

ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรต-ไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

Effect of Carbon : Nitrate-N ratio on Denitrification Rate of the Tubular Denitrification Reactor

พรรณนภา ไชคชัยทวี¹ วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัศมี¹ และ สรวิต เผ่าทองสุข^{2,3}

Pannapa Chokchaitavee¹, WiboonlukPungrasmi¹ and Sorawit Powtongsook^{2,3}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนของเมทานอลที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยทำการแปรผันอัตราส่วนในรูปคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าระบบแตกต่างกัน 3 ระดับเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 ในสภาวะที่เดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 22 ล./ชม. ควบคุมให้มีระยะเวลาที่เก็บน้ำในระบบเท่ากับ 2 ชม. ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตรน้ำ 453 ล. และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งอัตราดีไนทริฟิเคชันผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนจาก 1:1 เป็น 5:1 จะทำให้ค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก $1,282.7 \pm 347.6$ มก.ไนโตรเจน/วันเป็น $2,950.3 \pm 643.3$ มก.ไนโตรเจน/วัน โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตในการทดลองนี้ คือ 5:1 โดยในระหว่างการทดลองพบว่าค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (โออาร์พี) อยู่ในช่วง 0 ถึง -300 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

ABSTRACT

This research aimed to study the Carbon : Nitrate-N ratio using methanol for nitrate treatment in a tubular denitrification reactor with various Carbon : Nitrate-N ratios at 1:1, 2:1 and 5:1. The experiment was conducted by continuous feeding of artificial aquaculture wastewater containing 100 mg Nitrate-N/L at 22 L/hr to the tubular denitrification reactor (TDNR). The retention time of the TDNR was 2 hr and total water volume of the experimental system was 453 L. Methanol was added as an external organic carbon to accelerate the denitrification rate. The results showed that the increase in Carbon : Nitrate-N ratio from 1:1 to 5:1 significantly enhanced denitrification rate from $1,282.7 \pm 347.6$ mg-N/day to $2,950.3 \pm 643.3$ mg-N/day. The optimal Carbon : Nitrate-N ratio for nitrate removal was at 5:1. The oxidation-reduction potential (ORP) during denitrification experiment was between 0 to -300 mV, which was an appropriate condition for denitrification process.

Key Words: Aquaculture systems, Denitrification, Nitrate, Tubular system

e-mail address: p.m_13@hotmail.com

¹ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

²ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ เลขที่ 113 ถนนพหลโยธิน อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

²National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, 113 Paholyothin Road, KlongLuang, PathumThani 12120

³ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

³Center of Excellence for Marine Biotechnology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

คำนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถือเป็นแหล่งรายได้หลักที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยและทั่วโลก ทุกประเทศจึงให้ความสำคัญและหันมาพัฒนารูปแบบการเพาะเลี้ยงเพื่อให้เป็นระบบที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากเหตุผลข้างต้นส่งผลให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนาโดยมีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยแก้ปัญหาด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมภายนอกฟาร์ม และปัญหาโรคระบาดได้ อีกทั้งยังสามารถเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในระดับความหนาแน่นที่สูงขึ้นทำให้ได้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความคุ้มค่าแก่การลงทุน แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนจากอาหารที่เหลือจากการบริโภคและจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ จึงต้องมีการพัฒนาแนวทางที่เหมาะสมเพื่อบำบัดของเสียดังกล่าวผ่านกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งรูปแบบที่นิยมนำมาใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อช่วยให้อาหารหมุนเวียนน้ำใช้ได้นานขึ้น คือ การบำบัดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันที่จะช่วยลดความเป็นพิษของแอมโมเนียโดยเปลี่ยนให้เป็นไนเตรต (กษิตศ, 2551) แต่ก็ยังพบการสะสมของไนเตรตที่จะต้องทำการบำบัดต่อด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในสภาวะไร้อากาศ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาว (Tubular denitrification reactor) (รุ่งนภา, 2549) ซึ่งเป็นถึงปฏิกรณ์รูปแบบไหลตามกัน (Plug-flow reactor) ที่ต้องทำการเติมเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียดีไนตริไฟเออร์ (Denitrifier) แต่ปัญหาของระบบนี้คือไม่สามารถควบคุมให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ การวิจัยนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในระบบท่อยาว โดยทดสอบหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตในโตรเจนที่เหมาะสมที่จะทำให้การบำบัดไนเตรตเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูงต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ระบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ (1) **ถังบรรจุน้ำเสีย** ซึ่งเป็นถังน้ำพลาสติกขนาด 500 ล. โดยบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 450 ล. ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการเติมอากาศด้วยหัวทรายเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อให้มีออกซิเจนอย่างเพียงพอและป้องกันการเน่าเสียของน้ำ (2) **ถังกวนผสม** เป็นถังทรงกระบอกสูง ปริมาตร 53 ล. ทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ม. สูง 1.3 ม. ที่บริเวณด้านล่างของถังออกแบบเป็นรูปกรวยเอียงทำมุม 60 องศา (3) **ถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันแบบท่อยาว** ทำจากท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 ม. ยาว 26 ม. ภายในเส้นท่อนบรรจุตัวกลางพลาสติก Digester box (DB) เพื่อเป็นตัวกลางให้แบคทีเรียยึดเกาะโดยมีปริมาตรความจุน้ำเมื่อบรรจุตัวกลางพลาสติก DB เท่ากับ 13 ล.ที่บริเวณปลายท่อน้ำเข้าระบบจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อช่วยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ ส่วนที่ปลายท่อน้ำทิ้งขาออกจะติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential) เพื่อใช้ควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันภายในระบบ

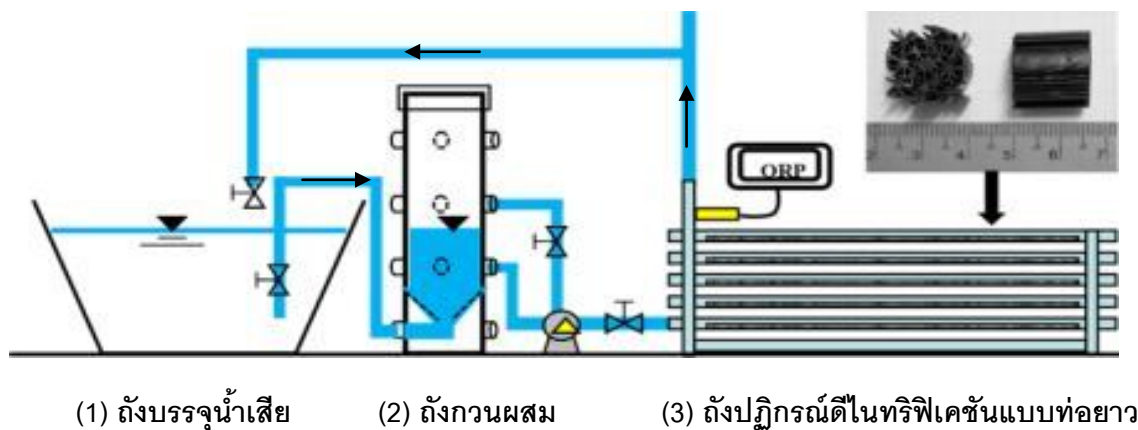


Figure 1 Schematic diagram of the operation system

2. วิธีการวิจัย

ทำการบรรจุตัวกลางพลาสติก Digester box (DB) ลงในถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว และติดตั้งชุดอุปกรณ์ ดังรูปที่ 1 จากนั้นใช้วิธีการลบน้ำเพื่อสูบน้ำเสียสังเคราะห์จากถังบรรจุน้ำเสียเข้าสู่ถังกวนผสม เติมนีโอทานอลใน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ลงในถังกวนผสม และหมุนเวียนน้ำเสียภายในถังกวนผสมเพื่อให้เกิด การผสมกันดีระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับเมทานอล โดยน้ำที่ผสมแล้วส่วนหนึ่งจะถูกสูบเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ท่อยาว ด้วยอัตราการไหล 22 ลิ./ชม. และควบคุมระยะเวลาที่เก็บน้ำในระบบเท่ากับ 2 ชม. ในขณะที่น้ำอีกส่วนหนึ่งจะ ถูกเวียนกลับไปยังถังกวนผสม ส่วนน้ำทิ้งที่ออกจากท่อยาวจะทำการหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังบรรจุน้ำเสียอีกครั้ง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากท่อยาวและจากถังบรรจุน้ำเสียเพื่อวิเคราะห์อัตราการบำบัดไนเตรต และการ เปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของ APHA (2005) ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย (4500-NH₃-D) ไนไตรต์ (4500-NO₂-B) ไนเตรต (4500-NO₃-B) ร่วมกับการวิเคราะห์ พารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ค่าดัชนีออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิ ออกซิเจนละลายน้ำ และพีเอช โดยในระหว่างที่ทำการ แปรเปลี่ยนอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต้องให้ความเข้มข้นของไนเตรตในระบบเริ่มแรกที่ค่อนข้างสูงจะทำให้การ เติมนีโอทานอลกับไซโตแบียมไนเตรตให้ได้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 เป็นจำนวน 3 รอบ จากนั้นจึง ทำการแปรผันค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในน้ำเสียเป็น 2:1 และ 5:1 ตามลำดับ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม

ผลการแปรผันอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนของเมทานอล 3 ระดับ ได้แก่ 1:1 2:1 และ 5:1 แสดงดังรูปที่ 2 โดยช่วงวันที่ 0-78 เป็นระยะที่ทำการบ่มเชื้อด้วยการเติมไซโตแบียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก. ในไนโตรเจน/ล. และวันที่ 79 เป็นวันที่เริ่มทำการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมนีโอทานอลใน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนที่แตกต่างกันจะส่งผลต่ออัตราการบำบัดไนเตรต โดยอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 มีอัตราดีไนทริฟิเคชันของถังบำบัดเท่ากับ $1,282.7 \pm 347.6$ มก.ไนโตรเจน/วัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้น เป็น 2 เท่า (คาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 2:1) อัตราดีไนทริฟิเคชันมีค่าเท่ากับ $1,568.0 \pm 748.4$ มก.

ไนโตรเจน/วัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณไนไตรต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอน ในขณะที่การเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 5 เท่า จะทำให้อัตราดีไนทริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังรูปที่ 3 โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ $2,950.3 \pm 643.3$ มก.ไนโตรเจน/วันและมีปริมาณไนไตรต์ลดลง แสดงว่าปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่ง Van Rijn *et al.* (2006) ได้ระบุถึงสาเหตุของการสะสมไนไตรต์ว่าอาจเกิดจากการขาดแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรีย ซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 2 จะเห็นว่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 และ 2:1 นั้นมีการสะสมของไนไตรต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ที่มีปริมาณไนไตรต์ต่ำเมื่อเทียบกับไนเตรต

