

06

เมื่อแหล่งน้ำกลายเป็นสีเขียว: การจัดการฟอสฟอรัสและการฟื้นฟูแหล่งน้ำจืด WHEN THE WATER BECOMES GREEN: PHOSPHORUS MANAGEMENT AND FRESHWATER RESTORATION

อนุชนรา ตาลกุล คัสเตอร์✉

สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม อาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Anootnara Talkul Kuster✉

Environmental Health Occupational Health and Safety,
Faculty of Public Health, Khon Kaen University

✉anootta@kku.ac.th

บทความนี้ ขอขอบคุณคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นสำหรับทุนสนับสนุนการดำเนินงานและแลกเปลี่ยน
ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา และเทศบาลตำบลบ้านเป็ด อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนโครงการศึกษาเชิงพื้นที่

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้เป็นการทบทวนสาเหตุปัญหาและแนวทางป้องกันเพื่อฟื้นฟูแหล่งน้ำจืดที่ประสบปัญหายูโทรฟิเคชัน ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากสารอาหารฟอสฟอรัสที่มากเกินไป ฟอสฟอรัสจัดว่าเป็นสารอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันอย่างมากโดยเฉพาะในแหล่งน้ำจืด ซึ่งมาจากแหล่งภายนอก เช่น น้ำท่าชุมชน ฟาร์ม พื้นที่เกษตรกรรม รวมถึงน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด และมาจากแหล่งภายใน ได้แก่ ตะกอนดิน วิธีการแก้ปัญหาที่ต้องคำนึงถึงคือการจัดการสารอาหารฟอสฟอรัสทั้งจากแหล่งภายนอกและภายในแหล่งน้ำจืดร่วมกัน บทความวิชาการนี้นำเสนอแนวทางความเป็นไปได้ในการนำมาใช้กับประเทศไทยโดยผ่านการทบทวนทางวรรณกรรม การวิจัยจริงในพื้นที่ที่ประสบปัญหายูโทรฟิเคชันในจังหวัดขอนแก่น และการศึกษาดูงานที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วย การใช้แผนการจัดการสารอาหาร ภายใต้พระราชบัญญัติ รัฐเพนซิลวาเนีย 38 แนวทางการป้องกันการพังทลายของหน้าดิน การทำการเกษตรแบบไม่ไถพรวน การหมักปุ๋ยแบบร่วม การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแนวตั้ง การใช้สารส้มและการทำบึงประดิษฐ์แบบลอยน้ำ เป็นต้น

คำสำคัญ: ยูโทรฟิเคชัน ไซยาโนแบคทีเรีย การจัดการฟอสฟอรัส การใส่สารส้ม บึงประดิษฐ์แบบลอยน้ำ

Abstract

This article presents the causes, issues, and existing strategies to address cultural eutrophication in freshwater lakes, which results from excessive nutrient loading from increased urban runoff, agricultural runoff, and discharge of untreated wastewater. The nutrient phosphorus, in particular, plays a significant role in causing eutrophication in freshwater bodies, and management of both external and internal sources of phosphorus is critical to effective freshwater restoration. A case study of eutrophication in Khon Kaen province, Thailand is presented along with suggested methods and techniques to reduce phosphorus loading and restore freshwater lakes, which were compiled from published literature and site visits in the United States. Particular attention is given to the Commonwealth of Pennsylvania's Nutrient Management Act ("Act 38"), no-till farming, co-composting, Vertical Loop Reactors, alum application to lakes, and floating treatment wetlands.

Keywords: Eutrophication, Cyanobacteria, Phosphorus management, Alum application, Floating treatment wetlands

บทนำ

น้ำเป็นหนึ่งในทรัพยากรที่มีความสำคัญ ซึ่งใช้เป็นแหล่งชลประทานสำหรับชุมชน การเกษตร อุตสาหกรรม รวมถึงใช้เป็นสถานที่สำหรับเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ แต่อย่างไรก็ตามในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งด้านจำนวนประชากรและเศรษฐกิจส่งผลทำให้คุณภาพน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงปี พ.ศ. 2552-2561 (Pollution Control Department, 2019) โดยเฉพาะในพื้นที่เขตชุมชนซึ่งมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วพบว่าการปล่อยน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัด ที่มีจุดปล่อยชัดเจน (point source) รวมถึงแหล่งกำเนิดที่มีจุดปล่อยไม่ชัดเจน (non-point source) เช่นน้ำฝนที่ไหลผ่านพื้นที่ต่างๆ (runoff) ที่มีกิจกรรมการใช้ปุ๋ยหรือพื้นที่อุตสาหกรรม ลงสู่แหล่งน้ำเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้คุณภาพน้ำมีแนวโน้มต่ำลง (US EPA, 1996) สถานการณ์คุณภาพน้ำในปัจจุบันพบว่ามีความเสื่อมโทรมเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสารอาหารและสารมลพิษสะสมอยู่ในแหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ในแหล่งน้ำโดยเฉพาะในบึง หรือ อ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งเป็นประจำทุกปี และมักเข้าใจกันในหลายๆชื่อ เช่น สาหร่ายแตกตัว สาหร่ายบุ่ม (algal blooms) หรือปัญหาน้ำเขียว ดังแสดงในภาพที่ 1 ยูโทรฟิเคชันสามารถแบ่งตามระดับรุนแรงได้ 4 ระดับ ได้แก่ oligotrophic mesotrophic eutrophic และ hypereutrophic ซึ่งคำว่า trophi ในภาษกรีกนั้นหมายถึง อาหาร หรือ สารอาหาร ส่วนคำว่า oligo, meso, eu และ hyper มีความหมายว่า ความอุดมสมบูรณ์ ดังนั้นคำว่า oligotrophic, mesotrophic, eutrophic และ hypertrophic จึงใช้อธิบายหรือเรียกแหล่งน้ำที่มีความสมบูรณ์ของธาตุอาหาร



ภาพที่ 1 สภาวะสาหร่ายบุ่มที่บึงก่ ตำบลบ้านเปิด อำเภอเมือง
จังหวัดขอนแก่นช่วงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562

กลไกการเกิดยูโทรฟิเคชัน

กลไกการเกิดยูโทรฟิเคชัน คือการบูมของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งเมื่อปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แสงแดด และความเข้มข้นของสารอาหารโดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำนั้นอยู่ในสัดส่วนที่มีความเหมาะสม (Schindler, 2006) แพลงก์ตอนพืชกลุ่มหลักที่เกิดการบูมในแหล่งน้ำ ได้แก่ แพลงก์ตอนสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) หรือ ไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) ตามธรรมชาติแหล่งน้ำสามารถจะเกิดยูโทรฟิเคชันได้หรือที่เรียกว่า natural eutrophication ซึ่งเกิดขึ้นได้ยาก หรือใช้เวลานานในการเกิดกว่า 100-1,000 ปี จากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ (Schindler, 1974) เช่น การรุกรานบริเวณที่ราบลุ่ม การทำการเกษตรที่ใช้ปุ๋ยเคมีเกินความจำเป็น การปล่อยน้ำเสียลงแหล่งน้ำ อุตสาหกรรม เป็นต้น กิจกรรมเหล่านี้ส่งผลทำให้แหล่งน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยไปเพิ่มปริมาณสารอาหารและการปลดปล่อยความสามารถในการรองรับธาตุอาหารของแหล่งน้ำ ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารอาหารซึ่งเกิดจากแหล่งน้ำได้รับการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีปริมาณสารอาหารฟอสฟอรัสและไนโตรเจนสูง เช่น โรงงานผลิตปุ๋ย โรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย น้ำเสียจากฟาร์มสุกร หรือน้ำทิ้งบ้านเรือนที่ไม่ผ่านการบำบัด น้ำฝนที่ไหลมาจากพื้นที่ต่างๆ โดยเฉพาะชุมชน (urban runoff) และแหล่งกำเนิดที่ไม่ทราบจุดปล่อยแน่นอน เช่น น้ำชะจากแปลงเกษตร ประการที่สองการลดความสามารถในการบำบัดตามธรรมชาติของแหล่งน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง เช่น สร้างคอนกรีตบริเวณแนวชายฝั่ง การรุกรานบริเวณที่ราบลุ่ม การลดพื้นที่ชุ่มน้ำ การถมพื้นที่ชุ่มน้ำเพื่อพัฒนาเป็นที่อยู่อาศัย (Van Der Windt & Swart, 2008) กิจกรรมเหล่านี้ทำให้ปริมาณสารอาหารในแหล่งน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างมหาศาลและลดความสามารถในการกำจัดสารอาหารของแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ประกอบกับเมืองไทยเป็นเมืองร้อน อุณหภูมิของน้ำและแสงแดดที่เหมาะสม สำหรับไซยาโนแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตได้ดี การเกิดยูโทรฟิเคชันจากกิจกรรมของมนุษย์นี้เรียกว่า cultural eutrophication หรือ anthropogenic eutrophication ซึ่งกระบวนการนี้ไปเร่งการเกิดยูโทรฟิเคชันให้เร็วขึ้น โดยใช้เวลาอย่างรวดเร็วเพียง 10 ปี (Schindler, 1974) ดังแสดงในภาพที่ 2

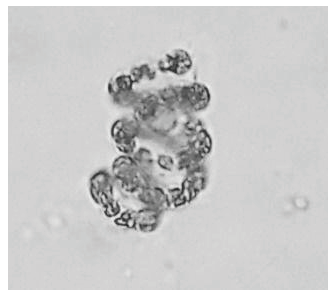
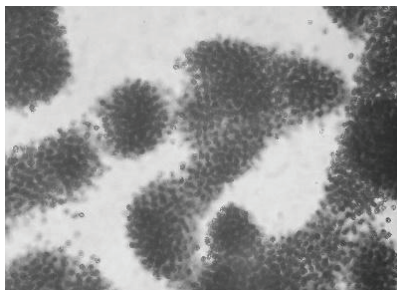


ภาพที่ 2 การเกิดยูโทรฟิเคชันจากตัวอย่างกิจกรรมหลักๆของมนุษย์ (cultural eutrophication)

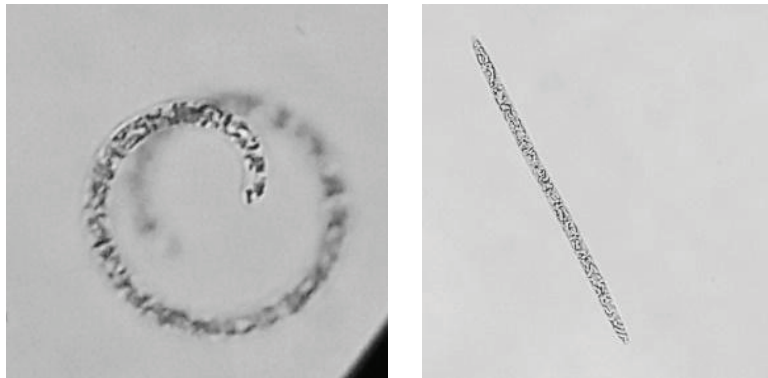
รู้จักไซยาโนแบคทีเรีย

ไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) หรือ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นมานานมากกว่าพันๆปี ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตพวกแรกที่มีความสามารถในการสังเคราะห์แสง ทำให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นบนโลก เนื่องจากมีความสามารถในการปรับตัวค่อนข้างสูงจึงทำให้ไซยาโนแบคทีเรียสามารถดำรงชีวิตได้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ ไซยาโนแบคทีเรียไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส จึงถูกจัดเป็นพวกโปรคาริโอติก (prokaryotic) ซึ่งมีลักษณะคล้ายพวกแบคทีเรียแต่ข้อแตกต่างของไซยาโนแบคทีเรียกับแบคทีเรียคือ ไซยาโนแบคทีเรียสามารถสังเคราะห์แสงและสร้างอาหารได้เอง แต่แบคทีเรียไม่สามารถสังเคราะห์แสงและสร้างอาหารเองได้ ดังนั้น ไซยาโนแบคทีเรีย คือ แบคทีเรียที่มีความสามารถในการสร้างอาหารเองได้โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งสารสีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เรียกว่า ไทลาคอยด์ (thylakoid) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ส่วนของคลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll a) นั้นจะอยู่ที่เยื่อหุ้ม ไทลาคอยด์ ซึ่งในการหาปริมาณของไซยาโนแบคทีเรียนั้นจะใช้คลอโรฟิลล์ เอ ภายในเซลล์ของไซยาโนแบคทีเรียนั้นจะมีถุงลม (gas vacuole) เพื่อช่วยการลอยตัวหา “สภาวะ” ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แสง นั่นคือหากปริมาณแสงเหมาะสมไซยาโนแบคทีเรียก็จะลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ แต่ถ้าปริมาณแสงมากเกินไป ไซยาโนแบคทีเรียก็จะเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ในช่วงเวลากลางคืนก็จะจมตัวเพื่อเก็บสารอาหารบริเวณใกล้ๆกันบ้าง

ไซยาโนแบคทีเรียในแหล่งน้ำจืด (freshwater cyanobacterium) มีหลายชนิด จากรายงานการวิจัย ตัวอย่างที่ตรวจพบบริเวณบึงที่ทำการศึกษานี้ในจังหวัดขอนแก่น เช่น เช่น ชนิด *Microcystis aeruginosa*, ชนิด *Anabaena spiroides*, ชนิด *Cylindrospermopsis acuminato-crispa* sp. Nova เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 3 และ 4 ชนิดเด่นที่พบคือ *Microcystis aeruginosa* ซึ่งมีลักษณะโคโรนี เป็นทรงกลม หรือ กลมแบน ขอบไม่เรียบ มีสีเขียวหรือสีน้ำเงินเขียวอ่อนๆ *M. aeruginosa* อาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหารและเจริญเติบโต ไมโครซิสติน (microcystins) ถือว่าเป็นสารพิษที่เป็นปัญหามากที่สุดพบได้ทั่วโลก โดยสารพิษจะถูกปลดปล่อยออกจากเซลล์เมื่อเซลล์แตก (cell lyse) โดยจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ได้ ไม่ว่าจะเป็น ก่อให้เกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนังและตา มีอาการเป็นไข้ เวียนศีรษะ อ่อนเพลียและเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร (Carmichael, 1992) ดังนั้นองค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) (WHO, 1998) ได้มีการกำหนดปริมาณสารพิษไมโครซิสตินในน้ำดื่มไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตร (WHO, 1998)



ภาพที่ 3 (ซ้าย) ภาพถ่ายของ *M. aeruginosa* และ (ขวา) คือ *A. spiroides*
ที่เก็บจากบึงที่ทำการศึกษานี้ในจังหวัดขอนแก่น



ภาพที่ 4 (ซ้าย) ภาพถ่ายของ *C. acuminato-crispa* sp. Nova และ (ขวา) คือ *C. raciborskii* เก็บจากบึงที่ทำการศึกษามหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผลกระทบจากยูโทรฟิเคชัน

ผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในด้านสุขภาพได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่วนในด้านสิ่งแวดล้อมนั้นผลกระทบที่สำคัญคือ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำ และสัตว์น้ำตาย รวมถึงส่งผลทำให้ทัศนียภาพไม่น่าดูและส่งกลิ่นเหม็น (Chislock, Doster, Zitomer & Wilson, 2013) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำที่เกิดยูโทรฟิเคชัน หากแหล่งน้ำใช้สำหรับการอุปโภคบริโภคหรือใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตประปา ได้แก่

- ประสิทธิภาพของสารที่ช่วยในการตกตะกอนจะลดลง (Hu, Liu, Qu, Wang & Rut, 2006) เนื่องจากแหล่งน้ำที่เกิดยูโทรฟิเคชันมีค่าพีเอชสูงกว่า 7 (WHO 2011) ในขณะที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ที่ 6.5-7.2
- การเกิด trihalomethanes (เช่น chloroform, bromodichloromethane, dibromochloromethane) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง เนื่องจากสาหร่ายคือ อินทรีย์วัตถุซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคลอรีน (และกรด hypochlorous) ในน้ำ (Palmstrom, Carlson & Cooke, 1998)
- สาหร่ายทำให้ตัวกรองเกิดการอุดตัน
- ทำให้น้ำมีกลิ่นและรสชาติไม่พึงประสงค์ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสาหร่ายในน้ำ (Chislock et al., 2013)

หากแหล่งน้ำใช้สำหรับเป็นการพักผ่อนและกิจกรรมนันทนาการ ผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้แก่

- ไฮยาโนแบคทีเรียบางชนิดสามารถสร้างสารพิษ เช่น microcystin และ anatoxin-a (Chorus & Bartram, 1999) ซึ่งส่งผลต่อกิจกรรมทางน้ำ เช่น ไม่ปลอดภัยสำหรับการว่ายน้ำ เป็นต้น
- การเจริญเติบโตของสาหร่ายส่งผลทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและสีน้ำที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งจะทำให้ประชาชนและชุมชนโดยรอบเดือดร้อน

หากแหล่งน้ำทำหน้าที่เป็นแหล่งประมง ผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้แก่

- สภาวะการขาดออกซิเจน (anoxia) ที่มักจะเกิดขึ้นภายหลังการเกิดยูโทรฟิเคชันซึ่งส่งผลให้ปลาตายจากภาวะออกซิเจนลดลง (hypoxia) โดยเฉพาะปลาอายุน้อย ซึ่งสร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อประชากรปลา ดังแสดงในภาพที่ 5
- การเกิดยูโทรฟิเคชันมีผลต่อองค์ประกอบของชนิดปลาโดยมักทำให้ปลาที่ไม่มีคุณค่าในเชิงพาณิชย์มีจำนวนเพิ่มขึ้น (Huser & Bartels, 2015; Burkholder, Noga, Hobbs & Glasgow, 1992; Jeppesen *et al.*, 1997)



ภาพที่ 5 สภาวะสาหร่ายแตกตัวและทำให้ปลาตายที่บึงกี้ ตำบลบ้านเปิด อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2562

การฟื้นฟูแหล่งน้ำจากสาหร่ายแตกตัว (freshwater restoration)

ธาตุอาหารสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้เป็น แหล่งที่มาจากภายนอก (external nutrient loading) และ แหล่งที่มาจากภายใน (internal nutrient loading) เมื่อกล่าวถึงยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด การวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การจัดการฟอสฟอรัส (phosphorus management) (Carpenter, 2008; Schindler *et al.*, 2008) อย่างที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ไซยาโนแบคทีเรียมีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศ (nitrogen fixation) แม้ว่าไนโตรเจนในน้ำจะถูกควบคุมได้ในปริมาณต่ำ トラบไคที่ยังมีฟอสฟอรัสอยู่ในน้ำเพียงพอ ไซยาโนแบคทีเรียก็ยังสามารถอยู่รอดได้โดยการตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศ ฉะนั้นบทความนี้ได้กล่าวถึงถึงวิธีแก้ปัญหาด้วยการลดฟอสฟอรัสในน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่อการลดยูโทรฟิเคชันและการฟื้นฟูแหล่งน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดคือการลดปริมาณสารอาหารฟอสฟอรัสจากภายนอก (external phosphorus management) รวมกับการจัดการปริมาณสารอาหารฟอสฟอรัสภายใน (internal phosphorus management) และการฟื้นฟูระบบแหล่งน้ำจืด (restoration of freshwater ecosystems) ซึ่งจะขอกล่าวถึง 3 วิธีหลักดังต่อไปนี้

เมื่อแหล่งน้ำกลายเป็นสีเขียว: การจัดการฟอสฟอรัสและการฟื้นฟูแหล่งน้ำจืด

1. การลดปริมาณสารอาหารฟอสฟอรัสจากภายนอก (external phosphorus management)

การลดปริมาณสารอาหารจากภายนอกเข้าไปในแหล่งน้ำจัดเป็นสิ่งสำคัญและมักเป็นแนวทางหลักในการฟื้นฟูแหล่งน้ำที่มีสภาพความสมบูรณ์ของสารอาหารสูง (Paerl *et al.*, 2011; Wang, Sample & Bell, 2014; Xu, Paerl, Qin, Zhu & Gao, 2010) ซึ่งทำได้โดยการลดปริมาณน้ำเสียจากชุมชนที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำและการลดปริมาณน้ำท่าชุมชน (urban runoff) เช่น การใช้หลังคาสีเขียว (green roof) ส่วนการสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland) และบ่อกักเก็บน้ำ (detention pond) เป็นวิธีที่ช่วยลดมลพิษในน้ำท่าชุมชน อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้ต้องใช้ที่ดินซึ่งอาจมีราคาแพง (Wang, Sample, Day & Grizzard, 2015) แนวทางหนึ่งในการลดปริมาณสารอาหารจากภายนอกคือการเปลี่ยนแปลงนโยบายหรือการใช้ที่ดิน นอกจากนี้การให้กฎระเบียบเข้ามาควบคุมการใช้ประโยชน์จากที่ดินเพื่อลดการไหลน้ำท่า วิธีการตามแนวทางเหล่านี้จำเป็นต้องมีหน่วยงานในการกำกับดูแลที่เข้มงวดและมีการปรับ

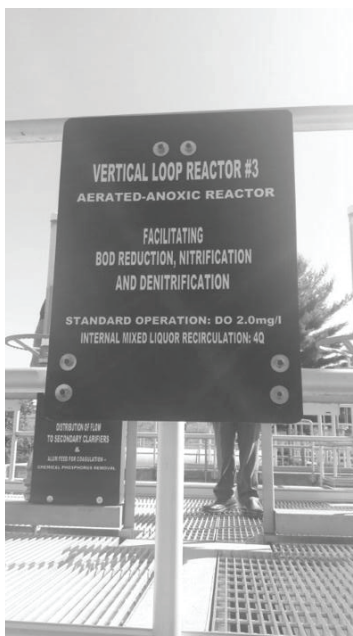
กรณีการปกป้องลุ่มน้ำ Chesapeake Bay watershed สหรัฐอเมริกา ประเทศสหรัฐอเมริกา

กรณีศึกษาการปกป้องพื้นที่ลุ่มน้ำ Chesapeake Bay ในมลรัฐเพนซิลวาเนีย ตะวันออกของประเทศสหรัฐอเมริกาในปีพ.ศ. 2561 พื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีความสำคัญทางนิเวศวิทยา (Chesapeake Bay Program, 2019) ในพื้นที่ลุ่มน้ำ Chesapeake Bay มีโรงบำบัดน้ำเสีย Beam Road ที่ Brecknock Township เมือง Lancaster ซึ่งสามารถรองรับน้ำเสียได้เพียง 1,700 ลบ.ม./วัน โดยใช้วิธีการจัดการที่เป็นนวัตกรรมก้าวหน้าใช้ถึงปฏิกรณ์แบบแนวตั้ง (Vertical Loop Reactor: VLR) จำนวน 3 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 6 กระบวนการนี้สามารถลดปริมาณสารอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) และค่าบีโอดีได้อย่างมากโดยผ่านสภาวะไร้อากาศและแอโรบิคคล้ายกับระบบ oxidation ditch ซึ่งระบบ VLR นี้มีแค่เพียง 30 แห่งทั่วสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ Northern Lancaster County Authority (NLCA) เป็นหน่วยงานแห่งแรกในสหรัฐอเมริกาที่ใช้กระจกไร้เคลือบปราศจากความคม (sharp free glass) ดังแสดงในภาพที่ 8 ในลานตากตะกอนแทนการใช้ทรายทั่วไปหรือที่รู้จักในชื่อ sand bed filter นอกจากนี้ใช้กระจกไร้เคลือบแล้วยังปลูกพืชพวกอ้อเล็ก อ่อน้อย (common reed) เป็นตัวกำจัดสารอาหารพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอีกด้วยซึ่งระบบลานตากตะกอนนี้เรียกว่า planted reed bed

การใช้เทคโนโลยีแบบผสมผสานเหล่านี้ ทำให้โรงบำบัดน้ำเสีย Beam Road สามารถปล่อยน้ำที่บำบัดแล้วซึ่งผ่านมาตรฐานน้ำที่เข้มงวดสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำ Chesapeake Bay watershed น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพดีเยี่ยม โดยค่าของแข็งรวมแขวนรวม (Total Solids : TS) น้อยกว่า 1 มก./ล. ค่าไนโตรเจนรวม (Total Kjeldahl Nitrogen : TKN) ประมาณ 3 มก./ล. ค่าฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorus : TP) ประมาณ 0.2 มก./ล. fecal coliform ประมาณ 5 MPN/100 มล. ดังแสดงในภาพที่ 7 นอกจากนี้ยังผลิตสารชีวมวล (biosolids) จากกากตะกอน ประเภท EPA class B (US EPA, 2017) ซึ่งเกษตรกรสามารถใช้เป็นปุ๋ยได้ ข้อดีของระบบนี้ โดยรวมคือใช้พื้นที่น้อย ประหยัดไฟฟ้าได้มาก ไม่ต้องใช้สารเคมี มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอาหารพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัส น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดมีคุณภาพสูงมากและสารชีวมวลที่เหลือยังสามารถนำมาเป็นปุ๋ยได้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้อาจจะมีการนำมาใช้กับประเทศไทยในอนาคตก็เป็นได้



ภาพที่ 6 โรงบำบัดน้ำเสีย Beam Road เมือง Brecknock Township
เมือง Lancaster County รัฐเพนซิลวาเนีย



ภาพที่ 7 น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Vertical Loop Reactors (VLR) โรงบำบัดน้ำเสีย
Beam Road เมือง Brecknock Township เมือง Lancaster County รัฐเพนซิลวาเนีย



ภาพที่ 8 planted reed bed โดยใช้กระจกรไซเคิลแบบไม้ปัก

นอกจากโรงบำบัดน้ำเสียแล้ว ในรัฐเพนซิลวาเนีย ยังมีฟาร์มที่ได้รับการรับรองด้านการจัดการสารอาหารเชิงพาณิชย์ในเมือง Lebanon รัฐเพนซิลวาเนีย ซึ่งผู้เขียนได้มีโอกาสคุยกับเกษตรกรและเป็นเจ้าของฟาร์มที่ได้รับการรับรอง (certified commercial nutrient management specialist) โดยทำหน้าที่แนะนำและให้คำปรึกษาเกษตรกรคนอื่นๆ ในด้านการปฏิบัติตามกฎระเบียบของรัฐเพนซิลวาเนียด้านการใช้ปุ๋ย ปุ๋ยคอก การควบคุมพังทลายของดิน และการควบคุมคุณภาพน้ำสำหรับฟาร์มเชิงพาณิชย์ซึ่งเป็นการลดปริมาณสารอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) ที่จะลงสู่ลำน้ำสาธารณะได้ รวมถึงฟาร์มนม Oregon Dairy ซึ่งได้รับการจัดการแบบผสมผสานประกอบด้วย การใช้ถังปฏิกรณ์มีเทน (methane digester) การหมักปุ๋ยแบบร่วม (co-composting) ดังแสดงในภาพที่ 9 และ การทำฟาร์มแบบไม่ไถพรวน ฟาร์มนม Oregon Dairy ครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 2,500 ไร่ มีวัวนมประมาณ 500 ตัว โดยฟาร์มนี้ใช้ถังปฏิกรณ์มีเทนในการเปลี่ยนมูลวัวให้เป็นก๊าซมีเทนเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับกิจกรรมต่างๆ ในฟาร์ม ร้านอาหารและร้านค้าในฟาร์ม ในปี พ.ศ. 2560 ฟาร์มนม Oregon Dairy ได้ประหยัดค่าไฟฟ้าถึง 13,000 เหรียญสหรัฐอเมริกา คิดเป็นประมาณ 416,000 บาท ที่ฟาร์มยังมีเทคนิค co-composting ในการหมักมูลสัตว์และพวกหญ้าแห้งและขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหารให้กลายเป็นปุ๋ยซึ่งใช้เวลาประมาณ 10-12 สัปดาห์ มีการปลูกพืชตามแนวชายฝั่งในลำธาร (riparian buffers) และใช้การทำฟาร์มแบบไม่ไถพรวน เพื่อปรับปรุงบำรุงคุณภาพดินและลดน้ำชะจากหน้าดิน ซึ่งการทำฟาร์มแบบไม่ไถพรวนเป็นการเพิ่มไส้เดือนในดิน ช่วยให้ดินมีคุณภาพดีขึ้นอีกด้วย

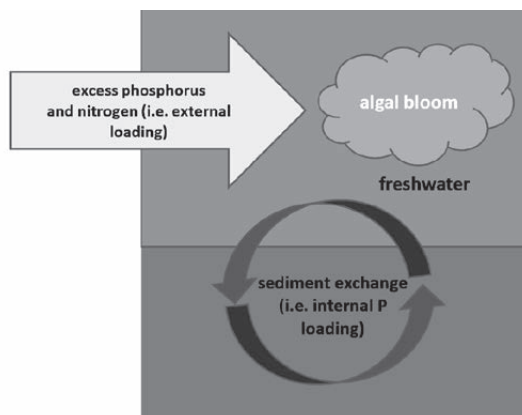


ภาพที่ 9 co-composting ในฟาร์ม Oregon Dairy รัฐเพนซิลวาเนีย

อย่างที่กล่าวมาข้างต้นว่าลุ่มน้ำ Chesapeake Bay ประสบปัญหาคุณภาพน้ำที่เสื่อมโทรมเป็นเวลานาน ซึ่งเป็นผลมาจากสารอาหารส่วนเกิน (เช่น ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน) ถูกปล่อยออกสู่ลำธารหลังจากชะผ่านพื้นที่การเกษตร เริ่มตั้งแต่ปีพ.ศ. 2540 รัฐเพนซิลวาเนียดำเนินการควบคุมฟาร์มปศุสัตว์ที่มีความหนาแน่นสูง (high-density animal operations) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำกัดการใช้ปุ๋ยคอกไม่ให้เกิดความสามารถในการรองรับของดินและการใช้ปุ๋ยให้เหมาะสมกับชนิดและปริมาณความต้องการใช้ของพืช และจำกัดปริมาณสารอาหารส่วนเกินคือ มูลสัตว์และปุ๋ยคอกที่มากับน้ำท่าซึ่งไหลลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง กฎระเบียบเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงปีพ.ศ. 2548 ภายใต้พระราชบัญญัติรัฐเพนซิลวาเนีย 38 (Pennsylvania Act 38 of 2005) ปัจจุบันนี้มีการจัดการจำนวนมากขึ้นความประสงค์เพื่อขออนุมัติตามพรบ.38 แผนการจัดการสารอาหาร (Nutrient Management Act) ที่เน้นการจัดการมูลสัตว์ที่เกิดจากฟาร์ม การนำมูลสัตว์ไปใช้ประโยชน์การปฏิบัติตามแนวทางการป้องกันการพังทลายของหน้าดินจากการไถพรวนหรือการไม่ไถพรวน (no-till practices) ซึ่งเป็นแนวทางการจัดการ best management practices เพื่อลดผลกระทบต่องสิ่งแวดล้อมจากน้ำท่า แผนการจัดการนี้เป็นส่วนสำคัญของการปรับปรุงคุณภาพน้ำในลำธารทั่วรัฐเพนซิลวาเนีย ตะวันออกเฉียงใต้ (Creech, 2017; Schneider, 2019; United States Department of Agriculture, 2018).

2. การจัดการปริมาณสารอาหารฟอสฟอรัสภายใน (internal phosphorus management)

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่ากิจกรรมของมนุษย์ได้ไปเพิ่มฟอสฟอรัสให้แหล่งน้ำ ซึ่งจะถูกละสมในดินตะกอน (sediment) ดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อดินตะกอนไม่สามารถรองรับธาตุอาหารฟอสฟอรัสได้อีก ฟอสฟอรัสก็จะถูกปล่อยออกมาสู่แหล่งน้ำในรูปของสารละลายออร์โธฟอสเฟต ซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ สารอาหารเหล่านี้ที่เรียกว่า สารอาหารฟอสฟอรัสภายใน (Qian & Huser, 2014; Chislock *et al.*, 2013) ฉะนั้นถ้าแหล่งน้ำมีทั้งสารอาหารฟอสฟอรัสที่มาจากทั้งภายนอกและมาจากภายใน แหล่งน้ำดังกล่าวจึงมีธาตุอาหารฟอสฟอรัสเหลือสำหรับการเติบโตของสาหร่ายและส่งผลกระทบเกิดการขยายพันธุ์ของสาหร่ายอย่างมาก(algal boom)ในที่สุด



ภาพที่ 10 แหล่งสารอาหารฟอสฟอรัสภายใน (internal phosphorus)

ในตะกอนดินนั้นมีฟอสฟอรัสอยู่ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ฟอสฟอรัสมีหลายรูปแบบ รูปแบบหลักๆ คือ สารอนินทรีย์ฟอสเฟต (inorganic phosphates) และสารอินทรีย์ฟอสเฟต (organic phosphates) ซึ่งสารอนินทรีย์ฟอสเฟตอยู่ในรูปของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) จับกับโลหะที่มีประจุเป็นบวก เช่น เหล็ก (Fe) อลูมิเนียม (Al) แมงกานีส (Mn) และแคลเซียม (Ca) เป็นต้น ในดินตะกอนนี้เองประกอบด้วยโลหะเหล่านี้ตามธรรมชาติ ซึ่งเหมาะที่จะจับกับสารอนินทรีย์ฟอสเฟต ดังนั้นวัฏจักรของฟอสฟอรัส (phosphorus cycle) ถึงเกี่ยวข้องกับดินและตะกอนดิน ในขณะเดียวกันสารอินทรีย์ฟอสเฟตซึ่งอยู่ในพืชและสาหร่าย เมื่อถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียก็จะเปลี่ยนรูปเป็นสารอนินทรีย์ฟอสเฟตและถูกดูดซับด้วยโลหะในตะกอนดินอีกครั้ง โดยจากการนี้ศึกษาพบว่า แม้จะมีการควบคุมไม่ให้ปล่อยธาตุอาหารต่างๆลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อย่างไรก็ตามหากปริมาณธาตุอาหารแหล่งน้ำยังคงสูงอยู่ตลอดเวลา ก็จะยังส่งผลให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชันตลอดเวลา เนื่องจากธาตุอาหารส่วนหนึ่งที่อยู่ในแหล่งน้ำนั้นมาจากตะกอนใต้ท้องน้ำ (Sánchez-Carrillo, Alatorre, Sánchez-Andrés & Garatuza-Payán, 2007) อีกทั้งความเร็วมายังมีผลต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากตะกอนใต้ท้องน้ำ ความเร็วของลมที่แรงส่งผลให้ความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำจึงเพิ่มขึ้นด้วย (Fan *et al.*, 2004; You *et al.*, 2007) การควบคุมไม่ให้ตะกอนดินปล่อยสารอาหารฟอสฟอรัสกลับสู่ชั้นน้ำสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี วิธีทางกายภาพที่เห็นได้ทั่วไปคือ การขุดลอกตะกอนในบึงหรือแหล่งน้ำเพื่อกำจัดสารอาหารที่เก็บอยู่ในตะกอน วิธีการนี้มีราคาสูงและไม่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้หมด

สำหรับวิธีทางเคมีนั้นคือ การใส่สารเคมี เช่น Phoslock® ซีโอไลต์ดัดแปลง(modified-zeolite) สารส้ม (alum) และแคลไซต์ (calcite) โดยงานวิจัยที่พบบ่อยที่สุดสำหรับการจำกัดฟอสฟอรัสสำหรับแหล่งกักเก็บน้ำที่ใช้ในการเจริญเติบโต(Zamparas & Zacharias, 2014) ที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้สำหรับประเทศไทย ดังนี้

การใส่สารส้ม (alum application) เป็นวิธีที่มีมานานและใช้มากในประเทศแถบยุโรปและอเมริกา (ตัวอย่างงานวิจัย ได้แก่ Huser, Futter, Wang & Fölster, 2018; Huser, 2017; Schütz, Rydin & Huser, 2017; Huser *et al.*, 2016) การเติมสารส้ม คือ การเติมโลหะอลูมิเนียมไปในดินตะกอนเพื่อไปเพิ่มตัวเกาะยึดหรือตัวดูดซับให้กับฟอสฟอรัส ความสมดุลระหว่างฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ (soluble phosphorus) และการดูดซับฟอสฟอรัส (phosphorus sorption) กระบวนการดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสามารถในการบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffering capacity) การดูดซับฟอสฟอรัสประกอบด้วยสองขั้นตอน ได้แก่ 1) ฟอสเฟตแลกเปลี่ยนอย่างรวดเร็วระหว่างพื้นผิวของน้ำและดินโดยอาศัยการดูดซับ และ 2) ฟอสเฟตจะค่อยๆแทรกซึมเข้าสู่ชั้นตอนของแข็งโดยอาศัยการดูดซึม (absorption) การย้อนกลับของกระบวนการดูดซึมนี้ (desorption) สามารถเกิดขึ้นได้ในสองขั้นตอน คือ สภาวะไร้อากาศสามารถเพิ่มอัตราการดูดซับและการปลดปล่อยโดยเฉพาะในแร่ธาตุ Fe (III) และ Mn (IV) ดูดซับของฟอสฟอรัสในดินจนกระทั่งอิ่มตัว จึงหมายความว่าดินนั้นมีความสามารถจำกัดในการดูดซับฟอสฟอรัสได้อีก ดังนั้นจึงไม่สามารถช่วยกำจัดและรองรับฟอสฟอรัสในระยะยาวได้ (Dunne & Reddy, 2005)

ทั้งนี้ไม่ใช่ฟอสฟอรัสทุกประเภทจะสามารถกลับคืนสู่แหล่งน้ำได้ การวิเคราะห์เพื่อจำแนกชนิดของฟอสฟอรัสในดินตะกอนนั้นมียุทธวิธีกันหลายวิธี ในบทความนี้กล่าวถึงวิธีที่ใช้วิเคราะห์ในโครงการวิจัยนี้เท่าที่ได้แก่ วิธี sequential fractionation (Psenner *et al.*, 1988 และปรับปรุงโดย Hupfer, Gächter & Giovanoli, 1995) ซึ่งจะแยกสกัดฟอสฟอรัสในรูปแบบต่างๆ ที่ละครึ่งๆ ได้แก่ loosely-bound P, iron-bound P (Fe-P), aluminum-bound P (Al-P), calcium-bound P (Ca-P), organic P (O-P) ซึ่งผลรวมของค่า loosely-bound P และ iron-bound P (Fe-P) คือ mobile-P ซึ่งเป็นฟอสเฟตชนิดที่พร้อมเป็นอาหารของพืชน้ำสาหร่าย ในขณะที่ผลรวมของ mobile-P และ บางส่วนของสารอินทรีย์ฟอสเฟตนั้นถูกเรียกว่า ฟอสฟอรัสที่อาจจะถูกใช้ได้ในเวลาต่อมา หรือ bioavailable-P ส่วน aluminum-bound P (Al-P) และ calcium-bound P (Ca-P) อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถใช้ได้ทันที (non-available form) สาหร่ายจึงไม่สามารถใช้ได้ ซึ่งคนส่วนใหญ่อาจรู้จักสารส้มเป็นสารสังกะสีตะกอน(coagulant) ที่กำจัดอนุภาคคอลลอยด์จากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา อย่างไรก็ตาม สารส้ม 100% ประกอบด้วย อลูมิเนียม 8-10% โดยประมาณ ดังนั้นการใส่สารส้มลงไป จึงเป็นการเพิ่มอลูมิเนียมในดินตะกอน และเพิ่มการกักเก็บฟอสเฟตไว้ในดินตะกอนนั้นตามลำดับ



ภาพที่ 11 การเกิด Green algal flocc (scum) ลอยบนผิวน้ำทันทีหลังจากที่มีการใส่สารส้มลงไป
ระหว่างการทำการทดลองที่บึงก อ.เมือง จ.ขอนแก่น

ข้อควรระวังในการใส่สารส้มในแหล่งน้ำนั้น ควรจะตรวจตรวจวิเคราะห์และประเมินคุณภาพน้ำ และดินตะกอนก่อนที่จะใส่สารส้มในบึงหรือแหล่งน้ำ เพื่อให้ปริมาณสารส้มที่ใส่ในแหล่งน้ำอย่างเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของฟอสฟอรัสในตะกอนดิน ค่าที่สำคัญ คือ สัดส่วนที่เหมาะสม(optimum ratio) ระหว่างอะลูมิเนียมกับฟอสฟอรัส โดยสามารถทราบได้จากค่าความเป็นกรดเป็นด่าง(pH) และค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ของแหล่งน้ำนั้น เพราะถ้าใส่สารส้มมากเกินไป ค่า pH จะลดต่ำลง ถ้า pH ต่ำมากกว่า 6 อะลูมิเนียม จะเป็นพิษต่อทั้งปลาและคน การใส่สารส้มจะต้องใส่ก่อนสาหร่ายบูมเพื่อป้องกันการเกิด cell lyse (Noyma *et al.*, 2016) ฉะนั้นการใส่สารส้มนั้นต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมากทั้งการคำนวณที่ถูกต้อง รวมทั้งต้องทราบค่า Trophic State Index (TSI) ซึ่งคำนวณจากฟอสฟอรัสรวมหรือค่าปริมาณคลอโรฟิล เอ ค่า TSI นี้จะ บ่งชี้ว่าแหล่งน้ำนั้นอยู่ในระดับใด เช่น eutrophic, hypereutrophic รวมทั้งต้องทราบช่วงเวลาที่เกิดยูโทรฟิเคชันว่าเกิดบ่อยช่วงไหน ดังแสดงในภาพที่ 11 เป็นต้น

3. การฟื้นฟูระบบแหล่งน้ำจืด (restoration of freshwater ecosystems) คือการเพิ่มความสามารถของทะเลสาบในการรองรับสารอาหารเพิ่มขึ้น จะขอกล่าวถึงวิธีที่มีความเป็นไปได้และน่าจะเหมาะสมกับประเทศไทย ดังนี้

บึงประดิษฐ์แบบลอยน้ำ (Floating Treatment Wetlands : FTWs) คือพืชที่ปลูกลงบนแพลอยหรือวัสดุที่ลอยน้ำ โดยที่รากยังคงอยู่ในน้ำ ซึ่งรูปแบบตรงกันข้ามกับพื้นที่ชุ่มน้ำประเภทอื่นที่สร้างขึ้น คือ พืชจะสามารถหยั่งรากลงในตะกอนหรือชั้นกรวดที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ บึงประดิษฐ์แบบลอยน้ำถูกนำมาใช้ทั้งการบำบัดน้ำเสีย น้ำทิ้งอุตสาหกรรมและน้ำท่าจากการเกษตรรวมทั้งปรับปรุงคุณภาพน้ำในแม่น้ำทะเลสาบและปากแม่น้ำ (Pavlineri, Skoulikidis & Tsihrintzis, 2017) นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งที่อยู่สำหรับปลาและสัตว์น้ำ รวมถึงสามารถปรับปรุงภูมิทัศน์และสถานที่ท่องเที่ยว (Zhu, Li & Ketola, 2011) บึงประดิษฐ์แบบลอยน้ำ สามารถช่วยให้คุณภาพน้ำดีขึ้นได้โดยผ่านกระบวนการทางชีวภาพและกายภาพ เช่น ช่วยลดความ

บ้นปนของน้ำ จึงช่วยเพิ่มการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยในน้ำนั้น ช่วยป้องกันแสงแดด และการลดลงของอุณหภูมิของน้ำ ลดการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชและการเกิดยูโทรฟิเคชัน ส่วนวิธีการลดสารอาหารในน้ำโดยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การดูดซึม (sorption) การถูกใช้โดยพืช (plant uptake) การถูกใช้โดยสาหร่ายและจุลชีพต่างๆ ผ่านทางรากไบโอฟิล์ม (root biofilm) และกระบวนการอื่นๆ เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชันซึ่งสามารถเปลี่ยนสารอาหารให้อยู่ในรูปแบบอื่น แต่ไม่ได้เป็นการกำจัดสารอาหารออกจากระบบ (Vymazal, 2007)

สรุป

การจัดการฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำนั้นควรเน้นที่ 2 กลยุทธ์หลัก ได้แก่ 1) การลดสารอาหารฟอสฟอรัสจากแหล่งภายนอก ซึ่งต้องอาศัยความร่วมมือของทุกฝ่าย การสร้างความตระหนักให้แก่ชุมชน ความรับผิดชอบของสังคมในการปล่อยน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัดลงแหล่งน้ำ และอาจต้องควบคู่ไปกับนโยบายและการใช้กฎหมาย เช่น การมีระบบบำบัดที่มีคุณภาพสูง VLR การอาศัยพระราชบัญญัติรัฐเพนซิลวาเนีย 38 ในการจัดการสารอาหาร การจัดการแบบผสมผสาน โดยใช้ถึงปฏิกรณ์มีเทน การหมักปุ๋ยแบบร่วม และการทำฟาร์มแบบไม่ไถพรวน และ 2) การลดแหล่งฟอสฟอรัสจากแหล่งภายในคือ ฟอสฟอรัสซึ่งมาจากดินตะกอนอย่างที่ได้กล่าวไป ได้แก่ การเติมสารส้มซึ่งเป็นวิธีที่ผู้เขียนกำลังดำเนินโครงการวิจัยและอาศัยความร่วมมือกับผู้เชี่ยวชาญต่างชาติ ซึ่งมีแนวโน้มว่าน่าจะเหมาะสมกับเมืองไทย เนื่องจากราคาถูก หาได้ง่าย และการใช้บึงประดิษฐ์แบบลอยน้ำ ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าจะนำมาใช้ได้ ดังที่มีการศึกษาของเสริมศักดิ์ อาษา และ ทิตพร คุณประดิษฐ์ (Arsa &Khunpradit,2016).แต่การทำแพลงก์ตอนที่สามารถปลูกพืชได้นั้น อาจยังมีราคาสูงอยู่และการดูแลพืชนั้นทำได้ไม่ถนัดนัก ฉะนั้นควรมีการส่งเสริมการพัฒนาศักยภาพของนักวิชาการ ทั้งนี้ องค์การปกครองต่างๆ ควรยื่นมือมาช่วยกันเป็นผู้สนับสนุนไม่ว่าจะเป็นเรื่องแหล่งทุนหรือกำลังคน และช่วยกันขับเคลื่อนให้ทั้งชุมชน นักวิชาการและนักวิจัยเข้ามามีส่วนร่วมในการฟื้นฟูพัฒนาในพื้นที่ที่ประสบปัญหาเป็นสำคัญที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- Arsa,S.,& Khunpradit,T.(2016).Effects of Hydraulic Retention Time, Area and Season on Removal of Total Nitrogen and Orthophosphate in Floating Island treatment wetlands in Thailand [In Thai]. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*,8(8),15-20
- Burkholder, J. M., Noga, E. J., Hobbs, C.H., & Glasgow, H. B. (1992). New 'phantom' dinoflagellate is the causative agent of major estuarine fish kills. *Nature*, 358, 407-410.
- Carmichael, W. W. (1992). Cyanobacteria secondary metabolites—the cyanotoxins. *Journal of Applied Bacteriology*, 72, 455-459.
- Carpenter, S. R. (2008). Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 105(32), 11039–11040.
- Chesapeake Bay Program. (2019). Watershed. Retrieved January 3, 2019, from <https://www.chesapeakebay.net/discover/watershed>
- Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., & Wilson, A. E. (2013). Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems. *Nature Education Knowledge*, 4(4), 10.
- Chorus, I., & Bartram, J. (1999). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring, and management*. London UK: E & FN Spon.
- Creech, E. (2017). Saving Money, Time and Soil: The Economics of No-Till Farming. Retrieved January 3, 2019, from United States Department of Agriculture (USDA) <https://www.usda.gov/media/blog/2017/11/30/saving-money-time-and-soil-economics-no-till-farming>
- Dunne, E. J., & Reddy, K. R. (2005). Phosphorus biogeochemistry of wetlands in agricultural watersheds. In E. J. Dunne, K. R. Reddy, & O.T. Carton (eds.), *Nutrient management in agricultural watersheds: A wetlands solution* (pp. 105-119). Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Fan, C., Zhang, L., Qin, B., Wang, S., Hu, W., & Zhang, C. (2004). Estimation on dynamic release of phosphorus from wind-induced suspended particulate matter in Lake Taihu. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(8), 710–719.
- Hu, C., Liu, H., Qu, J., Wang, D., & Rut, J. (2006). Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al¹³ species and pH control. *Environmental Science & Technology*, 40(1), 325-331.
- Hupfer, M., Gächter, R., & Giovanoli, R. (1995). Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquatic Sciences*, 57(4), 305-324.
- Huser, B. J. (2017). Aluminum application to restore water quality in eutrophic lakes: Maximizing binding efficiency between aluminum and phosphorus. *Lake and Reservoir Management*, 33(2), 143-151.
- Huser, B.J., Egemose, S., Harper, H., Hupfer, M., Jensen, H., Pilgrim, K. M., ... Futter, M. (2016). Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality. *Water Research*, 97, 122-132.

- Huser, B. J., Futter, M. N., Wang, R., & Fölster, J. (2018). Persistent and widespread long-term phosphorus declines in boreal lakes in Sweden. *Science of The Total Environment*, 613-614, 240-249.
- Huser, B., & Bartels, P. (2015). Feeding Ecology of Carp. In C. Pietsch & P. E. Hirsch (Eds.), *Biology and Ecology of Carp* (pp. 217-243). Abingdon : CRC Press.
- Jeppesen, E., Jensen, J. P., Søndergaard, M., Lauridsen, T., Pedersen, L. J., & Jensen, L. (1997). Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia*, 342, 151-164.
- Noyma, N. P., Magalhães, L., Furtado, L. L., Mucci, M., Oosterhout, F., Huszar, V. L. M., ... Lürling, M. (2016). Controlling cyanobacterial blooms through effective flocculation and sedimentation with combined use of flocculants and phosphorus adsorbing natural soil and modified clay. *Water Research*, 97, 26-38.
- Paerl, H., Xu, H., McCarthy, M., Zhu, G., Qin, B., Li, Y., & Gardner, W. (2011). Controlling harmful cyanobacteria blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N&P) management strategy. *Water Research*, 45(5), 1973-1983.
- Palmstrom, N. S., Carlson, R. E., & Cooke, G. D. (1988) Potential Links Between Eutrophication and the Formation of Carcinogens in Drinking Water. *Lake and Reservoir Management*, 4(2), 1-15.
- Pavlineri, N., Skoulikidis, N. T., & Tsihrintzis, V. A. (2017). Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal*. 308, 1120-1132.
- Pollution Control Department. (2019). Booklet on Thailand State of Pollution 2018. Bangkok Thailand: S. Mongkon Press Limited Partnership.
- Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., Puckso, R., & Sager, M. (1988) Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Archiv für Hydrobiologie*, 30, 98-103.
- Qian, H., & Huser, B.J. (2014). Anthropogenic oligotrophication via liming: long-term phosphorus trends in acidified, limed and neutral reference lakes in Sweden. *Ambio*, 43(1), 104-112.
- Sánchez-Carrillo, S., Alatorre, L. C., Sánchez-Andrés, R., & Garatuza-Payán, J. (2007). Eutrophication and Sedimentation Patterns in Complete Exploitation of Water Resources Scenarios: An Example from Northwestern Semi-arid Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 377-393.
- Schindler, D. W. (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science*, 174, 897-899.
- Schindler, D. W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 51, 356-363.
- Schindler, D. W., Hecky, R. E., Findlay, D. L., Stainton, M. P., Parker, B. R., Paterson, M. J., ... Kasian, S. E. M. (2008) Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 11254 –11258.
- Schneider, F. (2019). Nutrient Management Program. Pennsylvania Department of Agriculture. Retrieved June 3, 2018, from https://www.agriculture.pa.gov/Plants_Land_Water/State_ConservationCommission/NutrientManagementProgram/Pages/default.aspx

- Schütz, J., Rydin, E., & Huser, B. J. (2017). A newly developed injection method for aluminum treatment in eutrophic lakes: Effects on water quality and phosphorus binding efficiency. *Lake and Reservoir Management*, 33(2), 152-162.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2018). Natural Resources Conservation Service. Report: Chesapeake Bay Watershed Action Plan. Retrieved January 11, 2019, from https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MEDIA/nrcseprd1415210.pdf
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1996). Managing Urban Runoff in Nonpoint Pointers: Managing Urban Runoff, Pointer No. 7 Retrieved June 3, 2018, from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/20004PZS>.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2017). Biosolids. Retrieved February 12, 2019, from <https://www.epa.gov/biosolids>
- Van Der Windt, H. J., & Swart, J. A. (2008). Ecological corridors, connecting science and politics: the case of the Green River in the Netherlands. *Journal of Applied Ecology*, 45, 124-132.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1-3), 48-65.
- Wang, C. Y., Sample, D. J., & Bell, C. (2014). Vegetation effects on floating treatment wetland nutrient removal and harvesting strategies in urban stormwater ponds. *Science of The Total Environment*, 499, 384-393.
- Wang, C. Y., Sample, D. J., Day, S. D., & Grizzard, T. J. (2015). Floating treatment wetland nutrient removal through vegetation harvest and observations from a field study. *Ecological Engineering*, 78, 15-26.
- World Health Organization, Geneva. (1998). Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Addendum to Vol. 2. Health criteria and other supporting information. Retrieved January 3, 2019, from https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/cyanobactoxins.pdf?ua=1
- Xu, H., Paerl, H., Qin, B., Zhu, G., & Gao, G. (2010). Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 55(1), 420-432.
- You, B. S., Zhong, J. C., Fan, C. X., Wang, T. C., Zhang, L., & Ding, S. M. (2007). Effects of hydrodynamics processes on phosphorus fluxes from sediment in large, shallow Taihu Lake. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 19(9), 1055-1060.
- Zamparas, M., & Zacharias, I. (2014). Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrients: A Review. *Science of The Total Environment*, 496, 551-562.
- Zhu, L., Li, Z., & Ketola, T. (2011). Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area. *Ecological Engineering*, 37(10), 1460-1466.