



บทที่ 4

การหักเหของคลื่น

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่มีในการศึกษา ทฤษฎีการหักเหของคลื่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่งและสรุปผลการวิเคราะห์

4.1 ข้อมูลที่มีในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาสามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด คือ แผนที่ท้องทะเลและข้อมูลคลื่นในทะเลลึก ดังจะกล่าวต่อไปนี้

4.1.1 แผนที่ท้องทะเล

ข้อมูลด้านท้องทะเลในบริเวณพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียงที่สามารถหาได้จากหน่วยงานตลอดจนรายงานต่าง ๆ มีดังนี้

- 1) แผนที่อุทกศาสตร์หมายเลข 206 ซึ่งสำรวจโดยกรมอุทกศาสตร์ ราชนาวิกโยธินระหว่างปี พ.ศ.2503-2506 ดังแสดงในรูป 4-1
- 2) แผนที่อุทกศาสตร์ชายฝั่งทะเลตากใบ ซึ่งสำรวจโดยกรมเจ้าท่าในปี พ.ศ.2526 และ 2527 ซึ่งครอบคลุมชายฝั่งประมาณ 10 กม. จากปากแม่น้ำโกลก และประมาณ 4 กม. จากชายฝั่ง ดังแสดงในรูป 3-5 และ 3-10 สำหรับกรณีปี 2527 [4,5]
- 3) แผนที่อุทกศาสตร์ชายฝั่งทะเลกลันตันในมาเลเซีย ซึ่งสำรวจโดยกองทัพเรือมาเลเซียในปี พ.ศ.2527 ดังแสดงในรูป 3-10 [42]

จากการศึกษาแผนที่ดังกล่าวพอสรุปได้ว่า แผนที่อุทกศาสตร์ที่ควรจะนำมาเป็นข้อมูลสำหรับพื้นที่ศึกษาเป็นแผนที่อุทกศาสตร์ ซึ่งสำรวจโดยกรมอุทกศาสตร์ เพราะครอบคลุมพื้นที่ของทะเลที่มีอิทธิพลต่อการหักเหของคลื่นที่เกิดในทะเลลึก ซึ่งมีผลต่อคลื่นบริเวณชายฝั่งที่ทำการศึกษา

และจากแผนที่ดังกล่าวนำมาแบ่งกริด (Grid) ช่องละ 2 กม. ตามแกน xy โดยแกน x และ แกน y อยู่ในแนว N 33.5° E และ N 56.5° W ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ขนาด 42x68 ตร.กม. ดังแสดงในรูป 4-2 ค่าความลึกเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) ตามกริดนี้จะเป็นข้อมูลนำไปคำนวณการหักเหของคลื่น

4.1.2 ข้อมูลคลื่น

ข้อมูลคลื่นที่จะนำมาใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลคลื่นที่เกิดในทะเลจีนใต้ ซึ่งสำรวจโดย เรือสังเกตการณ์ของสำนักงานอุทกนิยมหาวิทยาลัยของอังกฤษในระหว่างปี พ.ศ.2492-2525 ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.6 และมีรายละเอียดเสนอในภาคผนวก ก คาบเวลาคลื่น (wave period) ที่ควรแก่การพิจารณาในการศึกษารังนี้ ได้แก่ 4.0, 6.5, 8.5 วินาที ส่วนทิศทางการเคลื่อนในทะเลลึกที่มีผลต่อบริเวณชายฝั่งที่ทำการศึกษาคือ คลื่นในแนว N 30° W จนถึง N 90° E ดังแสดงในรูป 4-3

4.2 ทฤษฎีการหักเหของคลื่น

ทฤษฎีหลักที่ใช้ในการศึกษาการหักเหของคลื่น อาศัยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (Small Amplitude Wave Theory) ดังปรากฏในตำราด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเลโดยทั่วไป เช่น Ippen ในปี ค.ศ.1969 [26], Horikawa ในปี ค.ศ.1978 [25] เป็นต้น ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้ศึกษาในที่นี้ ได้แก่ ความเร็วคลื่นในช่วงน้ำลึก (deep water, $d/L > 0.5$) ดังสมการ 4-1

$$c_0^2 = \frac{gL}{2\pi} \quad (4-1)$$

ความเร็วคลื่นในน้ำลึกปานกลาง (intermediate depth, $0.04 < d/L < 0.5$)

$$c^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (4-2)$$

และความเร็วคลื่นในน้ำตื้น (shallow water, $d/L < 0.04$)

$$c^2 = gd \quad (4-3)$$

พลังงานคลื่นต่อหนึ่งหน่วยความยาวสันคลื่น (total wave energy per unit crest width, E)

$$E = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (4-4)$$

ความหนาแน่นพลังงาน (energy density หรือ specific energy) ซึ่งคือพลังงานคลื่นต่อหน่วยพื้นที่ผิวที่คลื่นเคลื่อนผ่าน

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (4-5)$$

พลังงานคลื่นต่อหน่วยเวลา (wave power หรือ wave energy flux)

$$\text{ที่บริเวณน้ำลึก } d/L > 0.5 \quad P_0 = n_0 b_0 \bar{E}_0 C_0 \quad (4-6)$$

$$\text{และที่บริเวณความลึกใด ๆ } P_0 = n b \bar{E} C \quad (4-7)$$

ถ้าพลังงานคลื่นที่ส่งผ่านจากน้ำลึก ไปสู่น้ำตื้นระหว่างแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นสองเส้น (wave rays) มีค่าคงที่ $P_0 = P$ ดังนั้น

$$n_0 b_0 \bar{E}_0 C_0 = n b \bar{E} C \quad (4-8)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4 \pi d/L}{\sinh(4 \pi d/L)} \right)$$

$$n_0 = \frac{1}{2}$$

จากสมการ (4-8) จะได้ $\frac{\bar{E}}{E_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{C_0}{C} \cdot \frac{b_0}{b}$ (4-9)

จากสมการ (4-5) และ (4-9) จะได้ $\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{C_0}{C} \cdot \sqrt{\frac{b_0}{b}}}$ (4-10)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเข้าสู่น้ำตื้น (Shoaling Coefficient, K_s)

$$K_s = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{C_0}{C}} \quad (4-11)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น (Refraction Coefficient, K_r)

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (4-12)$$

ดังนั้นความสูงคลื่นเมื่อเคลื่อนเข้าใกล้ฝั่งมีค่า

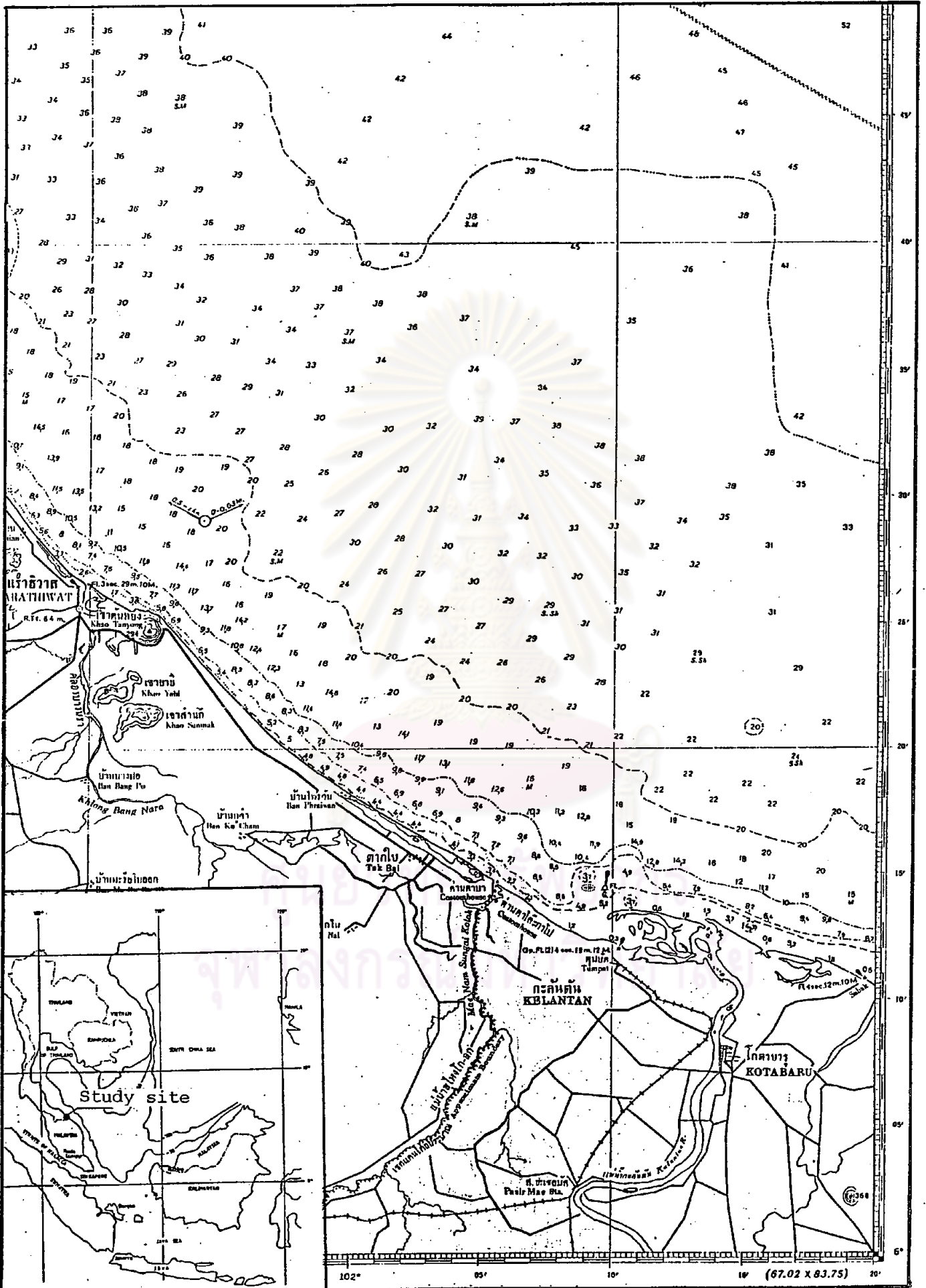
$$H = K_s \cdot K_r \cdot H_0 \quad (4-13)$$

ในการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ท่ามมเอียงกับเส้นชั้นความลึก (bottom contour) ก็จะทำให้เกิดการหักเหของคลื่นเนื่องจากความเร็วที่คลื่นเคลื่อนที่ไม่พร้อมกัน อันเป็นผลมาจากความลึกที่ไม่เท่ากัน จากปรากฏการณ์นี้ ซึ่งคล้ายกับปรากฏการณ์การหักเหของแสง ดังนั้นสามารถใช้กฎของสเนลล์ (Snell's Law) มาประยุกต์ใช้ (ดูรูป 2-4 ประกอบ)

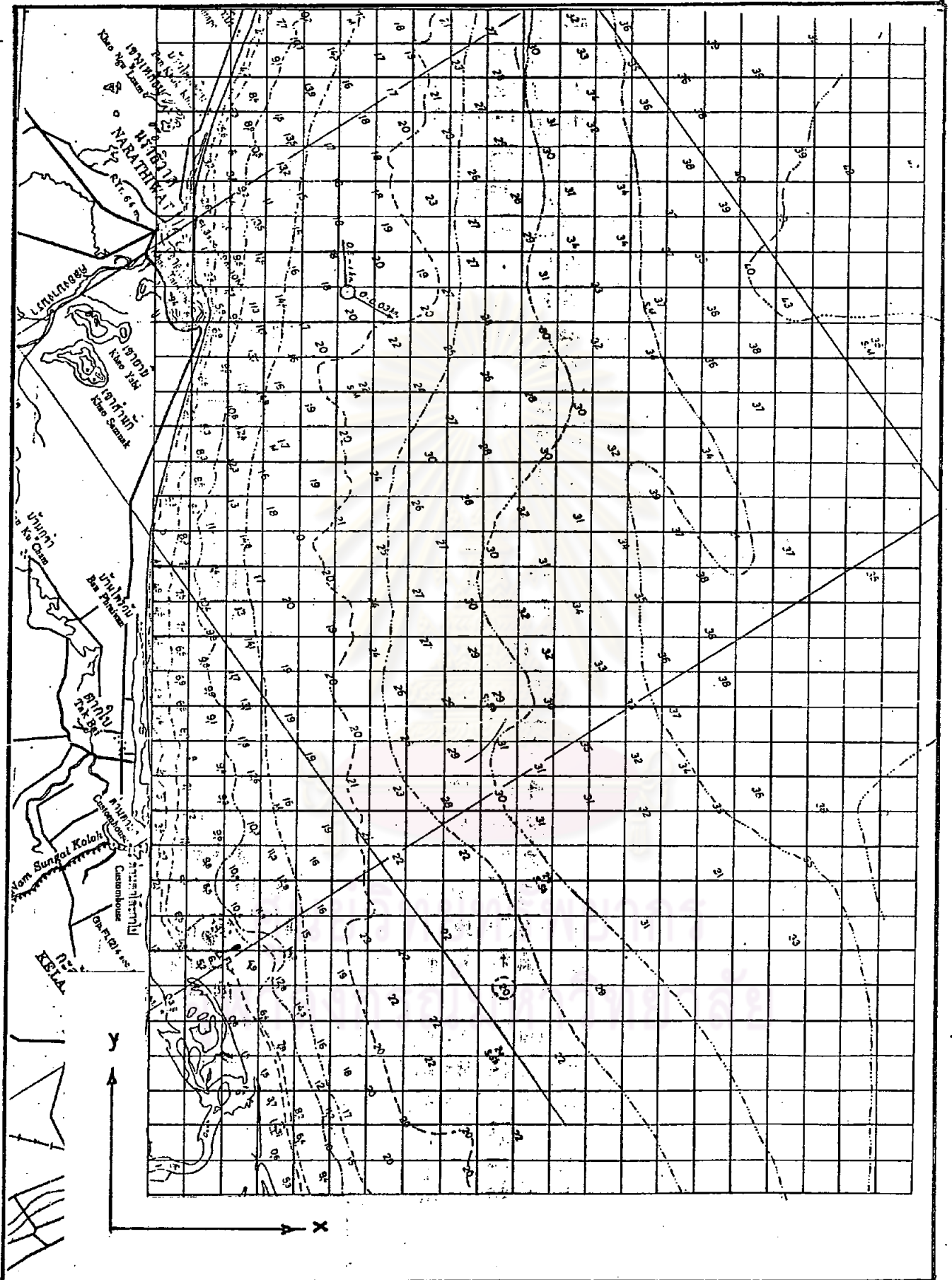
$$\sin \alpha_2 = \frac{C_2}{C_1} \sin \alpha_1 \quad (4-14)$$

จากกฎของสเนลล์และทฤษฎีคลื่นตั้งกล่าว จะสามารถหามุมที่คลื่นเคลื่อนที่หักเหเปลี่ยนไปตามเส้นชั้นความลึก (bottom contour) ที่เปลี่ยนไป ทำให้ได้รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่ฝั่ง และสามารถหาค่า b_0 และ b จากการวัดเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น K_r (Refraction Coefficient)

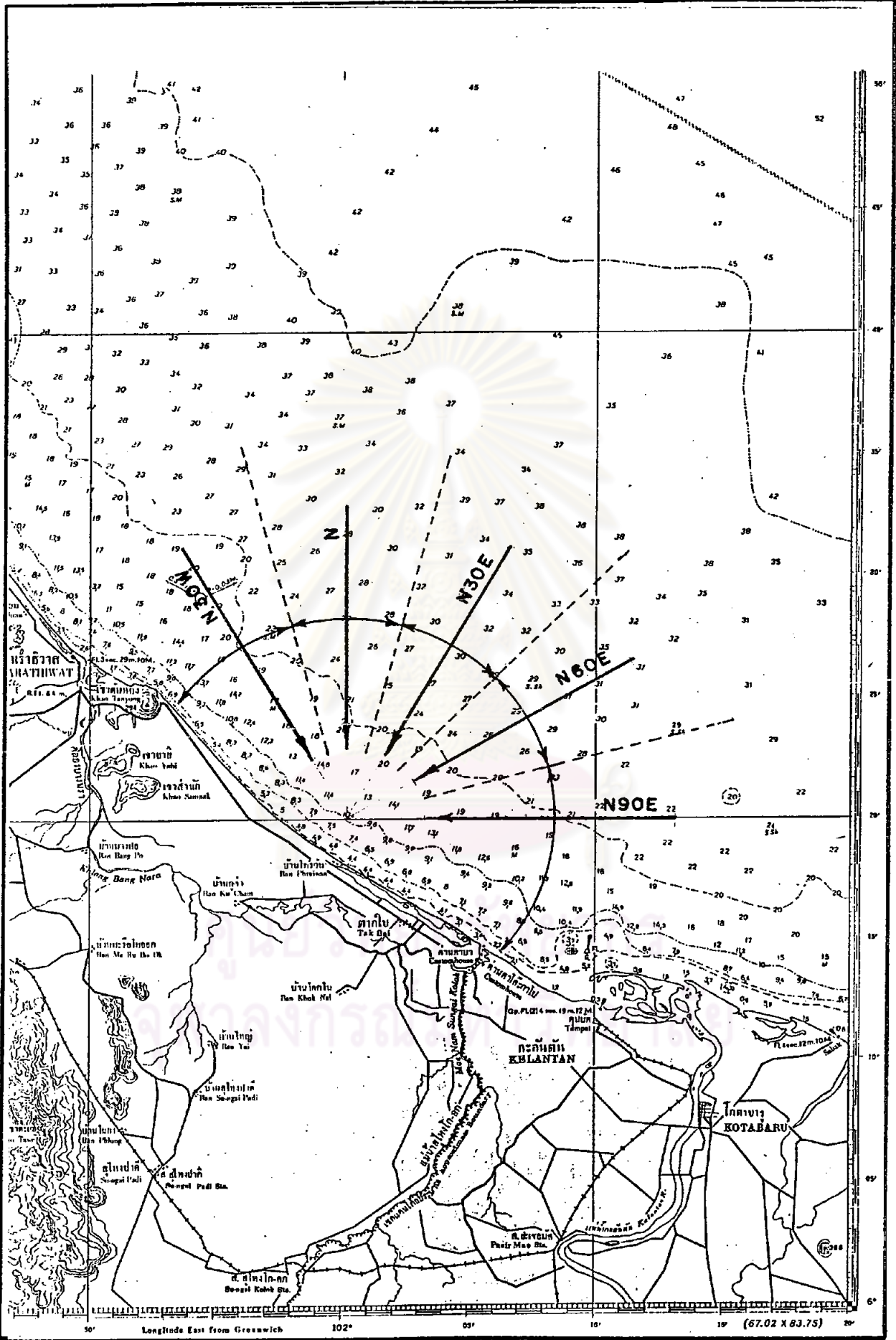
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4-1 แผนที่แสดงข้อมูลของทะเลบริเวณพื้นที่ศึกษา