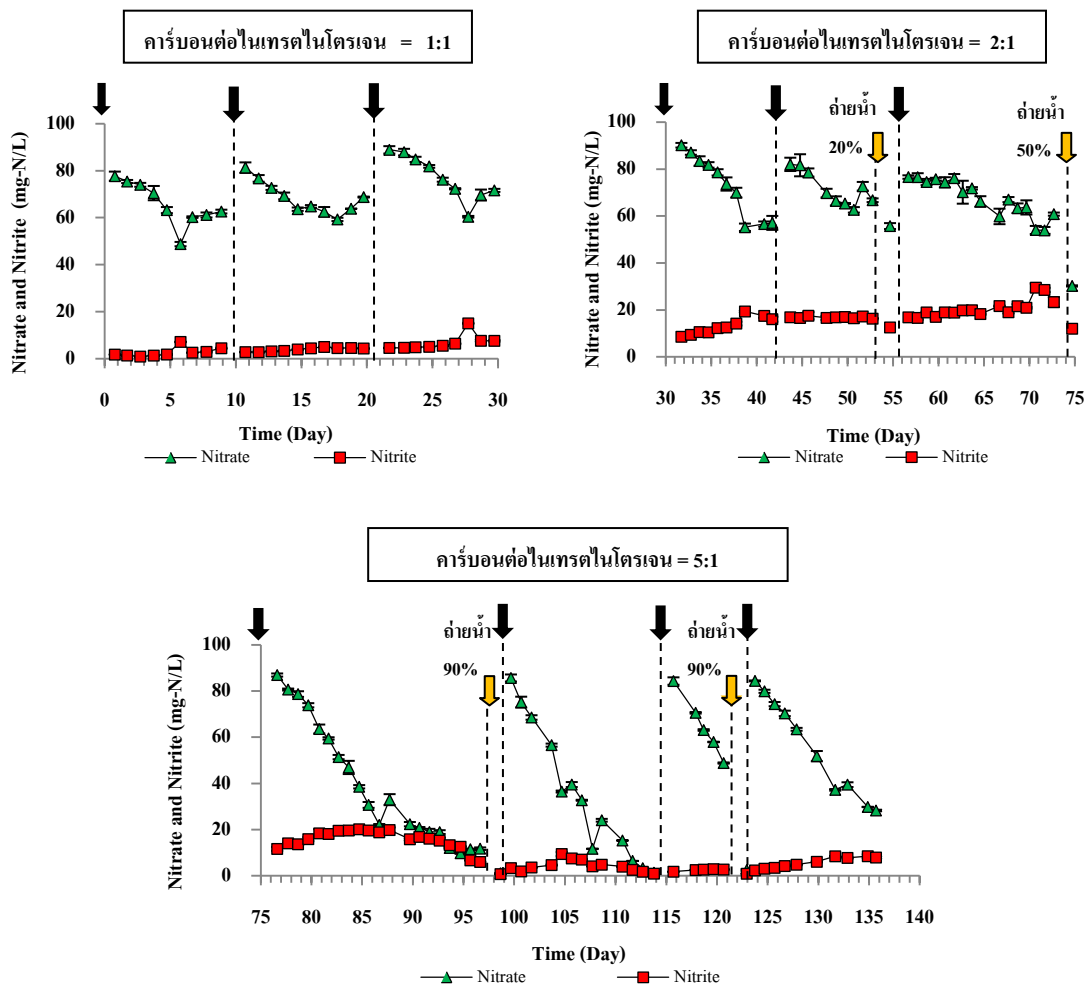


Figure 2 Nitrite and nitrate concentrations in experiment with varied Carbon : Nitrate-N ratio at 1:1 – 5:1, (↓) indicate the addition of nitrate and organic carbon to the tank containing artificial wastewater, while (↘) indicate the replacement of fresh artificial wastewater to the tank.

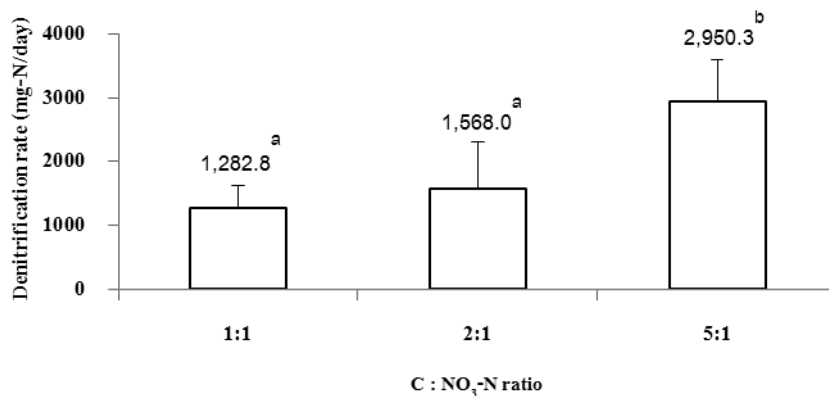


Figure 3 Denitrification rates as a result of methanol addition as organic carbon with varied Carbon : Nitrate-N at 1:1, 2:1 and 5:1 (the alphabet characters indicate significant differences in statistical analysis ($p < 0.05$))

ผลการตรวจวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเดินระบบการทดลอง พบว่าค่าศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของน้ำทิ้งจากทางออกของท่อยาวมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง -200 มิลลิโวลต์ แต่การบำบัดไนเตรตที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นการบำบัดที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังพบการสะสมของไนไตรต์ในช่วงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ดังรูปที่ 4

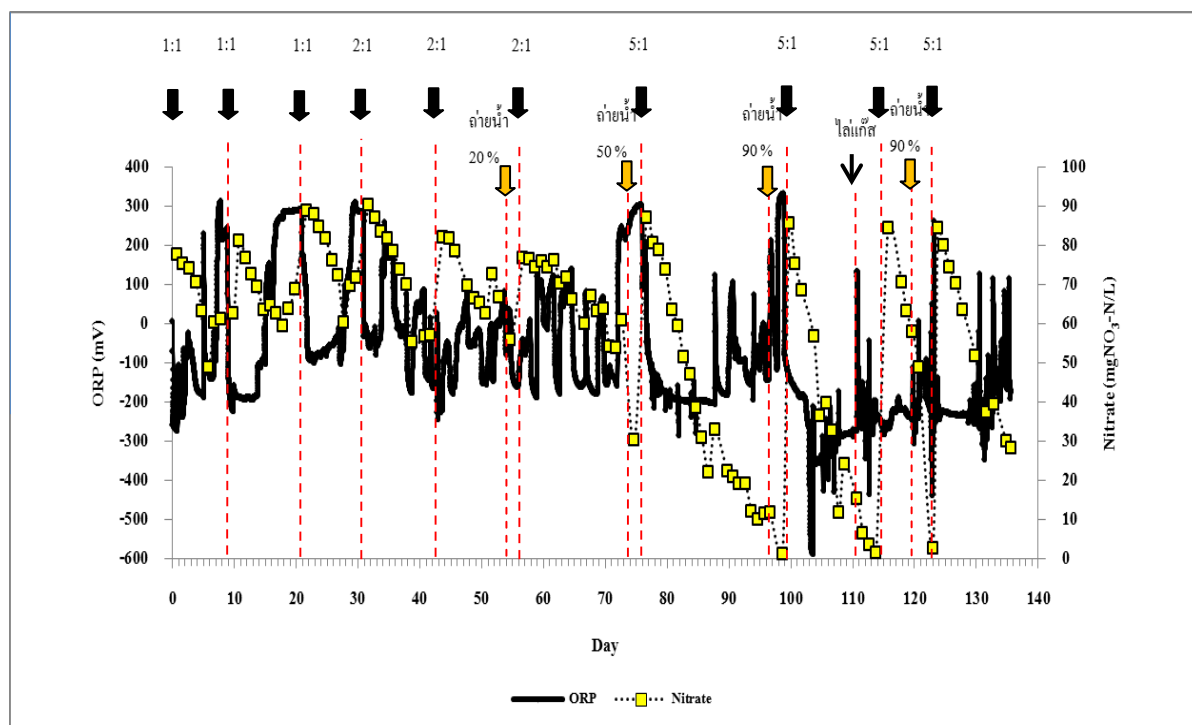


Figure 4 Relationship between oxidation-reduction potential (ORP) and nitrate (mgNO₃-N/L) in the tubular denitrification reactor, (↓) indicate the addition of nitrate and organic carbon to the tank containing artificial wastewater, while (⇓) indicate the replacement of fresh artificial wastewater to the tank.

ซึ่งการศึกษาของ Lee *et al.* (2000) พบว่าในช่วงค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่า -200 มิลลิโวลต์ แม้ว่าจะมีการลดลงของไนเตรต แต่ก็จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากพบการสะสมของไนไตรต์ โดยในช่วงท้ายของการทดลองภายหลังการปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเป็น 5:1 พบว่าค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันลดลงต่ำกว่า -200 มิลลิโวลต์ นอกจากนี้ผลการทดลองในรูปแบบที่ 5 ยังแสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงของการบำบัดไนเตรตค่าพีเอชและค่าสภาพต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้น

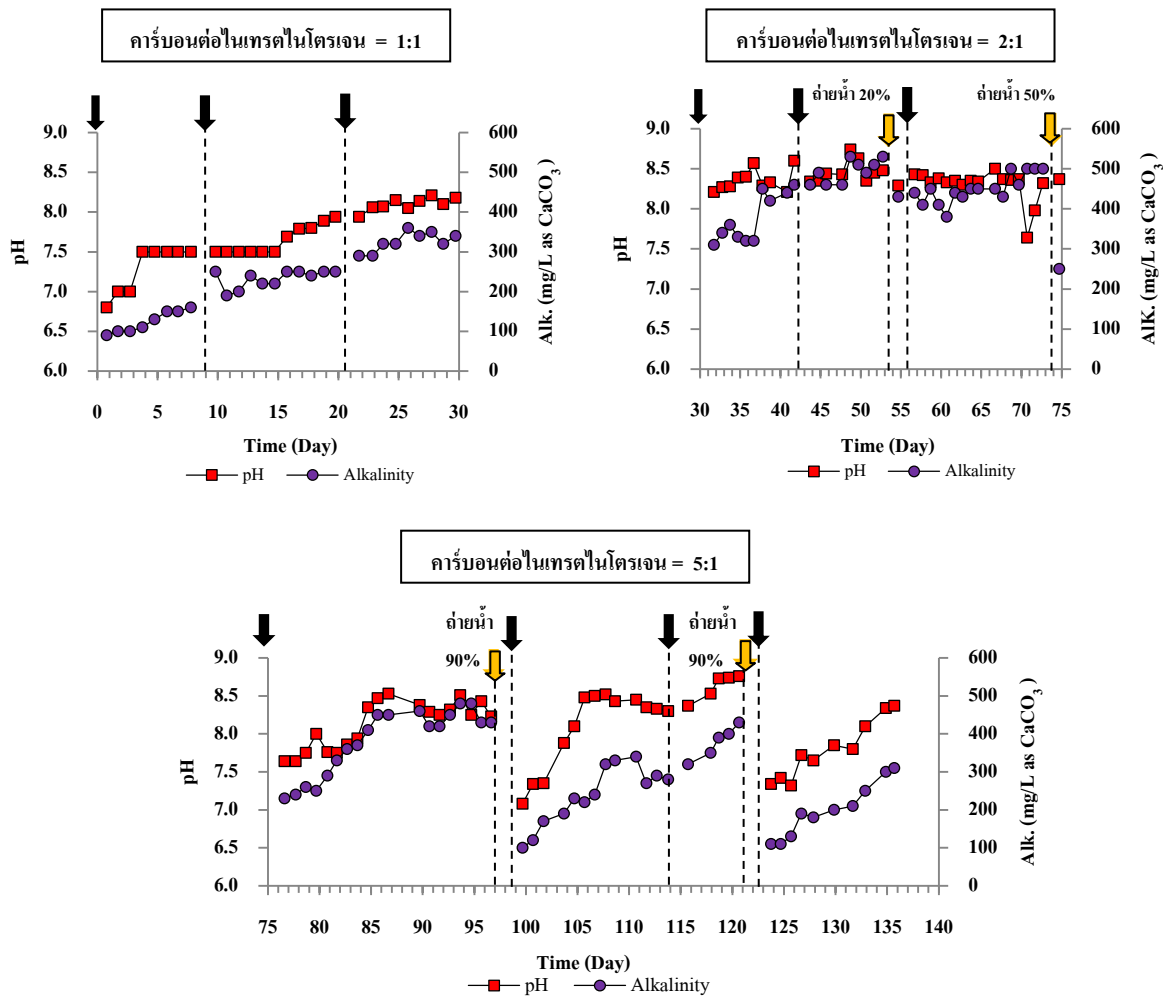


Figure 5 pH and Alkalinity after methanol addition as organic carbon with varied Carbon : Nitrate-N at 1:1, 2:1 and 5:1, (↓) indicate the addition of nitrate and organic carbon to the tank containing artificial wastewater, while (↘) indicate the replacement of fresh artificial wastewater to the tank.

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมทานอลสามารถใช้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาว โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสม คือ 5:1 โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของชลธิชา (2553) แต่ในการใช้เมทานอลจะต้องพึงระวังถึงปริมาณการใช้ที่เหมาะสม หากเติมสารอินทรีย์น้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ (Grommen *et al.*, 2006) แต่หาก

เติมปริมาณมากเกินไปและคงเหลืออยู่ในระบบอาจส่งผลเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันค่อนข้างหลากหลายแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบบำบัด ลักษณะสมบัติของน้ำเสียเข้าระบบ และชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เลือกใช้ เป็นต้น

สรุป

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในเทรตไนโตรเจนของเมทานอลที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดในเทรตด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวสำหรับการทดลองนี้ คือ 5:1 โดยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันจะเกิดขึ้นในระบบทดลองเมื่อค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -300 มิลลิโวลต์ และจากการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบการทดลองโดยใช้สมการเส้นตรง (Regression analysis) พบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันของระบบที่มีการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 1:1 มีค่าเท่ากับ $1,282.7 \pm 347.6$ มก.ไนโตรเจน/วัน ซึ่งอัตราดีไนทริฟิเคชันนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น $2,950.3 \pm 643.3$ มก.ไนโตรเจน/วัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 5:1

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ให้สถานที่ทำงานวิจัย และเอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ ขอขอบคุณทุนการวิจัยบางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (รหัสโครงการ FW1017A)

เอกสารอ้างอิง

- กษิติศ หนูทอง. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. **วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 16(1): 11-12.**
- ชลธิชา พลายชุม. 2553. การบำบัดในเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รุ่งนภา สุทธิศิริ. 2549. **ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 21st ed. American Public Health Association, Washington DC.
- Grommen, R., M. Verhaege and W. Verstrete. 2006. Removal of nitrate in aquaria by means of electrochemically generated hydrogen gas as electron donor for biological denitrification. **Aquacultural Engineering 34: 33-39.**

- Lee, P.G., R.N. Lea, E. Dohmann, W. Prebilssky, P.E. Turk, J.L. Ying and J.L. Whitson. 2000. Denitrification in aquaculture system: an example of a fuzzy logic control problem. **Aquacultural Engineering** 23: 37-59.
- Van Rijn, J., Y. Tal. and J. Schreier. 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. **Aquacultural Engineering** 34: 364-376.