



แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์เชิงพื้นที่ถึงกวนผสมหมุนเวียน ของระบบบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง สำหรับบำบัดน้ำเสีย

Mathematical Dynamic Recirculation Completely-Mixed Stirred Tank Areal Reactor Models Of Subsurface Recirculation Flow Constructed For Wastewater Treatment

รัฐพล สุขสมบุญ^{1,*}, ละอองดาว ภูสำรอง² และ อริย์รัช ชูโชติสกุลเลิศ³

Rattapol Suksumboon^{1,*}, Laongdaw poosumrong² and Arithat Chuchotsakunleot³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

²คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

³สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอาคาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม มหาสารคาม 44000

¹Department of Management Environmental Engineering, Faculty of Engineering

²Faculty of Humanities and Social Sciences

³Department of Building Systems Engineering, Faculty of Engineering

Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham 44000, Thailand

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

บทคัดย่อ

วิจัยในครั้งนี้เพื่อพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์เชิงพื้นที่ถึงกวนผสมหมุนเวียน (RCSTAR) ของระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง (SRFCW) ใช้ตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 29 กระถาง มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (<1:4) ใช้พื้นที่สะสม (Travel Area; TA) 0.50 ตารางเมตร ความลึกชั้นกรองที่ 20 เซนติเมตร พบว่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 และเวลาหมุนเวียน (HReT) 2 ชั่วโมงในการบำบัดน้ำเสียจากอ่างล้างจาน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและบีโอดี (COD and BOD Removal Efficiency) ได้ถึง $90.19 \pm 3.39\%$ และ $87.50 \pm 2.90\%$ ตามลำดับ และเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย kA_{2nd} เท่ากับ 0.158 และ 0.223 เมตร/วัน ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบบจำลองคณิตศาสตร์; เครื่องปฏิกรณ์เชิงพื้นที่ถึงกวนผสมหมุนเวียน; บึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง; บำบัดน้ำเสีย

ABSTRACT

The objective of this study was to develop the model of recirculation completely-mixed stirred tank areal reactor (RCSTAR) of recirculation surface flow constructed wetland (SRFCW) using granular activated carbon (GAC) as a media contained in 29 pots of reed. The ratio of width to: length was $<1:4$, used travel area was 0.50 m^2 , and the initial height of bed 20 cm. The result of the study found that the recirculation ratio: QR/Q_{in} (R) was 3. The hydraulic recirculation time (HReT) was 2 hrs for treat washing waste water. As a result, the efficiency of COD and BOD removal was 90.19% and 87.50%, respectively which cause the second-order-reaction with areal rate coefficient (kA_{2nd}) equals 0.158 and 0.223 m^3/day , respectively.

Keywords: Mathematical modeling; Recirculation completely-mixed stirred tank areal Reactor; Surface recirculation flow constructed Wetland; Waste water treatment

1. บทนำ

น้ำเสียจากแหล่งที่พักอาศัยเป็นน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และจุลินทรีย์จากสิ่งขับถ่าย ซึ่งทำให้เป็นที่น่ารังเกียจ [1]-[3] และไม่ปลอดภัยต่อสุขภาพอนามัย แต่ในขณะเดียวกันน้ำเสียสามารถที่จะสร้างพื้นที่สีเขียวที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในที่พักอาศัยได้ดี จากการศึกษาก่อนหน้านี้พิสูจน์แล้วว่า ระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) ถือเป็นระบบธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียที่ยั่งยืนดูแลง่าย [4]-[6] สามารถสร้างพื้นที่สีเขียว เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในที่พักอาศัยได้ดี

ภูมิอากาศร้อนของประเทศไทยเหมาะสมกับระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์ ซึ่งปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายที่สนับสนุนนวัตกรรมใหม่ๆ ให้ท้องถิ่นสามารถสร้างระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับที่พักอาศัยกระจายทั่วประเทศ มากกว่าที่จะสร้างระบบรวมขนาดใหญ่ [6]-[8] ระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมถูกเลือกใช้ในการออกแบบ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง (Subsurface Flow Constructed wetland: SFCW) แต่ภายใต้ข้อจำกัดการอุดตันในชั้นกรอง [9] จึงมีแนวคิดพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสีย SFCW เป็นระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรอง (Surface

Recirculation Flow Constructed Wetland: SRFCW) [7] ในเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ด้วยตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ทราเย เปอร์ไลต์ ซีโอไลต์ หินลาวา [10]-[12] โดยตัวกลาง GAC ซึ่งเป็นที่นิยมเพราะมีพื้นผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงมาก (Specific biofilm surface area; Ψ) ราวๆ 1,600-2,000 $\text{ตร.ม.}/\text{ลบ.ม.}$ สามารถรับโหลดสารอินทรีย์ปริมาณมากได้ [13] และจะทำหน้าที่ป้องกันรากของต้นกกในแต่ละกระถางต่อเป็นแนวยาว มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ($<1:4$) มีทิศทางตั้งฉากกับการไหลของน้ำที่ความลึกชั้นกรองเท่ากับ 20 ซม. [14] เพื่อลดการสูญเสียระดับน้ำ (Head Loss: HL) และพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์เชิงพื้นที่ถึงกวนผสมหมุนเวียน (Recirculation Completely-Mixed Stirred Tank Areal Reactor Models: RCSTAR) ซึ่งถูกพัฒนามาจากแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนผสมหมุนเวียน (Completely-Mixed Stirred Tank Areal Reactor Models: CSTAR) [3] ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio; $QR/Q_{in} = R$) [1]-[3], [6], [15]-[16] ในการแก้ปัญหาการอุดตัน เพราะจะทำให้ช่องว่างของชั้นกรองเกิดการขยายตัวในพื้นที่สะสม (Travel Area; TA)

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) หาประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD และ BOD, (2) พัฒนาแบบจำลองพลวัต RCSTAR, (3) หาค่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสอง ($n=1$ และ $n=2$) สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) ของระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW

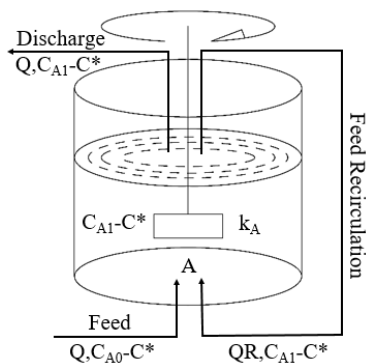
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองพลวัต RCSTAR จะต้องพิจารณาทิศทางไหลจากล่างขึ้นบน (Up Flow) กับอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ($<1:4$) [1-3, 6, 14] และปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสอง ($n=1$ และ $n=2$) เนื่องจากการไหลการเข้าออกของน้ำและมวลสารในหนึ่งเซลล์สามารถแบ่งเป็นล้านเซลล์ จากหลักสมมูล จะใช้หน่วยเซลล์พื้นที่ (Area; A) ในการวิเคราะห์เพื่ออธิบายองค์ประกอบต่างๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

2.1.1 การพัฒนาแบบจำลองพลวัต RCSTAR

แบบจำลองพลวัต RCSTAR สามารถใช้แทนถึงปฏิกรณ์ หรือระบบธรรมชาติโดยการประมาณได้หลายกรณี อาทิ Rapid-mix tank ในขบวนการ Chemical coagulation, Aeration tank ในขบวนการทาง Biological treatment, อ่างเก็บน้ำหรือแหล่งน้ำ [7] ที่มีการผสมผสานกันค่อนข้างทั่วถึงด้วยการหมุนเวียนน้ำ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองพลวัต RCSTAR

ถึงปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ เป็นถึงปฏิกรณ์แบบอุดมคติถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นแบบจำลองพลวัต RCSTAR

มีลักษณะเหมือนรูปแบบอ่างเก็บน้ำหนึ่งเซลล์สามารถแบ่งเป็นล้านเซลล์ ดังภาพที่ 1 โดยกำหนดให้อัตราการไหลเข้ากับอัตราการไหลหมุนเวียน ($Q+QR$) [1]-[3], [6] มีทิศทางไหลจากล่างขึ้นบน (Up Flow) และผนวกค่าความเข้มข้นพื้นหลัง (Background concentration; C^*) [17] ในความความเข้มข้นเข้า influent เป็น $C_{A0}-C^*$ ความเข้มข้นออก Effluent เป็น $C_{A1}-C^*$ จะทำให้มวลสารเข้าและมวลสารหมุนเวียนที่จุดเริ่มต้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะลดลงตามขนาดของเซลล์พื้นที่ที่มวลสาร (A) และอัตราส่วนหมุนเวียน (R) [1]-[3], [6, 15, 16] สามารถเขียนได้ในรูปของ partial differential equation ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อหน่วยแต่ละองค์ประกอบของพื้นที่ในทิศทางการไหลดังนี้ พิจารณาปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$)

$$V \frac{dC}{dt} = (Q + QR)(C_{A0} - C^*) - (Q + QR)(C_{A1} - C^*) - Ak_{A1st}(C_{A1} - C^*) \quad (1)$$

สภาวะคงที่, $VdC/dt=0$

$$0 = (Q + QR)(C_{A0} - C^*) - (Q + QR)(C_{A1} - C^*) - Ak_{A1st}(C_{A1} - C^*) \quad (2)$$

จัดรูปสมการ

$$k_{A1st} = \frac{Q(1 + R)(C_{A0} - C_{A1})}{A(C_{A1} - C^*)} \quad (3)$$

จากสมการที่ 2 ดังนั้น การแก้ปัญหามสมการสำหรับความเข้มข้นของแบบจำลองพลวัต RCSTAR จะได้

$$C_{A1} = C^* + \frac{(C_{A0} - C^*)}{1 + \frac{Ak_{A1st}}{Q(1 + R)}} \quad (4)$$

พิจารณาปฏิกิริยาอันดับสอง ($n=2$)

$$V \frac{dC}{dt} = (Q + QR)(C_{A0} - C^*) - (Q + QR)(C_{A1} - C^*) - Ak_{A2nd}(C_{A1} - C^*)^2 \quad (5)$$

สภาวะคงที่, $VdC/dt=0$

$$0 = (Q + QR)(C_{A0} - C^*) - (Q + QR)(C_{A1} - C^*) - Ak_{A2nd}(C_{A1} - C^*)^2 \quad (6)$$

$$k_{A2nd} = \frac{Q(1+R)(C_{A0} - C_{A1})}{A(C_{A1} - C^*)^2} \quad (7)$$

จากสมการที่ 6 ดังนั้นการแก้ปัญหาคำนวณการกำลังสมบูรณสำหรับความเข้มข้นของแบบจำลองพลวัต RCSTAR จะได้

$$C_{A1} = C^* - \frac{Q(1+R)}{2Ak_{A2nd}} + \sqrt{\frac{Q(1+R)}{Ak_{A2nd}} \left(C_{A0} - C^* + \frac{Q(1+R)}{4Ak_{A2nd}} \right)} \quad (8)$$

โดยที่ C_{A0} , C_{A1} คือ ความเข้มข้นของมวลสารเข้า และออกในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (มก./ลิตร)

Q คือ อัตราการไหลเข้า และออกของมวลสารในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (ลบ.ม./วัน)

A คือ พื้นที่ในหนึ่งเซลล์ (ตร.ม.)

R คือ อัตราส่วนการหมุนเวียน

k_{A1st} คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารเชิงพื้นที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$) (ม./วัน)

k_{A2nd} คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารเชิงพื้นที่ปฏิกิริยาอันดับสอง ($n=2$) (ม./วัน)

2.2 การทดลองเชิงพลวัต

2.2.1 ลักษณะน้ำเสีย

การศึกษานี้ใช้น้ำเสียจากอ่างล้างจานซึ่งมีค่า COD สูงมากกว่า 1,000 มก./ลิตร [3, 18, 19] และค่า BOD สูงมากกว่า 400 มก./ลิตร [20] ถูกเชื่อมต่อเข้าถังดักไขมันและท่อหมักน้ำเสียไร้อากาศในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อใช้ลดค่าความเข้มข้นของ COD และ BOD เพื่อปรับสภาพค่า pH จะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 9 ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW

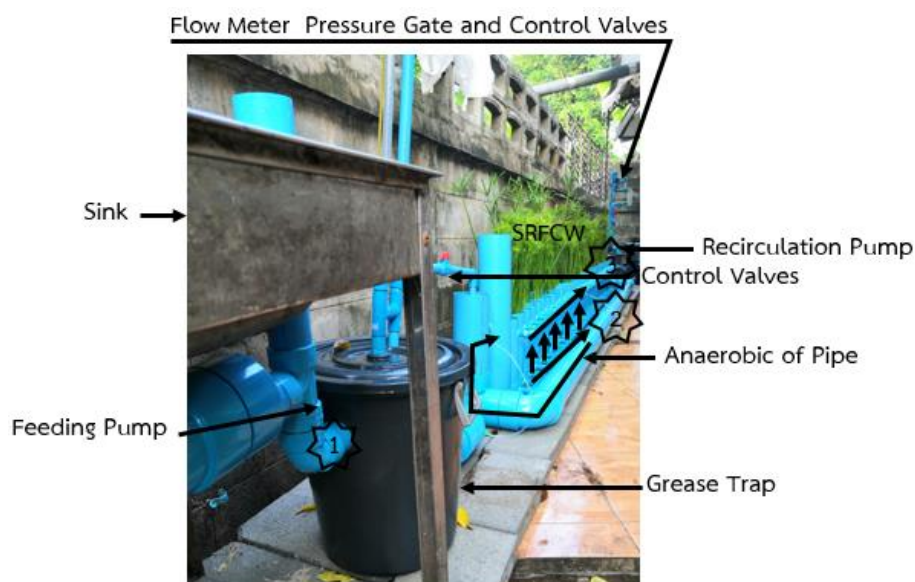
2.2.2 การทดลองระบบบำบัด SRFCW

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ใช้ตัวกลาง GAC [12] บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 29 กระถาง แต่ละกระถางจะแบ่งออกเป็น 2 เซลล์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 0.105 เมตร และระดับน้ำล้นที่ (Over Flow) เท่ากับ 0.25 เมตร มีอัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (<1:4) [1]-[3] โดยกำหนดทิศทางไหลจากล่างขึ้นบน (Up Flow) เข้าพื้นที่เซลล์ที่ 1 (Cell of Area 1; CA1) เท่ากับ 0.25 ตร.ม. มีพื้นที่สะสม (Travel Area; TA) เท่ากับ 0.25 ตร.ม. และเข้าพื้นที่เซลล์ที่ 2 (Cell of Area 2; CA2) 0.25 ตร.ม. ซึ่งมีพื้นที่สะสม (Travel Area; TA) เท่ากับ 0.50 ตร.ม. ที่ความลึกชั้นกรองที่ 20 ซม. [14] ดังแสดงรูปที่ 2 และ รูปที่ 3

จากรูปที่ 3 ในการทดลองระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ใช้ค่าอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 0.5, 0.85, 1, 2 และ 3 [6, 15] ในการทดสอบโดยทำการปรับวาล์ว 1 ด้วยปั๊ม (Feeding Pump) ปล่อน้ำเสียเข้า (Q_{in}) 100 ลิตร/วัน และปรับวาล์ว 2 ด้วยปั๊มระบบน้ำหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลหมุนเวียน (QR) เท่ากับ 50, 85, 100, 200 และ 300 ลิตร/วัน โดยใช้เวลาหมุนเวียน (Hydraulic recirculation time; HReT) ที่ 2 ชั่วโมง และปรับวาล์ว 3 เพื่อกำหนดน้ำเสียเข้า (Q_{in}) เท่ากับ น้ำเสียออก (Q_{out}) ในการบำบัดน้ำเสียล้างจาน [1]-[3] ทำเก็บน้ำตัวอย่างทั้งหมด 3 จุด ด้วยวิธี Standard Method [21] ดังแสดงตารางที่ 1 โดยจุดที่ 1 จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำของระบบบึงประดิษฐ์มีค่าซีโอดีเข้า (COD_{in}) เท่ากับ 1000 ± 3.59 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าบีโอดีเข้า (BOD_{in}) เท่ากับ 723.75 ± 2.68 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD และ BOD (COD and BOD Removal Efficiency) นำข้อมูลที่ได้ใส่ในโปรแกรม Microsoft Excel และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_d) จากสมการที่ 3 และสมการที่ 7 ทำการจำลองแบบจำลองพลวัต RCSTAR โดยใช้สมการที่ 4 และสมการที่ 8

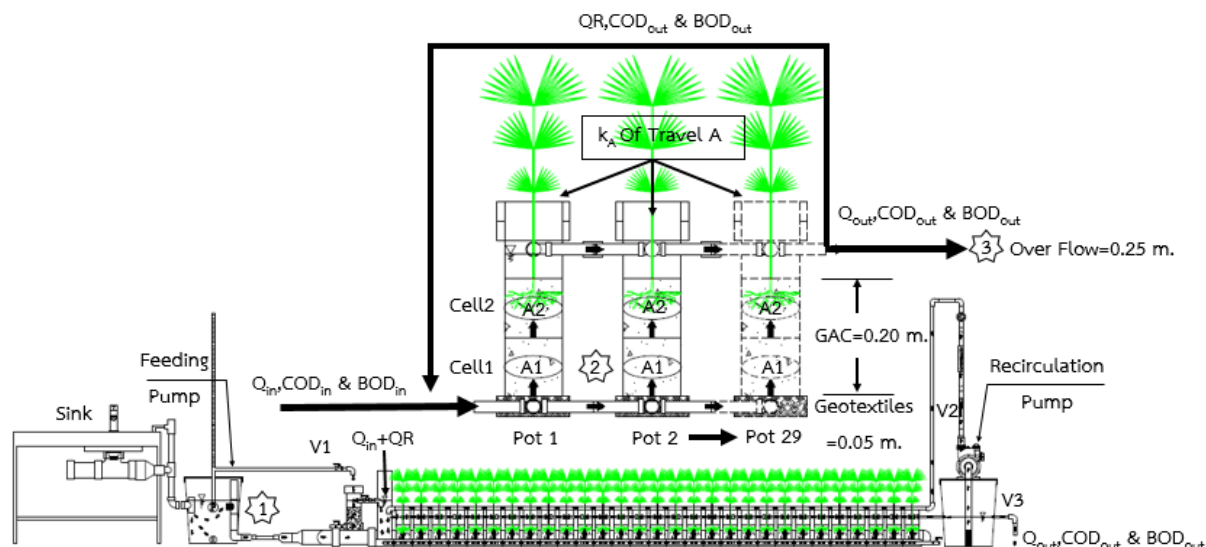
ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำ (วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง ณ จุดเก็บน้ำตามรูปที่ 2 และ รูปที่ 3)

Parameter Reactor	Travel Area; A (m ²)	Q _{in} (liter/day)	QR (liter/day)	R	COD _{out} (mg/l)	BOD _{out} (mg/l)
Cell1	0.25	100	50	0.5	327.92±3.25	242.33±2.99
	0.25	100	85	0.85	276.54±3.30	204.54±2.95
	0.25	100	100	1	259.45±3.28	192.58±2.86
	0.25	100	200	2	164.60±3.15	117.24±2.80
	0.25	100	300	3	135.78±3.09	84.60±2.70
Cell2	0.50	100	50	0.5	247.62±3.45	190.28±2.97
	0.50	100	85	0.85	206.31±3.38	157.21±2.90
	0.50	100	100	1	193.66±3.32	147.07±2.83
	0.50	100	200	2	119.70±3.25	87.85±2.76
	0.50	100	300	3	119.70±3.25	62.57±2.69



รูปที่ 2 หน่วยระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW

(Unit Operation Surface Recirculation Flow Constructed Wetland: SRFCW)



รูปที่ 3 ขบวนการบำบัดน้ำเสีย SRFCW

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD และ BOD กับอัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

ผลจากการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ใช้ตัวกลาง GAC [12], [13] บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 29 กระถาง แต่ละกระถางใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.105 เมตร และระดับน้ำล้นที่ (Over Flow) 0.25 เมตร มีอัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (<1:4) [1]-[3], [6] โดยปล่อยน้ำเสียล้างจานเข้า (Q_{in}) 100 ลิตร/วัน มีทิศทางไหล

จากล่างขึ้นบน (Up Flow) เข้าพื้นที่สะสม (TA) 0.25 ตร.ม. และไหลเข้าพื้นที่สะสม (TA) 0.50 ตร.ม. ที่ความลึกชั้นกรองที่ 20 ซม. [14] พบว่าที่อัตราส่วนการหมุนเวียนที่สูงขึ้น (R) เท่ากับ 3 [6, 15] ของระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ซึ่งใช้เวลาหมุนเวียน (HReT) สูงสุดที่ 2 ชั่วโมง [1]-[3], [6] มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่า COD และ BOD (Removal COD & BOD Efficiency) ได้ถึง 90.19±3.39% และ 87.50±2.90% ดังแสดงตารางที่ 2 และ รูปที่ 4

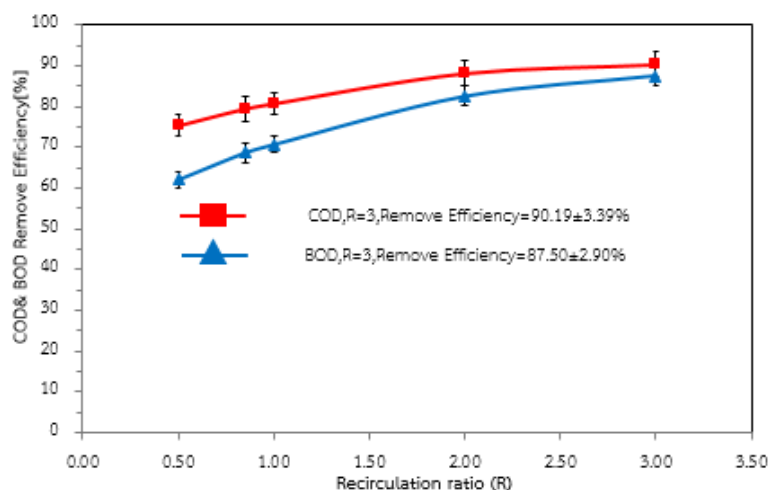
ตารางที่ 2 วิเคราะห์ค่า COD และ BOD กับความแตกต่างอัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

WW	R	COD _{in} (mg/L)	BOD _{in} (mg/L)	COD _{out} of RSFCW (mg/L)	BOD _{out} of RSFCW (mg/L)	Removal COD Efficiency (%)	Removal BOD Efficiency (%)
Travel Area;TA							
				0.50 (m ²)	0.50 (m ²)		
Washing	0.5	1000±3.59	500.5±3.11	247.62±3.5	190.28±2.97	75.24±3.55	61.98±3.04
	0.85	1000±3.59	500.5±3.11	206.31±3.8	157.21±2.90	79.37±3.70	68.59±3.41
	1	1000±3.59	500.5±3.11	193.66±3.2	147.07±2.83	80.63±3.40	70.62±2.94
	2	1000±3.59	500.5±3.11	119.70±3.5	87.85±2.76	88.03±3.54	82.45±3.33
	3	1000±3.59	500.5±3.11	98.14±3.18	62.57±2.69	90.19±3.39	87.50±2.90

COD*= 0 mg/L and BOD*= 5 mg/L [17]

แต่อย่างไรก็ตาม หน่วยระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ยังไม่พอเพียงที่จะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ดังนั้น ควรเพิ่ม การติดตั้งระบบเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไชด์เบด ตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving Fluidized bed

bioreactor- Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC) ซึ่งระบบ MFBBR-GAC สามารถกำจัดค่าซีโอดี 96.58% โดยใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมง เพื่อนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ [1]-[3]



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD และ BOD กับอัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

3.2 การศึกษาการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) ของค่า COD และ BOD ในระบบ RSFCW

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของ SRFCW ปล่อยน้ำเสีาล้างจานเข้า (Q_{in}) 100 ลิตร/วัน ในการกำจัดค่า COD และ BOD (Removal BOD and COD Efficiency) เกิด

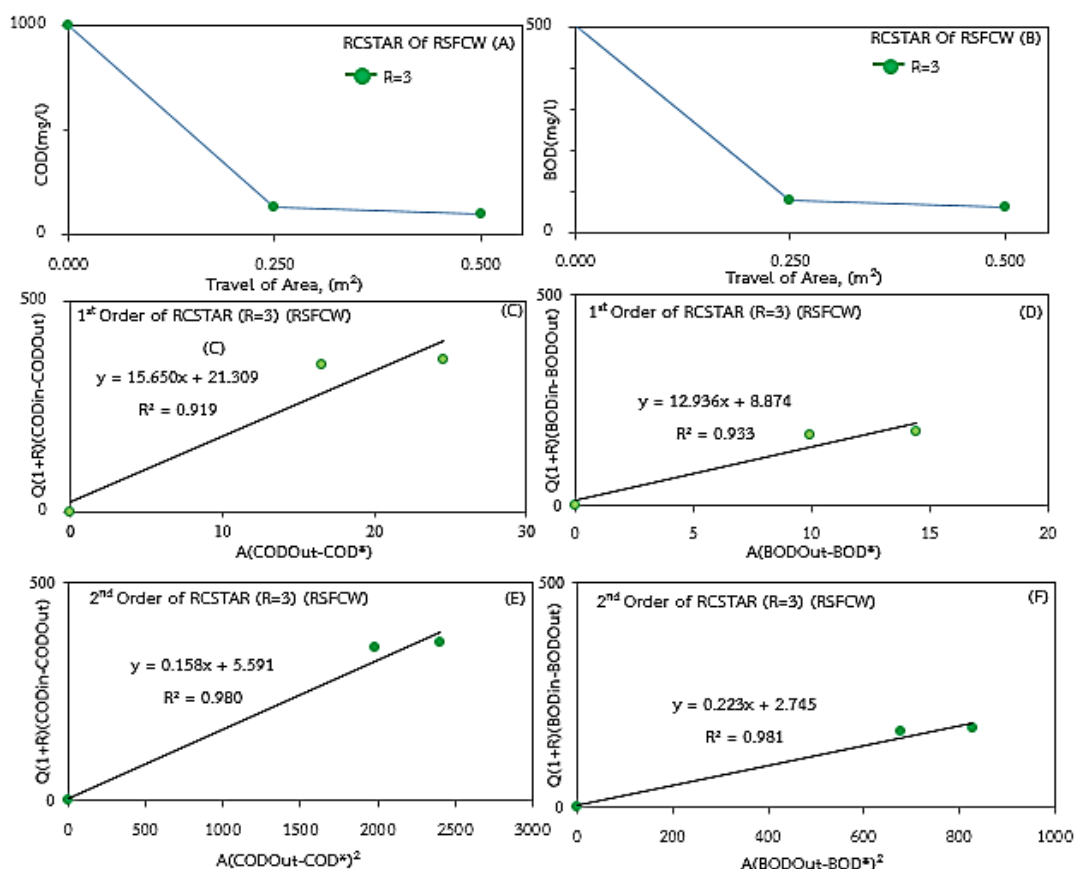
การดูดซับ (Adsorption) และแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biodegradation) ค่า COD และ BOD ที่อัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 [6, 15] ใช้พื้นที่สะสม (TA) เท่ากับ 0.50 ตร.ม. เวลาหมุนเวียน (HReT) ที่ 2 ชั่วโมง [1]-[3] ในการบำบัดน้ำเสียจากอ่างล้างจาน

ตารางที่ 3 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) ของปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 ของอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3

Parameter	Try	Model	Rate constant, k_A (m/day)	R^2
COD	RCSTAR	1st order	15.65	0.919
		2nd order	0.158	0.980
BOD	RCSTAR	1st order	12.936	0.933
		2nd order	0.223	0.981

โดยนำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในแบบจำลองพลวัต RCSTR จากสมการที่ 3 และสมการที่ 7 พบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 จากสมการที่ 3 และ 7 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย k_{A1st} และ k_{A2nd} เท่ากับ 15.65, 12.936,

0.158 และ 0.223 ม./วัน ตามลำดับ R^2 เท่ากับ 0.919, 0.933, 0.980 และ 0.981 ตามลำดับ ดังแสดงตารางที่ 3 และรูปที่ 5

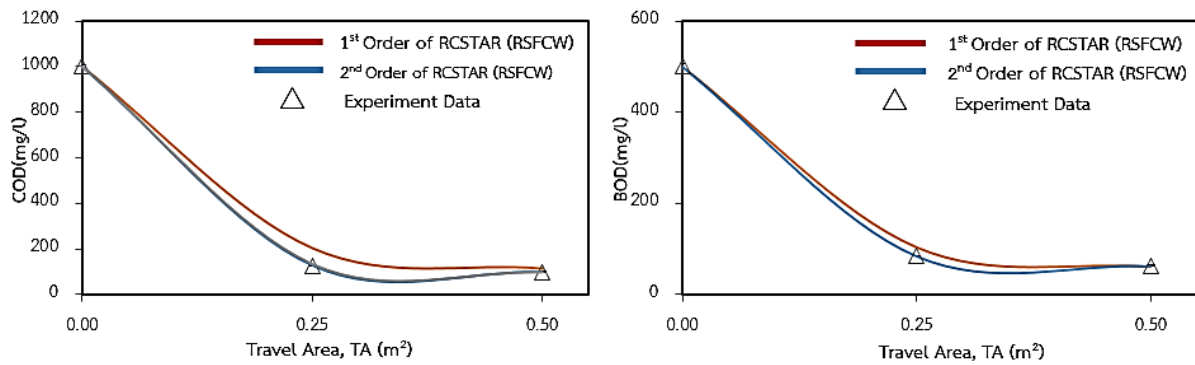


รูปที่ 5 การทำนายเปรียบเทียบแบบจำลองพลวัตค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย (k_A) โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 ของค่า COD และ BOD (A), (B), การศึกษาเชิงพลวัตการลด COD ของระบบ RSFCW (C), (E), การศึกษาเชิงพลวัตการลด BOD ของระบบ RSFCW (D), (F)

3.3 แบบจำลองพลวัต RCSTAR ของระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ปล่อยน้ำเสียล้างจานเข้า (Q_{in}) 100 ลิตร/วัน ในการกำจัดค่า COD และ BOD (Removal BOD and COD Efficiency) ที่อัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 [6, 15] ใช้พื้นที่สะสม (TA) เท่ากับ 0.50 ตร.ม. เวลาหมุนเวียน (HReT, tRe) ที่ 0.5 และ 1 ชั่วโมง และนำค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย k_{A1st} และ k_{A2nd} เท่ากับ 15.65, 12.936 ม./วัน และ 0.158, 0.223 ม./วัน ตามลำดับ R^2 เท่ากับ 0.919, 0.933, 0.980 และ 0.981 ของค่า COD และ BOD ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์โดย

ใช้โปรแกรม Microsoft excel จากสมการที่ 4 และสมการที่ 8 ของ แบบจำลองพลวัต RCSTR พบว่า เกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย k_{A2nd} เท่ากับ 0.158 และ 0.223 ม./วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.933 และ 0.923 ดังแสดงรูปที่ 6 แต่อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RCSTAR ของปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีความแตกต่างไม่มากนัก เกณฑ์การออกแบบจะขึ้นอยู่กับ การแบ่งเซลล์มากเท่าไรในบำบัดน้ำเสีย บึงประดิษฐ์ ปฏิกิริยาอันดับ 1 จะเข้าสู่ปฏิกิริยาอันดับ 2 ดังนั้น แบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RCSTAR ของปฏิกิริยาอันดับ 1 สามารถใช้แทนแบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัต RCSTAR ของปฏิกิริยาอันดับ 2 เช่นกัน



รูปที่ 6 การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างของค่า COD และ BOD กับพื้นที่สะสม (TA) ด้วยแบบจำลองพลวัต RCSTAR

4. สรุป

การพัฒนาแบบจำลองพลวัตเชิงพื้นที่ RCSTAR ของระบบบำบัดน้ำเสีย SRFCW ใช้ตัวกลาง GAC บรรจุในกระถางต้นกกจำนวน 29 กระถาง แต่ละกระถางใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 0.105 เมตร และระดับน้ำล้นที่ (Over Flow) เท่ากับ 0.25 เมตร มีอัตราส่วนความกว้าง: ความยาว (<1:4) ใช้พื้นที่สะสม (TA) เท่ากับ 0.50 ตร.ม. ความลึกชั้นกรองที่เท่ากับ 20 ซม. พบว่าเกิดการดูดซับ (Adsorption) และแบคทีเรียไม่ใช้ออกากในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biodegradation) ที่ความเหมาะสมอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุดกำจัดค่า COD และ BOD (Removal COD and BOD Efficiency) ได้ถึง $90.19 \pm 3.39\%$ และ $87.50 \pm 2.90\%$ และเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย

k_{A1st} และ k_{A2nd} เท่ากับ 15.65 และ 12.936 ม./วัน และ 0.158 และ 0.223 ม./วัน, R^2 เท่ากับ 0.919, 0.933, 0.980 และ 0.981 จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่า COD และ BOD พบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต RCSTR มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของการย่อยสลาย k_{A2nd} เท่ากับ 0.158 และ 0.223 ม./วัน ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่เอื้อเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รัฐพล สุขสมบุรณ์ และ ชัยยันต์ จันทศิริ, “ศักยภาพเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิด์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด,” วารสารเกษตรพระวรุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, ปีที่ 15, เล่ม 1, หน้า 238-247, 2561.
- [2] รัฐพล สุขสมบุรณ์, ชัยยันต์ จันทศิริ, วุฒิกร สายแก้ว, และ ศิวตล ภัญญาคำ, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิด์เบดตัวกลาง ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อใช้ทางการเกษตร,” วารสารเกษตรพระวรุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, หน้า 259-269, 2562.
- [3] R. Suksomboon, C. Junsiri, S. Tangjitjaroenkit, M. Moselhy, and P. Padungthong, “Mathematical models of a fluidized bed bioreactor using granular activated carbon (FBBR-GAC) for wastewater treatment,” Engineering and Applied Science Research, vol. 46, no. 3, pp. 183-191, 2019.

- [4] V. V. Chandanshive, N. R. Rane, A. S. Tamboli, A. R. Gholave, R. v Khandare, and S. P. Govindwar, “Co-plantation of aquatic macrophytes *Typha angustifolia* and *Paspalum scrobiculatum* for effective treatment of textile industry effluent,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 338, pp. 47–56, 2017.
- [5] F. Masi et al., “Lessons learnt from a pilot study on residual dye removal by an aerated treatment wetland,” *Science of the Total Environment*, vol. 648, pp. 144–152, 2019.
- [6] รัฐพล สุขสมบูรณ์, ชัยยันต์ จันทศิริ, ศิวตล กัญญาคำ, และ สุธาวลัย ตั้งจิตเจริญกิจ, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบึงประดิษฐ์การไหลเวียนใต้ชั้นกรองในการบำบัดน้ำเสียชุมชนสำหรับที่พักอาศัย,” *วารสารวิจัยราชภัฏเชียงใหม่*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 2, หน้า 37-48, 2564.
- [7] A. Gross, O. Shmueli, Z. Ronen, and E. Raveh, “Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW)—a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households,” *Chemosphere*, vol. 66, no. 5, pp. 916–923, 2007.
- [8] รัฐพล สุขสมบูรณ์, “การออกแบบระบบสวนน้ำเพื่อฟื้นฟูคลองในเขตเมืองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์,” *วิทยานิพนธ์ วศ.บ (สิ่งแวดล้อม)*, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 2550.
- [9] P. Knowles, G. Dotro, J. Nivala, and J. Garcia, “Clogging in subsurface-flow treatment wetlands,” *Ecological Engineering*, Amsterdam, vol.37, pp. 99-112, 2011.
- [10] P. Yu and Y. Luo, “Novel water treatment process—combined cationic ion-exchange bed and degasifier in a three-phase fluidized bed,” *Desalination*, vol. 151, no. 2, pp. 145–152, 2003.
- [11] N. Fernández, S. Montalvo, L. Guerrero, E. Sánchez, I. Cortés, and L. Travieso, “Anaerobic fluidized bed reactor application to tropical fruit wine effluent,” *Water science and technology*, vol. 56, no. 2, pp. 33–38, 2007.
- [12] R. Sowmeyan and G. Swaminathan, “Evaluation of inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic wastewater,” *Bioresource technology*, vol. 99, no. 9, pp. 3877–3880, 2008.
- [13] S. R. Qasim, E. M. Motley, and G. Zhu, *Water works engineering: planning, design, and operation*. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [14] J. Nivala et al., “Comparative analysis of constructed wetlands: The design and construction of the ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany,” *Ecological Engineering*, vol. 61, pp. 527–543, 2013.
- [15] W. Xing et al., “Enhancement of the performance of anaerobic fluidized bed bioreactors (AFBBRs) by a new starch based flocculant,” *Separation and purification technology*, vol. 72, no. 2, pp. 140–146, 2010.
- [16] A. Zafarzadeh, B. Bina, M. Nikaeen, A. H. Movahedian, and N. M. Hajian, “Performance of Moving Bed Biofilm Reactors for Biological Nitrogen Compounds Removal from Wastewater by Partial Nitrification-Denitrification Process,” *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol.7, no.4, pp. 353-364, 2010.
- [17] R. H. Kadlec and S. Wallace, *Treatment wetlands*. 2nd ed. Florida: CRC press, 2008.

- [18] K. Haribabu and V. Sivasubramanian, “Treatment of wastewater in fluidized bed bioreactor using low density biosupport,” *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 214–221, 2014.
- [19] K. Haribabu and V. Sivasubramanian, “Biodegradation of organic content in wastewater in fluidized bed bioreactor using low-density biosupport,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 10, pp. 4322–4327, 2016.
- [20] กรมควบคุมมลพิษ, “คู่มือการจัดการน้ำเสียสำหรับบ้านเรือน – Pollution Control Department,” สิงหาคม, 2555. [Online]. Available: <https://www.pcd.go.th/publication/4551/>.
- [21] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington: American Public Health Association, 2017.