http://journal.rmutp.ac.th/

การดูดซับทางชีวภาพฟอสเฟตด้วยกากมันสำปะหลังดัดแปร

สุดารัตน์ สมบัติศรี[1]* ณัฐวุฒิ สุไชยชิต[1] และ ชัยสิทธิ์ ภะวะ[2]

[1] คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[2] สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[1] 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 11 กรกฎาคม 2561 แก้ไขบทความ 23 กันยายน 2561 ตอบรับบทความ 22 ตุลาคม 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับทางชีวภาพของฟอสเฟตด้วยกากมันสำปะหลังดัดแปร โดยกากมันสำปะหลังถูกดัดแปรด้วยเมทิลเอมีนสำหรับการดูดซับในสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์ โดยยืนยันลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรจากเทคนิค XRD, SEM และ FTIR การทดลองการดูดซับทำในถังปฏิกรณ์แบบกะและศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อการดูดซับ ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้น โดยได้ติดตามปริมาณของฟอสเฟต โดยวิธีวานาโดโมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด สภาวะการทดลองที่ใช้คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม พีเอช 4 เวลา 5 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และได้นำแบบจำลองการดูดซับของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชมาอธิบายไอโซเทอมและค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับพบว่า ข้อมูลการดูดซับที่ได้เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งสามารถคำนวณความสามารถของการดูดซับสูงสุดได้เท่ากับ 5.128 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยการดูดซับดังกล่าวนั้นเกิดผ่านหมู่เอมีนบนตัวดูดซับ และสามารถใช้น้ำชะฟอสเฟตออกจากตัวดูดซับจนถึงสมดุลโดยใช้เวลา 4 วัน

คำสำคัญ : การดูดซับทางชีวภาพ; กากมันสำปะหลังดัดแปร; ฟอสเฟต; ไอโซเทอมการดูดซับ

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร.: +66 4423 3000 ต่อ 4313, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: ssombatsri@hotmail.com*

http://journal.rmutp.ac.th/

Biosorption of Phosphate using Modified Cassava Waste

Sudarat Sombatsri[1]* Nattawut Suchaichit[1] and Chaiyasit Phawa[2]

[1] Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan

[2] Institute of science, Suranaree University of Technology

[1] 744 Suranarai Road, Mueang, Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000

[2] 111 University Avenue, Mueang, Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 11 July 2018; Revised 23 September 2018; Accepted 22 October 2018

Abstract

The biosorption of phosphate using modified cassava waste were studied. Cassava pulp was modified in methylamine for the adsorption of phosphate ion in aqueous solution. XRD, SEM and FTIR result confirmed the surface modification of modified cassava waste. The adsorption experiments were conducted in a batch reactor. The studied parameters included pH, contact time and initial concentrations. The amount of phosphate in the solution was measured by Vanadomolybdophosphoric acid method. Optimum conditions of adsorption were 0.10 g of modified cassava waste, pH 4 and 5 hour of contact time at 25 mg/L of initial phosphate concentration. Kinetic of adsorption were studied by using the pseudo-first and pseudo-second-order models at room temperature. The results indicated that the pseudo-second-order model best described adsorption kinetic data. The Langmuir and Freundlich adsorption models were applied to describe the isotherms and isotherm constants. The adsorption of modified cassava fitted well with the Langmuir model and the maximum adsorption capacity of 5.128 mg/g; and the active site of adsorption was amine functional group. Phosphate released in water reach equilibrium within 4 days.

Keywords : Biosorption; Modified Cassava Waste; Phosphate; Adsorption Isotherm

** Corresponding Author. Tel.: +66 4423 3000 ext.4313, E-mail Address: ssombatsri@hotmail.com*

1. บทนำ

ปัจจุบันน้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่ถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติกำลังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากการขยายตัวของชุมชน และการเพิ่มจำนวนประชากร โดยปัญหามลพิษทางน้ำเกิดจากการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารต่างๆในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน น้ำทิ้งจากการเกษตร น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และการชะล้างจากหลุมฝังกลบ โดยพบว่า ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ และยังจัดเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (Growth Limiting Nutrient) ในแหล่งน้ำโสโครก เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำนี้ โดยเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) และเพื่อเป็นการป้องกันปัญหานี้ จึงกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมขึ้น โดยกำหนดมาตรฐานฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus) ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร [1] ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบฟอสเฟตปนเปื้อนอยู่มีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี [2-7] หรือ การกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ [8-10] อย่างไรก็ตาม การบำบัดด้วยสารเคมีจะเกิดตะกอนที่ต้องนำไปกำจัดเป็นจำนวนมาก ขณะที่การบำบัดทางชีวภาพมีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น จึงมีแนวคิดในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการดูดซับ เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย และสามารถพัฒนานำมาติดตั้งใช้งานในครัวเรือนได้

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีจำนวนมากในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ โดยกากมันสำปะหลังมีโครงสร้างเซลลูโลสประมาณร้อยละ 20-30 [11] ที่มีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สามารถปรับแต่งเพื่อให้มีผลต่อการดูดซับบนพื้นผิวได้ ด้วยคุณสมบัตินี้ ผู้วิจัยจึงจุดมุ่งหมายที่จะนำกากมันสำปะหลังเหลือทิ้งนี้มาดัดแปรในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) สำหรับการดูดซับฟอสเฟต เป็นการลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนของฟอสเฟต และเป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งในชุมชนให้เกิดประโยชน์ โดยการดัดแปรนี้จะช่วยให้เซลลูโลสในกากมันสำปะหลังดูดซับฟอสเฟตได้โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ระยะเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต ไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ รวมทั้งความสามารถในการปลดปล่อยฟอสเฟตในสารละลายเพื่อนำไปประยุกต์ในการผลิตปุ๋ยต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

นำกากมันสำปะหลัง 10 กรัม มาปรับสภาพด้วยกรด-เบส เพื่อทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนและแป้งที่ยังเหลือในกากมันสำปะหลัง และนำมาปั่นกวนใน 16% dichloroethane ที่ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที เมื่อครบกำหนดล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น เพื่อกำจัดสารเคมีและสารอัลคาไลที่มากเกินพอ จากนั้นทำการดัดแปรกากมันด้วย Methylamine ร้อยละ 10 ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที กรองแล้วทำการโปรโตเนตด้วยกรดอะซีติก อบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปบดและและร่อนให้ได้ขนาด 200-300 ไมโครเมตร

2.2 การดูดซับฟอสเฟต

การทดลองแบบกะ (Batch) ทำโดยชั่งตัวดูดซับหนัก 0.1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ปิเปตสารละลายฟอสเฟตความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 ปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นกวน 200 รอบต่อนาที ตามเวลาที่กำหนด นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่ โดยใช้วิธีวานาโดโมลิบโดฟอส-ฟอริกแอซิด (Vanadomolybdophosphoric Acid) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนวานาโดโมลิบโดฟอสเฟต ซึ่งมีสีเหลือง และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง

อัลตราไวโอเลต-วิสเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร (UV-Vis: SHIMADZU; JAPAN; Uv-2450) โดยศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-เบส เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟต นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับตามสมการที่ (1)

$$\%adsorption = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

C_0 คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟต ที่ดูดซับเวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลตามสมการที่ (2)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_e)}{W} V \quad (2)$$

โดยที่

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่สมดุล เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายฟอสเฟต (ลิตร)

W คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม)

2.3 ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

การทำการตรวจสอบลักษณะของกากมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังดัดแปร ด้วยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR: Perkin Elmer; USA; Spectrum 100) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD: Bruker; USA; D2 phaser), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JEOL; JAPAN; JSM-6010LV)

2.4 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge) ของตัวดูดซับ

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่พีเอชต่างๆ (2-12) วัดค่า pHเริ่มต้น จากนั้นนำตัวดูดซับ 25 มิลลิกรัม ใส่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปั่นกวน 200 รอบต่อนาที 24 ชั่วโมง จากนั้น วัด pH หลังการปั่นกวน [12] (pH meter: Sartorius; GERRAMANY; Doeu-pH±11doc) เพื่อนำค่า pH เริ่มต้น กับค่า pH หลังการปั่นกวน ไปสร้างกราฟ

2.5 ตรวจสอบการปล่อยฟอสเฟตของตัวดูดซับ

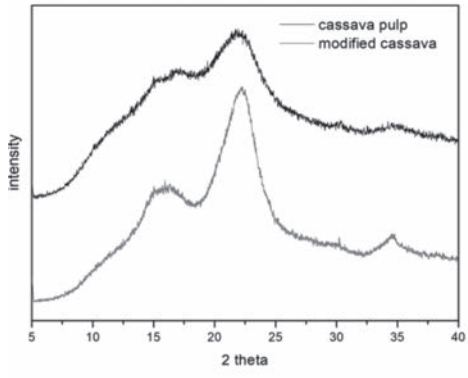
การทดลองการปล่อยหรือการหลุดออกของฟอสเฟตจากตัวดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยชั่งตัวดูดซับที่อิ่มตัวด้วยฟอสเฟต 0.1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ปิเปตน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปั่นกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) แล้วตรวจสอบฟอสเฟตที่หลุดออกมาในน้ำทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

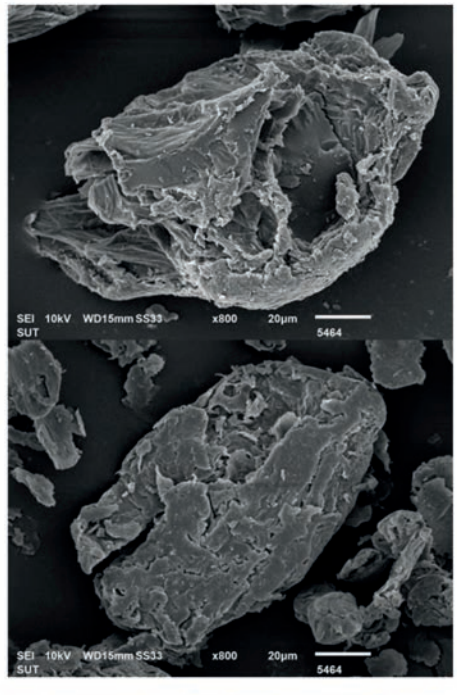
3.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

จากรูปที่ 1 (ก) เป็น XRD Pattern ของกากมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังดัดแปร พบพีกที่ตำแหน่ง 2Θ เท่ากับ 16°, 22° และ 35° ซึ่งแสดงลักษณะของเซลลูโลส 1 เหมือนกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Haafiz และคณะ [13] โดยกากมันสำปะหลังเมื่อทำการปรับสภาพด้วยกรด-เบส ก่อนทำการดัดแปร

พบว่า พีกที่ได้มีความคม (Sharp) ซึ่งแสดงความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าหลังการปรับสภาพด้วยกรด-เบส ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในโครงสร้างเซลลูโลส แต่เป็นการกำจัดแป้ง ลิกนินและสิ่งปนเปื้อนออกจากโครงสร้างเท่านั้น เพื่อให้สามารถนำเซลลูโลสมาดัดแปรหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่เอมีนได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM ที่พื้นผิวของกากมันผ่านการปรับสภาพมีความสะอาดและเรียบมากขึ้น ดังรูปที่ 1 (ข)



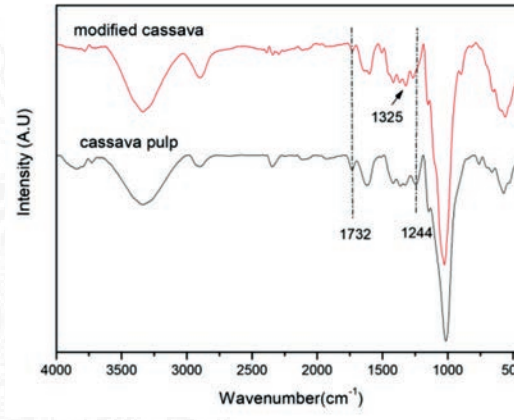
(ก) XRD Pattern ของกากมันสำปะหลังและกากมันดัดแปร



(ข) SEM ของ (1) กากมันสำปะหลัง (2) กากมันดัดแปร

รูปที่ 1 XRD Pattern และ SEM ของตัวดูดซับ

ส่วนผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ โดยใช้ FTIR ในช่วงเลขคลื่น 4,000-400 cm^{-1} ได้สเปกตรัมดังรูปที่ 2 พบว่า ที่เลขคลื่น 3334 cm^{-1} แสดงลักษณะการสั่น O-H Stretching ของ Lignocelluloses ที่เลขคลื่น 2,900 cm^{-1} แสดงลักษณะ C-H Stretching (-CH_2 ของเซลลูโลส) ที่เลขคลื่น 1,737 cm^{-1} และ 1,025 cm^{-1} แสดงลักษณะ -COOH และ C-O Stretching ตามลำดับ เมื่อนำตัวดูดซับไปดัดแปรด้วยเมทิลเอมีนพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงที่เลขคลื่น 1,732 cm^{-1} มีค่า Intensity ลดลง และมีพีกที่ประมาณ 1,325 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ C-N Stretching จากการดัดแปรเกิดขึ้นบนตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Munagapati และ Kim [14]

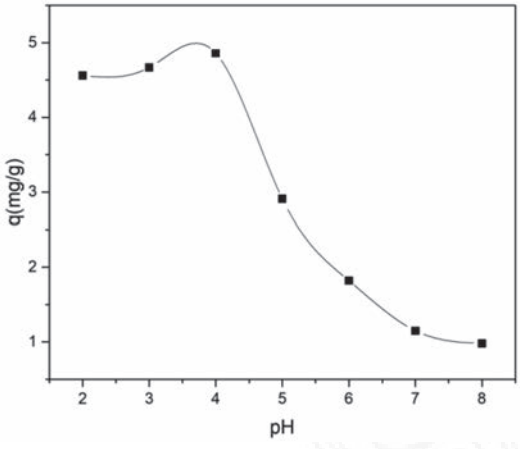


รูปที่ 2 FTIR Spectrum ของตัวดูดซับ

3.2 อิทธิพลของพีเอช

เมื่อเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับจะเกิดเปลี่ยนแปลงด้วย เนื่องจากความเป็นกรดเบสของสารละลายมีอิทธิพลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งสารละลายที่มี pH ต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับเป็นศูนย์ (point of zero charge; pH_{pzc}) ซึ่ง pH_{pzc} กากมันสำปะหลังดัดแปร

มีค่าเท่ากับ 5.45 จะทำให้ผิวของตัวดูดซับแสดงประจุบวก ซึ่งมีตำแหน่งที่ว่องไวในการดูดซับฟอสเฟตมากขึ้น และเกิดการดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ขณะที่สารละลายที่มี pH สูงกว่าค่า pH_{pzc} ของตัวดูดซับจะทำให้ผิวของตัวดูดซับแสดงประจุลบมากขึ้น เกิดแรงผลักกับประจุลบของฟอสเฟต ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับน้อย ดังนั้นจึงเลือกสารละลายฟอสเฟตที่ pH 4 เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองครั้งนี้



รูปที่ 3 อิทธิพลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับ (สภาวะการทดลอง: ตัวดูดซับ 0.1 กรัม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เวลา 5 ชั่วโมง)

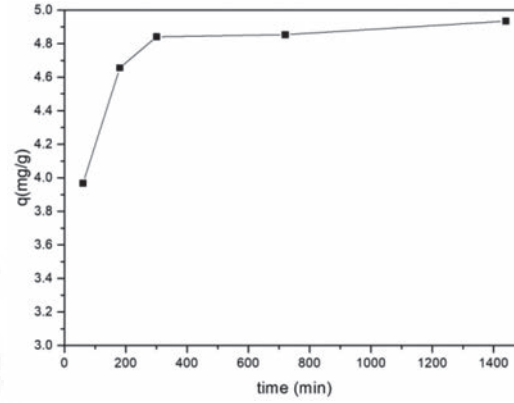
3.3 อิทธิพลของเวลาและจลนศาสตร์การดูดซับ

เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลา 60-1,440 นาที ผลการดูดซับ แสดงในรูปที่ 4

เมื่อทำการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \qquad (3)$$

และแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order)



รูปที่ 4 อิทธิพลของเวลา (สภาวะการทดลอง: ตัวดูดซับ 0.1 กรัม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร pH 4)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \qquad (4)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่ดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

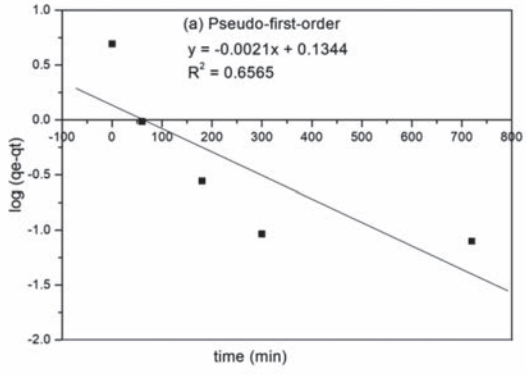
k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) ตามลำดับ

โดยข้อมูลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลามาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง log (q_e - q_t) กับ เวลา (t) ดังรูปที่ 5 (ก) และ t/q_t กับเวลา (t) ดังรูปที่ 5 (ข) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมให้ผลการทดลองสอดคล้องมากกว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า กลไกการดูดซับฟอสเฟตของกากมันสำปะหลังดัดแปรเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรง

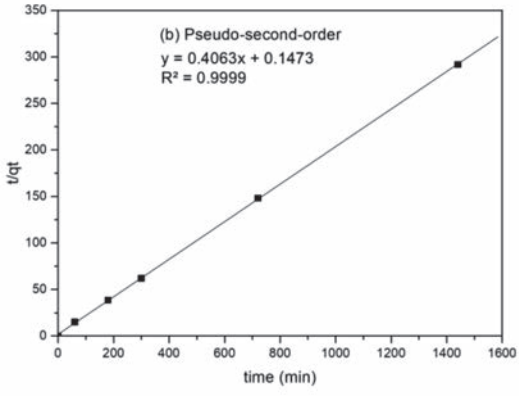
ทางเคมี โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ 0.022 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและอันดับการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
q_e (mg/g)	k_1 (1/min)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg min)	R^2
1.363	0.005	0.656	4.955	0.022	0.999



(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

รูปที่ 5 กราฟแสดงจลนศาสตร์การดูดซับ

3.4 อิทธิพลของความเข้มข้นและไอโซเทอมการดูดซับ

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตั้งแต่ 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำข้อมูลที่ได้ไปศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับ ซึ่งจะพิจารณาความถูกต้องของไอโซเทอมการดูดซับจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด (R^2) โดยแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมใช้คือ แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m}\frac{1}{C_e} \qquad (5)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณสูงสุดที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

และแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n}\log C_e \qquad (6)$$

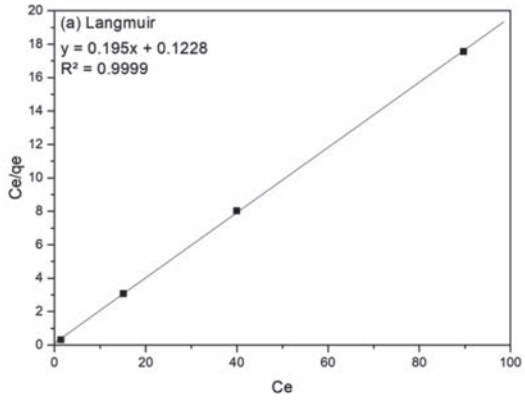
โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

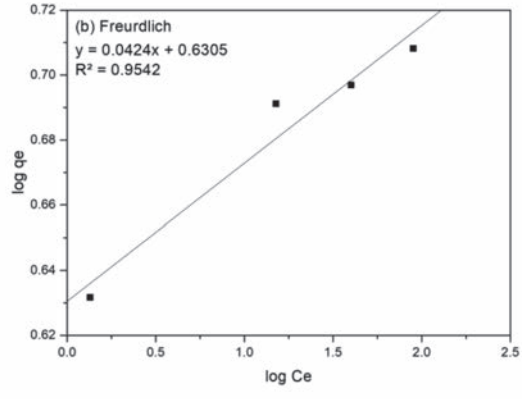
K_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$\frac{1}{n}$ คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ดังรูปที่ 6 (ก) และ log q_e กับ log C_e ดังรูปที่ 6 (ข) พบว่า ข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช โดยแบบจำลองของแลงเมียร์อธิบายได้ว่า สารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนพื้นผิวเท่านั้น (หมายความว่าการดูดซับสามารถเกิดได้มากที่สุดโดยมีความหนาเพียงชั้นเดียว) จากสมการไอโซเทอมการดูดซับสามารถคำนวณหาค่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2



(ก) แลงเมียร์ไอโซเทอม



(ข) ฟรุนดลิชไอโซเทอม

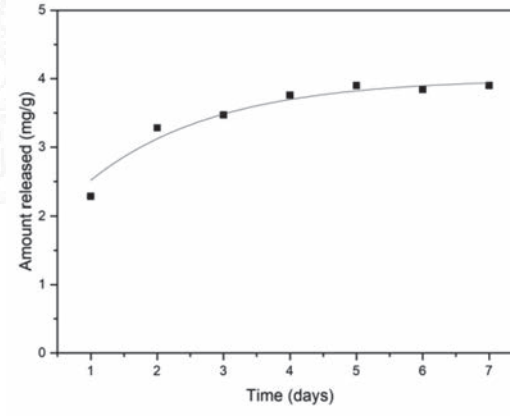
รูปที่ 6 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับ

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ฟอสเฟต	แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์			แบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช		
q_e (mg/g)	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	1/n	K_F (L/mg)	R^2
4.934	5.128	1.588	0.999	0.042	4.271	0.954

3.5 การปล่อยฟอสเฟตของตัวดูดซับ

เมื่อนำตัวดูดซับที่อิ่มตัวไปด้วยฟอสเฟต (4.934 มิลลิกรัมต่อกรัม) มาแช่ในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ปั่นกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน โดยตรวจวัดทุก 24 ชั่วโมง พบว่า ฟอสเฟตถูกปล่อยออกจากตัวดูดซับได้มากที่สุด 3.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ในเวลา 4 วัน ซึ่งการปลดปล่อยฟอสเฟตของตัวดูดซับนี้ อาจเป็นผลมาจากการปั่นกวนที่ช่วยทำให้มีการแทนที่ฟอสเฟตด้วยไอออน OH^- ในน้ำได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้หากเพิ่มอุณหภูมิของ



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสามารถในการปล่อยฟอสเฟตออกจากตัวดูดซับ

น้ำที่ใช้ในการชะฟอสเฟตออกจากตัวดูดซับ สันนิษฐานว่า อาจช่วยให้มีการปลดปล่อยฟอสเฟตออกจากตัวดูดซับได้เพิ่มขึ้นและใช้เวลาลดลงอีกด้วย

4. สรุป

การดูดซับฟอสเฟตในสารละลาย โดยใช้กากมันสำปะหลังดัดแปร ปริมาณ 0.1 กรัม เป็นตัวดูดซับที่ pH 4 เวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้นฟอสเฟต 25 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า กากมันสำปะหลังดัดแปรสามารถดูดซับได้ 4.934 มิลลิกรัมต่อกรัม ของตัวดูดซับ จลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ส่วนไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และสามารถนำฟอสเฟตออกจากตัวดูดซับโดยใช้น้ำ ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์เป็นปุ๋ยในการทดลองถัดไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน งบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ 2561 โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งห้องปฏิบัติการสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับอุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ทำสำหรับทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Notification of Ministry of Science, Technology and Environment no. 3, "Industrial Effluent Standards for Industrial Plants and Industrial Estates," *Royal Government Gazett*, vol. 113, Part 13D, Feb. 1996.

[2] R. Yamamoto-Ikemoto, S. Matsui, T. Komori and E. K. BosqueHamilton, "Control of filamentous bulking and interactions among sulfur oxidation-reduction and iron oxidation-reduction in activated sludge using an iron coagulant," *Water Science* and *Technology*, vol. 38, pp. 9-17, 1998.

[3] D. Donnert and M. Salecker, "Elimination of phosphorus from waste water by crystallization," *Environmental Technology,* vol. 20, pp. 735-742, 1999.

[4] S. H. Huang and B. Chiswell, "Phosphate removal from wastewater using spent alum sludge," *Water Science* and *Technology*, vol. 42, pp. 295-300, 2000.

[5] Q. Wu, P. L. Bishop, T. C. Keener, J. Stallard and L. Stile, "Sludge digestion enhancement and nutrient removal from anaerobic supernatant by $MgOH_2$ application," *Water Science* and *Technology,* vol. 44, pp. 161-166, 2001.

[6] W. G. Yi and K. V. Lo, "Phosphate recovery from greenhouse wastewater," *Journal* of *Environmental Science* and Health*, Part* B*,* vol. 38, pp. 501-509, 2003.

[7] S. Gao, C. Wang and Y. Pei, "Comparison of different phosphate species adsorption by ferric and alum water treatment residuals," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 25, no. 5, pp. 986-992, 2013.

[8] P. Chevalier, D. Proulx, P. Lessard, W. F. Vincent and J. de la Noue, "Nitrogen and phosphorus removal by high latitude mat-forming cyanobacteria for potential use in tertiary wastewater treatment,"

Journal of Applied Phycology, vol. 12, pp. 105-112, 2000.

[9] S. S. Choi and Y. J. Yoo, "Removal of phosphate in a sequencing batch reactor by Staphylococcus auricularis," *Biotechnology Letters,* vol. 22, pp. 1549-1552, 2000.

[10] N. F. Y. Tam and Y. S. Wong, "Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal," *Environmental Pollution*, vol. 107, pp. 145-151, 2000.

[11] U. Rattanachomsri, S. Tanapongpipat, L. Eurwilaichitr and V. Champreda, "Simultaneous non-thermal saccharification of cassava pulp by multi-enzyme activity and ethanol fermentation by Candida tropicalis," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 107, no. 5, pp. 488-493, 2009.

[12] A. O. Jorgetto, R. I. V. Silva, M. J. Saeki, R. C. Barbosa, M. A. U. Martines, S. M. A. Jorge, A.C. P. Silva, J. F. Schneider and G. R. Castro, "Cassava root husks powder as green adsorbent for the removal of Cu(II) from natural river water," *Applied Surface Science*, vol. 288, pp. 356-362, 2014.

[13] M. K. M. Haafiz, A. Hassan, Z. Zakaria and I. M. Inuwz, "Isolation and characterization of cellulose nanowhiskers from oil palm biomass microcrystalline cellulose," *Carbohydrate Polymrt*, vol. 103, pp. 119-125, 2014.

[14] V. S. Munagapati and D. S. Kim, "Adsorption of anionic azo dye congo red from aqueous solution by cationic modified orange peel powder," *Journal of Molecular Liuids*, vol. 220, pp. 540-548, 2016.