การกักเก็บคาร์บอนในดินของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการต่อระบบแบบผสมผสาน (Hybrid Constructed Wetlands)

ดิรดา บุญนารอด*, ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, อดิศร ทรงคุณ, พรชัย นุ่มวงศ์, และ ศุภวิชญ์ รุ่งเหมือนฟ้า

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

** Corresponding author: dirada.bo@ku.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการต่อระบบแบบผสมผสาน (Hybrid Constructed Wetlands) ในการกักเก็บคาร์บอน โดยพิจารณารูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในระบบ ได้แก่ ระบบไหลแนวดิ่ง (Vertical Flow Constructed Wetlands: VFCWs) ระบบไหลแนวราบ (Horizontal Flow Constructed Wetlands: HFCWs) และระบบที่มีการเพิ่มชั้นตัวกรองทางธรรมชาติ (Vertical Flow Wetland with Biological Filter: VFWBF) รวมถึงระบบที่มีการผสมผสานรูปแบบการไหลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและกักเก็บคาร์บอน ผลการศึกษาพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการต่อระบบแบบผสมผสาน เช่น VFWBF+ HFCWs, VFCWs+ VFWBF และ HFCWs+ VFCWs มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินและการกักเก็บคาร์บอนผ่านการเจริญเติบโตของพืชเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ไม่มีชั้นตัวกลาง นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่มีการเพิ่มชั้นตัวกรองทางธรรมชาติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมของอินทรียวัตถุในดินมากขึ้น ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการกักเก็บคาร์บอนของระบบบึงประดิษฐ์ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการออกแบบระบบไหลแบบผสมผสานสามารถเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการจัดการน้ำเสียเชิงนิเวศและการกักเก็บคาร์บอนเพื่อสนับสนุนการลดก๊าซเรือนกระจก

คำสำคัญ: การกักเก็บคาร์บอน / การไหลแบบผสมผสาน / ระบบบำบัดน้ำเสีย / บึงประดิษฐ์ / อินทรียวัตถุในดิน

Carbon sequestration in soil of hybrid constructed wetlands wastewater treatment systems.

Dirada Boonnarod*, Tunlawit Satapanajaru, Adisorn Songkun, Phonchai Noomvomg, and Supawit Rungmueanfa

Department of Environmental technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Thailand.
** Corresponding author: dirada.bo@ku.th*

Abstract

This article presents on evaluating the efficiency of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and carbon sequestration by considering different flow patterns within the system. The studied flow configurations include vertical flow constructed wetlands (VFCWs), horizontal flow constructed wetlands (HFCWs), and vertical flow wetlands with biological filters (VFWBF). Additionally, hybrid flow systems were assessed for their potential to enhance wastewater treatment efficiency and carbon sequestration. The results indicate that hybrid constructed wetlands, such as VFWBF+ HFCWs, VFCWs+ VFWBF and HFCWs+ VFCWs, exhibit high efficiency in increasing soil organic carbon and facilitating carbon sequestration through plant growth compared to control systems without filter media layers. Moreover, systems incorporating natural filtration layers demonstrated improved wastewater treatment performance, leading to higher organic matter accumulation in the soil—an essential mechanism for carbon sequestration in constructed wetlands. This study highlights that hybrid constructed wetlands with integrated flow designs present a promising ecological approach for wastewater management and carbon sequestration, contributing to greenhouse gas reduction efforts.

Keywords: carbon sequestration / hybrid constructed wetlands / wastewater treatment / constructed wetlands / soil organic matter

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมและชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะในด้านของภัยพิบัติทางธรรมชาติ ความมั่นคงทางอาหาร และทรัพยากรน้ำ [9] หนึ่งในสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงนี้คือ ภาวะเรือนกระจก ซึ่งเกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์ ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดปรากฏการณ์รุนแรงอย่าง น้ำท่วม ความแห้งแล้ง พายุ และการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ [7] แนวทางสำคัญในการบรรเทาผลกระทบจากปัญหาดังกล่าว คือการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ควบคู่กับการเพิ่มการกักเก็บคาร์บอนในระบบนิเวศ ซึ่งรวมถึงดิน พืช และแหล่งน้ำ โดยเฉพาะการกักเก็บคาร์บอนในดิน ซึ่งถือเป็นหนึ่งในแหล่งสะสมคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ [6] เนื่องจากดินสามารถดูดซับและกักเก็บสารอินทรีย์ได้ในระยะยาว และช่วยปรับปรุงโครงสร้างและความอุดมสมบูรณ์ของดินในเวลาเดียวกัน

หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงหลังคือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands: CWs) ซึ่งนอกจากจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้ต้นทุนต่ำแล้ว ยังแสดงศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนผ่านกระบวนการสะสมสารอินทรีย์ในดินและชีวมวลของพืชภายในระบบ [11][12] ระบบนี้จำลองลักษณะการทำงานของ พื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ โดยใช้พืช วัสดุกรอง และดินร่วมกันในการกำจัดมลสาร เช่น สารอินทรีย์ โลหะหนัก ธาตุอาหารส่วนเกิน และสารพิษอื่น ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย [15] นอกจากการบำบัดน้ำเสียแล้ว ระบบบึงประดิษฐ์ยังมีบทบาทในการกักเก็บคาร์บอน ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การตรึงคาร์บอนโดยพืช การสะสมอินทรียวัตถุในดิน และการทำงานร่วมของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยไม่ปล่อยกลับสู่บรรยากาศทันที [8] กระบวนการเหล่านี้ช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น CO_2 และ CH_4 ออกสู่ชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนระหว่างระบบบึงประดิษฐ์แบบเดี่ยวและแบบผสมผสาน ขาดความเข้าใจเกี่ยวกับผลของการออกแบบ เช่น ชนิดพืช ทิศทางการไหล และวัสดุกรอง ต่อการสะสมคาร์บอนในทั้งดินและชีวมวลพืช การศึกษาที่มีอยู่มักเน้นเฉพาะประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยไม่ได้เชื่อมโยงกับศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาวอย่างเป็นระบบ [4] การขยายพื้นที่ระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสมยังสามารถมีบทบาทสำคัญในการ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับภูมิภาคและระดับโลก โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรมและชุมชนที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งส่งเสริมความมั่นคงด้านทรัพยากรธรรมชาติในระยะยาว

การศึกษาครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการกักเก็บคาร์บอน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างรูปแบบของระบบที่แตกต่างกัน เพื่อเสนอแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบบำบัดให้มีความยั่งยืน สนับสนุนการจัดการสิ่งแวดล้อม และช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

1. ประเมินการกักเก็บคาร์บอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

3. ขอบเขตของการศึกษา

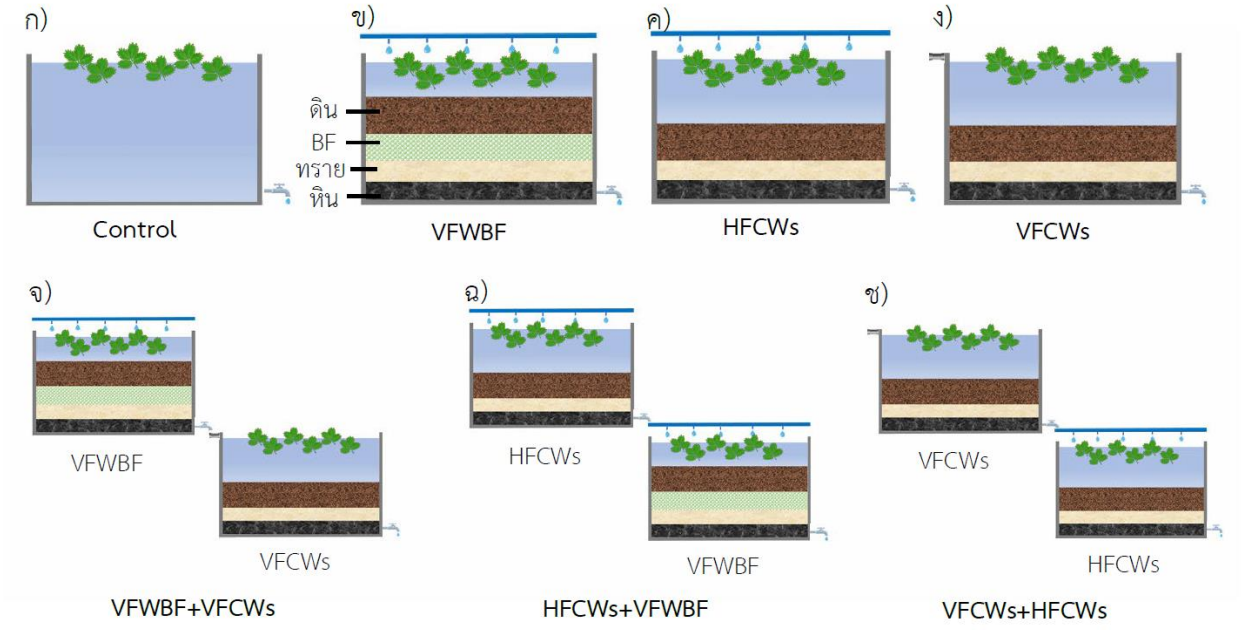
งานวิจัยนี้เป็นการประเมินการกักเก็บคาร์บอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำแบบผสมผสานที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำแบบผสมผสาน
2. ประเมินการกักเก็บคาร์บอนในดินและพืชของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำแบบผสมผสาน
3. ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำแบบผสมผสาน

4. วิธีการศึกษา

4.1 การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

การทดลองได้มีการออกแบบในกระถางปูนที่มีขนาดความกว้าง 40 เซนติเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร และความสูง 50 เซนติเมตร โดยมีการจัดการดังนี้ แบ่งเป็นระบบบำบัดเดี่ยว ได้แก่ รูปที่ 1 ก.) ไม่มีตัวกลาง; control รูปที่ 1 ข.) มีตัวกลางเป็นชั้นดิน, เซรามิกบอล (biological filter: BF), ทราย และหิน และมีการไหลของน้ำในแนวดิ่ง; VFWBF รูปที่ 1 ค.) มีตัวกลางเป็นชั้นดิน ทราย และหิน และมีการไหลของน้ำในแนวดิ่ง; VFCWs รูปที่ 1 ง.) มีตัวกลางเป็นชั้นดิน ทราย และหิน และมีการไหลของน้ำในแนวราบ; HFCWs ความสูงของตัวกลางในแต่ละชั้นประกอบด้วยดินหนา 12.5 เซนติเมตร BF หนา 10 เซนติเมตร ทรายหนา 3 เซนติเมตร และหินหนา 4.5 และระบบบำบัดผสมผสานที่มีการต่อระบบสองชั้น ได้แก่ รูปที่ 1 จ.) ระบบที่มีการเพิ่มชั้นตัวกรองทางธรรมชาติต่อกับระบบไหลแนวราบ; VFWBF+HFCWs รูปที่ 1 ฉ.) ระบบไหลแนวดิ่งต่อกับระบบที่มีการเพิ่มชั้นตัวกรองทางธรรมชาติ; VFCWs+VFWBF และ รูปที่ 1 ช.) ระบบไหลแนวราบต่อกับระบบไหลแนวดิ่ง; HFCWs+VFCWs ในแต่ละระบบมีการใช้ผักกระเฉดซึ่งเป็นพืชลอยน้ำภายในระบบ โดยจะทำการขังน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไว้ในระบบเป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนจะปล่อยน้ำเสียเข้าระบบถัดไปและขังไว้อีกเป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ ก) Control ข) VFWBF ค) VFCWs ง) HFCWs จ) VFWBF+ HFCWs ฉ) VFCWs+ VFWBF และ ช) HFCWs+ VFCWs

4.2 การศึกษาคุณภาพน้ำ

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำดำเนินการในห้องปฏิบัติการเคมีด้วยวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA and WPCF [3] โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้ ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ (BOD) mg/L โดยวิธี Azide modification of iodometric method ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) mg/L โดยวิธี Closed Reflux ค่าฟอสเฟตรวม (TP) mg/L ค่าไนไตรท์ (NO_2^--N) mg/L และ ค่าไนเตรท (NO_3^--N) mg/L โดยวิธี Colorimetric method

4.3 การกักเก็บคาร์บอนในระบบ

การกักเก็บคาร์บอนในระบบบำบัดจะดำเนินการคำนวณหาจากปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินและอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชก่อนและหลังการบำบัดน้ำเสียเพื่อหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนภายในของระบบบำบัด

4.3.1 การคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน

การคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอน โดยใช้วิธี Walkley and Black [14] เป็นการทำปฏิกิริยาทางเคมี ของคาร์บอนอินทรีย์ในดินกับโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) จากการทำปฏิกิริยา คาร์บอนจะถูกออกซิไดซ์โดยไดโครเมตไอออน ($Cr_2O_7^{-2}$) เป็น Cr^{+3} ในส่วนของ $Cr_2O_7^{-2}$ ส่วนเกินจะถูกไตเตรทกลับด้วย ไอออนของเหล็ก (Fe^{+3}) จากสารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$) แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการมาคำนวณหาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ จากสมการที่ (1)

$$\%\ Organic\ Carbon = \frac{(Vb - Vs)\ x\ M\ Fe\ x\ 0.003\ x\ 100\ x\ f\ x\ mcf}{W} \quad (1)$$

โดย :

Vb	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตตัวควบคุม (mL)
Vs	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างดิน (mL)
0.003	=	ค่าคงที่ที่ใช้ในการแปลงมวลของคาร์บอนจากปริมาตรของ Fe^{2+}
f	=	correction factor (1.3)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่างดินแห้ง (g)
mcf	=	Moisture correction factor

4.3.2 การคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในพืช

การกักเก็บคาร์บอนของพืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์สามารถประเมินได้จากชีวมวลของพืชที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงเวลาการทดลอง โดยใช้ตัวชี้วัดที่เรียกว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate: RGR) ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการสะสมชีวมวลของพืชต่อหน่วยชีวมวลเดิมในช่วงเวลาหนึ่ง ดังสมการที่ (2)

$$RGR = \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

โดย : W_1 = ชีวมวลของพืช ณ เวลาเริ่มต้น (g)

W_2 = ชีวมวลของพืช ณ เวลาสิ้นสุด (g)

t_1 และ t_2 = เวลาที่วัด (วัน)

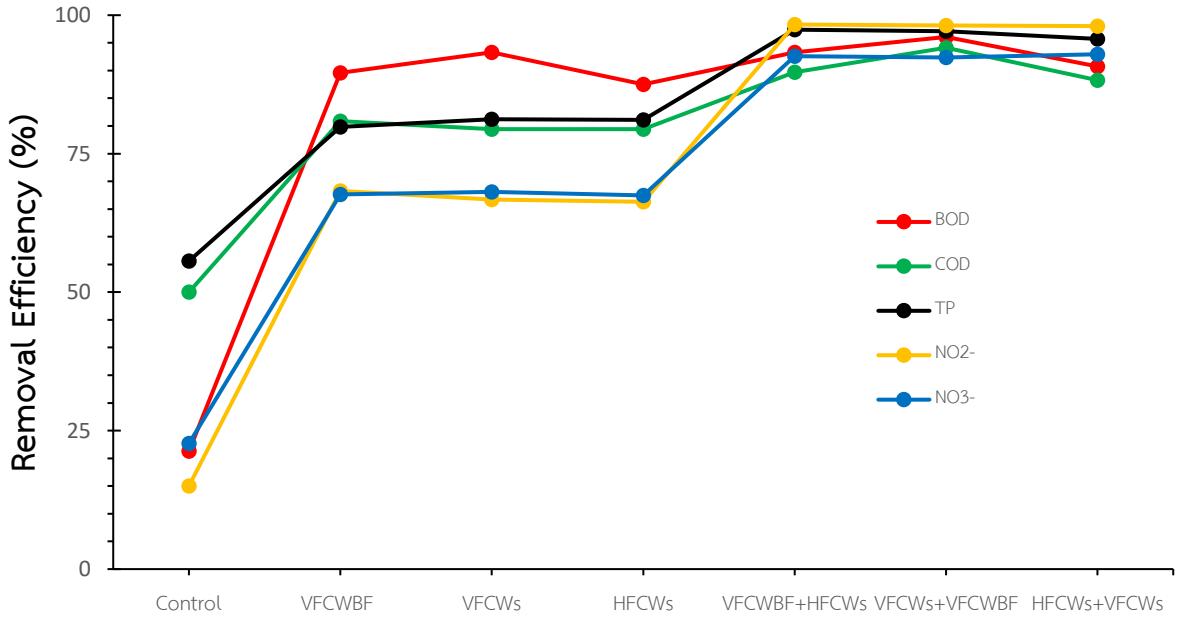
4.4 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

ทดสอบค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนของแต่ละชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากนั้นเปรียบเทียบหาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองด้วย T- test โดยโปรแกรม Excel

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 การศึกษาคุณภาพน้ำ

จากการศึกษาคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการ ลด BOD, COD, TP, NO_2^--N และ ค่าไนเตรท NO_3^--N เมื่อเทียบกับชุดควบคุม อีกทั้งระบบบำบัดแบบผสมผสานยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของทุกพารามิเตอร์มีค่ามากกว่าร้อยละ 88 อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์น้ำต่าง ๆ ของระบบ VFWBF+HFCWs, VFCWs+VFWBF และ HFCWs+VFCWs ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบบำบัดเดี่ยวอย่างเห็นได้ชัด

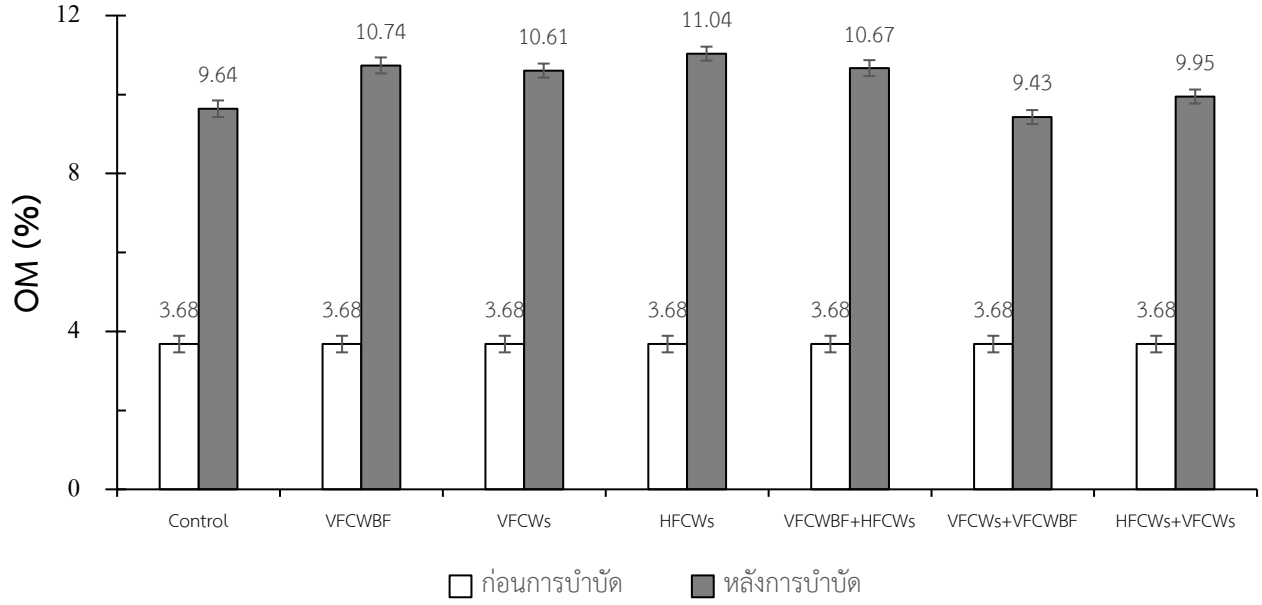


รูปที่ 2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

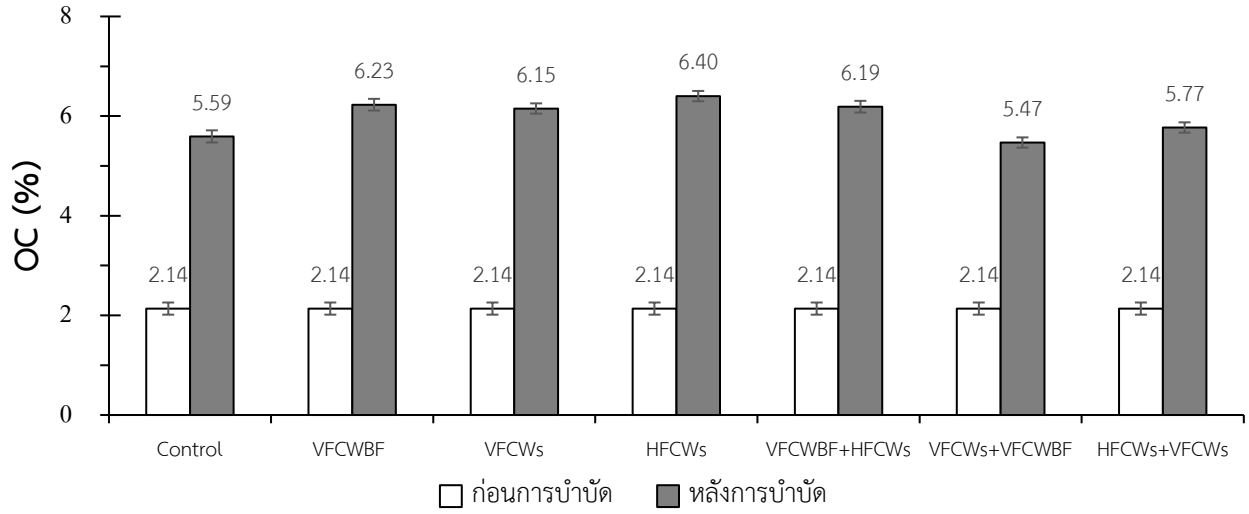
ระบบแบบผสมผสานช่วยให้การไหลของน้ำผ่านวัสดุกรองและพื้นที่รากพืชหลากหลายมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างจุลินทรีย์ น้ำเสีย และวัสดุกรองในแต่ละเฟตของระบบ ส่งผลให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์และการดูดซับสารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [10][15] โดยระบบ VFWBF+HFCWs ซึ่งประกอบด้วยการไหลแนวดิ่งผ่านวัสดุตัวกลางทางธรรมชาติอย่างเซรามิกบอลต่อด้วยการไหลแนวราบ แสดงประสิทธิภาพสูงเกือบทุกพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในระบบกาไหลแนวดิ่งจะเอื้อต่อการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic) โดยมีการเติมอากาศได้ดี ในขณะที่ระบบแนวราบจะเอื้อต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic) รวมถึงกระบวนการ Denitrification ที่ช่วยลดไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 การกักเก็บคาร์บอนในระบบ

จากการศึกษาการกักเก็บคาร์บอนในดินก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดพบว่าปริมาณค่าอินทรียวัตถุของดินมีค่าร้อยละ 3.68±0.10 ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าปริมาณของอินทรียวัตถุอยู่ในระดับสูง ตามการจำแนกระดับอินทรียวัตถุในดิน [1] และค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินมีค่าร้อยละ 2.14±0.06 ดังแสดงในรูปที่ 4 จากการศึกษาการกักเก็บและการปลดปล่อยคาร์บอนของดินในแหล่งน้ำที่มีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนใกล้เคียงกับดินก่อนนำน้ำเสียเข้าเข้าสู่ระบบบำบัด [4]

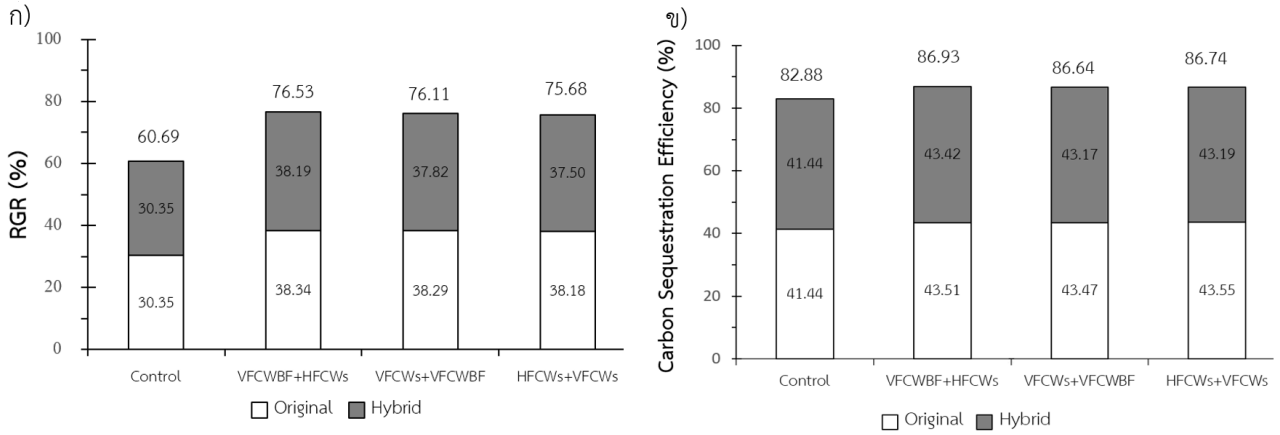


รูปที่ 3 ปริมาณอินทรียวัตถุในดินของระบบบำบัดน้ำเสียก่อนการบำบัดน้ำเสียและหลังการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 4 ปริมาณคาร์บอนอินทรียในดินของระบบบำบัดน้ำเสียก่อนการบบำบัดน้ำเสียและหลังการบำบัดน้ำเสีย

หลังผ่านการบำบัดน้ำเสียพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของอินทรียวัตถุ ส่งผลให้มีการสะสมของคาร์บอนอินทรียในดินเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 ในปัจจัยแวดล้อมที่คล้ายคลึงกันส่งผลให้ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกัน [2] เช่นเดียวกับอัตราการเจริญเติบโตของพืช ดังแสดงในรูปที่ 5 ก) และในขณะเดียวกันที่ปัจจัยแวดล้อมเดียวกันที่มีการจัดการออกแบบให้แตกต่างกันก็ส่งผลต่อปริมาณการกักเก็บคาร์บอนให้มีความแตกต่างกัน [8] ประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนของทุกระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน การออกแบบโดยต่อระบบแบบผสมผสานส่งผลให้มีการเพิ่มการกักเก็บคาร์บอนในระบบเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว ดังที่แสดงในรูปที่ 5 ข) ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นก็แลกมากับการใช้พื้นที่ในการบำบัดที่มากขึ้นและใช้ระยะเวลาที่มากขึ้น



รูปที่ 5 ก) อัตราการเจริญเติบโตของพืชในระบบบำบัดน้ำเสียหลังการบำบัดน้ำเสีย และ ข) ประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนของดินและพืชในระบบบำบัดน้ำเสียหลังการบำบัดน้ำเสีย

ระบบที่มีการต่อผสมผสาน เช่น VFWBF+HFCWs และ VFCWs+VFWBF แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มของปริมาณอินทรียวัตถุในดินมากกว่าระบบทั่วไป [10] ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มพื้นที่รับสัมผัสน้ำเสียกับชั้นดินและตัวกรองทำให้เกิดการสะสมสารอินทรีย์มากขึ้นอินทรียวัตถุเหล่านี้เป็นแหล่งของคาร์บอนที่สามารถถูกตรึงไว้ในดิน [13] แนวโน้มของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินแสดงให้เห็นว่าระบบ VFCWBF+HFCWs มีการสะสมคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด โดยระบบที่มีการผสมผสานระบบแบบแนวดิ่งและแนวราบสามารถเก็บคาร์บอนได้ดีกว่าระบบที่มีเพียงทิศทางเดียว นอกจากนั้นพืชในระบบ VFWBF+HFCWs มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มของสารอาหารในดินและคุณภาพน้ำที่ดีขึ้น การเติบโตของพืชไม่เพียงเพิ่มชีวมวล (biomass) ที่เป็นแหล่งสะสมคาร์บอนในรูปของชีวภาพ แต่ยังช่วยกรองและตรึงคาร์บอนจากบรรยากาศด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง [5]

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการออกแบบเป็นระบบผสมผสาน เช่น ระบบ VFWBF+HFCWs มีประสิทธิภาพในการลดค่ามลสารในน้ำเสียได้อย่างโดดเด่น โดยสามารถลดค่า BOD ได้ 93.29%, COD ได้ 89.71%, ฟอสเฟตรวม (TP) ได้ 97.38%, ไนไตรท์ (NO_2^--N) ได้ 98.31% และไนเตรท (NO_3^--N) ได้ 92.58% ซึ่งสูงกว่าระบบควบคุมที่มีค่าการลดอยู่ในช่วงเพียงประมาณ 56% หรือต่ำกว่า สำหรับทุกพารามิเตอร์ ระบบแบบผสมผสานอื่น ๆ เช่น VFCWs+VFWBF และ HFCWs+VFCWs ก็แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการลดมลสารที่อยู่ในช่วง 88–98% ซึ่งแม้ว่าจะต่ำกว่าระบบ VFWBF+HFCWs เล็กน้อย แต่ก็ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบบำบัดเดี่ยวอย่างชัดเจน ในด้านของการกักเก็บคาร์บอนในดินพบว่าหลังจากน้ำเสียผ่านกระบวนการบำบัด ระบบ VFWBF+HFCWs มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.68% เป็น 10.67% คิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 2.90 เท่า ขณะที่คาร์บอนอินทรีย์ในดิน (Soil Organic Carbon) เพิ่มจาก 2.14% เป็น 6.19% หรือประมาณ 2.89 เท่า โดยมีค่า SOC เพิ่มสูงที่สุด เมื่อเทียบกับระบบควบคุมพบว่าระบบผสมผสานสามารถเพิ่มการสะสมคาร์บอนในดินได้มากกว่าเกือบสองเท่า นอกจากนี้การวัดอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืช (Relative Growth Rate: RGR) พบว่าระบบ VFWBF+HFCWs ให้ค่า RGR สูงถึง 76.53% เมื่อเทียบกับระบบควบคุมที่มีค่าเพียง 60.69% ซึ่งหมายถึงการเจริญเติบโตของพืชในระบบผสมผสานสูงกว่าระบบควบคุมถึง 26.46% ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มของชีวมวลพืช และช่วยส่งเสริมการกักเก็บคาร์บอนในรูปชีวภาพ

เมื่อรวมทั้งการกักเก็บคาร์บอนจากดินและพืชพบว่าระบบ VFWBF+HFCWs มีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนรวมมากที่สุด คิดเป็น 86.93% ของค่าการกักเก็บ โดยระบบ VFCWs+VFWBF และ HFCWs+VFCWs อยู่ที่ 86.64% และ 86.74% ตามลำดับ ส่วนระบบควบคุมสามารถกักเก็บคาร์บอนได้เพียง 82.88% ของระบบ จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบผสมผสานไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย แต่ยังเสริมศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนในระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในดินและชีวมวลพืช ซึ่งส่งผลดีต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว และสนับสนุนแนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาที่ดิน. (2558). สถานภาพทรัพยากรดินและที่ดินของประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและ สหกรณ์. กรุงเทพฯ

[2] ณัทธิยา ชำนาญค้า. (2564). การกักเก็บคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน พื้นบ่อเลี้ยงปลาดุกบิ๊กอุย. Thai Science and Technology Journal, 296-306.

[3] APHA, AWWA, & WPCF. (2017). Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

[4] Boyd, C. E., Wood, C. W., Chaney, P. L., & Queiroz, J. F. (2010). Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions. *Environmental pollution*, *158*(8), 2537-2540.

[5] Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology, 35*(5), 11–17. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00047-4

[6] FAO. (2016). The state of food and agriculture, Climate Change. Agriculture and Food Security. FAO, United Nations.

[7] IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. International Panel on Climate Change. Hayama, Japan.

[8] Li, L., Xu, H., Zhang, Q., Zhan, Z., Liang, X., & Xing, J. (2024). Estimation methods of wetland carbon sink and factors influencing wetland carbon cycle: a review. Carbon Research. 3.

[9] Mander, U., Dotro, G., Ebie, Y., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Nogueira, S.F., Jamsranjav, B., Kasak, K., Truu, J., Tournebize, J., & Mitsch, W.J. (2014). Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. Ecological Engineering, 66, 19-35.

[10] Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2008). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press.

[11] Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, *21*, 101261.

[12] Rosli, F. A., Lee, K. E., Goh, C. T., Mokhtar, M., Latif, M. T., Goh, T. L., & Simon, N. (2017). The Use of Constructed Wetlands in Sequestrating Carbon: An Overview. Nature Environment & Pollution Technology. 16(3).

[13] Tanner, C. C., Sukias, J. P., & Upsdell, M. P. (1999). Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Water Research, 33*(12), 2875–2885. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00030-8

[14] Walkley, A.J., Black, I.A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29-38.

[15] Wu, S., Kuschk, P., Brix, H., Vymazal, J., & Dong, R. (2014). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *Water Research*, 57, 40–55.