

รายงานการวิจัย
(Final Report)



เรื่อง

การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในคลองอุตะเภาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(Mathematical Model of Salinity Intrusion in U-Taphao River)

โดย

นายสมบุรณ์ พรทิเนตพงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มิถุนายน 2541

Order Key	๒๒๘๙๒
BIB Key	16495๗

๓๒๐

เลขหมู่	TD42๗.524 4๓
เลขทะเบียน	๓๐๒๑ ๓๑
	25/ส.ค. 254๑

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอข้อมูลปฐมภูมิ ทดสอบ และการพยากรณ์ทางอุทกศาสตร์และการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสำรวจภาคสนามในฤดูแล้งระหว่างเดือนเมษายน-สิงหาคม 2540 มีจุดประสงค์ที่สำคัญสองประการคือ เพื่อให้ทราบถึงสภาพทางอุทกศาสตร์และความเค็มปัจจุบันของคลองอู่ตะเภา และเพื่อใช้ในการปรับและเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลที่ทำการสำรวจได้แก่ ความลึกของทะเลสาบสงขลา ความลึกของหน้าตัดคลองอู่ตะเภา ระดับน้ำในทะเลสาบสงขลาและในคลองอู่ตะเภา การรุกของน้ำเค็มรายเดือน ในฤดูแล้ง ในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา การเปลี่ยนแปลงความเค็มและความเร็วกระแสน้ำกับเวลา และการสังเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลที่ X90 ในฤดูแล้ง เป็นต้น การสำรวจชี้ว่าในฤดูแล้งความเค็มในทะเลสาบมีค่าอยู่ระหว่าง 15-30 ppt ที่อัตราการไหลเฉลี่ยประมาณ 2-3 ลบ.ม ต่อวินาที ความเค็มสูงสุดวัดได้ที่ปากคลองเท่ากับ 18 ppt ในเดือนสิงหาคม 2540 และน้ำเค็มรุกเข้าในคลองอู่ตะเภาเป็นระยะทาง 12 กม (บ้านนารังนก) โดยมีความเค็มที่ผิวและท้องคลองเท่ากับ 0.8 และ 15.3 ppt ตามลำดับ ซึ่งแสดงการผสมผสานเป็นแบบ partially mixed จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นน้ำจืดอย่างฉับพลัน นอกจากนี้การสำรวจยังพบว่า การตื้นเขินอย่างฉับพลันที่บ้านนารัง (กม +15) อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้หยุดการรุกของน้ำเค็ม

การศึกษาการรุกของน้ำเค็มด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ความเค็มในคลองอู่ตะเภามีความซับซ้อนและไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มในทะเลสาบสงขลาและอัตราการไหลของน้ำท่า จากการศึกษา Sensitivity พบว่า Horizontal diffusion มีค่าเท่ากับ $0.006 \text{ m}^2/\text{วินาที}$ ซึ่งค่อนข้างต่ำ อันแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการพัดพาเป็นขบวนการสำคัญในการรุกของน้ำเค็ม และการแยกชั้นของความเค็มสามารถแสดงได้จากเทอม Vertical diffusion ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยมาก ($0.0003 \text{ m}^2/\text{วินาที}$) อย่างไรก็ตามแบบจำลองยังไม่สามารถอธิบายความแตกต่างของความเค็มอย่างฉับพลันระหว่างผิวและท้องคลองได้ การผสมผสานเกิดจากความสมดุลระหว่างการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวตั้ง ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงความลึกอย่างฉับพลันบริเวณบ้านนารังนก (กม +11) ผลการคำนวณชี้ว่า ในฤดูแล้งถ้าอัตราการไหลในฤดูแล้งมีค่าประมาณ 1 ลบ.ม ต่อวินาที และไหลต่อเนื่องเป็นเวลา 24 วัน ความเค็ม 2 ppt อาจรุกถึงอำเภอหาดใหญ่ได้ และที่อัตราการไหล 10 ลบ.ม ต่อวินาที จะทำให้คลองอู่ตะเภาเป็นน้ำจืดตลอดสาย นอกจากนี้ยังพบว่าการขุดลอกลำน้ำทำให้ความเค็มในคลองอู่ตะเภาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ถ้ามีการตื้นเขินจะลดการรุกของน้ำเค็มได้อย่างมาก

สารบัญ

ลำดับที่	หัวข้อ	หน้า
	บทคัดย่อ	4
1	ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	5
2	วัตถุประสงค์	5
3	วิธีการศึกษา	5
4	ทบทวนเอกสาร	6
5	ข้อมูลทฤษฎีภูมิสภาพอุทกศาสตร์และความเค็ม	8
	5.1. การสำรวจความลึก	9
	5.2. ระดับน้ำ	9
	5.3. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลที่ X90 ในฤดูแล้ง	10
	5.4. ความเร็วกระแสน้ำ	10
	5.5. ความเค็ม	11
6	ทฤษฎีและสมมติฐานการเคลื่อนที่ของความเค็ม	12
7	แบบจำลองคณิตศาสตร์	15
	7.1. สมการอุทกศาสตร์แบบ 3 มิติ	15
	7.2. สมการการเคลื่อนที่ของความเค็มแบบ 3 มิติ	17
	7.3. การหาคำตอบเชิงตัวเลขของแบบจำลองคณิตศาสตร์	17
8	การประยุกต์แบบจำลองกับระบบทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา	18
	8.1. ขอบเขตของแบบจำลองฯ	18
	8.2. การทดสอบแบบจำลองฯ	19
9	การพยากรณ์การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา	21
	9.1. อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงน้ำท่า	21
	9.2. อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความลึก	21
	9.3. กลไกการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา	22
10	สรุปผลการศึกษา	22
11	ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อเนื่อง	24
	เอกสารอ้างอิง	25
	ภาคผนวก ก-ฉ	27

การศึกษาการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model of Salinity Intrusion in U-Taphao River)

1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ลำน้ำคลองอู่ตะเภาเป็นลำน้ำสายหลัก ไหลผ่านชุมชนต่าง ๆ ของอำเภอสะเตาะ อำเภอหาดใหญ่ และไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลาที่บ้านแหลมโพธิ์ ลำน้ำ มีความยาวประมาณ 51 กม. ในปี 2531 เกิดการรุกของน้ำเค็มถึงตัวเมืองหาดใหญ่ จนก่อให้เกิดปัญหาขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรง (เสรี, 2533) แม้ว่าปัญหาการรุกตัวของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาจะเป็นที่สนใจของประชาชนและผู้เกี่ยวข้องโดยทั่วไป แต่การศึกษาในรายละเอียดที่แสดงถึงปัจจัยที่อาจส่งเสริมหรือบรรเทาการรุกตัวของน้ำเค็มในแม่น้ำนี้ไม่ได้มีการศึกษาอย่างเป็นระบบและจริงจัง ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการรุกตัวของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา นอกเหนือไปจากสภาพเงื่อนไขทางชลศาสตร์และความเค็มในทะเลสาบสงขลาซึ่งเป็นผลมาจากน้ำเค็มในอ่าวไทยแล้ว การขุดลอกและการเปลี่ยนแปลงลำน้ำจากการกระทำของมนุษย์ ก็เป็นสาเหตุสำคัญของการรุกตัวของน้ำเค็มเช่นกัน ความเข้าใจพฤติกรรมทางธรรมชาติของ Estuary นี้จะยังประโยชน์ต่อการป้องกันการรุกตัวของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา เพื่อรับรองการพัฒนาชุมชนเมืองหาดใหญ่ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาคุณสมบัติทางอุทกศาสตร์และความเค็มของคลองอู่ตะเภา
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการรุกตัวของน้ำเค็มกับอัตราการไหลของน้ำจืดที่สภาพทางอุทกวิทยาต่าง ๆ กัน
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการรุกตัวของน้ำเค็มกับการเปลี่ยนแปลงความลึกของลำน้ำ

3. วิธีการศึกษา

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1. การวัดข้อมูลในสนาม มีจุดมุ่งหมาย 2 ประการคือ เพื่อความเข้าใจธรรมชาติของคลองอู่ตะเภาต่อการรุกของน้ำเค็ม และเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและปรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- ระดับน้ำขึ้นน้ำลง (tide) ที่บ้านแหลมโพธิ์และปากอ่าว แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 3 เดือน เพื่อ

ใช้ในการปรับแบบจำลองฯ

- อัตราการไหลที่สถานีบ้านบางศาลา (X90) เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำทำในฤดูแล้งแก่แบบจำลองฯ
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเค็มและความเร็วกระแสน้ำรายชั่วโมงต่อเนื่องกัน 6-24 ชั่วโมงในคลองอู่ตะเภาจำนวน 2 สถานีในฤดูแล้ง

3.2. การพัฒนาและประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์ทางอุทกศาสตร์และการเคลื่อนที่ของน้ำเค็ม (Hydrodynamic and Salt Transport Model) ซึ่งเริ่มพัฒนาโดย Swanson (1986) มีขั้นตอนดังนี้

- ประยุกต์แบบจำลองฯแบบ 2 มิติ กับทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา
- ศึกษาการไหลเวียนของน้ำ (Circulation) ในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา
- ศึกษาการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาแบบ 2 มิติ
- ประยุกต์แบบจำลองฯแบบ 3 มิติ กับทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา
- ศึกษาผลกระทบต่อคุณภาพการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาแบบ 3 มิติ
- พยากรณ์สภาพทางชลศาสตร์และการรุกตัวของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาตามเงื่อนไขทางอุทกศาสตร์และอุทกวิทยาต่างๆ โดยแสดงผลในรูปของแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล-ความเค็ม

3.3. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

4. ทบทวนเอกสาร

4.1 คุณลักษณะของกลุ่มน้ำคลองอุตะเถา

กลุ่มน้ำคลองอุตะเถา (U-Taphao River Basin) ครอบคลุมพื้นที่ 2,305 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ในกลุ่มน้ำเค็มสาบสงขลา (Songkhla Lake Basin) (ภาคผนวก ก) มีลักษณะของภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสูงทางทิศตะวันตก ส่วนพื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบตะกอนแม่น้ำ (Aluvium Deposit) มีการปลูกยางพาราขึ้นแทนพืชพรรณธรรมชาติ คลองอุตะเถาซึ่งเป็นลำน้ำสำคัญที่สุดในกลุ่มน้ำ มีต้นกำเนิดจากเทือกเขาสันกาลาคีรี เขตอำเภอสะเดา และไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลาทางทิศเหนือ ระหว่าง อ. สะเดา-อ. หาดใหญ่ ลำน้ำมีความลาดชันมาก และค่อยๆ ลาดลงระหว่าง อ. หาดใหญ่ (กม. +23) ถึงทะเลสาบ (กม. +0) ช่วงนี้ของลำน้ำนับเป็นเขตอิทธิพลของทะเล (Estuary) โดยระดับน้ำต่ำสุดที่สถานีอุทกวิทยา (X44) อำเภอหาดใหญ่มีค่าต่ำกว่าระดับน้ำเค็มปานกลาง (MSL) อยู่ 0.10 เมตร (AIT, 2537)

สถานที่ตั้งและรายละเอียดของสถานีอุทกวิทยาในลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยพื้นที่รับน้ำที่สถานี X44 (อ. หาดใหญ่) มีขนาดประมาณ 1,740 ตารางกิโลเมตร ให้ปริมาณน้ำเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 791.94 ล้าน ลบ.ม (mcm) (ข้อมูลปี 1967-1986) การไหลของน้ำในคลองอู่ตะเภา มีความผันแปรอย่างมาก (ภาคผนวก ก) โดยอัตราการไหลเฉลี่ยในฤดูแล้ง (เมษายน-กันยายน) มีค่าประมาณ 7.8 ลบ.เมตรต่อวินาที และในช่วงฤดูฝน (พฤศจิกายน-ธันวาคม) มีค่าประมาณ 88.6 ลบ.เมตรต่อวินาที (วินัยและสมบูรณ์ 2538)

ภูมิอากาศในลุ่มน้ำเป็นแบบร้อนชื้น ระหว่างเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และเดือนพฤศจิกายน-มกราคม เป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งทำให้เกิดฝนตกหนัก ปริมาณฝนตกเฉลี่ย 1800 มม.ต่อปี มีฤดูแล้งอยู่ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์-สิงหาคม อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีมีค่า 26.9°C และอัตราการระเหยรายเดือนเฉลี่ยเท่ากับ 139 มม. (ณ ศูนย์วิจัยการยาง ตำบลคองส์ อำเภอหาดใหญ่)

4.2. คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของคลองอู่ตะเภา

สถาบัน AIT ร่วมกับกรมชลประทาน เมื่อปี 2537 ทำการสำรวจรูปตัดคลองอู่ตะเภา และทำระดับมาตรฐานเทียบกับระดับน้ำเค็มปานกลาง (MSL) ตลอดความยาวลำน้ำ ตั้งแต่อำเภอสะเตาะถึงทะเลสาบสงขลาพบว่า ความกว้างของคลองอู่ตะเภาเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 40-80 เมตร และความลึกของลำน้ำอยู่ระหว่าง 3-8 เมตร โดยมีความยาวตามแนวลำน้ำช่วงบ้านบางศาลา-อำเภอหาดใหญ่เท่ากับ 12 กม และช่วงหาดใหญ่-ทะเลสาบสงขลา 23 กม

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลของน้ำท่า (Stage-Discharge) ในคลองอู่ตะเภาที่สถานี X44 และ X90 ซึ่งวิเคราะห์โดย AIT (2537) แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลของน้ำท่าในคลองอู่ตะเภา

สถานี	ตำแหน่ง	สูตร	เงื่อนไข
X44	อ. หาดใหญ่)	$Q_{x44} = 26.77(H + 0.33)^{1.32}$	$-0.33 < H < 4.23$
		$Q_{x44} = 35.58(H - 0.31)^{1.31}$	$H > 4.23$
X90	บ.บางศาลา	$Q_{x90} = 0.66(H - 0.09)^{3.29}$	$0.09 < H < 1.90$
		$Q_{x90} = 1.69(H + 0.09)^{2.11}$	$1.90 < H < 8.00$

เมื่อ Q_{x44}, Q_{x90} คืออัตราการไหล (ลบ.ม/วินาที)
 H คือระดับน้ำ (ม MSL)

อย่างไรก็ตามพบว่าความสัมพันธ์ข้างต้นยังให้ค่าที่ไม่ละเอียดเพียงพอสำหรับการไหลน้อยๆในฤดูแล้ง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการรุกของน้ำเค็ม

สภาพอุทกศาสตร์ของคลองอู่ตะเภาในช่วงปากแม่น้ำ (Estuary) ได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงในอ่าวไทยซึ่งมีค่าพิสัยประมาณ 40 ซม และ 60 ซม ในช่วงน้ำตายและน้ำเกิดตามลำดับ จากการวิเคราะห์ระดับน้ำขึ้นน้ำลงที่เกาะหนู (ภาคผนวก ข) ซึ่งพยากรณ์โดยกรมอุทกศาสตร์ทหารเรือระหว่างเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2540 โดยวิธี Harmonic analysis พบว่ามี 5 องค์ประกอบหลักของน้ำขึ้นน้ำลง (Predominant tidal constituents) คือ M2 (H=19.4 cm) S2 (H=6.4 cm) N2 (H=5.3 cm) K1 (H=5.6 cm) และ O1 (H=4.3 cm) คลื่นน้ำขึ้นน้ำลงในอ่าวไทยเคลื่อนเข้าสู่ระบบทะเลสาบสงขลา สภาพภูมิประเทศของทะเลสาบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ (amplitude และ phase) จากรายงานการวัดระดับน้ำจำนวน 3 สถานีในเดือน มีนาคม-สิงหาคม 2538 โดยวินัยและสมบูรณ์ (2538) ที่บ้านเกาะนก (กม+2 จากปากคลองอู่ตะเภา) บ้านหาร (กม+15) และอำเภอหาดใหญ่ (กม+23) พบว่ามีค่าพิสัย (Tidal range) ประมาณ 8 ซม 15 ซม และ 11 ซม ตามลำดับ

วินัยและสมบูรณ์ (2538) วัดกระแสน้ำในรอบ 24 ชั่วโมง (Tidal cycle) ที่ทุกๆความลึก 1 ม ที่บ้านเกาะนก เมื่อวันที่ 21-22 เมษายน 2538 พบว่ากระแสน้ำขึ้นและน้ำลงมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.18 ม ต่อวินาที และ 0.15 ม ต่อวินาที (ภาคผนวก ข)

4.3. การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา

ณรงค์ (2535) รายงานว่า ในเดือนพฤษภาคม 2534 น้ำเค็มรุกเข้าในคลองอู่ตะเภาไปไกลถึง 15 กม. โดยมีการผสมผสานของความเค็มเป็นแบบ partially mixed โดยความเค็มสูงสุดที่ปากคลองอู่ตะเภา มีค่า 18 ppt และที่ กม+11 มีค่า 12 ppt วินัยและสมบูรณ์ (2538) วัดความเค็มในวันที่ 9 พฤษภาคม 2538 พบว่าความเค็มที่ปากคลองอู่ตะเภา มีค่า 22 ppt และรุกเข้าไปเป็น ระยะทาง 11 กม (โดยความเค็มที่ห้องคลองเท่ากับ 10 ppt)

5. ข้อมูลทุติยภูมิของสภาพอุทกศาสตร์และความเค็มในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา

การสำรวจภาคสนามของงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่สำคัญสามประการคือ

- เพื่อให้ทราบถึงสภาพปัจจุบันทางสมุทรศาสตร์และความเค็มของทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา
- เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานแก่แบบจำลองคณิตศาสตร์

- เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและปรับตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามระหว่างเดือน เมษายน-ตุลาคม 2540 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี

5.1. การสำรวจความลึก

เนื่องจากความลึกมีผลกระทบโดยตรงต่อสภาพชลศาสตร์และการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา ดังนั้นเพื่อความละเอียดและถูกต้องในการศึกษาและพยากรณ์ สภาพชลศาสตร์และการรุกของน้ำเค็มด้วยแบบจำลองฯ จึงทำการสำรวจความลึกของทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภาอย่างละเอียดด้วยเครื่องหยั่งความลึกแบบคลื่นเสียงซึ่งมีความละเอียด ± 5 ซม. โดยทำการสำรวจความลึกของทะเลสาบสงขลา ตั้งแต่ทางเข้าทะเลสาบ-เกาะยอ-แหลมโพธิ์-ป่ากรอ (ภาคผนวก ก) และวัดของความลึกของหน้าตัดลำน้ำคลองอู่ตะเภาตั้งแต่บ้านเกาะนก (กม+2) ถึง บ้านบางสาลา (กม+35) จำนวนทั้งสิ้น 17 หน้าตัด และพบว่าความลึกมากที่สุดอยู่ที่ กม+11 ภาคผนวก ค แสดงความลึกตามแนวร่องน้ำของลำน้ำนี้

5.2. ระดับน้ำ

การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภาได้รับการบันทึกไว้ โดยในทะเลสาบสงขลาทำการสำรวจจำนวน 2 สถานี คือที่บ้านแหลมโพธิ์ และที่บ้านป่ากรอ โดยคณะวิจัยได้ติดตั้งเครื่องวัดระดับน้ำอัตโนมัติขึ้นชั่วคราวที่ช่องแคบป่ากรอ ระหว่างเดือนพฤษภาคม-กรกฎาคม 2540 สำหรับระดับน้ำที่บ้านแหลมโพธิ์ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากศูนย์อุทกวิทยาที่ 8 กรมชลประทาน ซึ่งเป็น ระดับน้ำแบบต่อเนื่องจากเครื่องวัดระดับน้ำอัตโนมัติที่ทำการติดตั้งอย่างถาวร ระดับน้ำของสถานีทั้งสอง ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง และความสัมพันธ์ของระดับน้ำในทะเลสาบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2

เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในคลองอู่ตะเภา คณะวิจัยได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดระดับน้ำอัตโนมัติ ที่สถานี X90 (บ้านบางสาลา) ซึ่งห่างจากปากแม่น้ำเป็นระยะทางประมาณ 35 กม เพื่อวัดอัตราการไหลตลอดช่วงที่ทำการศึกษา ภาคผนวก ง แสดงอัตราการไหลระหว่างเดือนเมษายน-สิงหาคม 2540

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำขึ้นน้ำลง (มิถุนายน 2540) ในระบบทะเลสาบสงขลา

	เกาะหนู	แหลมโพธิ์	ป่ากรอ
Max. tidal range (cm)	60	21	11
Phase lag** (hrs)	0	3.5	4.5

** ความแตกต่างระหว่างน้ำขึ้นสูงสุดที่เกาะหนูกับสถานีที่สนใจ

5.3. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลที่ X90 ในฤดูแล้ง

อัตราการไหลของน้ำทำในฤดูแล้งมีความสำคัญอย่างมากต่อการรุกของน้ำเค็ม การวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหล (Rating Curve) ที่สถานี X90 สำหรับฤดูแล้งอย่างละเอียด โดยทำการวัดความเร็วน้ำตลอดความกว้างของคลองจำนวน 8 ครั้ง ที่ทุกๆความลึก 0.5 ม ทุกระยะ 1 ม. เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลและรูปแบบการกระจายความเร็วตลอดหน้าตัด (ภาคผนวก จ) ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้คือ

$$Q = 0.0949e^{2.513911h} \quad R^2=0.9354$$

$$Q = 0.5243e^{2.51399h} \quad R^2=0.9354$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหล (ลบ.ม/วินาที)

h คือระดับน้ำ (ม A.D.)

H คือระดับน้ำ (ม MSL)

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้กับที่ไออยู่ (AIT, 2537) พบว่าที่ระดับน้ำระหว่าง 1.0-1.7 ม MSL อัตราการไหลที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1-6.4 ลบ.ม/วินาที ซึ่งเฉลี่ยต่ำกว่าที่คำนวณจากสูตรของ AIT อยู่ประมาณ 2.2 เท่า

5.4. ความเร็วกระแสน้ำ

คณะวิจัยได้ทำการวัดความเร็วกระแสน้ำทั้งในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา โดยในทะเลสาบสงขลา ทำการวัดความเร็วที่ความลึก 2 ม จำนวน 2 สถานีคือที่ ร่องน้ำเกาะขอท่างทิศเหนือและใต้ โดยใช้เครื่องวัดความเร็วกระแสน้ำแบบอัลตราโซนิก ทำการบันทึกข้อมูลราย 20 นาทีระหว่างวันที่ 27 มิถุนายน-1 กรกฎาคม 2540 รูปภาคผนวก ฉ แสดงความเร็วกระแสน้ำของทั้ง 2 สถานี และสรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณลักษณะของความเร็วกระแสน้ำในทะเลสาบสงขลา

	เกาะขอท่างเหนือ		เกาะขอท่างใต้	
	V (m/s)	Direction (°)	V (m/s)	Direction (°)
Max. flood current	0.42	260	0.42	55
Max. ebb current	0.67	80	0.43	240

สำหรับในคลองอู่ตะเภาทำการสำรวจความเร็วกระแสน้ำ 3 ครั้ง โดยครั้งแรกในวันที่ 11 พฤษภาคม 2540 วัดความเร็วรายชั่วโมงที่ทุกๆความลึก 1 ม ต่อเนื่องกัน 5 ชั่วโมง ณ สองสถานีคือที่

บ้านคูเต่า (กม+6) และบ้านนารังนก (กม+11) ครั้งที่สองในวันที่ 31 พฤษภาคม 2540 ทำการวัดความเร็วรายชั่วโมงที่ทุกๆความลึก 1 ม ต่อเนื่องกัน 9 ชั่วโมง ที่บ้านนารังนก และครั้งที่สามในวันที่ 17-18 สิงหาคม 2540 วัดครบรอบ 24 ชั่วโมงที่บ้านนารังนก คุณลักษณะของความเร็วกระแสน้ำของทั้ง 2 สถานีถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ฉ และสรุปไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกระแสน้ำและระดับน้ำในคลองอู่ตะเภา

	เกาะนก (กม 2)		คูเต่า (กม 6)		นารังนก (กม 11)	
	V_{max} (m/s)	ϕ (hrs)	V_{max} (m/s)	ϕ (hrs)	V_{max} (m/s)	ϕ (hrs)
Max. current	0.18	0 *	0.10	--	0.21	2.5

ϕ = phase lag ระหว่าง V_{max} และ maximum high tide

* = ข้อมูลวันที่ 21-22 เมษายน 2538

5.5. ความเค็ม

เพื่อความเข้าใจธรรมชาติของการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาในสภาวะปัจจุบัน และเพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ การสำรวจความเค็มระหว่างเดือนเมษายน-ตุลาคม 2540 ได้ถูกกระทำขึ้นใน 4 ลักษณะ (ภาคผนวก ช) คือ

- การวัดความเค็มในทะเลสาบสงขลารายเดือน (Horizontal distribution) ระหว่างเดือนเมษายน-ตุลาคม 2540 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเค็มในฤดูแล้ง ที่เป็นสาเหตุของการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา ผลการสำรวจชี้ว่า ความเค็มที่กึ่งกลางทะเลสาบสงขลามีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 15-29 ppt โดยการผสมผสานของความเค็มเป็นแบบ Completely mixed ยกเว้นในบริเวณที่มีความลึกมากกว่า 2.5 ม จะเป็นแบบ Partially mixed
- การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา (Longitudinal dispersion) ถูกสำรวจในเดือน เมษายน-สิงหาคม 2540 ซึ่งมีอัตราการไหลเฉลี่ยประมาณ 2-3 ลบ.ม/วินาที การสำรวจชี้ว่า น้ำเค็มสามารถรุกเข้าไปถึงบ้านนารังนก (กม+11) โดยที่มีค่าความเค็มสูงสุดอยู่ที่ห้องคลองเท่ากับ 15.3 ppt และความเค็มลดลงอย่างฉับพลัน จนเป็นน้ำจืดที่บ้านหาร (กม+15) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 5
- การผันแปรของความเค็มกับเวลา (Time-series Distribution) ในคลองอู่ตะเภา อันเนื่องมาจากอิทธิพลของน้ำท่าและกระแสน้ำขึ้นน้ำลง ได้รับการตรวจวัดที่บ้านนารังนก โดยทำการวัดความเค็มรายชั่วโมงที่ทุกๆความลึก 1 ม ในวันที่ 17-18 สิงหาคม 2540 ดังแสดงในภาคผนวก ช ผลการวัดชี้ว่าที่กึ่งกลางความลึก (~3 ม) น้ำขึ้นน้ำลงมีอิทธิพลอย่างมากต่อการ

เปลี่ยนแปลงของความเค็ม โดยผลต่างของความเค็มในรอบ 24 ชั่วโมง (Tidal cycle) มีค่าประมาณ 6 ppt

- การผสมผสานของความเค็มในแนวตั้ง (Vertical Distribution) อิทธิพลจากผลต่างของความหนาแน่นของมวลน้ำที่เกิดจากความแตกต่างของความเค็ม ได้รับการวัดพร้อมกับการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำเค็มกับเวลา ซึ่งจะเห็นการแยกชั้น (Stratification) ของความเค็มอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะที่บ้านนารังนก โดยมีความแตกต่างของความเค็มที่ผิวและที่ท้องน้ำถึง 14.5 ppt

ตารางที่ 5 การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา

วันที่	บ.เกาะนก (กม 2)		บ.คูเต่า (กม 6)		บ.นารังนก (กม 11)		บ.นาร (กม 15)	
	12 เม.ย. 40	3.0	5.0	1.0	1.5	-	-	0
4 พ.ค. 40	11.5	17.0	3.5	16.0	0.7	11.6	0	0
3 มิ.ย. 40	1.2	2.0	0.2	0.3	0	0	0	0
17 ส.ค. 40	3.5	16	2.0	15.9	0.8	15.3	0	0

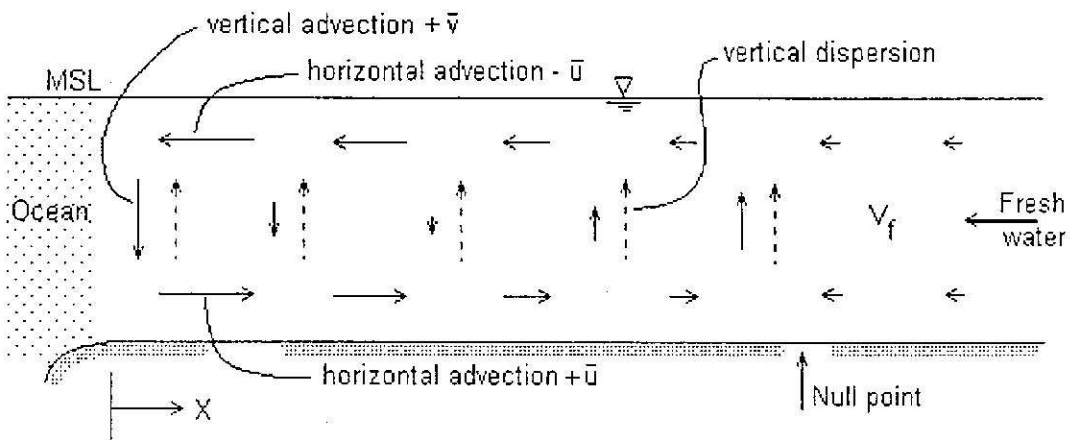
6. ทฤษฎีและสมมติฐานการเคลื่อนที่ของความเค็ม

