บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถแบ่งตามวิธีการเพาะเลี้ยงได้เป็น 2 ประเภท (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538) ดังต่อไปนี้

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือบ่อน้ำ การเพาะเลี้ยงด้วยวิธีนี้จะมีการใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มปริมาณแพลงก์ตอนพืชหรือจุลสาหร่ายในน้ำ เพื่อให้เป็นแหล่งอาหารแก่สัตว์น้ำทางอ้อม เนื่องจากสัตว์น้ำไม่สามารถใช้ปุ๋ยเป็นอาหารได้แต่ปุ๋ยจะทำหน้าที่เป็นสารอาหารให้แก่จุลสาหร่าย ซึ่งจะเป็นอาหารของสัตว์น้ำอีกต่อหนึ่ง โดยการเติมปุ๋ยจะต้องคำนึงถึงลักษณะของน้ำ เช่น ค่าพีเอช และปริมาณความขุ่น เนื่องจากถ้าค่าพีเอชต่ำเกินไปควรจะมีการเติมปูนขาวก่อนทำการใส่ปุ๋ย หรือถ้าความขุ่นของน้ำมีค่ามากเกินไปจะเกิดการปิดกั้นแสง ทำให้จุลสาหร่ายไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ นอกจากนี้จะต้องคำนึงถึงชนิดของปุ๋ยและปริมาณที่เหมาะสมด้วย เนื่องจากในน้ำอาจมีสารอาหารบางชนิดเพียงพออยู่แล้ว การเลือกใช้ปุ๋ยจึงควรเลือกชนิดสารอาหารที่ขาดแคลน ส่วนปริมาณปุ๋ยควรเติมในจำนวนที่พอเหมาะกับความต้องการของสัตว์น้ำ เนื่องจากการเติมปุ๋ยมากเกินไปจะทำให้จุลสาหร่ายเพิ่มจำนวนมากเกินความจำเป็น แต่ถ้าเติมปุ๋ยน้อยเกินไปอาจทำให้จุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำได้

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อที่จำกัดขนาด การเพาะเลี้ยงด้วยวิธีนี้จะทำการให้อาหารสำเร็จรูปกับสัตว์น้ำโดยตรงเพื่อให้สัตว์น้ำเจริญเติบโต โดยเฉพาะการเพาะเลี้ยงแบบหนาแน่นจะมีการให้อาหารในปริมาณมากเพื่อเพิ่มผลผลิตของสัตว์น้ำ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเสียตามมา เนื่องจากมีอาหารตกค้างและมีของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมามาก สารอินทรีย์ในอาหารเหล่านี้จะทำให้น้ำมีความต้องการออกซิเจนสูงขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการย่อยสลายตามธรรมชาติ ส่วนของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมาจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย ฟอสฟอรัส และสารอาหารต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้จุลสาหร่ายเจริญเติบโต แอมโมเนียที่เกิดขึ้นอาจถูกเปลี่ยนเป็นไนไทรต์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ค่าพีเอชของน้ำลดลงและมีผลต่อการหายใจของสัตว์น้ำ การใส่อาหารในปริมาณมากจึงเท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณจุลสาหร่ายและสารพิษต่างๆ ในน้ำ ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่นจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำใน

บ่อเพาะเลี้ยงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งปัญหาที่ควรให้ความสนใจ ได้แก่ การเกิดจุลสาหร่ายมากเกินไป การขาดแคลนออกซิเจน และการสะสมของของเสียที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เป็นต้น

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อความเป็นอยู่และสุขภาพของสัตว์น้ำ เนื่องจากเป็นสิ่งแวดล้อมที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ผลผลิตของสัตว์น้ำที่ดีและมีคุณภาพ โดยปัจจัยหลักที่ควรนำมาพิจารณาในการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำคือ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ สารอินทรีย์ สารอาหาร ก๊าซละลายน้ำ และสารพิษต่างๆที่เกิดขึ้นในน้ำ ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหรือค่าพีเอช

พีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญโดยตรงกับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ โดยการเพิ่มความเป็นกรดจะทำให้ค่าพีเอชลดลง และการเพิ่มความเป็นด่างจะทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับสภาวะของสัตว์น้ำแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับสภาวะของสัตว์น้ำ

ระดับพีเอช	**สภาวะของสัตว์น้ำ**
ต่ำกว่า 4	ตาย
4-5	ไม่สืบพันธุ์
4-6	เติบโตช้า
6.5-9	เติบโตได้ดี
9-11	เติบโตช้า
9.5-11	ไม่สืบพันธุ์
สูงกว่า 11	ตาย

(ที่มา: มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

โดยทั่วไปสัตว์น้ำสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในช่วงพีเอชเป็นกลางคือ ที่พีเอชประมาณ 6 ถึง 9 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชไปจากระดับที่เหมาะสมจะทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียดและส่งผลต่อสุขภาพของสัตว์น้ำได้ โดยน้ำที่มีค่าเป็นด่างมากเกินไปจะทำให้เกิดแอมโมเนียอิสระมากขึ้น ซึ่ง

มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เป็นอาหารของสัตว์น้ำจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากกว่าตัวของสัตว์น้ำเอง ทำให้ส่งผลกระทบต่อผลผลิตของสัตว์น้ำได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำสามารถเกิดขึ้นได้จากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.2.1.1 ความเป็นกรด

ความเป็นกรดหมายถึง ความสามารถของน้ำในการทำให้ด่างเป็นกลางโดยการให้ไฮโดรเจนไอออน ซึ่งน้ำที่มีพีเอชต่ำจะมีค่าความเป็นกรดมาก อย่างไรก็ตามน้ำที่มีพีเอชเท่ากันอาจมีค่าความเป็นกรดแตกต่างกันได้ เนื่องจากยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีผลต่อความเป็นกรดและค่าพีเอชของน้ำ ซึ่งค่าความเป็นกรดในน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

สภาพกรดอ่อน (Carbondioxide acidity) เป็นสภาพกรดที่เกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก น้ำที่มีสภาพกรดอ่อนเพียงอย่างเดียวจะมีค่าพีเอชสูงกว่า 4.3 ถึง 4.5

สภาพกรดแร่ (Mineral acidity) เป็นสภาพกรดที่เกิดจากกรดแร่ซึ่งเป็นกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริกหรือกรดไฮโดรคลอริก น้ำธรรมชาติมักไม่มีสภาพกรดแร่ และเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถลดค่าพีเอชของน้ำให้ต่ำกว่า 4.5 ได้ น้ำที่มีพีเอชต่ำกว่า 4.5 จึงเป็นน้ำที่มีกรดแร่ละลายอยู่

2.2.1.2 ความเป็นด่าง

ความเป็นด่างหมายถึง ความสามารถของน้ำในการทำให้กรดเป็นกลางโดยการรับไฮโดรเจนไอออน น้ำที่มีพีเอชสูงจะมีค่าความเป็นด่างมาก อย่างไรก็ตาม น้ำที่มีพีเอชเท่ากันอาจมีค่าความเป็นด่างแตกต่างกันได้ เนื่องจากยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น ค่าความเป็นกรดที่มีผลต่อความเป็นด่างและค่าพีเอชของน้ำ ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่ามากกว่า 20 ถึง 40 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร จึงจะให้ผลผลิตของสัตว์น้ำที่ดี

2.2.1.3 คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีแต่เนื่องจากมีอยู่ในชั้นบรรยากาศค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่นๆ จึงไม่พบในน้ำเป็นปริมาณมากนัก เมื่อละลายน้ำคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ค่าพีเอชของน้ำลดลงแต่มักไม่ทำให้พีเอชต่ำกว่า 4.5 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคาร์บอนไดออกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในเวลากลางคืนเนื่องจากการหายใจของพืชน้ำและจุลสาหร่าย ซึ่งจะส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงมีค่าต่ำสุดในช่วงเช้า และจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ในแง่ความเป็นพิษพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำเมื่อมีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำอย่างเพียงพอ แต่ถ้าในน้ำมีปริมาณออกซิเจนละลายลดลงคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถขัดขวางการใช้ออกซิเจนของสัตว์น้ำได้ และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มักมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าลดต่ำลง

2.2.1.4 ความกระด้างทั้งหมด

ความกระด้างทั้งหมดของน้ำคือ ผลรวมทั้งหมดของไอออนประจุบวกที่มีวาเลนต์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก เป็นต้น โดยความกระด้างทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับความเป็นด่างของน้ำเนื่องจากไอออนประจุบวกของความกระด้างและไอออนประจุลบของความเป็นด่างเกิดจากการแตกตัวของคาร์บอเนตชนิดต่างๆ โดยความกระด้างสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

ความกระด้างชั่วคราว (Carbonate hardness) คือความกระด้างที่เกิดจากคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^{2-}) ในน้ำ ความกระด้างชนิดนี้จะสลายตัวไปเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 100 °ซ

ความกระด้างถาวร (Non-carbonate hardness) คือความกระด้างที่เกิดจากไอออนประจุลบอื่นๆ เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}) คลอไรด์ (Cl^-) ไนเทรต (NO_3^-) และซิลิกาออกไซด์ (SiO_3^-) ความกระด้างชนิดนี้จะไม่สลายตัวเมื่อโดนความร้อน

โดยทั่วไปน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีความกระด้างทั้งหมดประมาณ 20 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร จึงจะมีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมเพียงพอต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.2.2 สารอินทรีย์

ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีสารอินทรีย์ละลายอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยสารอินทรีย์ที่พบในน้ำได้แก่ โปรตีน กรดอะมิโน น้ำตาล กรดไขมัน วิตามิน และกรดแทนนิน ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยได้แก่ แบคทีเรีย จุลสาหร่าย แพลงก์ตอนสัตว์ และซากจุลินทรีย์ที่เน่าเปื่อย โดยปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ควรมีการควบคุมเนื่องจากถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะทำให้น้ำเกิดการเน่าเสียได้

2.2.3 สารอาหาร

สารอาหารที่มีบทบาทสำคัญในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งรายละเอียดของสารอาหารแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ โดยไนโตรเจนส่วนใหญ่มักพบอยู่ในสิ่งมีชีวิตและสารอินทรีย์ที่เน่าเปื่อย ซึ่งรูปแบบของไนโตรเจนที่พบได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน แอมโมเนียอิสระ (NH_3) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไนไทรต์ (NO_2^-) ไนเทรต (NO_3^-) และสารอินทรีย์ไนโตรเจน แหล่งของไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่เกิดจากปุ๋ยและอาหารสำเร็จรูป ซึ่งปุ๋ยมักมีแอมโมเนียหรือไนเทรตเป็นองค์ประกอบ ปุ๋ยเหล่านี้ละลายน้ำได้ง่ายและแตกตัวให้ไอออนซึ่งจะถูกพืชและจุลสาหร่ายนำไปใช้ในการผลิตโปรตีนหรือสารอินทรีย์ไนโตรเจนรูปอื่นๆ จากนั้นจะถูกแพลงก์ตอนสัตว์หรือสัตว์น้ำบริโภคเข้าไปอีกต่อหนึ่ง และในท้ายที่สุดแล้วโปรตีนจากทั้งพืชและสัตว์น้ำจะกลายเป็นซากสารอินทรีย์ที่จะถูกจุลินทรีย์ในน้ำย่อยสลายต่อไป

2.2.3.2 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสที่พบในธรรมชาติมักเกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของกรดออร์โธฟอสเฟต (H_3PO_4) ดังสมการต่อไปนี้

$$H_3PO_4 \rightarrow H^+ + H_2PO_4^-$$

$$H_2PO_4^- \rightarrow H^+ + HPO_4^{2-}$$

$$HPO_4^{2-} \rightarrow H^+ + PO_4^{3-}$$

รูปของฟอสฟอรัสที่พบจะเปลี่ยนไปตามค่าพีเอชของน้ำ โดยในน้ำธรรมชาติจะมี $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 2 ถึง 7 จะมี $H_2PO_4^-$ เป็นหลัก แต่ถ้าน้ำมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7 ถึง 12 จะพบฟอสฟอรัสในรูปของ HPO_4^{2-} เป็นหลัก

ฟอสฟอรัสที่พบในน้ำจะมีปริมาณไม่มากนัก แต่เป็นธาตุอาหารที่ขาดไม่ได้เนื่องจากมีความสำคัญและจำเป็นต่อผลผลิตของสัตว์น้ำ ซึ่งฟอสฟอรัสสามารถพบได้ทั้งในรูปสารละลายและอนุภาคแขวนลอย โดยฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้จะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสมักเกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในขณะที่

สารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต สำหรับอนุภาคแขวนลอยในน้ำที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ จุลสาหร่าย แพลงก์ตอนสัตว์ และแบคทีเรียชนิดต่างๆ โดยแบคทีเรียในน้ำจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ฟอสเฟตในรูปของสารละลายหรือตะกอนแขวนลอยให้เป็นออร์โธฟอสเฟตได้ โดยทั่วไปปริมาณของออร์โธฟอสเฟตที่เหมาะสมในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 มก.-ฟอสฟอรัส/ลิตร ถ้าในน้ำมีปริมาณออร์โธฟอสเฟตน้อยกว่านี้ควรเติมปุ๋ยลงในน้ำเพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำ

2.2.4 ก๊าซ

ก๊าซละลายน้ำที่มีบทบาทสำคัญในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไนโตรเจน ซึ่งรายละเอียดของก๊าซแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.2.4.1 ออกซิเจนละลายน้ำ

ออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และเนื่องจากออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ทำให้การรักษาปริมาณออกซิเจนในบ่อเพาะเลี้ยงมีความสำคัญต่อผลผลิตของสัตว์น้ำมาก โดยเฉพาะในน้ำเค็มซึ่งมีปริมาณคลอไรด์ในน้ำสูงจะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยลงมาก ปริมาณออกซิเจนที่น้อยเกินไปจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำแต่ปริมาณของออกซิเจนที่สูงเกินไปก็สามารถก่อให้เกิดโรคในสัตว์น้ำได้เช่นกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายและผลต่อสัตว์น้ำแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายและผลกระทบต่อสัตว์น้ำ

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	**ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ**
< 1 มก./ลิตร	อาจมีอันตรายถึงตายต่อสัตว์น้ำถ้าเกิดขึ้นเป็นเวลานานหลายชั่วโมง
1-5 มก./ลิตร	สัตว์น้ำสามารถมีชีวิตอยู่ได้ แต่จะเจริญเติบโตช้าและไม่สามารถสืบพันธุ์ได้ดี
> 5 มก./ลิตร แต่ไม่เกินระดับอิ่มตัว	เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ
สูงเกินระดับอิ่มตัว	ทำให้เกิดฟองก๊าซในเลือดของสัตว์น้ำทำให้เกิดอันตรายถึงตายได้

(ที่มา: มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์และไพพรรณ พรประภา, 2538)

โดยสัตว์น้ำแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการทนต่อการขาดแคลนออกซิเจนได้ไม่เท่ากัน แต่โดยทั่วไปไม่ควรให้ออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าต่ำกว่า 3 มก./ลิตร และควรมีออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5 มก./ลิตร สัตว์น้ำจึงจะมีชีวิตได้ตามปกติ

2.2.4.2 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในสภาวะไร้ออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดในน้ำจะสามารถเปลี่ยนซัลเฟตให้กลายเป็นซัลไฟด์ ดังสมการต่อไปนี้

$$SO_4^{2-} + 8\,H^+ \rightarrow S^{2-} + 4H_2O$$

โดยค่าพีเอชจะเป็นตัวกำหนดชนิดและความเข้มข้นของซัลไฟด์ในน้ำ ถ้าน้ำมีค่าพีเอชต่ำจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นหลัก ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ดังนั้นการรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ส่วนน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางจะพบซัลไฟด์ในรูปไอออน ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ

2.2.4.3 ก๊าซไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยที่พบได้มากที่สุดในน้ำเนื่องจากเป็นก๊าซที่มีปริมาณมากที่สุดในอากาศ ทำให้มีไนโตรเจนละลายอยู่ในน้ำได้มากกว่าออกซิเจน แต่สิ่งมีชีวิตหลักๆในน้ำจะไม่สามารถใช้ก๊าซไนโตรเจนในการดำรงชีวิตได้เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนเป็นพันธะสามซึ่งมีความแข็งแรงมาก ก๊าซไนโตรเจนจึงต้องถูกตรึงให้อยู่ในรูปของสารประกอบไนโตรเจนก่อนที่จะถูกนำไปใช้โดยสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ แต่การมีก๊าซไนโตรเจนในน้ำมากเกินไปจะเป็นผลเสียต่อสัตว์น้ำโดยจะส่งผลให้เกิดฟองก๊าซในเลือดของสัตว์น้ำและทำให้เกิดโรคได้เช่นเดียวกับในกรณีของออกซิเจนละลายน้ำ

2.3 ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Boyd และ Tucker, 1998)

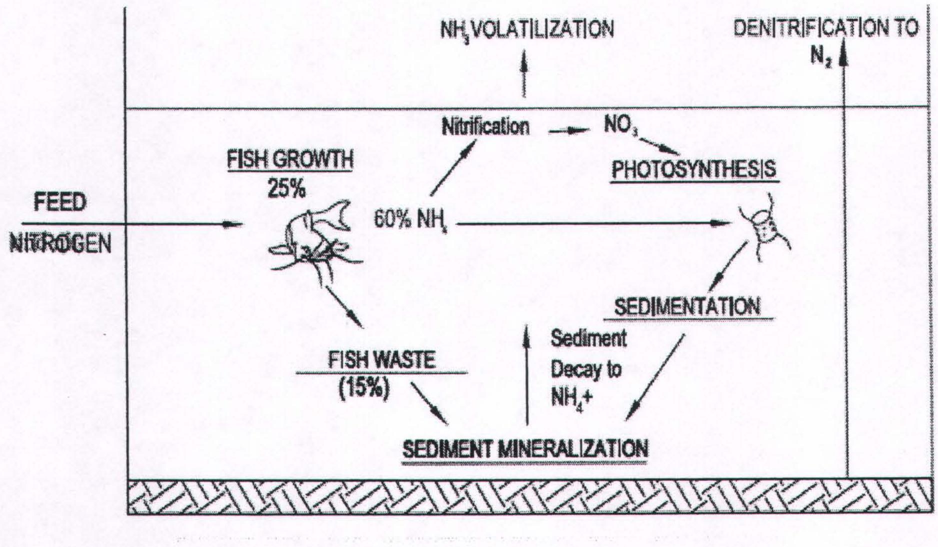
ไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่มีความสำคัญในระบบนิเวศน์สัตว์น้ำเนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีนและเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของโปรตีนจากอาหารและในรูปของของเสียที่ถูกขับออกมาจากสัตว์น้ำ โดยไนโตรเจนจะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารประกอบไนโตรเจน 3 ชนิดคือแอมโมเนีย

ไนไทรต์ และไนเทรต ซึ่งทั้งแอมโมเนียและไนไทรต์เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำแม้ในปริมาณน้อยและสามารถทำลายสภาพแวดล้อมในน้ำได้เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

ในระยะแรกไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกสะสมไว้ในเนื้อเยื่อของจุลสาหร่าย แพลงก์ตอนสัตว์ สัตว์น้ำ และแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในน้ำ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อใช้ดำเนินกิจกรรมภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ ซึ่งการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยวัฏจักรไนโตรเจนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 วัฏจักรไนโตรเจนในน้ำ

วัฏจักรไนโตรเจนคือความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบต่างๆ ของสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ภายในระบบนิเวศน์ โดยการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงประจุของไนโตรเจนในแต่ละขั้นของปฏิกิริยา (ไนโตรเจนมีประจุอิเล็กตรอนอยู่ในช่วงตั้งแต่ -3 ถึง +5) ซึ่งจะถูกควบคุมจากกิจกรรมทางชีวภาพเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Brune และคณะ, 2003)

วัฏจักรไนโตรเจนในน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่ การตรึงไนโตรเจน การนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่าย ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน การระเหยของแอมโมเนีย ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 11 ก.ย. 2555
เลขทะเบียน 248558
เลขเรียกหนังสือ

2.3.1.1 การตรึงไนโตรเจน

การตรึงไนโตรเจนเป็นการเปลี่ยนรูปก๊าซไนโตรเจนละลายน้ำให้กลายเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งแหล่งของไนโตรเจนที่สำคัญต่อระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้แก่

ไนโตรเจนจากแหล่งภายนอก ซึ่งได้แก่ ปุ๋ยและอาหารของสัตว์น้ำ โดยในระบบที่มีการใส่ปุ๋ยจะพบไนโตรเจนในรูปของปุ๋ยสังเคราะห์หรือมูลสัตว์ที่มีไนโตรเจนสูง ส่วนในบ่อที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป ไนโตรเจนเกือบทั้งหมดจะมาจากโปรตีนที่อยู่ในอาหาร โดยประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนในอาหารจะถูกบริโภคโดยสัตว์น้ำ ในขณะที่ 75 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะสูญเสียไปในน้ำในรูปของของเสีย และประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนที่เป็นของเสียนี้จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียซึ่งเป็นของเสียหลักที่ถูกขับออกมาจากสัตว์น้ำ

การตรึงไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในรากพืชตระกูลถั่ว เป็นแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากระบบเพาะเลี้ยงในปัจจุบันมักใช้อาหารสำเร็จรูปที่ประกอบด้วยถั่วเหลืองเป็นหลัก

การตรึงไนโตรเจนโดยสิ่งมีชีวิตที่อยู่อย่างอิสระในน้ำ ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและแบคทีเรียบางชนิด โดยเฉพาะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นแหล่งของไนโตรเจนที่สำคัญในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่การตรึงไนโตรเจนของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะถูกยับยั้งในสภาวะที่มีแอมโมเนียหรือไนเทรตในระบบ ดังนั้นการตรึงไนโตรเจนจึงเกิดขึ้นน้อยในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการใส่ปุ๋ยหรืออาหารสำเร็จรูปเพราะมีแหล่งของสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ อยู่แล้ว

2.3.1.2 การนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่าย

จุลสาหร่ายเป็นแหล่งรองรับสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนหลักในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยจุลสาหร่ายสามารถสะสมไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตได้ในระดับความเข้มข้น 1 ถึง 2 ไมโครกรัม-ไนโตรเจน/ลิตร ซึ่งไนไทรต์และไนเทรตจะถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นแอมโมเนีย ก่อนที่แอมโมเนียจะถูกประกอบขึ้นเป็นกรดอะมิโนเพื่อให้จุลสาหร่ายสามารถนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของเซลล์ได้ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของไนไทรต์และไนเทรตนี้จำเป็นต้องใช้พลังงาน ดังนั้นจุลสาหร่ายจึงมักเลือกใช้แอมโมเนียก่อนสารประกอบไนโตรเจนชนิดอื่นในน้ำ อัตราการสะสมไนโตรเจนในเซลล์จุลสาหร่ายจะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในระบบ ยกตัวอย่างเช่น อัตราการสะสมไนโตรเจนจะลดลงใน

ช่วงเวลาที่มีแสงอาทิตย์ต่ำ อุณหภูมิของน้ำลดลง และเมื่อสารอาหารอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายมีจำกัด

2.3.1.3 แอมโมนิฟิเคชัน

โดยปกติแล้วที่บริเวณพื้นของบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีสารต่างๆ ตกตะกอนอยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่งได้แก่ เซลล์ของจุลสาหร่ายที่ตายแล้ว มูลของสัตว์น้ำ อาหารที่ไม่ถูกบริโภค และสารอินทรีย์อื่นๆ สารเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็วและส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนกลับไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการย่อยสลายจะเริ่มจากการที่จุลินทรีย์เปลี่ยนอนุภาคไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นสารอินทรีย์ละลาย จากนั้นโปรตีนจะถูกปล่อยออกมาจากอนุภาคและถูกย่อยสลายให้กลายเป็นกรดอะมิโน ซึ่งจะถูกย่อยสลายต่อไปจนกลายเป็นแอมโมเนีย ขั้นตอนที่ทำให้แอมโมเนียออกมาสู่ระบบนี้รวมเรียกว่ากระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ซึ่งอัตราการเกิดแอมโมเนียจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่าพีเอช ออกซิเจน ปริมาณและประเภทของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการเกิดแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 40 °ซ และที่พีเอชเป็นกลางจนถึงเป็นด่างเล็กน้อย และจะเกิดในอัตราใกล้เคียงกันทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีอากาศในระบบ โดยแอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางชีวภาพอื่นๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น การสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์และการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่าย

2.3.1.4 การระเหยของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่ไม่มีประจุจะอยู่ในสภาวะของก๊าซที่ละลายน้ำและสามารถระเหยไปสู่ชั้นบรรยากาศได้ แต่เนื่องจากแอมโมเนียเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดีมากจึงไม่สามารถระเหยไปสู่บรรยากาศได้อย่างรวดเร็วนัก อัตราการระเหยของแอมโมเนียจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อแอมโมเนียในน้ำความเข้มข้นสูง ค่าพีเอชสูง และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนย้ายของก๊าซ เช่น เกิดการปั่นป่วนของน้ำในช่วงที่มีลม

2.3.1.5 ไนตริฟิเคชัน

ไนตริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการเปลี่ยนแอมโมเนียไปสู่ไนเทรต ซึ่งเกิดจากไนตริฟายอิงแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Nitrosomonas* sp. และ *Nitrobacter* sp. โดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียจะได้รับพลังงานในการเมตาบอลิซึมมาจากการออกซิเดชันสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน และได้คาร์บอนในการสร้างเซลล์มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนแรกของ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

กระบวนการไนตริฟิเคชันคือการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไทรต์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียชนิด *Nitrosomonas* sp. เป็นหลัก และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

ขั้นตอนต่อมาคือการเปลี่ยนรูปไนไทรต์ไปเป็นไนเทรตซึ่งเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียชนิด *Nitrobacter* sp. เป็นหลัก ปฏิกิริยาเขียนได้ดังนี้

$$NO_2^- + 0.5O_2 \rightarrow NO_3^-$$

ปฏิกิริยาต่อเนื่องนี้มีความสำคัญมากเนื่องจากอัตราเร็วของทั้ง 2 ปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นไม่เท่ากันจึงอาจทำให้มีการสะสมของไนไทรต์ในระบบ ซึ่งไนไทรต์มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำหลายชนิด และโดยทั่วไปไนตริฟายอิงแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ช้าเพราะพลังงานที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันมีค่าต่ำ เนื่องจากแอมโมเนียมักถูกแย่งใช้อย่างรวดเร็วโดยจุลสาหร่ายและพืชอื่นๆ เมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียยังมีความต้องการออกซิเจนสูง โดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำต่ำกว่า 1 ถึง 2 มก./ลิตร สำหรับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันสามารถเกิดได้ในช่วง 5 ถึง 40 °ซ แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่สุดที่ 25 ถึง 35 °ซ ส่วนค่าพีเอชที่ดีที่สุดคือระหว่าง 7 ถึง 8.5 แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไทรต์จะมีกรดเกิดขึ้น ซึ่งปริมาณกรดที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยากับสภาพความเป็นด่างในน้ำได้จึงส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยง แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใส่ปูนขาวลงในบ่อเพาะเลี้ยง

2.3.1.6 ดีไนตริฟิเคชัน

ในสภาวะไร้อากาศ แบคทีเรียหลายชนิดสามารถใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทนออกซิเจนในกระบวนการหายใจได้ โดยในกระบวนการนี้ไนเทรตจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนไทรต์และกลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าดีไนตริฟิเคชันเมื่อมีก๊าซไนโตรเจนเกิดขึ้นในระบบ และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$NO_3 \rightarrow NO_2^- \rightarrow N_2O_2 \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

กระบวนการเปลี่ยนรูปของไนเทรตที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับปริมาณไนเทรตในบ่อเพาะเลี้ยง ซึ่งโดยทั่วไปดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นควบคู่ไปกับไนตริฟิเคชันที่เป็นกระบวนการสร้างไนเทรต นอกจากนี้อัตราการเกิดดีไนตริ

ฟิเคชันยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำ เนื่องจากดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนในการเจริญเติบโต โดยกระบวนการนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 25 ถึง 35 °ซ และที่พีเอช 6 ถึง 8

2.3.2 สารประกอบไนโตรเจนที่มีความสำคัญต่อระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

สารประกอบไนโตรเจนที่มีบทบาทสำคัญในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบไนโตรเจนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำและสามารถก่อความเป็นพิษในสัตว์น้ำได้ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ซึ่งรายละเอียดของสารประกอบไนโตรเจนแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.3.2.1 แอมโมเนีย

แอมโมเนียที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากปุ๋ย อาหารสำเร็จรูป และของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา โดยค่าพีเอชจะเป็นตัวกำหนดรูปของแอมโมเนียดังสมการต่อไปนี้

$$NH_3 + H^+ \rightarrow NH_4^+$$

แอมโมเนียจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เมื่อพีเอชของน้ำมีค่าเป็นกลางหรือมีค่าต่ำ แต่จะอยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระ (NH_3) เมื่อน้ำมีค่าพีเอชสูงขึ้น ซึ่งแอมโมเนียอิสระหรือก๊าซแอมโมเนียนี้จะสามารถถ่ายเทไปสู่อากาศได้ แต่เนื่องจากน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักมีค่าพีเอชเป็นกลาง แอมโมเนียที่พบจึงมักอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออนมากกว่าแอมโมเนียอิสระ

แอมโมเนียเป็นสารประกอบไนโตรเจนชนิดหลักที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของปุ๋ย อาหารสำเร็จรูป และของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา นอกจากนี้แอมโมเนียยังเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการสะสมของแอมโมเนียในบ่อเพาะเลี้ยงเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์เนื่องจากแอมโมเนียมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และจะส่งผลให้ผลผลิตของระบบลดน้อยลง อย่างไรก็ตาม แอมโมเนียยังคงมีความสำคัญต่อระบบเพาะเลี้ยงเนื่องจากเป็นแหล่งของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย ซึ่งจะส่งผลต่อผลผลิตของสัตว์น้ำในระบบนั้น โดยทั่วไปแอมโมเนียในแหล่งน้ำมักมีความเข้มข้นต่ำ แต่อาจพบแอมโมเนียความเข้มข้นสูงในแหล่งน้ำที่ถูกปนเปื้อนจากน้ำเสียชุมชน น้ำเสียอุตสาหกรรม หรือน้ำเสียจากการเกษตร

ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการใส่ปุ๋ยมักพบแอมโมเนียในความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ยกเว้นในช่วงที่มีการเจริญเติบโตและมีการตายของจุลสาหร่ายมาก การมีแอมโมเนียความเข้มข้นสูง

อย่างต่อเนื่อง (มากกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร) เป็นตัวบ่งชี้ว่ามีการใส่ปุ๋ยในปริมาณที่มากเกินความต้องการของจุลสาหร่ายในน้ำ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองปุ๋ยและจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง สำหรับในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป โปรตีนในอาหารจะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นแอมโมเนีย และจะเป็นแหล่งของสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ ในน้ำ อัตราการเกิดของแอมโมเนียจะขึ้นอยู่กับอัตราการให้อาหาร ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะมีแอมโมเนียถูกขับออกมา 0.03 กก. ต่อ 1 กก. ของอาหารที่ถูกบริโภค (ถ้ามีโปรตีนในอาหารทั้งหมด 25 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์) อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของแอมโมเนียในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักถูกควบคุมโดยการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่าย ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่สูงจนเกินไปภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ จุลสาหร่ายจึงเป็นแหล่งกักเก็บแอมโมเนียที่สำคัญในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่

ปริมาณของแอมโมเนียในน้ำจะถูกควบคุมจากความเข้มข้นของแอมโมเนีย ค่าพีเอช และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งทั้งค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในแต่ละวัน ความเข้มข้นของแอมโมเนียจึงมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา โดยจะมีความเข้มข้นสูงสุดบริเวณผิวน้ำในช่วงบ่ายที่มีแสงแดดจัดซึ่งทั้งค่าพีเอชและอุณหภูมิมีค่าสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นของแอมโมเนียจะลดลงในช่วงกลางคืนเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกผลิตออกมาจากกระบวนการหายใจของจุลสาหร่ายซึ่งทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง

ความเป็นพิษของแอมโมเนียต่อสัตว์น้ำ

สัตว์น้ำทั่วๆ ไป มักมีของเสียประเภทไนโตรเจนอยู่ในเลือดในรูปของแอมโมเนีย และจะขับออกมาสู่ภายนอกในรูปของแอมโมเนียไม่มีประจุ ซึ่งแอมโมเนียจะแพร่ผ่านเยื่อบุผิวเหงือกของสัตว์น้ำโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียในเลือดกับความเข้มข้นของแอมโมเนียในสิ่งแวดล้อม เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียที่อยู่ภายนอกมีค่าต่ำแอมโมเนียในกระแสเลือดของสัตว์น้ำจะแพร่ออกมาสู่น้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้แอมโมเนียในกระแสเลือดมีค่าลดลง แต่เมื่อสิ่งแวดล้อมภายนอกมีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง การแพร่ของแอมโมเนียระหว่างกระแสเลือดกับน้ำจะลดน้อยลงและแอมโมเนียจะเริ่มสะสมในเลือดและเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียภายนอกสูงจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของแอมโมเนียเป็นตรงกันข้ามกับปกติ คืออาจเกิดการแพร่จากในน้ำเข้าสู่กระแสเลือดซึ่งจะทำให้มีแอมโมเนียในเลือดของสัตว์น้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความเป็นพิษของแอมโมเนียจึงเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเป็นหลักเนื่องจากเป็นปัจจัยที่กำหนดทิศทางการแพร่ของแอมโมเนีย

2.3.2.2 ไนไทรต์

ไนไทรต์เป็นสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบไนโตรเจนจากแอมโมเนียไปเป็นไนเทรตโดยแบคทีเรีย (กระบวนการไนตริฟิเคชัน) ซึ่งโดยทั่วไปไนไทรต์มักไม่สะสมในสิ่งแวดล้อมเพราะจะถูกเปลี่ยนให้เป็นไนเทรตอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในบางสภาวะอัตราการย่อยสลายแอมโมเนียอาจเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าอัตราการเปลี่ยนรูปไนไทรต์ไปเป็นไนเทรตทำให้เกิดการสะสมของไนไทรต์ขึ้นในระบบ ซึ่งไนไทรต์ที่สะสมในบ่อเพาะเลี้ยงจะสามารถก่อความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ ส่วนในแหล่งน้ำตามธรรมชาติมักมีไนไทรต์ในปริมาณไม่มากนัก นอกจากในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนจากของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งโดยปกติความเข้มข้นของไนไทรต์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักจะมีค่าต่ำมาก คือน้อยกว่า 0.1 มก./ลิตร เนื่องจากจุลสาหร่ายและพืชชนิดอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำจะนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์เพื่อไปใช้ในการเจริญเติบโตทำให้ปริมาณแอมโมเนียที่จะเข้าสู่กระบวนการไนตริฟิเคชันมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามไนไทรต์จะสามารถเพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นจากการตายของจุลสาหร่าย เนื่องจากการย่อยสลายซากจุลสาหร่ายจะเป็นการปลดปล่อยแอมโมเนียจำนวนมากคืนออกมาสู่แหล่งน้ำ

ความเป็นพิษของไนไทรต์ต่อสัตว์น้ำ

ไนไทรต์จากน้ำสามารถเข้าสู่กระแสเลือดของปลาได้ทางเหงือกในรูปของกรดไนตรัส (HNO_2) เมื่อน้ำมีค่าพีเอชต่ำมาก โดยกรดไนตรัสจะแพร่ผ่านเนื้อเยื่อของเหงือกได้อย่างอิสระเนื่องจากกรดไนตรัสไม่มีประจุและสามารถละลายในไขมันได้ดี แต่ในน้ำที่มีค่าพีเอชปกติจะมีกรดไนตรัสในปริมาณน้อยมาก และไนไทรต์จะเข้าสู่กระแสเลือดของสัตว์น้ำได้ในรูปของไนไทรต์ประจุลบ โดยไนไทรต์จะผ่านเข้าสู่เหงือกด้วยกลไกเดียวกับการขนส่งคลอไรด์เข้าสู่กระแสเลือด เนื่องจากทั้งไนไทรต์และคลอไรด์ต่างเป็นไอออนประจุลบ 1 ที่มีน้ำล้อมรอบ และกลไกในการขนส่งไอออนของปลาบางชนิดไม่สามารถแยกความแตกต่างของไอออนทั้ง 2 ชนิดนี้ได้ เมื่อไนไทรต์เข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะเกิดการออกซิไดซ์กับเหล็กในโมเลกุลของฮีโมโกลบินทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลซึ่งเรียกว่าโรคเลือดสีน้ำตาล (Brown Blood Disease) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้จะไม่สามารถจับตัวกับออกซิเจนได้จึงทำให้สัตว์น้ำจำพวกปลาสูญเสียความสามารถในการขนส่งออกซิเจนไป โดยความทนทานต่อไนไทรต์ของปลาจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างไอออนของคลอไรด์กับไอออนของไนไทรต์ที่อยู่ในน้ำ ส่วนสัตว์จำพวกกุ้งจะมีโมเลกุลโปรตีนที่ใช้ในการขนส่งออกซิเจนแตกต่างจากในปลา คือมีฮีโมไซยานินแทนฮีโมโกลบิน ผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างฮีโมไซยานินกับไนไทรต์ยังไม่เป็นที่แน่ชัด ดังนั้นกลไกความเป็นพิษของไนไทรต์ต่อกุ้งจึงไม่เป็นที่เข้าใจนัก อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาพบว่าไนไทรต์มีความเป็นพิษต่อ

กุ้งบางชนิดในระดับความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับในปลาและสามารถก่อความเป็นพิษต่อกุ้งทะเลได้อย่างมากแม้ว่าในน้ำทะเลจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง

2.3.2.3 ไนเทรต

ไนเทรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่สามารถพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำและในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยไนเทรตที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงมักเกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและจากปุ๋ยบางประเภทที่ใช้เกลือของไนเทรตเพื่อเร่งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย ไนเทรตถือเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารประกอบไนโตรเจนตัวอื่นๆ และความเข้มข้นของไนเทรตที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักจะมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและมีการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายมาก เนื่องจากการเติบโตของจุลสาหร่ายจะทำให้เกิดการใช้แอมโมเนียในน้ำจึงเป็นการจำกัดการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ความเข้มข้นของไนเทรตที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายมากจึงมักมีค่าน้อยกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการสะสมของไนเทรตเป็นความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้เกิดความเครียดในสัตว์น้ำได้ การเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องปฏิบัติโดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นของไนเทรตมีค่ามากกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร (Hart และ O’Sullivan, 1993)

2.4 จุลสาหร่าย

สาหร่ายเป็นพืชที่มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อนสามารถสังเคราะห์แสงได้ด้วยคลอโรฟิลล์เอ (Chlorophyll *a*) และมีการปล่อยออกซิเจนออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ โดยเฉพาะในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม โดยสาหร่ายสามารถดำรงชีวิตได้หลายรูปแบบ เช่น สาหร่ายที่ดำรงชีวิตโดยการลอยอยู่ในน้ำหรือที่เรียกว่าแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) หรือที่ดำรงชีวิตโดยการยึดเกาะกับพื้นน้ำหรือสิ่งอื่นๆ เช่น สาหร่ายทะเล (Seaweeds) นอกจากนี้ยังสามารถพบสาหร่ายได้ในสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ในดิน หิมะ น้ำพุร้อน หรือสาหร่ายที่ใช้ชีวิตร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น ไลเคน (Lichen) ซึ่งเป็นสาหร่ายที่อยู่ร่วมกับรา และ Zooxanthella ซึ่งเป็นสาหร่ายที่อาศัยอยู่ในเนื้อเยื่อของปะการัง (สรวิศ เผ่าทองศุข, 2543)

สาหร่ายสามารถจำแนกออกได้ตามขนาดเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ จุลสาหร่าย (Microalgae) และมหสาหร่าย (Macroalgae) โดยจุลสาหร่ายหมายถึงสาหร่ายขนาดเล็กที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าและต้องอาศัยการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ส่วนมหสาหร่ายหมายถึงสาหร่ายขนาดใหญ่ เช่น สาหร่ายทะเลและสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่บางชนิด ซึ่งสาหร่ายที่สามารถพบได้ในบ่อเพาะเลี้ยง

สัตว์น้ำทั่วไปจะเป็นจุลสาหร่ายที่เจริญเติบโตขึ้นจากสารอาหารที่มีอยู่ในปุ๋ยหรืออาหารของสัตว์น้ำที่เติมลงไปในบ่อเพาะเลี้ยง

การสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะเกิดขึ้นในส่วนที่เรียกว่าคลอโรพลาสต์ซึ่งเป็นออร์กาเนลที่มีรงควัตถุอยู่ภายใน รงควัตถุจะทำหน้าที่ดูดซับแสงเพื่อให้คลอโรพลาสต์นำพลังงานนั้นไปใช้ในปฏิกิริยาทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ต่อไป รงควัตถุที่พบในสาหร่ายสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน ซึ่งรงควัตถุเหล่านี้จะส่งผลให้สาหร่ายมีสีแตกต่างกันเนื่องจากการดูดซับและสะท้อนแสงในช่วงคลื่นที่แตกต่างกัน (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549) โดยรงควัตถุที่พบในสาหร่ายแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 รงควัตถุชนิดต่างๆ และชนิดของสาหร่ายที่พบ

ชนิดของรงควัตถุ	**ชนิดของสาหร่าย**
คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)	
คลอโรฟิลล์เอ (Chlorophyll *a*)	สาหร่ายทุกชนิด
คลอโรฟิลล์บี (Chlorophyll *b*)	สาหร่ายสีเขียว
คลอโรฟิลล์ซี(Chlorophyll *c*)	สาหร่ายสีน้ำตาลและไดอะตอม
คลอโรฟิลล์ดี (Chlorophyll *d*)	สาหร่ายสีแดง
แคโรทีนอยด์ (Carotenoid)	
บีตาแคโรทีน (*Beta*-carotene)	สาหร่ายส่วนใหญ่
แอลฟาแคโรทีน (*Alpha*-carotene)	สาหร่ายบางชนิด
ลูเทอิน (Lutein)	สาหร่ายสีเขียวและสาหร่ายสีแดง
ฟูโคแซนธิน (Fucoxanthin)	สาหร่ายสีน้ำตาลและไดอะตอม
ไฟโคบิลิน (Phycobilin)	
ไฟโคอิริทริน (Phycoerythrin)	สาหร่ายสีแดงและสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิด
ไฟโคไซยานิน (Phycocyanin)	สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสีแดงบางชนิด
แอลโลไฟโคไซยานิน (Allophycocyanin)	สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีแดง

(ที่มา: ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549)

2.4.1 ประเภทของสาหร่าย

สาหร่ายสามารถแบ่งได้เป็น 9 กลุ่มตามการจัดหมวดหมู่ของ Bold และ Wynne (1985) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549)

2.4.1.1 Division Cyanophyta

ได้แก่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย ซึ่งสาหร่ายชนิดนี้มีโครงสร้างของนิวเคลียสคล้ายแบคทีเรียและบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้เช่นเดียวกับแบคทีเรีย แต่จะแตกต่างจากแบคทีเรียตรงที่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีคลอโรฟิลล์เอเป็นองค์ประกอบ และมีการปล่อยออกซิเจนสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พบในแบคทีเรียทั่วไป รงควัตถุที่พบในสาหร่ายกลุ่มนี้ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เอ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน ซึ่งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นกลุ่มสาหร่ายที่มีจำนวนชนิดมากที่สุดเมื่อเทียบกับสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ โดยส่วนใหญ่มักพบในน้ำจืดและพบได้บ้างในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย นอกจากนี้สาหร่ายกลุ่มนี้ยังสามารถทนต่อสภาวะแห้งแล้งและในสภาวะที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าปกติ เช่น ในบ่อน้ำพุร้อนหรือในหิมะ โดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีรูปร่าง 2 แบบ คือชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยวหรือโคโลนีที่ไม่เป็นเส้นสายกับชนิดที่มีโครงสร้างเป็นเส้นสาย

2.4.1.2 Division Chlorophyta

ได้แก่สาหร่ายสีเขียวซึ่งเป็นสาหร่ายที่สามารถพบได้ทั่วไป โดยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เป็นสาหร่ายทะเลที่มักพบบริเวณน้ำตื้นตามแนวชายฝั่ง อีก 90 เปอร์เซ็นต์จะเป็นสาหร่ายน้ำจืด รงควัตถุที่พบในสาหร่ายกลุ่มนี้ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และแคโรทีนอยด์ โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บีเป็นจำนวนมากทำให้มองเห็นสาหร่ายชนิดนี้เป็นสีเขียว รูปร่างที่พบมีหลากหลายรูปแบบได้แก่ ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยว โคโลนี เส้นสาย หลอด หรือท่อที่ต่อเนื่องกันตลอด สาหร่ายสีเขียวที่เป็นเซลล์เดี่ยวหรือโคโลนีทั้งที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้มักจะพบในน้ำจืดเป็นส่วนใหญ่ ส่วนพวกที่เป็นเส้นสายมักพบในน้ำจืดเช่นกันแต่มีบ้างที่พบในน้ำทะเล ในขณะที่พวกที่เป็นหลอดหรือท่อต่อเนื่องกันมักจะพบในน้ำทะเลเป็นส่วนใหญ่

2.4.1.3 Division Charophyta

ได้แก่สาหร่ายไฟซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีความใกล้เคียงกับพืชชั้นสูง พบมากในน้ำจืดและมีน้อยชนิดที่พบในน้ำกร่อย รูปร่างของสาหร่ายไฟมีส่วนที่เป็นข้อและปล้องชัดเจน และมีรงควัตถุชนิดเดียวกับที่พบในสาหร่ายสีเขียว คือคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และแคโรทีนอยด์

2.4.1.4 Division Euglenophyta

ได้แก่สาหร่ายยูกลีนอยด์ซึ่งเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีสีเขียว เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บีมากเช่นเดียวกับกลุ่มของสาหร่ายสีเขียว สาหร่ายชนิดนี้เคลื่อนที่โดยอาศัยแฟลกเจลลัมซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเซลล์ บางชนิดว่ายน้ำเป็นอิสระ ส่วนชนิดอื่นๆ อาจสร้างก้านยึดติดกับพื้นผิวหรือสร้างเมือกอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม รงควัฎุที่พบในเซลล์ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และแคโรทีนอยด์

2.4.1.5 Division Phaeophyta

ได้แก่สาหร่ายสีน้ำตาลซึ่งมีคลอโรฟิลล์ที่ทำให้เกิดสีเขียวและฟูโคแซนทินที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล สาหร่ายในกลุ่มนี้เกือบทั้งหมดเป็นสาหร่ายทะเลและสาหร่ายที่พบในน้ำกร่อย และส่วนมากมักเป็นสาหร่ายขนาดใหญ่ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นสาย รงควัตถุที่พบในสาหร่ายชนิดนี้ประกอบด้วย คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์ซี และแคโรทีนอยด์

2.4.1.6 Division Chrysophyta

ได้แก่สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง สาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง และไดอะตอม ซึ่งเป็นกลุ่มของสาหร่ายที่มีความหลากหลายของรูปร่างมาก โดยมีทั้งกลุ่มที่เป็นเซลล์เดียวและที่อยู่กันเป็นกลุ่ม เซลล์ที่มีหรือไม่มีแฟลกเจลลัม ผนังเซลล์มีลวดลายและอาจมีสารซิลิกาอยู่ภายในผนังเซลล์ ซึ่งทั้งสาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง สาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง และไดอะตอมจะมีรงควัตถุชนิดแคโรทีนอยด์มากกว่าคลอโรฟิลล์ โดยคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์ซี

2.4.1.7 Division Pyrrhophyta

ได้แก่สาหร่ายไดโนแฟลเจลเลตซึ่งเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่ใช้แฟลกเจลลัมในการเคลื่อนที่ โดยสาหร่ายกลุ่มนี้จะมีแฟลกเจลลัม 2 เส้นอยู่ในตำแหน่งคนละระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดำรงชีวิตอิสระ สามารถพบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม

2.4.1.8 Division Cryptophyta

ได้แก่สาหร่ายคริพโตโมแนดส์ซึ่งเป็นสาหร่ายกลุ่มเล็กๆ ที่มีลักษณะเซลล์เดี่ยว ว่ายน้ำอิสระ ส่วนใหญ่ดำรงชีวิตแบบแพลงก์ตอน สามารถพบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม มีลักษณะ

ของเซลล์แบนจากด้านบนไปทางด้านท้ายและมีแฟลกเจลลัม 2 เส้น รงควัตถุในสาหร่ายชนิดนี้ประกอบด้วยรงควัตถุสีน้ำเงินและสีแดงที่เรียกว่าไฟโคบิลิโปรตีน คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์ซี และแคโรทีนอยด์

2.4.1.9 Division Rhodophyta

ได้แก่สาหร่ายสีแดงซึ่งเป็นสาหร่ายที่พบในน้ำทะเลมากกว่าน้ำจืด และสามารถพบได้ที่ระดับความลึกมากกว่าสาหร่ายชนิดอื่นๆ เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้มีรงควัตถุประเภทไฟโคบิลินเป็นปริมาณมาก ซึ่งรงควัตถุชนิดนี้สามารถสังเคราะห์แสงด้วยแสงสีเขียวและแสงสีเหลืองที่ผ่านไปยังทะเลส่วนลึกได้ ในขณะที่แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินจะถูกคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บีของสาหร่ายบนบริเวณผิวน้ำดูดซับไปใช้ในปริมาณมาก ซึ่งรงควัตถุในสาหร่ายชนิดนี้ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน

2.5 จุลสาหร่ายในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

จุลสาหร่ายเป็นพืชชนิดหลักที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบเพาะเลี้ยงส่วนใหญ่ ผลผลิตที่ได้จากจุลสาหร่ายจะเป็นฐานของห่วงโซ่อาหารในบ่อเพาะเลี้ยงที่มีการใส่ปุ๋ยเป็นหลัก ส่วนในระบบที่มีการให้อาหารสำเร็จรูปจุลสาหร่ายก็ยังคงมีความสำคัญเนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มจุลชีพที่ทำหน้าที่รักษาสภาวะแวดล้อมในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มของจุลสาหร่ายจะให้ออกซิเจนละลายและเก็บสะสมแอมโมเนียที่มีอยู่ในน้ำเข้ามาสู่เซลล์ อย่างไรก็ตาม ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพน้ำส่วนใหญ่ในบ่อเพาะเลี้ยงมักเกิดจากการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายโดยไม่มีการควบคุม ซึ่งจะนำไปสู่ความไม่สมดุลของออกซิเจนละลายและทำให้เกิดช่วงเวลาที่มีออกซิเจนในน้ำต่ำซึ่งจะมีผลต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ การควบคุมปริมาณจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญและผู้เพาะเลี้ยงควรมีความเข้าใจเบื้องต้นในเรื่องของจุลสาหร่ายที่สามารถพบได้ในบ่อเพาะเลี้ยง ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีดังต่อไปนี้

2.5.1 การเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย

จุลสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำและสามารถสังเคราะห์แสงได้เอง บางชนิดเคลื่อนไหวได้โดยอาศัยแฟลกเจลลัมหรือซิเลียซึ่งเป็นส่วนที่ยื่นออกมาจากเซลล์ บางชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในเซลล์ทำให้เคลื่อนที่ขึ้นลงในน้ำได้ ในขณะที่บางชนิดไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ต้องอาศัยกระแสน้ำเป็นตัวพาไป การมีจุลสาหร่ายในระบบมากจะทำให้สี

ของน้ำเปลี่ยนและทำให้เกิดความขุ่นในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำได้

จุลสาหร่ายที่พบเป็นหลักในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้แก่ สาหร่ายสีเขียว (Chlorophyta) ยูกลีนอยด์ (Euglenophyta) ไดโนแฟลกเจลเลต (Pyrrhophyta) สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง สาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง ไดอะตอม (Chrysophyta) และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) การแยกประเภทของจุลสาหร่ายเบื้องต้นสามารถดูได้จากการมีหรือไม่มีนิวเคลียส เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินไม่มีนิวเคลียส จึงไม่จัดเป็นพืชแต่จัดว่าเป็นแบคทีเรียแกรมลบหรือที่เรียกว่าไซยาโนแบคทีเรียซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีคลอโรฟิลล์คล้ายกับพืช ส่วนสาหร่ายอีกกลุ่มซึ่งเป็นพืชแท้จริงที่มีนิวเคลียสสามารถแยกประเภทได้จากหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของรงควัตถุ การจัดกลุ่มและปริมาณของรงควัตถุ ชนิดของอาหารที่สะสมไว้ภายในเซลล์ การมีอยู่และจำนวนของแฟลกเจลลา และองค์ประกอบของผนังเซลล์

จุลสาหร่ายจะใช้คลอโรฟิลล์และรงควัตถุที่ดูดซับแสงอื่นๆ ในการดักจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และเปลี่ยนให้กลายเป็นพลังงานเคมีหรือสารที่มีพลังงานสูง พลังงานเคมีที่ผลิตได้จะถูกใช้เพื่อเปลี่ยนสารอนินทรีย์คาร์บอนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของน้ำตาล กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่าการสังเคราะห์แสงซึ่งสามารถสรุปได้เป็นสมการดังนี้

$$6CO_2 + 6H_2O + \text{พลังงานแสง} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

สิ่งที่จำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่ายได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แสงอาทิตย์ และแร่ธาตุต่างๆ กระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการรีดักชันคือใช้พลังงานในปฏิกิริยาและปลดปล่อยออกซิเจนออกมาในระบบ สำหรับบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำการสังเคราะห์แสงมีบทบาทสำคัญ 3 ข้อ ได้แก่

1. เป็นแหล่งพลังงานหลักในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
2. เป็นแหล่งของสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารในระบบนิเวศน์สัตว์น้ำ
3. ออกซิเจนละลายจำนวนมากถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง

น้ำตาลที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงจะถูกใช้เพื่อผลิตสารอินทรีย์อื่นๆ ที่จุลสาหร่ายต้องใช้ในกระบวนการเมทาบอลิซึมและการสร้างเนื้อเยื่อต่างๆ ดังนั้นสารอินทรีย์เหล่านี้จึงเป็นทั้งแหล่งพลังงานและเป็นตัวกลางในการสร้างมวลของจุลสาหร่าย กระบวนการที่จุลสาหร่ายใช้สารอินทรีย์เหล่านี้เรียกว่ากระบวนการหายใจ (Respiration) ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นสมการดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{พลังงานความร้อน}$$

กระบวนการหายใจเป็นกระบวนการที่ตรงกันข้ามกับกระบวนการสังเคราะห์แสงคือเป็นกระบวนการออกซิเดชัน กล่าวคือปลดปล่อยพลังงานและใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยา

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย

ความต้องการหลักของจุลสาหร่ายในการเจริญเติบโตได้แก่ ปริมาณแสงที่จะทำให้เกิดการสังเคราะห์แสง สารอนินทรีย์ที่เป็นธาตุอาหาร และอุณหภูมิของน้ำที่พอเหมาะ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละปัจจัยมีดังนี้

2.5.2.1 แสงอาทิตย์

แสงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายมาก โดยช่วงคลื่นที่กระตุ้นการสังเคราะห์แสงจะอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร เมื่อเดินทางผ่านน้ำแสงส่วนหนึ่งจะถูกดูดซับไว้ทำให้ปริมาณแสงลดลงเมื่อความลึกของน้ำเพิ่มมากขึ้น และคุณภาพของแสงจะลดลงเนื่องจากแสงในช่วงอินฟาเรดกับแสงสีแดงจะถูกดูดซับจากน้ำไว้ได้มาก ในขณะที่แสงในช่วงสีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงินจะถูกดูดซับไว้น้อยกว่ามากจึงผ่านไปในน้ำได้ลึกกว่าช่วงแสงสีแดง ดังนั้นประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงใต้น้ำของจุลสาหร่ายจึงขึ้นอยู่กับการมีอยู่ของรงควัตถุซึ่งจะใช้แสงในช่วงคลื่นต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น คลอโรฟิลล์สามารถดูดซับแสงได้มากในช่วงแสงสีน้ำเงินและแดง แคโรทีนและแซนโทฟิลล์ซึ่งมีมากในไดอะตอมและสาหร่ายสีเหลืองแกมเขียวจะดูดซับแสงได้มากที่สุดในช่วงแสงสีเขียว ส่วนไฟโคบิลินและไฟโคอิริทรินในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะดูดซับแสงในช่วงแสงสีเขียวและเหลือง

ความต้องการแสงในการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายขึ้นอยู่กับชนิดของจุลสาหร่าย การได้รับสารอาหาร อุณหภูมิของน้ำ และปัจจัยอื่นๆ เนื่องจากจุลสาหร่ายต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาวะใต้น้ำซึ่งได้รับแสงน้อยกว่าบนพื้นดิน แสงที่มีความเข้มสูงจึงสามารถยับยั้งการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่ายได้ นอกจากนี้ การมีจุลสาหร่ายมากจะก่อให้เกิดการสกัดกั้นแสงหรือที่เรียกว่าการบังกันเองของจุลสาหร่าย (Self-shading) การบังแสงนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงลดลงและส่งผลให้มีการตรึงคาร์บอนและการผลิตออกซิเจนน้อยลง การบังแสงยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะกำหนดชนิดของจุลสาหร่ายในระบบ เพราะจุลสาหร่ายบางชนิด เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีแสงน้อย เนื่องจากมีรงควัตถุที่สามารถดูดซับแสงได้ในช่วงคลื่นที่จุลสาหร่ายชนิดอื่นไม่ใช้ และจุลสาหร่ายบางชนิดยังสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในน้ำได้เมื่อปริมาณแสงมีจำกัด จุลสาหร่ายเหล่านี้จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นและกลายเป็นจุลสาหร่ายชนิดหลักในระบบเมื่อความหนาแน่นของจุลสาหร่ายเพิ่มมากขึ้น

2.5.2.2. สารอาหาร

สารอาหารที่มีความสำคัญกับจุลสาหร่ายมีอยู่ด้วยกันประมาณ 20 ชนิด แบ่งออกได้เป็นสารอาหารหลักซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเนื้อเยื่อในเซลล์ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม และคลอไรด์ นอกจากนี้ยังมีซิลิกาซึ่งเป็นสารอาหารหลักสำหรับจุลสาหร่ายบางชนิด เช่น ไดอะตอมซึ่งมีซิลิกาในผนังเซลล์มาก สารอาหารอีกประเภทหนึ่งคือสารอาหารรองซึ่งใช้ในการทำงานของเซลล์ แต่จุลสาหร่ายต้องการในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม วานาเดียม และโคบอลต์ สารอาหารเหล่านี้จุลสาหร่ายจะรับมาจากน้ำและสะสมไว้ภายในเซลล์ โดยปกติแล้วการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายจะถูกจำกัดจากสารอาหารหลักที่มีไม่เพียงพอต่อความต้องการ เมื่อสารอาหารที่มีจำกัดนี้ถูกเติมลงในน้ำ จุลสาหร่ายจะเติบโตขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับการเจริญเติบโตสูงสุดในสิ่งแวดล้อมนั้นๆ การเพิ่มสารอาหารลงไปอีกจะไม่สามารถกระตุ้นให้จุลสาหร่ายเจริญเติบโตมากขึ้นและอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษในน้ำได้ นอกจากนี้ การเพิ่มสารอาหารชนิดหนึ่งขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดการขาดแคลนสารอาหารอีกชนิดหนึ่งเนื่องจากถูกจุลสาหร่ายนำไปใช้ในการสร้างเซลล์หรือใช้ในการทำงานภายในเซลล์อย่างต่อเนื่อง การเติบโตของจุลสาหร่ายจะดำเนินต่อไปได้ก็ต่อเมื่อมีการใส่สารอาหารทั้ง 2 ชนิดนั้นลงไปเพิ่มในน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฟอสฟอรัสและไนโตรเจนคือสารอาหารหลักที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย และการเข้าถึงสารอาหารก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อชนิดของจุลสาหร่ายเนื่องจากจุลสาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการรับอาหารจากสิ่งแวดล้อมต่างกัน

2.5.2.3. อุณหภูมิของน้ำ

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับอุณหภูมิต่างๆ ได้ดี โดยสามารถพบสาหร่ายได้ในทั้งในน้ำแข็ง หิมะ และน้ำพุร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 70 °ซ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของจุลสาหร่าย ความเข้มของแสง สารอาหารและปัจจัยอื่นๆ จุลสาหร่ายที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป อัตราการเติบโตจะเพิ่มขึ้น 1.8 ถึง 3 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 °ซ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5 ถึง 25 °ซ (Boyd และ Tucker, 1998) อุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่จำกัดชนิดของจุลสาหร่ายในแหล่งน้ำ ยกตัวอย่างเช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดจะเจริญเติบโตได้มากในน้ำอุ่นแต่จะพบน้อยในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.5.3 การนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่าย

ไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายและเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ สารประกอบไนโตรเจนที่จุลสาหร่ายใช้ได้มีหลายรูป แต่ที่มักเลือกใช้ก่อนคือแอมโมเนียเนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้ง่ายกว่าสารประกอบไนโตรเจนตัวอื่นๆ การใช้แอมโมเนียและไนเทรตเพื่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย (โดย $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ เป็นสูตรทางเคมีของจุลสาหร่ายทะเล) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

- เมื่อจุลสาหร่ายใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งของไนโตรเจน

$$16NH_4^+ + 92CO_2 + 92H_2O + 14HCO_3^- + HPO_4^{2-} \rightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 106O_2$$

- เมื่อจุลสาหร่ายใช่ไนเทรตเป็นแหล่งของไนโตรเจน

$$16NO_3^- + 124CO_2 + 140H_2O + HPO_4^{2-} \rightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138O_2 + 18HCO_3$$

ซึ่งปริมาณของสารที่ถูกใช้และที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายเมื่อมีการใช้แหล่งไนโตรเจนต่างกันจะมีความแตกต่างกัน โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 สารที่ถูกใช้และที่เกิดขึ้นในการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายตามสมการสตอยชิโอเมทริก

สารที่เกี่ยวข้องในการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย	เมื่อแอมโมเนียเป็นแหล่งของไนโตรเจน	เมื่อไนเทรตเป็นแหล่งของไนโตรเจน
ความเป็นด่าง	- 3.13 กรัมแคลเซียมคาร์บอเนต/กรัมไนโตรเจน	+ 4.02 กรัมแคลเซียมคาร์บอเนต/กรัมไนโตรเจน
คาร์บอนไดออกไซด์	- 18.07 กรัม/กรัมไนโตรเจน	- 24.4 กรัม/กรัมไนโตรเจน
ออกซิเจน	+ 15.14 กรัม/กรัมไนโตรเจน	+ 19.71 กรัม/กรัมไนโตรเจน
มวลของจุลสาหร่าย	+ 15.85 กรัม/กรัมไนโตรเจน	+ 15.85 กรัม/กรัมไนโตรเจน

หมายเหตุ : - หมายถึงสารที่ถูกใช้ และ + หมายถึงสารที่เกิดขึ้น

(ที่มา: Ebeling และคณะ, 2006)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

การนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่ายสามารถประมาณได้จากการวัดอัตราการตรึงคาร์บอนแล้วจึงนำไปเทียบกับ Redfield stoichiometric ratio (C:N:P = 106:16:1) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสรุปและรายงานไว้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณการตรึงคาร์บอนและการกำจัดแอมโมเนียในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำประเภทต่างๆ

ระบบเพาะเลี้ยง	ปริมาณคาร์บอนที่ถูกตรึง (กรัมคาร์บอน/ตร.ม.-วัน)	ปริมาณแอมโมเนียที่ถูกกำจัด (กรัมไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน)	เอกสารอ้างอิง
บ่อเพาะเลี้ยงกึ่งหนาแน่น	1-3	176 -528	Tucker, 1996
บ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกกึ่งหนาแน่น	-	450	Hargreaves, 1997
บ่อเลี้ยงกุ้ง	-	600-1500	Burford และคณะ, 2003
ระบบ PSG	12	1760-2113	Brune และคณะ., 2003

หมายเหตุ : PSG (Photosynthetic suspended growth system) คือระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการควบคุมคุณภาพน้ำโดยอาศัยจุลสาหร่าย แบคทีเรีย และจุลชีพชนิดอื่นๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ

(ที่มา: Hargreaves, 2006)

อัตราการสังเคราะห์แสงต่อพื้นที่ (กรัมของคาร์บอนที่ถูกตรึงต่อตารางเมตรต่อวัน) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณจุลสาหร่ายในน้ำเพิ่มมากขึ้นและสุดท้ายจะถูกจำกัดจากปริมาณแสงที่มีอยู่ในน้ำ ส่วนอัตราการสังเคราะห์แสงต่อมวลของจุลสาหร่าย (กรัมของคาร์บอนที่ถูกตรึงต่อกรัมของจุลสาหร่ายต่อวัน) จะลดลงเมื่อปริมาณของจุลสาหร่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากจุลสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความขุ่นซึ่งจะปิดกั้นแสง นอกจากนี้ยังมีการแก่งแย่งสารอาหารและทรัพยากรอื่นๆ ที่ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง แต่อัตราการหายใจต่อมวลของจุลสาหร่ายจะไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของจุลสาหร่ายมากนักเพราะแสงไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการหายใจ

แม้ว่าจุลสาหร่ายจะสามารถนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ได้ในปริมาณมาก แต่ก็เป็นเพียงการเก็บไนโตรเจนไว้ในเซลล์ชั่วคราวในรูปของโปรตีน เมื่อจุลสาหร่ายตายไปสารอินทรีย์ในเซลล์จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียทำให้ไนโตรเจนถูกปล่อยกลับออกมาสู่น้ำในรูปของแอมโมเนีย การ

จัดการแยกจุลสาหร่ายออกจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดการแยกแอมโมเนียออกจากน้ำอย่างถาวร

2.5.4 จุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการใส่ปุ๋ย

ความอุดมสมบูรณ์ของจุลสาหร่ายและผลผลิตของสัตว์น้ำจะมีความสัมพันธ์กันมากในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่พึ่งพาอาหารตามธรรมชาติเป็นหลัก การใส่ปุ๋ยในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นการส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตของสัตว์น้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุลสาหร่ายสามารถเป็นแหล่งอาหารของสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงได้ แต่ปริมาณของจุลสาหร่ายที่เหมาะสมในบ่อเพาะเลี้ยงยังไม่เป็นที่แน่ชัดและในการปฏิบัติโดยทั่วไปมักมีการป้องกันไม่ให้จุลสาหร่ายเจริญเติบโตมากเกินไปเพราะจะทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมลงได้

2.5.5 จุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป

ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูปกับสัตว์น้ำจุลสาหร่ายจะมีบทบาทในการรักษาสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำลงได้ถ้าสามารถควบคุมจุลสาหร่ายให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม แต่ปัญหาคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มักเกิดจากการเจริญเติบโตโดยไม่มีการควบคุมของจุลสาหร่าย เช่น การขาดแคลนออกซิเจนละลายและการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ปัญหาเหล่านี้เกิดจากธรรมชาติของจุลสาหร่ายที่จะเจริญเติบโตในระบบที่มีสารอาหารมาก และเป็นเรื่องที่จัดการได้ยากในบ่อเพาะเลี้ยงที่มีอัตราการให้อาหารสูง

บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูปสามารถเกิดจุลสาหร่ายในปริมาณมากได้เนื่องจากในระบบมีสารอาหารมากเกินพอ ต่างจากบ่อเพาะเลี้ยงที่มีการใส่ปุ๋ยซึ่งมักจะมีจุลสาหร่ายในระดับปานกลาง สารอาหารที่มากเกินไปนี้มาจากอาหารสำเร็จรูปที่เหลืออยู่ในระบบและจากของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมาในน้ำ ปริมาณของจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงจึงควบคุมได้ยากเพราะการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายไม่ได้ถูกควบคุมจากอัตราการเติมสารอาหารอย่างในกรณีของการใส่ปุ๋ย การแก้ปัญหาคุณภาพน้ำที่เกี่ยวข้องกับจุลสาหร่ายจึงมักใช้วิธีการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุมากกว่าการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ เช่น การใช้เครื่องเติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำเนื่องจากปริมาณจุลสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อเพาะเลี้ยง

2.5.6 ปริมาณจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

เนื่องจากคลอโรฟิลล์เอเป็นองค์ประกอบที่พบได้ทั่วไปในจุลสาหร่ายทุกชนิดจึงมักถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์หาปริมาณของจุลสาหร่ายในตัวอย่างน้ำ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วสารอินทรีย์ในเซลล์ของจุลสาหร่ายจะประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เอ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ แต่มักไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของจุลสาหร่ายในระบบนั้นๆ ค่าคลอโรฟิลล์เอที่เหมาะสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการใส่ปุ๋ยจะอยู่ที่ประมาณ 50 ถึง 250 ไมโครกรัม-คลอโรฟิลล์เอ/ลิตร ส่วนปริมาณเฉลี่ยของจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปมักมีค่าตั้งแต่ 0 ไปจนถึงมากกว่า 500 ไมโครกรัม-คลอโรฟิลล์เอ/ลิตร (Boyd และ Tucker, 1998) และแม้ว่าปริมาณของจุลสาหร่ายโดยเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับสารอาหารที่ให้เป็นหลัก แต่มวลของจุลสาหร่ายก็มีความแตกต่างกันมากในแต่ละช่วงเวลาและในแต่ละบ่อเพาะเลี้ยง ความเปลี่ยนแปลงของจุลสาหร่ายในระบบเกิดได้จากปริมาณของสารอาหาร สภาพภูมิอากาศ และความเปลี่ยนแปลงในกลุ่มประชากรของจุลสาหร่ายเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของจุลสาหร่ายนี้ส่งผลให้บ่อเพาะเลี้ยงแต่ละบ่อมีความแตกต่างกันมากแม้ว่าจะมีลักษณะและการจัดการแบบเดียวกัน ในบ่อเพาะเลี้ยงที่มีอัตราการให้อาหารสูงจะมีสารอาหารสำหรับจุลสาหร่ายในปริมาณมากอยู่ตลอดเวลา การเปลี่ยนแปลงของมวลจุลสาหร่ายตามฤดูกาลจึงขึ้นอยู่กับปริมาณแสงและอุณหภูมิของน้ำเป็นหลัก ปริมาณจุลสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในฤดูร้อนเมื่อมีแสงอาทิตย์มากและน้ำมีอุณหภูมิสูง จากนั้นจะลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาว แต่การเปลี่ยนแปลงของจุลสาหร่ายตามฤดูกาลมักไม่มีผลหรือมีผลกระทบน้อยในประเทศเขตร้อน ซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณแสงอาทิตย์และอุณหภูมิในแต่ละฤดูกาลไม่มากนัก ส่วนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากประชากรของจุลสาหร่ายเป็นผลมาจากการเพิ่มและการตายอย่างต่อเนื่องของจุลสาหร่ายในระบบ ความเปลี่ยนแปลงนี้มักเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีสารอาหารและจำนวนจุลสาหร่ายเพิ่มมากขึ้น ประชากรจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะอยู่ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงเสมอจึงส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอในบ่อเพาะเลี้ยงที่มีลักษณะเหมือนกันสามารถแตกต่างกันได้หลายเท่าตัว

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับจุลสาหร่ายมีความสำคัญต่อการจัดการระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลสาหร่ายมีผลต่อสภาพแวดล้อมในบ่อเพาะเลี้ยง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักเป็นการเปลี่ยนแปลงจากประชากรจุลสาหร่ายที่มีความหลากหลายมากแต่มีปริมาณปานกลางไปสู่ประชากรที่มีความหลากหลายน้อยแต่มีปริมาณมาก ซึ่งกลุ่มของจุลสาหร่ายที่มีความหลากหลายน้อยมักไม่มีความเสถียรเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับจุลสาหร่ายที่มีอยู่เพียงไม่กี่ชนิดจะส่งผลอย่างมากต่อกลุ่มประชากรทั้งหมดในระบบ

2.5.7 โครงสร้างของกลุ่มจุลสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

จุลสาหร่ายที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีมากมายหลายชนิดและมักเป็นจุลสาหร่ายที่พบได้ทั่วไป องค์ประกอบของกลุ่มจุลสาหร่ายจะแตกต่างกันในแต่ละบ่อเพาะเลี้ยงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจุลสาหร่ายดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สารอาหารเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อชนิดของจุลสาหร่ายมาก น้ำที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสน้อยถึงปานกลางมักจะมีสาหร่ายสีเขียว ยูกลีนอยด์ และไดอะตอมหลากหลายชนิดปนกันอยู่ เมื่อสารอาหารเพิ่มมากขึ้นความหลากหลายของจุลสาหร่ายในน้ำมักลดลงและมักจะมีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินประเภทที่จับตัวเป็นโคโลนีหรือประเภทที่มีเส้นใยเป็นหลัก นอกจากนี้ แพลงก์ตอนสัตว์และสัตว์น้ำก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของกลุ่มจุลสาหร่ายได้มากเนื่องจากทั้งแพลงก์ตอนสัตว์และสัตว์น้ำสามารถบริโภคจุลสาหร่ายเป็นอาหารได้ โดยส่วนใหญ่แล้วผู้บริโภคหลักของจุลสาหร่ายจะเป็นแพลงก์ตอนสัตว์ ผลกระทบจากแพลงก์ตอนสัตว์ต่อกลุ่มจุลสาหร่ายจะมาจากอัตราการบริโภค ขนาดของจุลสาหร่าย และอัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย อัตราการเติบโตของจุลสาหร่ายมีความสำคัญเนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสามารถของประชากรจุลสาหร่ายในการอยู่รอดจากการถูกบริโภค ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มจุลสาหร่ายที่เจริญเติบโตได้ช้าจะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วถ้ามีอัตราการถูกบริโภคสูง ในขณะที่กลุ่มจุลสาหร่ายที่เติบโตได้เร็วอาจสามารถเจริญเติบโตทดแทนการถูกบริโภคได้ ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความสามารถของจุลสาหร่ายในการทนทานต่อการถูกบริโภค ยกตัวอย่างเช่น จุลสาหร่ายขนาดเล็กจะมีความเสี่ยงต่อการถูกบริโภคโดยแพลงก์ตอนสัตว์มากกว่าจุลสาหร่ายที่ก่อตัวเป็นโคโลนีขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดและรูปร่างของจุลสาหร่ายจึงมีความสำคัญต่อการอยู่รอดและต่อปริมาณของจุลสาหร่ายชนิดนั้นในน้ำ ส่วนสัตว์น้ำที่บริโภคจุลสาหร่ายเป็นอาหารก็เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญเนื่องจากสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงมักเป็นสัตว์กินพืช จึงสามารถบริโภคจุลสาหร่ายขนาดใหญ่และจุลสาหร่ายที่สร้างโคโลนีขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจุลสาหร่ายขนาดเล็กจึงมักกลายเป็นสาหร่ายชนิดหลักเนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วและสามารถใช้แสงและสารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าจุลสาหร่ายที่มีขนาดใหญ่ มวลของจุลสาหร่ายขนาดเล็กจึงมักเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพาะเลี้ยงสัตว์กินพืชในน้ำ

2.5.8 กระบวนการแยกจุลสาหร่ายออกจากน้ำ

กระบวนการที่ได้มีการนำมาใช้แยกจุลสาหร่ายออกจากน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็นฟล็อคคูเลชัน การตกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยง และการกรอง ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการแยกแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.5.8.1 การแยกด้วยกระบวนการฟล็อคคูเลชัน (Flocculation)

ฟล็อคคูเลชันคือกระบวนการเพิ่มขนาดของสารที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวโดยการใส่สารเคมีที่เรียกว่าสารฟล็อคคูแลนท์ลงไป ทำให้สารแขวนลอยเกิดการรวมตัวกันจนตกตะกอนเพื่อให้สามารถแยกสารนั้นออกจากน้ำได้ ฟล็อคคูเลชันเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับประจุของสารแขวนลอยซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันเมื่อแรงดึงดูดระหว่างมวลหรือแรงแวนเดอร์วาวส์ (van der Waals) มีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างประจุหรือที่เรียกว่าเสถียรภาพของสารคอลลอยด์ และเนื่องจากจุลสาหร่ายมีประจุบนพื้นผิวของเซลล์เป็นลบ ทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ การจะให้จุลสาหร่ายมารวมตัวกันเพื่อตกตะกอนจึงต้องปรับประจุบนเซลล์ของจุลสาหร่ายให้เป็นกลางโดยการใส่สารฟล็อคคูแลนท์ เช่นสารที่มีประจุบวกหรือโพลิเมอร์ ซึ่งกระบวนการฟล็อคคูเลชันได้ถูกนำมาใช้ในแยกจุลสาหร่ายออกจากน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในการเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายในระบบเพาะเลี้ยงเพื่อนำไปใช้เป็นอาหารของสัตว์น้ำ (Knuckey และคณะ, 2006)

2.5.8.2 การแยกด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation)

การตกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยงเป็นการแยกสารที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวโดยใช้ความเร่งจากแรงเหวี่ยง ทำให้สารตกตะกอนแยกจากส่วนที่เป็นของเหลว การตกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยงเป็นวิธีการที่สามารถทำได้รวดเร็วแต่ต้องใช้พลังงานมาก แต่ยังคงเป็นวิธีที่ใช้กันมากในการแยกจุลสาหร่าย โดยเฉพาะเมื่อต้องการเก็บจุลสาหร่ายไว้ใช้เป็นระยะเวลานาน เช่น ใช้เป็นอาหารของสัตว์น้ำ (Grima และคณะ, 2003)

2.5.8.3 การแยกด้วยกระบวนการเยื่อกรอง (Membrane filtration)

การกรองคือกระบวนการแยกอนุภาคของสารที่อยู่ในของเหลวโดยการใช้ขนาดของอนุภาคเป็นเกณฑ์ในการแยก ของเหลวจะถูกนำไปไหลผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนซึ่งมีความดันที่แตกต่างกันระหว่างทั้ง 2 ด้าน ทำให้ของเหลวไหลผ่านไปอีกด้านหนึ่งของตัวกรองในขณะที่อนุภาคที่ต้องการแยกจะถูกกักไว้บนผิวหรือภายในตัวกรอง ขนาดของอนุภาคที่ถูกกักไว้จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนของตัวกรองที่นำมาใช้งานซึ่งจะสามารถกักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนเอาไว้ได้ การเลือกใช้ตัวกรองจึงต้องคำนึงถึงขนาดของสารที่ต้องการแยกเป็นหลัก โดยการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันได้มีการนำมาใช้เพื่อแยกจุลสาหร่ายออกจากอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อนำจุลสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ (Rossignol และคณะ, 1999) และใช้ในการแยกจุลสาหร่ายออกจากน้ำเพื่อนำน้ำจืดไปใช้ (Hung และ Liu, 2006)

2.6 อนุภาคของแข็งแขวนลอยในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

เนื่องจากในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปมักมีการให้อาหารในปริมาณมากเกินพอเพื่อให้สัตว์น้ำเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ จึงส่งผลให้เกิดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำ ได้แก่ อาหารที่เหลืออยู่ ของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา เซลล์ของจุลสาหร่าย รวมถึงเซลล์ของแบคทีเรีย ซึ่งอนุภาคของแข็งเหล่านี้สามารถลดทอนคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงและมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการปล่อยทิ้งไปโดยไม่ได้บำบัด ดังนั้นการจัดการกับอนุภาคของแข็งในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 ปริมาณและสารอาหารที่พบในอนุภาคของแข็งแขวนลอย

ต้นกำเนิดของของเสียที่เกิดขึ้นในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นล้วนมาจากอาหารของสัตว์น้ำที่ใส่ลงไปในระบบ โดยส่วนหนึ่งของอาหารจะถูกสัตว์น้ำบริโภคและถูกจะขับถ่ายออกมาประมาณ 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอาหารที่บริโภคไปทั้งหมด ทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลว และในรูปของก๊าซ ในขณะที่อาหารส่วนที่เหลือจะกลายเป็นของเสีย ซึ่งโดยทั่วไปการประมาณปริมาตรของแข็งแขวนลอยทั้งหมดจะคิดจาก 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอาหารที่ใส่ลงไปในระบบ (เมื่อคิดจากน้ำหนักแห้ง) และได้มีการแนะนำไว้ว่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 80 มก./ลิตร (Timmons และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตามปริมาณการกักเก็บสารอาหารของสัตว์น้ำแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับสภาวะของการเพาะเลี้ยงในแต่ละแห่ง ตัวอย่างการประมาณค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกกักเก็บและถูกปล่อยออกมาโดยสัตว์น้ำชนิดต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6 โดยจะเห็นได้ว่าไนโตรเจนในรูปอนุภาคของแข็งจะถูกพบอยู่ในช่วงระหว่าง 5.4 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในอาหาร ส่วนฟอสฟอรัสในรูปอนุภาคของแข็งจะถูกพบอยู่ในช่วง 15 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในอาหารของสัตว์น้ำ (Piedrahita และคณะ, 2003)

2.6.2 คุณสมบัติของอนุภาคของแข็งแขวนลอย

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอนุภาคของแข็งแขวนลอยเมื่อคำนึงถึงการควบคุมเป็นหลักมี 2 ประการ คือความถ่วงจำเพาะ (Particle specific gravity) และการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง (Particle size distribution) โดยความถ่วงจำเพาะจะถูกกำหนดจากแหล่งกำเนิดของอนุภาค ในขณะที่การกระจายขนาดจะถูกควบคุมจากหลายๆ ปัจจัย เช่น แหล่งของอนุภาค ขนาดของสัตว์น้ำ อุณหภูมิของน้ำ และความปั่นป่วนของระบบ นอกจากนี้จากการศึกษาของ Timmons และคณะ (2002) พบว่าประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์ของอาหารที่เหลืออยู่จะถูกย่อยสลายกลายเป็นอนุภาคที่มี

ขนาดใหญ่กว่า 60 ไมโครเมตร และประมาณ 73 เปอร์เซ็นต์จะเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 มม. ซึ่งอนุภาคของแข็งที่เกิดจากอาหารกับอนุภาคของแข็งที่เกิดจากของเสียของสัตว์น้ำจะมีขนาดและความถ่วงจำเพาะแตกต่างกัน โดยในระบบเพาะเลี้ยงแบบมีการหมุนเวียนน้ำจะพบอนุภาคขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตรมากที่สุด

ตารางที่ 2.6 อัตราการกักเก็บและอัตราการปล่อยสารอาหารของสัตว์น้ำชนิดต่างๆ โดยคิดจากเปอร์เซ็นต์ของสารอาหารที่มีอยู่ในอาหารของสัตว์น้ำ

ปริมาณที่ถูกกักเก็บ		**ปริมาณที่ถูกปล่อยในรูปของแข็ง**		**ปริมาณที่ถูกปล่อยในรูปสารละลาย**		**ชนิดของสัตว์น้ำ**	**เอกสารอ้างอิง**
N*	**P***	**N***	**P***	**N***	**P***		
49	36	14	55	37	9	ปลาแซลมอน	Johnsen และคณะ, 1993 Berggheim และ Asgard, 1996
10	40	35	15	55	45	ปลากระพง	Lemarie และคณะ, 1998
25	30	15	70	60	0	ปลาเทร้าท์สายรุ้ง	Hakanson, 1988 Pillay, 1992
22	18.8	5.4	22	72	62	ปลานิลพันธุ์ผสม	Siddiqui และ Al-Harbi, 1999

<u>หมายเหตุ</u> : *N หมายถึงไนโตรเจนและ P หมายถึงฟอสฟอรัสในหน่วยของเปอร์เซ็นต์

(ที่มา: Piedrahita, 2003)

2.6.3 การจัดการอนุภาคของแข็งแขวนลอยในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

กระบวนการแยกอนุภาคของแข็งที่ได้มีการนำมาใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีอยู่ 3 กระบวนการด้วยกัน ได้แก่ การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง การกรอง และกระบวนการลอยตัว (Timmons และคณะ, 2002) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละกระบวนการมีดังต่อไปนี้

2.6.3.1 การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation)

ใช้หลักการของการตกตะกอนและความเร็วในการตกตะกอน (Settling velocity) เป็นตัวแยกของแข็งแขวนลอยออกจากระบบ โดยใช้ถังตกตะกอนร่วมกับแผ่นกรอง (Screen) ตัวกรองแบบเม็ด (Granular media) หรือตัวกรองที่มีรูพรุน (Porous media)

2.6.3.2 การแยกด้วยระบบกรอง (Filtration)

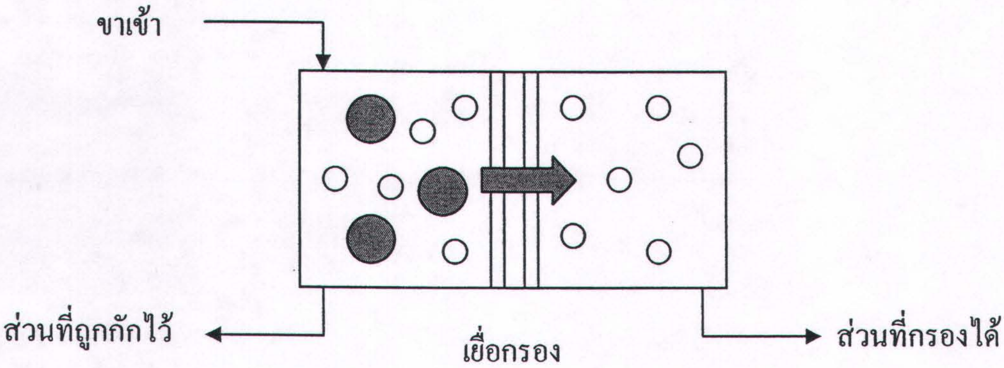
ใช้หลักการแยกของแข็งแขวนลอยด้วยการกรองโดยใช้แผ่นกรอง ตัวกรองแบบเม็ด หรือตัวกรองที่มีรูพรุน ซึ่งกระบวนการกรองอาจมีมากกว่า 1 ขั้นตอนเพื่อให้สามารถแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6.3.3 การแยกด้วยกระบวนการลอยตัว (Floatation)

การแยกด้วยกระบวนการลอยตัวนี้อนุภาคของแข็งแขวนลอยจะถูกดูดติดไปกับฟองอากาศที่ถูกใส่เข้าไปในระบบ จากนั้นของแข็งแขวนลอยจึงจะถูกพาแยกออกไปจากน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.7 กระบวนการเยื่อกรอง

กระบวนการเยื่อกรองหมายถึงกระบวนการที่อาศัยเยื่อกรองแบบเลือกผ่าน (Semi-permeable membrane) เพื่อแยกอนุภาคสาร (Solute) ออกจากของเหลว โดยใช้แรงขับดัน (Driving force) บังคับให้ของเหลวไหลซึมผ่านเยื่อกรองไปและกักสารต่างๆ ไว้บนเยื่อกรองหรือกักไว้ในรูปของสารละลายเข้มข้นที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ ซึ่งเยื่อกรองจะเป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสการไหล 2 เฟสที่มีคุณสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่าน และการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นตามความหนาของชั้นเยื่อกรอง โดยหลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อกรองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการของการแยกด้วยเยื่อกรอง

แรงขับที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลระหว่างเยื่อกรอง ได้แก่ ความดันระหว่างเยื่อกรองและความเข้มข้นของของเหลวที่นำมากรอง ซึ่งเยื่อกรองที่มีประสิทธิภาพดีจะมีค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง มีความแข็งแรงทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะการเดินระบบได้ดี รวมทั้งมีแนวโน้มในการอุดตันต่ำและมีราคาไม่แพง กระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภทตามขนาดของรูพรุนและแรงขับที่ใช้ในการถ่ายโอนมวล โดยในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการแยกอนุภาคออกจากของเหลวซึ่งสามารถแบ่งประเภทของเยื่อกรองตามขนาดรูพรุนได้เป็นไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน และออสโมซิสผันกลับ ซึ่งรายละเอียดลักษณะของเยื่อกรองและกลไกในการแยกของเยื่อกรองแต่ละประเภทแสดงไว้ในตารางที่ 2.7 ดังนี้

ตารางที่ 2.7 ลักษณะของเยื่อกรองและกลไกในการแยกของเยื่อกรองแต่ละประเภท

กระบวนการแยก	**ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)**	**กลไกการแยก**
ไมโครฟิลเตรชัน	500-20,000	การคัดขนาด
อัลตราฟิลเตรชัน	30-1,000	การคัดขนาด
นาโนฟิลเตรชัน	10-50	การคัดขนาด
ออสโมซิสผันกลับ	5-20	การคัดขนาด
	< 5	การละลาย-การแพร่

(ที่มา: Baker, 2004)

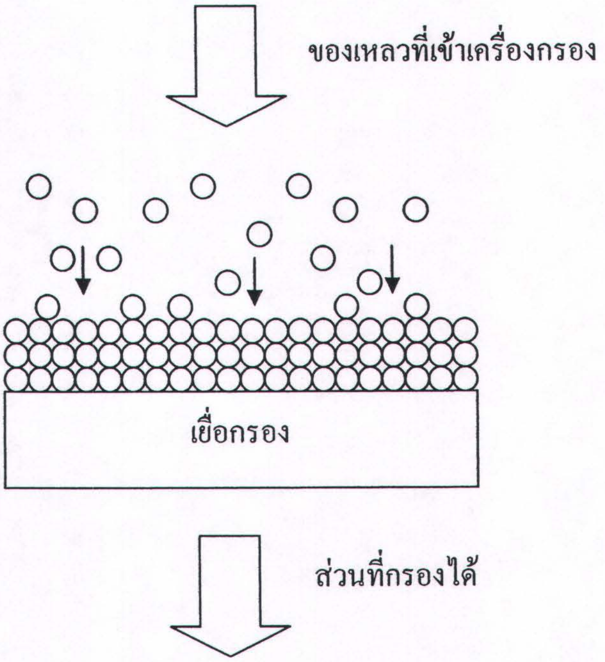
วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรองสามารถแบ่งตามคุณสมบัติทางเคมีออกได้เป็นเยื่อกรองที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยเมื่อเยื่อกรองสัมผัสกับน้ำจะแสดงการตอบสนองต่อโมเลกุลของน้ำในลักษณะที่สร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำหรือผลักโมเลกุลของน้ำให้

ห่างออกไป ซึ่งอนุภาคแขวนลอยในน้ำมักมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำและมีแนวโน้มชอบจับตัวกันเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่มักเข้าไปจับติดกับผิวของเยื่อกรอง ส่งผลให้เกิดการอุดตันของรูพรุนบนเยื่อกรองหรือภายในเยื่อกรอง จึงต้องทำการเปลี่ยนหรือทำการล้างย้อนเพื่อให้สามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ สำหรับวัสดุชนิดไม่ชอบน้ำจะมีความสามารถในการดูดติดสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน แบคทีเรีย จุลสาหร่าย และอนุภาคแขวนลอยได้สูง แต่จะยอมให้น้ำผ่านได้น้อยกว่าเยื่อกรองชนิดชอบน้ำ จึงก่อให้เกิดการอุดตันได้ง่ายกว่าเมื่อนำมาใช้ในการกรองสารอินทรีย์ ดังนั้นการเลือกชนิดของเยื่อกรองจึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์เป็นหลัก

2.7.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

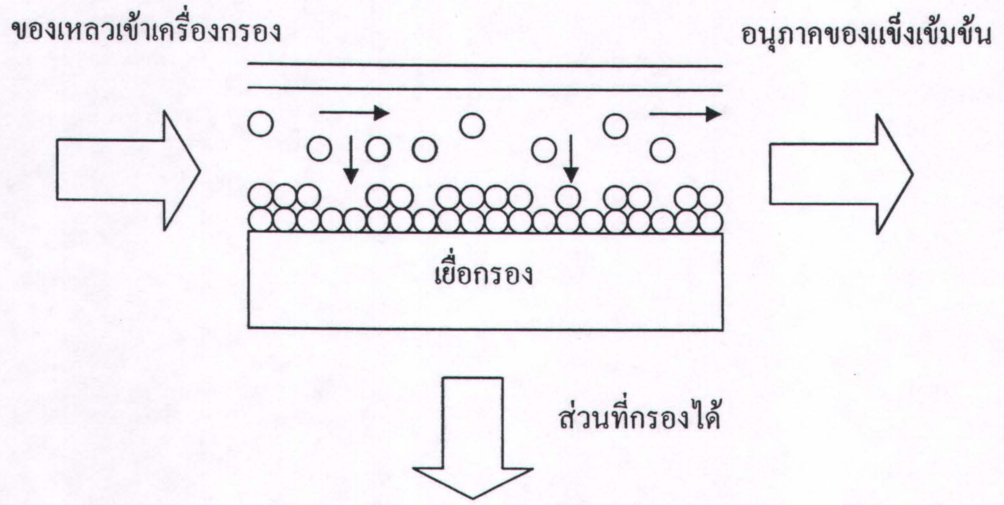
ไมโครฟิลเตรชันคือกระบวนการกรองที่ใช้เยื่อกรองเป็นตัวแยกอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดระหว่าง 0.01 ถึง 10 ไมโครเมตรออกจากของเหลว โดยไมโครฟิลเตรชันเป็นกระบวนการทางกายภาพที่อาศัยแรงดันเป็นตัวขับให้ของเหลวไหลผ่านรูพรุนของเยื่อกรองที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นกระบวนการไมโครฟิลเตรชันนี้จึงสามารถนำมาใช้แยกแบคทีเรีย จุลสาหร่าย และจุลชีพต่างๆ ออกจากน้ำ ซึ่งขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ต้องการแยกออกจากน้ำ ส่วนการแบ่งประเภทของการกรองในไมโครฟิลเตรชันสามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของของเหลวได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

การกรองโดยตรง (Dead-end microfiltration) เป็นลักษณะของการกรองที่ของเหลวจะไหลผ่านเยื่อกรองในแนวตั้งฉากภายใต้ความดัน สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองจะถูกกักไว้บนผิวหน้าของเยื่อกรอง เมื่อเวลาผ่านไปจึงเกิดการสะสมของอนุภาคของแข็งบนผิวหรือภายในเยื่อกรองจนเกิดการอุดตัน ซึ่งส่งผลให้ของเหลวที่กรองได้มีปริมาณลดลงและต้องมีการใช้ความดันในการเดินระบบเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ของเหลวสามารถไหลผ่านเยื่อกรองไปได้ จนในที่สุดจะถึงจุดที่ต้องมีการเปลี่ยนเยื่อกรองหรือต้องทำการล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดเยื่อกรอง ซึ่งการกรองชนิดนี้เหมาะสำหรับของเหลวที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กและมีความเข้มข้นต่ำ ลักษณะการไหลของของเหลวในการกรองโดยตรงแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของของเหลวในการกรองโดยตรง

การกรองแบบแบ่งส่วน (Cross-flow microfiltration) เป็นลักษณะของการกรองที่ของเหลวจะไหลเวียนอยู่รอบๆ เรือนกรอง ในลักษณะที่ขนานกับเยื่อกรอง โดยอนุภาคของแข็งที่ไม่สามารถไหลผ่านเยื่อกรองได้จะถูกกักไว้ที่อีกด้านหนึ่งของเยื่อกรองทำให้เกิดการไหลของของเหลวเป็น 2 ทาง คือ ด้านที่ของเหลวไหลผ่านเยื่อกรอง (Permeate) และด้านที่มีอนุภาคของแข็งเข้มข้น (Retentate หรือ Concentrate) การกรองประเภทนี้จะช่วยลดปัญหาการทับถมของอนุภาคบนเยื่อกรองเนื่องจากเกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าทำให้เกิดการอุดตันช้าลง ปริมาณของเหลวที่กรองได้จึงสูงกว่าการกรองโดยตรงเมื่อใช้ความดันในการเดินระบบเท่ากัน ลักษณะการไหลของของเหลวในการกรองแบบแบ่งส่วนแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของของเหลวในการกรองแบบแบ่งส่วน

สำหรับการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียและประสิทธิภาพของการกรองโดยตรงและแบบแบ่งส่วนแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2.8 ดังนี้

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบการกรองโดยตรงและการกรองแบบแบ่งส่วน

การกรองโดยตรง	การกรองแบบแบ่งส่วน
ต้นทุนต่ำ	ต้นทุนสูง
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง เนื่องจากต้องเปลี่ยนเยื่อกรองหลังการใช้งาน	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบปานกลาง เนื่องจากเยื่อกรองมีอายุในการใช้งานยาวนานกว่าเมื่อมีการทำความสะอาดเยื่อกรองอย่างสม่ำเสมอ
การเดินระบบทำได้ง่าย	การเดินระบบมีความยุ่งยาก ต้องมีการทำความสะอาดเยื่อกรองอย่างสม่ำเสมอ
เหมาะสมกับของเหลวที่เจือจาง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเยื่อกรองจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มมากขึ้น	เหมาะสมกับของเหลวที่มีปริมาณของแข็งมาก โดยค่าใช้จ่ายจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของของเหลวที่เข้าระบบ
มักใช้กรองสารละลายที่มีความเข้มข้นของของแข็งน้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์	มักใช้กรองสารละลายที่มีของแข็งเจือปนอยู่ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์

(ที่มา: Baker, 2004)

2.7.2 ประเภทของเยื่อกรอง

ประเภทของเยื่อกรองที่ใช้ในการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เยื่อกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง และเยื่อกรองแบบติดผิวชั้นกรอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เยื่อกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (Depth filter) เป็นเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ ทำให้อนุภาคสามารถผ่านไปถึงด้านในของเยื่อกรองได้ โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกดักจับไว้ในเยื่อกรองหรือถูกดูดติดอยู่กับผนังของรูพรุน ซึ่งกลไกในการกักอนุภาคของเยื่อกรองชนิดนี้คือการดูดซับ (Adsorption) และการดักติด (Entrapment) และเนื่องจากความสามารถในการกักอนุภาคของเยื่อกรองแบบติดค้างในชั้นกรองขึ้นอยู่กับความคดเคี้ยวของการไหล จึงสามารถกักสารที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนไว้ได้ นอกจากนี้เยื่อกรองแบบติดค้างในชั้นกรองจะมีพื้นที่ผิวในการกรองอนุภาคมากกว่าเยื่อกรองแบบติดผิวชั้นกรองทำให้เกิดการอุดตันได้ช้ากว่า เยื่อกรองชนิดนี้มักถูกนำมาใช้กับการกรองโดยตรง

เยื่อกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Screen filter) เป็นเยื่อกรองที่ส่วนของพื้นผิวด้านนอกสุดจะมีรูพรุนขนาดเล็กซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการสะสมตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน เยื่อกรองแบบติดผิวชั้นกรองจะเกิดการอุดตันได้อย่างรวดเร็วจากการทับถมของอนุภาคที่ถูกกักอยู่ที่ด้านนอกของเยื่อกรอง จึงมักถูกนำมาใช้กับการกรองแบบแบ่งส่วนเนื่องจากของเหลวที่ไหลเข้าเครื่องกรองจะก่อให้เกิดแรงเฉือนซึ่งจะพาอนุภาคบนเยื่อกรองออกไป จึงเป็นการช่วยทำความสะอาดเยื่อกรองอีกทางหนึ่ง

2.7.3 ทฤษฏีการอุดตันของเยื่อกรอง

โครงสร้างของเยื่อกรองมีความสำคัญต่อค่าฟลักซ์ของของเหลว เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของสารที่ต้องการแยกจะสามารถเข้าสู่รูพรุนของเยื่อกรองได้และทำให้เกิดการอุดตันแบบถาวร (Irreversible fouling) ในทางตรงกันข้ามถ้ารูพรุนของเยื่อกรองมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของสารในของเหลว โมเลกุลเหล่านั้นจะเกิดการสะสมอยู่บนพื้นผิวของเยื่อกรองทำให้มีการปิดกั้นหรืออาจเกิดการสร้างชั้นเจลขึ้นบนผิวของเยื่อกรอง ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุนของเยื่อกรองจะทำให้เกิดการอุดตันบางส่วนขึ้น ซึ่งทฤษฏีการอุดตันของเยื่อกรองสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ทฤษฏี (Cinta Vincent Vela และคณะ, 2009) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.3.1 Complete blocking model

ทฤษฎีนี้มีสมมติฐานว่าโมเลกุลที่เข้ามายังพื้นผิวของเยื่อกรองจะทำให้เกิดการอุดตันโดยการปิดกั้นรูพรุนบนเยื่อกรอง และสารโมเลกุลแต่ละตัวจะไม่ทับถมลงบนโมเลกุลตัวก่อนหน้า จึงไม่กระทบกับค่าฟลักซ์ของของเหลวที่ไหลผ่านรูพรุนซึ่งไม่ถูกปิดกั้น ดังนั้นสัดส่วนการลดลงของพื้นผิวเยื่อกรองจึงขึ้นอยู่กับจำนวนของรูพรุนที่ถูกปิดกั้น การอุดตันชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อขนาดโมเลกุลของสารที่เข้าสู่การกรองมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรอง ซึ่งการอุดตันจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวเยื่อกรองไม่ใช่ที่ด้านในของรูพรุน

2.7.3.2 Intermediate blocking model

ทฤษฎีนี้มีสมมติฐานว่ารูพรุนหนึ่งๆ ของเยื่อกรองไม่จำเป็นจะต้องถูกอุดตันจากสารโมเลกุลเพียงตัวเดียว เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการทับกันของโมเลกุลบนพื้นผิวของเยื่อกรอง ซึ่งการอุดตันชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของรูพรุนบนเยื่อกรอง ดังนั้นโมเลกุลของสารบางตัวจึงสามารถปิดกั้นรูพรุนไว้ได้โดยไม่ได้อุดตันรูพรุนนั้นทั้งหมด

2.7.3.3 Standard blocking model

ทฤษฎีนี้มีสมมติฐานว่าสารโมเลกุลได้เข้าสู่รูพรุนของเยื่อกรองและทับถมอยู่ที่ผนังของรูพรุนเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นทางในรูพรุนทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและโมเลกุลบางตัวอาจเกิดการดูดซับกับผนังของรูพรุน ซึ่งการอุดตันชนิดนี้จะเกิดได้จากสารโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อกรอง และการอุดตันจะเกิดขึ้นภายในรูพรุน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของรูพรุนจะลดลงเรื่อยๆ ตามสัดส่วนของปริมาตรน้ำกรอง และเนื่องจากการอุดตันนี้เกิดขึ้นภายในรูพรุนของเยื่อกรอง การอุดตันจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำเข้า

2.7.3.4 Gel layer formation model

ในกรณีนี้สารโมเลกุลจะไม่ได้มีการเข้าสู่รูพรุนของเยื่อกรองแต่จะมีการสร้างชั้นเจลขึ้นบนพื้นผิวของเยื่อกรองแทน ซึ่งการอุดตันชนิดนี้จะเกิดกับโมเลกุลของสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนและไม่ได้เข้าไปภายในรูพรุนของเยื่อกรอง

2.7.4 ทฤษฎีไมโครฟิลเตรชัน

ไมโครฟิลเตรชันคือกระบวนการแยกอนุภาคสารซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงไมครอน อันได้แก่ ของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดตั้งแต่ 0.10 ถึง 5 ไมโครเมตร โดยมักนำมาใช้กับการกรองน้ำให้ใส การแยกอนุภาคสารแขวนลอยออกจากสารผสม และการแยกอนุภาคอื่นๆ ซึ่งสามารถแยกได้โดยตัวกรองชนิดไมโครฟิลเตรชัน (Cheryan, 1998)

หลักการในการดำเนินระบบกรองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบหลักด้วยกัน คือระบบความดันคงที่และระบบค่าฟลักซ์คงที่ (AWWA, 2005) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ระบบความดันคงที่ (Constant pressure) คือการควบคุมความดันให้คงที่ไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง โดยไม่คำนึงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเดินระบบ ซึ่งในระบบนี้อัตราการไหลของส่วนที่กรองได้จะมีค่าลดลงตามเวลาที่ผ่านไป เนื่องจากความดันในการกรองจะเพิ่มมากขึ้นจากการอุดตันของอนุภาคสารบนเยื่อกรอง ข้อดีของระบบความดันคงที่คือสามารถเลือกขนาดของเครื่องสูบน้ำได้ตามค่าความดันที่ต้องการ แต่อัตราการไหลที่ลดลงของส่วนที่กรองได้ก็จะมีผลให้ผลผลิตมีปริมาณลดลงเช่นกัน

ระบบค่าฟลักซ์คงที่ (Constant flux) คือการควบคุมค่าฟลักซ์ให้คงที่ไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง โดยการเพิ่มความดันเข้าสู่ระบบเมื่อเวลาผ่านไปเพื่อเป็นการรักษาค่าฟลักซ์ให้อยู่ในระดับเดิม ข้อดีของระบบคือไม่จำเป็นต้องออกแบบเครื่องกรองให้มีขนาดใหญ่สำหรับรองรับสารละลายทั้งหมดที่ต้องทำการกรอง แต่ความดันที่เพิ่มสูงขึ้นก็มีผลต่อการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องสูบน้ำหลากหลายขนาดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนนี้ได้ และโรงงานกรองน้ำดื่มส่วนใหญ่ก็มักใช้ระบบค่าฟลักซ์คงที่ในการดำเนินการกรอง

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดำเนินระบบกรองในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันได้แก่ ฟลักซ์ ลักษณะการไหลของของเหลวที่เข้าเครื่องกรอง และความเข้มข้นของสารละลายที่ทำการกรอง (Cheryan, 1998) ซึ่งลักษณะการไหลของของเหลวแบบปั่นป่วน (Turbulant flow) จะมีผลทำให้ฟลักซ์ของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งให้ค่าฟลักซ์ของการกรองลดต่ำลง โดยค่าฟลักซ์จะเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพการกรองในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแบบแบ่งส่วน ซึ่งแสดงในรูปของปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านรูพรุนของเยื่อกรองต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ซึ่งปกติการหาค่าฟลักซ์จะทำการทดสอบที่สภาวะความดันต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา (Baker, 2004) การคำนวณค่าฟลักซ์สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = Q / A\Delta t$$

โดยที่ J = ค่าฟลักซ์

Q = ปริมาตรของของเหลวที่ผ่านเยื่อกรอง

A = พื้นที่ผิวของเยื่อกรองที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

Δt = เวลาที่เก็บของเหลว

ส่วนประสิทธิภาพการกรองของเครื่องกรองสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกรอง} = [(C_0 - C_1) / C_0] \times 100$$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำที่เข้าเครื่องกรอง

C_1 = ความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำที่กรองได้

ซึ่งทั้งค่าฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาและประสิทธิภาพในการกรองสามารถนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องกรองไมโครฟิลเตรชันได้ โดยค่าฟลักซ์ที่ลดลงจะบ่งชี้ว่าน้ำที่กรองได้ต่อพื้นที่ของเยื่อกรองมีปริมาตรลดลงเนื่องจากมีการอุดตันเพิ่มมากขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกรองจะบ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำที่เยื่อกรองสามารถกรองได้ ซึ่งข้อดีและข้อเสียของระบบกรองไมโครฟิลเตรชันแสดงไว้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ข้อดีและข้อเสียของระบบกรองไมโครฟิลเตรชัน

ข้อดี	**ข้อเสีย**
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบมีค่าต่ำ เนื่องจากมีความต้องการในการเปลี่ยนตัวกรองน้อยกว่าระบบอัลตราฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับ	การติดตั้งระบบมีค่าใช้จ่ายสูง
สามารถแยกโมเลกุลในขนาดที่กำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเหมาะกับการแยกอนุภาคสารต่างขนาดและการฆ่าเชื้อ	ขนาดของรูพรุนทำให้มีความสามารถในการกักอนุภาคสารได้น้อยกว่าเยื่อกรองชนิดอื่นๆ

(ที่มา: Cheremisinoff, 1995)

2.7.5 โมดูลของเครื่องกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration module)

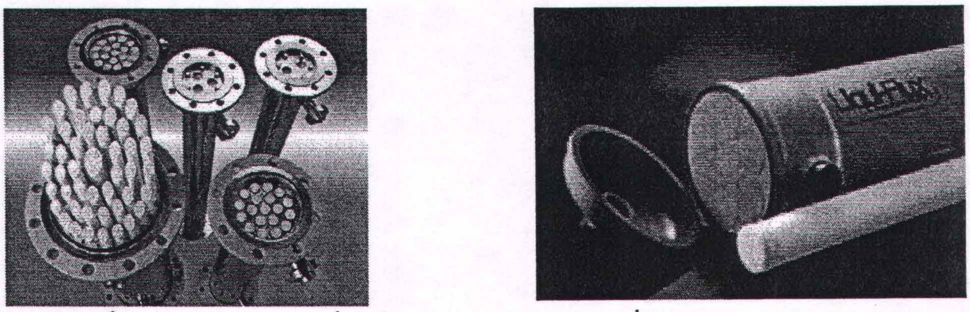
โมดูลของเครื่องกรองไมโครฟิลเตรชันสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 แบบดังนี้

- โมดูลแบบแผ่น (Plate and flame module)
- โมดูลแบบท่อ (Tubular module)
- โมดูลแบบม้วน (Spiral wound module)
- โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)

ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะโมดูลแบบท่อที่มีลักษณะเป็นแท่งกรอง เนื่องจากเป็นโมดูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รายละเอียดของโมดูลแบบแท่งกรองมีดังนี้

โมดูลแบบไส้กรอง (Cartridge type filter)

ไส้กรองคือแท่งวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กซึ่งใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่สามารถไหลผ่านรูพรุนของไส้กรองออกจากของเหลว ตัวอย่างของเครื่องกรองประเภทนี้ได้แก่ เครื่องกรองน้ำสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายเพื่อใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป โดยไส้กรองสามารถกรองได้ทั้งแบบติดค้างในชั้นกรองและแบบติดผิวชั้นกรอง ลักษณะของเครื่องกรองไมโครฟิลเตรชันชนิดนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเครื่องกรองไมโครฟิลเตรชันที่มีโมดูลแบบไส้กรอง

วัสดุที่มีการนำมาใช้ทำไส้กรองได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass fiber) ไนลอน (Nylon) โพลีซัลโฟน (Polysulfone) พีทีเอฟอี (Polytetrafluoroethylene, PTFE) โพลีเอมายด์ (Polyamide) โพลีโพรพีลีน (Polypropylene) พีวีดีเอฟ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) เซลลูโลส สิ่งทอ และกระดาษชนิดต่างๆ ซึ่งการเลือกใช้วัสดุควรเลือกให้เข้ากันได้กับของเหลวที่นำมากรองและสามารถทนต่ออุณหภูมิ อัตราการไหล และความดันที่ใช้ในการทำงาน โดยไส้กรองจะถูกใส่ไว้ในเรือนกรอง (Filter housing) และควรเลือกเรือนกรองที่มีขนาดเพียงพอกับอัตราการไหลของของเหลวและสามารถทนต่อความดันที่ใช้ในการเดินระบบได้

2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การศึกษาการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่าย

Aslan และ Kapdan (2006) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียความเข้มข้นระหว่าง 13.2 ถึง 410 มก./ลิตร และมีความเข้มข้นของฟอสเฟตระหว่าง 7.7 ถึง 199 มก./ลิตร ซึ่งในแต่ละตัวอย่างได้มีการควบคุมอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสให้มีค่าเท่ากับ 2/1 ตลอดการทดลอง โดยการทดลองทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 20 °ซ) กำหนดค่าพีเอชเท่ากับ 7 และใช้แสงสังเคราะห์ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 4,100 ลักซ์ เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย จากผลการทดลองพบว่าจุลสาหร่ายสามารถนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ได้มากกว่าฟอสฟอรัส โดยแอมโมเนียจะถูกบำบัดจนหมดไปที่ความเข้มข้นระหว่าง 13.2 ถึง 21.2 มก./ลิตร แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียจะลดลงเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียให้สูงขึ้นในช่วง 41.8 ถึง 92.8 มก./ลิตร และประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าน้อยกว่า 24 เปอร์เซ็นต์เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงกว่า 129 มก./ลิตร ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสพบว่ามีค่าประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์เมื่อมีปริมาณฟอสเฟตอยู่ที่ 7.7 มก./ลิตร แต่ประสิทธิภาพจะเหลือน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอจะเพิ่มจาก 10.7 เป็น 27.3 มก./ลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียจาก 13.2 เป็น 410 มก./ลิตร งานวิจัยนี้จึงเสนอแนะว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงของจุลสาหร่ายเมื่อสารอาหารมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น อาจเกิดจากจุลสาหร่ายแบ่งตัวเพิ่มจำนวนจนมีปริมาณมากเกินไปทำให้แสงไม่สามารถลอดผ่านไปได้ และสรุปผลจากการทดลองว่า *Chlorella vulgaris* สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีแอมโมเนียในน้ำน้อยกว่า 22 มก./ลิตร และมีฟอสเฟตน้อยกว่า 7.7 มก./ลิตร

Voltolina และคณะ (2005) ได้ศึกษาการใช้จุลสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำจุลสาหร่ายมาเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องในน้ำเสียที่ถูกเจือจางให้มีความเข้มข้น 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะที่มีแสงเป็นเวลา 14 ชม. และภายใต้สภาวะไร้แสงเป็นเวลา 10 ชม./วัน เพื่อวิเคราะห์การบำบัดไนโตรเจนของจุลสาหร่ายและการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนไปเป็นโปรตีนในเซลล์ (Single cell protein) จากการทดลองพบว่ามวลของจุลสาหร่ายและปริมาณโปรตีนเพิ่มมากขึ้นในช่วงเวลาที่ได้รับแสงเท่านั้น โดยน้ำเสียที่มีความเจือจาง 30 เปอร์เซ็นต์ มีมวลจุลสาหร่ายเกิดขึ้น 39.3 มก./ลิตร และเกิดโปรตีน 24.9 มก./ลิตร ส่วนน้ำเสียที่มีความเจือจาง 40 เปอร์เซ็นต์ มีมวลจุลสาหร่ายเกิดขึ้น 25.2 มก./ลิตร และเกิดโปรตีน 16.7 มก./ลิตร ในขณะที่ปริมาณการใช้ไนเทรตของจุลสาหร่ายในน้ำเสียทั้งสองความเข้มข้นในช่วงเวลาที่มีแสงอยู่ที่ 71 ถึง 73

เปอร์เซ็นต์ แต่ไนเทรตจะถูกขับออกจากเซลล์ของจุลสาหร่ายในช่วงเวลาไร้แสง เนื่องจากพบว่าเมื่อครบ 24 ชม. แล้วมีไนเทรตในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ที่ 64 ถึง 66 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไนเทรตตั้งต้น ส่วนการบำบัดแอมโมเนียของจุลสาหร่ายพบว่า *Scenedesmus obliquus* สามารถลดปริมาณแอมโมเนียลงได้ 14.5 ถึง 23 เปอร์เซ็นต์

2.8.2 การศึกษาการใช้จุลสาหร่ายในการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

Chuntapa และคณะ (2003) ได้ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina platensis*) ร่วมกับกุ้งกุลาดำเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง โดยเปรียบเทียบผลของสาหร่ายที่มีต่อสารอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างบ่อเพาะเลี้ยงกุ้ง 3 บ่อที่มีความหนาแน่นของกุ้งเท่ากัน ได้แก่ บ่อที่ไม่มีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย บ่อที่ไม่มีการแยกสาหร่ายออกจากระบบ และบ่อที่แยกสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องโดยใช้แพลงก์ตอนเนตขนาดรูพรุน 60 ไมโครเมตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าบ่อที่ไม่มีสาหร่ายสไปรูลิน่าจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไทรต์อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.6 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร มีไนเทรตที่ความเข้มข้นประมาณ 16 ถึง 18 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร และมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอน้อยกว่า 0.02 มก./ลิตร ตลอดการทดลอง ส่วนในบ่อที่ไม่มีการแยกสาหร่ายสไปรูลิน่าพบว่ามีความเข้มข้นของไนโตรเจนค่อนข้างหลากหลาย โดยปริมาณไนเทรตมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 จนถึงมากกว่า 15 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร ความเข้มข้นของไนไทรต์อยู่ในช่วงตั้งแต่น้อยกว่า 0.1 จนถึงมากกว่า 3 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร และพบว่าปริมาณแอมโมเนียมีค่าน้อยกว่า 0.1 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร ส่วนในบ่อที่มีการแยกสาหร่ายสไปรูลิน่าแบบกึ่งต่อเนื่องพบว่าปริมาณสารประกอบไนโตรเจนมีค่าลดลงมากที่สุด โดยมีปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์อยู่ที่ 0 ถึง 0.15 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร และมีไนเทรตอยู่ที่ 4 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอในการทดลองที่มีสาหร่ายสไปรูลิน่าทั้งที่มีการแยกและไม่มีการแยกสาหร่ายพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.01 ถึง 0.13 มก./ลิตร

Burford และคณะ (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของจุลชีพและแพลงก์ตอนพืชต่อคุณภาพน้ำ โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 3 อาทิตย์ในบ่อเพะเลี้ยงกุ้งขาวแบบหนาแน่น (กุ้ง 120 ตัว/ตร.ม.) เป็นจำนวน 5 บ่อ โดยบ่อเพาะเลี้ยงเหล่านี้เป็นบ่อที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พื้นบ่อปูด้วยพลาสติก และมีอัตราการให้อากาศสูง ไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอนถูกใส่ลงในบ่อเพาะเลี้ยงในรูปของอาหารสำเร็จรูป เมล็ดพืช และกากน้ำตาล ส่งผลให้มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ไนโตรเจนในระดับความเข้มข้นสูง (2.29 ถึง 5.56 และ 0.17 ถึง 10.66 มก.-ไนโตรเจน/ลิตร ตามลำดับ) และมีสารละลายอินทรีย์ในความเข้มข้นสูงเช่นกัน (14.20 ถึง 48.10 มก./ลิตร) สารอาหารจำนวนมากในน้ำจะกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แพลงก์ตอนพืช และโปรโตซัว โดยแบคทีเรียที่เกิดขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของฟล็อก และอีก 50 เปอร์เซ็นต์เป็นพวกที่

ดำรงชีวิตอย่างอิสระ ส่วนแพลงก์ตอนพืชที่พบส่วนใหญ่เป็นไดโนแฟลเจลเลต นาโนแฟลกเจลเลต ไซยาโนแบคทีเรีย และไดอะตอม ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าทั้งแบคทีเรียและแพลงก์ตอนพืชมีบทบาทสำคัญในการนำแอมโมเนียไปใช้ในเซลล์ โดยพบปริมาณแบคทีเรียในบ่อเพาะเลี้ยง 3.35 ถึง 5.42×10^7 ตัว/มล. พบแพลงก์ตอนพืชประเภทไดโนแฟลกเจลเลต 0.11 ถึง 7.43×10^4 ตัว/มล. พบนาโนแฟลกเจลเลต 9.14 ถึง 107.91×10^4 ตัว/มล. พบไซยาโนแบคทีเรีย 0.07 ถึง 5.45×10^4 ตัว/มล. และพบไดอะตอมตั้งแต่ 0 ถึง 643 ตัว/มล. ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอมีค่าประมาณ 134.29 ถึง 435.10 ไมโครกรัม/ลิตร ซึ่งจากการวิเคราะห์การใช้แอมโมเนียของแบคทีเรียและแพลงก์ตอนพืชโดยเปรียบเทียบอัตราการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ในสภาวะที่มีแสงและสภาวะที่ไม่มีแสงพบว่าแบคทีเรียสามารถนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ได้ประมาณ 11.72 ถึง 40.54 ไมโครกรัม/ลิตร-ชม. ส่วนแพลงก์ตอนพืชสามารถนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 63.32 ไมโครกรัม/ลิตร-ชม. และสามารถนำไนเทรตเข้าสู่เซลล์ได้ประมาณ 0.33 ถึง 2.18 ไมโครกรัม/ลิตร-ชม.

2.8.3 การศึกษาการใช้เครื่องกรองแบบแบ่งส่วนเพื่อแยกจุลสาหร่ายออกจากน้ำ

Rossignol และคณะ (1999) ได้ศึกษาการใช้ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันแบบแบ่งส่วนเพื่อนำมาแยกจุลชีพในงานเทคโนโลยีชีวภาพต่างๆ โดยผู้วิจัยได้นำเยื่อกรองที่มีขายตามท้องตลาดหลายชนิดมาทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการแยกจุลสาหร่าย 2 ชนิดคือ *Haslea ostrearia* และ *Skeletonema costatum* ออกจากอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยในแต่ละการทดลองจุลสาหร่ายจะถูกควบคุมให้มีความเข้มข้น 50×10^6 เซลล์/ลิตร เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเยื่อกรองแต่ละชนิดได้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบจากความเร็วของของเหลวที่เข้าเครื่องไมโครฟิลเตรชัน ความดันระหว่างเยื่อกรอง และความเข้มข้นของของเหลวที่เข้าเครื่องกรอง โดยเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลองมีพื้นที่เท่ากับ 0.01 ตร.ม. เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันที่ใช้เป็นเยื่อกรองที่ทำมาจากพีวีดีเอฟ มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.4 0.8 และ 1.5 ไมโครเมตร ส่วนเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้เป็นเยื่อกรองที่ทำมาจากพีเอเอ็น (40,000 ดาลตัน) พีวีดีเอฟ (40,000 ดาลตัน) และพีอีเอส (30,000 ดาลตัน) โดยในการเดินระบบผู้วิจัยได้ใช้ความเร็วเข้าเครื่องกรองเท่ากับ 1.5 และ 2.5 เมตร/วินาที สำหรับไมโครฟิลเตรชัน และ 1.0, 1.5 และ 2.5 เมตร/วินาที สำหรับอัลตราฟิลเตรชัน ส่วนความดันระหว่างเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 50 ถึง 300 กิโลปาสคาล ซึ่งในกระบวนการกรอง อาหารเลี้ยงเชื้อจะถูกหมุนเวียนเข้าเครื่องกรองอย่างต่อเนื่อง จากนั้นส่วนที่กรองได้จะถูกเวียนกลับไปยังถังเก็บอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อควบคุมให้เซลล์ในถังมีความเข้มข้นคงที่ ส่วนการควบคุมความดันในการกรองใช้วิธีการปรับวาล์วของน้ำที่เข้าและออกจากเครื่องกรอง จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการแยกจุลสาหร่ายขึ้นอยู่กับสภาวะในการไหลของของเหลว ความเข้มข้นและลักษณะของจุลสาหร่าย เช่น รูปร่าง อายุ และซากของจุลสาหร่ายที่

ตายแล้ว ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันพบว่าเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันที่ทำมาจากพีเอเอ็น (40,000 ดาลตัน) มีประสิทธิภาพสูงกว่าเยื่อกรองชนิดอื่นๆ เมื่อทดลองใช้ในระยะยาว โดยการทดลองได้เดินระบบที่ความดันและความเร็วต่ำ และพบว่าค่าฟลักซ์ในอัลตราฟิลเตรชันมีค่าอยู่ระหว่าง 15 ถึง 60 ลิตร/ตร.ม.-ชม. ซึ่งเป็นค่าฟลักซ์ในช่วงเดียวกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพส่วนใหญ่ เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมยา

Hung และ Liu (2006) ได้ศึกษาการใช้ไมโครฟิลเตรชันแบบแบ่งส่วนเพื่อแยกจุลสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* sp. ออกจากน้ำจืด พารามิเตอร์หลักที่นำมาใช้ในการทดลองคือค่าความดันระหว่างเยื่อกรองและความเร็วของน้ำที่เข้าสู่เครื่องกรอง โดยค่าความดันระหว่างเยื่อกรองถูกกำหนดไว้ที่ 40, 50 และ 60 กิโลปาสคาล ส่วนความเร็วถูกกำหนดไว้ 2 ค่าคือที่ 0.43 เมตร/วินาที และ 0.84 เมตร/วินาที ในขณะที่ปริมาณของจุลสาหร่ายในน้ำได้ถูกควบคุมไว้ให้มีความขุ่นเท่ากับ 13.3 เอ็นทียู ตลอดการทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของจุลสาหร่าย 400,000 เซลล์/มล. โมดูลของเยื่อกรองเป็นโมดูลชนิดแผ่นซึ่งมีพื้นที่เท่ากับ 4 ตร.ซม. ส่วนเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือเยื่อกรองชนิดไม่ชอบน้ำที่ทำจากพีวีดีเอฟ และเยื่อกรองชนิดชอบน้ำที่ทำจากเซลลูโลส โดยเยื่อกรองทั้ง 2 ชนิดมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.22 ไมโครเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ที่ความเร็วของน้ำ 0.43 เมตร/วินาที มีค่าเท่ากับ 44.7×10^{-5} 59.8×10^{-5} และ 59.2×10^{-5} ลบ.ม./ตร.ม.-วินาที ที่ความดันเท่ากับ 40, 50 และ 60 กิโลปาสคาลตามลำดับ ส่วนค่าฟลักซ์ที่ความเร็วของน้ำ 0.84 เมตร/วินาที มีค่าเท่ากับ 8.5×10^{-5} 9.7×10^{-5} และ 7.9×10^{-5} ลบ.ม./ตร.ม.-วินาที ที่ความดันเท่ากับ 40, 50 และ 60 กิโลปาสคาลตามลำดับ และจากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันระหว่างเยื่อกรองเพิ่มจาก 40 เป็น 50 กิโลปาสคาล แต่ค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างมากเมื่อใช้ความดันเท่ากับ 60 กิโลปาสคาล ส่วนความเร็วที่เหมาะสมในการกรองจุลสาหร่ายอยู่ที่ 0.43 เมตร/วินาที

จากการรวบรวมผลงานวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมา ข้อมูลส่วนใหญ่ระบุอย่างชัดเจนว่าจุลสาหร่ายสามารถช่วยควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ดี โดยกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการนำสารประกอบไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของจุลสาหร่ายเพื่อใช้ในการเติบโตเพิ่มจำนวน ส่วนการจะกำจัดไนโตรเจนอย่างถาวรนั้นจำเป็นต้องแยกจุลสาหร่ายออกไปจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งการกรองโดยใช้ระบบกรองแบบแบ่งส่วนเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจและได้มีงานวิจัยที่ผ่านมาระบุว่าสามารถนำมาใช้แยกจุลสาหร่ายออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขนาดรูพรุนของตัวกรองที่นำมาใช้ในการทดลองนี้จะอยู่ในช่วงของไมโครฟิลเตรชัน แม้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่มักนิยมใช้อัลตราฟิลเตรชันในการแยกอนุภาคสารชีวภาพออกจากสารละลาย แต่ตัวกรองอัลตราฟิลเตรชันมักมีราคาสูงและเกิดการอุดตันได้ง่ายเนื่องจากรูพรุนของตัวกรองมีขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ไส้กรองในช่วงรูพรุนของไมโครฟิลเตรชันและใช้เครื่องกรองที่ดัดแปลงมาจากเครื่องกรองน้ำ

ทั่วไปในการแยกจุลสาหร่ายและอนุภาคสารแขวนลอยอื่นๆ ออกจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนสำหรับการติดตั้งเครื่องกรองและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกรอง รวมทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในระบบเพาะเลี้ยง ซึ่งในการทดลองจะทำการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองแบบแบ่งส่วนและศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบกรองนี้ไปใช้กับอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจริงต่อไป โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้สามารถนำไปปรับใช้กับเกษตรกรรมในท้องถิ่นของประเทศไทยได้อย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย