



แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน
ของระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียน
ใต้ชั้นกรองสำหรับโรงเรือนเกษตร

Mathematical Dynamic Recirculation Plug-Flow Areal
Reactor Models of Subsurface Recirculation Flow
Constructed Wetland Wastewater Treatment for
Floating Agriculture Using in Greenhouse

รัฐพล สุขสมบูรณ์^{1,*} ชนะชัย อวนวัง² ละอองดาว ภูคำรอง³ และ วุฒิกร อนันตสิริชัย⁴

Rattapol Suksumboon^{1,*} Chanachai Uanwang² Laongdaw Poosumrong³

and Wuthikorn Anantasirichai⁴

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

²คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

³ภาควิชามนุษยศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม มหาสารคาม 44000

¹Department of Management Environmental Engineering, Faculty of Engineering,

²Faculty of Information Technology,

³Faculty of Humanities and Social Social Engineering,

⁴Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,

Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham 44000, Thailand

*E-mail: rattapol.suk@gmail.com, Tel: 0-89618-6944

บทคัดย่อ

วิจัยในครั้งนี้เพื่อพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation Plug-Flow Areal Reactor: RPFAR) ของระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง (Recirculation Subsurface Flow Constructed Wetland: RSFCW) ที่ใช้ตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 11 กระถาง มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ($<1:4$) ใช้พื้นที่ (Area: A) 0.04 ตร.ม. ความลึกชั้นกรองที่ 25 ซม. พบว่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (Recirculation ratio; Q_{Re}/Q_{in}) R เท่ากับ 7 และเวลากักเก็บหมุนเวียน (Hydraulic Recirculation Time; HReT) เท่ากับ 0.5 ชั่วโมงในการบำบัดน้ำเสีย พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) เท่ากับ 88.94% และเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย kA_{2nd} เท่ากับ 18.006 ม./วัน.

คำสำคัญ: การพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน; ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลเวียนใต้ชั้นกรอง

ABSTRACT

The objective of this study was to develop the dynamic modeling of recirculation plug-flow areal reactor recirculation completely-mixed stirred tank areal reactor (RPFAR) of recirculation Subsurface flow constructed wetland (RSFCW) using granular activated carbon (GAC) as a media contained in 11 pots of reed. The ratio of width to : length was $>1:4$, used area was 0.04 m², and the initial height of bed 25 cm. The result of the study found that the recirculation ratio: Q_{Re}/Q_{in} (R) was 7. The hydraulic recirculation time (HReT) was 0.5 hrs for treating waste water. As a result, the efficiency of BOD removal was 88.94%, respectively which cause the second-order-reaction with areal rate coefficient (kA_{2nd}) equals 18.006 m/day, respectively.

Keywords: The dynamic model of the Recirculation Plug-Flow Areal Reactor; Recirculating surface flow Constructed wetland For Wastewater Treatment

1. บทนำ

การศึกษาก่อนหน้านี้พิสูจน์แล้วว่าระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) ถือเป็นเทคโนโลยีที่ยั่งยืนโดยใช้พื้นฐานของธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสีย [1, 2, 3] และเพิ่มพื้นที่สีเขียวรักษาสภาพสมดุลของระบบนิเวศ [4] จากข้อดีของกระบวนการหลายอย่างที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) จึงได้นำระบบ CWs ใช้ในการติดตั้งกับโรงเรือนเมล่อนในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมเพื่อใช้บำบัดน้ำเสีย

ภูมิอากาศร้อนของประเทศไทยเหมาะสมกับระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์ (CWs) จึงมีแนวความคิดพัฒนา

แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation Plug-Flow Areal Reactor: RPFAR) [5] โดยออกแบบหลังคาหัวฉีดน้ำพ่นฝอยของโรงเรือนปลูกเมล่อนลอยน้ำเพื่อใช้ปรับอุณหภูมิและเติมอากาศในการถ่ายเทปริมาณออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง (Recirculation Subsurface Flow Constructed Wetland: RSFCW) การออกแบบระบบ RSFCW จะใช้ตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC), ทราาย, เพอร์ไลต์, ซีโอไลต์, หินลาวา [6, 7] โดย GAC เป็นที่นิยมเพราะสามารถให้แผ่นฟิล์มจุลชีพเกาะผิวตัวกลางหนาเพิ่มขึ้นและ

การสะสมของชีวภาพที่ดีเนื่องจากชั้นกรองมี Specific biofilm surface area ราว ๆ 1,600-2,000 ตร.ม./ลบ.ม. และสามารถรับโหลดสารอินทรีย์ปริมาณมากได้ [8] GAC จะทำหน้าที่ป้องกันรากของต้นกกในท่อกระถางแนวยาวที่มี อัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (>1:4) [9-11] โดยใช้ความ ลึกชั้นกรองในกระถางที่ 25 ซม.[12] เพื่อลดการสูญเสีย ระดับน้ำ (Head Loss: HL) แบบจำลองพลวัตเครื่อง ปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (RPFAR) ถูก พัฒนามาจากแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบ หมุนเวียน (RPFR) [11] ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรอัตราส่วน หมุนเวียน (Recirculation ratio: $QR/Q_{in} = R$) [9-11,13] ค่าความเข้มข้นพื้นหลัง (background concentration: C^*) [14] และพื้นที่ (Area: A) เพื่อได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ใหม่สำหรับวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ใช้ในการออกแบบ ระบบบำบัดน้ำเสีย

การศึกษาค้นคว้ามีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพ ในการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) และใช้ แบบจำลองพลวัต RPFAR เพื่อหาค่าปฏิกริยาอันดับหนึ่ง และสอง ($n=1$ และ $n=2$) ของระบบบำบัด RSFCW สำหรับ หาค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) และ ตรวจสอบความแม่นยำจากการพัฒนาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์

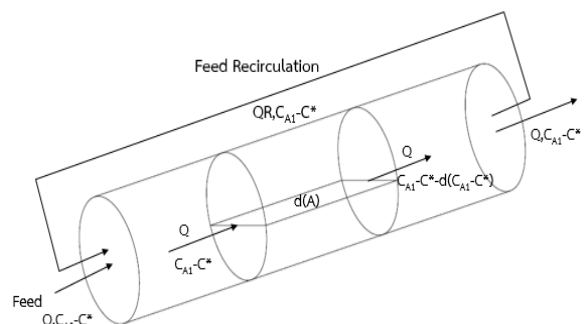
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองพลวัต RPFAR จะต้องพิจารณาทิศการไหล ตามแนวยาวกับอัตราส่วนความกว้าง:ความยาว (>1:4) [9-11, 12] และปฏิกริยาอันดับหนึ่งและสอง ($n=1$ และ $n=2$) เนื่องจากการไหลการเข้าออกของน้ำ และมวลสารใน หนึ่งเซลล์จากหลักสมดุลของ RPFAR จะเปลี่ยนการ วิเคราะห์จากหน่วยเซลล์ปริมาตร (Volume: V) [11] เป็น หน่วยเซลล์พื้นที่ (Area: A) และค่าความเข้มข้นพื้นหลัง (background concentration: C^*) [14] เพื่ออธิบาย องค์ประกอบต่าง ๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

2.1.1 การพัฒนาแบบจำลองพลวัต RPFAR

ใน ideal Recirculation Plug-Flow Areal Reactor (IRPFAR) การไหลเวียนของของเหลวจะทำให้มวลสาร เดินทางไปเป็นหน้าสม่ำเสมอ ความเข้มข้นในระนาบที่ ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอดและมีกรผสมโดยความ แตกต่างของความเข้มข้นในทิศทางการไหล ดังนั้น ในแบบจำลองพลวัต RPFAR จะมีความแตกต่างของ ความเข้มข้นเฉพาะในทิศทางการไหลเท่านั้น continuity equation จะเขียนได้ในรูปของ partial differential equation ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อ หน่วยเวลาในแต่ละ element ของปริมาตรในทิศการไหล ดังนี้ [11] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองพลวัต RPFAR

จากภาพที่ 1 กำหนดให้อัตราการไหลเข้ากับอัตราการ ไหลหมุนเวียน ($Q+QR$) [9-11,13] และให้ความเข้มข้นเข้า influent เป็น CA_0-C^* ความเข้มข้นออก Effluent เป็น CA_1-C^* [14] จะทำให้มวลสารเดินทางไปจุดเริ่มต้นความ เข้มในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะลดลงเท่ากันตลอดพื้นที่ มวลสาร (Area: A) สามารถเขียนได้ในรูปของ partial differential equation ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความ เข้มข้นต่อหน่วยของอัตราส่วนหมุนเวียน (R) [9-11,13] แต่ ละองค์ประกอบของพื้นที่ในทิศทางการไหลดังนี้ พิจารณา ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$)

$$(Q + QR)(CA_1 - C^*) = (Q + QR)((CA_1 - C^*) - d(CA_1 - C^*)) - k_{A_{1st}}(CA_1 - C^*)d(A) \quad (1)$$

จัดรูปสมการ

$$(Q + QR)d(CA1 - C^*) = -kA_{1st}(CA1 - C^*)d(A) \quad (2)$$

integrate

$$\int_{CA0}^{CA1} \frac{d(CA1 - C^*)}{(CA1 - C^*)} = \frac{-kA_{1st}}{(Q + QR)} \int_0^A d(A) \quad (3)$$

$$\ln\left(\frac{(CA1 - C^*)}{(CA0 - C^*)}\right) = -kA_{1st} \frac{A}{(Q + QR)} \quad (4)$$

$$kA_{1st} = -\frac{\ln\left(\frac{CA1 - C^*}{CA0 - C^*}\right)}{\frac{A}{Q(1 + R)}} \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 ดังนั้นการแก้สมการสำหรับความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ (RPFAR) จะได้

$$CA1 = C^* + (CA0 - C^*)e^{-kA_{1st} \frac{A}{Q(1+R)}} \quad (6)$$

พิจารณาปฏิกริยาอันดับสอง (n=2)

$$(Q + QR)(CA1 - C^*) = (Q + QR)(CA1 - C^*) - d(CA1 - C^*) - kA_{1st}(CA1 - C^*)^2 d(A) \quad (7)$$

จัดรูปสมการ

$$(Q + QR)d(CA1 - C^*) = -kA_{1st}(CA1 - C^*)^2 d(A) \quad (8)$$

integrate

$$\int_{CA0}^{CA1} \frac{d(CA1 - C^*)}{(CA1 - C^*)^2} = \frac{-kA_{1st}}{(Q + QR)} \int_0^A d(A) \quad (9)$$

$$\frac{1}{(CA1 - C^*)} - \frac{1}{(CA0 - C^*)} = -kA_{2nd} \frac{A}{Q(1 + R)} \quad (10)$$

จัดรูปสมการ

$$kA_{2nd} \frac{\frac{1}{(CA0 - C^*)} - \frac{1}{(CA1 - C^*)}}{\frac{A}{Q(1 + R)}} \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 ดังนั้นการแก้สมการสำหรับความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ปลักเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (RPFAR) จะได้

$$CA1 = C^* + \frac{(CA0 - C^*)}{1 - kA_{2nd} \frac{A(CA0 - C^*)}{Q(1 + R)}} \quad (12)$$

โดยที่ CA0, CA1 คือ ความเข้มข้นของมวลสารเข้า และออกในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (มก./ลิตร)

Q คือ อัตราการไหลเข้าและออกของมวลสารในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (ลบ.ม./วัน)

A คือ พื้นที่ในหนึ่งเซลล์ (ตร.ม.)

R คือ อัตราส่วนการหมุนเวียน

kA_{1st} คือ ค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของมวลสารเชิงพื้นที่ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (n=1) (ม./วัน)

kA_{2nd} คือ ค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของมวลสารเชิงพื้นที่ปฏิกริยาอันดับสอง (n=2) (ม./วัน)

2.2 การทดลองเชิงพลวัต

2.2.1 ลักษณะน้ำเสีย

การศึกษานี้ใช้จากแหล่งน้ำธรรมชาติหัวผัดน้ำพันฝอยบนหลังคาของโรงเรือนปลูกเมล่อนลอยน้ำเพื่อใช้ปรับลดอุณหภูมิและปรับปรุงคุณภาพน้ำของค่า BOD ให้อยู่ในช่วง 90-105 มก./ลิตร [9] โดยทั่วไปค่า pH จะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 9 ก่อนเข้าระบบบำบัด RSFCW

2.2.2 การทดลองระบบบำบัด RSFCW

ในการออกแบบระบบบำบัด RSFCW ใช้ตัวกลาง GAC [8] บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 11 กระถางบนท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter: D) 0.08 ม. และความยาว (Length: L) 8.00 ม. มีอัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (>1:4) [9-11, 12] ใช้พื้นที่ (Area: A) 0.04 ตร.ม. ความลึกชั้นกรองที่ 25 ซม. [12]

ในการทดลองระบบบำบัด RSFCW ใช้ค่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (Recirculation ratio: QR/Qin) R เท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 7 [9, 15] โดยทำการเปิดปั๊ม (Feeding Pump) ปลอยน้ำเสียเข้า (Qin) 1 ลิตร/นาที่ และเปิดปั๊มระบบน้ำหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลหมุนเวียน (QR) 3,4,5,6 และ 7 ลิตร/นาที่

โดยใช้เวลากักเก็บหมุนเวียน (hydraulic recirculation time: HReT) ที่ 0.5 ชั่วโมงในการบำบัดน้ำ [9-11] ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำของระบบบึงประดิษฐ์ ได้แก่ ค่า BOD โดยเก็บน้ำตัวอย่างทั้งหมด 3 จุดดังแสดงรูปที่ 2 ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำตาม Standard Method [16] เพื่อหา

ประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) นำข้อมูลที่ได้นำใส่ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมประสิทธิภาพเชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (kA) จากสมการที่ 5 และสมการที่ 11 ทำการตรวจสอบความแม่นยำแบบจำลองพลวัต RPFAR



รูปที่ 2 หน่วยระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง
(Unit Operation Recirculation Subsurface Flow Constructed Wetland: RSFCW)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) กับอัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

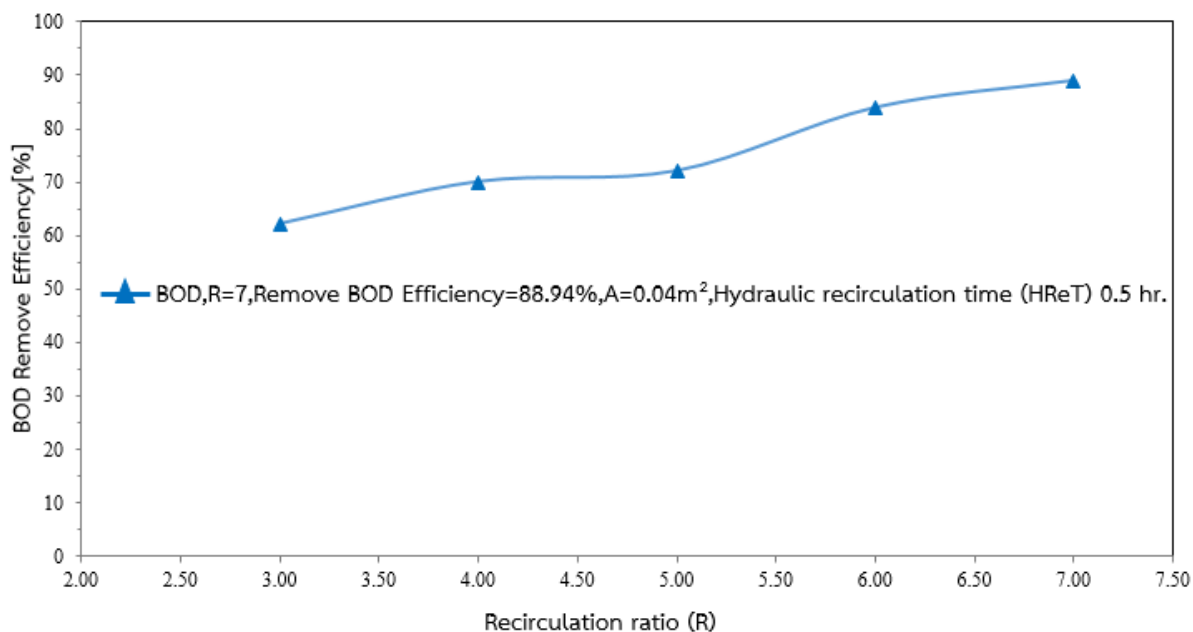
ผลจากการศึกษาระบบบำบัด RSFCW ใช้ตัวกลาง GAC [8] บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 11 กระถางบนท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter: D) 0.08 ม. และความยาว (Length: L) 8.00 ม. มีอัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (>1:4) [9-11, 12] ใช้พื้นที่ (Area: A) 0.04 ตร.ม.

ความลึกชั้นกรองที่ 25 ซม.[12] พบว่าค่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 7 [9, 15] ในการทดสอบโดยทำการเปิดปั๊ม (Feeding Pump) ปล่อน้ำเสียเข้า (Q_{in}) 1 ลิตร/นาที่และเปิดปั๊มระบบน้ำหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_R) 7 ลิตร/นาที่ โดยใช้เวลากักเก็บหมุนเวียน (HReT) ที่ 0.5 ชั่วโมงในการบำบัดน้ำเสียชุมชน [9-11] มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่า BOD (Removal BOD Efficiency) ได้ถึง 88.94% ดังแสดงรูปที่ 3 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า BOD กับความแตกต่างอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) และพื้นที่ (A)

R	BOD in (mg/L)	BOD out of RSFCW (mg/L)		(%) Removal BOD Efficiency
		Area		
		Middle of Area 0.02 (m ²)	Total of Area 0.04 (m ²)	
3	173.84 $\pm$ 2.63	93.45 $\pm$ 2.25	65.81 $\pm$ 2.25	62.14 $\pm$ 2.59
4	173.84 $\pm$ 2.63	77.98 $\pm$ 2.30	52.10 $\pm$ 2.30	70.03 $\pm$ 2.56
5	173.84 $\pm$ 2.63	73.47 $\pm$ 2.28	48.58 $\pm$ 2.28	72.05 $\pm$ 2.52
6	173.84 $\pm$ 2.63	44.06 $\pm$ 2.15	28.01 $\pm$ 2.15	83.89 $\pm$ 2.49
7	173.84 $\pm$ 2.63	30.70 $\pm$ 2.09	19.23 $\pm$ 2.09	88.94 $\pm$ 2.45

BOD* = 5 mg/L [14]



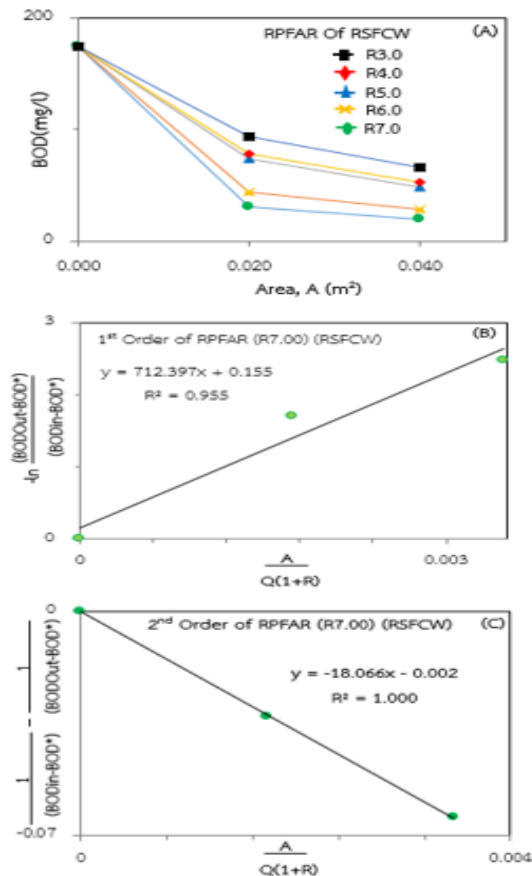
รูปที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) กับค่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

3.2 การศึกษาการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) ของค่าซีบีโอดี (BOD) ในระบบ RSFCW

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของ RSFCW ในการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) โดยใช้แบบจำลองพลวัต RPFAR พบว่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 7 [9, 15] และพื้นที่ (A) เท่ากับ 0.04 ตร.ม. ใช้เวลากักเก็บหมุนเวียน (HReT) ที่ 0.5 ชั่วโมงในการบำบัด [9-11] เกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 จากสมการที่ 3 และ 7 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย k_{A1st} และ k_{A2nd} เท่ากับ 172.397 ม./วัน และ 18.066 ม./วัน R^2 เท่ากับ 0.955 และ 1.00 ดังแสดงตารางที่ 2 และรูปที่ 4

ตารางที่ 2 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) ของปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2

Parameter	Try	Models	Rate constant, k (m/day)	R^2
BOD	RPFAR	1 st order	712.397	0.955
		2 nd order	18.006	1.000
		order		

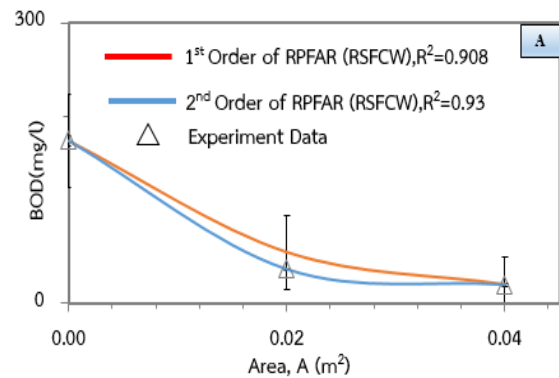


รูปที่ 4 การทำนายเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RPFAR ของค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 ของค่า BOD (A), การศึกษาเชิงพลวัตการลด BOD ของระบบ RSFCW(B)(C)

3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RPFAR ของระบบบำบัด RSFCW

วัตถุประสงค์การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RPFAR เพื่อใช้ในการออกแบบระบบบำบัด RSFCW โดยได้นำอัตราส่วนหมุนเวียนเท่ากับ 7 [9, 15] พื้นที่ (A) 0.04 ตร.ม. และค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) จากประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) เพื่อระบุว่าแบบจำลองความถูกต้องและความแม่นยำที่สุดจากการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สมการที่ 4 และสมการที่ 8 โดยใช้โปรแกรม Microsoft excel ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพบว่าแบบจำลองพลวัต RPFAR ของระบบ RSFCW เกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์

เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย $k_{A_{2nd}}$ เท่ากับ 18.066 ม./วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.93 ดังแสดงตารางที่ 2 และรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างของค่า BOD กับพื้นที่ (A) ด้วยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RPFAR

4. สรุป

การพัฒนาแบบจำลองพลวัต RPFAR ของระบบบำบัด RSFCW ใช้ตัวกลาง GAC บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 11 กระถางบนท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter: D) 0.08 ม. และความยาว (Length: L) 8.00 ม. มีอัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (>1:4) [9-11, 12] ใช้พื้นที่ (A) 0.04 ตร.ม. ความลึกชั้นกรองที่ 25 ซม. พบว่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 7 โดยในการทดสอบทำการเปิดปั๊ม (Feeding Pump) ปล่อยน้ำเสียเข้า (Q_{in}) 1 ลิตร/นาที่ และเปิดปั๊มระบบน้ำหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_R) 7 ลิตร/นาที่ โดยใช้เวลากักเก็บหมุนเวียน (HReT) ที่ 0.50 ชั่วโมงในการบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าบีโอดี (Removal BOD Efficiency) ได้ถึง 88.94% และจากการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RPFAR ของระบบ RSFCW เกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย $k_{A_{1st}}$ และ $k_{A_{2nd}}$ เท่ากับ 172.397 ม./วัน และ 18.066 ม./วัน R^2 เท่ากับ 0.955 และ 1.00 จากแบบจำลองความถูกต้องและความแม่นยำที่สุดพบว่า จะเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย $k_{A_{2nd}}$ เท่ากับ 18.066 ม./วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 1.00

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงาน
คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(สกว.) ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ
นวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2564 และศูนย์
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่เอื้อเพื่อ
วิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Suksomboon, R. (2007). **Design of Water Garden System for City Canal Rehabilitation by Mathematical Model**. M.E. Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Khon Kaen University. (In Thai)
- [2] Chandanshive, V.V., Rane, N.R., Tamboli, A.S., Gholave, A.R., Khandare, R.V. and Govindwar, S.P. (2017). Co-plantation of aquatic macrophytes *Typha angustifolia* and *Paspalum scrobiculatum* for effective treatment of textile industry effluent. **J Hazard Mater** 338: 47–56
- [3] Masi, F., Rizzo, A., Bresciani, R., Martinuzzi, N., Wallace, S.D., Van Oirschot, D., Macor, F., Rossini, T., Fornaroli, R. and Mezzanotte, V. (2019). Lessons learnt from a pilot study on residual dye removal by an aerated treatment wetland. **Sci Total Environ** 648: 144–152.
- [4] Dalila-Haddaji, D., Ghrabi-Gammar, Z., Hamed, K.B. and Bousselmi, L. (2019). A re-circulating horizontal flow constructed wetland for the treatment of synthetic azo dye at high concentrations. **Environmental Science and Pollution Research** 26, 13489–13501.
- [5] Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z. and Raveh, E. (2007). Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) — a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households. **Chemosphere** 66: 916–923.
- [6] Yu, P. and Luo, Y. (2002). Novel water treatment process-combined cationic ionexchange bed and degasifier in a three-phase fluidized bed. **Desalination** 151: 145–152.
- [7] Fernandez, N., Montalvo, S., Guerrero, L., Sanchez, E., Cortes, I. and Travieso, L. (2007). Anaerobic fluidized bed reactor application to tropical fruit wine effluent. **Water Science and Technology** 56: 33–38.
- [8] Qasim, S.R., Motley, E.M. and Zhu, G. (2000). **Water Works Engineering: Planning, Design and Operation**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [9] Suksomboon, R. and Junsiri, C. (2018). The performance of moving fluidized bed bioreactor-granular activated carbon, MFBBR- GAC. **Prawarun Agriculture Journal** 15(1): 238-247. (In Thai)
- [10] Suksomboon, R., Junsiri, C., Saikaew, W. and Kanyakam, S. (2019a). Mathematical Modeling of Moving Fluidized Bed Bioreactor-Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC Domestic Wastewater Treatment for Agricultural Use. **Prawarun Agriculture Journal** 16: 259-269. (In Thai)
- [11] Suksomboon, R., Junsiri, C., Tangjitjaroenkit, S., Moselhy, M. and Padungthon, P. (2019b). Mathematical models of a fluidized bed bioreactor using granular activated carbon (FBBR-GAC) for wastewater treatment. **Engineering and Applied Science Research** 46(3): 183-191.

- [12] Jaime-Nivalaa, J., Headleyc, T., Wallaced, S., Bernhardb, K., Brix, H., Afferdenb, M. and MüllerbJaime, R. (2013). Comparative analysis of constructed wetlands: The design and construction of the ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany. **Ecological Engineering** 61: 527–543.
- [13] Xing, W., Ngo, H., Guo, W. and Yang, N. (2010). Enhancement of the performance of anaerobic fluidized bed bioreactors (AFBBRs) by a new starch-based flocculant. **Separation and Purification Technology** 72(2): 140-146.
- [14] Kadlec, R.H. and Wallace, S.D. (2009). **Treatment Wetlands**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.
- [15] Zafarzadeh, A., Bina, B., Nikaeen, M., Movahedian Attar, H. and Hajian nejad, M. (2010). Performance of moving bed biofilm reactors for biological nitrogen compounds removal from wastewater nitrification-denitrification process. **Environ. Iran J. Health Sci. Eng.** 7(4): 353-364.
- [16] APHA, AWWA, and WEF. (1999). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association.