



แบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของเรือนผลิตน้ำแร่สำหรับบริโภคในชุมชน

Dynamic Mathematical Models of Mineral Water Production for Community Consumption

รัฐพล สุขสมบุญ และ ละอองดาว ภู่อารอง

Rattapol Suksomboon and Laongdaw Poosumrong

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ประเทศไทย

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

Received : 2 June 2023, Received in revised form : 27 November 2023, Accepted : 5 December 2023

Available online : 9 January 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (Recirculation Ring Plug-Flow Reactor: RRPFR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (Recirculation Ring Completely-Mixed Stirred Tank Reactor : RRCSTR) ของระบบเครื่องกรองน้ำบาดาลการไหลวนแบบวงแหวนลง (Recirculation Ring Down Flow Filter Reactor of Groundwater : RRFRG)

วิธีดำเนินการวิจัย : ระบบการไหลวนแบบวงแหวนลงเข้าสู่ปฏิกรณ์เหล็ก (Fe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ความสูง 4 เมตร เชื่อมต่อเข้าสู่ชุดถังปฏิกรณ์เรซินที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ระดับความสูง 1.2 เมตร จำนวน 12 ถัง มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว (D:L) ($<1:4$)

ผลการวิจัย : พบว่าอัตราส่วนหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 มีค่าความเข้มข้นพื้นหลังเหล็ก (Fe^*) และความเข้มข้นพื้นหลังความกระด้าง ($CaCO_3^*$) เท่ากับ 0.071 และ 0.032 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลากักเก็บ (HRT) ที่ 0.09 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง ($CaCO_3$) (Removal Fe & $CaCO_3$ Efficiency) เท่ากับ 99.8677% และ 99.996%

สรุปผลการวิจัย จากการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต RRCSTR มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของค่าเหล็ก (Fe) และค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของความกระด้าง ($CaCO_3$) k_{2nd} เท่ากับ 3396.80 1/วัน และ 11091 1/วัน

คำสำคัญ : พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ; ระบบเครื่องกรองน้ำบาดาลการไหลวนแบบวงแหวนลง



Abstract

Background and Objectives : The objective of this study was to develop the dynamic modeling of Recirculation Ring Plug-Flow Reactor (RRPFR) and Recirculation Ring Completely-Mixed Stirred Tank Reactor (RRCSTR) of a Recirculation Ring Drown Flow Filter Reactor of Groundwater (RRFRG).

Methodology : The flow direction is perpendicular to the Recirculation Ring Drown Flow-cylindrical reactor. The inflow into the iron reactor diameter 0.15 m., height 4 m., connected to the second resin reactor, diameter 0.15 m., height 1.2 meters of 12 reactors had a diameter to length ratio (D:L) ($<1:4$)

Main Results : It was found that the ratio (R) was 3 with the background concentration iron (Fe^*) and the background concentration hardness (CaCO_3^*) were 0.071 and 0.032 mg/L. The hydraulic retention time (HRT) at 0.09 day was the highest efficiency to remove Fe and CaCO_3 were 99.867% % and 99.996 % in groundwater.

Conclusions : The development of the mathematical model, it was found that second-order reaction occurred in Recirculation Ring Completely-Mixed Stirred Tank Reactor (RRCSTR) with a coefficient of constant k_{2nd} were 3396.80 1/day and 11091 1/day.

Keywords : The development of the mathematical model ; Recirculation Ring Drown Flow Filter Reactor of Groundwater

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

บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศเพราะน้ำเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีวิต ปัจจุบันประชากรของโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและสังคมก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งน้ำที่มีอยู่ในโลกนี้ ส่วนมากจะอยู่ในมหาสมุทรประมาณร้อยละ 97 ส่วนน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดินที่สามารถนำมาใช้ได้นั้นมีเพียง ร้อยละ 0.63 เท่านั้น นอกนั้นเป็นน้ำแข็งอยู่ที่ขั้วโลก (Barbara & Thomus, 2014) น้ำที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นน้ำที่ได้จากฝนที่ตกลงสู่พื้นโลก ในขณะที่น้ำฝนตกลงผ่านบรรยากาศของโลก ซึ่งละลายเอาก๊าซและสารต่างๆ ใน บรรยากาศไว้ด้วยรวมทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์ก่อให้เกิดปัญหาเมื่อนำน้ำมาใช้ประโยชน์ น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำสำคัญที่มีการพัฒนาขึ้นมาใช้เพื่ออุปโภค บริโภค เกษตรกรรม ปศุสัตว์และอุตสาหกรรม ชื้นน้ำบาดาลเป็นชั้นหิน หรือชั้นตะกอนที่มีสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างตะกอนกว้าง หรือมีโพรงหรือรอยแตกต่อเนื่องกัน จึงทำให้เก็บน้ำไว้ได้เป็น ปริมาณมากจนกลายเป็นน้ำใต้ดิน (Wichai, 2009) ซึ่งเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติ แหล่งหนึ่งที่ทำให้ปริมาณน้ำได้มากแต่ก็มีปัญหาในเรื่องคุณภาพทางด้านกายภาพ ซึ่งมีแร่ธาตุชนิดต่างๆ เจือปนอยู่ในระดับเกิน

มาตรฐาน อีกทั้งมีปริมาณเหล็กและแมงกานีสสูง การที่น้ำบาดาลมีความกระด้าง เหล็ก และแมงกานีสสูงจะทำให้เกิดผลเสียหลาย กล่าวคือ น้ำจะมีสีเหลืองหรือสีแดง มีรส และมีกลิ่น ซึ่งก่อให้เกิดคราบตามภาชนะ สุขภัณฑ์และ อุปกรณ์ต่างๆ แต่อย่างไรก็ตาม หากมีกระบวนการการปรับปรุงที่เหมาะสมน้ำบาดาลก็จะเป็นน้ำที่มีคุณภาพที่จะนำไปใช้ในการบริโภคได้จากรายงานคุณภาพน้ำดื่มต้องมีค่ามาตรฐานของเหล็ก (Fe) ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร และความกระด้าง (CaCO_3) ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ลิตร จะทำให้น้ำมีคุณภาพและไม่มีผลเชิงลบต่อสุขภาพ น้ำกระด้างคือน้ำที่มีแคลเซียมและแมกนีเซียมปนอยู่ ซึ่งธาตุทั้งสองนี้มีผลต่อสุขภาพ คือ แคลเซียมจะมีส่วนช่วยในการหดตัวของกล้ามเนื้อโดยเฉพาะกล้ามเนื้อหัวใจ เป็นตัวเร่งการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดในร่างกายมนุษย์ ช่วยรักษาสมดุลต่างในร่างกาย และช่วยป้องกันการเกิดโรคกระดูกพรุน ส่วนแมกนีเซียมจะมีส่วนช่วยในการคลายตัวของกล้ามเนื้อโดยเฉพาะกล้ามเนื้อหัวใจ ซึ่งต้องทำงานร่วมกับแคลเซียม เป็นตัวเร่งให้กับเอนไซม์ ซึ่งมีหน้าที่เผาผลาญ อาหาร แป้ง น้ำตาล และไขมัน เป็นองค์ประกอบของเลซิทีน (Lecitin) ป้องกันไม่ให้เกิดหลอดเลือดในเลือดสูงขึ้น รวมถึงป้องกันการเกิดนิ่วเนื่องจากการจับตัวของแคลเซียมออกซาเลต (Calcium Oxalate) ในไตและถุงน้ำดี (Department of Medical Sciences, 2019)

วิจัยในครั้งนี้จึงได้คิดค้นการปรับปรุงคุณภาพของน้ำบาดาลก่อนเข้าระบบ RO ด้วยเครื่องผลิตน้ำดื่มด้วยระบบเครื่องกรองน้ำบาดาลการไหลวนแบบวงแหวน (Recirculation Ring Flow Filter Reactor of Groundwater: RRFRG) เพื่อยืดอายุการอุปกรณ์ของระบบ RO ซึ่งตัวถังทำจากวัสดุพีวีซี (PVC) ที่หาได้ง่ายภายในท้องถิ่น ประหยัดค่าใช้จ่าย และปลอดภัยในการใช้บริโภค (Jarawae *et al.*, 2017) นำมาใช้ในการกระบวนการผลิตน้ำอุปโภคบริโภคใช้ในชุมชน ระบบ RRFRG มีส่วนประกอบที่ 1 แกนกลางท่อแรงดันน้ำแบบเติมออกซิเจนในการกระจายแรงดันและอากาศเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำบาดาลเป็นตะกอนเหล็ก (Fe) การไหลของน้ำบาดาลจะถูกเชื่อมต่อกับเครื่องปฏิกรณ์สารกรองเรซินมีลักษณะจัดเรียงตัวเป็นวงแหวนในการกำจัดทั้งเหล็ก (Fe) และความกระด้าง (CaCO_3) ก่อนเข้าถังเก็บน้ำดี การทำให้น้ำเกิดรสชาติด้วยการไหลวนแบบวงแหวนด้วย ประกอบด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio; $QR/Q_{in} = R$) และได้พัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (Recirculation Ring Plug-Flow Reactor: RRPFR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (Recirculation Ring Completely-Mixed Stirred Tank Reactor Models: RRCSTR) โดยใช้หลักเกณฑ์อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว (D:L) (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b) สำหรับหาค่าความเข้มข้นพื้นหลัง (C^*) (Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) ของเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO_3) และหาความเหมาะสมแบบจำลองคณิตศาสตร์พลวัตพลวัตในการออกแบบเครื่องกรองน้ำบาดาล

งานวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นหาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO_3) (Removal Fe & CaCO_3 Efficiency) ด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (R) และ เวลาการกักเก็บ (Hydraulic retention time; HRT) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (RRPFR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (RRCSTR) ปฏิบัติการลำดับที่หนึ่งและสอง ($n=1$ และ $n=2$) ของระบบ RRFRG เพื่อหาค่าความเข้มข้นน้อยที่สุด

ของเหล็ก(Fe^*)และความเข้มข้นน้อยที่สุดของความกระด้าง ($CaCO_3^*$) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลง(k) (Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996) ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองพลวัต RRPFR และ RRCSTR จะต้องพิจารณาทิศทางไหลแบบวงแหวนหมุนเวียนจากบนลงล่าง (Drown Flow) โดยใช้หลักเกณฑ์อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว ($>1:4$) และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว ($<1:4$) (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b) ของปฏิกริยาอันดับหนึ่ง และสอง ($n=1$ และ $n=2$) จากการไหลหมุนวนความเข้มข้นเข้า influent เป็น C_{in} ความเข้มข้นออก Effluent เป็น C_{out} เข้าออกของเครื่องปฏิกรณ์ และค่าความเข้มข้นน้อยที่สุด (background concentration: C^*) (Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) ในหน่วยอัตราส่วนหมุนเวียน (R) และเวลาการกักเก็บ (HRT) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง (k) (Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996) ในการวิเคราะห์ เพื่ออธิบายองค์ประกอบต่าง ๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (RRPFR)

ใน ideal plug-flow reactor (PF) มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว ($>1:4$) การไหลของของเหลวจะทำให้มวลสารเดินทางไปเป็นหน้าสมำเสมอ ความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอดและไม่มีการผสมโดยความแตกต่างของความเข้มข้นในทิศทางการไหลความเข้มข้นที่ลดลงด้วยเวลาการกักเก็บ (HRT) (Reynolds, 1982; Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) แต่เครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (RRPFR) เป็นการไหลหมุนวนความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอดแนวยาวและมีการผสมโดยความแตกต่างของความเข้มข้นลดลงด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (R) และเวลาการกักเก็บ (HRT) ด้วยสมการของความต่อเนื่อง (The equation of continuity) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในแต่ละ element ของปริมาตรในทิศการไหลดังนี้ (Suksomboon *et al.*, 2019) (Figure 1)

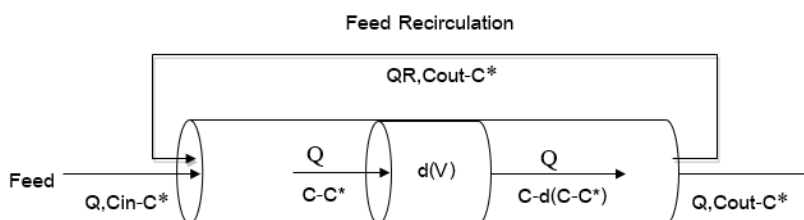


Figure 1 Recirculation Ring Plug-Flow Reactor (RRPFR)

จาก Figure 1 ให้ $(Q+QR)$ เป็นอัตราการไหลเข้ากับอัตราการไหลหมุนเวียน ในทิศทางปริมาตรเริ่มต้น (Initial of volume, V_i) เคลื่อนที่เต็มปริมาตรลูกสูบ (capacity of volume, V_c) เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมวลสาร (dV) โดยมีความเข้มข้นเข้า influent เป็น $C_{in}-C^*$ ความเข้มข้นออก Effluent เป็น $C_{out}-C^*$ ตามลำดับ (Kadlec & Wallace, 2009) ดังนั้นจะสามารถเขียน mass balance ภายใน Control Volume ระหว่าง V_i และ V_c ได้ดังนี้ พิจารณาปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$)

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

จัดรูปสมการ

$$(Q + QR)d(C - C^*) = -k_{1st}(C - C^*)d(V) \quad (2)$$

อินทิเกรต

$$\int_{C_{in}}^{C_{out}} \frac{d(C - C^*)}{(C - C^*)} = \frac{-k_{1st}}{(Q + QR)} \int_{V_i}^{V_c} d(V) \quad (3)$$

กำหนดให้ $V_i=0$ และ $V_c=V$ แทนค่าในดั่งสมการ (3)

$$\int_{C_{in}}^{C_{out}} \frac{d(C - C^*)}{(C - C^*)} = \frac{-k_{1st}}{(Q + QR)} \int_0^V d(V) \quad (4)$$

$$\ln \left(\frac{(C_{out} - C^*)}{(C_{in} - C^*)} \right) = -k_{1st} \frac{(1 - f)V}{Q(1 + R)} \quad (5)$$

$$k_{1st} = - \frac{\ln \left(\frac{C_{out} - C^*}{C_{in} - C^*} \right)}{\frac{t}{(1 + R)}} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) ดังนั้นการแก้สมการสำหรับความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation Ring Plug-Flow Reactor: RRPFR) จะได้

$$C_{out} = C^* + (C_{in} - C^*)e^{-k_{1st} \frac{t}{(1 + R)}} \quad (7)$$

พิจารณาปฏิกริยาอันดับสอง ($n=2$)

$$(Q + QR)(C - C^*) = (Q + QR)((C - C^*) - d(C - C^*)) - k_{2nd}(C - C^*)^2 d(V) \quad (8)$$

จัดรูปสมการ

$$(Q + QR)d(C - C^*) = -k_{2nd}(C - C^*)^2 d(V) \quad (9)$$



อินทิเกรต

$$\int_{C_{in}}^{C_{out}} \frac{d(C - C^*)}{(C - C^*)^2} = \frac{-k_{2nd}}{(Q + QR)} \int_{V_i}^{V_c} d(V) \quad (10)$$

กำหนดให้ $V_i=0$ และ $V_c=V$ แทนค่าในดั่งสมการ (10)

$$\int_{C_{in}}^{C_{out}} \frac{d(C - C^*)}{(C - C^*)^2} = \frac{-k_{2nd}}{(Q + QR)} \int_0^V d(V) \quad (11)$$

$$\frac{1}{(C_{out} - C^*)} - \frac{1}{(C_{in} - C^*)} = -k_{2nd} \frac{V}{Q(1 + R)} \quad (12)$$

จัดรูปสมการ

$$k_{2nd} = \frac{\frac{1}{(C_{in} - C^*)} - \frac{1}{(C_{out} - C^*)}}{\frac{t}{(1 + R)}} \quad (13)$$

จากสมการที่ 13 ดังนั้นการแก้สมการสำหรับความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation Ring Plug-Flow Reactor: RRPFR) จะได้

$$C_{out} = C^* + \frac{(C_{in} - C^*)}{1 - k_{2nd} \frac{t(C_{in} - C^*)}{(1 + R)}} \quad (14)$$

โดยที่ C_{in} , C_{out} คือ ความเข้มข้นของมวลสารเข้า และออกในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C^* คือ ความเข้มข้นพื้นหลัง (มิลลิกรัม/ลิตร)

f คือ ค่าแฟกเตอร์แทนความหนาแน่นของมวลสารในหนึ่งเซลล์

t คือ เวลาในการกักเก็บ (วัน)

R คือ อัตราส่วนการหมุนวน

V คือ ปริมาตรมวลสาร (ลูกบาศก์เมตร)

Q คือ อัตราการไหลเข้า (ลูกบาศก์เมตร/วัน)

k_{1st} คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$) (เมตร/วัน)

k_{2nd} คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารปฏิกิริยาอันดับสอง ($n=2$) (เมตร/วัน)

การพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (RRCSTR)

ใน Ideal Completely Mixed Flow Reactors (CMF) ใช้อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว ($<1:4$) สามารถใช้แทน reactor หรือระบบธรรมชาติโดยการประมาณได้หลายกรณี อาทิ rapid-mix tank ในขบวนการ chemical coagulation , aeration tank ในขบวนการทาง biological treatment, อ่างเก็บน้ำหรือแหล่งน้ำที่มีการผสมผสานกันค่อนข้างทั่วถึงด้วยแรงคลื่นลมความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอดและไม่มีการผสมโดยความแตกต่างของความเข้มข้นในทิศทางการไหลความเข้มข้นที่ลดลงด้วยเวลาการกักเก็บ (HRT) (Reynolds, 1982; Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) แต่เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (RRCSTR) เป็นการไหลหมุนวนในอ่างเก็บน้ำความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอด และมีการผสมโดยความแตกต่างของความเข้มข้นที่ลดลงด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio; $QR/Q_{in} = R$) และเวลาการกักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT) (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021c) ด้วยสมการของความต่อเนื่อง (the equation of continuity) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อหน่วยเวลาในแต่ละ element ของปริมาตรในทิศการไหลดังนี้ (Figure 2)

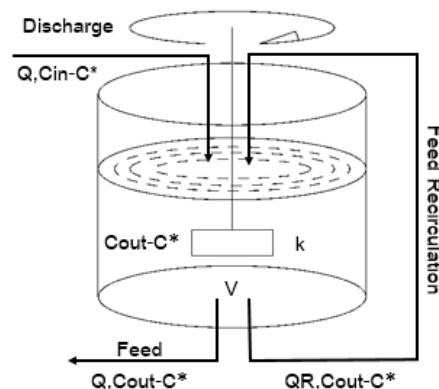


Figure 2 Recirculation Ring Completely-Mixed Stirred Tank Reactor Models(RRCSTR)

จาก Figure 1 ถ้ากำหนดให้อัตราการไหลเข้า และอัตราการไหลออกของของเหลวเท่ากัน และเท่ากับ Q และ V เป็นปริมาตร และให้ $(Q+QR)$ เป็นอัตราการไหลเข้ากับอัตราการไหลหมุนเวียนของ reactor และให้ความเข้มข้นเข้า influent เป็น $C_{in}-C^*$ และความเข้มข้นออก Effluent เป็น $C_{out}-C^*$ (Kadlec & Wallace, 2009) เนื่องจากภายใน reactor มีความเข้มข้นเท่ากันทุกจุด ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแสดง material balance รวม reactor ได้ดังนี้ พิจารณาปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$)

$$V \frac{dC}{dt} = (Q + QR)(C_{in} - C^*) - (Q + QR)(C_{out} - C^*) - (1 - f)Vk_{1st}(C_{out} - C^*) \quad (15)$$



ซึ่งเป็นสมการที่แสดงการผันแปรของความเข้มข้นภายใน reactor ต่อหน่วยเวลาในกรณีที่เป็น transient loading โดยรู้ค่า $(Q+QR)$, V , $C_{in}-C^*$, และ $k(C_{out}-C^*)$ ซึ่ง $(Q+QR)$ และ $C_{in}-C^*$ สามารถอยู่ใน function ของเวลา โดยส่วนใหญ่ การออกแบบ reactor มักจะถือว่าเป็น steady state โดยประมาณ ($dC/dt=0$) จึงสามารถเขียนสมการที่ (15) ได้เป็น

$$0 = (Q + QR)(C_{in} - C^*) - (Q + QR)(C_{out} - C^*) - (1 - f)Vk_{1st}(C_{out} - C^*) \quad (16)$$

$$\frac{(C_{out} - C^*) - (C_{in} - C^*)}{(C_{out} - C^*)} = k_{1st} \frac{(1 - f)V}{Q(1 + R)} \quad (17)$$

จัดรูปสมการ

$$k_{1st} = \frac{\frac{(C_{in} - C_{out})}{(C_{out} - C^*)}}{\frac{t}{(1 + R)}} \quad (18)$$

จากสมการที่ 2 ดังนั้นการแก้ปัญหสมการสำหรับความเข้มข้นของแบบจำลองพลวัต RCSTR จะได้

$$C_{out} = C^* + \frac{(C_{in} - C^*)}{1 + \frac{k_{1st}t}{(1 + R)}} \quad (19)$$

พิจารณาปฏิกิริยาอันดับสอง ($n=2$)

$$V \frac{dC}{dt} = (Q + QR)(C_{in} - C^*) - (Q + QR)(C_{out} - C^*) - (1 - f)Vk_{2nd}(C_{out} - C^*)^2 \quad (20)$$

สภาวะคงที่, $VdC/dt=0$

$$0 = (Q + QR)(C_{in} - C^*) - (Q + QR)(C_{out} - C^*) - (1 - f)Vk_{2nd}(C_{out} - C^*)^2 \quad (21)$$

$$\frac{(C_{out} - C^*) - (C_{in} - C^*)}{(C_{out} - C^*)^2} = k_{2nd} \frac{(1 - f)V}{Q(1 + R)} \quad (22)$$

$$k_{2nd} = \frac{\frac{(C_{in} - C_{out})}{(C_{out} - C^*)^2}}{\frac{t}{(1 + R)}} \quad (23)$$

จากสมการที่ (21) ดังนั้นการแก้ปัญหสมการกำลังสองสมบรูณ์สำหรับความเข้มข้นของแบบจำลองพลวัต RCSTARจะได้

$$C_{out} = C^* - \frac{(1 + R)}{2 k_{2nd} t} + \sqrt{\frac{(1 + R)}{k_{2nd} t} \left(C_{in} - C^* + \frac{(1 + R)}{4 k_{2nd} t} \right)} \quad (24)$$

โดยที่ C_{in} , C_{out} คือ ความเข้มข้นของมวลสารเข้า และออกในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C^* คือ ความเข้มข้นพื้นหลัง (มิลลิกรัม/ลิตร)

f คือ ค่าแฟกเตอร์แทนความหนาแน่นของมวลสารในหนึ่งเซลล์

t คือ เวลาในการกักเก็บ (วัน)

R คือ อัตราส่วนการหมุนเวียน

V คือ ปริมาตรมวลสาร (ลูกบาศก์เมตร)

Q คือ อัตราการไหลเข้า (ลูกบาศก์เมตร/วัน)

k_{1st} คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ($n=1$) (เมตร/วัน)

k_{2nd} คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารปฏิกิริยาอันดับสอง ($n=2$) (เมตร/วัน)

โครงสร้างพื้นฐานของระบบ RRFRG

ชุดถังปฏิกรณ์ที่ 1 ทำจากท่อพีวีซี (p.v.c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ความสูงของท่อยาว 4 เมตร ใช้เป็นแกนกลางในสร้างแรงดันและในการกระจายน้ำและเติมออกซิเจนที่ปลายท่อรับอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio; $QR/Q_{in} = R$) ด้วยระบบหัวฉีด ในการเติมอากาศเข้าทำปฏิกิริยาน้ำบาดาลเป็นตะกอนเหล็ก (Fe) เพื่อใช้ทดแทนการใช้สารกรองแมงกานีส มีทิศการไหลจากบนลงล่าง (Drown Flow) คิดเป็นค่าแฟกเตอร์ (f) เท่ากับ 0 (Xing *et al.*, 2017; Burger *et al.*, 2008) จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าเหล็กด้วยการเติมอากาศและการตกตะกอน

ชุดถังปฏิกรณ์ที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ความสูงของท่อยาว 1.20 เมตร จำนวน 12 ถังจัดเรียงเป็นวงแหวน มีทิศการไหลจากบนลงล่าง (Drown Flow) ภายในถังบรรจุสารกรองเรซินร้อยละ 50 คิดเป็นค่าแฟกเตอร์ (f) เท่ากับ

0.50 (Jarawae *et al.*, 2017) จะทำหน้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง (CaCO_3) ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resins)

การทดลองระบบ RRFRG

ลักษณะระบบ RRFRG มีชุดถังปฏิกรณ์ที่ 1 เป็นแกนกลางในสร้างแรงดันและในการกระจายน้ำและเติมออกซิเจน เชื่อมต่อเข้าสู่ชุดถังปฏิกรณ์ที่ 2 การไหลวนแบบวงแหวนลง (Recirculation Ring Down Flow) มีความกว้างของชั้นกรองประมาณ 0.15 ม. มีความลึกของชั้นกรอง (h) เท่ากับ 0.60 เมตร ของความสูงถึงปฏิกรณ์ 1.20 เมตร จำนวน 12 ถึงใช้อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว (D:L) (<1:4)

หลักการทำงานของระบบ RRFRG โดยการเปิดปั๊มปล่อยอัตราน้ำเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 1.44 ลูกบาศก์เมตร/วัน และเปิดปั๊มระบบน้ำหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลหมุนเวียน (QR) เท่ากับ 1.44, 2.88, 4.32 และ 5.76 ลูกบาศก์เมตร/วัน โดยใช้เวลาหมุนเวียน (Hydraulic recirculation time; HReT) ที่ 1 ชั่วโมง (Suksomboon *et al.*, 2021b) ทำการเก็บน้ำตัวอย่างจุดที่ 1, 2 และ 3 (Figure 3) และ (Table 1)



Figure 3 Recirculation Ring Flow Filter Reactor of Groundwater (RRFRG)

Table 1 The quality of Groundwater at various recirculation ratios (R) in terms recirculation ration (R).

W	Head	Q _{in}	Q _{Re}	Fe _{in}	CaCO ₃ _{in}	Feout of FSRG		CaCO ₃ out of FSRG	
						middle Pipe	end Pipe	middle Pipe	end Pipe
		(L/M)	(L/M)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Groundwater	1.6	1	1	1.5	240	0.26	0.25	1.6	1.4
	2.4	1	2	1.5	240	0.24	0.225	1.38	1.18
	3.2	1	3	1.5	240	0.22	0.2	1.20	1
	4	1	4	1.5	240	0.20	0.18	0.98	0.78

จาก (Figure 3) ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำตาม Standard Method (APHA *et al.*, 1999) หาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO₃) (Removal Fe & CaCO₃ Efficiency) โดยนำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในโปรแกรม Microsoft Excel นำไปสู่การหาค่าความเข้มข้นพื้นหลังเหล็ก (Fe*) และความเข้มข้นพื้นหลังความกระด้าง (CaCO₃*) โดยใช้สมการที่ (5) สมการที่ (12) สมการที่ (17) และสมการที่ (22) และปรับเทียบด้วยปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งและสอง (n=1 และ n=2) หาค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลาย (k_{1st} และ k_{2nd}) โดยใช้สมการที่ (6) สมการที่ (13) สมการที่ (18) และสมการที่ (23) ทำการตรวจสอบความแม่นยำโดยใช้สมการที่ (7) สมการที่ (14) สมการที่ (19) และสมการที่ (24) ของแบบจำลองพลวัต (RRPFR) และแบบจำลองพลวัต (RRCSTR)

ผลการวิจัย

ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO₃) (Removal Fe & CaCO₃ Efficiency) กับอัตราน้ำเข้า (Q_{in}) กับ อัตราการไหลหมุนเวียน (QR)

ผลจากการศึกษาระบบ RRFGR มีชุดถังปฏิกรณ์ที่ 1 เป็นแกนกลางในสร้างแรงดันและในการกระจายน้ำและเติมออกซิเจน เชื่อมต่อเข้าสู่ชุดถังปฏิกรณ์ที่ 2 การไหลวนแบบวงแหวนลง (Recirculation Ring Down Flow) มีความกว้างของชั้นกรองประมาณ 0.15 เมตร มีความลึกของชั้นกรอง (h) เท่ากับ 0.65 เมตร ของความสูงถังปฏิกรณ์ 1.25 เมตร จำนวน 12 ถัง ใช้อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว (D:L) (<1:4) (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021c) พบว่าอัตราน้ำเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ กับ อัตราการไหลหมุนเวียน (QR) เท่ากับ 3 ลิตร/นาที่ มีอัตราส่วนหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 (Suksomboon *et al.*, 2021b) เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO₃) (Removal Fe & CaCO₃ Efficiency) เท่ากับ 99.867% และ 99.996% มีค่ามาตรฐานของเหล็ก (Fe) ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร และความกระด้าง (CaCO₃) ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ลิตร (Table 2) และ(Figure 4)

Table 2 Effect of optimum recirculation ration (R) to the Fe and CaCO₃ removal efficiency in terms recirculation ration (R).

W	Head	Q _{in}	Q _{Re}	Fe _{in}	CaCO ₃ _{in}	Removal Fe		Removal CaCO ₃	
						Efficiency (%)		Efficiency (%)	
						middle	end	middle	end
						filter	filter	filter	filter
		(L/M)	(L/M)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Groundwater	1.6	1	1	1.5	240	99.827	99.833	99.993	99.994
	2.4	1	2	1.5	240	99.840	99.850	99.994	99.995
	3.2	1	3	1.5	240	99.853	99.867	99.995	99.996
	>4	1	4	1.5	240	99.867	99.880	99.996	99.997

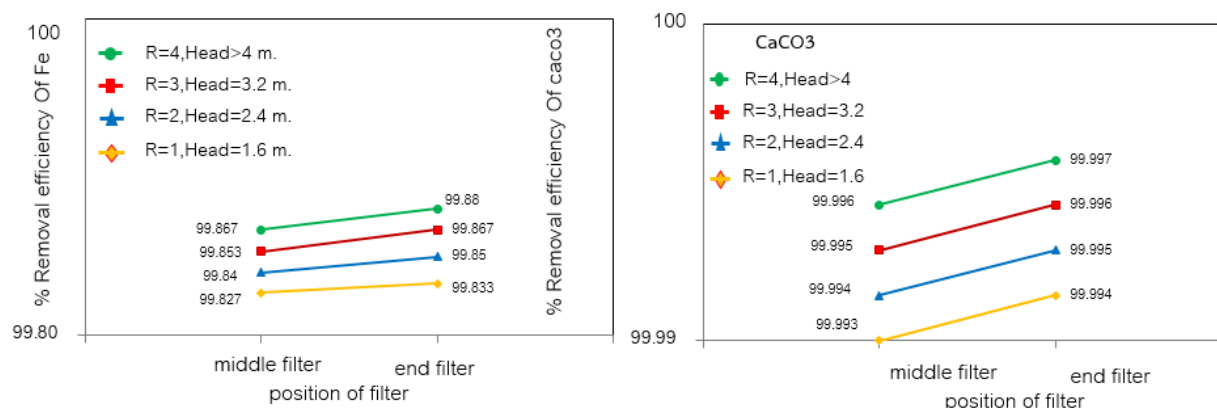


Figure 4 Effect of optimum recirculation ration (R) to the (Fe) and CaCO₃ removal efficiency in terms recirculation ration (R) with overflow

การศึกษาความเข้มข้นพื้นหลังเหล็ก (Fe*)และความเข้มข้นพื้นหลังความกระด้าง (CaCO₃*)ของระบบ RRFRG

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของ RRFRG ในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO₃) (Removal Fe & CaCO₃ Efficiency) โดยนำค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (R) เท่ากับ 1 และ 3 ความเข้มข้นเหล็กเข้า (Fe_{in}) และ ความเข้มข้นความกระด้างเข้า (CaCO₃_{in}) เท่ากับ 1.5 และ 240 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นเหล็กออก (Fe_{out}) เท่ากับ 0.25 และ 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร และความเข้มข้นความกระด้างออก (CaCO₃_{out}) เท่ากับ 1.4 และ 1 mg/L เพื่อแก้สมการ 2 ตัวแปร ของ



สมการพหุนามโดยใช้สมการที่ (5) สมการที่ (12) สมการที่ (17) และสมการที่ (22) พบว่าค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดของเหล็ก (Fe^*) และความเข้มข้นน้อยที่สุดของความกระด้าง (CaCO_3^*) เท่ากับ 0.071 และ 0.032 มิลลิกรัม/ลิตร (Jirasak, 1985; Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996; Kadlec & Wallace, 2009) (Table 3)

Table 3 The background concentration Fe^* and CaCO_3^* of Groundwater at various recirculation ratios (R) 1 and 3

Models	Models	Models	Models	Models	Models	Models	Models
RRPFR 1 st	RRPFR 2 nd	RRCSTR	RRCSTR	RRPFR	RRPFR 2 nd	RRCSTR 1 st	RRCSTR 2 nd
order of	order of	1 st order	2 nd order of	1 st order of	order of	order of	order of
Fe^*	Fe^*	of Fe^*	Fe^*	CaCO_3^*	CaCO_3^*	CaCO_3^*	CaCO_3^*
R=1 & 3 of	R=1 & 3 of	R=1 & 3 of	R=1 & 3 of	R=1 & 3 of	R=1 & 3 of	R=1 & 3 of	R=1 & 3 of
Eq. (5)	Eq. (12)	Eq. (17)	Eq. (22)	Eq. (5)	Eq. (12)	Eq. (17)	Eq. (22)
0.198	0.146	0.159	0.071	0.999	0.599	0.599	0.032

การศึกษาการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลาย (k) ของค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO_3) ของระบบ RRFRG

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ RRFRG ในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO_3) (Removal Fe & CaCO_3 Efficiency) โดยนำค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 และนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นน้อยที่สุดของเหล็ก (Fe^*) และความเข้มข้นน้อยที่สุดของความกระด้าง (CaCO_3^*) เท่ากับ 0.071 และ 0.032 มิลลิกรัม/ลิตร โดยนำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (RRPFR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (RRCSTR) โดยใช้สมการที่ (6) สมการที่ (13) สมการที่ (18) และสมการที่ (23) พบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายของค่าเหล็ก (Fe) ดังนี้ k_{st1} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRPFR) เท่ากับ 104.57, -306.64 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7948, 0.8579 และ k_{st1} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRCSTR) เท่ากับ 438.19, 3396.80 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8579, 0.9298 และค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายของค่าความกระด้าง (CaCO_3) ดังนี้ k_{st1} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRPFR) เท่ากับ 239.72, -44.74 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7755, 0.8745 และ k_{st1} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRCSTR) เท่ากับ 10736, 11091 1/วัน และ R^2 เท่ากับ 0.8745, 0.9558 (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021c) (Table 4) และ (Figure 5) (Figure 6)

Table 4 Kinetics of 1st order and 2nd order models

Reactor	w	Try	Models	Rate constant, k (day ⁻¹)	R ²
RRFRG	Fe	RRPFR	1 st order , 2 nd order	104.57, -306.64	0.7948, 0.8579
		RRCSTR	1 st order , 2 nd order	438.19, 3396.80	0.8579, 0.9298
	CaCO ₃	RRPFR	1 st order , 2 nd order	239.72, -44.74	0.7755, 0.8745
		RRCSTR	1 st order , 2 nd order	10736, 11091	0.8745, 0.9558

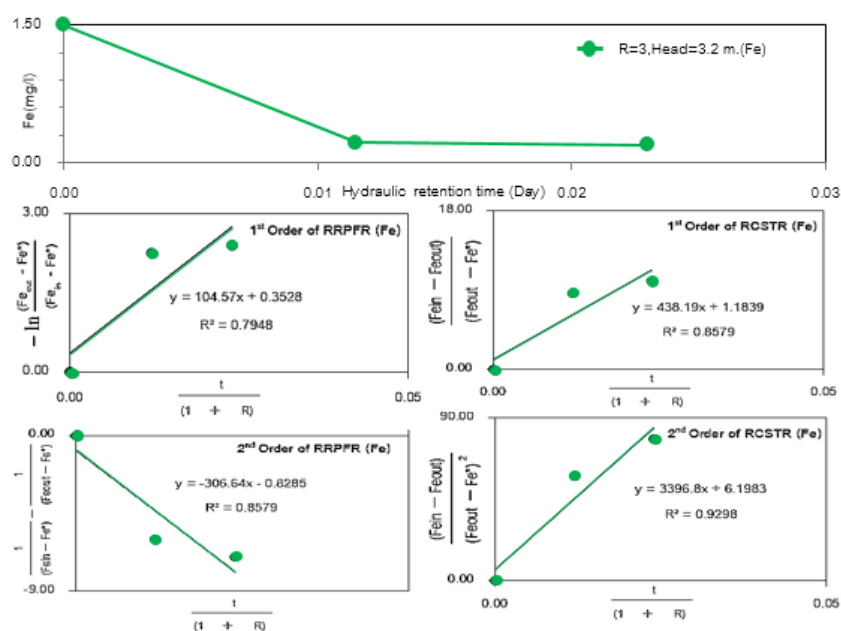


Figure 5 Prediction of kinetic reactions using 1st order and 2nd order models kinetic study of Fe

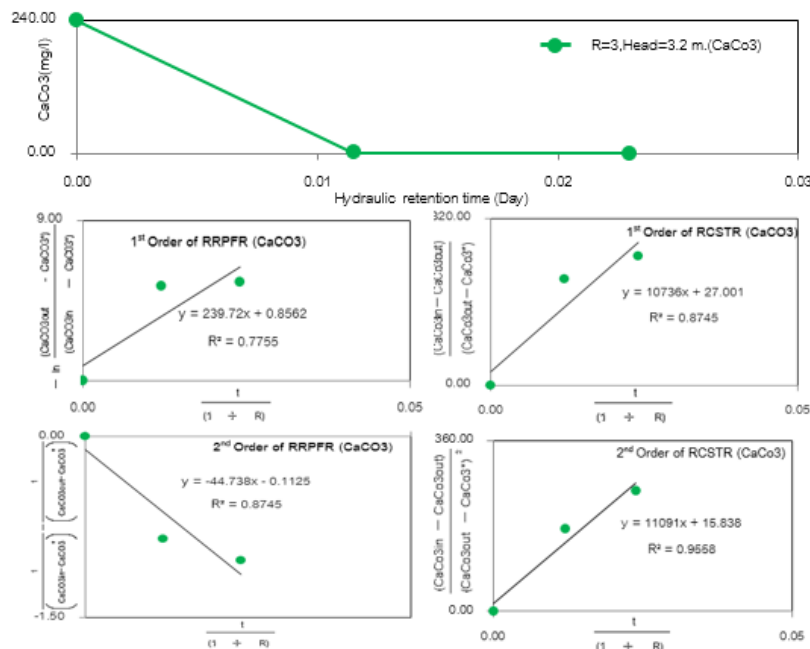


Figure 6 Prediction of kinetic reactions using 1st order and 2nd order models kinetic study of CaCO₃

แบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงพลวัต RRPFR และ RRCSTR ของระบบ RRFRG

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง (CaCO₃) (Removal Fe & CaCO₃ Efficiency) ของ RRFRG มีชุดถังปฏิกรณ์ที่ 1 เป็นแกนกลางในสร้างแรงดันและในการกระจายน้ำและเติมออกซิเจน เชื่อมต่อเข้าสู่ชุดถังปฏิกรณ์ที่ 2 การไหลวนแบบวงแหวนลง (Recirculation Ring Down Flow) มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว (D:L) (<1:4) โดยนำค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 และเวลากักเก็บ (HRT) ที่ 0.05 และ 0.09 วัน ถูกลำมาใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลง (k) เพื่อระบุว่าแบบจำลองใดถูกต้องที่สุด จากน้ำบาดาลที่ผ่านการบำบัดจริงโดยใช้สมการที่ (7) สมการที่ (14) สมการที่ (19) และสมการที่ (24) ของแบบจำลองพลวัต RRPFR และ แบบจำลองพลวัต RRCSTR สำหรับตรวจสอบความแม่นยำ (Figure 7)

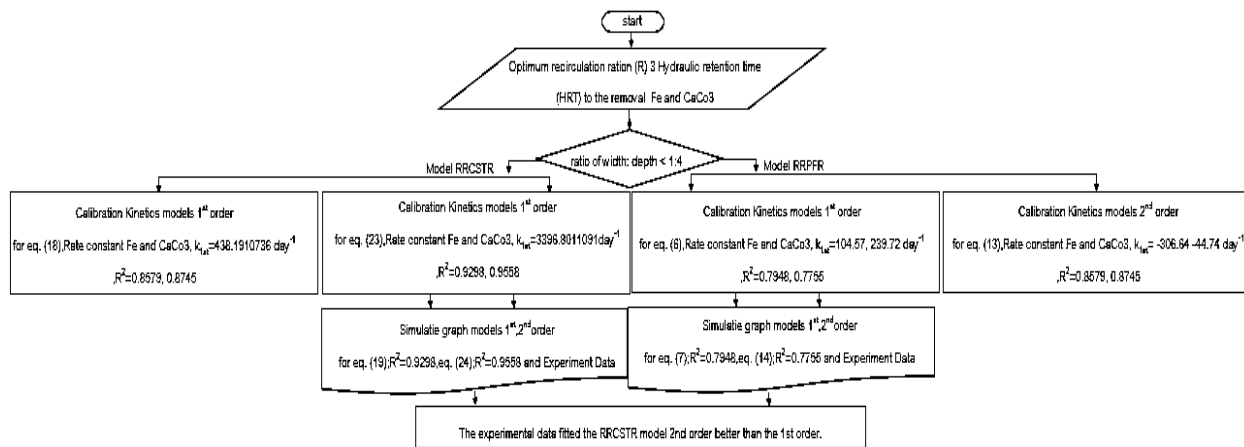


Figure 7 Flow charts of calculation processes using mathematical models

จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Microsoft excel ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต RRCSTR มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายของค่าเหล็ก (Fe) และค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายของค่าความกระด้าง (CaCO_3) k_{2nd} เท่ากับ 3396.80 และ 11091 1/วัน ความแม่นยำในการจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9298 และ 0.9558 (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021c) (Table 4) และ (Figure 8)

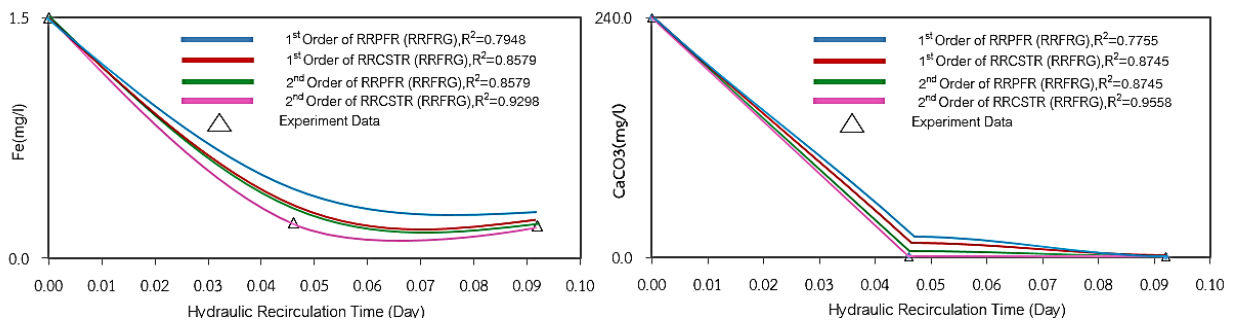


Figure 8 Comparison of RRPFR and RRCSTR models (HRT=0.088 days and R=3)

วิจารณ์ผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กไหลแบบวงแหวนหมุนเวียน (Recirculation Ring Plug-Flow Reactor: RRPFR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมวงแหวนหมุนเวียน (Recirculation Ring

Completely-Mixed Stirred Tank Reactor Models: RRCSTR) ในการหาค่า Fe_{out} คือ ความเข้มข้นของมวลสารของเหล็ก (Fe) ออกในหนึ่งเซลล์ และ $CaCO_{3out}$ คือ ความเข้มข้นของมวลสารของความกระด้าง ($CaCO_3$) ออกในหนึ่งเซลล์ ประกอบตัวตัวแปรหลัก ความเข้มข้นที่น้อยที่สุด (background concentration: C^*) ลิตร (Jirasak, 1985; Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996; Kadlec & Wallace, 2009) ค่าแฟกเตอร์แทนความหนาแน่นของมวลสารในหนึ่งเซลล์ (f), อัตราส่วนการหมุนเวียน (R), ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (k_{1st}), ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของมวลสารปฏิกิริยาอันดับสอง (k_{2nd}) (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021c) และทำการเปลี่ยนเวลาการกักเก็บ (Hydraulic retention time; HRT) เป็นเวลาหมุนเวียน (Hydraulic recirculation time; HReT) แทนเพื่อกำหนดความสะอาดของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงของระบบ RRFRG เพื่อประหยัดพลังงาน สำหรับนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรใช้ในการออกแบบ

สรุปผลการวิจัย

ในการพัฒนาแบบจำลองพลวัต RRPFR และแบบจำลองพลวัต RRCSTR ของระบบเครื่องกรองน้ำบาดาลการไหลวนแบบวงแหวน (RRFRG) มีทิศทางการไหลจากบนลงล่าง (Drown Flow) เข้าสู่ถังปฏิกรณ์เหล็ก (Fe) เป็นแกนกลางในสร้างแรงดันและในการกระจายน้ำและเติมออกซิเจนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตรระดับความสูง 4 เมตร เชื่อมต่อเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เรซินที่ 2 การไหลวนแบบวงแหวนลง (Recirculation Ring Drown Flow) มีความกว้างของชั้นกรองประมาณ 0.15 ม. มีความลึกของชั้นกรอง (h) เท่ากับ 0.50 ม. ของความสูงถังปฏิกรณ์ 1.20 เมตรจำนวน 12 ถัง มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาว ($D:L$) ($<1:4$) พบว่าอัตราน้ำเข้า (Q_{in}) เท่ากับ 1.44 ลูกบาศก์เมตร/วัน กับ อัตราการไหลหมุนเวียน (QR) เท่ากับ 4.32 ลูกบาศก์เมตร/วัน มีอัตราส่วนหมุนเวียน (R) เท่ากับ 3 เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำค่าเหล็ก (Fe) และ ความกระด้าง ($CaCO_3$) (Removal Fe & $CaCO_3$ Efficiency) เท่ากับ 99.867% และ 99.996% สำหรับบริเวณในชุมชนใช้เวลาการกักเก็บ (HRT) ที่ 0.09 วัน มีค่าความเข้มข้นพื้นหลังเหล็ก (Fe^*) และความเข้มข้นพื้นหลังความกระด้าง ($CaCO_3^*$) เท่ากับ 0.071 และ 0.032 มิลลิกรัม/ลิตร เกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายของค่าเหล็ก (Fe) ดังนี้ k_{1st} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRPFR) เท่ากับ 104.57, -306.64 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7948, 0.8579 และ k_{1st} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRCSTR) เท่ากับ 438.19, 3396.80 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8579, 0.9298 และค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายของค่าความกระด้าง ($CaCO_3$) ดังนี้ k_{1st} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRPFR) เท่ากับ 239.72, -44.74 1/วัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7755, 0.8745 และ k_{1st} และ k_{2nd} ของแบบจำลองพลวัต (RRCSTR) เท่ากับ 10736, 11091 1/วัน และ R^2 เท่ากับ 0.8745, 0.9558 จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ความถูกต้องพบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต RRCSTR มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าเหล็ก(Fe) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าความกระด้าง ($CaCO_3$) k_{2nd} RRCSTR เท่ากับ 3396.80 และ 11091 1/วัน ความแม่นยำในการจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9298 และ 0.9558



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักแผนยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

เอกสารอ้างอิง

APHA, AWWA, and WEF, (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.

Barbara, S. and Thomus, R. (2003). *Exploring Earth Sciences*. Water of the World.

Burger, M. Krentz, C. Merce, r. and Gagon, G. (2008). Manganese removal and occurrence of manganese oxidizing bacteria in full-scale biofilters. *Water Supply Res Technol* , 57,351-359.

Department of Medical Sciences. (2019). *Handbook of drinking water standards in Thailand*. Bureau of Quality and Food Safety Department of Medical Sciences Ministry of Public Health. (in Thai)

Jarawae, R. , Namayam, S and E-tea, R. (2017). The Study on Physical Qualities of the Groundwater Filtered by Simple Water Filters. *The Sci J of Phetchaburi Rajabhat University*, 14(1), 1-12. (in Thai)

Jirasak, J. (1985). *Environmental Process*. Khon Kaen University: Khon Kaen. (in Thai)

Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands CRC Press*. Inc: U.S.A.

Kadlec, R. H. and Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. (2nded). Boca Raton: CRC Press.

Metcalf, E. (1991). *Wastewater Engineering*. 3rd ed. New York: McGraw – Hill.

Reynolds, TD. (1982). *Solutions manual for unit operations and processes in environmental engineering*. California: Brooks/Cole Engineering Division.

Suksomboon, R., Junsiri, C., Tangjitjaroenkit, S., Moselhy, M. and Padungthon, P. (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.



- Suksomboon, R. , Junsiri, C. , Kanyakam, S. and Tangjitjaroenkit, S. (2021a). Mathematical Model of Subsurface Recirculation Flow Constructed Wetland Domestic Wastewater Treatment for Household. *Rajabat Chiang Mai Research Journal*, 22, 37-48. (in Thai)
- Suksomboon, R. , Uanwang, C. , Poosumrong L. and Anantasirichai W., (2021b). Mathematical Dynamic Recirculation Plug- Flow Areal Reactor Models of Subsurface Recirculation Flow Constructed Wetland Wastewater Treatment for Floating Agriculture Using in Greenhouse. *Engineering Journal Chiang Mai University Journal*, 28, 37-48. (in Thai)
- Suksomboon, R. , Tangjitjaroenkit, S. and Junsiri, C. 2021c. An Integrated Fluidized Bed Bioreactor (iFBBR) by Mathematical Models. *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research*, 13(3) , 623-636. (in Thai)
- Wichai, S. (2009). *Hydrology*. Khon Kaen University: Khon Kaen. (in Thai)
- Xing, D., Guangyang, L., Fangshu, Q., Kai, L., Senlin, S., Guibai, L. and Heng, L. (2017). Removal of iron, manganese and ammonia from groundwater using a PAC-MBR system. The anti-pollution ability, microbial population and membrane fouling. *Desalination*, 403 , 97-106.