

การเลือกชุดกรองชีวภาพที่จำหน่ายในท้องตลาดเพื่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ในระบบปิด

จิรวัช ช่วยรอดหมด¹ สมหมาย เชี่ยววารีสัจจะ² วิจิตรา ลีละสุภกุล³
และ อุดมผล พิชนิไพบูลย์⁴

Abstract

Chuayrodmod, J.¹, Chiayvareesajja, S.¹, Leelasuphakul, W.² and Puetpaiboon, U.³
Selection of commercial biofilters for rearing aquatic animals in closed system
Songklanakar J. Sci. Technol., 2007, 29(4) : 945-957

A comparative study was made to select the most suitable biofilter from 7 types of commercial water filters by rearing hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) in aquaria for 64 days. It was found that diminishing concentrations of ammonia and nitrite were attributed mainly to nitrifying bacteria that convert ammonia into nitrite and nitrate which required a minimum period of 16-28 days for the process to function. Low absorption of ammonia was achieved through using activated carbon, coconut shell charcoal, zeolite and ceramic. Durability and filtering efficiency of the filters depended upon porosity and amount of biofilm on the filter surface. The filter using one coarse meshed plastic sheet and 37 bioballs was the most

¹Department of Aquatic Science, Faculty of Natural Resources, ²Department of Biochemistry, Faculty of Science, ³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

¹นักศึกษาลูกสุตร วท.ม. สาขาวิชาวนิชศาสตร์ ²Ph.D. (Fisheries and Allied Aquacultures) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวนิชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ³Ph.D. (Biochemistry) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ⁴D.Eng. (Water and Wastewater Engineering) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail : sommai.c@psu.ac.th

รับต้นฉบับ 1 พฤศจิกายน 2549 รับลงพิมพ์ 19 กุมภาพันธ์ 2550

suitable, though it caused a problem with low total alkalinity resulting in mortality of the biofilm which peeled off, thus increasing the concentrations of ammonia, nitrite and suspended solids toward the end of the experimental period. The catfish growth rate, survival and FCR in all treatments were in the ranges of 7.39-8.91 g/d, 84.44-95.56% and 0.21-0.25, respectively.

Key words : filter media, biofilm, water quality, hybrid catfish, growth rate, survival rate

บทคัดย่อ

จิรวัช ช่วยรอดหมด สมหมาย เขียววารีย์จะ วิจิตรา ลีละสุภกุล และ อุดมผล พิษณุโพบูลย์
การเลือกชุดกรองชีวภาพที่จำหน่ายในท้องตลาดเพื่อเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิด

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2550 29(4) : 945-957

เพื่อคัดเลือกชุดกรองชีวภาพในตู้เลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดที่จำหน่ายในท้องตลาดซึ่งดีที่สุด จึงทดลองเลี้ยงปลา
คอกบักอยู่ในตู้กระจกด้วยชุดกรอง 7 แบบ เป็นระยะเวลา 64 วัน พบว่า ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์ที่ลดลง
ส่วนใหญ่เกิดจากจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายเออร์เปลี่ยนรูปแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์และไนเตรท และต้องใช้ระยะ
เวลาอย่างน้อย 16-28 วัน ก่อนที่ระบบจะทำงานได้ ส่วนการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ ถ่านกะลามะพร้าว zeolite และ
เซรามิก (ceramic) เกิดขึ้นในปริมาณต่ำ อายุการใช้งานและประสิทธิภาพการกรองจึงขึ้นอยู่กับความพรุน และปริมาณ
ฟิล์มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของวัสดุกรองเป็นหลัก ชุดกรองที่ใช้วัสดุกรองเป็นโพลีพลาสติกหยาบ 1 แผ่น ร่วมกับ
bioball 37 ลูก มีความเหมาะสมที่สุด แม้มีปัญหาเกี่ยวกับการลดลงของค่าความเป็นด่างทั้งหมด (Alkalinity) ทำให้ฟิล์ม
จุลินทรีย์ที่เกาะบริเวณผิววัสดุกรองเริ่มตายและหลุดออก ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ และของแข็งแขวนลอยจึง
เพิ่มสูงขึ้นในช่วงปลายการทดลอง ส่วนอัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ
ของปลาคอกในแต่ละชุดกรองมีค่าอยู่ในช่วง 7.39-8.91 กรัม/วัน, 84.44-95.56% และ 0.21-0.25 ตามลำดับ

การเลี้ยงปลาสวยงามหรือปลาคู (Aquarium fish) ได้รับความนิยมนานในปัจุบัน โดยเลี้ยงเป็นงานอดิเรกให้
ความเพลิดเพลินและความสวยงาม การเลี้ยงปลาคูจึง
แพร่หลายไปทั่วโลก ซึ่งการเลี้ยงปลาในตู้และมีระบบปิดน้ำ
หมุนเวียนสามารถรักษาคุณภาพน้ำให้อยู่ในช่วงที่ไม่เป็น
อันตรายต่อสัตว์น้ำและช่วยเพิ่มอัตราการรอดตาย และอัตรา
การเจริญเติบโต ทำให้สามารถเลี้ยงในความหนาแน่นสูงช่วย
ลดมลภาวะของน้ำทั้งจากการเพาะเลี้ยงลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
และยังนำไปใช้ในการเลี้ยงและจัดการพ่อแม่พันธุ์ การเพาะ
ฟัก อนุบาลลูกปลาและผลิตปลาน้ำจืดในปลาหลายชนิด เช่น
ปลาแอตแลนติกคอด (*Gadus morhua*) และปลาไหล
(*Anguilla anguilla*) โดยฟาร์มเพาะพันธุ์ปลาน้ำจืดส่วนใหญ่
ส่วนใหญ่ในแถบเมดิเตอร์เรเนียน นิยมผลิตลูกปลาในระบบ
น้ำหมุนเวียนและมีระบบกรองช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ ซึ่ง
ทำให้ผลิตลูกปลาเพิ่มจำนวนขึ้น 15% (สุนิตย์ และคณะ,
2547; Ridha and Cruz, 2001) เป็นผลมาจากปัจจัยทาง

สิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพของน้ำที่ใช้เลี้ยงจะมี
ผลโดยตรงกับอัตราการรอดตาย การเจริญเติบโต และการ
สืบพันธุ์ (Laohavisuti, 1997) พรเลิศ และคณะ (2537)
พบว่าหากคุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลงจากจุดที่เหมาะสมจะทำให้
สัตว์น้ำเครียดและอ่อนแอส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดโรคได้ง่ายขึ้น
จึงต้องมีแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการคุณภาพน้ำเพื่อลด
ของเสียที่เกิดขึ้นจากการให้อาหารและสิ่งขับถ่ายของปลาที่
ปล่อยออกมาระหว่างการเลี้ยง วิธีการกรองน้ำจัดเป็นวิธีการที่
มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดตะกอนและสารแขวนลอยในตู้
เลี้ยงสัตว์น้ำ Moe (1992) ได้แบ่งระบบการกรองน้ำใน
ตู้เลี้ยงสัตว์น้ำไว้ 3 ประเภท คือ การกรองโดยวิธีทางชีวภาพ
การกรองโดยวิธีทางเคมี และการกรองโดยวิธีทางกายภาพ