การผสมผสานระหว่างน้ำเค็มและน้ำจืด อันเนื่องมาจากการรุกของน้ำเค็มในลำน้ำธรรมชาติสามารถจำแนกได้เป็น 3 กรณี คือ

- การผสมผสานเป็นแบบ Completely mixed ในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่ออิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงมีค่ามากเมื่อเทียบกับน้ำท่า ซึ่งพบเห็นได้ทั่วไปในฤดูแล้งสำหรับแม่น้ำที่ไหลลงสู่ทะเลโดยตรง
- การผสมผสานเป็นแบบ Partially mixed ในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่ออิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงอ่อนกว่าน้ำท่า หรือในกรณีที่เป็นฤดูฝนซึ่งการไหลของน้ำจืดมีมาก
- การผสมผสานเป็นแบบ Wedge flow ในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่ออิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำท่า สามารถพบเห็นได้ในเขตที่เรียกว่า Fjord เมื่อปริมาณน้ำจืดจำนวนมากไหลลงสู่ทะเล

ขบวนการผสมผสานระหว่างน้ำจืดกับน้ำเค็มในลำน้ำธรรมชาติ (Ippen and Harleman, 1961) แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยตั้งแต่บริเวณปากแม่น้ำถึงกึ่งกลางโซนของการรุกของน้ำเค็ม (Intrusion zone) จะมีความเร็วทิศทางลงในแนวตั้ง ขณะที่อีกกึ่งหนึ่งถึงต้นน้ำ จะมีความเร็วทิศทางขึ้นในแนวตั้ง ทำให้

เกิดการเคลื่อนที่สุทธิของความเค็มในแนวตั้งจากท้องน้ำสู่ผิวน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นทั้งกรณีของ completely mixed และ partially mixed



รูปที่ 1 แสดงขบวนการผสมผสานในแนวตั้งและการรุกของน้ำเค็ม

สมการอธิบายการเคลื่อนที่ของความเค็ม

ในกรณีของการผสมผสานเป็นแบบ Completely mixed ในลำน้ำที่แคบและยาว สามารถประมาณการรุกของความเค็มได้จากสูตรอย่างง่าย คือ

$$S/S_0 = e^{-UrX/Dt}$$

เมื่อ	Ur	คือความเร็วเฉลี่ยการไหลของน้ำท่า
	X	คือระยะทางจากปากแม่น้ำ
	Dt	คือ Dispersion coefficient
	S_0	คือความเค็มที่ปากแม่น้ำ

สำหรับกรณีที่การผสมผสานเป็นแบบ Weakly partially mixed สามารถประมาณการรุกของความเค็มได้จากสูตรที่เสนอโดย Ippen and Harleman (1961) ดังนี้

$$S/S_0 = \exp(AQ_f X^n + CQ_f^{0.5})$$

เมื่อ	Q_f	คืออัตราการไหลของน้ำท่า (ลบ.ม/วินาที)
	X	คือระยะทางจากปากแม่น้ำ (กม)
	A, C, n	คือ ค่าคงที่ของลำน้ำนั้น
	S_0	คือความเค็ม ณ จุดที่มีค่าคงที่

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมติฐานอย่างง่ายและมีข้อจำกัดหลายประการ ขณะที่ในธรรมชาติจะมีความซับซ้อนของภูมิประเทศ และความลึกของร่องน้ำที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การไหลในธรรมชาติมีความซับซ้อนมาก ไม่อาจอธิบายได้ด้วยสมมติฐานอย่างง่ายข้างต้น ดังนั้นการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ (2D mathematical model) ซึ่งมีสมมติฐานการไหลเป็นแบบ Vertically Averaged จึงเป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ การศึกษาด้านนี้ได้รับการพัฒนาจนให้ผลการคำนวณแม่นยำและรวดเร็ว การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ จึงได้รับความนิยมน้อยมาก ผู้ที่เชี่ยวชาญในด้านนี้และได้พัฒนาโปรแกรมประเภทนี้จนเป็นที่ยอมรับและใช้กัน แพร่หลายในสหรัฐอเมริกาได้แก่ Swanson (1986), Sheng, et al. (1989)

สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของความเค็ม คือสมการของการพาและการแพร่ของสาร (Convective-Diffusion Equation) ดังนี้

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} - w\frac{\partial c}{\partial z} = D_x\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z\frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

เมื่อ	c	คือความเข้มข้นของความเค็ม
	u	คือความเร็วในแนวแกน x
	v	คือความเร็วในแนวแกน y
	w	คือความเร็วในแนวแกน z
	D_x	คือสัมประสิทธิ์การผสมผสานในแกน x
	D_y	คือสัมประสิทธิ์การผสมผสานในแกน y
	D_z	คือสัมประสิทธิ์การผสมผสานในแนว z

ค่าสัมประสิทธิ์การผสมผสานในแนวราบ (horizontal diffusion coefficient) ของ Estuary บางแห่งถูกแสดงไว้ในตารางภาคผนวก \mathcal{D}

การเคลื่อนที่ของความเค็มเข้าสู่ลำน้ำในธรรมชาติมีความซับซ้อน โดยมีขบวนการที่เกี่ยวข้องได้แก่

- การพัดพา (Convection) กระแสน้ำจะเป็นตัวพามวลน้ำให้เคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็ว ขบวนการนี้มีต้นกำเนิดที่สำคัญสองประการคือ จากน้ำขึ้นน้ำลง และจากน้ำท่า อิทธิพลของกระแสน้ำทั้งสองก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค็มไปตามเวลาที่แต่ละตำแหน่ง

- การแพร่ในแนวราบ (Horizontal diffusion) ความเค้นเฉือนในแนวราบ (Shear stress) ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนกันอย่างช้าๆของอนุภาคความเค็มกับอนุภาคน้ำ ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่สุทวิของ

ความเค็มในแนวราบ ความสามารถในการแพร่ก็ยังเป็นขบวนการที่ซับซ้อนและต้องการการศึกษาต่อไป

- การแพร่ในแนวดิ่ง (Vertical diffusion) ความปั่นป่วนในแนวดิ่ง (Entrainment) ที่เกิดจากการแยกตัวของการไหล (Stratification) ทำให้เกิดการถ่ายเทของความเค็มระหว่างด้านบนและด้านล่าง (รูปที่ 1) ในขบวนการผสมผสานแบบ Partially mixed ที่สภาวะสมดุลการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่าง Turbulence และ แรงโน้มถ่วงจะมีค่าคงที่ ขบวนการนี้นับเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำเค็ม

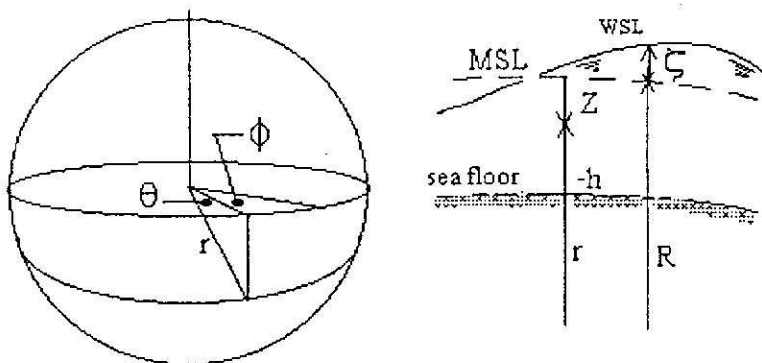
ในการศึกษาที่ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเค็มเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากคลองอยู่ตะกอนเป็นลำน้ำที่แคบ อิทธิพลของลมมีน้อย ยกเว้นที่บริเวณของปากแม่น้ำและในทะเลสาบ ดังนั้นการศึกษาก็จะจำกัดอยู่ที่อิทธิพลของน้ำท่าและน้ำขึ้นน้ำลงเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำ อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค็มได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อให้เข้าใจกลไกของการผสมผสานในแนวดิ่ง อันสันนิษฐานว่าจะเป็นสาเหตุหลักของการรุกของน้ำเค็ม

7. แบบจำลองคณิตศาสตร์

เพื่อสามารถอธิบายการผสมผสานของมวลสารในแนวดิ่ง แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติจึงถูกนำมาใช้ในที่นี้ ดังมีรายละเอียดของสมการต่อไปนี้

7.1. สมการอุทกศาสตร์แบบ 3 มิติ (3-D model of hydrodynamics)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นการพัฒนาต่อเนื่องจากแบบจำลอง 3 มิติทางอุทกศาสตร์ที่เริ่มพัฒนาโดย Spaulding (1984) และ Swanson (1986) ใช้เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของมวลน้ำ ภายใต้สมมุติฐานของสมการ shallow water wave สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ กฎทรงมวลของสารและโมเมนตัมในพิกัดทรงกลม (Spherical Coordinate (ϕ, θ, r)) (รูปที่ 2) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2 ระบบ Spherical Coordinate ที่ใช้ในสมการและแบบจำลองคณิตศาสตร์

กฎทรงมวลของสาร

$$\frac{1}{r \cos \theta} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{v \tan \theta}{r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัมในแนว ϕ

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \theta} u \frac{\partial u}{\partial \phi} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{uv \tan \theta}{r} + w \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{uw}{r} = - \frac{1}{\rho_o r \cos \theta} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \frac{3 \tau_{r\phi}}{\rho_o r} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial r} \quad (2)$$

เมื่อ $\tau_{r\phi}$ = shear stress in ϕ -direction

$$\tau_{r\phi} = \rho_o V_t \left(-\frac{u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r \cos \theta} \frac{\partial w}{\partial \phi} \right) \quad (3)$$

สมการโมเมนตัมในแนว θ

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \theta} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{uv \tan \theta}{r} + w \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{vw}{r} = \frac{1}{\rho_o r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{3 \tau_{r\theta}}{\rho_o r} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} \quad (4)$$

เมื่อ $\tau_{r\theta}$ = shear stress in θ -direction

$$\tau_{r\theta} = \rho_o V_t \left(-\frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

สมการโมเมนตัมในแนว r สามารถประมาณโดย Hydrostatic approximation และ Boussineq's assumption ดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho g \quad (6)$$

$$p = \rho_o g(z + \zeta) + \int \rho' g dr \quad (7)$$

$$\rho = \rho' + \rho_o \quad (8)$$

ตัวแปรในสมการข้างต้นมีความหมายดังต่อไปนี้

- u, v, w = interior velocities in ϕ -, θ -, and r - direction respectively
- p = pressure
- t = time
- g = gravitational acceleration
- ρ = seawater density
- ρ' = difference in seawater density
- ρ_o = average seawater density
- V_t = vertical eddy viscosity

7.2. สมการการเคลื่อนที่ของความเค็มแบบ 3 มิติ (3-D model of salt transport)

สมการการถ่ายเทความเค็มแบบ 3 มิติ ได้รับการพัฒนามาจากสมการ Convective-diffusion of mass ซึ่งในระบบ spherical coordinates แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \theta} u \frac{\partial s}{\partial \phi} + \frac{1}{r} v \frac{\partial s}{\partial \theta} + w \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{1}{r^2 \cos^2 \theta} \frac{\partial s}{\partial \phi} (D_\phi \frac{\partial s}{\partial \phi}) + \frac{1}{r^2 \cos \theta} \frac{\partial s}{\partial \theta} (D_\theta \frac{\partial s}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 D_r \frac{\partial s}{\partial r}) \quad (9)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของสาร D_z แปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์ความปั่นป่วน V_t

$$D_z = V_t \sigma_t$$

โดย σ_t คือ Prandtl's Number

ASCE (1988) รายงานความสัมพันธ์ระหว่าง V_t และ Ri (Richardson number) สำหรับกรณีที่มีการแยกตัวของชั้นการไหล

$$V_t = V_{t0} (1 + 10 Ri)^{-0.5}$$

$$D_t = D_{t0} (1 + 3.33 Ri)^{-1.5}$$

เมื่อ

$$Ri = \frac{g (\partial \rho / \partial z)}{\rho (\partial w / \partial z)^2}$$

สมการต่างๆข้างต้นได้รับการแปลงให้อยู่ในรูปของ curvilinear coordinates หรือ boundary-fitted coordinates ซึ่งมีข้อดีคือสามารถใช้ได้กับขอบเขตของภูมิประเทศที่ซับซ้อน และง่ายต่อการคำนวณเชิงตัวเลข สมการที่ได้รับการแปลงแล้วถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ๘ รายละเอียดในเรื่องนี้สามารถศึกษาได้จาก Spaulding (1984) และ Swanson (1986)

7.3. การหาคำตอบเชิงตัวเลขของแบบจำลองคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์ทางอุทกศาสตร์แบบ 3 มิติ จะได้รับการหาคำตอบเชิงตัวเลข โดยวิธีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

1. ในการวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิค Curvilinear coordinate (Spaulding, 1984; Swanson, 1986) มาใช้ในการแก้ปัญหาสภาพที่ซับซ้อนของภูมิประเทศในแบบจำลอง ซึ่งกระทำโดยการเปลี่ยนรูปของสมการควบคุมการไหลทางสมุทรศาสตร์จากรูปทรงตามธรรมชาติให้อยู่ในรูปของ rectangular computational grid ซึ่งสามารถทำการคำนวณได้สะดวก
2. แบบจำลองหาคำตอบของสมการควบคุมการไหลทางอุทกศาสตร์ (สมการคงมวลของน้ำ และสมการโมเมนตัม) โดยการประมาณค่าทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี staggered grid, finite difference approximation

3. เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการได้มาซึ่งคำตอบ การคำนวณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ external mode และ internal mode โดยใน external mode จะคำนวณค่าของ ระดับน้ำ (water surface elevation) ด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบ semi-implicit finite difference scheme จากสมการควบคุมการไหลทางสมุทรศาสตร์แบบ 2 มิติ จากนั้นค่าระดับน้ำจะถูกแทนในสมการโมเมนตัมเพื่อหาค่าความเร็วเฉลี่ย (depth-averaged velocity) การคำนวณใน mode นี้สมมติให้แรงเสียดทานที่ท้องแม่น้ำเป็นไปตามกฎกำลังสองของแรงเสียดทาน (Quadratic drag law) ในขณะที่ internal mode จะคำนวณค่าผลต่างของความเร็วที่ทุกๆความลึก (velocity deviations) จากสมการโมเมนตัมด้วยวิธี semi-implicit finite difference scheme ซึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ความปั่นป่วน (V_t) สามารถหาโดยการแก้สมการพลังงานจลน์ (k) และ Length scale (L) (One-equation model) (1962; ASCE, 1988; White, 1992) โดยวิธี semi-implicit finite difference scheme
4. ความเร็วของกระแสน้ำที่คำนวณได้จากสมการ hydrodynamics จะถูกนำไปแทนในสมการการเคลื่อนที่ของความเค็ม ซึ่งหาค่าตอบเชิงตัวเลขได้โดยวิธี semi-implicit finite difference scheme โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion coefficient, D_2) หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Prandtl's number (σ) และสัมประสิทธิ์ความปั่นป่วน ในกรณีนี้ที่พิจารณาการแยกตัวของชั้นการไหล ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าของ Richardson's number (R_f) (ASCE, 1988)
5. แบบจำลองได้พิจารณาถึงกระแสน้ำที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่น (density-induced circulation) ไว้ด้วย

8. การประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์กับระบบทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา

8.1. ขอบเขตของแบบจำลอง

เนื่องจากความถี่ในคลองอู่ตะเภาแปรเปลี่ยนไปตามสภาพความถี่ในทะเลสาบสงขลา และเพื่อให้การศึกษามีความถูกต้องมากที่สุด ในการศึกษานี้ได้กำหนดขอบเขตของแบบจำลอง (model domain) ให้ครอบคลุมพื้นที่ทั่วทั้งระบบทะเลสาบสงขลา (ครอบคลุมพื้นที่ 1,182 ตารางกิโลเมตร) อันได้แก่ ทะเลหลวง ทะเลสาบ ทะเลสาบสงขลาและเกาะยอ ช่องแคบปากอและร่องน้ำทางเข้าทะเลสาบสงขลา และส่วนของอ่าวไทยถึงเกาะหนู (ภาคผนวก ก) และในส่วนของคลองอู่ตะเภาจากปากแม่น้ำถึงบ้านพรุ เป็นระยะทาง 29 กม

จำนวนกริดที่ใช้ในการคำนวณถูกเลือกให้มีความละเอียดเพียงพอต่อความต้องการของคำตอบ และเหมาะสมกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในที่นี้กริดจำนวน 48x64 ถูกเลือกใช้กับส่วนของระบบ

ทะเลสาบ โดยขนาดของกริด (Δx) เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 500-2,000 ม และสำหรับในส่วนของคลอง อยู่ตะเภา ใช้กริดจำนวน 3×20 โดย Δx มีค่าประมาณ 1,500 ม

ค่าความลึกที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการวัดในสนาม (ภาคผนวก ค) โดยถูกนำมาปรับให้ สอดคล้องกับขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ และใส่ลงที่กึ่งกลางของแต่ละกริด (ดูภาคผนวก ฎ)

8.4. การทดสอบแบบจำลอง (Model Testing)

ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้ในการพยากรณ์การเคลื่อนที่ของมวลน้ำและการรุกของน้ำเค็ม จำเป็นต้องทำการทดสอบแบบจำลองฯ ซึ่งการทดสอบมีจุดประสงค์สำคัญ 2 ประการ คือ

- เพื่อตรวจสอบ Computer Codes ที่เขียนขึ้น และแก้ไขให้ใช้งานได้
- ตรวจสอบน่าเชื่อถือและความเป็นไปได้ของคำตอบที่ได้จากแบบจำลองฯ

8.2.1. การทดสอบแบบจำลองทางอุทกศาสตร์

ความถูกต้องของคำตอบที่ได้จากแบบจำลองทางอุทกศาสตร์มีความสำคัญอย่างมาก เพราะเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ของสาร และมีการคำนวณที่ซับซ้อนที่สุด การทดสอบแบบจำลองฯ มีขั้นตอนดังนี้

1. ใส่ค่าอุทกศาสตร์เริ่มต้น (Initial Condition) ของทะเลสาบสงขลา โดยกำหนดให้อยู่ในสภาพน้ำนิ่ง นั่นคือความเร็ว ณ จุดต่างๆ และอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำต่างๆ มีค่าเท่ากับศูนย์
2. ใส่ค่าระดับน้ำที่ทางเข้าทะเลสาบที่ได้จากการพยากรณ์โดยกรมอุทกศาสตร์ ทหารเรือที่เกาะหนู
3. กำหนดขนาดของเวลา (Δt) ที่ใช้ในการคำนวณ ในที่นี้ให้เท่ากับ 450 วินาที และให้แบบจำลองทำการคำนวณต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 วัน
4. นำผลการคำนวณระดับน้ำและความเร็วกระแส น้ำไปเปรียบเทียบกับที่วัดได้ทั้ง 4 สถานีเพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในแบบจำลองฯ
5. ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 4 จนกว่าจะให้ผลการเปรียบเทียบเป็นที่ดีที่สุด

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและการคำนวณของระดับน้ำและกระแส น้ำ ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ฐ โดยใช้ข้อมูลในเดือนมิถุนายน 2540 จำนวน 2 สถานีคือ ที่ร่องน้ำด้านทิศเหนือและใต้ของเกาะขอมบริเวณสะพานหินสุสานนันทน์ และสำหรับในคลองอยู่ตะเภาใช้ข้อมูลวันที่ 11 และ 31 พฤษภาคม 2540 และ 17-18 สิงหาคม 2540 ที่บ้านคูเต่า และบ้านนารังนก จากการทำ Sensitivity study พบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ท้องน้ำ (C_p) มีค่าเท่ากับ 0.0015

และพบว่าในคลองอุ้ตะเภาความลึกมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วกระแสน้ำ นอกจากนี้จากการศึกษาด้วยแบบจำลอง ๓ มิติสามารถแสดงอิทธิพลของความแตกต่างของความหนาแน่นได้ โดยที่ กม+11 จะพบการไหลสวนทิศกันระหว่างผิวน้ำและท้องคลองอย่างชัดเจน

ประโยชน์ที่สำคัญของการศึกษาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ คือสามารถแสดงรายละเอียดของกระแสน้ำที่ทุกๆ จุดได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งไม่สามารถกระทำได้ด้วยการวัดโดยตรงในสนาม เนื่องจากกระแสน้ำในทะเลสาบจะแปรเปลี่ยนไปตลอดเวลา การไหลวนอันเป็นธรรมชาติที่ซับซ้อน รูปในภาคผนวก ๓ แสดงการไหลบริเวณปากคลองอุ้ตะเภาในรูปของ vector diagram ราย 3 ชั่วโมงจนครบ 1 รอบของน้ำขึ้นน้ำลง

8.2.2. การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของความเค็ม

เมื่อแบบจำลองอุทกศาสตร์ได้รับการทดสอบแล้วว่า ความเร็วกระแสน้ำที่คำนวณได้ มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้พยากรณ์การเคลื่อนที่ของมวลน้ำในทะเลสาบสงขลาและคลองอุ้ตะเภา ต่อไปนำผลนี้ไปใช้ร่วมกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของความเค็ม โดยมีลำดับการทดสอบแบบจำลองฯ ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเค็มเริ่มต้น (Initial Condition) ของระบบทะเลสาบและคลองอุ้ตะเภา ได้มาจากการวัด (ภาคผนวก ข)
2. ค่าความเค็มที่บ้านพรูถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์กลางการคำนวณ พร้อมทั้งใส่ค่าอัตราการไหลของน้ำท่าที่วัดได้จากสถานี X90
3. กำหนดขนาดของเวลา (Δt) ที่ใช้ในการคำนวณ ในที่นี้ให้เท่ากับ 112.5 วินาที และให้แบบจำลองทำการคำนวณต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 วัน
4. นำผลการคำนวณความเค็มไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากบ้านคูเต่าและบ้านนารังนก เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแบบจำลองฯ
5. ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 4 จนกว่าจะให้ผลการเปรียบเทียบเป็นที่ดีที่สุด

ในที่นี้ทำการเปรียบเทียบระหว่างความเค็มที่ได้จากการวัดและการคำนวณที่บ้านคูเต่าและบ้านนารังนก ในวันที่ 11 พฤษภาคม 2540 และ 17-18 สิงหาคม 2540 ดังแสดงในภาคผนวก ข

9. การพยากรณ์การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา

เมื่อผลการทดสอบแบบจำลองเป็นที่น่าพอใจ และสามารถใช้พยากรณ์การเคลื่อนที่ของความเค็มได้ ขั้นตอนต่อไปเป็นการพยากรณ์การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา ที่สภาพทางอุทกวิทยาต่างๆ และอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความลึกของลำน้ำ ผลของการพยากรณ์มีดังนี้

9.1. อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของน้ำท่า

ในการศึกษานี้ให้น้ำท่าในคลองอู่ตะเภาแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 1-10 ลบ.ม/วินาที และกำหนดให้ความเค็มของทะเลสาบสงขลาในฤดูแล้งมีค่าคงที่ที่ 25 ppt จากการคำนวณต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน ผลที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ๘ และสรุปไว้ในตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า ที่อัตราการไหลคงที่ 1 ลบ.ม ต่อวินาที ต่อเนื่องเป็นเวลา 13 วัน น้ำเค็มสามารถรุกเข้าไปถึงอำเภอหาดใหญ่ และที่อัตราการไหลมากกว่า 5 ลบ.มต่อวินาที คลองอู่ตะเภาจะมีสภาพเป็นน้ำจืดตลอดสาย

ตารางที่ 6 การพยากรณ์การรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภาที่อัตราการไหลคงที่ 1 ลบ.ม ต่อวินาที

บ้านหาร		หาดใหญ่	
ความเค็ม (ppt)	เวลาในการรุกตัว (ชั่วโมง)	ความเค็ม (ppt)	เวลาในการรุกตัว (ชั่วโมง)
1	110	1	300
2	160	2	550
2.7	350	6	700

9.2. อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความลึกของลำน้ำ

จากการที่กรมชลประทานมีโครงการพัฒนาลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาหลายโครงการ ซึ่งย่อมอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อารเปลี่ยนแปลงรูปทรงและความลึกของลำน้ำ ในที่นี้จึงทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงความลึกของลำน้ำตลอดสาย โดยกำหนดให้ความลึกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง $\pm 50\%$ และให้อัตราการไหลในฤดูแล้งคงที่ที่ 2 ลบ.มต่อวินาที ผลการพยากรณ์แสดงในภาคผนวก ๘ และตารางที่ 7 สามารถสรุปได้ว่าการขุดลอกร่องน้ำให้ลึกเพิ่มขึ้นอีก 50% มีผลต่อการรุกของน้ำเค็มเพียงเล็กน้อย ขณะที่ถ้ามีการตื้นเขินเกิดขึ้นอีก 50% จะลดการรุกของน้ำเค็มได้อย่างมาก

ตารางที่ 7 การรุกของน้ำเค็มที่อัตราการไหล 2 ลบ.ม ต่อวินาทีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึก

ความเค็ม (ppt)

การเปลี่ยนแปลงความลึก	กม+2	กม+6	กม+11	กม+15	กม+23
ขุดลอก 50%	15	9.5	5.5	2.5	0.25
สภาพปัจจุบัน	15	9.5	5	2	0.15
ดินเงิน 50%	12.5	6	2	0.5	0

9.3. กลไกการรุกของน้ำเค็มในคลองอุตะเถา

จากการทำ Sensitivity study ด้วยแบบจำลอง 2 มิติพบว่า ความเค็มในคลองอุตะเถามีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวราบ (D_H) และพบว่า D_H มีค่าเพียง 0.006 ม²/วินาที ทำให้การรุกตัวของน้ำเค็มเป็นไปอย่างช้าๆ ขณะที่การพัดพาความเค็มเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นน้ำลงทำให้ความเค็มเฉพาะถิ่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และพบว่าแบบจำลองแบบ 2 มิติให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความเค็มที่กึ่งกลางความลึกของลำน้ำในรอบน้ำขึ้นน้ำลงค่อนข้างต่ำ ขณะที่แบบจำลองแบบ 3 มิติสามารถคำนวณการผสมผสานในแนวตั้งได้แม่นยำกว่า โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวตั้ง (D_V) มีค่าต่ำมาก (0.0003 ม²/วินาที) ซึ่งแสดงถึงสาเหตุสำคัญของการแยกชั้นของน้ำเค็ม อย่างไรก็ตามแบบจำลองยังไม่สามารถอธิบายความแตกต่างของความเค็มอย่างนับพันที่ผิวและท้องคลองได้

10. สรุปผลการศึกษา

จากข้อมูลเบื้องต้นชี้ว่า การผสมผสานของความเค็มในคลองอู่ตะเภา เป็นแบบ partially mixed แสดงให้เห็นถึงความปั่นป่วนเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นน้ำลงมีน้อย จากการติดตามการรุกของน้ำเค็มพบว่า น้ำเค็มมีแนวโน้มรุกเข้าสู่คลองอู่ตะเภารุนแรงที่สุดในเดือนพฤษภาคม โดยมีค่าความเค็มที่ปากคลอง เท่ากับ 18 ppt และรุกไปไกล 11 กม. อย่างไรก็ตามขบวนการรุกของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภามีความซับซ้อนมาก อันเนื่องมาจากความผันแปรของความเค็มในทะเลสาบสงขลา ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาภาพสมุทรศาสตร์ของทะเลสาบและคลองอู่ตะเภาร่วมกัน

จากการสำรวจภาคสนามเพื่อทราบถึงสภาพปัจจุบันทางสมุทรศาสตร์ และเพื่อใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์สรุปได้ดังนี้

1. พิสัยน้ำขึ้นน้ำลง (tidal range) ที่เกาะหนูในเดือนมิถุนายน 2540 มีค่า 60 ซม. เมื่อเคลื่อนเข้าสู่ทะเลสาบสงขลาพิสัยลดลงเป็น 21 ซม. ที่บ้านแหลมโพธิ์โดยช้ากว่าที่เกาะ

- หนู 3.5 ชั่วโมง จากนั้นเข้าสู่คลองอุต๊ะเกาโดยที่บ้านเกาะนก (กม+2) บ้านหาร และ
อำเภอหาดใหญ่ มีค่าพิสัยประมาณ 8 ชม และ 15 ชม และ 11 ชม ตามลำดับ
2. ความเร็วกระแส น้ำสูงสุดทางด้านเหนือและใต้ของเกาะขอมมีค่าประมาณ 0.67 ม ต่อวินาที และ 0.43 ม ต่อวินาที ตามลำดับ
 3. ความเร็วกระแสสูงสุดที่บ้านนารังนกและบ้านเกาะนกมีค่าประมาณ 0.18 ม ต่อวินาที และ 0.15 ม ต่อวินาที ตามลำดับ
 4. อัตราการไหลของน้ำในฤดูแล้งที่สถานี X90 (บ้านบางศาลา) มีค่าอยู่ระหว่าง 1-7 ลบ.ม ต่อวินาที
 5. ในฤดูฝนทั่วทั้งระบบทะเลสาบสงขลาเป็นน้ำจืด ส่วนในฤดูแล้งน้ำเค็มรุกถึงเกาะใหญ่ โดยในเดือนกรกฎาคม 2540 มีความเค็มถึง 4.5 ppt การผสมผสานของความเค็มเป็นแบบ Completely mixed ยกเว้นบริเวณร่องน้ำทางทิศใต้และทิศเหนือของเกาะขอมที่มีความลึกมากกว่า 2.5 ม จะมีการผสมผสานเป็นแบบ Partially mixed
 6. ข้อมูลความเค็มในฤดูแล้งระหว่างเดือนเมษายน-ตุลาคม 2540 พบว่าที่กึ่งกลางทะเลสาบสงขลาความเค็มมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 15-29 ppt
 7. การรุกของน้ำเค็มรุนแรงที่สุดในปี 2540 คือในเดือนสิงหาคม โดยอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำท่าประมาณ 2 ลบ.ม/วินาที พบว่าที่ กม+11 ความเค็มที่ผิวน้ำและท้องคลองมีค่าเท่ากับ 0.3 ppt และ 15.3 ppt ตามลำดับ

การศึกษาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางอุทกศาสตร์และการเคลื่อนที่ของความเค็ม ได้ข้อสรุป

ดังนี้

1. ระดับน้ำและความเร็วกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองฯ ในทะเลสาบสงขลาและคลองอุต๊ะเกา ให้คำตอบที่สอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกไว้ทั้งขนาดและเวลา โดยจากการทำ Sensitivity study ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายท้องน้ำเท่ากับ 0.0015
2. การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองฯ พบว่า ความลึกมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วกระแสน้ำที่คำนวณได้ในคลองอุต๊ะเกา
3. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความเค็มในแนวราบของคลองอุต๊ะเกามีค่าน้อย (~0.006 ม²ต่อวินาที) ทำให้การรุกตัวของน้ำเค็มเป็นไปอย่างช้าๆ ขณะที่การพัดพาความเค็มเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นน้ำลงทำให้ความเค็มเฉพาะถิ่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

4. แบบจำลองแบบ 3 มิติสามารถให้คำตอบของการผสมผสานในแนวคิดได้แม่นยำกว่าแบบจำลองแบบ 2 มิติ โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวคิดมีค่า 0.0003 ม²ต่อวินาที ซึ่งแสดงถึงสาเหตุของการแยกชั้นของน้ำเค็ม
5. ผลการคำนวณของแบบจำลองฯยังไม่สามารถอธิบายการแยกตัวของความเค็มอย่างจับพลันได้ จำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไป
6. ที่อัตราการไหลคงที่ 1 ลบ.ม ต่อวินาที ต่อเนื่องเป็นเวลา 24 วัน ความเค็ม 2 ppt สามารถรุกเข้าไปถึงอำเภอหาดใหญ่ และที่อัตราการไหลมากกว่า 5 ลบ.มต่อวินาที คลองอุตะเกาะจะมีสภาพเป็นน้ำจืดตลอดสาย
7. การขุดลอกร่องน้ำให้ลึกเพิ่มขึ้นอีก 50% มีผลต่อการรุกของน้ำเค็มเพียงเล็กน้อย ขณะที่ถ้ามีการตื้นเขินเกิดขึ้นอีก 50% จะลดการรุกของน้ำเค็มได้อย่างมาก

10. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อเนื่อง

จากข้อมูลภาคสนามแสดงให้เห็นแล้วว่า การผสมผสานของน้ำเค็มในคลองอุตะเกาะมีการแยกชั้นอย่างจับพลัน (Discontinuity) พฤติกรรมดังกล่าวขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความลึกอย่างรวดเร็ว บริเวณบ้านนารังนก (กม+11) -บ้านหาร (กม+15) ซึ่งงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เช่นนั้นได้อย่างละเอียด จึงควรทำการวิจัยต่อไปเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์อย่างแม่นยำ ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมมีดังต่อไปนี้

1. พัฒนาแบบจำลองแบบ 3 มิติ ให้มีประสิทธิภาพในการอธิบายปรากฏการณ์การแยกชั้นของความเค็มอย่างจับพลันได้อย่างแม่นยำ
2. ตรวจสอบความลึกบริเวณบ้านนารังนก (กม+11) -บ้านหาร (กม+15) โดยละเอียดเพื่อนำมาปรับปรุงให้เกิดความสมบูรณ์ในการใช้กับแบบจำลองแบบ 3 มิติต่อไป
3. ติดตามการเปลี่ยนแปลง รายวันของความเค็มในทะเลสาบสงขลาและอัตราการไหลที่ X90 เมื่อน้ำท่ามีค่าน้อยกว่า 2 ลบ.ม ต่อวินาที
4. ศึกษาการรุกของน้ำเค็มในกรณีของการขุดคลองระบายน้ำสายใหม่เชื่อมกับคลองอุตะเกาะ
5. เนื่องจากความเค็มในคลองอุตะเกาะขึ้นอยู่กับความเค็มในทะเลสาบสงขลา ดังนั้นจึงควรศึกษาความเป็นไปได้ของการรุกของน้ำเค็มในคลองอุตะเกาะจากอุทกวิทยาของทั้งระบบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา

เอกสารอ้างอิง

1. กรมชลประทาน 2534. List of Stream Guaging stations in Thailand Under Operation of Royal Imigation Department Investigation project up to 1990, กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
2. ณรงค์ ฌ เชียงใหม่ 2535 “การศึกษารูปแบบการรุกตัวของน้ำเค็มในคลองอู่ตะเภา จังหวัดสงขลา” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. วินัย แซ่จิว และสมบูรณ์ พรพิเนตพงศ์ 2538 “การศึกษาและจำลองสภาพการคกตะกอนทางธรรมชาติในลำน้ำคลองอู่ตะเภาเพื่อสร้างโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
4. เสรี พานิชกุล 2533. “การวางแผนจัดสรรน้ำ เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำอุปโภค-บริโภค เพื่อการประปาของอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา” กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
5. AIT 1994, Note No. 1 of Utaphao Basin on Data Check; Rating Curves & Nam Calibration, AIT Bangkok, Thailand
6. AIT 1994, Note No. 2 of Utaphao Basin on Data Check; Rating Curves & Nam Calibration. AIT Bangkok, Thailand
7. AIT 1994, Note No. 3 of Utaphao Basin on Data Check; Rating Curves & Nam Calibration, AIT Bangkok, Thailand
8. John Taylor and Sons, 1985. “Songkhla Lake Basin Planning Study”, Final reporty, Vol.7, Technical Appendices, Basin Water Resources, National Economic and Social Development Board, National Environmental Board, Thailand
9. TEAM Consulting Engineerings and Nippon Koei, 1989 “Feasibility Study Khlong Sadao Dam Project, Royal Irrigation Department, Ministry of Agriculture and Cooperative.
10. Linsley, R.K, Kohler, M.A and Paulhus, J.L.H, 1975. Hydrology for Engineers, 2nd Ed. McGraw-Hill, New York.
11. Swanson. J. C., 1986 “A Three Dimensional Numerical Model of Coastal Circulation and Water Quality” Ph.D Dissertation, Department of Ocean Engineering, Univ. Of Rhode Island.
12. McDowell, D.M. and Connor, B.A., 1977. “Hydraulic Behavior of Estuaries”, The Macmillan ฌ Press Ltd, London
13. Prasuhn, A.L, 1987. “Fundamental of Hydraulic Engineering”, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York.
14. Thomann, R.V and Mueller J.A, 198-. “Principles of Surface Water Quality Modeling and

Control”

15. Spaulding M.L., 1984. “A Vertically Averaged Circulation Model Using Boundary-Fitted Coordinates”, Journal of Physical Oceanography, 14. Pages 973-982.
16. เทสโก้, ปัญญาคอนซัลแตนท์ และพอสคอนซัลแตนท์ “การศึกษาและออกแบบโครงการดันกั้นน้ำ เข็มทะเลสาบสงขลา จังหวัดสงขลาและจังหวัดพัทลุง” กรมชลประทาน กระทรวงเกษตร และ สหกรณ์ 2536

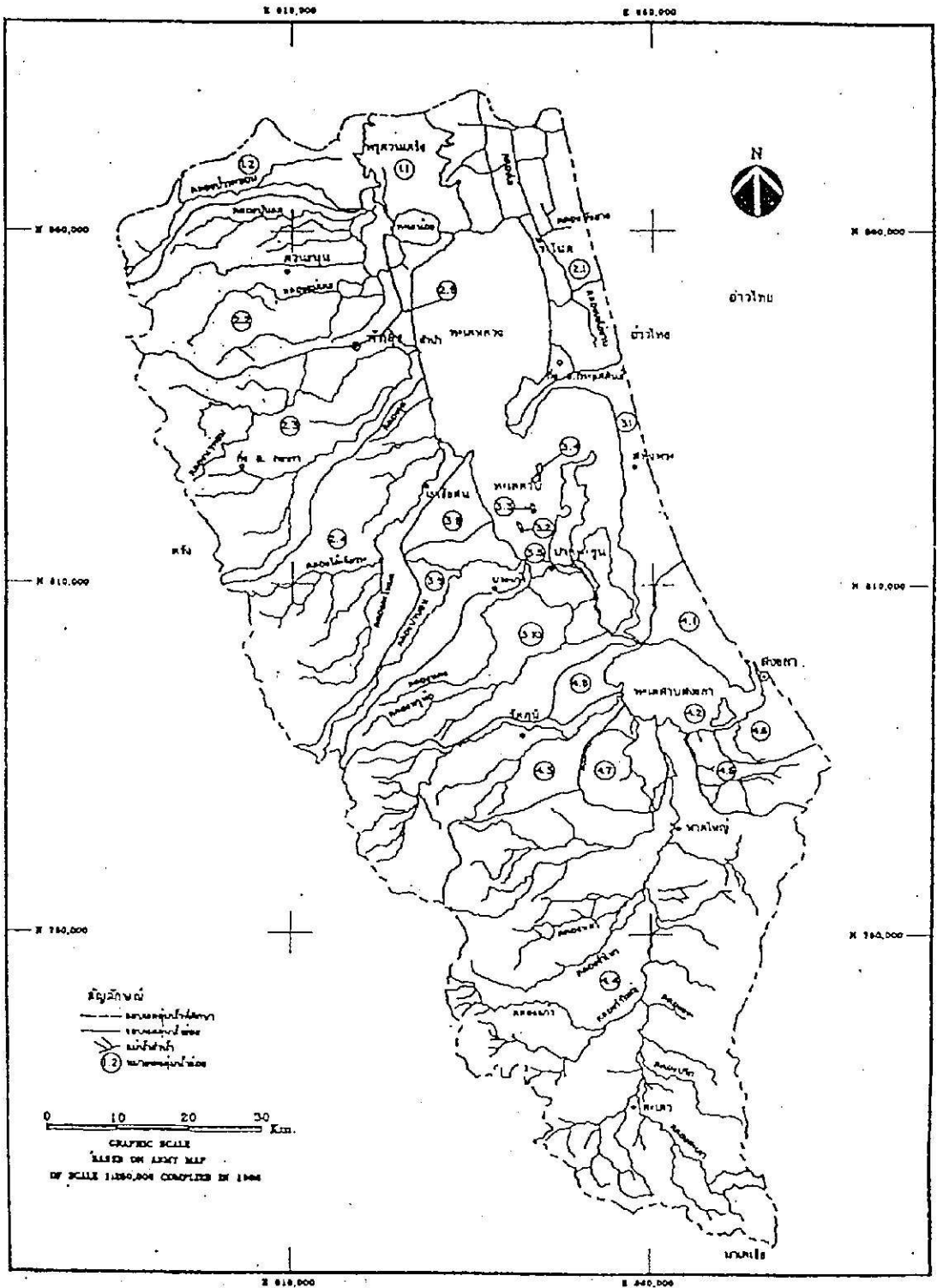
ภาคผนวก ก

รายละเอียดของสถานีอุทกวิทยาในกลุ่มน้ำคลองอุตตะเกาที่เกี่ยวข้อง

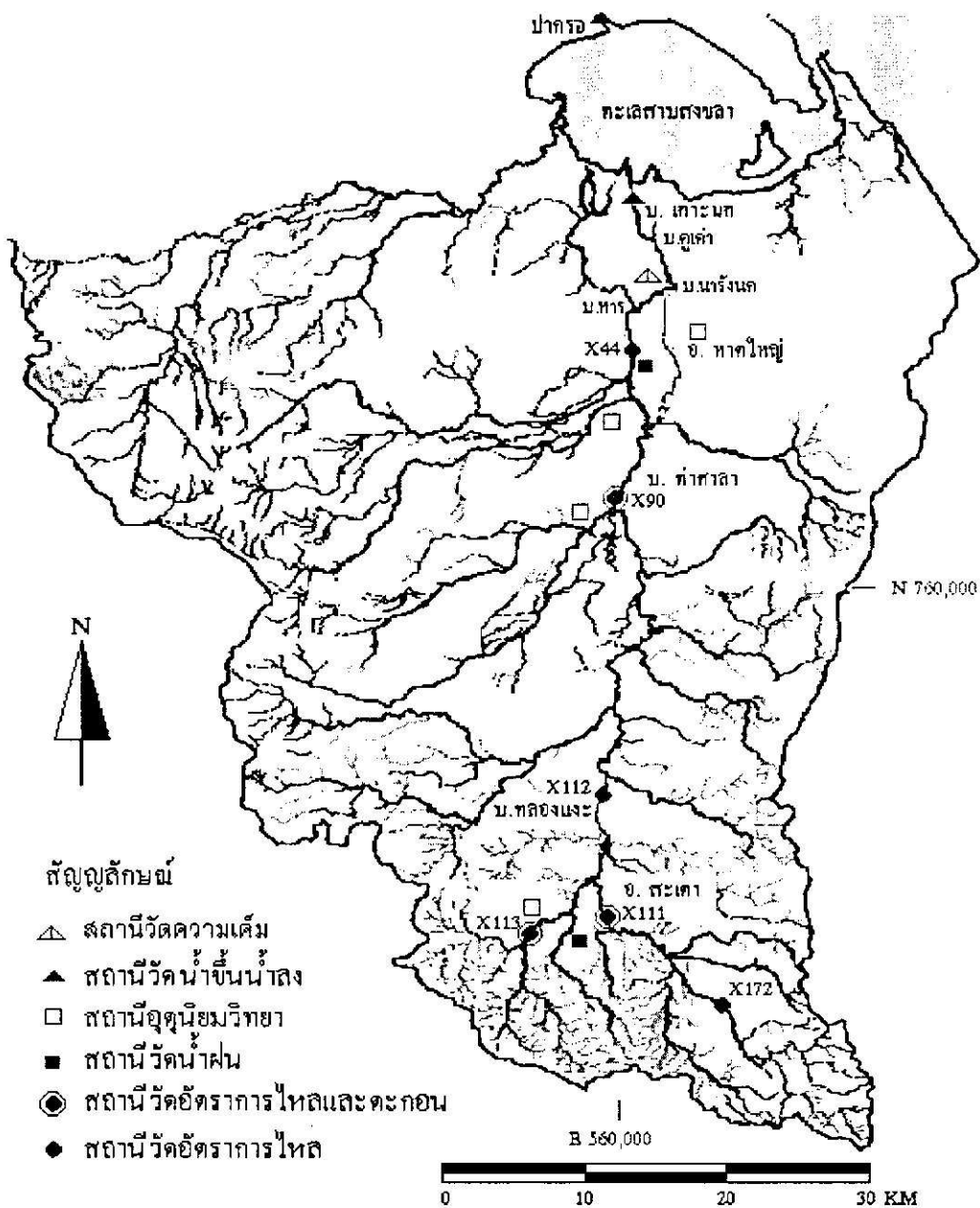
Sta. Code	River	Location	Drainage Area (km ²)	Period of Record	Mean Annual Yield (mm)	Characteristics
X90	Klong U-Taphao	Ban Bang Sala	1,562	1971-now	644.91	ตั้งอยู่ที่บ้านบางศาลา บริเวณส่วนตรงของลำน้ำ ความลึกของลำน้ำเท่ากับ 9 ม. ความสามารถระบายน้ำสูงสุดเท่ากับ 300 ม ³ /วินาที น้ำไหลกลับคืนถึงเป็นครั้งคราว มีค่า datum เท่ากับ 0.680 m MSL การวัดความเร็วและตะกอนกระทำที่สะพาน ที่อัตราการไหลสูง ค่าอัตราการไหลจริง ให้ค่าสูงกว่าที่คำนวณได้จาก rating curve
X44		Hat Yai	1,740	1967-now	791.94	ตั้งอยู่ที่อันกอกหาดใหญ่ insensitive ที่อัตราการไหลต่ำๆ เพราะได้รับอิทธิพลจากทะเล ความสามารถระบายน้ำสูงสุดเท่ากับ 300 ม ³ /วินาที มีค่า datum เท่ากับ -0.980 m MSL rating curve ถูกกระน้ำที่ 200 เมตร ห่างจากสะพาน ส่วนตะกอนนั้นวัดที่สะพาน หน้าตัดการไหลวัดที่บริเวณสะพาน เนื่องจากมีการขุดลอกคลองในปี 1989 และยังไม่มีการทำ rating curve ทำให้ค่า rating curve มีความเชื่อถือได้ ค่าอัตราการไหลสูงๆ ยังไม่เป็นที่น่าเชื่อถือนัก

ลำน้ำสำคัญและขอบเขตลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา

ที่มา : เทศโก้ และคณะ (2536) "การศึกษาและออกแบบโครงการคั่นกั้นน้ำเค็ม ทะเลสาบสงขลา จังหวัดสงขลาและจังหวัดพัทลุง"

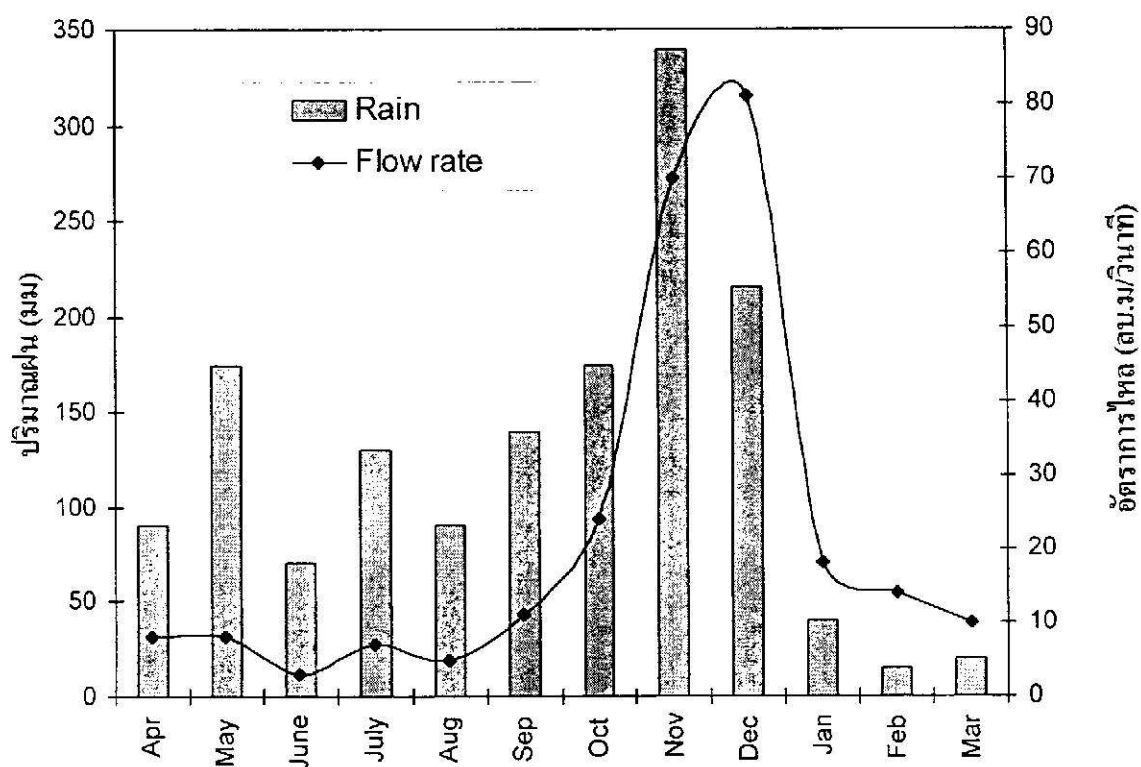


สถานีอุทกวิทยาและอุทกศาสตร์ในลุ่มน้ำคลองอุตะเกา



ปริมาณฝนและอัตราการไหลเฉลี่ยรายเดือนของน้ำท่าในคลองอุต๊ะเกาที่อำเภอหาดใหญ่

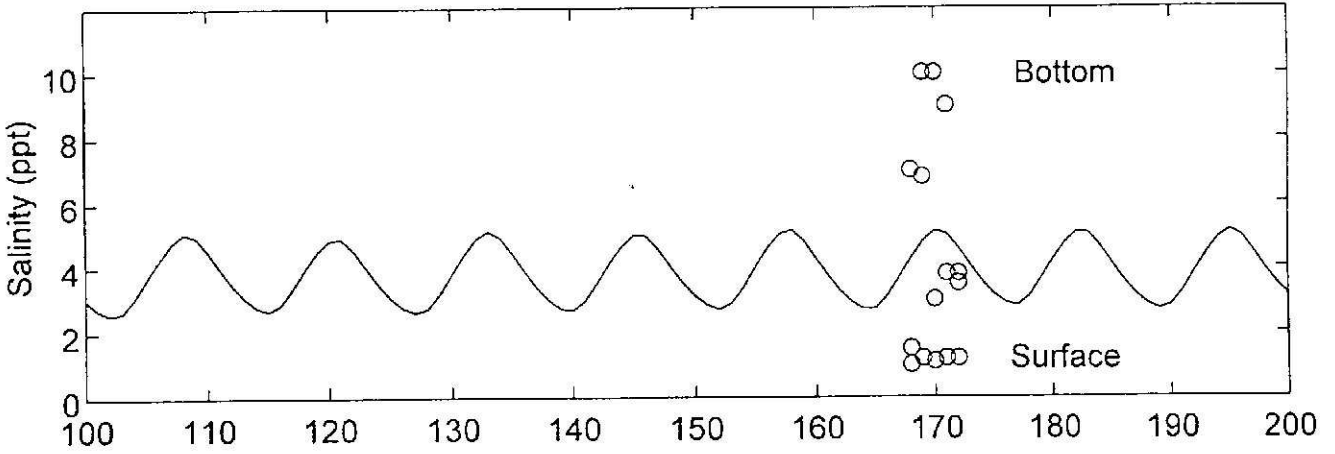
ที่มา : TEAM Consulting Engineerings and Nippon Koei, 1989



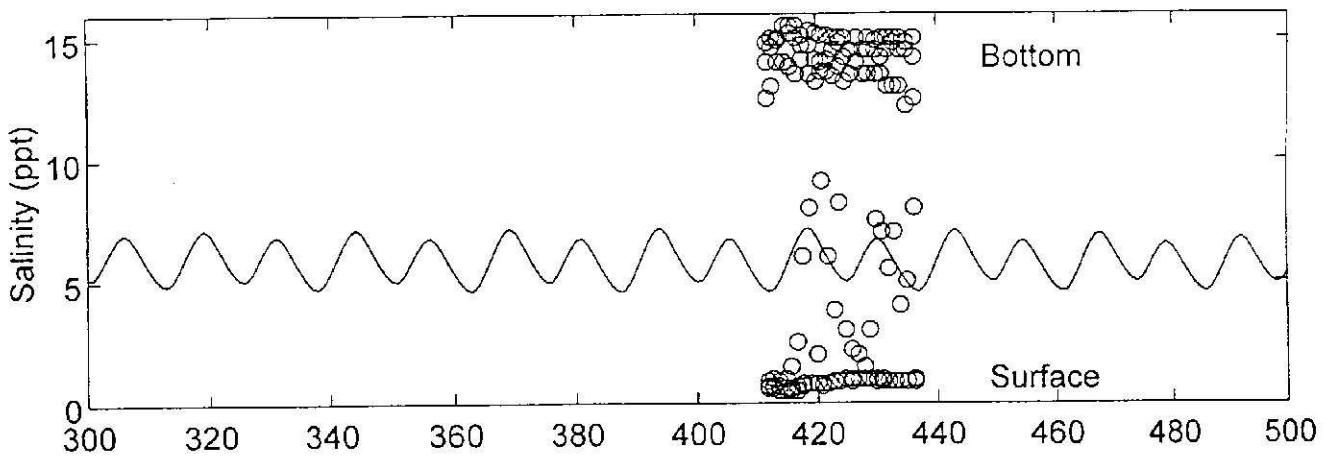
ภาคผนวก ๓

เปรียบเทียบผลการคำนวณ (-) ความเค็มแบบ 2 มิติกับการวัด (o)

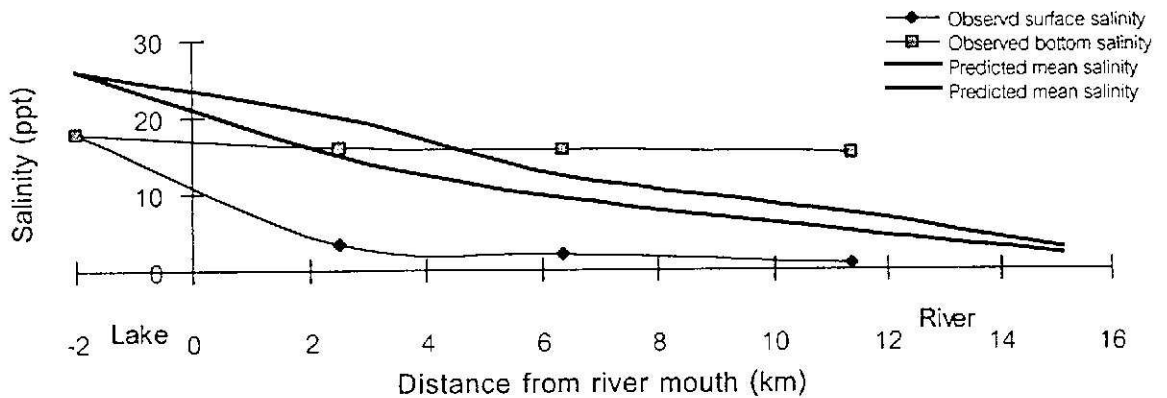
ที่บ้านญั่วแต่วันที่ 11 พฤษภาคม 2540



ที่บ้านนารังนงวันที่ 17-18 สิงหาคม 2540



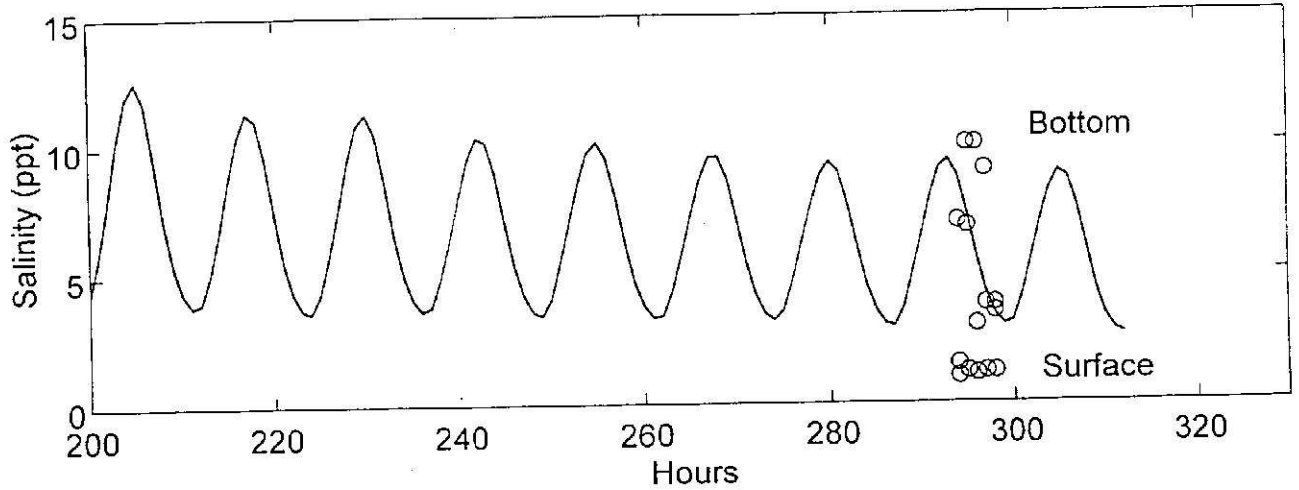
เปรียบเทียบผลการคำนวณการรุกของน้ำเค็มกับการวัดวันที่ 17 สิงหาคม 2540



