

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดซ์เบดตัวกลาง ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อใช้ทางการเกษตร

รัฐพล สุขสมบูรณ์^{*}, ชัยยันต์ จันทศิริ, วุฒิกร สายแก้ว และ ศิวตล ภัฏญาคำ

สาขาวิศวกรรมจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ถนนนครสวรรค์ 80 อำเภอเมืองมหาสารคาม มหาสารคาม 44000

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving Fluidized bed bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC) ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตร MFBBR- GAC ทำจากอะคริลิกไฮทรวงกระบอกตั้งสูงมีทิศการไหลขึ้นแบบเกลียวเชื่อมต่อกับถังรวบน้ำเสียจากความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของ 2 ตัวแปร คือน้ำหนักแห้ง (W_{dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) เท่ากับ 4 กก. ความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (h_0) เท่ากับ 0.55 ม. ใช้อัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{re}) ระหว่าง 13 ลิตร/นาทีเข้ากระแทกชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of wheel fixed) และน้ำเสียเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 20 ลิตร/วัน จากการศึกษาพบว่าจำนวน 24 หัวฉีดไม่มีความแตกต่างกันกับจำนวน 8 หัวฉีดโดยมี 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 จำนวนกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (number impact nozzle jet water of wheel fixed: n_w) เท่ากับ 1 กอล้อ ปัจจัยที่ 2 ระยะห่างปลายท่อแขนง (distant Pipe of lateral : d_{pl}) เท่ากับ 0.11 ม. ปัจจัยที่ 3 จำนวนท่อแขนง (number of pipe of lateral: n_{pl}) เท่ากับ 8 ท่อ ปัจจัยที่ 4 เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดน้ำ (diameter of nozzle: d_n) เท่ากับ 5 มม. ปัจจัยที่ 5 ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (the particle diameter of GAC: d_p) เท่ากับ 1.50 มม. เกิดค่าความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement height of bed: h_b) เท่ากับ 0.11 ม. เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement time of bed: t_b) เท่ากับ 11.51 วินาที มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (movement Degrees of bed: θ_b) เท่ากับ 42.11 และความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) เท่ากับ 26 รอบ/นาทีและความเหมาะสมจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio: R) เท่ากับ 976 กำจัดค่าซีโอดี 96.58% ของน้ำเสียชุมชนโดยใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (hydraulic recirculation time: HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมงระบบ MFBBR- GAC บำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตรได้

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving Fluidized bed bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC)

^{*} ผู้เขียนให้ติดต่อ: E-mail: Rpol9@hotmail.com

Mathematical Modeling of Moving Fluidized Bed Bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC Domestic Wastewater Treatment for Agricultural Use

Rattapol Suksomboon^{*}, Chaayan Junsiri, Wuthikorn Saikaew and Siwadol kanyakam

**Department of management environment engineering, Rajabhat Maha Sarakham University,
Nakhonsawan Road 80, Muang Maha Sarakham Muang, 44000, Thailand*

Abstract

The objective of this study was to developing mathematical models for Moving Fluidized Bed Bioreactor - Granular Activated Carbon purposely managed to utilize the treated wastewater. The result of using MFBBR – GAC, a highly cylindrical acrylic tank with spiral flow connected with waste water tank, found that the optimal correlation of these variables are as follows: a dry weight (W_{dry}) of GAC was 4 kg., the initial height of bed (h_0) was 0.55 m. The initial height of the saturated filter layer (h_0) is 0.55 m with the flow rate of recirculation (Q_{re}) between 13 liters / minute was to number impact nozzle jet water of wheel and the inflow rate of waste water (Q_{in}) 20 Little /day,.It was found that the number of 24 nozzles was not different with the number of 8 nozzles. The 5 parameters of 8 nozzles that were used to construct the prediction equation are 1) the number impact nozzle jet water of wheel fixed (n_w): 3 wheels, 2) the distant pipe of lateral (d_{pl}) 0.11 m., 3) the number of pipe of lateral: (n_{PL}) 8 pipes, 4) the diameter of nozzle (d_n) 5 mm., 5) the particle diameter of GAC(d_p) 1.50 mm. The indicators of moving bed were the 0.11 m movement height of bed (h_B), the 11.51 sec. movement time of bed (t_b), the 42.11 degree movement degrees of bed (θ_b), 26 rpm optimum rate of bed's stirrer speed (NB), and 936 optimum rate of recirculation (R). This system can remove BOD removal efficiency higher than 96.58% of domestic wastewater, and the hydraulic recirculation time (HReT) was 2 hrs and MFBBR – GAC purposely managed to utilize the treated wastewater for agricultural use.

Keywords: Mathematical Modeling of Moving Fluidized Bed Bioreactor - Granular Activated Carbon (MFBBR-GAC)

*Corresponding author: E-mail: Rpol9@hotmail.com

บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการเติบโตของประชากร การขยายตัวของเมืองค่อยๆ เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิด วิกฤตการณ์น้ำซึ่งเป็นปัญหาสำคัญทั่วโลก ประเทศไทยซึ่งเป็น หนึ่งในประเทศกำลังพัฒนาเริ่มตระหนักถึงมลพิษทาง น้ำจากกิจกรรมในบ้านเรือน บ้านเรือนเป็นแหล่งที่มาของ มลพิษทางน้ำที่มีสารหรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่พึงปรารถนาบนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติของน้ำ เปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ ประโยชน์ได้ กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วย น้ำ เสียจากการซักล้าง น้ำเสียจากครัวและเสียจากส้วม เกือบ ทุกหลังคาเรือนยังไม่มีระบบบำบัดรองรับน้ำเสียซัก-ล้าง ยิ่งคงระบายลงสู่แหล่งน้ำหรือสิ่งแวดล้อม ทำให้แหล่งน้ำ นั้นกลายเป็นแหล่งน้ำที่มีสภาพเสื่อมโทรมหรือน้ำเน่าเสีย มีสีค้ำและส่งกลิ่นเหม็น (Nemerow, 2006; Suksomboon *et al.*, 2019) เพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ ทางการเกษตรต่อไป จึงควรบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ เหมาะสม หากบำบัดน้ำเสียนั้นสามารถกำจัดความน่า รังเกียจ ก็สามารถมีประโยชน์และคุณค่าขึ้นมาได้ (Roongvisai, 2004; Sensai, 2004; Suksomboon and Junsiri, 2018; Suksomboon *et al.*, 2019) หลายภาคส่วนคือชุมชนรัฐบาลและองค์กรเอกชนต่างให้ ความสนใจในประเด็นนี้ มันเป็นความต้องการอย่างมาก ใน การ พ ฒ น า เท ค โ น โ ล ยี ก า ร บ ำ บ ั ด น้ำเสียอุตสาหกรรมขนาดเล็กในประเทศและขนาดเล็กที่ เชื่อถือได้ ต้นทุนต่ำและขนาดเล็กเนื่องจากระบบบำบัด น้ำเสียส่วนกลางต้องการระบบที่มีต้นทุนสูงและพื้นที่ ขนาดใหญ่สำหรับการดำเนินงาน นอกจากนี้เขตชานเมือง และอุตสาหกรรมขนาดเล็กยังมีการสร้างน้ำเสียจำนวน น้อยและตั้งอยู่ห่างจากกันทำให้ไม่สามารถรวบรวมน้ำเสีย สำหรับโรงงานบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง น้ำเสียที่เกิดจาก เขตชานเมืองหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ตั้งอยู่นอกสวน อุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กถึง

ขนาดกลางซึ่งสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูงและ ต้องผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง 20 มก./ลิตร

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดิซด์เบด (Fluidized Bed Bioreactor, FBBR) คือลักษณะการ เคลื่อนที่การไหลตามกันในแนวตั้งระหว่างของเหลวและ ของแข็งถูกใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนมานานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเดิม เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง(Trickling Filter: TF) และระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนที่ใช้งาน (Activated Sludge: AS) FBBR มีข้อได้เปรียบกว่าข้อ อื่นๆของระบบบำบัดน้ำเสียที่กล่าวมา (Sutton *et al.*, 1981; Hare *et al.*, 1988; Sutton and Mishra, 1994; Suksomboon *et al.*, 2019) ตัวกลางที่เหมาะสมกับ FBBR ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC), ทราาย, เพอร์ไลต์, ซีโอไลต์, หินลาวา (Yu and Luo, 2003; Fernandez *et al.*, 2007; Sowmeyan and Swaminathan, 2008) โดย GAC เป็นที่นิยมเพราะสามารถให้แผ่นฟิล์มจุลชีพเกาะผิว ตัวกลางหนาเพิ่มขึ้นและการสะสมของชีวภาพที่ดี เนื่องจากชั้นกรองมี Specific biofilm surface area ราวๆ 1,600-2,000 ตร.ม./ลบ.ม. (Qasim and Zhu, 2000) และสามารถรับโหลดสารอินทรีย์ปริมาณมากได้ จากรายงานวิจัยพบว่า การเพิ่มอัตราการใช้ของเหลวหมุนเวียน (Q_{rec}) โดยการเพิ่มจำนวนรอบหมุนเวียน Recirculation ratio, R สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย (Xing *et al.*, 2010; Zafarzadeh *et al.*, 2010) และ จากการดำเนินการบำบัดของ MFBBR-GAC สามารถ กำจัดซีโอดีได้ทั้งในทิศทางการไหลซึ่งอยู่ในทิศทางเป็น เกลียวและขึ้นในแนวตั้ง (Suksomboon and Junsiri, 2018; Suksomboon *et al.*, 2019) เนื่องจากภายใน เครื่องปฏิกรณ์ของ FBBR-GAC เป็นถึงอะคริลิคทรง กระจุกสูงที่มีชุดกึ่งล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) จำนวน 24 หัวฉีด ประกอบไปด้วย 5 ปังจ้ย คือโดย ปังจ้ยที่ 1 จำนวนกึ่งล้อ หัวฉีดน้ำแบบติดตาย(number impact nozzle jet

วารสารเกษตรพระวรุณ 261

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2562

water of wheel fixed: n_w) ปัจจัยที่2 ระยะห่างปลายท่อแขนง (distant Pipe of lateral : d_{pl}) ปัจจัยที่3 จำนวนท่อแขนง (number of pipe of lateral: n_{pl}) ปัจจัยที่4 เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดน้ำ (diameter of nozzle: d_n) ปัจจัยที่5 ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (the particle diameter of GAC: d_p) นำมาใช้ในการออกแบบของระบบ MFBBR- GAC จากรายงานวิจัยพบว่า การเพิ่มจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio: R) และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย (Xing *et al.*, 2010; Zafarzadeh *et al.*, 2010) และความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) กวนผสมตัวกลาง GAC (Suksomboon and Junsiri, 2018; Suksomboon *et al.*, 2019;) กวนผสมตัวกลางกับน้ำเสียมีการถ่ายเทออกซิเจนได้สม่ำเสมอ (Zafarzadeh, 2010) แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบสมการที่ใช้ ออกแบบชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) ของจำนวนหัวฉีดสร้างการเคลื่อนที่ทิศทางการไหลซึ่งอยู่ในทิศทางเป็นเกลียวและขึ้นในแนวตั้งของระบบเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไคซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving Fluidized bed bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC) MFBBR- GAC ประกอบด้วย 5 ปัจจัยดังกล่าว

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวความคิดพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC สำหรับออกแบบหัวฉีดน้ำ (Number of Nuzzle Jet Water :N) ของระบบ MFBBR- GAC โดยใช้ 5 ปัจจัยประกอบในสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC (Suksomboon and Junsiri, 2018; Suksomboon *et al.*, 2019) เพื่อประกอบค่าชี้ผลการเคลื่อนที่คือความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) และจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio: R) ที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนเพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไคซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving Fluidized bed bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC) ประกอบด้วยถังอะคริลิกทรงกระบอกขนาด 12.2 ลิตร ซึ่งบรรจุ GAC (FILTRASORB 100) จาก Calgon carbon (PA, USA) ด้วยไอโอดีนหมายเลข 850 mg/g ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (the particle diameter of GAC: d_p) เท่ากับ 1.50 มม. Specific biofilm surface area ราวๆ 1,800 ตร.ม./ลบ.ม. ทำการเปรียบเทียบโดยติดชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact Nozzle Jet Water of Wheel Fix) จำนวน 24 หัวฉีดและ 8 หัวฉีดเพื่อปรับอัตราการไหลของการไหลเวียน (Q_{Re}) และอัตราการไหลเข้า (Q_{in}) มีค่าชี้ผลคือจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio: R)(Reynolds, 1982; Suksomboon *et al.*, 2019) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$R = \frac{Q_{Re}}{Q_{in}} \quad (1)$$

และความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) (Fig.1) (A) แสดงการเคลื่อนที่แบบกวนของน้ำเสียบนชั้นกรองจากความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (Initial height of bed: h_0) ถูกความเร็วของน้ำจากอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) กระแทกชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) มีทิศการไหลขึ้นแบบเกลียวทำให้ชั้นกรองถูกยกลอยตัวขึ้นเป็นความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement height of bed: h_b) ผลรวมของความสูงทั้งสองคือความสูงการขยายตัวสูงสุด (height of the expanded bed: h_e) เทียบกับความสูงระดับน้ำต้น (h_{Water})

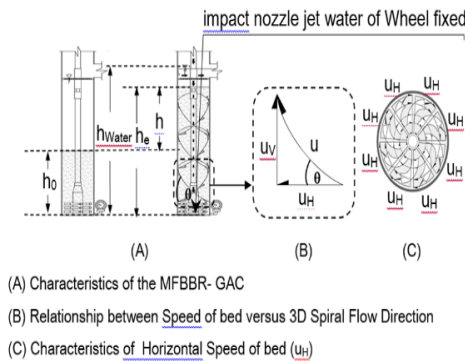


Fig. 1 hydraulic characteristics MFBBR- GAC (GAC

Source: Suksomboon and Junsiri (2018);
 Suksomboon *et al.* (2019)

(Fig.1) (B) แสดงความเร็วการไหลแบบสามมิติ ประกอบด้วยความเร็วระนาบของชั้นกรอง (ขึ้น) ตั้งฉากกับความเร็วแนวตั้งของชั้นกรอง (u_v) ซึ่งคำนวณจากความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement height of bed: h_B) ตัวกลาง / ชั้นกรองไหลขึ้นมุม 90 องศาไหลทิศทางขึ้นหารด้วยเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement time of bed: t_B) ความเร็วทั้งหมดที่คำนวณได้ (u) อยู่ที่ระดับมุมมองศอกการหมุนของชั้นกรอง (movement Degrees of bed: θ_B) การไหลเวียนของเกลียวและขึ้น (Vennard and Street, 1982) แสดงความสัมพันธ์ความเร็วลัพธ์ของชั้นกรอง (u) กับความเร็วแนวตั้งของชั้นกรอง (u_v) สมการจะถูกจัดเรียงเป็นความเร็วเชิงมุมของเตียง (θ_B) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (D_R) สร้างสมการความเร็วเชิงมุมของชั้นกรอง (ω) (Daugherty, 1989) ในเทอมของความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) ดังแสดงในสมการที่ 2 GAC (Suksomboon and Junsiri, 2018; Suksomboon *et al.*, 2019)

$$N_B = \frac{30h_B}{A_R(t_B)\text{Sin}(\theta_B)} \times 100 \quad (2)$$

$A_R = V_{\text{media}} / h_0$; คือ พื้นที่ของถังปฏิกรณ์ (Area of Reactor : A_R) แทนในสมการที่ 2

$$N_B = \frac{30h_B h_0}{V_{\text{media}}(t_B)\text{Sin}(\theta_B)} \times 100 \quad (3)$$

$V_{\text{media}} = A_{\text{Surface}} / \psi$; ปริมาตรตัวกลาง (Volume of media: V_{media}) แทนในสมการที่ 3 ได้สมการที่ 4

$$N_B = \frac{30\psi h_B h_0}{A_{\text{Surface}}(t_B)\text{Sin}(\theta_B)} \times 100 \quad (4)$$

โดยมีฟังก์ชันดังนี้

$$h_B = 0.004 Q_{\text{Re}}^{0.948} W_{\text{dry}}^{0.671} \quad (5)$$

$$t_B = 19.24 Q_{\text{Re}}^{-0.30} W_{\text{dry}}^{0.218} \quad (6)$$

$$\theta_B = 4431.35 Q_{\text{Re}}^{-2.59} W_{\text{dry}}^{0.11} Q_{\text{Re}}^{1.01} \quad (7)$$

- เมื่อ N_B คือ ความเร็วรอบของชั้นกรอง (รอบ / นาที)
- A_{Surface} คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวกลาง (ตร.ม.)
- ψ คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวกลางต่อปริมาตรตัวกลาง (ตร.ม./ลบ.ม.)
- h_0 คือ ความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (ม.)
- h_B คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (ม.)
- t_B คือ เวลาเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (วินาที)
- θ_B คือ มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (องศา)
- Q_{Re} คือ อัตราการไหลของการไหลเวียน (ลิตร/นาที)
- W_{dry} คือ น้ำหนักแห้ง (กก.)

1. การพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR-GAC

ในวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC โดยใช้ 5 ปัจจัยประกอบในสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC (Suksomboon and Junsiri, 2018) โดยทำการเปรียบเทียบชุดก่อกวนหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) จำนวน 24 หัวฉีดและ 8 หัวฉีดประกอบไปด้วย 5 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่1จำนวนก่อกวน (number of wheel: n_w) เท่ากับ3:1 ก่อกวนเทียบ ปัจจัยที่2 ระยะห่างระหว่างปลายท่อแขนง (distant pipe of lateral : d_{pl}) เท่ากับ 0.11:0.11 m. ปัจจัยที่3 จำนวนท่อแขนง (number pipe of lateral: n_{pl}) เท่ากับ 24:8 ท่อ ปัจจัยที่4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดน้ำ (diameter of nozzle: d_n) เท่ากับ 2:5 mm. ปัจจัยที่5 ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (the particle diameter of GAC: d_p) เท่ากับ 1.50 mm (Fig.2)