ชุดกรองชีวภาพในตู้เลี้ยงสัตว์น้ำที่จำหน่ายในท้องตลาด
มีหลายแบบหลายราคา เพื่อประโยชน์ต่อการคัดเลือกชุด
กรองชีวภาพในตู้เลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้งาน จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลง
คุณภาพน้ำจากการบำบัดด้วยชุดกรอง อัตราการเจริญ

เติบโต อัตราการรอดตาย และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาตู้กบักกอยที่ใช้เป็นสัตว์ทดลอง นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงราคาและระยะเวลาที่เริ่มจุดตันของชุดกรองประกอบการคัดเลือกด้วย

อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

1. แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design : CRD) (มนต์ทิพย์, 2536) โดยใช้ชุดกรองที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจำนวน 7 แบบๆ ละ 3 ซ้ำ ชุดกรองแต่ละแบบแตกต่างกันที่ชนิดของวัสดุกรอง (Figure 1) และจัดเรียงลำดับของวัสดุกรองจากบนลงล่างดังนี้

ชุดกรองที่ 1 ใช้วัสดุกรองเป็นกรวด (Gravel) 500 กรัม ร่วมกับทรายหยาบ (Coarse sand) 500 กรัม และทรายละเอียด (Fine sand) 500 กรัม

ชุดกรองที่ 2 ใช้วัสดุกรองเป็นทรายละเอียด 500 กรัม ร่วมกับทรายหยาบ 500 กรัม และกรวด 500 กรัม

ชุดกรองที่ 3 ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ (coarse meshed plastic sheet) 1 แผ่น ร่วมกับเซรามิก (ceramic) 300 กรัม และ ammonia chip 300 กรัม

ชุดกรองที่ 4 ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ 1 แผ่น ร่วมกับ zeolite 250 กรัม และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) 200 กรัม

ชุดกรองที่ 5 ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ 1 แผ่น ร่วมกับ bioball 37 ลูก

ชุดกรองที่ 6 ใช้วัสดุกรองเป็นทรายละเอียดขนาด 500 กรัม ร่วมกับใยพลาสติกหยาบ (coarse meshed plastic sheet) 2 แผ่น และถ่านกะลามะพร้าว (coconut shell charcoal) 200 กรัม

ชุดกรองที่ 7 ใช้วัสดุกรองเป็นเศษปะการัง (broken coral) 300 กรัม ร่วมกับ ammonia chip 300 กรัม และถ่านกัมมันต์ 200 กรัม

ใช้ปลาตู้กบักกอยขนาดน้ำหนักตัวละ 10 กรัม จำนวน 15 ตัวต่อตู้ เลี้ยงในตู้กระจกขนาด 45x60x45 ซม. ซึ่งบรรจุน้ำตู้ละ 80 ลิตร ให้อาหารตลอดเวลา และใช้เวลาทดลอง 64 วัน

2. การเตรียมน้ำ ตู้ทดลอง และระบบกรอง

2.1 การเตรียมน้ำในตู้ทดลอง

ใช้น้ำประปาจากโรงเรียนเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พักไว้เป็นเวลา 7 วัน ในถังขนาดความจุ 1 ลบ.เมตร โดยให้อากาศตลอดเวลา แล้วนำมาผ่านการกรอง

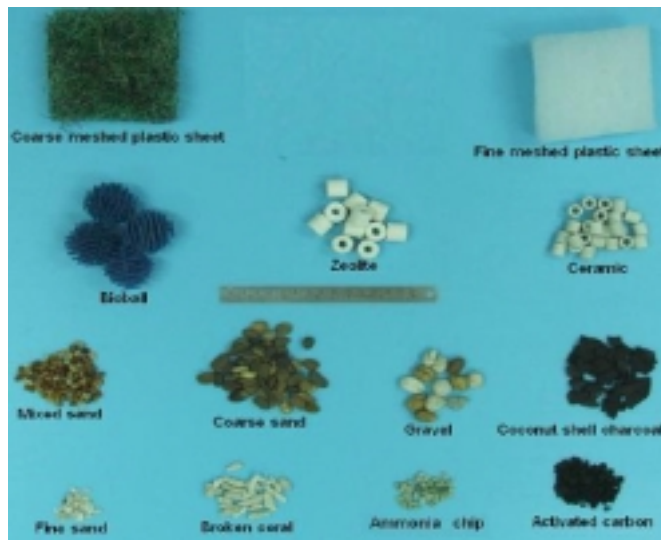


Figure 1. Filter media used for the experiment.

ด้วยลูกกรองแพลงก์ตอนขนาดช่องตา 20-60 ไมครอน ใส่ในตู้ทดลองตู้ละ 80 ลิตร และทำการเดินระบบกรองเป็นระยะเวลา 8 วัน ก่อนปล่อยปลาลงเลี้ยงในตู้ทดลองให้ระบบกรองอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานและเป็นข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำหลังจากปล่อยปลาและให้อาหาร

2.2 การเตรียมตู้ทดลอง

ตู้ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นตู้กระจกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 45x60x45 ซม. ภายในตู้ทดลองมีชุดกรองขนาด 10x10x30 ซม. วางอยู่ในแนวตั้งบริเวณมุมตู้ โดยใช้ airlift เป็นตัวควบคุมการไหลของน้ำผ่านชุดกรองในอัตรา 1 ลิตร/นาที และมีการให้ออกซิเจนตลอดเวลาโดยใช้หัวทราย 2 หัวต่อตู้ (Figure 2)

2.3 การเตรียมระบบกรอง

นำวัสดุกรองแต่ละชนิดไปล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วนำไปอบให้แห้งก่อนนำวัสดุกรองบรรจุในกล่องแก้วใส่วัสดุกรองให้วัสดุกรองแต่ละชนิดหนา 5 ซม. (ปริมาตรวัสดุกรองทั้งหมด 10x10x5 ลบ.ซม.) จากนั้นนำระบบกรอง (กล่องแก้วที่มีวัสดุกรองบรรจุอยู่) แช่น้ำสะอาด 24-48 ชม. ให้วัสดุกรองที่มีความพรุนสูง เช่น ถ่านกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จมลงสู่พื้นของกล่องแก้วใส่วัสดุกรองในแต่ละชั้น

3. การให้อาหารปลาทดลอง

ปล่อยปลาคูกบักอูย (*Clarias macrocephalus* X *C. gariepinus*) ขนาดน้ำหนักเฉลี่ยตัวละ 10 กรัม จำนวน 15 ตัวต่อตู้ โดยให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาคูกขนาดเล็กพิเศษของบริษัทเจริญโภคภัณฑ์อาหารจำกัด (มหาชน) วันละ

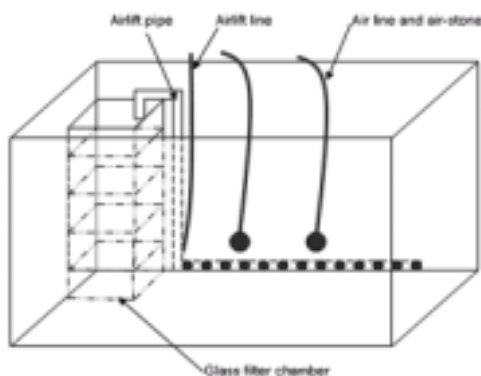


Figure 2. A layout of glass aquaria and a filter system.

