บทที่ 5
อภิปรายและสรุปผล

5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดเชื้อแบคทีเรียที่เติมลงในมวลน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 3 และ 6 ลิตรต่อนาที

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดเชื้อแบคทีเรียที่เติมลงในมวลน้ำในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการลดเชื้อแบคทีเรียที่เติมลงในมวลน้ำได้ดีกว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 6 ลิตรต่อนาที โดยที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ลิตรต่อนาที ปริมาณ *E. coli*, *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* มีการลดลงเร็วกว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 6 ลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของน้ำที่ต่ำกว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดเชื้อแบคทีเรียในมวลน้ำได้

เนื่องจากไม่พบเอกสารที่ใช้ในการยืนยันผลการศึกษาว่าอัตราการไหลของน้ำที่ต่ำกว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดเชื้อแบคทีเรียในมวลน้ำได้ แต่จากผลการศึกษาของ Katara et al. (2008) ทำการลดปริมาณของ *E. coli* ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่ระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 5 นาทีจนถึง 40 นาที โดยทำการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตครั้งละ 5 นาที พบว่าหลังจาก *E. coli* ได้สัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 10 นาที ปริมาณเชื้อลดลงไป 0.2×10^4 ที่เวลา 15 นาทีปริมาณเชื้อลดลงไป 2.6×10^4 และที่เวลา 20 นาทีปริมาณเชื้อลดลงไป 3.5×10^4 โดยพบว่าในช่วงเวลา 20-25 นาทีเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เพียงพอในการที่จะใช้ฆ่า *E. coli* และระยะเวลาสัมผัสที่สามารถฆ่า *E. coli* ได้หมดคือระยะเวลา 30 นาที ซึ่งจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาสัมผัส (Exposure time) กับแสงอัลตราไวโอเลตสามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น ซึ่งเทียบได้กับระบบที่ใช้อัตราการไหลของน้ำที่ต่ำ น้ำจะไหลช้าลงทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในมวลน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลน้ำมีระยะเวลาสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตเป็นเวลานานขึ้น

5.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดเชื้อแบคทีเรียที่เติมลงในมวลน้ำในระบบที่ไม่มีระบบกรองโลหะหนักกับระบบที่มีระบบกรองโลหะหนัก

ผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดเชื้อแบคทีเรียที่เติมลงในมวลน้ำในระบบที่ไม่มีระบบกรองโลหะหนักกับระบบที่มีระบบกรองโลหะหนักที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ลิตรต่อนาทีในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าระบบกรองโลหะหนักมีผลทำให้ประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลด *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในมวลน้ำดีขึ้น แต่สำหรับ *E. coli* พบว่าระบบกรองโลหะหนักทำให้ประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลด *E. coli* ช้าลง แต่ก็สามารถลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้เช่นกัน แสดงว่าการเพิ่มระบบกรองโลหะหนักที่ภายในบรรจุด้วย ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ หินปะการังและหินภูเขาไฟ มีผลทำให้ประสิทธิภาพของหลอดอัลตราไวโอเลตในการลดแบคทีเรียในมวลน้ำดีขึ้น

จากการศึกษาของ Barile et al. (2009) ได้มีการใช้สาหร่าย *Lithothamnium calcareum* เป็นตัวกรองชีวภาพร่วมกับ perlon และ carbon ในการกรองน้ำในระบบ Depuration ที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อ พบว่าน้ำที่อยู่ในระบบ Depuration ตรวจไม่พบการปนเปื้อนของ *E. coli, Salmonella typhimurium* และ *V. parahaemolyticus* ตลอดการทดลอง Abreu et al. (2007) ใช้ทรายเป็นตัวกรองน้ำในระบบ Depuration ที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการลด *S.* Typhimurium ร่วมกับการฆ่าเชื้อด้วยการใช้คลอรีนในหอยนางรม พบว่าระบบสามารถกำจัด *S.* Typhimurium ในหอยนางรมได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง

เห็นได้ว่าระบบกรองน้ำมีความสำคัญต่อระบบ Depuration ที่ออกแบบโดยการใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ซึ่งระบบกรองน้ำนั้นทำหน้าที่ในการลดปริมาณของตะกอนที่แขวนลอยอยู่ในมวลน้ำ เนื่องจากตะกอนแขวนลอยเหล่านี้จะเป็นตัวกั้นไม่ให้แสงอัลตราไวโอเลตทะลุผ่านมวลน้ำได้ (Barile et al., 2009) ทำให้แสงอัลตราไวโอเลตไม่ได้สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียในมวลน้ำโดยตรง การฆ่าเชื้อแบคทีเรียในมวลน้ำจึงไม่มีประสิทธิภาพเต็มที่ ดังนั้นระบบกรองโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จึงทำหน้าที่ในการกรองตะกอนที่อยู่ในมวลน้ำ ทำให้มวลน้ำในระบบสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตได้อย่างเต็มที่ จึงทำให้ประสิทธิภาพของแสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเพิ่มขึ้นได้

5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียและโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบของระบบ Depuration ที่ไม่มีการจัดการกับตะกอนกับระบบ Depuration ที่มีการจัดการกับตะกอนที่หอยคายออกมา

5.3.1 การลดการปนเปื้อนของ *E. coli, V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบ

การทดสอบระบบ Depuration การลดการปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียและโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบในระบบที่ไม่มีการจัดการกับตะกอน พบว่าตัวอย่างของหอยนางรมปากจีบที่นำมาทำการศึกษา ไม่พบการปนเปื้อนของ *E. coli* ตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงสุดท้ายที่ทำการทดลอง สำหรับ *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ที่ตรวจพบในหอยนางรมปากจีบ มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสูงสุดในชั่วโมงที่ 12 หลังจากนั้นจึงเริ่มลดลงเรื่อย ๆ และยังคงตรวจพบได้ในชั่วโมงที่ 96 ซึ่งจากการศึกษาของ Marino et al. (2005) พบว่าการลดการปนเปื้อนของหอยแมลงภู่ด้วยการ Depuration ที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ลิตรต่อนาที ต้องใช้เวลาถึง 144-196 ชั่วโมง จึงจะทำให้ *V. cholerae* non-O1 และ *Enterococcus durans* ในหอยแมลงภู่ลดลงสู่ระดับที่ไม่สามารถตรวจพบได้

การเพิ่มจำนวนของ *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบที่ผ่านการ Depuration ในระบบที่ไม่มีการจัดการกับตะกอน สอดคล้องกับการศึกษาของ Tamplin and Capers (1992) ศึกษาการลดการปนเปื้อนของ *V. vulnificus* ในหอยนางรมด้วยแสงอัลตราไวโอเลต พบว่าภายในเวลา 24 ชั่วโมงปริมาณของ *V. vulnificus* ในเนื้อเยื่อของหอยนางรมเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 เท่า และยังคงตรวจพบ *V. vulnificus* ตลอดระยะเวลา 3 วันของการทดลอง และการศึกษาของทัศวรรณ ขาวสีจาน และสุวรรณา ภาณุตระกูล (2551) ศึกษาการลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียรวมในกลุ่ม *Vibrio, V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบด้วยแสงอัลตราไวโอเลตในระบบน้ำหมุนวน พบว่าแบคทีเรียรวมในกลุ่ม *Vibrio, V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการ Depuration ได้ 3 ชั่วโมง จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงชั่วโมงที่ 20 แล้วจึงเริ่มลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ในชั่วโมงที่ 96 ซึ่งการเพิ่มจำนวนของเชื้อแบคทีเรียในหอยนางรมปากจีบที่ผ่านระบบ Depuration อาจจะเกิดจากสารอินทรีย์รวมถึงตะกอนที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวหอยนางรมเอง แล้วระบบไม่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำทะเลได้ทันในระยะเวลาอันสั้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนกลับ (Recontamination) เข้าสู่ตัวหอยนางรมได้อีก จึงทำให้พบการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในหอยนางรมปากจีบระหว่างการทำ Depuration

เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง ผู้วิจัยสังเกตพบว่าภายในถัง Depuration ที่เป็นถังพักหอย มีตะกอนที่หอยนางรมคายออกมา อยู่ที่บริเวณด้านล่างของถังพักหอย ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าตะกอนที่อยู่ด้านล่างของถังพักหอยนั้น อาจจะเป็นสาเหตุของการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในหอยนางรม จึงได้ทำการปรับปรุงระบบ Depuration โดยทำการจัดการกับตะกอนที่หอยคายออกมา ซึ่งผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างของหอยนางรมปากจีบที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ไม่พบการปนเปื้อนของ *E. coli* เช่นเดียวกัน สำหรับ *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ที่ตรวจพบหอยนางรมปากจีบนั้นไม่มีการเพิ่มจำนวนและลดลงเรื่อย ๆ จนไม่สามารถตรวจพบได้ในชั่วโมงที่ 72 ทั้งสองชนิด

เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนแปลงแบคทีเรียในระบบ Depuration ที่ไม่มีการจัดการกับตะกอนกับระบบ Depuration ที่มีการจัดการกับตะกอน พบว่าประสิทธิภาพในการลด *V. cholerae* ในหอยนางรมปากจีบในระบบที่มีการจัดการกับตะกอนดีขึ้น สำหรับ *V. parahaemolyticus* ก็พบว่ามีแนวโน้มในการลดลงเร็วขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการจัดการกับตะกอนที่หอยนางรมคายออกมาในระบบ ส่งผลทำให้ระบบ Depuration ที่ออกแบบในการศึกษาครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของ *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lewis, Rikaed, and Arias (2010) ศึกษาการกำจัด *V. vulnificus* ในหอยนางรมด้วยวิธีการ Depuration แบบเปิด (Flow-Through Depuration) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบ Depuration แบบเปิด ทำให้ปริมาณ *V. vulnificus* ในหอยนางรมมีอัตราการลดลงเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบ Depuration แบบระบบเปิด เป็นการช่วยจัดการกับตะกอนที่หอยนางรมคายออกมาให้ถูกกำจัดออกไปจากระบบได้เร็วขึ้น ซึ่งเทียบได้กับการจัดการกับตะกอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ดังนั้นถ้าสามารถเอาตะกอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการ Depuration ออกไปก็จะเป็นการลดโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดการปนเปื้อนกลับเข้าสู่ระบบได้ และตะกอนดังกล่าวอาจจะเป็นแหล่งอาหารของแบคทีเรีย หรือไปอุดตันช่องเหงือกทำให้ขัดขวางการกรองน้ำของหอย (มณีย์ กรรณรงค์ และคณะ, 2543) ซึ่งอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของระบบได้เช่นกัน

จากข้อมูลร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียในหอยนางรมปากจีบในแต่ละชั่วโมงเมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเมื่อเริ่มการทดลอง พบว่ามีการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียทั้งสองชนิดในหอยนางรมปากจีบ อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำในระบบ Depuration ที่สูงเกินไป โดยอุณหภูมิของน้ำทะเลในการศึกษาครั้งนี้อยู่ที่ 29-31 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง ซึ่งอุณหภูมิน้ำที่แนะนำให้ใช้ในระบบ Depuration สำหรับการลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียในหอยนางรมจะอยู่ระหว่าง 10-25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของน้ำที่สูงมากกว่า 20 องศาเซลเซียส ทำให้เกิด

การเพิ่มจำนวนของเชื้อวิบริโอในหอยระหว่างที่ทำการ Depuration ได้ (Lee, Lovatelli, & Ababouch, 2008) ซึ่งการลดอุณหภูมิของน้ำในระบบ Depuration เป็นการป้องกันการเพิ่มจำนวนของเชื้อแบคทีเรียในกลุ่มวิบริโอ (Chae et al., 2009) ดังนั้นถ้ามีการลดอุณหภูมิน้ำในระบบลงอาจจะทำให้ระบบ Depuration ที่ออกแบบในการศึกษาครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียในหอยนางรมเพิ่มขึ้นได้ และจากการศึกษาของ Chae et al. (2009) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิน้ำในระบบ Depuration ทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ *V. vulnificus* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมจะลดลง การศึกษาของ Tamplin and Capers (1992) พบว่าแสงอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในระบบ Depuration จะไม่สามารถฆ่าเชื้อ *V. vulnificus* ได้ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 23 องศาเซลเซียส

5.3.2 การลดการปนเปื้อนโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบ

สำหรับการลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบในระบบ Depuration ที่ออกแบบในการทดลองครั้งนี้พบว่าไม่สามารถลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบได้ แม้ว่าจะมีการจัดการกับตะกอนที่หอยคายออกมาในระบบแล้วก็ตาม ซึ่งแตกต่างจากการทดลองของสุวรรณา ภาณุตระกูล และเอื้ออารี คำดี (2551) ศึกษาการลดปริมาณโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบด้วยระบบ Depuration แบบน้ำวนขนาดเล็ก พบว่าสามารถลดปริมาณโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบได้ โดยปริมาณ Cd, Cu, Zn และ Hg มีค่าลดลง ยกเว้น Pb โดยมีอัตราการลดลงเท่ากับ 0.025, 5.474, 54.809 ไมโครกรัมต่อวันและ 0.804 นาโนกรัมต่อวันตามลำดับ โดยความหนาแน่นของหอยนางรมที่ใช้ในระบบนี้เท่ากับ 14 ตัวต่อน้ำ 100 ลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของหอยนางรมปากจีบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะเห็นว่าระบบ Depuration ของการทดลองในครั้งนี้ มีความหนาแน่นของหอยนางรมปากจีบอยู่ที่ 50 ตัวต่อน้ำ 100 ลิตร ซึ่งมากกว่าการทดลองของสุวรรณา ภาณุตระกูล และเอื้ออารี คำดี (2550)

ความหนาแน่นของหอยนางรมปากจีบที่ใช้ในระบบน่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่หอยคายออกมาในน้ำ อาจจะมีมากเกินกว่าที่ระบบกรองจะสามารถดูดซับโลหะหนักที่หอยนางรมคายออกมาได้ทัน ถึงแม้จะมีการดูดตะกอนออกจากระบบแล้วก็ตาม ก็ยังมีโลหะหนักบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้คงอยู่ในระบบ จึงทำให้ปริมาณโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบที่ผ่านการ Depuration ด้วยระบบที่ออกแบบในการศึกษาครั้งนี้ไม่ลดลง สุเมธ สุพิชญางกรู และคณะ (2541) ศึกษาการพัฒนากรรมวิธีลดสิ่งปนเปื้อนในหอยแครงมีชีวิต พบว่าถ้าใช้อัตราการไหลของน้ำทะเลและความหนาแน่นของหอยที่มากเกินไป ความสะอาดของหอยก็จะลดลง ทำให้เกิดการปนเปื้อนกลับในระบบได้

นอกจากการลดการปนเปื้อนของโลหะหนักด้วยวิธีการ Depuration แบบปิดแล้ว ยังพบว่ามีการศึกษาการลดการปนเปื้อนของโลหะหนักที่เป็นระบบเปิด โดยเป็นการย้ายหอยจากบริเวณที่มีการปนเปื้อนสูงไปสู่บริเวณที่มีการปนเปื้อนต่ำ (Relaying) (Maria et al., 2005; Chan et al., 1999; Geffard et al., 2002) ซึ่งระบบน้ำในระบบ Depuration แบบเปิดจะมีการถ่ายเท จึงช่วยลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำทะเล ทำให้ลดโอกาสเสี่ยงของการปนเปื้อนกลับในระบบได้เช่นกัน

5.4 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียและโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบด้วยระบบ Depuration แบบน้ำวน สรุปได้ว่า

1. ประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียในมวลน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำลดลง

2. การเพิ่มระบบกรองโลหะหนักที่ภายในประกอบด้วย หินปะการัง ซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์และหินภูเขาไฟ ทำให้ประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่เติมลงในมวลน้ำเพิ่มขึ้น

3. มีการเพิ่มจำนวนของ *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบในระบบ Depuration ที่ไม่มีการจัดการกับตะกอน

4. การจัดการกับตะกอนที่หอยคายออกมา ทำให้ประสิทธิภาพในการลด *V. cholerae* และ *V. parahaemolyticus* ในหอยนางรมปากจีบเพิ่มขึ้น

5. ระบบ Depuration ที่ออกแบบในการศึกษาครั้งนี้ ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบได้

5.5 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าระบบที่มีการจัดการกับตะกอนที่หอยคายออกมา สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียในหอยนางรมปากจีบได้ แต่ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของโลหะหนักได้ ซึ่งผลที่ได้อาจจะยังไม่ประสบความสำเร็จแต่ก็แสดงให้เห็นว่าระบบ Depuration ที่ออกแบบในการศึกษาครั้งนี้ มีความเป็นไปได้ที่จะนำรูปแบบและแนวทางดังกล่าวไปใช้ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคและโลหะหนักในหอยนางรมปากจีบ ถ้ามีการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อการลดสิ่งปนเปื้อนในหอยนางรมปากจีบควบคู่กันไปด้วย เช่นการใช้อุณหภูมิน้ำในระบบที่ต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส การลดความหนาแน่นของหอยนางรมที่ใช้หรือว่าการเพิ่มปริมาณน้ำที่ใช้ในระบบก็น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ Depuration ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคและโลหะหนักในหอยนางรมได้