บทที่ 2

การสำรวจเอกสาร

1. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

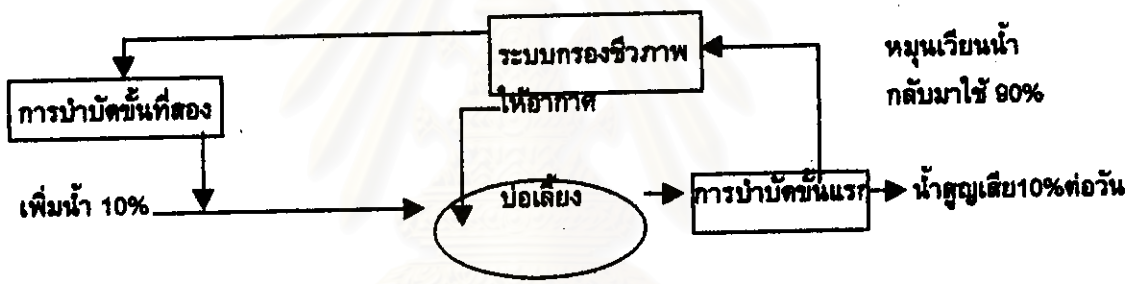
การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเป็นระบบเพาะเลี้ยงที่ปรับสภาพน้ำที่มีการใช้แล้วในบ่อเลี้ยงให้มีคุณภาพน้ำที่ดีขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การปรับสภาพดังกล่าวทำโดยระบบกรองชีวภาพเป็นระบบหลัก (Spotte, 1979) ซึ่งการปรับสภาพหรือบำบัดน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงแบบปิดน้ำจะถูกบำบัดหลายวิธีการก่อนที่จะนำน้ำกลับเข้าสู่บ่อเลี้ยง ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำน้อยมาก ในแต่ละวันอาจจะมีเพียงการเติมน้ำเข้าไปเพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยไปและควบคุมปริมาณไนเตรตเท่านั้น วิธีการบำบัดที่ถูกนำมาทดสอบมีทั้งวิธีการเดียว และการนำหลายวิธีมาใช้ร่วมกัน (ตารางที่ 1) โดยทั่วไปแล้วขบวนการต่างๆ เหล่านี้จะมีการทดลองในการทดลองขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่ไม่มีการทดสอบทางเศรษฐศาสตร์ วิธีการหลักที่มักนำมาใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดก็คือ การกรอง (screening), การจมตัว (settling), การกรองชีวภาพ (biological filtration), การให้อากาศ (aeration) และการฆ่าเชื้อโรค (disinfection)

ตารางที่ 1 วิธีทางกายภาพ, เคมี และ ชีวภาพ ที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำในระบบการนำน้ำมาใช้ใหม่

วิธีทางกายภาพ	วิธีทางเคมี	วิธีทางชีวภาพ
การกรอง	การให้อากาศ	ไนตริฟิเคชั่น
การจมตัว	การปรับสภาพความเป็นด่างและความกระด้างของน้ำ	ดีไนตริฟิเคชั่น
การหมุนเหวี่ยง	การดูดซับของธาตุคาร์บอน	
การควบคุมอุณหภูมิ	การควบคุมค่ากรดเบสของน้ำ	
การฆ่าเชื้อโรคโดยแสงอุลตร้าไวโอเลต	การแยกของเสียโดยฟองอากาศ	
	การแลกเปลี่ยนประจุ	
	การให้โอโซน	

ที่มา: ดัดแปลงจาก Lawson (1995)

รูปแบบของระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดโดยทั่วไป ดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ 90% โดยน้ำที่ออกจากบ่อเลี้ยงจะผ่านเข้าสู่การบำบัดขั้นแรก (primary clarification) เป็นการนำของแข็งออกจากน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวิธีการบำบัดโดยวิธีการทางกายภาพ อาจจะใช้เพียงวิธีการเดียวหรือหลายวิธีการรวมกัน เช่น การกรอง ร่วมกับการตกตะกอนเป็นต้น หลังจากผ่านการบำบัดขั้นแรก น้ำจะเข้าสู่ขั้นตอนการบำบัดที่สำคัญที่สุดในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดคือการบำบัดด้วยการกรองชีวภาพ (biological filtration) ซึ่งเป็นตัวควบคุมของเสียพวกไนโตรเจน (แอมโมเนีย, ไนไตรท์) จากนั้นน้ำจะเข้าสู่การบำบัดขั้นที่สอง (secondary clarification) เป็นการกำจัดฟล็อกทางชีวภาพ (biological floc) ที่เกิดจากตัวกรองทางชีวภาพซึ่งการกำจัดเป็นวิธีการที่คล้ายกับการบำบัดน้ำขั้นแรกอาจจะใช้วิธีการกรองหรือตกตะกอน และจะมีการให้อากาศเพิ่มเข้าสู่ระบบด้วย และหลังน้ำผ่านวิธีบำบัดแล้วน้ำจะกลับเข้าสู่บ่อเลี้ยง (Lawson, 1995)



รูปที่ 1 ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในการเพาะเลี้ยงน้ำที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ 90% ต่อวัน
ที่มา: ดัดแปลงจาก Lawson (1995)

2. ชนิดของวิธีบำบัดน้ำที่ใช้แล้ว

2.1 การบำบัดทางกายภาพ (physical treatment methods)

การนำของแข็ง (solids) ออกจากน้ำที่มีการใช้แล้วจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มักใช้วิธีทางกายภาพ (physical method) ขบวนการต่าง ๆ เหล่านี้คือ การกรอง (screening) และ การแยกสะสารโดยใช้แรงโน้มถ่วง (gravity seperation) คือ การตกตะกอน (sedimentation), การใช้แรงหมุนเหวี่ยง (centrifuging, hydrocione) รวมถึง การดักจับ (physical intercept) หรือ การดูดซับ (adsoption) ระหว่างตัวกรอง (filter bed) (Chen, Stechey and Malone, 1994 ; Lawson,1995)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.1 การกรอง (screening)

เป็นวิธีที่ง่ายและมีการใช้มานาน มักใช้ในขบวนการก่อนการบำบัดน้ำขั้นแรกโดยการนำตะแกรงขวางทางน้ำผ่านดักจับทั้งของแข็งทั้งขนาดเล็ก และใหญ่