5% ของน้ำหนักตัว (กลุ่มรักเกษตร, 2541) แบ่งเป็น 2 มื้อ คือมือเช้า (8.00 น.) และมือเย็น (17.00 น.) และทำการชั่งน้ำหนักปลาในแต่ละชุดกรอง เพื่อปรับปริมาณอาหารทุก 8 วัน ตลอดการทดลอง

4. การเก็บตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำในบริเวณตรงข้ามกับระบบกรองและห่างจากผิวน้ำประมาณ 5 ซม. ปริมาตร 1 ลิตร จากตู้ทดลองทั้งหมดในเวลา 16.00 น. ทุก 4 วัน ก่อนให้อาหารปลา โดยมีการเติมน้ำทดแทนทุก 8 วัน ให้คงปริมาตรน้ำ 80 ลิตร และทำการจดบันทึกระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของชุดกรอง (ระยะเวลาทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนมีน้ำไหลบ่าออกทางด้านบนของกล่องแก้วใส่วัสดุกรอง) ทุกวันต่อเนื่องไปจนถึงสิ้นสุดการทดลองเป็นระยะเวลา 64 วัน

5. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน ไนเตรท ออกซิเจนละลายน้ำ และบีโอดี ตามวิธีของ APHA และคณะ (1989) แอมโมเนียรวม ของแข็งแขวนลอย และความเป็นด่างทั้งหมดตามวิธีของ Boyd และ Tucker (1992) ส่วนการวัดพีเอช (pH) ใช้ pH meter ของ Mettler Delta รุ่น 340 และวัดอุณหภูมิใช้ thermometer

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของ อัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ต้นทุนของระบบกรอง และระยะเวลาที่ชุดกรองเริ่มเกิดการอุดตันด้วยวิธี one way analysis of variance และ Duncan's new multiple range test ที่ความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม SPSS Release 9.0

วิธีการคำนวณข้อมูลต่างๆ ตลอดการทดลอง มีดังนี้

1) อัตราการเจริญเติบโต (growth rate) คำนวณจากสมการ

$$G = (\bar{W}_t - \bar{W}_0) / t$$

เมื่อ G คือ อัตราการเจริญเติบโต (กรัม น้ำหนักเปียก/วัน)

\bar{W}_t คือ น้ำหนักเฉลี่ยของปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม น้ำหนักเปียก)

\bar{W}_0 คือ น้ำหนักเฉลี่ยของปลาเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (กรัม น้ำหนักเปียก)

t คือ ระยะเวลา (วัน)

2) อัตราการรอดตาย (survival rate) คำนวณจากสมการ

$$\text{อัตราการรอดตาย} = \frac{\text{จำนวนปลาที่เหลือเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลาที่เริ่มการทดลอง}} \times 100$$

3) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio : FCR) คำนวณจากสมการ

$$FCR = F / (W_t - W_0)$$

เมื่อ F คือ น้ำหนักรวมของอาหารที่ใช้เลี้ยงปลาตลอดการทดลอง (กรัม น้ำหนักแห้ง)

W_t คือ น้ำหนักรวมทั้งหมดของปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม น้ำหนักเปียก)

W_0 คือ น้ำหนักรวมทั้งหมดของปลาเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (กรัม น้ำหนักเปียก)

4) ต้นทุนของระบบกรอง คำนวณจากสมการ ต้นทุนของระบบกรอง = ค่าก่อสร้างแกว้ไส่วัดตุกรอง + ค่าวัสดุกรอง + ค่าท่อ airlift

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1. คุณภาพน้ำที่บำบัดด้วยระบบกรองในท้องตลาด

1) อุณหภูมิ

ในแต่ละชุดกรองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง 64 วัน และมีค่าอยู่ในช่วง 26-29°C ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกตามรายงานของอุทัยรัตน์ (2538)

2) พีเอชและความเป็นด่างทั้งหมด

พีเอชมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับความ เป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดกรองและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใน

ช่วงต้นการทดลองจากการระเหยของน้ำที่มากกว่าการใช้แหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์และเมื่อมีของเสียเพิ่มขึ้นจากการปล่อยปลาและให้อาหารทำให้พีเอชและความเป็นด่างทั้งหมดค่อย ๆ ลดลงจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบกรองที่ทำให้เกิดกรด (Moriarty, 1997) โดยชุดกรองที่ 3 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับเซรามิก และ ammonia chip) ชุดกรองที่ 4 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ zeolite และถ่านกัมมันต์) และชุดกรองที่ 5 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) ไม่มีการอุดตัน และคาดว่าจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้น ทำให้พีเอชและความเป็นด่างทั้งหมดลดลงในปริมาณสูงกว่าชุดกรองที่ 1 (ใช้วัสดุกรองเป็นกรวดร่วมกับทรายหยาบ และทรายละเอียด) ชุดกรองที่ 2 (ใช้วัสดุกรองเป็นทรายละเอียดร่วมกับทรายหยาบและกรวด) ชุดกรองที่ 6 (ใช้วัสดุกรองเป็นทรายละเอียดร่วมกับใยพลาสติกขาว และถ่านกะลามะพร้าว) และชุดกรองที่ 7 (ใช้วัสดุกรองเป็นเศษปะการังร่วมกับ ammonia chip และถ่านกัมมันต์) ที่มีการอุดตันของระบบกรองเฉลี่ยอยู่ที่ 37.0 วัน, 34.0 วัน, 41.0 วัน และ 43.7 วัน ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าจะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันขึ้น ทั้งนี้เพราะในกระบวนการไนตริฟิเคชันแบคทีเรียไนตริฟายเออร์จะกำจัดแอมโมเนีย 1 มก./ลิตร ให้เป็นไนเตรตต้องใช้ออกซิเจน 4.18 กรัม สารอนินทรีย์คาร์บอน 0.09 กรัม และความเป็นด่างทั้งหมด 7.14 มก./ลิตร จึงจะได้เซลล์ใหม่เกิดขึ้น 0.15 กรัม ส่วนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระบบกรองที่อุดตัน (กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน) ในการกำจัดไนเตรต 1 มก./ลิตร ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้ความเป็นด่างทั้งหมดกลับคืนมา 3.57 มก./ลิตร (เกรียงศักดิ์, 2543; Liu and Han, 2004)

พีเอชและความเป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดกรองมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 5.18-8.53 มก./ลิตร และ 2-110 มก./ลิตร ตามลำดับ (Figure 3 และ 4 ตามลำดับ) ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมต่อปลาดุกดำ (*Clarias batrachus*) อยู่ใน ช่วง 7-8.5 และหากมีพีเอชอยู่ในช่วง 8.5-9.5 จะมีปัญหา กับความเป็นด่างทั้งหมดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปจาก NH_4^+ ไปอยู่ในรูป NH_3 ที่มีพิษสูงกว่า (Saha et al., 2002) ส่วนความเป็นด่างทั้งหมดที่เหมาะสมควรสูงกว่า 20 มก./ลิตร เพื่อเพิ่มผลผลิตปลาและต้านทานความเป็นกรดของแหล่งน้ำ (Boyd, 1990)

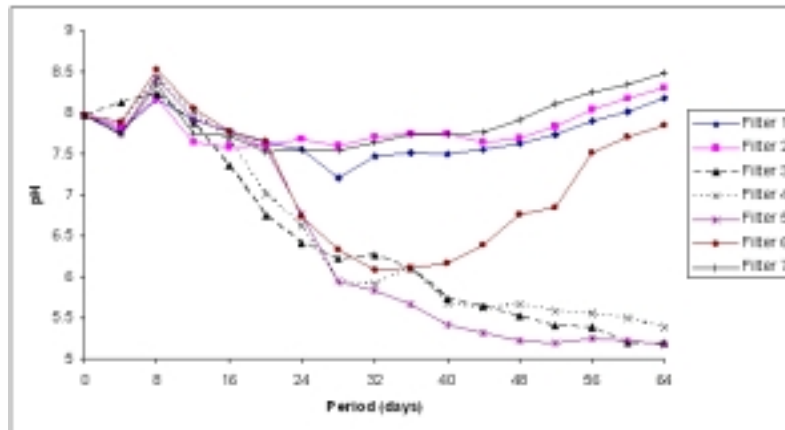


Figure 3. Mean pH in the water treated with 7 commercial biofilters.

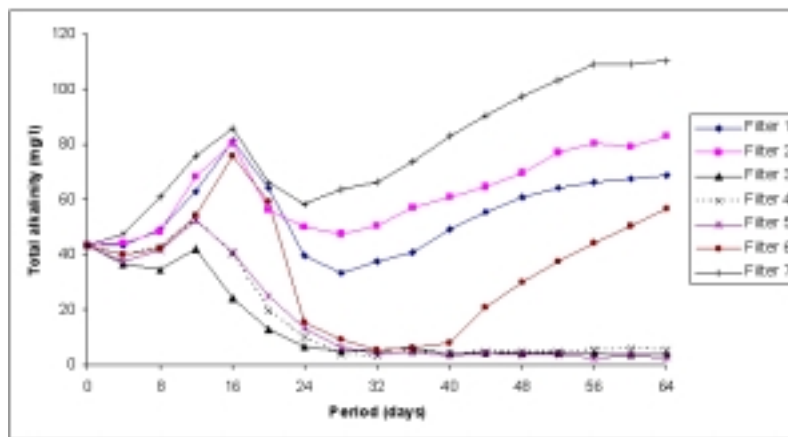


Figure 4. Mean total alkalinity level in the water treated with 7 commercial biofilters.

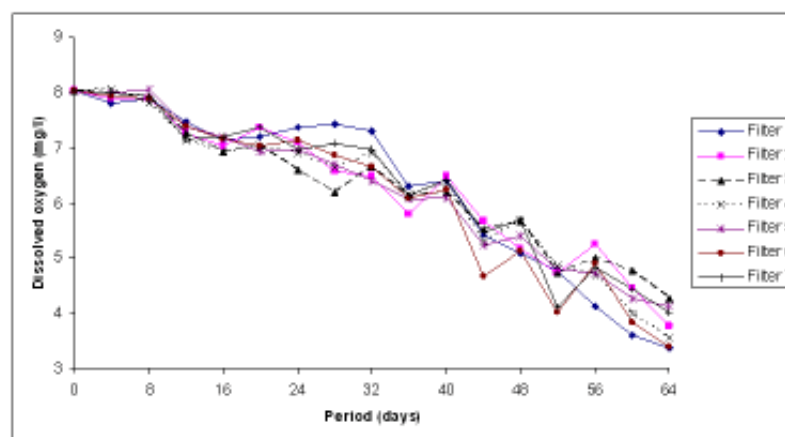


Figure 5. Mean dissolved oxygen concentration in the water treated with 7 commercial biofilters.

3) ออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแต่ละชุดกรองต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.4-4.3 มก./ลิตร (Figure 5) ซึ่งในการเลี้ยงปลาทุกตัวๆ ไปมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 5-6 มก./ลิตร และหากลดลงถึง 3.0-3.5 มก./ลิตร ก็ไม่เป็นอันตรายต่อปลา (อุทัยรัตน์, 2538; Colt, 2006) แต่หากออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 3 มก./ลิตร ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้า และจำกัดการเจริญของแบคทีเรียไนโตรฟายเออร์ (Masser *et al.*, 1999 อ้างโดย Akinwale and Faturoti, 2007) ส่วนบีโอดีและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในชุดกรองที่ไม่

อุดมมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 5.9-7.2 มก./ลิตร และ 39.8-56.3 มก./ลิตร ตามลำดับ (Figure 6 และ 7 ตามลำดับ) ซึ่งปริมาณบีโอดีในการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 30 มก./ลิตร (Boyd and Gross, 1999 อ้างโดย Xinglong and Boyd, 2005) และปริมาณบีโอดีที่สูงขึ้นอาจทำให้น้ำขาดแคลนออกซิเจนได้

ออกซิเจนละลายน้ำลดลงตลอดการทดลองอาจเกิดจากการใช้ของปลาและการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียพวกไนโตรฟายเออร์ (Turner and Bower, 1982) ส่วนบีโอดีในแต่ละชุดกรองเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตามกับของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เนื่องจากช่วงต้นการทดลองมี

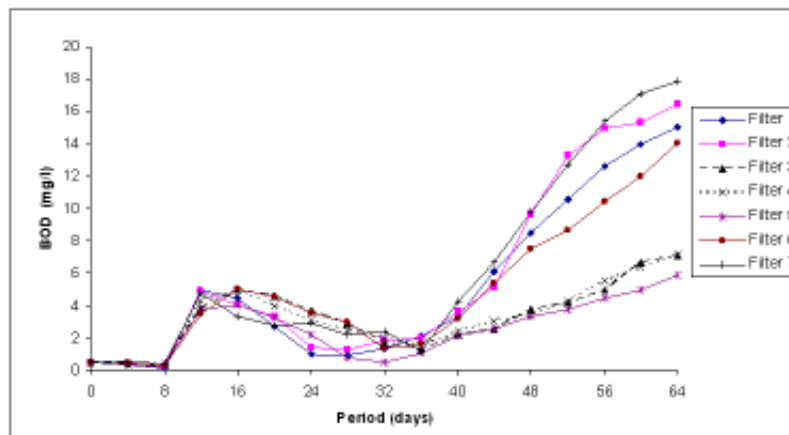


Figure 6. Mean BOD concentration in the water treated with 7 commercial biofilters.

