บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

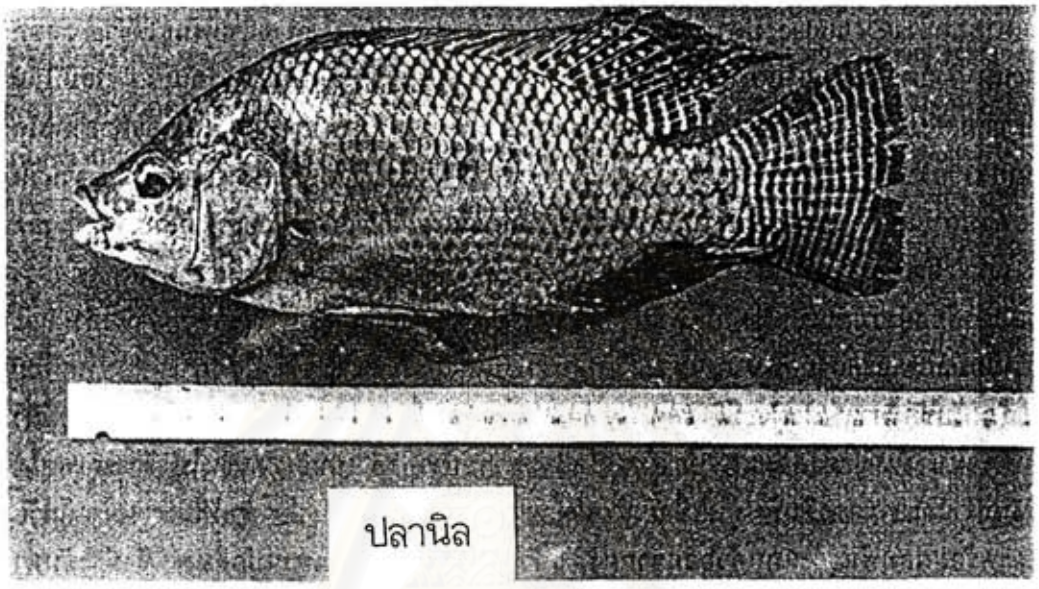
2.1 ปลานิล

2.1.1 ประวัติและลักษณะทั่วไปของปลานิล

ปลานิลมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Tilapia nilotica* จัดอยู่ในวงศ์ Cichlidae และมีชื่อเรียกทั่วไปว่า nile ปลานิลมีความแข็งแรงทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เลี้ยงง่าย เจริญเติบโตเร็วและสามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้เองในธรรมชาติ เป็นพันธุ์ปลาที่นิยมใช้เป็นตัวแทนของปลาทดลองในงานค้นคว้าวิจัยทางประมง และถูกเลือกเป็นพันธุ์ปลาที่ใช้ในการส่งเสริมการประมงในประเทศที่กำลังพัฒนา เพื่อเป็นแหล่งผลิตอาหารโปรตีนที่มีต้นทุนต่ำคุณภาพสูง

ปลานิลถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2508 โดยสมเด็จพระจักรพรรดิ์อากิฮิโตแห่งประเทศญี่ปุ่น เมื่อครั้งดำรงพระอิสริยยศมกุฎราชกุมาร ได้ทรงจัดส่งมาทูลเกล้าฯ ถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช จำนวน 50 ตัว ปลานิล (รูปที่ 2.1) มีลักษณะลำตัวสั้นแบน ริมฝีปากบนและริมฝีปากล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว มีลายพาดขวางลำตัว 9-10 แถบ ครีบหลังติดต่อกันเป็นครีบเดียวประกอบด้วยก้านครีบแข็ง 15-18 อัน และก้านครีบอ่อน 12-14 อัน ครีบก้นมีก้านครีบแข็ง 3 อัน และก้านครีบอ่อน 9-10 อัน บนแถบเส้นข้างลำตัวมีเกล็ด 33 เกล็ด ทางด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ครีบหางตัดตรง ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาลตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม ที่กระดูกแก้มมีจุดสีเข้มอยู่หนึ่งจุด บริเวณปลายอ่อนของครีบหลัง ครีบก้น และครีบหางมีจุดสีขาวและเส้นสีดำตัดขวางอยู่ทั่วไป ปลานิลตัวผู้และตัวเมียมีลักษณะคล้ายกันมาก แต่จะสังเกตความแตกต่างระหว่างเพศได้โดยการดูช่องเพศที่อยู่ใกล้ๆ กับช่องทวาร ตัวผู้จะมีติ่งเพศ (genital papilla) ยื่นยาวค่อนข้างแหลม มีช่องเปิดเพียงช่องเดียวอยู่ตรงปลายติ่งทำหน้าที่ขับถ่ายปัสสาวะและน้ำเชื้อ ส่วนปลานิลตัวเมียจะมีติ่งเพศยื่นออกมาเช่นกัน แต่สั้นและกลมมน จะเห็นได้ชัดในปลาที่มีขนาดความยาวตั้งแต่ 10 เซนติเมตรขึ้นไป บนติ่งเพศจะมีช่องเปิด 2 ช่อง ช่องแรกอยู่ตรงส่วนปลายทำหน้าที่เป็นช่องขับปัสสาวะ อีกช่องหนึ่งอยู่ถัดไปทางส่วนหน้า ตรงบริเวณกลางติ่งเพศซึ่งมีขนาดใหญ่และมีสีชมพูเรื่อๆ หรือสีเนื้อ ทำหน้าที่เป็นช่องปล่อยไข่ นอกจากนี้สีบนลำตัวและใต้คางของปลาตัวผู้จะเข้มกว่าปลาตัวเมีย โดยเฉพาะในระหว่างฤดูผสมพันธุ์ปลาตัวผู้ส่วนใหญ่บริเวณใต้คางมีสีคล้ำเป็นสีแดงอมม่วง และตัวเมียส่วนใหญ่ใต้คางมีสีเหลือง ปลานิลสามารถผสมพันธุ์วางไข่ได้ตลอดปี ใช้เวลา 2-3 เดือนต่อครั้ง และสามารถสืบพันธุ์ได้เมื่อมีอายุประมาณ 4 เดือนขึ้นไป

หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ปลานิล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 การเลี้ยงปลานิล

ในปัจจุบันมีการเลี้ยงปลานิลกันอย่างแพร่หลาย การเลี้ยงปลาแบ่งตามความหนาแน่นของปลาที่ปล่อยเลี้ยง ชนิดและปริมาณอาหารที่ใช้เลี้ยง และลักษณะของการดำเนินงานได้ 3 ประเภทคือ การเลี้ยงแบบธรรมดา (extensive) เป็นการเลี้ยงปลาโดยอาศัยอาหารธรรมชาติที่มีอยู่ในบ่อปลา ไม่มีการให้อาหารสมทบ ปล่อยให้เป็นไปตามธรรมชาติ ผลผลิตที่ได้ต่ำ ประเภทที่ 2 คือ การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (semi - intensive) เป็นการเลี้ยงปลาโดยให้กินอาหารที่มีอยู่ในบ่อเป็นส่วนใหญ่ อาจจะให้อาหารสมทบและใส่ปุ๋ยบ้างเป็นครั้งคราว ผลผลิตที่ได้รับสูงกว่าการเลี้ยงปลาแบบธรรมดา และประเภทที่ 3 คือ การเลี้ยงแบบพัฒนาหรือหนาแน่น (intensive) เป็นการเลี้ยงปลาที่ต้องการผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูง ดังนั้นจึงต้องเอาใจใส่ดูแลและนำวิธีการต่างๆ เข้าช่วยเพิ่มผลผลิต เช่น ให้อาหารที่มีคุณภาพสูง บำรุงรักษาและปรับปรุงบ่อปลาอย่างดี ใส่ปุ๋ย ใช้ยา และสารเคมีเพื่อกำจัดโรคและปรสิต มีการถ่ายเทน้ำตลอดเวลาและใช้เครื่องตีน้ำ เพื่อรักษาคุณภาพของน้ำให้ดีอยู่เสมอ

ระบบการเลี้ยงแบบสมัยใหม่จะต้องคำนึงถึงคุณภาพและปริมาณของผลผลิตในเชิงธุรกิจด้วย การที่จะพัฒนาผลผลิตของปลานิลให้มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอตามที่ต้องการได้ จำเป็นต้องมีการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นสูง มีการลงทุนและใช้เทคนิคขั้นสูงในการเลี้ยง และการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาอยู่เสมอ การเลี้ยงแบบพัฒนาหรือหนาแน่นสามารถเลี้ยงปลานิลได้ทั้งในบ่อดินโดยใช้ความหนาแน่นระหว่าง 5-12.5 ตัว/ตร.ม. และในบ่อคอนกรีตสามารถเลี้ยงในอัตรา 30-100 ตัว/ตร.ม. ในการเลี้ยงแบบนี้จะต้องมีการอนุบาลลูกปลาให้ได้ขนาดก่อนปล่อยลงเลี้ยงในบ่อ มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและให้อากาศในบ่อตลอดเวลา เพื่อป้องกันก้นบ่อเน่าเสียและเพิ่มผลผลิตต่อเนื้อที่บ่อ (มานพ, 2536)

2.2 คุณภาพน้ำและปัจจัยที่มีผลต่อการเลี้ยงปลานิล

2.2.1 พีเอช

ปลานิลสามารถอาศัยในน้ำที่มีพีเอชตั้งแต่ 7.2-8.3 และน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเกินกว่า 2 หน่วยในรอบวัน ส่วนในช่วงพีเอช 4-6 และ 9-11 ปลาจะเจริญเติบโตช้าและอ่อนแอ (มานพ, 2536)

พีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพกรดและสภาพด่างในน้ำ การเพิ่มสภาพด่างจะมีผลทำให้พีเอชสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มสภาพกรดจะทำให้พีเอชมีค่าลดลง พีเอชมีผลต่อการเกิดแพลงค์ตอนพืชน้ำ และการเกิดสารพิษต่างๆ ในน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แอมโมเนีย (NH_3) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ตลอดจนปริมาณของไนไตรท์ (NO_2^-) ในน้ำอีกด้วย

โดยทั่วไปสภาพด่าง สภาพกรด และพีเอชเป็นกลุ่มของพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ 2 ตัวในกลุ่มจะมีผลทำให้พารามิเตอร์ที่เหลือเปลี่ยนแปลงไปด้วยเสมอ ความ

สัมพันธ์ระหว่างสภาพกรด สภาพด่างและพีเอชอาจแสดงให้เห็นและนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้นด้วยรูปที่ 2.2 นั่นคือถ้ารู้ค่าของพารามิเตอร์ 2 ตัวในกลุ่ม ย่อมจะรู้ค่าของพารามิเตอร์ตัวที่ 3 ได้เสมอ ควรตระหนักว่าปริมาณสารละลายทั้งหมด (TDS) และอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์กลุ่มนี้ จึงต้องคำนึงถึงด้วยเสมอ

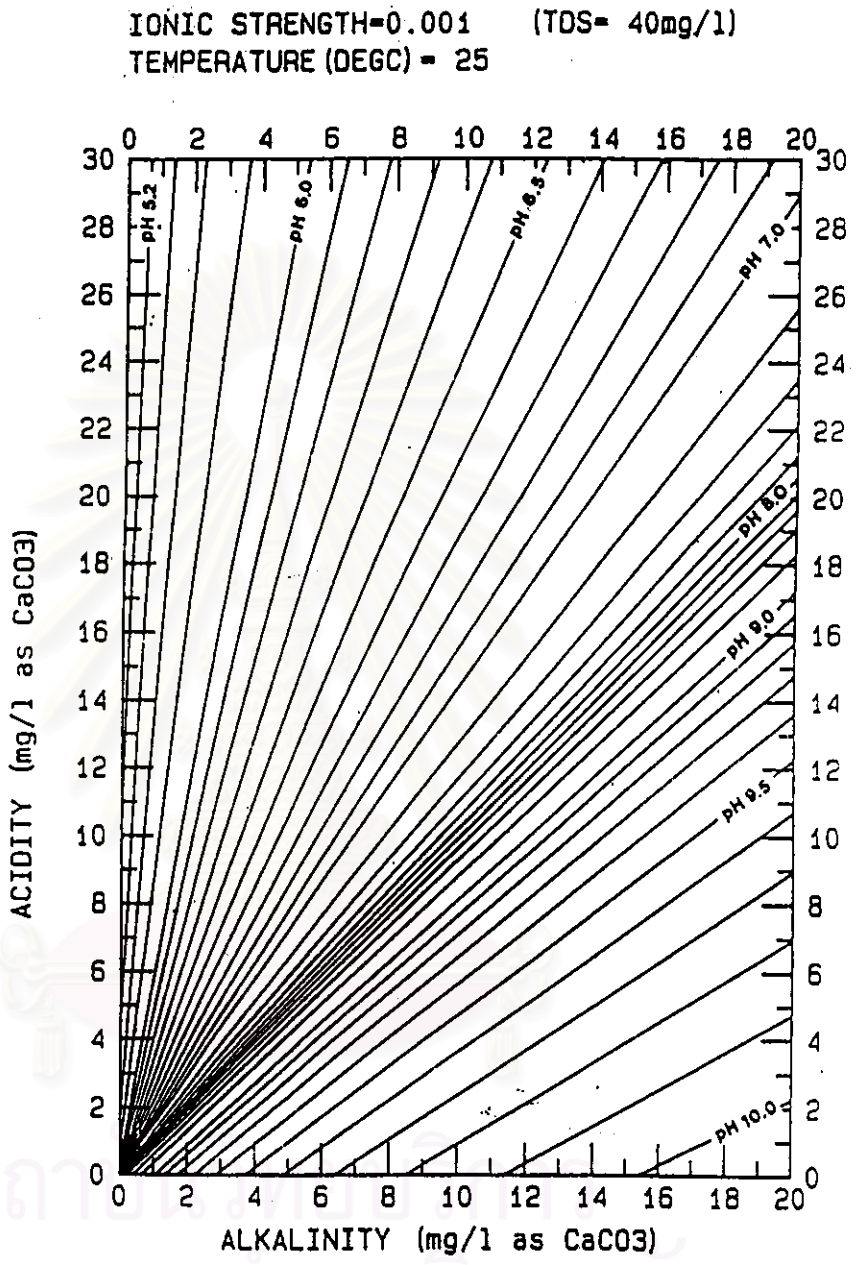
สารประกอบที่ทำให้เกิดสภาพด่างมี 3 ชนิดคือ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) น้ำที่มีสารประกอบตัวใดตัวหนึ่งใน 3 ชนิดดังกล่าวจะเป็นน้ำที่มีสภาพด่างอยู่ด้วย รูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างการกระจายตัวของ OH^-, CO_3^{2-} และ HCO_3^- ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในน้ำที่มีสภาพด่างทั้งหมด 100 มก./ล. (วัดในรูปของ $CaCO_3$) และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เนื่องจากพีเอช, OH^-, CO_3^{2-} และ HCO_3^- มีความสัมพันธ์กันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พีเอชจึงเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดชนิดของสารด่างที่อยู่ในน้ำ ยกตัวอย่างเช่น น้ำที่มีพีเอชสูงถึง 11 หรือมากกว่าจะมี OH^- และ CO_3^{2-} มากที่สุด พีเอชยิ่งสูงก็ยิ่งมี OH^- มาก น้ำที่มีพีเอชอยู่ในช่วงเป็นกลางจะมี HCO_3^- มากที่สุด ส่วนน้ำที่มีพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 9.5 - 10.5 จะมี CO_3^{2-} มากที่สุด

2.2.2 ออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen หรือ DO) มีความสำคัญมากเนื่องจากปลาต้องใช้ในการหายใจ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจึงมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของปลาในด้านต่างๆ ได้แก่ การเจริญเติบโต การตาย การเผาผลาญอาหารในร่างกาย การกินอาหาร ความต้านทานต่อโรค พฤติกรรมของปลา เป็นต้น อัตราการใช้ออกซิเจนของปลาแตกต่างกันตามชนิด ขนาด ระยะต่างๆ ในช่วงชีวิต พฤติกรรมของปลา เช่น การกินอาหาร การสืบพันธุ์ การเคลื่อนไหว เป็นต้น และสภาพแวดล้อมที่ปลาอาศัยอยู่ เช่น อุณหภูมิ ปลาจะใช้ออกซิเจนมากขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาผลาญอาหารในร่างกายของปลาสูงขึ้น ปลาจึงกินอาหารมากขึ้น โดยทั่วไปปลาขนาดเล็กใช้ออกซิเจนต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าปลาขนาดใหญ่ และปลาอ้วนมีอัตราการใช้ออกซิเจนสูงกว่าปลาผอม (Moss และ Scott, 1964) อัตราการใช้ออกซิเจนของปลาที่เคลื่อนที่สูงกว่าปลาที่อยู่นิ่ง เมื่อปลาเคลื่อนพี่เร็วขึ้นจะใช้ออกซิเจนมากขึ้น (Farmer และ Beamish, 1969) ปลาจะกินอาหารน้อยลงเมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้าเมื่ออาศัยอยู่ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ การใช้ออกซิเจนของปลาหลังจากกินอาหารมีอัตราสูงกว่าเมื่อปลายังไม่ได้กินอาหารเนื่องจากปลาต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อกระบวนการย่อยอาหาร

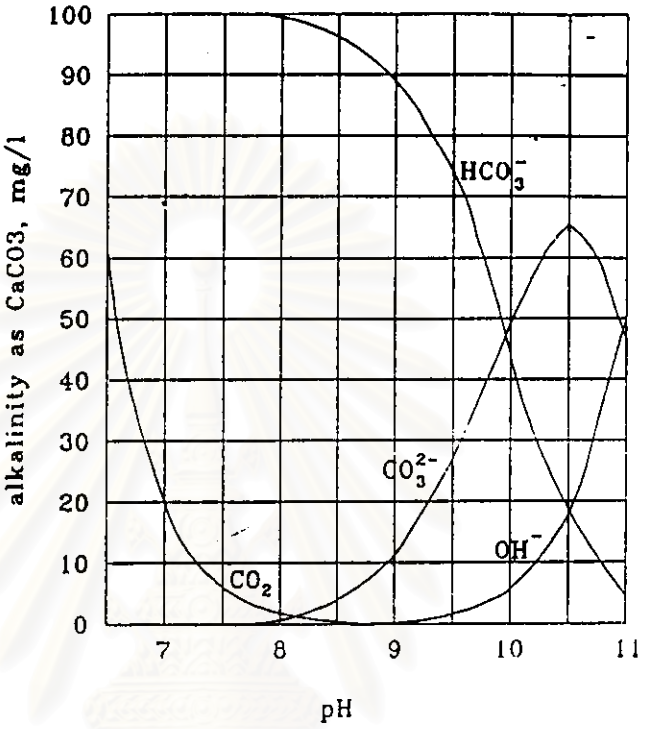
น้ำในบ่อปลาส่วนใหญ่ได้รับออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชในน้ำ และจากการแพร่จากบรรยากาศลงสู่น้ำ ส่วนสาเหตุที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ได้แก่ การหายใจของสัตว์น้ำและพืชน้ำ และการย่อยสลายอินทรีย์สารต่างๆ ในน้ำโดยพวกแบคทีเรียในบ่อ

ปัญหาการขาดออกซิเจนละลายน้ำ มักจะเกิดในบ่อที่มีสารอินทรีย์สะสมอยู่ในปริมาณมาก สารอินทรีย์เหล่านี้อาจมาจาก เศษเหลือของอาหาร ของเสียจากการขับถ่ายของปลา และแพลงค์ตอนพืชที่ตายลง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพกรด สภาพด่าง และพีเอช (มั่นสิน, 2538)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 ปริมาณของ CO_2, HCO_3^- และ CO_3^{2-} ที่ระดับพีเอชต่างๆ (มั่นสิน, 2538)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งเมื่อเน่าสลายก็จะดึงออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำไปใช้ จุดวิกฤตในการเกิดปัญหาการขาดออกซิเจนจะเป็นในช่วงเช้ามืดที่ยังไม่มีการสังเคราะห์แสง ปลามักจะลอยหัวขึ้นมาที่ผิวน้ำและตายในช่วงนี้

ปริมาณออกซิเจนในน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก./ล. จนถึงจุดอิ่มตัว ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำอยู่เป็นระยะเวลานานจะทำให้อัตราการเจริญเติบโตไม่ดีและส่วนมากถ้าต่ำกว่า 1 มก./ล. ปลาจะตายภายในไม่กี่ชั่วโมง ปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำได้ดีตั้งแต่ 0-0.4 มก./ล. ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 0.3 มก./ล. ปลาจะลอยหัวขึ้นมาใช้ออกซิเจนจากผิวน้ำและอากาศ สภาพดังกล่าวจะทำให้ปลาเกิดอาการเครียดและลดการเจริญเติบโต ดังนั้นบริเวณผิวน้ำปริมาณออกซิเจนไม่ควรต่ำกว่า 0.3 มก./ล. (มานพ, 2536)

2.2.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำจะมีผลต่อกระบวนการต่างๆ ภายในร่างกายของปลาเป็นอย่างมาก เช่น การย่อยอาหาร การเคลื่อนไหว การกินอาหาร การหายใจ การสืบพันธุ์และการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังมีผลต่อปฏิกิริยาย่อยสลายอินทรีย์สารของแบคทีเรียในน้ำ ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีผลโดยตรงทำให้ผลผลิตของปลาสูงขึ้น โดยปกติปลาในเขตร้อนจะอาศัยอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิระหว่าง 25-32 องศาเซลเซียส แต่ปลาไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ ดังนั้นจึงไม่ควรนำปลาจากที่หนึ่งไปปล่อยยังอีกแห่งหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะเมื่อนำปลาจากน้ำที่อุณหภูมิต่ำไปปล่อยในน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า โดยปกติการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำต้องกระทำอย่างช้าๆ และไม่ควรเกิน 3 องศาเซลเซียส ในเวลาสั้นๆ

ปลานิลทนต่ออุณหภูมิได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 10.0-42.0 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 42 องศาเซลเซียส ปลาจะอยู่ได้ไม่นานและตายได้ ปลานิลจะไม่กินอาหารและไม่เจริญเติบโตเมื่ออุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส และจะไม่วางไข่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมในการวางไข่อยู่ระหว่าง 26-29 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 19-28 องศาเซลเซียส (มานพ, 2536)

2.2.4 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนนั้นจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เพราะเป็นส่วนประกอบของโปรตีนของชีวเคมีอื่นๆ ไนโตรเจนจะถูกพืชใช้ไปในรูปของไนเตรต (NO_3^-) สัตว์นั้นได้ไนโตรเจนโดยการกินพืชหรือสัตว์อีกต่อหนึ่ง กากเหลือพวกไนโตรเจนที่สัตว์ขับถ่ายออกมานั้น จะอยู่ในรูปของ แอมโมเนีย ครีเอทีน (Createne) ครีเอตินิน (Creatinine) ยูเรีย กรดอะมิโน และกรดยูริค สารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้จะค่อยๆ ถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรต์และไนเตรตโดยแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งคือ Nitrosomonas ซึ่งเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ และ Nitrobacter ที่เปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต และยังมีแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งที่เปลี่ยนไนเตรตให้กลายไปเป็น

ก๊าซไนโตรเจน แบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ Pseudomonas Achromobacter, Bacillus, Micrococcus และ Corynebacterium (Meade, 1976)

$$NH_3 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} NO_2^- \xrightarrow{\text{Nitrobacter}} NO_3^-$$

แอมโมเนียในน้ำมีอยู่ 2 รูปคือ แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และอิออนแอมโมเนีย (NH_4^+) โดยมีสมดุลเคมีดังนี้

$$NH_4^+ + H_2O \longrightarrow NH_3 + H_3O^+$$

หรือ

$$NH_4^+ \longrightarrow NH_3 + H^+$$

แอมโมเนียอิสระเป็นพิษอย่างมากต่อปลา แต่อิออนแอมโมเนียไม่มีพิษ สัดส่วนของแอมโมเนียอิสระและอิออนแอมโมเนียในน้ำขึ้นอยู่กับ พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณเกลือแร่ ปริมาณของแอมโมเนียอิสระจะเพิ่มตามระดับพีเอชและอุณหภูมิที่สูงขึ้น พีเอชมีอิทธิพลต่อเคมีของแอมโมเนียในน้ำมากกว่าอุณหภูมิ ปริมาณเกลือแร่ในน้ำมีอิทธิพลน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิ แต่มีอิทธิพลในทางตรงกันข้าม คือถ้ามีปริมาณเกลือแร่สูงขึ้นในน้ำจะมีแอมโมเนียน้อยลง (ตารางที่ 2.1)

แอมโมเนียเป็นพิษต่อปลาในทางอ้อม เนื่องจากทำให้ปลาไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือดได้ ถ้ามีปริมาณแอมโมเนียอิสระในน้ำสูงเกินไป และพบว่าในขณะที่ระดับแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้น ปลาขับถ่ายแอมโมเนียได้น้อยลง ระดับแอมโมเนียในเลือดและในเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้พีเอชของเลือดมีค่าสูงขึ้น และเป็นผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ทำให้มีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น ทำอันตรายต่อหนังและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน ปลาที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่มีแอมโมเนียสูงถึงระดับ Sublethal มักอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย ค่า LC_{50} ของแอมโมเนียอิสระสูงประมาณ 0.5 มก./ล. แต่ความเข้มข้นเพียงประมาณ 0.025 มก./ล. ก็ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลาแล้ว ถ้าจำกัดปริมาณของแอมโมเนียอิสระไม่ให้เกิน 0.025 มก./ล. ปริมาณของแอมโมเนียทั้งหมด ($NH_3 + NH_4^+$) ในน้ำที่ระดับพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ จะต้องมีค่าไม่เกินตัวเลขที่แสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.4 แสดงถึงสภาพต่างของน้ำที่มีผลกระทบต่อความเป็นพิษของแอมโมเนีย คือบ่อปลาที่มีสภาพด่างในน้ำสูงย่อมปลอดภัยจากพิษของแอมโมเนียได้ดีกว่าบ่อปลาที่มีสภาพด่างต่ำกว่า (มั่นสิน, 2538)

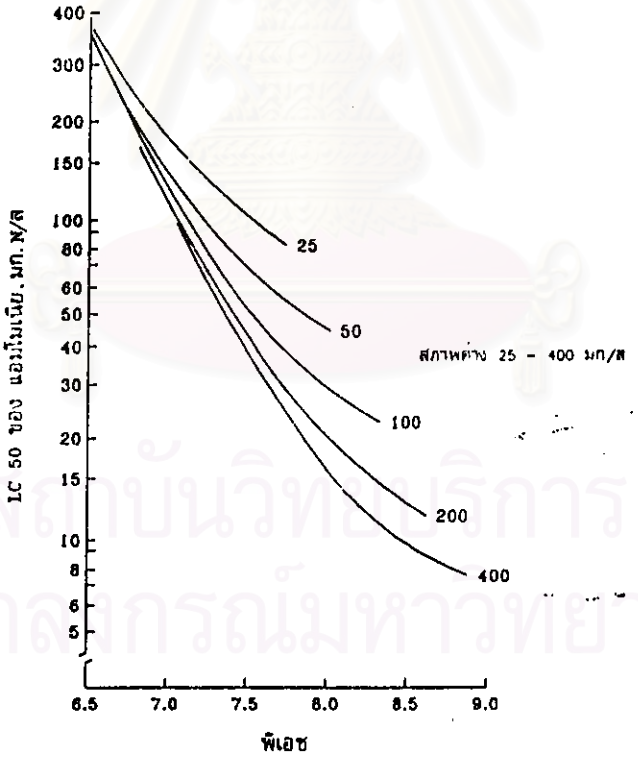
ไนไตรท์ไนโตรเจนเป็นพิษต่อปลามาก เนื่องจากไนไตรท์ไปออกซิไดซ์เหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดปลาได้เมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งไม่สามารถขนถ่าย

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของแอมโมเนียอิสระในน้ำจืด (FW) และน้ำทะเล (SW) ที่ระดับพีเอช และอุณหภูมิต่างๆ (มั่นสิน, 2538)

pH	10 °C		15 °C		20 °C		25 °C	
	Fw	SW	Fw	SW	Fw	SW	Fw	SW
7.0	0.19		0.27		0.40		0.55	
7.1	0.23		0.34		0.50		0.70	
7.2	0.29		0.43		0.63		0.88	
7.3	0.37		0.54		0.79		1.10	
7.4	0.47		0.68		0.99		1.38	
7.5	0.59	0.459	0.85	0.665	1.24	0.963	1.73	1.39
7.6	0.74	0.577	1.07	0.836	1.56	1.21	2.17	1.75
7.7	0.92	0.726	1.35	1.05	1.96	1.52	2.72	2.19
7.8	1.16	0.912	1.69	1.32	2.45	1.90	3.39	2.74
7.9	1.46	1.15	2.12	1.66	3.06	2.39	4.24	3.43
8.0	1.83	1.44	2.65	2.07	3.83	2.98	5.28	4.28
8.1	2.29	1.80	3.32	2.60	4.77	3.73	6.55	5.32
8.2	2.86	2.26	4.14	3.25	5.94	4.65	8.11	6.61
8.3	3.58	2.83	5.16	4.06	7.36	5.78	10.00	8.18
8.4	4.46	3.54	6.44	5.05	9.09	7.17	12.27	10.10
8.5	5.55	4.44	7.98	6.28	11.18	8.87	14.97	12.40

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด ($NH_3 + NH_4^+$) ที่ยอมให้มีได้ในน้ำ โดยไม่เป็นอันตรายหรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา (NH_3 ไม่เกิน 0.025 มก./ล.) (มั่นสิน, 2538)

อุณหภูมิ (°ซ)	pH = 7	pH = 7.5	pH = 8	pH = 8.5	pH = 9	pH = 9.5
5	19.6	6.3	2	0.65	0.22	0.088
10	12.4	5.9	1.37	0.45	0.16	0.068
15	9.4	4.3	0.93	0.31	0.12	0.054
20	6.3	2	0.65	0.22	0.088	0.045
25	4.4	1.43	0.47	0.17	0.069	0.039
30	3.1	1	0.33	0.12	0.056	0.035



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของพีเอชและสภาพด่างที่มีต่อ LC_{50} ของแอมโมเนีย เมื่อทดสอบกับปลาเทร้าท์ (มั่นสิน, 2538)

ออกซิเจนได้ ปลาที่ได้รับไนไตรต์จึงมีเมทฮีโมโกลบินในเลือดและเห็นเป็นสีน้ำตาล (Brown blood disease) ปลาที่มีอาการเช่นนี้ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้เนื่องจากขาดออกซิเจน การสะสมตัวของไนไตรต์เชื่อว่าเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ความเป็นพิษของไนไตรต์นั้นได้มีการศึกษา และพบว่าที่ความเข้มข้น 0.5 มก./ล. เป็นอันตรายต่อปลาในเขตหนาว และเมื่อทดสอบความเป็นพิษของไนไตรต์ต่อ Channel Catfish ได้ผลว่า LC_{50} (96 ชม.) มีค่าสูงถึง และ 13.0 มก./ล. ดังนั้นค่าของไนไตรต์ไนโตรเจนในน้ำไม่ควรมีค่าเกิน 0.5 มก./ล. (Boyd, 1984)

ส่วนไนเตรตไนโตรเจนไม่มีพิษต่อปลาที่ความเข้มข้นต่ำๆ และมีการศึกษาค่าของไนเตรตที่มีผลต่อปลา Channel Catfisf ได้ในความเข้มข้นที่สูงถึง 400 มก./ล. (Boyd, 1984)

2.2.5 ความเค็ม

ความเค็มคือปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำมีหน่วยวัดเป็นส่วนในพันส่วน (Part per thousand) หรือย่อว่า พีพีที (ppt) ความเค็มของน้ำทะเลเฉลี่ยจะอยู่ประมาณ 34 พีพีที ในเขตน้ำกร่อยชายฝั่งความเค็มจะเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างตั้งแต่เกือบศูนย์จนมากกว่า 30 พีพีที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำจืดที่ไหลลงมาจากแม่น้ำลำคลองสายต่างๆ ปลาแต่ละชนิดจะมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค็มต่างกัน

Kirk (1972) รายงานว่าพบปลานิลอาศัยอยู่ในทะเลสาบเกรทบิตเทอร์ ในประเทศอียิปต์ ซึ่งมีความเค็ม 13.5-22.4 พีพีที

จากการทดลองของ Payne และ Collinson (1983) พบว่าลูกปลานิลซึ่งเป็นปลาลูกผสม (*O.niloticus X O.aureus*) สามารถอยู่ได้ในระดับความเค็ม 6 พีพีที แต่หากระดับความเค็มเปลี่ยนไปเป็น 16 พีพีที ก็จะมีอัตรารอดต่ำ และจากการศึกษาผลของระดับความเค็มต่อการกินอาหาร พบว่าระดับความเค็ม 10 พีพีที อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลจะดีกว่าระดับความเค็ม 1 พีพีที เนื่องจากระดับความเค็มที่เหมาะสมทำให้มีการกินอาหารได้เพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อกลับต่ำลง เมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้น ฉะนั้นในการเลี้ยงปลานิลในระดับความเค็มที่แตกต่างกัน จำเป็นต้องศึกษาปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ช่วงแสง อัตราการปล่อย ฯลฯ

2.2.6 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในบ่อที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ สารแขวนลอยต่างๆ ตามพื้นหรือก้นบ่อ เมื่อมีการสะสมมากขึ้นจะเกิดสภาพแอนแอโรบิค แบคทีเรียที่เป็นพวกแอนแอโรบิคจะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ โดยดึงเอาออกซิเจนจากสารประกอบพวกซัลเฟตไปใช้ ทำให้เกิดซัลไฟด์ (S^{2-}) ดังนี้

$$SO_4^{2-} + \text{อินทรีย์สาร} \xrightarrow[\text{ไม่มีออกซิเจน}]{\text{แบคทีเรีย}} S^{2-} + H_2O + CO_2$$

ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีบทบาทเกี่ยวข้องอยู่กับสมดุลเคมีของไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งอยู่ในน้ำดังนี้

$$H_2S \longrightarrow HS^- + H^+$$

$$HS^- \longrightarrow S^{2-} + H^+$$

น้ำในบ่ออาจพบสารซัลไฟด์รูปต่างๆ โดยจะมีระดับพีเอชเป็นตัวกำหนดชนิด และความเข้มข้น (รูปที่ 2.5) น้ำที่มีพีเอชต่ำจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งมีกลิ่นเหม็นมากที่สุด ส่วนน้ำที่มีพีเอชเป็นกลางจะพบอิออนซัลไฟด์ (HS^-,S^{2-}) ซึ่งไม่มีกลิ่นเหม็น และไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่านั้นที่เป็นพิษต่อปลา ทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตและอัตรารอดลดลง ในบ่อเลี้ยงปลาไม่ควรมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิน 0.002 มก./ล. ตามพื้นก้นบ่อปลามักเกิดการขาดออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ง่าย ดังนั้นปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีมากตามก้นบ่อปลา เนื่องจากอาหารที่เหลือและของเสียที่ปลาขับถ่ายออกมาตกลงสู่พื้นก้นบ่อ (ศักดิ์ชัย, 2536)

2.2.7 คาร์บอนไดออกไซด์

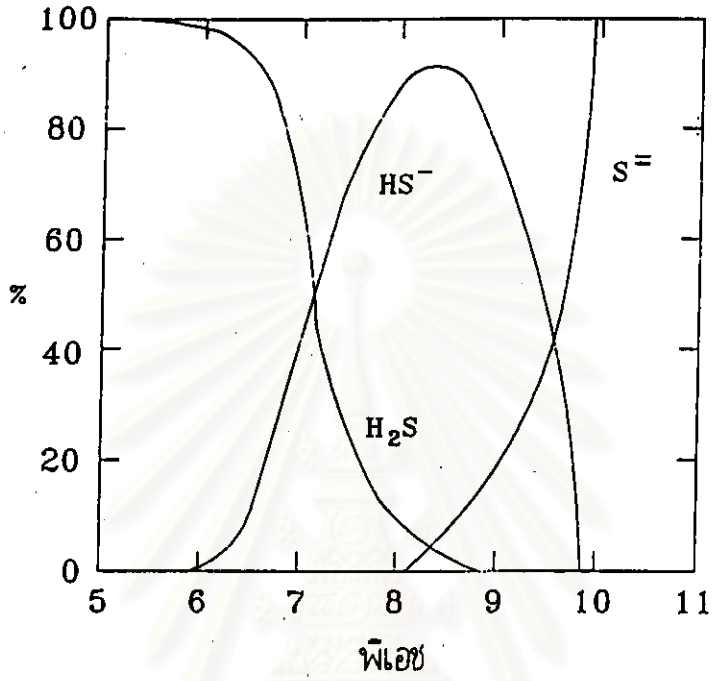
น้ำในบ่อปลาได้รับคาร์บอนไดออกไซด์จากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศละลายปนกับน้ำ จากกระบวนการหายใจของพืชและสัตว์ที่อยู่ในน้ำ และจากการย่อยสลายของอินทรีย์สาร น้ำในบ่อปลาสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ไปกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช การระเหยของคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำขึ้นสู่อากาศ และการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

ในน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของปลาลดลง ปลาส่วนใหญ่สามารถรู้สึกต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้ดี จึงหลีกหนีไม่อาศัยอยู่ในน้ำบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง โดยปกติปลาจะหลีกเลี่ยงไม่อยู่ในน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินกว่า 5 มก./ล. แต่ปลาสามารถทนอยู่ได้ในน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 60 มก./ล. หากมีปริมาณของออกซิเจนละลายในน้ำเพียงพอหรือมากกว่า 3 มก./ล. (มานพ, 2536; มั่นสิน 2538)

2.2.8 แพลงค์ตอน

แพลงค์ตอน (Plankton) หมายถึงสิ่งที่มีชีวิตเล็กๆ ในน้ำซึ่งเป็นแหล่งอาหารของปลา ในน้ำมีทั้งแพลงค์ตอนพืช (Phytoplankton) และแพลงค์ตอนสัตว์ (Zooplankton)

แพลงค์ตอนพืชเป็นพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่มีสีเขียวของคลอโรฟิลล์ เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) สาหร่ายสีเขียว (Green algae) หรือสาหร่ายสีต่างๆ อีกมากมายเช่น สาหร่ายสีน้ำตาล (Brown algae) สาหร่ายสีแดง (Red algae) หรือพวก Euglenoids (Euglena) รวมทั้งพวกไดอะตอม



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของสารประกอบซัลเฟอร์ต่างชนิด ที่ระดับพีเอชต่างๆ (มั่นสิน, 2538)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(Diatoms) ต่างๆ ซึ่งพวกแพลงค์ตอนพืชเหล่านี้จะเป็นอาหารของแพลงค์ตอนสัตว์ต่อไป ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนพืชคือ ฤดูกาล หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายในน้ำที่อยู่อาศัยนั้น การขาดแสงสว่างในการสังเคราะห์แสงจะทำให้พวกแพลงค์ตอนมีจำนวนลดน้อยลง ส่วนการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอนพืช (water bloom) จะสังเกตุได้จากสีของน้ำ เช่น มีสีเขียว สีน้ำตาล สีเหลืองเขียว สีเหลืองน้ำตาล สีแดงน้ำตาล และสีน้ำเงินเขียว ซึ่งเป็นสีของแพลงค์ตอนชนิดต่างๆ

แพลงค์ตอนสัตว์ ได้แก่ สิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่เป็นสัตว์ ไม่มีสีเขียวของคลอโรฟิลล์และกินแพลงค์ตอนพืชเป็นอาหาร สิ่งมีชีวิตพวกนี้ได้แก่ โปรโตซัว (Protozoa) ซึ่งเป็นสัตว์เซลเดียว ขนาดเล็ก และโรติเฟอร์ (Rotifers) ซึ่งเป็นสัตว์ขนาดเล็กประมาณ 1/50 - 2 มิลลิเมตร มีชีวิตอยู่ได้ไม่เกิน 2-3 สัปดาห์ และจะเกิดใหม่ทดแทน เป็นอาหารของลูกปลาและปลาเล็ก (วิทย์, 2525)

ปริมาณของแพลงค์ตอนมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของน้ำอย่างมาก โดยเฉพาะแพลงค์ตอนพืชจะดึงแอมโมเนียจากน้ำไปใช้ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำลดลง เมื่อมีการสังเคราะห์แสงแพลงค์ตอนพืชจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำและปล่อยก๊าซออกซิเจนให้แก่น้ำ แต่ถ้ามีปริมาณแพลงค์ตอนมากเกินไป อัตราการสังเคราะห์แสงและการหายใจที่สูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และค่าพีเอชในช่วงกว้างซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อปลาได้ และเมื่อแพลงค์ตอนพืชที่มีเป็นจำนวนมากตายลงจะเน่าสลาย ทำให้เกิดปัญหาการขาดออกซิเจนและปล่อยแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ซึ่งจะเป็นอันตรายแก่ปลาในบ่อ (มานพ, 2536)

2.3 การหมุนเวียนของแร่ธาตุในบ่อปลา

สัตว์น้ำและพืชน้ำทุกชนิดต้องการแร่ธาตุเพื่อใช้ในการดำรงชีวิต และใช้เป็นสารอาหารในการเจริญเติบโต แร่ธาตุที่สำคัญได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม ความต้องการแร่ธาตุเหล่านี้มีขีดจำกัด ซึ่งการผันแปรของปริมาณแร่ธาตุในน้ำทั้งในทางที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าขีดความต้องการย่อมมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของพืชน้ำและสัตว์น้ำ

2.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบส่วนน้อยของอากาศคือประมาณ 0.033 % ก๊าซชนิดนี้ละลายน้ำได้ดี และมีความเข้มข้นในน้ำแปรผกผันกับระดับอุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

คาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อปลาส่วนใหญ่ถูกใช้โดยแพลงค์ตอนพืชในการสังเคราะห์แสง ในขณะเดียวกันบ่อปลาก็ได้คาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจของพืชและสัตว์ที่อยู่ในน้ำ และจากการย่อยสลายของ

อินทรีย์สารโดยแบคทีเรีย คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการย่อยสลายของอินทรีย์สารโดยแบคทีเรียนี้ จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์สาร จำนวนแบคทีเรียและอุณหภูมิ ความแตกต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกใช้เพื่อการสังเคราะห์แสงกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการหายใจและการย่อยสลาย ควรจะเป็นค่าของคาร์บอนไดออกไซด์ที่พบในน้ำ

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (มั่นสิน, 2538)

อุณหภูมิ (°ซ)	คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ (มก./ล.)
0	1.10
5	0.91
10	0.76
15	0.65
20	0.56
25	0.48
30	0.42

* ที่ความดัน 3.3×10^{-5} atm CO_2

ในตอนกลางวันปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อสังเคราะห์แสงมักจะมีปริมาณสูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการหายใจของสิ่งที่มีชีวิตในน้ำ จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อลดลง และโดยเหตุนี้ในบ่อซึ่งมีแพลงค์ตอนพืชมากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อาจถูกใช้หมดไปตั้งแต่เช้า ครั้นถึงเวลากลางคืนไม่มีการสังเคราะห์แสงแต่การหายใจยังคงมีต่อไป ประกอบกับคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศละลายน้ำได้ดีขึ้นเพราะอากาศเย็นลงจึงทำให้พบคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำอีก และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งรุ่งเช้าของวันใหม่ จากนั้นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะค่อยๆ ลดน้อยลงจนกระทั่งหมดไปในตอนสายหรือบ่าย เนื่องจากถูกแพลงค์ตอนพืชนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสง การผันแปร

ของคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบวันที่เกิดขึ้นเป็นประจำในบ่อปลาอย่างที่กล่าวมาแล้วนั้น (รูปที่ 2.6) จะเกิดขึ้นในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชหนาแน่นรุนแรงมากกว่าในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชเพียงเล็กน้อย

นอกจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อปลาจะผันแปรตามเหตุผลดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น คาร์บอนไดออกไซด์ยังทำปฏิกิริยากับน้ำและแร่ธาตุที่ละลายเจือปนอยู่ในน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO^-_3) และคาร์บอเนตไอออน (CO^{2-}_3) ทั้งคาร์บอนไดออกไซด์ กรดคาร์บอนิก ไบคาร์บอเนตไอออน และคาร์บอเนตไอออน มีความสำคัญต่อระบบนิเวศวิทยาของน้ำในบ่อปลาเป็นอย่างยิ่ง

เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจะเกิดกรดคาร์บอนิกดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

คาร์บอนไดออกไซด์ที่รวมตัวกับน้ำอยู่ในรูปกรดคาร์บอนิก เมื่อสัมผัสกับหินหรือดินที่ประกอบด้วยหินปูนจะทำปฏิกิริยาเคมีกับด่างในหินและดินได้เป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตซึ่งละลายน้ำได้ง่าย ทำให้เกิดไบคาร์บอเนตได้ดังนี้

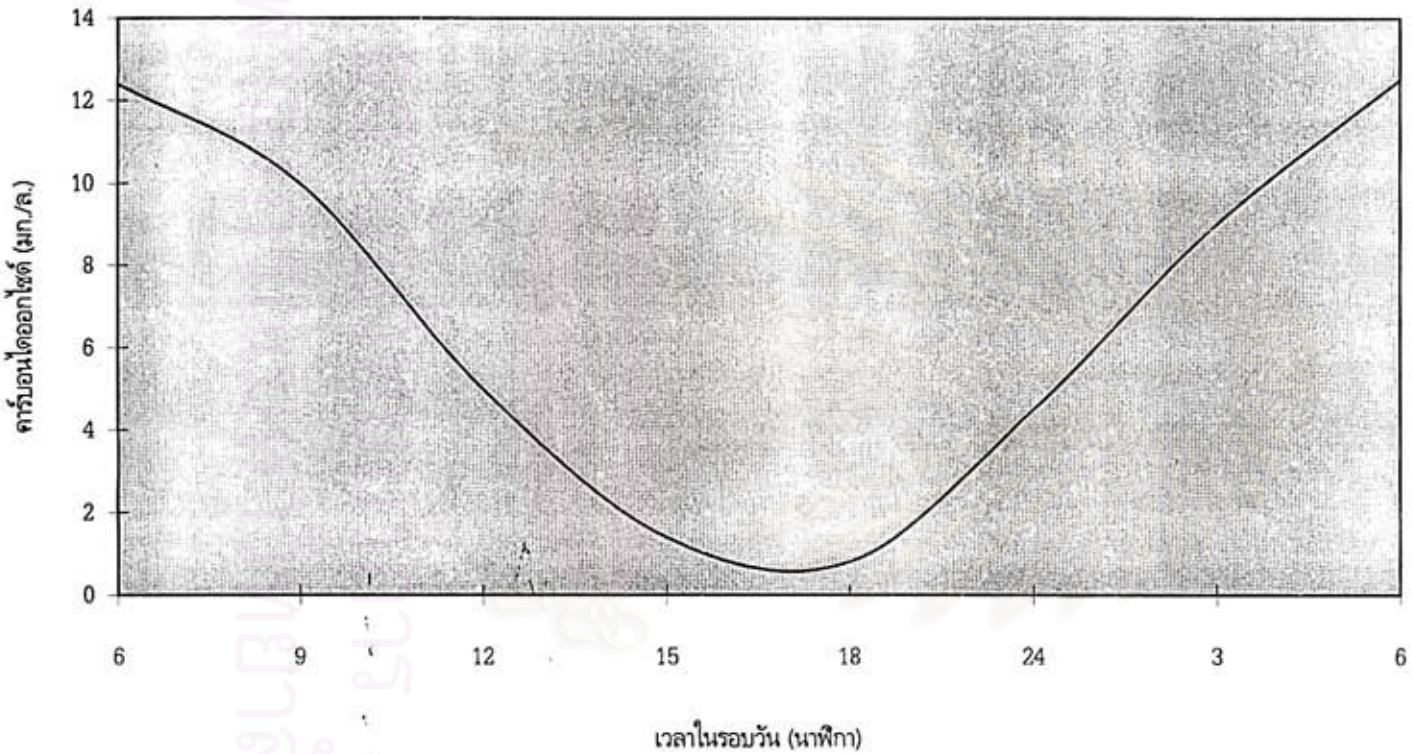
$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO^-_3$$

ปฏิกิริยาดังกล่าวจะอยู่ในสมดุลเสมอ ถ้ามี CO_2 เพิ่มขึ้น หินปูนหรือ $CaCO_3$ จะถูกละลายเพิ่มขึ้น แต่ถ้า CO_2 ลดลง ก็จะมีการตกผลึกของ $CaCO_3$ เกิดขึ้น

ความสัมพันธ์ของ HCO^-_3, CO^{2-}_3, CO_2 และพีเอช (อาจเรียกว่าเป็นระบบคาร์บอเนต) ได้แสดงให้เห็นอยู่แล้วในรูปที่ 2.3 กิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในบ่อ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของระบบคาร์บอเนตเกิดขึ้นตลอดเวลา ยกตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงและการหายใจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 เกิดขึ้นอย่างเด่นชัดในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชชุกชุม และมีปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นมากความต้องการ CO_2 จะสูงมากจนกระทั่ง CO_2 หรือ H_2CO_3 ถูกใช้จนหมด และยังไม่พอเพียง จึงต้องใช้ CO_2 จากการสลายตัวของ HCO^-_3 ดังนี้

$$2HCO^-_3 \longrightarrow CO_2 + CO^{2-}_3 + H_2O$$

น้ำในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชชุกชุม จึงมี CO^{2-}_3 สูง และมีพีเอชสูงกว่า 8.3 ถ้าหากว่า HCO^-_3 ยังไม่สามารถให้ CO_2 กับปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงได้เพียงพอ แพลงค์ตอนจะดึง CO_2 จาก CO^{2-}_3 จากปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 การผันแปรในรอบวันของคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อปลา (เวียง, 2525)

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$CO_3^{2-} + H_2O \longrightarrow CO_2 + 2OH^-$$

พีเอชของน้ำจะเพิ่มขึ้นไปอีกจนสูงกว่า 9 หรือ 10 แพลงค์ตอนจะดึง CO_2 ออกจากน้ำได้มากจนกระทั่งพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 10 - 11 ซึ่งเป็นระดับที่แพลงค์ตอนไม่สามารถจะเจริญเติบโตได้

เนื่องจากในน้ำธรรมชาติมักมีแคลเซียมละลายอยู่ด้วย แพลงค์ตอนพืชสามารถเพิ่มปริมาณของ CO_3^{2-} จนกระทั่งเกิดการตกผลึกของ $CaCO_3$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3$$

การตกผลึกมักเกิดขึ้นก่อนที่พีเอชของน้ำจะเพิ่มสูงถึง 10 ด้วยเหตุนี้ถ้าน้ำมีแคลเซียมมากในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชชุกชุมจึงมีพีเอชไม่เกิน 9-10 ในทางตรงกันข้ามบ่อที่มีแคลเซียมในน้ำน้อยก็อาจมีปัญหาพีเอชสูงกว่า 10 -11 ก็ได้

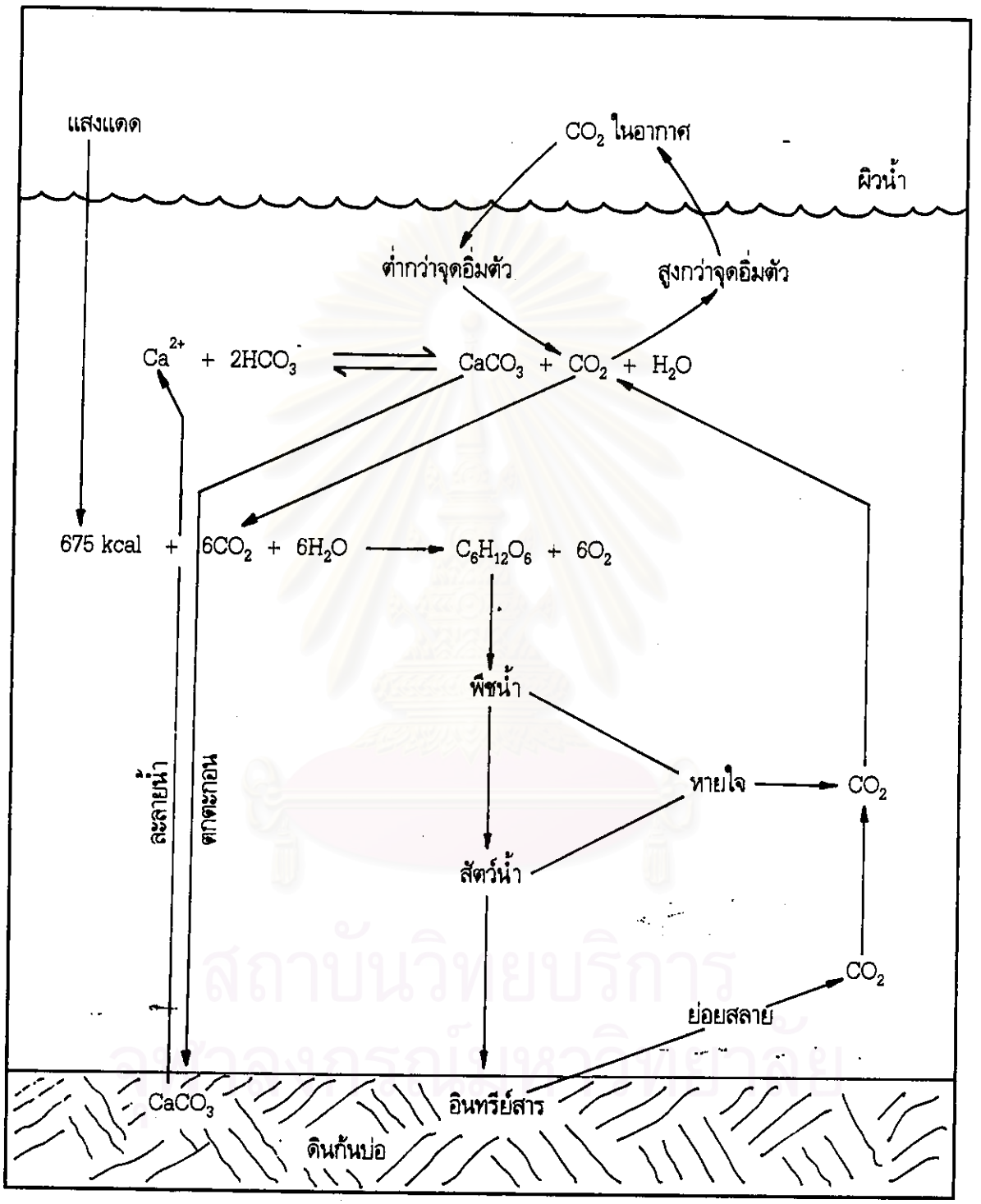
ปริมาณแคลเซียมไบคาร์บอเนตในน้ำ จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในหินหรือดินที่น้ำไหลผ่าน และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ แต่ส่วนมากหินหรือดินมักจะมีแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณมากพอ ฉะนั้นจึงถือว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวจำกัดปริมาณแคลเซียมไบคาร์บอเนตในน้ำ

การผันแปรของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อปลาในรอบวัน มีผลทำให้ปริมาณไบคาร์บอเนตไอออนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปจะพบไบคาร์บอเนตไอออนในปริมาณต่ำในตอนเที่ยงวัน หลังจากนั้นไบคาร์บอเนตไอออนจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งใกล้รุ่ง การผันแปรของปริมาณไบคาร์บอเนตไอออนจะเป็นไปอย่างรุนแรงในบ่อปลาที่มีแพลงค์ตอนพืชมาก

นอกจากไบคาร์บอเนตไอออนจะทำหน้าที่เป็นแหล่งสำรองคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุแคลเซียมสำหรับให้พืชได้ใช้เพื่อการสังเคราะห์และให้ความกระด้างแก่น้ำในบ่อปลาแล้ว ไบคาร์บอเนตไอออนยังเป็นสารกันกลาง ทำหน้าที่ควบคุมพีเอชของน้ำไม่ให้เปลี่ยนแปลงโดยกระทันหันอีกด้วย

รูปที่ 2.7 แสดงการหมุนเวียนของคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อปลาตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น คือ ธาตุคาร์บอนซึ่งพบในรูปสารประกอบง่ายๆ อย่างคาร์บอนไดออกไซด์และแคลเซียมไบคาร์บอเนต ถูกพืชเปลี่ยนเป็นอินทรีย์สารที่สลับซับซ้อนระหว่างการสังเคราะห์แสงโดยอาศัยพลังงานจากแสงแดด ที่จริงกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นเรื่องเข้าใจยากแต่เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น จึงนิยมใช้สมการเคมีอธิบายดังนี้

$$6CO_2 + 6H_2O + 675\ kcal \rightleftharpoons C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$



รูปที่ 2.7 การหมุนเวียนของคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อปลา (เวียง, 2525)

อินทรีย์สารที่พืชได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงบางส่วนจะถูกสัตว์น้ำใช้เป็นอาหารและถือว่าตอนนี้เป็นตอนที่ธาตุคาร์บอนเริ่มเกี่ยวข้องกับห่วงโซ่อาหารของปลาหรือสัตว์น้ำอื่นๆ ขณะเดียวกันบ่อปลาจะได้ธาตุคาร์บอนกลับคืนมาอีกจากการหายใจของสิ่งมีชีวิต และจากกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์สารโดยแบคทีเรีย ปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการหายใจหรือกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารต้องการออกซิเจนและเป็นปฏิกิริยาสวนทางกับกระบวนสังเคราะห์แสงนั่นเอง พลังงานซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยานี้จะถูกสัตว์นำไปใช้เพื่อการดำรงชีพ

2.3.2 ออกซิเจน

สิ่งมีชีวิตในน้ำทุกชนิดใช้ออกซิเจนเพื่อการหายใจ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทราบถึงแหล่งที่มาของออกซิเจนในน้ำ รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่ควบคุมปริมาณของออกซิเจนในน้ำเป็นอย่างดี

น้ำในบ่อปลาได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำและจากการที่ออกซิเจนในอากาศละลายปนกับน้ำ แต่ปริมาณออกซิเจนที่น้ำได้รับจากการสังเคราะห์แสงจะสูงกว่าปริมาณออกซิเจนที่น้ำได้รับจากอากาศ ดังนั้นปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง ย่อมมีผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นผลิตผลจากกระบวนการนี้ด้วยเช่นกัน ปัจจัยที่ควบคุมการสังเคราะห์แสง ได้แก่ อุณหภูมิ แสงแดด ธาตุอาหาร ชนิดของพืช ปริมาณพืช เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ควบคุมให้น้ำในบ่อปลารับออกซิเจนทั้งที่มาจากอากาศ และจากการสังเคราะห์แสงได้ในปริมาณที่จำกัดอีกด้วย

ปัจจัยที่จำกัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในบ่อปลา ได้แก่

1. อุณหภูมิ ที่ความดันของบรรยากาศเดียวกัน ออกซิเจนสามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้มากกว่าที่อุณหภูมิสูง (ตารางที่ 2.4)

2. ความดันอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน ออกซิเจนสามารถละลายในน้ำที่ความดันอากาศสูงได้มากกว่าที่ความดันอากาศต่ำ (ตารางที่ 2.5)

3. ความเค็ม ออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยลงถ้าความเค็มของน้ำเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายน้ำของออกซิเจนจะลดลงประมาณ 5% ต่อทุกๆ 5000 มก./ล. ของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความเค็มมีอิทธิพลน้อยมากต่อการละลายของออกซิเจนในน้ำจืด ปัจจัยนี้จึงมักไม่ต้องคำนึงถึงเมื่อมีการเลี้ยงปลาน้ำจืด (ตารางที่ 2.6)

พื้นที่ผิวน้ำ การถ่ายเทออกซิเจนระหว่างน้ำและอากาศเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยอาศัยหลักการ คือ ออกซิเจนในอากาศสัมผัสกับผิวน้ำและซึมละลายปนกับน้ำ ดังนั้นถ้าผิวหน้าน้ำมากออกซิเจนจากอากาศก็สามารถละลายปนในน้ำได้มากตามไปด้วย นอกจากนี้ลักษณะของผิวหน้าน้ำที่เป็นคลื่นเนื่องจากลมพัดจะช่วยเพิ่มเนื้อที่ผิวหน้าน้ำ ทำให้ออกซิเจนในอากาศมีโอกาสสัมผัสน้ำได้ดีขึ้น ฉะนั้นในเวลากลางคืนที่มีลมแรง น้ำ

ตารางที่ 2.4 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิลิตรปรอท (Boyd, 1981)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย (มก./ล.)
20	8.84
21	8.68
22	8.53
23	8.38
24	8.25
25	8.11
26	7.99
27	7.86
28	7.75
29	7.64
30	7.53
31	7.42
32	7.32
33	7.22
34	7.13
35	7.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายออกซิเจน (มิลลิกรัม/ลิตร)
ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสที่ความดันต่างกัน
(เวียง,2525)

ที่ระดับสูง (เมตร)	ความสามารถในการละลาย
0	8.4
500	7.9
1,000	7.4
1,500	7.0
2,000	6.6
2,500	6.2
3,000	5.8

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ ที่มีคลอไรด์ระดับต่าง ๆ และที่อุณหภูมิ 0-50 องศาเซลเซียส และความดันอากาศ 1 บรรยากาศ (มั่นสิน, 2538)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คลอไรด์, มก/ล				
	0	5000	10000	15000	20000
1	14.2	13.4	12.6	11.8	11.0
5	12.8	12.1	11.4	10.7	10.0
10	11.3	10.7	10.1	9.6	9.0
15	10.2	9.7	9.1	8.6	8.1
20	9.2	8.7	8.3	7.9	7.4
25	8.4	8.0	7.6	7.2	6.7
30	7.6	7.3	6.9	6.5	6.1
35	7.1				
40	6.6				
45	6.1				
50	5.6				

ในบ่อปลาจึงไม่ขาดแคลนออกซิเจน แต่ถ้าบ่อปลาค่อนข้างลึกลำพังลมไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นและกระแสน้ำแรงพอที่จะกระจายออกซิเจนได้ทั่วบ่อ ในกรณีนี้จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องเพิ่มออกซิเจนช่วย

น้ำที่มีออกซิเจนละลายเท่ากับปริมาณออกซิเจนที่สามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมินั้นๆ ได้ เช่นน้ำที่ 32 องศาเซลเซียส ควรมีออกซิเจนละลายในน้ำ 7.32 มิลลิกรัม/ลิตร และวัดออกซิเจนละลายในน้ำนี้ได้ 7.32 มิลลิกรัม/ลิตร เท่ากัน เรียกว่าน้ำนี้อิ่มตัว (saturated) ด้วยออกซิเจน น้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่น้อยกว่าเรียกว่าน้ำนั้นมีออกซิเจนยังไม่อิ่มตัว (undersaturated) ส่วนน้ำที่มีออกซิเจนละลายสูงกว่าออกซิเจนที่ควรพบในน้ำนั้น เรียกว่าน้ำนั้นมีออกซิเจนสูงกว่าจุดอิ่มตัว (supersaturated) และหากน้ำมีออกซิเจนละลายต่ำกว่าหรือสูงกว่าจุดอิ่มตัวแล้ว จะเกิดการถ่ายเทออกซิเจนระหว่างออกซิเจนในน้ำกับในอากาศ กล่าวคือ เมื่อน้ำมีออกซิเจนละลายต่ำกว่าจุดอิ่มตัว น้ำจะได้รับออกซิเจนจากอากาศ ในทางตรงกันข้ามเมื่อน้ำมีออกซิเจนละลายสูงกว่าจุดอิ่มตัวออกซิเจนในน้ำจะระเหยขึ้นสู่อากาศ

สาเหตุที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำของบ่อปลาลดลง ได้แก่

1. การหายใจ แพลงค์ตอนพืช และพืชน้ำสังเคราะห์แสงในเวลากลางวันทำให้น้ำได้รับออกซิเจน แต่แพลงค์ตอนพืช พืชน้ำ แพลงค์ตอนสัตว์ ปลา และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำ ใช้ออกซิเจนเพื่อการหายใจทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน (ตารางที่ 2.7) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในเวลากลางคืนจะลดลง เพราะไม่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้น น้ำในบ่อปลาได้รับออกซิเจนจากอากาศเท่านั้น แต่เนื่องจากการแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างอากาศกับน้ำมีขีดจำกัดดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่น้ำได้รับจากอากาศน้อยกว่าปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปเพื่อกระบวนการหายใจ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะเหลือลดน้อยลง จนบางครั้งอาจจะไม่เหลือเลย

2. การย่อยสลายอินทรีย์สาร แบคทีเรียใช้ออกซิเจนเพื่อการย่อยสลายอินทรีย์สารทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณของแบคทีเรียและอุณหภูมิ ถ้าหากอินทรีย์สารย่อยสลายได้ง่ายและมีปริมาณมาก อุณหภูมิสูง และมีแบคทีเรียจำนวนมาก การใช้ออกซิเจนเพื่อการย่อยสลายอินทรีย์สารก็จะมากตามไปด้วย

3. การย่อยสลายอนินทรีย์สารในบ่อปลา นอกจากจะมีแบคทีเรียที่ใช้อินทรีย์สารเป็นอาหาร (Saprophytic Bacteria) แล้ว ยังมีแบคทีเรียซึ่งใช้อนินทรีย์สารเป็นอาหาร (Autotrophic Bacteria) ผลที่เกิดขึ้นหลังจากแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อินทรีย์สารเป็นอาหารและใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลายอินทรีย์สารคือไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ต่อจากนั้น แบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อนินทรีย์สารเป็นอาหาร จะใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ให้เป็นไนไตรต์และไนเตรตต่อไป (สมการที่ 1 และ 2) ปัญหาการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลาจนถึงขั้นเป็นอันตรายต่อปลานั้น มักเกิดจากการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อนินทรีย์สารเป็นอาหารมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อินทรีย์สารเป็นอาหาร

$$2NH_3 + 3O_2 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} 2NO^-_2 + 2H^+ + 2H_2O \qquad (1)$$

$$2NO^-_2 + O_2 + 2H^+ \xrightarrow{\text{Nitrobacter}} 2NO^-_3 + 2H^+ \qquad (2)$$

ตารางที่ 2.7 การผลิตและใช้ออกซิเจนในบ่อปลา (มั่นสิน, 2538)

รายการ	ออกซิเจนที่ผลิตได้		ออกซิเจนที่ใช้ไป	
	ก./ตร.ม.-วัน	%	ก./ตร.ม.-วัน	%
การสังเคราะห์แสง	14.33	86.0		
ออกซิเจนที่ได้จากอากาศ	2.34	14.0		
รวม	16.67	100.0		
ปลาใช้หายใจ			3.67	22.0
การหายใจอื่นๆ ในน้ำ			12.0	72.0
การหายใจในดินก้นบ่อ			0.48	2.9
ออกซิเจนหนีจากน้ำ			0.52	3.1
รวม			16.67	100.0

4. กระบวนการทางเคมีของสารประกอบหรือแร่ธาตุต่างๆ ในบ่อปลาที่อินทรีย์สารมากเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากการได้รับอินทรีย์สารจากน้ำภายนอก หรือจากการที่แพลงค์ตอนพืช แพลงค์ตอนสัตว์ หรือพืชน้ำเกิดตายลงอย่างกระทันหันเป็นจำนวนมาก ในสภาพเช่นนี้นอกจากออกซิเจนจะถูกใช้โดยแบคทีเรียเพื่อย่อยสลายอินทรีย์สารแล้ว ออกซิเจนยังถูกใช้ในกระบวนการสลายอินทรีย์สารโดยตรง ออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารซึ่งใช้ออกซิเจนโดยตรงไม่ผ่านแบคทีเรีย เรียกว่า Chemical Oxygen Demand (COD) กระบวนการนี้มักจะใช้ออกซิเจนในปริมาณมากกว่ากระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารโดยแบคทีเรีย ฉะนั้นการขาดแคลนออกซิเจนในลักษณะนี้จึงรุนแรง ซึ่งอาจทำให้ปริมาณออกซิเจนในบ่อปลาลดต่ำลง จนบางครั้งไม่เหลือเลยเป็นเวลาหลายวันติดต่อกัน

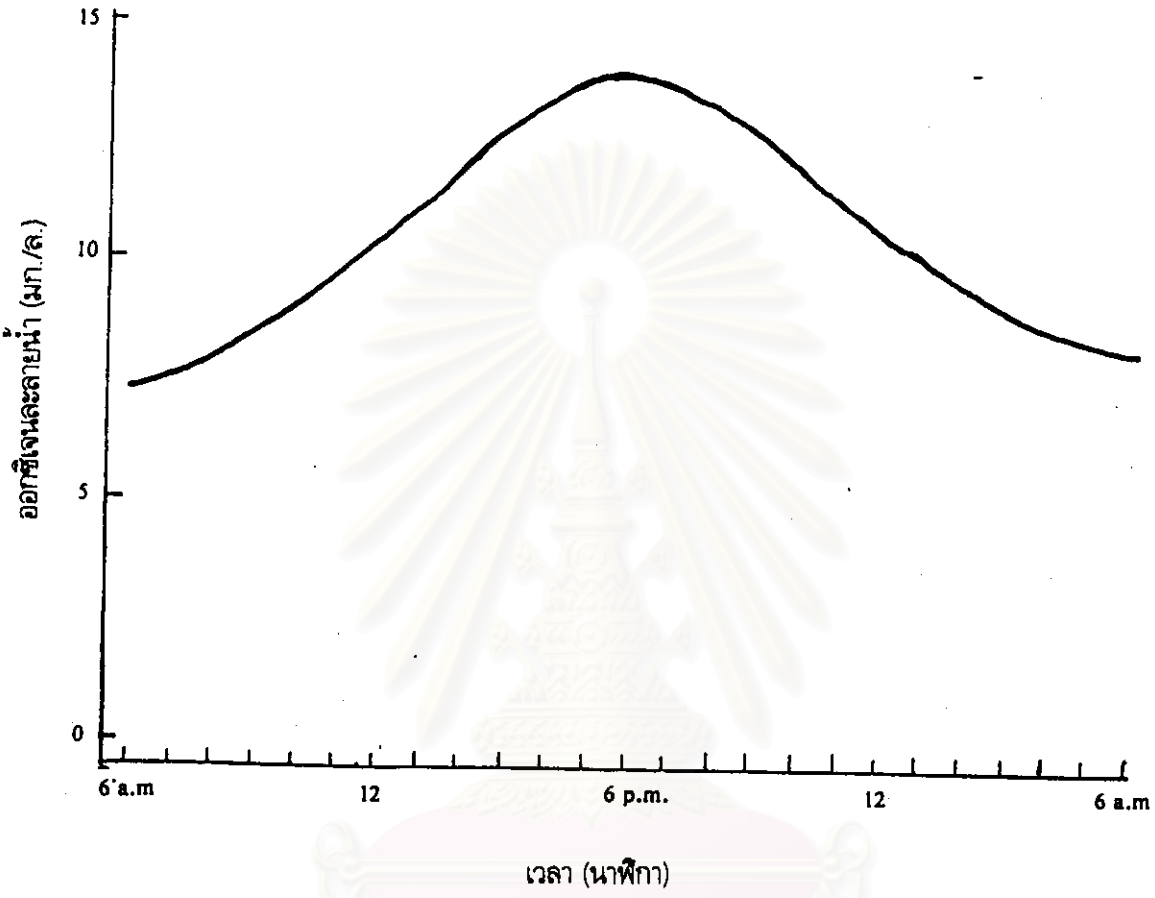
5. การหมุนเวียนของน้ำหรือการผสมกับน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ การเติมน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำในบ่อปลา เช่น น้ำบาดาล อาจทำให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนได้ เนื่องจากน้ำบาดาลมักจะมีเฟอรัสไบคาร์บอเนตและแมงกานีสไบคาร์บอเนตในปริมาณสูง สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และทำให้น้ำสูญเสียปริมาณออกซิเจนละลาย ดังแสดงอยู่ในสมการต่อไปนี้

$$4Fe(HCO_3)_2 + 2H_2O + O_2 \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$$

$$4Mn(HCO_3)_2 + 2H_2O + O_2 \longrightarrow 4Mn(OH)_3 + 8CO_2$$

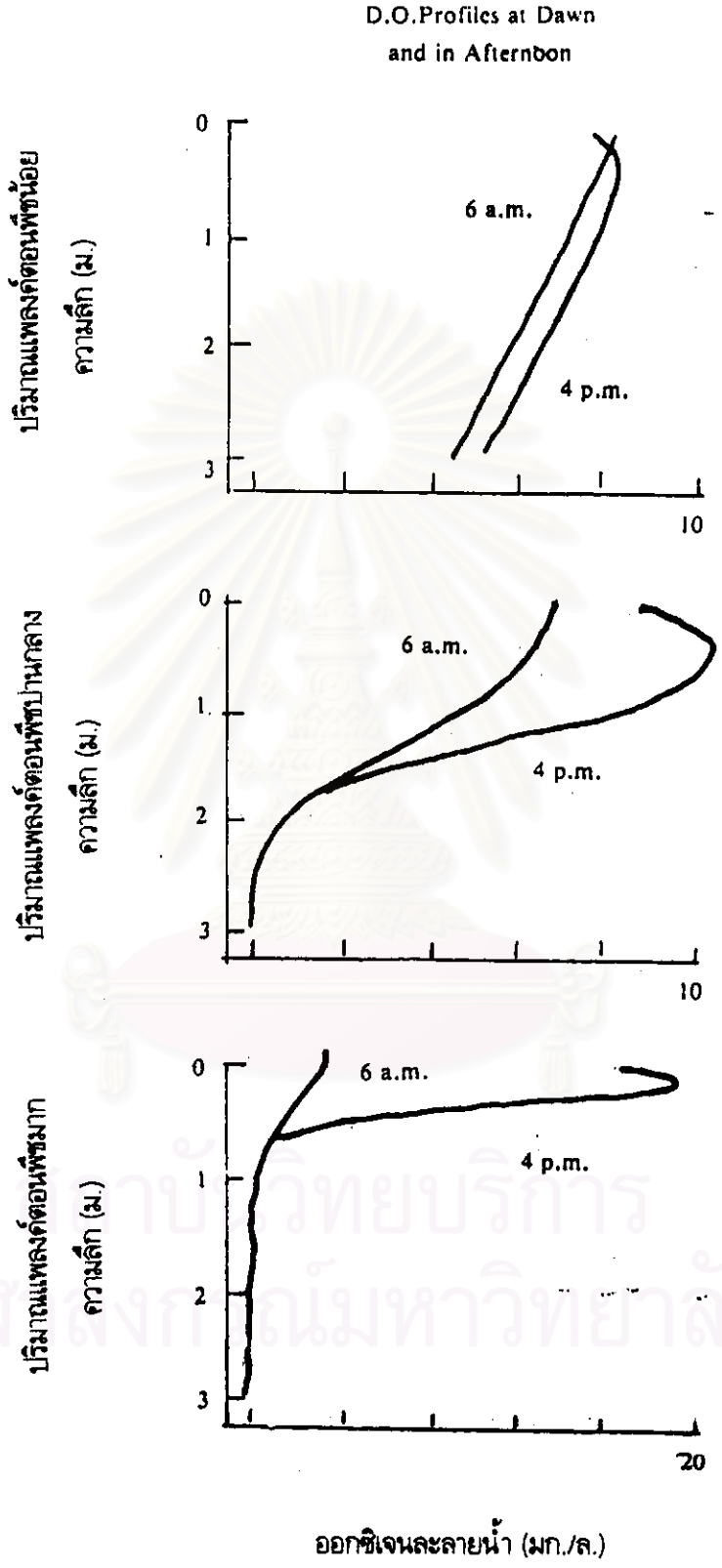
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า น้ำในบ่อปลาส่วนใหญ่ได้รับออกซิเจนที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงของแพลงค์ตอนพืช และออกซิเจนถูกใช้ไปเพื่อการหายใจของสิ่งมีชีวิต และกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารอยู่ตลอดเวลา ในเวลากลางวันปริมาณออกซิเจนที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงผลิตได้เร็วกว่าการใช้ออกซิเจนเพื่อการหายใจและย่อยสลายอินทรีย์สาร ดังนั้นปริมาณออกซิเจนในน้ำจึงสูงขึ้นเรื่อยๆ (รูปที่ 2.8) จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว และมักจะสูงกว่าจุดอิ่มตัวเสมอ ในกรณีที่ออกซิเจนในน้ำมีปริมาณสูงกว่าจุดอิ่มตัว ออกซิเจนละลายในน้ำจะระเหยขึ้นสู่อากาศ แต่การระเหยจะเป็นไปอย่างช้ามากถ้าไม่มีคลื่นลม ในกรณีเช่นนี้ทำให้ออกซิเจนเหลือในน้ำมากยิ่งขึ้น จนบางครั้งปริมาณออกซิเจนในน้ำสูงกว่าจุดอิ่มตัวมากถึง 2 เท่า ครั้นในเวลากลางคืนไม่มีการสังเคราะห์แสง แต่การใช้ออกซิเจนเพื่อการหายใจและย่อยสลายอินทรีย์สารยังคงมีต่อไป ฉะนั้นปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจึงลดลงในเวลากลางคืน

ปัญหาการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลาอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากแพลงค์ตอนพืชมีปริมาณมากเกินไป ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำอาจจะเหลือน้อยหรือไม่มีเลยในช่วงกลางคืน เป็นสาเหตุทำให้ปลาตายได้ น้ำในบ่อปลาที่มีสารอาหารสูง แพลงค์ตอนพืชจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งแพลงค์ตอนพืชเป็นตัวกันแสงแดด ทำให้ปริมาณแสงแดดลดน้อยลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงแตกต่างกันตามระดับความลึกของบ่อปลา ฉะนั้นจึงพบออกซิเจนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสังเคราะห์แสงตามความลึกต่างๆ ในปริมาณต่างกัน และหากวันใดคลื่นลมสงบก็ยิ่งทำให้ความแตกต่างเด่นชัดยิ่งขึ้น จากหลักการดังกล่าวหากจะเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนในบ่อปลาซึ่งมีปริมาณแพลงค์ตอนพืชน้อย มีปานกลาง และมีมาก ตามความลึกต่างๆ ก็จะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 บ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชน้อยจะพบออกซิเจนที่ระดับผิวหน้าน้ำในปริมาณน้อยกว่าบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชปานกลาง และออกซิเจนที่ระดับผิวหน้าน้ำในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชปานกลางจะมีปริมาณน้อยกว่าในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชมาก แต่การผันแปรของออกซิเจนที่ความลึกต่างๆ ในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชมากจะมีมากกว่าในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชปานกลางและมีแพลงค์ตอนพืชน้อยตามลำดับ กล่าวคือปริมาณออกซิเจนที่ระดับผิวหน้าน้ำกับที่ระดับก้นบ่อในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชน้อยไม่ค่อยแตกต่างกัน



รูปที่ 2.8 การผันแปรของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในรอบวัน (Boyd, 1981)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ปริมาณออกซิเจนในบ่อปลาที่มีปริมาณแพลงค์ตอนพืชมาก ปานกลาง และน้อย ตามระดับความลึกของน้ำ (Boyd, 1981)

เหมือนในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชปานกลาง ส่วนในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชมากออกซิเจนที่ระดับผิวหน้าน้ำมีปริมาณสูงกว่าที่ระดับก้นน้ำมาก ในสภาพเช่นนี้มักไม่พบออกซิเจนที่ระดับก้นบ่อ

ความมากน้อยของแพลงค์ตอนในบ่อปลา นอกจากจะทำให้การผันแปรของออกซิเจนที่ความลึกต่างๆ แตกต่างกันแล้ว ยังทำให้การผันแปรของออกซิเจนในรอบวันแตกต่างกันอีกด้วย ออกซิเจนในบ่อปลามีปริมาณต่ำสุดในตอนเช้าก่อนได้รับแสงแดด สูงสุดในช่วงบ่ายและเย็น จากนั้นในตอนกลางคืนปริมาณออกซิเจนค่อยๆ ลดลงจนเหลือน้อยที่สุดในตอนเช้าอีก การผันแปรเช่นนี้จะเกิดรุนแรงในบ่อที่มีแพลงค์ตอนพืชมากและเกิดขึ้นน้อยในบ่อปลาที่มีแพลงค์ตอนพืชน้อย (รูปที่ 2.10)

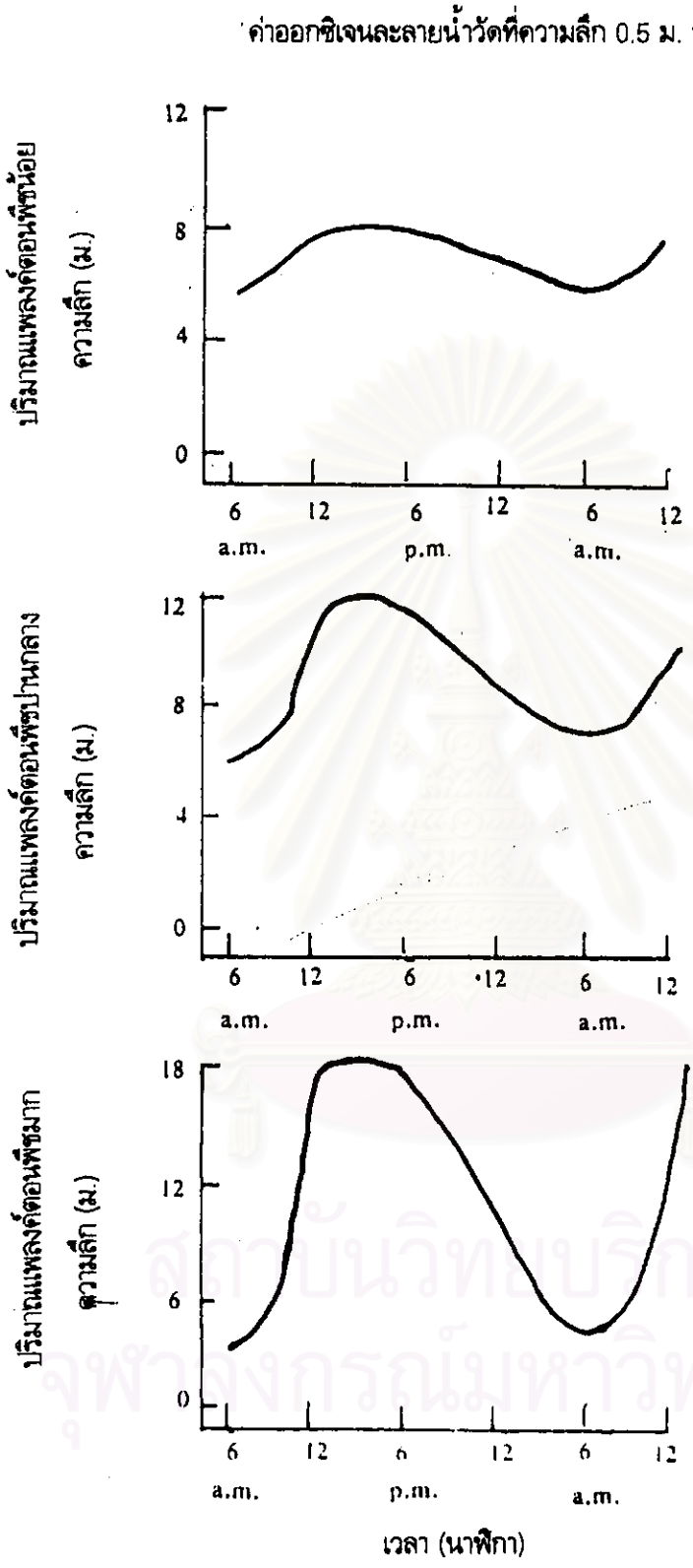
นอกจากแพลงค์ตอนพืชมีปริมาณมากเกินไปแล้ว ชนิดของแพลงค์ตอนพืชก็มีความสำคัญในการทำให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลาได้ ปกติบ่อปลาได้รับออกซิเจนส่วนใหญ่จากการสังเคราะห์แสงของแพลงค์ตอนพืช 2 ชนิดด้วยกัน คือ สาหร่ายสีเขียว (Green algae) และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) สาหร่ายทั้ง 2 ชนิดชอบอยู่ในน้ำที่ระดับต่างกันกล่าวคือ สาหร่ายสีเขียวกระจายอยู่ทั่วไปทุกระดับชั้นของน้ำที่มีแสงแดดส่องถึง ส่วนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชอบอยู่ที่ระดับผิวหน้าน้ำเท่านั้นและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินนี้เองที่มักจะก่อให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลาหากมีปริมาณมากเกินไป ทั้งนี้เพราะว่าออกซิเจนที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในตอนกลางวัน จะมีเฉพาะในชั้นผิวหน้าน้ำเท่านั้น ซึ่งมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำตอนกลางคืน ไม่เหมือนกับออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวซึ่งมีอยู่เกือบทุกชั้นของระดับน้ำ จึงไม่ค่อยมีการขาดแคลนออกซิเจนในตอนกลางคืน

แพลงค์ตอนสัตว์ต้องการออกซิเจนสูง ฉะนั้นการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลาอาจเกิดขึ้นได้ถ้าแพลงค์ตอนสัตว์มีมากเกินไป การขาดแคลนออกซิเจนเนื่องจากแพลงค์ตอนสัตว์มักจะเกิดขึ้นในตอนกลางคืน โดยเฉพาะในคืนของวันที่น้ำในบ่อปลาได้รับออกซิเจนต่ำกว่าปกติ และถึงแม้ว่าการขาดแคลนออกซิเจนเนื่องจากแพลงค์ตอนสัตว์จะไม่ค่อยเกิดขึ้นบ่อยครั้งนักแต่ก็เป็นเรื่องที่ควรระวัง

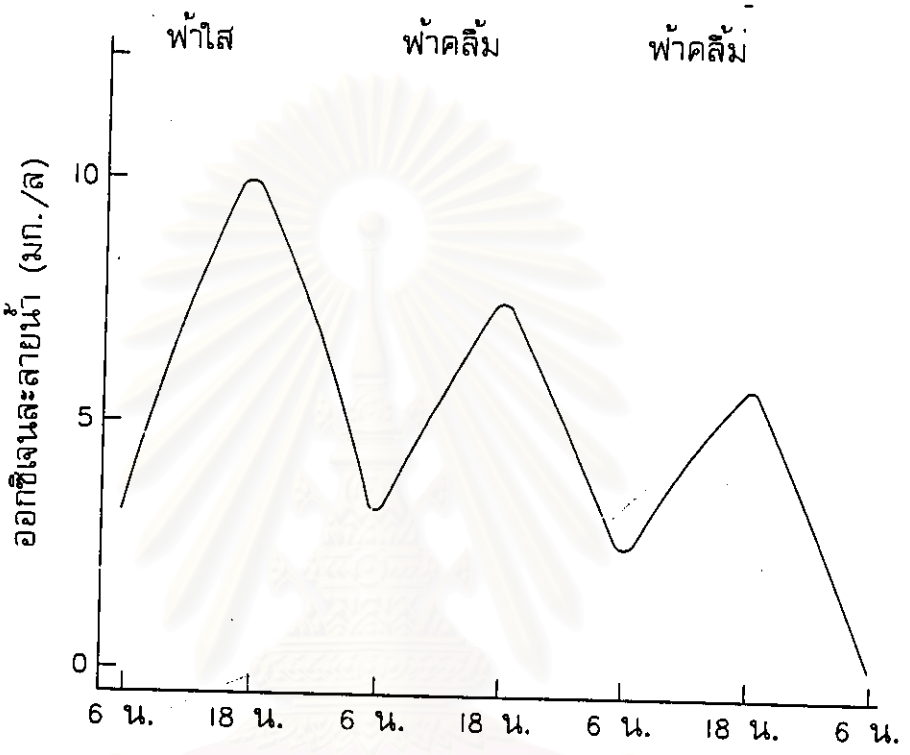
การขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลาเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะยิ่งเกิดขึ้นได้ง่ายและรุนแรงมากขึ้น ในช่วงที่อากาศมืดครึ้มติดต่อกันหลายวัน ในวันอากาศมืดครึ้มน้ำได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงน้อยกว่าในวันอากาศแจ่มใส ทำให้ออกซิเจนในน้ำโมตอนเช้าของวันรุ่งขึ้นเหลือน้อยกว่าปกติและถ้าหากอากาศยังมืดครึ้มต่อไปอีกเป็นเวลาหลายวัน ปริมาณออกซิเจนก็ยิ่งเหลือน้อยลงเรื่อยๆ จนถึงขั้นเป็นอันตรายต่อปลาได้ (รูปที่ 2.11)

2.3.3 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นแร่ธาตุที่พบในร่างกายของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดในรูปของ โปรตีนเพพไทด์ และกรดอะมิโน นอกจากนั้นยังพบไนโตรเจนในอากาศมากถึง 80% ดังนั้นไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยจึงพบได้มากที่สุดในน้ำจืดและน้ำเค็ม



รูปที่ 2.10 การผันแปรของออกซิเจนที่ละลายน้ำในรอบวันของบ่อปลาที่มีแพลงค์ตอนพืชมาก ปานกลาง และน้อย (Boyd, 1981)



รูปที่ 2.11 ท้องฟ้ามืดครึ้มติดต่อกัน 2 วัน ทำให้แพลงค์ตอนไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้อย่างเต็มที่ ระดับออกซิเจนละลายน้ำในตอนเช้าตรู่จึงมีค่าลดลงทุกวัน และมีค่าต่ำมากในวันที่สาม (มั่นสิน, 2538)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไนโตรเจนที่พบในน้ำมีอยู่หลายรูป เช่น ไนเตรต แอมโมเนีย แอมโมเนียมอิออน ไนไตรต์ ก๊าซไนโตรเจน และอินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้แก่ กรดอะมิโน โปรตีนเพพไทด์ ยูเรีย เป็นต้น ไนโตรเจนในหมู่แอมโมเนียมอิออน มักพบในรูปของเกลือแอมโมเนียมคลอไรด์และเกลือแอมโมเนียมซัลเฟต ซึ่งเมื่อถูกย่อยสลายจะให้ก๊าซแอมโมเนีย เกลือเหล่านี้พืชบกส่วนมากไม่สามารถใช้ในการสังเคราะห์แสงได้ แต่แพลงค์ตอนพืชแทบทุกชนิดใช้ได้และบางชนิดชอบมากกว่าไนเตรต ไนโตรเจนในหมู่ไนเตรตมักพบในรูปของสารประกอบโซเดียมไนเตรตหรือแคลเซียมไนเตรต ในบ่อปลาสารประกอบเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากการย่อยสลายแอมโมเนียในสภาพกรดโดย nitrifying bacteria ดังสมการต่อไปนี้

$$NH_3 \xrightarrow{\text{acid solutions}} NH^+_4$$

$$2NH^+_4 + 3O_2 \xrightarrow{\text{nitrosomonas}} 2NO^-_2 + 4H^+ + \text{energy}$$

$$2NO^-_2 + O_2 \xrightarrow{\text{nitrobacter}} 2NO^-_3 + \text{energy}$$

กระบวนการย่อยสลายแอมโมเนียโดยแบคทีเรียหรือกระบวนการไนตริฟิเคชั่น มีความสำคัญต่อพืชชั้นสูงรวมทั้งพืชชั้นต่ำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะนอกจากไนโตรเจนในรูปไนเตรตแล้ว พืชชั้นสูงไม่สามารถใช้ไนโตรเจนในรูปอื่นได้อีก ส่วนพืชชั้นต่ำโดยเฉพาะแพลงค์ตอนก็เช่นเดียวกันส่วนใหญ่ใช้ได้เฉพาะไนโตรเจนรูปไนเตรต ยกเว้นแพลงค์ตอนบางชนิดสามารถใช้ไนโตรเจนได้ทั้งในรูปแอมโมเนียและไนเตรต

จากกระบวนการย่อยสลายแอมโมเนียโดยแบคทีเรียข้างต้น จะเห็นได้ว่า ไนโตรเจนในรูปของไนไตรต์ไม่อาจอยู่ในสภาพคงที่ เพราะถูกแบคทีเรียสลายต่อกลายเป็นไนเตรต ฉะนั้นจึงมักจะพบไนไตรต์ในปริมาณต่ำ

แพลงค์ตอนพืชใช้ไนโตรเจนในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างกรดอะมิโนหรือโปรตีน ไนโตรเจนที่แพลงค์ตอนพืชใช้เพื่อกระบวนการนี้ส่วนมากได้จากเกลือไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำและส่วนน้อยเป็นไนโตรเจนที่น้ำได้รับจากอากาศ นอกจากบ่อปลาจะได้รับไนโตรเจนจากอากาศโดยกระบวนการถ่ายเทแลกเปลี่ยนระหว่างอากาศกับน้ำแล้ว แบคทีเรียในดินก้นบ่อยังสามารถตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation) จากอากาศอีกทางหนึ่งด้วย แบคทีเรียในกลุ่มนี้บางชนิดอาศัยอยู่ได้ทั้งในดินก้นบ่อและในน้ำ และนอกจากแบคทีเรียแล้วสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินก็สามารถตรึงไนโตรเจนได้เช่นกัน ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ สาหร่ายในสกุล Nostoc สกุล Anabaena และสกุล Anabenopsis

จากที่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตประกอบด้วยไนโตรเจนในรูปของโปรตีน หรือกรดอะมิโน เมื่อสิ่งมีชีวิตตายโปรตีนในร่างกายถูกย่อยสลายได้แอมโมเนียและพลังงาน แอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีน

ส่วนหนึ่งถูกแพลงค์ตอนพืชนำไปใช้เพื่อสร้างกรดอะมิโนและโปรตีน อีกส่วนหนึ่งแบคทีเรียย่อยสลายต่อเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนอย่างที่กล่าวแล้ว กระบวนการย่อยสลายแอมโมเนียให้เป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนถึงแม้จะเกิดขึ้นอย่างเฉื่อยช้าแต่ก็เกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนโปรตีนหรืออินทรีย์สารถูกย่อยสลายจนหมด ฉะนั้นจึงถือว่าอินทรีย์สารเป็นแหล่งให้ไนโตรเจนที่สำคัญแหล่งหนึ่ง

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า น้ำในบ่อปลาได้รับไนโตรเจนหลายทางด้วยกันคือ จากน้ำเดิม จากอากาศ และจากการเน่าสลายของอินทรีย์สาร ขณะเดียวกันไนโตรเจนที่น้ำในบ่อปลาได้รับก็ถูกสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะแพลงค์ตอนพืชใช้ในการสร้างโปรตีนในร่างกาย และนอกจากการสูญเสียไนโตรเจนโดยการใช้ของแพลงค์ตอนพืชแล้ว ไนโตรเจนในบ่อปลายังถูกใช้ในกระบวนการอื่นทั้งที่เกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิตซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

ในบ่อปลานอกจากแบคทีเรียซึ่งช่วยย่อยสลายแอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์และไนเตรตแล้ว ยังมีแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่ง (denitrifying bacteria) ซึ่งทำหน้าที่ลดออกซิเจนในไนเตรตให้เป็นไนไตรต์ และจากไนไตรต์ไปเป็นไนตริกออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนตามลำดับ ก๊าซไนโตรเจนที่ได้ระเหยขึ้นสู่อากาศ กระบวนการนี้เรียว่า denitrification มักเกิดขึ้นในสภาพที่ขาดออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณก้นบ่อ อย่างไรก็ดีกระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นที่บริเวณอื่นของบ่อซึ่งมีออกซิเจนได้ถ้ามีอินทรีย์สารมากพอ

$$2NO^-_3 \longrightarrow 2NO^-_2 + O_2$$

$$2NO^-_2 \longrightarrow 2NO + O_2$$

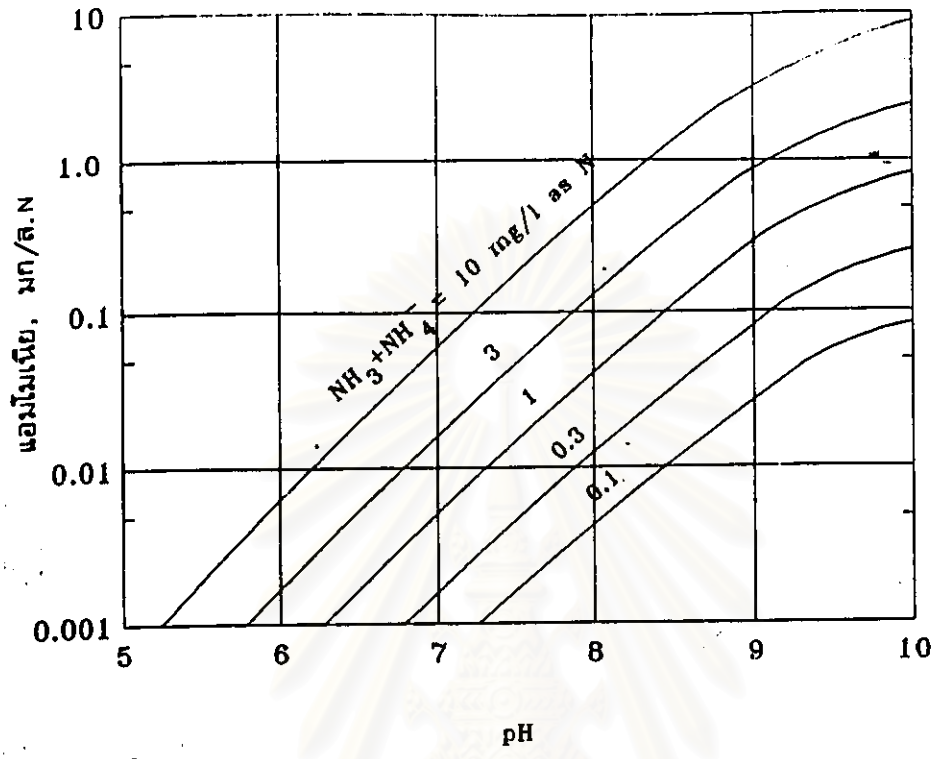
$$2NO \longrightarrow N_2 + O_2$$

ในน้ำจะพบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียได้ 2 รูป คือ แอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) ซึ่งแตกตัวได้ง่าย และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งไม่แตกตัว ดังนั้นน้ำในบ่อปลาอาจสูญเสียไนโตรเจนจากการระเหยของก๊าซแอมโมเนียได้อีกทางหนึ่ง และแอมโมเนียทั้งสองแบบอยู่ในสภาพสมดุลย์กันดังสมการต่อไปนี้

$$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4OH \rightleftharpoons NH^+_4 + OH^-$$

สภาพสมดุลย์นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพีเอชของน้ำ พีเอชจะเป็นตัวกำหนดรูปของแอมโมเนียว่าจะเป็นก๊าซแอมโมเนีย หรือแอมโมเนียอิออน (รูปที่ 2.12) น้ำในบ่อที่มีพีเอชเป็นกลาง แอมโมเนียจะอยู่ในรูปแอมโมเนียอิออนมากกว่าก๊าซแอมโมเนีย แต่ถ้าพีเอชสูงขึ้นก๊าซแอมโมเนียจะพบมากขึ้น และแอมโมเนีย

I 17589238



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของพีเอชในการกำหนดความเข้มข้นของ NH_3 และ NH_4^+ (มั่นสิน, 2538)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิออนจะมีน้อยลง ก๊าซแอมโมเนียสามารถระเหยขึ้นสู่อากาศได้ง่ายเนื่องจากในอากาศมีก๊าซแอมโมเนียน้อยมาก และก๊าซแอมโมเนียในน้ำจะระเหยขึ้นสู่อากาศได้เร็วยิ่งขึ้น ถ้าอุณหภูมิและพีเอชของน้ำสูงมากขึ้น

โดยทั่วไปน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติมีไนโตรเจนต่ำคือประมาณ 2.5 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งแบ่งเป็นไนเตรตประมาณ 0.01-0.05 มิลลิกรัม/ลิตร แอมโมเนียประมาณ 0.01-0.1 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนที่เหลือเป็นไนโตรเจนในรูปอื่น หากใช้น้ำนี้เติมในบ่อปลาแล้วคอยติดตามปริมาณไนโตรเจนตั้งแต่วันเริ่มเติมน้ำ จะพบว่าปริมาณไนโตรเจนในน้ำจะค่อยๆ ลดน้อยลงจนในที่สุดเหลือไนโตรเจนประมาณ 0.25-0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในเวลาประมาณ 30 วัน หลังจากวันเติมน้ำ จากนั้นจะพบปริมาณไนโตรเจนระดับนี้ตลอดไป การที่ไนโตรเจนลดน้อยลงในช่วง 30 วัน หลังจากเติมน้ำ เนื่องจากถูกดูดกลืนและตกตะกอนพร้อมกับตะกอนดินและบางส่วนระเหยขึ้นสู่อากาศ

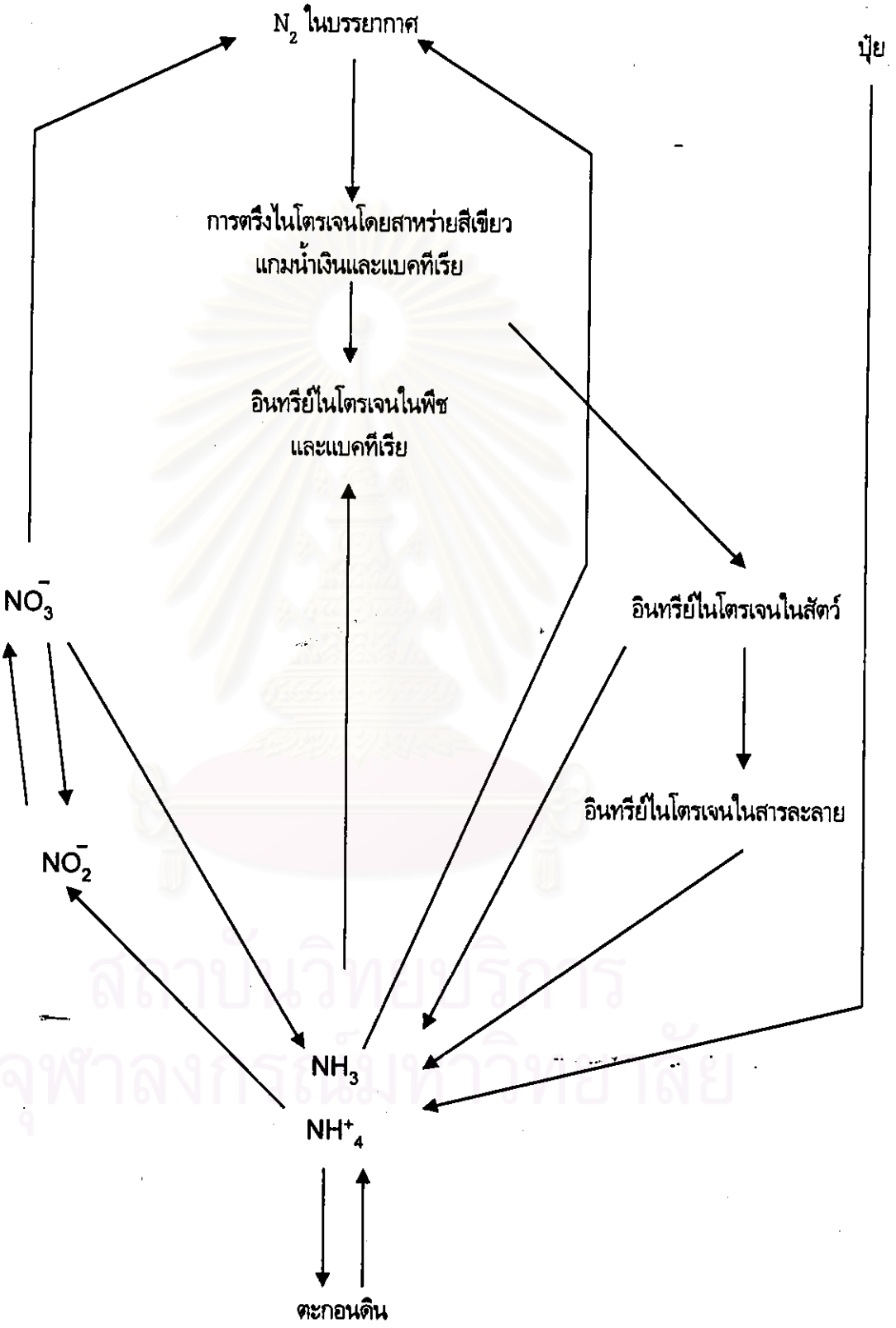
ในกรณีที่มีการเติมปุ๋ยในบ่อปลา เมื่อเริ่มเติมปุ๋ยจะพบไนโตรเจนในปริมาณสูง จากนั้นไนโตรเจนจะถูกใช้ในกระบวนการต่างๆ จนในที่สุดเหลือน้อยกว่าปริมาณที่พบก่อนเติมปุ๋ย การให้อาหารปลาก็เช่นเดียวกัน ส่วนหนึ่งของอาหารถูกปลากิน ไนโตรเจนในอาหารเปลี่ยนเป็นโปรตีนในเนื้อปลา และสิ่งขับถ่ายในรูปของแอมโมเนียละลายปนอยู่ในน้ำ ส่วนของอาหารที่ปลากินไม่หมดกลายเป็นปุ๋ยละลายน้ำให้ไนโตรเจน

เท่าที่กล่าวมาพอสรุปได้ว่าการหมุนเวียนของธาตุไนโตรเจนในบ่อปลา (รูปที่ 2.13) ประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ที่ค่อนข้างสลับซับซ้อน กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณแบคทีเรีย อินทรีย์สาร แร่ธาตุอื่นๆ ที่แบคทีเรียต้องการ ออกซิเจนและพีเอชของน้ำ รวมทั้งความเข้มของแสง

2.3.4 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุหลักที่พบในพืช พืชชั้นต่ำต้องการฟอสฟอรัสเพื่อการเจริญเติบโต ฟอสฟอรัสที่พืชชั้นต่ำสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสงได้คือ อนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปออร์โทฟอสเฟต (inorganic orthophosphate, $H_2PO^-_4$, HPO^{2-}_4, PO^{2-}_4) ซึ่งฟอสฟอรัสในรูปนี้ละลายน้ำได้แต่มีจำนวนน้อย ฉะนั้นจึงถือว่าฟอสฟอรัสเป็นตัวกำหนดการเจริญเติบโตของพืชชั้นต่ำ นอกจากอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปออร์โทฟอสเฟตแล้ว พบว่าในน้ำยังมีอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปโพลีฟอสเฟต (inorganic polyphosphate) อินทรีย์ฟอสฟอรัส (soluble organic phosphorus) และฟอสฟอรัสในร่างกายของสิ่งมีชีวิต (phosphorus in seston) ฟอสฟอรัสในร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีปริมาณสูงกว่าฟอสฟอรัสรูปอื่นหลายเท่า กล่าวคือมีประมาณร้อยละ 50-85 ของฟอสฟอรัสรวม ในขณะที่อินทรีย์ฟอสฟอรัสและอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปออร์โทฟอสเฟตมีเพียงร้อยละ 10-30 และ 5-20 ของฟอสฟอรัสรวม ตามลำดับ

อนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่พบเป็นประจำในแหล่งน้ำจืดคือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) ซึ่งไม่ละลายน้ำ นอกจากไตรแคลเซียมฟอสเฟตก็มีอนุมูลฟอสเฟตของโลหะหนักซึ่งได้แก่ เฟริกฟอสเฟต ($FePO_4$) และอลูมินัมฟอสเฟต ($AlPO_4$) ทั้งเฟริกฟอสเฟตและอลูมินัมฟอสเฟตมักจะพบในน้ำที่เป็นกรด



รูปที่ 2.13 การหมุนเวียนของธาตุไนโตรเจนในบ่อปลา (เวียง,2525)

โดยเฉพาะที่ก้นบ่อและมีปริมาณน้อยกว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟต อนินทรีย์ฟอสฟอรัสแตกต่างจากอนินทรีย์ไนโตรเจนอย่างหนึ่งคือ อนินทรีย์ฟอสฟอรัสไม่ค่อยละลายน้ำ ถึงแม้หินและดินจะเป็นแหล่งให้ฟอสฟอรัสที่สำคัญ แต่น้ำฝนก็สามารถละลายฟอสฟอรัสได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฉะนั้นจึงพบฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณต่ำ ในแหล่งน้ำที่ไม่อุดมสมบูรณ์ (oligotrophic) จะพบฟอสฟอรัสรวมประมาณ 0.005-0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนในแหล่งน้ำที่อุดมสมบูรณ์ (eutrophic) อาจพบฟอสฟอรัสสูงถึง 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร (Boyd, 1984) อย่างไรก็ตามปริมาณฟอสฟอรัสในระดับนี้ยังไม่พอกับความต้องการเพื่อการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนพืชในบ่อเลี้ยงปลา ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำของบ่อเลี้ยงปลาควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของฟอสฟอรัส (มั่นสิน, 2538)

สิ่งที่มีชีวิตในน้ำนับว่าเป็นแหล่งให้อินทรีย์ฟอสฟอรัสที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง เมื่อพืชและสัตว์น้ำตายและเกิดการเน่าสลาย ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารประกอบแบบสลับซับซ้อนถูกเปลี่ยนเป็นฟอสฟอรัสในรูปของสารประกอบแบบง่ายๆ ซึ่งพืชชั้นต่ำสามารถนำไปใช้ได้ ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของสารประกอบซึ่งพืชสามารถใช้ได้นี้ จะมีมากหรือน้อยย่อมขึ้นกับอัตราการเน่าสลายของอินทรีย์สารในน้ำ และอัตราการเน่าสลายอินทรีย์สารในน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณของอินทรีย์สาร และปริมาณแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการเน่าสลาย บ่อปลาซึ่งมีอินทรีย์สารมากย่อมมีปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำสูงกว่าบ่อปลาซึ่งมีอินทรีย์สารน้อย และในบ่อเดียวกันปริมาณฟอสฟอรัสที่ระดับต่างๆ ก็ยังแตกต่างกันอีกด้วย การที่พบปริมาณฟอสฟอรัสที่ระดับต่างๆ ในบ่อเดียวกันต่างกันก็เนื่องมาจากว่า ที่ระดับต่างๆ มีปริมาณอินทรีย์สารต่างกัน โดยทั่วไปมักจะไม่พบอินทรีย์สารที่ระดับผิวหน้าน้ำแต่จะพบอินทรีย์สารในปริมาณสูงที่ก้นบ่อ ซึ่งเป็นแหล่งที่มักจะขาดแคลนออกซิเจน มีรายงานว่าในบ่อปลาในสหรัฐอเมริกาอินทรีย์สารที่พบที่ก้นบ่อมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 90 ของอินทรีย์สารรวม ส่วนอินทรีย์สารที่ก้นบ่อเลี้ยงปลาในโปแลนด์มีประมาณร้อยละ 81.8 ของอินทรีย์สารทั้งหมดในบ่อ (เวียง, 2525)

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายอินทรีย์สารก็เช่นเดียวกัน ส่วนมากชอบอาศัยอยู่ที่พื้นก้นบ่อหรือที่ระดับ 1-2 เซนติเมตร เหนือพื้นก้นบ่อ ที่ระดับนี้หากน้ำเป็นกรดเพียงเล็กน้อยจะพบฟอสฟอรัสมากกว่าที่ระดับอื่นหลายเท่า ตัวอย่างเช่นบ่อเลี้ยงปลาในอิสราเอลพบฟอสฟอรัสที่ก้นบ่อสูงถึงร้อยละ 75 ของฟอสฟอรัสรวม

อนินทรีย์ฟอสฟอรัสในน้ำเพียงส่วนน้อยถูกใช้โดยพืช (โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชชั้นต่ำ) เพื่อการสังเคราะห์แสง ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะตกตะกอนและถูกดูดกลืนโดยดินก้นบ่อ การตกตะกอนของฟอสฟอรัสเกิดขึ้นได้ง่าย ในสภาพที่น้ำเป็นกรดฟอสฟอรัสตกตะกอนกับเหล็กและอลูมินัม ได้เฟริกฟอสเฟตและอลูมินัมฟอสเฟตตามลำดับ ส่วนในสภาพที่น้ำเป็นด่าง ฟอสฟอรัสตกตะกอนกับแคลเซียมได้ไตรแคลเซียมฟอสเฟต รูปที่ 2.14 แสดงผลของพีเอชที่มีต่อปริมาณอนินทรีย์ฟอสฟอรัส และจากรูปนี้จะเห็นได้ว่าโอกาสที่น้ำจะมีอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปที่พืชใช้ได้มีน้อยที่สุด คือ เมื่อพีเอชของน้ำอยู่ในช่วง 6.3 ถึง 6.9 เท่านั้น ที่พีเอชของน้ำสูงหรือต่ำกว่าช่วงนี้ปริมาณอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในน้ำลดลง

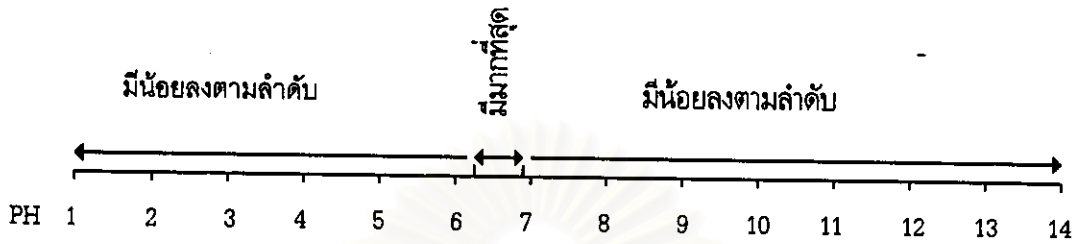
เกลือฟอสเฟตที่ตกตะกอนทับถมที่พื้นก้นบ่อไม่ละลายน้ำ แต่ในกรณีที่บ่อมีความลึกเกิน 1 เมตร

ก้นบ่อมีโอกาสขาดแคลนออกซิเจน เกลือเฟริกฟอสเฟตที่ตกตะกอนก็มีโอกาสละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย ในสภาพที่ขาดออกซิเจนเฟริกฟอสเฟตลดรูปเป็นเฟรัสฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำได้ง่าย ในที่สุดปล่อยฟอสฟอรัสให้กับน้ำ และเฟริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ก็จะปล่อยฟอสฟอรัสที่ดูดกลืนไว้ขณะมีออกซิเจนเช่นกัน จากนั้นกระแสลมช่วยนำฟอสฟอรัสจากพื้นก้นบ่อขึ้นมาสู่ระดับผิวหน้าน้ำให้พืชได้ใช้ประโยชน์ต่อไป อย่างไรก็ตามพืชสามารถใช้ประโยชน์ฟอสฟอรัสส่วนนี้ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะว่าที่ผิวหน้าน้ำมีออกซิเจนมากกว่าส่วนอื่นของบ่อ ในสภาพที่มีออกซิเจนฟอสฟอรัสจะตกตะกอนกับเหล็กและอลูมินัม และบางส่วนถูกดูดกลืนโดยเฟริกไฮดรอกไซด์เหมือนเช่นเดิม ผลก็คือฟอสฟอรัสสำหรับพืชใช้ประโยชน์มีปริมาณน้อยลง การขาดฟอสฟอรัสในทำนองนี้อาจเกิดขึ้นในบ่อปลาที่มีฟอสฟอรัสอยู่บ้างแล้วได้ ถ้าบ่อปลานั้นได้รับน้ำเสียซึ่งมีออกซิเจนต่ำมากและมีเหล็กในรูปเฟรัสสูง

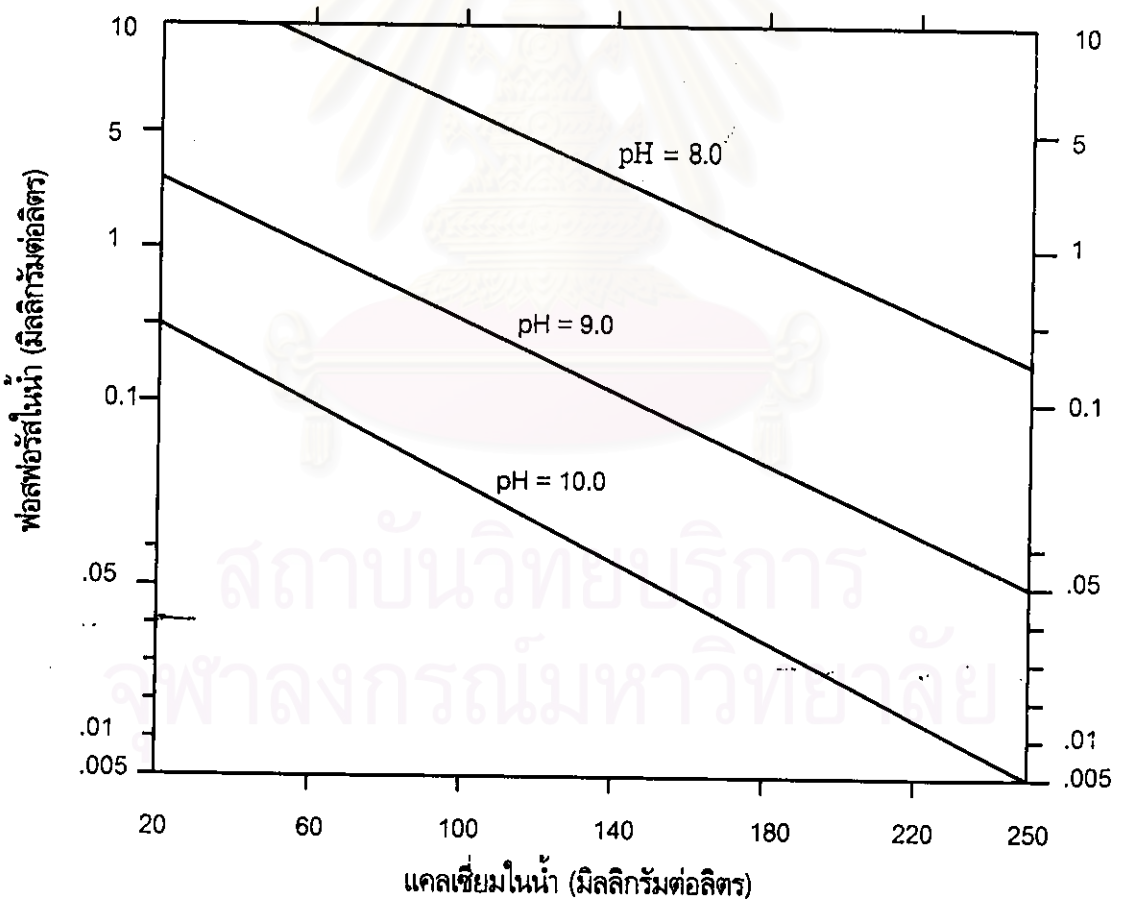
ได้กล่าวมาแล้วว่าในสภาพที่น้ำเป็นด่าง ฟอสฟอรัสจะตกตะกอนกับแคลเซียมเป็นไตรแคลเซียมฟอสเฟต หรือสารประกอบที่สลับซับซ้อนกว่าซึ่งเรียกว่า hydroxi apatite ($Ca_5(PO_4)_3OH$, $Ca(PO_4)_2$ $Ca(OH)_2$) การตกตะกอนขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมและค่าพีเอชของน้ำ ถ้าน้ำยิ่งมีแคลเซียมมากและเป็นด่างอย่างแรงฟอสฟอรัสก็ยิ่งตกตะกอนมาก ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำก็ยิ่งเหลือน้อยลง (รูปที่ 2.15) โดยทั่วไปบ่อปลามีแคลเซียมประมาณ 100-150 มิลลิกรัม/ลิตร ในสภาพที่มีแคลเซียมขนาดนี้ถ้าพีเอชของน้ำมีค่าประมาณ 9-9.5 ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำจะมีไม่มากเลย

การที่ก้นบ่อมีฟอสฟอรัสมากกว่าส่วนอื่นของบ่อ นอกจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วยังเป็นเพราะว่าก้นบ่อได้รับฟอสฟอรัสอย่างสม่ำเสมอจากการย่อยสลายของอินทรีย์สารที่ก้นบ่อเอง ผลจากการย่อยสลายอินทรย์สารได้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งทำให้พีเอชของน้ำและปริมาณแคลเซียมลดลง ผลก็คือฟอสฟอรัสจะไม่ตกตะกอนกับแคลเซียม อีกทั้งการสังเคราะห์แสงที่ก้นบ่อก็มีน้อยด้วยเนื่องจากขาดแคลนแสงแดด นอกจากนั้นยังมีการถ่ายเทแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสระหว่างน้ำกับดินที่ก้นบ่ออยู่ตลอดเวลา เมื่อใดฟอสฟอรัสในน้ำใกล้ก้นบ่อเหลือน้อยดินก็จะปล่อยฟอสฟอรัสไปทดแทน แม้ว่าที่ก้นบ่อจะมีฟอสฟอรัสมากแต่พืชใช้ได้น้อยเพราะขาดแคลนแสงแดด ตรงกันข้ามกับที่ผิวหน้าน้ำซึ่งมีแสงแดดเพียงพอกลับขาดแคลนฟอสฟอรัสสำหรับให้พืชชั้นต่ำใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณ การเลี้ยงปลาในบ่อซึ่งมีสภาพเช่นนี้ให้ผลผลิตต่ำและการเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นอาจทำได้โดยการเติมปุ๋ยหรือให้อาหาร

ในระยะเริ่มแรกของการเติมปุ๋ยฟอสฟอรัสในบ่อปลา จะพบปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำในปริมาณสูง จากนั้นปริมาณฟอสฟอรัสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในเวลาเพียง 3-4 วัน หลังจากการเติมปุ๋ยจะพบฟอสฟอรัสเหลือได้อย่างมากเท่ากับก่อนเติมปุ๋ยเท่านั้น ฟอสฟอรัสส่วนที่หายไปบางส่วนถูกพืชนำไปใช้ แต่ส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนโดยตะกอนดินและตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อ การให้อาหารก็เช่นเดียวกันฟอสฟอรัสในอาหารส่วนที่ปลากินถูกเปลี่ยนเป็นอินทรีย์ฟอสฟอรัสในตัวปลา ฟอสฟอรัสในอาหารส่วนที่ปลากินไม่หมดจะละลายน้ำ บางส่วนถูกพืชนำไปใช้และบางส่วนตกตะกอนอย่างเดียวกับฟอสฟอรัสในปุ๋ย



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของพีเอชของน้ำที่มีผลต่อปริมาณอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในบ่อปลา (เวียง,2525)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียม พีเอชของน้ำและปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำ (เวียง,2525)

เท่าที่กล่าวมาแล้วพอสรุปได้ว่า การหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในน้ำ (รูปที่ 2.16) เกี่ยวข้องกับกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ดังนี้คือ (1) กระบวนการใช้ฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์แสงของพืช (2) กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารโดยแบคทีเรีย และ (3) กระบวนการตกตะกอนของฟอสฟอรัสเป็นเกลือฟอสเฟต เนื่องจากฟอสฟอรัสในน้ำเปลี่ยนรูปอยู่ตลอดเวลา สมดุลย์ของกระบวนการดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับปริมาณของฟอสฟอรัสแต่ละรูป และอัตราการเกิดกระบวนการแต่ละกระบวนการ ถ้าฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มปริมาณมากขึ้นทำให้สมดุลย์เสียไป อัตราการสูญเสียฟอสฟอรัสในน้ำโดยพืชนำไปใช้และโดยการตกตะกอนก็จะเร็วขึ้น ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำเหลือน้อยลงและกลับเข้าสู่สมดุลย์ในที่สุด

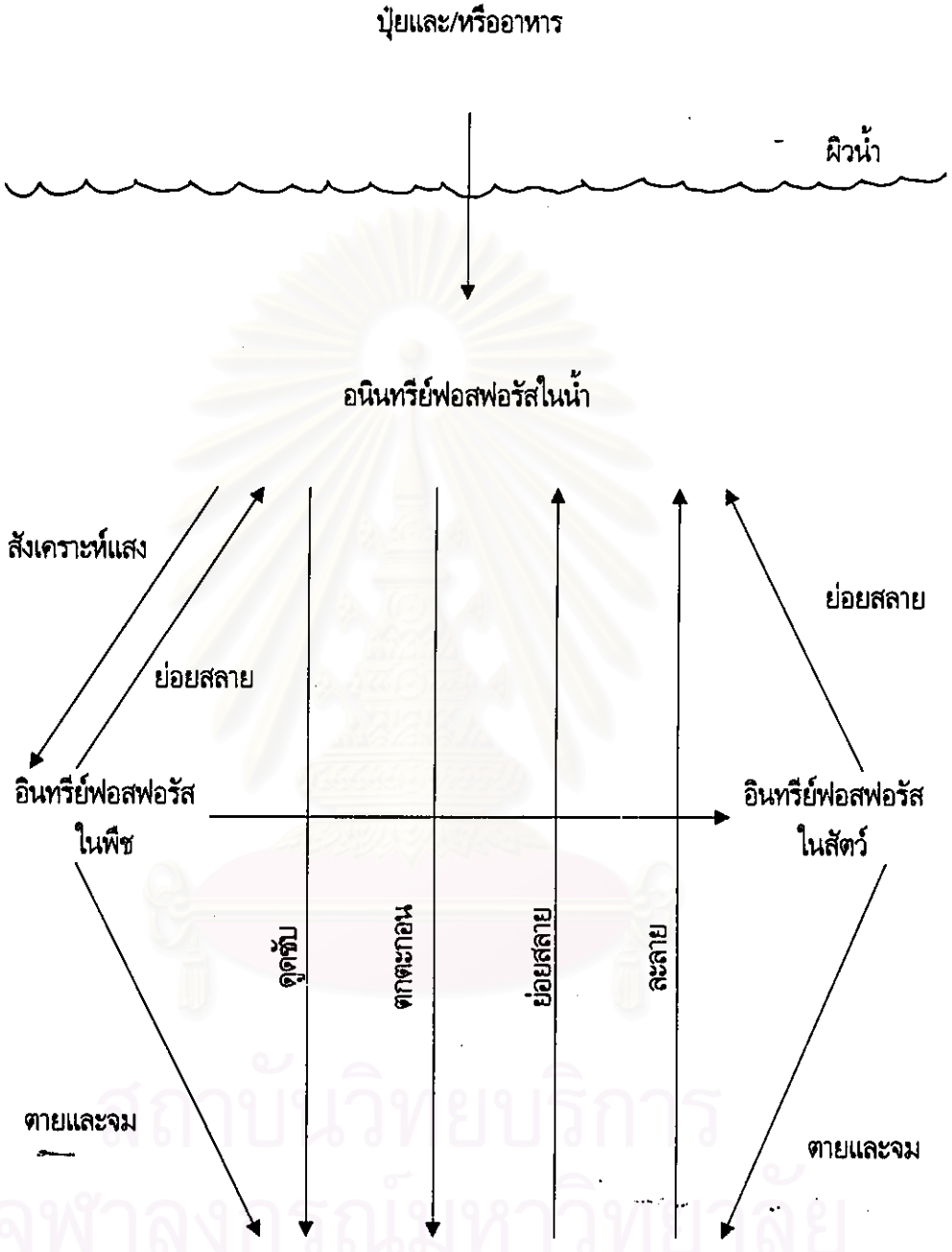
2.4 การใช้สารอาหารโดยแพลงค์ตอน

เกี่ยวกับความต้องการสารอาหารของแพลงค์ตอนโดยทั่วๆ ไป Jewell และ McCarty (1968), Force และ McCarty (1968) ได้รายงานไว้ถึงองค์ประกอบของแพลงค์ตอน ในรูปขององค์ประกอบเฉลี่ยของเซลล์ที่เจริญเติบโต พร้อมกับค่าต่ำสุดและสูงสุดของธาตุองค์ประกอบหลักต่างๆ ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.8 จากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แพลงค์ตอนต้องใช้ธาตุสารอาหารต่างๆเหล่านี้ในการเจริญเติบโต

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบของเซลล์แพลงค์ตอน

องค์ประกอบ	เปอร์เซนต์ของน้ำหนักขี้เถ้าแห้ง		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
คาร์บอน	53.0	42.9	70.2
ไฮโดรเจน	8.0	6.0	10.5
ออกซิเจน	31.0	17.8	34.0
ไนโตรเจน	8.0	0.6	16.0
ฟอสฟอรัส	2.0	0.16	5.0

ในน้ำมีออกซิเจนและไฮโดรเจนอยู่ในปริมาณที่มากเกินพอ จึงไม่ใช่สารอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอน ดังนั้นการใช้สารอาหารของแพลงค์ตอนจะเกี่ยวข้องกับธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งอาจเป็นสารอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอน



อินทรีย์และอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ดินก้นบ่อ

รูปที่ 2.16 การหมุนเวียนของธาตุฟอสฟอรัสในบ่อปลา (เวียงม 2525)

2.4.1 ฟอสฟอรัสที่ใช้เป็นสารอาหาร

ในปี 1951 Oswald และคณะ (1957) ได้เพาะเลี้ยง *Euglena gracilis* อย่างต่อเนื่องด้วยน้ำเสียจากบ้านเรือน ภายใต้สภาวะแวดล้อมดังนี้คือ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, ให้แสงสว่างตลอดเวลาที่ 27 กรัม คาลอรี/ลิตร-นาที เปลี่ยนแปลงช่วงระยะเวลาเก็บกักต่างๆ และมีฟอสเฟตเท่ากับ 8 มก./ล.จากการทดลองพบว่าของแข็งแขวนลอยในการเพาะเลี้ยง ประกอบด้วยเซลล์ของ *Euglena* เป็นส่วนใหญ่ เซลล์ประกอบด้วย 2.3%P ที่เวลาเก็บกัก 2 วัน และ 0.8%P ที่เวลาเก็บกัก 14 และ 20 วัน ในกรณีของการเพาะเลี้ยง 14 และ 20 วัน จะพบว่าไนโตรเจนเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของ *Euglena* แต่ไม่มีกรณีที่ฟอสเฟตเป็นตัวจำกัด

Zabat (1970) ได้ทำการศึกษาเพาะเลี้ยง *Chlorella pyrenoidosa* (Emerson) อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมือนกัน แต่มีการควบคุมฟอสเฟตให้เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโต ภายใต้สภาวะการควบคุมดังกล่าวพบว่า *Chlorella* มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 25 °ซ. ประมาณ 1.5 วัน$^{-1}$ ซึ่งเกิดขึ้นที่ฟอสเฟต (S_1) มีค่าเท่ากับ 0.05 มก./ล. และเซลล์มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบอยู่ 0.6 %P ที่ค่าครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Ks) ฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 0.020 มก./ล. เซลล์ประกอบด้วยฟอสฟอรัส 0.4%P และอัตราการเจริญเติบโตต่ำสุดของ *Chlorella* พบที่ 0.25 วัน$^{-1}$ เซลล์มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 0.28 % ที่ฟอสฟอรัสมีความเข้มข้น 0.0037 มก./ล.

Porcella (1970) ได้ทำการเพาะเลี้ยง *Selenastrum capricornutum* อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดฟอสฟอรัส ซึ่งพบว่าเซลล์จะประกอบด้วยฟอสฟอรัส 0.41 ถึง 0.34 %P

Toerien และคณะ (1971) ได้ทำการเพาะเลี้ยง *S. capricornutum* โดยมีการจำกัดฟอสเฟตจากการทดลองได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 1.85 วัน$^{-1}$ ที่ฟอสฟอรัสมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.030 และ 0.050 มก./ล. และค่าครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดนี้ (Ks) เกิดขึ้นที่ฟอสเฟตมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0037 และ 0.0057 มก./ล. ตามลำดับ และภายใต้สภาวะที่จำกัดฟอสเฟตอย่างรุนแรงจะได้ค่ายิลด์เท่ากับ 850 มก.เซลล์/มก.ฟอสเฟต และที่ค่ายิลด์นี้เซลล์มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.125 %P

ในการทดลองใช้บ่อบำบัดน้ำเสียกลางแจ้งในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนที่มีฟอสฟอรัสอยู่ประมาณ 10 มก./ล. Oswald และ Gotaas (1958) พบว่าเปอร์เซนต์เฉลี่ยของฟอสฟอรัสในแพลงค์ตอนจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันกับความลึกของบ่อ โดยได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.9 จากค่าในตาราง จะเห็นว่าที่ระดับความลึกของบ่อที่มากขึ้น เปอร์เซนต์เฉลี่ยของฟอสฟอรัสในแพลงค์ตอนและค่าเฉลี่ยของพีเอชจะมีค่าลดลง จากค่าพีเอชเหล่านี้บางที อาจเกิดการตกตะกอนของฟอสเฟตที่ค่าพีเอชสูง แต่จะไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 7.5 และ 7.1 ในทางตรงกันข้ามที่ความลึก 30 ซ.ม. และ 45 ซ.ม. เซลล์แพลงค์ตอนจะมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเพียง 0.5%P เท่านั้น จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไม่มี luxury uptake เกิดขึ้นในการเพาะเลี้ยงที่ระดับลึกๆ แต่อาจจะเกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับแสงสว่างที่มีอย่างมากเกินพอ

ตารางที่ 2.9 เปอร์เซนต์เฉลี่ยของฟอสฟอรัสในแพลงค์ตอน

ความลึกของบ่อ (ซม.)	เปอร์เซนต์เฉลี่ยของ ฟอสฟอรัสในแพลงค์ตอน	ค่าเฉลี่ยของพีเอช
5	1.1	10
15	0.95	9
30	0.7	7.5
45	0.4	7.1

Hintz และคณะ (1966) ได้ทำการศึกษาค่าสารอาหารของการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนที่เพาะเลี้ยงไว้กลางแจ้งที่ความลึก 20 ซ.ม. และทำการแยกเซลล์แพลงค์ตอนออกมาวิเคราะห์ ได้ค่าฟอสฟอรัสใน 10 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.2 % ของเซลล์ที่แห้ง อย่างไรก็ดีอาจจะเป็นไปได้ว่าแพลงค์ตอนได้รวมเอาผลึกของแคลเซียมฟอสเฟตจากภายนอกเซลล์เข้าไปด้วย

โดยอ้างอิงจากข้อมูลที่ได้ จะเห็นว่าภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดฟอสฟอรัสอย่างรุนแรง แพลงค์ตอนอาจจะมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเพียง 0.25% P แต่ที่ภายใต้สภาวะที่ฟอสฟอรัสมีอยู่เป็นปริมาณมาก มีสารอาหารอย่างมากมาย แพลงค์ตอนได้รับแสงสว่างมากเกินพอและอุณหภูมิที่เหมาะสมแพลงค์ตอนอาจมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบถึง 1.25% P

2.4.2 ไนโตรเจนที่ใช้เป็นสารอาหาร

แพลงค์ตอนสามารถใช้ไนโตรเจนเป็นสารอาหารทั้งในรูปของ แอมโมเนีย และ ไนเตรตได้ ในการศึกษาของ Oswald (1972) ได้เพาะเลี้ยง *C. pyrenoidosa* (Emerson) อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะที่มีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนอยู่อย่างมากเกินพอ ที่สภาวะดังกล่าวนี้พบว่า แพลงค์ตอนมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 9.0 $\pm$ 1.0 %N

Shelef และคณะ (1970) ได้ทำการศึกษาการใช้แอมโมเนียของ *C. pyrenoidosa* โดยทำการเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่องในสภาวะที่มีการจำกัดไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่าที่ 19 °ซ. อัตราการเจริญเติบโตมีค่าประมาณ 1.5 วัน$^{-1}$ และไม่มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเจริญเติบโตเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.5 มก./ล. ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 0.65 มก./ล. จะได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตเท่ากับ 1 วัน$^{-1}$ อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดที่ 28.5 °ซ เท่ากับ 2.2 วัน$^{-1}$ ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 1.75 มก./ล. ในโรงบำบัดน้ำเสียจำลองที่มีแอมโมเนียเป็นแหล่งหลักของไนโตรเจน ซึ่งน้อยมากที่จะพบว่าไนโตรเจนเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต และยังพบว่าเซลล์แพลงค์ตอนจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ เท่ากับ 10 %N $\pm$ 2

จากการศึกษาความต้องการไนเตรตของ *C. pyrenoidosa* (Emerson) ภายใต้สภาวะการเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 19 °ซ และ 28.5 °ซ Shelef (1968) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดประมาณ 1.45 วัน$^{-1}$ ที่ 19 °ซ และประมาณ 2.22 วัน$^{-1}$ ที่ 28.5 °ซ ภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดไนเตรตไนโตรเจน ค่าคงที่การอิ่มตัว(Ks) เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของไนโตรเจนมีค่าประมาณ 0.9 มก./ล. ที่ 19 °ซ และ 1.2 มก./ล ที่ 28 °ซ และได้ค่ายิลด์เฉลี่ยเท่ากับ 12 มก.เซลล์/มก.ไนโตรเจน ที่ 28 °ซ และประมาณ 14 มก.เซลล์/มก.ไนโตรเจน ที่ 19 °ซ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซนต์องค์ประกอบไนโตรเจนจะมีค่าเท่ากับ 8.3 และ 7.15 %N ตามลำดับ ในการเพาะเลี้ยงอย่างหนาแน่น หลายครั้งที่ไนโตรเจนเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตอย่างรุนแรง และ Shelef พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของยิลด์สำหรับไนโตรเจนมีค่าสูงเท่ากับ 17.75 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบเพียง 5.65 % เท่านั้น

ภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดไนโตรเจน Porcella และคณะ (1970) พบว่าค่ายิลด์เท่ากับ 13 ถึง 18 มก.เซลล์/มก.ไนโตรเจน ซึ่งแสดงว่าเซลล์มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบจาก 5.5 ถึง 7.7 % รวมทั้ง Shelef (1968) ยังพบว่าไม่มีการจำกัดไนเตรตไนโตรเจนต่อ *C. pyrenoidosa* ที่อุณหภูมิปรกติถ้าความเข้มข้นของไนโตรเจนเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 5 มก./ล. แต่ถ้าความเข้มข้นของไนโตรเจนเริ่มต้นลดลงจาก 5 มก./ล. ถึง 0.3 มก./ล. จะมีการลดลงอย่างรวดเร็วของการเจริญเติบโต และหยุดการเจริญเติบโตที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.3 มก./ล.

2.4.3 คาร์บอนและการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอน

Oswald และ Gotaas (1958) ได้ทำการศึกษาปริมาณคาร์บอนในบ่อเพาะเลี้ยงกลางแจ้งอย่างต่อเนื่อง พบว่าเซลล์ที่เติบโตในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์รวมกับสารอนินทรีย์คาร์บอนอยู่ในช่วง 113 ถึง 211 มก./ล.ของคาร์บอน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 157 มก./ล. จะมีปริมาณคาร์บอนแปรผันอยู่ในช่วง 43.5 ถึง 60% ส่วนปริมาณการใช้คาร์บอนของแพลงค์ตอนเองก็แปรผันอยู่ในช่วง 10 ถึง 88 % ของปริมาณที่สามารถหาได้ ปริมาณการใช้นี้แปรผกผันกับความลึกของบ่อในช่วง 5 ถึง 45 ซ.ม. และที่ปริมาณการใช้คาร์บอนมีค่าสูงสุด ปริมาณคาร์บอนในเซลล์จะมีค่าประมาณ 50 % ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ค่าพีเอชในเวลากลางวันของระบบจะเท่ากับ 10.5 แต่เนื่องจากปริมาณคาร์บอนของเซลล์มีค่าสูงอย่างต่อเนื่องตลอด จึงทำให้สรุปได้ว่าคาร์บอนไม่ใช่ปัจจัยจำกัดที่สำคัญของการทดลองนี้

Goldman, Oswald และ Jenkins (1974) ได้ทำการศึกษาเพาะเลี้ยง *Scenedesmus quadricauda* อย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดอนินทรีย์คาร์บอน และมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.05 ถึง 7.61 จากการศึกษาพบว่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ จะแปรผันกับค่าความเข้มข้นของ อนินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด อัตราการเกิดของปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของ CO_2 ไม่เป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนในการศึกษานี้ ค่า Ks ของ *S. quadricauda* มีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.7 มก./ล. ที่พีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 7.05 -7.61 และมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดของอนินทรีย์คาร์บอนที่พบใน

แหล่งน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่ (ความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 23 มก./ล.) ดังนั้นจึงสนับสนุนสมมติฐานที่ว่า ไม่บ่อยที่อนินทรีย์คาร์บอนจะเป็นสารอาหารจำกัดในแหล่งน้ำธรรมชาติ และแหล่งน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีความกระด้างไบคาร์บอเนตเป็นบัฟเฟอร์หลัก ซึ่งระดับต่ำๆ ของอนินทรีย์คาร์บอนจะพบที่ค่าพีเอชสูงๆเท่านั้น เมื่อมีการบูมของแพลงค์ตอนเกิดขึ้นที่พีเอชสูงๆ จะมีการตกตะกอนของสารอาหารจำเป็นอื่นๆ เช่น ฟอสฟอรัส เหล็ก และสารอาหารอื่นๆ ทำให้มีการยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมของแพลงค์ตอน ดังนั้นอาจจะเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอน

2.5 ความสัมพันธ์ของสตอยชิโอเมตริก

ในการดำเนินงานทางชีวเคมีจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสารอาหารจำกัดการเจริญเติบโต กับจุดประสงค์การบำบัด สารอาหารจำกัดการเจริญเติบโตเป็นตัวที่ต้องการกำจัด เช่น ถ้าต้องการกำจัดสารอินทรีย์ละลาย ความเข้มข้นของสารอินทรีย์จะต้องเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต

ในการกำจัดสารอินทรีย์โดยการเจริญเติบโตของจุลชีพ จำเป็นต้องมีสารอาหาร เช่ น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และคาร์บอน ซึ่งปริมาณสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตหาได้จากสตอยชิโอเมตริกของระบบ

ความสัมพันธ์ของสตอยชิโอเมตริกของการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายการผลิตมวลของแพลงค์ตอน มีวิธีการดังนี้คือ

$$C_6H_{14}O_2N + 3.36\ O_2 \longrightarrow 1.61\ CO_2 + 0.12\ NH_4 + 0.12\ H^+ + 0.88\ C_5H_7O_2N$$

เมื่อ

$C_5H_7O_2N$ = สูตรเคมีของแบคทีเรีย

จากสมการข้างต้นของ Reynolds (1982) ซึ่งแสดงปริมาณการหายใจของแบคทีเรียทั้งหมดสำหรับสารอาหารอินทรีย์อย่างง่าย ($C_6H_{14}O_2N$) ซึ่งรวมการสังเคราะห์ของเซลล์และการหายใจที่เป็นส่วนของการออกซิเดชั่นทางชีวภาพไว้ด้วยนั้น จะได้ว่า 1 กรัมของสารอาหารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถผลิต CO_2 ได้เท่ากับ 0.56 กรัม

แพลงค์ตอนพืชเป็นจุลินทรีย์ที่มีคลอโรฟิลล์ ดังนั้นเมื่อได้รับแสงจะสามารถใช้ CO_2 ผลิตเซลล์แพลงค์ตอนใหม่ออกมา และในขณะเดียวกันจะให้ออกซิเจนออกมาด้วย ปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงของแพลงค์ตอนอาจเขียนได้ดังนี้

$$106\ CO_2 + 16\ NO_3 + HPO_4^{-2} + 122\ H_2O + 18\ H^+ \longrightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138\ O_2$$

เมื่อ

$C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ = สูตรเคมีของแพลงค์ตอน

จากปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงของแพลงค์ตอนจะได้ว่า 1 กรัมของ CO_2 สามารถเกิดแพลงค์ตอนขึ้นใหม่ได้ 0.76 กรัม

ดังนั้นจากสมการทั้งสองข้างต้น ถ้ารู้ความเข้มข้นของสารอาหารอินทรีย์ในกระแสเข้า ก็สามารถประมาณการผลิตแพลงค์ตอนทั้งหมดได้

2.6 ถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง

การกรองแบบไหลไม่ต่อเนื่อง จะเป็นการกรองที่ให้ปริมาณน้ำกับถังกรองเป็นช่วงๆไม่ต่อเนื่อง และจะมีระบบระบายน้ำและรวบรวมน้ำที่ไหลผ่านชั้นตัวกรองออกมา การกรองแบบนี้เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และยังเป็นวิธีที่สามารถกำจัดแพลงค์ตอนออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก ถ้ามีการออกแบบ การดำเนินการ และการก่อสร้างที่เหมาะสมแล้ว คุณภาพน้ำที่ได้ออกมาจะสูงมาก โดยทั่วไปจะใช้ระบบการกรองแบบนี้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ผ่านบ่อเกรอะหรือผ่านการบำบัดแบบแอโรบิคมาแล้ว และผ่านน้ำที่ได้จากการกรองเข้าสู่ระบบฆ่าเชื้อโรค ก่อนนำน้ำกลับไปใช้ใหม่หรือปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป

การใช้ถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้วได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่าถังกรองแบบนี้ให้น้ำที่ผ่านถังกรองออกมามีคุณภาพสูง โดยดูค่าของ BOD_5 และของแข็งแขวนลอย และโดยทั่วไปถ้าถังกรองมีสภาพแอโรบิค ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรตได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นในถังกรองจะเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย

Rich และ Wahlberg (1990) ได้ศึกษาผลการทำงานของระบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องจำนวน 9 แห่ง ซึ่งตั้งอยู่ที่ South Carolina โดยประเมินผลการทำงานจากค่า BOD_5 ,TSS และ NH_3-N มีการกำหนดอัตราการไหลอยู่ในช่วง 303 ถึง 12,869 ลบ.ม./วัน พบว่าค่าเฉลี่ย 50% ของ BOD_5 , TSS และ NH_3-N มีค่าเท่ากับ 7, 8 และ 0.9 มก./ล. ตามลำดับ ในขณะที่ค่า 95% จะเท่ากับ 19, 25 และ 3.1 มก./ล. ตามลำดับ และยังได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของระบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องกับระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ สรุปได้ว่าระบบถังกรองให้ค่า BOD_5 และ TSS มีค่าเท่ากับหรือดีกว่าระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ซึ่งเป็นระบบที่มีการดำเนินงานยุ่งยากกว่าแต่ใช้พื้นที่น้อยกว่า

Truax และ Shindala (1994) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการกรองเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อ และได้สรุปว่าระบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องสามารถให้

ตารางที่ 2.10 การใช้ถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว (U.S. Environmental Protection Agency, 1980)

แหล่งน้ำเข้า	ลักษณะของทรายกรอง			ความลึกของชั้นทราย (นิ้ว)	ความถี่ในการสูบน้ำเข้าถังกรอง (ครั้ง/วัน)	คุณภาพของน้ำที่ผ่านถังกรองแล้ว					
	ขนาดสัมฤทธิ์ (ES) (มม.)	สัมประสิทธิ์ความไม่สม่ำเสมอ (UC)	ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (ลบ.ม./ตร.ม.)			บีโอดี (มก./ล.)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ไนเตรต (มก./ล.)	อายุกรอง (เดือน)	อ้างอิง
บ่อเกรอะ	0.23-0.26	-	0.183	60	-	23[a]	-	8	32	6 - 9[b]	A
บ่อเกรอะ	0.41	-	0.094	60	-	11[a]	-	3	46	6 - 9[b]	A
ทริคคลิง ฟิลเตอร์	0.27	-	0.464	60	-	17[a]	-	2	29	6[b]	A
ทริคคลิง ฟิลเตอร์	0.41	-	0.57	60	-	18[a]	-	2	33	12[b]	A
การบำบัดขั้นต้น	0.25	-	0.112	30	1	6	6	5	19	4.5	B
การบำบัดขั้นต้น	0.25	-	0.191	30	2	3	8	2	22	36	B
การบำบัดขั้นต้น	1.04	-	-	30	2	28	36	10	13	>54	B
การบำบัดขั้นต้น	1.04	-	0.570	30	24	4	9	3	17	>54	B
บ่อเกรอะ	0.45	3	0.204	30	3-6	8	4	3	25	3	C
บ่อเติมอากาศ	0.19	3.3	0.155	30	3-6	3	9	0.3	34	12	C
บ่อเติมอากาศกลางแจ้ง ฤดูร้อน	0.19	9.7	0.370	36	1	2	3	0.5	4.0	1	D
ฤดูหนาว	0.19	9.7	0.370	36	1	9.4	9.6	4.6	1.0	4	D

[a] วิเคราะห์จากปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไป

[b] ชุดที่ผิวหน้าทรายลึก 3 นิ้ว ทุกอาทิตย์

A = Clark และ Gage (1909)

B = Emerson (1954)

C = Municipal Environmental Research Laboratory (1978)

D = Harris และคณะ (1977)

กระแสน้ำออกที่มีคุณภาพตามที่คาดหวังได้ดีกว่าแบบอื่นๆ และทำการศึกษาขนาดต่างๆของทรายตัวกลางในถังกรองต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ โดยรายละเอียดของทรายตัวกลางในถังกรองและผลของคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

2.6.1 กลไกของการกรอง

การผ่านน้ำเสียเข้าไปในถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง จะเกิดกลไกหลายอย่างในการกรองสารต่างๆ ออกจากน้ำ มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นกับทั้งของแข็งแขวนลอย และสารละลายที่มีอยู่ในน้ำเสีย Metcalf และ Eddy (1991) ได้กล่าวไว้ว่ามีกลไก 2 อย่างเกิดขึ้นในการกรองสารต่างๆออกจากน้ำ กลไกแรกเป็นการกำจัดทางกายภาพของสารแขวนลอยโดยการติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย การดูดติดผิว และการตกตะกอนอยู่บนเม็ดทราย และกลไกที่สองเป็นการกำจัดทางชีวเคมีของคอลลอยด์และสารอินทรีย์ละลายโดยการเปลี่ยนไปเป็นรูปที่เสถียรขึ้น

Borchardt และ O' Melia (1961) ; Fair, Geyer และ Okun (1968) ; Folkman และ Wachs (1970) พบว่าการกรองเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นกรองที่ความลึก 5-6 เซนติเมตรจากผิวหน้าเท่านั้น การเกิดลักษณะนี้อาจเนื่องมาจากเหตุผล 3 ข้อ คือ ข้อแรกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างเม็ดทรายติดค้างอยู่บนผิวหน้าของชั้นทรายกรอง การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้ทำให้อนุภาคต่างๆถูกกักไว้บนผิวหน้า และทำให้ขนาดของช่องว่างเล็กลง จุลินทรีย์จะยึดเกาะกันหรือจะเกิด Schmutzdecke ขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นตัวกรองซึ่งทำให้การกรองมีประสิทธิภาพสูงกว่ากลไกแบบติดค้างอยู่ระหว่างช่องว่างเม็ดทรายอย่างเดียว เหตุผลข้อที่ 2 คือ ที่ผิวหน้าของชั้นกรองที่ความลึกประมาณ 2-3 เซนติเมตร จะเป็นบริเวณที่มีการเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์มากที่สุด เพราะบริเวณนี้จะมีออกซิเจนมากที่สุดนั้นเอง แบคทีเรียจะเกิดขึ้นคลุมทั่วเม็ดทรายในบริเวณที่มีออกซิเจนและแบคทีเรียพวกนี้จะกินและย่อยสลายสารอินทรีย์ซับซ้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้นๆ (Metcalf และ Eddy, 1991) และเหตุผลข้อที่ 3 คือ จากลักษณะทางชลศาสตร์ของถังกรอง ซึ่งที่ผิวหน้าของชั้นทรายหนาประมาณ 2-3 เซนติเมตร จะมีความเร็วต้นของการกรองสูงที่สุด และความเร็วที่สูงนี้จะทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ควรจะดูดติดอยู่บนผิวเม็ดทรายถูกผลักไปตามกระแสน้ำ และนอกจากนี้โมเมนตัมและแรงดึงดูดจะทำให้อนุภาคแขวนลอยดังกล่าวมีการเคลื่อนที่ขวางเส้นทางการไหลและเข้าไปสัมผัสกับผิวเม็ดทราย จากนั้นจะถูกดูดติดที่ผิวเม็ดทรายด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์และแรงวันเดอร์วาล์ว

การศึกษาการกำจัดแพลงค์ตอนของ Folkman และ Wachs (1970) พบว่าอนุภาคต่างๆ ดูดติดกับผิวของเม็ดทรายเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าที่ตรงกันข้ามกัน และทรายกรองที่มีเฟริคอิออนและอลูมินัมอิออนจะมีประสิทธิภาพในการกรองแพลงค์ตอนและแบคทีเรียมากขึ้น และจากการศึกษาของ Ives (1961) พบว่าที่ความลึกของชั้นทรายกรอง ที่ต่ำกว่าผิวหน้าที่ใช้ในการกรอง การสูญเสียเฮดจะมีค่าคงที่และแพลงค์ตอนสามารถจะทะลุไปได้ทั่วทั้งชั้นตัวกรอง

ตารางที่ 2.11 รายละเอียดของตัวกลางในถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง

ตัวกลาง	ขนาดสัมฤทธิ์ (ES) D_{10} , มม.	สัมประสิทธิ์ความไม่สม่ำเสมอ (UC)
1	0.70	2.1
2	0.35	1.4
3	0.37	7.0
4	0.18	2.7

2.6.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสำหรับถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้วได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.13

ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ของถังกรองแบบนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวกรองที่ใช้ และลักษณะสมบัติของน้ำเสีย โดยภาระบรรทุกทางชลศาสตร์จะมีผลต่อระยะเวลาในการกรอง

น้ำเสียที่จะนำมากรองด้วยถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง จะต้องมีการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำมาก่อน อย่างน้อยที่สุดควรผ่านการตกตะกอนหรือผ่านบ่อเกรอะมาแล้ว และนอกจากนี้หากน้ำเสียได้ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการใช้ออกซิเจนมาแล้ว ก่อนนำมาปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อด้วยถังกรอง ก็จะมีผลทำให้สามารถกรองน้ำดังกล่าวได้ในอัตรากรองที่สูง และระยะเวลาที่จะต้องเปลี่ยนตัวกลางของถังกรองจะยาวมากขึ้นหรือเกิดการอุดตันของถังกรองช้าลง

ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) ของสารตัวกลางสำหรับถังกรองแบบนี้จะใช้ค่าในช่วง 0.35 ถึง 1.00 มม. และสัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอมีค่าน้อยกว่า 4 แต่ค่าที่นิยมใช้คือน้อยกว่า 3.5 สารตัวกลางที่มีขนาดเล็กจะให้น้ำที่ผ่านถังกรองมีคุณภาพสูงแต่จะทำให้ถังกรองเกิดการอุดตันเร็ว และถ้ามีขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้การกระจายตัวของน้ำผ่านชั้นกรองได้ไม่ดีและได้น้ำทิ้งคุณภาพต่ำ

ระบบระบายน้ำที่กรองแล้ว โดยทั่วไปจะใช้ท่อเจาะรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว (10 ซม.) และท่อระบายนี้จะวางไว้ที่ก้นบ่อให้มีความชันประมาณ 0.5 ถึง 1 % และส่วนที่ใช้รองรับทรายหรือตัวกลางเพื่อป้องกันไม่ให้มันหลุดออกไปพร้อมกับน้ำที่กรองแล้ว โดยปรกติจะใช้กรวดหรือหินที่มีขนาดตั้ง

ตารางที่ 2.12 สรุปผลคุณภาพน้ำที่ได้จากถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง (Truax และ Shindala, 1994)

พารามิเตอร์ [1]	ค่าทางสถิติ [2]	น้ำเข้าถังกรอง	ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (ลบ.ม./ตร.ม.-วัน)							
			ตัวกลางที่ 1		ตัวกลางที่ 2		ตัวกลางที่ 3		ตัวกลางที่ 4	
			0.2	1.2	0.2	1.2	0.2	1.2	0.2	1.2
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	Mean	100	18	32	13	39	13	41	13	25
	S.D.	38	9	17	5	12	6	15	4	8
ของแข็งระเหยแขวนลอย	Mean	86	13	22	9	26	10	27	7	17
	S.D.	32	5	12	4	5	4	9	2	4
ซีโอดี	Mean	156	79	109	73	105	59	91	48	75
	S.D.	38	21	35	21	31	19	32	12	32
บีโอดี	Mean	31	16	20	13	20	11	16	6	14
	S.D.	7	6	7	6	8	4	5	4	7
สารอินทรีย์ไนโตรเจน	Mean	11.6	5.6	7.9	4.6	7.3	6.0	7.0	4.3	7.8
	S.D.	4.2	1.7	3.2	2.1	2.2	2.2	2.8	2.2	2.3
แอมโมเนีย	Mean	3.1	0.4	1.6	0.5	1.2	0.7	1.7	0.6	1.2
	S.D.	1.5	0.6	0.9	0.7	0.7	0.5	1.1	0.8	0.9
ไนเตรต	Mean	0.3	0.6	1.1	2.9	2.6	2.8	1.1	3.1	1.5
	S.D.	0.2	1.9	1.0	2.0	2.4	2.4	1.8	2.6	1.7
ฟอสเฟต	Mean	5.7	3.5	4.9	5.5	4.9	4.0	4.9	4.0	3.9
	S.D.	2.6	2.6	3.0	2.3	1.4	3.1	3.3	2.8	3.1
จำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมด	Mean	165×10^3	92×10^3	69×10^3	71×10^3	83×10^3	47×10^3	46×10^3	38×10^3	28×10^3
	S.D.	321×10^3	257×10^3	168×10^3	149×10^3	274×10^3	182×10^3	117×10^3	215×10^3	41×10^3
พีเอช	Mean	7.8	7.2	7.2	7.2	7.0	6.9	7.0	7.0	7.0
	S.D.	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

[1] พารามิเตอร์ทุกตัวมีหน่วยเป็น มก./ล. ยกเว้น จำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมดมีหน่วยเป็น MPN/100 มล. และ พีเอชมีหน่วยตามมาตรฐานพีเอช

[2] Mean หมายถึงค่าเฉลี่ยเลขคณิต , S.D. หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2.13 เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง

(Metcalf และ Eddy, 1991 และ U.S. Environmental Protection Agency, 1980)

พารามิเตอร์	ข้อกำหนดของการออกแบบ
การบำบัดขั้นต้น	การตกตะกอน (บ่อเกรอะ หรือ เทียบเท่า)
ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์	
ผ่านบ่อเกรอะมาแล้ว	0.082 - 0.204 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน (2.0 - 5.0 แกลลอน/ตารางฟุต-วัน)
ผ่านการบำบัดแบบแอโรบิคมาแล้ว	0.204 - 0.612 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน (5.0 - 15.0 แกลลอน/ตารางฟุต-วัน)
สารตัวกลาง	
วัสดุที่ใช้	วัสดุที่มีลักษณะกลมและทนทานต่อการชะล้าง (มีสารอินทรีย์น้อยกว่า 1 % โดยน้ำหนัก)
ขนาดสัมฤทธิ์ (ES)	0.35 - 1.00 มิลลิเมตร
สัมประสิทธิ์ความไม่สม่ำเสมอ (UC)	< 4.0 (นิยมใช้ <3.5)
ความลึก	40 - 90 เซนติเมตร
ระบบระบายน้ำที่กรองแล้ว	
วัสดุที่ใช้	ท่อเจาะรู
ความลาดชัน	0.5 -1.0 %
ชั้นของระบบระบายน้ำ	กรวดหรือเศษหินที่ทนทานต่อการชะล้าง (1/4 - 2 นิ้ว)
ท่อระบายอากาศ	ด้านต้นท่อระบายน้ำที่กรองแล้ว
ระบบกระจายน้ำเข้าถังกรอง	รางน้ำวางบนผิวหน้าถังกรอง; แผ่นกันการกัดเซาะวางที่กลางถังหรือที่มุมของถังกรอง; ระบบหัวกระจายน้ำ

แต่ $\frac{1}{4}$ ถึง 2 นิ้ว เรียงกันเป็นชั้นๆ ตามลำดับโดยมีขนาดใหญ่ที่สุดเริ่มเรียงที่ก้นถังกรองขึ้นไปให้มีความสูงอย่างน้อย 10 นิ้ว

2.6.3 การทำงานและการดูแลรักษา

ถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องมีการควบคุมหรือดูแลรักษาน้อย ตารางที่ 2.14 ได้สรุปความต้องการของการทำงานและการดูแลรักษาถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง

การอุดตันของถังกรองจะเกิดขึ้น เมื่อช่องว่างระหว่างเม็ดตัวกลางเริ่มถูกอุดด้วยสารที่เฉื่อยและย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้การไหลของน้ำออกจากถังกรองต่ำกว่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เฉลี่ยและเกิดน้ำขังขึ้นอย่างถาวรในถังกรอง เมื่อเกิดการกักขังน้ำขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับที่สูงกว่า 12 นิ้ว (30 ซม.) เหนือระดับผิวหน้าของทราย ซึ่งที่ระดับดังกล่าวนี้สามารถใช้เตือนให้ผู้ควบคุมระบบได้ทราบว่าเกิดการอุดตันของถังกรองขึ้นแล้วเพื่อจะได้มีการขุดทรายที่ผิวหน้าออกหรือเปลี่ยนทรายใหม่ต่อไป

จากข้อมูลที่มีแสดงให้เห็นว่า ถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องที่รับน้ำทิ้งจากบ่อเกรอะจะเกิดการอุดตันในเวลาประมาณ 30 และ 150 วัน สำหรับทรายที่มีขนาดสัมฤทธิ์เท่ากับ 0.2 มม. และ 0.6 มม. ตามลำดับ (MERL,1978) และถ้าน้ำทิ้งที่ออกจากการบำบัดด้วยกระบวนการแบบแอโรบิคมีความเข้มข้นของ SS ต่ำกว่า 50 มก./ล. ก็สามารถกรองได้ด้วยอัตราการกรองเดียวกันกับน้ำจากบ่อเกรอะข้างต้นและจะอุดตันในเวลาประมาณ 12 เดือน (MERL,1978 ; Emerson,1954)

การดูแลรักษาตัวกลางจะรวมทั้งขั้นตอนการดูแลรักษาที่ทำเป็นประจำ และการเปลี่ยนตัวกลางใหม่ซึ่งขึ้นอยู่กับการอุดตันของถังกรอง การขุดผิวหน้าของตัวกลางเป็นประจำเป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดี แต่ยังไม่มีหลักฐานแน่นอน แม้ว่าจะมีการใช้ในหลายๆการทดลองมาแล้ว (MERL,1978 ; Schwartz และคณะ,1967; Clark และ Gage,1909; Hines และ Favreau,1975) และถังกรองที่เปิดโล่งต้องมีการกำจัดพวกหญ้าหรือวัชพืชออกด้วย

การอุดตันของถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในที่สุดจะต้องมีการเปลี่ยนตัวกลางใหม่ การเปลี่ยนตัวกลางเช่นนี้จะต้องใช้เวลาในการฟื้นตัวกลับคืนมาเหมือนเดิมนานมากกว่าการขุดที่ผิวหน้าตัวกลางแต่ไม่ได้เอาตัวกลางเดิมออก (MERL, 1978 ; Schwartz และคณะ,1967) การกำจัดทรายชั้นบนออกแล้วใส่ทรายที่สะอาดเข้าไปแทนเมื่อความลึกของชั้นทรายน้อยกว่า 24-30 นิ้ว (61-76 ซม.) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับถังกรองที่อุดตันในชั้นต้นที่ผิวหน้าตัวกลางและกับถังกรองที่รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบแอโรบิคด้วย (MERL,1978) อย่างไรก็ดีการอุดตันในที่ลึกๆ หลายครั้งที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในถังกรองแบบไหลไม่ต่อเนื่อง ซึ่งถังกรองที่เกิดการอุดตันแบบดังกล่าวนี้ต้องการสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์เพื่อมาออกซิเดชันสารที่เป็นตัวอุดตันในถังกรองได้ และการปล่อยให้ตัวกลางพักจากการกรองในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ถังกรองกลับคืนสภาพมาใช้ในการกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป (MERL, 1978)

ตารางที่ 2.14 การทำงานและการดูแลรักษาถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง

(U.S. Environmental Protection Agency, 1980)

รายการ	การทำงานและการดูแลรักษาที่ต้องการ
การบำบัดขั้นต้น	ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้
ถังกรอง	
เครื่องสูบน้ำและตัวควบคุมการทำงาน	ตรวจสอบทุกๆ 3 เดือน
นาฬิกาตั้งเวลาควบคุมการทำงาน	ตรวจสอบและปรับแก้ทุกๆ 3 เดือน
เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ	ตรวจสอบทุกๆ 3 เดือน
ตัวกลางของถังกรอง	
การขุดผิวหน้า	ทุกๆ 3 เดือน, ลึกประมาณ 3 นิ้ว
การเปลี่ยนตัวกลาง	
น้ำจากบ่อเกรอะ	เปลี่ยนตัวกลางเมื่อมีน้ำกักขังสูงกว่า 12 นิ้ว เปลี่ยนชั้นทรายผิวบนลึก 2-3 นิ้ว ; พักทิ้งไว้ 60 วัน โดยใช้ถังกรองใบอื่นทำงาน
น้ำจากการบำบัดแบบแอโรบิค	เปลี่ยนตัวกลางเมื่อมีน้ำกักขังสูงกว่า 12 นิ้ว เปลี่ยนชั้นทรายผิวบนลึก 2-3 นิ้ว ; ทำงานต่อได้
อื่นๆ	การถอนหญ้า การดูแลรักษาอุปกรณ์ที่ใช้กระจายน้ำ ตรวจสอบเครื่องเตือนระดับน้ำ