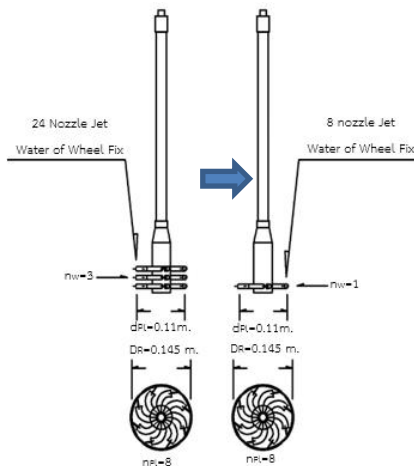


Fig. 2 Compare nozzle Jet Water of Wheel Fix of MFBBR- GAC system

จากสมการที่5, 6 และ7 นำค่าอัตราส่วน 5 ปัจจัยมีความสำคัญในการออกแบบชุดก่อกวนหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) คูณค่าการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC ดังนี้

$$h_B = \left(\frac{3}{n_w} \right) \left(\frac{D_R^{1.143}}{d_{pl}} \right) \left(\frac{8}{n_{pl}} \right)^{-0.4} \left(\frac{2}{d_n} \right)^{1.25} \left(\frac{1.5}{d_p} \right) 0.004 Q_{Re}^{0.948} W_{Dry}^{0.671} \quad (8)$$

$$t_B = \left(\frac{3}{n_w} \right) \left(\frac{D_R^{1.143}}{d_{pl}} \right) \left(\frac{8}{n_{pl}} \right)^{-0.4} \left(\frac{2}{d_n} \right)^{1.25} \left(\frac{1.5}{d_p} \right) 19.24 Q_{Re}^{-0.30} W_{Dry}^{0.218} \quad (9)$$

$$\theta_B = \left(\frac{3}{n_w} \right) \left(\frac{D_R^{1.143}}{d_{pl}} \right) \left(\frac{8}{n_{pl}} \right)^{-0.4} \left(\frac{2}{d_n} \right)^{1.25} \left(\frac{1.5}{d_p} \right) 4431.35 Q_{Re}^{-2.59} W_{Dry}^{0.11 Q_{Re}^{0.01}} \quad (10)$$

เมื่อ n_w คือ จำนวนก่อกวนหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (ก่อกวน)

- D_R คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกรณ์ (ม.)
- d_{pl} คือ ระยะห่างปลายท่อแขนง (ม.)
- n_{pl} คือ จำนวนท่อแขนง (ท่อ)
- d_n คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดน้ำ (มล.)
- d_p คือ ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (มล.)

โดยได้ทำการทดสอบกับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) 4 กิโลกรัมมีความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (Initial height of bed: h_0) เท่ากับ 0.55 ม. บ่มด้วยน้ำเสียในทรงกระบอกตั้งสูง 1 เมตรทำจากอะคริลิก กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) มีความแตกต่างกัน 5 ระดับคือ 11, 12, 13, 14 และ 15 ลิตร/นาที ทำการเปิดปั๊มปล่อยน้ำเสีย (Feeding pump) และปั๊มน้ำเสียไหลเวียน (Recirculation pump) กระแทกชุดก่อกวนหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) (Fig.3)

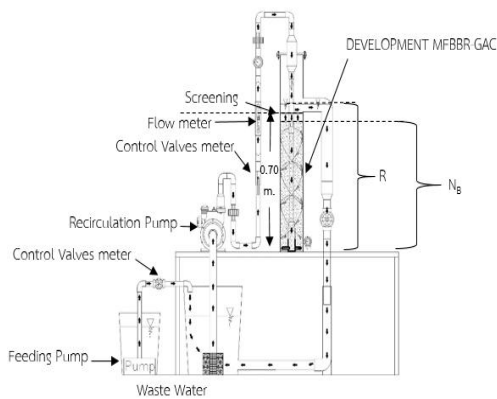


Fig. 3 Experimental set-up of MFBBR- GAC system

2. การทดสอบด้านคุณภาพน้ำของระบบ MFBBR-GAC

ทดสอบด้านคุณภาพน้ำของระบบ MFBBR-GAC บำบัดน้ำเสียบ้านเรือนมีค่าชี้ผลทางด้านคุณภาพน้ำ คือค่าบีโอดีบรรจุกความเหมาะสมของน้ำหนักแห้ง (W_{dry}) เท่ากับ 4 กิโลกรัมในถังอะคริลิกใช้ช่วงอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) เท่ากับ 11, 12, 13, 14, 15 ด้วยปั๊มน้ำเสียไหลเวียน และเปิดปั๊มปล่อยน้ำเสีย (Feeding pump) น้ำเสียเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 20 ลิตร/วัน ในถังรวมน้ำเสีย (Wastewater Reactor) ซึ่งความบรรจุน้ำเสียบ้านเรือน 20 ลิตร (Pollution Control Department, 2012) ใช้เวลากักเก็บหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชม. (Suksomboon and Junsiri, 2018 ; Kim *et al.*, 2007)

ผลการวิจัย

1. ผลการการคำนวณการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR-GAC

จากข้อมูลใน Table 1 ระบบ MFBBR- GAC มีพื้นที่ของถังปฏิกรณ์ (A_R) เท่ากับ 0.0165 ตร.ม. ผลการทดสอบน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) เท่ากับ 4 กก. พบว่าความสูง

เริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (Initial height of bed: h_0) เท่ากับ 0.55 ม. กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ระหว่าง 11-15 ลิตร/นาที จากการศึกษาเปรียบเทียบชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) พบว่าจำนวน 24 หัวฉีดไม่มีความแตกต่างกันกับจำนวน 8 หัวฉีดตั้งนั้น ค่าชี้ผลการเคลื่อนที่ของจำนวน 8 หัวฉีด ประกอบไปด้วย 5 ปัจจัย คือโดย ปัจจัยที่ 1 จำนวนกอล้อ (number of wheel: n_w) เท่ากับ 1 ปัจจัยที่ 2 ระยะห่างปลายท่อแขนง (distant Pipe of lateral : d_{pl}) เท่ากับ 0.11 ม. ปัจจัยที่ 3 จำนวนท่อแขนง (number of pipe of lateral: n_{pl}) เท่ากับ 8 ท่อ ปัจจัยที่ 4 เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดน้ำ (diameter of nozzle: d_n) เท่ากับ 5 มม. ท่อปัจจัยที่ 5 ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (the particle diameter of GAC: d_p) เท่ากับ 1.5 มม. คำนวนความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement height of bed: h_b) เท่ากับ 0.094, 0.102, 0.11, 0.118 และ 0.126 ม. เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement time of bed: t_b) เท่ากับ 12.10, 11.79, 11.51 และ 11.02 วินาที มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (movement Degrees of bed: θ_B) เท่ากับ 47.34, 44.25, 42.11, 40.71 และ 39.89 และ ความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) เท่ากับ 19, 23, 26, 29 และ 32 รอบ/นาที

Table 1 Moving Fluidized bed bioreactor - Granular Activated Carbon, n=24 nozzle jet water

W_{Dry} (kg)	Q_{Re} (Lpm)	h_0 (m)	h_B (m)	t_B (s)	θ_B (degree)	ψ (m^2/m^3)	$A_{Surface}$ (m^2)	R (Q_{Re}/Q_{in})	N (rpm)
4	11	0.55	0.098 ¹ 0.094 ²	12.68 ¹ 12.10 ²	49.60 ¹ 47.34 ²	1800 ^{1,2}	16.34 ^{1,2}	792 ^{1,2}	19 ^{1,2}
4	12	0.55	0.107 ¹ 0.102 ²	12.35 ¹ 11.79 ²	46.36 ¹ 44.25 ²	1800 ^{1,2}	16.34 ^{1,2}	864 ^{1,2}	22 ¹ 23 ²
4	13	0.55	0.115 ¹ 0.110 ²	12.06 ¹ 11.51 ²	44.13 ¹ 42.11 ²	1800 ^{1,2}	16.34 ^{1,2}	936 ^{1,2}	25 ¹ 26 ²
4	14	0.55	0.124 ¹ 0.118 ²	11.79 ¹ 11.25 ²	42.66 ¹ 40.71 ²	1800 ^{1,2}	16.34 ^{1,2}	1008 ^{1,2}	28 ¹ 29 ²
4	15	0.55	0.132 ¹ 0.126 ²	11.55 ¹ 11.02 ²	41.80 ¹ 39.89 ²	1800 ^{1,2}	16.34 ^{1,2}	1080 ^{1,2}	31 ¹ 32 ²

$N^1=24$ nozzle jet water $N^2=8$ nozzle jet water

2. ผลการทดสอบทางด้านคุณภาพน้ำของระบบ DMFBBR- GAC

นำผลการทดสอบชุดกึ่งล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) จำนวน 24 หัวฉีดกับจำนวน 8 หัวฉีดมาทดสอบทางด้านคุณภาพน้ำของระบบ MFBBR- GAC โดยนำน้ำหนักแห้ง (W_{dry}) เท่ากับ 4 กิโลกรัมกับ อัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) 11, 12, 13, 14 และ 15 ลิตร/นาที น้ำเสียเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 20 ลิตร/วัน ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนคือน้ำเสียจากบ้านเรือนมีค่าเริ่มต้นบีโอดี 130, 128, 150, 116 และ 112 มก./ลิตร จากการศึกษาเปรียบเทียบชุดกึ่งล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) พบว่าจำนวน 24 หัวฉีดไม่มีความแตกต่างกันกับจำนวน 8 หัวฉีดพบว่าความเหมาะสมจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio: R) เท่ากับ 976 และ ความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) เท่ากับ 26 รอบ/นาที กำจัดค่าซีโอดี 96.58% ของน้ำเสียชุมชนโดยใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมงดังแสดงใน Table 2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตรน้ำที่ปรุงปรุงน้ำเสีย (Roongvisai, 2004; Sensai, 2004) ที่ค่าเริ่มต้นบีโอดีเข้า (BOD_{in}) 60 มก./ลิตร ลดค่าบีโอดี (BOD) ได้ถึง 15 มก./ลิตร ใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 8 ชม. น้ำที่ผ่าน

การบำบัดด้วยระบบ MFBBR- GAC ลดค่าบีโอดี (BOD) ได้ถึง 5.13 มก./ลิตร (Fig.4 และ Fig. 5) และจึงเหมาะสมนำไปใช้ทางการเกษตรได้

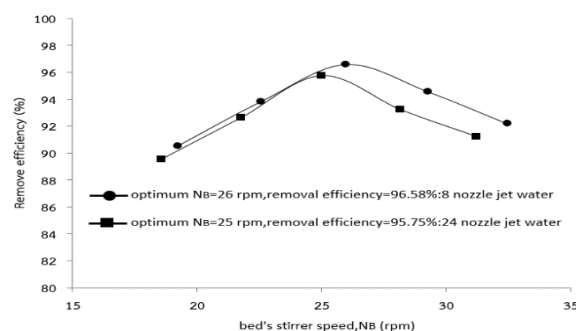


Fig. 4 Relationship between removal efficiency vs. bed's stirrer speed (N_B)

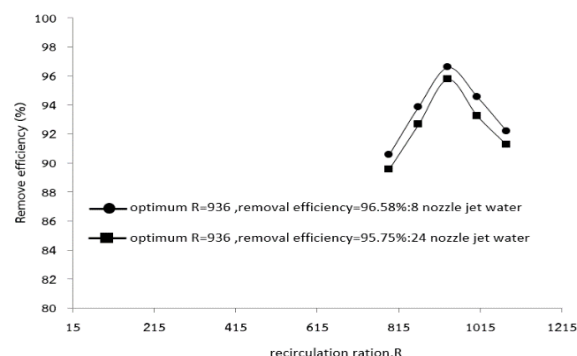


Fig. 5 Relationship between removal efficiency

Table 2 Effect of optimum rate recirculation ratio (R) and bed's stirrer speed (N_B) to the BOD removal efficiency

W_{Dry} (kg)	Q_{Re} (Lpm)	Q_{in} (L/d)	BOD_{in} (mg/L)	BOD (mg/L)	N_B (rpm)	R (Q_{Re}/Q_{in})	HReT (HR)	removal efficiency (%)
4	11	20	130	13.59 ¹ 12.29 ²	19 ^{1,2}	792 ^{1,2}	2 ^{1,2}	89.55 ¹ 90.55 ²
4	12	20	128	9.42 ¹ 7.87 ²	22 ¹ 23 ²	864 ^{1,2}	2 ^{1,2}	92.64 ¹ 93.85 ²
4	13	20	150	6.38 ¹ 5.13 ²	25 ¹ 26 ²	936 ^{1,2}	2 ^{1,2}	95.75 ¹ 96.58 ²
4	14	20	116	7.85 ¹ 6.32 ²	28 ¹ 29 ²	1008 ^{1,2}	2 ^{1,2}	93.23 ¹ 94.55 ²
4	15	20	112	9.81 ¹ 11 ²	31 ¹ 32 ²	1080 ^{1,2}	2 ^{1,2}	91.24 ¹ 90.18 ²

$N^1=24$ nozzle jet water $N^2=8$ nozzle jet water

วิจารณ์ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการทำนายการเคลื่อนที่แบบเกลียวของชั้นกรองในเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไอส์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving Fluidized bed bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR-GAC) MFBBR- GAC บำบัดน้ำเสีย เครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยถังบรรจุอะคริลิกซึ่งประกอบด้วยถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (GAC) ทำการเปรียบเทียบชุดกอลหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (Design Nuzzle Jet Water of Wheel Fix) โดยใช้ 5 พารามิเตอร์ประกอบในสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC ปรับอัตราการไหลเวียนของการไหลเวียนเพื่อให้ได้ความแตกต่างที่ดีที่สุดสำหรับชั้นกรองเพื่อประกอบค่าชี้ผลการเคลื่อนที่คือจำนวนรอบหมุนเวียน Recirculation ratio, R และความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) ที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนเพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรพบว่าจำนวน 24 หัวฉีดไม่มีความแตกต่างกับจำนวน 8 หัวฉีดโดยมี 5 พารามิเตอร์ได้แก่ ปัจจัยที่1จำนวนกอล(number of wheel: n_w)

เท่ากับ1 กอลเทียบ ปัจจัยที่2 ระยะห่างปลายท่อแขนง (distant Pipe of lateral : d_{pl}) เท่ากับ 0.11 ม. ปัจจัยที่ 3 จำนวนท่อแขนง (number of pipe of lateral: n_{pl}) เท่ากับ 8 ท่อ ปัจจัยที่4 เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดน้ำ (diameter of nozzle: d_n) เท่ากับ 5 มม. ปัจจัยที่5 ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (the particle diameter of GAC: d_p) เท่ากับ 1.50 มม.จากถังอะคริลิกทรงกระบอกตั้งสูงมีทิศการไหลขึ้นแบบเกลียวเชื่อมต่อกับถังรวบน้ำเสีย ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของ 2 ตัวแปร คือน้ำหนักแห้ง (W_{dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) เท่ากับ 4 กก. ความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (h_0) เท่ากับ 0.55 ม. กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) 13 ลิตร/นาที เข้ากระทบชุดกอลหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (impact nozzle jet water of Wheel fixed) น้ำเสียเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 20 ลิตร/วัน พบว่าความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement height of bed: h_b) เท่ากับ 0.11 ม. เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement time of bed: t_b) เท่ากับ 11.51 วินาที มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (movement Degrees of bed: θ_b) เท่ากับ 42.11 คำนวนความเหมาะสมความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) เท่ากับ 26 รอบ/นาที และความเหมาะสมจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio: R) เท่ากับ 976 กำจัดค่าซีโอดี 96.58% ของน้ำเสียชุมชน

วารสารเกษตรพระวรุณ 267

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2562

โดยใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชม.
ระบบMFBBR- GAC บำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตร
ได้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้านี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก
ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บ
เกี่ยว สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

References

- Daugherty, R.L. and Franzini, J.B. 1989. Fluid Mechanics with Engineering Applications, SI Metric edition. New York: McGraw-Hill Book.
- 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.
- Hare, R.W., Sutton, P.M., Mishra, P.N. and Potochnik, K.F. 1988. Utilization of fluidized bed biological treatment at general motors facilities: pilot and full scale results. Water Pollution Control Conference, Dallas.
- Kim, S.W., Park, J.B., and Choi, E. 2007. Possibility of sewage and combined sewer overflow reuse with biological aerated filters. Water Science and Technology. 55(1-2): 1-8.
- Metcalf, E. 1991. Wastewater Engineering. 3rd ed. New York: McGraw – Hill.
- Nemerow, N. 2006. Industrial Waste Treatment. Butterworth-Heinemann. 568 pp.
- Pollution Control Department. 2012. Manual Management Waste Water for Households. Ministry of Natural Resources and Environment Bangkok: Pollution Control Department. (in Thai)
- Qasim, S.R., E.M. and Zhu, G. 2000. Water Works Engineering: Planning, Design and Operation, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.
- Reynolds, T.D. 1982. Solutions Manual for Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. Brooks/Cole Engineering Division.
- Roongvisai, P. 2004. Mathematical Modeling of Constructed Wetlands Domestic Wastewater Treatment for Agricultural Use. Master of Engineering. Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Khon Kaen University. Khon Kaen. (in Thai)
- Sensai, P. 2004. Water Quality Modeling in Improvement of Community Wastewater Ponding Areas. Master of Engineering. Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Khon Kaen University. Khon Kaen. (in Thai)

- Sowmeyan, R. and Swaminathan, G. 2008. Evaluation of inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic waste water. *Bio-resource Technology*. 99: 3877–3880.
- Suksomboon, R. and Junsiri C. 2018. The Performance of Moving Fluidized Bed Bioreactor-Granular Activated Carbon. *Prawarun Agr. J.* 15(1): 238-247. (in Thai)
- Suksomboon R, Junsiri C, Tangjitjaroenkit S, Mohamed El-Moselhy,M. and Padungthon S. 2019. 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.
- Sutton, P.M. and Mishra, P.N. 1994. Activated carbon based biological fluidized beds for contaminated water and wastewater treatment: A state-of-the-art review. *Water Science and Technology*. 29(10–11): 309–317.
- Sutton, P.M., Shieh, W.K., Kos, P. and Dunning, P.R. 1981. Dorr-oliver's oxitron system™ fluidized-bed Water and Wastewater treatment process. In: Cooper, P.E., Atkinson, B. (Eds.), *Biological Fluidized Bed Treatment of Water and wastewater*. Ellis Horwood, London.
- Vennard, J.K. and Street, R.L. 1982. *Elementary Fluid Mechanics*, 6th ed. New York: John Wiley.
- Xing, W., Ngo, H.H., Guo, W.S., Wu, Z.Q., Nguyen, T.T., Cullum, P., Listowski, A. 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: 140–146.
- Yu, P. and Luo, Y. 2003. Noval water treatment process-combined cationic ion-exchange bed and degasifier in a three-phase fluidized bed. *Desalination*. 151(2): 145–152.
- Zafarzadeh, B., Bina, M., Nikaeen, H., Movahedian Attar, M. and Hajian nejad. 2010. Performance of moving bed biofilm reactors for biological nitrogen compounds removal from wastewater nitrification-denitrification process. *Environ. Health. Sci. Eng.* 7(4): 353-364.