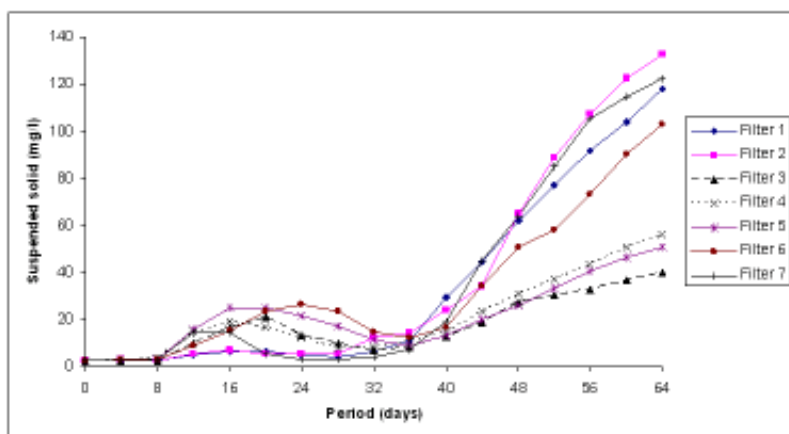


Figure 7. Mean suspended solid concentration in the water treated with 7 commercial biofilters.

ปริมาณฟิล์มจุลินทรีย์ไม่เพียงพอทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุกรองมีขนาดใหญ่ (มันลิน, 2542) เมื่อระยะเวลาการทดลองผ่านไประยะหนึ่งจึงเกิดฟิล์มจุลินทรีย์ช่วยลดช่องว่างระหว่างวัสดุกรองให้เล็กลง ซึ่งวัสดุกรองที่เรียงตัวจากความพรุนสูงไปหาความพรุนต่ำในชุดกรองที่ 1 (ใช้วัสดุกรองเป็นกรวดร่วมกับทรายหยาบ และทรายละเอียด) ทำให้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ติดอยู่ด้านบน ส่วนตะกอนขนาดรองลงมาจะลอดผ่านและติดอยู่ในชั้นกรองถัดไป แต่ในชุดกรองที่ 2 (ใช้วัสดุกรองเป็นทรายละเอียดร่วมกับทรายหยาบ และกรวด) วัสดุกรองด้านบนมีความพรุนต่ำตะกอนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จะติดอยู่ที่ผิวด้านบนทั้งหมดจึงเกิดการอุดตันได้ง่าย (มันลิน, 2542) ส่วนชุดกรองที่ 5 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) ที่มีช่องว่างของวัสดุกรองสูงๆ จำเป็นต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อให้ตะกอนขนาดใหญ่ตกทับกันและเกิดฟิล์มจุลินทรีย์ขึ้นเพื่อลดช่องว่างให้เล็กลงจึงสามารถกรองตะกอนที่มีขนาดเล็กได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของระบบกรอง

4) แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท

ปริมาณแอมโมเนียรวมสูงสุดในชุดกรองที่ 3 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับเซรามิก และ ammonia chip) ชุดกรองที่ 4 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ zeolite และถ่านกัมมันต์) และชุดกรองที่ 5 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) ซึ่งไม่เกิดการอุดตัน มีค่าอยู่ระหว่าง 2.464-3.584 มก./ลิตร (Figure

8) ซึ่งค่อนข้างเป็นอันตราย โดยปริมาณแอมโมเนียในรูปของ NH_3 ที่ทำให้ปลาจำจัดหลายชนิดตายในเวลาอันสั้นอยู่ที่ 0.2-2 มก./ลิตร (EIFAC, 1973) พีเอชที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปจาก NH_4^+ ไปอยู่ในรูป NH_3 ที่มีพิษสูงกว่าและปริมาณแอมโมเนีย 3.0 มก. NH_3 /ลิตร มีพิษต่อปลาน้ำจืดที่พีเอช 8.5 แต่ไม่เป็นอันตรายที่พีเอช 6.0 (Lewbart, 1998) สอดคล้องกับ Tomasso และคณะ (1980) ที่พบว่าขณะที่พีเอช 9 มีปริมาณแอมโมเนียรวม 4.5 มก./ลิตร สามารถทำให้ปลาคออเมริกัน (channel catfish) ตายหมดภายใน 24 ชม. และหากลดความเป็นกรดต่างให้เหลือ 7 ต้องมีปริมาณแอมโมเนียรวมถึง 263.6 มก./ลิตร จึงทำให้ปลาตาย ส่วนปริมาณไนไตรท์สูงสุดในชุดกรองที่ไม่อุดตันมีค่าอยู่ในช่วง 2.78-4.53 มก./ลิตร (Figure 9) ซึ่งค่าความเป็นพิษ (96-h LC50) ของไนไตรท์ต่อปลาน้ำจืดหลายชนิดอยู่ในช่วง 0.66-200 มก./ลิตร ในขณะที่มีอันตรายต่อปลาตุ๊กเมื่อมีค่าสูงกว่า 1 มก./ลิตร และความเป็นพิษของไนไตรท์สูงขึ้นเมื่อพีเอชลดลง (Boyd, 1990; Lewbart, 1998; Colt, 2006) ในขณะที่ปริมาณไนเตรทสูงสุดในแต่ละชุดกรองมีค่าอยู่ในช่วง 41.94-61.95 มก./ลิตร (Figure 10) โดยปกติไนเตรทมีความเป็นพิษต่อปลาน้ำจืดต่ำมากและค่า 96-h LC50 ของไนเตรทสูงกว่า 1,000 มก./ลิตร (Colt, 2006)

ชุดกรองที่ใช้วัสดุกรองเป็น zeolite, ammonia chip และถ่านกัมมันต์ (ชุดกรองที่ 3, 4 และ 7) สามารถ

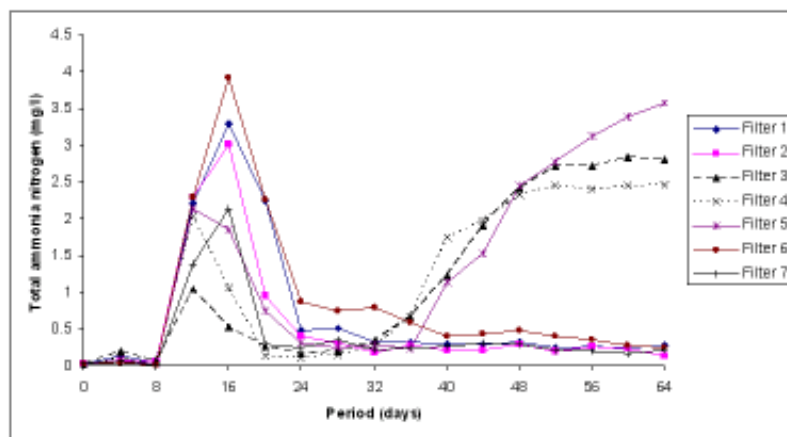


Figure 8. Mean total ammonia nitrogen concentration in the water treated with 7 commercial biofilters.

ช่วยควบคุมปริมาณแอมโมเนียในช่วงต้นการทดลองได้ดี (Figure 8) โดยกระบวนการดูดซับ (absorption) (มันสิน, 2542; มันสิน และไพพรรณ, 2539) แต่การบำบัดแอมโมเนียในระยะต่อมาเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นหลัก ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุกรองที่มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียร่วมกับวัสดุกรองที่ชักนำให้เกิดไนตริฟิเคชันจึงมีความได้เปรียบ โดยช่วงระยะเวลาการทดลองที่ 15 วันแรกในแต่ละชุดทดลองที่วัสดุกรองเป็นพวก zeolite, ammonia chip และถ่านกัมมันต์บำบัดโดยการดูดซับและมีการเจริญของฟิล์มจุลินทรีย์เกิดขึ้นบริเวณผิววัสดุกรอง ต่อมาที่ระยะเวลาการทดลองหลังจาก 15 วัน การดูดซับโดยวัสดุกรองถึง

ขีดจำกัดและฟิล์มจุลินทรีย์ในระบบกรองมีปริมาณเพียงพอในการบำบัดแอมโมเนีย และไนไตรท์ และจากการทดลองพบว่า ระบบไนตริฟิเคชันจะทำงานได้สมบูรณ์หลังจาก 30 วัน เป็นต้นไป ซึ่งระบุได้จากการที่ปริมาณไนไตรท์ลดลงจนหมดและเกิดการสะสมของไนเตรทอย่างต่อเนื่อง (Figure 9 และ 10) ซึ่งขณะที่มีออกซิเจนเพียงพอและมีของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถชักนำให้บริเวณผิววัสดุกรองมีการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus* และ *Nitrosolobus* เปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ ต่อมาแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrobacter*, *Nitrospira* และ *Nitrococcus* ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์

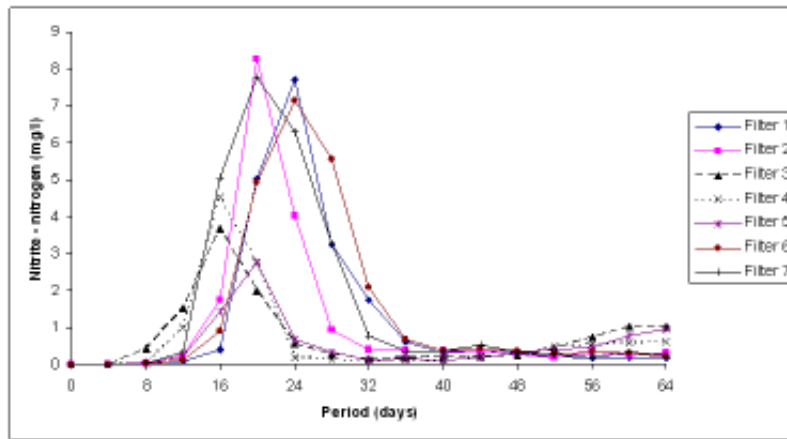


Figure 9. Mean nitrite-nitrogen concentration in the water treated with 7 commercial biofilters.

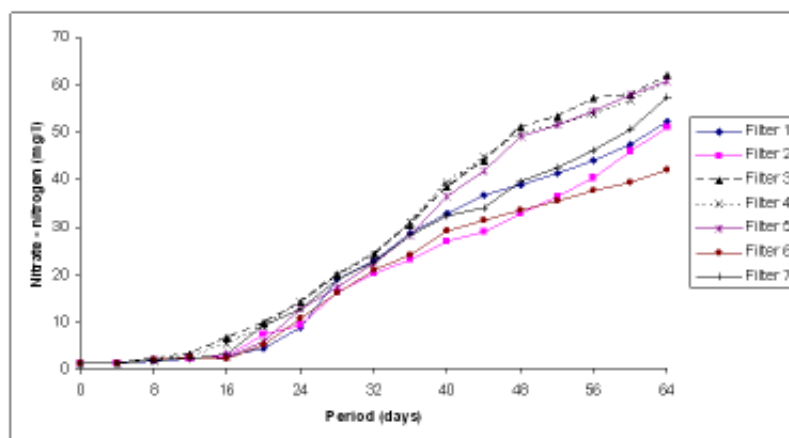


Figure 10. Mean nitrate-nitrogen concentration in the water treated with 7 commercial biofilters.

ไปเป็นไนเตรท ซึ่งปัจจัยหลักที่ควบคุมกลไกเหล่านี้คือความสามารถในการให้ฟิล์มจุลินทรีย์เกาะผิววัสดุกรอง โดยวัสดุกรองที่เป็นเม็ดเล็ก ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์, ททราย, เซรามิก และ ammonia chip สามารถดักตะกอนแขวนลอยได้ดีแต่ถอดล้างง่าย ส่วนวัสดุกรองที่เป็นแผ่นลอนหรือตาข่าย เช่น โยพลาستيكหยาบและโยพลาติกขาวสามารถดักตะกอนแขวนลอยได้น้อยแต่ถอดล้างยาก และวัสดุที่ทำจาก polyethylene มีอัตราการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูงสุด (เกรียงศักดิ์, 2543; ธงชัย, 2544; Boyd, 1990; Singh et al., 2004) ทำให้ชุดกรองที่ใช้โยพลาستيكหยาบเป็นวัสดุกรองสามารถลดแอมโมเนียและไนไตรท์ที่มีค่าสูงสุดเพียง 1.05-2.13 มก./ลิตร และ 2.78-4.53 มก./ลิตร ตามลำดับ (Figure 8 และ 9 ตามลำดับ) (ช่วงที่มีความเป็นด่างทั้งหมดเพียงพอที่ระยะเวลาการทดลอง 0-32 วัน) ซึ่งต่ำกว่าชุดกรองอื่นๆ อย่างชัดเจน สอดคล้องกับ Azim และคณะ (2004) ซึ่งใช้ไมไฟในการเพิ่มพื้นที่ผิวให้เกิด periphyton (biofilm) สามารถลดแอมโมเนีย ไนไตรท์และเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำได้ดีกว่าการไม่เพิ่มพื้นที่ผิว แต่แบคทีเรียไนไตรฟายเออร์เปลี่ยนแอมโมเนีย 1 มก./ลิตร ให้เป็นไนเตรททำให้ ความเป็นด่างทั้งหมดลดลง 7.14 มก./ลิตร (เกรียงศักดิ์, 2543; Liu and Han, 2004) ทำให้ในชุดกรองที่ไม่ถอดล้าง (ชุดกรองที่ 3, 4 และ 5) มีความเป็นด่างลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาการทดลอง 36 วัน (Figure 4) ปริมาณแอมโมเนียจึงเพิ่มขึ้นจนจบการทดลองและปริมาณไนไตรท์สูงขึ้นช่วงปลายการทดลอง ส่วนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถกำจัดไนเตรท 1 มก./ลิตร ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้ความเป็นด่างทั้งหมดกลับคืนมา 3.57 มก./ลิตร (เกรียงศักดิ์, 2543) ชุดกรองที่ถอดล้าง (ชุดกรองที่ 1, 2, 6 และ 7) จึงไม่มีการขาดแคลนความเป็นด่างทั้งหมดในการกำจัดแอมโมเนียและไนไตรท์ อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดหมุนเวียนที่บำบัดแบบไนตริฟิเคชันเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดการสะสมของไนเตรทซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ในแต่ละชุดกรองจึงมีปริมาณไนเตรทเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนจบการทดลอง (Figure 10) แต่ในชุดกรองที่ถอดล้างมีปริมาณไนเตรทต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ สอดคล้องกับ Moriarty (1997) ที่พบว่าเมื่อมีสารอินทรีย์จำนวนมาก ๆ จุลินทรีย์ย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นในมวลน้ำและผิวตะกอน แต่ตะกอนที่มี

การทับถมอยู่ด้านล่างเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จึงทำให้ปริมาณไนเตรทลดลง

2. อัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโตของปลาในแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.39-8.91 กรัม/วัน (Table 1) ซึ่งสูงกว่าการทดลองของ Akinwale และ Faturoti (2006) ที่มีอัตราการเจริญเติบโตของปลาคูอยู่ในช่วง 4.58-6.29 กรัม/วัน เนื่องจากในการทดลองนี้มีการปล่อยปลาความหนาแน่นต่ำกว่าและมีคุณภาพน้ำโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาคู ดังผลการศึกษาคูคุณภาพน้ำที่กล่าวไปแล้ว

3. อัตราการรอดตาย

อัตราการรอดตายของปลาในแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 84.44-95.56% (Table 1) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนในบ่อคอนกรีตกลมที่มีค่าอยู่ระหว่าง 79.5-91% (ณรงค์, 2540) แต่การตายของปลาทั้งหมดเกิดขึ้นที่ระยะเวลาการทดลอง 12 ถึง 28 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์มีค่าสูงสุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Das และคณะ (2004) ซึ่งพบว่าเกิดการเกิดความเครียดสูงๆ จากสารพิษ (แอมโมเนียและไนไตรท์) ส่งผลให้อัตราเมตาบอลิซึมสูงขึ้นและอาจมีอัตราการตายเพิ่มสูงขึ้นหากไม่มีการจัดการที่ดี

4. อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาในแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.21-0.25 (Table 1) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าการเลี้ยงปลาคูในระบบน้ำหมุนเวียนของ ณรงค์ (2540) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.24-1.49 เนื่องจากการให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว เพียงพอต่อความต้องการของปลาคู (กลุ่มรัก เกษตร, 2541) ประกอบกับสัตว์น้ำบางชนิดและพวกสัตว์ขนาดเล็กสามารถกินจุลินทรีย์เป็นอาหารได้โดยตรง (Moriarty, 1997) ในขณะที่ Akinwale และ Faturoti (2007) รายงานว่าในการเลี้ยงปลาตระกูล catfish (ขนาดปลาน้ำ) มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้ออยู่ในช่วง 0.60-0.78 และ

Table 1. Growth rate, survival rate and feed conversion ratio (mean \pm SD) of the catfish reared in glass aquaria equipped with 7 commercial biofilters for 64 days.

Filter	Growth rate (g/day wet weight)	Survival rate (%)	Feed conversion ratio
1	8.91 \pm 0.05	84.44 \pm 10.18	0.21 \pm 0.01
2	8.08 \pm 0.79	88.89 \pm 3.85	0.23 \pm 0.02
3	8.42 \pm 1.27	91.11 \pm 3.85	0.23 \pm 0.04
4	8.13 \pm 0.84	93.33 \pm 0.00	0.23 \pm 0.03
5	7.94 \pm 0.53	84.45 \pm 3.85	0.24 \pm 0.02
6	7.39 \pm 0.32	85.00 \pm 5.00	0.25 \pm 0.01
7	8.24 \pm 0.82	95.56 \pm 7.70	0.23 \pm 0.02

No significant difference (P>0.05) among treatments

Table 2. Price and time before clogging of 7 commercial biofilters.

Filter	Price (Baht)	Time before clogging (days)
1	111.00 ^a	37.0 ^a
2	111.00 ^a	34.0 ^a
3	159.30 ^c	> 64.0 ^c
4	144.30 ^d	> 64.0 ^c
5	121.50 ^c	> 64.0 ^c
6	105.40 ^b	41.0 ^b
7	162.00 ^f	43.7 ^b

In the same column, means with the same superscript do not differ significantly (P>0.05)

ลดลงต่ำกว่านี้หากเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนและมีระบบกรองที่ดี

5. ต้นทุนของระบบกรอง

ต้นทุนส่วนใหญ่ของระบบกรองในแต่ละชุดทดลอง คือ ก่อถังแก้วใส่วัสดุกรองที่มีราคาเท่ากับ 80 บาท ส่วนวัสดุกรองพวกทรายต่างๆ และกรวดมีราคา 10 บาท/กก. แต่ราคา ammonia chip, เซรามิก, zeolite และถ่านกัมมันต์ มีราคาอยู่ที่ 100 บาท/กก. ชุดกรองที่ 6 (ใช้วัสดุกรองเป็นทรายคละขนาดร่วมกับใยพลาสติกขาวและถ่านกัมมันต์) มีราคาถูกที่สุด (105.40 บาท) และชุดกรองที่ 7 (ใช้วัสดุกรองเป็นเศษปะการังร่วมกับ ammonia chip และถ่าน

กัมมันต์) มีราคาสูงที่สุด (162.00 บาท) (Table 2) หากเปรียบเทียบราคาต้นทุนของระบบกรองต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำโดยรวม พบว่า ชุดกรองที่ 5 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) ดีที่สุดเพราะใยพลาสติกหยาบ และ bioball มีพื้นที่ผิวและความสามารถในการกักเก็บตะกอนสูงจึงมีอายุการใช้งานยาวนาน

6. ระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของระบบกรอง

วัสดุกรองที่เป็นเม็ดเล็กๆ เช่น ถ่านกัมมันต์, ถ่านกัลมาเซพัว, ทราย, เซรามิก และ ammonia chip สามารถดักตะกอนแขวนลอยได้ดีแต่อุดตันง่าย โดยเฉพาะวัสดุกรองที่เป็นเม็ดขนาดกลางจะมีรูพรุนต่ำจึงอุดตันได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่วนวัสดุกรองที่เป็นแผ่นลอนหรือตาข่าย เช่น ใยพลาสติกหยาบ bioball และใยพลาสติกขาวสามารถดักตะกอนแขวนลอยได้น้อยแต่อุดตันยาก (มันลิน, 2542; เกรียงศักดิ์, 2543) ทำให้ชุดกรองที่ 5 (ใช้วัสดุกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) ไม่เกิดการอุดตันตลอดระยะเวลา 64 วัน (Table 2)

สรุปผลการทดลอง

คุณภาพน้ำที่บำบัดด้วยชุดกรองที่จำหน่ายในท้องตลาดตลอดระยะเวลาการทดลอง 64 วัน พบว่าปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์ที่ลดลงส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรียไนตริฟายเออร์เปลี่ยนแปลงแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งชุดกรอง

ที่ใช้ใยพลาสติกหยาบ 1 แผ่น ร่วมกับ bioball 37 ลูก มีความเหมาะสมที่สุดและมีราคาเพียง 121.50 บาท โดยสามารถลดปริมาณแอมโมเนียและไนโตรที่ให้อยู่ในสภาวะปกติ ใช้เวลาเท่ากับ 16 วัน และลดปริมาณของแข็งแขวนลอยให้เหลือ 7.4 มก./ลิตร ใช้เวลา 28 วัน หลังจากปล่อยปลาและให้อาหาร แต่จะมีปัญหาเกี่ยวกับการลดลงของค่าความเป็นด่างทั้งหมดซึ่งจุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งคาร์บอน ส่งผลให้ฟิล์มจุลินทรีย์ที่เกาะบริเวณผิววัสดุกรองเริ่มตายและหลุดออก ปริมาณแอมโมเนีย ไนโตร และของแข็งแขวนลอยจึงเพิ่มสูงขึ้นในช่วงปลายการทดลองขณะที่ชุดกรองไม่มีการอุดตัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวาริชศาสตร์ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและให้ข้อเสนอแนะที่ดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวาริชศาสตร์ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ในการทดลอง ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวาริชศาสตร์ทุก ๆ คนที่ได้อำนวยความสะดวกในระหว่างดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มรักเกษตร. 2541. การเพาะเลี้ยงปลาตก. นนทบุรี : ฐานเกษตรกรรม.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 4. ปทุมธานี : สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ณรงค์ คงมาก. 2540. การเพาะเลี้ยงปลาตก : เลี้ยงปลาตก ระบบน้ำหมุนเวียนในบ่อคอนกรีตกลม. นนทบุรี : ฐานเกษตรกรรม.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- พรเลิศ จันทร์รัชชกุล เจ เอฟ เทอร์นบอด และชลอ ลิมสุวรรณ. 2537. คู่มือการเลี้ยงและการป้องกันโรคกุ้งกุลาดำ. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยสุขภาพสัตว์น้ำ กรมประมง.
- มนต์ทิพย์ เทียนสุวรรณ. 2536. ชีวสถิติและระเบียบวิธีวิทยาการวิจัย. สงขลา : ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มันสิน ดัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ดัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุนิตย์ โรจนพิทยากุล เจนจิตต์ คงกำเนิด และเขาวนิตย์ ดนยดล. 2547. การเลี้ยงปลากะรังดอกแดง *Epinephelus coioides* (Hamilton) ในระบบน้ำหมุนเวียน. เอกสารวิชาการฉบับที่ 8/2547. สงขลา : สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. กรมประมง.
- อุทัยรัตน์ ณ นคร. 2538. ปลาตก : การเพาะพันธุ์และการเลี้ยง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Akinwale, A. O. and Faturoti, E. O. 2007. Biological performance of African catfish (*Clarias gariepinus*) cultured in recirculating system in Ibadan. Aquacult. Eng. 36 : 18-23.
- APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Azim, M.E., Wahab, M.A., Biswas, P.K., Asaeda, T., Fujino, T. and Verdgem, M.C.J. 2004. The effect of periphyton substrate density on production in freshwater polyculture ponds. Aquaculture 232 : 441-453.
- Boyd, C.E. 1990. Water Quality in Ponds for Aquaculture. Alabama : Birmingham Publishing Company.
- Boyd, C.E. and Tucker, C.S. 1992. Water Quality and Pond Soil Analyses for Aquaculture. Alabama : Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University.
- Colt, J. 2006. Water quality requirements for reuse systems. Aquacult. Eng. 34 : 143-156.
- Das, P.C., Ayyappan, S., Jena, J.K. and Das, B.K. 2004. Effect of sub-lethal nitrite on selected haematological parameters in fingerling *Catla catla* (Hamilton). Aquacult. Res. 35 : 874-880.

- EIFAC (European Inland Fisheries Advisory Commission). 1973. Water quality criteria for European freshwater fish. Report on ammonia and inland fisheries. *Water Res.* 7 : 1011-1022.
- Laohavisuti, N. 1997. Aquatic Plant for Improving Water Quality in Aquaria Fish Culture. Ph.D. Dissertation, Asian Institute of Technology.
- Lewbart, G.A. 1998. Clinical Nutrition of Ornamental Fish. *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine* 7 : 154-158.
- Liu, F. and Han, W. 2004. Reuse strategy of wastewater in prawn nursery by microbial remediation. *Aquaculture* 230 : 281-296.
- Moe, M.A. 1992. *The Marine Aquarium Reference System and Invertebrates*. Florida : Green Turtle Publication.
- Moriarty, D.J.W. 1997. The role of microorganisms in aquaculture ponds. *Aquaculture* 151 : 333-349.
- Ridha, M.T. and Cruz, E.M. 2001. Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system. *Aquacult. Eng.* 24 : 157-166.
- Saha, N., Kharbuli, Z.Y., Bhattacharjee, A., Goswami, C. and Haussingerb, D. 2002. Effect of alkalinity (pH 10) on uregenesis in the air-breathing walking catfish, *Clarias batrachus*. *Comp. Biochem. Physiol.* 132 A : 353-364.
- Singh, R.K., Vartak, V.R., Balange, A.K. and Ghughuskar, M.M. 2004. Water quality management during transportation of fry of Indian major carps, *Catla catla* (Hamilton), *Labeo rohita* (Hamilton) and *Cirrhinus mrigala* (Hamilton). *Aquaculture* 235 : 297-302.
- Tomasso, J.R., Goudie, C.A., Simco, B.A. and Davis, K.B. 1980. Effect of environmental pH and calcium on ammonia toxicity in channel catfish. *Trans Am. Fish. Soc.* 109 : 229-234.
- Turner, D.T. and Bower, C.E. 1982. Removal of ammonia by bacteriological nitrification during the simulated transport of marine fishes. *Aquaculture* 29 : 347-357.
- Xinglong, J. and Boyd, C. E. 2005. Measurement of 5-day biochemical oxygen demand without sample dilution or bacterial and nutrient enhancement. *Aquacult. Eng.* 33 : 250-257.