



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถ่านกัมมันต์เม็ดคงที่การไหลหมุนเวียนสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน

วุฒิกกร สายแก้ว

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

รัฐพล สุขสมบูรณ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ละอองดาว ภูสำราญ

คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9618 6944 อีเมล: Rpol9@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.06.001

รับเมื่อ 27 เมษายน 2564 แก้ไขเมื่อ 8 กรกฎาคม 2564 ตอรับรับเมื่อ 13 สิงหาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 26 มิถุนายน 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กการไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation Plug-Flow Reactor; RPFR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องถังกวนผสมหมุนเวียน (Recirculation Completely-mixed Stirred Tank Reactor; RCSTR) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบถ่านกัมมันต์เม็ดคงที่การไหลหมุนเวียน (Recirculation Static Granular Activated Carbon Bed Reactor; RSGBR-GAC) มีทิศทางการไหลตั้งฉากกับถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกตามแนวนอน มีความกว้างของชั้นกรองประมาณ 0.10 เมตร มีความลึกของชั้นกรองประมาณ เท่ากับ 0.09 เมตร และความสูงท่อเท่ากับ 1.80 เมตร บรรจุถ่านกัมมันต์แบบเม็ด 12.6 กิโลกรัม จากการศึกษาที่อัตราส่วนความกว้าง : ความลึก (<1 : 4) พบว่า ค่าความเหมาะสมอัตราส่วนการหมุนเวียน (QR/Qin = R) เท่ากับ 936 ใช้ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume; V) เท่ากับ 0.014 เมตร³ เวลาหมุนเวียน (Hydraulic Recirculation Time; HReT) ที่ 1 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพสูงสุดกำจัดค่า BOD และ NH₃ (Removal BOD and NH₃ Efficiency) ได้ถึง 87.40 ± 2.42% และ 62.76 ± 2.69% ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน และจากแบบจำลองความถูกต้องและความแม่นยำพบว่า เกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัตเครื่องถังกวนผสมหมุนเวียน (Recirculation Completely-mixed Stirred Tank Reactor; RCSTR) มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร $k_{BOD} 2nd_{RCSTR}$ และ $k_{NH_3} 2nd_{RCSTR}$ เท่ากับ 2.044 1/วัน และ 7.63 1/วัน

คำสำคัญ: แบบจำลองคณิตศาสตร์ เครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กการไหลแบบหมุนเวียน เครื่องถังกวนผสมหมุนเวียน การบำบัดน้ำเสียชุมชน

การอ้างอิงบทความ: วุฒิกกร สายแก้ว, รัฐพล สุขสมบูรณ์ และ ละอองดาว ภูสำราญ, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถ่านกัมมันต์เม็ดคงที่การไหลหมุนเวียนสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 1-11, เลขที่บทความ 233-144992, ก.ค.-ก.ย. 2566.



Dynamic Mathematical Modeling of Static Granular Bed Reactor-Granular Activated Carbon (RSGBR-GAC) with Recirculation Flow for Domestic Wastewater Treatment

Wuthikorn Saikaew

Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham, Thailand

Rattapol Suksomboon*

Department of Environmental Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham, Thailand

Laongdaw Poosumrong

Faculty of Humanities and Social Science, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9618 6944, E-mail: Rpol9@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.06.001

Received 27 April 2021; Revised 8 July 2021; Accepted 13 August 2021; Published online: 26 June 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this study was to develop the dynamic modeling of Recirculation Plug-Flow Reactor (RPFR), and Recirculation Completely-mixed Stirred Tank Reactor (RCSTR) of a wastewater treatment system that uses Recirculation Static Granular Activated Carbon Bed Reactor (RSGBR-GAC). The flow direction is perpendicular to the horizontal-cylindrical reactor. The width of the filter layer is about 0.10 m., the depth of the filter layer is approximately 0.09 m., and length of the pipe is 1.80 m. It contains 12.6 kg of granular activated carbon. Accordingly, the study of the width : depth ratio ($<1 : 4$) found that the optimum recirculation ratio ($QR/Q_{in} = R$) equal to 936 with the Volume (V) equals 0.014 m^3 . The Hydraulic Recirculation Time (HReT) at 1 h yielded the highest efficiency to remove BOD and NH_3 . The BOD and NH_3 removal efficiency reached $87.40 \pm 2.42\%$ and $62.76 \pm 2.69\%$ in domestic wastewater. The accuracy and precision model revealed that the second-order reaction occurred in Recirculation Completely-mixed Stirred Tank Reactor (RCSTR) with Volumetric rate coefficients to $k_{\text{BOD}2\text{nd}_{\text{RCSTR}}}$ and $k_{\text{NH}_32\text{nd}_{\text{RCSTR}}}$ were 2.044 1/day and 7.63 1/day.

Keywords: Mathematical Modeling, Recirculation Plug-Flow Reactor, Recirculation Completely-Mixed Stirred Tank Reactor, Domestic Wastewater Treatment

Please cite this article as: W. Saikaew, R. Suksomboon, and L. Poosumrong, "Dynamic mathematical modeling of static granular bed reactor-granular activated carbon (RSGBR-GAC) with recirculation flow for domestic wastewater treatment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1–11, ID. 233-144992, Jul.–Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันประชากรโลกเกิดการเจริญเติบโตและมีการเพิ่มจำนวนประชากรเป็นจำนวนมาก รวมทั้งการขยายตัวของเมืองค่อยๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำซึ่งเป็นปัญหาสำคัญทั่วโลก ประเทศไทยซึ่งเป็นหนึ่งในประเทศกำลังพัฒนาเริ่มตระหนักถึงมลพิษทางน้ำจากกิจกรรมในบ้านเรือนซึ่งบ้านเรือนเป็นแหล่งที่มาของมลพิษทางน้ำที่มีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม มีสิ่งปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการบำบัด จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำเป็นอย่างมาก [1]–[3] ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ๆ อยู่ตลอดเวลาจากพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบได้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเม็ดการไหลแบบนิ่ง (Static Granular Bed Reactor; SGBR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่สูงมากระบบมีลักษณะการไหลลงในแนวตั้งผ่านชั้นกรองระบบดังกล่าวถูกใช้งานมานานกว่า 20 ปี ซึ่งระบบมีข้อได้เปรียบดังนี้ คือ 1) การตรงแผ่นฟิล์มจุลชีพขนาดเล็กของช่องว่างในชั้นตัวกลางได้ดี 2) ช่วยลดเวลาในการกักเก็บ (HRT) และ 3) ฟิล์มจุลชีพเกาะพื้นผิวสัมผัสตัวกลางที่มีปริมาณมากๆ ช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น [4], [5] แต่อย่างไรก็ตามระบบบำบัดน้ำเสีย SGBR มีการล้างชั้นกรองอยู่บ่อยครั้งเนื่องจากปัญหาการอุดตันจากอัตราส่วนความกว้าง : ความลึก (>1 : 4) [6] จึงมีแนวความคิดปรับอัตราส่วนความกว้าง : ความลึก (<1 : 4) โดยให้เครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอกตั้งสูงปรับหมุนเป็นแนวอนและควบคุมการไหลเวียนของน้ำเสียจากบนลงล่างเรียกว่าระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเม็ดคงที่การไหลหมุนเวียน (Static Granular Bed Reactor-Granular Activated Carbon; RSGBR-GAC) ตัวกลางที่ใช้ในระบบ RSGBR-GAC คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon; GAC) [7]–[9] ซึ่งเป็นที่นิยมเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงมาก (Specific Biofilm Surface Area; Ψ) ราวๆ 1,600–2,000 เมตร²/เมตร³ [10] สามารถให้แผ่นฟิล์มจุลชีพเกาะผิว

ตัวกลางหนาเพิ่มขึ้นจากการสะสมของชีวภาพและลดกลิ่นได้ดี ซึ่งถือได้ว่าเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใหม่จึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยให้ตัวแปรอิสระ คือ อัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation Ratio; R) เป็นการเพิ่มการรับไหลสารอินทรีย์ปริมาณมากได้ [1]–[3], [11], [12] และตัวแปรคงที่คือเวลาหมุนเวียน (Hydraulic Recirculation Time; HReT, t_{Re}) เพื่อใช้กำหนดลดปริมาณสารอินทรีย์ออก ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC ที่กล่าวมานั้นเป็นระบบทางเลือกสำหรับนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรใช้ในการคำนวณออกแบบ

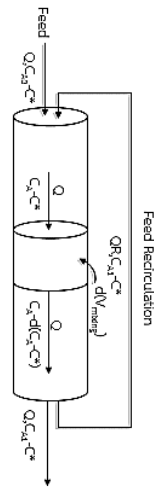
งานวิจัยในครั้งนี้นุ่งเน้นหาประสิทธิภาพของค่าความเหมาะสมของอัตราส่วนหมุนเวียน (R) ในการกำจัดค่าบีโอดี (BOD) และแอมโมเนีย (NH_3) (Removal BOD and NH_3 Efficiency) และพัฒนาแบบจำลองพลวัตปลั๊กการไหลหมุนเวียน (Recirculation Plug-Flow Reactor; RPFR) และแบบจำลองพลวัตถังกวนผสมหมุนเวียน (Recirculation Completely-mixed Stirred Tank Reactor; RCSTR) ปฏิกริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ($n = 1$ และ $n = 2$) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร (Volumetric rate Coefficient; kv) ของระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC ในการทำนายผลการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากการวิจัยในครั้งนี้นุ่งเน้นพัฒนาแบบจำลองพลวัต RPFR และแบบจำลองพลวัต RCSTR ปฏิกริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ($n = 1$ และ $n = 2$) ของระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC โดยใช้อัตราส่วนหมุนเวียน (R) และเวลาหมุนเวียน (HReT, t_{Re}) เป็นตัวแปรหลักในแบบจำลองพลวัต

2.1.1 การพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ RPFR เครื่องปฏิกรณ์ RPFR เป็นการไหลแบบหมุนเวียนอุดมคติ (Ideal Recirculation Plug – Flow Reator; IRPFR) ทำงานที่สถานะคงที่มีลักษณะเหมือนรูปแบบลูกสูบตั้งรูปที่ 1 จากคอมโพเนนต์ A กำหนดผลรวมอัตราการไหลเข้า (In Flow Rate; Q_{in}) กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Recirculation



รูปที่ 1 พัฒนาแบบจำลองพลวัต RPFRR

Flow Rate; QR) เป็น $(Q + QR)$ [1]–[3] และให้ความเข้มข้นเข้า Influent เป็น $C_{A0} - C^*$ ความเข้มข้นออก Effluent เป็น $C_{A1} - C^*$ [13] จะทำให้มวลสารเดินทางไปจุดเริ่มต้นความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะลดลงเท่ากันตลอดลูกสูบในปริมาตรมวลสารผสม (V_{mixing}) เมื่ออัตราส่วนหมุนเวียน (R) และเวลาหมุนเวียน (HRT) ที่เพิ่มสูงขึ้น

เขียนในรูปของ Partial Differential Equation ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสารดังต่อไปนี้

พิจารณาปฏิกริยาอันดับ 1 ($n = 1$) แสดงดังสมการที่ (1)

$$(Q + QR)(C_A - C^*) = (Q + QR)((C_A - C^*) - d(C_A - C^*)) - k_1 s t_{RPFRR} (C_A - C^*) d(V_{mixing}) \quad (1)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

$$k_1 s t_{RPFRR} = - \frac{\ln \left(\frac{C_{A1} - C^*}{C_{A0} - C^*} \right)}{\left(\frac{V}{Q} + R t_{Re} \right) (1 + R)} \quad (2)$$

ดังนั้นการแก้สมการที่ (2) ของแบบจำลองพลวัต RPFRR ปฏิกริยาอันดับ 1 ($n = 1$) ได้ดังนี้

$$C_{A1} = C^* + (C_{A0} - C^*) e^{-k_1 s t_{RPFRR} \frac{\left(\frac{V}{Q} + R t_{Re} \right)}{(1 + R)}} \quad (3)$$

พิจารณาปฏิกริยาอันดับ 2 ($n = 2$)

$$(Q + QR) d(C_A - C^*) = -k_2 n d_{RPFRR} (C_A - C^*)^2 d(V_{mixing}) \quad (4)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

$$k_2 n d_{RPFRR} = \frac{\left(\frac{1}{C_{A1} - C^*} - \frac{1}{C_{A0} - C^*} \right)}{\frac{V}{Q_m} + R t_{Re}} \cdot \frac{1}{1 + R} \quad (5)$$

ดังนั้นการแก้สมการที่ (4) ของแบบจำลองพลวัตปฏิกริยาอันดับ 2 ($n = 2$) ได้ดังนี้

$$C_{A1} = C^* + \frac{(C_{A0} - C^*)}{\left(1 + (C_{A0} - C^*) k_2 n d_{RPFRR} \left(\frac{V}{Q_m} + R t_{Re} \right) \right)^{1/2}} \quad (6)$$

โดยที่

C_{A1} คือ ความเข้มข้นของน้ำออก (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_{A0} คือ ความเข้มข้นของน้ำที่เข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)

C^* คือ ความเข้มข้นพื้นหลัง (มิลลิกรัม/ลิตร)

Q_m คือ อัตราการไหลเข้าระบบ (เมตร³/วัน)

V คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (เมตร³)

t_{Re} คือ ระยะเวลาหมุนเวียน (วัน)

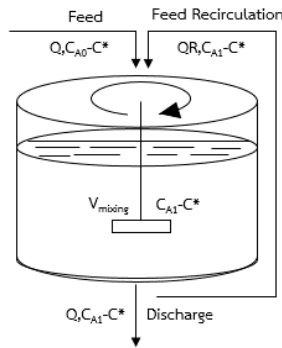
R คือ อัตราการหมุนเวียน

$k_1 s t_{RPFRR}$ คือ ค่าคงที่ปฏิกริยาลำดับที่ 1 ของ RPFRR (1/วัน)

$k_2 n d_{RPFRR}$ คือ ค่าคงที่ปฏิกริยาลำดับที่ 2 ของ RPFRR (1/วัน)

2.1.2 การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ RCSTR

RCSTR ทำงานที่สถานะคงที่มีลักษณะเหมือนอ่างเก็บน้ำ



รูปที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองพลวัต RCSTR

หรือแหล่งน้ำที่มีการผสมผสานหมุนเวียนกันค่อนข้างทั่วถึงด้วยการหมุนเวียนน้ำ [3] การไหลเวียนในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 2

โดยกำหนดผลรวมอัตราการไหลเข้า (In flow Rate; Qin) กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Recirculation Flow Rate; QR) เป็น (Q + QR) [1]-[3] และให้ความเข้มข้นเข้า Influent เป็น $C_{A0} - C^*$ ความเข้มข้นออก Effluent เป็น $C_{A1} - C^*$ [13] จะทำให้มวลสารเดินทางไปจุดเริ่มต้นความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะลดลงเท่ากันตลอดอ่างเก็บน้ำในปริมาตรมวลสารผสม (V_{mixing}) เมื่ออัตราส่วนหมุนเวียน (R) และเวลาหมุนเวียน (HReT) ที่เพิ่มสูงขึ้นสามารถเขียนในรูปของ Partial Differential Equation ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสาร ดังต่อไปนี้ดังนี้

พิจารณาปฏิกริยาอันดับ 1 ($n = 1$) แสดงดังสมการที่ (7)

$$V_{mixing} d(C_{A1} - C^*) = (C_{A0} - C^*)(Q + QR)dt - k_1 st_{RCSTR} V_{mixing} dt - (C_{A1} - C^*)(Q + QR)dt \quad (7)$$

สภาวะคงที่, $\frac{dC_{A1}}{dt} = 0$

$$k_1 st_{RCSTR} = \frac{\left(\frac{C_{A0} - C^*}{C_{A1} - C^*} - 1 \right)}{\left(\frac{V}{Q_{in}} + Rt_{Re} \right)} \quad (8)$$

ดังนั้นการแก้สมการที่ (8) ความเข้มข้นของ RCSTR ปฏิกริยาอันดับ 1 ($n = 1$) ได้ดังสมการที่ (9)

$$C_{A1} = C^* + \frac{C_{A0} - C^*}{1 + k_1 st_{RCSTR} \frac{Q_{in}}{V + Rt_{Re}} + R} \quad (9)$$

พิจารณาปฏิกริยาอันดับ 2 ($n = 2$) แสดงดังสมการที่ (10)

$$V_{mixing} d(C_{A1} - C^*) = (C_{A0} - C^*)(Q + QR)dt - k_2 nd_{RCSTR} (C_{A1} - C^*)^2 V_{mixing} dt - (C_{A1} - C^*)(Q + QR)dt. \quad (10)$$

สภาวะคงที่, $\frac{dC_{A1}}{dt} = 0$

$$k_2 nd_{RCSTR} = \frac{(C_{A0} - C^*) - (C_{A1} - C^*)}{\frac{V}{Q_{in}} + Rt_{Re}} \cdot \frac{1}{1 + R} \quad (11)$$

ดังนั้นการแก้สมการที่ (11) ความเข้มข้นของ RCSTR ปฏิกริยาอันดับ 2 ($n = 2$) ได้ดังสมการที่ (12)

$$C_{A1} = C^* + \sqrt{(C_{A0} - C^*) \frac{(1+R)}{k_2 nd_{RCSTR} \left(\frac{V}{Q_{in}} + Rt_{Re} \right)} - \left(\frac{1+R}{2k_2 nd_{RCSTR} \left(\frac{V}{Q_{in}} + Rt_{Re} \right)} \right)^2} - \left(\frac{1+R}{2k_2 nd_{RCSTR} \left(\frac{V}{Q_{in}} + Rt_{Re} \right)} \right) \quad (12)$$

โดยที่

C_{A1} คือ ความเข้มข้นของน้ำออก (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_{A0} คือ ความเข้มข้นของน้ำที่เข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)

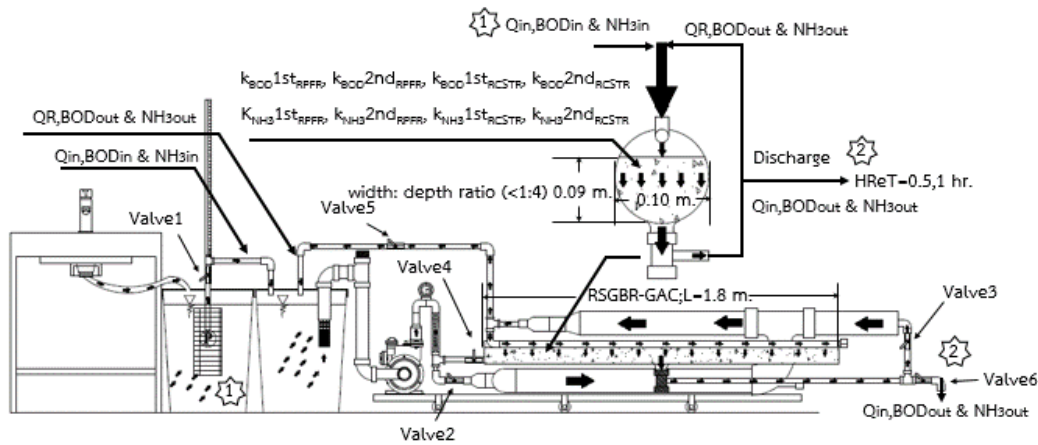
C^* คือ ความเข้มข้นพื้นหลัง (มิลลิกรัม/ลิตร)

Q_{in} คือ อัตราการไหลเข้าระบบ (เมตร³/วัน)

V คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (เมตร³)

t_{Re} คือ ระยะเวลาหมุนเวียนกักเก็บ (วัน)

R คือ อัตราการหมุนเวียน



รูปที่ 3 Process Flow Diagram of RSGBR-GAC

$k_{1st_{RCSTR}}$ คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของ RCSTR (1/วัน)

$k_{2nd_{RCSTR}}$ คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่ 2 ของ RCSTR (1/วัน)

2.2 ลักษณะน้ำเสีย

การศึกษานี้ใช้น้ำเสียจากอ่างล้างจานเชื่อมต่อกับบ่อดักไขมันและท่อพักน้ำเสียปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Equalization) เพื่อลดค่า BOD และ NH_3 ปริมาณสูงๆให้อยู่ในช่วง 910–7,500 มิลลิกรัม/ลิตร และ 12–50 มิลลิกรัม/ลิตร [11], [14] โดยทั่วไปค่า pH จะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 9 ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC

2.3 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (GAC)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) ยี่ห้อ เพียวซอร์บ WB 80 ตราการค้าอิสลามแห่งประเทศไทย GAC มีขนาดอนุภาค #8x30 MESH หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 1.5 มิลลิเมตร จำนวนไอโอดีน > 800 มิลลิกรัม/(กรัม-นาที) และปริมาณแฉะสูงสุด 10%

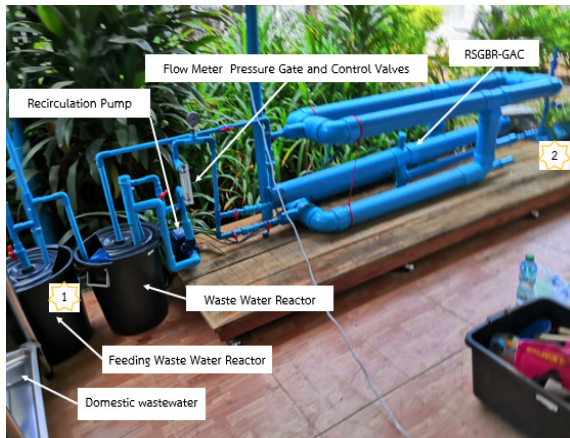
2.4 การทดลองระบบบำบัด RSGBR

ระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC มีลักษณะทรงกระบอกยาว (Length; L) เท่ากับ 1.80 เมตร ถูกบรรจุด้วย

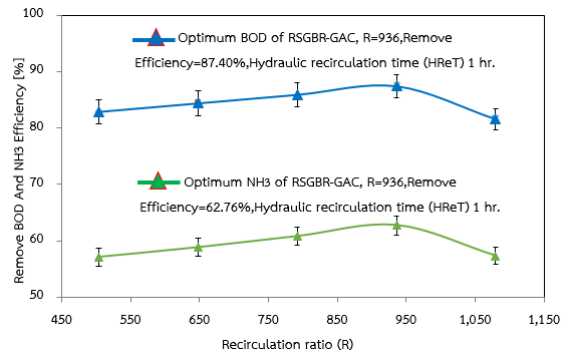
ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) จำนวน 12.6 กิโลกรัม ทิศทางการไหลเวียนของน้ำเสียจากบนลงล่างผ่านความกว้าง (Wide; W) เท่ากับ 0.10 เมตร และความลึก (Depth; D) ของชั้นกรอง เท่ากับ 0.09 เมตร มีอัตราส่วนความกว้าง : ความลึก (W : D) เท่ากับ 1 : 0.9 หรือ < 1 : 4 ขนาดปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume; V) เท่ากับ 0.014 เมตร³

หลักการการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC โดยการทำงานปิดวาล์ว 4 เปิดวาล์ว 1 ด้วยปั๊มปล่อยน้ำเสียเข้า (Q_{in}) จำนวน 20 ลิตร/วัน [1]–[3] ทำการเปิดวาล์ว 2, 3 และปรับวาล์ว 6 เพื่อกำหนดน้ำเสียเข้า (Q_{in}) เท่ากับ น้ำเสียออก (Q_{out}) หลังจากนั้นทำการเปิดปั๊มน้ำเสียไหลเวียน (Recirculation Pump) จำนวน 5 ระดับอัตราการไหลหมุนเวียน (QR) คือ 7, 9, 11, 13 และ 15 ลิตร/นาทีและปรับวาล์ว 5 เพื่อลดแรงดันโดยมีอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 504, 648, 792, 936 และ 1,080 [1]–[3] ในการทดลองนี้ใช้เวลา HReT จำนวน 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาเก็บน้ำตัวอย่าง 2 จุด แสดงดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตรวจสอบคุณภาพน้ำตาม Standard Method [15] เพื่อหาประสิทธิภาพในกำจัดค่า BOD และ NH_3 (Removal BOD and NH_3 Efficiency) โดยนำข้อมูลที่ได้ประมวลผลโดยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบค่าปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ($n = 1$ และ $n = 2$) และค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร



รูปที่ 4 RSGBR-GAC System



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีและแอมโมเนีย (Removal BOD and NH₃ Efficiency) กับ อัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

ของ BOD และ NH₃ ($k_{BOD\ 1st\ RPFR}$, $k_{BOD\ 2nd\ RPFR}$, $k_{NH_3\ 1st\ RCSTR}$, $k_{NH_3\ 2nd\ RCSTR}$) ของแบบจำลองพลวัต (RPFR) จากสมการที่ (2) และสมการที่ (5) และแบบจำลองพลวัต (RCSTR) จากสมการที่ (8) และสมการที่ (11) ทำนายผลการเปลี่ยนแปลงของ BOD และ NH₃ ด้วยสมการที่ (3) สมการที่ (6) และสมการที่ (9) สมการที่ (12)

3. ผลการทดลอง

3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า BOD และ NH₃ (Removal BOD and NH₃ Efficiency) กับอัตราส่วนการหมุนเวียน (R)

ผลจากการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC มีขนาดทรงกระบอกยาว (L) เท่ากับ 1.80 เมตร ถูกบรรจุด้วย GAC จำนวน 12.6 กิโลกรัม ทิศทางการไหลเวียนของน้ำเสียจากบนลงล่างผ่านความกว้าง (W) และความลึก (D) ของชั้นกรอง โดยมีอัตราส่วนความกว้าง : ความลึก (W:D) < 1:4 ขนาดปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume; V) เท่ากับ 0.014 เมตร³ พบว่า เมื่อค่าบีโอดีเข้า (BOD_{in}) เท่ากับ 723.75 ± 2.68 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าแอมโมเนียเข้า (NH₃_{in}) เท่ากับ 30.32 ± 2.83 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าความเหมาะสมของอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 936 [1]-[3] ที่เวลาหมุนเวียน (t_{re}) สูงสุดที่ 1 ชั่วโมง ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่า BOD และ NH₃ (Removal BOD and NH₃ Efficiency) ได้ถึง $87.40 \pm 2.42\%$ และ $62.76 \pm 2.69\%$

ซึ่งระบบ SGBR ต้องใช้เวลากักเก็บ (Hydraulic Retention Time; HRT) มากกว่า 9 ชั่วโมง [6] ดังรูปที่ 5 และ ตารางที่ 1

3.2 การศึกษาการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร (kv) ค่า BOD และ NH₃ ของระบบบำบัด RSGBR-GAC