เปรียบเทียบผลการคำนวณ (-) ความเค็มแบบ 3 มิติกับการวัด (o)

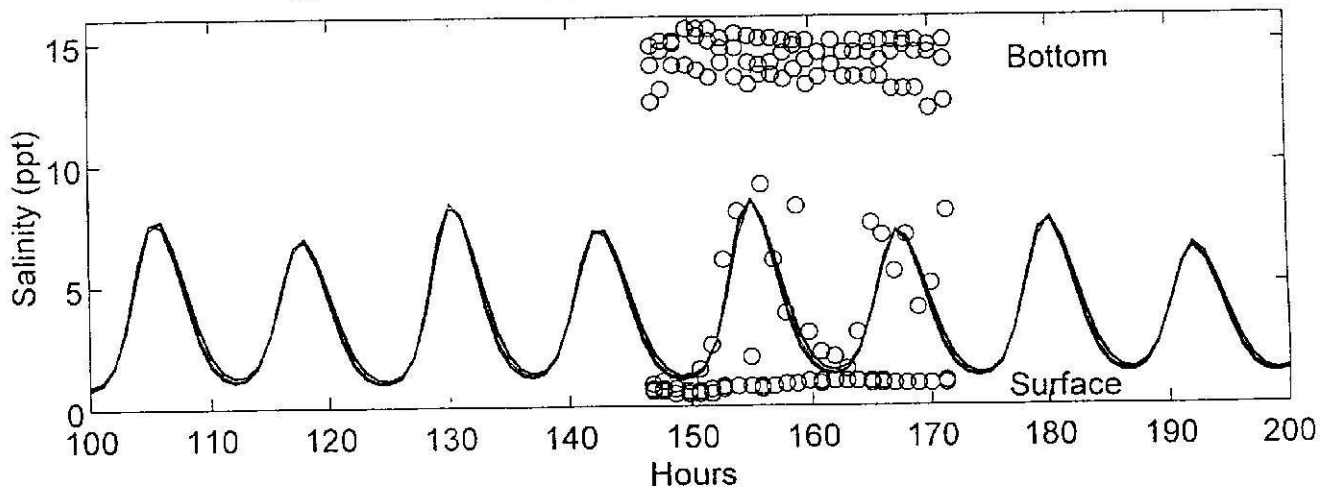
ที่บ้านคูเต่าวันที่ 11 พฤษภาคม 2540

Predicted (-) and observed (o) salinity at Ku Tao, May 11, 1997



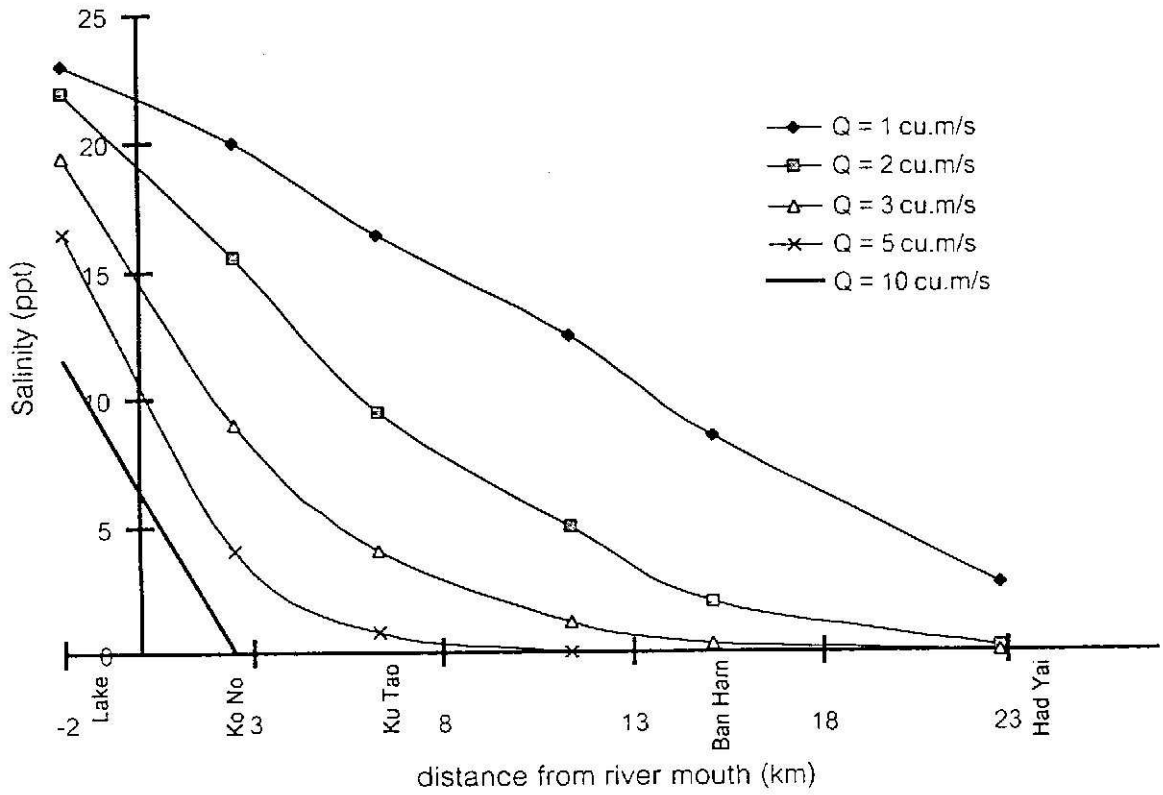
ที่บ้านนารังนกวันที่ 17-18 สิงหาคม 2540

Predicted (-) and observed (o) salinity at Na Rang Nok, August 17-18, 1997



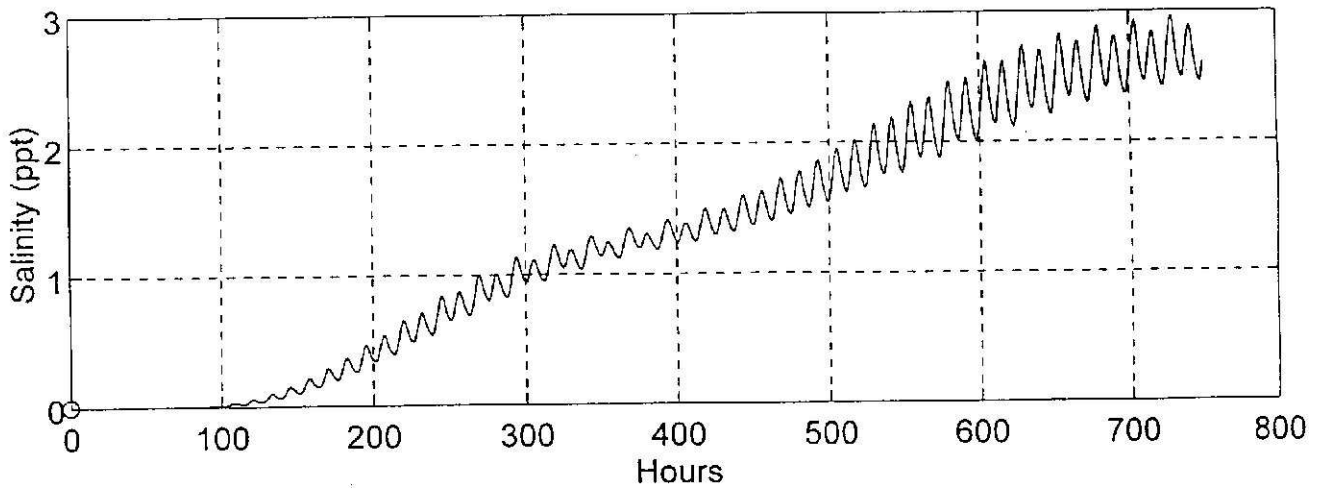
ภาคผนวก ค

การพยากรณ์การรุกของน้ำเค็มในคลองอุต๊ะภายใต้อัตราการไหล 1-10 ลบ.ม/วินาที

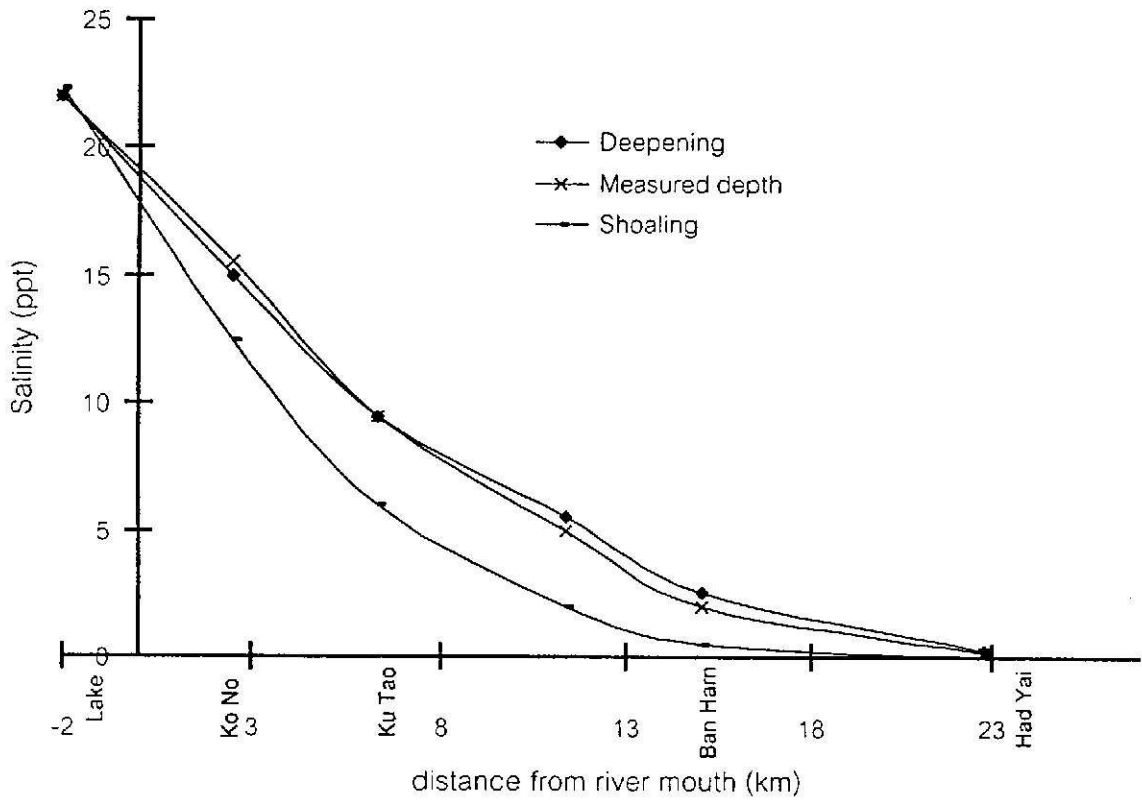


การพยากรณ์การรุกของน้ำเค็มกับเวลาสำหรับอัตราการไหลคงที่ 1 ลบ.ม/วินาที

Predicted mean salinity intrusion at Had Yai for flow rate of 1 cu.m/s



การพยากรณ์การรุกของความเค็มในคลองอุตะเกา
กรณีเปลี่ยนแปลงความลึกระหว่าง $\pm 50\%$ ที่อัตราการไหลคงที่ 2 ลบ.ม/วินาที

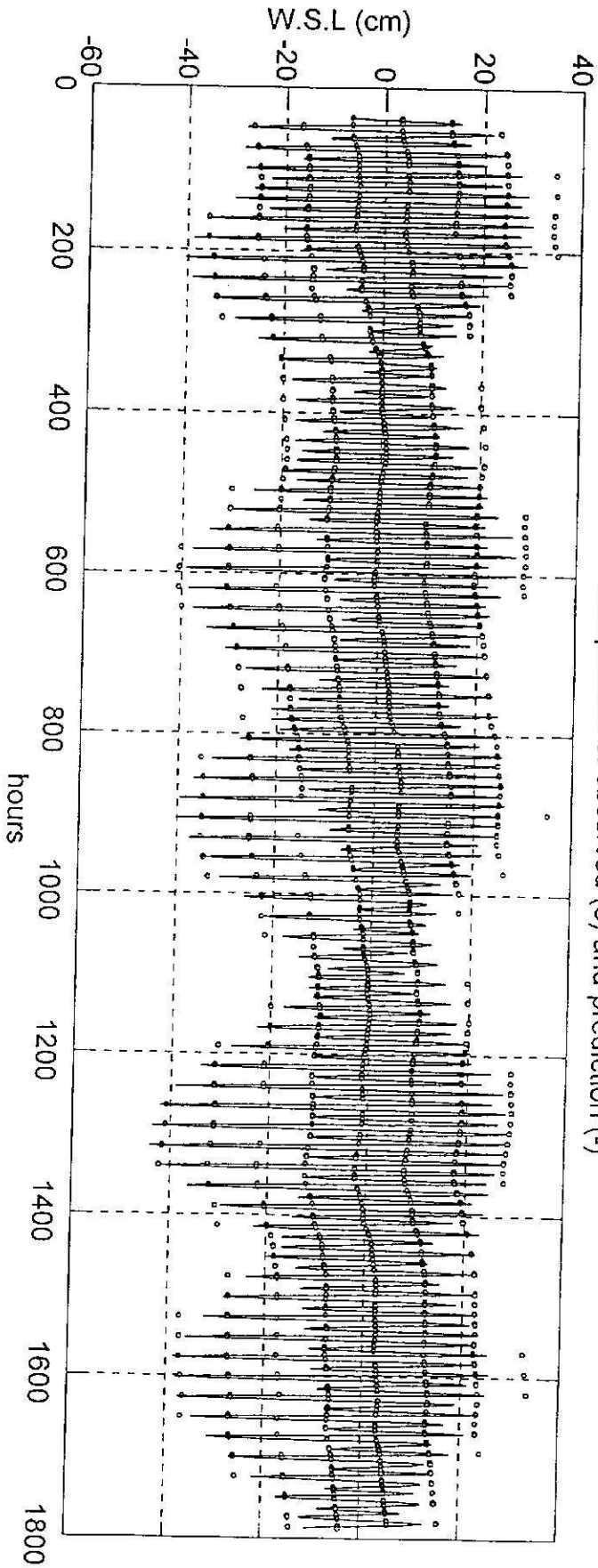


ภาคผนวก ข

องค์ประกอบของน้ำขึ้นน้ำลงที่เกาะหนู
วิเคราะห์จากข้อมูลเดือนพฤษภาคม-กรกฎาคม 2540

Tidal constituents	Degree hr	Amplitude (cm)	Phase (degree)
Q1	13.4	0.771	107
O1	13.9	4.263	155.6
K1	15	5.589	135.7
OO1	16.1	0.841	252.5
P1	15	1.379	18.6
MU2	28	0.781	243
N2	28.4	5.273	81.3
M2	29	19.387	124.3
S2	30	6.385	316.9
MSN2	30.5	0.807	83.6
NU2	28.5	1.063	288.7
K2	30.1	1.623	219.7
NO3	42.4	0.656	100.7
MO3	42.9	1.801	117
M3	43.5	0.622	203.6
MK3	44	2.972	49
SK3	45	1.267	291.7

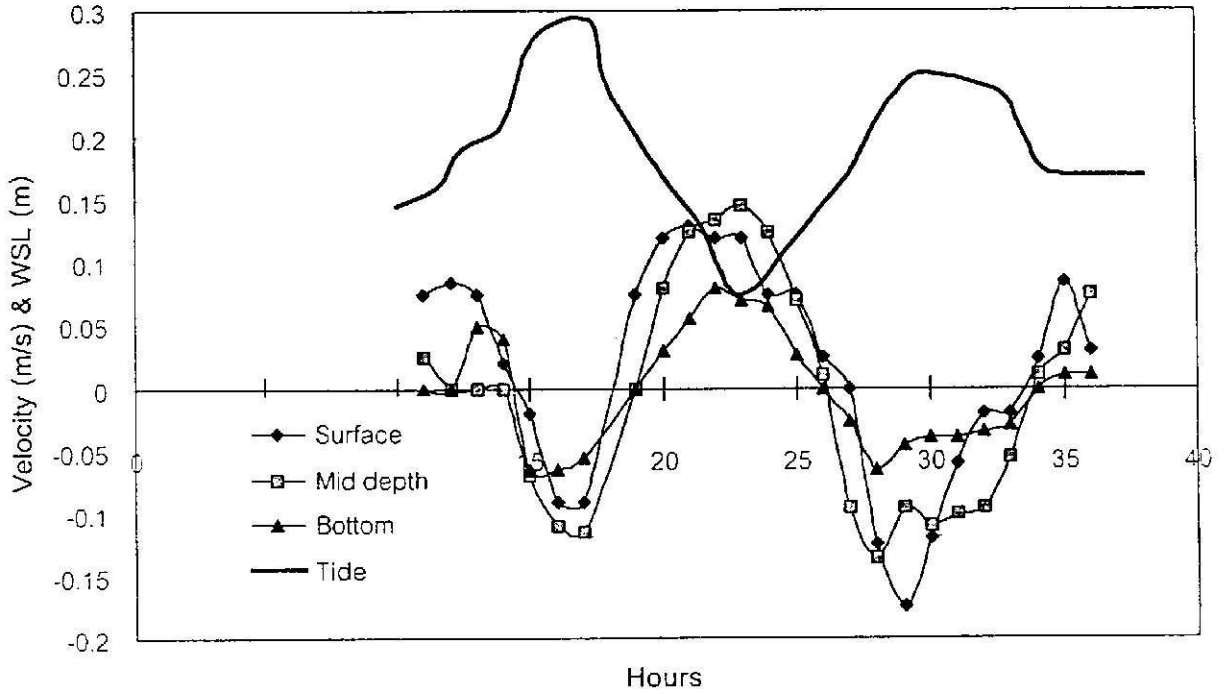
พฤติการณ์ของน้ำขึ้นน้ำลงที่เกาะหนู



Comparison of observed (o) and prediction (-)

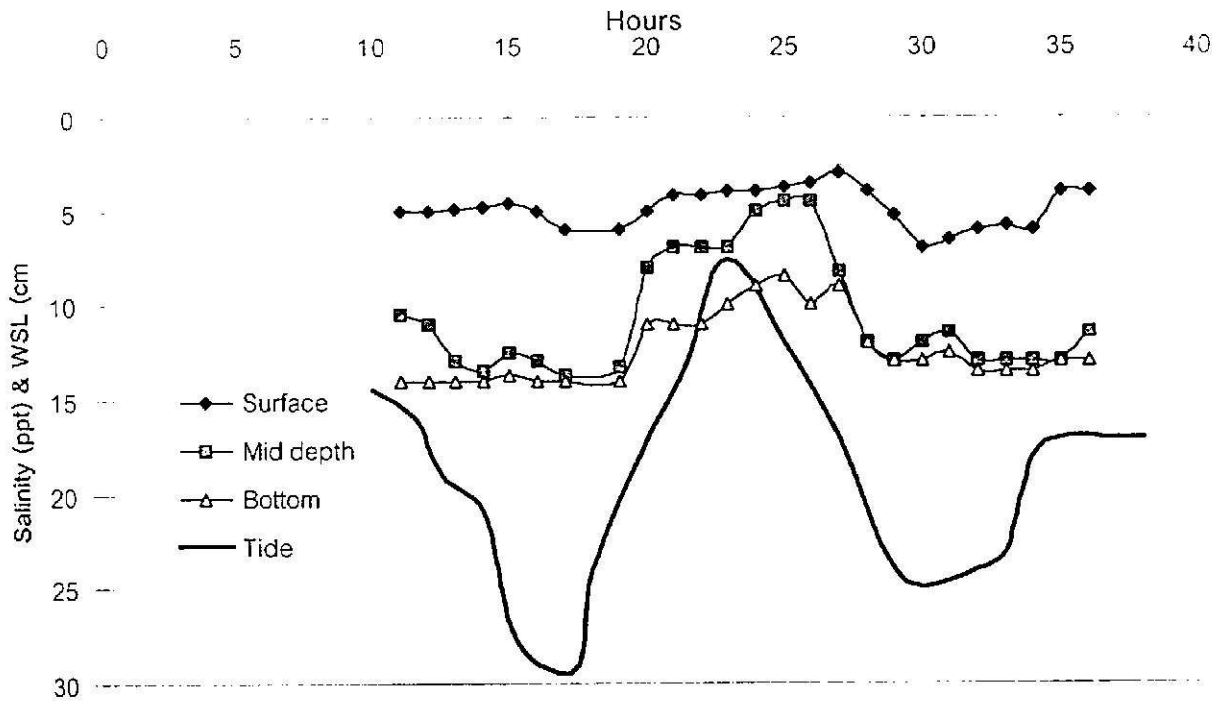
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและกระแสน้ำที่บ้านเกาะนกงวันที่ 21-22 เมษายน 2538

ที่มา: วินิจฉัย และ สมบูรณ์ 2538



ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและความเค็มที่บ้านเกาะนกงวันที่ 21-22 เมษายน 2538

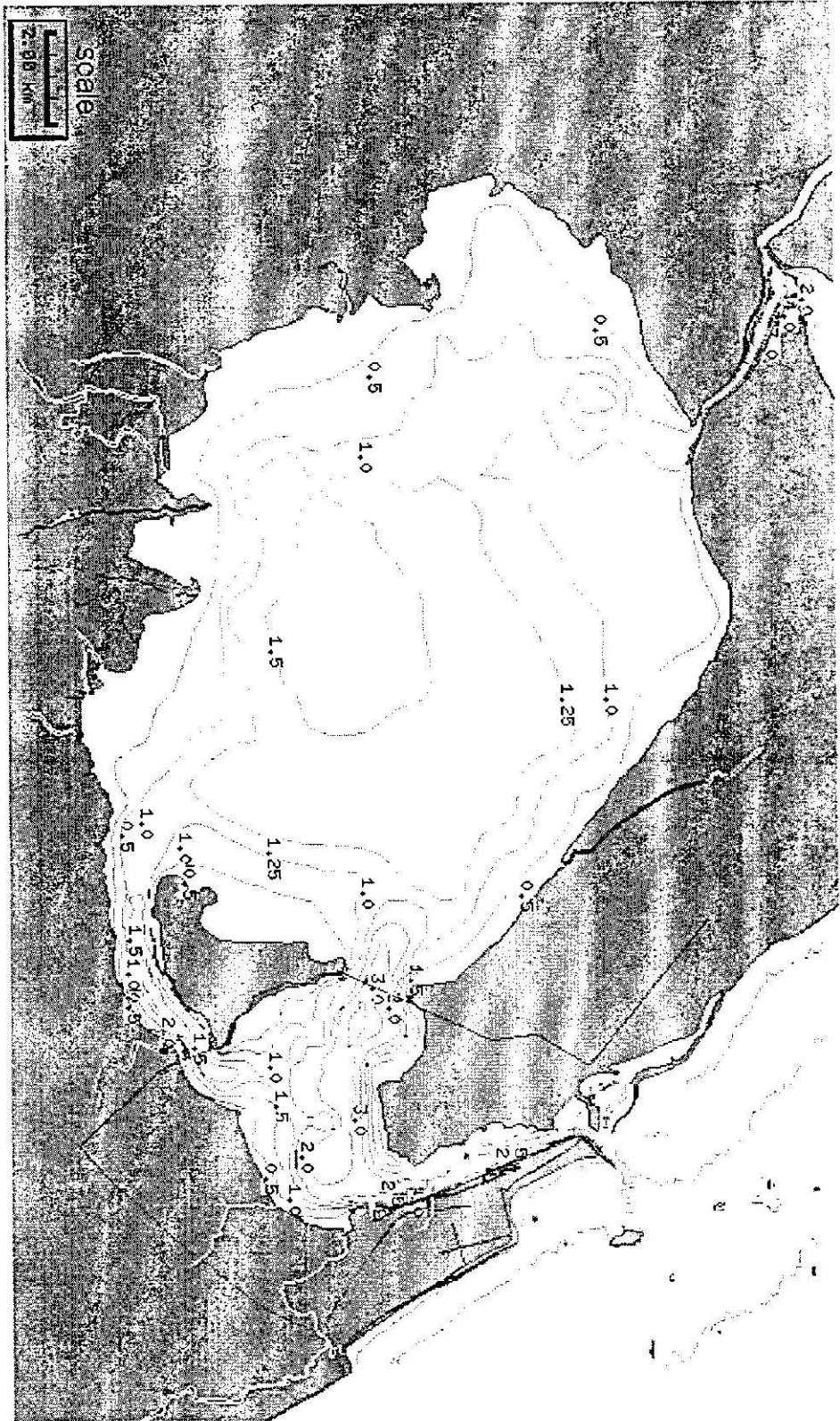
ที่มา: วินิจฉัย และ สมบูรณ์ 2538



ภาคผนวก ก

รูปทรงพื้นฐานและความลึกของทะเลสาบสงขลา

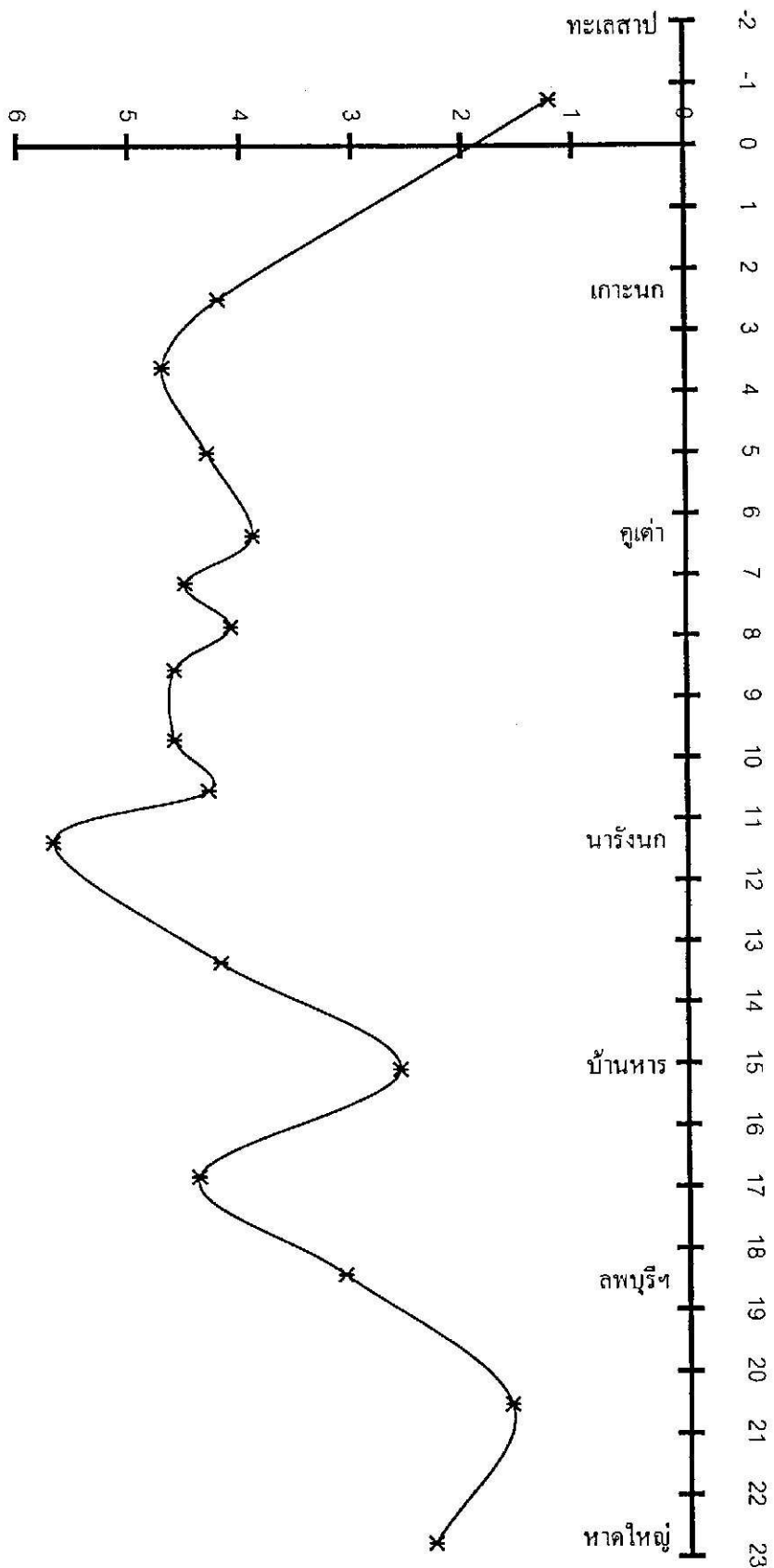
ที่มา: ดำรง โดย สมบูรณ์ พรทิเนตพงศ์ และทีมวิจัย 2541



