

## บทบาทของกระบวนการทางชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในบ่อดิน สำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ

### Role of Biological Processes on Nitrogen Compounds Conversion in Earthen Aquaculture Pond

มะลิวัลย์ คุตะโค<sup>1</sup> และ สรวิศ เผ่าทองสุข<sup>2,3</sup>

#### บทคัดย่อ

บ่อดินถือเป็นรูปแบบหลักของบ่อที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำในปัจจุบัน โดยมุมมองในเชิงนิเวศบ่อดินจะประกอบด้วยระบบนิเวศแบบซับซ้อนที่อุดมไปด้วยสารอาหารและของเสียไนโตรเจน ไนโตรเจนจะเป็นสารอาหารที่สำคัญของสัตว์น้ำที่ได้รับจากอาหารที่สัตว์น้ำบริโภคและยังมีบทบาทหลักในกระบวนการชีวธรณีเคมีในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งกระบวนการสำคัญคือ กระบวนการตรึงไนโตรเจน ไนโตรเจนแอสซิมิเลชัน แอมโมเนียเฟอซิเคชัน ไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน และแอนแอโรบิกแอมโมเนียออกซิเดชันหรือแอนแอมมอกซ์ การหมุนเวียนไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนจากรูปที่มีพิษต่อสัตว์น้ำคือแอมโมเนียและไนไตรต์ไปเป็นรูปที่ไม่มีพิษและถูกกำจัดออกจากบ่อในรูปของก๊าซไนโตรเจน การสะสมสารประกอบไนโตรเจนสามารถพบได้ทั้งบริเวณดินก้นบ่อและมวลน้ำ โดยที่สารอาหารในดินตะกอนก้นบ่อจะช่วยเร่งการทำงานของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรไนโตรเจน ดังนั้นบทความนี้จึงได้อธิบายถึงกระบวนการทางชีวภาพที่มีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งความเข้าใจเกี่ยวกับแบคทีเรียที่มีเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำนี้ ถือได้ว่ามีบทบาทสำคัญสำหรับเพิ่มผลผลิตของสัตว์น้ำพร้อมทั้งช่วยลดผลกระทบของกิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต่อสภาวะแวดล้อมได้อีกด้วย

คำสำคัญ : การเลี้ยงสัตว์น้ำ, บ่อดิน, กระบวนการชีวธรณีเคมี, สารประกอบไนโตรเจน, กระบวนการทางชีวภาพ

#### Abstract

Earthen pond is the major type of aquaculture system. Under ecological point of view, earthen pond is a complex ecosystem enriched with nutrients and wastes. Nitrogen is among the most important nutrient for aquatic animals hence sufficient nitrogen must be supplied in feed. In aquaculture pond, nitrogen compounds involve with major role in biogeochemical process. The important processes are nitrogen fixation, nitrogen assimilation, ammonification, nitrification, denitrification and anaerobic ammonia oxidation (anammox). Nitrogen mitigation in aquaculture systems depends on nitrogen compound conversion from toxic forms especially ammonia and nitrite to non-toxic forms and further nitrogen removal in gas phase. Success of aquaculture hence relied on nitrogen waste treatment. Accumulation of nitrogenous compounds can be found in pond bottom soil and also in water column. With pond bottom soil, nutrients in soil layer can accelerate microbial activities involved with nitrogen cycle. This review illustrates the role of biological processes on nitrogen transformation in aquaculture pond. Understanding

<sup>1</sup> คณะเทคโนโลยีทางทะเล, มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี, จันทบุรี 22170

<sup>2</sup> ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปทุมธานี 12120

<sup>3</sup> ศูนย์เชี่ยวชาญด้านเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ 10330

in microbial nitrogen compounds conversion in aquaculture pond is a key role for increase aquatic animal production together with environment protection.

**Keywords:** Aquaculture, earthen pond, biogeochemistry process, nitrogen compounds, biological process

## บทนำ

บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่พบเห็นได้ทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ (1) บ่อดิน (earthen pond) เป็นรูปแบบบ่อที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง พบเห็นได้ทั่วไป (2) บ่อไร้อินกลางแจ้ง (outdoor lining pond) ที่พบบ่อยมากคือ บ่อที่สร้างจากซีเมนต์หรือบ่อดินที่มีการปูทับด้วยวัสดุสังเคราะห์ เช่น ฝ้าพลาสติกพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ปกคลุมพื้นที่ทั่วทั้งบ่อ ดังนั้นบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งรูปแบบบ่อดินและบ่อไร้อินกลางแจ้งจัดเป็นสภาวะที่ได้รับแสงแดดโดยตรง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในรอบวันตามธรรมชาติและได้รับน้ำฝนตามฤดูกาล และ (3) บ่อไร้อินในโรงเรือน (indoor pond) เป็นบ่อที่ไม่มีพื้นดินและอยู่ในสถานที่ที่ได้รับแสงแดดในปริมาณน้อยและสามารถป้องกันน้ำฝนได้ บ่อในโรงเรือนจึงมีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมที่น้อยกว่าบ่อที่อยู่กลางแจ้ง อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อทุกรูปแบบมีของเสียที่เป็นปัญหาสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำก็คือของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมโมเนียและไนไตรต์ซึ่งเกิดขึ้นจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและการย่อยสลายสารอินทรีย์ในบ่อโดยการทำงานของจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาในมุมมองของวัฏจักรไนโตรเจน (nitrogen cycle) การหมุนเวียนของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั้ง 3 รูปแบบ มีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยบ่อดินมีแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดินตะกอนก้นบ่อทำหน้าที่หลักในการบำบัดของเสียไนโตรเจน นอกจากนี้แพลงก์ตอนพืชที่เติบโตอยู่ในมวลน้ำก็มีบทบาทด้วยในบางส่วน (Kutako *et al.*, 2005; Jangrassa *et al.*, 2007) ส่วนบ่อไร้อินกลางแจ้งซึ่งเป็นบ่อพื้นซีเมนต์หรือพื้นดินที่ปูทับด้วยพลาสติก กระบวนการทางชีวภาพที่ผิวดินจะถูกจำกัดลงไปเกือบทั้งหมดทำให้การเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนจะเกิดขึ้นในน้ำเป็นส่วนใหญ่โดยเป็นบทบาทของแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์และตะกอนลอยแขวนลอยของจุลินทรีย์หรือไบโอฟลอค (biofloc) และเมื่อทำการเลี้ยงไปไประยะหนึ่งจึงจะพบการสะสมของตะกอนขึ้นภายในบ่อ (Vanitchanai *et al.*, 2009) ส่วนบ่อไร้อินในโรงเรือนจัดเป็นสภาวะของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการควบคุมได้มากที่สุด กระบวนการบำบัดของเสียไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอาศัยการทำงานของแบคทีเรียที่เติบโตและยึดเกาะอยู่บนวัสดุตัวกรองหรือเรียกว่าตัวกรองชีวภาพ (biofilter) (Menasveta *et al.*, 2001; Kutako *et al.*, 2007a; Sesuk *et al.*, 2009)

ในปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อดินยังคงเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สอดคล้องกับวิถีชีวิตของเกษตรกรโดยทั่วไป บ่อดินสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการเลี้ยงได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงแบบธรรมชาติที่ระดับความหนาแน่นต่ำ การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนาที่มีการให้อาหารเสริม จนถึงการเลี้ยงแบบพัฒนาที่มีการให้อาหารสำเร็จรูปและมีเครื่องกลในการหมุนเวียนน้ำและเพิ่มออกซิเจน บทความนี้เป็นบทประมวลองค์ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารประกอบไนโตรเจน ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับควบคุมและจัดการของเสียไนโตรเจนในบ่อดินที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ

### 1. ลักษณะและกระบวนการที่ใช้ในการควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบบ่อดิน

บ่อดินประกอบด้วยชั้นของมวลน้ำซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน และชั้นดินก้นบ่อที่ผิวดินสามารถที่สัมผัสกับออกซิเจนและดินที่ลึกลงไปเป็นบริเวณที่ไม่สัมผัสกับออกซิเจน มีการหมุนเวียนสารประกอบชนิดต่างๆ ระหว่างชั้นมวลน้ำและดินก้นบ่อ อีกทั้งปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ แสง และปริมาณน้ำฝนมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ซึ่งเกษตรกรนิยมเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนและปริมาณแพลงก์ตอนพืช ข้อได้เปรียบของบ่อดินคือ ใช้ต้นทุนในการเลี้ยงสัตว์น้ำต่ำเพราะใช้กระบวนการตามธรรมชาติควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจน โดยจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นทั้งในมวลน้ำและดินตะกอน แต่ส่วนใหญ่แล้วปฏิบัติการบำบัดของเสียไนโตรเจนมักเกิดที่ดินตะกอน ส่วนข้อจำกัดของบ่อดิน คือ มีความสามารถรองรับของเสียไนโตรเจนต่ำกว่าบ่อรูปแบบอื่นจึงต้องเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังมีความเสี่ยงในการติดโรคสูงและยากต่อการควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อโรค

กระบวนการที่ใช้เร่งการทำงานของแบคทีเรียเพื่อควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนในบ่อดินจะการใช้เครื่องตีน้ำให้มีการผสมของมวลน้ำอย่างทั่วถึงและรักษาปริมาณออกซิเจนในน้ำให้เพียงพอต่อการหายใจของสัตว์น้ำและจุลินทรีย์เพื่อเร่งกระบวนการออกซิเดชันสารอินทรีย์และของเสียอนินทรีย์ไนโตรเจน (Burford and Langmore, 2001; Jangrass *et al.*, 2007) และยังใช้วิธีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน เช่น กากน้ำตาล (molasses) หรือแป้งมันเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างเซลล์แบคทีเรีย (assimilation) ส่งผลให้กิจกรรมการทำงานของแบคทีเรียสูงขึ้นด้วย (Avnimelech and Ritvo, 2003; Boyd *et al.*, 2002)

## 2. บทบาทของไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบบ่อดิน

ส่วนใหญ่ บ่อดินจะมีความลึกประมาณ 1 ถึง 2 ม. และบ่อมักมีขนาดใหญ่ ในประเทศไทยมักพบบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบบ่อดินที่มีขนาดหลากหลาย ตั้งแต่บ่อขนาดเล็กกว่า 1 ไร่ จนถึงบ่อขนาดใหญ่กว่า 100 ไร่ เช่น ในวังกุ้งหรือบ่อเลี้ยงกุ้งแบบธรรมชาติบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย ส่วนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลที่เป็นบ่อเลี้ยงแบบหนาแน่นมักมีขนาดระหว่าง 2-6 ไร่ (ประจวบ, 2543) จุดเด่นของบ่อดิน คือ ใช้ต้นทุนในการดำเนินการเลี้ยงสัตว์น้ำต่ำ เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นต่ำกว่า 1 กก./ลบ.ม หรือคิดเป็นผลผลิตต่ำกว่า 1,600 กก./ไร่ ในบ่อที่มีความลึก 1 ม. ทำให้กระบวนการทางธรรมชาติภายในบ่อยังสามารถรองรับของเสียที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อมีการเติมอากาศโดยเครื่องมือกล เช่น เครื่องตีน้ำแบบใบพัดหรือหัวพ่นอากาศก็จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับของเสียในบ่อขึ้นได้ ทั้งนี้ปฏิบัติการทางชีวภาพที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของมวลสารภายในบ่อ ได้แก่ กระบวนการรีดักชัน (reduction) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) อีกทั้งบ่อดินยังเป็นระบบนิเวศที่มีความซับซ้อน (complex ecological system) เพราะประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตหลากหลายชนิดไม่เพียงแต่มีเฉพาะสัตว์น้ำที่เลี้ยงเท่านั้น แต่ภายในบ่อยังมีแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ฟังไจและแบคทีเรีย รวมทั้งสัตว์หน้าดินและสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ ที่อาจปะปนเข้ามาในระหว่างการเลี้ยง

สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_3$  และ  $\text{NH}_4^+$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) เป็นของเสียที่มีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ แม้ว่าในน้ำจะมีความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนต่ำกว่าระดับที่เป็นพิษเฉียบพลันแต่อาจจะทำให้สัตว์น้ำอ่อนแอ ติดโรคง่ายและอาจตายในที่สุด ดังนั้นแนวทางปฏิบัติของการเลี้ยงสัตว์น้ำจึงต้องควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนเตรตให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.2 ถึง 2 และต่ำกว่า 0.3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในส่วนของไนเตรตแม้ว่าจะมีความเป็นพิษต่ำกว่าแอมโมเนียและไนเตรต แต่ก็ควรทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำหากพบความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล. (Boyd, 1990; Timmons *et al.*, 2002)

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนเกิดจากการทำงานของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย (heterotrophic bacteria) ที่ย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งส่วนใหญ่ คือ โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในอาหารของสัตว์น้ำให้เปลี่ยนเป็นแอมโมเนียซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจน จากการศึกษาสมดุลไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าไนโตรเจนที่มีอยู่ในอาหารที่สัตว์น้ำกินเข้าไปมีเพียง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่ไปสะสมในตัวของสัตว์น้ำ ในขณะที่ไนโตรเจนส่วนใหญ่ (70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์) จะถูกขับถ่ายออกมาสะสมอยู่ในน้ำและดินภายในบ่อ (Hargreaves, 1998) จึงยังคงพบของเสียไนโตรเจนหลงเหลืออยู่ในบ่อในปริมาณมากถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระหว่างการเลี้ยงก็ตาม ด้วยเหตุนี้หลังจากจบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในแต่ละรุ่นเกษตรกรจึงนิยมสูบน้ำมาฉีดล้างดินตะกอนหรือเลนออกจากบ่อเพื่อกำจัดของเสียไนโตรเจนและเชื้อโรคที่สะสมอยู่ ซึ่งการจัดการน้ำและดินตะกอนนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และเพื่อเป็นการสนองต่อข้อกำหนดของ

กรมประมงที่ให้แต่ละฟาร์มต้องทำตามแนวทางปฏิบัติที่ดีในการจัดการฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำ (Good Aquaculture Practice หรือ GAP) (กรมประมง, 2552) ตะกอนเลนที่ถูกนำออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรนำมาพักไว้ในบ่อเก็บที่อยู่ภายในฟาร์มเพื่อรอให้กระบวนการบำบัดตามธรรมชาติเกิดขึ้น เมื่อน้ำมีปริมาณแอมโมเนียไม่เกิน 1.1 มก.ไนโตรเจน/ล. และไนโตรเจนทั้งหมดไม่เกิน 4 มก.ไนโตรเจน/ล. (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2543) จึงสามารถนำน้ำกลับมาใช้ได้อีกครั้งหรือสามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

### 3. กระบวนการทางชีวภาพที่มีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อดิน

ไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีบทบาทสำคัญโดยเป็นทั้งสารอาหารของแพลงก์ตอนพืชและเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ซึ่งกระบวนการทางชีวภาพที่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของไนโตรเจนในบ่อดินมีดังนี้

(1) การตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation) เป็นการรีดิวซ์หรือลดรูปก๊าซไนโตรเจนจากบรรยากาศให้เป็นแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรต ตามลำดับ โดยการทำงานของเอนไซม์ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ที่อยู่ในไซโทพลาสซึม (heterocyst) ของไซยาโนแบคทีเรีย เช่น *Anabaena*, *Gloeothece* และ *Oscillatoria* ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Moriarty, 1997) หรืออาจเกิดจากการทำงานของแบคทีเรีย เช่น *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Clostridium* และ *Klebsiella* ทั้งนี้การตรึงไนโตรเจนจึงเป็นการนำไนโตรเจนเข้าสู่ระบบนิเวศน์ และแหล่งน้ำธรรมชาติอาจมีการตรึงไนโตรเจนในปริมาณสูงถึง 82 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกนำเข้าสู่แหล่งน้ำ (Howarth *et al.*, 1988) แต่ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอาจพบเพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบว่ามีอัตราการตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation rate) เพียง 0.72-24 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่วนในบริเวณที่มีสารอินทรีย์สะสมสูง เช่น ป่าพุ่มน้ำเค็มจะมีอัตราการตรึงไนโตรเจนสูงถึง 300 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน นอกจากนี้มีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการตรึงไนโตรเจน เช่น ความเค็ม อุณหภูมิ ปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรตและฟอสเฟต สัดส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ความเข้มแสง ปริมาณเซลล์แบคทีเรียและไซโทพลาสซึมของไซยาโนแบคทีเรีย (Hargreaves, 1998)

(2) การนำสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์เพื่อสร้างมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชหรือไนโตรเจนแอสซิมิลเลชัน (nitrogen assimilation) โดยแพลงก์ตอนพืชสามารถนำสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนทั้งในรูปของแอมโมเนียและไนเตรตเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในการเติบโต จึงถือได้ว่าเป็นกระบวนการบำบัดไนโตรเจนขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นในน้ำ ในกรณีที่มีแอมโมเนียมีปริมาณน้อยกว่า 0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. แพลงก์ตอนพืชสามารถใช้ไนเตรตทดแทนได้ (Turker and van der Ploeg, 1993) และผลจากการศึกษาของ Jangrassa *et al.* (2007) ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชในบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีไนโตรเจนทั้งในรูปของแอมโมเนียและไนเตรต แพลงก์ตอนพืชจะใช้เฉพาะแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนส่งผลให้มีไนเตรตสะสมในน้ำ ส่งผลให้แอมโมเนียในน้ำมีค่าต่ำเพราะถูกแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้ตลอดเวลา แต่จะพบปริมาณของไนเตรตจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เพราะไม่ถูกนำไปใช้ อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายประการที่มีผลกระทบต่อการนำสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนดังกล่าวเข้าสู่เซลล์ เช่น ชนิดและความหนาแน่นเซลล์ของแพลงก์ตอนพืช อุณหภูมิ ความเข้มแสง ค่าอัลคาไลน์ดีและความเข้มข้นของสารอาหาร (Hargreaves, 2006)

อัตราการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ (nitrogen uptake rate) มีการตรวจวัดได้หลายวิธี เช่น วัดอัตราการตรึงคาร์บอน (carbon fixation rate) แล้วคำนวณอัตราการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ได้จากสัดส่วนของคาร์บอน:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$  ดังนั้นสัดส่วนของคาร์บอน:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสในแพลงก์ตอนพืชจะเท่ากับ 106:16:1 (Stumm and Morgan, 1996) จากรายงานของ Tucker (1996) และ Brune *et al.* (2003) พบว่าบ่อไร้ดินกลางแจ้งมีอัตราการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์สูงกว่าบ่อดินมากถึง 10 เท่า สาเหตุเพราะว่าบ่อไร้ดินกลางแจ้งมักมีสารอาหารพวกคาร์บอนและไนโตรเจนหมุนเวียนอยู่ในปริมาณสูง แต่มักจะเกิดมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชสูงเกินไปจนก่อให้เกิดปัญหาออกซิเจนลดลงอย่างรวดเร็วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลากลางคืน และในที่สุดจะพบปัญหาแอมโมเนียและไนโตรัสสะสมในปริมาณสูง โดยเฉพาะหลังจากเกิดการบลูมของแพลงก์ตอนพืช

(3) การเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนในรูปของแอมโมเนียหรือกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) ซึ่งในระหว่างการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีปริมาณของเสียอินทรีย์สะสมที่ดินก้นบ่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้องการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์สูงขึ้นและทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงจึงเกิดการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Steeby *et al.*, 2004)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนโดยเฉพาะในรูปของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในอาหารของสัตว์น้ำที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวของชั้นดินตะกอนที่สัมผัสกับออกซิเจน เริ่มต้นจากเอนไซม์ไฮโดรไลติกแบคทีเรียและเชื้อราปลดปล่อยเอนไซม์ protease และ peptides ย่อยโปรตีน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบพอลิเปปไทด์ (polypeptide) ซึ่งจะถูกย่อยอีกครั้งด้วยเอนไซม์ protease ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอะมิโน (amino acid) เอไมด์ (amide) หรือแอมโมเนีย และในระหว่างการย่อยสลายโปรตีนยังเกิดกรดอินทรีย์ (organic acid) แอลกอฮอล์ (alcohol) อัลดีไฮด์ (aldehyde) และสารประกอบชนิดอื่น โดยได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เนื่องจากดินตะกอนมีอัตราการใช้ออกซิเจนสูงจึงทำให้ชั้นดินตะกอนที่ลึกลงไปมีสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งในสภาวะนี้มีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เช่นกัน แต่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเป็นกรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ และมีเทน (methane; CH<sub>4</sub>) และแบคทีเรียยังสามารถใช้สารอนินทรีย์ เช่น ซัลเฟต ไนเตรต ไนไตรต์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวรีดิวซ์อินทรีย์ จึงก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide; H<sub>2</sub>S) ไนไตรต์ แอมโมเนียและมีเทน ตามลำดับ (Boyd, 1995) และจากการทำงานของแบคทีเรียในสภาวะไร้ออกซิเจนนี้มักทำให้ดินตะกอนมีสีดำและมีกลิ่นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเฉพาะในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มเพราะมีปริมาณซัลเฟตสูงกว่าน้ำจืด (Avnimelech and Ritvo, 2003) ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีค่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนให้เป็นแอมโมเนีย (ammonification rate) ในช่วงกว้างตั้งแต่ 0.001–59 มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม/วัน (Kroom, 1991; Gross *et al.*, 2000)

(4) กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) ถือเป็นกระบวนการออกซิเดชันที่เกิดจากการทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม โดยขั้นตอนแรกจะเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (ammonia oxidation) จากการดำเนินงานของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (ammonia oxidizing bacteria, AOB) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่อยู่ในกลุ่ม Betaproteobacteria คือ *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus* และ *Nitrosospira* รวมทั้ง *Nitrosococcus* ที่อยู่ในกลุ่ม Gammaproteobacteria สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไฮดรอกซิลามีน (hydroxylamine, NH<sub>2</sub>OH) ด้วยเอนไซม์ hydroxylamine oxidoreductase และถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรต์ด้วยเอนไซม์ ammonia monooxygenase ลำดับต่อมาจะเกิดกระบวนการไนไตรต์ออกซิเดชัน (nitrite oxidation) โดยการทำงานของไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (nitrite oxidizing bacteria, NOB) ซึ่งมีอยู่ 4 กลุ่ม คือ กลุ่ม Alphaproteobacteria, Deltaproteobacteria, Gammaproteobacteria และ Nitrospirae ได้แก่ *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus* และ *Nitrospira* ตามลำดับ ที่สามารถเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรตได้ด้วยเอนไซม์ nitrite oxidoreductase (McCarty, 1999) ซึ่งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนและไนตริไฟอิงแบคทีเรียทุกชนิดที่กล่าวในข้างต้นจัดเป็นออโตโทรฟิกไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (autotrophic nitrifying bacteria) เพราะใช้สารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจน เช่น แอมโมเนียและไนไตรต์เป็นแหล่งอิเล็กตรอนสำหรับตรึงคาร์บอนทั้งในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไบคาร์บอเนต (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) เข้าสู่เซลล์ นอกจากนี้ยังมีเฮเทอโรโทรฟิกไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (heterotrophic nitrifying bacteria) เช่น *Pseudomonas putida*, *Thiosphaera panto-tropha* และ *Alcaligenes faecalis* สามารถดำรงชีวิตโดยการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน เช่น อะซิเตตหรือแอมโมเนียที่อยู่ในดินตะกอนให้กลายเป็นไนเตรตได้ โดยมีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน แต่เฮเทอโรโทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิดไนโตรไฟอิงแบคทีเรียเหล่านี้ไม่ได้มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่จะมีบทบาทสำคัญในป่าที่ดินมีสภาพเป็นกรด (Hagopian and Riley, 1998)

ไนโตรไฟอิงแบคทีเรียมักยึดเกาะบนอนุภาคของดิน ตะกอนแขวนลอย เปลือกหอยและก้อนหินซึ่งพบแพร่กระจายทั้งในมวลน้ำและในดินตะกอนที่สามารถสัมผัสกับออกซิเจน แต่มีความหนาแน่นเซลล์สูงในชั้นดินตะกอนเนื่องจากในบริเวณนี้มีปริมาณแอมโมเนียสูงและมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอส่งผลให้ไนโตรไฟอิงแบคทีเรียทำงานได้ดี ในดินตะกอนที่ลึกลงไปมีปริมาณออกซิเจนลดต่ำลงหรืออาจจะไม่มีออกซิเจนเลย รวมทั้งมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูงทำให้สัดส่วนของคาร์บอน:ไนโตรเจนสูงซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมต่อการเติบโตของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย ส่งผลให้ไนโตรไฟอิงแบคทีเรียที่มีอัตราการเติบโตช้าไม่สามารถเติบโตได้ทัน แต่ก็ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในไนโตรไฟเคชัน เช่น ปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต อัลคาไลน์ตี ออกซิเจน ความเค็ม อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่างและความหนาแน่นของไนโตรไฟอิงแบคทีเรียที่ยึดเกาะในดินตะกอน (Hargreaves, 1998; Kutako *et al.*, 2007a,b)

โดยทั่วไปแล้ว เกษตรกรต้องจัดการของเสียที่เกิดขึ้นหลังจากเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละรุ่น โดยสูบน้ำและฉีดเลนหรือดินตะกอนออกจากบ่อเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่สะสมปกคลุมดินก้นบ่อ และยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพดี คือ การตากดินตะกอนให้สัมผัสกับแสงแดดและอากาศทำให้ความชื้นของดินตะกอนลดลง และเกิดการแตกของดินตะกอนซึ่งจะทำให้ให้ออกซิเจนสามารถแพร่กระจายได้อย่างทั่วถึงเพื่อเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการทำงานของแอนแอโรบิกแบคทีเรีย จากนั้นสีของดินจะเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีน้ำตาล (Hargreaves, 1998; Avnimelech and Ritvo, 2003) แต่ทว่าจากการศึกษาของ Kutako *et al.* (2009a,b) พบว่าการตากดินตะกอนเป็นเวลาเพียง 1 สัปดาห์ จะไม่พบทั้งแบคทีเรียก่อโรคและรวมถึงไนโตรไฟอิงแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วย ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าการตากดินตะกอนทำให้ระบบนิเวศของบ่อสูญเสียไปโดยมีการทำลายแบคทีเรียทั้งกลุ่มที่มีประโยชน์และมีโทษ

(5) กระบวนการดีไนโตรฟิเคชัน (denitrification) เป็นการรีดิวซ์สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งในรูปของไนเตรตและไนไตรต์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) โดยผ่านไนตริกออกไซด์ ( $NO$ ) และไนตรัสออกไซด์ ( $N_2O$ ) ตามลำดับ โดยการทำงานของเอนไซม์ 4 ชนิด คือ nitrate reductase, nitrite reductase, nitric oxide reductase และ nitrous oxide reductase ตามลำดับ จึงถือได้ว่าดีไนโตรฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดไนโตรเจนออกจากระบบนิเวศได้ ซึ่งไม่เหมือนกับกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันและไนโตรฟิเคชันที่เป็นเพียงการเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบไนโตรเจนเท่านั้น รวมทั้งดีไนโตรฟิเคชันแบคทีเรีย (denitrifying bacteria) ยังมีความหลากหลายทางชีวภาพสูงกว่าไนโตรฟิเคชันแบคทีเรียเพราะมีแพร่กระจายอยู่ในธรรมชาติมากกว่า ตัวอย่างของดีไนโตรฟิเคชันแบคทีเรียได้แก่ *Pseudomonas stutzeri*, *Thioalcalovibrio denitrificans*, *Paracoccus denitrificans*, *Bacillus* sp. และ *Alcaligenes* sp. (Diep *et al.*, 2009; Kutako *et al.*, 2009a,b; Kutako *et al.*, 2007b) แบคทีเรียกลุ่มนี้ดำรงชีวิตในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นที่ใช้สารประกอบอินทรีย์ เช่น กลูโคส อะซิเตต กากน้ำตาลและเมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน แต่ในสิ่งแวดล้อมยังมีดีไนโตรฟิเคชันแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนเรียกว่าแอโรบิกดีไนโตรฟิเคชันแบคทีเรีย (aerobic denitrifying bacteria) ที่สามารถใช้ออกซิเจนอิสระและไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน รวมทั้งใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนจึงสามารถเกิดควบคู่กับปฏิกิริยาไนโตรฟิเคชันได้ นอกจากนี้ยังมีกลุ่มออโตโทรฟิกดีไนโตรฟิเคชันแบคทีเรีย (autotrophic denitrifying bacteria) เช่น *Sulfurimonas denitrificans* ซึ่งใช้สารประกอบอินทรีย์ได้ แต่มักจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟอร์ออกซิเดชัน (sulfur oxidation) ควบคู่ด้วย โดยมีซัลเฟอร์และไบคาร์บอเนตเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอนตามลำดับ ปฏิกิริยานี้มีข้อดี คือ สามารถป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (sulfate reduction) ได้ (Byun *et al.*, 2008)

ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบว่าในดินตะกอนมีชั้นที่สามารถสัมผัสกับออกซิเจนบางมากซึ่งอาจมีความหนาเพียง 0.3 ซม. ดังนั้นแอนแอโรบิกดีไนโตรฟิเคชันแบคทีเรีย (anaerobic denitrifying bacteria) จึงมีบทบาทเด่นในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดไนเตรต ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (denitrification rate) ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณออกซิเจน คาร์บอนและไนเตรต อุณหภูมิและความหนาแน่นเซลล์ของดีไนตริฟิอิงแบคทีเรีย และรวมถึงปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนและไนเตรตที่ถือเป็นปัจจัยหลักในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน แต่ในบ่อดินมักพบว่าไนเตรตที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันมีปริมาณน้อยกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันต่ำด้วย (Tucker and van der Ploeg, 1993)

(6) กระบวนการแอนแอโรบิกแอมโมเนียออกซิเดชันหรือแอนแอมมอกซ์ (anaerobic ammonia oxidation หรือ anammox) กระบวนการนี้เกิดจากการทำงานของไฮโดรฟิติกแบคทีเรียในกลุ่ม Planctomycetales ซึ่งมี anammoxosome ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนให้เป็นก๊าซไนโตรเจนผ่านสารตัวกลาง คือ ไฮดรอกซีลามีนและไฮดราซีน (hydrazine,  $N_2H_4$ ) โดยใช้ไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แบคทีเรียกลุ่มนี้จะแพร่กระจายอยู่ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม ดินตะกอนและมวลน้ำที่มีสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น กระบวนการนี้จึงมีความคล้ายคลึงกับดีไนตริฟิเคชันเพราะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซไนโตรเจนและสามารถกำจัดออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ แต่ดีไนตริฟิเคชันยังคงเป็นกระบวนการหลักที่กำจัดไนโตรเจนเพราะสามารถผลิตก๊าซไนโตรเจนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กระบวนการแอนแอมมอกซ์ผลิตได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากการเกิดแอนแอมมอกซ์ต้องมีปริมาณแอมโมเนีย 1 โมล และไนโตรเจน 1 โมล จึงจะเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ รวมทั้งแบคทีเรียในกลุ่มนี้มีการเติบโตช้าโดยใช้เวลาสำหรับแบ่งเซลล์ให้มีจำนวนเพิ่มเป็น 2 เท่า ประมาณ 9-10 วัน (Dalsgaard *et al.*, 2005)

#### 4. การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบบ่อดิน

ถึงแม้ว่าระบบบ่อดินจะมีแหล่งไนโตรเจนที่เข้าสู่บ่อและมีกระบวนการทางชีวภาพที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนที่หลากหลาย แต่แหล่งของไนโตรเจนที่สำคัญที่เข้าสู่บ่อจะเป็นอาหารที่เหลือจากการกินของสัตว์น้ำ ซากเซลล์ของแพลงก์ตอนพืช และของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา ส่วนกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปและกำจัดของเสียไนโตรเจนที่มีบทบาทเด่นในบ่อดินจะเกิดที่ดินตะกอนก้นบ่อเพราะมีของเสียต่างๆ สะสมอยู่ในปริมาณมาก โดยมีกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันที่เปลี่ยนของเสียอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ส่วนใหญ่แล้วแอมโมเนียจะถูกปลดปล่อยออกสู่มวลน้ำ จากนั้นด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม จะทำให้เกิดการบำบัดแอมโมเนียได้ คือ (1) แพลงก์ตอนพืชที่อาศัยอยู่ในมวลน้ำสามารถนำแอมโมเนียไปใช้ในการสร้างมวลชีวภาพ และ (2) ไนตริฟิอิงแบคทีเรียจะออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนเตรต โดยมีไนโตรเจนเป็นสารตัวกลางในกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งเกิดจากการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่ม AOB และ NOB ที่แพร่กระจายอยู่ในมวลน้ำและดินตะกอนบริเวณที่สัมผัสกับออกซิเจน ไนเตรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเป็นสารอาหารที่แพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ในการเติบโตได้ ส่วนแบคทีเรียในกลุ่มดีไนตริฟิอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในของดินก้นบ่อที่ไม่สัมผัสออกซิเจนจะทำหน้าที่รีดิวซ์ไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจน โดยผ่านไนตริกออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ ตามลำดับ นอกจากนี้ดินก้นบ่อบริเวณที่ไม่สัมผัสกับออกซิเจนจะมีโอกาสเกิดกระบวนการแอนแอมมอกซ์ได้ โดยแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซไนโตรเจน แต่กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง สัดส่วนของแอมโมเนียและไนเตรตที่เหมาะสมและอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ ดังนั้นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีโอกาสเกิดกระบวนการแอนแอมมอกซ์ขึ้นได้น้อย

อย่างไรก็ตาม บ่อดินมีความสามารถในการรองรับปริมาณของเสียไนโตรเจน (carrying capacity) ได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยจากการศึกษาของ Kutako *et al.* (2005) พบว่าเมื่อเติมอาหารกึ่งปริมาณ 6.7 ก./ตร.ม. (เทียบเท่ากับปริมาณเลี้ยงกึ่ง 134 ก./ตร.ม. โดยให้อาหารที่มีโปรตีน 37 เปอร์เซ็นต์ ในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกึ่งต่อวัน) ลงในบ่อดินจำลองสภาวะห้องปฏิบัติการที่ไม่มีแสงและมีการเติมอากาศเพื่อป้องกันการขาดออกซิเจนในชั้นมวลน้ำ พบการย่อยสลายอาหารกึ่งและได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนียซึ่งจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นไนเตรตได้อย่างรวดเร็วโดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน และจากนั้นไนเตรตจะถูกกำจัดด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในชั้นของดินตะกอนที่ขาดออกซิเจน

วิธีการบ่งชี้ว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้นในดินตะกอนทำได้โดยการตรวจวัดค่า ORP (Oxidation-Reduction Potential) ซึ่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะส่งผลให้ค่า ORP (oxidation reduction potential) เป็นค่าติดลบประมาณ -50 ถึง -300 มิลลิโวลต์ (Lee *et al.*, 2000) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอาหารกุ้งบดขึ้นเป็น 67 ก./ตร.ม. (เทียบเท่ากับการเลี้ยงกุ้ง 1340 ก./ตร.ม. โดยให้อาหารที่มีโปรตีน 37 เปอร์เซ็นต์ในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกุ้งต่อวัน) จะพบว่ามีการสะสมแอมโมเนียในอัตรา 8.7 มก. ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียในบ่อดินจำลองเพิ่มสูงขึ้นถึง 8 มก. ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าความสามารถในการบำบัดไนโตรเจนตามธรรมชาติของพื้นดินตะกอนไม่สามารถรองรับปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้ ประเมินได้ว่าปริมาณของไนโตรเจนอินทรีย์สูงกว่าความสามารถในการรองรับของเสียไนโตรเจนของดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง

## สรุป

บ่อดินสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำมีระบบนิเวศที่ซับซ้อนโดยเกิดปฏิกิริยาทั้งในดินและมวลน้ำ รวมทั้งมีกระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบไนโตรเจนหลายกระบวนการที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในรูปที่เป็นพิษโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ แต่เนื่องจากแนวทางการปฏิบัติในการเลี้ยงสัตว์น้ำหลายวิธี เช่น การเติมสารอินทรีย์คาร์บอน การฉีดเลนและการตากดินก้นบ่อกลับทำให้กระบวนการทางชีวภาพที่มีบทบาทในการบำบัดของเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันถูกรบกวน ถูกยับยั้งหรือทำให้เสียหายไปจนอาจจะก่อให้เกิดความล้มเหลวในการควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนได้ดังนั้นแนวทางการปฏิบัติสำหรับบ่อดินเกษตรควรเตรียมสภาพบ่อดินให้มีความพร้อมก่อนเลี้ยงสัตว์น้ำโดยกระตุ้นให้บ่อเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแบบสมบูรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมแอมโมเนียและไนไตรต์ รวมทั้งควรปล่อยสัตว์น้ำด้วยความหนาแน่นที่ดินตะกอนก้นบ่อสามารถรองรับของเสียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นได้เพื่อก่อให้เกิดความยั่งยืนสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อดินต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนการจัดทำบทความวิชาการในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2543. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 121 ตอนพิเศษ 49ง. หน้า 1-4.
- กรมประมง. 2552. มาตรฐานการปฏิบัติทางการประมงที่ดีสำหรับฟาร์มเพาะเลี้ยงและอนุบาลสัตว์น้ำ. (ระบบออนไลน์) แหล่งที่มา <http://www.fisheries.co.th>.
- ประจวบ หล้าอุบล. 2543. เสวนาวิชาการเรื่องกุ้ง. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 155 หน้า.
- Avnimelech, Y. and G. Ritvo. 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management. *Aquaculture* 220: 549-567.
- Brune, D.E., G. Schwartz, A.G. Eversole, J.A. Collier and T.E. Schwedler. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic system. *Aquacultural Engineering* 28: 65-86.
- Boyd, C.E. 1990. Water quality in ponds for aquaculture. Birmingham Publishing Company, Birmingham, Alabama.
- Boyd, C.E. 1995. Bottom soils, sediment and pond aquaculture. Chapman&Hall. New York. 348 p.
- Boyd, C.E., C.W. Wood, and T. Thunjai. 2002. Aquaculture ponds bottom soil quality management. PD/A CRSP. Oregon. 41 p.
- Burford, M.A. and M.R. Longmore. 2001. High ammonium production from sediments in hypereutrophic shrimp ponds. *Marine Ecology Progress Series* 224: 187-195.
- Byun, I., J. Park and T. Park. 2008. A new method of autotrophic denitrification with spent sulfide caustic as substrate and alkalinity source. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 13: 89-95.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dalsgaard, T., B. Thamdrup and D.E. Canfield. 2005. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in the marine environment. *Research in Microbiology* 156: 457-464.
- Gross, A., C. Boyd and C.W. Wood. 2000. Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds. *Aquacultural Engineering* 24: 1-14.
- Hagopian, D. and J.G. Riley. 1998. A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering* 18: 223-244.
- Hargreaves, J.A. 1998. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture* 166: 181-212.
- Hargreaves, J. A. 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 34: 344-363.
- Howarth, R.W. and R. Marino 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical control. *Limnology Oceanography* 33(4): 688-701.
- Jangrassa, S., M. Kutako, S. Powtongsook and P. Manasveta. 2007. Effect of aeration on inorganic nitrogen released from sediment in artificial outdoor shrimp pond. In *Proceeding: 33<sup>rd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand*. Walailuk University.
- Kroom, M.D. 1991. Importance of benthic productivity in controlling the flux of dissolved inorganic nitrogen through the sediment-water interface in a hypertrophic marine ecosystem. *Marine Ecology Progress Series* 78: 163-172.
- Kutako, M., K. Yiewya, P. Nupasant, C. Ngamphongsai and S. Powtongsook. 2005. Conversion of inorganic nitrogen compounds from organic matter decomposition in sediment from shrimp pond under laboratory Condition. In *Proceeding: 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand*. Suranaree University of Technology.
- Kutako, M., B. Srisamrit, J. Arnthong, S. Powtongsook and P. Manasveta. 2007a. Use of nitrification biofilter on nitrogen treatment in outdoor aquaculture tank. *Journal of Environmental Research* 29(2): 23-46.
- Kutako, M., Saleedeang, A., Tapaneeyaworawong, P., Limpiyakorn, T., Powtongsook, S. and P. Manasveta. 2007b. Effect of the inorganic carbon addition on nitrogen conversion and bacterial diversity in the high organic content sediment from shrimp pond. In *Proceeding: The 12<sup>th</sup> Biological Science Graduate Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Kutako, M., T. Limpiyakorn, E. Luepromchai, S. Powtongsook and P. Manasveta. 2009a. Inorganic nitrogen conversion and changes of bacterial community in sediment from shrimp pond after methanol addition. *Journal of Applied Sciences* 9(16): 2907-2915.
- Kutako, M., T. Limpiyakorn, S. Powtongsook and P. Manasveta, P. 2009b. Effect of sun-drying on ammonia removal efficiency of shrimp pond under laboratory condition. In *Proceeding: 35<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand*. Burapha University.
- Lee, P.G., R.N. Lea, E. Dohmann, W. Prebilsky, P.E. Turk, H. Ying and J.L. Whitson. 2000. Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem. *Aquacultural Engineering* 23: 37-59.
- McCarty, G.W. 1999. Modes of action of nitrification inhibitors. *Biology and Fertility of Soils* 29: 1-9.
- Manasveta, P., T. Panritdam, P. Sihanonth, S. Powtongsook, B. Chuntapa and F. Lee. 2001. Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. *Aquacultural Engineering* 25: 35-39.
- Moriarty, D.J.W. 1997. The role of microorganisms in aquaculture ponds. *Aquaculture* 151: 333-349.
- Rich, J.J., O.R. Dale, B. Song, and B.B. Ward. 2008. Anaerobic ammonium oxidation (Anammox) in Chesapeake Bay sediments. *Microbial Ecology* 55: 311-320.
- Sesuk, T., S. Powtongsook and K. Nootong. 2009. Inorganic nitrogen control in a novel zero-water exchanged aquaculture system integrated with airlift-submerged fibrous nitrifying biofilters. *Bioresource Technology* 100: 2088-2094.
- Steeby, J.A., J.A. Hargreaves, C.S. Tucker and S. Kingsbury. 2004. Accumulation, organic carbon and dry matter concentration of sediment in commercial channel catfish ponds. *Aquacultural Engineering* 30: 115-126.
- Stumm, W. and J.J. Morgan. 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. John Wiley & Sons Inc., New York. 1022 p.
- Timmons, M.B., J.M. Ebeling, F.W. Weaton, S.T. Summerfelt and B.J. Vinci. 2002. *Recirculating aquaculture systems*. 2<sup>nd</sup> edition, Cayuga Aqua Ventures, USA, 757.
- Tucker, C.S. and M. van der Ploeg. 1993. Seasonal changes in water quality in commercial channel catfish ponds in Mississippi. *Journal of World Aquaculture Society* 24: 473-481.
- Tucker, C. S. 1996. The ecology of channel catfish culture ponds in northwest Mississippi. *Reviews in Fisheries Science* 4: 1-55.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vanitchanai, W., S. Powtongsook and K. Nootong 2009. Effects of organic carbon addition on inorganic nitrogen control and biofloc characteristics during the closed-water tilapia growout in suspension systems. In Proceeding: 35<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand. Burapha University.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความแก้ไข

เนื่องจากบทความเรื่อง “บทบาทของกระบวนการทางชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในบ่อดินสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ” ที่ตีพิมพ์ในวารสารเกษตรพระจอมเกล้า ฉบับที่ 30 : 2 หน้า 97-106 มีข้อผิดพลาดเนื่องจากการตีพิมพ์ กองบรรณาธิการเกษตรพระจอมเกล้า จึงขอยกเลิกบทความดังกล่าวข้างต้นและตีพิมพ์บทความที่ถูกต้องในฉบับที่ 30:3 หน้า 103-112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้