน้ำและปริมาณตะกอนแขวนลอยสุทธิเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนและค่าคงที่จะหาได้จากข้อมูลสนามหรือการทดลอง

(2) การคำนวณปริมาณการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ(Bed Load) จากแม่น้ำ

จากการทบทวนการหาอัตราการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำของแม่น้ำ พบว่าไม่มีสมการที่เหมาะสมกับสภาพของการศึกษาค้างนี้ เนื่องจากสมการการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำได้มาจากการทดลอง มีเงื่อนไขของการใช้สมการต่างๆขึ้นอยู่กับการทดลองนั้นๆ ค่า d_{50} (Median Grain Size) ที่ใช้ในการทดลองส่วนใหญ่ใช้ตะกอนทราย เช่นสมการที่เสนอโดย Meyer-Peter and Muller (1984) ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d_m) อยู่ในช่วง 0.4-30 มิลลิเมตร สมการที่เสนอโดย Einstein-Brown (1950) ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยมากกว่า 0.3 มิลลิเมตร และสมการ Van Rijn (1984) ทดลองในช่วง d_{50} อยู่ระหว่าง 0.2 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร (รูปแบบของสมการทั้งสามแสดงไว้ในตาราง 4-2) แต่ในการศึกษาค้างนี้ ตะกอนมีขนาด d_{50} เท่ากับ 0.002 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่

นอกเหนือไปของการจะใช้สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้อ้างอิง และจากการรวบรวมเอกสารอ้างอิง ไม่พบการศึกษาวิจัยเพื่อหาสมการการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้อ้างอิง ที่มีขนาดตะกอนเล็กๆ (น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร) นอกจากนี้จากการศึกษาของ NEDECO (1965) ได้กล่าวไว้ว่าค่าอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้อ้างอิงของปากแม่น้ำเจ้าพระยามีค่าน้อย โดยพิจารณาจากผลการสำรวจการเปลี่ยนแปลงของตะกอนที่ได้อ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงไม่คิดปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้อ้างอิงจากแม่น้ำ

ตาราง 4-2 สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้อ้างอิง (Bed Load) จากแม่น้ำ

ชื่อสมการ	สมการ	เงื่อนไขในการใช้
Meyer-Peter and Muller (1948)	$q_{b,c} = 8[(S-1)g]^{1/2} d_{50}^{1.5} (\mu\theta - 0.047)^{1.5}$	$0.4 < d_m < 30 \text{ mm.}$
Einstein-Brown (1950)	$q_{b,c} = 40F \left(\frac{hi}{\Delta d_{50}} \right) (\Delta g d_{50}^3)^{1/2}$	$d_m > 0.3 \text{ mm.}$
Van Rijn (1984)	$q_{b,c} = 0.053[(S-1)g]^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1}$	$0.2 < d_{50} < 2 \text{ mm.}$

4.4 ความสัมพันธ์ ขององค์ประกอบกับอัตราการตกตะกอน

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้การคำนวณอัตราการตกตะกอนในร่องน้ำนั้น จะพิจารณาจากตะกอนที่ถูกพามาจาก 2 แหล่งเท่านั้น คือ (1) ตะกอนจากการไหลของน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา และ (2) ตะกอนจากคลื่นและกระแสน้ำ ซึ่งเป็นตัวพาตะกอนมา ดังนั้น อัตราการตกตะกอนในร่องน้ำ จึงกำหนดความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q_{sed} = K_1 Q_R + K_2 Q_W \text{ ----- (4-74)}$$

โดย Q_{sed} หมายถึง อัตราการตกตะกอนในร่องน้ำรายเดือน

- Q_R หมายถึง ปริมาณตะกอนที่พามาจากการไหลของแม่น้ำเจ้าพระยา รายเดือน
- Q_W หมายถึง ปริมาณตะกอนที่พามาโดยคลื่นและกระแสน้ำรายเดือน ประกอบด้วยตะกอนแขวนลอย(Q_{sw}) และตะกอนท้องน้ำ(Q_{bw})
- K_1 หมายถึง สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการพาตะกอนมาโดยการไหลของแม่น้ำเจ้าพระยาสู่ปากแม่น้ำกับปริมาณตะกอนตกในร่อง หรือเป็นสัมประสิทธิ์ การดักตะกอนของร่องน้ำนี้
- K_2 หมายถึง สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณตะกอนที่พามาจากคลื่นและกระแสน้ำกับปริมาณตะกอนตกในร่อง

โดยปกติแล้วค่า K_1, K_2 มีค่าไม่เกิน 1 เนื่องจากปริมาณตะกอนตกในร่องที่เป็นไปได้จะมีค่าตั้งแต่ ศูนย์ ถึงค่าปริมาณรวมของตะกอนที่พามา นั่นคือ K_1, K_2 ควรมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 การคิดค่า K_1, K_2 จะคิดจากสูตรดังนี้

$$K_1 = \frac{Q_{netR}}{Q_R} \text{-----(4-75)}$$

$$K_2 = \frac{Q_{netW}}{Q_W} \text{-----(4-76)}$$

โดยที่ Q_{netR}, Q_{netW} = ปริมาณตะกอนตกจริงในร่องน้ำอันเนื่องมาจากการไหลของแม่น้ำและคลื่นตามลำดับ

4.5 การวิเคราะห์ห้วงค้ำประกอบ

ค่าสัมประสิทธิ์ K_1, K_2 เป็นตัวชี้ถึงปริมาณการตกตะกอนในร่องน้ำ ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบต่างๆ ซึ่งจะส่งผลต่อการตกตะกอนในร่องน้ำ

โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ K_1 นี้ จะเกี่ยวข้องกับปริมาณการไหลของแม่น้ำเนื่องจากปัจจัยที่แตกต่างกันในแต่ละเดือนคือ อัตราการไหลสู่ปากแม่น้ำ ความเข้มข้นของตะกอน ลักษณะของร่อง

ความกว้าง ความลึก มุมที่กระทำ ฯลฯ ซึ่งจะเป็นตัวพาดะกอนให้ตกหรือไม่ตกในพื้นที่บริเวณศึกษา แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาค่า K_1 อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลสุทธิรายเดือนของน้ำสู่ปากแม่น้ำเป็นหลักโดยถือว่าความเข้มข้นของตะกอนแปรผันตามอัตราการไหลสุทธิด้วย และลักษณะของร่องน้ำคงที่

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ K_2 นั้น จากการศึกษาของ Leo C. van Rijn ได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ในการตกตะกอน คือค่ามุมของกระแสน้ำที่ทำกับร่องน้ำ (α_o) ค่าความเร็วที่ถึงร่องน้ำ ($\bar{V}_{r,o}$) ค่าความลึกของน้ำ (h_o) ค่าความเร็วการเฉือนท้องน้ำ (bed shear velocity, $U_{x,o}$) ความเร็วการตกของอนุภาค (particle fall velocity, w_s) ความสูงคลื่น (H) ความกว้างของร่องน้ำ (channel width, B) ความลาดชันของด้านข้างร่องน้ำ ($\tan \gamma$) ค่าความขรุขระท้องน้ำ (bed roughness, k_s) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ค่า h_o , w_s , B และความสัมพันธ์ของมันได้ตามสมการ

$$K_2 = F\left(\alpha_o, \bar{V}_{r,o}, \frac{w_s}{U_{x,o}}, \frac{H}{h_o}, \frac{k_s}{h_o}, \frac{d}{h_o}, \tan \gamma\right) \text{-----}(4-77)$$

ในที่นี้ ค่า $\bar{V}_{r,o}$, w_s , $U_{x,o}$, $\tan \gamma$ ในแต่ละเดือนเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสิ่งที่เป็องค์ประกอบในการคิด K_2 มีค่า H (ความสูงคลื่น) ซึ่งในที่นี้คิดว่าค่า K_2 จะแปรตาม H^2 หรือแปรตาม Wave Energy ของคลื่นน้ำลึก กล่าวคือการตกตะกอนในร่องน้ำกรุงเทพจะขึ้นกับขนาดของพลังงานของคลื่นที่พัดเข้าสู่ร่องน้ำ

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของอัตราการตกตะกอนในร่องน้ำกรุงเทพครั้งนี้ จะพิจารณาแยกตามแหล่งตะกอนกล่าวคือ ตะกอนจากแม่น้ำและตะกอนจากคลื่น และกระแสน้ำจากคลื่น โดยที่ค่าอัตราการไหลบริเวณปากแม่น้ำจะเป็นพารามิเตอร์หลัก ในการวิเคราะห์องค์ประกอบตะกอนจากแม่น้ำ และค่าพลังงานคลื่นน้ำลึกจะเป็นพารามิเตอร์หลัก ในการวิเคราะห์องค์ประกอบตะกอนจากคลื่นและกระแสน้ำ เนื่องจากการนำค่าความสูงคลื่นมาพิจารณาจะต้องคิดเกี่ยวกับค่าทิศทางต่างๆ ดังนั้น การใช้ค่าพลังงานคลื่นจะรวมพลังงานของคลื่นจากทิศทางต่างๆ ได้ดีกว่า จึงนำค่าพลังงานคลื่นเฉลี่ยของคลื่นทุกขนาดและทิศทางในแต่ละเดือนมาวิเคราะห์กับค่าสัมประสิทธิ์ K_2 ค่าพลังงานเฉลี่ยหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E_{ij} \cdot n_{ij}}{\sum n_{i,j}} \text{-----}(4-78)$$

โดยที่	\bar{E}	คือ	พลังงานต่อพื้นที่เฉลี่ยรายเดือน
	E_y	คือ	พลังงานของคลื่นในแต่ละความสูงคลื่นในทิศทางใดๆ $= \frac{\rho g H^2}{8}$
	n_y	คือ	ชั่วโมงที่เกิดคลื่นที่มีขนาดใดๆใน 1 เดือน
	$\sum n_y$	คือ	จำนวนชั่วโมงที่เกิดคลื่นทั้งหมด
	M	คือ	จำนวนทิศทางคลื่น
	N	คือ	จำนวนขนาดความสูงที่มีในแต่ละทิศทาง

4.6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Ratio)

การพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายปริมาณตะกอนตกจะคิดจากสมการดังนี้

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ปริมาณตะกอนตกที่ได้จากการคำนวณ} - \text{ปริมาณตะกอนตกจริง}}{\text{ปริมาณตะกอนตกจริง}} \quad (4-79)$$

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย