

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อได้แก่

1. แหล่งที่ตั้งและลักษณะทั่วไปของบางปะกงเอสทรี
2. ลักษณะสำคัญของบริเวณเอสทรี
3. ฟอสฟอรัสและความสำคัญของฟอสฟอรัส
4. พฤติกรรมของฟอสฟอรัสบริเวณเอสทรี และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
5. ไนโตรเจนและความสำคัญของไนโตรเจน
6. พฤติกรรมของไนโตรเจนบริเวณเอสทรี และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แหล่งที่ตั้งและลักษณะทั่วไปของบางปะกงเอสทรี

แม่น้ำบางปะกงเป็นแม่น้ำที่สำคัญสายหนึ่งในประเทศไทย เกิดจากการรวมตัวกันของแม่น้ำปราจีนบุรี และแม่น้ำนครนายกที่จังหวัดปราจีนบุรี โดยมีแหล่งต้นน้ำเป็นภูเขาสูงในบริเวณวนอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบน ฝั่งตะวันออกที่ตำบลบางปะกง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา ปากแม่น้ำอยู่ห่างจากปากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นแม่น้ำสายที่สำคัญที่สุดของประเทศเพียง 39 km เท่านั้น แม่น้ำบางปะกงมีความยาวประมาณ 122 km ความกว้างระหว่าง 100 - 500 เมตร และมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 4 เมตร บริเวณเลยปากแม่น้ำออกไปประมาณ 3 km เป็นเขตพื้นที่ดินเงิน (Sojisupom & Jirasirilert, 1991) พื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำบางปะกงมีบริเวณกว้างครอบคลุม 5 จังหวัดในตอนบนของภาคตะวันออก ได้แก่ จังหวัดปราจีนบุรี สระแก้ว นครนายก ฉะเชิงเทรา และชลบุรี มีพื้นที่ลุ่มแม่น้ำทั้งหมด 19,786 ตารางกม (Boonphakdee, Fujiwara & Sawangwong, 1999)

ลักษณะภูมิอากาศในบริเวณพื้นที่ลุ่มแม่น้ำบางปะกง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ฤดูกาล คือ ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างพฤษภาคมถึงตุลาคม (ฤดูฝน) ละฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างพฤศจิกายนถึงเมษายน (ฤดูแล้ง) พบว่ามีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยประมาณ 1,280 mm/month โดยมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในฤดูฝนและฤดูแล้ง (รอบ 6 เดือน) เท่ากับ 180 และ 34 mm/month ตามลำดับ (ปิ่นัญญา ธนสุวรรณ, ชวเลศ นวลโคกสูง และสุภาณี ศักดาเยี่ยงยงค์, 2539) ซึ่งปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำท่าที่ไหลออกสู่ปากแม่น้ำ พบว่าการไหลของน้ำท่าออกสู่ปากแม่น้ำบางปะกง จะเกิดขึ้นช้ากว่าน้ำฝนที่ตกลงในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงประมาณ 1 เดือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงต้นฤดูฝน (Boonphakdee et al., 1999)

ลักษณะน้ำขึ้นน้ำลงในบริเวณปากแม่น้ำบางปะกงเป็นแบบผสม (Mixed Type) คือมีน้ำขึ้นลงวันละ 2 ครั้ง ในช่วงน้ำตาย (Neap Tide) และวันละ 1 ครั้งในช่วงน้ำเกิด (Spring Tide) และมีค่าแตกต่างระหว่างระดับน้ำสูงสุด (Tidal Range) ในแต่ละวันประมาณ 1.5 เมตร หรือต่ำกว่าในช่วงน้ำตาย และสูงกว่า 3 เมตรในช่วงน้ำเกิด (พิชาญ สว่างวงศ์ และคณะ, 2541) คุณภาพน้ำบริเวณบางปะกงเอสทูรี พบว่าความเค็มมีค่าอยู่ระหว่าง 0-33.5 psu อุณหภูมิมีค่าอยู่ระหว่าง 24.5-34.9 °C ความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำอยู่ระหว่าง 5.46-8.1 และออกซิเจนละลายน้ำอยู่ระหว่าง 0.1-14.4 mg/l บางปะกงเอสทูรีเป็นบริเวณน้ำกร่อยที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากน้ำท่าที่ทำให้บริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มตลอดเวลา คือในฤดูฝนมีฝนตกมาก ปริมาณน้ำท่าจึงมีมาก ความเค็มที่ตรวจวัดได้จะต่ำ มีค่าอยู่ในช่วง 0-10 psu และมีการเปลี่ยนแปลงความเค็มในช่วงกว้าง ในขณะที่ฤดูแล้งฝนตกน้อย ทำให้มีปริมาณน้ำท่าน้อย ความเค็มที่ตรวจวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 20-30 psu และมีการเปลี่ยนแปลงความเค็มในช่วงแคบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของน้ำท่าต่อแม่น้ำบางปะกง (พิชาญ สว่างวงศ์ และคณะ, 2541)

ตลอดระยะทางที่ลำน้ำสาขาไหลผ่าน พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเขตการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 81 ของพื้นที่ทั้งหมด โดยแบ่งเป็นพื้นที่เพื่อการเพาะปลูกร้อยละ 72 พื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อยร้อยละ 7 และพื้นที่เพื่อการปศุสัตว์ร้อยละ 2 (พิชาญ สว่างวงศ์ และคณะ, 2541) ในพื้นที่เพื่อการเพาะปลูกร้อยละ 72 ดังกล่าวข้างต้นส่วนใหญ่เป็นการทำนา และพบว่ามีพื้นที่นา ซึ่งมีการใช้ปุ๋ยเคมีที่ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม คิดเป็นร้อยละ 84 ของพื้นที่ทำนาทั้งหมด โดยเฉพาะในจังหวัดฉะเชิงเทรานั้นมีการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นจาก 1,263 ตัน ใน พ.ศ. 2535 เป็น 2,432 ตัน ใน พ.ศ. 2536 (ปณัญญา ธนเศรษฐ และคณะ, 2539) เป็นการแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่ปุ๋ยจะตกค้าง และถูกฝนชะล้างลงสู่แม่น้ำบางปะกงทำให้เกิดการปนเปื้อนจากสารประกอบไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

พื้นที่ปศุสัตว์ส่วนใหญ่ที่พบในกลุ่มแม่น้ำบางปะกงจะเป็นฟาร์มสุกร เป็ดและไก่ เนื่องจากกิจกรรมเหล่านี้ส่วนใหญ่มักจะพบอยู่ใกล้กับแหล่งน้ำ เพื่อความสะดวกในการกำจัดของเสียโดยการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง ดังนั้นฟาร์มปศุสัตว์จึงเป็นแหล่งหนึ่งของสารอินทรีย์ที่สำคัญที่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนั้นการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในเขตจังหวัดฉะเชิงเทราซึ่งมีพื้นที่รวมกันทั้งหมด 96,536 ไร่ (ประจวบ ลีรักษากิจยติ, 2543) ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง ซึ่งน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งที่ปล่อยลงสู่แม่น้ำก็เป็นแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางตอนล่างของแม่น้ำบางปะกง (จริญ วงษ์วิวัฒน์วาท, พิชิต ศรีมุกดา, ลือชัย ครุณชู และไพรัช เขียวรัตน์, 2540) รวมทั้งโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ตั้งอยู่ริมแม่น้ำบางปะกง เช่น โรงผลิตมันสำปะหลังและมันอัดเส้น โรงน้ำปลา โรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง

โรงสีข้าว น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมามักอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ จึงมีส่วนในการเพิ่มสารอาหารแก่แหล่งน้ำ ตลอดจนน้ำทิ้งจากครัวเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ผงซักฟอกก็เป็นการเพิ่มปริมาณฟอสเฟตให้แก่แหล่งน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าแม่น้ำบางปะกงได้รับผลกระทบจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ จนอาจส่งผลกระทบให้กับคุณภาพของน้ำในแหล่งนี้ด้วย

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าอ่าวไทยตอนบนด้านตะวันออก ที่ติดกับชายฝั่งของจังหวัดฉะเชิงเทราและชลบุรี มักจะเกิดปรากฏการณ์การเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton Bloom) ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าอาจจะเนื่องมาจากการมีปริมาณสารอาหารและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต โดยมักจะเกิดในช่วงเดือน กรกฎาคม - สิงหาคม ที่พบ ในปี 2534-2535 และพบว่าเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี 40 ครั้ง ในช่วงปี 2524-2531 (พิชาญ สว่างวงศ์ และคณะ, 2541) การเกิดปรากฏการณ์การเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืช เชื่อกันว่าถูกควบคุมโดยคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำ (พิชาญ สว่างวงศ์ และคณะ, 2541) Uchiyama, Iwata, Okuza and Ishida (1987) กล่าวว่า การสะสมสารอาหารอันเนื่องมาจากการพัฒนามากับลำน้ำเป็นสิ่งสำคัญในการทำนายการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ และพบว่ากระแสน้ำและลมมีอิทธิพล อย่างมากต่อการกระจายของแพลงก์ตอนพืช

ลักษณะสำคัญของบริเวณแอสทูรี

1. แอสทูรี (Estuary)

ได้มีผู้ให้คำนิยามไว้อย่างต่าง ๆ กัน เช่น แอสทูรี หมายถึงบริเวณที่น้ำจืดพบกับน้ำทะเลที่รุกกล้าเข้ามา (Fairbridge, 1980) หรือเป็นบริเวณที่มีการผสมผสานกันระหว่างสารละลายที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันมาก (Phillip, 1972) ส่วนทางด้านสมุทรศาสตร์เคมีนั้น แอสทูรีหมายถึงบริเวณที่น้ำทะเลถูกเจือจางด้วยน้ำจืดจากแผ่นดิน โดยทั่วไปจะพบว่าบริเวณแอสทูรีประกอบไปด้วยน้ำจากแม่น้ำที่มีปริมาณเกลือละลายอยู่ประมาณ 120 mg/l (0.12 ppt) ไปจนถึงน้ำที่มีความเค็มตามระดับน้ำทะเลปกติประมาณ 35 ppt (Livingstone, 1963 cited in Burton, 1976) การหมุนเวียนของน้ำในแอสทูรีถูกควบคุมด้วยปริมาณน้ำท่า (Fresh Water Discharge) และน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal) องค์ประกอบทาง เคมีของน้ำในแอสทูรี จึงเกี่ยวเนื่องกับการผสมผสานของมวลน้ำจืดและมวลของน้ำเค็ม โดยความเค็มมีการเปลี่ยนแปลงจากความเค็มสูงซึ่งเป็นบริเวณที่ติดต่อกับทะเลเปิดและลดลงตามลำดับเมื่อเข้าสู่ลำน้ำ การหมุนเวียนของน้ำในแอสทูรีค่อนข้างที่จะจำกัด และมักจะพบการแบ่งชั้นของน้ำ เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำทะเลมากกว่าน้ำจืด (มนูวดี หังสพฤกษ์, 2532)

แต่โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าเอสทรีทุกแห่งเป็นบริเวณที่น้ำทะเลถูกทำให้เจือจางด้วยน้ำจืดจากแม่น้ำ ในขณะที่น้ำกร่อย (Brackish Water) เป็นน้ำทะเลใด ๆ ซึ่งเจือจางด้วยน้ำจืด โดยที่เราไม่ต้องคำนึงถึงที่มาของน้ำจืดเลย ดังนั้นเอสทรีจึงเป็นถิ่นที่อยู่ของน้ำกร่อย ในขณะที่ถิ่นที่อยู่ของน้ำกร่อยไม่จำเป็นต้องเป็นเอสทรี (มนูวดี หังสพฤกษ์, 2532)

Pritchard (1955) ได้แบ่งเอสทรีตามการแบ่งชั้นและการแจกแจงของชาลิไนตีของมันออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. เอสทรีแบบ Salt Wedge มีการแบ่งระหว่างชั้นน้ำจืดข้างบน กับน้ำเค็มข้างล่างอย่างชัดเจน น้ำขึ้นน้ำลงอ่อน แรงเสียดทานน้อยการไหลของแม่น้ำเป็นตัวควบคุมการไหลเวียน
2. เอสทรีแบบ Partially Mixed น้ำขึ้นน้ำลงแรงกว่าชนิดแรก มีการผสมของน้ำเค็มเข้าไปในน้ำจืดมากขึ้น มีการแบ่งชั้นอย่างปานกลาง
3. เอสทรีแบบ Vertically Homogeneous น้ำขึ้นน้ำลงแรงมากทำให้น้ำเค็มและน้ำจืดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
4. เอสทรีแบบ Sectionally Homogeneous น้ำขึ้นน้ำลงแรงจนเกือบเอาชนะผลของการไหลจากแม่น้ำโดยสิ้นเชิง มีความสม่ำเสมอของชาลิไนตี ทั้งในแนวขวางและแนวดิ่ง

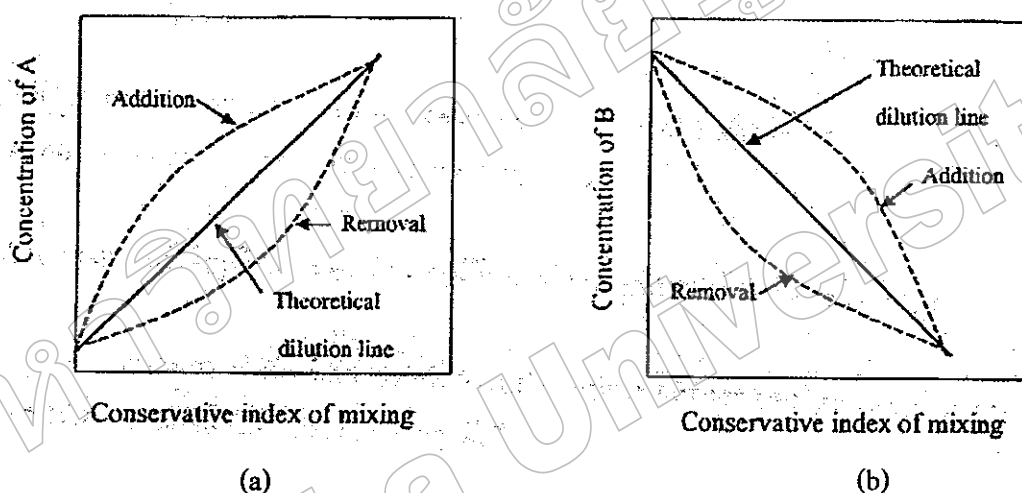
เมื่อพิจารณาถึงบางปะกงเอสทรีแล้ว สามารถจัดว่าเป็นเอสทรีแบบ Salt Wedge ในฤดูฝน และเป็นแบบ Partially Mixed ในฤดูแล้ง

2. พฤติกรรมขององค์ประกอบทางเคมีในเอสทรี

การกระจายขององค์ประกอบทางเคมีภายในเอสทรี มีผลมาจากกระบวนการหลายอย่างพร้อมกัน สารต่าง ๆ ทั้งที่เกิดโดยธรรมชาติและโดยการกระทำของมนุษย์ ต่างก็ถูกนำสู่บริเวณเอสทรีโดยทางแม่น้ำ ทางอากาศ จากแหล่งบนชายฝั่งทะเลใกล้เคียง และจากทะเลด้วยส่วนหนึ่งจะสะสมอยู่ในเอสทรี และส่วนหนึ่งจะถูกพัดพาออกทะเลไป สารเหล่านี้จะอยู่ในสภาพและรูปแบบต่าง ๆ กัน บางส่วนละลายอยู่ในน้ำในรูปแบบของไอออนอิสระ ไอออนคู่สารประกอบเชิงซ้อน คอลลอยด์และสารแขวนลอย ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแร่ธาตุที่แขวนลอยจะมีผิวเคลือบไปด้วยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ รวมทั้งอิทธิพลของสิ่งมีชีวิตด้วย โดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่า ลักษณะทางเคมีของเอสทรี ถูกควบคุมด้วย ลักษณะพื้นฐานทางธรณีวิทยา การหมุนเวียนของกระแสน้ำ และสัดส่วนของการผสมผสานกันของน้ำจืดและน้ำทะเล (มนูวดี หังสพฤกษ์, 2532)

ในการศึกษาทางเคมีของพฤติกรรมขององค์ประกอบที่ละลายน้ำ (ส่วนที่ผ่านแผ่นกรองขนาด $0.45 \mu\text{m}$) ในบริเวณเอสทรี จะดูความสัมพันธ์ของธาตุนั้นโดยใช้ความเค็มเป็นตัวบ่งชี้รูปแบบของการผสมผสาน (Conservative Mixing Index) องค์ประกอบที่ละลายน้ำใด ๆ ที่ปริมาณหรือความเข้มข้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเค็มที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงการ

ผสมผสานกันของน้ำจืดและน้ำทะเล โดยกระบวนการทางกายภาพอย่างเดียว ซึ่งไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางชีวภาพเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีพฤติกรรมเป็นแบบอนุรักษ์ (Conservative) ในกรณีที่ความเข้มข้นขององค์ประกอบน้ำกับความเค็มมีผลเบี่ยงเบนไปจากเส้นเจือจางทางทฤษฎี (Conservative Dilution Line) แสดงให้เห็นว่ามีการสูญเสีย (Removal หรือ Sink) โดยกราฟจะมีลักษณะโค้งลง (Concave) หรือการเพิ่มขึ้น (Addition หรือ Source) โดยกราฟจะมีลักษณะโค้งขึ้น (Convex) เนื่องจากกระบวนการทางเคมี หรือทางชีวภาพก็ตามเรียกว่า มีพฤติกรรมแบบไม่อนุรักษ์ (Non – Conservative) (Liss, 1976) (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ละลายน้ำ กับตัวบ่งชี้รูปแบบของการผสมผสานของเอสทูรี ที่มีเพียงแหล่งน้ำแม่น้ำกับน้ำทะเล
(a) ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในน้ำทะเลมากกว่าในแม่น้ำ
(b) ความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ในแม่น้ำมากกว่าน้ำทะเล

3. การเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของธาตุที่ละลายน้ำในบริเวณเอสทูรี

เมื่อธาตุหรือสารอาหารเข้าสู่เอสทูรีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณ และโครงสร้างทางเคมี การเปลี่ยนแปลงของธาตุที่ละลายน้ำภายในเอสทูรีโดยรวมแล้ว เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทางชีวธรณีเคมี (Biogeochemical Processes) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดค่อนข้างสลับซับซ้อน (Dyressen & Wedborg, 1980) จึงทำให้เอสทูรีเป็นบริเวณที่พบมีการเปลี่ยนแปลงของธาตุที่ละลายน้ำตลอดเวลา อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการได้แก่

3.1 กระบวนการทางกายภาพ โดยการผสมผสานระหว่างน้ำจืดจากแม่น้ำและน้ำเค็มจากทะเลในบริเวณเอสทูรี ทำให้ความเข้มข้นของธาตุที่ละลายน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งในทางที่เพิ่มขึ้นและลดลง ขึ้นอยู่กับว่าธาตุนั้นมีปริมาณมากในน้ำจืดหรือในน้ำทะเล และเนื่องมาจากการที่กระแสน้ำจากแม่น้ำที่ไหลมาด้วยความเร็วสูง เมื่อปะทะกับน้ำทะเลบริเวณเอสทูรี ทำให้ความเร็วของน้ำลดลง สารแขวนลอยและตะกอนต่าง ๆ ที่มากับแม่น้ำก็จะตกทับถมกันที่บริเวณเอสทูรี ด้วยเหตุนี้จึงมักจะเรียกบริเวณเอสทูรีนี้ว่าเป็นแหล่งกักเก็บปริมาณสารอาหาร (Nutrients Trap) เมื่อสารแขวนลอยและตะกอนได้จมตัวลงในบริเวณนี้แล้ว อาจจะมีการฟุ้งกระจายของตะกอนขึ้นมาได้ ซึ่งทำให้เกิดการหมุนเวียนของสารอาหารอินทรีย์ที่ละลายน้ำระหว่างตะกอนดินและมวลน้ำเกิดขึ้น และปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการหมุนเวียนนี้ ได้แก่ น้ำขึ้นน้ำลง คลื่น และพายุฝน ทำให้เกิดการผสมผสานของน้ำและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงแบบชั่วคราวในการถ่ายเทสาร (ณัฐวรรตน์ ปภาวสิทธิ์, 2522 และ มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)

3.2 กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการที่พบว่ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอาหารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำบริเวณเอสทูรีมาก (Aston, 1980) โดยจะทำให้เกิดการรวมตัวของสารอาหารกับสารแขวนลอยและตะกอนดิน ทั้งโดยการแลกเปลี่ยนประจุกัน และการดูดซับ (Adsorption) กับสารแขวนลอยและตะกอนดิน ทำให้มีขนาดใหญ่มากขึ้นและจมตัวลงสู่พื้นท้องน้ำ และอาจเกิดการละลายกลับสู่มวลน้ำของสารอาหารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจากตะกอนดินได้โดยการปลดปล่อย (Desorption) ซึ่งปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการดูดซับ และการปลดปล่อยของสารอาหารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในบริเวณเอสทูรี ได้แก่ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ น้ำ และรีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox Potential) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหมุนเวียนของสารอาหารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเหล่านี้ (ณัฐวรรตน์ ปภาวสิทธิ์, 2522 และ มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)

3.3 กระบวนการทางชีววิทยา สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณเอสทูรีจะเป็นตัวการสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสารอาหารจากสารอินทรีย์ให้กลายเป็นสารอนินทรีย์ เปลี่ยนสารอาหารจากสารอนินทรีย์ไปเป็นสารอินทรีย์ เปลี่ยนสารอาหารที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยไปเป็นสารละลาย หรือเปลี่ยนรูปจากรูปสารละลายไปเป็นสารแขวนลอย (Dyresen & Wedborg, 1980) กล่าวคือเมื่อมีสารอินทรีย์เข้าสู่แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นให้เป็นสารอนินทรีย์ แล้วสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกแพลงก์ตอนพืชที่มีชีวิตนำไปใช้ โดยการดูดซึมผ่านทางผนังเซลล์ และสามารถปลดปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ต่อไป แพลงก์ตอนพืชเหล่านี้จัดเป็นอินทรีย์สารที่แขวนลอยซึ่งจะเป็นอาหารแก่ผู้บริโภคในลำดับต่อไปในห่วงโซ่อาหาร เมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ตายลงจะจมตัวลง

หรือแขวนลอยอยู่ และกลายเป็นแหล่งอาหารแก่สัตว์หน้าดิน หรือแบคทีเรียทั้งในมวลน้ำและที่เกาะอยู่ที่ผิวของดินตะกอน ซึ่งจะทำให้การย่อยสลายซากเหล่านั้น (ปัญญานิช พรพวงษ์, 2533 และ มนุวดี หังสพฤกษ์, 2532) สิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ มีบทบาทสำคัญในการกลับคืน (Regeneration) ออกมาสู่มวลน้ำของสารอนินทรีย์ใน ไตรเจน ฟอสฟอรัส และซิลิเกต

ฟอสฟอรัสและความสำคัญของฟอสฟอรัส

1. ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นธาตุสำคัญชนิดหนึ่งในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลต่าง ๆ เช่น DNA และโครงสร้างที่เป็นผนังของเซลล์ เป็นต้น นอกจากนั้น กระดูกและฟันของสัตว์ยังมีฟอสฟอรัสจำนวนมาก แหล่งของฟอสฟอรัสตามธรรมชาติอยู่ใน หินฟอสเฟต โดยธรรมชาติสารประกอบที่มีธาตุฟอสฟอรัสเหล่านี้ถูกกัดกร่อนและชะล้างพังทลาย ละลายโดยการกระทำของน้ำและลม ค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสในน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 70-75 $\mu\text{g P/l}$ โดยปกติที่ซาลินิตีปกติของน้ำทะเล pH 8.0 และอุณหภูมิ 20 °C ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูป HPO_4^{2-} 87 % ในรูปของ PO_4^{3-} 12 % และ H_2PO_4^- 1 % เมื่อมีการแตกตัวแล้ว เกือบทั้งหมด (99.6 %) จะจับคู่กับ แคลเซียมและแมกนีเซียมในรูปของไอออนคู่ ส่วนฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในรูปของโพลีฟอสเฟตจะพบมากบริเวณชายฝั่งและเอสทูรี เพราะเป็นส่วนที่ได้จากผงซักฟอก (Detergent) ซึ่งมาจากกิจกรรมของมนุษย์และชุมชน แต่ในน้ำทะเลผิวหน้าอาจมีปริมาณต่ำกว่านี้ เนื่องจากถูกใช้โดยแพลงก์ตอนพืช และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ระดับวิกฤติของฟอสเฟตในน้ำอยู่ที่ความเข้มข้นประมาณ 10 $\mu\text{g P/l}$ เพราะถ้าต่ำกว่านี้แล้วการแบ่งเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชจะถูกจำกัด โดยเซลล์ที่สร้างขึ้นใหม่จะขาดแคลนฟอสฟอรัส แล้วในที่สุดการสังเคราะห์แสงจะหยุดลง แต่ถ้าเติมฟอสเฟตให้เซลล์ก็จะดูดซึมไปใช้อย่างรวดเร็ว (มนุวดี หังสพฤกษ์, 2532)

2. ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสไม่มีในสภาพเป็นแก๊สในบรรยากาศ แต่ฟอสฟอรัสในบรรยากาศอยู่ในรูปของอนุภาคเล็ก (Particle) ที่เกิดจากการผุกร่อนโดยการพัดพาของลมหรืออากาศรวมไปถึงกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ทำให้เกิดฟอสเฟตเข้าไปสู่อากาศและทะเล เช่นน้ำที่ใช้ในการซักฟอก (ในรูปฟอสเฟตและโพลีฟอสเฟต) จากการใช้ปุ๋ยในการเกษตร (ในรูปของออร์โธฟอสเฟต) ซึ่งมักจะมากับการถูกชะล้างจากน้ำฝนแล้วไหลลงสู่แม่น้ำ ในแหล่งน้ำต่าง ๆ นั้นฟอสเฟตจะรวมอยู่กับธาตุที่มีประจุบวกชนิดต่าง ๆ โดยฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของฟอสเฟตจะถูกพืชนำไปใช้ได้ดีที่สุด (เป็ยมศักดิ์ เมนะเสวด, 2539) และเมื่อสิ่งมีชีวิตนำฟอสฟอรัสไปใช้แล้วก็จะมีการขับถ่ายออกจากสิ่งมีชีวิตในรูปของ ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ ส่วนฟอสฟอรัสแขวนลอยอาจประกอบด้วยเฟอริก

ฟอสเฟตแคลเซียมฟอสเฟต และฟอสฟอรัสอินทรีย์ ซึ่งถูกดูดซับได้บนสารแขวนลอย เนื่องจากฟอสเฟตเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ดี และมีจำนวนมากกว่าฟอสเฟตอินทรีย์ที่ละลายอยู่มาก จึงสามารถหาค่าของฟอสเฟตแทนค่าผลของฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำทั้งหมดได้ (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)

ความเข้มข้นหรือปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจะมีมากหรือน้อย ขนาดไหนขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม 4 ประการ

2.1 รูปร่างของแหล่งน้ำ ถ้าแหล่งน้ำมีขนาดใหญ่ มีปริมาตรมากก็จะมีโอกาสที่จะเจือจางได้มาก ฉะนั้นก็จะมีฟอสฟอรัสละลายอยู่น้อย

2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งน้ำ ถ้าแหล่งน้ำตั้งอยู่ในแหล่งที่มีหินฟอสเฟตก็จะทำให้น้ำมีความเข้มข้นของฟอสเฟตสูง

2.3 ระยะใกล้หรือไกลจากแหล่งที่มีน้ำโสโครก หรืออินทรีย์สาร ถ้าแหล่งน้ำตั้งอยู่ใกล้แหล่งดังกล่าว น้ำสิ้นผิวดินอาจนำพาฟอสฟอรัสลงมากในแหล่งน้ำได้มาก ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก็สูงขึ้น

2.4 ความสามารถในการย่อยสลายของฟอสเฟตอินทรีย์ในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจทำให้มีการตกตะกอนของฟอสฟอรัสออกไปจากน้ำได้ (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต, 2539)

3. วัฏจักรของฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อม

จากภาพวัฏจักรของฟอสฟอรัส (ภาพที่ 2) จะเห็นได้ว่า ฟอสฟอรัสเข้าสู่บริเวณเอสทูรีได้ 2 ทาง คือจากการชะล้างบนพื้นผิวโลกแล้วเกิดการ Run Off หรือมาจาก Point Source discharge เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม บ้านเรือน การเกษตรกรรม รวมไปถึงการย่อยสลายของโพลี-ฟอสเฟตที่ใช้ในผงซักฟอก ส่วนอีกทางซึ่งเป็น Non-Point Source Discharge ได้มาจากการที่สิ่งมีชีวิตตายลงแล้วถูกย่อยสลายในน้ำ ฟอสฟอรัสส่วนหนึ่งในซากสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นจะถูกปล่อยกลับเข้าสู่แหล่งน้ำ ส่วนที่เหลือก็จะผ่านขบวนการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีของดินตะกอน กลายเป็นแร่ฟอสฟอรัส เช่น Apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ส่วนที่สูญเสียออกจากน้ำนี้จะถูกขดเชย โดยรับเพิ่มจากการชะล้างฟอสฟอรัสจากพื้นดินลงสู่ทะเล ฟอสฟอรัสโดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 รูปแบบคือ

3.1 อินินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ (Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP)

3.2 อินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Phosphorus, DOP)

3.3 อินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่แขวนลอย (Particulate Organic Phosphorus, POP)

อนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำจะถูกใช้โดยสาหร่าย และแบคทีเรียโดยการดูดซึมผ่านทางผนังเซลล์และสร้างเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่แขวนลอย ซึ่งสามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ทั้งรูปอินทรีย์ และอนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำ จากการจับถ่าย อินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำจะสามารถถูกย่อยสลายโดยการทำงานของแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นรูปอนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำได้ กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ทั้งในน้ำ และในดินตะกอน โดยความสำคัญของแบคทีเรียในการสร้างอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในดินตะกอนมีมากกว่าในน้ำ ฟอสฟอรัสที่ละลายในน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างดินตะกอนจะถูกแลกเปลี่ยนโดยกระบวนการแพร่สู่น้ำข้างบนได้

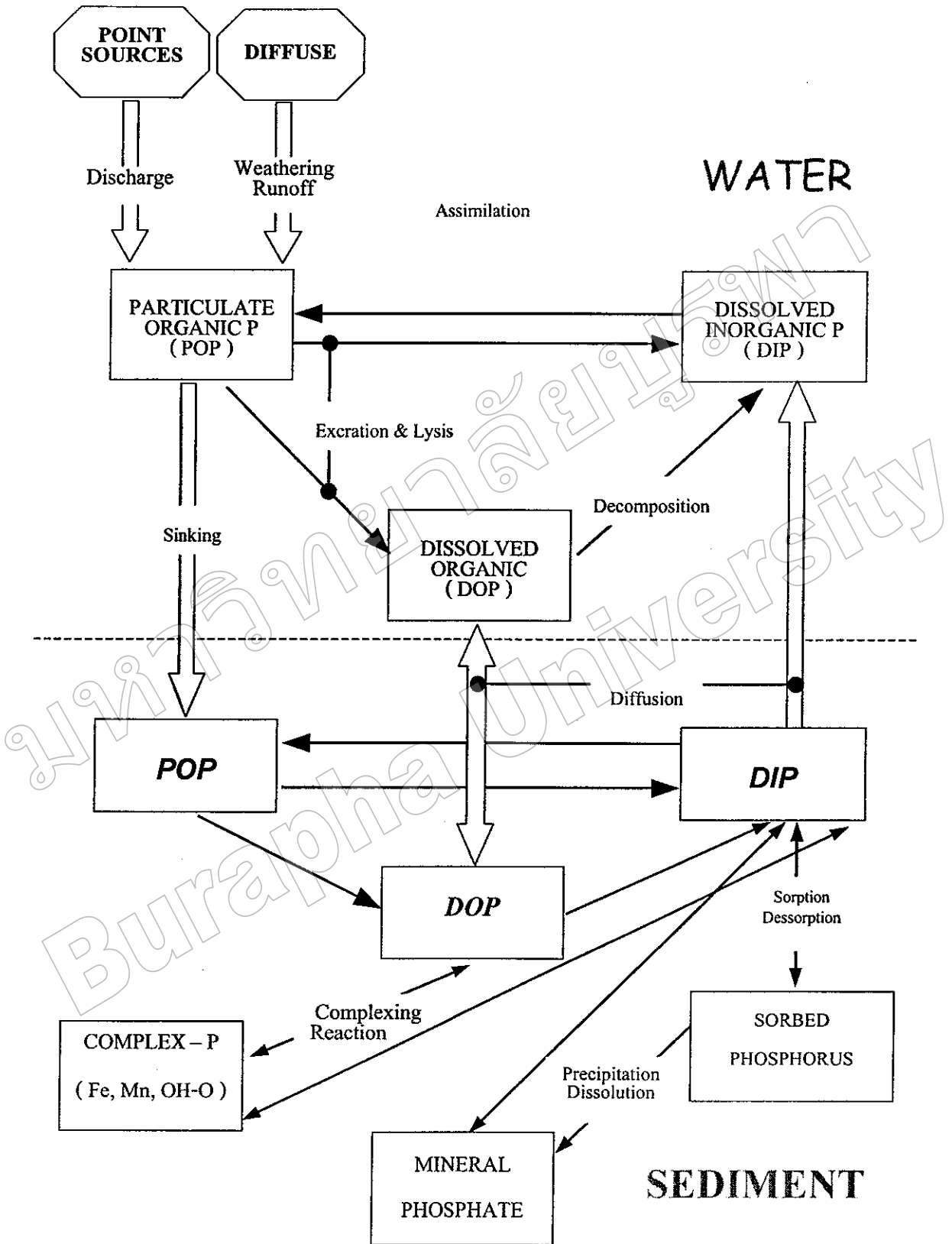
อนินทรีย์และอนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำสามารถรวมตัวกับโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก และแมงกานีส เป็นสารประกอบเชิงซ้อนตกตะกอนในรูปที่ไม่ละลายน้ำในสภาพที่มีออกซิเจนในดินตะกอนได้ และจะมีการละลายได้ใหม่ เมื่อมีการรีดิวซ์ หรืออยู่ในสภาพที่ขาดออกซิเจน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการนำอนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำไปใช้โดยพวกแพลงก์ตอนพืช

4. การหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในเอสทูรี

การชะล้างเปลือกโลกช่วยนำฟอสฟอรัสลงสู่เอสทูรีในรูปของแร่ฟอสเฟต ทั้งส่วนที่ละลายน้ำและส่วนที่เป็นเศษชิ้นส่วนเล็ก ๆ ในน้ำทั้งจากชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรมก็ยังมี การปล่อยสารประกอบฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตสามารถเปลี่ยนฟอสฟอรัสอนินทรีย์ไปเป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์ได้

4.1 การควบคุมฟอสฟอรัสโดยกระบวนการทางเคมีอนินทรีย์

ในน้ำทะเลฟอสเฟตอาจถูกแยกออกจากน้ำโดยการดูดซับไว้บนผิวของเศษแร่ธาตุ การดูดซับจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำและพื้นที่ผิวที่ดูดซับ การทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นกระบวนการแบบคายความร้อน (Exothermic) การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในช่วง pH 3-7 จะเป็นไปได้ดีที่สุด จึงเกิดในน้ำจืดได้ดีกว่าในน้ำทะเล ยิ่งกว่านั้นการเพิ่มขึ้นของความเค็มก็เป็นการลดการดูดซับอีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งอาจเป็นเพราะการแก่งแย่งพื้นที่ดูดซับโดยแอนไอออนตัวอื่นที่มีมากในน้ำทะเล เช่น Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- ดังนั้นในเอสทูรี บริเวณที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการดูดซับฟอสเฟต คือ บริเวณส่วนบนสุดของเอสทูรี ดังนั้นขบวนการ Buffering ของฟอสเฟต โดยการดูดซับและการคายออกจากผิวของตะกอนเป็นข้อควรพิจารณาที่สำคัญที่ควบคุมปริมาณฟอสเฟตในเอสทูรี ขบวนการนี้สำคัญมากเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของ มลภาวะจากน้ำทิ้งต่อเอสทูรี โดยที่ตะกอนเป็นตัวดูดซับเอาฟอสฟอรัสจำนวนมากไว้ (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)



ภาพที่ 2 วัฏจักรของฟอสฟอรัสในบริเวณเอสทูรี (Day et al., 1989)

4.2 การหมุนเวียนของฟอสฟอรัสอันเนื่องมาจากสิ่งมีชีวิต

การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสเฟตที่ละลายน้ำและในรูปสารแขวนลอยจากแม่น้ำ อาจแปรเปลี่ยนได้รวดเร็วกว่า และในเอสทูรีน้ำมีโอกาสดังกล่าวมากกว่า การแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสจึงเกิดขึ้นได้มากเนื่องมาจากฟอสฟอรัสที่อยู่บนผิวของอนุภาคเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายฟอสฟอรัสอินทรีย์ให้เป็นฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเพื่อให้แพลงก์ตอนพืชดึงเอาฟอสเฟตที่ละลายในน้ำพวกนี้ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหารตามระบบห่วงโซ่อาหารต่อไป เมื่อสัตว์มากขึ้นสารแขวนลอยหรือแพลงก์ตอนเข้าไปก็แล้วจะกักฟอสฟอรัสคืนสู่น้ำในรูปของออร์โธฟอสเฟตจากของเสียที่ปล่อยออกจากเซลล์และการสลายของซากสิ่งมีชีวิต ดังนั้นหากมีการเพิ่มของฟอสฟอรัสเข้าสู่ระบบเป็นจำนวนมาก (Eutrophication) แล้วก็จะทำให้เกิดการสังเคราะห์แสง (Phytoplankton Bloom) มากตามวัฏจักรไปด้วย โดยร่วมกับการใช้สารอินทรีย์อื่น เช่น ไนโตรเจน และซิลิโคน อย่างไรก็ตามการหมุนเวียนเป็นวัฏจักรของฟอสฟอรัสในเอสทูรีจะมีความคล้ายคลึงกับวัฏจักรในมหาสมุทร แต่แตกต่างกันตรงที่การเพิ่มของฟอสฟอรัสเข้ามาในเอสทูรีนั้นมีที่มาจากภาวะมลพิษ เช่น น้ำเสียจากชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความสำคัญมากกว่า

5. ความสัมพันธ์ของฟอสฟอรัสกับสิ่งมีชีวิต

ฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ เนื่องจากฟอสฟอรัสจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจำพวกแพลงก์ตอนพืช ซึ่งจะดึงเอาออร์โธฟอสเฟตออกจากน้ำไปใช้โดยตรง สารประกอบฟอสฟอรัสประเภทอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine Triphosphate: ATP) และนิวคลีโอไทด์โค-เอนไซม์ (Nucleotide Co-Enzyme) เป็นตัวสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงและอื่นๆ ในพืช โดยมีระดับวิกฤติของฟอสเฟตในน้ำอยู่ประมาณ $10 \mu\text{g P/l}$ เพราะถ้าต่ำกว่านี้แล้วจะเป็นการจำกัดการแบ่งเซลล์ และเซลล์ที่สร้างขึ้นใหม่จะขาดแคลนฟอสฟอรัส ดังนั้นหากเดิมฟอสเฟตอินทรีย์เข้าสู่แหล่งน้ำแล้ว เซลล์ของแพลงก์ตอนพืชจะดูดซึมไปใช้ได้อย่างรวดเร็ว และการที่ฟอสเฟตอินทรีย์สามารถถูกใช้ได้โดยแพลงก์ตอนพืชอาจเป็นเพราะแบคทีเรียได้ช่วยย่อยสลายอินทรีย์ฟอสเฟตให้ก่อนแล้ว (มนูวดี หังสพฤกษ์, 2532)

Hecky and Kilham (1988) กล่าวว่า เมื่อแสงและอุณหภูมิมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้งอัตราการสูญหายไม่มากเกินไป ปริมาณสารอาหารจะเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช รูปแบบการแพร่กระจายของสารอาหารในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำทะเล มีความแตกต่างกันอย่างเห็นเด่นชัด ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการทำให้สรุปได้ว่า สัดส่วน N : P จะเป็นดัชนีบ่งชี้การเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช สัดส่วน N : P ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชเท่ากับ 16 : 1 โดยพบว่าสัดส่วน

N : P ในน้ำทะเลเท่ากับ 13 : 1 ดังนั้นไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยจำกัดในน้ำทะเล ขณะเดียวกัน สัดส่วน N : P ในน้ำจืดเท่ากับ 28 : 1 ดังนั้นฟอสฟอรัสจึงเป็นปัจจัยจำกัดในน้ำจืด

พฤติกรรมของฟอสฟอรัสบริเวณเอสทูรี และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. พฤติกรรมของฟอสเฟตบริเวณเอสทูรี

ได้เคยมีผู้ทำการศึกษาพฤติกรรมของฟอสฟอรัสในเอสทูรีจากหลาย ๆ พื้นที่ เช่น

กัลยา อำนวย (2527) และ ถัดดา แก้วศรีประกาย (2528) ศึกษาพฤติกรรมของธาตุ ปริมาณน้อยบางตัวในแม่น้ำและปากแม่น้ำเจ้าพระยา พบว่าฟอสเฟตมีพฤติกรรมแบบอนุรักษ์ใน เอสทูรี ของแม่น้ำเจ้าพระยา

Sousa (1983 อ้างถึงใน ปัญญาธิ์ พราพษ์, 2533) ศึกษาในเอสทูรีของแม่น้ำ Mandovi พบว่าความเข้มข้นของฟอสเฟตเกือบจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน ช่วงความเค็มต่ำ และความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเค็มสูงขึ้น

Fisher, Harding, Stanley and Ward (1988) ศึกษาปริมาณแพลงก์ตอน สารอาหาร และ ความขุ่นของน้ำใน Chesapeake, Delaware และ Hudson Estuary พบว่าฟอสเฟตมีพฤติกรรมเป็น แบบไม่อนุรักษ์ โดยมีการสูญเสียของฟอสเฟตในเอสทูรีของ Chesapeake และ Delaware แต่มีการ เพิ่มของฟอสเฟตใน Hudson

Fox, Lipochultz, Kerkhof and Wofsy (1987) ศึกษาในเอสทูรีของแม่น้ำ Mississippi พบว่าฟอสเฟตมีพฤติกรรมเป็นแบบอนุรักษ์ โดยฟอสเฟตลดลงจากความเค็มต่ำไปสู่ความเค็มสูง

Rehm (1985) ศึกษาในเอสทูรีของแม่น้ำ Weser พบว่าในช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาว ฟอสเฟตมีพฤติกรรมเป็นแบบอนุรักษ์

Eastman and Church (1985) ศึกษาพฤติกรรมของเหล็ก แมงกานีส ฟอสเฟตและ กรดฮิวมิก ระหว่างการผสมของน้ำในเอสทูรีของแม่น้ำ Delaware พบว่า ฟอสเฟตมีพฤติกรรมเป็น แบบไม่อนุรักษ์ โดยมีการเพิ่มของฟอสฟอรัสอย่างมากในช่วงความเค็มต่ำ (ประมาณ 1 – 10 psu)

