ผลของสภาวะพร่องออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของไนโตรเจนจากตะกอนดินสู่น้ำเหนือตะกอนดินบริเวณอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี

นางสาวนัทชาพัฒน์ ฐาศิริทรัพย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HYPOXIA AND SALINITY ON NITROGEN FLUXES FROM SEDIMENT TO OVER LYING WATER AT ANG-SILA COAST, CHONBURI PROVINCE

Miss Natchapat Thasirisap

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Marine Science
Department of Marine Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสภาวะพร่องออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของไนโตรเจนจากตะกอนดินสู่น้ำเหนือตะกอนดินบริเวณอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี
โดย	นางสาวนัทชาพัฒน์ ฐาศิริทรัพย์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์ทางทะเล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ธรรมวานิช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ธรรมวานิช)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ ศิรินาวิน)

นัทชาพัฒน์ ฐาศิริทรัพย์ : ผลของสภาวะพร่องออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของไนโตรเจนจากตะกอนดินสู่น้ำเหนือตะกอนดินบริเวณอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี (EFFECTS OF HYPOXIA AND SALINITY ON NITROGEN FLUXES FROM SEDIMENT TO OVERLYING WATER AT ANG-SILA COAST, CHONBURI PROVINCE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ศิริชัย ธรรมวานิช, 76 หน้า.

ศึกษาอิทธิพลออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากดินตะกอนอ่างศิลาสู่มวลน้ำในห้องปฏิบัติการ ที่ความเค็ม 10, 15, 20, 25 และ 30 พบว่าความเค็มไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน แต่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีผลต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและพร่องออกซิเจน ส่วนใหญ่มีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าดินตะกอนอ่างศิลามีสารอินทรีย์สูง การย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินตะกอนจะทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในดินตะกอนสูงขึ้น ในภาวะที่มีออกซิเจนแม้ว่าแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทโดยกระบวนการไนตริฟิเคชั่น แต่การที่มีสารอินทรีย์สูง จึงทำให้แอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์มีความเข้มข้นสูงมาก ทำให้นอกจากฟลักซ์ของไนไตรท์และไนเตรท จะมีทิศทางการแพร่จากดินสู่น้ำเหนือตะกอนแล้ว ฟลักซ์ของแอมโมเนียก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ขณะที่ภาวะพร่องออกซิเจน ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนีย ทำให้แอมโมเนียเข้มข้นขึ้น และความเข้มข้นของไนเตรทลดลง ทั้งในน้ำเหนือดินตะกอนและในชั้นดินตะกอน ฟลักซ์ของแอมโมเนียที่ได้จะเป็นผลรวมของแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำและที่แพร่ออกมาจากดินตะกอน ซึ่งในดินตะกอนมีความเข้มข้นมากกว่าจึงจะมีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน เช่นเดียวกับฟลักซ์ของไนไตรท์ ส่วนฟลักซ์ของไนเตรทจะมีทิศทางการแพร่จากน้ำเหนือดินตะกอนสู่ดินตะกอน

ในการศึกษาเบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ณ รอยต่อระหว่างดินตะกอนกับมวลน้ำ โดยใช้แชมเบอร์แบบโปร่งใสและแบบทึบแสง ทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำทะเลและดินตะกอนจากชายฝั่งอ่างศิลา พบว่าแชมเบอร์ทั้งสองชนิดได้ผลการทดลองเหมือนกัน ค่าออกซิเจนละลายน้ำภายในแชมเบอร์ลดลงจนเข้าสู่ภาวะไร้ออกซิเจนเมื่อการทดลองผ่านไปไม่นาน และการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ได้มีรูปแบบเดียวกับการเปลี่ยนแปลงในการทดลองที่ภาวะไร้ออกซิเจน แต่เนื่องจากในแชมเบอร์แบบโปร่งใสสามารถเกิดการสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งเป็นการเติมออกซิเจนให้กับน้ำในแชมเบอร์แบบโปร่งใส ทำให้ปฏิกิริยาและความรุนแรงต่าง ๆ เนื่องจากภาวะไร้ออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนเกิดได้ช้ากว่าและรุนแรงน้อยกว่าในแชมเบอร์แบบทึบแสง

ภาควิชา	วิทยาศาสตร์ทางทะเล	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์ทางทะเล	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

5472236423 : MAJOR MARINE SCIENCE
KEYWORDS: NITROGEN / BENTHIC FLUX / HYPOXIA / SALINITY

NATCHAPAT THASIRISAP: EFFECTS OF HYPOXIA AND SALINITY ON NITROGEN FLUXES FROM SEDIMENT TO OVERLYING WATER AT ANG-SILA COAST, CHONBURI PROVINCE. ADVISOR: ASST. PROF. PENJAI SOMPONGCHAIYAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. SIRICHAI DHARMVANIJ, Ph.D., 76 pp.

Effect of oxygen and salinity on inorganic nitrogen flux from sediment to overlying water at salinity 10, 15, 20, 25 and 30 was performed in the laboratory. The results indicated that salinity did not have an effect on the inorganic nitrogen flux, while dissolved oxygen did. In most cases of oxic or anoxic conditions, the fluxes of ammonia, nitrite and nitrate were in the direction from sediment to overlying wate. Bacterial decomposition of organic matter in sediment increased ammonia concentration, which nitrification process substantially changed ammonia to nitrite and nitrate. This process decreased ammonia concentration in the overlaying water. However, high amount of organic matter in Ang-sila sediment resulting in highly supply of ammonia from organic decomposition. As such, the fluxes direction from sediment to overlying water was observed not only for nitrite and nitrate, but also for ammonia. In hypoxic case, nitrate was reduced to ammonia that increased ammonia concentration and decreased nitrate concentration both in overlying water and in sediment. In this case, the fluxes of ammonia was a sum of existing ammonia in water and diffusive ammonia from sediment. However, the ammonia concentration in sediment was higher than in the overlying water resulting in the ammonia fluxes from sediment to overlying water, similarly to nitrite fluxes. The direction from overlying water to sediment of nitrate fluxes was observed.

Benthic fluxes of inorganic nitrogen at the sediment-water interface in light and dark benthic chambers was investigated in the laboratory using seawater and sediment from Ang-sila. The results from both chamber were similar. Shortly after installation, dissolved oxygen level in both of chambers decreased to hypoxic and anoxic conditions. Appearance of inorganic nitrogen fluxes in the both chambers was the same as in the anoxic case. However, oxygen from photosynthesis in the light chamber during day time retarded the reaction in anoxic condition that affected the fluxes of inorganic nitrogen. As a result, slower approaching to the same condition as appearing in the dark chamber has been observed.

Department:	Marine Science	Student's Signature	....
Field of Study:	Marine Science	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2014	Co-Advisor's Signature	....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาจากคณาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล และ ผศ.ดร.ศิริชัย ธรรมวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำ คำปรึกษาต่างๆ และความช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ และ ผศ.ดร.วราภรณ์ ศิรินาวิน ที่ให้คำแนะนำและแนวทางต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจนจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าประจำศูนย์วิจัยสัตว์ทะเลอ่างศิลา ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ. ชลบุรี สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ รวมทั้งอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณครอบครัวฐาศิริทรัพย์ สมาชิกห้องปฏิบัติการ 423 และเพื่อนๆ ในภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความเหลือในการปฏิบัติงาน ทั้งการทดลอง วิเคราะห์ ให้คำปรึกษา และกำลังใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญรูป .... ญ

สารบัญตาราง .... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ขอบเขตการวิจัย 2

1.3 วัตถุประสงค์ 2

1.4 สมมติฐานการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 การส่งผ่านมวลสารบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นน้ำและตะกอน 3

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างชั้นน้ำและดินตะกอน 4

2.2 การหมุนเวียนไนโตรเจนในมวลน้ำ 5

2.2.1 การศึกษาฟลักซ์อนินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นน้ำและดินตะกอน 7

2.3 อิทธิพลของภาวะพร่องและภาวะไร้ออกซิเจนต่อฟลักซ์ของไนโตรเจน 8

2.4 อิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงอนินทรีย์ไนโตรเจน 9

2.5 พื้นที่ทำการศึกษา 9

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ 12

3.1 ศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนและความต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำที่ความเค็มต่าง ๆ 12

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำในภาวะที่มีออกซิเจนอิ่มตัวและไม่มีออกซิเจน 12

3.1.3 การเตรียมถังทดลอง 12

3.1.4 การเก็บตัวอย่างน้ำ 13

3.2 การทดลองเพื่อหาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในแชมเบอร์แบบโปร่งใสและทึบแสงในสภาวะจำลอง 13

3.2.1 เบนทิกแชมเบอร์ 13

3.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ 15

3.2 การวิเคราะห์หาอนินทรีย์ไนโตรเจน 15

3.3 การวิเคราะห์หาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน 15

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ 17

4.1 อิทธิพลของออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน 17

4.1.1 อิทธิพลของออกซิเจนต่อเบนทิกฟลักซ์ของแอมโมเนีย 21

4.1.2 อิทธิพลของออกซิเจนต่อเบนทิกฟลักซ์ของไนไตรท์ 23

4.1.3 อิทธิพลของออกซิเจนต่อเบนทิกฟลักซ์ของไนเตรท 25

4.2 อิทธิพลของความเค็มต่อเบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน 36

4.3 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากเบนทิกแชมเบอร์ 39

4.3.1 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากเบนทิกแชมเบอร์ 40

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 43

เอกสารอ้างอิง 45

รายการอ้างอิง 49

ภาคผนวก ก 51

1. สารเคมี 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2. อุปกรณ์ 52
3. เครื่องมือวิเคราะห์ 52
ภาคผนวก ข 53
1. การวิเคราะห์แอมโมเนีย 53
2. การวิเคราะห์ไนไตรท์ 55
3. การวิเคราะห์ไนเตรท 55
4. การหาค่าออกซิเจนละลาย 57
ภาคผนวก ค 61
ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน 61
ภาคผนวก ง 72
ผลการศึกษาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในเบนทิกแชมเบอร์ 72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 กระบวนการชีวธรณีเคมีที่เกิดขึ้นในทะเล....4

รูปที่ 2-2 การแลกเปลี่ยนสารระหว่างรอยต่อของชั้นน้ำกับดินตะกอน....5

รูปที่ 2-3 วัฏจักรไนโตรเจนในแหล่งน้ำ....6

รูปที่ 2-4 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้ง ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี.... 10

รูปที่ 3-1 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาเบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนที่ความเค็มต่าง ๆ 13

รูปที่ 3-2 ส่วนประกอบภายในแชมเบอร์ 14

รูปที่ 3-3 เบนทิกแชมเบอร์แบบโปร่งใส (ซ้าย) และแบบทึบแสง (ขวา) 14

รูปที่ 3-4 แสดงการเก็บตัวอย่างน้ำจากเบนทิกแชมเบอร์ที่ทำการทดลอง.... 15

รูปที่ 4-1 เบนทิกฟลักซ์ของแอมโมเนีย 18

รูปที่ 4-2 เบนทิกฟลักซ์ของไนไตรท์.... 19

รูปที่ 4-1 เบนทิกฟลักซ์ของไนเตรท 20

รูปที่ 4-4 เบนทิกฟลักซ์ของแอมโมเนียในช่วง 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง.... 22

รูปที่ 4-5 เบนทิกฟลักซ์ของไนไตรท์ในช่วง 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง 24

รูปที่ 4-6 เบนทิกฟลักซ์ของไนเตรทในช่วง 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง.... 26

รูปที่ 4-7 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 10 28

รูปที่ 4-8 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 15 29

รูปที่ 4-9 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 20 30

รูปที่ 4-10 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 25 31

รูปที่ 4-11 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 30 32

รูปที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรท์ต่อเวลา 34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4-13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนเตรทต่อเวลา 35

รูปที่ 4-14 เบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ความเค็มต่าง ๆ 37

รูปที่ 4-15 ปริมาณออกซิเจนละลายในเบนทิกแชมเบอร์ 39

รูปที่ 4-16 ฟลักซ์ของแอมโมเนียจากเบนทิกแชมเบอร์ 41

รูปที่ 4-17 ฟลักซ์ของไนไตรท์จากเบนทิกแชมเบอร์ 41

รูปที่ 4-18 ฟลักซ์ของไนเตรทจากเบนทิกแชมเบอร์ 41

รูปที่ 4-19 ความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนในเบนทิกฟลักซ์.... 42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2-1 คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งอ่างศิลา (สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล, 2556-2558) เทียบกับค่ามาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) 10

ตาราง ค-1 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 10 61

ตาราง ค-2 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 10 62

ตาราง ค-3 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 15 63

ตาราง ค-4 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 15 64

ตาราง ค-5 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 20 65

ตาราง ค-6 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 20 66

ตาราง ค-7 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 25 67

ตาราง ค-8 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 25 68

ตาราง ค-9 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µM.m-2.h-1) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 30 69

ตาราง ค-10 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µM.m-2.h-1) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 30 70

ตาราง ค-11 ปริมาณออกซิเจนละลาย (mg/l) ในภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-1 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) จากแชมเบอร์แบบทึบแสง 72

ตาราง ง-2 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm-2h-1) จากแชมเบอร์แบบโปร่งแสง 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่อาศัยบริเวณชายฝั่ง เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มสารอาหารลงสู่ทะเลจนทำให้เกิดสภาวะยูโทรฟิเคชั่น (eutrophication) และก่อให้เกิดสภาวะพร่อง (hypoxia) หรือขาดออกซิเจน (anoxia) ในน้ำบริเวณชายฝั่ง อันเป็นผลมาจากแบคทีเรียในมวลน้ำใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จนทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมีค่าลดต่ำลงหรือมีค่าเป็นศูนย์ ภาวะดังกล่าวนี้ทำเกิดปฏิกิริยา Dissimilatory ทำให้ไนเตรท (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) ถูกรีดิวซ์ (Reduce) ไปเป็นแอมโมเนีย (NH_4)

ในบริเวณที่ดินตะกอนมีการสะสมสารอินทรีย์สูง การพร่องหรือขาดออกซิเจนจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก ซึ่งส่งผลให้มีอนินทรีย์ไนโตรเจนละลายในน้ำระหว่างดินตะกอนเพิ่มสูงขึ้น ก่อนที่อนินทรีย์ไนโตรเจนจะแพร่ออกจากดินตะกอนสู่มวลน้ำ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการเพิ่มปริมาณสารอาหารในน้ำและทำให้แพลงก์ตอนพืชเติบโตได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโตเพิ่มสูงขึ้น

ในน้ำทะเลที่มีความเค็มสูง อินทรีย์ไนโตรเจนแขวนลอยจะเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นและตกลงไปสะสมในตะกอนทำให้สารอาหารจำนวนมากถูกเก็บสะสมอยู่ในชั้นดินตะกอน ปรากฏการเช่นนี้เกิดขึ้นมากบริเวณเอสทูรีเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มอยู่ตลอดเวลาจากปริมาณน้ำท่าในแต่ละฤดูกาลและจากน้ำขึ้นน้ำลงในรอบวัน ทำให้บริเวณชายฝั่งเป็นพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของปริมาณสารอาหาร ทำให้มีปริมาณผลผลิตเบื้องต้นสูงเช่นกัน ดังนั้นในพื้นที่ชายฝั่งความเค็มและปริมาณออกซิเจนจึงมีบทบาทสำคัญกับปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจนที่แพลงก์ตอนพืชจะนำไปใช้

พื้นที่ชายฝั่ง ต.อ่างศิลา อ. เมือง จ.ชลบุรี เป็นชายฝั่งที่มีความลาดชันต่ำ ระดับน้ำไม่ลึกมากนัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำ และน้ำขึ้นน้ำลง จึงทำให้มวลน้ำบางฤดูกาลผสมกันทั้งชั้นความลึกน้ำ ทำให้สารอาหารสามารถแพร่กระจายได้ดีทั้งชั้นน้ำทำให้ง่ายต่อการที่แพลงก์ตอนพืชจะนำสารอาหารไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความอุดมสมบูรณ์ของสัตว์น้ำ และเป็นแหล่งเพาะเลี้ยงหอยที่สำคัญของประเทศ ที่เป็นเช่นนี้ได้ ส่วนหนึ่งน่ามาจากสารอินทรีย์กลุ่มของไนโตรเจนที่สะสมอยู่กับตะกอนในปริมาณสูงซึ่งมีที่มาจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

กิจกรรมอื่น ๆ ตามแนวชายฝั่งและจากแผ่นดิน เมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์สูงจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต้องใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นด้วย อาจทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดภาวะพร่องหรือขาดออกซิเจนได้ในบางช่วงเวลา อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความเค็มจากน้ำขึ้นน้ำลง ปริมาณน้ำจืดจากแม่น้ำและจากครัวเรือนตามชายฝั่งที่มีชุมชนอาศัยอยู่หนาแน่น ทั้ง 2 ปัจจัยนี้จะส่งผลต่ออนินทรีย์ไนโตรเจนที่กักเก็บในชั้นตะกอนสามารถที่จะแพร่ออกมาสู่มวลน้ำบริเวณรอยต่อระหว่าง ดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอนก่อนที่จะขึ้นไปผสมกับมวลน้ำด้านบนและแพลงก์ตอนสามารถดึงสารอาหารเหล่านั้นไปใช้ในกระบวนการการเจริญเติบโตได้

1.2 ขอบเขตการวิจัย

การทดลองในครั้งนี้ใช้น้ำทะเลและตะกอนดินจากชายฝั่งทะเลอ่างศิลา โดยเก็บตัวอย่างจากบริเวณสถานีวิจัยสัตว์ทะเลอ่างศิลา จ.ชลบุรี โดยการทดลองในครั้งนี้ เป็นการออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็นการทดลองเพื่อหาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ภายใต้ความเค็มที่แตกต่างกัน และการทดลองในแชมเบอร์แบบทึบแสง (dark chamber) และแชมเบอร์แบบโปร่งใส (light chamber) ในถังน้ำขนาดใหญ่ที่ติดตั้งการทดลองในห้องปฏิบัติการเช่นกัน

1.3 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของไนโตรเจนอนินทรีย์บริเวณรอยต่อชั้นน้ำและดินตะกอน
2) ศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของไนโตรเจนอนินทรีย์บริเวณรอยต่อชั้นน้ำและดินตะกอน

1.4 สมมติฐานการวิจัย

สภาวะพร่องออกซิเจนและความเค็มมีอิทธิพลต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณรอยต่อชั้นน้ำและดินตะกอน เมื่อภาวะพร่องออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นฟลักซ์ของแอมโมเนียจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อความเค็มสูงขึ้นฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจะมีค่าลดลง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประเมินฟลักซ์ของสารอาหารประเภทไนโตรเจนที่มาจากชั้นดินตะกอนในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนและความเค็มในมวลน้ำเหนือดินตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การส่งผ่านมวลสารบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นน้ำและตะกอน

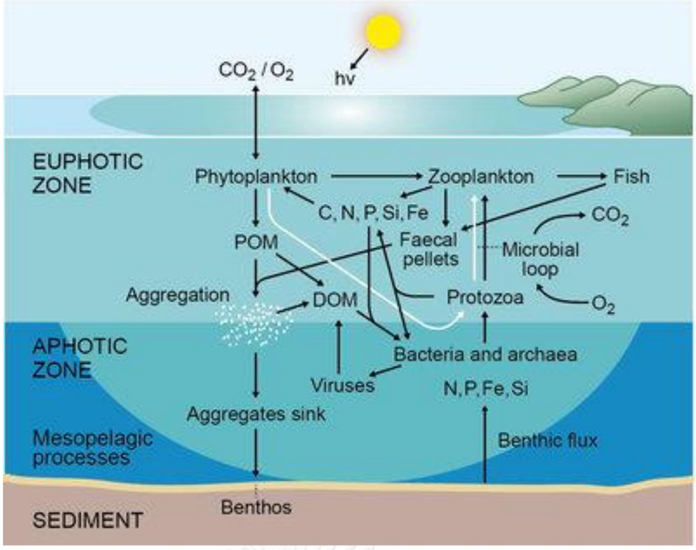
การส่งผ่านมวลสารผ่านรอยต่อระหว่างชั้นน้ำและดินตะกอน หรือเบนทิกฟลักซ์ (benthic flux) หมายถึง การไหลผ่านเข้าและออกระหว่างชั้นดินตะกอน (sediment) และชั้นน้ำที่อยู่ติดกับผิวหน้าของดินตะกอน (overlying water) ของสารต่าง ๆ ทั้งรูปที่เป็นอินทรีย์และอนินทรีย์ ค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จากปริมาณการแพร่ของสารที่ออกมาจากน้ำระหว่างดินตะกอน (pore water) (Kuwabara et al., 1999) ค่าฟลักซ์ที่มีค่าเป็นบวก (+) หมายถึง สารถูกส่งผ่านจากชั้นดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน และมีค่าลบ (-) เมื่อสารมีทิศทางการส่งผ่านจากชั้นน้ำสู่ดินตะกอน (Topping et al., 2001)

การแลกเปลี่ยนและส่งผ่านสารอาหารในระบบนิเวศทางน้ำ รวมถึงที่ผ่านบริเวณรอยต่อต่าง ๆ เช่น รอยต่อระหว่างดินและน้ำ (water-sediment interface) หรือรอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำ (air-sea interface) นอกจากจะถูกควบคุมโดยกระบวนการทางฟิสิกส์และชีวภาพแล้ว ยังถูกควบคุมโดยกระบวนการทางชีวธรณีเคมี (Zago et al., 2000) ในชั้นน้ำที่มีแสงส่องถึง (euphotic zone) (รูปที่ 2-1) แพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำที่เป็นผู้ผลิตเบื้องต้นในห่วงโซ่อาหารจะนำสารอาหารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในมวลน้ำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง สารอาหารหลักที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และซิลิกา (Si)

ในกระบวนการสังเคราะห์แสง แพลงก์ตอนพืชจะใช้ไนโตรเจน (N) 16 โมล ฟอสฟอรัส (P) 1 โมล เพื่อสร้างสารอินทรีย์ 1 โมล (สมการที่ 2-1) สัดส่วนดังกล่าว เรียกว่า Redfield ratio ซึ่ง C : N : P เท่ากับ 106 : 16 : 1 (Beer, 1997) โดยทั่วไปแล้วไนโตรเจนที่ถูกใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงจะถูกนำไปใช้ในรูปของไนเตรท แบคทีเรียและแพลงก์ตอนพืชบางกลุ่มสามารถตรึงแก็สไนโตรเจน (nitrogen fixation) ในน้ำไปใช้ได้โดยตรง พื้นที่ชายฝั่งบางแห่งมีไนโตรเจนในน้ำน้อยไม่เพียงพอต่อการสังเคราะห์แสง จึงทำให้ไนโตรเจนเป็นสารอาหารจำกัด (Forryan et al., 2012)

$$106CO_2 + 16HNO_3 + H_3PO_4 + 90H_2O \xrightarrow{\text{light}} (CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}(H_3PO_4) + 138O_2 \qquad (2\text{-}1)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ที่มา : http://www.geomar.de/nc/en/research/oceans/topic-2-ocean-warming-acidification-and-deoxygenation/topic-2-wp2-englisch/

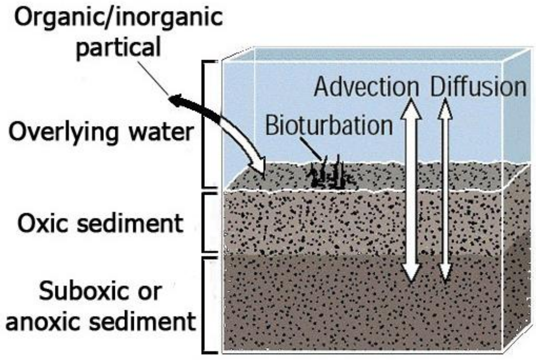
รูปที่ 2-1 กระบวนการชีวธรณีเคมีที่เกิดขึ้นในทะเล

เมื่อสิ่งมีชีวิตตายลง แบคทีเรียจะย่อยสลายซากซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ให้เปลี่ยนกลับไปเป็นสารอาหารอนินทรีย์ ซากของสิ่งมีชีวิตและสารอาหารอนินทรีย์ที่เหลือจากการนำไปใช้ในวัฏจักรการถ่ายทอดสารอาหารในมวลน้ำ จะรวมตัวกัน และตกลงสะสมที่พื้นท้องน้ำ (Trenberth, 2007) ในพื้นที่ที่น้ำมีความลึกไม่มากนัก ชั้นดินตะกอนจะถูกรบกวนได้ง่ายกว่าในทะเลลึก การรบกวนดังกล่าวสามารถเกิดได้ทั้งจากกระบวนการทางธรรมชาติและกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ สารอาหารอนินทรีย์จะถูกหมุนเวียนไปมาระหว่างดินตะกอนกับมวลน้ำ โดยเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างผิวดินและน้ำเหนือดินตะกอน การหมุนเวียนสารโดยกระบวนการต่าง ๆ ทั้งทางทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี เรียกว่าวัฏจักรชีวธรณีเคมี หรือ biogeochemical cycle (Riebesell and Oschlies, 2014)

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างชั้นน้ำและดินตะกอน

โดยทั่วไปดินตะกอน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น คือ ชั้นดินตะกอนที่มีออกซิเจน (oxic sediment) และชั้นดินที่ไม่มีออกซิเจน (suboxic/anoxic sediment) (รูปที่ 2-2) พื้นทะเลแต่ละบริเวณมีการทับถมของดินตะกอนและสารอินทรีย์ในอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ทำให้ชั้นดินตะกอนที่มีออกซิเจนมีความหนาไม่เท่ากัน ดินตะกอนที่มีการตกตะกอนเร็วจะทำให้ดินตะกอนชั้นบนมีเวลาในการสัมผัสอากาศได้น้อยลงส่งผลให้สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนลงมาถูกทับถมให้อยู่ในชั้นดินที่ขาดออกซิเจนได้มากขึ้น (มนุวดี หังสพฤกษ์, 2532)

ปริมาณออกซิเจนมีผลต่อออกซิเดชันสเตทของไนโตรเจน ทำให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนแต่ละรูปแบบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างระหว่างชั้นน้ำและดินตะกอนจะอาศัยการความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่าง 2 บริเวณในการแพร่ (diffusion) จากบริเวณมีความเข้มข้นสูงไปสู่อีกบริเวณมีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งก็แล้วแต่ว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำระหว่างเม็ดดินและความเข้มข้นในน้ำเหนือดินตะกอน ที่ไหนจะมากน้อยกว่ากัน



ที่มา : http://toxics.usgs.gov/definitions/benthic_flux.html

รูปที่ 2-2 การแลกเปลี่ยนสารระหว่างรอยต่อของชั้นน้ำกับดินตะกอน

2.2 การหมุนเวียนไนโตรเจนในมวลน้ำ

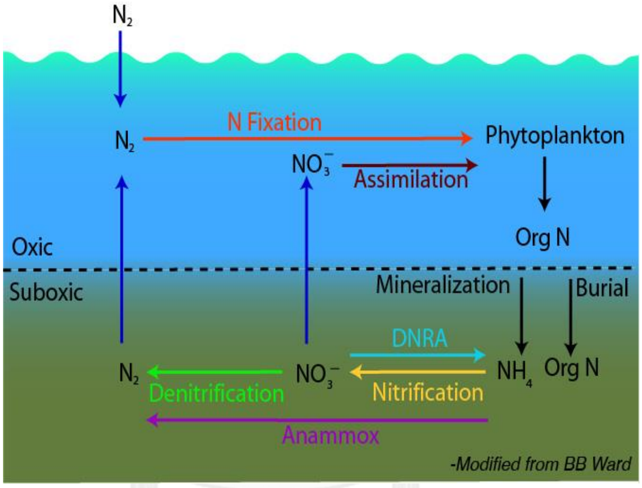
โดยทั่วไปไนโตรเจนในน้ำจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ (กรดอะมิโน, ยูเรีย, กรดยูริก) และในรูปของสารอนินทรีย์ (ไนเตรท: NO_2^-, ไนไตรท์ : NO_3^- และแอมโมเนียม : NH_4^+) ซึ่งมีปฏิกิริยาทางเคมีเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนรูปทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชั่น (ammonification), ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น (nitrification) หรือปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) เป็นต้น ปฏิกิริยาเหล่านั้นสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจน ไปเป็นสารอาหารอนินทรีย์ไนโตรเจนและแก๊สไนโตรเจน (Saeed and Sun, 2012)

ปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำอยู่ในภาวะที่มีออกซิเจนนั้น คือ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขึ้นตอนเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรท์ และเปลี่ยนไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท ตามลำดับ และปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นที่เปลี่ยนไนเตรทให้ไปอยู่ในรูปของแก็สไนโตรเจน (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ซึ่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นในระบบนิเวศทางทะเลจะเป็นตัวส่งผ่านไนโตรเจนเข้าสู่ระบบนิเวศชายฝั่งสูงถึง 20–50% (Nowicki, 1994)

เมื่อแพลงก์ตอนและสิ่งมีชีวิตในน้ำตายลง อินทรีย์ไนโตรเจนที่ในรูปของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย กระบวนการย่อยสลายดังกล่าวใช้ออกซิเจน ดังสมการ 2-2 ซึ่งจะเกิดในชั้นน้ำที่มีออกซิเจน (oxic zone) ส่วนใหญ่มักอยู่ชั้นบน

$$5(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}(H_3PO_4) + 690O_2 \longrightarrow 530CO_2 + 80HNO_3 + 5H_3PO_4 + 610H_2O \qquad (2\text{-}2)$$

การใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลาย จะส่งผลให้ชั้นน้ำที่มีสารอินทรีย์ปริมาณมากอยู่ในภาวะพร่องออกซิเจนหรือไร้ออกซิเจน เรียกชั้นน้ำดังกล่าวว่า suboxic zone (รูปที่ 2-3)



ที่มา : http://faculty.www.umb.edu/jennifer.bowen/research.php

รูปที่ 2-3 วัฏจักรไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในชั้นที่ไม่มีออกซิเจน ไนเตรทจะกลายเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่อจากออกซิเจน (สมการ 2-3) สุดท้าย เมื่อไนเตรทถูกออกซิไดซ์จนหมดไปจึงจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟต ผลลัพธ์สุดท้ายจากการกระบวนการย่อยสลายสารจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนีย ดังสมการ 2-4 (Bender et al., 1997)

$$5(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}(H_3PO_4) + 472HNO_3 \longrightarrow 530CO_2 + 276\ N_2 + 866H_2O + 5H_3PO_4 \qquad (2\text{-}3)$$

$$5(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}(H_3PO_4) + 53SO_4^{2-} \longrightarrow 106HCO_3^{-} + 16NH_3 + H_3PO_4 + 53H_2S \qquad (2\text{-}4)$$

จากนั้นแอมโมเนียที่อยู่ในชั้นที่ไม่มีออกซิเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท ด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ตามสมการที่ 2-5 ท้ายที่สุดไนเตรทและไนไตรท์จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นไนโตรเจนแก๊สด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่น ดังสมการที่ 2-6 (Saeed and Sun, 2012) การที่ไนโตรเจนถูกเปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจนจะส่งผลให้แพลงก์ตอนพืชนำไนโตรเจนไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงไม่ได้หรือใช้ได้ยากขึ้น เทียบได้กับการที่ไนโตรเจนถูกดึงออกไปจากห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศทางทะเล (Eggert and Schneider, 2015)

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+ \quad (2\text{-}5)$$

$$NO_2^- + 0.5CH_3OH + H^+ \rightarrow 0.5N_2 + 0.5CO_2 + 1.5H_2O \quad (2\text{-}6)$$

2.2.1 การศึกษาฟลักซ์อนินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นน้ำและดินตะกอน

การศึกษาฟลักซ์ของไนโตรเจนบริเวณรอยต่อของชั้นดินตะกอนกับน้ำเหนือดินตะกอนมีผู้ศึกษาในหลายพื้นที่ทั่วโลก เช่น ชายฝั่งประเทศสวีเดน พบว่าค่าฟลักซ์ของไนเตรทและไนไตรท์มีค่าอยู่ระหว่าง (–60) ถึง +50 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นในชั้นดินตะกอนจะถูกควบคุมโดยความเข้มข้นของไนเตรทที่อยู่ในน้ำระหว่างอนุภาคดินตะกอน (pore water) ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนเตรทที่น้ำเหนือดินตะกอนมีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอนินทรีย์ไนโตรเจนส่วนใหญ่มีทิศทางการแพร่ลงสู่ชั้นดินตะกอน ทำให้ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารจำกัด (limiting nutrient) ของพื้นที่ชายฝั่งสวีเดน (Sundback et al., 2000)

ในประเทศไทย สุกัญดา ไมตรีแก้ว (2550) รายงานฟลักซ์ของไนโตรเจนที่ทะเลสาบสงขลาตอนนอกบริเวณชายฝั่งหัวเขาแดง 2 ฤดูกาล โดยใช้เบนทิกแชมเบอร์แบบโปร่งใส และแบบทึบแสง ในการศึกษา พบว่า ในฤดูฝน ค่าฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในเบนทิกแชมเบอร์แบบโปร่งแสงมีค่าเท่ากับ 119.3, 2.1 และ 15 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ส่วนในแชมเบอร์แบบทึบแสงมีค่า 126.4, 15 และ (-74.3) ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนฤดูแล้งค่าฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท จากแชมเบอร์แบบโปร่งแสงมีค่าเท่ากับ 28.6, (-9.3) และ (-87.1) ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง และจากแชมเบอร์แบบทึบแสงมีค่าเท่ากับ 111.4, (-87.1) และ (-47.1) ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ และยังพบว่าการดูดซับไนเตรทของดินตะกอนชายฝั่งทะเลสาบสงขลาตอนนอก ขึ้นกับปริมาณไนเตรทในน้ำเหนือดินตะกอนและภาวะพร่องออกซิเจนในชั้นน้ำ

ธีรพล ลาภเสนา (2553) ศึกษาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ชายฝั่งอ่างศิลา โดยติดตั้งเบนทิกแชมเบอร์แบบโปร่งใสและทึบแสงหลังสถานีวิจัยสัตว์ทะเลอ่างศิลา เพื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ในแชมเบอร์แบบโปร่งใส ซึ่งเป็นสภาวะที่มีการใช้อนินทรีย์ไนโตรเจนไปในกระบวนการสังเคราะห์แสง และมีการปลดปล่อยอนินทรีย์ไนโตรเจนในกระบวนการหายใจและย่อยสลายสารอินทรีย์ กับฟลักซ์ในแชมเบอร์แบบทึบแสง ซึ่งเป็นสภาวะที่มีแต่การหายใจและย่อยสลายสารอินทรีย์ ผลจากการศึกษา พบว่าฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในแชมเบอร์แบบโปร่งใส อยู่ที่ 448.6, (–2.5) และ (–41.0) ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ และในแชมเบอร์แบบทึบแสงมีค่า 391.8, (–3.1) และ (–45.3) ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้Burnett et al. (2007) ยังได้ศึกษาฟลักซ์ของไนโตรเจนที่ซึมจากน้ำใต้ดิน (ground water) บริเวณชายฝั่งศรีราชา พบว่าฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำมีค่าเท่ากับ 5.87 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง

2.3 อิทธิพลของภาวะพร่องและภาวะไร้ออกซิเจนต่อฟลักซ์ของไนโตรเจน

สภาวะพร่องออกซิเจน (hypoxia) คือ สภาวะที่มวลน้ำมีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำกว่า 2 มิลลิกรัม/ลิตร และสภาวะขาดออกซิเจน (anoxia) คือ สภาวะที่มวลน้ำไม่มีออกซิเจนละลายอยู่เลย หรือมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ลิตร (Ribaudo et al., 2005) บางครั้งสภาวะทั้งสองนี้อาจเกิดขึ้นต่อเนื่องกับการเกิดยูโทรฟิเคชั่น เนื่องจากปริมาณสารอาหารอนินทรีย์ในน้ำมีปริมาณสูงมากเกินไป จนทำให้แพลงก์ตอนพืชมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว จนเมื่อแพลงก์ตอนตายลงพร้อม ๆ กันเป็นจำนวนมาก แบคทีเรียจะเข้ามาย่อยสลายซากอินทรีย์เหล่านี้ให้กลับไปเป็นสารอาหารอนินทรีย์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวใช้ออกซิเจน เมื่อออกซิเจนถูกใช้ไปมาก ทำให้น้ำบริเวณนั้นพร่องหรือขาดออกซิเจนได้ ผลของการเกิดสภาวะพร่องหรือขาดออกซิเจนในน้ำจะส่งผลให้ไนเตรทและไนไตรท์ถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนีย และทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเพิ่มสูงขึ้น (Saeed and Sun, 2012)

จากการศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดินจากชายฝั่งทะเล Derwent ออสเตรเลีย ในสภาวะที่มีค่าออกซิเจนละลายในน้ำเหนือดินตะกอน 75%, 20% และ 5% พบว่าฟลักซ์ของแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 67.468, 74.889 และ 108.661 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนฟลักซ์ของไนเตรท+ไนไตรท์ มีค่าเท่ากับ 22.130, 21.210 และ 16.836 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ขณะที่ในสภาวะพร่องออกซิเจน (hypoxia) (ออกซิเจนละลาย 5%) ค่าฟลักซ์ของแอมโมเนียมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และในทางกลับกัน ฟลักซ์ของไนไตรท์+ไนเตรท จะมีค่าต่ำกว่าสุดในสภาวะพร่องออกซิเจน (Abell et al.,

2011) การศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนต่อฟลักซ์ของแอมโมเนียในธรรมชาติ บริเวณชายฝั่งประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าผลการศึกษาเหมือนกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ นั่นคือ ฟลักซ์ของแอมโมเนียจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออยู่ในภาวะพร่องหรือไร้ออกซิเจน (Devol and Christensen, 1993)

2.4 อิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงอนินทรีย์ไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณปากแม่น้ำและชายฝั่ง จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเค็มต่ำตั้งแต่ความเค็ม 0 – 8 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลต่อการดูดซับ (adsorption) อนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในมวลน้ำกับอนุภาคในมวลน้ำ ก่อนที่จะตกลงไปสะสมที่ชั้นดินตะกอน

จากการศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อฟลักซ์และการแลกเปลี่ยนแอมโมเนียบริเวณปากแม่น้ำ Parker พบว่า แอมโมเนียจะสามารถแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำเหนือดินตะกอนและน้ำระหว่างเม็ดดินตะกอนได้ดีเมื่อน้ำเหนือดินตะกอนมีความเค็มต่ำ (Weston et al., 2010) อย่างไรก็ดี นอกจากความเค็มที่ส่งผลต่อฟลักซ์ของแอมโมเนียจากดินตะกอน ฤดูกาลและสภาพแวดล้อมอื่นก็มีผลต่อฟลักซ์ของแอมโมเนียเช่นกัน (Giblin et al., 2010)

2.5 พื้นที่ทำการศึกษา

อ่างศิลา (รูปที่ 2-4) ตั้งอยู่ในทางฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยตอนบน มีอาณาเขตต่อเนื่องกับปากแม่น้ำบางปะกง ลักษณะดินตะกอนท้องน้ำเป็นดินโคลนและดินทรายปนเลน (การจัดการฐานข้อมูลทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556) ได้รับอิทธิพลจากลมตะวันตกเฉียงเหนือ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน – กุมภาพันธ์ เป็นช่วงเวลาที่มีฝนน้อย ความชื้นในอากาศต่ำ และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม – ตุลาคม เป็นฤดูที่มีการพาความชื้นจากทะเลอันดามันและอ่าวไทยเข้าสู่พื้นที่ชายฝั่งทำให้มีปริมาณน้ำฝนมาก (โครงการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเล, 2546) มีความลาดชันต่ำ ความลึกน้ำประมาณ 20 เมตร เมื่ออยู่ในช่วงน้ำลง หรือในฤดูที่มีลมแรงจะทำให้มวลน้ำชั้นล่างและชั้นบนผสมเป็นเนื้อเดียวกันจากอิทธิพลของกระแสน้ำ น้ำขึ้นน้ำลง คลื่นลม และการถูกรบกวนโดยมนุษย์ (ใบพัดจากเรือ การทำประมงชายฝั่ง) ซึ่งส่งผลต่อการแพร่กระจายสารอาหารต่าง ๆ ด้วย

รูปที่ 2-4 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้ง ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี

ทะเลอ่างศิลามีความอุดมสมบูรณ์สูง เหมาะแก่การเพาะเลี้ยงสัตว์ทะเลและการทำประมงชายฝั่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อ่างศิลาเป็นพื้นที่เลี้ยงหอยแมลงภู่ที่ใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งของไทย เนื่องจากมีสารอาหารของแพลงก์ตอนพืชที่เป็นผู้ผลิตเบื้องต้น (primary producer) ในปริมาณสูงและบ่อยครั้งที่สูงกว่าค่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 2-1 นอกจากนี้พื้นที่ดังกล่าวยังเป็นแหล่งสะสมของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์ทะเล และสะสมทั้งในมวลน้ำและในชั้นดินตะกอน ดังนั้นหากมีการรบกวนชั้นดินตะกอน หรือมีปัจจัยใดที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงในชั้นดินตะกอน จนทำให้สารอินทรีย์ที่สะสมถูกเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์และแพร่ขึ้นสู่มวลน้ำ จะเป็นการเพิ่มสารอาหารในมวลน้ำชายฝั่งอ่างศิลาให้สูงขึ้นจากเดิมอีก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 2-1 คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งอ่างศิลา (สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล, 2556-2558) เทียบกับค่ามาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

ประเภท	ค่ามาตรฐาน	ชายฝั่งอ่างศิลา		
		ก.พ. 2556	ก.พ. 2557	ก.พ. 2558
ออกซิเจนละลาย (mg/l)	ไม่ต่ำกว่า 4	4.6	4.2	5.5
แอมโมเนีย (µg/l)	ไม่เกิน 70	68.6	175	96.5
ไนเตรท (µg/l)	ไม่เกิน 20	12.0	66.6	47.6
ฟอสเฟต (µg/l)	ไม่เกิน 15	13.6	45.1	38.6

จากรายงานข้อมูลจากโครงการกลไกน้ำเปลี่ยนสี ที่สำรวจชายฝั่งอ่างศิลาและพื้นที่ใกล้เคียง พบว่าค่าออกซิเจนละลายบริเวณน้ำผิวหน้าชั้นตะกอน (bottom water) ชายฝั่งอ่างศิลา ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2554 มีค่าตั้งแต่ 0.5 – 6.1 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าน้ำทะเลอยู่ในสภาวะพร่องออกซิเจนในช่วงเดือนสิงหาคม มีค่าออกซิเจนละลายอยู่ที่ 0.5 – 1.8 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ชั้นน้ำความลึก 6 - 9 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ชายฝั่งตั้งแต่อ่างศิลาไล่ไปจนถึงศรีราชา เป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ ก่อนที่ค่าออกซิเจนละลายจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกลับเข้าสู่ปกติ และค่าความเค็มต่ำสุดที่วัดได้ในน้ำชั้นล่างเหนือดินตะกอน มีค่าความเค็มต่ำสุดประมาณ 24 และสูงสุดประมาณ 33 (ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ, ติดต่อส่วนตัว) และในปี พ.ศ. 2555 เกิดภาวะพร่องออกซิเจนในอ่าวไทยตัว ก ครอบคลุมพื้นที่กว่า 1,000 ตารางกิโลเมตร (เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล, ติดต่อส่วนตัว)

ภาวะพร่องออกซิเจนในน้ำทะเล อาจทำให้ผลผลิตหอยแครง หอยนางรม และหอยแมลงภู่ ที่เพาะเลี้ยงบริเวณอ่าวไทยตัว ก มีปริมาณลดลง ซึ่งในปี พ.ศ. 2553 ผลผลิตหอยที่ได้เท่ากับ 145,680 ตัน (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง, 2555) แต่ปี พ.ศ. 2555 ได้ผลผลิตเพียง 141,151 ตัน (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง, 2557) เนื่องจากหอยเป็นสัตว์ทะเลที่อาศัยบริเวณหน้าดิน หรือยึดเกาะตามหลักและโขดหิน เมื่อเกิดภาวะพร่องออกซิเจนจึงไม่สามารถเคลื่อนย้ายหรือว่ายหนีไปจากบริเวณดังกล่าวได้เหมือนกับปลาหรือสัตว์ทะเลชนิดอื่น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการตายของหอยและสัตว์ทะเลหน้าดินได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 ศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนและความต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำที่ความเค็มต่าง ๆ

นำน้ำทะเลมาปรับความเค็มด้วยน้ำประปาให้มีค่าเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยใช้ refractometer ในการวัดความเค็ม

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำในภาวะที่มีออกซิเจนอิ่มตัวและไม่มีออกซิเจน

นำน้ำทะเลจากข้อ 3.1.1 ความเค็มละ 2 ถัง เพื่อนำไปปรับค่าออกซิเจนละลายในน้ำ

ถังที่ 1 : ภาวะที่มีออกซิเจนอิ่มตัว

ต่อสายยางและหัวทรายเข้ากับปั๊มลม ให้อากาศเบา ๆ ตลอดเวลา เพื่อเพิ่มออกซิเจนลงไปในน้ำที่ใช้ในการทดลองภาวะที่มีออกซิเจน

ถังที่ 2 : ภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

ต่อสายยางและหัวทรายเข้ากับถังแก็สไนโตรเจน ให้ไนโตรเจนเบา ๆ ตลอดเวลา เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากน้ำที่ใช้ในการทดลองภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Abell et al., 2011) จากนั้นวัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำด้วยเครื่องวัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (D.O meter) YSI 550A ให้มีค่าประมาณ 0 มิลลิกรัม/ลิตร ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

3.1.3 การเตรียมถังทดลอง

นำดินตะกอนจากชายฝั่งอ่างศิลาใส่ในถังพลาสติกใส ความสูงจากก้นถัง 5 เซนติเมตร ค่อย ๆ เติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้ให้มีความสูงประมาณ 20 เซนติเมตร จากผิวดินตะกอน ระวังไม่ให้เกิดการฟุ้งของดินตะกอน เจาะรูที่ฝาแต่ละถังเพื่อใส่สายยางขนาดเล็ก 2 เส้น สำหรับใช้เก็บตัวอย่าง 1 เส้น และสำหรับต่อสายกับปั๊มลมหรือแก็สไนโตรเจนอีก 1 เส้น ใช้ซิลิโคนปิดรอบฝาและบริเวณรอยต่อของสายยางเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้าสู่ในถังน้ำได้ การทดลองนี้จะให้อากาศและแก็สไนโตรเจนตลอดระยะเวลาการทดลอง

รูปที่ 3-1 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาเบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนที่ความเค็มต่าง ๆ

3.1.4 การเก็บตัวอย่างน้ำ

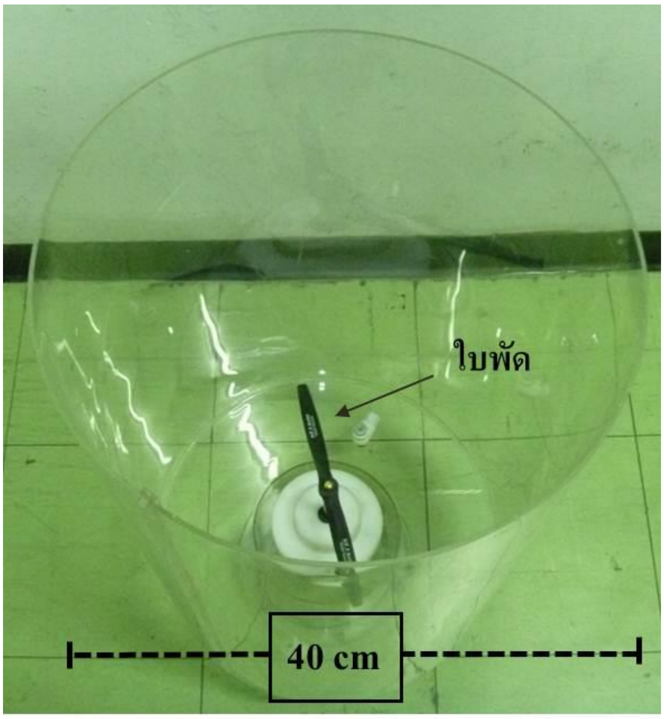
ดูดน้ำตัวอย่าง 60 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดฉีดยาต่อกับสายยางสำหรับการเก็บตัวอย่างที่มีปลายสายอยู่ใกล้ผิวดินมากที่สุด จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน เริ่มเก็บตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นการทดลอง คือ ชั่วโมงที่ 0 เริ่มเก็บตัวอย่างชั่วโมงที่ 0 หลังจากนั้นเก็บทุก 2 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง และเก็บทุก 4 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 72 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างทุก 6 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 114

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

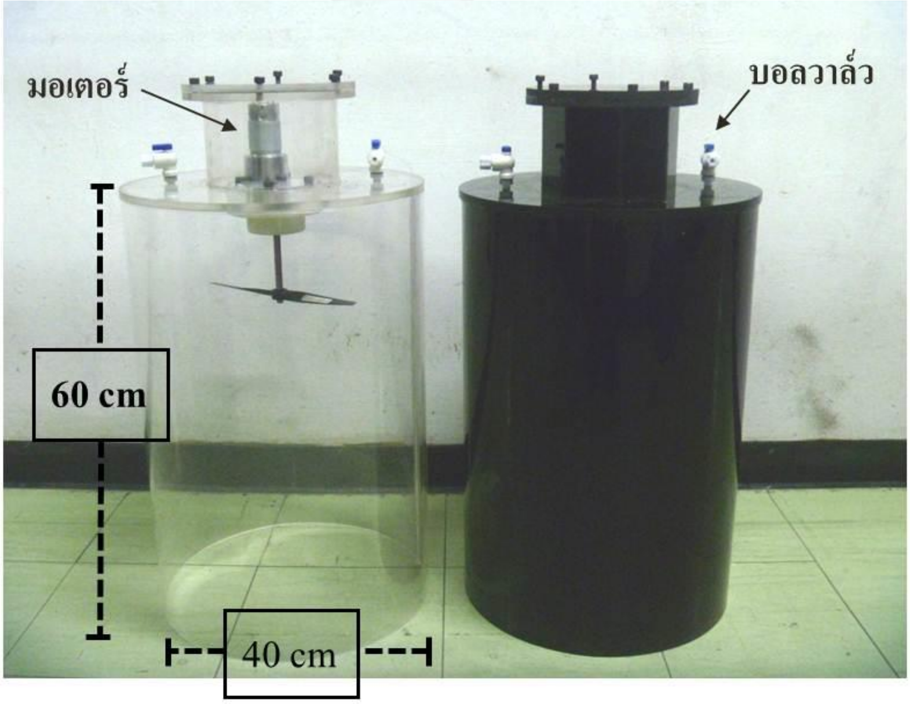
3.2 การทดลองเพื่อหาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในแชมเบอร์แบบโปร่งใสและทึบแสงในสภาวะจำลอง

3.2.1 เบนทิกแชมเบอร์

เบนทิกแชมเบอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ออกแบบและประกอบโดย ธีรพล ลาภเสนา (2553) มีลักษณะเป็นท่ออะคริลิก (acrylic tube) เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ที่ฝาด้านบนติดใบพัดยาว 9 เซนติเมตร กับมอเตอร์ DC รอบต่ำ (10 rpm) เพื่อกวนน้ำในแชมเบอร์อย่างช้า ๆ จำลองการหมุนเวียนน้ำในธรรมชาติ (รูปที่ 3-2) และติดวาล์ว 2 ตัว สำหรับเก็บตัวอย่างและเติมน้ำเพื่อรักษาปริมาตรน้ำภายในแชมเบอร์ ซึ่งเบนทิกแชมเบอร์ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ คือ แบบโปร่งใส (light chamber) และแบบทึบแสง (dark chamber) (รูปที่ 3-3)



รูปที่ 3-2 ส่วนประกอบภายในแชมเบอร์



รูปที่ 3-3 เบนทิกแชมเบอร์แบบโปร่งใส (ซ้าย) และแบบทึบแสง (ขวา)

3.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ

ดูดน้ำตัวอย่าง 60 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดฉีดยาต่อกับสายยางเข้ากับวาวล์บนฝาถัง จากนั้นนำอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาค่าออกซิเจนละลายและฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยเริ่มเก็บตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นการทดลอง คือ ชั่วโมงที่ 0 จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำทุก 2 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง เก็บทุก 4 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 72 เก็บตัวอย่างทุก 6 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 114 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างในวันที่ 7 ของการทดลอง (ชั่วโมงที่ 168) และเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้ายในวันที่ 15 ของการทดลอง (ชั่วโมงที่ 360)

รูปที่ 3-4 แสดงการเก็บตัวอย่างน้ำจากเบนทิกแชมเบอร์ที่ทำการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 การวิเคราะห์หาอนินทรีย์ไนโตรเจน

นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจน 3 ชนิด คือ ไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนีย ด้วยวิธี Colorimetric Method และค่าออกซิเจนละลายด้วยวิธี Winkler Method (Strickland and Parson, 1972)

3.3 การวิเคราะห์หาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน

คำนวณหาฟลักซ์จากความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ได้จากหัวข้อ 3.2 ตามสมการที่ 3-1 (พุทธ ส่องแสงจินดา และคณะ, 2543) กำหนดให้ค่าฟลักซ์เป็นบวกเมื่อทิศทางการถ่ายเทอนินทรีย์ไนโตรเจนมีทิศจากจากตะกอนดินสู่มวลน้ำ และมีค่าเป็นลบเมื่อทิศทางจากน้ำสู่ชั้นดินตะกอนผ่านรอยต่อระหว่างผิวดินตะกอนกับน้ำเหนือดินตะกอน

$$\text{Flux (N)} = \frac{([\,]_t - [\,]_{t-1}) \times V}{1000 \times A \times t} \tag{3-1}$$

เมื่อ Flux (N) = ฟลักซ์ของสารประกอบไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง)

$[\,]_{t-1}$ = ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนที่เวลาเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์/ลิตร)

$[\,]_t$ = ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนที่เวลาใด ๆ (ไมโครโมลาร์/ลิตร)

t = เวลาใด ๆ ของการทดลอง (ชั่วโมง)

V = ปริมาตรของน้ำในแชมเบอร์ (มิลลิลิตร)

A = พื้นที่ผิวของตะกอนดิน หรือพื้นที่ผิวของถังพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง (ตารางเมตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

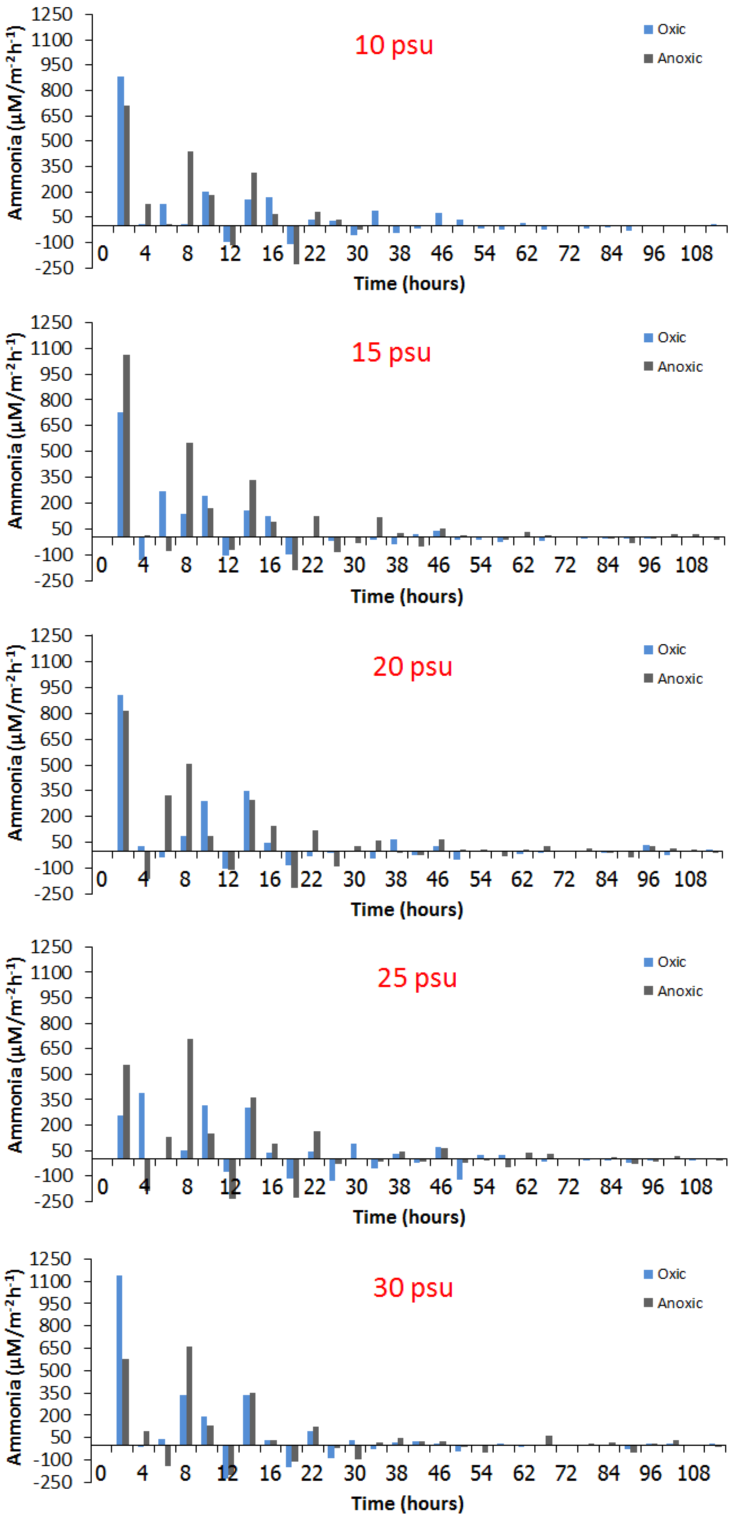
บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 อิทธิพลของออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน

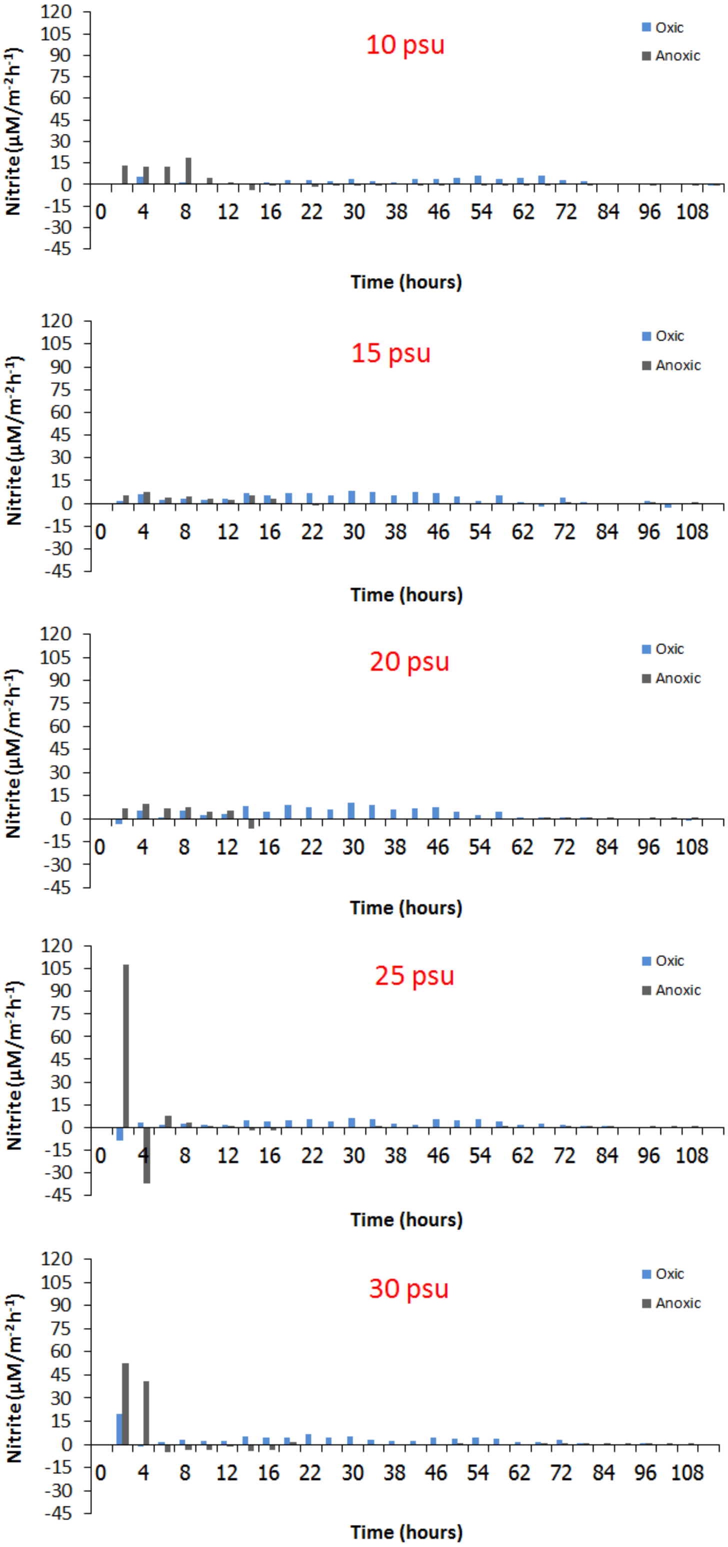
การทดลองครั้งนี้วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอนเริ่มต้น พบว่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.55 ในชุดการทดลองภาวะไร้ออกซิเจน แม้ว่าจะให้แก็สไนโตรเจนตลอดเวลาเพื่อรักษาสภาวะการทดลองให้อยู่ในภาวะไร้ออกซิเจน แต่เมื่อนำน้ำตัวอย่างจากแต่ละช่วงเวลาของภาวะไร้ออกซิเจนไปวิเคราะห์หาค่าออกซิเจนละลาย พบว่า มีค่าระหว่าง 0 – 4 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงถึงน้ำที่ใช้ทดลองภาวะไร้ออกซิเจนอยู่ในภาวะพร่องออกซิเจน ดังนั้น การอภิปรายผลการทดลองครั้งนี้ จึงเป็นการบอกความรุนแรงของผลกระทบของออกซิเจนต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างภาวะที่มีออกซิเจนอิ่มตัวและภาวะพร่องออกซิเจน

ผลของการศึกษา พบว่าฟลักซ์ของแอมโมเนีย (รูปที่ 4-1) ไนไตรท์ (รูปที่ 4-2) และไนเตรท (รูปที่ 4-3) มีการเปลี่ยนแปล่งอย่างรวดเร็วช่วง 30 ชั่วโมงแรก ของการทดลอง ในทั้ง 5 ความเค็ม การที่ฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมากในช่วงเวลาเริ่มต้นนั้น สาเหตุหนึ่งมาจากการที่ดินตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้มีความหนาเพียง 5 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับความหนาของดินตะกอนในธรรมชาตินั้น ความหนาของดินตะกอนที่ใช้ในการทดลองเทียบเท่ากับเพียงแค่ผิวหน้าของดินตะกอนใต้ทะเลเท่านั้น ทำให้การแพร่ของอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่มีสารตั้งต้นเริ่มต้นในน้ำหรือในดินในปริมาณที่สูง เมื่อเวลาผ่านไป ความแตกต่างของความเข้มของระหว่าง 2 บริเวณลดน้อยลง หรือแทบไม่มีความแตกต่างค่าฟลักซ์ที่ได้จึงไม่มีการเพิ่มขึ้น หรือลดลงมากไปกว่าเดิมมากนัก

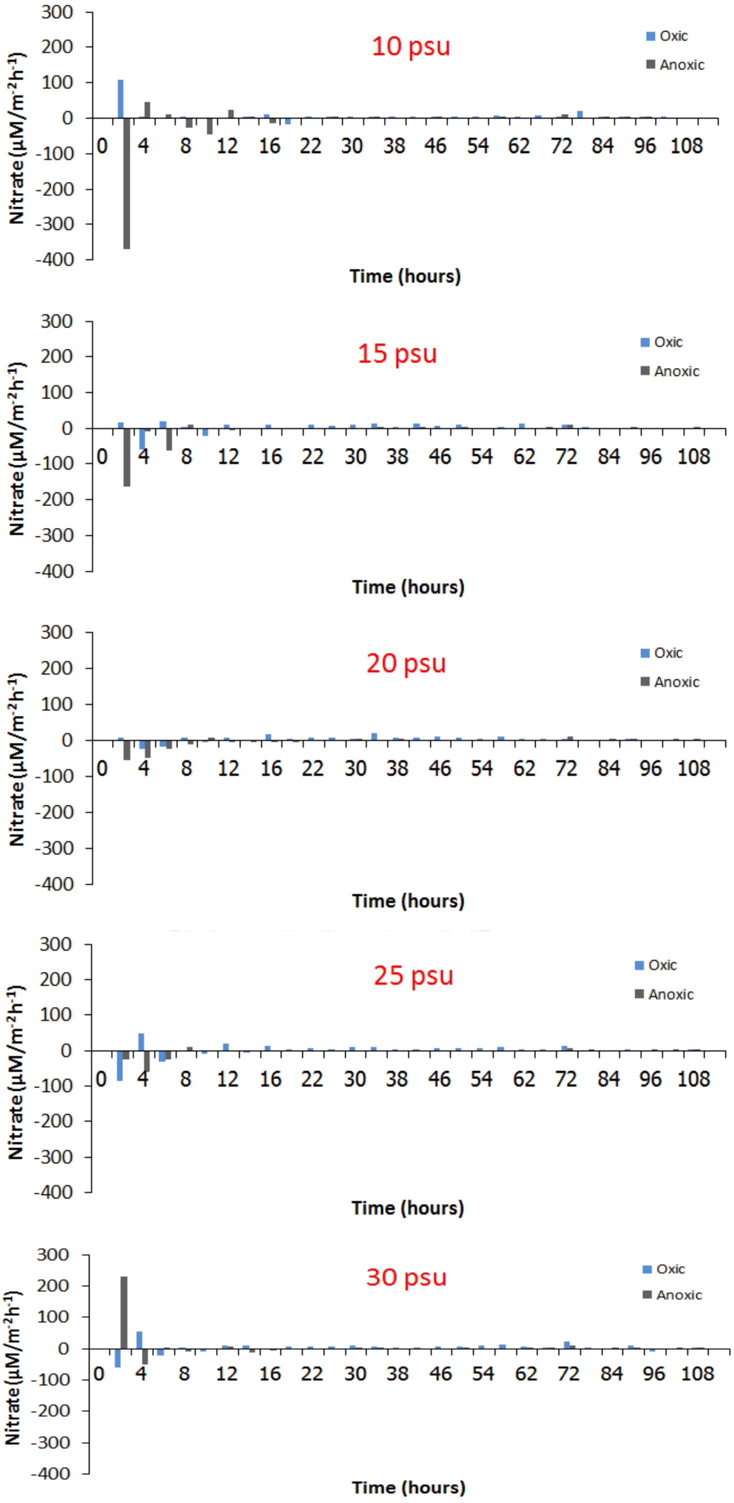
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-1 เบนทิกฟลักซ์ของแอมโมเนีย



รูปที่ 4-2 เบนทิกฟลักซ์ของไนไตรท์



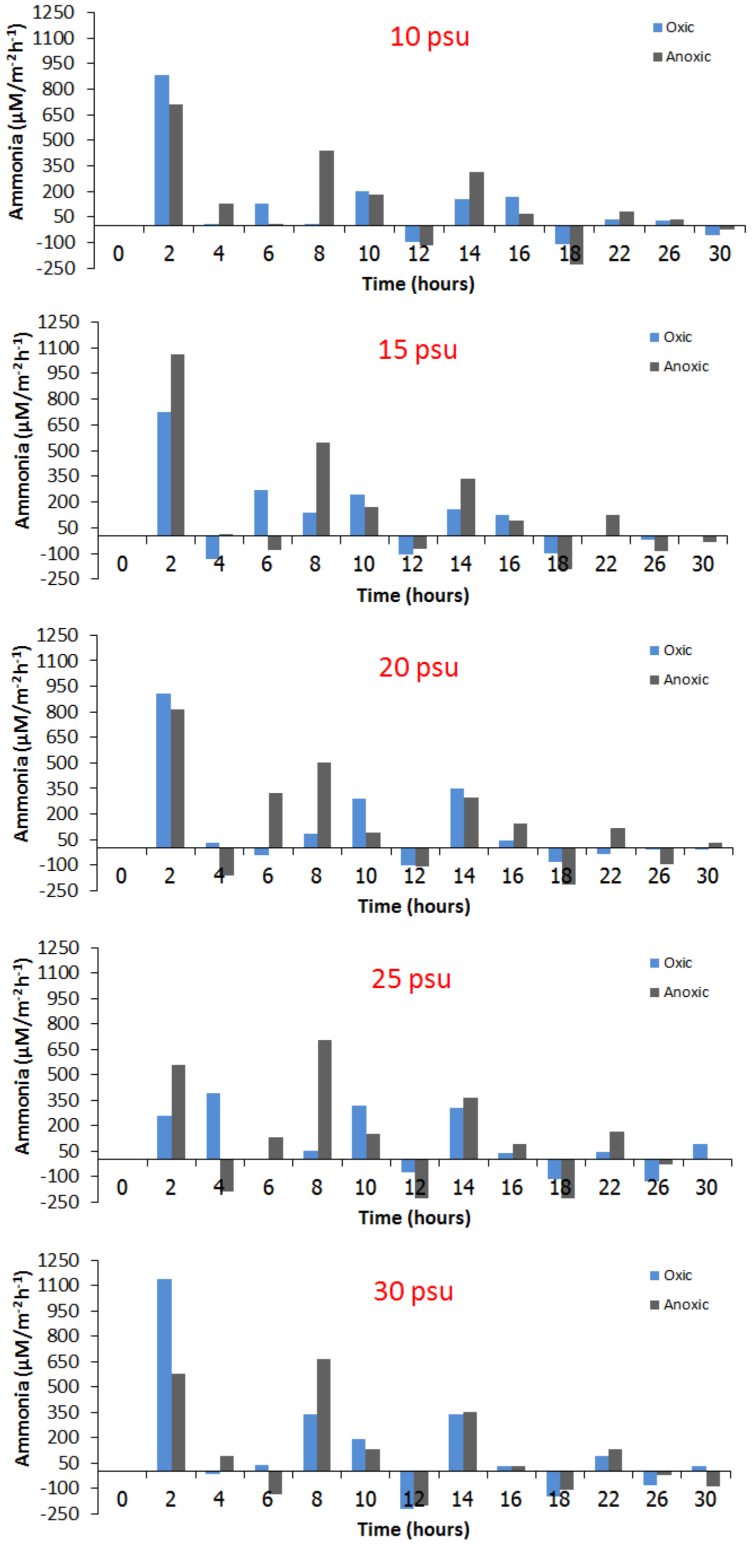
รูปที่ 4-1 เบนทิกฟลักซ์ของไนเตรท

4.1.1 อิทธิพลของออกซิเจนต่อเบนทิกฟลักซ์ของแอมโมเนีย

ผลการศึกษาฟลักซ์ของแอมโมเนียใน 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง (รูปที่ 4-4) พบว่าทั้งในภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน ฟลักซ์ของแอมโมเนียส่วนใหญ่จะมีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน มีค่าสูงสุดในชั่วโมงที่ 2 ของการทดลอง และค่าฟลักซ์ค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการทดลองที่ผ่านไป มีเพียงบางช่วงเวลาที่ฟลักซ์มีค่าติดลบ หรือมีทิศทางการแพร่ของแอมโมเนียจากน้ำเหนือตะกอนสู่ดินตะกอน

การที่ฟลักซ์ของแอมโมเนียมีทิศทางจากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอนสูงในภาวะที่มีออกซิเจน เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในชั้นดินตะกอน เพราะกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยออกซิเจน (Friedl et al., 1998) ซึ่งทำให้แอมโมเนียที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายสารอินทรีย์มีความเข้มข้นที่สูงมากขึ้นจากเดิมและได้แพร่ออกจากชั้นดินตะกอนไปยังบริเวณน้ำเหนือดินตะกอนที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า และในมวลน้ำได้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยเช่นกันทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเหนือตะกอนจากภาวะที่มีออกซิเจนมีค่าสูงกว่าภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่เป็นผลรวมมาจากการแพร่ออกจากชั้นดินตะกอนและจากความเข้มข้นที่มีอยู่เดิมในน้ำเหนือดินตะกอน

ส่วนฟลักซ์แอมโมเนียจากภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากไนเตรทที่ละลายอยู่ในน้ำเหนือดินตะกอนถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนีย (Saeed and Sun, 2012) ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเหนือดินตะกอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดเช่นกันในน้ำระหว่างเม็ดดินตะกอนแต่ด้วยความที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรทมีค่าน้อยมาก กระบวนการรีดักชั่นของไนเตรทที่จะเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียจึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นให้กับแอมโมเนียได้มากเท่ากระบวนการที่เกิดในภาวะที่มีออกซิเจน เมื่อแอมโมเนียในดินมีการแพร่ออกมาจากดินสู่น้ำเหนือดินตะกอนจนทำให้ทั้ง 2 บริเวณมีความเข้มข้นเท่ากัน แต่ในมวลน้ำยังคงเกิดปฏิกิริยารีดักชั่นของไนเตรทอยู่ ส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเหนือดินตะกอนมีค่าสูงกว่าในชั้นดินตะกอนจึงทำให้ทิศทางการแพร่ของแอมโมเนียมีทิศจากน้ำเหนือดินตะกอนลงสู่ชั้นดินตะกอนบางช่วงเวลา



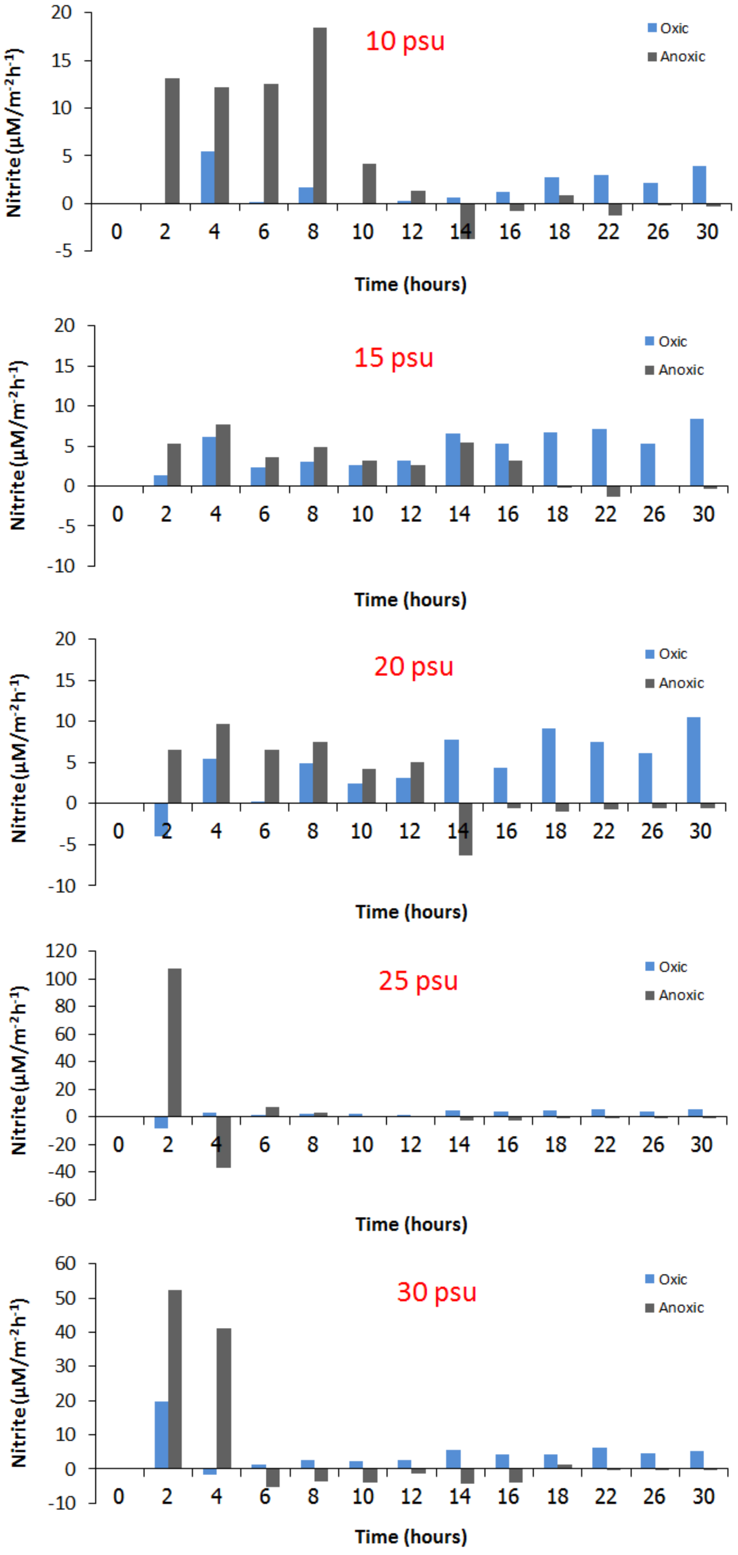
รูปที่ 4-4 เบนทิกฟลักซ์ของแอมโมเนียในช่วง 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง

4.1.2 อิทธิพลของออกซิเจนต่อเบนทิกฟลักซ์ของไนไตรท์

ผลการศึกษาฟลักซ์ของไนไตรท์ใน 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง (รูปที่ 4-5) พบว่าในภาวะไร้ออกซิเจนจะมีค่าฟลักซ์สูงกว่าภาวะที่มีออกซิเจนในช่วงแรกของการทดลองในทุกความเค็ม เนื่องจากในภาวะไร้ออกซิเจนมี 2 ปฏิกิริยาที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอนินทรีย์ไนโตรเจน นั่นคือ ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นที่จะเปลี่ยนไนไตรท์และไนเตรทไปเป็นแก็สไนโตรเจนและปฏิกิริยา anammox ที่เปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรท์ไปเป็นแก็สไนโตรเจนด้วยเช่นกัน (Fernandes et al., 2015) ทั้ง 2 กระบวนการที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนไตรท์ในมวลน้ำลดลงทำให้ไนไตรท์ในน้ำเหนือดินตะกอนมีความเข้มข้นน้อยกว่าในชั้นดินตะกอนจึงทำให้ฟลักซ์ของไนไตรท์ในภาวะพร่องออกซิเจน มีทิศทางออกจากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน เมื่อมีการแพร่ไนไตรท์จากดินตะกอนออกมาเพิ่มมากขึ้น ค่าฟลักซ์ที่วัดได้จึงมีค่าสูงเนื่องจากความเข้มข้นของไนไตรท์บริเวณน้ำเหนือดินตะกอนเป็นความเข้มข้นที่ได้จากไนไตรท์ที่ปล่อยมาเพิ่มรวมกับความเข้มข้นของไนไตรท์ที่มีอยู่เดิมในมวลน้ำ

ส่วนในภาวะที่มีออกซิเจนในช่วงแรกของการทดลองการแพร่ของไนไตรท์เป็นการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า นั่นคือไนไตรท์ที่สะสมในดินตะกอนมีค่าสูงกว่าในน้ำเหนือดินตะกอนทำให้ในภาวะที่มีออกซิเจนฟลักซ์ของไนไตรท์มีทิศทางจากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอนทุกความเค็มเมื่อเวลาผ่านไปกระทั่งความเข้มข้นของไนไตรท์ในน้ำเหนือดินตะกอนและในดินตะกอนมีความเข้มข้นเท่ากันหรือแตกต่างกันน้อยมากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดในภาวะที่มีออกซิเจนนั่นคือปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นที่ทำให้แอมโมเนียในน้ำเหนือดินตะกอนเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์ (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนไตรท์ในน้ำเหนือดินตะกอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ในชั้นดินตะกอนมีความเข้มข้นของไนไตรท์ต่ำกว่าทำให้ฟลักซ์ของไนไตรท์ในภาวะไร้ออกซิเจนมีทิศทางการแพร่จากน้ำเหนือดินตะกอนสู่ดินตะกอน เช่น ความเค็ม 30 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 6 เป็นต้นไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



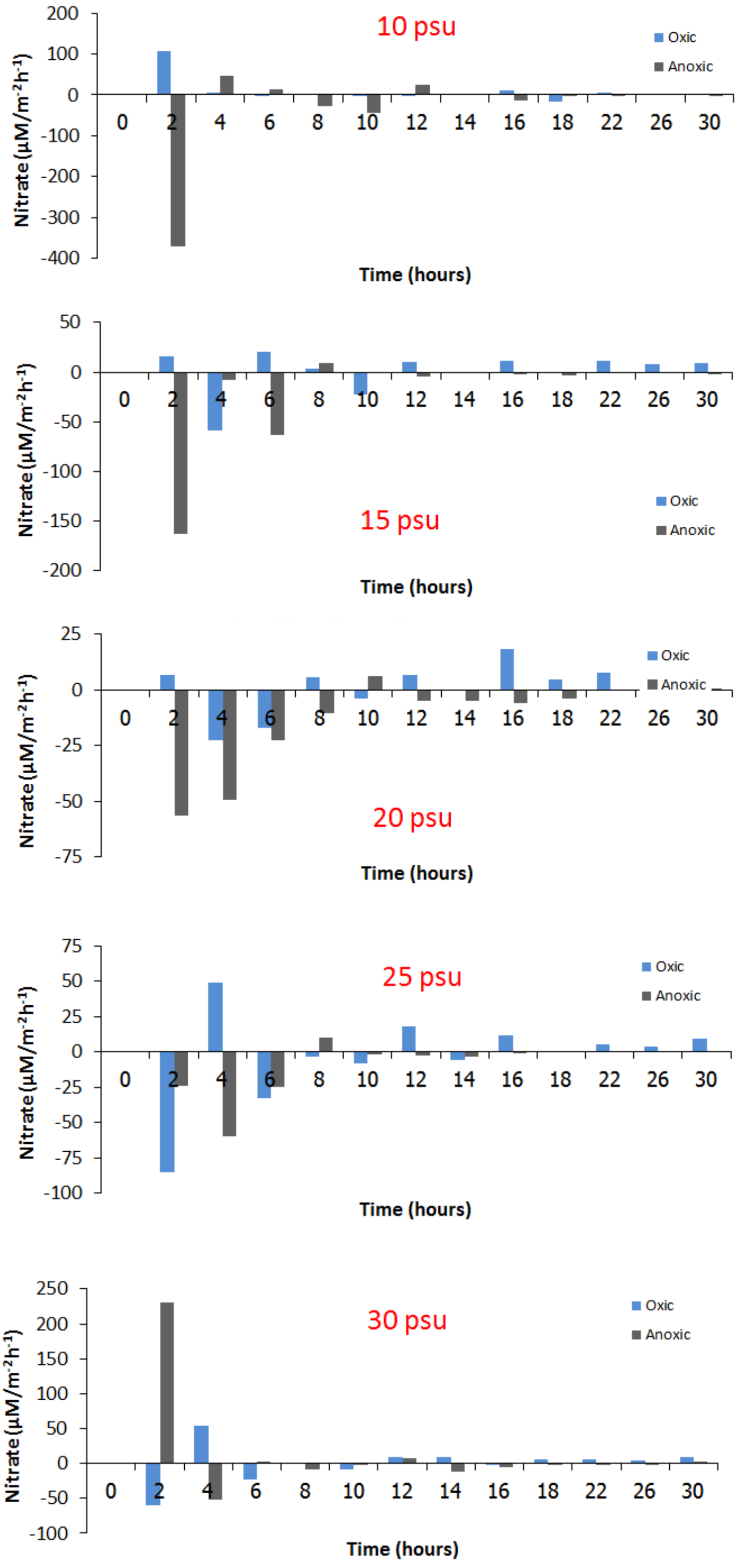
รูปที่ 4-5 เบนทิกฟลักซ์ของไนไตรท์ในช่วง 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง

4.1.3 อิทธิพลของออกซิเจนต่อเบนทิกฟลักซ์ของไนเตรท

ผลการศึกษาเบนทิกฟลักซ์ของไนเตรทใน 30 ชั่วโมงแรงของการทดลอง (รูปที่ 4-6) พบว่า ภาวะที่มีออกซิเจนฟลักซ์จะมีทิศทางจากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอนเนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นจะเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเหนือดินตะกอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีความเข้มข้นสูงกว่าในดินตะกอนส่งผลให้ฟลักซ์ของไนเตรทมีทิศทางการแพร่จากน้ำเหนือดินตะกอนสู่ชั้นดินตะกอน ส่วนบางช่วงเวลาที่พบว่าฟลักซ์ของไนเตรทมีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอนนั้นมาจากการที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรทในน้ำเหนือดินตะกอนมีปริมาณที่น้อยมากและในชั้นดินเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นเช่นกันทำให้ไนเตรทที่ได้จากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นในดินตะกอนมีความเข้มข้นสูงกว่าที่ได้จากน้ำเหนือดินตะกอนฟลักซ์ของไนเตรทจึงมีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน

ส่วนในภาวะไร้ออกซิเจนทิศทางของฟลักซ์ในช่วงแรกของการทดลองจะเป็นไปตามความแตกต่างของความเข้มข้นบริเวณน้ำเหนือดินตะกอนและดินตะกอน นั่นคือมีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอนในชั่วโมงที่ 2 ที่ความเค็ม 10, 15, 20 และ 25 และมีการแพร่จากน้ำเหนือดินตะกอนสู่ชั้นดินในความเค็มที่ 30 นอกจากนี้ในภาวะไร้ออกซิเจนไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ด้วยปฏิกิริยารีดักชั่นเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย (Saeed and Sun, 2012) ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทที่น้ำเหนือดินตะกอนลดลง ไนเตรทบางส่วนจะแพร่ขึ้นมาจากชั้นดินตะกอน แต่การทดลองนี้พบว่าช่วงท้ายของการทดลอง ฟลักซ์ของไนเตรทในภาวะไร้ออกซิเจนส่วนใหญ่มีทิศทางการแพร่จากน้ำเหนือดินตะกอนสู่ชั้นดินตะกอนมากกว่าการแพร่ออกมาจากดินตะกอน อาจมาจากไนเตรทที่สะสมในดินตะกอนถูกรีดิวซ์หรือถูกใช้ไปได้มากกว่าจนทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในชั้นดินตะกอนต่ำกว่าน้ำเหนือดินตะกอน ฟลักซ์ของไนเตรทในภาวะดังกล่าวจึงมีค่าเป็นลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

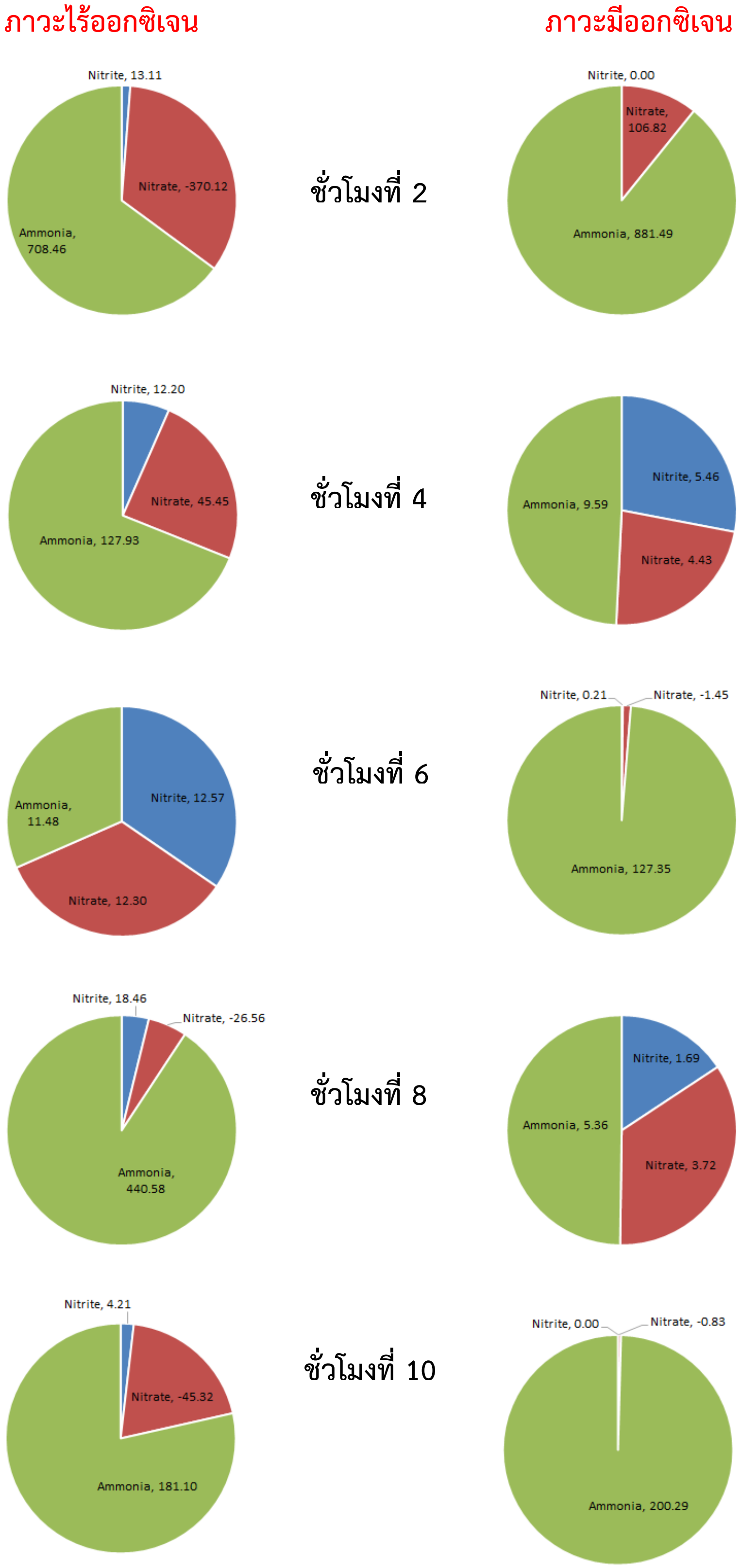


รูปที่ 4-6 เบนทิกฟลักซ์ของไนเตรทในช่วง 30 ชั่วโมงแรกของการทดลอง

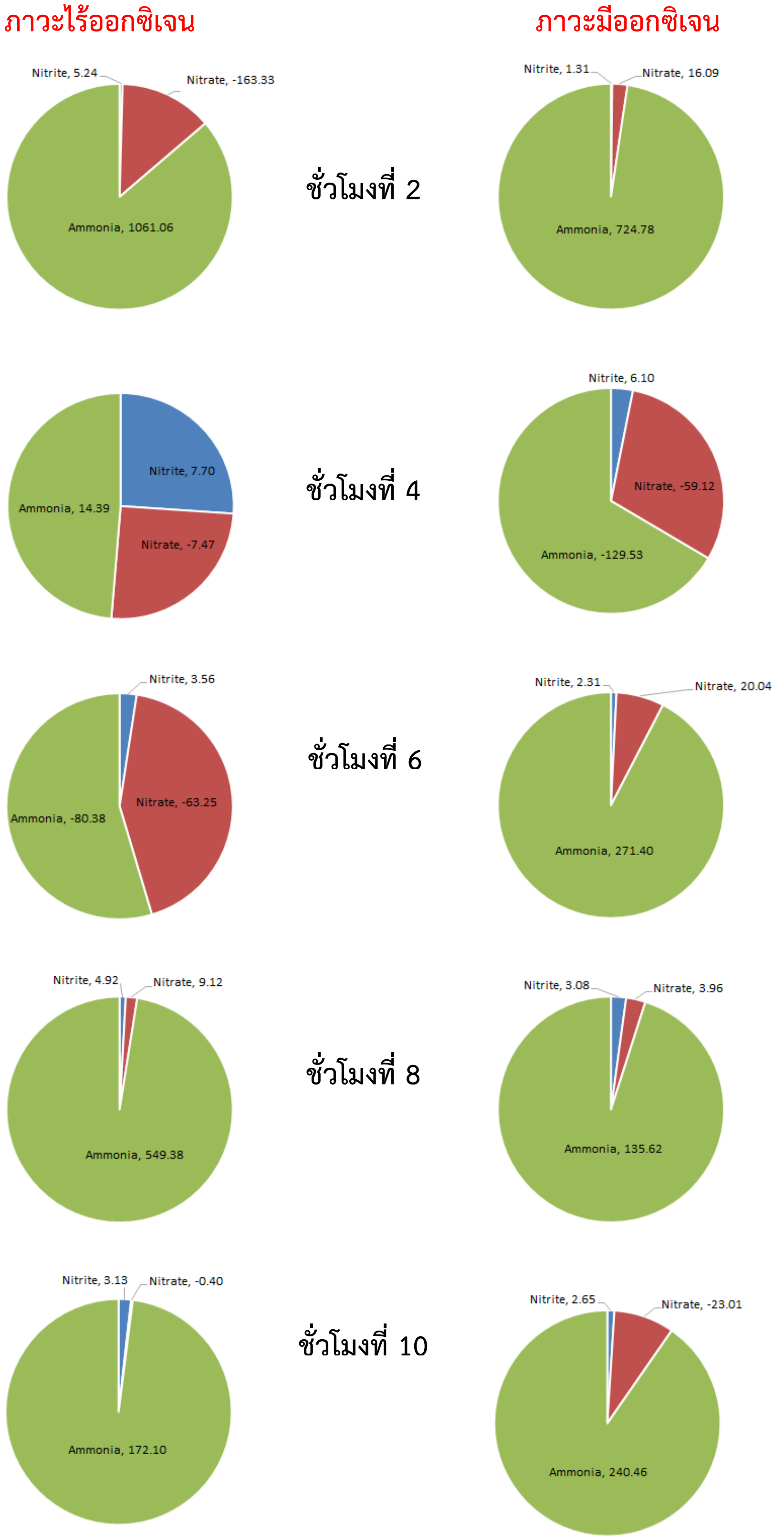
เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนเนื่องจากอิทธิพลของออกซิเจนทีละความเค็ม โดยเลือกช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดคือตั้งแต่เริ่มต้นทดลองจนถึงชั่วโมงที่ 10 พบว่า ที่ชั่วโมงที่ 2 ของการทดลอง ฟลักซ์ของแอมโมเนียจะมีค่าสูงกว่าฟลักซ์ของไนไตรท์และไนเตรท์ทั้งในภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนและเมื่อพิจารณาสัดส่วนระหว่างฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ที่แสดงในรูปแบบของกราฟวงกลม พบว่าในภาวะไร้ออกซิเจน สัดส่วนฟลักซ์ของไนไตรท์และไนเตรทจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปแต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ฟลักซ์ของไนไตรท์และไนเตรทจะมีค่าลดลงอีกครั้ง ซึ่งการกลับมาลดลงของฟลักซ์ของไนไตรท์และไนเตรทเกิดขึ้นในชั่วโมงที่ 6 ของการทดลอง ที่ความเค็ม 10, 15, 20 และ 25 (รูปที่ 4-7 ถึง 4-10) และเกิดขึ้นในชั่วโมงที่ 4 ของการทดลองในความเค็ม 30 (รูปที่ 4-11) ส่วนการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน ส่วนในภาวะที่มีออกซิเจนเมื่อการทดลองผ่านไปจะพบว่าสัดส่วนของฟลักซ์ของไนเตรทจะมีค่าสูงขึ้นและมีสัดส่วนสูงกว่าในภาวะไร้ออกซิเจนเห็นได้ชัดจากชั่วโมงที่ 4 ของความเค็ม 15, 20 และ 30 และชั่วโมงที่ 6 ที่ความเค็ม 25

นอกจากนี้ยังพบว่า การทดลองตั้งแต่ชั่วโมง 8 เป็นต้นไป สัดส่วนระหว่างฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ที่ได้จากภาวะไร้ออกซิเจนและภาวะที่มีออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกันเช่นที่ความเค็ม 15, 20, 25 และ 30

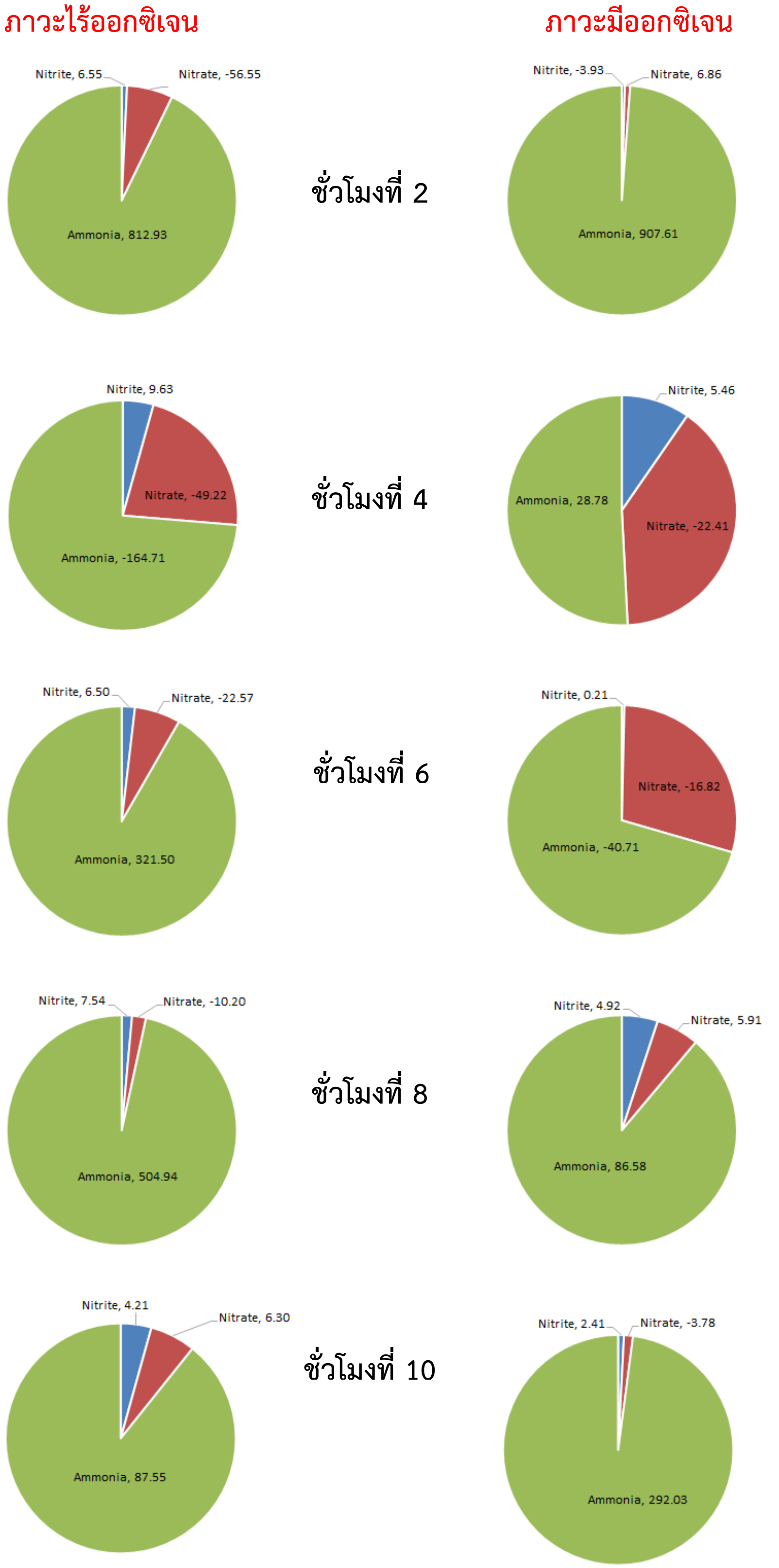
หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของอนินทรีย์ไนโตรเจนแต่ละตัว พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อความเข้มข้นของไนไตรท์ (รูปที่ 4-12) ความเข้มข้นของทั้งแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นในภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ความเข้มข้นของไนไตรท์ในภาวะไร้ออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเท่านั้นและค่อย ๆ ลดลงเมื่อการทดลองผ่านไป 15 ชั่วโมง ดังเช่นที่ความเค็ม 10, 15 และ 20 ส่วนที่ความเค็ม 25 และ 30 ความเข้มข้นของไนไตรท์จะเพิ่มขึ้นเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น (ชั่วโมงที่ 2 และชั่วโมงที่ 4) สำหรับภาวะที่มีออกซิเจนความเข้มข้นของไนไตรท์จะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



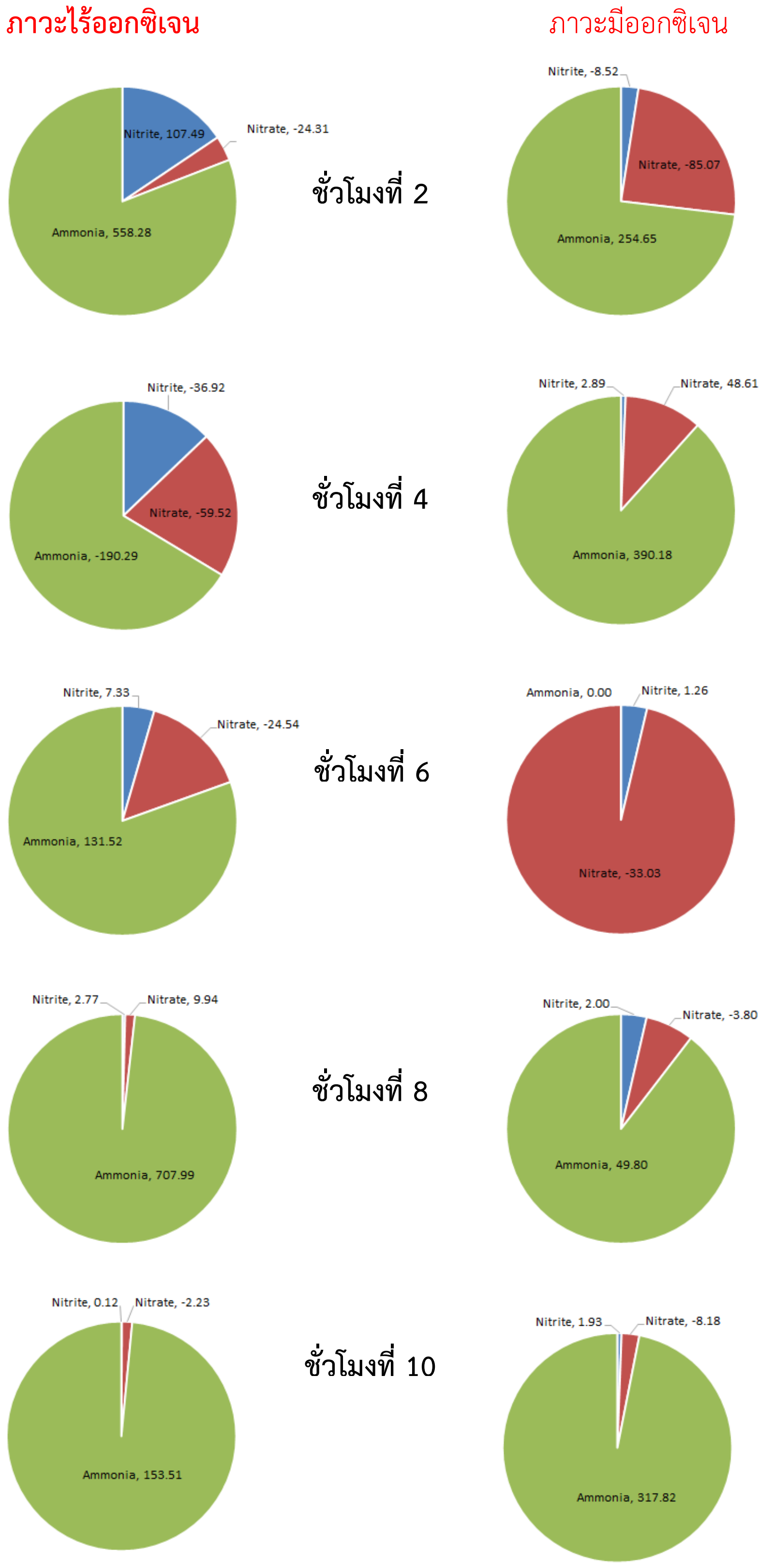
รูปที่ 4-7 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 10



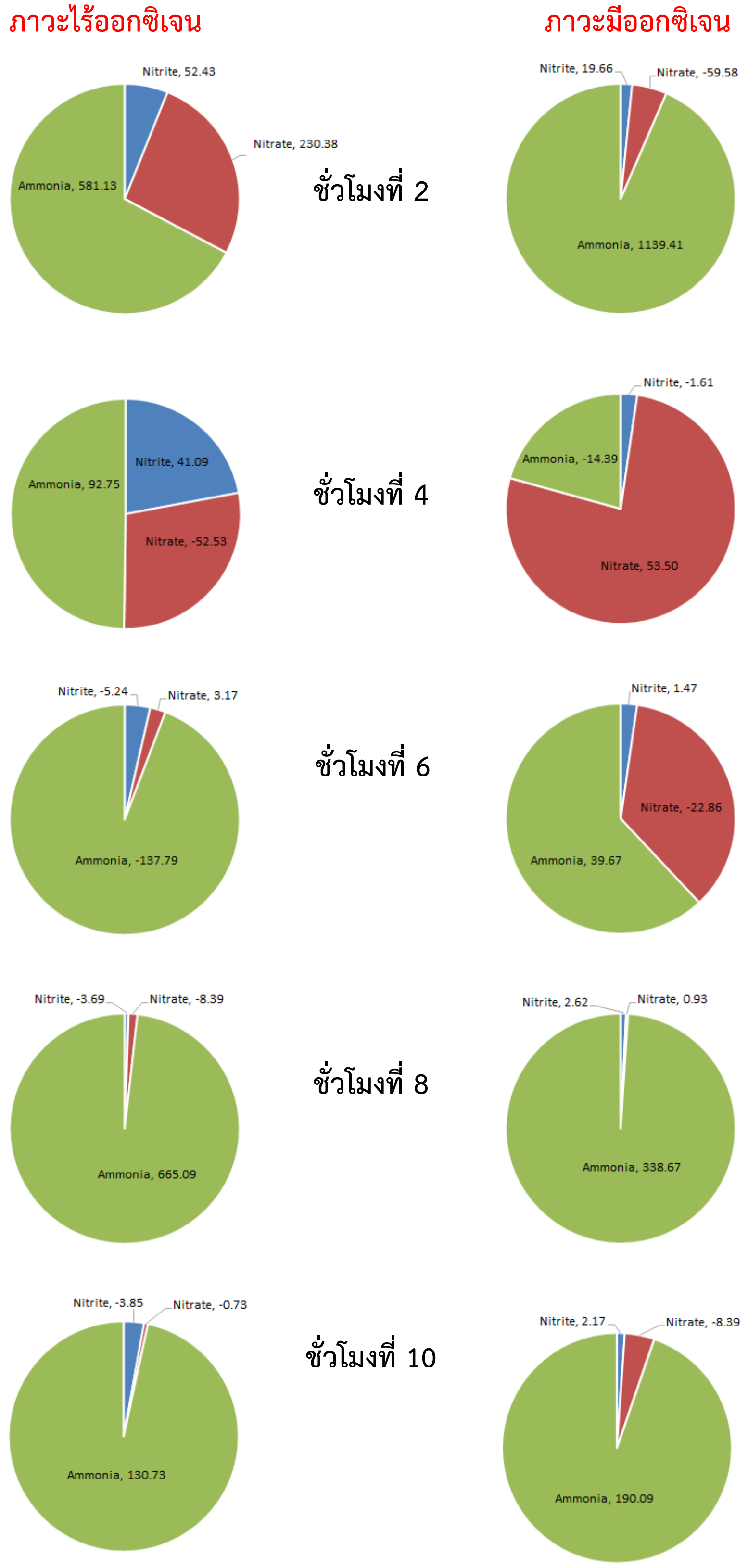
รูปที่ 4-8 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 15



รูปที่ 4-9 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 20



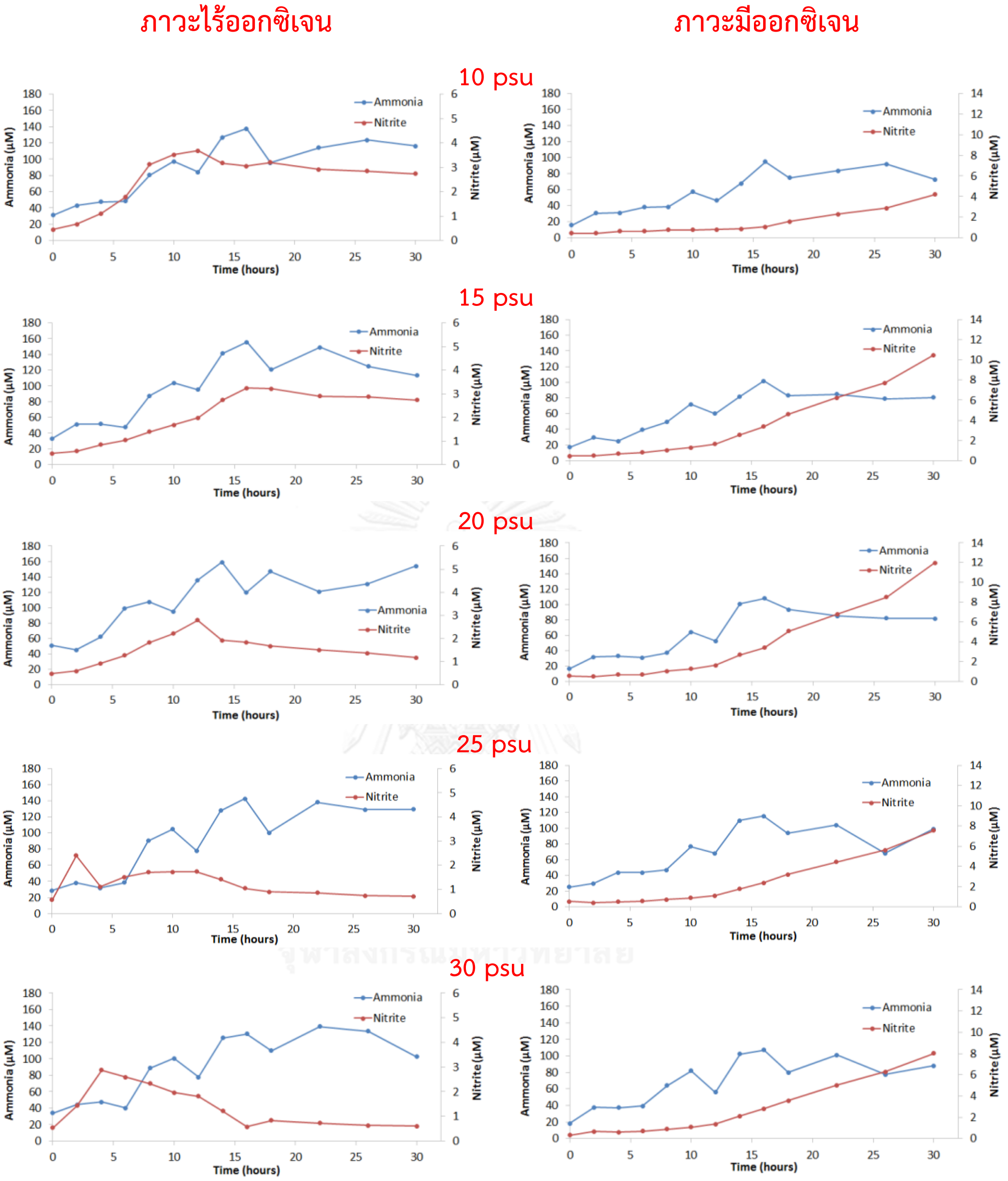
รูปที่ 4-10 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 25



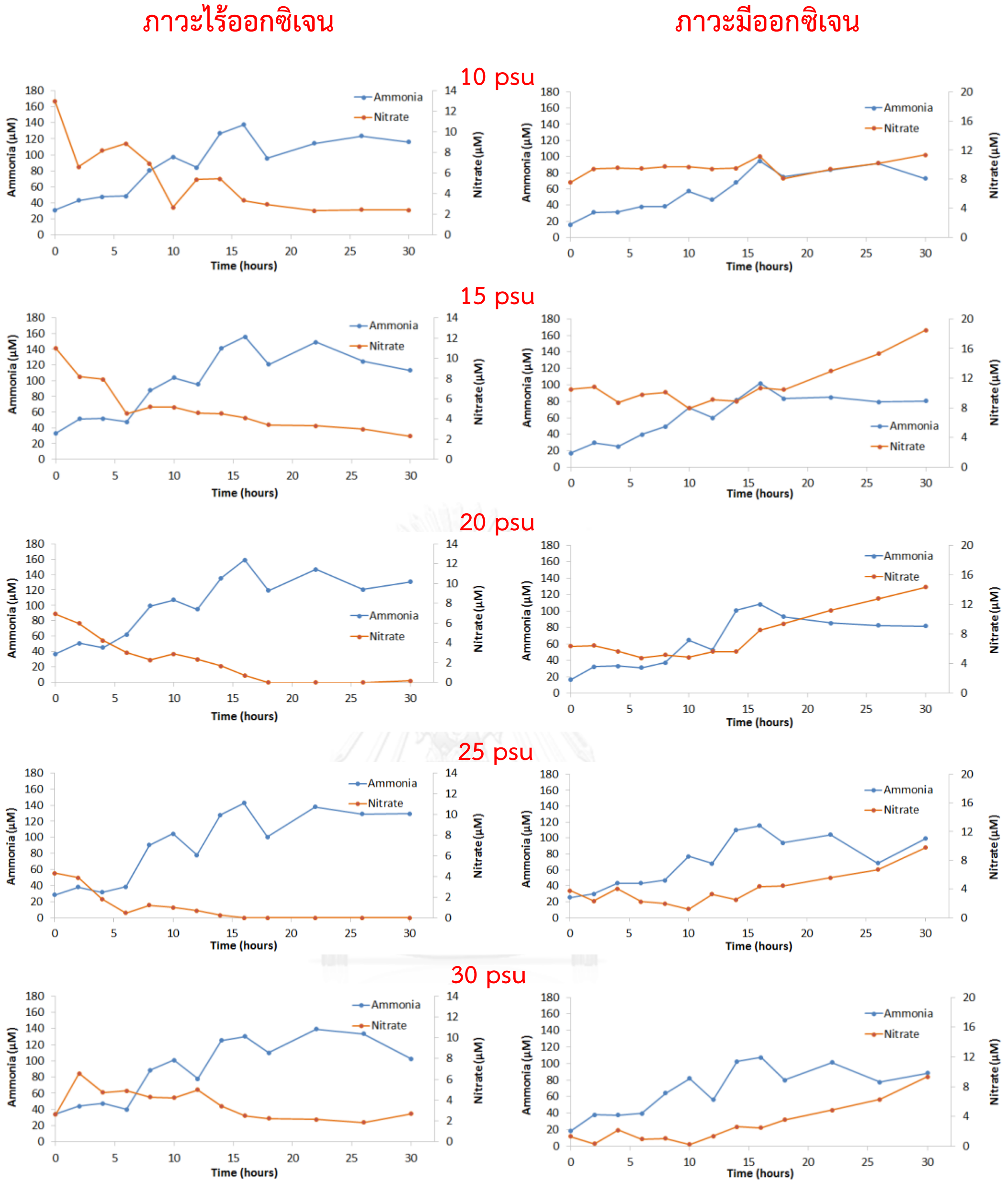
รูปที่ 4-11 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง) ความเค็ม 30

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรท (รูปที่ 4-13) ที่ภาวะไร้ออกซิเจน ความเข้มข้นของไนเตรทจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นในภาวะที่มีออกซิเจน เนื่องจากในภาวะไร้ออกซิเจนไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนีย เรียกว่า dissimilatory nitrate reduction (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ซึ่งความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนเตรทมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบผกผันในภาวะไร้ออกซิเจน นั่นคือ เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นแต่ความเข้มข้นของไนเตรทจะลดลง ส่วนในภาวะที่มีออกซิเจนปฏิกิริยาที่เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องคือปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น ซึ่งมีการทำงาน 2 ขั้นตอนด้วยกัน ลำดับแรกเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ และไปเป็นไนเตรท ปฏิกิริยาดังกล่าวอาศัยการทำงานของแบคทีเรียบางชนิด (Saeed and Sun, 2012) สามารถดูได้จากรูปที่ 4-12 และ 4-13 ที่บางช่วงเวลาความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงแต่ความเข้มข้นของไนไตรท์และไนเตรทเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรท์ต่อเวลา

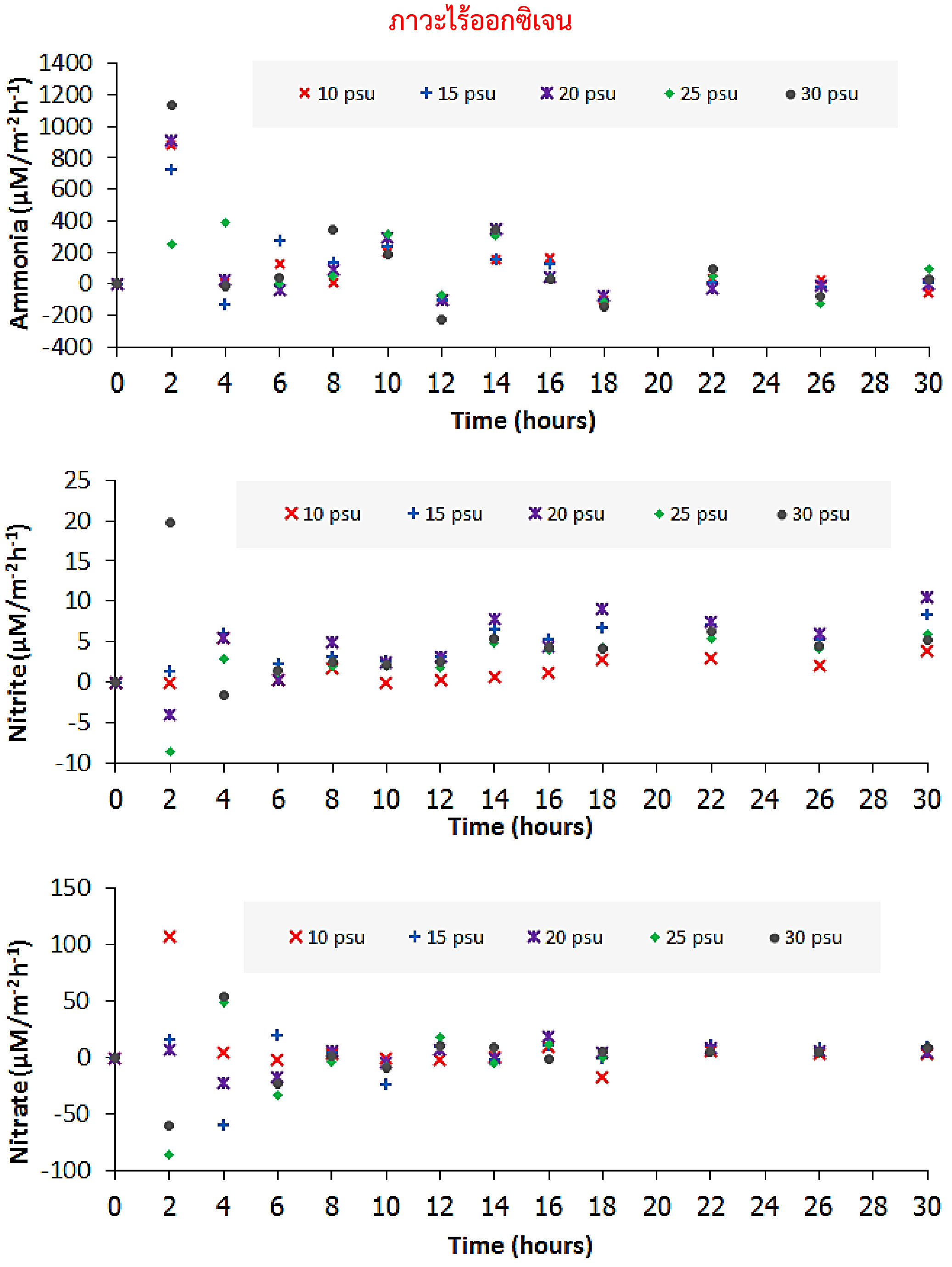


รูปที่ 4-13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนเตรทต่อเวลา

4.2 อิทธิพลของความเค็มต่อเบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน

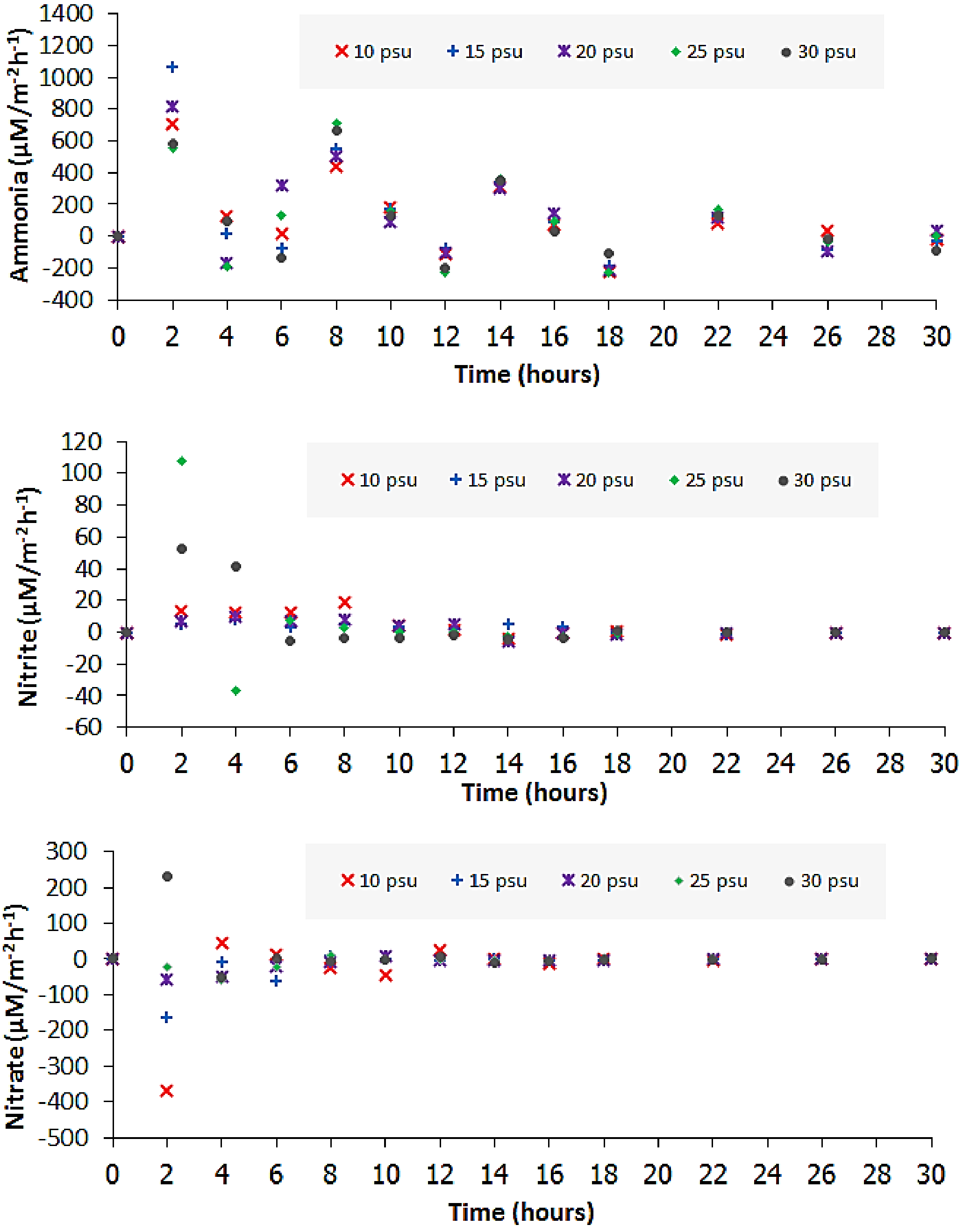
จากรูป 4-14 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเบนทิกฟลักซ์ที่ความเค็ม 10, 15, 20, 25 และ 30 พบว่าทั้งภาวะไร้ออกซิเจนและภาวะที่มีออกซิเจน ความเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์และความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ เนื่องจากทั้งแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในความเค็มต่าง ๆ ในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกับการศึกษาฟลักซ์ระหว่างชั้นดินตะกอนที่ได้จากปากแม่น้ำ 3 แห่งในประเทศโปรตุเกสที่มาทดลองอิทธิพลของความเค็ม 3 ระดับ คือ 0, 10 และ 20 ต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างชั้นดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอน ในห้องปฏิบัติการเช่นกัน พบว่าแต่ละความเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (Teixeira et al., 2013) แม้ว่าความเค็มจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนของแอมโมเนียระหว่างดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอน (Weston et al., 2010) แต่ความเค็มไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนเสมอไป เนื่องจากในธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้รับอิทธิพลจากฤดูกาลและสภาวะแวดล้อมอื่นๆ มากกว่าอิทธิพลจากความเค็ม (Giblin et al., 2010) หากต้องการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากความเค็มจำเป็นต้องมีการศึกษาในระยะเวลาที่ยาวนานเพิ่มมากขึ้นเพื่อครอบคลุมให้ครบทุกฤดูกาล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-14 เบนทิกฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ความเค็มต่าง ๆ

ภาวะมีออกซิเจน

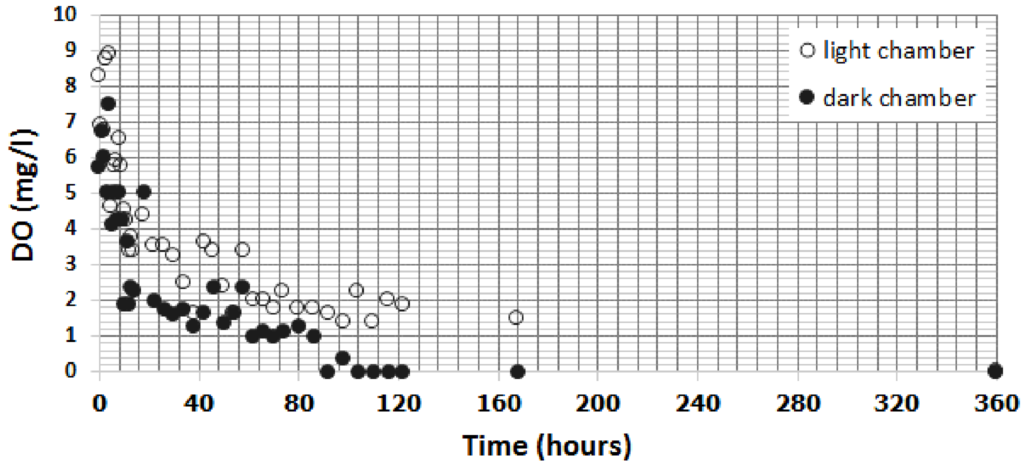


รูปที่ 4-14 (ต่อ)

4.3 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากเบนทิกแชมเบอร์

จากการศึกษาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากรอยต่อระหว่างชั้นดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอนโดยใช้เบนทิกแชมเบอร์ชนิดโปร่งใสและแบบทึบแสงทำการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้รับแสงจากธรรมชาติก่อนการทดลองได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารอนิทรีย์ในดิน พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 4.74 และน้ำทะเลที่ใช้มีความเค็มเท่ากับ 30

สำหรับการศึกษาฟลักซ์ครั้งนี้ได้ทำการวัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำควบคู่กับการหาค่าฟลักซ์ตลอดการทดลองซึ่งในแชมเบอร์แบบทึบแสงเข้าสู่ภาวะพร่องออกซิเจนตั้งแต่ชั่วโมงที่ 10 และมีค่าเท่ากับ 0 mg/l ในชั่วโมงที่ 98 ส่วนแชมเบอร์แบบโปร่งใสอยู่ในภาวะพร่องออกซิเจนช้ากว่าในแชมเบอร์แบบทึบแสง ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นในชั่วโมงที่ 34 และวัดค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 0 mg/l ได้ที่ชั่วโมงที่ 360 เนื่องจากน้ำภายในแชมเบอร์แบบโปร่งใสมีการรับแสงธรรมชาติในแต่ละช่วงของวันจึงเกิดการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวคือออกซิเจนในขณะที่แชมเบอร์แบบทึบแสงไม่ได้รับแสงเพิ่มสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสง อีกทั้งยังเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในแชมเบอร์ทำให้ออกซิเจนในน้ำภายในแชมเบอร์แบบทึบแสงลดลงและหมดไปก่อนน้ำจากแชมเบอร์แบบโปร่งแสงดังแสดงในรูปที่ 4-15



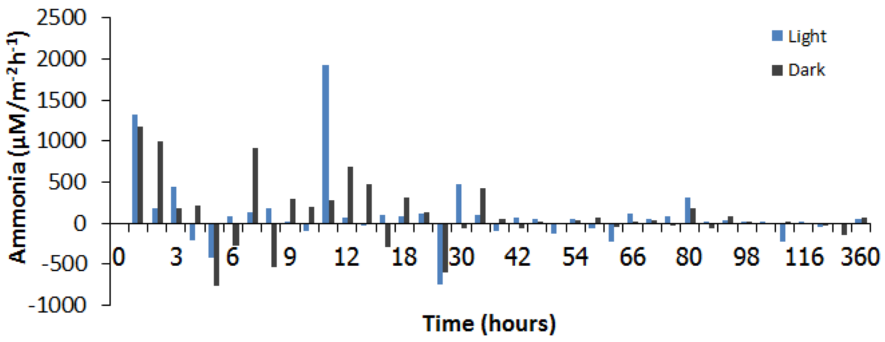
รูปที่ 4-15 ปริมาณออกซิเจนละลายในเบนทิกแชมเบอร์

4.3.1 ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากเบนทิกแชมเบอร์

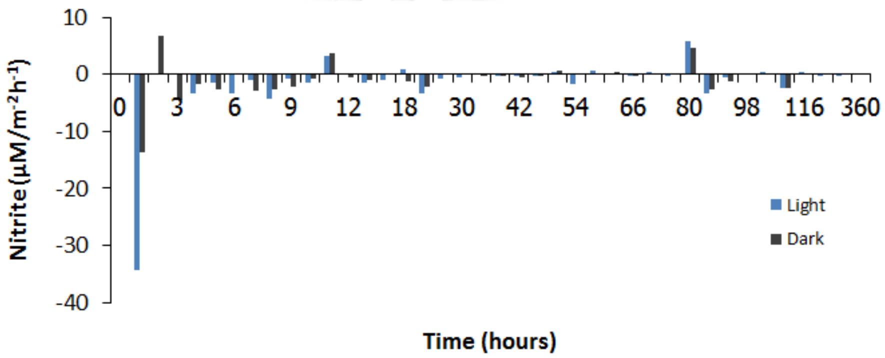
ฟลักซ์ของแอมโมเนียที่ได้จากการทดลองพบว่า แชมเบอร์แบบโปร่งใส มีค่าฟลักซ์ระหว่าง (-747.84) – 1920.19 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ส่วนในแชมเบอร์แบบทึบแสงมีค่าระหว่าง (-763.84) – 1181.47 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ส่วนใหญ่แล้วฟลักซ์จากแชมเบอร์ทั้ง 2 แบบ จะมีทิศทางการแพร่จากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน มีเพียงบางช่วงเวลาที่ฟลักซ์มีทิศทางจากน้ำเหนือดินตะกอนลงสู่ตะกอน (รูปที่ 4-16) การเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียทั้งในแชมเบอร์ทั้งสองมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในมวลน้ำข้างใน (Hoigne and Bader, 1983) ฟลักซ์ของไนไตรท์ในแชมเบอร์แบบโปร่งใสและแบบทึบแสง มีค่าระหว่าง (-34.20) - 5.90 และ (-13.68) - 6.84 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ซึ่งฟลักซ์ส่วนใหญ่จะมีทิศทางการแพร่จากน้ำเหนือดินตะกอนสู่ดินตะกอน โดยช่วงแรกฟลักซ์ของไนไตรท์ที่ได้จากแชมเบอร์แบบโปร่งใสจะมีค่าสูงกว่าฟลักซ์ที่ได้จากแชมเบอร์แบบทึบแสง (รูปที่ 4-17) ส่วนฟลักซ์ของไนเตรทในแชมเบอร์แบบโปร่งใสและแบบทึบแสงมีค่าระหว่าง (-156.73) - 128.23 และ (-106.86) - 427.44 ไมโครโมลาร์/ตารางเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ ฟลักซ์ของไนเตรทส่วนใหญ่จะมีค่าสูงในช่วงแรกของการทดลอง ก่อนที่จะค่อย ๆ ลดลง (รูปที่ 4-18)

การที่ช่วงแรกฟลักซ์ที่ได้จากแชมเบอร์แบบโปร่งใส่มีค่าสูงกว่าฟลักซ์ที่ได้จากแชมเบอร์แบบทึบแสง เนื่องจากแชมเบอร์แบบโปร่งใส่ที่มีการสังเคราะห์แสงทำให้มีค่าออกซิเจนละลายสูงกว่าแชมเบอร์แบบทึบแสงในช่วงแรกของการทดลองทำให้มีออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงกว่าในแชมเบอร์แบบทึบแสงซึ่งดินตะกอนจากชายฝั่งอ่างศิลามีการสะสมสารอินทรีย์สูง เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินตะกอนและได้เป็นแอมโมเนียในภาวะดังกล่าวปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นจะทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรท์และไนเตรททำให้ฟลักซ์ของไนไตรท์และไนเตรทจากแชมเบอร์แบบโปร่งใสมีค่าสูงกว่าแชมเบอร์แบบทึบแสง และเมื่อเข้าสู่ภาวะพร่องหรือไร้ออกซิเจนในแชมเบอร์ทั้ง 2 ชนิด ฟลักซ์ของแอมโมเนียที่ได้จะมาจากการที่ไนเตรทถูกรีดิวซ์ให้เป็นแอมโมเนียผ่านกระบวนการรีดักชั่นของไนโตรเจน (Saeed and Sun, 2012) ดูได้จากความเข้มข้นของแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเข้มข้นของไนเตรทจะลดลงทั้งในแชมเบอร์แบบโปร่งใสและแบบทึบแสง (รูปที่ 4-19) แม้ว่าการศึกษาโดยใช้แชมเบอร์แบบโปร่งใสและแบบทึบแสงจะเป็นการศึกษาเพื่อพิจารณาอิทธิพลของการสังเคราะห์แสงและการย่อยสลายสารอินทรีย์ในมวลน้ำ แต่จากผลการศึกษาพบว่าเปลี่ยนแปลงอนินทรีย์ไนโตรเจนทั้งในแชมเบอร์ทั้งสองไม่มีความแตกต่างกัน (Berelson et al., 1998) แสดงถึงการสังเคราะห์แสงที่จะเป็นตัวเพิ่มออกซิเจนละลายในน้ำเหนือตะกอนในแชมเบอร์มีไม่เพียงพอจึงทำให้น้ำในแชมเบอร์ทั้ง 2 ชนิดยังคงเป็นภาวะพร่องออกซิเจน แต่กระบวนการ

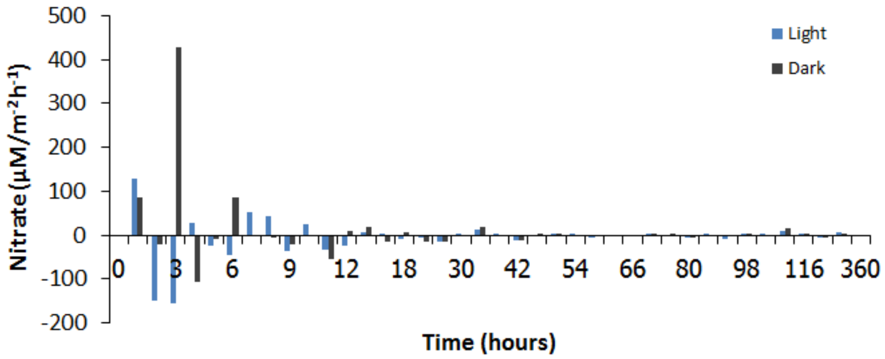
สังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นจะชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงอนินทรีย์ไนโตรเจนเนื่องจากภาวะไร้ออกซิเจนในแชมเบอร์แบบโปร่งใสได้



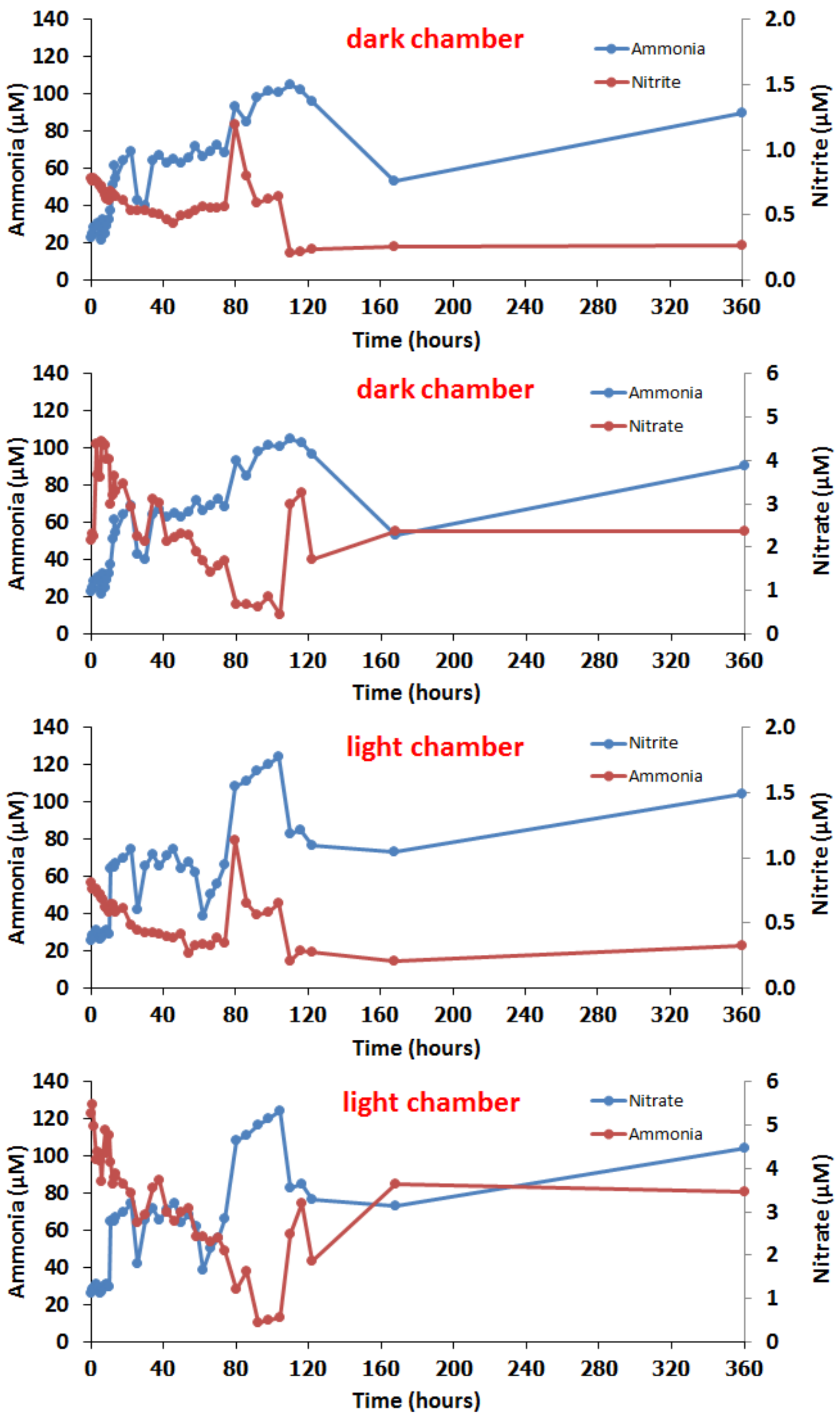
รูปที่ 4-16 ฟลักซ์ของแอมโมเนียจากเบนทิกแชมเบอร์



รูปที่ 4-17 ฟลักซ์ของไนไตรท์จากเบนทิกแชมเบอร์



รูปที่ 4-18 ฟลักซ์ของไนเตรทจากเบนทิกแชมเบอร์



รูปที่ 4-19 ความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนในเบนทิกฟลักซ์

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนและความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท พบว่า ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำเหนือดินตะกอนมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงรูปแบบอนินทรีย์ไนโตรเจน ในภาวะที่มีออกซิเจน ปฏิกิริยาที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์บริเวณรอยต่อระหว่างดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอน นั่นคือปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นที่จะเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท ตามลำดับ จากนั้นปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นจะเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นแก็สไนโตรเจน (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเหนือดินตะกอนลดลงและส่งผลต่อทิศทางการแพร่ของแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท ส่วนในภาวะไร้ออกซิเจน ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนีย (Groffman and Rosi-Marshall, 2013) ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทที่น้ำเหนือตะกอนลดลง และความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องจากในดินตะกอนมีปริมาณสารอินทรีย์สะสมสูง ทำให้แอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์มีความเข้มข้นสูง แอมโมเนียส่วนใหญ่จึงมีทิศทางการแพร่จากจากดินตะกอนสู่น้ำเหนือดินตะกอน เพราะมีความเข้มข้นสูงกว่า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะแสดงเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ หรือเฉพาะช่วงแรกของการทดลองเนื่องจากความหนาของดินตะกอนมีไม่มากนัก เมื่อปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้นจนทำให้ความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนในดินตะกอนและน้ำเหนือดินตะกอนเท่ากันหรือมีความแตกต่างกันไม่มาก ฟลักซ์จึงมีค่าลดลงหรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงท้ายของการทดลอง ส่วนอิทธิพลของความเค็มไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในธรรมชาติที่ปากแม่น้ำ Parker (Giblin et al., 2010) โดยพบว่าปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์มากกว่าอิทธิพลของความเค็ม หากต้องการศึกษาอิทธิพลของความเค็มควรที่จะเพิ่มระยะเวลาในการศึกษาให้ครอบคลุมทุกช่วงฤดู

ผลการศึกษาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจากเบนทิกแชมเบอร์แบบโปร่งใสและแบบทึบแสง พบว่า การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนกันในแชมเบอร์ทั้ง 2 แบบ และมีรูปแบบเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงในการทดลองภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากค่าออกซิเจนละลายในแชมเบอร์ทั้ง 2 ชนิด ลดลงจนเข้าสู่ภาวะไร้ออกซิเจนเมื่อการทดลองผ่านไปไม่นาน และกระบวนการสังเคราะห์แสงในแชมเบอร์แบบโปร่งใสที่สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในมวลน้ำได้ ไม่

เพียงพอต่อกระบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในแชมเบอร์แบบโปร่งใส ทำให้สุดท้ายแล้วน้ำในแชมเบอร์ดังกล่าวอยู่ในภาวะไร้ออกซิเจนเช่นกัน ซึ่งผลกระทบจากภาวะไร้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นแชมเบอร์แบบโปร่งใสจะเกิดช้ากว่าและมีความรุนแรงน้อยกว่าผลกระบทที่เกิดขึ้นในแชมเบอร์แบบทึบแสง

ทั้งนี้การศึกษาเบนทิกฟลักซ์อาจต้องศึกษาปัจจัยทางชีวภาพอื่นด้วย เช่น ปริมาณแพลงก์ตอนในมวลน้ำ อัตราการสังเคราะห์แสง อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ เนื่องจากหลาย ๆ ปฏิกิริยาของไนโตรเจนจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทางชีวภาพจึงจะเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ไนโตรเจนเป็นสารอาหารพืชที่จำเป็นต่อแพลงก์ตอนพืชและผลผลิตเบื้องต้น หากมีการศึกษาควบคู่ไปกับปริมาณผลผลิตเบื้องต้น จะสามารถบอกได้ว่าเบนทิกฟลักซ์มีความสำคัญอย่างไรต่อผลผลิตเบื้องต้นของชายฝั่งอ่างศิลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2552. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล [ออนไลน์]. แหล่งที่มาจาก: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water02.html.

กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์เศรษฐกิจประมง. 2555. สถิติการประมงแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2553. เอกสารฉบับที่ 9/2555, ศูนย์สารสนเทศ กรมประมง

กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์เศรษฐกิจประมง. 2557. สถิติการประมงแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2555. เอกสารฉบับที่ 9/2557, ศูนย์สารสนเทศ กรมประมง

กฤดิกานต์ คำสุนทร. 2553. ฟลักซ์ของฟอสฟอรัสและซิลิกาละลายบริเวณรอยต่อระหว่างตะกอนดินและมวลน้ำชายฝั่งบริเวณอ่างศิลา จ.ชลบุรี. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. คณะวิทยาศาสตร์. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

การจัดการฐานข้อมูลทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2556. ระบบฐานข้อมูลกลางและมาตรฐานข้อมูลทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง [ออนไลน์]. แหล่งที่มาจาก: http://marinegiscenter.dmcr.go.th/.

เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการกลไกน้ำเปลี่ยนสี. ติดต่อขอข้อมูลจาก รศ.ดร.ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ

โครงการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเล. 2546. การไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบน [ออนไลน์]. แหล่งที่มาจาก: http://mrpolicy.trf.or.th/.

ธีรพล ลาภเสนา. 2553. ฟลักซ์ของไนโตรเจนบริเวณรอยต่อระหว่างตะกอนดินและมวลน้ำชายฝั่งบริเวณอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. คณะวิทยาศาสตร์. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พุทธ ส่องแสงจินดา, ลักขณา ละอองศิริวงศ์ และชัชวาล อินทรมนตรี. 2543. ฟลักซ์ของสารประกอบไนโตรเจนที่ผิวสัมผัสของน้ำ-ดินตะกอนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 1/2543. สถาบันวิจัยและพัฒนาการเลี้ยงกุ้งทะเล. กรมประมง.

มนุวดี หังสพฤกษ์. 2532. สมุทรศาสตร์เคมี. 329 หน้า. กรุงเทพ ฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล. 2556-2558. รายงานคุณภาพน้ำ [ออนไลน์]. แหล่งที่มาจาก: http://www.bims.buu.ac.th/DocLib4/Forms/AllItems.aspx.

สุกัญดา ไมตรีแก้ว. 2550. อิทธิพลของออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ณ รอยต่อระหว่างตะกอนและน้ำบริเวณทะเลสาบสงขลาตอนนอก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Abell, G. C., Banks, J., Ross, D. J., Keane, J. P., Robert, S. S., Revill, A. T. & Volkman, J. K. 2011. Effects of estuarine sediment hypoxia on nitrogen fluxes and ammonia oxidizer gene transcription. FEMS Microbiol Ecol., 75, 112-122.

Beer, T. 1997. *Environmental Oceanography* CRC Press. Florida.

Bender, M. L., Fanning, K. A., Froelich, P. N., Heath, G. R. & Maynard, V. 1997. nterstitial nitrate profiles and oxidation of sedimentary organic matter in the eastern equatorial atlantic. Science Magazine 198, 605-609.

Burnett, W. C., Wattayakorn, G., Taniguchi, M., Dulaiova, H., Sojisuporn, P., Rungsupa, S. & Ishitobi, T. 2007. Groundwater-derived nutrient inputs to the Upper Gulf of Thailand. Continental Shelf Research. 27(2). 176-190

Berelson, W. M., Heggie, D., Longmore, A., Kilgore, T., Nicholson, G. & Skyring, G. 1998. Benthic Nutrient Recycling in Port Phillip Bay, Australia. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 46, 917-934.

Devol, A. H. & Christensen, J. P. 1993. Benthic fluxes and nitrogen cycling in sediments of the continental margin of the eastern North Pacific Journal of Marine Research, 51, 345-372.

Eggert, A. & Schneider, B. 2015. A nitrogen source in spring in the surface mixed-layer of the Baltic Sea: Evidence from total nitrogen and total phosphorus data. Journal of Marine Systems, 148, 39-47.

Fernandes, S. O., Javanaud, C., Aigle, A., Michotey, V. D., Guasco, S., Deborde, J., Deflandre, B., Anschutz, P. & Bonin, P. C. 2015. Anaerobic nitrification–denitrification mediated by Mn-oxides in meso-tidal sediments: Implications for N2 and N2O production. Journal of Marine Systems, 144, 1-8.

Forryan, A., Martin, A. P., Srokosz, M. A., Popova, E. E., Painter, S. C. & Stinchcombe, M. C. 2012. Turbulent nutrient fluxes in the Iceland Basin. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 63, 20-35.

Friedl, G., Dinkel, C. & Wehrli, B. 1998. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea. Marine Chemistry, 62, 77-88.

Giblin, A. E., Weston, N. B., Banta, G. T., Tucker, J. & Hopkinson, C. S. 2010. The Effects of Salinity on Nitrogen Losses from an Oligohaline Estuarine Sediment. Estuaries and Coasts, 33, 1054-1068.

Groffman, P. M. & Rosi-Marshall, E. J. 2013. Chapter 7 - The Nitrogen Cycle. *In:* WEATHERS, K. C., STRAYER, D. L. & LIKENS, G. E. (eds.) *Fundamentals of Ecosystem Science.* Academic Press.

Hoigne, J. & Bader, H. 1983. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—I: Non-dissociating organic compounds. Water Research, 17, 173-183.

Kuwabara, J. S., Topping, B. R., Coale, K. H. & Berelson, W. M. 1999. Processes affecting the benthic flux of trace metals into the water column of San Francisco Bay. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4018B, 2.

Nowicki, B. L. 1994. The Effect of Temperature, Oxygen, Salinity, and Nutrient Enrichment on Estuarine Denitrification Rates Measured with a Modified Nitrogen Gas Flux Technique. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 38, 137–156.