รูป 4-2 แผนที่ท้องทะเลที่ถูกแบ่งตามกริดของละ 2 กม



รูป 4-3 ทิศทางคลื่นในทะเลจีนใต้ที่นำมาพิจารณาการหักเหของคลื่น

4.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หักเหของคลื่น ได้พัฒนาจากโปรแกรมของ Wilson (1964), Ho(1971) และ Muangman (1973) โดยดัดแปลงให้เป็นหน่วย SI และแก้ไขโปรแกรมให้เข้ากับภาษาฟอร์แทรน 77 สำหรับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ IBM-PC ดังรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

รูป 4-4 แสดงตำแหน่งพิกัดการเคลื่อนที่ของคลื่น โดย $P_n(x_n, y_n)$ และ $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ คือจุดบนแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น (wave ray) D คือระยะทางที่เพิ่มขึ้น A คือ มุมระหว่างแกน X กับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น และ n คือแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น หรือแนวสันคลื่น (wave front) การเปลี่ยนแปลงความลึก (d) ตามแนวตั้งฉากการเคลื่อนที่ของคลื่น สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial d}{\partial n} = -\frac{\partial d}{\partial x} \sin A + \frac{\partial d}{\partial y} \cos A \quad (4-15)$$

จากสมการ 4-2 ความเร็วคลื่น C จะมีค่า

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{CT}\right) \quad (4-16)$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} = \frac{\partial d}{\partial n} \cdot W \quad (4-17)$$

และค่า W ได้พิสูจน์โดย Harrison และ Wilson (1964) ดังนี้

$$W = \frac{1}{K'} \left[\frac{1}{\left(\frac{K''C}{1+K''C}\right) + \left(\frac{K''C}{1-K''C}\right) + \ln(1+K''C) - \ln(1-K''C)} \right] \quad (4-18)$$

ซึ่งค่า $K' = \frac{T}{4\pi}$ และ $K'' = \frac{2\pi}{gT}$

โค้งการเคลื่อนที่ของคลื่น (Ray Curvature, K) มีค่า

$$K = \frac{1}{C} \left(-\frac{\partial C}{\partial n} \right) \quad (4-19)$$

จากสมการ 4-15, 4-17, 4-19 จะได้ K

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{C} \cdot W \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial x} \cdot \sin A - \frac{\partial d}{\partial y} \cdot \cos A \right) \\ &\approx \frac{1}{C} \cdot W \cdot \left(\frac{\Delta d}{\Delta x} \cdot \sin A - \frac{\Delta d}{\Delta y} \cdot \cos A \right) \end{aligned} \quad (4-20)$$

เมื่อรู้ค่าโค้งการเคลื่อนที่ของคลื่น (K) ตำแหน่งพิกัดของจุด P_{n+1} จะหาได้จากพิกัดจุดของ P_n โดยวิธีการเป็นขั้นตอน (Iteration) จากสมการ

$$\Delta A = \frac{(K_n + K_{n+1}) \cdot D}{2} \quad (4-21)$$

$$A_{n+1} = A_n + \Delta A \quad (4-22)$$

$$\bar{A} = \frac{(A_n + A_{n+1})}{2} \quad (4-23)$$

$$X_{n+1} = X_n + D \cos \bar{A} \quad (4-24)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + D \sin \bar{A} \quad (4-25)$$

ความลึกท้องน้ำ (d) เป็นตัวกำหนดโค้งการเคลื่อนที่ของคลื่น เมื่อจุดบนโค้งการเคลื่อนที่ของคลื่นอยู่ระหว่างจุด 4 จุดบนกริด ดังแสดงในรูป 4-5 ซึ่งสามารถคำนวณความลึก ณ จุดบนโค้งได้โดยอาศัยสมการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) fit กับ ระนาบเรียบ (Linear Plane) ของท้องทะเลที่ผ่านจุด 4 จุดบนกริด ดังสมการ

$$d = E(1) + E(2) \cdot \Delta X + E(3) \cdot \Delta Y \quad (4-26)$$

ซึ่งค่า $E(1), E(2)$ และ $E(3)$ สามารถหาได้จากสมการ 4-27 โดย $L = 1, 3$

$$E(L) = \frac{3}{\sum_{i=1}^3 S(L, I)} \cdot \frac{4}{\sum_{i=1}^4 d(J)} \cdot EM(J, L) \quad (4-27)$$

โดย s คือ ความลึกที่ตำแหน่งกริดทั้ง 4 ส่วน ค่า S และ EM เป็น Matrices ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ (E) ในสมการ 4-26 ซึ่งมีค่าคงที่ตาม Wilson ในปี ค.ศ. 1964 [47] เสนอไว้ดังต่อไปนี้

 $S(I,J)$

J \ I	1	2	3
1	0.75	-0.50	-0.50
2	-0.50	1.00	0.00
3	-0.50	0.00	1.00

 $EM(L,I)$

L \ I	1	2	3	4
1	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.00	1.00	1.00	0.00
3	0.00	0.00	1.00	1.00

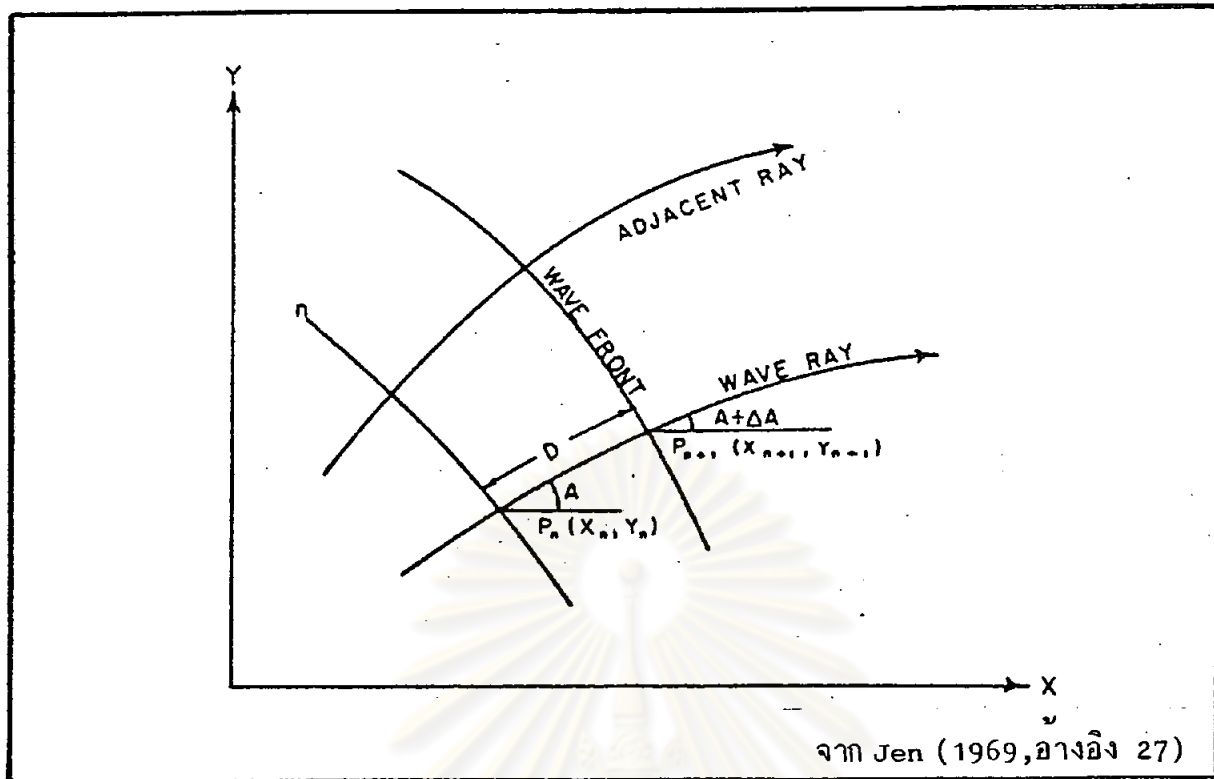
การคำนวณการหักเหของคลื่น เมื่อกำหนดความลึกของน้ำ (water depth, d) ตามตำแหน่งกริด คาบเวลาคคลื่น (wave period, T) จำนวนแนวการหักเหหรือการเคลื่อนที่ของคลื่น (number of ray) ตำแหน่งพิกัดจุดเริ่มต้น (initial coordinate) และทิศทางคลื่น (wave direction) โดยอาศัยทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น จะสามารถหาค่าตำแหน่งพิกัดระดับความลึกและทิศทางคลื่นตามแนวการหักเหของคลื่นที่เคลื่อนผ่าน โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งพิกัดที่พิจารณาในแต่ละช่วง (D) เท่า d/L ของระยะห่างของกริด จนกระทั่งคลื่นเข้าใกล้ฝั่ง รูป 4-6 แสดงขั้นตอนการคำนวณ และตัวอย่างผลการคำนวณบางแนวการหักเหของคลื่น หรือการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งเกิดจากคลื่นในทิศ $N 60^\circ E$ และคาบเวลาคคลื่น 6.5 วินาที ได้แสดงในตาราง 4-1 ส่วนรายละเอียดต่าง ๆ ของโปรแกรมได้เสนอไว้ในภาคผนวก ข

จากผลการคำนวณพิกัดแนวการหักเหของคลื่นเข้าสู่ฝั่ง นำไปเข้าเครื่อง Plotter จะได้รูปแบบการหักเหของคลื่นในทิศทางและคาบเวลาต่าง ๆ ดังเสนอไว้ในภาคผนวก ค.

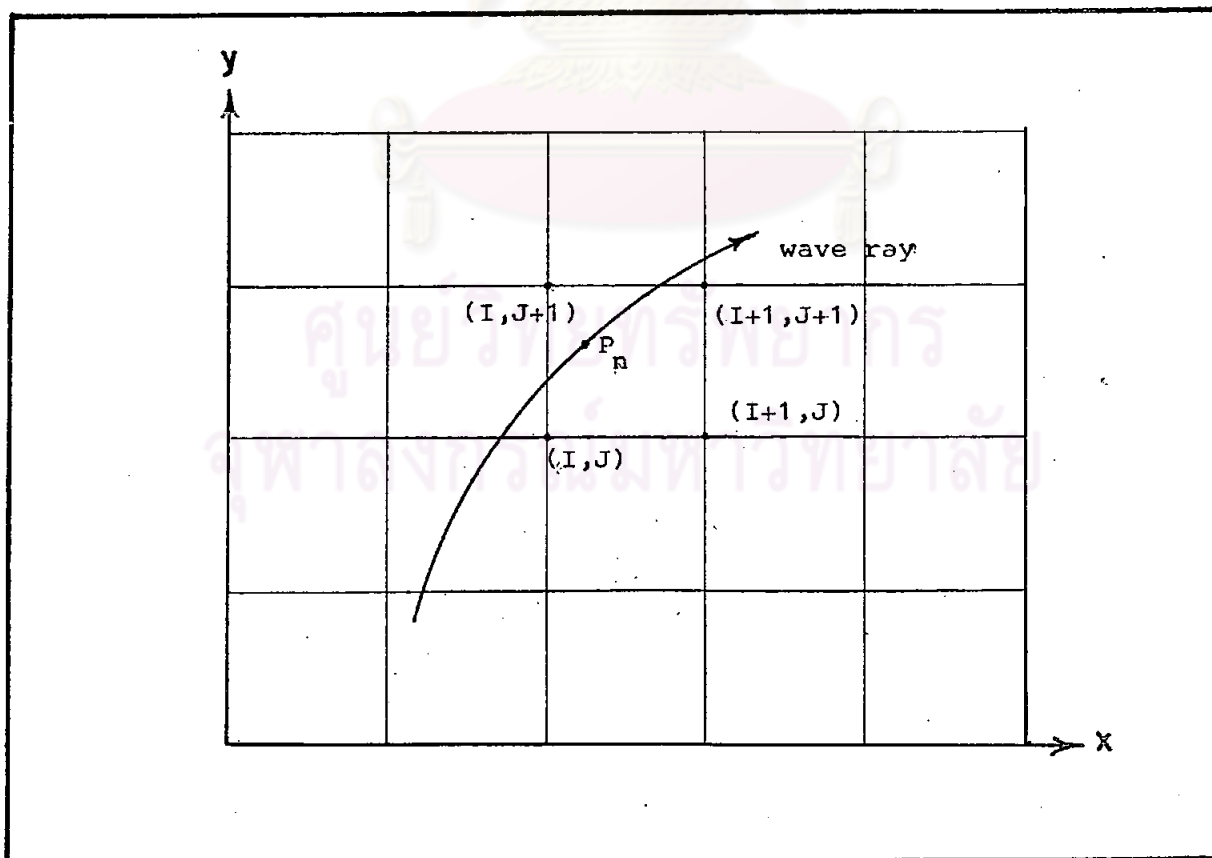
PERIOD = 6.5 SEC. RAY NO. 13							PERIOD = 6.5 SEC. RAY NO. 14						
MAX	X	Y	ANGLE	TIME	DEPTH	D	MAX	X	Y	ANGLE	TIME	DEPTH	D
1	28.58	18.50	153.58	.888	41.88	.5888	1	28.58	18.50	153.58	.888	41.78	.5888
2	28.85	18.72	153.58	.827	41.71	.5888	2	28.85	18.72	153.58	.827	41.65	.5888
3	19.61	18.95	153.58	.855	40.95	.5888	3	19.61	18.95	153.58	.855	39.75	.5888
4	19.16	11.17	153.58	.882	39.94	.5888	4	19.16	12.17	153.58	.882	39.12	.5888
5	18.71	11.39	153.58	.189	38.96	.5888	5	18.71	12.39	153.58	.189	38.66	.5888
6	18.26	11.62	153.58	.137	38.51	.5888	6	18.26	12.62	153.58	.137	38.32	.5888
7	17.82	11.84	153.58	.164	38.33	.5888	7	17.82	12.84	153.58	.164	37.99	.5888
8	17.37	12.06	153.58	.192	38.15	.5888	8	17.37	13.06	153.58	.192	37.73	.5888
9	16.92	12.28	153.58	.219	37.82	.5888	9	16.92	13.28	153.58	.219	37.57	.5888
10	16.47	12.51	153.58	.246	37.48	.5888	10	16.47	13.51	153.58	.246	37.62	.5888
11	16.03	12.73	153.58	.274	37.15	.5888	11	16.03	13.73	153.58	.274	37.49	.5888
12	15.59	12.95	153.58	.301	36.82	.5888	12	15.59	13.95	153.58	.301	37.75	.5888
13	15.13	13.18	153.58	.328	36.44	.5888	13	15.13	14.18	153.58	.328	37.78	.5888
14	14.68	13.40	153.58	.356	36.28	.5888	14	14.68	14.40	153.58	.356	37.27	.5888
15	14.24	13.62	153.58	.383	36.17	.5888	15	14.24	14.62	153.58	.383	36.68	.5888
16	13.79	13.85	153.58	.411	35.46	.5888	16	13.79	14.85	153.58	.411	35.75	.5888
17	13.34	14.07	153.58	.438	34.33	.5888	17	13.34	15.07	153.58	.438	34.74	.5888
18	12.99	14.29	153.58	.465	33.58	.5888	18	12.99	15.29	153.58	.465	34.81	.5888
19	12.45	14.52	153.58	.493	33.58	.5888	19	12.45	15.52	153.58	.493	33.78	.5888
20	12.00	14.74	153.58	.520	33.56	.5888	20	12.00	15.74	153.58	.520	33.71	.5888
21	11.55	14.96	153.51	.547	32.68	.5888	21	11.55	15.96	153.51	.547	32.82	.5888
22	11.11	15.18	153.53	.575	32.86	.4943	22	11.11	16.18	153.53	.575	32.39	.4973
23	10.67	15.40	153.56	.601	31.52	.4859	23	10.67	16.40	153.55	.602	32.18	.4911
24	10.25	15.61	153.59	.628	31.14	.4778	24	10.23	16.62	153.57	.627	32.81	.4978
25	9.82	15.82	153.62	.654	30.68	.4721	25	9.79	16.84	153.60	.652	31.51	.4953
26	9.40	16.03	153.66	.679	30.32	.4678	26	9.37	17.05	153.62	.682	30.88	.4776
27	8.99	16.22	153.74	.705	29.67	.4597	27	8.95	17.26	153.63	.707	29.99	.4669
28	8.59	16.43	153.74	.729	29.81	.4498	28	8.54	17.46	153.65	.732	28.87	.4547
29	8.19	16.63	153.77	.751	28.37	.4358	29	8.15	17.65	153.67	.757	27.68	.4377
30	7.81	16.82	153.81	.778	27.71	.4381	30	7.77	17.84	153.69	.788	26.93	.4214
31	7.43	17.00	153.82	.801	27.16	.4281	31	7.48	18.02	153.69	.802	26.48	.4087
32	7.06	17.18	153.81	.824	26.56	.4188	32	7.05	18.20	153.72	.825	26.85	.4083
33	6.70	17.36	153.83	.846	25.61	.4027	33	6.69	18.37	153.75	.847	25.38	.3948
34	6.35	17.53	153.88	.867	24.78	.3882	34	6.35	18.54	153.81	.868	24.49	.3848