Mackey and Leatherland (1976) พบว่า ฟอสเฟตในเอสทูรีของแม่น้ำ Clyde มีพฤติกรรม เป็นแบบไม่อนุรักษ์ โดยมีการสูญเสียของฟอสเฟตเกิดขึ้น

2. ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของฟอสเฟตในเอสทูรี

จากพฤติกรรมที่แตกต่างกันนี้มีผลมาจาก

2.1 การเกิดบัฟเฟอร์ของฟอสเฟตในเอสทูรี

2.2 ผลของอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด – ด่าง และความเค็ม

2.3 อิทธิพลของโลหะ และอินทรีย์สาร

2.1 การเกิดบัฟเฟอร์ของฟอสเฟตในเอสทูรี

กระบวนการสำคัญในบริเวณเอสทูรีที่พยายามจะรักษาระดับของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำให้อยู่ในภาวะที่สมดุล เรียกว่า “ขบวนการบัฟเฟอร์ริง” ซึ่งตะกอนดินจะเป็นตัวการสำคัญในการดึงเอาฟอสเฟตออกจากมวลน้ำ ถ้าในน้ำนั้นมีความเข้มข้นของฟอสเฟตมากเกินไป และสามารถเติมฟอสเฟตแก่มวลน้ำ ถ้าในน้ำนั้นมีความเข้มข้นของฟอสเฟตน้อยเกินไป โดยดูดซับและคายออกจากผิวตะกอนดิน (อนเนก จูศิริพงษ์กุล, 2539)

Steffanson and Richard (1963) ศึกษาพฤติกรรมของฟอสเฟตที่ละลายน้ำระหว่างการผสมผสานของน้ำในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำ Columbia พบว่า ความเข้มข้นของฟอสเฟตเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงความเค็มที่พบบริเวณนั้น (0 – 32 psu) ที่ระดับความเข้มข้น 37 $\mu\text{g P/l}$ ซึ่งเนื่องมาจาก “buffering effect” ในน้ำบริเวณเอสทูรีซึ่งพยายามรักษาค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในบริเวณเอสทูรีให้มีค่าคงที่ 37 $\mu\text{g P/l}$

Butler and Tibbets (1972) ศึกษาในเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar พบว่ามี “Buffering Effect เกิดขึ้น” โดยมีการควบคุมปริมาณของฟอสเฟตให้อยู่ในช่วง 22 – 46 $\mu\text{g P/l}$ โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างฟอสเฟตในน้ำ และในตะกอนแขวนลอย

Lawrence and Steven (1980 อ้างถึงใน ปัญญาณีย์ พรารพงษ์, 2533) พบว่าฟอสเฟตมีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์อย่างสูงโดยปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างฟอสเฟตในน้ำและในดินตะกอนแขวนลอยบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำ Colorado

Sousa (1983 อ้างถึงใน ปัญญาณีย์ พรารพงษ์, 2533) พบว่ามีกลไกในการเกิดบัฟเฟอร์ของฟอสเฟตของดินตะกอนในเอสทูรีของแม่น้ำ Mandovi ที่มีความเค็มต่ำ ๆ โดยมีการแลกเปลี่ยนของฟอสเฟตระหว่างน้ำกับดินตะกอน

2.2 ผลของอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด – ด่าง และความเค็ม

Aston (1980) และ Chen, Butler and Stumm (1973) ศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า การดูดซับของฟอสเฟตเป็นกระบวนการคายความร้อน โดยที่การดูดซับของฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสนับสนุนผลการศึกษาในแม่น้ำ Colorado ของ Lawrence and Steven (1980 อ้างถึงใน ปัญญาณีย์ พรารพงษ์, 2533)

นอกจากนี้ Carpenter & Smith (1984) ศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่าการสูญเสียของฟอสเฟตโดยกระบวนการดูดซับเพิ่มจาก 43 % - 51 % เมื่อ pH ของน้ำจืดและน้ำเค็มลดลงจาก 8.2 – 6.0

Seitzinger (1991), Boers (1991) พบว่าในน้ำที่มี pH สูง (ประมาณ 9 – 10) ทำให้มีการปลดปล่อยของฟอสเฟตจากดินตะกอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ pH สูง ๆ จะช่วยในการเพิ่มการคาย

ฟอสเฟตไอออนจากเหล็กไฮดรอกไซด์เมื่อ pH และอุณหภูมิคงที่กระบวนการดูดซับของฟอสเฟตจะน้อยลงเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange mechanism) โดยที่ความเค็มสูงขึ้นจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนตัวอื่น เช่น Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- ได้ดีกว่าฟอสเฟตไอออน

Carpenter and Smith (1984) พบว่าการสูญเสียของฟอสเฟตจะเกิดได้ดีที่ความเค็มต่ำ ๆ อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า การสูญเสียของฟอสเฟตบริเวณเอสทรีเกิดได้ดีในสภาพที่ความเค็มและ pH ต่ำ ซึ่งสภาพแบบนี้เกิดได้ดีในบริเวณต้นเอสทรี

2.3 อิทธิพลของโลหะ และอินทรีย์สาร

กัลยา อำนวย (2525) ศึกษาฟอสฟอรัสในดินตะกอนพบว่า ฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอินทรีย์คาร์บอน แสดงถึง การได้รับของฟอสฟอรัสจากดินตะกอนโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์

ลัดดา แก้วศรีประกาย (2528) ทำการศึกษาเปรียบเทียบดินตะกอนธรรมชาติกับดินตะกอนที่กำจัดโลหะและอินทรีย์สารแล้ว พบว่า ดินตะกอนธรรมชาติคายฟอสเฟตออกสู่สารละลายมากกว่าดินตะกอนที่ไม่ได้กำจัดโลหะและอินทรีย์สาร

Hosmi, Okada and Sudo (1982) พบว่า ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากดินตะกอนของทะเลสาบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการลดลงของฟอสฟอรัสที่ยึดติดกับเหล็กทั้งในสภาพ Aerobic และ Anaerobic

Carpenter and Smith (1984) ได้สร้างรูปแบบของการผสมผสานกันไนเอสทรีเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฟอสเฟต พบว่า เหล็กออกไซด์มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของฟอสเฟต โดยถ้ามีเหล็กออกไซด์อยู่ในปริมาณที่สูง จะทำให้มีการสูญเสียของฟอสเฟตเกิดขึ้นมาก

Klapwizlk and Bruming (1984) พบว่า การปลดปล่อยของฟอสเฟตออกจากดินตะกอนบริเวณทะเลสาบในประเทศเนเธอร์แลนด์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของฟอสฟอรัสที่ยึดติดอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น อินทรีย์สารและเหล็ก

ไนโตรเจนและความสำคัญของไนโตรเจน

ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำมาก เพราะเป็นส่วนประกอบของอินทรีย์สารหลายชนิดที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของพืชและสัตว์ เช่น เป็นส่วนประกอบของโปรตีน และไขมันบางชนิด ไนโตรเจนที่ลงสู่เอสทรีมีทั้งแก๊สไนโตรเจน และสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ อนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท) และอินทรีย์ไนโตรเจน โดยส่วนมากเป็นไนเตรท ที่ได้จากการชะล้างของหินและแหล่งมลพิษ เช่น ปุ๋ยไนเตรท เป็นต้น

สารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนรูปแบบที่สำคัญที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือ ไนเตรทไอออน (NO_3^-) ไนไตรท์ไอออน (NO_2^-) แอมโมเนีย (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) โดยแอมโมเนียจะเป็นแหล่งของไนโตรเจนที่แพลงก์ตอนพืชจะเลือกใช้ก่อน (Pennock, 1987) แอมโมเนียจำนวนเล็กน้อยที่เข้าสู่เอสทูรีโดยผ่านการตรึงไนโตรเจน ขณะที่แอมโมเนียจำนวนมากเกิดผ่านทางกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในดินตะกอน ไนเตรทเข้าสู่เอสทูรีโดยผ่านทาง Run Off และถูกสร้างขึ้นในน้ำและที่ผิวของดินตะกอน โดยกระบวนการไนตริเคชัน ไนโตรเจนที่สร้างขึ้นส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแอมโมเนียโดยมาจากการขับถ่ายของ Metazoa โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำ และโดยการย่อยสลายของอินทรีย์สารโดยแบคทีเรียในน้ำ และดินตะกอน ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะเป็นบัฟเฟอร์โดยปฏิกิริยา Sorption – Desorption กับ Particulate Matter โดยเฉพาะดินเหนียว และ Humic Material ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยน Cation สูง

แหล่งของไนโตรเจนจะสัมพันธ์กับการชะล้างของดิน และน้ำผิวดิน การใช้น้ำในโตรเจนได้เพิ่มปริมาณของไนโตรเจนที่พัดพามากับแหล่งน้ำ ปริมาณของแอมโมเนียจะสัมพันธ์กับการปล่อยน้ำทิ้งจากบ้านเรือน เนื่องจากบริเวณเอสทูรีเป็นบริเวณที่มักจะมีบ้านเรือนอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น จึงพบว่ามีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียค่อนข้างสูง ส่วนปริมาณของไนไตรท์จะสัมพันธ์กับปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรท และสภาพแวดล้อมขณะนั้น ถ้าในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนอยู่ในแหล่งน้ำมาก แอมโมเนียก็จะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และไนเตรทในที่สุด เรียกว่ากระบวนการไนตริฟิเคชัน ทำให้ปริมาณของไนไตรท์ลดลง แต่ในสภาพที่มีออกซิเจนอยู่น้อยหรือขาดออกซิเจน (Reducing Environment) จะเกิดการคั่งออกซิเจนออกจากโมเลกุลของไนเตรทโดย Denitrifying Bacteria ให้อยู่ในรูปของไนไตรท์ และแอมโมเนีย เรียกกระบวนการนี้ว่าดีไนตริฟิเคชัน การหมุนเวียนของไนโตรเจนในเอสทูรีค่อนข้างซับซ้อน เพราะมีหลายรูปแบบ (ภาพที่ 3)

พฤติกรรมของไนโตรเจนบริเวณเอสทูรี และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมของไนโตรเจนบริเวณเอสทูรี

แอมโมเนีย ในบริเวณเอสทูรีส่วนใหญ่มีพฤติกรรมเป็นแบบไม่อนุรักษ์ เช่นจากการศึกษาในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำ Delaware พบว่าพฤติกรรมของแอมโมเนียเป็นแบบไม่อนุรักษ์โดยมีการสูญเสียของแอมโมเนียเกิดขึ้น (Fisher et al., 1988; Pennock, 1987) ส่วนในเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar (Owen, 1986; Morris et al., 1985) แม่น้ำ Chesapeake และแม่น้ำ Hudson (Fisher et al., 1988) พบว่าพฤติกรรมของแอมโมเนียเป็นแบบไม่อนุรักษ์ โดยมีการเพิ่มของแอมโมเนียเกิดขึ้น

สำหรับไนโตรเจนในบริเวณเอสทูรีมีทั้งพฤติกรรมที่เป็นแบบอนุรักษ์และไม่อนุรักษ์ เช่น จากการศึกษาของ Fisher et al. (1988) พบว่าไนโตรเจนที่มีพฤติกรรมเป็นแบบไม่อนุรักษ์ ในเอสทูรีของแม่น้ำ Chesapeake และแม่น้ำ Hudson โดยมีการเพิ่มของไนโตรเจนที่เกิดขึ้น และมีการสูญหายของไนโตรเจนในเอสทูรีของแม่น้ำ Delaware นอกจากนี้จากการศึกษาในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar พบว่าไนโตรเจนที่มีพฤติกรรมเป็นแบบไม่อนุรักษ์ โดยมีการเพิ่มของไนโตรเจนอย่างมาก (Owen, 1986) ขณะที่ Morris et al. (1985) พบว่าไนโตรเจนที่มีพฤติกรรมเป็นแบบอนุรักษ์ในช่วงฤดูหนาว และจากการศึกษาพฤติกรรมของฟอสฟอรัสในบริเวณเอสทูรีของคลองหางาว จังหวัดระนอง พบว่าไนโตรเจนที่มีพฤติกรรมเป็นแบบอนุรักษ์ในเดือนกันยายน และมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่อนุรักษ์ในเดือนตุลาคม

ส่วนไนเตรทในบริเวณเอสทูรีมีทั้งพฤติกรรมที่เป็นแบบอนุรักษ์และไม่อนุรักษ์ เช่นเดียวกับไนโตรเจน เช่น ผลการศึกษาในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar พบว่าไนเตรทมีพฤติกรรมเป็นแบบอนุรักษ์ (Owen, 1986; Morris et al., 1985) และมีพฤติกรรมที่เป็นแบบไม่อนุรักษ์โดยมีการสูญเสียของไนเตรทในบริเวณตอนล่างของเอสทูรีของแม่น้ำ Delaware (Pennock, 1987) แม่น้ำ Mandovi (Sousa, 1983) และในเอสทูรีของแม่น้ำ Chesapeake (Fisher et al., 1988) ส่วนพฤติกรรมแบบไม่อนุรักษ์โดยมีการเติมของไนเตรท พบในเอสทูรีของแม่น้ำ Hudson และต้นเอสทูรีของแม่น้ำ Delaware (Fishere et al., 1988) และแม่น้ำ Mandovi (Sousa, 1983)

2. ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของไนโตรเจนในบริเวณเอสทูรี

2.1 กระบวนการทางกายภาพ

กระบวนการทางกายภาพจะมีผลต่อการกระจายและพฤติกรรมของสารอาหารในบริเวณเอสทูรี โดย Aston and Chester (1976) ได้สรุปไว้ดังนี้

2.1.1 การผสมผสานของน้ำจืดและน้ำทะเลโดยน้ำขึ้น – น้ำลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง การถ่ายเทปริมาณสารอาหารของแหล่งน้ำ

2.1.2 การหมุนเวียนของน้ำ โดยเฉพาการแบ่งชั้นของน้ำในเอสทูรี ทำให้เกิดความแตกต่างของสารอาหารทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง

2.1.3 ลักษณะของเอสทูรีมีส่วนในการจำกัดการหมุนเวียนถ่ายเทของน้ำ

2.1.4 ระบบกระแสน้ำชายฝั่งและในเอสทูรีทำให้เกิดการทับถมของตะกอน การตกตะกอน และการกลับลอยขึ้นของตะกอน อาจมีผลกระทบต่อปริมาณของสารอาหารต่าง ๆ

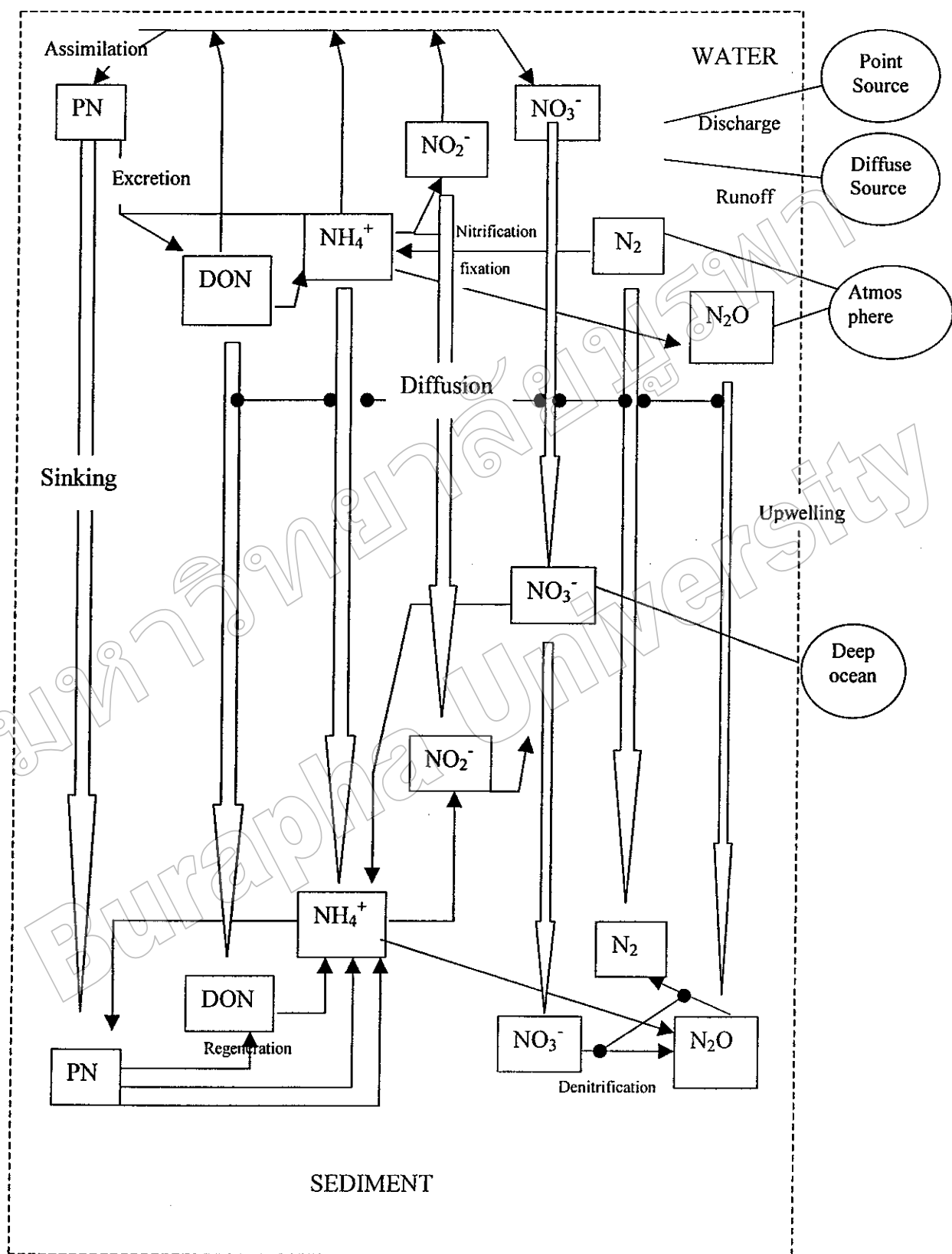
จากการศึกษาใน North Inlet South Carolina พบว่าปริมาณของไนเตรทในช่วงน้ำเกิดจะมีปริมาณสูงกว่าในช่วงน้ำตาย และฤดูกาลมีผลต่อความเข้มข้น และการกระจายของสารอาหาร (Dame, 1986) ส่วนการเปลี่ยนแปลงการกระจายของไนเตรทและแอมโมเนีย ใน Sacramento River และใน San Francisco Bay เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่เข้ามาจากแม่น้ำ และการ

เคลื่อนย้ายเข้ามาของแพลงก์ตอนพืช นอกจากนี้ผลการศึกษาในเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar พบว่า บริเวณที่มีความขุ่นสูงทำให้มีการเพิ่มของไนไตรท์ และอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงมีผลต่อพฤติกรรมของแอมโมเนียในแม่น้ำสายเดียวกัน ซึ่งทั้งความขุ่นและอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงทำให้เกิดกระบวนการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (Particle Transport Process) อาจกล่าวโดยสรุปว่า กระบวนการนี้เป็นพื้นฐานสำคัญของกลไกการควบคุมพฤติกรรมของไนไตรท์ และแอมโมเนียในเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar (Morris et al., 1985)

2.2 กระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการทางชีวภาพนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ที่มีผลต่อพฤติกรรมของไนโตรเจนและมีความซับซ้อน เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบระหว่างไนโตรเจนรูปต่าง ๆ (Ball, 1992) มีการสูญเสียไนโตรเจนจากกระบวนการ Denitrification (Nielsen et al., 1995) และการเคลื่อนย้ายออกโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Kemp & Boynton, 1984) เช่น พบว่าการสูญเสียหรือถูกนำไปใช้โดยแพลงก์ตอนพืชในตอนล่างของเอสทูรีในแม่น้ำ Delaware (Sharp et al., 1986; Pennock, 1987) แม่น้ำ Mandovi (Sousa, 1983) และในเอสทูรีของแม่น้ำ Chesapeake (Fisher et al., 1988) ส่วน Fisher et al. (1988) พบว่าไนไตรท์บริเวณเอสทูรีของแม่น้ำ Chesapeake มีในปริมาณที่สูง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการกำจัดไนไตรท์โดยแพลงก์ตอนพืช นอกจากนี้ Eyre and Twigg (1995) ศึกษาใน River Estuary ประเทศออสเตรเลีย พบว่าไนเตรทจะถูกนำไปใช้โดยแพลงก์ตอนพืช และมีส่วนหนึ่งของไนเตรทถูกนำออกไปโดยผ่านกระบวนการ Denitrification

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของแบคทีเรีย เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชัน คือ การเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์และไนเตรท โดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน โดย Fisher et al. (1988) พบว่าการเพิ่มของไนเตรทในช่วงต้นเอสทูรีและการลดลงของไนไตรท์ในแม่น้ำ Delaware เกิดจากกระบวนการ ไนตริฟิเคชัน และจากการศึกษาของ Morris et al. (1985) ในเอสทูรีของแม่น้ำ Tamar พบว่า ไนไตรท์ถูกสร้างขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในน้ำโดยการย่อยสลายซึ่งเกิดจากการทำงานของแบคทีเรีย



ภาพที่ 3 วัฏจักรของไนโตรเจนในบริเวณเอสทูรี (Day et al., 1989)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอสทรีบริเวณบางปะกงเอสทรี

มนูดี หังสพฤกษ์ (2532) กล่าวว่าแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำบางปะกงมีการผสมผสานระหว่างชั้นน้ำ กระแสน้ำขึ้นน้ำลงมีความแรง ในฤดูแล้งจะมีการผสมผสานกันของมวลน้ำทั้งสองดีมาก ความเค็มของน้ำที่ผิวหน้าและที่ลึกลับค่าเท่ากัน แต่ในปลายฤดูฝนก็ยังมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ความเค็มจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกแต่ไม่มากนัก

พรทิพย์ งานสกุล (2535) กล่าวว่าแม่น้ำบางปะกงจัดเป็นปากแม่น้ำที่มีการผสมกลมกลืนกันในแนวตั้งแบบสมบูรณ์ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีความลึกของระดับน้ำไม่มาก (4 - 5 เมตร) อิทธิพลของกระแสน้ำขึ้นน้ำลงในบริเวณนี้จะทำให้มวลน้ำทั้งสองเกิดการผสมผสานกันดีในแนวตั้งค่าความเค็มจึงไม่แตกต่างกันมากนัก และจากการศึกษาพฤติกรรมของสารอาหารในแม่น้ำบางปะกง พบว่าส่วนที่ละลายน้ำในฤดูแล้งมีพฤติกรรมแบบอนุรักษ์ ในขณะที่แอมโมเนียไนโตรเจนอินทรีย์ ออโรฟอสเฟต ฟอสฟอรัสอินทรีย์ และฟอสฟอรัสรวมมีพฤติกรรมแบบไม่อนุรักษ์ เช่นเดียวกับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสส่วนที่แขวนลอย

Boonphakdee et al. (1999) ได้ทำการศึกษา ปริมาณน้ำท่าของแม่น้ำบางปะกงที่ไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบนพบว่า ในฤดูน้ำมากมีปริมาณน้ำท่ามากที่สุด 1,152 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งปรากฏอยู่ในเดือนกันยายนและในฤดูแล้งมีปริมาณน้ำท่าน้อยที่สุด 8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งปรากฏอยู่ในเดือนกุมภาพันธ์ ปริมาณเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 267 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราส่วนของปริมาณน้ำท่าต่อพื้นที่รับน้ำเท่ากับ 0.30 ในพื้นที่ส่วนที่เป็นภูเขา และ 0.09 ในพื้นที่ราบ และรายงานว่าปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ไหลออกสู่ปากแม่น้ำ

Jintasaeranee, Buranapratheprat and Sawangwong (2000) ได้ทำการศึกษาพลศาสตร์ของน้ำทางด้านกายภาพบริเวณปากแม่น้ำบางปะกง โดยนำข้อมูลคุณภาพน้ำทางด้านกายภาพจากโครงการวิจัยร่วม NRCT - JSPS ปี 2537-2540 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่ผิวหน้าน้ำทะเลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยรอบของพื้นที่ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับฤดูกาลที่เปลี่ยนไป ปริมาณน้ำที่ไหลลงมากจะมีผลทำให้ความเค็มในบริเวณปากแม่น้ำลดลง และมีความเค็มเพิ่มขึ้นจากระยะทางของปากแม่น้ำออกสู่ทะเล ในฤดูฝน (เดือนมิถุนายน-เดือนตุลาคม) อิทธิพลของกระแสน้ำขึ้นน้ำลงจะผลักดันให้น้ำทะเลผ่านเข้าไปในปากแม่น้ำมากกว่าฤดูแล้ง (เดือนมกราคม-เมษายน) และในส่วนของปริมาณความชุ่มชื้นที่เพิ่มขึ้น การละลายของไนเตรตและฟอสเฟตจากแม่น้ำสู่ปากแม่น้ำ ปรากฏขึ้นก่อนที่จะมีน้ำจากแม่น้ำลงมากที่สุดใน

Buranapratheprat and Yanagi (2000) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางด้านไฮโดรไดนามิกในบริเวณปากแม่น้ำบางปะกง โดยการทดสอบภาคสนามและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้จากการศึกษาการกระจายตัวตามแนวตั้งของความเค็ม แสดงให้เห็นการเกิดเอสทรีแบบลิ้ม

ความเค็ม (Salt Wedge) ในฤดูน้ำมาก (Wet Season) และเกิดการแบ่งชั้นกันบางส่วน (Slightly stratified, Partially Mixed) ในฤดูแล้ง (Dry Season) ส่วนผลจากแบบจำลองทำให้ทราบว่า กระแสน้ำที่มีกำลังแรงในฤดูน้ำมาก และเกิดการผสมผสานกันของชั้นน้ำในบริเวณใกล้ปากแม่น้ำ ทั้งสองฤดูกาล ผลจากการคำนวณเพียงอย่างเดียวจะแทนที่ผลกระทบจากแรงความดันของน้ำ ในขณะที่กระแสน้ำที่วัดได้จะแสดงถึงความสำคัญของโครงสร้างแบบ 3 มิติของการหมุนเวียน กระแสน้ำในบริเวณดังกล่าว