ตะแกรงมีสองแบบคือแบบอยู่กับที่ (static screen) และ แบบเคลื่อนที่ (rotary screen) แบบอยู่กับที่ จะต้องทำความสะอาดโดยใช้แรงงาน และมักมีปัญหาการอุดตัน ส่วนแบบเคลื่อนที่จะมีกลไกในการทำความสะอาดทำให้ลดปัญหาการอุดตัน แต่ตะแกรงแบบเคลื่อนที่จะมีราคาแพงกว่าแบบอยู่กับที่

2.1.2 การใช้แรงโน้มถ่วงแยกตะกอน (gravity seperation)

2.1.2.1 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuges and hydroclone)

เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuges) ใช้หลักการแรงหนีศูนย์กลางของวัตถุที่มีความหนาแน่นต่างกันออกจากกัน ทำให้สะสารตกตะกอนได้เร็วขึ้น โดยการเหวี่ยงน้ำด้วยความเร็วสูงทำให้ตะกอนแยกออกจากน้ำ ส่วน hydroclone มีลักษณะเป็นภาชนะรูปกรวยมีการหมุนเพื่อให้เกิดการตกตะกอนโดยอาศัยหลักการเดียวกับ centrifuges คือแรงเหวี่ยงทำให้สะสารเคลื่อนที่ไปกระทบฝาผนังภาชนะและเคลื่อนที่ตกตะกอนลงสู่ด้านในสุด แต่วิธีการนี้มีความยุ่งยากเกินไปที่จะนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเนื่องจากต้องใช้ในกรณีที่น้ำมีการไหลอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีราคาแพงเกินไป

2.1.2.2 แผ่นและท่อตกตะกอน (plate and tube settles)

ลักษณะจะเป็นแผ่นหรือท่อที่ช่วยในการตกตะกอน เป็นช่องที่รูปเป็นช่องสี่เหลี่ยมด้านขนานหรือรูปทรงอื่น ที่ช่วยให้น้ำที่ไหลผ่านมีความปั่นป่วนลดลง ให้ระยะทางในการตกตะกอนสั้นลง ซึ่งมุมของช่องจะอยู่ประมาณ 45-60 องศา เพราะถ้ามุมน้อยกว่า 30 องศา จะทำให้เกิดตะกอนในช่องของแผ่นและท่อตกตะกอนมักเป็นอุปกรณ์ที่นำไปใช้ช่วยการตกตะกอนในอ่างตกตะกอน (sedimentation basin)

2.1.2.3 การตกตะกอน (sedimentation) เป็นขบวนการที่ทำให้สารแขวนลอย และสารจมตัว(settleable matter) แยกออกจากของเสียโดยแรงโน้มถ่วง ซึ่งเครื่องมือที่ช่วยในการตกตะกอนจะมีลักษณะเป็นอ่างเรียกว่าอ่างตกตะกอน (sedimentation basin) มีหลักในการออกแบบคือจะทำให้น้ำที่ไหลผ่านมีความเร็วลดลงเพื่อให้ตกตะกอนได้ และในอ่างตกตะกอนบางชนิดมีการใช้สารเคมีช่วยทำให้ตกตะกอนด้วย

2.2 การบำบัดทางเคมี (chemical treatment method)

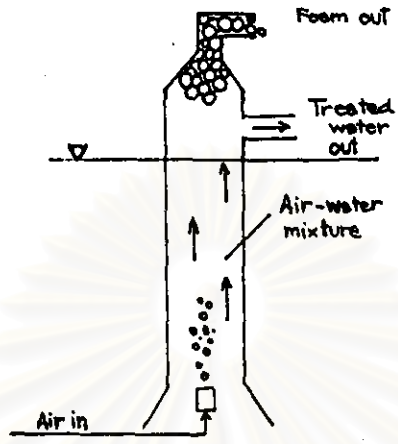
วิธีบำบัดทางเคมีมีเพียงสามวิธีเท่านั้นที่นำมาใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดใหญ่ คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon), การแยกโดยฟองอากาศ (foam fractionation) และ การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) (Lawson, 1995)

2.2.1 ถ่านกัมมันต์

เป็นถ่านที่ได้รับความร้อน 900 ^{0}C โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศ ซึ่งจะทำให้มีการออกซิไดซ์แกส ทำให้เกิดรูในโครงสร้างของถ่าน ดังนั้นถ่านจึงสามารถใช้ในการดูดซับสารแขวนลอย, สี และความขุ่น เมื่อถ่านกัมมันต์เกิดการอุดตันต้องมีการฟื้นฟูสภาพใหม่ (regenerate) โดยการนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง

2.2.2 การแยกของเสียโดยฟองอากาศ (foam fractionation) (รูปที่ 2)

เป็นกระบวนการใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ (dissolved organic matter และ particulate organic matter) โดยการดูดซับบนพื้นที่ผิวของฟองอากาศที่ลอยขึ้นซึ่งจะสะสมสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดสารที่ถูกกำจัดออกไปจะมีโมเลกุลสองขั้ว คือ ขั้วที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำขั้วที่ไม่ชอบน้ำก็จะจับกับฟองอากาศ และถูกกำจัดออกจากน้ำด้วยวิธีดังกล่าว เพื่อให้ขบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีคอลัมน์ (column) เพื่อเพิ่มระยะทางในการจับฟองอากาศกับของเสียซึ่งมีตัวให้อากาศอยู่ใต้คอลัมน์ และต้องควบคุมให้ขนาดความเร็วของฟองอากาศที่สร้างขึ้นให้มีขนาดพอเหมาะที่จะจับกับ dissolved organic matter และ particulate organic matter ในน้ำได้ สารอินทรีย์ก็จะถูกกำจัดออกทางด้านบนของคอลัมน์โดยการลอยขึ้นไปของฟองอากาศ (Timmons, 1994)



รูปที่ 2 การแยกของเสียโดยฟองอากาศ (foam fractionation)
ที่มา: Lawson (1995)

2.2.3 การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)

เป็นกระบวนการโดยการแลกเปลี่ยนประจุ โดยมีวัสดุแลกเปลี่ยนประจุ คือ เรซิน (resin) โดยเรซินจะมีประจุชนิดที่แตกต่างกับสารที่ต้องการกำจัดที่ละลายอยู่ในน้ำที่ผ่านการใช้แล้ว การแลกเปลี่ยนประจุมีสองประเภทคือ การแลกเปลี่ยนประจุบวกและลบ การเลือกเรซินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสะสารที่ต้องการนำออกจากน้ำเสีย ข้อจำกัดของวิธีการแลกเปลี่ยนประจุคือ สามารถใช้ได้ดีในการทดลองหรือระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็ก แต่ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดใหญ่จะมีปัญหาด้านราคาและการฟื้นฟูสภาพของเรซิน

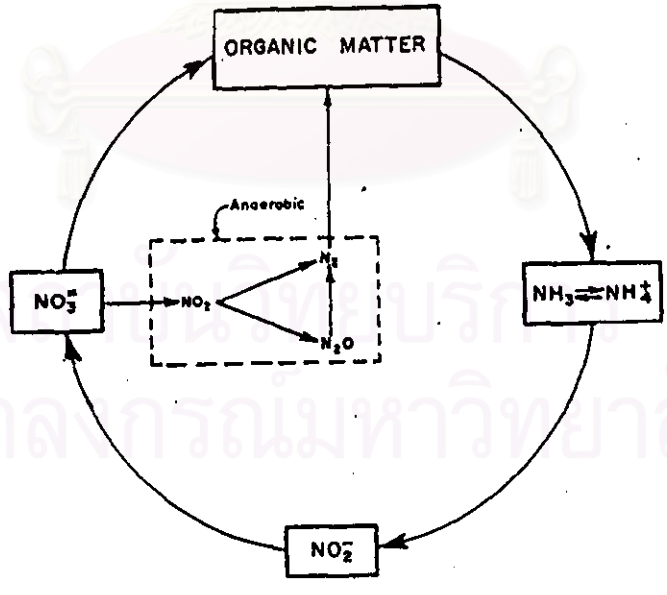
2.3 การบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment method)

ความหมายของการบำบัดทางชีวภาพ หมายถึงเทคนิคการบำบัดที่ใช้สิ่งมีชีวิต (living organisms) ในการกำจัดสสาร (substances) จากน้ำ คำจำกัดความรวมถึงระบบที่ใช้สาหร่ายและพืชชั้นสูง เพื่อกรองน้ำแต่ความหมายของการกรองชีวภาพหรือตัวกรองชีวภาพ ในที่นี้ใช้แทนการกำจัดแอมโมเนีย และไนไตรท์โดยแบคทีเรียซึ่งความหมายนี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปหลังจากที่แอมโมเนีย และออกซิเจนกลายเป็นปัจจัยจำกัดที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบปิด (Lawson, 1995)

2.3.1 กลไกการทำงานของระบบกรองชีวภาพ

การย่อยสลายของสารประกอบไนโตรเจนเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิด เนื่องจากการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน และการขับถ่ายของสัตว์น้ำจะได้ผลผลิตคือ แอมโมเนีย และไนไตรท์ซึ่งมีพิษต่อสัตว์น้ำสูงมากคือสามารถส่งผลต่อสัตว์น้ำได้ที่ความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่ไนเตรทมีพิษน้อย จะมีพิษต่อสัตว์น้ำเมื่อความเข้มข้นสูงมาก ๆ ดังนั้นตัวกรองชีวภาพจึงต้องมีกลไกในการเปลี่ยนแอมโมเนีย และไนไตรท์เป็น ไนเตรท

ขบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์เริ่มจากการแยกตัวของสารอินทรีย์โดยฝ่านวัฏจักรไนโตรเจน (รูปที่ 3) เริ่มจาก heterotrophic bacteria ย่อยสลายสารประกอบที่ซับซ้อน (complex compounds) ให้เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน (simple compounds) และกลายเป็นแอมโมเนียในที่สุด โดยแอมโมเนียจะเป็นผลผลิตสารอนินทรีย์ตัวแรก จากนั้นแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียที่สร้างพลังงานจากสารอนินทรีย์กล่าวคือสามารถนำพลังงานจากปฏิกริยาการออกซิไดซ์ของแอมโมเนียมาใช้ประโยชน์ได้ แบคทีเรียสกุลสำคัญที่สุดคือแบคทีเรียสกุล *Nitrosomonas* ซึ่งแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไนไตรท์ และไนไตรท์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทโดยมีแบคทีเรียสกุลสำคัญคือ *Nitrobacter* ซึ่งตัวกรองชีวภาพจะต้องมีแบคทีเรียทั้งสองสกุลคือ *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรทตามวัฏจักรไนโตรเจน



รูปที่ 3 วัฏจักรไนโตรเจน

ที่มา: Wheaton , Hochheimer , Kaiser, Krone *et al.*, (1994)

ไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สำคัญในวัฏจักรไนโตรเจน และมีความสำคัญต่อระบบกรองชีวภาพเป็นแบคทีเรียพวก chemosynthetic autotrophs หรือ chemolithitrophs กล่าวคือ autotrophic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สร้างพลังงานจากสารประกอบอนินทรีย์ ตรงกันข้ามกับพวก heterotrophs ซึ่งสร้างพลังงานจากสารประกอบอินทรีย์ อีกทั้ง aurotrophs ได้คาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนจากโมเลกุลของน้ำ, แอมโมเนีย, หรือจากอากาศ และมากกว่า 400 ชนิดของแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียได้แต่มี *Nitrosomonas* sp. เป็นหลัก และเป็นตัวที่ ออกซิไดซ์ได้ดีที่สุด (Spotte, 1979 ; Lawson, 1995)

ขบวนการไนตริฟิเคชั่นมีสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์โดยแบคทีเรีย *Nitrosomonas* ดังสมการที่ (1)

$$NH_4^+ + 1.5\ O_2 \longrightarrow 2H^+ + H_2O + NO_2 \qquad (1)$$

ขั้นที่สองเป็นการออกซิไดซ์ของไนไตรท์เป็นขั้นตอนเดียว ๆ ของการใช้ออกซิเจนจากน้ำเพื่อสร้างไนเตรตใช้เพียงหนึ่งโมเลกุลของออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลกตรอนดังสมการ (2)

$$NO_2 + 0.5O_2 \longrightarrow NO_3 \qquad (2)$$

สองสมการข้างต้นเป็นปฏิกริยาเคมีหลักที่เกิดขึ้นในการเปลี่ยนรูปแอมโมเนีย และไนไตรท์ของตัวกรองชีวภาพ ดังนั้นตัวกรองชีวภาพต้องมีแบคทีเรียทั้งสองสกุลอยู่ในระบบ (Atlas and Bartha, 1987 อ้างถึงใน Lawson, 1995 ; Hugnennin and Colt, 1989)

2.3.2 ชนิดของตัวกรองชีวภาพ

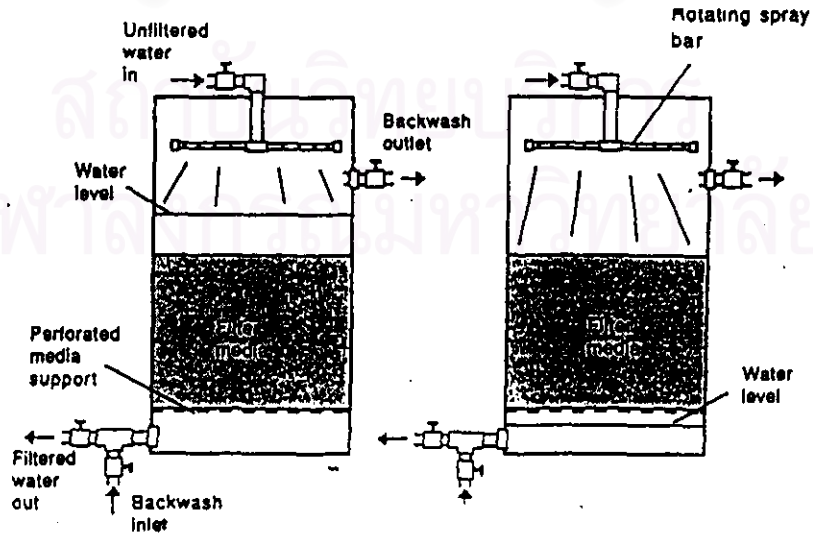
ตัวกรองชีวภาพมีมากมายหลายชนิดซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการเลียนแบบจากการกำจัดน้ำเสียในอุตสาหรรม ซึ่งในการทดลองเกี่ยวกับตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำช่วงแรกสุดที่มีการใช้กันคือตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาตัวกรองชีวภาพแบบอื่น ๆ ขึ้นมาซึ่งหลักการส่วนใหญ่ดัดแปลงมาจากตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำ (Lawson, 1995)

2.3.2.1 ตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำ (submerged filters)

ตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำเป็นตัวกรองชีวภาพแบบแรกสุด และมีการใช้งานมาจนถึงทุกวันนี้ วัสดุกรอง (filter media) จะจมน้ำอยู่ตลอดเวลา และเป็นวัสดุกรองแบบอยู่กับที่อยู่ได้ทั้งในภาชนะแบบด้านบนเปิดหรือด้านล่างเปิด ดังรูปที่ 4 (a) แสดงภาพตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำที่มีภาชนะด้านบนเปิด หลักการคือบนวัสดุกรองที่จมน้ำอยู่ตลอดเวลาจะเป็นที่ยึดเกาะของแบคทีเรียที่ควบคุมของเสียจำพวกไนโตรเจน โดยมีน้ำที่จะบำบัดไหลผ่านระบบโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง หรือการพ่นน้ำเข้าสู่ระบบกรอง อย่างไรก็ตามตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำมักจะมีปัญหาเรื่องการขาดออกซิเจนของตัวกรอง และปัญหาการอุดตันของตัวกรอง ซึ่งปัญหาการอุดตันของตัวกรองแก้ปัญหาได้โดยทำการล้างย้อนกลับ (backwash) และใช้วัสดุกรองที่เมื่อเรียงตัวแล้วมีช่องว่างเป็นจำนวนมาก

2.3.2.2 ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (trickling filters)

ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรองเป็นระบบกรองชีวภาพที่วัสดุกรองอยู่กับที่อยู่ในภาชนะที่ด้านบนเปิด โดยวัสดุกรองมีหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะของแบคทีเรียที่ควบคุมของเสียจำพวกไนโตรเจน โดยมีน้ำที่จะบำบัดไหลผ่าน ระบบกรองชีวภาพชนิดนี้จะไม่มีส่วนที่จมน้ำ (รูปที่ 4 (b)) แต่จะมีการโปรยน้ำผ่านระบบกรองอยู่ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้ตัวกรองแห้ง เพราะถ้าตัวกรองแห้งแบคทีเรียที่เกาะอยู่บนวัสดุกรองจะตาย ข้อเสียของระบบนี้คือจะมีการอุดตันเร็วการแก้ไขทำได้โดยการทำการล้างย้อนกลับ และใช้วัสดุกรองที่เมื่อเรียงตัวแล้วมีช่องว่างเป็นจำนวนมาก

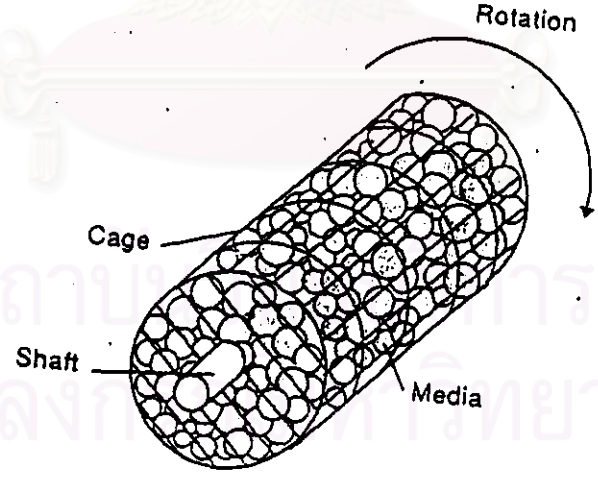


รูปที่ 4 a.ตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำ b. ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง
ที่มา: Lawson (1995)

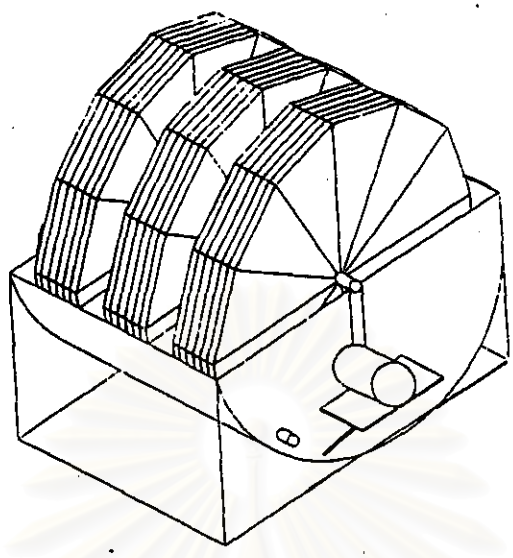
2.3.2.3 ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกรองหมุน (rotating media filters)

ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกรองหมุนเป็นระบบกรองชีวภาพที่มีการหมุนของตัวกรอง โดยระบบกรองนี้มักแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือเป็นแผ่นหมุนรูปกลมเรียงซ้อนกันเรียกว่าตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นจานหมุน (biodisk) (รูปที่ 6) หรือเป็นภาชนะทรงกระบอกบรรจุวัสดุกรอง เช่น วัสดุทรงกลมขนาดเล็กไว้ภายในกันเรียกว่าไบโอดรัม (biodrum) (รูปที่ 5) ซึ่งระบบกรองแบบนี้จะมีแกนหมุนการใช้งานตัวกรองจะจมน้ำประมาณ 30-50% และจะหมุนช้า ๆ อยู่ตลอดเวลา ข้อดีของตัวกรองประเภทนี้คือจะไม่อุดตัน และมีการกำจัดแผ่นฟิล์มชีวภาพที่สร้างโดยแบคทีเรียที่หนาเกินไปออกจากตัวกรองด้วย . และการหมุนอยู่ตลอดเวลาของตัวกรองนี้ยังเป็นการเพิ่มอากาศเข้าสู่ระบบด้วย

ในตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นจานหมุนจะประกอบด้วยแผ่นจานหมุนหลายอันเรียงกัน (รูปที่ 6) ช่องว่างระหว่างจานไม่น้อยกว่า 13 มม. เพื่อหลบหลีกการประสานกันระหว่างฟิล์มจานหมุนจะทำจากไฟเบอร์กลาสที่เรียบหรือฝ่น, แผ่นพลาสติก แต่จานหมุนต้องมีผิวหยาบเพื่อการเกาะที่ดีของแผ่นฟิล์มชีวภาพ ส่วนตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมสามารถเพิ่มอากาศได้มาก แต่ต้องใช้พลังงานในการหมุนมาก แต่ถ้าใช้วัสดุกรองที่มีน้ำหนักเบาก็สามารถประหยัดพลังงานได้ วัสดุกรองหลายชนิดที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จเช่น ลูกทรงกลมพลาสติก วัสดุรูปวงแหวน เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ผิวมาก



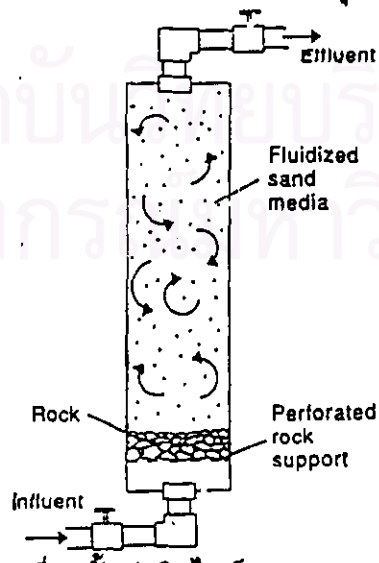
รูปที่ 5 ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม
ที่มา: Lawson (1995)



รูปที่ 6 ตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นจานหมุน
ที่มา: Wheaton, Hochheimer, Kaiser, Malone *et al.*, 1994

2.3.2.3 ชั้นฟลูอิดไดซ์ (fluidized bed reactor)

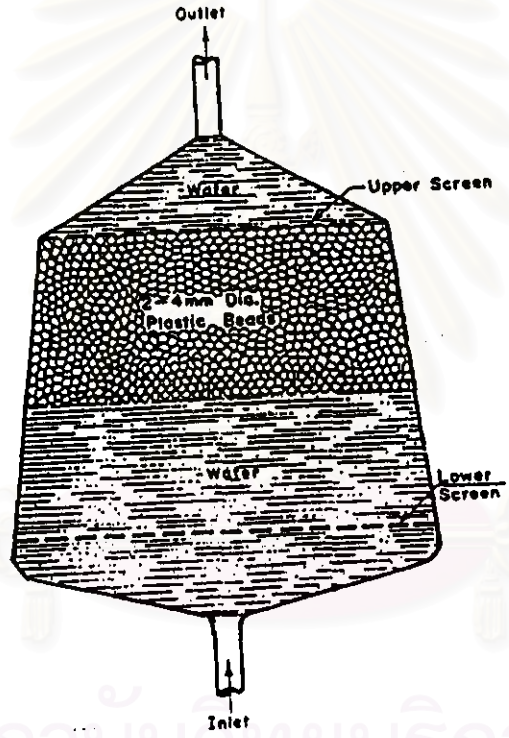
ชั้นฟลูอิดไดซ์ (รูปที่ 7) เป็นตัวกรองที่วัสดุกรองบรรจุอยู่ในภาชนะแนวตั้งวัสดุกรองจะเป็นวัสดุกรองที่หนักพอสมควรและมีขนาดเล็ก เช่น ทราย เป็นต้น หลักการคือวัสดุกรองจะกระจายตัวเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการสูบน้ำเข้าไปอย่างแรง ทำให้น้ำสัมผัสตัวกรองได้มากขึ้น และเพิ่มออกซิเจนให้ตัวกรองซึ่งต้องใช้กำลังน้ำมาก ตัวกรองชนิดนี้จะไม่มีความสามารถในการจับของแข็ง จึงต้องใช้ร่วมกับวิธีการกำจัดของแข็ง อย่างไรก็ตามตัวกรองชนิดนี้จะมีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนีย และไนไตรท์ได้มากที่สุด เพราะสามารถได้รับออกซิเจนได้เต็มที่



รูปที่ 7 ชั้นฟลูอิดไดซ์ (fluidized bed reactor)
ที่มา: Lawson (1995)

2.3.2.5 low density media filters (floating bead filters)

เป็นตัวกรองชีวภาพที่มีวัสดุกรองที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำบรรจุในภาชนะปิด ซึ่งมีการทำให้วัสดุกรองกระจายตัวเพื่อสัมผัสกับน้ำที่ใช้แล้วที่เข้ามา วัสดุกรองก็ทำการกำจัดของเสียที่มีองค์ประกอบไนโตรเจน และยังมีการกำจัดสารแขวนลอยโดยการเกาะกลุ่มกันของวัสดุกรอง และสารแขวนลอยตกลงสู่ช่องที่ตกตะกอนของตัวกรองโดยช่วงนี้จะไม่มีการทำให้วัสดุกรองกระจายตัวเพื่อให้ตะกอนตกลงมา



รูปที่ 8 low density fitter media (floating bead filter)

ที่มา : Wheton, Hochheimer, Kaiser, Malone *et. al.*, 1994

2.3.3. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบกรองชีวภาพ

2.3.3.1 ปัจจัยทางเคมี (chemical factor)

- ค่ากรด-เบส (pH)

ค่ากรด-เบสที่เหมาะสมต่อตัวกรองชีวภาพต้องมีช่วงระหว่าง 6-9 ซึ่งเป็นช่วงที่แคบ แบคทีเรียจำพวกไนตริฟายอิ้งจะปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากรด-เบสอย่างช้าๆ ค่าค่ากรด-เบสต่ำสุดที่แบคทีเรียจำพวกไนตริฟายอิ้งต้องการคือ 6.5–7 ขบวนการไนตริฟิเคชั่นจะถูกยับยั้งเมื่อค่ากรด-เบสเริ่มต่ำกว่า 7

แบคทีเรียจำพวกไนตริฟายอิ้งสามารถปรับตัวเมื่อค่าค่ากรด-เบสมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอัตราของการปรับตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของแอมโมเนีย, และปัจจัยอื่น ๆ

- ค่าความเป็นด่าง (alkalinity)

ค่าความเป็นด่างสามารถวัด bufferring capacity ของระบบน้ำได้ ปฏิกริยาไนตริฟิเคชั่นจะสร้างสภาพความเป็นกรดโดยการสร้างไฮโดรเจนอิออน และใช้ความเป็นด่างทำให้ค่ากรด-เบสของระบบลดลง ถ้าระบบเลี้ยงมี buffering capacity น้อย ค่ากรด-เบสของระบบก็ลดลง

ดังนั้นบางครั้งต้องใช้สารเคมีที่ช่วยเพิ่มความเป็นด่างช่วยในการปรับค่าความเป็นด่างให้ระบบซึ่งสารเคมีจำพวกนี้มีด้วยกันหลายชนิดต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม เพราะสารเคมีแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป

- แอมโมเนีย และไนไตรท์

ปริมาณของแอมโมเนียและไนไตรท์มากๆ จะมีพิษต่อไนตริฟายอิ้งแบคทีเรีย *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* โดยจะมีอาการต่อระดับของพิษต่างกัน ตัวยับยั้งหลัก ๆ คือ แอมโมเนียอิสระ (un-ionized ammonia) และ กรดไนตรัส(HNO_3)

แอมโมเนียอิสระ จะยับยั้งการทำงานของ *Nitrosomonas* ที่ 10-150 มก./ลิตร และจะยับยั้งการทำงานของ *Nitrobacter* ที่ 0.1-10 มก.ลิตร กรดไนตรัสจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มที่ความเข้มข้น 0.22-218 มก./ลิตร (Lawson, 1995)

- ออกซิเจน

อัตราของการไนตริฟิเคชั่นในตัวกรองชีวภาพจะลดลงถ้าขาดออกซิเจน เมื่อวัฏจักรไนโตรเจนเริ่มต้นจะมีการนำออกซิเจนเข้าไปใช้ในปฏิกริยาต่าง ถ้าปล่อยให้ออกซิเจนต่ำกว่า 1 มก./ลิตร จะทำให้ออกซิเจนกลายเป็นตัวปัจจัยจำกัดแทนแอมโมเนีย น้ำที่ไหลออกจากตัวกรองอย่างน้อยควรมีออกซิเจน 2 มก./ล. ส่วนน้ำไหลเข้าควรมีออกซิเจน 5-6 มก./ล. ถ้าออกซิเจนมีปริมาณต่ำมากๆ จะทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนแบคทีเรียที่สร้างพลังงานโดยไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) จะสร้างมีเทน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (Whaeton, Hochheimer, Kaiser, Krone *et al.*, 1994)

-. ตะกอนแขวนลอย (suspended solid)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ตะกอนแขวนลอยส่วนใหญ่ที่เป็นสารอินทรีย์เกิดจากเศษอาหาร และของเสียจากสัตว์น้ำเป็นต้น ส่วนสารอนินทรีย์ เช่น เศษทราย เป็นต้น เกี่ยวกับตะกอนแขวนลอยยังไม่มีรายงานโดยตรงว่ามีผลกระทบต่อระบบกรองชีวภาพ แต่พบว่าตะกอนแขวนลอยจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ตะกอนแขวนลอยจะเข้าไปอุดตันตัวกรองและส่วนอื่นๆ ของระบบ อีกทั้งการสลายตัวของตะกอนแขวนลอยยังทำให้ปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนในระบบ และเป็นที่สะสมของเชื้อโรคด้วย

- ความเค็ม (salinity)

ไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียสามารถปรับตัวในความเค็มเกือบทุกช่วงถ้าความเค็มมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ ไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียน้ำจืดจะถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ด้วยน้ำเค็ม และถ้าความเค็มมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 5 ส่วนในพันส่วน อย่างฉับพลันจะทำให้ไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียเกิดการชะงัก และลดอัตราการกำจัดแอมโมเนีย และไนไตรท์ได้ (Lawson, 1995)

ปัจจัยทางกายภาพ (physical factor)

- อุณหภูมิ

ไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียสามารถปรับตัวได้ในอุณหภูมิช่วงกว้างถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้า ๆ จากการศึกษาของ Wortman และWheaton (1991) เป็นการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 7-35 C° (45-95 F°) ต่อขบวนการไนตริฟิเคชั่นของตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม พบว่าการกำจัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมมีความความสัมพันธ์แปรตามกันกับอุณหภูมิ ส่วนในไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียน้ำเค็มมีรายงานของ Kawai *et al.* (1966) อ้างถึงใน Spotte (1979) ได้รายงานอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเติบโตคือ 30-35 C°

- แสง

พบว่าไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียทำงานได้ดีในที่มืด แต่ความเข้มแสงต้องไม่น้อยกว่า 1 % ของแสงในวันปกติเพราะจะเป็นการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย สาเหตุที่แบคทีเรียทำงานได้ดีในที่มืดคาดว่าเนื่องมาจากแสงจะไปออกซิไดซ์ cytochrome c ทั้งใน *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* แต่ *Nitrobacter* จะไวต่อแสงมากกว่าเพราะว่ามี cytochrome c มาก (Whaeton, Hochheimer, Kaiser, Krone *et al.*, 1994)

- วัสดุกรอง (filter media)

การเลือกวัสดุกรอง มีความสำคัญต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพเนื่องจากมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย วัสดุที่นำมาใช้ในตัวกรองชีวภาพในปัจจุบันมีมากมายหลายรูปแบบสิ่งสำคัญในการเลือกวัสดุกรองก็คือ วัสดุที่ใช้ทำวัสดุกรองต้องไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ต้องคำนึงถึงน้ำหนัก พื้นที่ผิว และอายุการใช้งาน ซึ่งการเลือกก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกรอง และสภาพการใช้งาน เช่นในตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมต้องเลือกวัสดุกรองที่มีน้ำหนักเบาเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการหมุนตัวกรองเป็นต้น

วัสดุกรองที่ใช้ในปัจจุบันมีสองชนิดคือวัสดุกรองธรรมชาติ และวัสดุกรองสังเคราะห์ซึ่งวัสดุกรองธรรมชาติ คือ ทราย หินเปลือกหอย จะมีราคาถูก แต่มีปัญหาเรื่องน้ำหนักที่มาก หรือในทรายจะมีปัญหาที่มีการอุดตันเร็วเพราะช่องว่างน้อย ส่วนในวัสดุกรองที่ทำจากพลาสติกและเซรามิคจะมีความคงทนกว่า และจะมีปัญหาการอุดตันน้อย แต่วัสดุกรองพวกนี้จะมีราคาแพงและไม่มีความสามารถในการเพิ่ม buffering capacity เหมือนในวัสดุธรรมชาติพวกเปลือกหอยหรือหินปะการัง

3. การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาและทดลองในการนำระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมากมายหลายรูปแบบของตัวกรองชีวภาพ และมีการทดลองกับสัตว์น้ำหลายประเภทดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาการทำงานของตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมโดยใช้สารเคมีสังเคราะห์

การศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของระบบกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมโดย Wortman และ Wheaton (1991) ได้ทดลองเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่มีต่อขบวนการไนตริฟิเคชั่น ของตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม พบว่าอุณหภูมิจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันกับปริมาณแอมโมเนียในอุณหภูมิช่วง 7-35 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 35 องศาเซลเซียส จะมีการสะสมของไนไตรท์เกิดขึ้นส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมในการศึกษาครั้งนี้คือ 25 องศาเซลเซียส และไบโอดรัมมีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียได้มากกว่าตัวกรองชีวภาพแบบอื่น (หน่วยต่อพื้นที่ของตัวกรองชีวภาพ)

ส่วนการศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมกับตัวกรองชีวภาพประเภทอื่นโดย Rogers and Klemetson (1985) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพ 4 ชนิดคือ ตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นหมุนชีวภาพ ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (trickling filter) และตัวกรองชีวภาพแบบไร้อากาศใต้น้ำ (submerged anaerobic filter) ปรากฏว่าตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นหมุนชีวภาพมีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวได้มากที่สุด (>90%) รองลงมา ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม (>80%) และ ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (50%) ตามลำดับ ส่วนตัวกรองชีวภาพแบบไร้อากาศใต้น้ำ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตได้ดีสามารถนำไปใช้ควบคู่กับตัวกรองชีวภาพในระบบที่มีอากาศ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบตัวกรองที่มีขนาดเท่ากันพบว่ากรองชีวภาพแบบไบโอดรัมจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นหมุนชีวภาพและสามารถเพิ่มอากาศให้แก่ระบบได้มากกว่า (Lawson, 1995)

3.2. การใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงกุ้งทะเล

การศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงกุ้งทะเลนั้นมีทั้งการเพาะฟักและอนุบาล และรวมถึงการเลี้ยงในระยะวัยรุ่น ซึ่งมีดังต่อไปนี้

การศึกษาเกี่ยวกับการเพาะฟักและอนุบาลกุ้งกุลาดำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดนั้น Millamena, Casalmir and Sobusa (1991) ซึ่งทำการอนุบาลกุ้งกุลาดำตั้งแต่ระยะนอเพลียสถึง

ระยะหลังวัยอ่อน (postlarval stage) ในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดที่มีชั้นกรองชีวภาพร่วมกับระบบการตกตะกอนแบบคดเดี้ยว พบว่าการเลี้ยงประสบความสำเร็จดีมีอัตราการรอด 35% นอกจากนั้นยังได้ทำการเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กุ้งกุลาดำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพเปรียบเทียบกับระบบเปิด พบว่ากุ้งที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดจะมีความสมบูรณ์เพศดีกว่า ส่วนคุณภาพน้ำปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์มีค่าต่ำกว่า 1 ส่วนต่อล้านส่วน

ซึ่งในประเทศไทยมีผู้ศึกษาเรื่องนี้คือ Menasveta *et al.* (1989) ได้ทำการเลี้ยงกุ้งพ่อแม่พันธุ์กุ้งกุลาดำและอนุบาลกุ้งแชบ๊วย (*Penaeus merguiensis*) ระยะหลังวัยอ่อน (postlarva) ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพอยู่ด้านในของบ่อ เปรียบเทียบกับการเลี้ยงระบบเปิดที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกวัน พบว่าในระบบปิดอัตราในการผลิตไข่ (spawning rate) จะต่ำกว่า แต่อัตราฟักไข่ (hatching rate) ไม่แตกต่างกัน ส่วนในการอนุบาลกุ้งแชบ๊วยพบว่าในระบบเปิดจะมีอัตราการรอดมากกว่าแต่ในระบบปิดมีคุณภาพน้ำที่ดีกว่ามาก ต่อมา Menasveta *et al.* (1991) ได้ทำการปรับปรุงระบบบ่อเลี้ยงเดิมให้เป็นระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีบ่อกรองที่มีชั้นกรองชีวภาพแยกส่วนทำการเลี้ยงกุ้งพ่อแม่พันธุ์กุ้งกุลาดำที่มาจากแหล่งที่ต่างกัน พบว่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี และการเพาะฟักประสบความสำเร็จ ส่วนความสมบูรณ์ทางการสืบพันธุ์ของกุ้งมีความแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของกุ้งและชนิดของอาหารที่ให้

นอกจากนี้ยังมีการทดลองเลี้ยงกุ้งกุลาดำในระยะวัยรุ่นโดย Tseng, Su and Su. (1998) เลี้ยงกุ้งกุลาดำน้ำหนักเฉลี่ย 5-8 กรัม โดยใช้ตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำเป็นเวลา 2 เดือน ที่ความหนาแน่น 40, 80 และ 160 ตัว/ตรม. ตามลำดับ ได้ผลโดยมีอัตรารอดคือ 89%, 76% และ 60% ตามลำดับ

ส่วนในประเทศไทยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำวัยรุ่นโดย ธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดำ (2541) ได้เลี้ยงกุ้งกุลาดำ 2 ครั้ง แต่ละครั้งใช้เวลา 5 เดือน โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่มีระบบไนตริฟิเคชั่นกับไม่มีระบบไนตริฟิเคชั่น พบว่าทั้งสองชุดการทดลองสามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ปกติได้ทั้งสองชุดการทดลอง แต่ในการทดลองเลี้ยงกุ้งกุลาดำครั้งที่สองชุดการทดลองที่มีระบบไนตริฟิเคชั่นสามารถทำให้ปริมาณไนเตรทลดลงได้ ในการทดลองครั้งแรกใช้กุ้งกุลาดำที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 21 กรัม มีอัตราการรอดคือ 11.7% และ 8.51% ในครั้งที่สองใช้กุ้งกุลาดำที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 10 กรัม มีอัตราการรอดคือ คือ 22.41% และ 27.49%

2.3 การใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงปลา

การศึกษาเกี่ยวกับการนำระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดมาใช้ในการเลี้ยงปลานั้นได้ศึกษาในปลาหลายประเภทมีดังต่อไปนี้

Blancheton and Canaguier (1995) ทำการทดลองเลี้ยงปลาเก๋า (*Dicentrachus labrax*) ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีการกรองตะกอน และฆ่าเชื้อด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต และมีตัวกรองชีวภาพ โดยการเลี้ยงปลาเก๋า ตัวอ่อนและฟอแม่พันธุ์ พบว่าคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดมีคุณภาพดีกว่าปลาเก๋าที่เลี้ยงในระบบน้ำแบบเปิด แต่น้ำที่ผ่านระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจะมีแบคทีเรีย และสารแขวนลอยมากกว่า

สำหรับในตัวกรองชนิดอื่น Reyes and Lawson (1996) ออกแบบระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยง ที่มีตัวกรองชีวภาพ 2 ชนิดร่วมกันในการเลี้ยงปลานิล คือ ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางหมุน และตัวกรองชีวภาพแบบตัวกรองลอย (floating bead filter) พบว่าระบบสามารถเปลี่ยนแอมโมเนีย และไนไตรท์ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางหมุนสามารถกำจัดแอมโมเนียได้มากกว่าแบบตัวกรองลอย แต่ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกรองลอยก็สามารถกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งได้ดี

นอกจากนี้ยังมีการเลี้ยงปลานิล และปลาไนอย่างหนาแน่นในอิสราเอลโดย Mires and Amit (1990) เลี้ยงปลานิล (50 ตัว/ตร.ม.) และปลาไน (1 ตัว/ตร.ม.)ในบ่อขนาด 500 ตร.ม. ใช้ตัวกรองชีวภาพธรรมชาติ พบว่าอาหารปลาเป็นสาเหตุสำคัญของของเสียในระบบ มีการสะสมของแอมโมเนีย และไนไตรท์ ส่วนปริมาณออกซิเจนลดลงมากดังนั้นระบบที่ทดลองในครั้งนี้ต้องมีการจัดการที่ดีกว่านี้

ส่วนการเลี้ยงปลาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในประเทศไทยก็มีการศึกษาพอสมควร เช่น กำชัย ลาวัณยวุฒิ, (2526) ศึกษาการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงปลากะพงขาวขนาดเริ่มต้น 2 ซม. ในการเปรียบเทียบการเลี้ยงปลากะพงขาวด้วยอาหาร 4 ชนิด เป็นเวลา 70 วัน และ 84 วัน พบว่าอาการเนื้อปลาผสมวิตามินบีหนึ่งให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือเหยื่อเป็น เนื้อปลาสด และปลาเปรี้ยว ตามลำดับ คุณภาพน้ำในการทดลองครั้งนี้มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Suresh and Lin, (1992) ศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของปลาต่อคุณภาพน้ำและผลผลิตของปลานิลแดงในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีบ่อกรองชีวภาพแยกจากบ่อเลี้ยง โดยตัวกรองชีวภาพเป็นแผ่นกรองพลาสติกที่เรียงซ้อนกันถี่ ๆ พบว่าระบบสามารถกำจัดแอมโมเนีย และ ตะกอนได้ดี แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนไตรท์ได้น้อยและมีการสะสมของไนไตรท์ เกิดขึ้น ส่วนปลาที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น คือ 50 100 และ 200 ตัว/ตร.ม. จะมีการเจริญเติบโตที่ความหนาแน่นน้อยมากที่สุดรองลงมาเป็น กลางและสูงตามลำดับ แต่การเจริญเติบโตที่กลางและสูงไม่มีความแตกต่างกันแต่พบว่าปลาที่เลี้ยงในความหนาแน่นสูงจะสูญเสียประสาทสัมผัสในการมองเห็นไป