35	6.01	17.70	153.93	.888	23.98	.3757	35	6.01	18.71	153.87	.889	24.02	.3743
36	5.69	17.86	154.04	.909	22.92	.3636	36	5.68	18.87	153.97	.909	23.86	.3641
37	5.38	18.01	154.19	.928	21.85	.3474	37	5.37	19.02	154.08	.929	21.99	.3495
38	5.09	18.15	154.36	.947	20.91	.3312	38	5.07	19.17	154.18	.949	20.76	.3334
39	4.79	18.29	154.47	.965	20.54	.3178	39	4.79	19.30	154.18	.965	20.33	.3147
40	4.51	18.42	154.53	.983	20.36	.3114	40	4.51	19.44	154.07	.983	19.85	.3082
41	4.23	18.56	154.59	1.000	20.19	.3087	41	4.24	19.57	153.96	1.000	19.38	.3018
42	3.95	18.69	154.78	1.017	19.92	.3088	42	3.97	19.78	153.98	1.017	19.88	.2939
43	3.68	18.82	154.87	1.035	19.28	.3028	43	3.72	19.82	153.98	1.034	18.36	.2888
44	3.42	18.94	155.05	1.051	18.51	.2911	44	3.47	19.95	153.98	1.058	17.73	.2783
45	3.16	19.06	155.14	1.068	18.82	.2886	45	3.22	20.07	153.88	1.065	17.22	.2688
46	2.92	19.17	155.38	1.083	16.87	.2732	46	2.99	20.18	153.93	1.086	16.78	.2618
47	2.68	19.28	155.62	1.098	15.82	.2557	47	2.76	20.29	154.08	1.095	15.75	.2543
48	2.46	19.38	155.97	1.113	14.84	.2398	48	2.55	20.40	154.24	1.118	14.79	.2388
49	2.26	19.47	156.34	1.128	13.91	.2249	49	2.34	20.49	154.41	1.123	13.88	.2241
50	2.06	19.55	156.74	1.139	13.04	.2189	50	2.15	20.58	154.59	1.136	13.35	.2184
51	1.89	19.63	157.18	1.152	12.28	.1977	51	1.97	20.67	154.80	1.148	12.17	.1975
52	1.71	19.70	157.68	1.163	11.56	.1862	52	1.81	20.75	155.02	1.168	11.29	.1815
53	1.55	19.77	158.19	1.175	10.88	.1753	53	1.65	20.82	155.25	1.171	10.45	.1718
54	1.39	19.83	158.71	1.185	10.23	.1649	54	1.51	20.88	155.49	1.162	9.69	.1585
55	1.25	19.88	159.25	1.196	9.62	.1551	55	1.37	20.94	155.74	1.172	8.97	.1468
56	1.11	19.93	159.79	1.206	9.04	.1459	56	1.25	21.00	155.95	1.201	8.19	.1361
57	.98	19.98	160.02	1.216	8.58	.1371	57	1.14	21.05	156.12	1.218	7.51	.1242
58	.89	20.02	160.31	1.223	7.28	.1285	58	1.03	21.10	156.29	1.219	6.89	.1138
59	.78	20.05	161.05	1.232	6.14	.1184	59	.94	21.14	156.85	1.227	5.99	.1043
60	.69	20.08	161.79	1.240	5.17	.0938	60	.85	21.17	157.74	1.234	5.87	.0988
61	.62	20.11	162.58	1.246	4.35	.0783	61	.79	21.20	158.62	1.241	4.29	.0767
62	.55	20.12	163.19	1.253	3.68	.0659	62	.72	21.23	159.45	1.248	3.63	.0658
63	.50	20.14	163.84	1.258	3.07	.0554	63	.67	21.24	160.25	1.253	3.06	.0558
64	.46	20.15	164.45	1.264	2.58	.0466	64	.63	21.26	161.08	1.258	2.59	.0465
65	.42	20.16	165.03	1.268	2.17	.0392	65	.59	21.27	161.71	1.263	2.19	.0392
66	.39	20.17	165.57	1.275	1.83	.0329	66	.56	21.28	162.37	1.267	1.84	.0331
67	.35	20.18	166.07	1.278	1.53	.0277	67	.53	21.29	162.99	1.271	1.58	.0288
68	.34	20.18	166.54	1.288	1.29	.0232	68	.51	21.30	163.57	1.275	1.31	.0226
69	.32	20.19	166.97	1.283	1.08	.0195	69	.49	21.30	164.18	1.278	1.11	.0199
70	.30	20.19	167.37	1.286	.91	.0164	70	.47	21.31	164.69	1.281	.93	.0168
71	.29	20.20	167.74	1.289	.76	.0138	71	.46	21.31	165.26	1.284	.79	.0142
72	.28	20.20	168.08	1.291	.64	.0116	72	.45	21.31	165.48	1.285	.66	.0119
							73	.44	21.32	165.87	1.289	.56	.0101

