

ศักยภาพเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไรซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

รัฐพล สุขสมบูรณ์* และ ชัยยันต์ จันทร์ศิริ

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไรซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving fluidized bed bioreactor - granular activated carbon, MFBBR- GAC) MFBBR- GAC ทำจากอะคริลิกทรงกระบอกตั้งสูงมีทิศการไหลขึ้นแบบเกลียวเชื่อมต่อกับถังรวบน้ำเสียพบว่าความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของ 2 ตัวแปร คือ น้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) เท่ากับ 4 กก. ความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (h_0) เท่ากับ 0.55 ม. กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ระหว่าง 10-15 ลิตร/นาที เข้ากระแทกชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (Impact nozzle jet water of Wheel fixed) จากการศึกษพบว่าอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ตั้งแต่ 13 ถึง 15 ลิตร/นาที มีค่า%กระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage distribution of bed, DB%) มากกว่า 90 ค่าชี้ผลการเคลื่อนที่ คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_b) เท่ากับ 0.115, 0.124, 0.132 ม. เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_b) เท่ากับ 12.06, 11.79, 11.55 วินาทีมุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement Degrees of bed: θ_b) เท่ากับ 44.13, 42.66, 41.80 และความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) เท่ากับ 25, 28, 31 รอบ/นาที การกำจัดค่าซีโอดีได้มากกว่า 95% ของน้ำเสียชุมชนคือน้ำเสียชักล้างใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมง และ MFBBR- GAC บำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตรได้

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด และ เครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไรซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

*ผู้เขียนให้ติดต่อ: E-mail: Rpol9@hotmail.com

The Performance of Moving Fluidized Bed Bioreactor - Granular Activated Carbon, MFBBR- GAC

Rattapol Suksomboon* and Chaiyan Junsiri

Department of Agricultural Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

Abstract

The objective of this study was to study the moving fluidized bed bioreactor – granular activated carbon (GAC). The result of using MFBBR – GAC, a highly cylindrical acrylic tank with spiral flow connected with waste water reactor, 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 percentage distribution of bed (DB%) of a flow rate of recirculation between 10 to 15 L/min impact nozzle jet water of Wheel fixed. The results showed that the flow rate (Q_{Re}) from 13 to 15 L/min had the percentage distribution of bed (DB%), higher than 90 percent. The indicators of moving bed were the movement height of bed (h_B) equaled 0.115, 0.124, 0.132 m., the movement time of bed (t_B) equaled 12.06, 11.79, 11.55 sec., the movement degrees of bed (θ_B) equaled 44.13, 42.66, 41.80 degree, and the bed's the stirrer speed equaled 25, 28, 31 rpm. This system can remove COD removal efficiency, higher than 95% of domestic wastewater that is wash water, and the hydraulic recirculation time (HReT) was 2 hrs and MFBBR – GAC purposely managed to utilize the treated wastewater for agricultural use.

Keywords: Granular activated carbon (GAC) and Moving fluidized bed bioreactor - granular activated carbon (MFBBR- GAC)

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

บทนำ

บ้านเรือนจัดเป็นแหล่งที่มาของมลพิษทางน้ำที่มีสารหรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วย น้ำเสียจากการซักล้าง น้ำเสียจากครัวเรือนและจากสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งในเกือบทุกหลังคาเรือนยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียซักล้างยังคงระบายลงสู่แหล่งน้ำหรือสิ่งแวดล้อมทำให้แหล่งน้ำนั้นกลายเป็นแหล่งน้ำที่มีสภาพเสื่อมโทรมหรือน้ำเน่าเสียมีสีดำและส่งกลิ่นเหม็น (Pollution Control Department, 2012) เพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรต่อไป จึงควรบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีที่เหมาะสม หากบำบัดน้ำเสียนั้นสามารถกำจัดความน่ารังเกียจก็สามารถมีประโยชน์และคุณค่าขึ้นมาได้ (Roongvisai, 2004; Sensai, 2004)