ความลึกตามแนวร่องน้ำจากปากคลองอุตะเถาถึงอำเภอลาดใหญ่

ที่มา: สำรองโดย สมบูรณ์ พรตเนตหงส์ และทีมวิจัย 2541

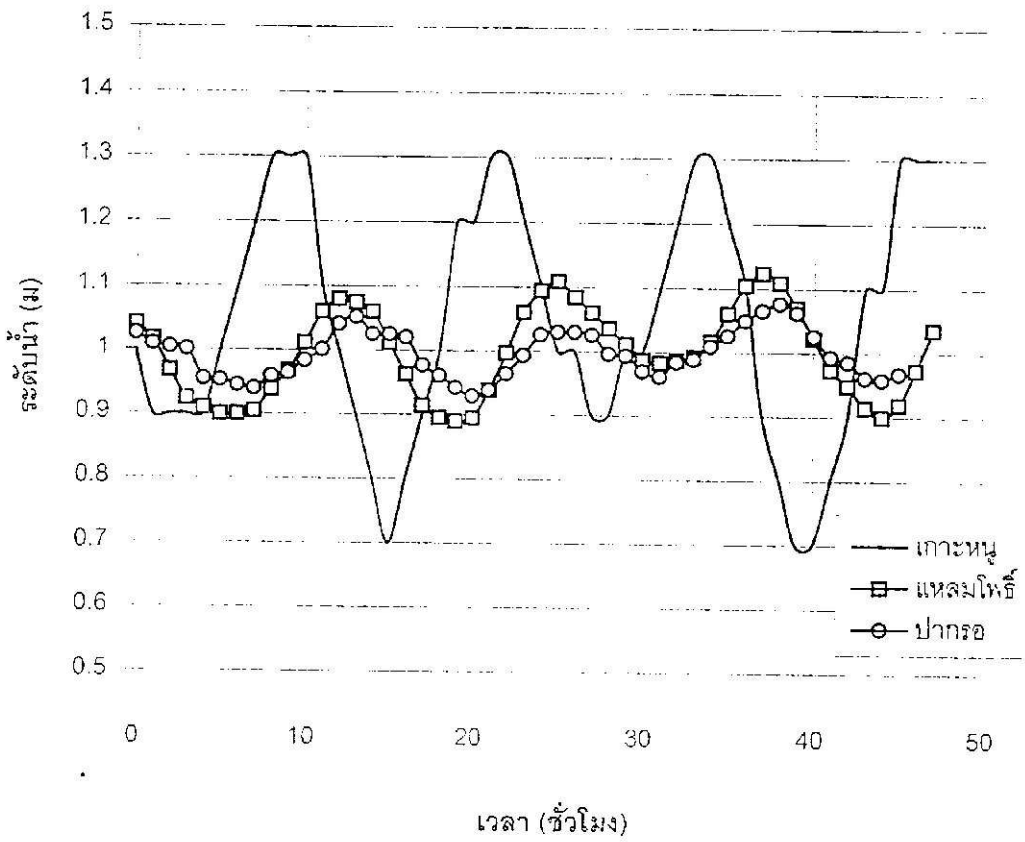
ความลึก (ม)



ระยะทางจากปากคลองอุตะเถา (กม)

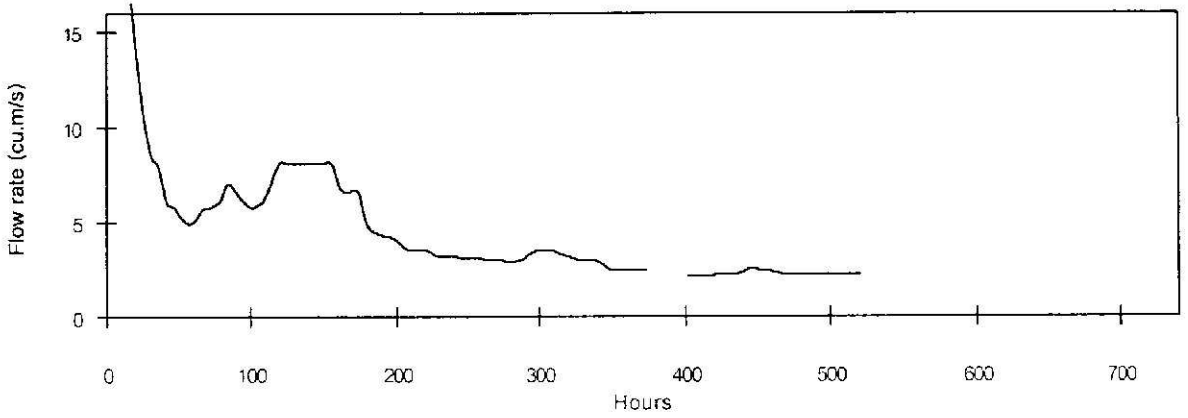
ภาคผนวก ง

ความสัมพันธ์ของน้ำขึ้นน้ำลงวันที่ 4-5 มิถุนายน 2540
ที่เกาะหนู-แหลมโพธิ์-ปากกรอ

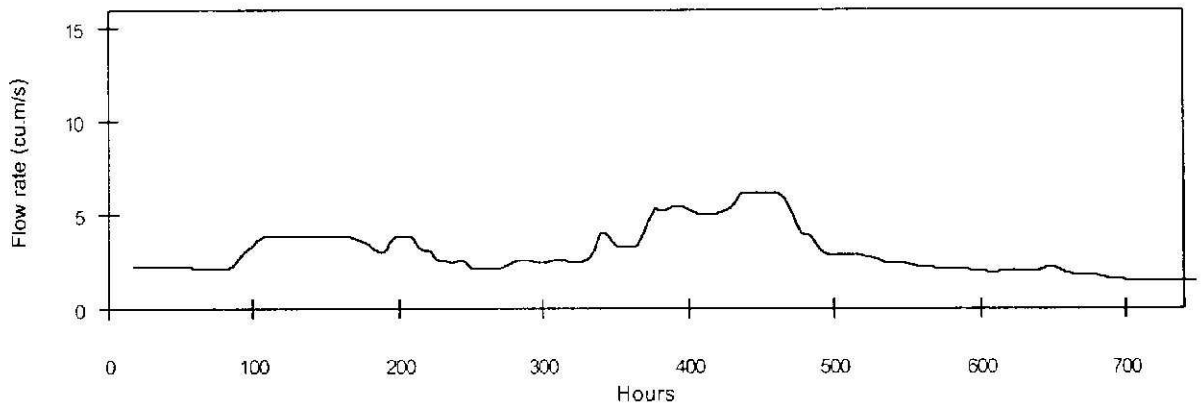


การไหลของน้ำท่าที่สถานี X90 ในฤดูแล้ง (เมษายน-สิงหาคม 2540)

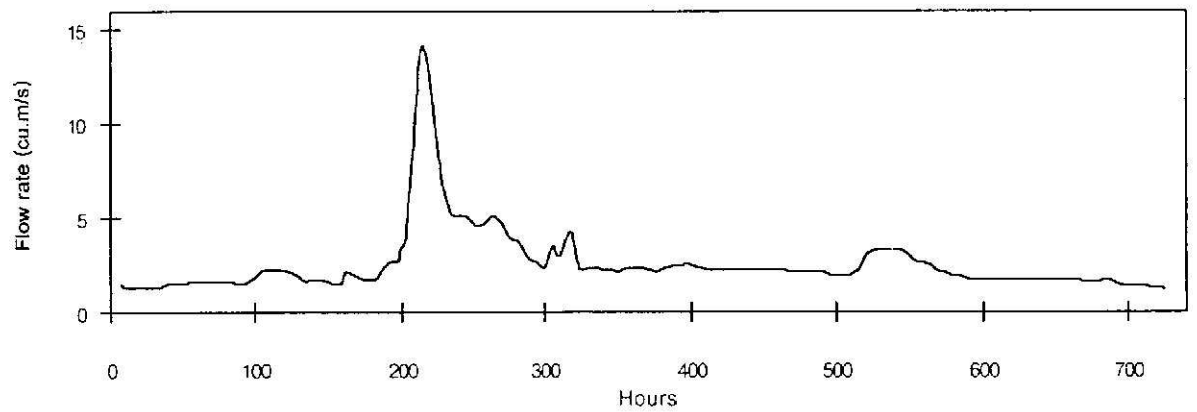
เมษายน



พฤษภาคม

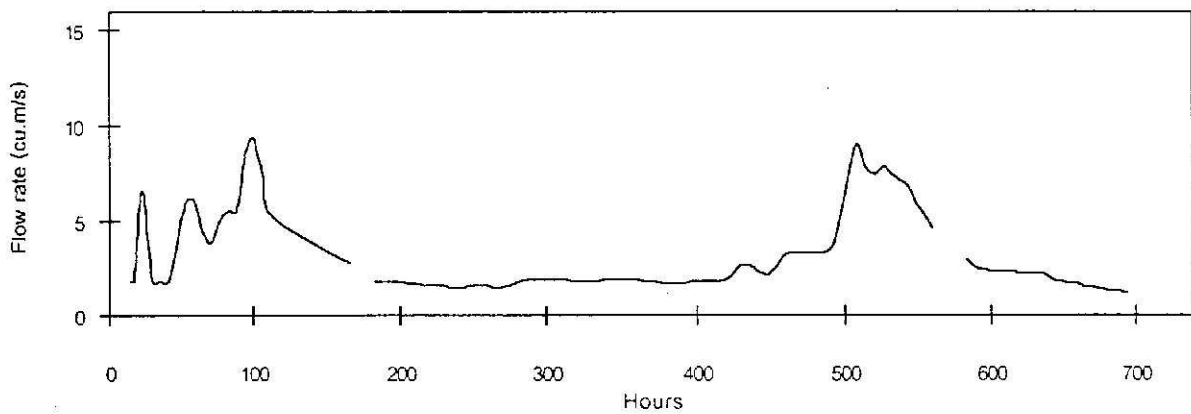


มิถุนายน

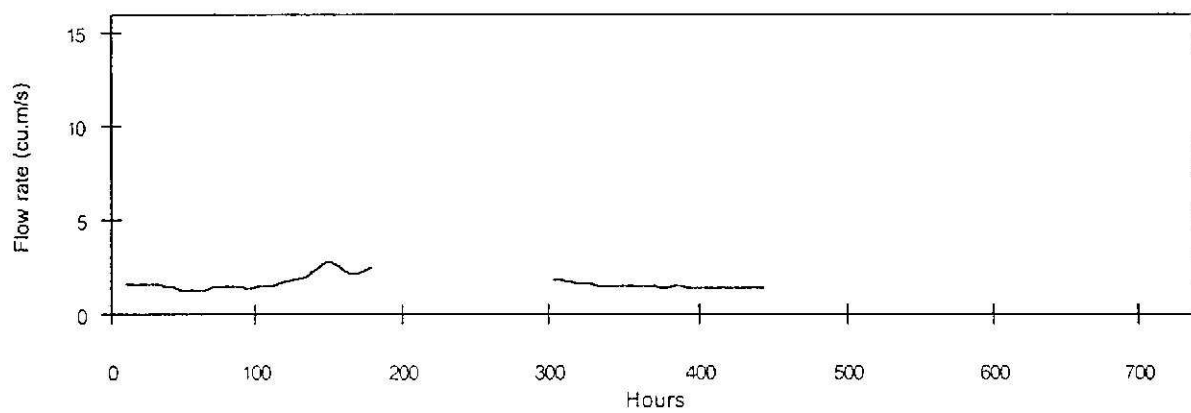


การไหลของน้ำท่าที่สถานี X90 ในฤดูแล้ง (เมษายน-สิงหาคม 2540)

กรกฎาคม

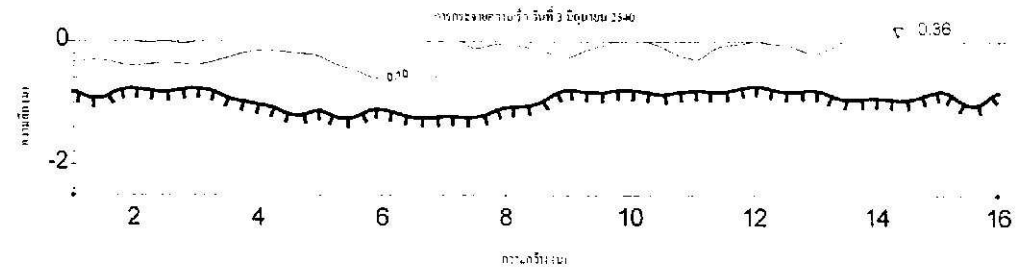
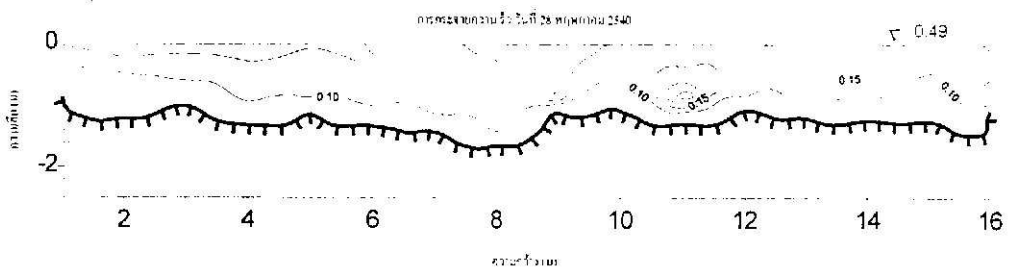
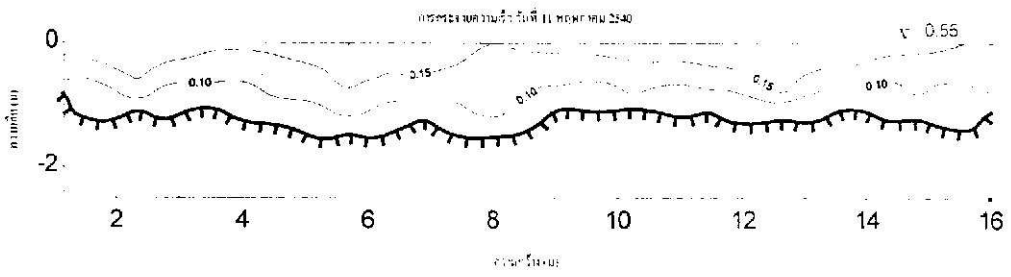
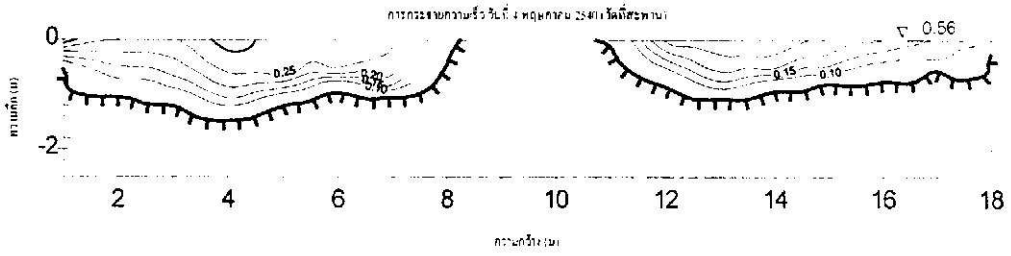


สิงหาคม

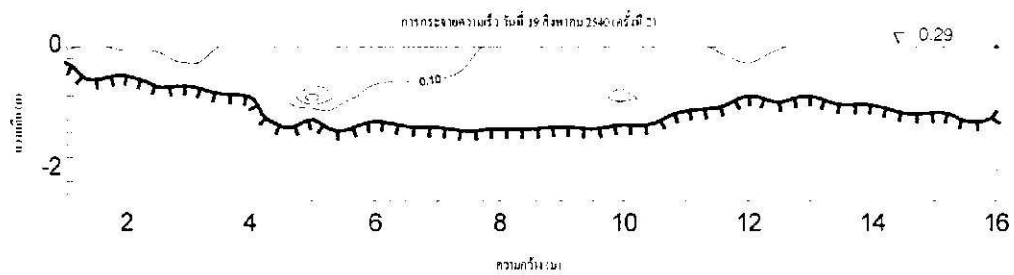
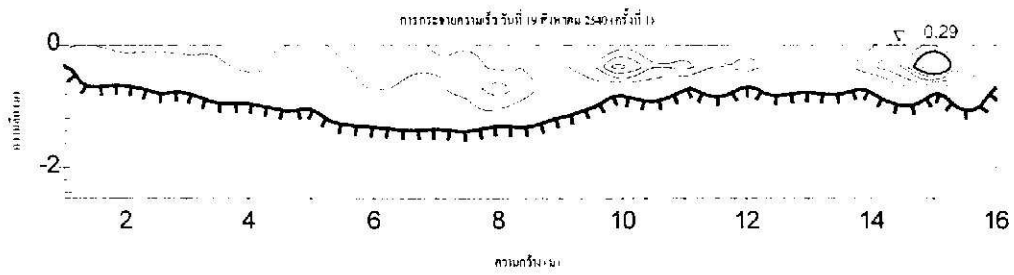
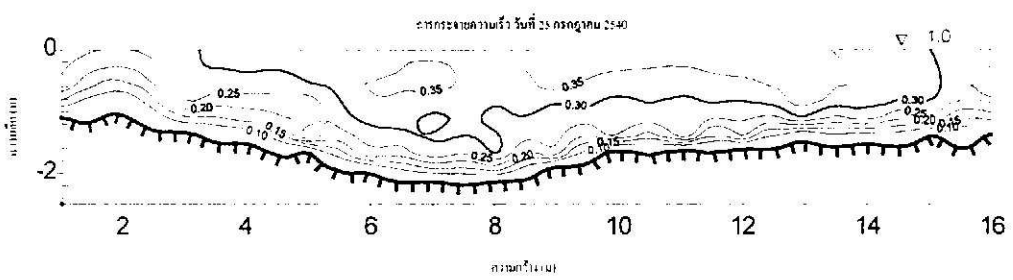
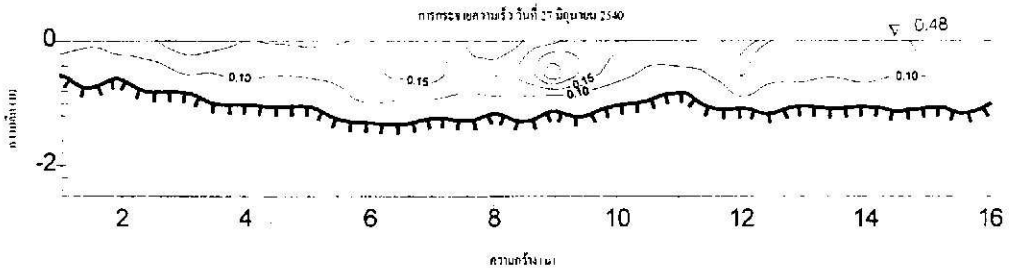


ภาคผนวก จ

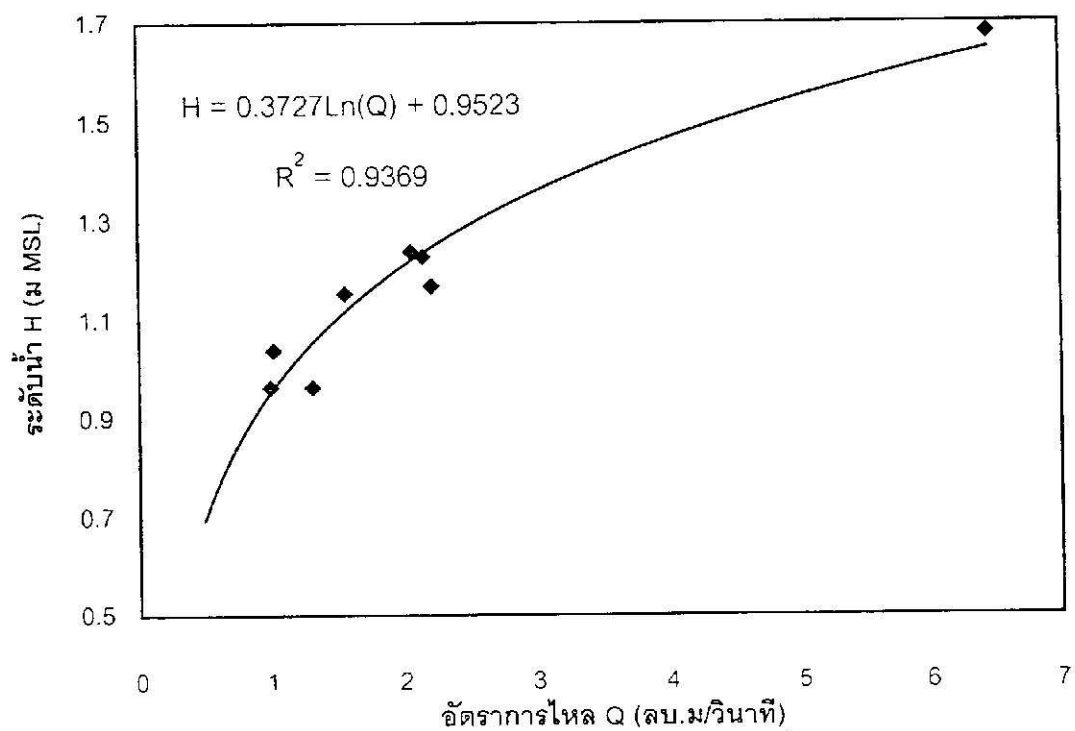
การกระจายความเร็วในคลองอุ้ตะเภาที่สถานี X90 (บ้านบางศาลา)



การกระจายความเร็วในคลองอยู่ตะเภาที่สถานี X90 (บ้านบางศาลา)

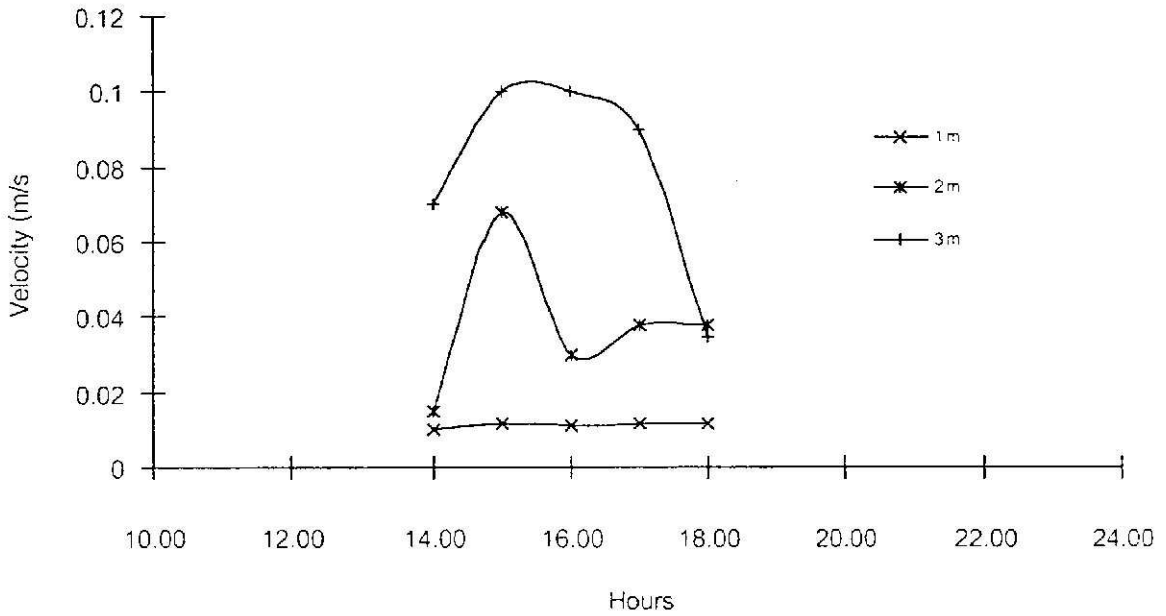


ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลที่สถานี X90 (บ้านบางศาลา)

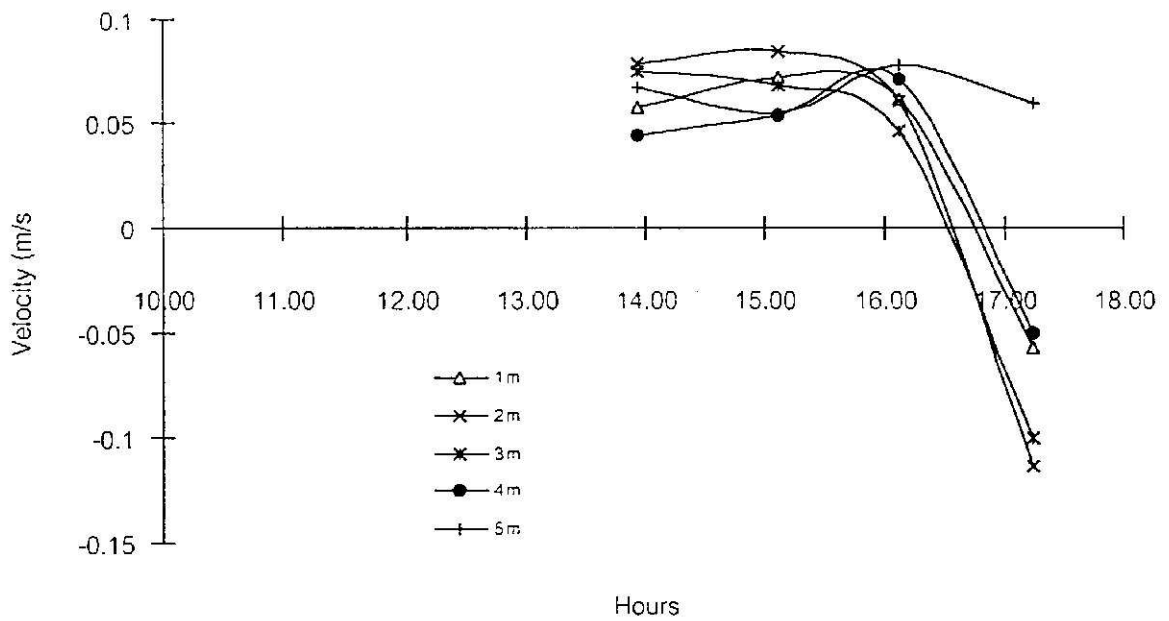


ภาคผนวก ฉ

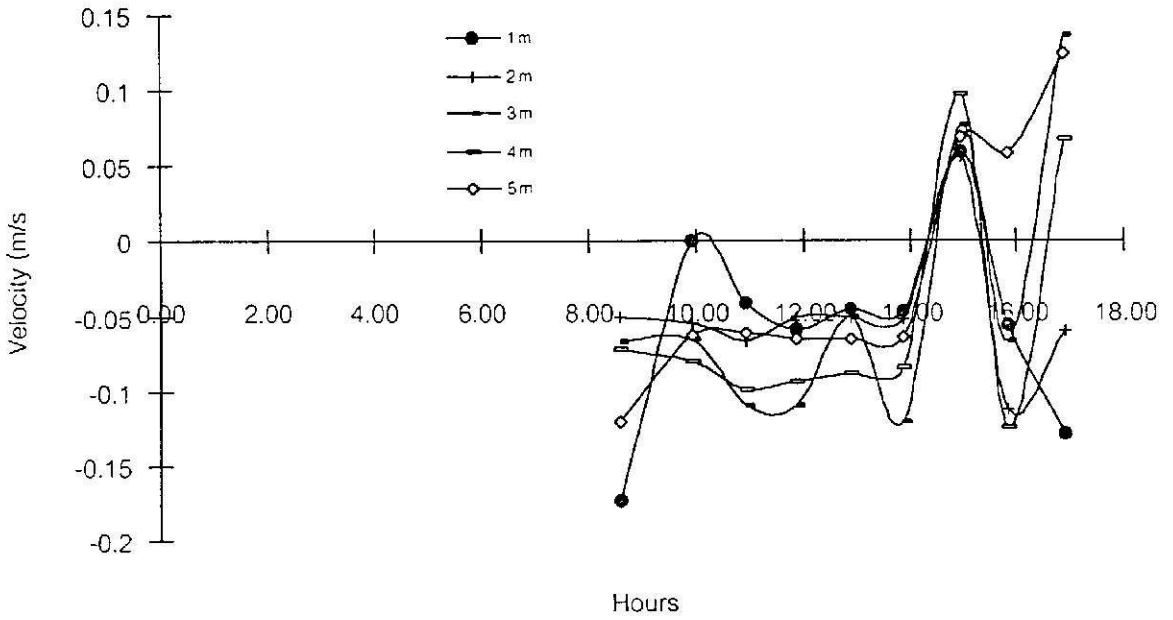
ความเร็วกระแสน้ำที่บ้านคูเต่า 11 พฤษภาคม 2540