RAY REACHED SHALLOW WATER

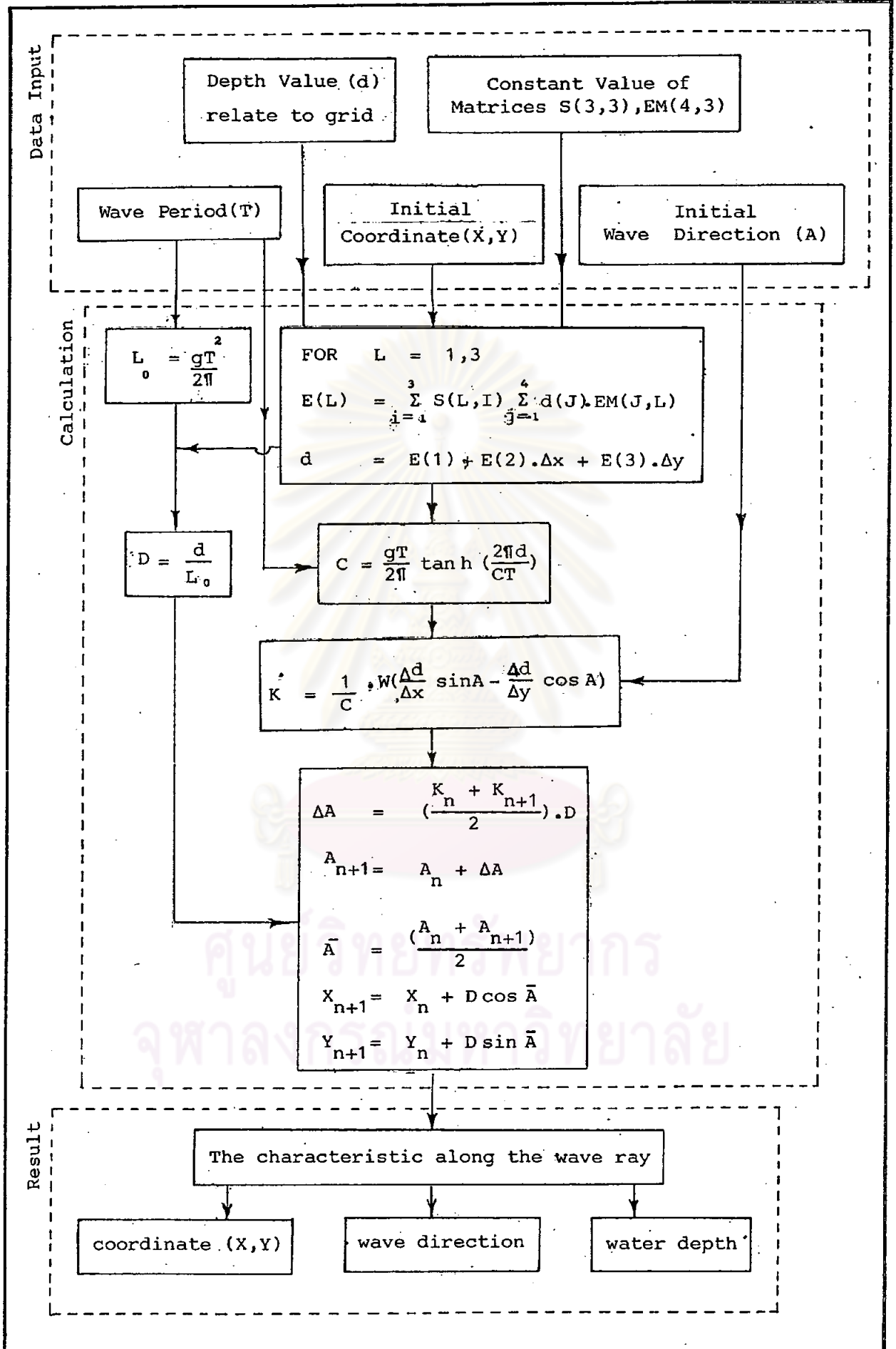
RAY REACHED SHALLOW WATER



รูป 4-4 แสดงตำแหน่งพิกัดของโหนดการหักเหของคลื่น



รูป 4-5 แสดงแนวการหักเหของคลื่นสัมพันธ์กับกริด



รูป 4-6 แสดงขั้นตอนของการคำนวณการเคลื่อนที่ของคลื่น

4.4 รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง

คลื่นที่เคลื่อนเข้าสู่ชายฝั่งบริเวณพื้นที่ศึกษา จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามทิศทางคลื่นในทะเลลึกและคาบเวลาคคลื่น ดังแสดงในภาคผนวก ก จากการศึกษารูปประกอบต่อไปนี้

1) คลื่นที่เคลื่อนมาจากทิศ $N 90^{\circ} E$ ในทะเลจีนใต้ จากรูป ก-1 ถึง ก-3 ในภาคผนวก ก จะสังเกตเห็นว่าคลื่นค่อนข้างกระจาย (divergence) ช่วง กม.ที่ -5 ถึง 5 ซึ่งเป็นบริเวณชายฝั่งมาเลเซีย-ปากแม่น้ำโกลก-อ่าวตากใบ สำหรับกรณีของคาบเวลาคคลื่น 4.0, 6.5 และ 8.5 วินาที และช่วง กม.ที่ 20 ถึง 27 และ กม.ที่ 16 ถึง 26 ในกรณีคาบเวลาคคลื่น 6.5 และ 8.5 วินาทีตามลำดับ ส่วนลักษณะคลื่นที่ลู่เข้าหากันซึ่งเป็นกรณีที่เกิดพลังงานสะสมมาก (convergence) จะสังเกตเห็นเด่นชัดในช่วง กม.ที่ 14 ถึง 18 ในกรณีคาบเวลาคคลื่น 6.5 วินาที ดังแสดงในรูป ก-2 และ ช่วง กม.ที่ 10 ถึง 13 และ กม.ที่ 27 ถึง 29 ซึ่งเป็นบริเวณใกล้เขาคันธงในกรณีคาบเวลาคคลื่น 8.5 วินาที ดังแสดงในรูป ก-3

2) คลื่นที่เคลื่อนมาจากทิศ $N 60^{\circ} E$ ในทะเลจีนใต้ จากรูป ก-4 ถึง ก-6 จะเห็นได้ว่า การหักเหค่อนข้างสม่ำเสมอในกรณีคาบเวลาคคลื่น 4.0 และ 8.5 วินาที และคลื่นจะกระจาย (divergence) ช่วง กม.ที่ -5 ถึง 0 จากชายฝั่งมาเลเซียถึงปากแม่น้ำโกลกในกรณีคาบเวลา 4.0 และ 6.5 วินาที ช่วง กม.ที่ 7 ถึง 10 ในคาบเวลาคคลื่น 6.5 วินาที และ ช่วง กม.ที่ -2 ถึง 1, กม.ที่ 6 ถึง 10 และ กม.ที่ 20 ถึง 25 ในกรณีคาบเวลาคคลื่น 8.5 วินาที คลื่นที่ลู่เข้าหากัน (convergence) จะเห็นได้ชัดในรูป ก-6 คือบริเวณ กม.ที่ -5 ถึง -2, กม.ที่ 1 ถึง กม.6, กม.ที่ 10 ถึง 14 และ กม.ที่ 34 ถึง 35 ซึ่งเป็นบริเวณปากแม่น้ำบางนราในกรณีของคาบเวลาคคลื่น 8.5 วินาที

3) คลื่นที่เคลื่อนมาจากทิศ $N 30^{\circ} E$ ในทะเลจีนใต้ จากรูป ก-7 ถึง ก-9 จะเห็นว่าแนวการหักเหค่อนข้างน้อย เนื่องจากแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเกือบจะตั้งฉากกับเส้นชั้นความลึกโดยทั่วไป (bottom contour) ลักษณะการกระจายของคลื่นมีให้เห็นในช่วง กม.ที่ -5 ถึง กม.-1 ในกรณีคาบเวลาคคลื่น 6.5 วินาที และช่วง กม.ที่ -5 ถึง 2, กม.ที่ 7 ถึง 10 กม.ที่ 15 ถึง 17 และ กม.ที่ 23 ถึง 28 ในกรณีคาบเวลาคคลื่น 8.5 วินาที ส่วนลักษณะคลื่นที่ลู่เข้าหากันพบในช่วง กม.ที่ 30 ถึง 32 ในกรณีคาบเวลาคคลื่น 6.5 วินาที และบริเวณ กม.ที่ -5 ถึง -1, กม.ที่ 1 ถึง 6, กม.ที่ 11 ถึง 14 และ กม.ที่ 28 ถึง 30 บริเวณเขาคันธงดังแสดง

ในรูป ก-9

4) คลื่นที่เคลื่อนมาจากทิศ N ในทะเลจีนใต้ จากรูป ก-10 ถึง ก-12 การหักเหของคลื่นตลอดแนวชายฝั่งค่อนข้างสม่ำเสมอในกรณีของคาบเวลา 4.0 และ 6.5 วินาที ลักษณะของคลื่นที่เข้าสู่หากันมีให้เห็นในกรณีคาบเวลาคลื่น 8.5 วินาที ได้แก่ ช่วง กม.ที่ -2 ถึง 1, กม.ที่ 5 ถึง 10, กม.ที่ 17 ถึง 20, กม.ที่ 26 ถึง 31 บริเวณใกล้เขตันหยง และ กม.ที่ 33 ถึง 35 ใกล้ปากแม่น้ำบางนรา ดังแสดงในรูป ก-12 ส่วนคลื่นที่กระจายในช่วง กม.ที่ -5 ถึง -2, กม.ที่ -1 ถึง 2, กม.ที่ 11 ถึง 16, กม.ที่ 20 ถึง 24 และ กม.ที่ 31 ถึง 33 ในกรณีคาบเวลาคลื่น 8.5 วินาที

5) คลื่นที่เคลื่อนมาจากทิศ N 30° W ในทะเลจีนใต้ จากรูป ก-13 ถึง ก-15 จะเห็นว่า คลื่นจะมีลักษณะค่อนข้างกระจายตลอดแนวชายฝั่งในกรณีของคาบเวลาคลื่น 4.0, 6.5 และ 8.5 วินาที เช่น คลื่นที่เข้าสู่หากันจะเห็นได้บริเวณ กม.ที่ 29 ถึง 32 ซึ่งเป็นบริเวณเขตันหยง สำหรับกรณีคาบเวลาคลื่น 8.5 วินาที ดังแสดงในรูป ก-15

4.5 สัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น

จากรูปแบบการหักเหของคลื่นเข้าสู่ฝั่งในทิศทางและกรณีคาบเวลาคลื่นต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก. สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่นได้จาก

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (4-28)$$

โดยการวัดค่า b_0 และ b ซึ่งเป็นระยะระหว่างแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น (wave ray) ในน้ำลึกและบริเวณชายฝั่งตามลำดับ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวชายฝั่ง และผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่นในทิศทาง N 90° E, N 60° E, N 30° E, N และ N 30° W ในกรณีคาบเวลาคลื่น 4.0, 6.5 และ 8.5 วินาที ดังแสดงในตาราง 4-2 และ รูป 4-7 และจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่นมีค่าระหว่าง 0.9-1.0 ในช่วง กม.ที่ -5 ถึง 15 และมีค่าระหว่าง 0.8-1.0 ในช่วง กม.ที่ 15 ถึง 35 สำหรับกรณีคาบเวลาคลื่น 4.0 วินาที ส่วนในกรณีคาบเวลาคลื่น 6.5 วินาที มีค่าค่อนข้างกระจายในทิศทางและตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวชายฝั่ง และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.3 ในทิศ N 90° E ที่ กม.17 บริเวณใกล้ประตูระบายน้ำ

คลองน้ำแบ่ง และค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่นตลอดแนวชายฝั่งในกรณีคาบเวลาคลื่น 6.5 วินาที มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.8-1.0 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ในคาบเวลา 8.5 วินาที มีค่าค่อนข้างสูงเป็นช่วง ๆ ตามตำแหน่งต่าง ๆ ตามชายฝั่ง เช่น บริเวณ กม.ที่ 5 ใกล้อำเภอตากใบ มีค่า 1.0-1.2, กม.ที่ 12 มีค่า 1.0-1.4 และ ช่วง กม.ที่ 30 บริเวณเขาคันธงมีค่า 1.2-1.4

4.6 สรุปผลและการวิเคราะห์การหักเหของคลื่น

จากรูปแบบการหักเหของคลื่นตั้งไกล่ลาวมาแล้วในหัวข้อ 4.4 และแสดงไว้ในภาคผนวก ก พอสรุปได้ว่าคลื่นที่เคลื่อนเข้าหาชายฝั่งมีลักษณะแตกต่างกันไปตามทิศทางคลื่นคาบเวลาคลื่นและความลึกของน้ำ มีผลทำให้คลื่นเกิดการลูเข้าหากันซึ่งเป็นกรณีที่เกิดพลังงานสะสมมาก (convergence) หรือคลื่นกระจายออก (divergence) จากลักษณะการลูเข้าหากันและกระจายออกของคลื่นบริเวณชายฝั่ง ตามสถิติข้อมูลคลื่นระหว่าง 1949-1982 พอจะบ่งบอกได้ว่าชายฝั่งบริเวณใดจะมีการกัดเซาะและบริเวณใดจะมีการทับถมในระยะยาว เมื่อพิจารณาลักษณะการลูเข้าหากันหรือกระจายออกของคลื่นตลอดแนวชายฝั่ง เนื่องจากคลื่นในทิศทางและคาบเวลาต่าง ๆ ครั้งแสดงสรุปไว้ในรูป 4-8 ซึ่งสามารถกล่าวไต่กว้าง ๆ ดังนี้

1) บริเวณชายฝั่งที่คลื่นมีลักษณะลูเข้าหากัน (convergence) จะมีแนวโน้มของการกัดเซาะชายฝั่งยังผลทำให้เกิดการถดถอยของชายฝั่งได้แก่ พื้นที่ชายฝั่งช่วง กม.ที่ -5 ถึง -2 บริเวณชายฝั่งมาเลเซีย ช่วง กม.ที่ 1 ถึง 6 บริเวณใกล้อำเภอตากใบ ช่วง กม.ที่ 10 ถึง 17 ช่วงก่อนถึงประตูระบายน้ำคลองน้ำแบ่ง และช่วง กม.ที่ 27 ถึง 32 บริเวณใกล้เขาคันธง

2) บริเวณชายฝั่งที่คลื่นมีลักษณะกระจายออก (divergence) จะมีแนวโน้มการทับถมของชายฝั่งดังเช่นช่วง กม.ที่ -2 ถึง 1 บริเวณชายฝั่งมาเลเซียใกล้ปากแม่น้ำโกลก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการงอกของแหลมทรายฝั่งมาเลเซียมาปิดปากแม่น้ำโกลก ช่วง กม.ที่ 6 ถึง 10 กม.ที่ 17 ถึง 27 จากบริเวณประตูระบายน้ำคลองน้ำแบ่งจนถึงบริเวณใกล้เขาคันธง

REFRACTION COEFFICIENT

WAVE DIRECTION : N90E

STATION	4.0s	STATION	6.5s	STATION	8.5s
-4.00	0.58	-4.00	0.56	-3.50	0.58
2.00	0.63	1.50	0.65	1.75	0.80
6.50	0.91	5.00	0.93	4.50	1.00
9.75	0.97	8.00	0.76	7.50	0.74
13.50	0.89	12.00	0.76	11.50	1.55
16.50	0.91	15.00	1.07	14.50	0.96
19.25	0.91	16.50	1.31	18.50	0.58
21.75	0.91	18.25	0.86	24.00	0.61
24.00	0.96	21.50	0.71	27.25	1.21
26.00	0.96	25.00	0.74	28.50	1.39
28.00	0.94	28.00	0.86	30.25	0.83
30.75	0.91	30.50	0.91	32.75	0.91
33.75	0.87	33.25	0.83		

REFRACTION COEFFICIENT

WAVE DIRECTION : N60E

STATION	4.0s	STATION	6.5s	STATION	8.5s
-2.50	0.83	-5.25	0.92	-3.50	1.37
0.00	0.85	-2.25	0.81	-2.25	1.27
2.00	1.00	0.50	0.97	-0.25	0.86
4.00	0.97	2.50	1.00	1.75	1.17
6.00	1.00	4.00	1.00	3.25	1.09
8.00	0.97	6.00	0.97	5.00	1.03
10.00	1.00	8.50	0.78	8.00	0.67
12.00	0.97	11.00	0.95	10.75	1.17
14.00	1.00	13.00	0.97	12.50	1.06
16.00	1.00	15.25	0.95	14.50	0.90
18.00	0.97	17.50	0.97	16.75	0.92
20.00	0.97	19.50	0.97	19.25	0.81
22.00	1.00	21.50	0.90	22.00	0.77
24.00	1.00	23.50	1.00	24.25	1.06
25.75	1.00	25.25	1.09	26.00	0.97
27.25	1.00	27.00	0.97	28.25	0.83
29.25	1.00	29.00	0.92	31.25	0.79
31.00	1.00	30.75	1.06	34.00	0.90
33.00	0.95	32.50	0.95	35.25	1.32
35.00	0.95	34.50	1.03		

REFRACTION COEFFICIENT

WAVE DIRECTION : N30W

STATION	4.0s	STATION	6.5s	STATION	8.5s
-6.00	0.85	-4.75	0.88	-5.00	0.75
-2.50	0.90	0.25	0.71	-1.60	0.88
1.25	0.86	4.00	0.79	1.75	0.74
5.00	0.90	8.50	0.63	6.10	0.64
8.50	0.92	12.75	0.80	10.25	0.85
12.50	0.92	17.50	0.66	14.50	0.67
17.50	0.80	22.75	0.69	19.00	0.80
24.00	0.77	27.25	0.90	23.25	0.72
29.75	0.86	30.50	0.87	27.25	0.85
34.00	0.77	33.50	0.79	29.50	1.52
				31.00	1.14
				33.50	0.85