Ribaudo, M. O., Heimlich, R. & Peters, M. 2005. Nitrogen sources and Gulf hypoxia: potential for environmental credit trading. Ecological Economics, 52, 159-169.

Riebesell, U. & Oschlies, A. 2014. *WP2: Pelagic biogeochemical cycling: drivers and controls* [Online]. GEOMAR. Available: http://www.geomar.de/nc/en/research/oceans/topic-2-ocean-warming-acidification-and-deoxygenation/topic-2-wp2-englisch [Accessed 25 April 2014.

Saeed, T. & Sun, G. 2012. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Journal of Environmental Management, 112, 429–448.

Strickland, J. D. H. & Parson, T. R. 1972. A Pratical Handbook of Seawater Analysis. Fisheries Research Board of Canada. Bulletin, 167, 49-64.

Sundback, K., Miles, A. & Goransson, E. 2000. Nitrogen fluxes, denitrification and the role of microphytobenthos in microtidal shallow-water sediments: an annual study. Marine Ecology Progress Series, 200, 59-76.

Teixeira, C., Magalhães, C., Joye, S. B. & Bordalo, A. A. 2013. The role of salinity in shaping dissolved inorganic nitrogen and N2O dynamics in estuarine sediment–water interface. Marine Pollution Bulletin, 66, 225-229.

Topping, B. R., Kuwabara, J. S., Parchaso, F., Hagar, S. W., Arnsberg, A. J. & Murphy, F. 2001. Benthic Flux of Dissolved Nickel into the Water Column of South San Francisco Bay. U.S. Geological Survey Open File Report 01-89, 50.

Trenberth, K. E. 2007. *The Role of the Oceans in Climate* [Online]. Available: http://www.oco.noaa.gov/roleofOcean.html [Accessed June, 12th 2015].

Weston, N., Giblin, A., Banta, G., Hopkinson, C. & Tucker, J. 2010. The Effects of Varying Salinity on Ammonium Exchange in Estuarine Sediments of the Parker River, Massachusetts. Estuaries and Coasts, 33, 985-1003.

Zago, C., Capodaglio, G., Ceradini, S., Ciceri, G., Abelmoschi, L., Soggia, F., Cescon, P. & Scarponi, G. 2000. Benthic fluxes of cadmium, lead, copper and nitrogen species in the northern Adriatic Sea in front of the River Po outflow, Italy. Science of The Total Environment, 246, 121-137.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ทั้งหมดเป็น analytical grade (AR grade) ซึ่งมีรายการทั้งหมดดังนี้

- แมงกานีสซัลเฟต (Manganease sulfate, $MnSO_4.H_2O$) (Merck, Germany)
- โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide, KI) (Merck, Germany)
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) (Merck, Germany)
- โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodiumthiosulphate, $Na_2S_2O_3.5H_2O$) (Merck, Germany)
- โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium Iodate, KIO_3) (Merck, Germany)
- ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas, N_2) (ไทยอินดรัสเตรียล จำกัด, ประเทศไทย)
- แป้ง (starch soluble) (CARLO ERBA, Ronado)
- ซัลฟานิลาไมด์ (sulphanilamide, $C_6H_8N_2O_2S$) (Fluka, Switzerland)
- โซเดียมไนไตรต์ (sodium nitrite, $NaNO_2$) (BDH Chemicals, England)
- โพแทสเซียมไนเตรต (potassium nitrate, KNO_3) (Carlo Erba, Italy)
- แอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride, NH4Cl)
- คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (copper (II) sulphate, $CuSO_4.5H_2O$) (Merck, Germany)
- กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) (Lab-scan, Ireland)
- ไตรโซเดียมซิเตรต (trisodium citrate, $Na_3C_6H_8O_7$. H_2O) (Unilab, Australia)
- โซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (sodium nitroprusside, $Na_2[Fe(III)(CN)_5NO]$. H_2O) (Merck, Germany)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. อุปกรณ์

- ชุดกรอง (filter holder)
- แผ่นกรอง GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร
- หลอดฉีดยาขนาด 60 มิลลิลิตร
- Chambers ชนิดทึบแสง และโปร่งแสง
- ถังพลาสติกขนาดใหญ่
- ถังพลาสติกใสขนาด 5 ลิตร
- สายยางขนาดเล็ก
- หัวทราย
- เครื่องปั๊มอากาศ
- ถังสำรองน้ำ
- หลอดทดลองพลาสติกขนาด 12 มิลลิลิตร

3. เครื่องมือวิเคราะห์

- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

1. การวิเคราะห์แอมโมเนีย

1.1 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.1.1 Ammonium-free water

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, NaOH 2-3 เกล็ดในน้ำกลั่น 1 L ต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ใช้น้ำกลั่นที่เตรียมนี้ในการเตรียมสารเคมีบางตัวที่ระบุ

1.1.2 1.0 M Sodium hydroxide

ละลาย NaOH 40.0 กรัม ในน้ำกลั่น 750 มิลลิลิตร เมื่อละลายหมดทิ้งให้เย็นแล้วถ่ายลงสู่ volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร

1.1.3 Phenol reagent

(1) ละลายฟีนอลสะอาด 80 กรัม ใน ethyl alcohol 300 มิลลิลิตร แล้วเติม Ammonium-free water 600 มิลลิลิตร

(2) ละลาย Di-sodium nitroprusside dehydrate 0.5 กรัม ใน Ammonium-free water 100 มิลลิลิตร

(3) เทสารละลาย (2) ลงในสารละลาย (1) เก็บในขวดสีชา อุณหภูมิ > 8 °c

1.1.4 Citrate solution ($C_6H_5Na_3O_7.2H_2O$)

ละลาย Tri-sodium citrate dehydrate 120 กรัม และ Na-EDTA 10 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 300 มิลลิลิตร เติม 1.0 M NaOH 5 มิลลิลิตร ต้มจนมีปริมาตรน้อยกว่า 250 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตร ด้วย Ammonium-free water

1.1.5 Sodium hydroxide working solution

เนื่องจากการเกิดสีของตัวอย่าง จะดีที่สุดที่ pH 11 ดังนั้นให้ทดลองเติม phenol solution 2 มิลลิลิตร และ citrate solution 1 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วไตเตรตด้วย 1.0 M NaOH จนได้ pH = 11 จดปริมาตร 1.0 M NaOH ที่ใช้ไป มาใช้เป็น factor ในการ dilute

1.1.6 Hypochlorite solution

ละลาย dichloro-s-triazing-2,4,6-(1H,3H,5H)-trione sodium salt (Trione,DTT) 0.5 กรัม ใน sodium hydroxide working solution 100 มิลลิลิตร และเก็บที่อุณหภูมิ > 8 °c

1.1.7 Stock standard ammonia (1 ml = 10.0 μM)

ละลาย ammonia chloride, NH_4Cl (อบ 100 °c นาน 1 ชั่วโมง) 0.0535 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร หยด chloroform 1 หยด เพื่อ preserve เก็บสารละลายในที่เย็นและมืด

1.1.8 Working ammonia standard series

เตรียมชุด ammonia standard เพื่อทำ standard calibration โดยเจือจางสารละลายแอมโมเนียมาตรฐานต่อ จนได้ความเข้มข้น 1, 5, 10, 15, 20 μM ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วิธีการทดลอง

1.2.1 ตวงน้ำตัวอย่างที่กรองแล้วแต่ละตัวอย่าง และชุดสารละลายมาตรฐานแต่ละชุด 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาด 12 มิลลิลิตร

1.2.2 เติมสารละลาย phenol 200 ไมโครลิตร แกว่งเบาๆ

1.2.3 เติมสารละลาย phenol 100 ไมโครลิตร แกว่งเบาๆ

1.2.4 เติมสารละลาย hypochlorite 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที

1.2.5 วัดการดูดกลืนของแสงสารละลายสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร ด้วย Spectrophotometer

2. การวิเคราะห์ไนไตรท์

2.1 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.1.1 Sulphanilamide solution

ละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide) 5 กรัม ลงในสารละลายที่มีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตรเจือจางด้วยน้ำจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

1.1.2 N-(1-napthyl)-ethylenediamine dihydrochloride solution :: NED

ละลายไดไฮโดรคลอริก 0.50 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดแก้วสีชา

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 เติมสารละลาย Sulphanilamide solution 200 ไมโครลิตร ด้วย Autonomic pipette ในแต่ละตัวอย่าง (5 มิลลิลิตรในหลอดทดลองขนาด 12 มิลลิลิตร) ผสมแล้วปล่อยให้สารทำปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่เกิน 8 นาที

2.2.2 เติมสารละลาย N-(1-napthyl)-ethylenediamine dihydrochloride solution หรือ NED 200 ไมโครลิตร แล้วผสมกันอย่างรวดเร็ว ทิ้งไว้ 10 นาทีถึง 2 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร

3. การวิเคราะห์ไนเตรท

3.1 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.1 ammonium buffer solution

ละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride) 10 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดแก้วหรือพลาสติก

3.1.2 Dilute ammonium chloride solution

เจือจางสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(ammonium chloride) 50 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 2000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดแก้วหรือพลาสติก

3.1.3 Sulphanilamide solution

ละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide) 5 กรัม ลงในสารละลายที่มีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตรเจือจางด้วยน้ำจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

3.1.4 N-(1-napthyl)-ethylenediamine dihydrochloride solution

ละลายไดไฮโดรคลอริก 0.50 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดแก้วสีชา

3.2 การเตรียม Cadmium-Cu reduction column

3.2.1 นำผง Cd 50 กรัมที่ล้างด้วย HCl เจือจาง 5% v/v 300 มิลลิลิตรแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 200-300 มิลลิลิตร มากวนกับ 2% w/v $CuSo_4 \cdot 5H_2O$ 500 มิลลิลิตร เติมสารละลายพอท่วมผง Cd กวนจนสีน้ำเงินหายไปแล้วเทสารละลายทิ้ง ทำซ้ำหลายๆ ครั้ง จนได้ผง Cd สีดำ (Cd-Cu amalgam)

3.2.2 นำใยแก้วรองที่ปลายคอลัมน์

3.2.3 เทสารละลายน้ำกลั่นลงในคอลัมน์ ค่อยๆ ตักผง Cd ที่เคลือบ Cu แล้งลงใส่ลงในคอลัมน์ เคาะคอลัมน์เบาๆ เป็นระยะๆ เพื่อให้ผง Cd เรียงตัวได้ดี ความสูงของคอลัมน์ประมาณ 10 เซนติเมตร นำใยแก้วปิดตอนบนของคอลัมน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.4 ผ่านสารละลาย ammonium buffer หลายๆ ครั้ง เพื่อปรับสภาพคอลัมน์ อัตราการไหลของสารละลายประมาณ 100 มิลลิลิตร ในเวลา 8-12 นาที จากนั้น active ด้วยสารละลายไนเตรทมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ เมื่อ activate แล้วต้องใช้ ammonium buffer เท่านั้นในการผ่าน คอลัม

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 เติมสารละลาย ammonium buffer 10 มิลลิลิตร ในน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร มาผสมกันในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำน้ำตัวอย่างใส่ใน Cadmium-Cu reduction column ปล่อยให้สารละลายไหลผ่าน

3.3.2 รองสารละลายที่ผ่านคอลัมภ์ด้วยกระบอกตวง ทิ้งสารละลายที่ไหลผ่านมาช่วงแรก 10 มิลลิลิตร

3.3.3 เก็บสารละลายตัวอย่างที่ไหลผ่านต่อมา 5 มิลลิลิตร

3.3.4 เติมสารละลาย Sulphanilamide 200 ไมโครลิตร ด้วย Autonomic pipette ปล่อยให้สารทำปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่เกิน 8 นาที จากนั้นเติม N-(1-napthyl)-ethylenediamine dihydrochloride solution หรือ NED 200 ไมโครลิตร แล้วผสมกันอย่างรวดเร็ว ทิ้งไว้ 10 นาที ถึง 2 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร

3.3.5 คำนวณความเข้มข้นของไนเตรทจากกราฟมาตรฐานที่ได้

4. การหาค่าออกซิเจนละลาย

4.1 การเตรียมสารเคมี

4.1.1 H_2SO_4 เข้มข้น 95% w/w

4.1.2 สารละลายแมงกานีส (II)

นำ $MnSO_4 .4H_2O$ มาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียดให้ได้น้ำหนัก 48 กรัม แล้วนำมาละลายด้วยน้ำกลั่นใน Volumetric flask แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก

4.1.3 สารละลายอัลคาไลน์ไอโอไดด์

นำ NaOH มาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียดให้ได้น้ำหนักเท่ากับ 50 กรัม หลังจากนั้นนำมาละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลตร ในบีกเกอร์ ในขณะละลายต้องหล่อด้วยน้ำเปล่าเนื่องจากสารดังกล่าวจะคายพลังงานความร้อนออกมามาก หลังละลาย KI 30 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 45 มิลลิลิตร นำสารละลายทั้งสองมาผสมกัน ทิ้งไว้ให้เย็น เก็บสารละลายไว้ในขวดพลาสติก

4.1.4 สารละลายมาตรฐานไธโอซัลเฟต (0.1 M)

ชั่ง $Na_2S_2O_3 .5H_2O$ ด้วยเครื่องชั่งละเอียดให้ได้น้ำหนักเท่ากับ 29 กรัม แล้วจึงนำไปละลายด้วยน้ำกลั่นใน Volumetric flask แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลตร หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปเก็บไว้ในขวดสีชา และไว้ในที่มืดและเย็น เนื่องจากไธโอซัลเฟตเป็น Secondary Standardc และความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงต้องนำไป Standardized ทุกครั้งก่อนใช้งาน ก่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ใช้มักจะนำไปเจือจางก่อน โดยการทดลองนี้นำไปเจือจาง 20 เท่าจากความเข้มข้นเดิม

4.1.5 สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิไอโอเดท

นำ KIO_3 ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °c เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จแล้วให้ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ เมื่อเย็นแล้วนำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียดให้ได้น้ำหนัก 0.0892 กรัม หลังจากนั้นนำมาละลายด้วยน้ำกลั่นใน Volumetric flask แล้วปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.001 M

4.1.6 น้ำแป้ง

นำ Soluble Starch 1 g ผสมกับน้ำกลั่น 100 ml นำไปต้มจนเดือด ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำส่วนที่ใสไปใช้ โดยเก็บไว้ในขวดแก้วหรือพลาสติกก็ได้

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 ทำ Standardized สารละลายไธโอซัลเฟต และหาค่า Reagent blank

1) เติมน้ำกลั่นลงในหลอดทดลองขนาด 12 มิลลิลิตร จนปริ่มปากขวดพอดี เพราะปริมาตรรวมจะเท่ากับ 12 มิลลิลิตรพอดี (ขณะเติมระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ+ก่อนเติมน้ำควรชะด้วยน้ำตัวอย่างภายในขวดก่อน)

2) เติม H_2SO_4 เข้มข้น 200 ไมโครลิตร และสารละลายอัลคาไลน์ไอโอไดด์ 200 ไมโครลิตร ตามลำดับ (การเติมจะจุ่มปลายปิเปตให้จมอยู่ใต้ผิวน้ำเล็กน้อย) ปิดฝาขวด แล้วเขย่าให้เข้ากัน

3) เปิดจุกขวด ใช้ปิเปตเติมสารละลายแมงกานีส (II) 200 ไมโครลิตร (การเติมจะจุ่มปลายปิเปตให้จมอยู่ใต้ผิวน้ำเล็กน้อย) ปิดจุกแล้วเขย่าให้เข้ากัน นำสารละลายในขวดแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเพื่อหาค่า reagent blank และส่วนที่สองทำ Standardization

ส่วนที่ 1

ปิเปตสารละลายมา 12 มิลลิลิตร เติมน้ำแป้ง 3-4 หยด จะทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน จากนั้นให้ไทเทรตด้วยสารละลายไธโอซัลเฟตที่ผ่านการ Standardization แล้ว จนไม่มีสี จดปริมาตรไธโอซัลเฟตที่ใช้ นำค่าปริมาตร

ที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณที่สมมูลย์กับค่าออกซิเจนละลาย แต่ถ้าไม่เกิดสีน้ำเงินเมื่อเติมน้ำแป้ง แสดงว่าไม่มีการปนเปื้อน จึงไม่ต้องนำไปไทเทรต และได้ค่า reagent blank มีค่าเท่ากับศูนย์

ส่วนที่ 2

นำไปทำ Standardization เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไธโอซัลเฟต โดยปิเปตสารละลายมา 12 มิลลิลิตร เติมสารละลายมาตรฐานไอโอเดท 200 ไมโครลิตร สารละลายที่เดิมเคยใสจะเปลี่ยนเป็นเหลือง นำไปไทเทรตกับสารละลายไธโอซัลเฟต (dilute 20 เท่า) ที่ต้องการทราบความเข้มข้น จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งลงไปจะได้สารละลายสีน้ำเงิน แล้วไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี จดปริมาตรไธโอซัลเฟตที่ใช้ แล้วนำไปคำนวณค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไธโอซัลเฟต

4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

4.3.1 เก็บตัวอย่างน้ำ โดยใช้เข็มฉีดยาขนาด 60 มิลลิลิตร ดึงน้ำตัวอย่างผ่านสายยางโดยระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศขณะดึง จากนั้นค่อยๆ ถ่ายน้ำตัวอย่างใส่หลอดทดลองขนาด 12 มิลลิลิตร ให้ปริ่มพอดีปากหลอด ขณะถ่ายน้ำตัวอย่างต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2 ปิเปตสารละลายแมงกานีส (II) 200 ไมโครลิตร และสารละลายอัลคาไลน์ไอโอไดด์ 200 ไมโครลิตร ตามลำดับ โดยให้ปลายปิเปตจมอยู่ใต้ผิวน้ำเล็กน้อยก่อนที่จะปล่อยสาร และระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศขณะเติม หลังจากนั้นจึงปิดจุกและเขย่าอย่างแรง

4.3.3 ปิเปต H_2SO_4 เข้มข้น 200 ไมโครลิตร แหย่ลงไปในขวดลึกจนถึงระดับตะกอนเมื่อพร้อมที่ต้องการวิเคราะห์

4.3.4 ปิดจุก โดยระวังอย่าให้มีฟองอากาศ เขย่าจนตะกอนละลายหมด ของเหลวในขวดจะกลายเป็นสีเหลือง ให้นำไปไทเทรตต่อทันที

4.3.5 นำสารละลายที่ได้มา 12 มิลลิลิตร ใส่ลงใน flask แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนน้ำเปลี่ยนสีกลายเป็นสี

เหลืองอ่อนหรือเหลืองฟาง ให้เติมน้ำแป้งลงไปจะได้สารละลายสีน้ำเงิน แล้วไตเตรตต่อจนกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี โดยค่อยๆ หยดเมื่อใกล้ถึงจุดยุติ

4.3.6 นำปริมาตรของสารละลายไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรทไปคำนวณหาค่าออกซิเจนละลายในน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของออกซิเจนและความเค็มต่อฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน

ตาราง ค-1 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\mu M m^{-2} h^{-1}$) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 10

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.45	0.00	12.95	0.00	31.03	0.00
2	0.67	13.11	6.60	-370.12	43.18	708.46
4	1.10	12.20	8.20	45.45	47.66	127.93
6	1.78	12.57	8.85	12.30	48.27	11.48
8	3.12	18.46	6.91	-26.56	80.45	440.58
10	3.52	4.21	2.69	-45.32	97.36	181.10
12	3.67	1.37	5.36	23.37	83.98	-116.78
14	3.17	-3.70	5.44	0.57	126.91	313.92
16	3.04	-0.77	3.34	-13.10	137.48	66.11
18	3.20	0.85	2.96	-2.10	95.62	-227.04
22	2.91	-1.26	2.34	-2.69	114.26	80.68
26	2.84	-0.24	2.45	0.42	123.60	33.38
30	2.74	-0.30	2.41	-0.12	116.16	-22.45
34	2.57	-0.44	3.38	2.51	126.79	27.55
38	2.57	0.00	2.53	-1.93	143.03	36.61
42	2.43	-0.29	2.41	-0.23	150.69	15.21
46	2.34	-0.16	2.45	0.07	165.86	26.69
50	2.36	0.04	1.75	-1.10	176.94	17.41
54	2.01	-0.49	1.40	-0.49	175.11	-2.58
58	1.81	-0.26	1.56	0.20	186.23	14.15
62	1.69	-0.14	1.56	0.00	198.60	14.25
66	1.37	-0.33	1.07	-0.51	203.13	4.74
72	1.49	0.11	13.80	11.78	203.13	0.00
78	1.20	-0.24	13.12	-0.56	209.96	5.63
84	1.47	0.20	13.19	0.05	204.70	-3.88
90	1.91	0.29	13.59	0.27	184.16	-13.58
96	1.78	-0.08	13.80	0.12	156.18	-16.66
102	1.91	0.07	13.59	-0.11	197.82	22.36
108	1.75	-0.08	13.46	-0.07	181.87	-7.74
114	0.98	-0.34	13.12	-0.15	191.49	4.22
Average		**1.81**		**-12.27**		**58.06**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-2 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\mu Mm^{-2}h^{-1}$) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 10

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.45	0.00	7.57	0.00	15.81	0.00
2	0.45	0.00	9.40	106.82	30.92	881.49
4	0.64	5.46	9.55	4.43	31.26	9.59
6	0.65	0.21	9.48	-1.45	38.09	127.35
8	0.78	1.69	9.75	3.72	38.48	5.36
10	0.78	0.00	9.67	-0.83	57.17	200.29
12	0.81	0.29	9.40	-2.37	46.42	-93.81
14	0.89	0.58	9.51	0.85	67.97	157.58
16	1.08	1.19	11.14	10.19	94.61	166.50
18	1.60	2.80	8.08	-16.62	74.86	-107.15
22	2.28	2.97	9.36	5.54	83.70	38.28
26	2.89	2.17	10.17	2.91	91.87	29.18
30	4.19	3.93	11.34	3.51	72.84	-57.39
34	5.16	2.50	13.01	4.32	105.75	85.27
38	5.90	1.67	14.21	2.72	86.61	-43.18
42	7.67	3.52	17.21	5.95	78.83	-15.44
46	9.79	3.72	19.95	4.82	122.32	76.53
50	12.85	4.81	23.05	4.87	146.27	37.64
54	17.41	6.43	27.15	5.79	134.85	-16.11
58	20.57	4.03	32.41	6.69	113.75	-26.85
62	24.26	4.24	37.19	5.51	125.68	13.73
66	30.17	6.19	45.86	9.08	103.46	-23.25
72	33.55	3.13	49.93	3.77	103.46	0.00
78	36.23	2.21	74.27	20.06	85.77	-14.58
84	37.49	0.93	79.76	4.05	71.22	-10.72
90	37.66	0.11	84.37	3.05	24.93	-30.61
96	37.99	0.20	86.85	1.47	15.92	-5.36
102	38.05	0.03	88.81	1.06	13.18	-1.47
108	38.51	0.22	88.27	-0.26	10.38	-1.36
114	38.44	-0.03	81.46	-2.99	25.31	6.55
Average		**2.17**		**6.55**		**46.27**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-3 ความเข้มข้น (μM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (μMm^{-2}h^{-1}) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 15

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.48	0.00	10.97	0.00	33.10	0.00
2	0.57	5.24	8.17	-163.33	51.29	1061.06
4	0.84	7.70	7.91	-7.47	51.80	14.39
6	1.03	3.56	4.52	-63.25	47.49	-80.38
8	1.39	4.92	5.18	9.12	87.62	549.38
10	1.69	3.13	5.15	-0.40	103.68	172.10
12	1.99	2.65	4.59	-4.89	95.34	-72.80
14	2.73	5.42	4.51	-0.55	141.23	335.62
16	3.25	3.23	4.10	-2.60	155.73	90.60
18	3.21	-0.18	3.41	-3.71	120.81	-189.40
22	2.90	-1.36	3.32	-0.41	149.13	122.60
26	2.88	-0.08	2.99	-1.18	124.72	-87.15
30	2.74	-0.41	2.28	-2.13	113.25	-34.60
34	2.46	-0.73	3.32	2.68	157.91	115.72
38	2.24	-0.51	2.75	-1.27	168.60	24.11
42	1.92	-0.62	3.84	2.15	141.12	-54.52
46	1.87	-0.10	2.00	-3.23	170.45	51.61
50	1.75	-0.18	2.05	0.07	179.07	13.54
54	1.66	-0.13	1.39	-0.93	181.36	3.24
58	1.46	-0.26	0.96	-0.54	171.90	-12.04
62	1.06	-0.47	0.31	-0.76	201.51	34.11
66	1.00	-0.06	0.68	0.39	210.41	9.31
72	1.11	0.10	10.41	9.01	210.41	0.00
78	0.89	-0.19	9.96	-0.37	217.01	5.44
84	0.88	-0.01	9.85	-0.08	215.34	-1.24
90	0.70	-0.12	9.89	0.02	160.82	-36.05
96	0.78	0.05	9.37	-0.31	159.31	-0.90
102	0.60	-0.10	9.07	-0.16	189.59	16.26
108	0.61	0.01	9.89	0.40	223.73	16.56
114	0.51	-0.04	9.70	-0.08	190.49	-14.58
Average		**1.02**		**-7.79**		**68.40**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-4 ความเข้มข้น (μM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\mu M m^{-2} h^{-1}$) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 15

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.45	0.00	10.52	0.00	17.04	0.00
2	0.47	1.31	10.80	16.09	29.47	724.78
4	0.69	6.10	8.73	-59.12	24.93	-129.53
6	0.81	2.31	9.81	20.04	39.48	271.40
8	1.03	3.08	10.09	3.96	49.39	135.62
10	1.28	2.65	7.95	-23.01	71.83	240.46
12	1.64	3.14	9.10	10.07	60.02	-103.10
14	2.53	6.49	8.88	-1.62	81.46	156.76
16	3.37	5.27	10.67	11.20	101.61	125.93
18	4.61	6.70	10.45	-1.21	83.03	-100.77
22	6.24	7.05	12.95	10.83	84.71	7.27
26	7.73	5.34	15.30	8.40	79.11	-19.99
30	10.49	8.33	18.47	9.57	80.57	4.39
34	13.38	7.49	23.37	12.67	75.53	-13.05
38	15.67	5.17	25.61	5.05	57.90	-39.77
42	19.58	7.76	31.84	12.37	67.92	19.88
46	23.25	6.45	36.36	7.95	90.47	39.69
50	26.33	4.84	41.92	8.74	83.42	-11.08
54	27.59	1.78	40.58	-1.90	74.07	-13.19
58	31.59	5.09	42.44	2.38	51.80	-28.35
62	32.03	0.51	55.17	14.67	55.04	3.74
66	30.23	-1.89	54.87	-0.31	35.96	-19.97
72	34.33	3.79	64.17	8.61	35.96	0.00
78	34.38	0.05	66.00	1.51	32.66	-2.72
84	34.11	-0.20	64.32	-1.24	20.18	-9.20
90	33.12	-0.65	63.87	-0.30	11.05	-6.03
96	35.85	1.62	60.47	-2.02	8.25	-1.67
102	30.10	-3.08	58.12	-1.26	9.88	0.87
108	29.11	-0.48	55.02	-1.50	12.90	1.47
114	28.04	-0.47	52.82	-0.97	16.26	1.47
Average		**3.18**		**2.32**		**41.18**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-5 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\mu Mm^{-2}h^{-1}$) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 20

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.47	0.00	6.92	0.00	36.80	0.00
2	0.58	6.55	5.95	-56.55	50.73	812.93
4	0.92	9.63	4.23	-49.22	44.97	-164.71
6	1.27	6.50	3.02	-22.57	62.21	321.50
8	1.82	7.54	2.27	-10.20	99.09	504.94
10	2.21	4.21	2.86	6.30	107.26	87.55
12	2.79	5.00	2.31	-4.79	94.95	-107.49
14	1.92	-6.33	1.65	-4.88	135.64	297.55
16	1.83	-0.56	0.69	-6.00	158.98	145.87
18	1.66	-0.91	0.00	-3.72	119.29	-215.20
22	1.51	-0.68	0.00	0.00	146.72	118.72
26	1.36	-0.52	0.00	0.00	120.53	-93.55
30	1.17	-0.58	0.16	0.47	130.49	30.04
34	1.13	-0.09	-0.02	-0.46	154.11	61.20
38	1.06	-0.18	0.00	0.04	149.97	-9.34
42	0.90	-0.31	0.00	0.00	138.72	-22.32
46	0.85	-0.08	0.00	0.00	175.93	65.50
50	0.82	-0.05	0.00	0.00	179.07	4.93
54	0.71	-0.16	0.00	0.00	181.36	3.24
58	0.71	0.00	0.00	0.00	158.75	-28.77
62	0.46	-0.28	0.00	0.00	165.36	7.61
66	0.52	0.06	0.00	0.00	190.32	26.11
72	0.66	0.14	9.64	8.92	190.32	0.00
78	0.67	0.01	9.15	-0.40	208.40	14.90
84	0.88	0.15	9.31	0.12	195.13	-9.78
90	0.72	-0.10	9.80	0.32	133.85	-40.53
96	0.81	0.05	9.60	-0.12	176.89	25.62
102	0.87	0.03	10.28	0.36	200.06	12.44
108	1.15	0.14	10.67	0.19	207.11	3.42
114	1.01	-0.06	10.51	-0.07	181.08	-11.41
Average		**0.97**		**-4.74**		**61.37**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-6 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm^{-2}h^{-1}) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 20

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.56	0.00	6.31	0.00	16.37	0.00
2	0.49	-3.93	6.43	6.86	31.93	907.61
4	0.69	5.46	5.65	-22.41	32.94	28.78
6	0.70	0.21	4.75	-16.82	30.75	-40.71
8	1.06	4.92	5.18	5.91	37.08	86.58
10	1.28	2.41	4.82	-3.78	64.33	292.03
12	1.64	3.14	5.61	6.85	52.69	-101.63
14	2.71	7.81	5.61	0.00	100.71	351.17
16	3.40	4.35	8.51	18.11	107.99	45.47
18	5.08	9.08	9.38	4.73	93.10	-80.74
22	6.80	7.44	11.19	7.83	85.15	-34.40
26	8.51	6.10	12.77	5.65	82.19	-10.59
30	11.99	10.51	14.32	4.68	81.57	-1.86
34	15.53	9.17	21.56	18.75	64.39	-44.52
38	18.24	6.11	24.57	6.78	94.28	67.41
42	21.42	6.31	28.96	8.72	80.90	-26.54
46	25.42	7.03	34.87	10.41	98.14	30.34
50	28.40	4.68	39.43	7.16	67.47	-48.20
54	30.07	2.37	43.24	5.38	66.52	-1.34
58	33.54	4.41	51.81	10.90	65.12	-1.78
62	34.37	0.96	53.29	1.71	50.73	-16.57
66	35.21	0.88	57.27	4.16	37.81	-13.53
72	35.54	0.31	63.34	5.63	37.81	0.00
78	35.73	0.15	61.73	-1.33	32.15	-4.66
84	35.50	-0.17	60.63	-0.81	18.89	-9.78
90	34.73	-0.51	60.98	0.24	8.20	-7.07
96	33.77	-0.57	56.30	-2.79	60.64	31.22
102	31.91	-1.00	51.74	-2.45	10.61	-26.86
108	29.73	-1.06	48.06	-1.79	9.37	-0.60
114	28.12	-0.70	44.54	-1.54	20.62	4.93
Average		**3.20**		**2.89**		**45.81**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-7 ความเข้มข้น (μM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (μMm^{-2}h^{-1}) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 25

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.56	0.00	4.30	0.00	28.68	0.00
2	2.40	107.49	3.88	-24.31	38.25	558.28
4	1.11	-36.92	1.80	-59.52	31.59	-190.29
6	1.51	7.33	0.48	-24.54	38.65	131.52
8	1.71	2.77	1.21	9.94	90.36	707.99
10	1.72	0.12	1.00	-2.23	104.69	153.51
12	1.74	0.20	0.69	-2.73	78.10	-232.09
14	1.42	-2.38	0.24	-3.30	127.80	363.45
16	1.04	-2.32	0.00	-1.48	142.52	92.00
18	0.90	-0.79	0.00	0.00	100.43	-228.25
22	0.87	-0.15	0.00	0.00	138.04	162.82
26	0.74	-0.44	0.00	0.00	129.20	-31.58
30	0.71	-0.10	0.00	0.00	129.54	1.01
34	0.72	0.03	0.00	0.00	123.88	-14.65
38	0.65	-0.15	0.00	0.00	144.65	46.84
42	0.65	0.00	0.00	0.00	135.92	-17.32
46	0.55	-0.18	0.00	0.00	171.79	63.13
50	0.54	-0.02	0.00	0.00	159.54	-19.26
54	0.53	-0.02	0.00	0.00	157.69	-2.61
58	0.54	0.01	0.00	0.00	121.59	-45.94
62	0.44	-0.12	0.00	0.00	152.37	35.46
66	0.33	-0.12	0.00	0.00	180.58	29.51
72	0.58	0.24	6.79	6.29	180.58	0.00
78	0.60	0.01	7.60	0.66	183.94	2.77
84	0.73	0.10	7.18	-0.31	196.64	9.36
90	0.66	-0.04	6.42	-0.50	149.18	-31.39
96	0.81	0.09	6.91	0.29	127.80	-12.73
102	0.87	0.03	7.33	0.23	159.87	17.22
108	1.10	0.11	7.88	0.26	162.45	1.25
114	0.94	-0.07	6.58	-0.57	155.62	-2.99
Average		**2.49**		**-3.39**		**51.57**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-8 ความเข้มข้น (μM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\mu Mm^{-2}h^{-1}$) ในภาวะมีออกซิเจนที่ความเค็ม 25

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.55	0.00	3.78	0.00	25.44	0.00
2	0.40	-8.52	2.32	-85.07	29.80	254.65
4	0.51	2.89	4.02	48.61	43.46	390.18
6	0.57	1.26	2.25	-33.03	43.46	0.00
8	0.72	2.00	1.97	-3.80	47.10	49.80
10	0.90	1.93	1.21	-8.18	76.76	317.82
12	1.10	1.77	3.26	17.88	68.20	-74.76
14	1.76	4.85	2.49	-5.59	109.84	304.51
16	2.39	3.93	4.33	11.50	115.55	35.68
18	3.20	4.39	4.44	0.56	94.05	-116.56
22	4.45	5.40	5.58	4.96	104.18	43.85
26	5.62	4.17	6.69	3.97	68.31	-128.13
30	7.56	5.86	9.75	9.22	99.20	93.17
34	9.76	5.69	13.88	10.71	77.99	-54.96
38	10.74	2.23	14.99	2.51	90.98	29.29
42	11.59	1.68	16.39	2.76	79.33	-23.10
46	14.80	5.65	20.58	7.39	120.75	72.89
50	17.95	4.95	24.29	5.83	44.52	-119.79
54	21.85	5.50	30.00	8.05	63.22	26.37
58	25.14	4.19	37.29	9.28	83.81	26.21
62	26.85	1.96	39.63	2.69	86.50	3.09
66	29.33	2.59	43.58	4.14	74.52	-12.53
72	30.67	1.25	57.92	13.27	74.52	0.00
78	31.69	0.84	57.79	-0.10	71.89	-2.17
84	31.92	0.17	57.04	-0.55	64.00	-5.82
90	31.19	-0.48	59.83	1.85	31.15	-21.73
96	30.85	-0.20	55.88	-2.36	29.91	-0.73
102	30.44	-0.22	55.13	-0.40	34.56	2.49
108	30.06	-0.19	56.33	0.59	31.43	-1.52
114	28.72	-0.58	52.63	-1.63	43.85	5.45
Average		**2.19**		**0.84**		**36.46**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-9 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($µM.m^{-2}.h^{-1}$) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 30

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.54	0.00	2.62	0.00	34.17	0.00
2	1.44	52.43	6.57	230.38	44.13	581.13
4	2.88	41.09	4.73	-52.53	47.38	92.75
6	2.60	-5.24	4.90	3.17	39.99	-137.79
8	2.33	-3.69	4.29	-8.39	88.57	665.09
10	1.97	-3.85	4.22	-0.73	100.77	130.73
12	1.81	-1.37	5.00	6.84	77.65	-201.80
14	1.21	-4.35	3.44	-11.45	125.28	348.30
16	0.58	-3.93	2.49	-5.96	130.26	31.13
18	0.83	1.34	2.25	-1.29	109.89	-110.48
22	0.73	-0.44	2.14	-0.44	139.28	127.20
26	0.63	-0.36	1.87	-0.97	133.51	-20.59
30	0.61	-0.07	2.69	2.46	102.73	-92.84
34	0.48	-0.32	2.96	0.71	109.22	16.82
38	0.48	0.00	2.79	-0.38	131.44	50.12
42	0.40	-0.16	2.66	-0.27	144.76	26.43
46	0.38	-0.04	2.38	-0.48	158.42	24.03
50	0.40	0.04	2.59	0.32	150.92	-11.79
54	0.40	0.00	2.32	-0.38	117.11	-47.70
58	0.39	-0.01	2.04	-0.35	115.82	-1.64
62	0.31	-0.09	2.14	0.12	110.62	-6.00
66	0.34	0.02	2.32	0.18	167.60	59.61
72	0.57	0.22	12.84	9.74	167.60	0.00
78	0.61	0.03	12.05	-0.65	171.46	3.18
84	0.67	0.05	12.46	0.30	199.16	20.42
90	0.69	0.01	12.50	0.02	120.58	-51.97
96	0.79	0.06	12.39	-0.06	121.37	0.47
102	0.85	0.04	12.70	0.16	176.55	29.63
108	1.06	0.10	13.11	0.20	170.90	-2.74
114	1.01	-0.02	12.84	-0.12	143.47	-12.03
Average		**2.38**		**5.67**		**50.32**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-10 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µM.m^{-2}.h^{-1}) ในภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเค็ม 30

ชั่วโมงที่	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
	Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	0.33	0.00	1.32	0.00	18.33	0.00
2	0.66	19.66	0.30	-59.58	37.86	1139.41
4	0.61	-1.61	2.17	53.50	37.36	-14.39
6	0.69	1.47	0.95	-22.86	39.48	39.67
8	0.88	2.62	1.01	0.93	64.22	338.67
10	1.08	2.17	0.23	-8.39	81.96	190.09
12	1.37	2.55	1.36	9.81	56.05	-226.23
14	2.11	5.42	2.61	9.21	102.39	338.89
16	2.80	4.28	2.48	-0.85	107.21	30.08
18	3.56	4.14	3.53	5.72	80.01	-147.52
22	5.02	6.32	4.86	5.75	101.22	91.83
26	6.27	4.45	6.26	4.99	77.49	-84.75
30	8.01	5.25	9.32	9.24	88.18	32.24
34	9.29	3.30	12.15	7.32	76.03	-31.47
38	10.23	2.14	12.95	1.81	83.64	17.17
42	11.20	1.91	14.92	3.90	94.95	22.43
46	13.75	4.49	19.36	7.83	102.39	13.10
50	16.25	3.93	22.49	4.91	77.21	-39.58
54	19.24	4.22	28.49	8.47	76.20	-1.42
58	22.19	3.76	38.03	12.15	84.37	10.40
62	23.62	1.65	43.93	6.80	72.73	-13.41
66	24.77	1.20	46.44	2.62	70.38	-2.46
72	27.71	2.72	71.59	23.29	70.38	0.00
78	28.87	0.96	72.27	0.56	63.94	-5.30
84	28.64	-0.17	70.17	-1.55	58.57	-3.96
90	28.38	-0.17	85.36	10.04	21.07	-24.80
96	28.87	0.29	70.92	-8.60	24.43	2.00
102	27.87	-0.54	69.83	-0.58	36.24	6.34
108	27.49	-0.18	70.10	0.13	35.73	-0.24
114	26.28	-0.53	65.29	-2.11	46.65	4.79
Average		**2.86**		**2.82**		**56.05**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค-11 ปริมาณออกซิเจนละลาย (mg/l) ในภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน

ชั่วโมงที่	10 psu		15 psu		20 psu		25 psu		30 psu	
	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic	Oxic	Anoxic
0	7.42	1.51	6.60	1.30	6.54	0.95	6.88	1.54	5.07	1.03
2	7.49	1.49	6.55	1.00	6.47	1.18	6.82	1.29	6.95	0.99
4	7.77	1.41	7.57	1.07	6.86	1.28	6.30	1.53	5.96	0.91
6	7.95	1.11	7.35	1.35	6.37	1.07	7.85	0.88	8.43	0.92
8	8.71	1.32	7.06	0.88	7.92	0.93	8.41	0.87	8.77	0.78
10	8.09	1.11	7.85	1.02	8.33	1.01	6.40	0.65	7.01	0.97
12	7.32	1.32	7.19	0.94	6.65	0.94	6.36	1.24	5.48	0.82
14	7.70	1.03	7.50	0.97	7.71	0.83	6.78	0.91	6.29	1.10
16	7.49	1.19	7.21	1.17	5.64	1.14	6.89	0.81	5.33	0.89
18	7.96	2.34	7.12	3.20	7.81	2.35	6.18	2.35	6.56	2.00
22	6.65	1.77	7.32	1.92	6.64	2.27	5.95	2.07	6.58	2.12
26	6.39	2.30	5.78	2.11	6.07	1.98	5.59	2.38	5.90	1.82
30	7.05	2.24	6.34	2.04	6.02	2.30	6.58	2.15	6.12	2.55
34	7.71	1.78	7.86	2.33	7.84	2.35	6.21	2.42	6.71	2.37
38	5.70	2.14	5.99	1.77	6.12	1.83	6.22	1.41	5.73	2.36
42	7.34	1.98	6.40	1.58	7.34	1.55	6.87	1.53	5.98	1.79
46	7.14	2.17	7.90	2.31	7.30	2.37	6.56	1.75	6.95	2.01
50	6.50	1.77	7.54	1.96	7.93	1.82	6.74	1.99	5.82	1.44
54	8.13	2.00	7.43	2.34	8.12	2.24	7.03	2.28	7.03	1.92
58	8.69	2.56	9.37	2.48	8.77	2.22	7.09	2.17	7.20	2.67
62	8.06	2.41	9.14	3.24	10.43	2.79	7.56	2.59	7.56	2.70
66	6.70	2.35	7.29	2.45	7.60	1.71	6.85	2.08	6.34	2.20
72	8.55	2.36	9.53	2.07	8.22	2.56	7.26	1.68	7.64	2.08
78	8.97	2.33	8.88	2.06	7.66	2.46	6.67	1.83	7.04	2.34
84	9.70	3.62	8.23	2.92	8.05	3.33	8.38	3.57	7.46	2.76
90	9.51	2.92	7.86	3.01	8.42	2.72	7.54	2.98	7.83	2.70
96	10.88	2.66	8.31	2.40	9.08	2.29	7.75	2.37	8.23	3.38
102	10.17	2.31	7.27	2.50	7.85	2.33	7.41	2.07	7.15	2.41
108	9.90	3.29	7.93	3.59	8.78	3.15	8.62	3.09	8.38	3.43
114	9.51	2.18	7.72	2.03	7.79	2.04	7.43	1.64	7.00	1.96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนในเบนทิกแชมเบอร์

ตาราง ง-1 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\mu Mm^{-2}h^{-1}$) จากแชมเบอร์แบบทึบแสง

ชั่วโมงที่	DO (mg/l)	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
		Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	5.75	0.78	0.00	2.17	0.00	22.87	0.00
1	6.75	0.76	-13.68	2.32	85.49	24.84	1181.47
2	6.00	0.78	6.84	2.24	-21.37	28.18	1002.88
3	5.00	0.76	-4.56	4.38	427.44	29.05	174.02
4	7.50	0.75	-1.71	3.67	-106.86	30.52	219.81
5	4.13	0.72	-2.74	3.60	-8.55	24.15	-763.84
6	5.00	0.72	0.00	4.45	85.49	21.40	-274.76
7	4.25	0.69	-2.93	4.42	-3.05	32.17	922.41
8	5.00	0.65	-2.57	4.35	-5.34	24.93	-542.65
9	4.25	0.62	-2.28	4.03	-21.37	29.23	286.97
10	1.88	0.61	-0.68	4.03	0.00	32.49	195.08
11	3.63	0.68	3.73	2.99	-56.34	37.48	272.26
12	1.88	0.67	-0.57	3.21	10.69	51.21	686.62
13	2.38	0.64	-1.05	3.63	19.73	61.55	477.42
14	2.25	0.64	0.00	3.28	-15.27	54.58	-298.78
18	5.00	0.61	-1.14	3.46	5.94	64.03	314.88
22	2.00	0.53	-2.18	2.92	-14.57	68.98	134.99
26	1.75	0.53	0.00	2.24	-15.62	42.79	-604.36
30	1.60	0.53	0.00	2.14	-2.14	39.77	-60.45
34	1.75	0.52	-0.20	3.10	16.97	63.97	427.13
38	1.25	0.51	-0.18	3.03	-1.12	67.28	52.25
42	1.63	0.46	-0.65	2.14	-12.72	62.82	-63.72
46	2.38	0.44	-0.30	2.21	0.93	64.69	24.40
50	1.38	0.49	0.68	2.32	1.28	62.85	-22.10
54	1.63	0.51	0.13	2.28	-0.40	65.35	27.82
58	2.38	0.53	0.24	1.89	-4.05	71.60	64.60
62	1.00	0.56	0.33	1.67	-2.07	66.13	-52.91
66	1.13	0.55	-0.10	1.42	-2.27	68.83	24.59
70	1.00	0.55	0.00	1.57	1.22	72.55	31.82
74	1.13	0.56	0.09	1.67	0.87	68.63	-31.73
80	1.25	1.19	4.70	0.68	-7.48	93.04	183.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง-1 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	DO (mg/l)	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
		Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
86	1.00	0.80	-2.70	0.68	0.00	84.89	-56.82
92	0.00	0.60	-1.34	0.61	-0.46	98.01	85.58
98	0.38	0.62	0.14	0.85	1.53	101.29	20.09
104	0.00	0.64	0.13	0.43	-2.47	101.12	-1.00
110	0.00	0.21	-2.36	2.99	13.99	105.15	21.98
116	0.00	0.22	0.06	3.24	1.29	102.56	-13.40
122	0.00	0.23	0.06	1.71	-7.53	96.35	-30.57
168	0.00	0.26	0.08	2.35	2.29	53.36	-153.51
360	0.00	0.27	0.02	2.35	0.00	90.10	61.23
Average			**-0.67**		**9.10**		**98.07**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-2 ความเข้มข้น (µM) และฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจน (µMm^{-2}h^{-1}) จากแชมเบอร์แบบโปร่งแสง

ชั่วโมงที่	DO (mg/l)	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
		Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
0	8.25	0.81	0.00	5.27	0.00	25.85	0.00
1	6.88	0.76	-34.20	5.49	128.23	28.04	1318.85
2	6.75	0.76	0.00	4.99	-149.60	28.64	178.59
3	8.75	0.76	0.00	4.20	-156.73	30.84	439.62
4	8.88	0.73	-3.42	4.38	26.71	29.46	-206.07
5	4.63	0.72	-1.37	4.17	-25.65	25.94	-423.13
6	5.75	0.69	-3.42	3.70	-46.31	26.81	87.01
7	5.88	0.68	-0.98	4.31	51.90	28.27	125.61
8	6.50	0.62	-4.28	4.88	42.74	30.65	178.59
9	5.75	0.61	-0.76	4.35	-35.62	30.97	21.37
10	4.50	0.59	-1.37	4.77	25.65	29.37	-96.17
11	4.25	0.64	3.11	4.13	-34.97	64.58	1920.19
12	3.38	0.64	0.00	3.63	-24.93	65.78	60.43
13	3.75	0.61	-1.58	3.78	6.58	64.98	-37.19
14	3.38	0.59	-0.98	3.88	4.58	67.28	98.66
18	4.38	0.61	0.76	3.63	-8.31	69.96	89.21
22	3.50	0.48	-3.42	3.42	-5.83	74.42	121.65
26	3.50	0.45	-0.79	2.74	-15.62	42.01	-747.84
30	3.25	0.43	-0.46	2.92	3.56	65.87	477.19
34	2.50	0.43	0.00	3.56	11.31	71.68	102.58
38	1.63	0.41	-0.18	3.74	2.81	65.67	-94.96
42	3.63	0.39	-0.33	2.99	-10.69	70.82	73.59
46	3.38	0.38	-0.15	2.78	-2.79	74.73	51.05
50	2.38	0.41	0.41	2.99	2.56	63.91	-129.84
54	1.63	0.27	-1.65	3.06	0.79	68.00	45.40
58	3.38	0.32	0.59	2.42	-6.63	62.30	-58.94
62	2.00	0.34	0.11	2.42	0.00	38.71	-228.27
66	2.00	0.32	-0.10	2.32	-0.97	50.69	108.83
70	1.75	0.38	0.49	2.39	0.61	56.00	45.53
74	2.25	0.35	-0.28	2.10	-2.31	66.19	82.62
80	1.75	1.13	5.90	1.21	-6.68	108.66	318.56
86	1.75	0.65	0.00	1.64	0.00	110.99	0.00
92	1.63	0.56	-34.20	0.43	128.23	116.60	1318.85
98	1.38	0.59	0.00	0.50	-149.60	120.49	178.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-2 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	DO (mg/l)	ไนไตรท์		ไนเตรท		แอมโมเนีย	
		Conc.	flux	Conc.	flux	Conc.	flux
104	2.25	0.65	-3.34	0.57	2.98	124.40	16.26
110	1.38	0.21	-0.59	2.49	-7.90	82.65	36.60
116	2.00	0.29	0.14	3.21	0.44	84.98	23.79
122	1.88	0.28	0.39	1.85	0.41	76.86	22.58
168	1.50	0.21	-2.43	3.63	10.49	73.44	-227.76
360	0.00	0.32	0.41	3.46	3.68	104.60	12.06
Average			**-1.35**		**-5.40**		**95.15**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนัทชาพัฒน์ ฐาศิริทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดจันทบุรี

สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต แขนงวิชาชีววิทยาทางทะเลและการประมง ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต แขนงวิชาสมุทรศาสตร์เคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University