

ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

Effects of Nitrogen and Phosphorus on Eutrophication in Water Bodies and Nitrogen and Phosphorus Removal

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์¹ และ รัฐชา ชัยชนะ^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณมากที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การเกษตร ชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรม ที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ เป็นสาเหตุของการเกิดแพลงก์ตอนบลูมหรือยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำจัดการบลูมของแพลงก์ตอนพืชก่อให้เกิดปัญหาทางลบมากมายทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ปัญหาที่สำคัญได้แก่ การสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพของทั้งพืชและสัตว์เนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมส่งผลต่อระบบการกรองน้ำสำหรับแหล่งน้ำดิบในการทำน้ำประปา นอกจากนั้นแพลงก์ตอนบลูมโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกิดจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินยังมีการสร้างสารพิษ เช่น microcystins, anatoxin-a และ homoanatoxin-a ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ การเกิดยูโทรฟิเคชันยังทำให้แหล่งน้ำสูญเสียทัศนียภาพและความสวยงามด้านการพักผ่อนหย่อนใจ เนื่องจากสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ของแพลงก์ตอนพืชที่เน่าสลายและทำให้ไม่สามารถทำกิจกรรมทางน้ำในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การว่ายน้ำ ด้วยปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้มีแนวความคิดในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำที่ชุมชนและอุตสาหกรรมซึ่งยังเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย เพราะในปัจจุบันประเทศไทยมีเฉพาะมาตรฐานน้ำทิ้งที่พิจารณาจากค่าบีโอดีเป็นประเด็นสำคัญ ส่วนค่ามาตรฐานน้ำทิ้งในรูปของไนโตรเจนเน้นที่รูปแอมโมเนีย แต่ไม่มีค่าของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ซึ่งไม่เพียงพอต่อการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม ถ้ามีการควบคุมปริมาณน้ำทิ้งให้มีค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ในระดับต่ำแล้วอาจช่วยทำให้สามารถนำน้ำกลับมาใช้ซ้ำมีความเป็นไปได้สูง ซึ่งช่วยประหยัดการใช้น้ำดิบที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา หรือสามารถนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นเช่น น้ำเพื่อการเกษตรและที่สำคัญยังเป็นการลดปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำอีกด้วย

คำสำคัญ

ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ยูโทรฟิเคชัน การบำบัดน้ำเสีย

Abstract

Excessive amounts of nitrogen (N) and phosphorus (P) compounds from human activities such as agriculture, residential areas and industry can cause plankton bloom or eutrophication in freshwater bodies. The bloom of phytoplankton causes many negative problems on economy, society and environment. The major problems caused by eutrophication include loss of biodiversity of both plants and animals due to improper environmental conditions, problems of water filtration systems for drinking water. The phytoplankton bloom of blue green algae in particular also creates toxins such as microcystins, anatoxin-a and homoanatoxin-a, which directly affect the health of humans and animals. Moreover, eutrophication results in the loss of beautiful scenery due to unpleasant hue and odor caused by rotten algae and influences recreational activities such as swimming. Due to adverse impact of eutrophication, a new concept in the treatment of nitrogen and phosphorus from sewage of industry and community is introduced, which is relatively new to Thailand. Presently Thailand has an effluent standard for BOD and TKN but no TN. These standards that might not be sufficient to solve water pollution problems. If there is a new standard set for nitrogen and phosphorus, then the effluent will be able to re-use and thus saving the raw water to use in the drinking water. It will also be beneficial to agriculture and most importantly, low N and P from wastewater treatment will help to reduce the problems of eutrophication in freshwater bodies.

Keywords

nitrogen, phosphorus, eutrophication, wastewater treatment

1. ธาตุอาหารพืชที่ส่งผลต่อการเกิดยูโทรฟิเคชัน

ธาตุอาหารทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีความสำคัญอย่างมากในระบบนิเวศแหล่งน้ำจืด เพราะสิ่งมีชีวิตกลุ่มออโรโตโทรป (autotrophs) เช่น แพลงก์ตอนพืช ซึ่งเป็นผู้ผลิตเบื้องต้นในแหล่งน้ำต้องนำมาใช้ในการเจริญเติบโต แต่ในธรรมชาติธาตุเหล่านี้มีปริมาณน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่สิ่งมีชีวิตต้องการ ดังนั้นจึงถือเป็นปัจจัยจำกัดต่อการเจริญเติบโต (limiting factors) ธาตุไนโตรเจนมีส่วนสำคัญในการนำมาใช้สร้างโปรตีนและกรดนิวคลีอิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของยีน ในขณะที่ฟอสฟอรัสเป็น

องค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก และสารประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ ถึงแม้ในบรรยากาศจะมีแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ แต่มีสิ่งมีชีวิตเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศมาใช้ได้โดยตรง เช่น แบคทีเรียหรือสาหร่ายบางชนิด ดังนั้นสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ จะได้รับไนโตรเจนจากการบริโภคสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นเป็นอาหารแหล่งที่มาของไนโตรเจนยังมาจากปุ๋ย ซึ่งไนโตรเจนมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีทำให้เกิดการชะล้างสู่แหล่งน้ำธรรมชาติสูง ในส่วนของฟอสฟอรัสพบว่าเป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยในธรรมชาติ โดยมีต้นกำเนิดมาจากหินและแร่ธรรมชาติ ฟอสฟอรัสยังได้จากปุ๋ย แต่ละลายน้ำได้ไม่ดีเท่า

ไนโตรเจน อีกทั้งยังถูกยึดติดกับอนุภาคดินเหนียว ทำให้ในแหล่งน้ำธรรมชาติปริมาณฟอสฟอรัสจึงมีเพียงไม่กี่ไมโครกรัมต่อลิตร ในขณะที่ไนโตรเจนมีปริมาณสูงกว่าฟอสฟอรัสประมาณ 10-20 เท่า [1, 2]

รูปแบบของสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำ ได้แก่ กลุ่มสารประกอบอนินทรีย์ ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ เช่น ไนเตรต ไนไตรท์ และแอมโมเนียม ซึ่งมีแหล่งที่มาหลักจากภาคการเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี สำหรับสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ กลุ่มฟอสเฟตและโพลิฟอสเฟต มีแหล่งที่มาหลักจากน้ำทิ้งจากชุมชน รวมถึงน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว [1, 3] สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสยังอยู่ในรูปที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ได้แก่ ไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในกรดอะมิโน หรือน้ำตาลฟอสเฟต รวมถึงอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า คอลลอยด์ เช่น ดินเหนียว และแร่ธาตุต่างๆ ที่ฟอสเฟตถูกดูดซับไว้ หรืออาจจะเป็นอนุภาคหรือเศษซากของสารอินทรีย์หรือที่เรียกว่า ดีทริตัส (detritus) สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถถูกนำมาใช้ได้โดยตรงหรือต้องผ่านกระบวนการทางเคมีและชีวภาพในการเปลี่ยนรูปเพื่อให้แพลงก์ตอนพืชซึ่งเป็นผู้ผลิตเบื้องต้นในแหล่งน้ำสามารถดึงนำมาใช้ได้ในการเจริญเติบโต

การวิเคราะห์หาปัจจัยจำกัดของธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัด ไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัด หรือทั้งฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัด การพิจารณาหาปัจจัยจำกัดมี 2 แนวทาง คือ การพิจารณาจากค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณไนโตรเจนรวม (total nitrogen: TN) ต่อปริมาณฟอสฟอรัสรวม (total phosphorus: TP) และการพิจารณาจากปริมาณฟอสฟอรัสรวมเพียงอย่างเดียว (phosphorus threshold

value) [4] ถ้าแหล่งน้ำมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณไนโตรเจนรวมต่อปริมาณฟอสฟอรัสรวม น้อยกว่า 10 แสดงว่าไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช ถ้าแหล่งน้ำมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณไนโตรเจนรวมต่อปริมาณฟอสฟอรัสรวมระหว่าง 10 ถึง 17 แสดงว่าไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช และถ้าแหล่งน้ำมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณไนโตรเจนรวมต่อปริมาณฟอสฟอรัสรวมมากกว่า 17 แสดงว่า ฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช ถ้าพิจารณาจากปริมาณฟอสฟอรัสรวมเพียงอย่างเดียวพบว่า ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมาณฟอสฟอรัสรวมเกินกว่า 100 ไมโครกรัม/ล. มีแนวโน้มที่ไนโตรเจนจะเป็นปัจจัยจำกัดเพราะฟอสฟอรัสมีปริมาณมาก แต่ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมาณฟอสฟอรัสรวมต่ำกว่า 50 ไมโครกรัม/ล. มีแนวโน้มที่ฟอสฟอรัสจะเป็นปัจจัยจำกัด

2. การเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำจืด

ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) หรือมลภาวะจากธาตุอาหารพืช (nutrient pollution) [5] เกิดจากการบลูมของแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำจืด เช่น ตามคูคลอง หนอง บึง ทะเลสาบ หรืออ่างเก็บน้ำ ซึ่งถือเป็นหนึ่งในปัญหามลพิษทางน้ำที่สำคัญที่เกิดขึ้นในทุกทวีปทั่วโลก สาเหตุหลักของปัญหามาจากแหล่งน้ำได้รับสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณมากจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การเกษตร อุตสาหกรรม หรือน้ำทิ้งจากบ้านเรือน สารอาหารเหล่านี้จะไปกระตุ้นให้แพลงก์ตอนพืชเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนส่งผลให้แหล่งน้ำไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ได้

โดยธรรมชาติแล้ว แหล่งน้ำต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพตาม

ระยะเวลา หรือที่เรียกกันว่า succession โดยแหล่งน้ำจะมีความอุดมสมบูรณ์ (trophic levels) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากแหล่งน้ำที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (oligotrophic) ไปเป็นแหล่งน้ำที่มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง (mesotrophic) และกลายเป็นแหล่งน้ำที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง (eutrophic) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติดังกล่าวนั้นใช้ระยะเวลานานหลายสิบปีถึงหลายร้อยปี แต่ผลจากการพัฒนาต่างๆ ของมนุษย์ในปัจจุบันส่งผลให้ปัญหายูโทรฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว บ่อยครั้ง และรุนแรงขึ้น นักวิทยาศาสตร์ประเมินว่าแหล่งน้ำที่เกิดการบวมของแพลงก์ตอนพืชจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์มากกว่า 40 ไมโครกรัม/ล. และถ้าปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่า 100 ไมโครกรัม/ล. โอกาสที่ปลาในแหล่งน้ำจะตายจะมีสูงมากเพราะเกิดปัญหาขาดแคลนออกซิเจน [4]

แพลงก์ตอนพืชกลุ่มหลักที่เกิดการบวมในแหล่งน้ำ ได้แก่ แพลงก์ตอนพืชสีเขียวแกมน้ำเงิน หรือ cyanobacteria (blue green algae) ทั้งนี้แพลงก์ตอนพืชกลุ่มดังกล่าวมีกลไกต่างๆ ที่ช่วยในการบวม ได้แก่ ความสามารถในการลอยตัวขึ้นลงจากผิวน้ำตามปริมาณแสงและปริมาณสารอาหารในแหล่งน้ำ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินยังสามารถตรึงไนโตรเจนได้จากอากาศโดยตรงแล้วเปลี่ยนรูปให้เป็นสารประกอบแอมโมเนียมภายในเซลล์ โดยผ่านกระบวนการทางชีวเคมีที่เรียกว่า nitrogen fixation [6] ดังนั้นแพลงก์ตอนพืชกลุ่มนี้จึงสามารถรักษาระดับการเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง เพราะมีสารประกอบไนโตรเจนอย่างเพียงพอ แพลงก์ตอนพืชกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงินยังสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพขาดแคลนสารประกอบฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ ทั้งนี้เพราะแพลงก์ตอนพืชกลุ่มนี้สามารถดูดซึมและเก็บกักสารประกอบฟอสฟอรัส ในขณะที่ยังมีอยู่ในปริมาณมากในแหล่งน้ำ เพื่อนำไว้ใช้เมื่อยามขาดแคลนแพลงก์ตอนพืชสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดสามารถ

เก็บกักฟอสฟอรัสได้นานหลายวันจนกระทั่งหลายสัปดาห์ นอกจากนั้นการที่แพลงก์ตอนกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถฟอร์มตัวรวมกันเป็นโคโลนีขนาดใหญ่ได้ ทำให้ไม่ถูกกินโดยแพลงก์ตอนสัตว์ และแพลงก์ตอนกลุ่มนี้บางชนิดยังผลิตสารเคมีที่ส่งผลต่อการกินของแพลงก์ตอนสัตว์อีกด้วย

ตัวอย่างของแพลงก์ตอนพืชกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงิน ได้แก่ *Aphanizomenon flos-aquae* ซึ่งเป็นชนิดที่พบได้ทั่วไป มีลักษณะยาวเป็นเส้นสาย ลอยตัวได้ในน้ำ ฟอร์มกลุ่มเป็นโคโลนีขนาดใหญ่ที่ยากต่อการกินของแพลงก์ตอนสัตว์ สำหรับ *Anabaena* เป็นชนิดที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้และมีลักษณะเป็นสายยาว (N_2 -fixing filamentous algae) ส่วน *Microcystis* มีลักษณะเป็นโคโลนี แต่ไม่สามารถตรึงไนโตรเจนได้

3. การเกิดยูโทรฟิเคชันในประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ประสบปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันหรือการบวมของแพลงก์ตอนพืช จากการศึกษาจากเอกสารต่างๆ พบว่ามีข้อมูลการเกิดยูโทรฟิเคชันในภาคต่างๆ เช่น ภาคเหนือ อ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ มีรายงานการบวมของแพลงก์ตอนพืช *Microcystis aeruginosa* จำนวนมาก โดยแพลงก์ตอนพืชชนิดนี้สามารถผลิตสารพิษไมโครซิสตินได้ [7] ในส่วนของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากข้อมูลของชัยวัฒน์ประกิระเค [8] จากสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 10 ระบุว่า จังหวัดขอนแก่นมีแหล่งน้ำหลายแห่งที่เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน โดยเฉพาะที่หนองของแมว ในพื้นที่ตำบลศิลา อำเภอมือเก็ง ที่เกิดการบวมของแพลงก์ตอนพืชอย่างมากโดยมีสาเหตุมาจากน้ำทิ้งชุมชนเพราะไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียหรือที่บริเวณบึงหนองโคตร มีรายงานการบวมของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพราะบึงดังกล่าวเป็น

พื้นที่รองรับน้ำทั้งจากชุมชน และเมื่อแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ตายลงได้ส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นอย่างรุนแรง หรือบริเวณแหล่งท่องเที่ยวน้ำตกตาดโดน จังหวัดชัยภูมิ ก็พบปัญหาการบลูมของแพลงก์ตอนพืชด้วยเช่นกัน แต่สถานการณ์ยังไม่รุนแรงมากนัก ถ้าหากในอนาคตไม่มีการแก้ไข อาจส่งผลกระทบต่อท่องเที่ยวได้ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีรายงานการเกิดยูโทรฟิเคชันในอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำตะคอง ในปี 2541 ที่พบสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วจนส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา [9] ในส่วนของพื้นที่ภาคกลางพบการบลูมของแพลงก์ตอนพืชที่อ่างเก็บน้ำห้วยสงสัย ตำบลเขากระปุก อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี [10, 11] และจากการศึกษาของ Chaichana [11] พบการบลูมของแพลงก์ตอนพืชสกุล *Auracoseira* บริเวณภาคตะวันออก ในอ่างเก็บน้ำบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ส่วนในพื้นที่ภาคใต้ มีรายงานการเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา บริเวณทะเลหลวง ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก โดยเฉพาะบริเวณทะเลหลวง พบปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ หรือมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชสูงที่สุด [13]

จากข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นแล้วว่าปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันในประเทศไทยเกิดขึ้นในแหล่งน้ำทั่วทุกภูมิภาคและส่วนใหญ่ยังเกิดในแหล่งน้ำที่มีความสำคัญต่อการอุปโภคและบริโภคของประชาชนอีกด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมแหล่งกำเนิดธาตุอาหารหรือจะต้องทำการบำบัดธาตุอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [14, 3] อีกทั้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องรวมถึงประชาชนจะต้องร่วมมือกันในการหามาตรการเฝ้าระวัง ป้องกัน รวมถึงการแก้ไขฟื้นฟูแหล่งน้ำที่มีการบลูมของแพลงก์ตอนพืชเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เหมือนเดิม

4. ผลกระทบจากการเกิดยูโทรฟิเคชัน

การบลูมของแพลงก์ตอนพืชก่อให้เกิดปัญหาทางลบต่างๆ มากมาย ในด้านสิ่งแวดล้อมปัญหาที่เกิดขึ้น ได้แก่ การขาดแคลนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำโดยเฉพาะในช่วงเวลากลางคืนที่พืชและแพลงก์ตอนพืชที่บลูมมีการหายใจโดยใช้ออกซิเจนในน้ำ ทำให้สัตว์น้ำขาดอากาศหายใจ และเมื่อเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชที่บลูมตายลงพร้อมๆ กัน ทำให้เกิดการย่อยสลายและทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และยังคงเกิดเชื้อโรคขึ้นตามมาอีกด้วย [15] การที่แหล่งน้ำมีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลงยังส่งผลกระทบต่อการสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพของทั้งพืชและสัตว์ในแหล่งน้ำ [1, 16] แพลงก์ตอนพืชที่บลูมหนาแน่นเป็นแผ่นๆ บริเวณผิวน้ำน้ำจะไปบดบังแสง ทำให้น้ำขุ่น และกันไม่ให้แสงส่องผ่านมายังได้พื้นท้องน้ำ ทำให้ไปจำกัดการเจริญเติบโตของพืชใต้น้ำ

การบลูมของแพลงก์ตอนพืชยังอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ แพลงก์ตอนพืชกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เช่น *Anabaena circinalis* สามารถสร้างสารพิษที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท ส่วนชนิดที่สร้างสารพิษที่ออกฤทธิ์ต่อดับและอวัยวะอื่นๆ ภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ *Microcystis aeruginosa* ที่สร้างสารพิษ microcystins, anatoxin-a และ homoanatoxin-a [17] สารพิษเหล่านี้ นอกจากจะส่งผลโดยตรงต่อสัตว์แล้ว ยังมีรายงานว่าส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อีกด้วย เช่น เกิดการระคายเคืองบริเวณผิวหนัง การแพ้ในรูปแบบต่างๆ เกิดอาการเจ็บที่กล้ามเนื้อและข้อต่อ และส่งผลต่อการทำลายตับและไต รวมถึงระบบประสาทต่างๆ [17-20] นอกจากนั้นยังมีรายงานในประเทศจีนว่าประชาชนที่ดื่มน้ำที่มีการบลูมของแพลงก์ตอนพืชและมีการปนเปื้อนของสาร microcystins จะทำให้เพิ่มโอกาสของการเป็นมะเร็งตับสูงขึ้นอีกด้วย [21]

ตามแหล่งน้ำขนาดใหญ่ เช่น อ่างเก็บน้ำ การบลูมของแพลงก์ตอนพืชยังส่งผลกระทบต่อระบบการกรองน้ำสำหรับแหล่งน้ำดิบในการทำน้ำประปา เซลล์ของแพลงก์ตอนพืชจะไปติดที่ระบบกรองน้ำทำให้ไม่สามารถผลิตได้น้ำซึ่งจะส่งต่อต้นทุนการผลิตที่จะต้องมีการทำความสะอาดหรือเปลี่ยนวัสดุกรองบ่อยมากขึ้น หรือต้องเพิ่มสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการทำความสะอาดน้ำมากขึ้น เช่น การฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน [22] แพลงก์ตอนพืชบางชนิดมีสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เมื่อบลูมพร้อมกันในปริมาณมากอาจทำให้แหล่งน้ำสูญเสียทัศนียภาพและความสวยงามเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจและทำให้ไม่สามารถทำกิจกรรมทางน้ำในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การว่ายน้ำ การดำน้ำ และประการสุดท้าย แหล่งน้ำที่เกิดการบลูมของแพลงก์ตอนพืชจะต้องมีการบำบัด ดังนั้นจะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในฟื้นฟูให้แหล่งน้ำนั้นสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เหมือนเดิม [22, 23]

5. การกำจัดธาตุอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ถึงแม้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแล้วสามารถกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิดที่อยู่ในรูปค่าความสกปรกของบีโอดีหรือซีโอดีออกจากน้ำเสียได้แล้ว แต่ถ้ายังมีธาตุอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ยังมีความจำเป็นที่ต้องกำจัดธาตุอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง แหล่งน้ำสาธารณะ หรือทะเล เหตุผลที่สำคัญ คือน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วแต่ยังมีธาตุอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปนเปื้อนอยู่ในรูปแบบต่างๆ สามารถก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบ

ต่อสิ่งแวดล้อมและมลพิษทางน้ำได้อีกมากมายดังที่ได้กล่าวมาในช่วงต้น มาตรฐานน้ำทิ้งของธาตุอาหารในเมืองไทยยังไม่มีข้อกำหนดอย่างชัดเจน (หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งของธาตุอาหารในเมืองไทยมีแต่เฉพาะมาตรฐานน้ำทิ้งในเขตกรุงเทพมหานครชั้นในบางพื้นที่เท่านั้น) กำหนดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดควรต่ำกว่า 2.0 มล ฟอสฟอรัส/ล. และปริมาณไนโตรเจน-ไนโตรเจนควรต่ำกว่า 10 มล. ไนโตรเจน/ล. แต่มาตรฐานน้ำทิ้งในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus, TP) ของต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ประเทศในทวีปยุโรปและออสเตรเลีย กำหนดไว้ว่าควรต่ำกว่า 0.2 มล. ฟอสฟอรัส/ล.

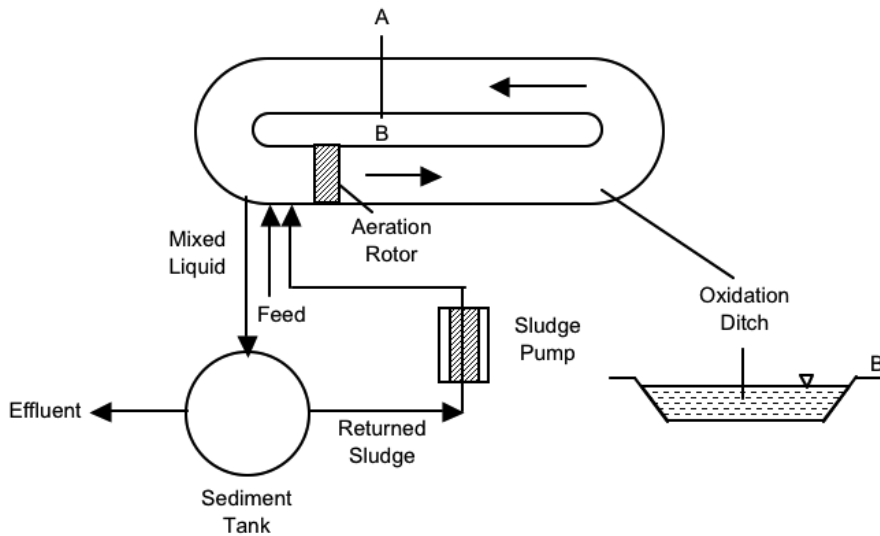
วิธีการกำจัดธาตุอาหารที่เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะเลือกใช้กับการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนและอุตสาหกรรม วิธีการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การกำจัดไนโตรเจนโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ/เคมี (physical/chemical processes) ได้แก่ การเติมคลอรีน (chlorination) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) และการเป่าอากาศ (air stripping) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพงถ้าเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสก็เช่นเดียวกัน กระบวนการบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพงมาก สารเคมีที่มีการใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ปูนขาว สารประกอบเหล็ก คลอไรด์ และสารส้ม แต่ในบทความนี้ขอกล่าวเฉพาะการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วยวิธีการทางชีวภาพเท่านั้น

โดยทั่วไปกระบวนการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนจากน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ วิธีการบำบัดทางชีวภาพประกอบ

ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification process) และกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification process) สามารถกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียได้เป็นอย่างดีและเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย ส่วนหลักการของการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีการทางชีวภาพคือ การให้จุลินทรีย์เก็บเอาฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์เป็นปริมาณมากๆ จากนั้นแล้วใช้วิธีการดังต่อไปนี้คือ แยกเอาเซลล์ออกจากน้ำเสีย ซึ่งก็คือ การดึงเอาฟอสฟอรัสออกไปนั่นเอง และให้เซลล์ปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในรูปที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายด้วยปูนขาว ความสามารถในการทำให้เซลล์สามารถดึงเอาฟอสฟอรัสเข้าไปเก็บไว้ในเซลล์มากๆ ได้วิธีการที่นิยมใช้ในการให้เซลล์สะสมฟอสฟอรัสคือการบังคับให้เซลล์มีสภาวะหิวโหย หรือ endogenous decay โดยการปล่อยให้เซลล์ อดอาหารและออกซิเจน และนำเซลล์เหล่านั้นไปปล่อยในบริเวณที่สภาวะเหมาะสมกับการเจริญเติบโต เซลล์ที่มีสภาวะหิวโหยเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอาหารเหมาะสมกับการเจริญเติบโต เซลล์สามารถดึงเอาฟอสฟอรัสเข้าไปเก็บสะสมในปริมาณมาก ฟอสฟอรัสถูกเก็บอยู่ในรูปพลังงานสะสม เอทีพี (ATP) เราเรียกการสะสมฟอสฟอรัสเช่นนี้ว่า luxury uptake และเมื่อเซลล์สะสมฟอสฟอรัสถึงระดับที่ต้องการแล้ว สามารถแยกเซลล์ออกเพื่อเป็นการดึงเอาฟอสฟอรัสออกจากระบบ หรือเอาเซลล์ไปเลี้ยงในสภาวะใกล้เคียงอีกครั้ง โดยการอดอาหารและออกซิเจน ซึ่งเมื่อเซลล์เจอสภาวะเช่นนี้ใช้พลังงานที่สะสมเอาไว้ ทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาเป็นปริมาณมหาศาล

ระบบชีวภาพกำจัดธาตุอาหาร (Biological Nutrient Removal, BNR) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า

บีเอ็นอาร์ (BNR) ระบบหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมากคือ ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่มีการออกแบบเพื่อกำจัดธาตุอาหารซึ่งประกอบด้วยถึงแอมโมเนียและไนโตรเจนแล้วตามด้วยถังแอโรบิก แต่ปัจจุบันในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกานิยมใช้ระบบแบบคลองวนเวียน (oxidation ditch) เพื่อกำจัดธาตุอาหารจากน้ำทิ้งชุมชน แต่ระบบแบบคลองวนเวียนเป็นระบบแบบหนึ่งของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์หรือระบบเอเอส ที่เรียกว่า ระบบยืดเวลาในถังเติมอากาศ (extended aeration) ที่มีการไหลของน้ำเป็นวงจร (circuit-flow activated sludge process) ซึ่งข้อเด่นของระบบนี้คือ สามารถทำงานได้ดีและสม่ำเสมอโดยไม่ต้องมีการควบคุมอย่างมากมาย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอเอสโดยทั่วไป ระบบบำบัดแบบคลองวนเวียนประกอบด้วยถังเติมอากาศแบบวงรีซึ่งทำให้น้ำไหลวนเวียนตามแนวยาวของถัง มีการเติมอากาศ และมีการกวนโดยใช้เครื่องกลเติมอากาศแบบตีนน้ำในแนวนอน (horizontal surface aerator) การไหลของน้ำเสียในถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียนมีลักษณะเฉพาะคือเป็นได้ทั้งแบบไหลตามแนวยาวและแบบกวนผสมหมุนขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่พิจารณา ถ้าพิจารณาว่าภายในถังเติมอากาศมีน้ำเสียไหลวนและถูกเติมอากาศในระยะเวลา 15 นาทีต่อรอบ การพิจารณาแบบนี้จะเป็นลักษณะของการไหลตามยาว และถ้าพิจารณาว่าน้ำเสียที่ไหลเข้ามาบำบัดมีระยะเวลาเก็บกักนาน 24 ชั่วโมง มีการถูกกวนผสมอยู่ถึง 96 รอบ การพิจารณาแบบนี้จะเป็นการลักษณะของการกวนผสมหมุน ดังภาพที่ 1

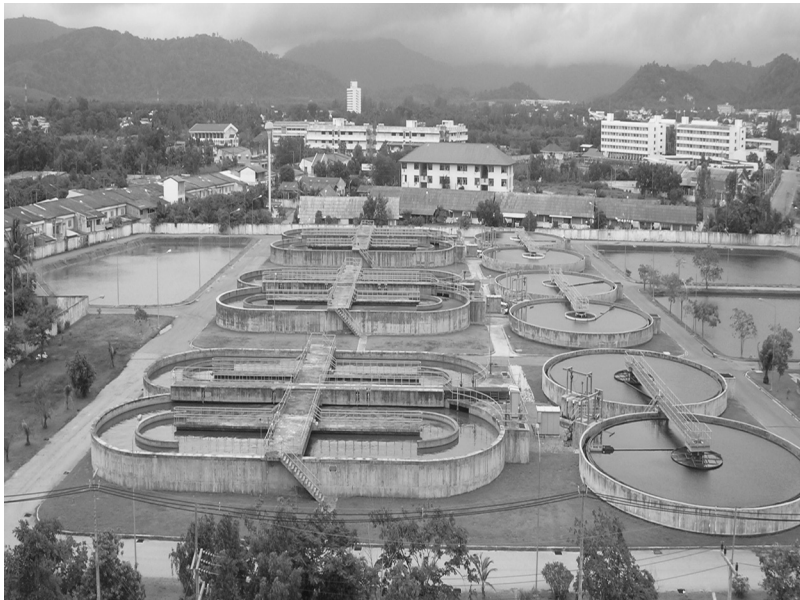


ภาพที่ 1 ระบบเอเอสแบบคลองวนเวียน (oxidation ditch) [24]

ระบบเอเอสแบบคลองวนเวียนเป็นระบบที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำทิ้งชุมชนเพราะสามารถกำจัดทั้งได้สารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้อย่างดี อีกทั้งสามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรมที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่สูงจนเกินไป เพราะลักษณะการเติมออกซิเจนเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของถังเติมอากาศ ถ้าวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำเป็นบวกอยู่ครึ่งหนึ่งของความยาวของถังและอีกส่วนหนึ่งมีค่าออกซิเจนเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์เรียกว่า anoxic zone จะมีระยะเวลาประมาณ 10 นาที

ระบบชีวภาพกำจัดธาตุอาหาร (BNR) ของน้ำเสียจากชุมชนโดยเฉพาะระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนในประเทศไทยมีใช้ที่เทศบาลจังหวัด

ภูเก็ต และในกรุงเทพมหานครที่โรงบำบัดหนองแขม ระบบคลองวนเวียนที่เทศบาลจังหวัดภูเก็ตสามารถบำบัดบีโอดีและกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอย่างมีประสิทธิภาพสูง ดังภาพที่ 2 แต่ระบบนี้มักไม่ถูกออกแบบหรือเลือกใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียของชุมชน โดยมีเหตุผลหลักสองประการคือ ระบบดังกล่าวมีราคาก่อสร้างที่สูงและต้องการพื้นที่มากกว่าระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ซึ่งในบางพื้นที่ไม่มีพื้นที่กว้างพอหรือถึงแม้ว่ามีพื้นที่กว้างพอ ราคาที่ดินแพงมากทำให้ราคาก่อสร้างสูงกว่าระบบอื่น แต่ในประเทศสหรัฐอเมริกากระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนได้รับความนิยมสูง และมักถูกออกแบบให้กับการบำบัดน้ำเสียของชุมชนตั้งแต่ขนาดเล็ก ขนาดกลาง จนถึงขนาดใหญ่



ภาพที่ 2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากชุมชนในเขตพื้นที่ของเทศบาล
จังหวัดภูเก็ต

6. สรุป

การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งชุมชนและอุตสาหกรรมยังเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่สำหรับผู้ควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียของประเทศไทย แต่ในอนาคตอันใกล้เรื่องดังกล่าวน่าจะได้รับความสนใจมากขึ้นและยังต้องการการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพิ่มเติมถ้าจะทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถกำจัดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ดี ซึ่งจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศเพราะจะช่วยลดปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนน้ำเริ่มทวีความรุนแรงขึ้นโดยเฉพาะในช่วงหน้าแล้งหรือช่วงที่มีฝนตกน้อย ดังนั้นเราจึงควรพิจารณาน้ำที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ซ้ำ แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดต้องมีการกำจัดทั้งค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้อยู่ระดับต่ำเสียก่อน

ถ้าเราสามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพมหานครหรือในเมืองใหญ่ได้จนถึงขั้นนำกลับมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำประปา น้ำดิบจากคลองประปาในปัจจุบันจะสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งน้ำเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้น หรือนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้เป็นแหล่งน้ำเพื่ออุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามก็ยังมี ความจำเป็นที่ต้องศึกษาและวิจัยเรื่องความเสี่ยงต่อเชื้อโรคที่จะมากับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำ รวมถึงทัศนคติของคนในชุมชนที่ต้องนำน้ำที่ใช้แล้วหรือน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ซ้ำ การให้ความรู้ และความเข้าใจ เป็นเรื่องที่สำคัญ ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องใช้เวลาพอสมควร แต่อย่างไรก็ตามแนวทางนี้น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Moss, B., J. Madgwick and G. Phillips. 1997. A guide to the restoration of nutrient-enriched shallow lakes. W.W. Hawes.
- [2] Elser, J.J., Bracken M.E.S., Cleland E.E., Gruner D.S., Harpole W.S., Hillebrand H., Ngai J.T., Seabloom E.W., Shurin J.B., Smith J.E.. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters. 10 (12) : 1135-1142.
- [3] Conley, D.J., Paerl H.W., Howarth, R.W. Boesch D.F., Seitzinger S.P., Havens K.E., Lancelot C. and Likens G.E.. 2009. Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus. Science. 323 : 1014-1015.
- [4] Florida LakeWatch. 2000. A beginner;s guide to water management-Nutrients. University of Florida, Florida.
- [5] World Resources Institutes. 2012. Eutrophication and Hypoxia. <http://www.wri.org/project/eutrophication/about> (สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2555)
- [6] Chen, P. 1999. Ecology. John Murray : London. 213 pp.
- [7] ชีรศักดิ์ สมดี. 2540. การกระจายของแพลงก์ตอนพืช *Microcystis aeruginosa* Kutz ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่กวงอุดมธารา ปี 2539-2540. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท (ชีววิทยา). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 102 หน้า.
- [8] ชัยวัฒน์ ประกิระเค. 2554. สาหร่ายสะพรั่ง หรือการเจริญเติบโตมากเกินไปของสาหร่ายในน้ำ (Algae bloom). <http://www.reo10.go.th/forum/index.php?topic=721.0> (สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2555).
- [9] หนังสือพิมพ์แนวหน้า. 2554. เตือนปรากฏการณ์"ยูโทรฟิเคชัน" นักวิจัยพบหลายจุดในลำตะคองเตือนกระทบระบบนิเวศในน้ำ.วันที่ 21 กรกฎาคม 2554. <http://www.naewna.com/news.asp?ID271524>. (สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2555).
- [10] ภาสพล ธรรมตันติหิรัญ จงกลณี วรณเพ็ญสกุล สุวัฒน์ พาหุสุวณโณ และตรีดาร์ตนี ศิริดำรง. 2555. การแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาน้ำเน่าเสีย เนื่องจากสาหร่ายมีพิษเกิดการบลูมในอ่างเก็บน้ำห้วยสงสัยโดยเคมีบำบัดและบูรณาการวิธี. กลุ่มวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน.
- [11] หนังสือพิมพ์เดลินิวส์. 2555. กรมชลฯนำแนวพระราชดำริแก้ปัญหาน้ำเสียจาก "สาหร่ายบลูม". วันที่ 10 กรกฎาคม 2555. <http://www.dailynews.co.th/agriculture/135000> (สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2555).
- [12] Chaichana, R., Arunlertaree C., Sricharoendham B.and Veeravaitaya N.. 2003. Quantity and Distribution of plant nutrients on eutrophication in Bang Pra reservoir, Chonburi province. Kasetsart Journal. 37(1): 90-100.
- [13] นิคม ละอองศิริวงศ์ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร.2548.สภาวะยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา. การประชุมวิชาการประจำปี 2548 สาขาประมง ทรัพยากรธรรมชาติ และเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม ระหว่างวันที่ 1-4 กุมภาพันธ์ 2548 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. หน้า 473-480.

- [14] Yeoman, S., T. Stephenson, J.N. Lester and R. Perry. 1988. The removal of phosphorus during wastewater treatment: A review. *Environmental Pollution*. 49(3): 183-233.
- [15] Meybeck, M., Kuusisto, E., Mañkela, A., Mañlki, E., 1996. Water quality. In: Bartram, J., Ballance, R. (Eds.), *Water Quality Monitoring*. E and FN Spon, London, pp. 9-33.
- [16] Hautier, Y., P.A. Niklaus and A. Hector. 2009. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science*. 324(5927) : 636-638.
- [17] Codd, G.A. 2000. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality and the prioritization of eutrophication control. *Ecological Engineering*. 16 : 51-60.
- [18] Hunter, P.R., 1994. An epidemiological critique of reports of human illness associated with cyanobacteria. In: Codd, G.A., Jefferies, T.M., Keevil, C.W., Potter, E. (Eds.), *Detection Methods for Cyanobacterial Toxins*. The Royal Society for Chemistry, Cambridge, pp. 11-18.
- [19] Falconer, I.R., 1994. Health problems from exposure to cyanobacteria and proposed safety guidelines for drinking and recreational water. In: Codd, G.A., Jefferies, T.M., Keevil, C.W., Potter, E. (Eds.), *Detection Methods for Cyanobacterial Toxins*. The Royal Society for Chemistry, Cambridge, pp. 3-10.
- [20] Falconer, I.R. and A.R. Humpage. 2005. Health risk assessment of cyanobacterial (blue-green algal) toxins in drinking water. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2(1): 43-50.
- [21] Yu, S.-Z., 1995. Primary prevention of hepatocellular carcinoma. *J. Gastroenterol. Hepatol*. 10, 674-682.
- [22] Walker, W.W. Jr. 1983. Significance of eutrophication in water supply reservoir. *Journal of American Water Work Association*. 75(1): 38-42.
- [23] Dodds, W.K., Bouska W.W., Eitzmann J.L., Pilger T.J., Pitts K.L., Riley A.J., Schloesser J.T. and Thornbrugh D.J.. 2009. Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of Potential Economic Damages. *Environ. Sci. Technol*. 43(1): 12-19.
- [24] Gray, N. F. 1990 *Activated Sludge (Theory and Practice)* Oxford University Press, New York, U.S.A.