ระยะเวลาพำนักของสารอนุรักษ์ในอ่าวปากพนัง

Residence Time of a Conservative Substance in Pak Panang Bay

ชาลี ครองศักดิ์ศิริ[1]*, ปราโมทย์ โศจิศุภร[1] และ อนุกูล บูรณประทีปรัตน์[2]

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2]ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Charlie Krongsaksiri[1]*, Pramot Sojisuporn[1] and Anukul Buranapratheprat[2]

[1]Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

[2]Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University,

บทคัดย่อ

แบบจำลอง RMA2 และ RMA4 ถูกใช้จำลองการไหลเวียนของน้ำและระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำโดยการทดลองตัวตามรอยในอ่าวปากพนัง โดยได้ศึกษาการตอบสนองของระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารชนิดนี้ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังและลม ผลการจำลองถูกเทียบมาตรฐานและทวนสอบกับข้อมูลความเร็วกระแสน้ำและความเค็มจากการตรวจวัดในอ่าว ผลการทดลองตัวตามรอยแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำถูกควบคุมโดยอัตราการไหลของน้ำท่าเป็นหลักโดยที่ไม่ได้ถูกควบคุมโดยลม ระยะเวลาพำนักเฉลี่ยจากคำนวณมีค่าเท่ากับ 10.3 3.7 และ 2 วันเมื่ออัตราการไหลของน้ำท่าเท่ากับ 5 150 และ 350 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารในอ่าวปากพนังมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึมกับอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนัง

คำสำคัญ : แบบจำลอง RMA2 แบบจำลอง RMA4 ระยะเวลาพำนัก สารอนุรักษ์ อ่าวปากพนัง

Abstract

RMA2 and RMA4 models were used to simulate water circulation and average residence time of a dissolved conservative substance in terms of passive tracer experiment in Pak Panang Bay. The response of the average residence time of this substance to freshwater discharge from the Pak Panang River and wind variations was also investigated. The simulation results were calibrated and verified by current and salinity data which were measured in the bay. The results of the tracer experiment represented that the average residence time of the dissolved conservative substance was mainly controlled by river discharge, not wind. Calculated average residence times are 10.3, 3.7 and 2 days when the discharges are 5, 150 and 350 m^3/s, respectively. Regression analysis result revealed that the average residence time logarithmically related with freshwater discharge from the Pak Panang River.

Keywords : RMA2 model, RMA4 model, residence time, conservative substance, Pak Panang Bay

***Corresponding author.** E-mail: kr_charlie@hotmail.com

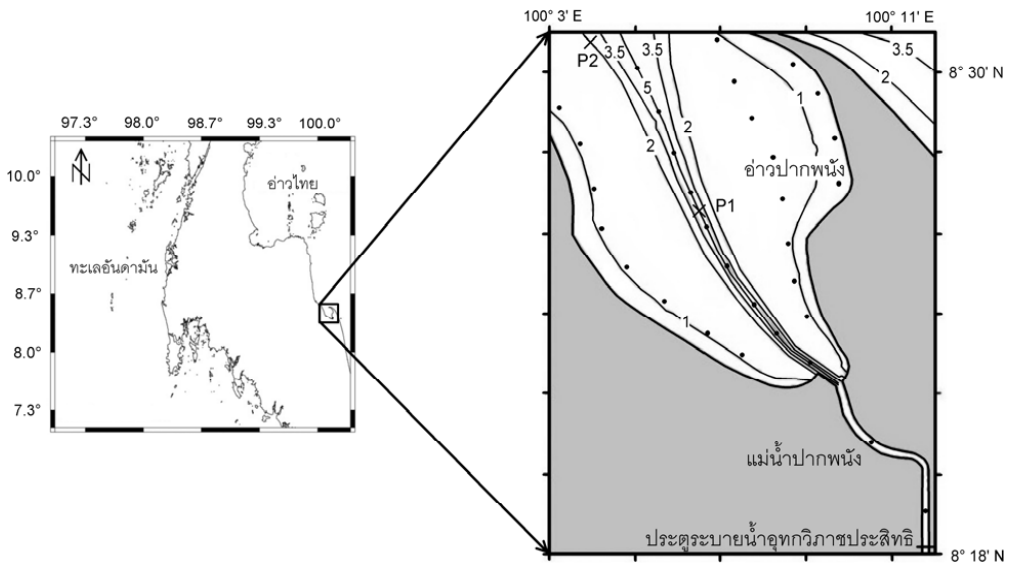
บทนำ

เอสทูรี่ (Estuary) เป็นบริเวณที่มีการผสมผสานกันระหว่างน้ำเค็มและน้ำจืดเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลและน้ำท่า และยังเป็นบริเวณที่ง่ายต่อการเกิดภาวะมลพิษทางน้ำ เนื่องจากเป็นบริเวณแรกที่รองรับของเสียจากน้ำท่าและของเสียที่ถูกชะล้างจากแผ่นดิน (Flegal *et al.,* 1991; Comber *et al.,* 1995; Fang & Lin, 2002) จำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการทำกสิกรรมและอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการปล่อยของเสียและสิ่งปฏิกูลที่มาจากการทำกิจกรรมดังกล่าวลงสู่เอสทูรี่ในปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นสาเหตุทำให้คุณภาพของน้ำต่ำลงและนำไปสู่การเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อคนในที่สุด (Kennish, 1997) ดังนั้นความเข้าใจในกระบวนการทางอุทกพลศาสตร์ในเอสทูรี่เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมและควบคุมมลพิษในบริเวณดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม

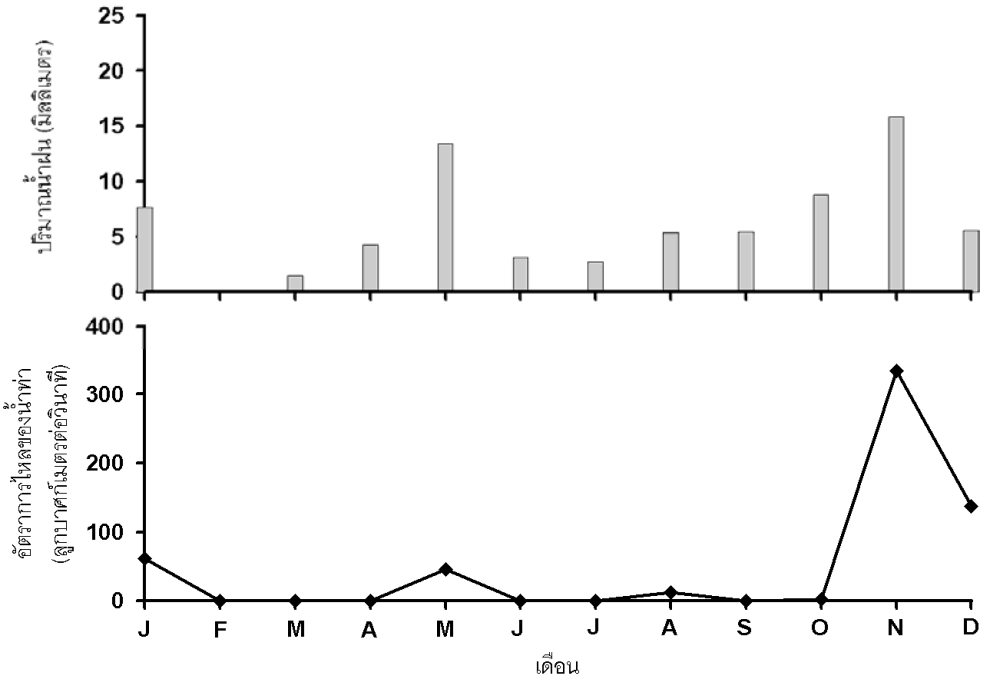
ระยะเวลาพำนัก (Residence time) ของวัสดุ (Material) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงระยะเวลาที่วัสดุพำนักตัวอยู่ในพื้นที่ มีค่าขึ้นกับอัตราการแลกเปลี่ยนของวัสดุ (Yanagi, 1999) ระยะเวลาพำนักของวัสดุที่ยาวนานแสดงถึงการที่วัสดุนั้นมีโอกาสสูงที่จะเกิดอันตรกิริยาทางกายภาพ เคมี และชีวภาพกับมวลน้ำหรือวัสดุต่างๆ ที่อยู่ล้อมรอบ ยกตัวอย่างเช่น การพัดพาสารอาหารอนินทรีย์ จากแม่น้ำลงสู่เอสทูรี่ ทำให้แพลงก์ตอนพืชที่อาศัยในบริเวณนี้ใช้สารอาหารดังกล่าวในการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้จำนวนแพลงก์ตอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำต่ำลงและคุณภาพของน้ำลดลง อาจเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การตายของสัตว์น้ำในเอสทูรี่เป็นจำนวนมาก

อ่าวปากพนังมีสภาพเป็นเอสทูรี่ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย (ภาพที่ 1) มีพื้นที่ประมาณ 100 ตารางกิโลเมตร มีพื้นที่เปิดสู่อ่าวไทยตอนล่างและด้านทิศใต้ของอ่าวได้รับอิทธิพลของน้ำจืดจากแม่น้ำปากพนังซึ่งเป็นแม่น้ำสายหลักของภาคใต้ที่มีพื้นที่ลุ่มน้ำครอบคลุม 3 จังหวัดคือ จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดพัทลุง และจังหวัดสงขลา พื้นที่ในอ่าวมีความหลากหลายของสิ่งมีชีวิต และอุดมสมบูรณ์ไปด้วยสัตว์น้ำที่มีความสำคัญต่อการประมงของชาวนครศรีธรรมราชตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ในฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน) เป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนน้อย อีกทั้งประตูระบายน้ำอุทกวิภาชประสิทธิยังถูกปิด ทำให้อัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังมีค่าต่ำมาก (ภาพที่ 2) ทำให้คาดการณ์ได้ว่าการขนส่งของวัสดุ และระยะเวลาพำนักของวัสดุน่าจะถูกควบคุมโดยน้ำขึ้นน้ำลงเพียงปัจจัยเดียว ในทางกลับกันในฤดูฝน (เดือนพฤศจิกายนและเดือนธันวาคม) มีปริมาณน้ำฝนมากและมีการเปิดประตูระบายน้ำอุทกวิภาชประสิทธิ ทำให้น้ำอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังมีค่าสูง (ภาพที่ 2) ดังนั้นน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังน่าจะมีอิทธิพลเด่นต่อการขนส่งและระยะเวลาพำนักของวัสดุ



ภาพที่ 1 แผนที่อ่าวปากพนัง เส้นคอนทัวน์ (Contour line) แสดงความลึก (เมตร) สถานีตรวจวัดกระแสน้ำและความเค็ม P1 และ P2 (x) และสถานีเก็บข้อมูลความเข้มข้นของสารตามรอยในการจำลอง (•)



ภาพที่ 2 ปริมาณน้ำฝน (บน) และอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนัง (ล่าง) เฉลี่ยรายเดือนในปี พ.ศ. 2550

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติ ได้แก่ แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ RMA2 (Resource Management Associates 2) (US Army Corps of Engineers, 1997) และแบบจำลองคุณภาพน้ำ RMA4 (Resource Management Associates 4) (US Army Corps of Engineers, 2001) เพื่อศึกษาการขนส่งของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำ (Dissolved conservative substance) และระยะเวลาพำนักของสารดังกล่าวโดยการทดลองตัวตามรอย (Passive tracer experiment) ในอ่าวปากพนัง

วิธีการทดลองเชิงตัวเลข

RMA2 เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้ในการคำนวณความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกและระดับน้ำ โดยมีสมการโมเมนตัม (สมการที่ 1 และ 2) และสมการความต่อเนื่อง (สมการที่ 3) เป็นสมการควบคุมซึ่งถูกแก้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) โดยใช้ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์คิน (Galerkin method of weighted residuals)

$$h\frac{\partial u}{\partial t}+hu\frac{\partial u}{\partial x}+hv\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left[E_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+E_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right]+gh\left[\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial a}{\partial y}\right]+$$
$$\frac{gun^2}{\left(h^{\frac{1}{6}}\right)^2}\left(u^2+v^2\right)^{\frac{1}{2}}-\xi V_a^2\cos\psi-2hv\omega\sin\Phi=0 \qquad (1)$$

$$h\frac{\partial v}{\partial t}+hu\frac{\partial v}{\partial x}+hv\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left[E_{yx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+E_{yy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right]+gh\left[\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial a}{\partial y}\right]+$$
$$\frac{gvn^2}{\left(h^{\frac{1}{6}}\right)^2}\left(u^2+v^2\right)^{\frac{1}{2}}-\xi V_a^2\sin\psi+2hu\omega\sin\Phi=0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+h\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+u\frac{\partial h}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y}=0 \qquad (3)$$

เมื่อ

x และ y คือการกระจัด (เมตร) ในทิศตะวันออก-ตกและในทิศเหนือใต้ตามลำดับ

t คือเวลา (วินาที)

u และ v คือความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที) ในทิศตะวันออก-ตกและทิศเหนือ-ใต้ตามลำดับ

h คือความลึกของน้ำ (เมตร)

ρ คือความหนาแน่นของน้ำทะเล (1,013 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

E คือสัมประสิทธิ์ความหนืด (Eddy viscosity coefficient) (เมตร^2/วินาที)

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 เมตร/วินาที^{2})

a คือระดับน้ำ (เมตร)

n คือค่าความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's roughness n-value)

ξ คือสัมประสิทธิ์เอมไพริคัลการเฉือนของลม (Empirical wind shear coefficient)

V_a คือความเร็วของลม (เมตร/วินาที)

ψ คือทิศทางของลม (องศา)

ω คือความเร็วเชิงมุมที่โลกหมุนรอบตัวเอง (7.29×10^{-5} เรเดียน/วินาที)

Φ คือละติจูด (องศา)

ความเค็มเฉลี่ยตามความลึกในอ่าวปากพนังนั้นถูกจำลองโดยแบบจำลอง RMA4 โดยอาศัยข้อมูลความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกที่คำนวณได้จากแบบจำลอง RMA2 เป็นข้อมูลนำเข้า สมการที่นำมาคำนวณการกระจายความเค็มคือ

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x}+D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y} \qquad (4)$$

เมื่อ

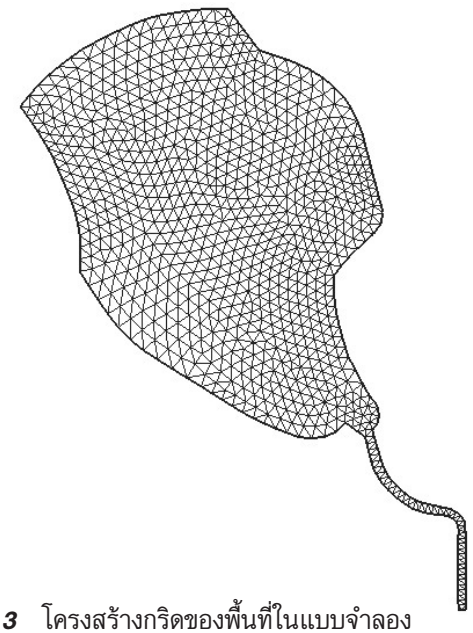
C คือความเค็ม (ส่วนต่อพันส่วน)

D_x และ D_y คือสัมประสิทธิ์การผสมผสานแบบปั่นป่วน (Turbulent mixing coefficient; เมตร^2/วินาที) ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

โครงสร้างกริด (Grid) ของพื้นที่ในแบบจำลองประกอบด้วย 1,684 เอลิเมนต์ (ภาพที่ 3) ขอบเขตเปิดที่บริเวณปากอ่าวปากพนังตลอดทั้งแนวถูกบังคับด้วยระดับน้ำขึ้นน้ำลงรายชั่วโมงจากสถานีวัดระดับน้ำของกรมเจ้าท่าที่อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช และขอบเขตเปิดด้านแม่น้ำนั้นถูกกำหนดด้วยปริมาณน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำอุทกวิภาชประสิทธิซึ่งถูกควบคุมและตรวจวัดโดยกรมชลประทาน แนวขอบเขตเปิดด้านปากอ่าวปากพนังถูกกำหนดค่าความเค็มเท่ากับ 32 ส่วนต่อพันส่วน โดยที่ขอบเขตเปิดบริเวณประตูระบายน้ำอุทกวิภาชประสิทธินั้นถูกกำหนดค่าความเค็มเท่ากับ 0 ส่วนต่อพันส่วน และกำหนดค่าความเค็มเริ่มต้นของน้ำในอ่าวเท่ากับ 25 ส่วนต่อพันส่วน

การเทียบมาตรฐาน (Calibration) ความเร็วกระแสน้ำที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลอง RMA2 กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ถึงวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ที่สถานี P1 (ภาพที่ 1) โดยการแบ่งพื้นที่ในแบบจำลองเป็น 2 ส่วน (ภาพที่ 4) พื้นที่ที่ 1 (สีขาว) ประกอบด้วยร่องน้ำในอ่าวปากพนังและแม่น้ำปากพนัง และพื้นที่ที่ 2 (สีดำ) เป็นส่วนข้างร่องน้ำทั้งสองด้านของอ่าวปากพนัง เพื่อที่จะกำหนดตัวเลขเพกเลต (Peclet number; *Pe*) (สมการที่ 5) ให้เท่ากับ 15 ทั่วทั้งพื้นที่ในแบบจำลอง และค่าความขรุขระของแมนนิ่งเท่ากับ 0.020 และ 0.025 ในพื้นที่ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดจะถูกปรับค่าโดยอัตโนมัติในการจำลอง

$$Pe=\frac{\rho\bar{u}dx}{E} \qquad (5)$$



ภาพที่ 3 โครงสร้างกริดของพื้นที่ในแบบจำลอง

ภาพที่ 4 การแบ่งพื้นที่ในแบบจำลองเพื่อกำหนดตัวเลขเพกเลต ค่าความขรุขระของแมนนิ่ง และสัมประสิทธิ์การผสมผสานแบบปั่นป่วน ประกอบด้วยพื้นที่สีดำแสดงพื้นที่น้ำตื้นในอ่าวและพื้นที่สีขาวแสดงบริเวณร่องน้ำในอ่าวปากพนังและแม่น้ำปากพนัง

เมื่อ $\overline{u}$ คือความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยในแต่ละเอลิเมนต์ (เมตร/วินาที)

dx คือความยาวของแต่ละเอลิเมนต์ (เมตร)

ความเค็มที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลอง RMA4 ถูกเทียบมาตรฐานกับข้อมูลจากการตรวจวัดในวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ถึงวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ที่สถานี P1โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การผสมผสานแบบปั่นป่วนให้มีค่าเท่ากับ 23.5 เมตร^2/วินาทีทั้งแนวแกน x และ y

เวลาในการคำนวณของแบบจำลอง RMA2 และ RMA4 เท่ากับ 1,488 ชั่วโมงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม ถึง 1 ธันวาคม พ.ศ. 2550 โดยมีขั้นเวลา (Time step) เท่ากับ 1,800 วินาที

แบบจำลองที่ถูกเทียบมาตรฐานแล้วถูกนำมาทำการทวนสอบ (Verification) เพื่อประเมินความสามารถในการจำลองความเร็วกระแสน้ำและความเค็ม ความเร็วกระแสน้ำและความเค็มที่คำนวณได้จากแบบจำลองได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลความเร็วกระแสน้ำและความเค็มจากการตรวจวัดที่สถานี P2 (ภาพที่ 1) ในวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2551 เวลา 9.00 น. ถึงวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2551 เวลา 9.00 น.

แบบจำลองที่ถูกเทียบมาตรฐานและทวนสอบแล้วถูกนำมาทดลองตัวตามรอย สารตามรอยถูกกำหนดให้เป็นสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำเนื่องจากแบบจำลองถูกเทียบมาตรฐานและทวนสอบกับเกลือที่ละลายในน้ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารอนุรักษ์ การทดลองตัวตามรอยถูกออกแบบขึ้นเพื่อศึกษาการขนส่งของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำและระยะเวลาพำนักเฉลี่ย (T_r) ของสารดังกล่าวในอ่าวปากพนังโดยคำนวณจากสมการที่ 6

$$T_r = \int_{t=0}^{\infty} r(t)\,dt \qquad (6)$$

เมื่อ $r(t)$ คือฟังก์ชันเรมแนนต์ (Remnant function) (Takeoka & Hashimoto, 1988; Yanagi, 1999; Balotro *et al.,* 2003) มีค่าเท่ากับ (Buranapratheprat & Yanagi, 2003)

$$r(t) = \frac{R(t)}{R(t_0)} \qquad (7)$$

โดยที่

$R(t)$ คือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามความลึกของความเข้มข้น (ส่วนต่อพันส่วน; part per thousand) ที่เวลาใดๆ ทั้ง 31 สถานี (ภาพที่ 1)

$R(t_0)$ คือ $R(t)$ ที่เวลาเริ่มต้น (t=0) ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนต่อพันส่วน

ค่าความเข้มข้นของสารที่คำนวณได้จากแบบจำลองจาก RMA4 ถูกนำมาคำนวณระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในอ่าวปากพนัง เวลาในการคำนวณเท่ากับ 3,240 ชั่วโมง และขั้นเวลา 1,800 วินาที โดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำท่า (Q) จากแม่น้ำปากพนังเท่ากับ 0 5 10 30 50 150 250 350 และ 450 ลูกบาศก์เมตร/วินาที และนำไปเปรียบเทียบกับค่าระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในกรณีที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตผิวด้วยความเค้นลมในแบบจำลอง (สมการที่ 8) เพื่อศึกษาอิทธิพลของลมต่อระยะเวลาพำนัก โดยกำหนดความเร็วลม 2 กรณีคือความเร็วลมที่มีขนาดเท่ากับ 5 เมตร/วินาที ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้

$$T_s = \rho_{air} C_d W^2 \qquad (8)$$

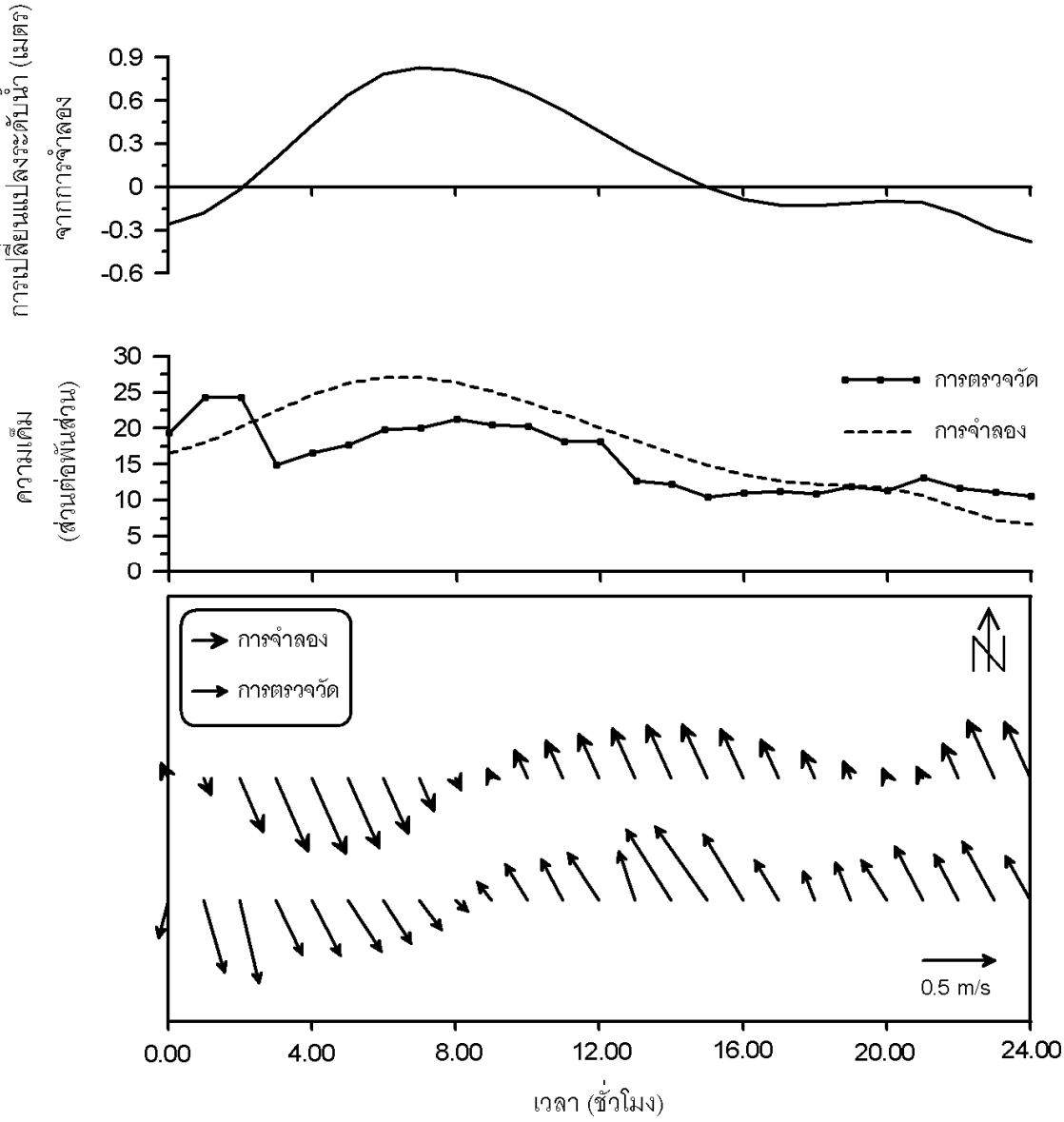
เมื่อ

- T_s คือความเค้นลม (กิโลกรัม/เมตร/วินาที^{2})
- ρ_{air} คือความหนาแน่นอากาศ (1.2x10^{-3} กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- C_d คือสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient; 1.4x10^{-3})
- W คือความเร็วลม (เมตร/วินาที) ที่ถูกวัดเหนือผิวน้ำ 10 เมตร

ผลการทดลอง

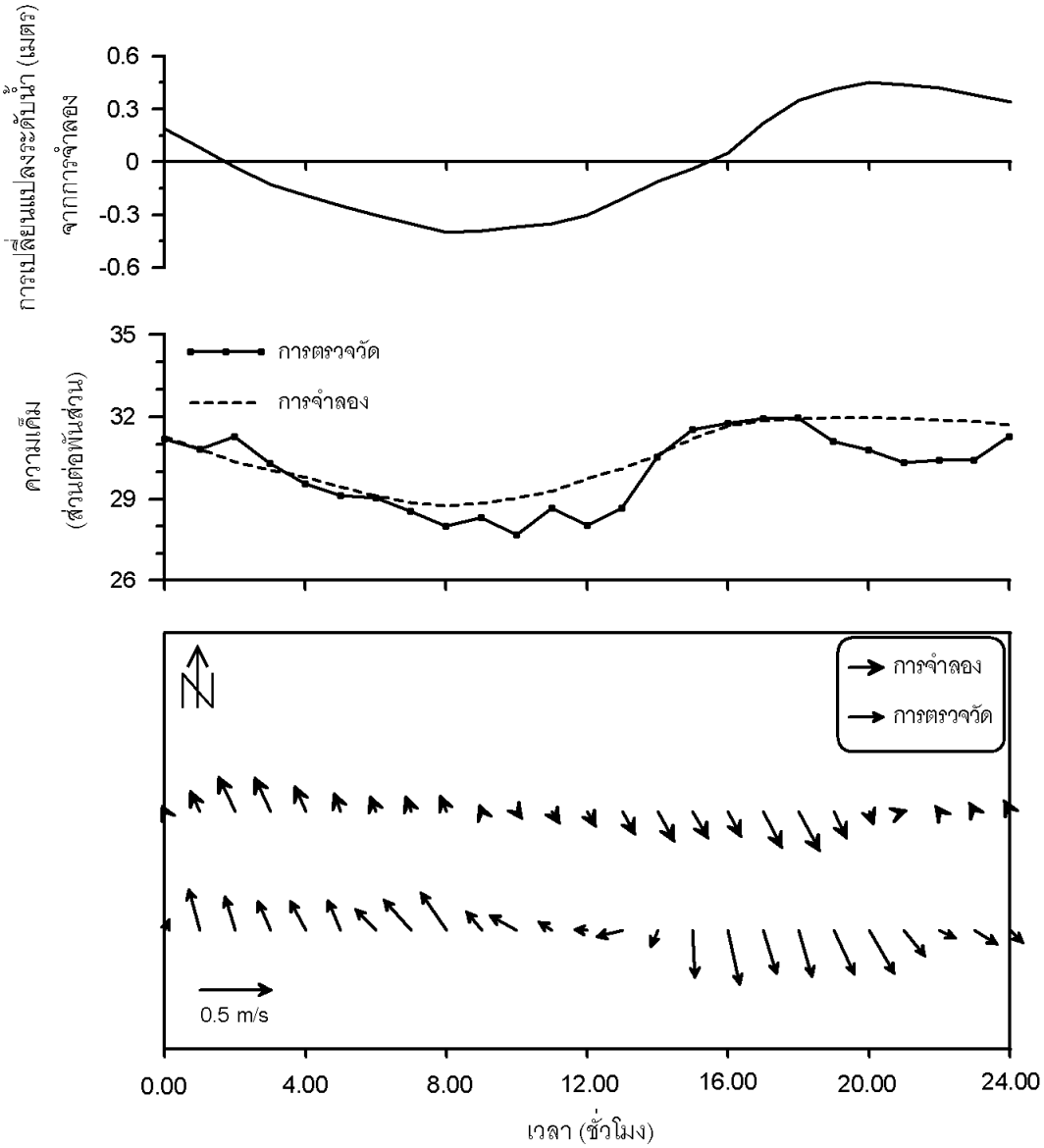
การเทียบมาตรฐานและทวนสอบแบบจำลอง

การเทียบมาตรฐานความเร็วกระแสน้ำและความเค็มที่ได้จากการจำลองกับการตรวจวัดในวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ถึงวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ที่สถานี P1 (ภาพที่ 5) พบว่าแบบจำลองสามารถคำนวณความเร็วกระแสน้ำและความเค็มได้ใกล้เคียงกับการตรวจวัด และยังแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของมวลน้ำและการเปลี่ยนแปลงความเค็มตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง อย่างไรก็ตามในช่วงเวลา 2.00 น. ถึง 4.00 น. ของวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2550 นั้นเป็นช่วงเวลาที่น้ำขึ้น แต่กระแสน้ำอยู่ในทิศไหลออกจากอ่าว และความเค็มในช่วงเวลาดังกล่าวยังคงมีค่าลดต่ำลง ลักษณะดังกล่าวนั้นเป็นผลมาจากอิทธิพลเด่นของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนัง โดยตลอดช่วงการตรวจวัดอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังมีค่าสูงถึง 425 ลูกบาศก์เมตร/วินาที



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจากการจำลอง (บน) และความเค็มเฉลี่ยตามความลึกจากการจำลองและการตรวจวัด (กลาง) และความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกจากการจำลองและการตรวจวัด (ล่าง) ในวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ถึงวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2550 เวลา 8.00 น. ที่สถานี P1

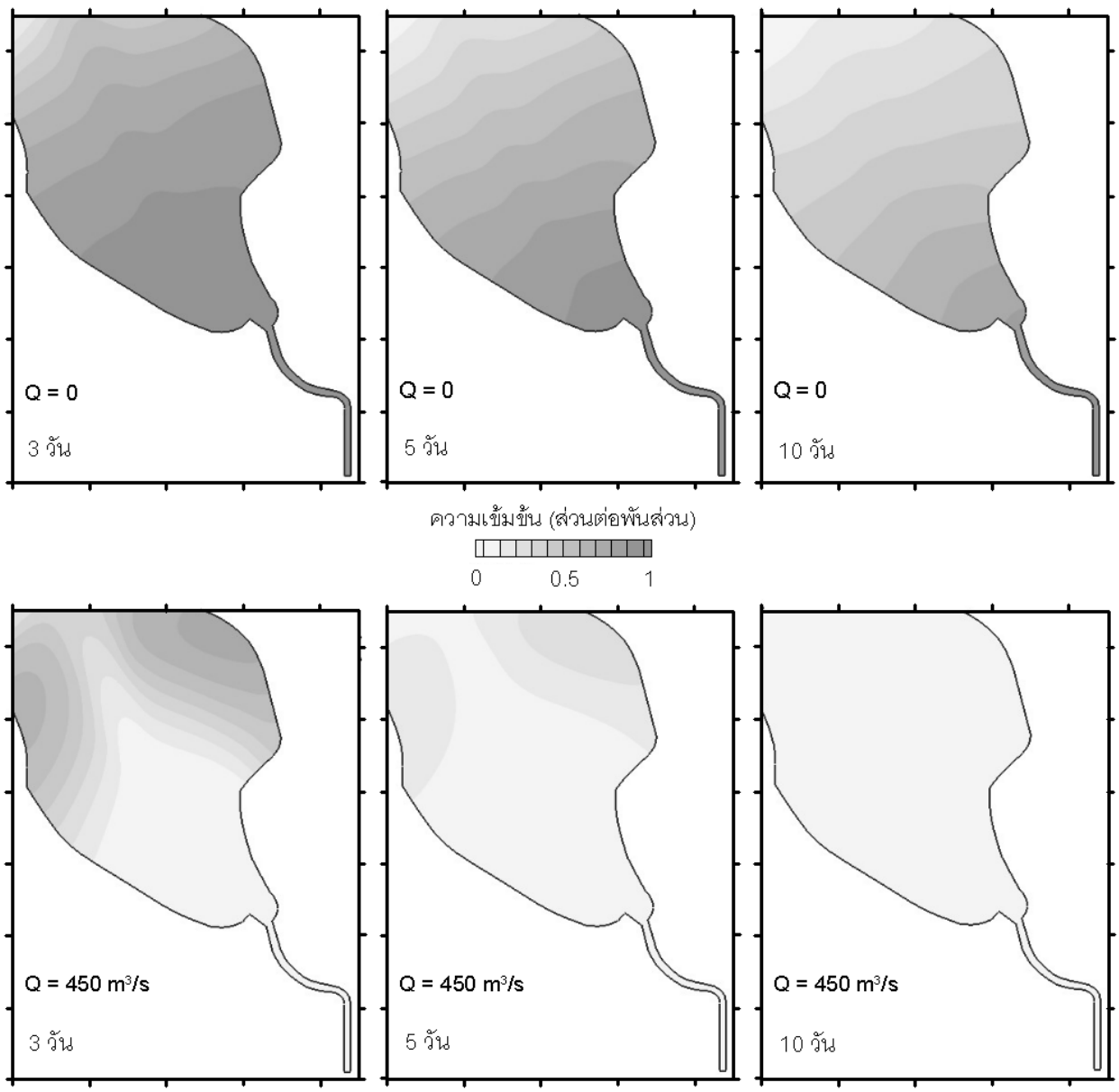
แบบจำลองที่ถูกเทียบมาตรฐานสามารถจำลองความเร็วกระแสน้ำและความเค็มได้ใกล้เคียงกับการตรวจวัดในวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2551 เวลา 9.00 น. ถึงวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2551 เวลา 9.00 น. ที่สถานี P2 (ภาพที่ 6) กระแสน้ำและการเปลี่ยนแปลงความเค็มตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงเพียงปัจจัยเดียว เนื่องมาจากอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังมีค่าน้อยมาก (ค่าเฉลี่ยไม่เกิน 12 ลูกบาศก์เมตร/วินาทีตลอดช่วงเวลาการตรวจวัด) แต่เนื่องจากจุดตรวจวัดดังกล่าวอยู่ในบริเวณข้างร่องน้ำ ทำให้น้ำในร่องไหลออกสู่พื้นที่บริเวณข้างร่องน้ำในช่วงที่น้ำเริ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 18.00 น. ถึง 23.00 น. ในวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2551 ในขณะเดียวกันในช่วงที่น้ำเริ่มลงตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึง 9.00 น. ในวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2551 น้ำในพื้นที่บริเวณข้างร่องน้ำไหลเข้าสู่ร่องน้ำ จึงเป็นสาเหตุให้ความเร็วกระแสน้ำจากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนไปจากข้อมูลการตรวจวัด



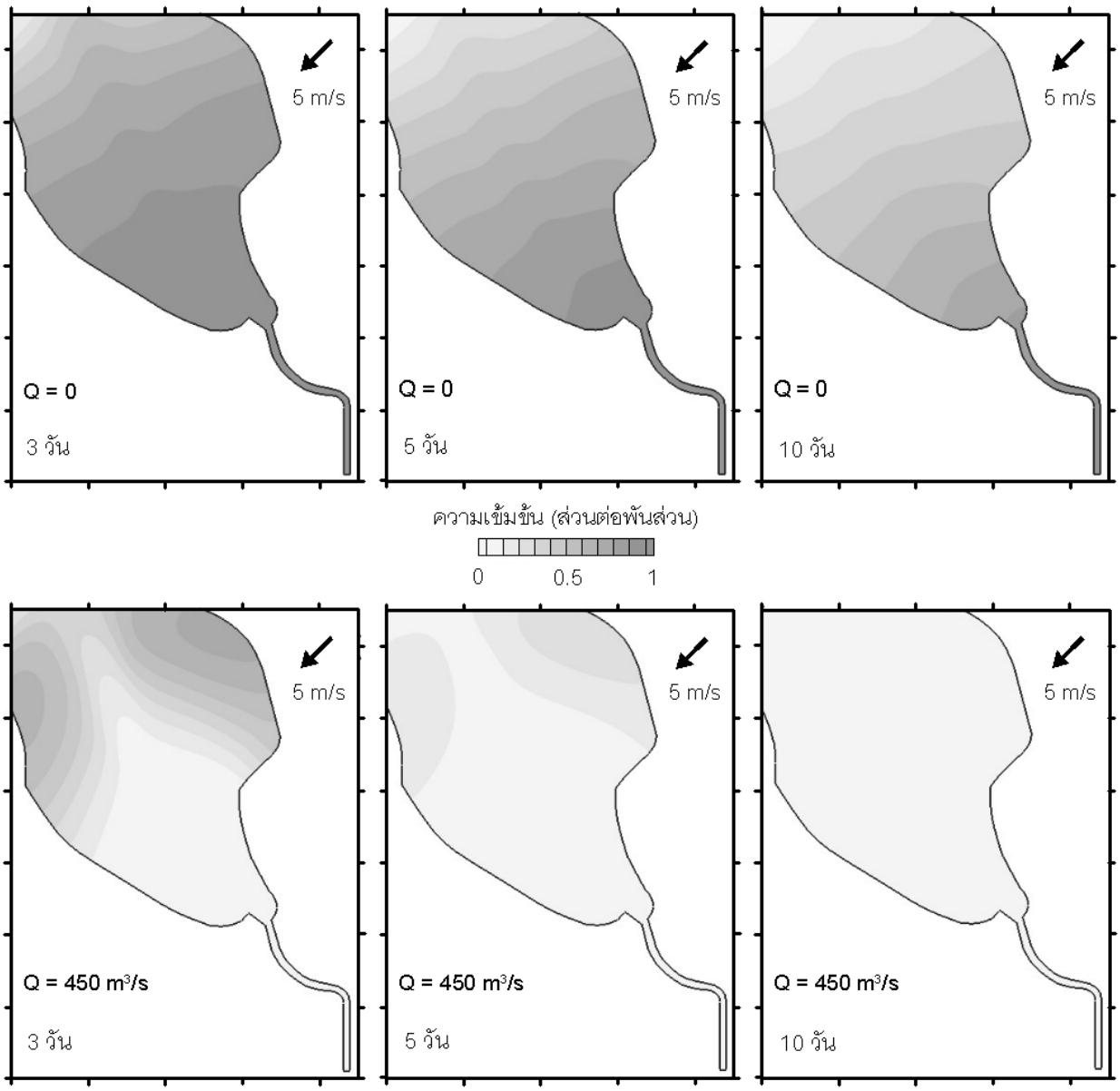
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจากการจำลอง (บน) และความเค็มเฉลี่ยตามความลึกจากการจำลองและการตรวจวัด (กลาง) และความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกจากการจำลองและการตรวจวัด (ล่าง) ในวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2551 เวลา 9.00 น. ถึงวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2551 เวลา 9.00 น. ที่สถานี P2

ระยะเวลาพำนักเฉลี่ย

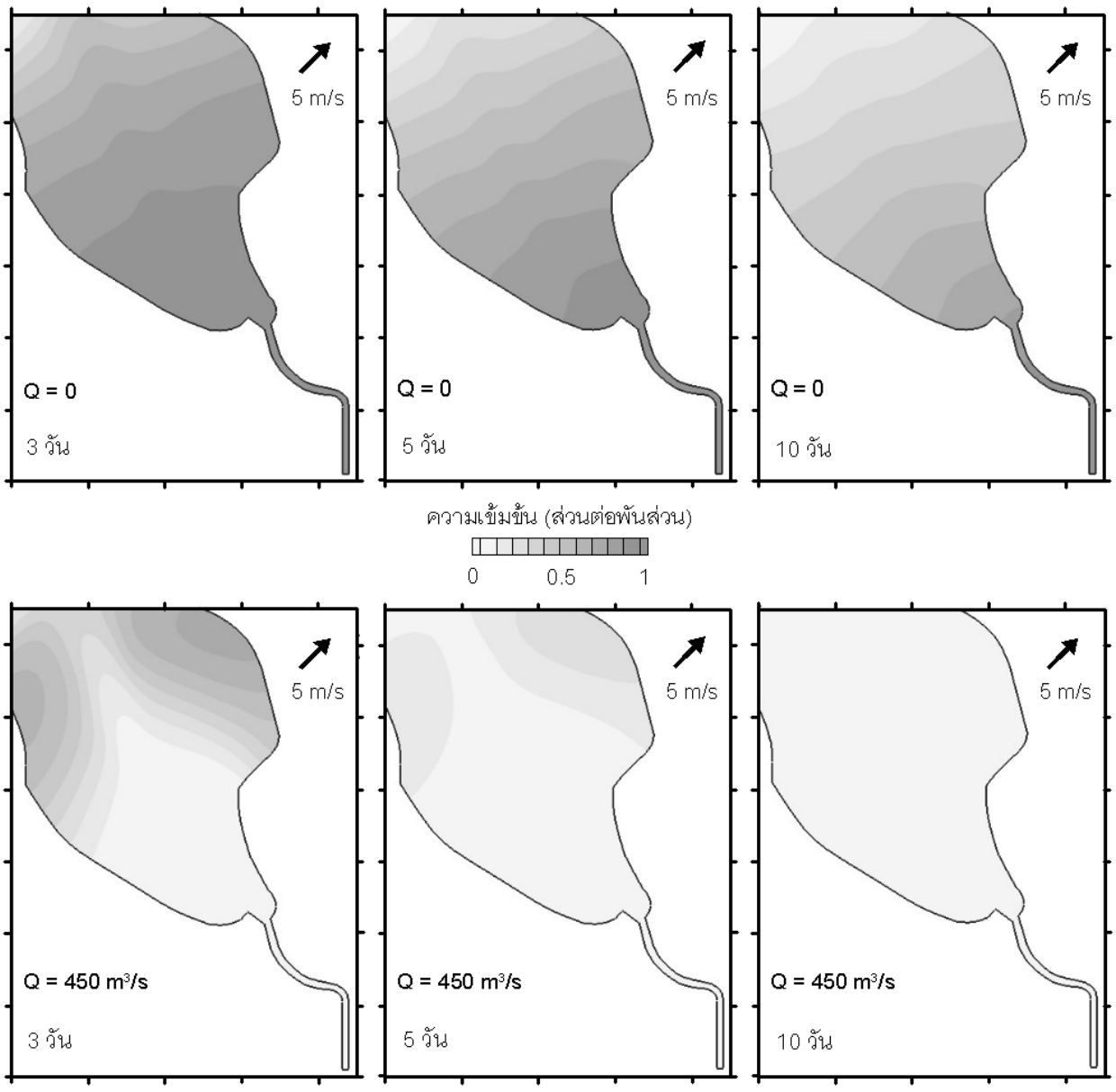
ความเข้มข้นของสารตามรอยหลังจากแพร่กระจายตัวในพื้นที่ศึกษาเป็นเวลา 3 5 และ 10 วันในกรณีไม่มีน้ำท่าและอัตราการไหลของน้ำท่าสูง (450 m^3/s) ซึ่งเป็นตัวแทนของฤดูแล้งและฤดูฝนตามลำดับ ในกรณีไม่ได้บังคับลมในแบบจำลอง (ภาพที่ 7) และบังคับลมในแบบจำลองในทิศตะวันออกเฉียงใต้ (ภาพที่ 8) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (ภาพที่ 9) ผลการจำลองพบว่ารูปแบบการแพร่กระจาย (Distribution pattern) ของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำไม่แตกต่างกันทั้งในกรณีบังคับลมและไม่บังคับลมในแบบจำลอง ในกรณีไม่มีน้ำท่านั้น สารตามรอยส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในอ่าวหลังจากเวลาผ่านไป 5 วัน หลังจากนั้นมีสารตามรอยจำนวนน้อยมากที่เคลื่อนที่ออกจากอ่าวเมื่อหลังเวลาผ่านไป 10 วัน ในทางกลับกันในกรณีอัตราการไหลของน้ำท่าสูง สารตามรอยถูกขนส่งโดยน้ำท่าออกไปจากอ่าวอย่างรวดเร็ว มีสารตามรอยน้อยมากที่ยังคงอยู่ในอ่าวหลังจากเวลาผ่านไป 5 วัน สารถูกขนส่งออกไปเรื่อยๆ จนหมดโดยใช้เวลาทั้งหมด 6.92 วัน



ภาพที่ 7 การแพร่กระจายของสารอนุรักษ์เมื่อเวลาผ่านไป 3 5 และ 10 วันเมื่อไม่ได้บังคับลมในแบบจำลองในกรณีไม่มีน้ำท่า (บน) และน้ำท่าที่มีอัตราการไหล 450 ลูกบาศก์เมตร/วินาที (ล่าง)



ภาพที่ 8 การแพร่กระจายของสารอนุรักษ์เมื่อเวลาผ่านไป 3 5 และ 10 วันเมื่อบังคับลมในทิศตะวันออกเฉียงเหนือในแบบจำลองในกรณีไม่มีน้ำท่า (บน) และน้ำท่าที่มีอัตราการไหล 450 ลูกบาศก์เมตร/วินาที (ล่าง)



ภาพที่ 9 การแพร่กระจายของสารอนุรักษ์เมื่อเวลาผ่านไป 3 5 และ 10 วันเมื่อบังคับลมในทิศตะวันตกเฉียงใต้ในแบบจำลองในกรณีไม่มีน้ำท่า (บน) และน้ำท่าที่มีอัตราการไหล 450 ลูกบาศก์เมตร/วินาที (ล่าง)

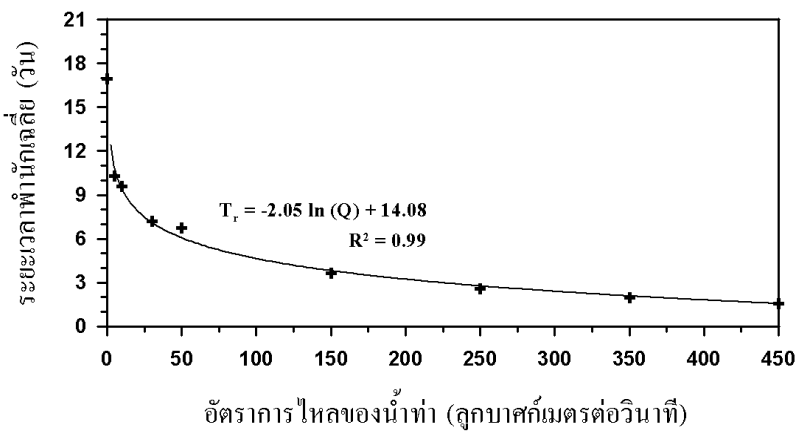
การเปรียบเทียบผลการคำนวณระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในอ่าวปากพนังจากแบบจำลองทั้ง 3 กรณีคือ กรณีที่ไม่ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตผิว กรณีกำหนดเงื่อนไขขอบเขตผิวด้วยความเค้นลมในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและในทิศตะวันตกเฉียงใต้ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังเท่ากับ 0 5 10 30 50 150 250 350 และ 450 ลูกบาศก์เมตร/วินาที พบว่าระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำของทั้ง 3 กรณีมีค่าเท่ากัน (ตารางที่ 1) และผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) พบว่าระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำสัมพันธ์กับกับอัตราการไหลของน้ำท่าแบบลอการิทึม (สมการที่ 9) โดยกราฟความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 10

$$T_r = -2.05 \ln (Q) + 14.08 \quad (9)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.99

ตารางที่ 1 ระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนัง

อัตราการไหลของน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)	ระยะเวลาพำนักเฉลี่ย (วัน)
0	17
5	10.3
10	9.6
30	7.2
50	6.7
150	3.7
250	2.6
350	2
450	1.6



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพำนักเฉลี่ยและอัตราการไหลของน้ำท่า

อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าการแพร่กระจายของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำและระยะเวลาพำนักเฉลี่ยไม่ได้ขึ้นกับลม แต่ขึ้นกับอัตราการไหลของน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังเป็นหลักและน้ำขึ้นน้ำลงเพียงเล็กน้อย การที่ลมไม่มีผลต่อระยะเวลาพำนักและการแพร่กระจายของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำนั้น อาจเนื่องมาจากรูปร่างของอ่าวปากพนังที่ค่อนข้างแคบ ส่งผลให้ลมมีระยะการสัมผัสกับผิวน้ำ (Fetch length) สั้นเกินไป ซึ่งไม่เพียงพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสน้ำที่ผิวน้ำได้เช่นเดียวกับเอสทูรี่บางแห่ง เช่น แม่น้ำ Danshuei (Liu *et at*., 2007) อีกทั้งอ่าวปากพนังเป็นบริเวณที่ตื้นมากจึงส่งผลให้มีแรงเสียดทานสูงบริเวณใกล้พื้นท้องน้ำซึ่งก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลมไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสน้ำได้ และผลการทดลองยังบ่งชี้ว่าระยะเวลาพำนักของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในอ่าวที่มีค่าสูงถึง 14.91 วันในฤดูแล้งในขณะที่ในฤดูฝนมีระยะเวลาพำนักเพียง 4.62 วัน แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ว่าสารต่างๆ มีโอกาสที่จะสะสมตัวในอ่าวในฤดูแล้งเป็นระยะเวลายาวนานกว่าในฤดูฝน มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการศึกษาของกัลยา วัฒยากร (2547) ที่พบปริมาณของแอมโมเนียม ไนเตรทและไนโตรเจนอินทรีย์ ในฤดูแล้งมากกว่าในฤดูฝน แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ในช่วงฤดูแล้งจะมีปริมาณน้ำท่าและน้ำฝนน้อยกว่าในช่วงฤดูฝน ส่งผลให้ปริมาณสารต่างๆ ที่ถูกพัดพามาโดยน้ำท่าในฤดูแล้งน้อยกว่าฤดูฝนตามไปด้วย แต่ก็ยังพบสารหลายชนิดตกค้างอยู่ในอ่าวในปริมาณที่มากกว่า ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาน้ำเน่าเสียในอ่าวปากพนังในที่สุด

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการศึกษากระบวนการทางอุทกพลศาสตร์โดยการทดลองตัวตามรอยในอ่าวปากพนัง แต่ด้วยข้อจำกัดของแบบจำลอง 2 มิติ จึงไม่สามารถศึกษาอิทธิพลของการไหลเวียนของน้ำที่เหนี่ยวนำโดยความหนาแน่น (Density-induced circulation) และกระบวนการผสมผสานในแนวดิ่ง (Vertical mixing process) ซึ่งอาจจะมีผลต่อระยะเวลาพำนักของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในอ่าวปากพนัง ด้วยเหตุนี้ในอนาคตจึงควรประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ 3 มิติในการศึกษาระยะเวลาพำนักของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในอ่าวปากพนัง

สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ได้แก่ RMA2 และ RMA4 ถูกนำมาจำลองการไหลเวียนของน้ำและการกระจายความเค็มในอ่าวปากพนัง แบบจำลองถูกเทียบมาตรฐานและทวนสอบกับข้อมูลความเร็วกระแสน้ำและการกระจายความเค็มจากการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2550 และ 2551 ในอ่าวปากพนัง แบบจำลองที่ถูกเทียบมาตรฐานและทวนสอบแล้วถูกนำไปใช้ในการทดลองตัวตามรอยเพื่อศึกษาการขนส่งและระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำ ผลการคำนวณโดยแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพำนักของสารอนุรักษ์ที่ละลายน้ำในอ่าวที่ไม่ขึ้นกับลมแต่ขึ้นอยู่กับน้ำท่าจากแม่น้ำปากพนังเป็นปัจจัยหลัก ขณะที่น้ำขึ้นน้ำลงมีอิทธิพลต่อการขนส่งและระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของสารในอ่าวเพียงเล็กน้อย สารดังกล่าวมีระยะเวลาพำนักเฉลี่ยในฤดูฝนเพียง 4.62 วัน ในขณะที่ในฤดูแล้งมีระยะเวลาพำนักเฉลี่ยยาวนานถึง 14.91 วัน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าอาจเกิดปัญหาคุณภาพน้ำในอ่าวปากพนังในช่วงฤดูแล้ง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะผู้ประเมินบทความที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วัฒยากร. (2547). สถานภาพสารอาหารในอ่าวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช. *การจัดการสวนป่าชายเลนแบบผสมผสานเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมบริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทย*, 258-267.

Balotro, R.S., Isobe A., & Shimizu, M. (2003). Seasonal variability in circulation pattern and residence time of Suo-Nada. *Journal of Oceanography, 59*, 259-277.

Buranapratheprat, A., & Yanagi, T. (2003). Seasonal variation in circulation and average residence time of the Bangpakong estuary, Thailand. *La mer, 41*, 199-213.

Comber, S.D.W., Gunn, A.M., & Whalley, C. (1995). Comparison of the partitioning of trace metals in the Humber and Mersey estiaries. *Marine Pollution Bulletin*, *30,* 851-860

Fang, T.H., & Lin, C.L. (2002). Dissolved and particulate trace metals and their partitioning in a hypoxic estuary: the Tanshui estuary in northern Taiwan. *Estuaries 25,* 598-607.

Flegal, A.R., Smith, G.J., Gill, G.A., Sanudo-Wilhelmy, S., & Anderson, L.C.D. (1991). Dissolved trace element cycle in the San Francisco Bay estuary. *Marine Chemistry 36*, 329-363.

Kennish, M.J. (1997). *Practice Handbook of Estuarine and Marine Pollution*. New York: CRC Press. Liu, W.C., Chen, W.B., Cheng, R.T., Hsu, M.H., & Kuo, A.Y. (2007). Modeling the influence of river discharge on salt intrusion and residual circulation in Danshuei River estuary, Taiwan. *Continental Shelf Research, 27*, 900-921.

Takeoka, H., & Hashimoto, T. (1988). Average residence time of matter in coastal waters in a transport system including biochemical processes. *Continental Shelf Research, 8*, 1247-1256.

US Army Corps of Engineers. (1997). User guide to RMA2 WES Version 4.3. Waterways Experiment station-Hydraulics Laboratory, produced by WesTech System Inc., New York.

US Army Corps of Engineers. (2001). User guide to RMA4 WES Version 4.5. Waterways Experiment station-Hydraulics Laboratory, produced by WesTech System Inc., New York.

Yanagi, T. (1999). *Coastal Oceanography*. Tokyo: Terra Scientific Publishing.