บทที่ 4
วิจารณ์

1.1 คุณภาพน้ำที่บำบัดด้วยระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาด

1) อุณหภูมิ

ในแต่ละชุดทดลองมีแนวโน้มการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง 64 วัน และมีค่าอยู่ในช่วง 26-29 °ซ. ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกตามรายงานของอุทัยรัตน์ (2538)

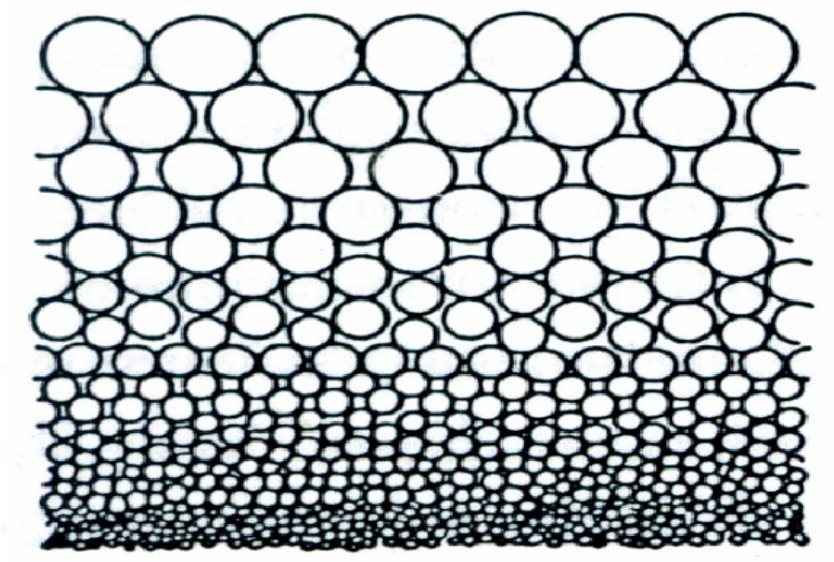
2) ความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมด

ค่าความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดได้รับอิทธิพลจากระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาด ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาดและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งความเป็นกรด-ด่างมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับความเป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดทดลองและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นการทดลองจากการระเหยของน้ำที่มากกว่าการใช้แหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์และเมื่อมีของเสียเพิ่มขึ้นจากการปล่อยปลาและให้อาหารทำให้ความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดค่อยๆ ลดลงจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบกรองทำให้เกิดกรด (Moriarty, 1997) โดยชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดลดลงในปริมาณสูงกว่าชุดทดลองที่อุดตันเพราะแบคทีเรียไนตริฟายเออร์กำจัดแอมโมเนีย 1 มก./ล. ให้เป็นไนเตรทต้องใช้ออกซิเจน 4.18 ก. สารอนินทรีย์คาร์บอน 0.09 ก. และความเป็นด่างทั้งหมด 7.14 มก./ล. จึงได้เซลล์ใหม่เกิดขึ้น 0.15 ก. ส่วนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถกำจัดไนเตรท 1 มก./ล. ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้ความเป็นด่างทั้งหมดกลับคืนมา 3.57 มก./ล. (เกรียงศักดิ์, 2543; Liu and Han, 2004)

ความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 5.18-8.53 และ 2-110 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของปลาดุกด้าน (*Clarias batrachus*) อยู่ในช่วง 7-8.5 และหากมีความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 8.5-9.5 จะมีปัญหากับความเป็นด่างทั้งหมดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปจาก NH_4^+ ไปอยู่ในรูป NH_3 ที่มีพิษสูงกว่า (Saha *et al*., 2002) ส่วนสมหมาย (2539) แนะนำว่าความเป็นด่างทั้งหมดที่เหมาะสมควรสูงกว่า 20 มก./ล. เพื่อเพิ่มผลผลิตปลาและต้านทานความเป็นกรดของแหล่งน้ำ

3) ออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้รับอิทธิพลจากระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาด ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาดและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงตลอดการทดลอง 64 วัน จากการใช้ของปลาและการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์และพวกแบคทีเรียไนตริฟายเออร์ (Turner and Bower, 1982) ส่วนบีโอดีในแต่ละชุดทดลองเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตามกับของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เนื่องจากช่วงต้นการทดลองมีปริมาณฟิล์มจุลินทรีย์ไม่เพียงพอทำให้ช่องว่างระหว่างสารกรองมีขนาดใหญ่ (มั่นสิน, 2542) เมื่อระยะเวลาการทดลองผ่านไประยะหนึ่งจึงเกิดฟิล์มจุลินทรีย์ช่วยลดช่องว่างระหว่างสารกรองให้เล็กลง ส่วนสารกรองที่เป็นทราย ถ่านกะลามะพร้าว zeolite และถ่านกัมมันต์ในแต่ละชุดทดลองที่เรียงตัวจากความพรุนสูงไปหาความพรุนต่ำทำให้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ติดอยู่ด้านบน ส่วนตะกอนขนาดรองลงมาจะลอดผ่านและติดอยู่ในชั้นกรองถัดไป (รูปที่ 32) หากชั้นกรองด้านบนมีความพรุนต่ำตะกอนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จะติดอยู่ที่ผิวด้านบนทั้งหมดจึงเกิดการอุดตันได้ง่าย (มั่นสิน, 2542) สารกรองที่มีช่องว่างสูงๆ เช่น ใยพลาสติกหยาบ และ bioball จำเป็นต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อให้ตะกอนขนาดใหญ่ตกทับกันและเกิดฟิล์มจุลินทรีย์ขึ้นเพื่อลดช่องว่างให้เล็กลงจึงสามารถกรองตะกอนที่มีขนาดเล็กได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของระบบกรอง



รูปที่ 32 รูปตัดตามขวางของเครื่องกรองแบบอุดมคติ (มั่นสิน, 2542)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแต่ละชุดทดลองต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.4-4.3 มก./ล. ซึ่งในการเลี้ยงปลาดุกทั่วๆ ไปมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 5-6 มก./ล. และหากลดลงถึง 3.0-3.5 มก./ล. ก็ไม่เป็นอันตรายต่อปลา (อุทัยรัตน์, 2538; Colt, 2006) แต่หากออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 3 มก./ล. ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้า และจำกัดการเจริญของแบคทีเรียไนตริฟายเออร์ (Masser *et al*., 1999 อ้างโดย Akinwole and Faturoti, 2007) ส่วนบีโอดีและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 5.9-7.2 และ 39.8-56.3 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณบีโอดีในการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 30 มก./ล. (Boyd and Gross, 1999 อ้างโดย Xinglong and Boyd, 2005) และปริมาณบีโอดีที่สูงขึ้นอาจทำให้น้ำขาดแคลนออกซิเจนได้ (ไมตรี และจารุวรรณ, 2528 อ้างโดย ประทีป, 2544) ในขณะที่บ่อเลี้ยง channel catfish มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดอยู่ในช่วง 56.95-105.06 มก./ล. และหากสูงกว่านี้ ปลามีโอกาสเกิดโรค gill disease ได้สูง (Tucker *et al*., 1996; Seo and Boyd, 2001)

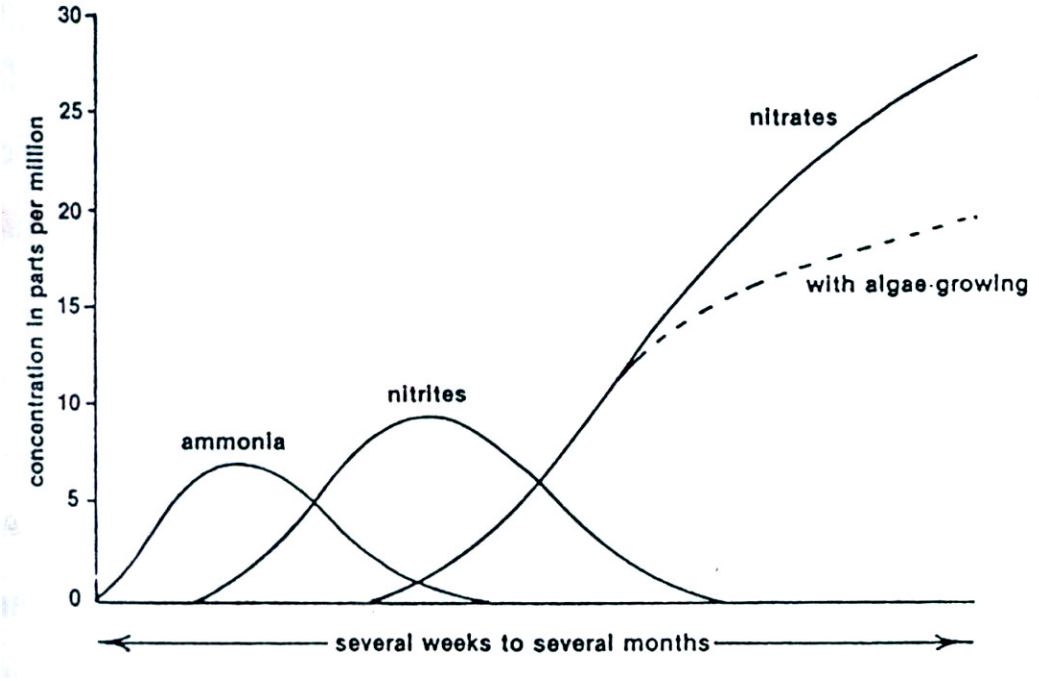
4) แอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรท

ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรทได้รับอิทธิพลจากระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาด ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกรองที่จำหน่ายในท้องตลาดและระยะเวลาการทดลอง โดยสารกรองที่เป็นเศษปะการัง, ถ่านกัมมันต์, ceramic, ammonia chip และ zeolite สามารถดูดซับแอมโมเนียและไนไตรท์ได้ดี (มั่นสิน, 2542; มั่นสินและไพพรรณ, 2539) แต่ในการทดลองนี้ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์สูงสุดไม่แตกต่างกับสารกรองที่เป็นทรายเพราะแอมโมเนียและไนไตรท์ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่หายไปจากการเปลี่ยนรูปของแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์เป็นหลัก (Singh *et al*., 2004) ซึ่งขณะที่มีออกซิเจนเพียงพอและของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถชักนำให้บริเวณผิวสารกรองมีการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus* และ *Nitrosolobus* เปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ ต่อมาแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrobacter*, *Nitrospira* และ *Nitrococcus* ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท (รูปที่ 33) ซึ่งปัจจัยหลักที่ควบคุมกลไกเหล่านี้คือความสามารถในการให้ฟิล์มจุลินทรีย์เกาะผิวสารกรอง โดยสารกรองที่เป็นเม็ดเล็กๆ เช่น ถ่านกัมมันต์, ทราย, ceramic และ ammonia chip สามารถดักตะกอนแขวนลอยได้ดีแต่อุดตันง่าย ส่วนสารกรองที่เป็นแผ่นลอนหรือตาข่าย เช่น ใยพลาสติกหยาบและใยพลาสติกขาวสามารถดักตะกอนแขวนลอยได้น้อยแต่อุดตันยากและหากวัสดุทำจาก Polyethylene มีอัตราการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูงสุด (เกรียงศักดิ์, 2543; ธงชัย, 2544; Boyd, 1990; Singh *et al*., 2004) ทำให้ชุดทดลองที่ใช้ใยพลาสติกหยาบเป็นสารกรองสามารถลดแอมโมเนียและไนไตรท์ให้มีค่าสูงสุดเพียง

1.046–2.147 และ 2.778-4.527 มก./ล. ตามลำดับ (ช่วงที่มีความเป็นด่างทั้งหมดเพียงพอที่ระยะเวลาการทดลอง 0-32 วัน) ซึ่งต่ำกว่าชุดทดลองอื่นๆ อย่างชัดเจน สอดคล้องกับ Azim และคณะ (2004) ใช้ไม้ไผ่ในการเพิ่มพื้นที่ผิวให้เกิด periphyton (biofilm) สามารถลดแอมโมเนียไนไตรท์และเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำได้ดีกว่าการไม่เพิ่มพื้นที่ผิว แต่แบคทีเรียไนตริฟายเออร์กำจัดแอมโมเนีย 1 มก./ล. ให้เป็นไนเตรทต้องการสารอนินทรีย์คาร์บอน 0.09 ก. ความเป็นด่างทั้งหมดลดลง 7.14 มก./ล. และได้เซลล์ใหม่เกิดขึ้น 0.15 ก. (เกรียงศักดิ์, 2543; Liu and Han 2004) ทำให้ในแต่ละชุดทดลองที่ระบบกรองไม่อุดตันมีความเป็นด่างลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาการทดลอง 36 วัน ปริมาณแอมโมเนียจึงเพิ่มขึ้นจนจบการทดลองและปริมาณไนไตรท์สูงขึ้นช่วงปลายการทดลอง ส่วนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถการกำจัดไนเตรท 1 มก./ล. ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้ความเป็นด่างทั้งหมดกลับคืนมา 3.57 มก./ล. (เกรียงศักดิ์, 2543) ระบบกรองที่อุดตันจึงไม่มีการขาดแคลนความเป็นด่างทั้งหมดในการกำจัดแอมโมเนียและไนไตรท์ อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดหมุนเวียนที่บำบัดแบบไนตริฟิเคชันเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดการสะสมของไนเตรท (Honda,1993 อ้างโดย Rijn *et al*., 1995) ในแต่ละชุดทดลองจึงมีปริมาณไนเตรทเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนจบการทดลอง แต่ในชุดทดลองที่อุดตันมีปริมาณไนเตรทต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ สอดคล้องกับ Moriarty (1997) ที่พบว่าเมื่อมีสารอินทรีย์จำนวนมากๆ จุลินทรีย์ย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นในมวลน้ำและผิวตะกอน แต่ตะกอนที่มีการทับถมอยู่ด้านล่างเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงทำให้ปริมาณไนเตรทลดลง

ปริมาณแอมโมเนียรวมสูงสุดในแต่ละชุดทดลองที่ระบบกรองไม่อุดตันมีค่าอยู่ระหว่าง 2.464-3.584 มก./ล. ตามลำดับ โดยปริมาณแอมโมเนียในรูปของ NH_3 ที่ทำให้ปลาน้ำจืดหลายชนิดตายในเวลาอันสั้นอยู่ที่ 0.2-2 มก./ล. (EIFAC, 1973) ซึ่งความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปจาก NH_4^+ ไปอยู่ในรูป NH_3 ที่มีพิษสูงกว่าและปริมาณแอมโมเนีย 3.0 มก. NH_3 /ล. มีพิษต่อปลาน้ำจืดที่ความเป็นกรด-ด่าง 8.5 แต่ไม่เป็นอันตรายที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.0 (Lewbart, 1998) สอดคล้องกับ Tomasso และคณะ (1980) พบว่า ขณะที่ความเป็นกรด-ด่าง 9 มีปริมาณแอมโมเนียรวม 4.5 มก./ล. สามารถทำให้ปลา channel catfish ตายหมดภายใน 24 ชม. และหากลดความเป็นกรดด่างให้เหลือ 7 ต้องมีปริมาณแอมโมเนียรวมถึง 263.6 มก./ล. ส่วนปริมาณไนไตรท์สูงสุดในชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีค่าอยู่ในช่วง 2.778-4.527 มก./ล. ซึ่ง 96-h LC_{50} ของไนไตรท์ต่อปลาน้ำจืดหลายชนิดอยู่ในช่วง 0.66-200 มก./ล. ในขณะที่มีอันตรายต่อปลาดุกเมื่อมีค่าสูงกว่า 1 มก./ล. และความเป็นพิษของไนไตรท์สูงขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างลดลง

(สมหมาย, 2539; Lewbart, 1998; Colt, 2006) ในขณะที่ปริมาณไนเตรทสูงสุดในแต่ละชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 41.94-61.95 มก./ล. โดยปกติไนเตรทมีอันตรายต่อปลาน้ำจืดต่ำมากและ 96 h LC_{50} ของไนเตรทต้องสูงกว่า 1000 มก./ล. (Colt, 2006)



รูปที่ 33 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในตู้เลี้ยงสัตว์น้ำ (Emmen, 1995 อ้างโดย สมรักษ์, 2543)

1.2 อัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกในแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.39-8.91 ก./วัน ซึ่งสูงกว่าการทดลองของ Akinwole และ Faturoti (2007) ที่มีการปล่อยปลาดุก 150-300 ตัว/ลบ.ม. ให้อาหาร 3-6 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกอยู่ในช่วง 4.58-6.29 ก./วัน เนื่องจากในการทดลองนี้มีการปล่อยปลาความหนาแน่นเพียง 130 ตัว/ลบ.ม. และมีคุณภาพน้ำโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาดุก

1.3 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกในแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.21-0.25 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าการเลี้ยงปลาดุกในระบบน้ำหมุนเวียนของ ณรงค์ (2540) ที่ให้อาหารจนอิ่มจึงมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้ออยู่ในช่วง 1.24-1.49 เนื่องจากการให้อาหาร 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว เพียงพอต่อความต้องการของปลาดุก (กลุ่มรักเกษตร, 2541) ประกอบกับสัตว์น้ำบางชนิดและพวกสัตว์ขนาดเล็กสามารถกินจุลินทรีย์เป็นอาหารได้โดยตรง (Moriarty, 1997) ในขณะที่ Akinwole และ Faturoti (2007) แนะนำว่าในการเลี้ยงปลาตระกูล catfish (ขนาดปลานิ้ว) มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้ออยู่ในช่วง 0.60-0.78 และลดลงต่ำกว่านี้หากเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนและมีระบบกรองที่ดี

1.4 ต้นทุนของระบบกรอง

ต้นทุนส่วนใหญ่ของระบบกรองในแต่ละชุดทดลอง คือ กล่องแก้วใส่สารกรองที่มีราคาเท่ากับ 80 บาท ส่วนราคาสารกรองมีราคาถูก ยกเว้น ammonia chip, ceramic, zeolite และถ่านกัมมันต์ มีราคาอยู่ที่ 100 บาท/กก. หากเปรียบเทียบราคาต้นทุนของระบบกรองต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำโดยรวม พบว่าชุดทดลองที่ 1.5 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) ดีที่สุดในสภาพที่มีความเป็นด่างทั้งหมดเพียงพอ

1.5 ระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของระบบกรอง

สารกรองที่เป็นเม็ดเล็กๆ เช่น ถ่านกัมมันต์, ถ่านกะลามะพร้าว, ทราย, ceramic และ ammonia chip สามารถดักตะกอนแขวนลอยได้ดีแต่อุดตันง่ายโดยเฉพาะสารกรองที่มีเม็ดๆ คละกันจะมีรูพรุนต่ำจึงอุดตันได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่วนสารกรองที่เป็นแผ่นลอนหรือตาข่าย เช่น ใยพลาสติกหยาบ bioball และใยพลาสติกขาวสามารถดักตะกอนแขวนลอยได้น้อยแต่อุดตันยาก (มั่นสิน, 2542; เกรียงศักดิ์, 2543) ทำให้ชุดทดลองที่ 1.5 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบร่วมกับ bioball) มีระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของระบบกรองมากกว่า 64 วัน

2. การศึกษาคุณภาพน้ำที่บำบัดด้วยระบบกรองทรายร่วมกับถ่านไม้ และแบคทีเรียเกาะติด

2.1 คุณภาพน้ำที่บำบัดด้วยระบบกรองทรายร่วมกับถ่านไม้ และแบคทีเรียเกาะติด

1) อุณหภูมิ

ในแต่ละชุดทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง 64 วัน และมีค่าอยู่ในช่วง 27-29.8 °ซ. ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกอยู่ในช่วง 25-30 °ซ. (อุทัยรัตน์, 2538) และหากอุณหภูมิลดต่ำลงจะส่งผลให้ปลากินอาหารลดลง (ทวีและจินตนา, 2541) แต่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2-3 °ซ. ของจุดที่เหมาะสมหรืออุณหภูมิที่เพิ่มจาก 28 °ซ. เป็น 30 °ซ. เช่นเดียวกับปลากะพงที่อุณหภูมิเหมาะสมคือ 26.8 °ซ. แต่อัตราเจริญเติบโตสูงสุดที่อุณหภูมิ 29.2 °ซ. (Buentello *et al.*, 2000) และอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียด้วย (Inaba, 1992)

2) ความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่างทั้งหมด

ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่างทั้งหมดได้รับอิทธิพลจากระบบกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกรองและระยะเวลาการทดลอง โดยความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดทดลองมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการเตรียมน้ำก่อนการทดลองเพิ่มความเป็นด่างทั้งหมดด้วย $NaHCO_3$ ทำให้ความเป็นกรด-ด่างส่วนใหญ่อยู่ในรูป HCO_3^- เมื่อความเป็นด่างทั้งหมดลดลงจากการหายใจของปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งละลายน้ำเป็น H_2CO_3 แตกตัวให้ H^+ และ HCO_3^- ส่งผลให้ความเป็นกรด-ด่างในน้ำลดลง (Boyd, 1982 อ้างโดย Golombieski *et al.*, 2003) อีกส่วนมาจากจุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการย่อยสลายของเสียที่เข้ามาในระบบ (ธงชัย, 2544; Wu *et al.*, 1999) โดยพวกออโตทรอฟออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์และไนเตรทภายใต้สภาวะมีอากาศนั้นจะได้พลังงานออกมาและใช้ไปตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือไบคาร์บอเนตอิออน (HCO_3^-) หรือคาร์บอเนตอิออน (CO_3^{2-}) มาเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ใหม่ (ธงชัย, 2544) ส่วนความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาการทดลอง 44 วัน จากการเติมสารละลาย $NaHCO_3$

ในแต่ละชุดทดลองมีความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.24-8.85 และ 7-126 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งอุทัยรัตน์ (2538) แนะนำว่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลาดุกควรอยู่ในช่วง 7-8.5 และความเป็นด่างทั้งหมดไม่ควรต่ำกว่า 30 มก./ล. ส่วน Golombieski และคณะ (2003) พบว่าความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่าง

ทั้งหมดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนจากรูป NH_4^+ เป็น NH_3 ซึ่งมีความเป็นพิษสูงขึ้นและทำให้ปริมาณแอมโมเนียในเลือด ตับ และกล้ามเนื้อเพิ่มสูงขึ้น (Saha *et al*., 2002)

3) ออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้รับอิทธิพลจากระบบกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกรองและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำลดลงตลอดการทดลองจากการใช้ของปลา และจุลินทรีย์ในการย่อยสลายของเสียที่เกิดขึ้น (Moriarty, 1997) โดยฟิล์มจุลินทรีย์ในระบบกรองสามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ง่าย (Azim *et al.,* 2004) ส่วนตะกอนแขวนลอยที่ผ่านระบบกรองออกมาอยู่ในมวลน้ำถูกแบคทีเรียใช้เป็นที่ยึดเกาะและบำบัดน้ำควบคู่ไปด้วย (Wickins, 1985) บีโอดีที่เพิ่มขึ้นจึงเกิดจากตะกอนแขวนลอยผ่านระบบกรองออกมาเป็นหลัก ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและบีโอดีในแต่ละชุดทดลองมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นการทดลองเนื่องจากสารกรองที่เป็นทราย ถ่านกะลามะพร้าว และใยพลาสติกหยาบมีระยะห่างระหว่างสารกรองสูงจึงต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งให้ตะกอนและฟิล์มจุลินทรีย์ติดค้างอยู่บนสารกรองเพื่อช่วยลดช่องว่างระหว่างสารกรอง สอดคล้องกับการทดลองของ Thompson และคณะ (2002) พบว่าวัสดุจมน้ำชักนำให้เกิดฟิล์มจุลินทรีย์ยึดเกาะบริเวณผิววัสดุและลดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและบีโอดีได้ดี เมื่อความเป็นด่างทั้งหมดเริ่มลดลงต่ำกว่า 20 มก./ล. จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสารกรองเริ่มตายและหลุดออกจึงมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้น โดยสารกรองที่เป็นใยพลาสติกหยาบมีช่องว่างระหว่างสารกรองสูงฟิล์มจุลินทรีย์จึงหลุดออกมาได้ง่าย สารกรองที่เป็นทรายมีฟิล์มจุลินทรีย์หลุดออกมาเพียงบางส่วน และสารกรองที่เป็นถ่านกะลามะพร้าวมีฟิล์มจุลินทรีย์หลุดออกมาเพียงเล็กน้อยและมีการสะสมตะกอนบริเวณผิวหน้าทำให้ระบบกรองอุดตันได้ง่าย (มั่นสิน, 2542) ชุดทดลองที่มีถ่านกะลามะพร้าวเป็นสารกรองจึงมีอายุการใช้งานต่ำกว่าชุดทดลองอื่นๆ

ในแต่ละชุดทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.2-4.2 มก./ล. ซึ่งการเลี้ยงปลาดุกต้องการปริมาณออกซิเจนละลายน้ำไม่น้อยกว่า 3 มก./ล. (อุทัยรัตน์, 2538) Akinwole และ Faturoti (2007) แนะนำว่าในการเลี้ยงปลา African Catfish ให้มีอัตราการเจริญเติบโตและอัตรารอดสูงต้องมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 2-3 มก./ล. และยังเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ส่วนบีโอดีและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.8-9.4 และ 38.5-41.7 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณบีโอดีในการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 30 มก./ล. (Boyd and Gross, 1999 อ้างโดย Xinglong and Boyd, 2005) เพราะปริมาณบีโอดีที่สูงขึ้นอาจทำให้น้ำขาดแคลนออกซิเจนได้

(ไมตรี และจารุวรรณ, 2528 อ้างโดย ประทีป, 2544) ในขณะที่บ่อเลี้ยง channel catfish มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดอยู่ในช่วง 56.95-105.06 มก./ล. และหากสูงกว่านี้ ปลามีโอกาสเกิดโรค gill disease ได้สูง (Tucker *et al*., 1996; Seo and Boyd, 2001)

4) แอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรท

ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรทได้รับอิทธิพลจากระบบกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกรองและระยะเวลาการทดลอง โดยสารกรองที่มีความพรุนสูง เช่น ใยพลาสติกหยาบ และ bioball มีการสะสมตะกอนสม่ำเสมอตลอดชั้นสารกรอง แต่ถ่านกะลามะพร้าวมีความพรุนต่ำสะสมตะกอนหนาขึ้นเฉพาะบนผิวหน้าของชั้นกรองจึงดูดซับไอออนได้น้อยจากการอุดตันของระบบ (Singh *et al*., 2004) ส่วนชั้นสารกรองทรายวางอยู่บนสุดของระบบกรองได้รับแรงเฉือนของน้ำสูงจึงมีจุลินทรีย์บางส่วนหลุดไปกับมวลน้ำ (Soinia *et al*., 2002) ซึ่งแอมโมเนียและไนไตรท์ส่วนใหญ่ลดลงจากการเปลี่ยนรูปของแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวตะกอนลึกไม่เกิน 1 ซม. (Oer Zur and Avnimelech, 1982) โดย heterotrophic bacteria ย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น ขี้ปลา และเศษอาหารในสภาวะที่มีออกซิเจนได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นแอมโมเนีย (สมหมาย, 2539) ทำให้ในแต่ละชุดทดลองมีปริมาณแอมโมเนียสูงสุดอยู่ในช่วง 3.122-4.505 มก./ล. อีก 4 วัน ปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นถูกแบคทีเรียไนตริฟายเออร์เปลี่ยนรูปเป็นไนไตรท์ (Moriarty, 1997; Sugita *et al*., 2005) ทำให้แอมโมเนียลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ไนไตรท์เพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 3.447-10.198 มก./ล. แล้วลดลงต่ำกว่า 1.2 มก./ล. ในอีก 4-8 วัน โดยแบคทีเรียเปลี่ยนรูปไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท (Grommen *et al.,* 2002; Sugita *et al*., 2005) ปริมาณไนเตรทจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนจบการทดลอง และพบว่าในการทดลองนี้ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์ถูกดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเพียงเล็กน้อยส่วนใหญ่หายไปจากการเปลี่ยนรูปของแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์เป็นหลัก (Singh *et al*., 2004) ซึ่งต้องใช้เวลาอย่างน้อย 16-20 วัน ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Thompson และคณะ (2002) ที่ใช้เวลา 10-15 วัน เพื่อให้ฟิล์มจุลินทรีย์เกิดขึ้นสมบูรณ์บริเวณสารกรองเพื่อรักษาแอมโมเนียและไนไตรท์อยู่ในระดับต่ำ และขึ้นอยู่กับปัจจัยความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Spotte,1979) หากปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำกว่า 20 มก./ล. ทำให้แบคทีเรียไนตริฟายเออร์มีแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ใหม่ไม่เพียงพอ (ธงชัย, 2544) จึงเกิดการตายและหลุดออกไปสะสมร่วมกับตะกอนบริเวณด้านบนสารกรองที่มีความพรุนต่ำ (ทรายและถ่านกะลามะพร้าว) จนระบบกรองอุดตัน เมื่อตะกอนหนามากขึ้นจึงเกิดการย่อย

สลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในชั้นตะกอนที่ทับถมอยู่ด้านล่าง (เกรียงศักดิ์, 2543) ทำให้ในชุดทดลองที่อุดตันมีปริมาณไนเตรทอยู่ในระดับต่ำกว่าชุดทดลองที่ไม่อุดตัน

ปริมาณแอมโมเนียรวมสูงสุดในแต่ละชุดทดลองที่ระบบกรองไม่อุดตันมีค่าอยู่ระหว่าง 3.122-3.382 มก./ล. โดยปริมาณแอมโมเนียในรูปของ NH_3 ที่ทำให้ปลาน้ำจืดหลายชนิดตายในเวลาอันสั้นอยู่ที่ 0.2-2 มก./ล. (EIFAC, 1973) ซึ่งความเป็นกรดด่างที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปจาก NH_4^+ ไปอยู่ในรูป NH_3 ที่มีพิษสูงกว่าและปริมาณแอมโมเนีย 3.0 มก. NH_3 /ล. มีพิษต่อปลาน้ำจืดที่ความเป็นกรด-ด่าง 8.5 แต่ไม่เป็นอันตรายที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.0 (Lewbart, 1998) สอดคล้องกับ Tomasso และคณะ (1980) พบว่า ขณะที่ความเป็นกรด-ด่าง 9 มีปริมาณแอมโมเนียรวม 4.5 มก./ล. สามารถทำให้ปลา channel catfish ตายหมดภายใน 24 ชม. และหากลดความเป็นกรดด่างให้เหลือ 7 ต้องมีปริมาณแอมโมเนียรวมถึง 263.6 มก./ล. ส่วนปริมาณไนไตรท์สูงสุดในชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีค่าอยู่ในช่วง 4.421-5.312 มก./ล. ซึ่ง 96-h LC_{50} ของไนไตรท์ต่อปลาน้ำจืดหลายชนิดอยู่ในช่วง 0.66-200 มก./ล. ในขณะที่มีอันตรายต่อปลาดุกเมื่อมีค่าสูงกว่า 1 มก./ล. และความเป็นพิษของไนไตรท์สูงขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างลดลง (สมหมาย, 2539; Lewbart, 1998; Colt, 2006) ส่วนปริมาณไนเตรทสูงสุดในแต่ละชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 37.68-62.53 มก./ล. ซึ่งไนเตรทมีอันตรายต่อปลาน้ำจืดต่ำมากและ 96 h LC_{50} ของไนเตรทต้องสูงกว่า 1000 มก./ล. (Colt, 2006)

2.2 อัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกในแต่ละชุดทดลองมีค่าสูงถึง 8.10-9.39 ก./วัน โดยชุดทดลองที่ 1 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบและ bioball) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.39 ก./วัน เนื่องจากน้ำในตู้ทดลองมีคุณภาพดีกว่าชุดทดลองอื่นๆ แอมโมเนียและไนไตรท์ในชุดทดลองอื่นที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกลดลง (Colt and Tchobanoglous, 1978) แต่สูงกว่าการทดลองของ Akinwole และ Faturoti (2007) ที่มีอัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกอยู่ในช่วง 4.58-6.29 ก./วัน เนื่องจากมีการปล่อยปลาความหนาแน่นสูงและมีปริมาณแอมโมเนียในเกณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อปลา

2.3 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกในชุดทดลองที่ 2.1 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบและ bioball) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.21 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการทดลองของณรงค์ (2540) ที่พบว่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกอยู่ในช่วง 1.24-1.49 เป็นผลมาจากการจำกัดอาหารที่ให้เพียง 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก ซึ่งเพียงพอกับความต้องการของลูกปลาดุก (อุทัยรัตน์, 2538) และปลาที่ใช้ในการทดลองเป็นลูกปลาดุกขนาดปลานิ้ว ซึ่ง Akinwole และ Faturoti (2007) รายงานว่าในการเลี้ยงปลาตระกูล catfish (ขนาดปลานิ้ว) มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้ออยู่ในช่วง 0.60-0.78 และลดลงต่ำกว่านี้หากเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนและมีระบบกรองที่ดี

2.4 ต้นทุนของระบบกรอง

ต้นทุนส่วนใหญ่ของระบบกรองในแต่ละชุดทดลอง คือ กล่องแก้วใส่สารกรองที่มีราคาเท่ากับ 80 บาท ส่วนราคาสารกรองอยู่ระหว่าง 2-5 บาทต่อชั้นกรอง ยกเว้น bioball จะมีราคาอยู่ที่ 22.2 บาทต่อชั้นกรอง หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำโดยรวม อัตรารอด อัตราการเจริญเติบโต และอายุการใช้งาน พบว่าชุดทดลองที่ 2.1 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบและ bioball) และชุดทดลองที่ 2.5 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ 1 แผ่น) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ชุดทดลองที่ 2.5 มีราคาเพียง 101.30 บาท ขณะที่ชุดทดลองที่ 2.1 มีราคา 121.50 บาท

2.5 ระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของระบบกรอง

สารกรองที่เป็นเม็ดเล็กๆ เช่น ถ่านกัมมันต์, ถ่านกะลามะพร้าว, ทราย และ zeolite โดยเฉพาะสารกรองที่มีเม็ดๆ คละกันจะมีรูพรุนต่ำจึงอุดตันได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่วนสารกรองที่เป็นแผ่นลอนหรือตาข่าย เช่น ใยพลาสติกหยาบ bioball และใยพลาสติกขาวสามารถดักตะกอนแขวนลอยได้น้อยแต่อุดตันยาก (มั่นสิน, 2542; เกรียงศักดิ์, 2543) ทำให้ชุดทดลองที่ 2.1 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบและ bioball) และชุดทดลองที่ 2.4 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ) มีระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของระบบกรองสูงสุดมากกว่า 64 วัน

3. การศึกษาคุณภาพน้ำ ปริมาณเชื้อแบคทีเรียรวมในน้ำและสารกรองจากการบำบัดด้วยระบบกรองแบบแบคทีเรียเกาะติดที่ระดับความหนาของสารกรองแตกต่างกัน

3.1 คุณภาพน้ำจากการบำบัดด้วยระบบกรองแบบแบคทีเรียเกาะติดที่ระดับความหนาของสารกรองแตกต่างกัน

1) อุณหภูมิ

ในแต่ละชุดทดลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง 64 วัน และมีค่าอยู่ในช่วง 26-28.7 °ซ. ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกอยู่ในช่วง 25-30 °ซ. (อุทัยรัตน์, 2538) หากอุณหภูมิลดต่ำลงจะส่งผลให้การกินอาหารของปลาและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียลดลง (ทวีและจินตนา, 2541; Inaba,1992)

2) ความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่างทั้งหมด

ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่างทั้งหมดได้รับอิทธิพลจากความหนาของสารกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างความหนาของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งความเป็นกรด-ด่างในแต่ละชุดทดลองมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแปรผันตามกับความเป็นด่างทั้งหมด เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการเตรียมน้ำก่อนการทดลองเกิดจากการเติม $NaHCO_3$ ความเป็นด่างทั้งหมดส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูป HCO_3^- และปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดที่ลดลงอาจเกิดจากการใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรีย โดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลาการทดลอง 0 ถึง 12 วัน จากการระเหยของน้ำในตู้ทดลองทำให้ค่าความเป็นด่างทั้งหมดมีความเข้มข้นสูงขึ้นประกอบกับมีจุลินทรีย์ในปริมาณน้อย แต่เมื่อมีการปล่อยปลาลงในตู้ทดลอง ค่าความเป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดทดลองจะลดลงอย่างรวดเร็วจากการใช้ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบกรองสอดคล้องกับการศึกษาของ Liu และ Han (2004) ที่พบว่าการลดลงของคาร์บอนและฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์กับการลดลงของแอมโมเนีย การเติมสารละลาย $NaHCO_3$ ที่ระยะเวลาการทดลอง 32 และ 34 วัน ทำให้ความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่างทั้งหมดในแต่ละชุดทดลองมีค่าสูงถึง 8.43-8.50 และ 98–101 มก./ล. ตามลำดับ จุลินทรีย์ในระบบต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 4 วัน ให้กลับมาทำงานได้ตามปกติ ส่วนความหนาของสารกรองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นด่างทั้งหมดลดลงอย่างรวดเร็วเพราะการกำจัดของเสียทางชีวภาพเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ (ธงชัย, 2544)

ในระหว่างการทดลอง 64 วัน น้ำในแต่ละชุดทดลองมีความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างทั้งหมดเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.27-8.68 และ 6-104 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อปลาดุกอยู่ในช่วง 7-8.5 และความเป็นด่างทั้งหมดต้องไม่น้อยกว่า 30

มก./ล. (อุทัยรัตน์, 2538) แต่ในปลาดุกด้าน (C. *batrachus*) มีชีวิตอยู่ได้ในความเป็นด่างทั้งหมดที่เพิ่มสูงขึ้นจนความเป็นกรด-ด่างสูงถึง 10 แต่อัตราการปลดปล่อยแอมโมเนียออกจากเหงือกปลาลดลงมากกว่า 25 % ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในเลือด ตับ และกล้ามเนื้อเพิ่มสูงขึ้น และตายหากความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นถึง 11 (Saha *et al*., 2002)

3) ออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ปริมาณบีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้รับอิทธิพลจากความหนาของสารกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างความหนาของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง แต่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้รับอิทธิพลเฉพาะจากความหนาของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำลดลงตลอดการทดลองและลดลงมากสุดในระบบกรองที่อุดตันเนื่องจากเกิดตะกอนแขวนลอยและจุลินทรีย์เส้นสายในปริมาณสูง การใช้ออกซิเจนจึงสูงตามไปด้วย (ธงชัย, 2544) และแบคทีเรียจำพวกไนตริฟายเออร์ใช้ออกซิเจน 4.6 มก./ล. ในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 มก./ล. เรียกว่า Nitrogenous oxygen demand (NOD) (Bitton, 1994) สารอินทรีย์และฟิล์มจุลินทรีย์ที่ลอดผ่านระบบกรองออกมาอยู่ในมวลน้ำเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มปริมาณบีโอดี ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกจุลินทรีย์ในระบบกรองกำจัดได้ง่าย (ธงชัย, 2544) จึงไม่ส่งผลต่อปริมาณบีโอดีมากนักทำให้บีโอดีมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละชุดทดลองจำเป็นต้องใช้ระยะเวลา 28 – 32 วัน ให้มีเศษอาหารและเกิดฟิล์มจุลินทรีย์บริเวณผิวใยพลาสติกหยาบเพื่อลดช่องว่างให้มีขนาดเล็กลง แม้ว่าความหนาของใยพลาสติกหยาบแตกต่างกันในแต่ละชุดทดลอง แต่ช่องว่างระหว่างอนุภาคสารกรองไม่แตกต่างกันโดยเฉพาะความหนาที่เพิ่มขึ้นของใยพลาสติกหยาบมีผลให้การเก็บกักตะกอนสูงขึ้น (มั่นสิน, 2542) ชุดทดลองที่ 3.4 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนา 3 แผ่น) จึงมีอายุการใช้งานสูงที่สุด

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุดในแต่ละชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 2.8-3.7 มก./ล. ซึ่งในการเลี้ยงปลาดุกทั่วๆ ไปมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 5-6 มก./ล. และหากลดลงถึง 3.0-3.5 มก./ล. ก็ไม่เป็นอันตรายต่อปลา (อุทัยรัตน์, 2538; Colt, 2006) ส่วนบีโอดีและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.8-10.9 และ 41.2-69.8 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณบีโอดีในการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 30 มก./ล. (Boyd and Gross, 1999 อ้างโดย Xinglong and Boyd, 2005) และปริมาณบีโอดีที่สูงขึ้นอาจทำให้น้ำขาดแคลนออกซิเจนได้ (ไมตรีและจารุวรรณ, 2528 อ้างโดย ประทีป, 2544)

4) แอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรท

ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรทได้รับอิทธิพลจากความหนาของสารกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างความหนาของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของปลาในสภาวะมีออกซิเจนเพียงพอสามารถเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชั่นโดยพวกจุลินทรีย์ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นแอมโมเนียแล้วถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นไนไตรท์และไนเตรท (Higgins and Burn, 1975) ทำให้แอมโมเนียรวมและไนไตรท์มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาการทดลอง 16 และ 20 วัน ตามลำดับ แล้วสามารถลดแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 0.182 มก./ล. ต้องใช้เวลาอีก 8 วัน และลดปริมาณไนไตรท์ให้ต่ำกว่า 1 มก./ล. ต้องใช้เวลาอีก 12 วัน ซึ่งใกล้เคียงกับ Ling และ Chen (2005) ที่บำบัดแอมโมเนียให้เป็นไนเตรทใช้เวลา 7-35 วัน แต่ Oer Zur และ Avnimelech (1982) ใช้เวลา 10 วัน หรือมีจำนวนทีเรียรวมในตะกอน 10^3-10^6 CFU/g โดยปริมาณแบคทีเรียไนตริฟายเออร์เพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น (Mridula *et al*., 2003) เช่น การเลี้ยงแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์ให้เกาะบริเวณผิวของเปลือกหอยนางรม ถ่านกัมมันต์ และ polyurethane สามารถลดปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่งปลาทะเลได้ 93-95 เปอร์เซ็นต์ (Turner and Bower,1982) ชุดทดลองที่มีใยพลาสติกหยาบครึ่งแผ่นจึงมีประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียและไนไตรท์ต่ำกว่าชุดทดลองที่มีใยพลาสติกหยาบ 2 และ 3 แผ่น แต่ปริมาณแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ที่ลดลงประกอบกับอิทธิพลจากกระแสน้ำมีผลให้ฟิล์มจุลินทรีย์หลุดออก (Soinia *et al*., 2002) จากใยพลาสติกหยาบ ปริมาณแอมโมเนียรวมจึงเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยที่ระยะเวลาการทดลอง 32 วัน ส่วน Yossi และคณะ (2003) รายงานว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นสามารถหยุดยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันให้ต่ำลง อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดหมุนเวียนที่บำบัดแบบไนตริฟิเคชันเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดการสะสมของไนเตรท (Honda,1993 อ้างโดย Rijn *et al*., 1995) ซึ่งในแต่ละชุดทดลองนี้มีค่าแตกต่างกันในช่วงกว้าง อาจเกิดจากชุดทดลองที่อุดตันมีการทับถมของตะกอนบริเวณผิวหน้าสารกรองหนามากจนเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนส่งผลให้เกิดก๊าซไนโตรเจนหลุดออกไปจากน้ำ (ธงชัย, 2544)

ปริมาณแอมโมเนียรวมสูงสุดในแต่ละชุดทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.605-2.013 มก./ล. ตามลำดับ โดยปริมาณแอมโมเนียในรูปของ NH_3 ที่ทำให้ปลาน้ำจืดหลายชนิดตายในเวลาอันสั้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-2 มก./ล. (EIFAC, 1973) ส่วน Eding และ Kamstra (2001) อ้างโดย Akinwole และ Faturoti (2007) แนะนำว่าในการเลี้ยงปลา African Catfish (*Clarias gariepinus*) ควรมีปริมาณแอมโมเนียต่ำกว่า 8.8 มก./ล. และความเป็นกรดด่างที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แอมโมเนียเปลี่ยนรูปจาก NH_4^+ ไปอยู่ในรูป NH_3 ที่มีพิษสูงกว่า สอดคล้องกับ Tomasso และคณะ (1980)

พบว่า ขณะที่ความเป็นกรด-ด่าง 9 มีปริมาณแอมโมเนียรวม 4.5 มก./ล. สามารถทำให้ปลา channel catfish ตายหมดภายใน 24 ชม. และหากลดความเป็นกรดด่างให้เหลือ 7 ต้องมีปริมาณแอมโมเนียรวมถึง 263.6 มก./ล. ส่วนปริมาณไนไตรท์สูงสุดในชุดทดลองที่ไม่อุดตันมีค่าอยู่ในช่วง 6.026-8.426 มก./ล. ซึ่ง 96-h LC_{50} ของไนไตรท์ต่อปลาน้ำจืดหลายชนิดอยู่ในช่วง 0.66-200 มก./ล. ในขณะที่มีอันตรายต่อปลาดุกเมื่อมีค่าสูงกว่า 1 มก./ล. และความเป็นพิษของไนไตรท์สูงขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างลดลง (สมหมาย, 2539; Lewbart, 1998; Colt, 2006) ในขณะที่ปริมาณไนเตรทสูงสุดในแต่ละชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 60.80-74.53 มก./ล. โดยปกติไนเตรทมีอันตรายต่อปลาน้ำจืดต่ำมากและ 96 h LC_{50} ของไนเตรทต้องสูงกว่า 1000 มก./ล. (Colt, 2006)

3.2 ปริมาณแบคทีเรียรวมในน้ำและสารกรอง

1) ปริมาณแบคทีเรียรวมในน้ำ

ปริมาณแบคทีเรียรวมในน้ำได้รับอิทธิพลจากความหนาของสารกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างความหนาของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งเศษอาหารและของเสียจากการขับถ่ายของปลาชักนำให้ปริมาณแบคทีเรียรวมในน้ำของแต่ละชุดทดลองที่มีระบบกรองแตกต่างกันเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 4.0 X 10^4-6.4 X 10^5 CFU/ml ใกล้เคียงกับการทดลองของ Oer Zur และ Avnimelech (1982) ที่พบว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณแบคทีเรียรวมในน้ำเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 10^3-10^6 CFU/g ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้สามารถใช้ตะกอนแขวนลอยเป็นที่ยึดเกาะและลดแอมโมเนียและไนไตรท์ได้ดี แต่ปริมาณแบคทีเรียรวมในน้ำลดลงหากความเป็นด่างทั้งหมด ตะกอนแขวนลอย แอมโมเนีย ไนไตรท์ และปริมาณสารอินทรีย์อยู่ในระดับต่ำ (Wickins, 1985; Painting *et al*., 1989 อ้างโดย Moriarty, 1997)

2) ปริมาณแบคทีเรียรวมในสารกรอง

ปริมาณแบคทีเรียรวมในสารกรองได้รับอิทธิพลจากความหนาของสารกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างความหนาของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง ซึ่งแบคทีเรียสามารถใช้ของเสียจากปลาและเศษอาหารเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างเซลล์ใหม่และเพิ่มจำนวน ปริมาณแบคทีเรียรวมในสารกรองแต่ละชุดทดลองจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 5.4 X 10^6 - 4.5 X 10^7 CFU/ml ใกล้เคียงกับ Sugita และคณะ (2005) พบว่าจำนวนแบคทีเรียรวมในระบบกรองที่เลี้ยงปลาทองและปลาคาร์พเท่ากับ 1.1x10^7 และ 1.9x10^8 CFU/ml ตามลำดับ โดยกลุ่มแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่พบ คือ *Hyphomicrobium denitrificans*, *Rhodovulum euryhalinum* และ *Nitrospira moscoviensis* สอดคล้องกับ Sugita และคณะ

(1981) อ้างโดย Sugita และคณะ (2005) ที่รายงานว่าระบบกรองที่เลี้ยงปลาคาร์พมีเชื้อแบคทีเรียพวก Vibrionaceae, *Pseudomonas*, Enterobacteriaceac, *Flavobacterium* และ *Bacteroides* อยู่ที่ $2.5X10^3$ – $2.7X10^5$ CFU/ml ส่วน Garrity และ Holt (2001) อ้างโดย Sugita และคณะ (2005) พบว่าเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในระบบกรองน้ำมีความแตกต่างกันตามชนิดปลาที่เลี้ยง สิ่งแวดล้อมในการเลี้ยง และช่วงเวลาเลี้ยง โดยพบเชื้อแบคทีเรียส่วนใหญ่ทั้ง *Nitrobacter* และ *Nitrospira* เป็นพวกใช้ออกซิเจนที่เปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรท์เป็นไนเตรทได้ ส่วนความหนาของสารกรองที่ลดลงส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียรวมเกิดขึ้นหนาแน่นกว่าในพื้นที่ที่เท่ากันทำให้ชุดทดลองที่ 1 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนาครึ่งแผ่น) มีปริมาณแบคทีเรียรวมสูงกว่าชุดทดลองอื่นๆ

3) ปริมาณแบคทีเรียรวมในสารกรองที่ระดับความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับ

ปริมาณแบคทีเรียรวมในสารกรองที่ระดับความลึกต่างๆ ของชุดทดลองที่ 3.4 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนา 3 แผ่น) พบว่า ปริมาณแบคทีเรียรวมในสารกรองได้รับอิทธิพลจากความลึกของสารกรอง ระยะเวลาการทดลอง และอิทธิพลร่วมระหว่างความลึกของสารกรองและระยะเวลาการทดลอง โดยใยพลาสติกหยาบที่อยู่ด้านบนของระบบกรองใกล้กับท่อ airlift จึงได้รับแรงเฉือนของน้ำที่สูงขึ้นมีผลให้ปริมาณแบคทีเรียรวมลดลง (มั่นสิน, 2542; Soinia *et al*., 2002) ทำให้ใยพลาสติกหยาบชั้นบนของชุดทดลองที่ 3.4 มีปริมาณแบคทีเรียรวมต่ำกว่าใยพลาสติกหยาบชั้นล่างในชุดทดลองเดียวกัน

3.3 อัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกในแต่ละชุดทดลองมีค่าสูงถึง 8.52-9.58 ก./วัน โดยที่ชุดทดลองที่ 3.3 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนา 2 แผ่น) และชุดทดลองที่ 3.4 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนา 3 แผ่น) มีค่าสูงสุดเท่ากันคือ 9.58 ก./วัน เป็นผลมาจากคุณภาพน้ำที่ไม่แตกต่างกันมากของทั้ง 2 ชุดทดลอง และปลาดุกเป็นปลาที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำได้สูง (อุทัยรัตน์, 2538) แต่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าการทดลองของ Akinwole และ Faturoti (2007) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 4.58-6.29 ก./วัน เนื่องจากมีการปล่อยปลาความหนาแน่นสูงและมีปริมาณแอมโมเนียไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาดุก

3.4 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกในชุดทดลองที่ 3.3 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนา 2 แผ่น) และชุดทดลองที่ 3.4 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบหนา 3 แผ่น) มีค่าต่ำสุดเท่ากันคือ 0.21 ซึ่งต่ำกว่าการรายงานของไชยา (2543) ที่มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกเท่ากับ 1.8 เป็นผลมาจากการจำกัดอาหารที่ให้เพียง 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว เพียงพอกับความต้องการของลูกปลาดุก (อุทัยรัตน์, 2538; กลุ่มรักเกษตร, 2541) สอดคล้องกับ Akinwole และ Faturoti (2007) ซึ่งพบว่าในการเลี้ยงปลาตระกูล catfish (ขนาดปลานิ้ว) มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อในช่วง 0.60-0.78 และลดลงต่ำกว่านี้หากเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนและมีระบบกรองที่ดี

3.5 ต้นทุนของระบบกรอง

ต้นทุนส่วนใหญ่ของระบบกรองในแต่ละชุดทดลอง คือ กล่องแก้วใส่สารกรองที่มีราคาเท่ากับ 80 บาท ส่วนราคาสารกรอง (ใยพลาสติกหยาบ) เท่ากับ 3.3 บาทต่อชิ้น หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำโดยรวม อัตราการรอดตาย อัตราการเจริญเติบโต และอายุการใช้งาน พบว่าชุดทดลองที่ 3.3 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ 2 แผ่น) และชุดทดลองที่ 3.4 (ใช้สารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบ 3 แผ่น) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ชุดทดลองที่ 3.3 มีราคาถูกกว่า

3.6 ระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันของระบบกรอง

สารกรองที่เป็นแผ่นลอนหรือตาข่าย เช่น ใยพลาสติกหยาบ ดักตะกอนแขวนลอยได้น้อยและอุดตันยาก (เกรียงศักดิ์, 2543) แต่ฟิล์มจุลินทรีย์ที่เกิดบริเวณผิวสารกรองทำให้ช่องว่างระหว่างสารกรองลดลงและระบบกรองอุดตันเร็วขึ้น (ธงชัย, 2544) จึงต้องมีการเพิ่มความหนาของสารกรองให้การเก็บกักตะกอนสูงขึ้น (มั่นสิน, 2542) สอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งในระบบกรองแบบแบคทีเรียเกาะติดที่มีสารกรองเป็นใยพลาสติกหยาบมากกว่าครึ่งแผ่นมีระยะเวลาการอุดตันเกิน 64 วัน