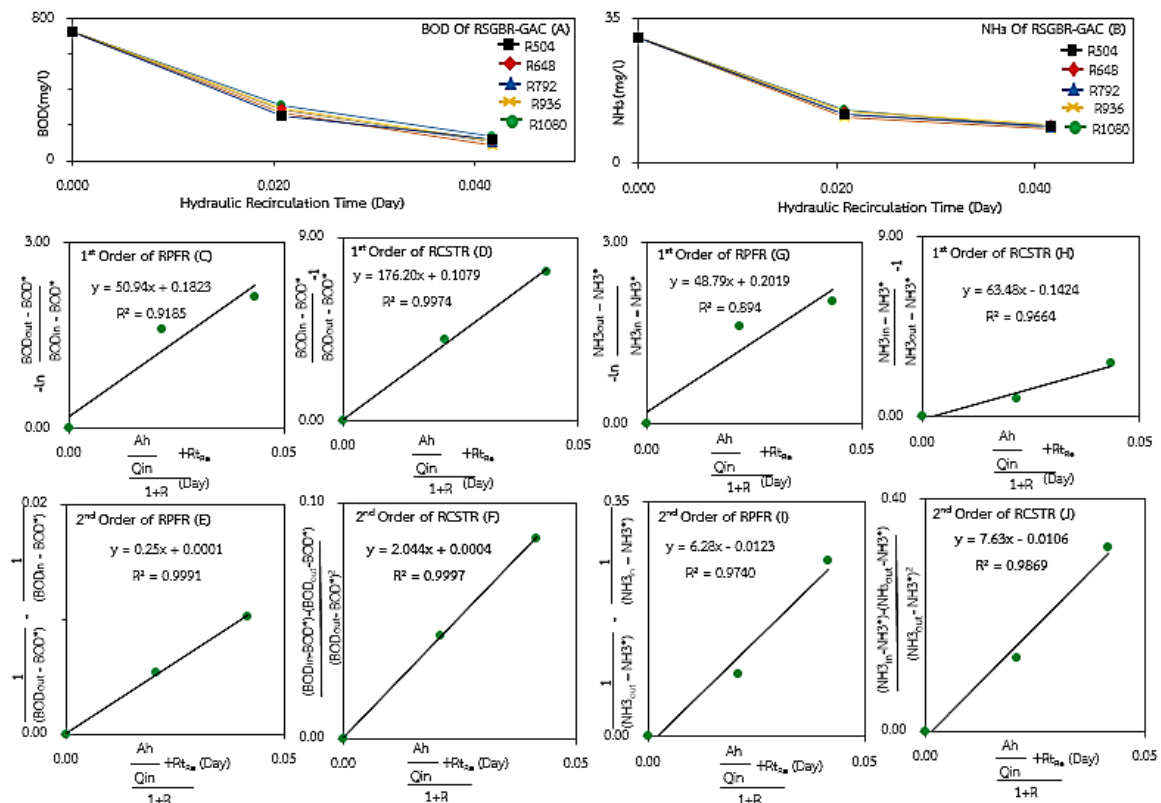
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของ RSGBR-GAC เกิดการดูดซับ (Adsorption) และแบคทีเรียไม่ใช้ออกาไคในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biodegradation) ค่า BOD และ NH₃ ที่ความเหมาะสมอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 936 [1]-[3] และขนาดปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume; V) เท่ากับ 0.014 เมตร³ ใช้เวลาหมุนเวียน (HReT, t_{re}) ที่ 0.5 และ 1 ชั่วโมง ในการบำบัดน้ำเสียโดยนำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในแบบจำลองพลวัต RPFR จากสมการที่ (2) และสมการที่ (5) และแบบจำลองพลวัต RCSTR จากสมการที่ (8) และสมการที่ (11) พบว่า เกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตรของค่า BOD และ NH₃ คือ ($k_{BOD\ 1st\ RPFR}$, $k_{BOD\ 2nd\ RPFR}$: $k_{NH_3\ 1st\ RPFR}$, $k_{NH_3\ 2nd\ RPFR}$) และ ($k_{BOD\ 1st\ RCSTR}$, $k_{BOD\ 2nd\ RCSTR}$: $k_{NH_3\ 1st\ RCSTR}$, $k_{NH_3\ 2nd\ RCSTR}$) เท่ากับ (50.94, 0.245 : 48.79, 6.28 และ 176.20, 2.044 : 63.48, 7.63) 1/วัน และ R² เท่ากับ 0.918, 0.997 : 0.894, 0.9740 และ 0.9974, 0.9997 : 0.9664, 0.9869 ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6



ตารางที่ 1 ค่า BOD และค่า NH₃ กับความแตกต่างอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) และเวลาหมุนเวียน (HReT, *t_{Re}*)

ประเภทน้ำเสีย	อัตราการไหลหมุนเวียน (ลิตร/นาท)	อัตราส่วนหมุนเวียน	บีโอดีออก (มิลลิกรัม/ลิตร) ที่เวลาหมุนเวียน (ชั่วโมง)		แอมโมเนียออก (มิลลิกรัม/ลิตร) ที่เวลาหมุนเวียน (ชั่วโมง)		ประสิทธิภาพในกำจัดค่า บีโอดี และ แอมโมเนีย (ร้อยละ)
			0.5 (ชั่วโมง)	1 (ชั่วโมง)	0.5 (ชั่วโมง)	1 (ชั่วโมง)	
Domestic	7	504	169.50 ± 2.65	124.02 ± 2.63	12.00 ± 2.60	9.14 ± 2.80	82.86 ± 2.63, 57.12 ± 2.80
	9	648	151.86 ± 2.60	113.07 ± 2.56	12.48 ± 2.55	9.29 ± 2.76	84.38 ± 2.56, 58.83 ± 2.76
	11	792	137.55 ± 2.59	102.13 ± 2.49	11.88 ± 2.50	8.83 ± 2.73	85.89 ± 2.49, 60.80 ± 2.73
	13	936	123.15 ± 2.54	91.19 ± 2.42	11.29 ± 2.53	8.37 ± 2.69	87.40 ± 2.42, 62.76 ± 2.69
	15	1080	177.34 ± 2.45	133.54 ± 2.35	12.93 ± 2.40	8.73 ± 2.50	81.55 ± 2.35, 57.33 ± 2.50

BOD* = 5 mg/L and NH₃* = 0 mg/L [13]

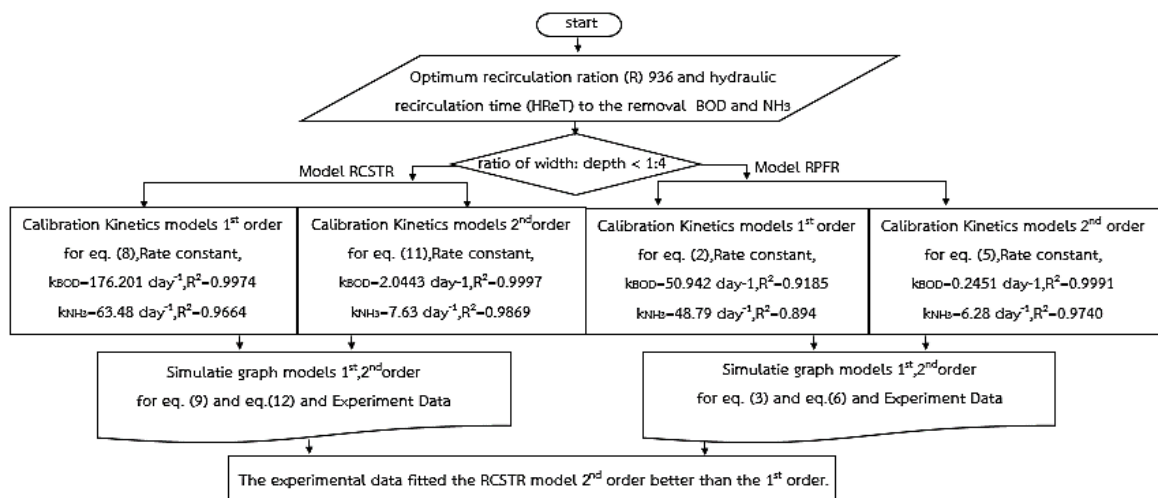


รูปที่ 6 การทำนายเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัตค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร (kv) โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับ 1 และปฏิกิริยาอันดับ 2 ของค่า BOD และ NH₃ (A)(B) การศึกษาเชิงพลวัตการลดค่า BOD ของระบบบำบัด RSGBR-GAC (C)(D)(E)(F) และเชิงพลวัตการลดค่า NH₃ ของระบบบำบัด RSGBR-GAC (G)(H)(I)(J)

วุฒิกุล สายแก้ว และคณะ, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถ่านกัมมันต์เม็ดคงที่การไหลหมุนเวียนสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน.”

ตารางที่ 2 ค่าปรับเทียบสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร (kv) ของปฏิกิริยาอันดับ 1 และปฏิกิริยาอันดับ 2 ของ BOD และ NH₃

เครื่องปฏิกรณ์	พารามิเตอร์	ชนิด	แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ของการย่อยสลาย k (วัน ⁻¹)	R^2
RSGBR -GAC	BOD	RPFR	1st order, 2nd order	50.942, 0.2451	0.9185, 0.9991
		RCSTR	1st order, 2nd order	176.201, 2.044	0.9974, 0.9997
	NH ₃	RPFR	1st order, 2nd order	48.79, 6.28	0.894, 0.9740
		RCSTR	1st order, 2nd order	63.48, 7.63	0.9664, 0.9869



รูปที่ 7 แผนภูมิกระบวนการคำนวณโดยใช้แบบจำลองพลวัต RPFR และแบบจำลองพลวัต RCSTR

3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงพลวัต RPFR และ RCSTAR ของระบบบำบัด RSGBR-GAC

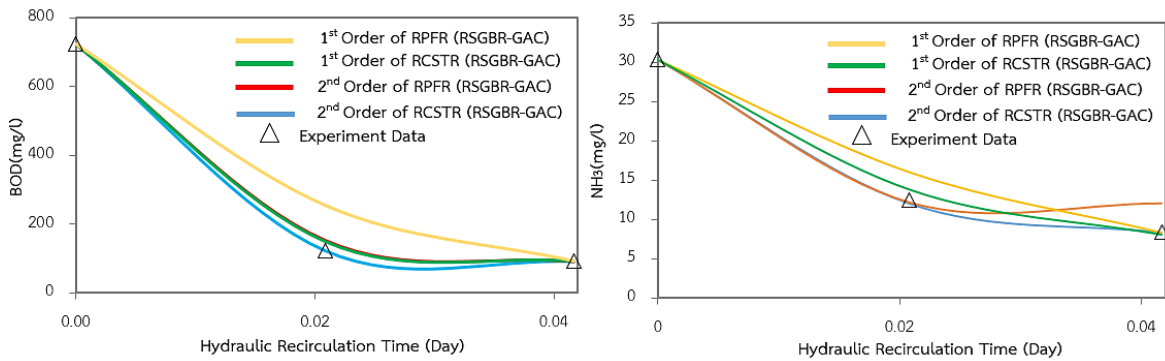
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของ RSGBR-GAC ในกำจัดค่า BOD และ NH₃ (Removal BOD and NH₃ Efficiency) ที่ความเหมาะสมอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 936 [1]-[3] และปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume; V) เท่ากับ 0.014 เมตร³ ใช้เวลาหมุนเวียน (HReT, t_{Re}) ที่ 0.5 และ 1 ชั่วโมง และนำค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตรของค่า BOD และ NH₃ คือ ($k_{BOD}1st_{RPFR}$, $k_{BOD}2nd_{RPFR}$: $k_{NH3}1st_{RPFR}$, $k_{NH3}2nd_{RPFR}$) และ ($k_{BOD}1st_{RCSTR}$, $k_{BOD}2nd_{RCSTR}$: $k_{NH3}1st_{RCSTR}$, $k_{NH3}2nd_{RCSTR}$) เท่ากับ (50.94, 0.245 : 48.79, 6.28) และ (176.20, 2.044 : 63.48, 7.63) 1/วัน และ R^2 เท่ากับ (0.918, 0.997 : 0.894, 0.9740) และ

(0.9974, 0.9997 : 0.9664, 0.9869)

ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่า BOD และ NH₃ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้สมการที่ (3) สมการที่ (6) และสมการที่ (9) และสมการที่ (12) ของแบบจำลองพลวัต RPFR และ แบบจำลองพลวัต RCSTR ดังรูปที่ 7 พบว่า เกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต RCSTR มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร $k_{BOD}2nd_{RCSTR}$ และ $k_{NH3}2nd_{RCSTR}$ เท่ากับ 2.044 และ 7.63 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9997 และ 0.9869 ดังรูปที่ 8

4. อภิปรายผลและสรุป

ในการพัฒนาแบบจำลองพลวัต RPFR และแบบจำลองพลวัต RCSTR ของระบบบำบัดน้ำเสีย RSGBR-GAC มี



รูปที่ 8 การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างของค่า BOD และ NH₃ กับ เวลาที่กักเก็บหมุนเวียน (HReT, t_{Re})

ทิศทางการไหลตั้งฉากกับถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกยาว (L) เท่ากับ 1.80 เมตร ถูกบรรจุด้วยถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (GAC) จำนวน 12.6 กิโลกรัม ทิศทางการไหลเวียนของน้ำเสียจากบนลงล่างผ่านความกว้าง (W) และความลึก (D) ของชั้นกรอง โดยมีอัตราส่วนความกว้าง : ความลึก (W : D) < 1 : 4 มีปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume; V) เท่ากับ 0.014 เมตร³ ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนใช้เวลาหมุนเวียน (HReT, t_{Re}) ที่ 1 ชั่วโมง พบว่าเกิดการดูดซับ (Adsorption) และแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biodegradation) ที่ความเหมาะสมอัตราส่วนการหมุนเวียน (R) เท่ากับ 936 มีประสิทธิภาพสูงสุดกำจัดค่า BOD และ NH₃ (Removal BOD and NH₃ Efficiency) ได้ถึง $87.40 \pm 2.42\%$ และ $62.76 \pm 2.69\%$ และเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตรของค่า BOD และ NH₃ คือ ($k_{BOD}1st_{RPFR}$, $k_{BOD}2nd_{RPFR}$: $k_{NH_3}1st_{RPFR}$, $k_{NH_3}2nd_{RPFR}$) และ ($k_{BOD}1st_{RCSTR}$, $k_{BOD}2nd_{RCSTR}$: $k_{NH_3}1st_{RCSTR}$, $k_{NH_3}2nd_{RCSTR}$) เท่ากับ 50.94, 0.245 : 48.79, 6.28 และ 176.20, 2.044 : 63.48, 7.63 1/วัน และ R2 เท่ากับ 0.918, 0.997 : 0.894, 0.9740 และ 0.9974, 0.9997 : 0.9664, 0.9869 จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่า BOD และ NH₃ พบว่า เกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต RCSTR มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายเชิงปริมาตร $k_{BOD}2nd_{RCSTR}$ และ $k_{NH_3}2nd_{RCSTR}$ เท่ากับ 2.044 และ 7.63 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9997 และ 0.9869 แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวไม่ความแตกต่างสำหรับ

นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรที่นำไปใช้ในการคำนวณออกแบบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่เอื้อเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Suksomboon and C. Junsiri, "The performance of moving fluidized bed bioreactor-granular activated carbon, MFBBR- GAC," *Prawarun Agriculture Journal*, vol. 15, no 1, pp. 238–247, 2018 (in Thai).
- [2] R. Suksomboon, C. Junsiri, W. Saikaew, and S. Kanyakam, "Mathematical modeling of moving fluidized bed bioreactor - granular activated carbon, MFBBR- GAC domestic wastewater treatment for agricultural use," *Prawarun Agriculture Journal*, vol. 16, pp. 259–269, 2019 (in Thai).
- [3] R. Suksomboon, C. Junsiri, S. Tangjitjaroenkit, M. Moselhy, and P. Padungthon, "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] R. Saravanane and D. V. S. Murthy, “Application of anaerobic fluidized bed reactors in wastewater treatment,” *A review*, vol. 11, no. 2, pp. 97–117, 2000.
- [5] D. Mowla and M. Ahmadi. “Theoretical and experimental investigation of biodegradation of hydrocarbon polluted water in a three phase fluidized-bed bioreactor with pvc biofilm support,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 147–156, 2007.
- [6] J. H. Oh, “Performance evaluation of the pilot-scale static granular bed reactor (SGBR) for industrial wastewater treatment and biofilter treating septic tank effluent using recycled rubber particles,” Doctoral dissertation, Iowa State University, USA, 2012.
- [7] P. Yu and Y. Luo, “Noval water treatment process-combined cationic ionexchange bed and degasifier in a three-phase fluidized bed,” *Desalination*, vol. 151, no. 2, pp. 145–152, 2002.
- [8] N. Fernandez, S. Montalvo, L. Guerrero, E. Sanchez, I. Cortes 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.
- [9] 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.
- [10] S. R. Qasim, E. M. Motley, and G. Zhu. *Water Works Engineering: Planning, Design and Operation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.
- [11] W. Xing, H. Ngo, W. Guo, and N. Yang, “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.
- [12] A. Zafarzadeh, B. Bina, M. Nikaeen, H. Movahedian-Attar, and M. Hajian-nejad, “Performance of moving bed biofilm reactors for biological nitrogen compounds removal from wastewater nitrification-denitrification process,” *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 353–364, 2010.
- [13] R. H. Kadlec and S. D. Wallace. *Treatment Wetlands*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [14] K. Haribabu and V. Sivasubramanian. “Treatment of wastewater in fluidized bed bioreactor using low density biosupport,” *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 214–221, 2014.
- [15] APHA, AWWA, and WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, 1999.