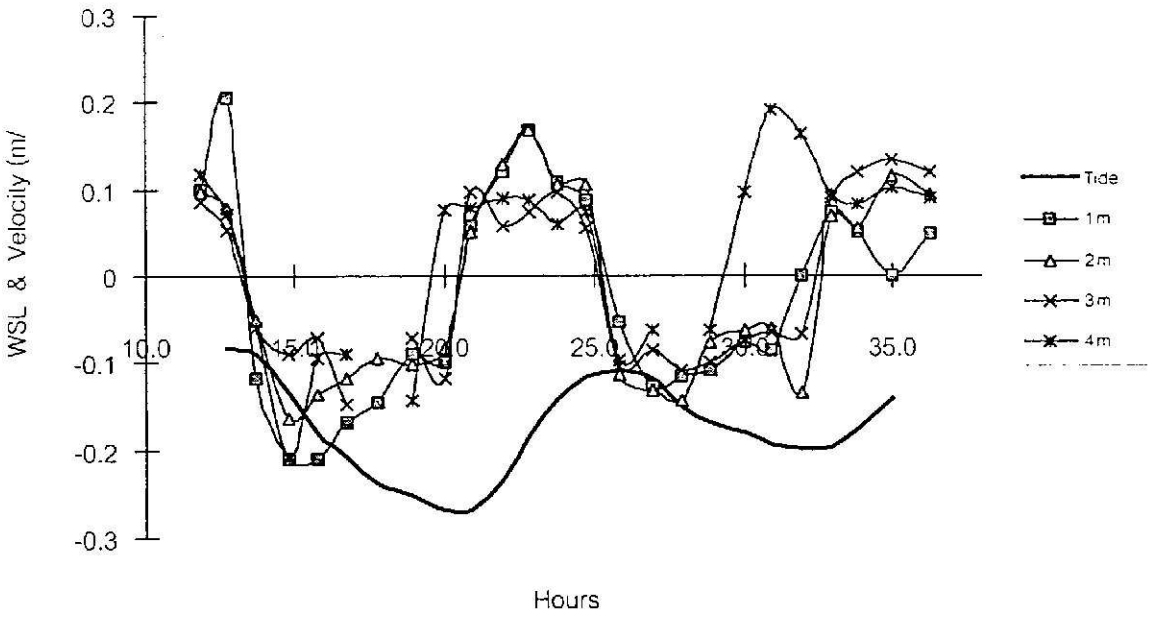
ความเร็วกระแสน้ำที่บ้านนาเรียงนก 11 พฤษภาคม 2540



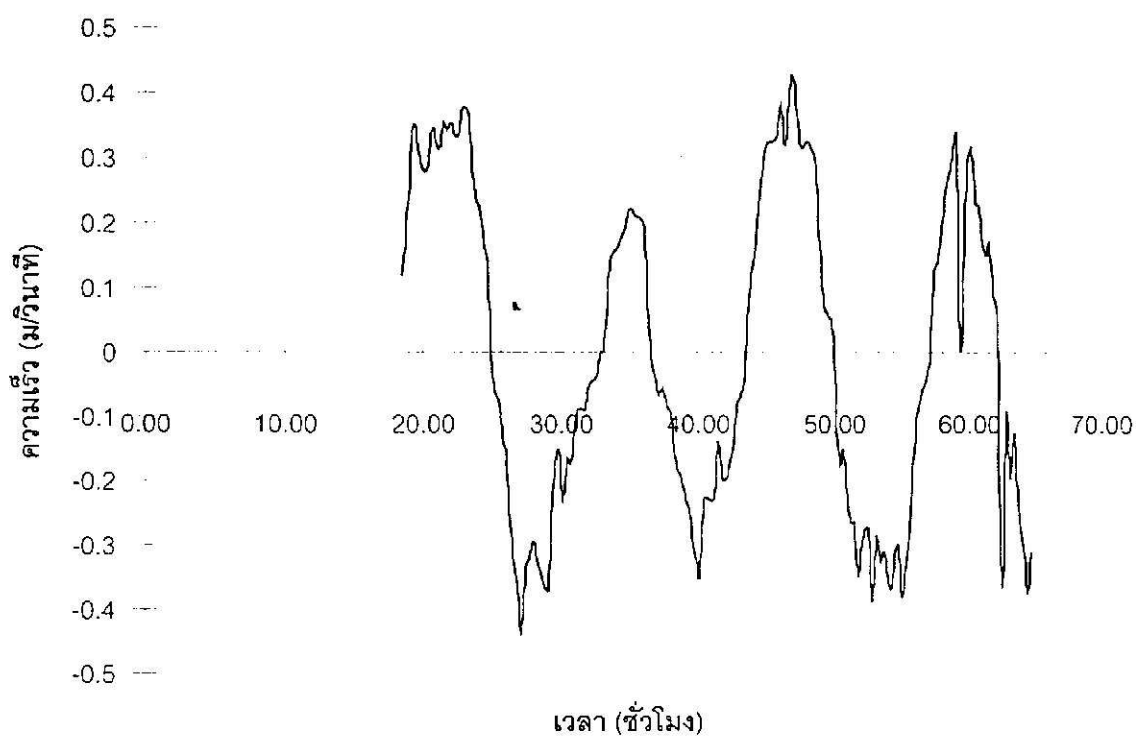
ความเร็วกระแสน้ำที่บ้านนารังนก 31 พฤษภาคม 2540



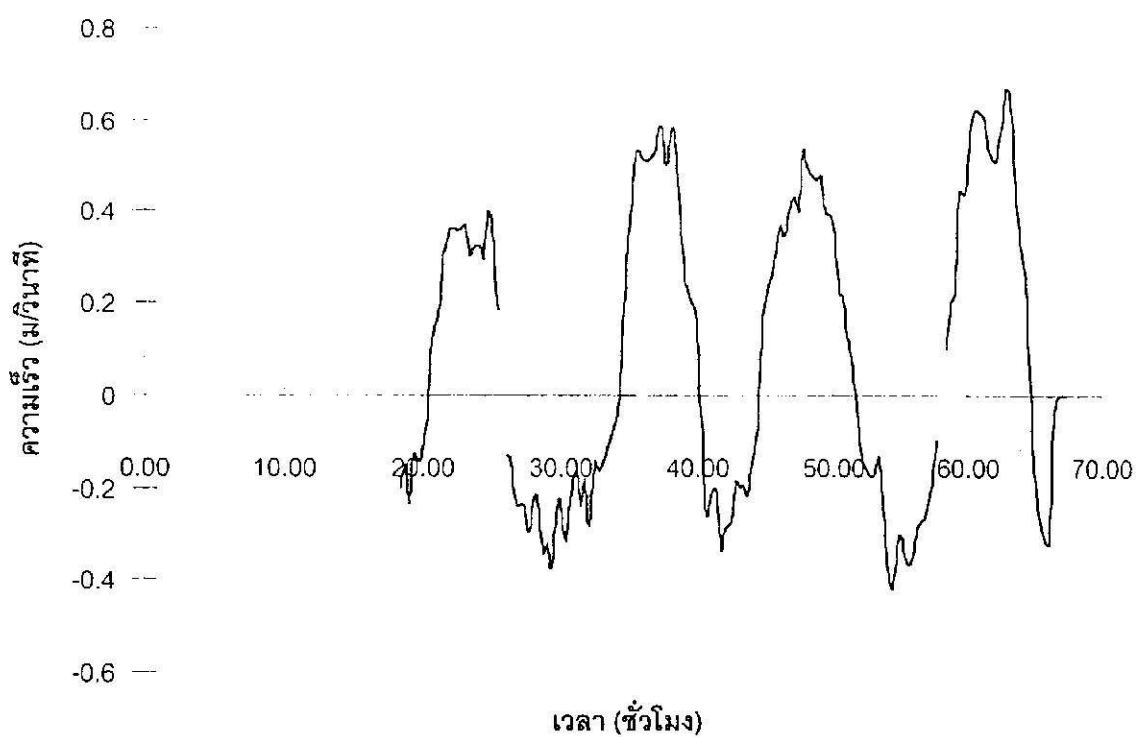
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและความเร็วกระแสน้ำที่บ้านนารังนก 17-18 สิงหาคม 2540



ความเร็วกระแสน้ำที่ความลึก 2 ม วันที่ 28-29 มิถุนายน 2540 ที่ทิศใต้ของเกาะยอ



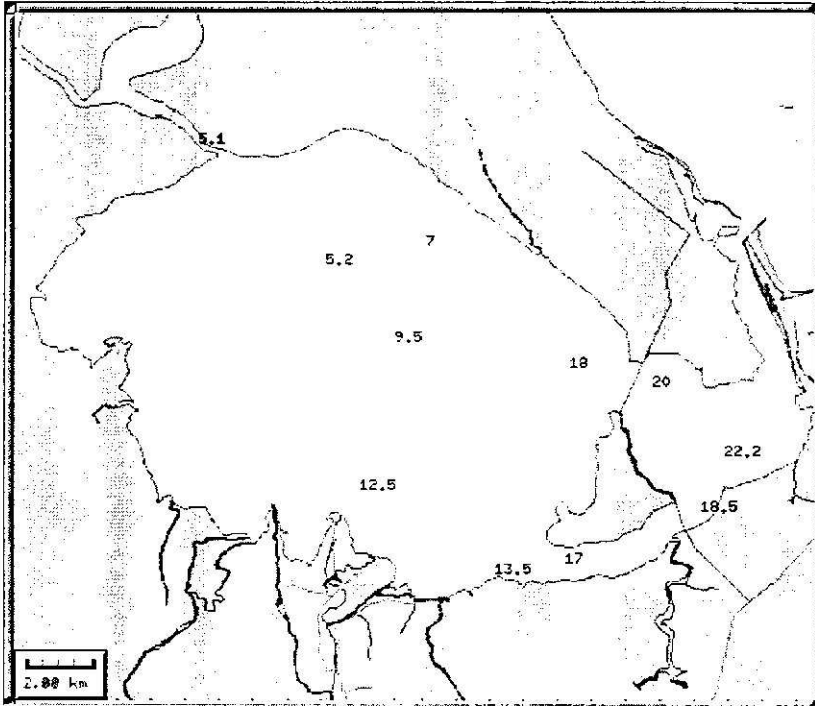
ความเร็วกระแสน้ำที่ความลึก 2 ม วันที่ 29-1 กรกฎาคม 2540 ที่ทิศเหนือของเกาะยอ



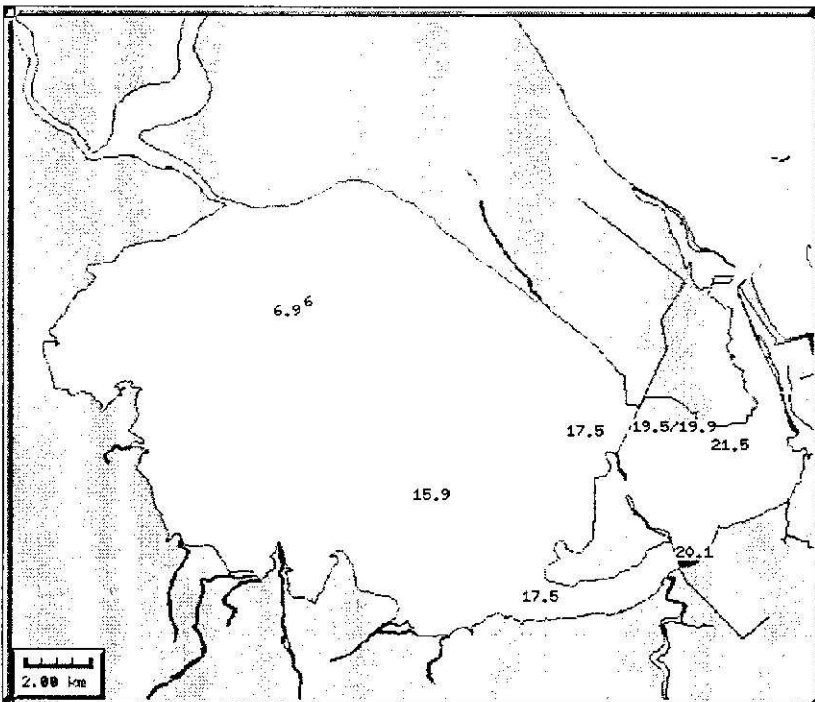
ภาคผนวก ข

การสำรวจความเค็มรายเดือนในทะเลสาบสงขลา

วันที่ 12 เมษายน 2540

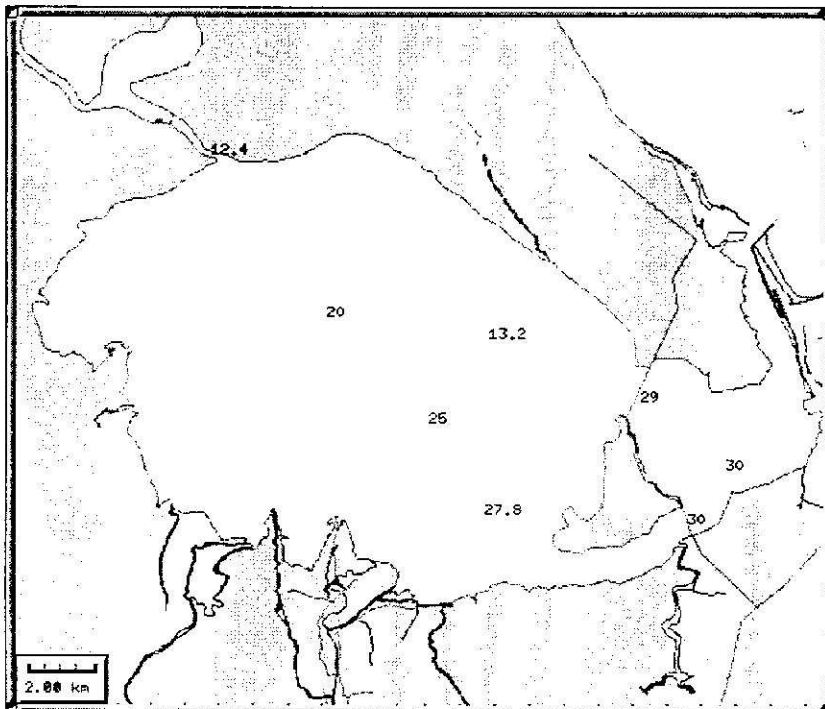


วันที่ 18 พฤษภาคม 2540

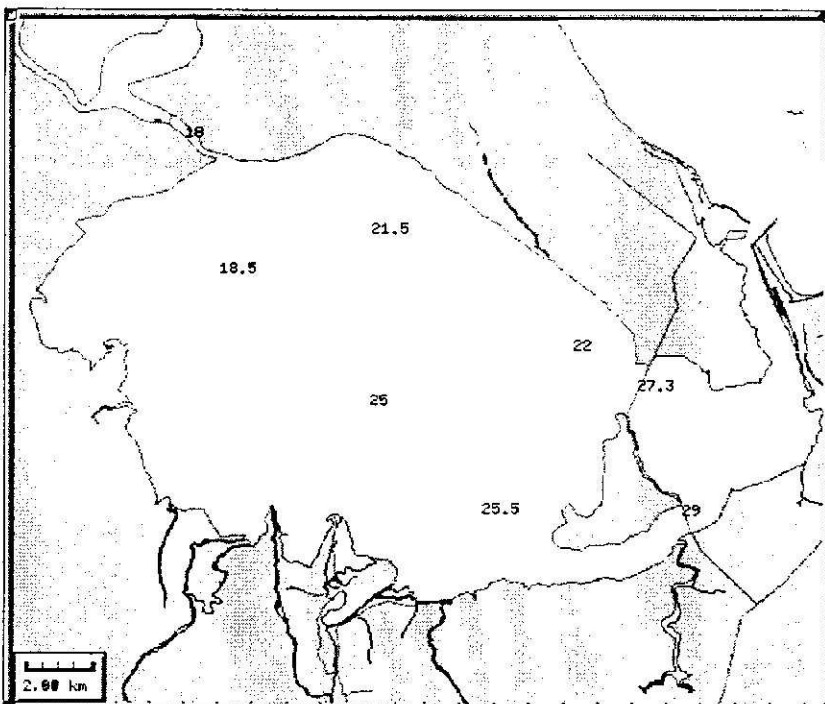


การสำรวจความเค็มรายเดือนในทะเลสาบสงขลา

วันที่ 14 มิถุนายน 2540

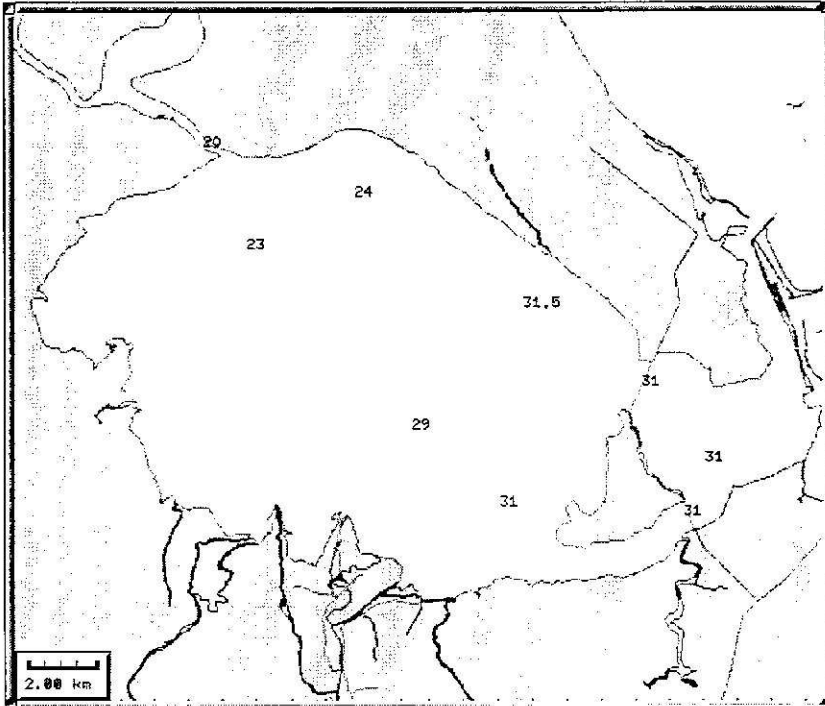


วันที่ 21 มิถุนายน 2540

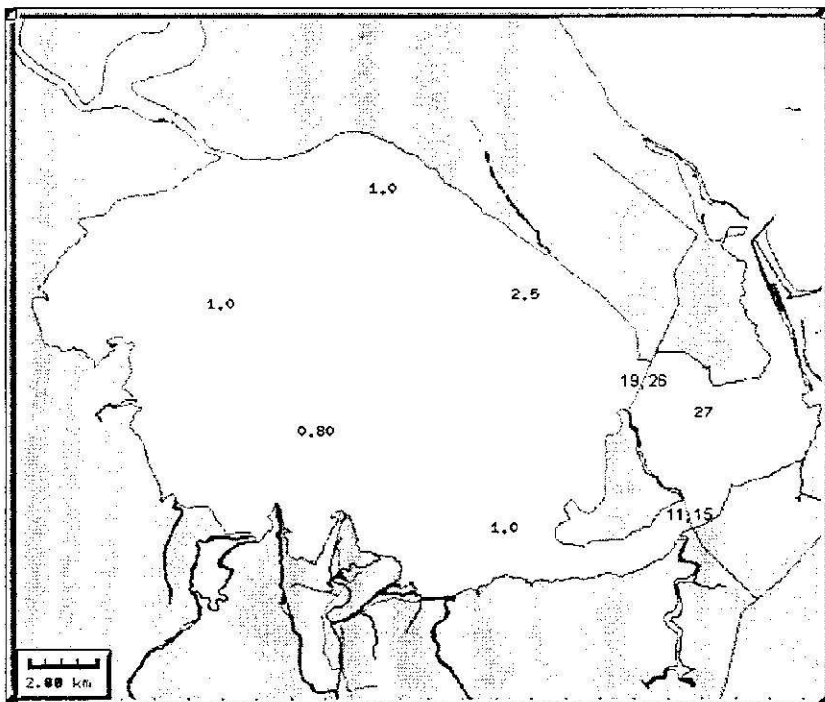


การสำรวจความเค็มรายเดือนในทะเลสาบสงขลา

วันที่ 14 กรกฎาคม 2540

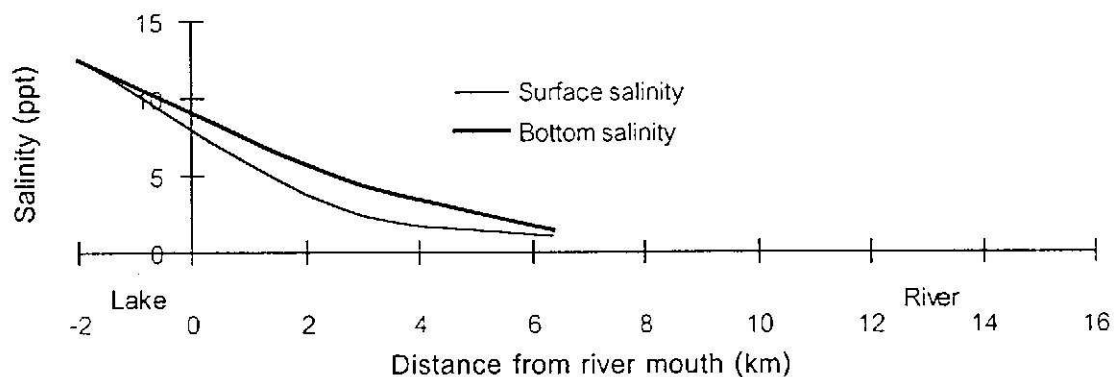


วันที่ 17 ตุลาคม 2540

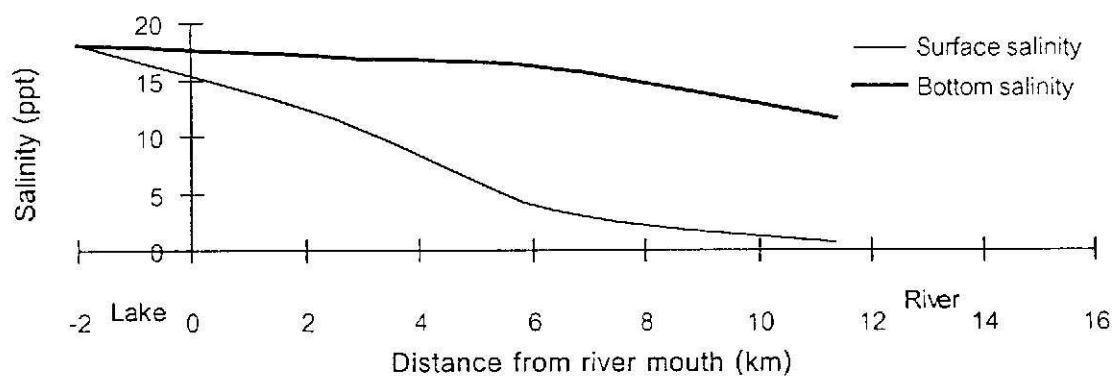


การรุกของน้ำเค็มในคลองอุตะเกา

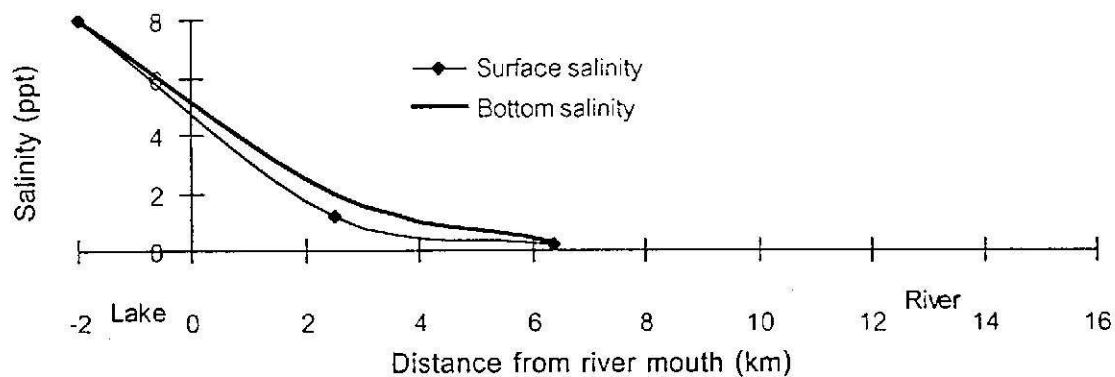
12 เมษายน 2540



4 พฤษภาคม 2540

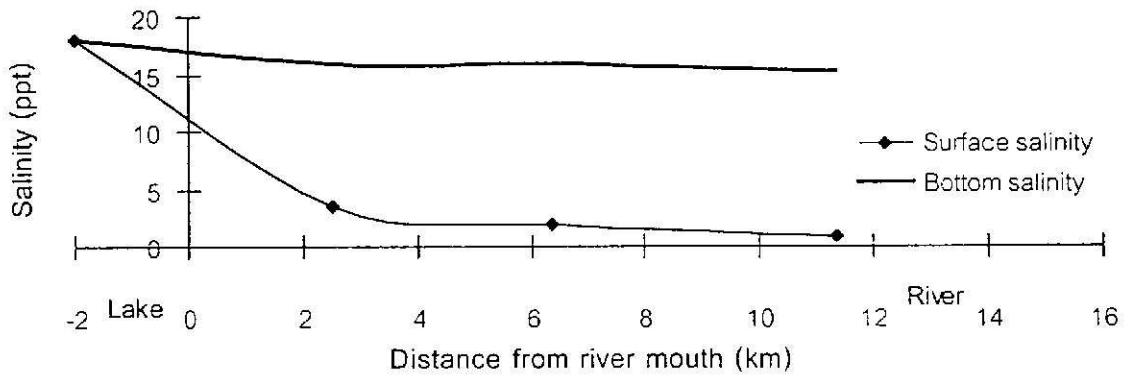


3 มิถุนายน 2540

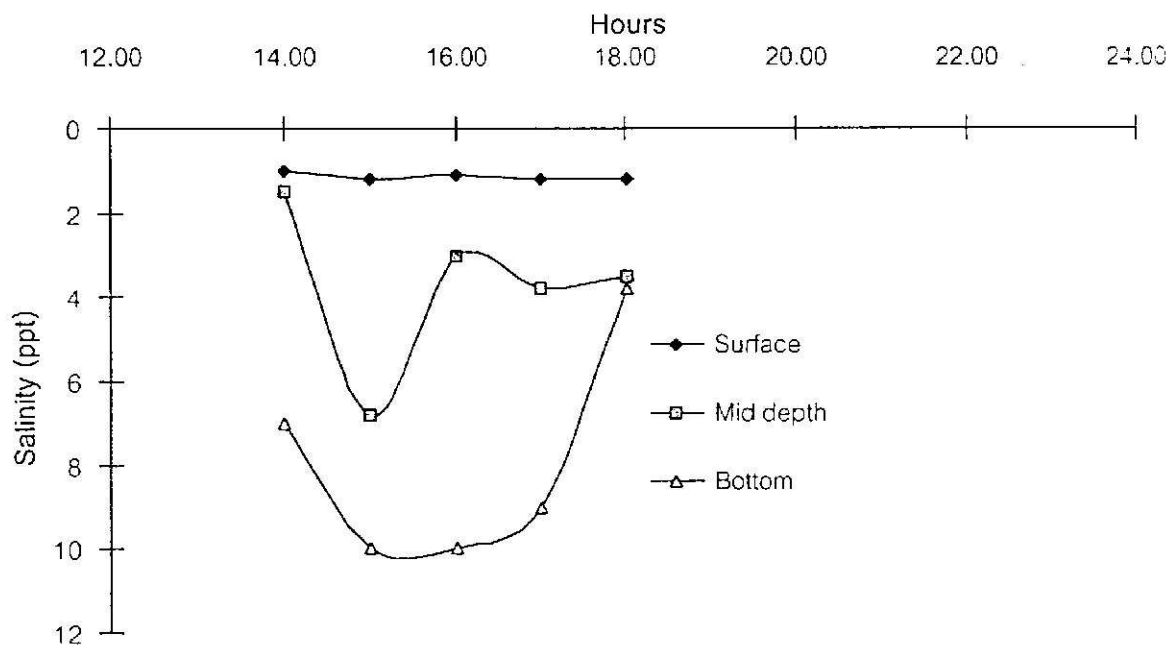


การรุกของน้ำเค็มในคลองอุตะเกา

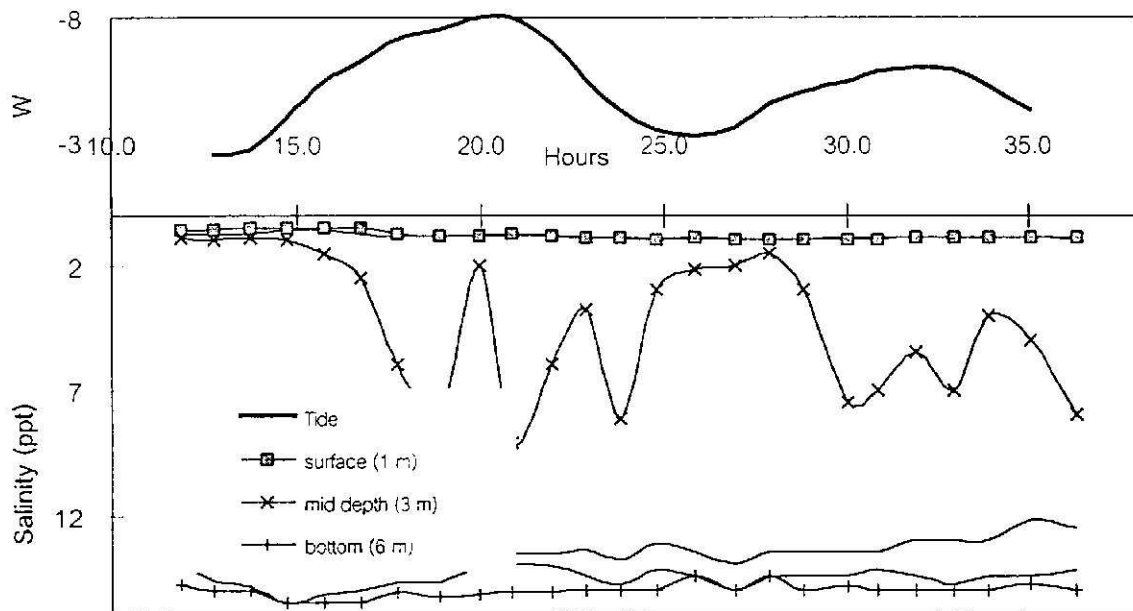
17 สิงหาคม 2540



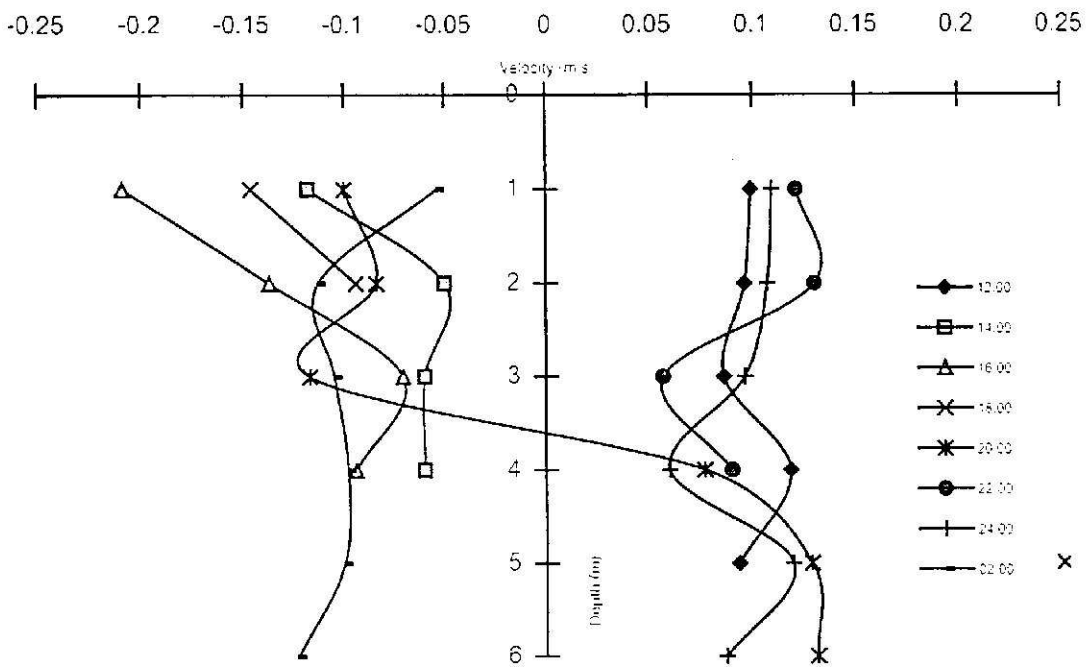
การผันแปรของความเค็มกับเวลาที่บ้านคูเต่า (กม +6) วันที่ 11 พฤษภาคม 2540



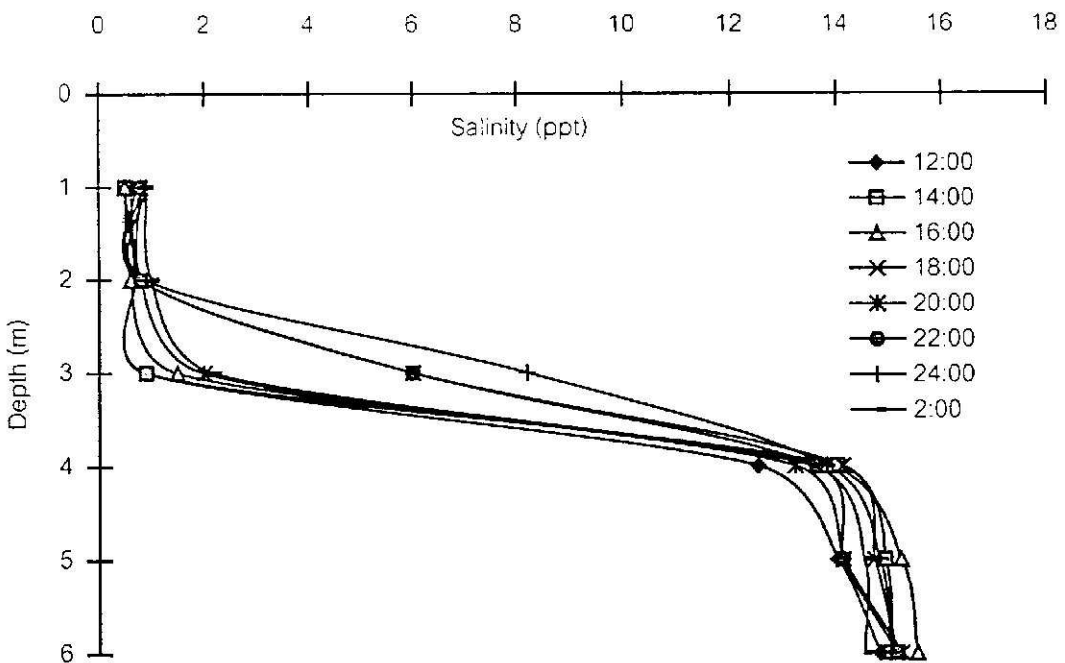
การผันแปรของความเค็มกับเวลาที่บ้านนารังนก (กม +11) วันที่ 17-18 สิงหาคม 2540



ลักษณะของความเร็วในแนวตั้งกับเวลาที่บ้านนารังนวันที่ 17-18 สิงหาคม 2540



ลักษณะของความเค็มในแนวตั้งกับเวลาที่บ้านนารังนวันที่ 17-18 สิงหาคม 2540



ภาคผนวก ฅ

ESTUARINE LONGITUDINAL DISPERSION COEFFICIENTS

Dispersion coefficient

Estuary	Flow (cfs)	(m^2/day)	Reference
Hudson River, NY	5000	20	Hydroscience (1971)
East River, NY	0	10	Hydroscience (1971)
Cooper River, SC	10000	30	Hydroscience (1971)
South River, NJ	23	5	Hydroscience (1971)
Houston Ship Channel, TX	900	27	Hydroscience (1971)
Cape Fear River, NC	1000	2-10	Hydroscience (1971)
Compton Creek, NJ	10	1	Hydroscience (1971)
Wappinger and Fishkill Creek, NY	2	0.5-1	Hydroscience (1971)
River Foyle, N. Ireland	250	5	Hydroscience (1971)
Delaware River, upper		2-7	Thomann (1972)
Delaware River, lower		7-11	Thomann (1972)
Potomac River, upper		0.6-6	Thomann (1972)
Potomac River, lower		6-10	Thomann (1972)
Narrows of Mercey		4.4-12	Tetra-Tech (1978)
San Francisco Bay, southern		0.6-6	Tetra-Tech (1978)
San Francisco Bay, northern		1.5-62	Tetra-Tech (1978)
Rio Quayas, Ecuador		25	Fischer et al. (1979) Thames River, England, low flow
Thames River, England, high flow		1.8-2.8	Fischer et al. (1979)
Thames River, England, high flow		11	Fischer et al. (1979)

ที่มา : Thomann, R.V. and Mueller J.A., 19--

สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ ในรูปของ Curvilinear Coordinates

พิกัดในแนวนอนจาก physical coordinates สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของ curvilinear coordinates (ξ, η) (Spaulding, 1984 และ Swanson, 1986) ได้ดังนี้

กฎทรงมวลของสาร

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{Jr \cos \theta} \frac{\partial (U H J \cos \theta)}{\partial \xi} + \frac{1}{Jr \cos \theta} \frac{\partial (V H J \cos \theta)}{\partial \eta} - \frac{V H \tan \theta}{r} = 0$$

สมการโมเมนตัมในแนว ξ

$$\begin{aligned} \frac{\partial U H}{\partial t} + \frac{1}{J^2 r \cos^2 \theta} \theta_{\eta} \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \phi_{\xi} + U V H J \phi_{\eta}))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \phi_{\xi} + V V H J \phi_{\eta}))}{\partial \eta} \right] \\ - \frac{1}{J^2 r \cos^2 \theta} \phi_{\eta} \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \theta_{\xi} + U V H J \theta_{\eta}))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \theta_{\xi} + V V H J \theta_{\eta}))}{\partial \eta} \right] \\ = \frac{\tau_{b\xi}}{\rho_0} \end{aligned}$$

สมการโมเมนตัมในแนว η

$$\begin{aligned} \frac{\partial V H}{\partial t} - \frac{1}{J^2 r \cos^2 \theta} \theta_{\xi} \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \phi_{\xi} + U V H J \phi_{\eta}))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \phi_{\xi} + V V H J \phi_{\eta}))}{\partial \eta} \right] \\ - \frac{1}{J^2 r \cos^2 \theta} \phi_{\xi} \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \theta_{\xi} + U V H J \theta_{\eta}))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (U V H J \theta_{\xi} + V V H J \theta_{\eta}))}{\partial \eta} \right] \\ = \frac{\tau_{b\eta}}{\rho_0} \end{aligned}$$

เมื่อ U, V = contra-variance velocities in ξ and η -direction

$$J = \text{Jacobian} = \phi_{\xi} \theta_{\eta} - \phi_{\eta} \theta_{\xi}$$

สมการการเคลื่อนที่ของความเค็มแบบ 2 มิติ ในรูปของ curvilinear Coordinates

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{1}{Jr} \frac{\partial (U \partial s)}{\partial \xi} + \frac{1}{Jr} \frac{\partial (V \partial s)}{\partial \eta} = \frac{D_H}{J^2 r^2 \cos^2 \theta} (G_{22} s_{\xi\xi}^2 - 2G_{12} s_{\xi\eta} + G_{11} s_{\eta\eta}) - D_H \tan \theta \frac{\partial s}{\partial \theta}$$

เมื่อ G_{ij} คือ metric coefficients

$$G_{11} = \theta_{\xi}^2 + \phi_{\xi}^2 \cos^2 \theta$$

$$G_{12} = \theta_{\xi} \theta_{\eta} + \phi_{\xi} \phi_{\eta} \cos^2 \theta$$

$$G_{22} = \theta_{\eta}^2 + \phi_{\eta}^2 \cos^2 \theta$$

แบบจำลองทางอุทกศาสตร์แบบ 3 มิติ (3-D curvilinear coordinate model of hydrodynamics)

สมการสมุทรศาสตร์แบบ 3 มิติ ในที่นี้ เลือกใช้ coordinates ใน 2 ลักษณะคือ ในแนวตั้งเป็น sigma coordinate (σ) และในแนวนอนเป็น curvilinear coordinates รายละเอียดของสมการที่ได้จากการ transformation แล้วมีดังนี้

กฎทรงมวลของสาร

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{Jr \cos \theta} \frac{\partial (UHJ \cos \theta)}{\partial \xi} + \frac{1}{Jr \cos \theta} \frac{\partial (VHJ \cos \theta)}{\partial \eta} - \frac{VH \tan \theta}{r} + \frac{\partial wH}{\partial \sigma} = 0$$

$$\text{เมื่อ } \sigma = \frac{(z + \zeta)}{H}$$

$$w = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{H} (w - \sigma \frac{dH}{dt} + \frac{d\zeta}{dt})$$

สมการโมเมนตัมในแนว ξ

$$\begin{aligned} \frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{1}{Jr \cos^2 \theta} \theta_\eta \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (uuHJ\phi_\xi + uvHJ\phi_\eta))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (uvHJ\phi_\xi + vvHJ\phi_\eta))}{\partial \eta} \right] \\ - \frac{1}{Jr \cos^2 \theta} \phi_\eta \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (uuHJ\theta_\xi + uvHJ\theta_\eta))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (uvHJ\theta_\xi + vvHJ\theta_\eta))}{\partial \eta} \right] \\ = - \frac{H}{\rho_o r \cos \theta} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{3\tau r \xi}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \tau r \xi}{\partial \sigma} \end{aligned}$$

สมการโมเมนตัมในแนว η

$$\begin{aligned} \frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{1}{Jr \cos^2 \theta} \theta_\xi \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (uuHJ\phi_\xi + uvHJ\phi_\eta))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (uvHJ\phi_\xi + vvHJ\phi_\eta))}{\partial \eta} \right] \\ - \frac{1}{Jr \cos^2 \theta} \phi_\xi \left[\frac{\partial (\cos^2 \theta (uuHJ\theta_\xi + uvHJ\theta_\eta))}{\partial \xi} + \frac{\partial (\cos^2 \theta (uvHJ\theta_\xi + vvHJ\theta_\eta))}{\partial \eta} \right] \\ = - \frac{H}{\rho_o r \cos \theta} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{3\tau r \eta}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \tau r \eta}{\partial \sigma} \end{aligned}$$

ตัวแปรในสมการมีความหมายดังต่อไปนี้

u, v = contra-variance velocities in ξ and η -direction

w = vertical velocity in σ -direction

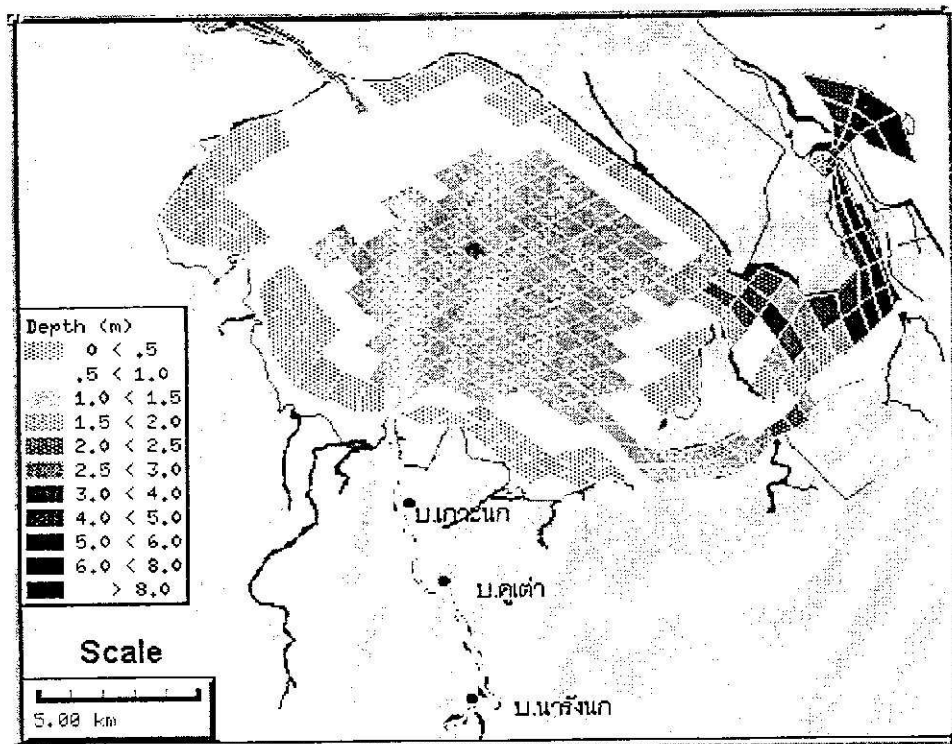
แบบจำลองการเคลื่อนที่ของความเค็มแบบ 3 มิติ (3-D model of salt transport)

ในรูปของ curvilinear coordinates คือ

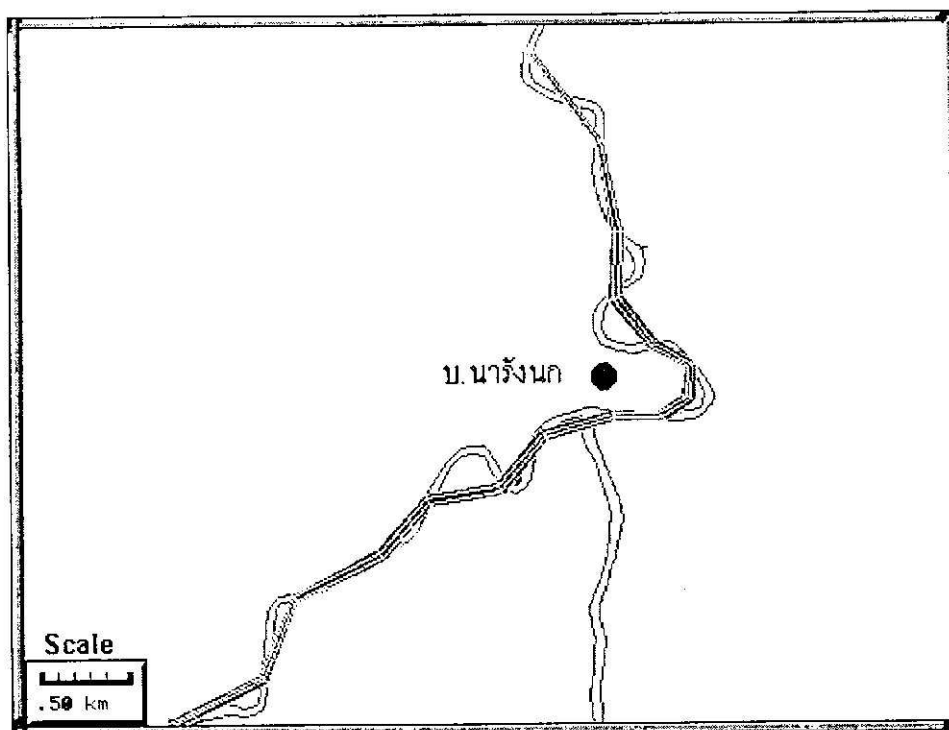
$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{1}{Jr} \frac{\partial s J}{\partial \xi} + \frac{1}{Jr} \frac{\partial s J}{\partial \eta} + \frac{1}{H} \frac{\partial s}{\partial \sigma} = \frac{D_H}{Jr^2 \cos^2 \theta} (G_{22} s_{\xi\xi} - 2G_{12} s_{\xi\eta} + G_{11} s_{\eta\eta}) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} (D_z \frac{\partial s}{\partial \sigma}) + \frac{2D_z}{rH} \frac{\partial s}{\partial \sigma} - \frac{D_H \tan \theta}{r} \frac{\partial s}{\partial \theta}$$

ภาคผนวก ฎ

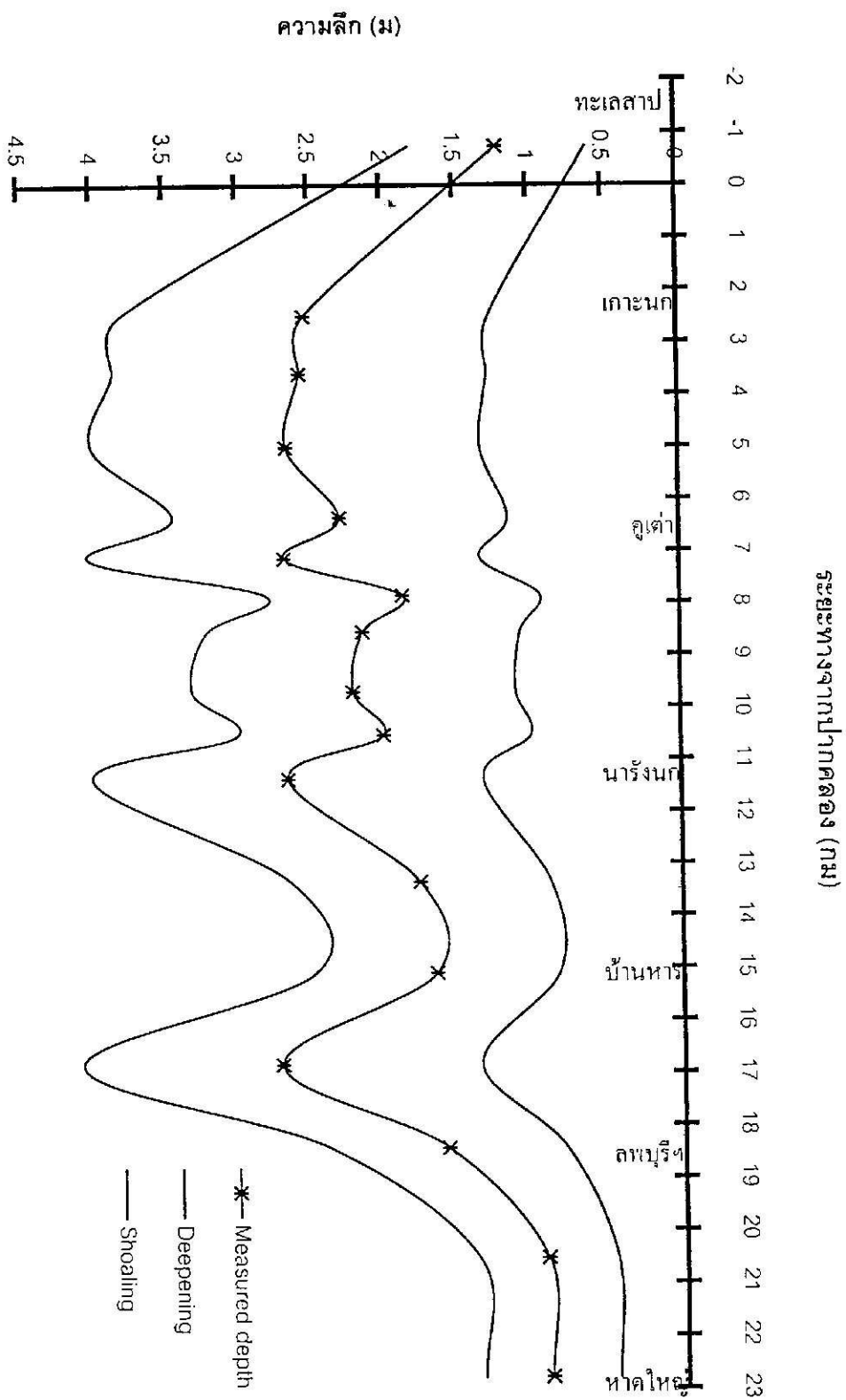
ขอบเขตของแบบจำลอง (Model domain)



แบบจำลองในส่วนของคลองอู่ตะเภา



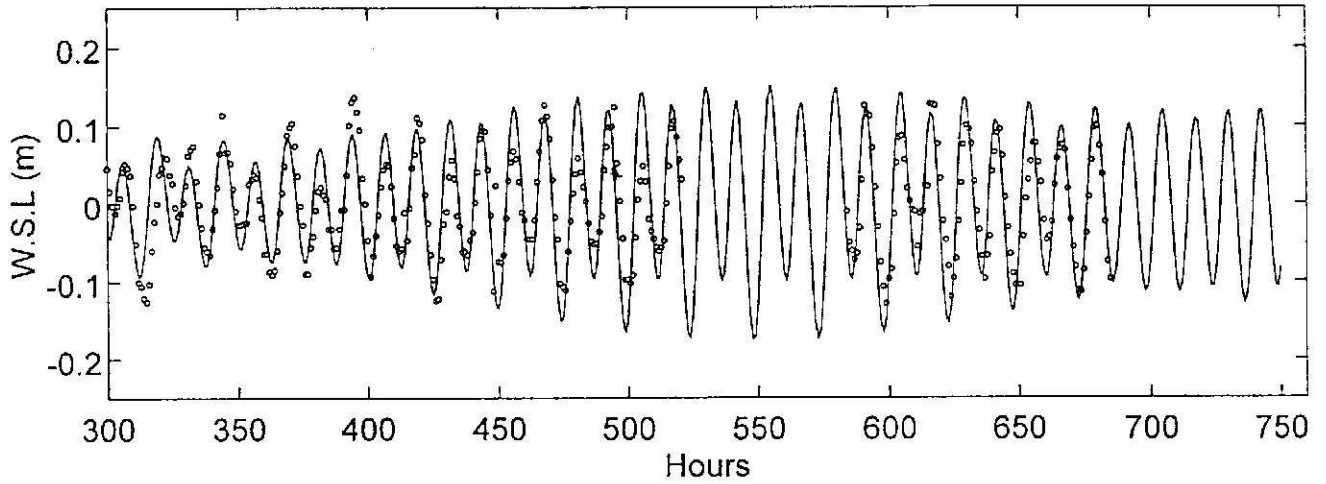
ความลึกที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์



การเปรียบเทียบระดับน้ำระหว่างผลการคำนวณ (-) กับการวัด (.) ในทะเลสาบสงขลา

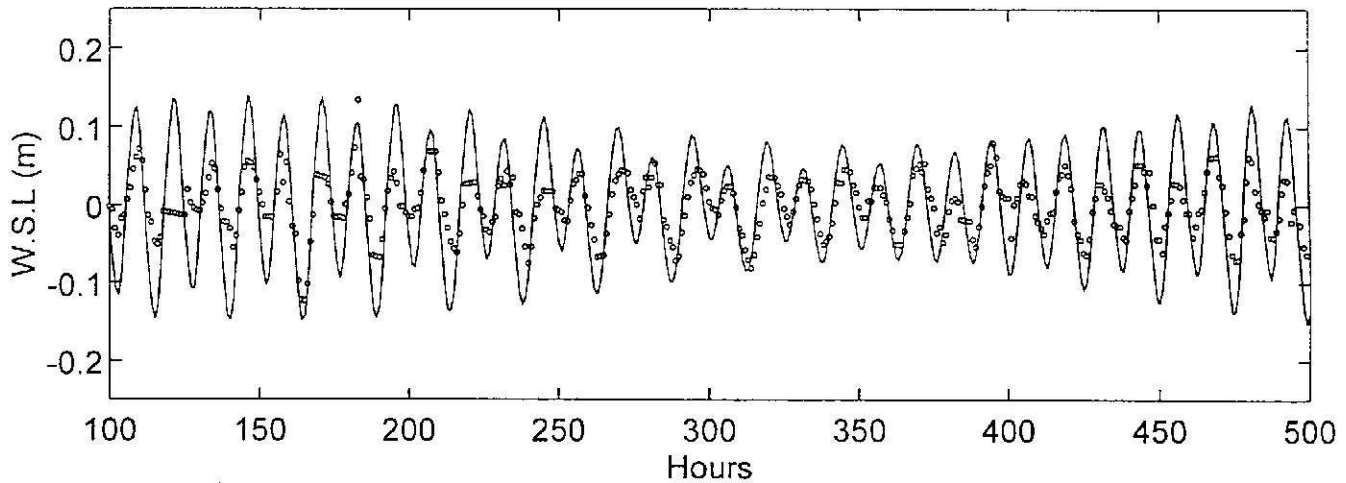
ที่แหลมโพธิ์ เดือนมิถุนายน 2540

Predicted (-) and observed (.) water surface elevation at Laem Po, June 15-31, 1997



ที่ช่องแคบปากกรอ เดือนมิถุนายน 2540

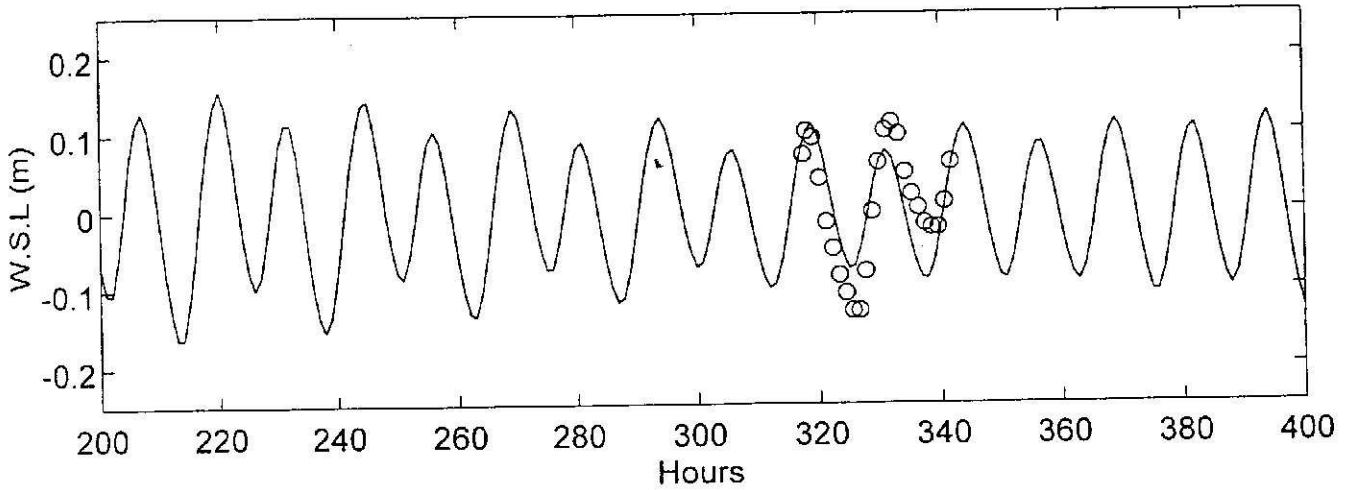
Predicted (-) and observed (.) water surface elevation at Pak Ro, June 5-20, 1997