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไอซ์เบด (Fluidized bed bioreactor, FBBR) คือลักษณะการเคลื่อนที่การไหลตามกันไปในแนวตั้งระหว่างของเหลวและของแข็งถูกใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนมานานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเดิมเช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter: TF) และระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนที่ใช้งาน (Activated sludge: AS) FBBR มีข้อได้เปรียบกว่าข้ออื่น ๆ ของระบบบำบัดน้ำเสียที่กล่าวมา (Sutton *et al.*, 1981; Hare *et al.*, 1988; Sutton and Mishra, 1994) ตัวกลางที่เหมาะสมกับ FBBR ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon, GAC) ทราย เฟอร์ไรต์ ซีโอไซด์ และ หินลาวา (Yu and Luo, 2002; Fernandez *et al.*, 2007; Sowmeyan and Swaminathan, 2008) โดย GAC เป็นที่นิยมเพราะสามารถให้แผ่นฟิล์มจุลชีพเกาะผิวตัวกลางหนาเพิ่มขึ้นและการสะสมของชีวภาพที่ดีเนื่องจากชั้นกรองมี Specific biofilm surface area ราว ๆ 1,600-2,000 ตร.ม./ลบ.ม. (Qasim *et al.*, 2000) และสามารถรับโพลีสารอินทรีย์ปริมาณมากได้ จากรายงานวิจัยพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) โดยการเพิ่มจำนวนรอบหมุนเวียน (Recirculation ratio, R) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย (Xing *et al.*, 2010; Zafarzadeh *et al.*, 2010) และ

%การกระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage distribution of bed, DB%) มากกว่า 90 โดยความเร็วรอบใบกวนชั้นกรอง (N) ในกวนผสมตัวกลางกับน้ำเสียมีการถ่ายเทออกซิเจนได้สม่ำเสมอ (Zafarzadeh *et al.*, 2010)

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวความคิดพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไอซ์เบด (Fluidized bed biofilm reactors: FBBR) คือ ลักษณะการเคลื่อนที่การไหลตามกันไปในแนวตั้งระหว่างของเหลวและของแข็งถูกใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนพัฒนาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบเครื่องปฏิกรณ์กวนชีวภาพแบบฟลูอิดไอซ์เบดตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Moving fluidized bed bioreactor – Granular activated carbon: MFBBR-GAC) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรที่เหมาะสม ได้แก่ น้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon: GAC) โดยอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ประกอบค่าชี้ผลการเคลื่อนที่คือ %การกระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage distribution of bed: DB%) มีค่ามากกว่า 90% กับความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) สำหรับบำบัดน้ำซักล้างจากน้ำเสียชุมชนเพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

วิธีดำเนินการวิจัย

MFBBR-GAC เป็นระบบที่ไม่มี ความซับซ้อนในการทำงานสามารถบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีดูดซับกับการย่อยสลายทางชีวภาพ (Fig.1) ทิศทางการไหลของ MFBBR-GAC (Fig. 2) มีลักษณะคล้ายกับถังกวนผสมบูรณมีการกระจายตัวของชั้นกรองในสารอินทรีย์เป็นเนื้อเดียวกันภายในถังกวนหมุนเวียนเท่า ๆ กันทั่วถึง (Metcalf, 1991)

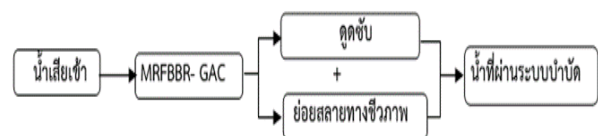
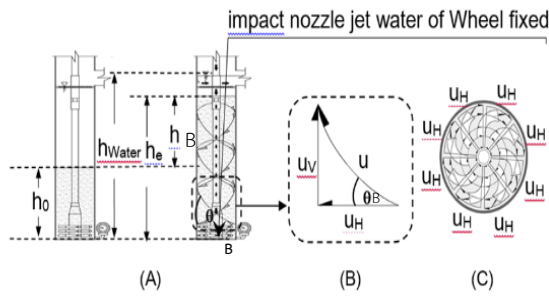


Fig. 1 Processes of MFBBR- GAC system



(A) Characteristics of the MFBBR- GAC
 (B) Relationship between Speed of bed versus 3D Spiral Flow Direction
 (C) Characteristics of Horizontal Speed of bed (u_H)

Fig. 2 Hydraulic characteristics MFBBR- GAC

Fig. 2 (A) แสดงการเคลื่อนที่แบบกวนของน้ำเสียกับชั้นกรองจากความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (Initial height of bed: h_0) ถูกความเร็วของน้ำจากอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) กระแทกชุดกบถหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (Impact nozzle jet water of Wheel fixed) มีทิศการไหลขึ้นแบบเกลียวทำให้ชั้นกรองถูกยกลอยตัวขึ้นเป็นความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_b) ผลรวมของความสูงทั้งสองคือความสูงการขยายตัวสูงสุด (Height of the expanded bed: h_e) คิดเป็น%กระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage distribution of bed, DB%) เทียบกับความสูงระดับน้ำล้น (h_{Water}) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\% DB = \frac{h_e}{h_{Water}} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 2 (B) แสดงถึงความสัมพันธ์ความเร็วหมุนของชั้นกรองมีทิศทาง 3 มิติ ประกอบไปด้วย Fig. 2 (C) ความเร็วแนวราบของชั้นกรอง (u_H) ทำมุม 90 องศา กับความเร็วแนวตั้งของชั้นกรอง (u_V) มีค่าเท่ากับความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (h) ทหารด้วยเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) มีทิศการไหลขึ้นมุม 90 องศา ได้ความเร็วลัพท์ (u) ซึ่งทำมุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) กับความเร็วแนวราบของชั้นกรอง (u_H) (Vennard and Street, 1982) แสดงความสัมพันธ์ความเร็วลัพท์ของชั้นกรอง (u) กับความเร็วแนวตั้งของชั้นกรอง (u_V) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\frac{u}{\sin 90} = \frac{u_V}{\sin(\theta_B)} \quad (2)$$

จัดรูปความเร็วลัพท์ (u) ในรูปความเร็วเชิงมุม (ω) ของชั้นกรอง (Daugherty and Franzini, 1989) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$u = \omega r = \omega \frac{D_R}{2} = \frac{u_V}{\sin(\theta_B)} \quad (3)$$

จัดรูปสมการที่ 3 ในรูปความเร็วเชิงมุมของชั้นกรอง (ω) ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\omega = \frac{2u_V}{D_R \sin(\theta_B)} \quad (4)$$

สร้างสมการความเร็วเชิงมุมของชั้นกรอง (ω) ในเทอมของความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\omega = \frac{N_B \pi D_R}{60} \quad (5)$$

นำสมการที่ 4 เท่ากับสมการที่ 5 ดังแสดงในสมการที่ 6

$$\frac{N_B \pi D_R}{60} = \frac{2u_V}{D_R \sin(\theta_B)} \quad (6)$$

จัดรูปสมการในเทอมของความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) ดังแสดงในสมการที่ 7

$$N_B = \frac{30u_V}{A_R \sin(\theta_B)} \quad (7)$$

จากความเร็วแนวตั้ง (u_V) มีค่าซึ่งผลคือความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_b) ทหารด้วยเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) แทนในสมการที่ 7 ได้สมการความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) ดังแสดงในสมการที่ 8

$$N_B = \frac{30h_B}{A_R(t_B) \sin(\theta_B)} \quad (8)$$

เมื่อ N_B คือความเร็วรอบของชั้นกรอง (รอบ/นาที) t_B คือ เวลาเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (วินาที) A_R คือ พื้นที่ของถังปฏิกรณ์ (ตร.ม.) θ_B คือ มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (องศา)

1. การศึกษาการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของ 2 ตัวแปรได้แก่ น้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) ขนาดอนุภาค (d_p) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร มีความแตกต่างกัน 7 ระดับ คือ 1, 1.5, 2, 2.5, 3.5 และ 4 กก. บ่มน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในทรงกระบอกตั้งสูง 1 เมตร ทำจากอะคริลิคความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (Initial height of bed: h_0) ในทรงกระบอก กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) มีความแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 10, 11, 12, 13, 14 และ 15 ลิตร/นาที ทำการเปิดปั๊มปล่อยน้ำเสีย (Feeding pump) และปั๊มน้ำเสียไหลเวียน (Recirculation pump) กระแทกชุดกอล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (Impact nozzle jet water of Wheel fixed) (Fig. 3) เพื่อศึกษาผลของการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 8 คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) และมุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) ใช้ประกอบการคำนวณ%การกระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage Distribution of Bed, DB%) กับความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B)

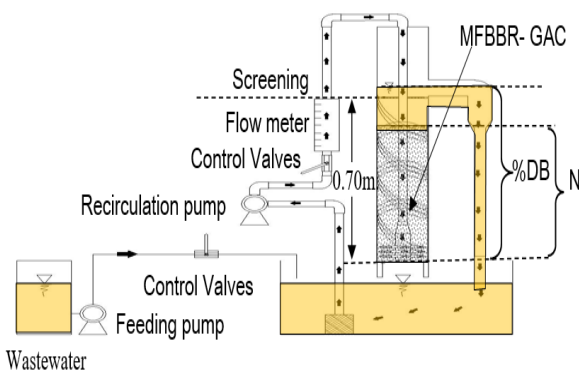


Fig. 3 Experimental set-up of MFBBR- GAC system

1.1 ศึกษาความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement height of bed: h_B)

เพื่อหาความสัมพันธ์ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) กับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) และอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ปรับเทียบ 6 สมการด้วยค่าความชันคงที่ (Slope constant: a) และค่าคงที่ยกกำลัง (Exponent constant: b)

1.2 ศึกษาเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B)

เพื่อหาความสัมพันธ์เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) กับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) และอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ปรับเทียบ 6 สมการด้วยค่าความชันคงที่ (Slope constant: a) และค่าคงที่ยกกำลัง (Exponent constant: b)

1.3 ศึกษามุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B)

เพื่อหาความสัมพันธ์มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) กับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) และอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ปรับเทียบ 6 สมการด้วยค่าความชันคงที่ (Slope constant: a) และค่าคงที่ยกกำลัง (Exponent constant: b)

1.4 การคำนวณการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC

ในการคำนวณการเคลื่อนที่โดยใช้น้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) เท่ากับ 4 กก. เนื่องจากการดูดซับและย่อยสลายทางชีวภาพมากที่สุดกับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) มีความแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 10, 11, 12, 13, 14 และ 15 ลิตร/นาที ทำการคัดเลือก%การกระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage distribution of bed, DB%) ที่มากกว่า 90 จากสมการที่ 1 และ แสดงค่าชี้ผล คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) และมุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) ในการหาความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) จากสมการที่ 8

2. การทดสอบด้านคุณภาพน้ำของระบบ MFBBR- GAC

ทดสอบด้านคุณภาพน้ำของระบบ MFBBR- GAC บำบัดน้ำเสียชุมชนคือน้ำเสียซักล้างมีค่าชี้ผลทางด้านคุณภาพน้ำคือค่า ซีโอดี บรรจุความเหมาะสมของน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ในถังอะคริลิค ใช้ช่วงอัตราการไหลหมุนเวียน

(Q_{Re}) ด้วยปั๊มน้ำเปล่าไหลเวียน (Recirculation pump) และเปิดปั๊มปล่อยน้ำเสีย (Feeding pump) น้ำเสียซักล้างเข้า (Q_{In}) เท่ากับ 20 ลิตร/วิน ในถังรวมน้ำเสีย (Wastewater reactor) ซึ่งความบรรจุน้ำเสียซักล้าง 20 ลิตร (Pollution control department, 2012) ใช้เวลาเก็บเก็บหมวนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมง (Kim *et al.*, 2007)

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC

จากความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรที่เหมาะสม ได้แก่ น้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) กับอัตราการไหลหมวนเวียน (Q_{Re}) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) และมุมมองการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) ใช้ประกอบการคำนวณ%การกระจายตัวของชั้นกรอง (Percentage distribution of bed, DB%) ที่มากกว่า 90 กับความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) มีผลการศึกษา ดังนี้

1.1 ผลการศึกษาความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B)

จากการศึกษาพบว่าความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) แปรผันตรงกับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) และอัตราการไหลหมวนเวียน (Q_{Re}) จากการวิเคราะห์ (Fig. 4) ได้ 6 สมการยกกำลังความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) เท่ากับ ค่าความชันคงที่ a (Slope constant, a) คูณน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ยกกำลังค่าคงที่ b (Exponent constant, b) 0.671 ดังแสดงในสมการที่ 9

$$h_B = aW_{Dry}^{0.671} \tag{9}$$

เปรียบเทียบ 6 สมการด้วยค่าความชันคงที่ a (Slope constant, a) (Fig. 5) ได้สมการความสูงการเคลื่อนที่ของ

ชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) ดังแสดงในสมการที่ 10

$$h_B = 0.004Q_{Re}^{0.948}W_{Dry}^{0.671} \tag{10}$$

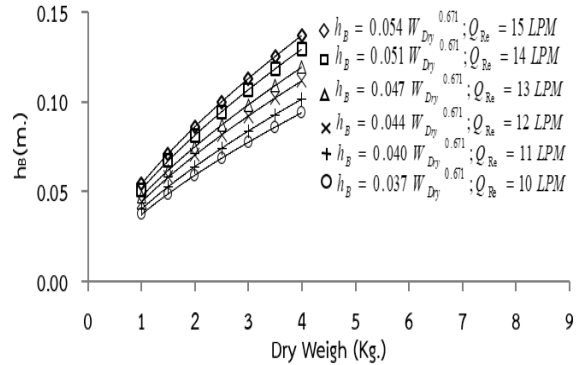


Fig. 4 Relationship between the movement height of bed (h_B) versus dry weight of activated carbon granular (W_{Dry})

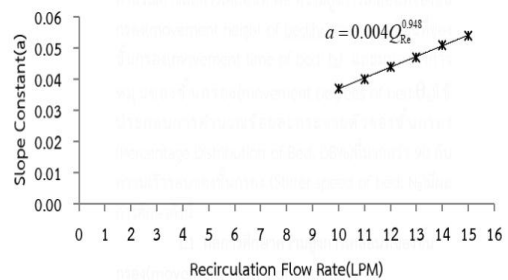


Fig. 5 Relationship between slope constant (a) versus recirculation flow rate (Q_{Re})

1.2 ผลการศึกษาเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B)

จากการศึกษาพบว่าเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) แปรผกผันกับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) และอัตราการไหลหมวนเวียน (Q_{Re}) จากการวิเคราะห์ (Fig. 6) ได้ 6 สมการยกกำลังเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (t) เท่ากับค่าความชันคงที่ a (Slope constant, a) คูณน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ยกกำลังค่าคงที่ b (Exponent constant, b) 0.218 ดังแสดงในสมการที่ 11

$$t_B = aW_{Dry}^{0.218} \tag{11}$$

$$\theta_B = aW_{Dry}^b \quad (13)$$

เปรียบเทียบ 6 สมการด้วยค่าความชันคงที่ (Slope constant, a) (Fig. 7) ได้สมการเวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_B) ดังแสดงในสมการที่ 12

$$t_B = 19.24Q_{Re}^{-0.30}W_{Dry}^{0.218} \quad (12)$$

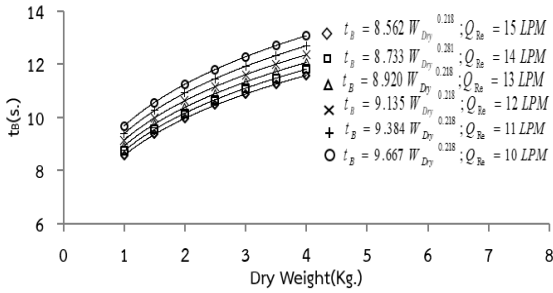


Fig. 6 Relationship between time of the moving bed (t) versus dry weight of activated carbon granular (W_{Dry})

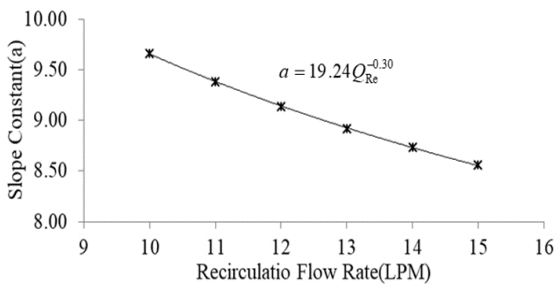


Fig. 7 Relationship between slope constant (a) versus recirculation flow rate (Q_{Re})

1.3 ผลการศึกษามุมมองการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B)

จากการศึกษาพบว่าพหุนามองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) แปรผันตรงกับน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) และแปรผกผันกับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) จากการวิเคราะห์ (Fig.8) ได้ 6 สมการยกกำลังมูมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) เท่ากับค่าความชันคงที่ a (Slope constant, a) คูณน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ยกกำลังค่าคงที่ b (Exponent constant, b) ดังแสดงในสมการที่ 13

เปรียบเทียบ 6 สมการด้วยค่าความชันคงที่ (Slope constant, a) (Fig. 9) และค่าคงที่เลขยกกำลัง (Exponent constant, b) (Fig. 10) ดังแสดงในสมการที่ 14

$$\theta_B = 4431.35Q_{Re}^{-2.59}W_{Dry}^{0.11}Q_{Re}^{1.01} \quad (14)$$

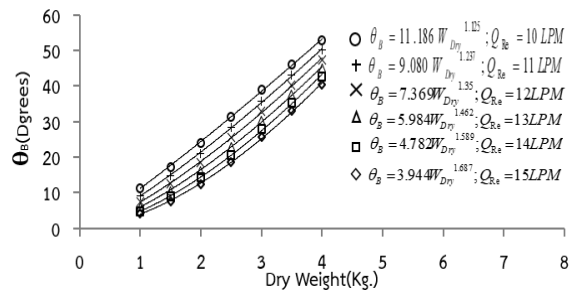


Fig. 8 Relationship between degrees of the movement degrees of bed (θ_B) versus dry weight of activated carbon granular (W_{Dry})

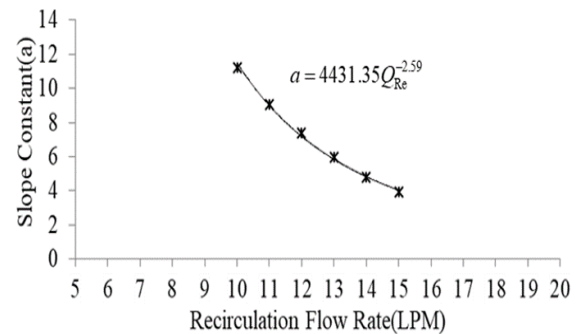


Fig. 9 Relationship between Slope constant (a) versus Recirculation Flow Rate (Q_{Re})

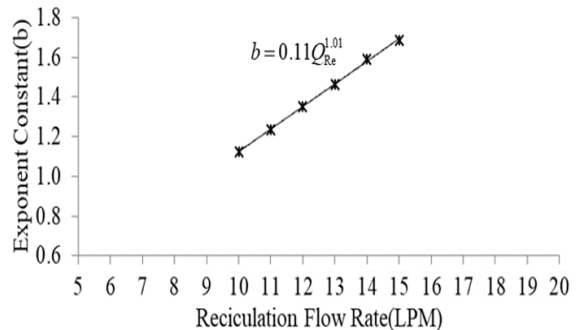


Fig. 10 Relationship between exponent constant (b) versus recirculation flow rate (Q_{Re})

1.4 ผลการการคำนวณการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC

จากข้อมูลใน Table 1 ระบบ MFBBR- GAC มีพื้นที่ของถังปฏิกรณ์ (A_R) เท่ากับ 0.0165 ตร.ม. ผลการทดสอบน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) เท่ากับ 4 กก. พบว่า ความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (Initial height of bed: h_0) เท่ากับ 0.55 ม. กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ระหว่าง 10-15 ลิตร/นาที เข้ากระแทกชุดกึ่งล้อหัวฉีดน้ำแบบติดตาย (Impact nozzle jet water of Wheel fixed) จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ตั้งแต่ 13 ถึง 15 ลิตร/นาที มีค่า%การกระจายตัวของชั้นกรอง

(Percentage distribution of bed, DB%) มากกว่า 90 ค่าซึ่งผลการเคลื่อนที่ คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_B) เท่ากับ 0.115, 0.124, 0.132 ม. เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (movement time of bed: t_B) เท่ากับ 12.06, 11.79, 11.55 วินาที มุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_B) เท่ากับ 44.13, 42.66, 41.80 และความเร็วรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_B) เท่ากับ 25, 28, 31 รอบ/นาที

Table 1 Performance moving fluidized bed bioreactor - granular activated carbon

W_{Dry} (kg)	Q_{Re} (Lpm)	h_0 (m)	h_B (m)	t_B (s)	θ_B (degree)	h_e (m)	h_{Water} (m)	DB (%)	N_B (rpm)
4	10	0.55	0.090	13.05	54.22	0.64	0.725	88.27	16
4	11	0.55	0.098	12.68	49.60	0.648	0.73	89.04	19
4	12	0.55	0.107	12.35	46.36	0.657	0.735	89.80	22
4	13	0.55	0.115	12.06	44.13	0.665	0.74	90.54	25
4	14	0.55	0.124	11.79	42.66	0.674	0.745	91.28	28
4	15	0.55	0.132	11.55	41.80	0.682	0.75	92.00	31

2. ผลการทดสอบทางด้านคุณภาพน้ำของระบบ MFBBR- GAC

นำผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของระบบ MFBBR- GAC นำน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) เท่ากับ 4 กก. กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) 13, 14 และ 15 ลิตร/นาที (Fig. 11) ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนคือน้ำเสียซักล้างมีค่าเริ่มต้นซีโอดี 3,893 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า กำจัดค่าซีโอดีได้มากกว่า 95% ของน้ำเสียชุมชนคือน้ำเสียซักล้างใช้เวลาที่เก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมง ดังแสดงใน Table 2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตรน้ำที่ถูกปรับปรุงจากน้ำเสีย (Roongvisai, 2004; Sensai, 2004) ที่ค่าเริ่มต้นบีโอดีเข้า (BOD_{in}) 60 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ MFBBR- GAC ลดค่าบีโอดี (BOD) ได้ถึง 3 มิลลิกรัม/ลิตร จึงนำไปใช้ทางการเกษตรได้

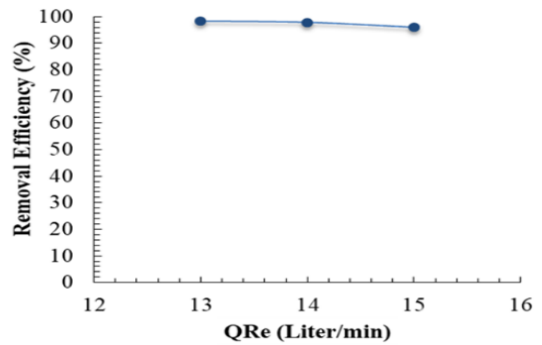


Fig. 11 Performance comparison of MFBBR- GAC with different flow rate of recirculation

Table 2 Performance and standard deviations of the COD removals activity comparison of MFBBR- GAC at different flow rate of recirculation

Q _{Re} (Lpm)	Waste water COD (mg/L) Removal efficiency (%) activity	
	Washing	(%)
0	3,893	0
13	69	98.23
14	85	97.82
15	154	96.04

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาระบบ MFBBR-GAC พบว่าความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของ 2 ตัวแปร คือน้ำหนักแห้ง (W_{Dry}) ของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon, GAC) เท่ากับ 4 กก. ที่ความสูงเริ่มต้นของชั้นกรองอิมตัว (h_0) เท่ากับ 0.55 ม. กับอัตราการไหลหมุนเวียน (Q_{Re}) ตั้งแต่ 13 ถึง 15 ลิตร/นาที มีค่า%การกระจายตัวของชั้น

กรอง (Percentage distribution of bed, DB%) มากกว่า 90 ค่าชี้ผลการเคลื่อนที่คือ ความสูงการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement height of bed: h_b) เท่ากับ 0.115, 0.124, 0.132 ม. เวลาการเคลื่อนที่ของชั้นกรอง (Movement time of bed: t_b) เท่ากับ 12.06, 11.79, 11.55 วินาทีมุมองศาการหมุนของชั้นกรอง (Movement degrees of bed: θ_b) เท่ากับ 44.13, 42.66, 41.80 และความเร็วยรอบของชั้นกรอง (Stirrer speed of bed: N_b) เท่ากับ 25, 28, 31 รอบ/นาที สามารถการกำจัดค่าซีโอดีได้มากกว่า 95% ของน้ำเสียชุมชนคือ น้ำเสียซักล้างใช้เวลากักเก็บการหมุนเวียน (HReT) เท่ากับ 2 ชั่วโมง และ MFBBR-GAC บำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ทางการเกษตรได้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

References

Daugherty, R.L. and Franzini, J.B. 1989. Fluid mechanics with engineering applications, SI metric edition. McGraw-Hill: New York.

Fernandez, N., Montalvo, S., Guerrero, L., Sanchez, E., Cortes, I. and Travieso, L. 2007. Anaerobic fluidized bed reactor application totropical fruit wine effluent. Water Sci. Tech. 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. Proceeding of the Industrial Waste Symposia, Water Pollution Control Federation: Texas.

Kim, S.W., Park, J.B. and Choi, E. 2007. Possibility of sewage and combined sewer overflow reuse with biological aerated filters. Water Sci. Tech. 55(1-2): 1-8.

Metcalf, E. 1991. Wastewater Engineering. 3rd edition. McGraw – Hill: New York.

Pollution Control Department. 2012. Manual management waste water for households. Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment: Bangkok.

- Qasim, S.R., Motley, E.M. and Zhu, G. 2000. Water works engineering: planning, design and operation. Prentice Hall PTR: New Jersey.
- Roongvisai, P. 2004. Mathematical modeling of constructed wetlands domestic wastewater treatment for agricultural use. M.E. Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.
- Sensai, P. 2004. Water quality modeling in improvement of community wastewater ponding areas. M.E. Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.
- Sowmeyan, R. and Swaminathan, G. 2008. Evaluation of inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic waste water. *Bioresour. Technol.* 99: 3877–3880.
- 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 Sci. Tech.* 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: *Biological fluidized bed treatment of water and wastewater*. P.E. Cooper and B. Atkinson (Eds.), Ellis Horwood: London.
- Vennard, J.K. and Street, R.L. 1982. *Elementary fluid Mechanics*. 6th edition. John Wiley: New York.
- 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. *Sep. Purif. Technol.* 72: 140–146.
- 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.
- 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.