REFRACTION COEFFICIENT

WAVE DIRECTION : N30E

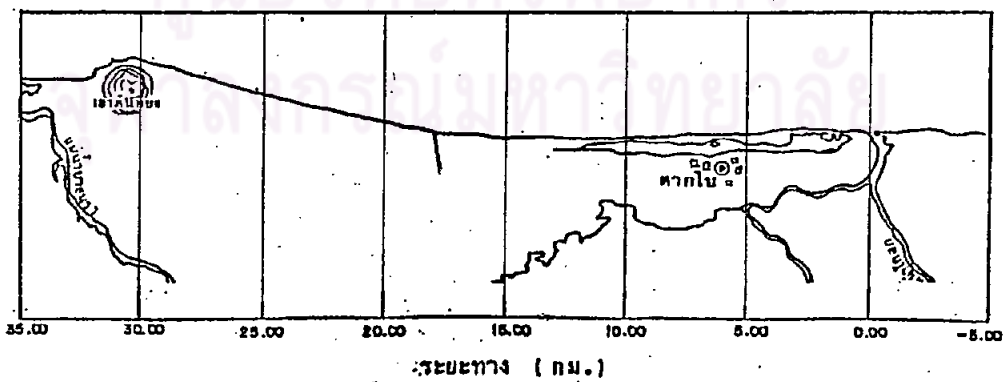
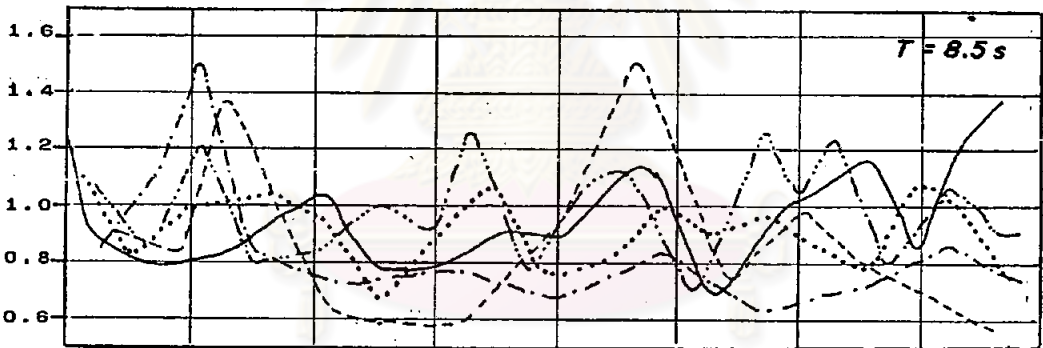
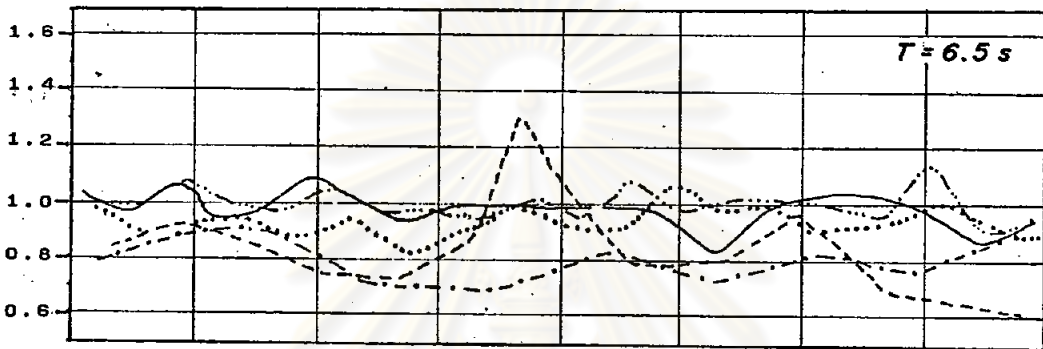
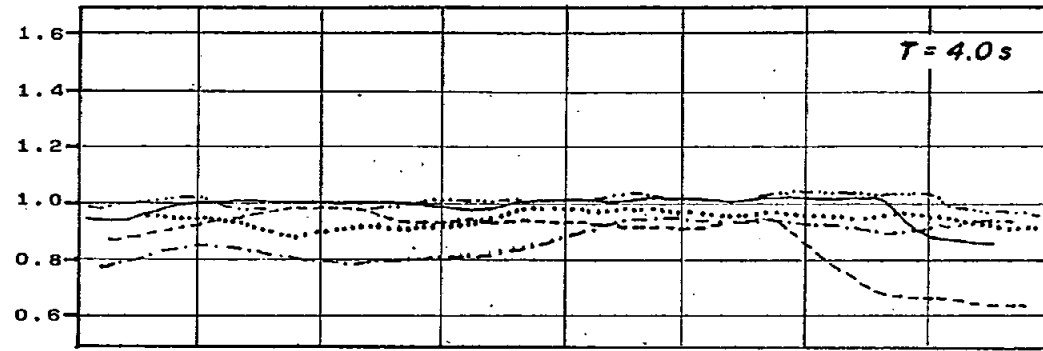
STATION	4.0s	STATION	6.5s	STATION	8.5s
-4.25	0.93	-5.00	0.93	-7.50	1.24
-1.00	0.95	-2.50	0.86	-6.00	0.95
0.00	1.01	-0.25	1.13	-3.75	0.93
2.00	1.00	1.50	0.93	-1.60	1.12
4.00	1.01	3.50	0.98	0.70	0.80
6.00	1.01	5.75	1.01	3.15	1.29
8.00	1.00	7.75	1.00	4.65	1.08
10.25	1.00	10.00	0.95	6.15	1.29
12.25	1.01	12.00	1.08	8.85	0.70
14.00	1.00	13.85	0.93	11.75	1.15
16.00	1.00	16.00	1.01	13.25	1.12
18.00	1.00	19.25	0.93	15.75	0.78
20.00	1.00	20.50	0.95	18.15	1.29
22.25	0.98	22.50	0.95	19.85	0.93
24.25	0.98	24.25	1.05	22.00	1.03
26.50	0.98	26.25	0.95	24.35	0.86
28.50	0.98	28.50	0.98	27.25	0.80
30.50	1.03	30.35	1.08	29.40	1.24
33.25	1.00	32.40	0.98	31.50	0.84
34.50	0.98	34.50	1.00	34.00	1.08

REFRACTION COEFFICIENT

WAVE DIRECTION : N

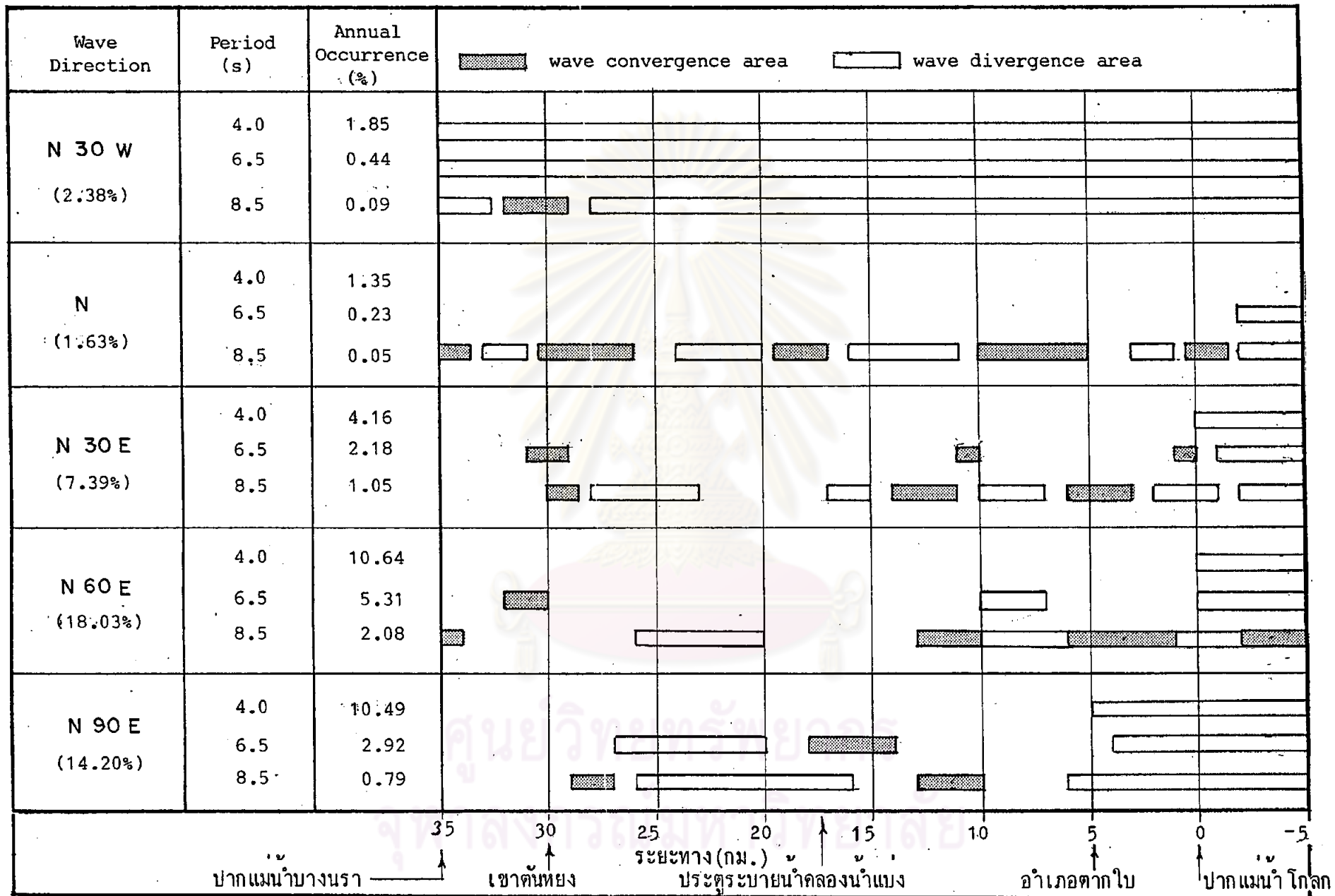
STATION	4.0s	STATION	6.5s	STATION	8.5s
-5.75	0.94	-6.00	0.87	-4.25	0.77
-3.40	0.94	-3.75	0.85	-1.75	1.05
-1.25	0.96	-0.60	0.99	-0.25	1.11
0.75	0.99	0.25	0.93	1.75	0.80
2.75	0.96	2.40	0.89	4.00	0.89
4.75	0.97	4.50	0.88	6.00	0.99
6.60	0.99	6.25	0.97	8.10	0.91
8.50	0.96	8.25	0.94	10.10	1.01
10.60	0.99	10.25	1.05	12.25	0.83
12.60	0.99	12.10	0.89	15.10	0.76
14.50	0.99	14.50	0.89	17.40	1.09
16.50	0.99	16.75	0.97	19.00	0.96
18.75	0.94	18.80	0.89	21.90	0.68
21.10	0.92	21.25	0.80	24.25	0.96
23.40	0.93	23.50	0.93	26.60	1.05
25.75	0.89	25.75	0.85	28.25	1.02
28.25	0.93	28.00	0.93	30.00	1.00
30.40	0.96	30.25	0.92	32.30	0.82
32.10	0.96	32.25	0.88	34.30	1.11
34.00	0.95	34.10	0.99		
36.00	0.93				

ค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น (Kr)



สัญลักษณ์ N 90E ----- N 60E ----- N 30E -----
 N N 30W -----

รูป 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่นในทิศทางและคาบเวลาต่าง ๆ



รูป 4-8 ลักษณะการกระจายและลูเข้าหากันของคลื่น ตามแนวชายฝั่งเนื่องจากคลื่นในทิศทางและคาบเวลาต่าง ๆ