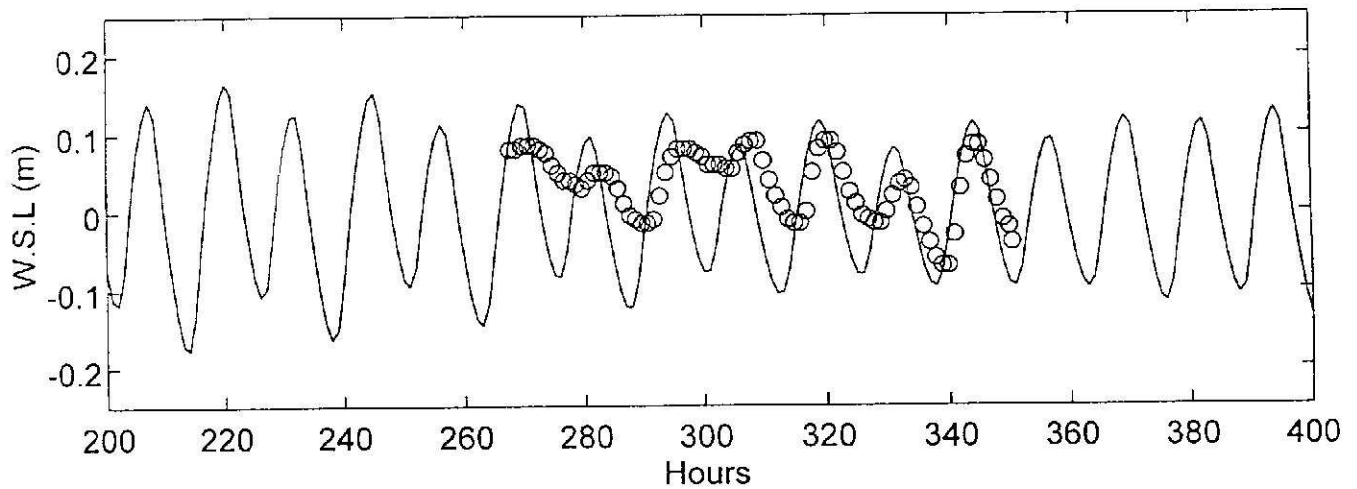
การเปรียบเทียบระดับน้ำระหว่างผลการคำนวณ (-) กับการวัด (.) ในคลองอุตะเถา

ที่บ้านหาร วันที่ 17 สิงหาคม 2540

Water surface elevation at Ban Harn, August 17, 1995



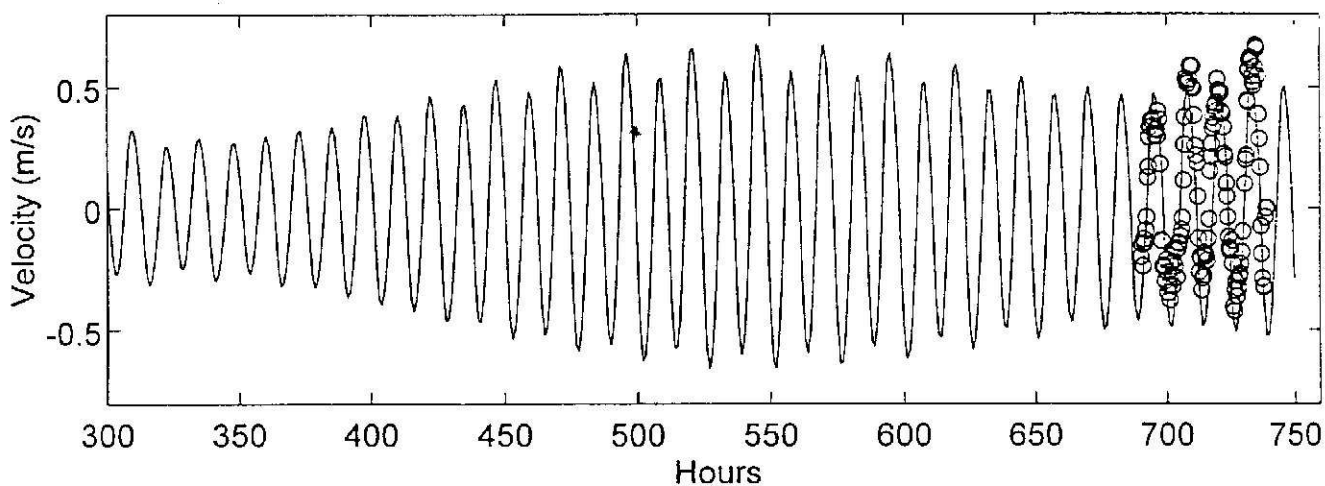
ที่อำเภอหาดใหญ่



การเปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำระหว่างการคำนวณ (-) กับการวัด (o)

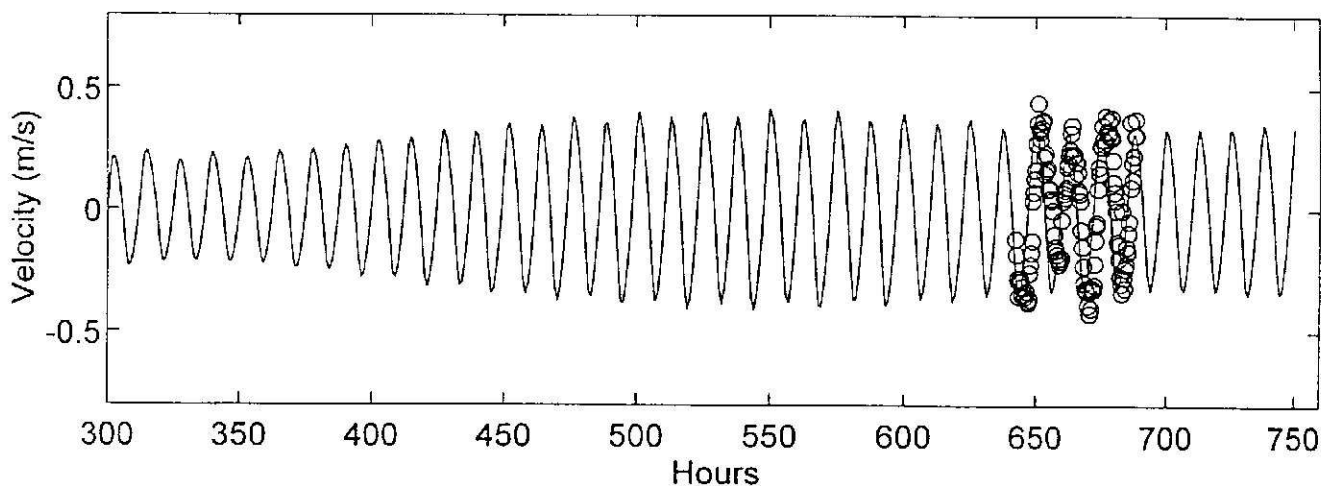
ที่ร่องน้ำทิศใต้ของเกาะยอ (27-29 มิถุนายน 2540)

Predicted (-) and observed (o) velocity at north channel of Koyo, June 29-July 1, 1997



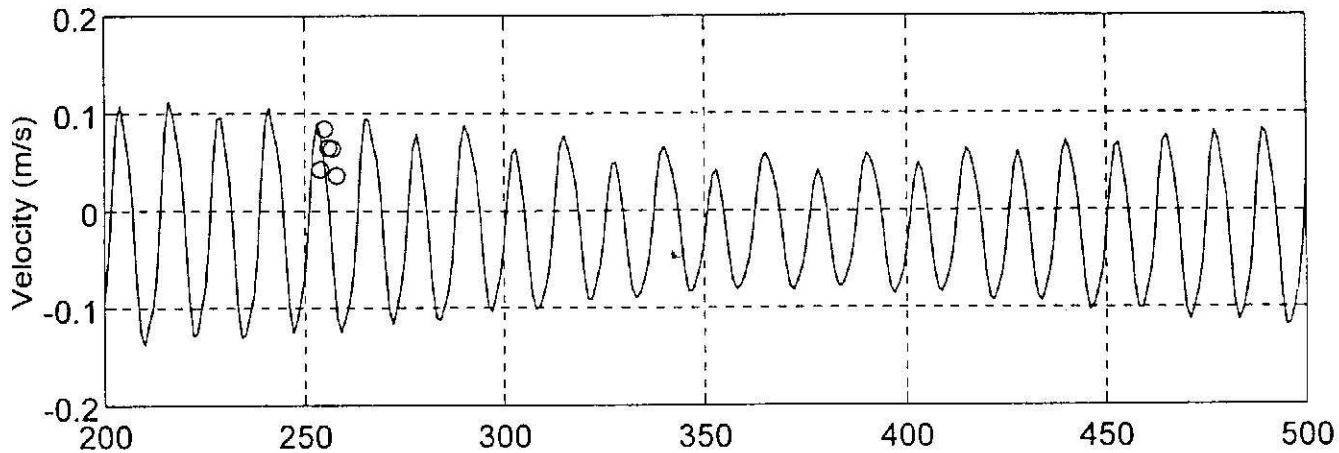
ที่ร่องน้ำทิศเหนือของเกาะยอ (29-30 มิถุนายน 2540)

Predicted (-) and observed (o) velocity at south channel of Koyo, June 27-29, 1997



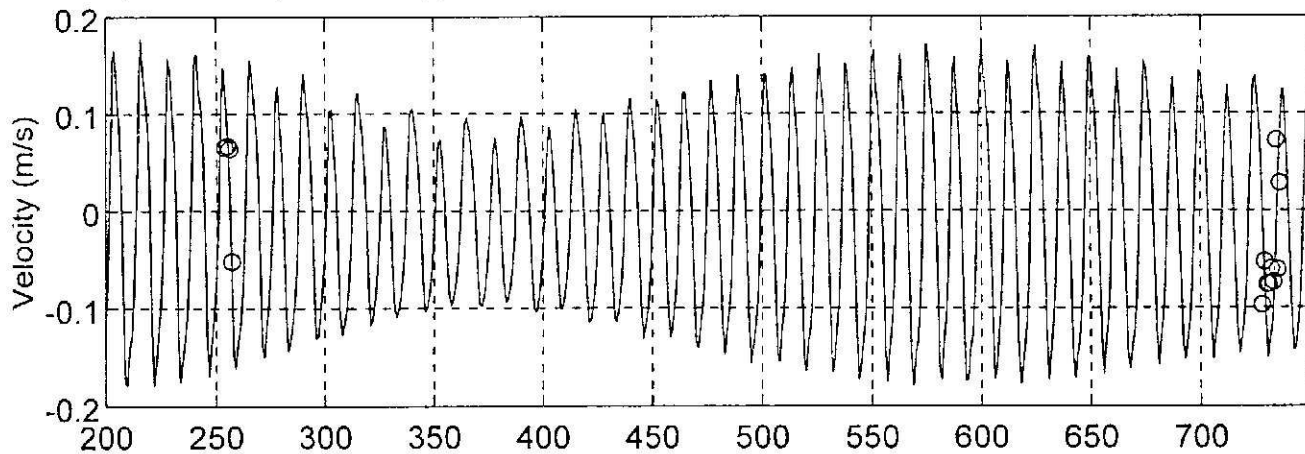
การเปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำระหว่างการคำนวณ (-) กับการวัด (.)

ที่บ้านคูเต่า (11 พฤษภาคม 2540)



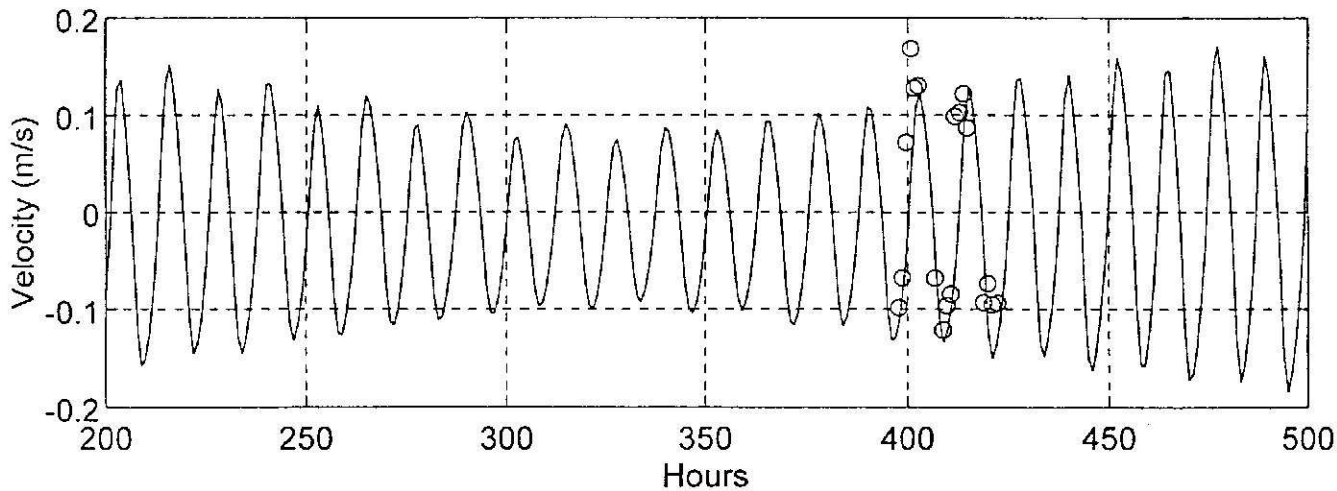
ที่บ้านนารังนก (11 และ 31 พฤษภาคม 2540)

Comparison of predicted (-) and observed (o) velocity at Na Rang Nok, May 11 & 31, 1997



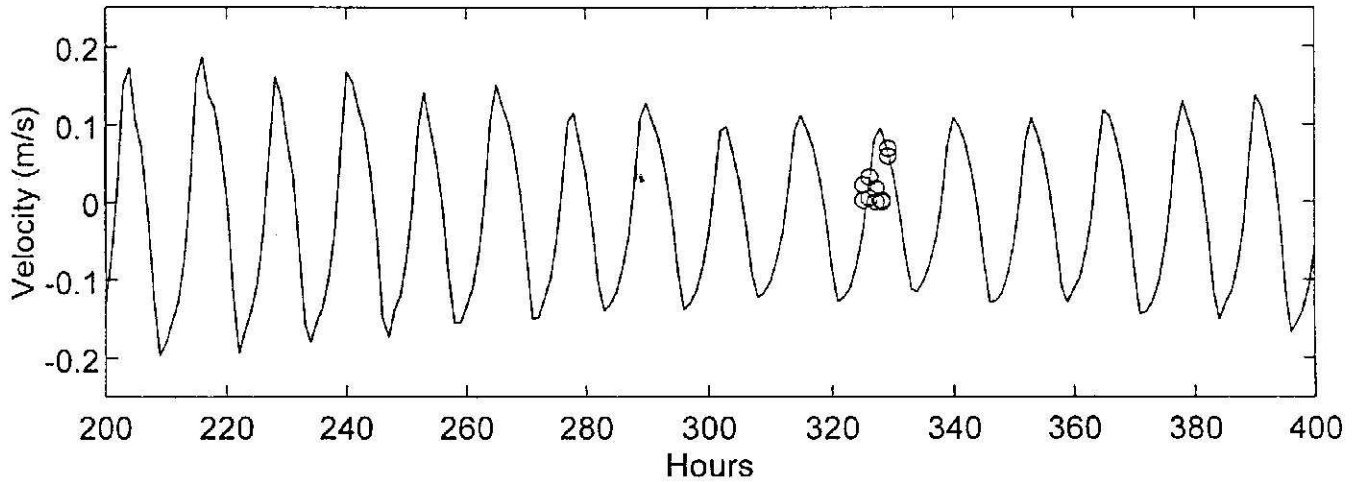
ที่บ้านนารังนก (17-18 สิงหาคม 2540)

Comparison of predicted (-) and observed (o) velocity at Na Rang Nok, August 17-18, 1997



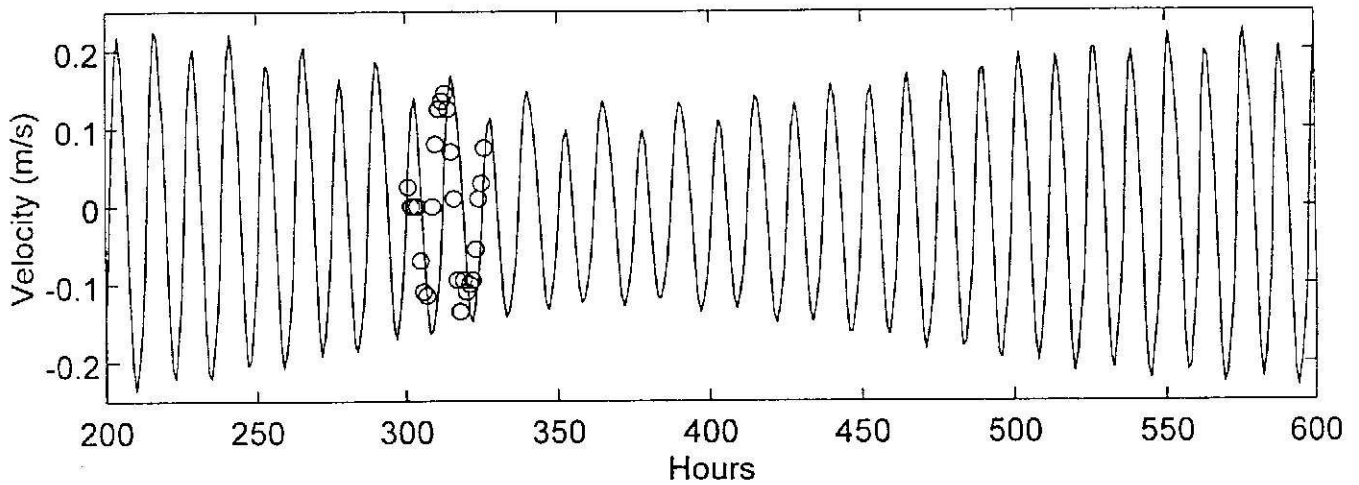
การเปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำระหว่างการคำนวณ (-) กับการวัด (o)

ที่บ้านหาร (17 สิงหาคม 2540)

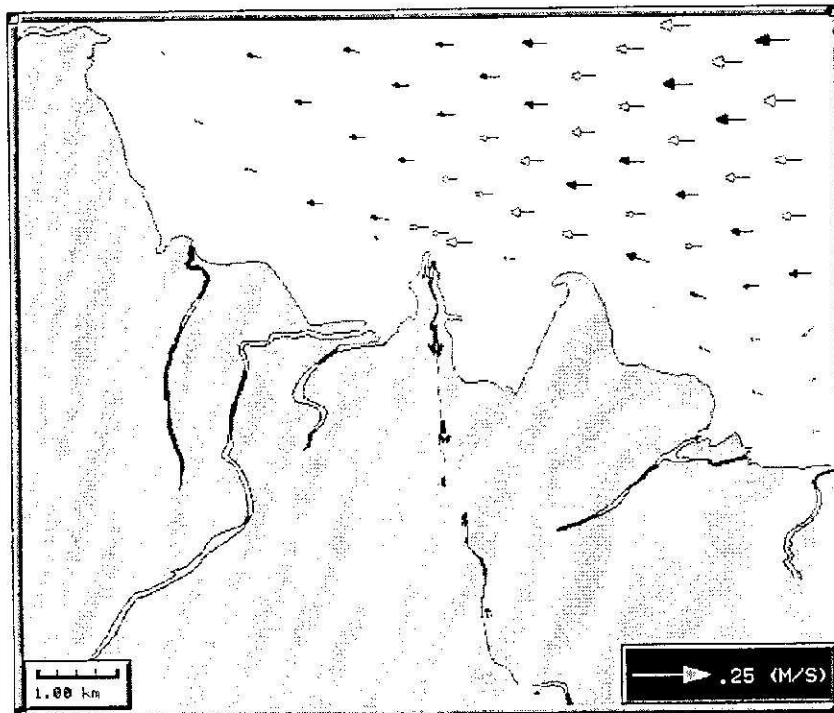


ที่บ้านเกาะนกก (21-22 เมษายน 2538)

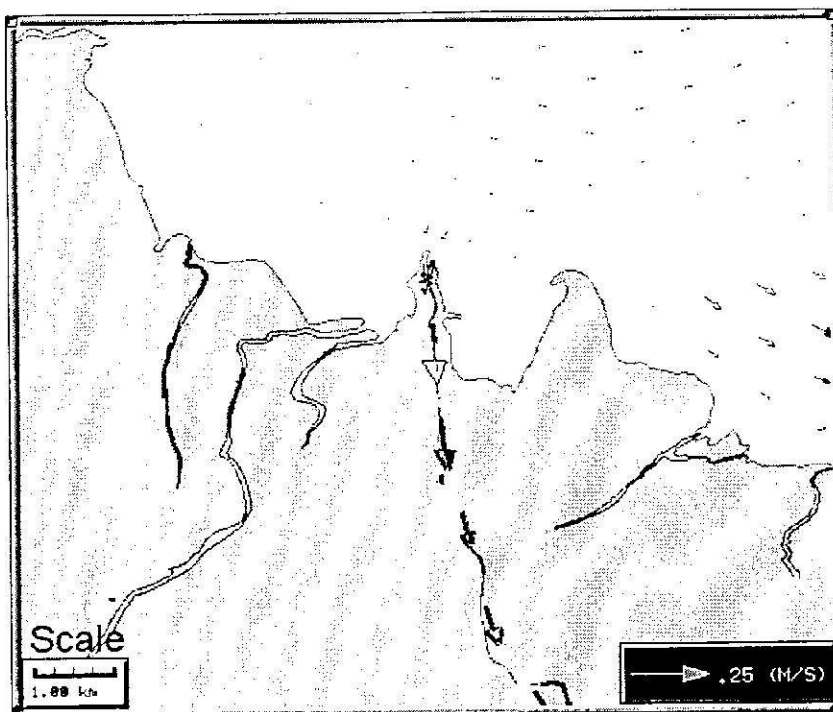
Comparison of predicted (-) and observed (o) velocity at Ko Nok, April 21-22, 1995



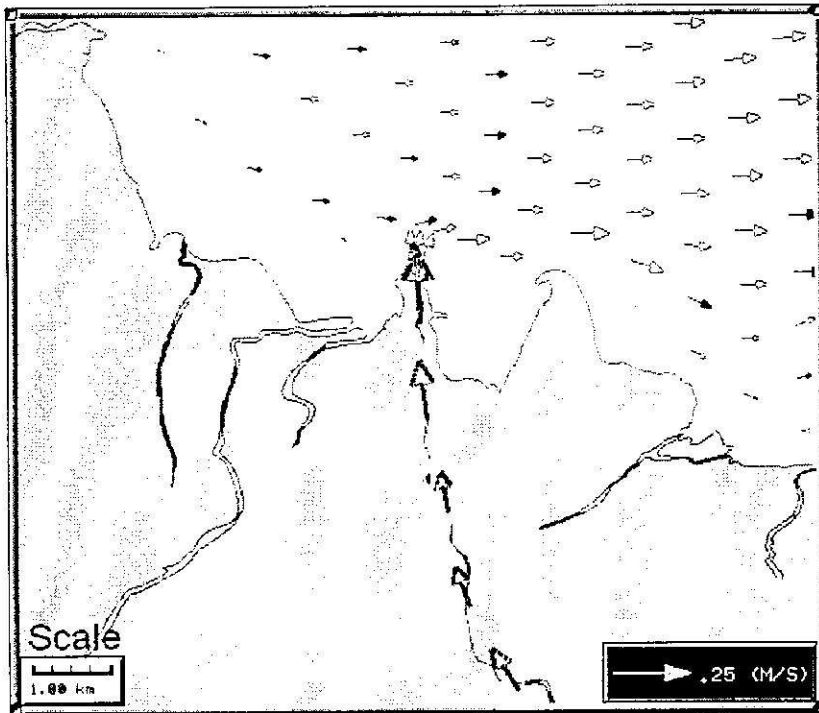
ตัวอย่างการจำลองรูปแบบการไหลในทะเลสาบสงขลาและคลองอุตุตะเกา
น้ำขึ้น



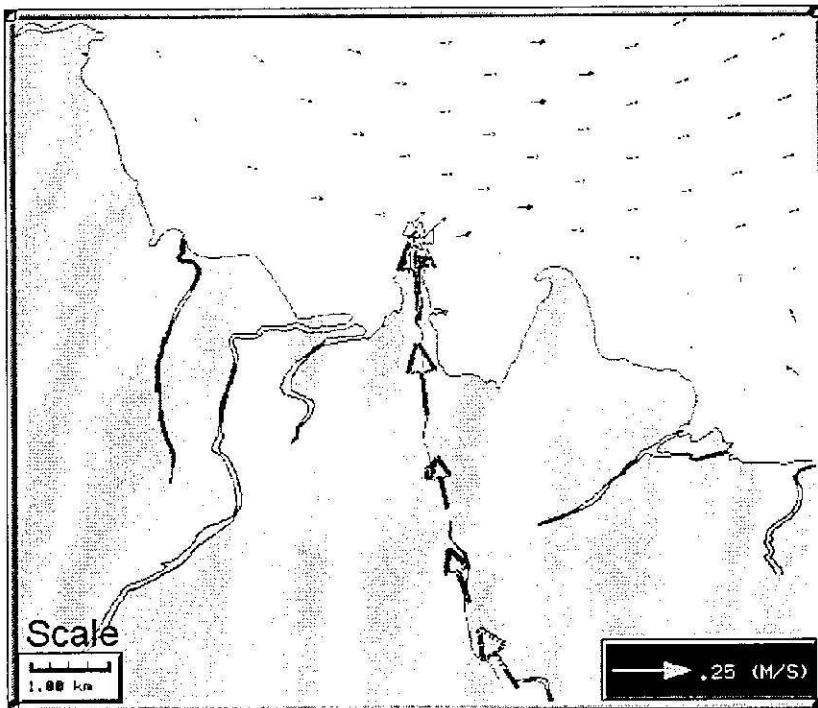
เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง



ตัวอย่างการจำลองรูปแบบการไหลในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา
เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง น้ำลง

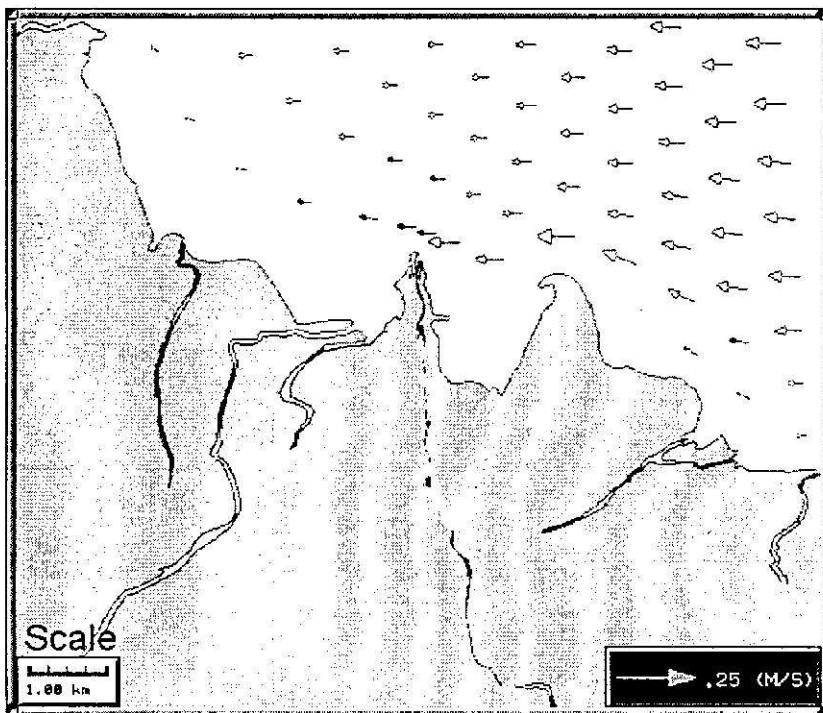


เมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมง



ตัวอย่างการจำลองรูปแบบการไหลในทะเลสาบสงขลาและคลองอู่ตะเภา

เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง



เมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง

