ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตของกากกาแฟและถ่านกากกาแฟ

Ammonium and Orthophosphate Adsorption Efficiency of Coffee Ground and Coffee Ground Charcoal

ภัทราพร พนมชัยสว่าง (Phattaraporn Phanomchaisawang)* คณิตา ตังคณานุรักษ์ (KanitaTungkananuruk)[1]**
ดร.นพวรรณ เสมวิมล (Dr.Noppawan Semvimol)*** ดร.ชาลิสา วีสมหมาย (Dr.Chalisa Veesommai)***

(Received: *May 17, 2021*; Revised: *July 13, 2021*; Accepted: *July 13, 2021*)

บทคัดย่อ

ศึกษาประสิทธิภาพของกากกาแฟที่เป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพในการกำจัดแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย การดูดซับของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ กากกาแฟ (CG), ถ่านกากกาแฟ (CGC) และถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 (P-CGC) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ที่สภาวะเหมาะสมของตัวดูดซับแต่ละชนิด พบว่า ที่ pH เท่ากับ 7 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1.0 กรัม CG ดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่ระยะเวลาสัมผัส 1 และ 30 นาที ตามลำดับ ขณะที่ CGC และ P-CGC ดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที โดย CG, CGC และ P-CGC มีค่าร้อยละของการดูดซับแอมโมเนียมเท่ากับ 97.55±0.15, 98.47±0.08 และ 98.32±0.08 ตามลำดับ และออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 95.64±0.07, 95.30±0.05 และ 95.54±0.07 ตามลำดับ ข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด อธิบายได้ว่าสอดคล้องกับ Pseudo-second order model ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึง การนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่มีศักยภาพในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต และสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้

ABSTRACT

The efficiency of coffee ground waste as biosorbent for ammonium and orthophosphate removal in solution was studied. The adsorption study was performed in batch method at different 3 types of adsorbents: Coffee Ground (CG), Coffee Ground Charcoal (CGC), and activated coffee ground charcoal by H_3PO_4 (P-CGC). At the optimum condition of each adsorbent, it was found that pH 7, initial concentration of 20.0 mg/L, adsorbent dose of 1.0 g. CG adsorption for ammonium and orthophosphate at a contact time of 1 and 30 min respectively, While CGC and P-CGC adsorption for ammonium and orthophosphate at a contact time of 60 min. The adsorption percentage of CG, CGC, and P-CGC for ammonium were 97.55±0.15, 98.47±0.08, and 98.32±0.08, respectively and orthophosphate were 95.64±0.07, 95.30±0.05, and 95.54±0.07 respectively. The kinetic experimental data of these 3 adsorbents can be described according to the Pseudo-second order model. The isotherm model which fits the experimental data was the Freundlich model. The results demonstrated the beneficial use of the coffee ground as potential ammonium and orthophosphate bio-adsorbent and could be used as soil amendment material.

คำสำคัญ: แอมโมเนียม ออร์โธฟอสเฟต กากกาแฟ

Keywords: Ammonium, Orthophosphate, Coffee ground

[1]*Corresponding author: kkanita.kt@gmail.com*

**นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

***รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

****อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

บทนำ

กากกาแฟเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเพื่อนำไปบริโภค จากการคาดการณ์การบริโภคกาแฟในประเทศไทยนั้น ประชาชนจะมีการบริโภคกาแฟที่สูงขึ้นในปี 2565 และจะทำให้เกิดกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากกว่า 290,000 ตัน/ปี [1] กากกาแฟเหล่านี้จะถูกทิ้งไปโดยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์และหากไม่ได้รับการกำจัดที่เหมาะสมก็จะกลายเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อโรคได้ [2] ซึ่งกากกาแฟเหลือทิ้งนั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากสามารถนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์ จะเป็นการช่วยลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปหรือจากการชงกาแฟสดได้ ในปัจจุบันได้มีการนำกากกาแฟกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ และเป็นแนวคิดที่จะสามารถลดปริมาณขยะได้ คือ การนำไปผลิตไบโอดีเซล การนำกากกาแฟไปทำเป็นปุ๋ยใส่ต้นไม้และนำไปผสมเพื่อเป็นตัวดูดซับ เป็นต้น เนื่องจากกากกาแฟมีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งยังมีสารคาเฟอีนในกากกาแฟที่มีฤทธิ์เป็นกรด สามารถนำมาบำรุงต้นไม้ ไม้ดอกที่ชอบดินเป็นกรด จากงานวิจัยที่ได้พยายามนำกากกาแฟกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ การนำกากกาแฟมาผลิตเป็นตัวดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะกากกาแฟมีลักษณะเด่นคือ มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไนโตรเจนสูง [3]

งานวิจัยนี้จึงได้นำกากกาแฟมาดูดซับธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของกากกาแฟ 3 แบบ คือ กากกาแฟ ถ่านกากกาแฟและถ่านกากกาแฟที่ถูกกระตุ้นทางเคมี เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนของถ่าน ซึ่งจะทำให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น [4] เพื่อให้สามารถนำกากกาแฟกลับมาใช้ประโยชน์ต่อได้ในรูปของวัสดุปลูกที่อุดมด้วยธาตุอาหารและช่วยลดธาตุอาหารในน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้ำมาก เนื่องจากการประกอบอาชีพหรือการดำรงชีวิตประจำวัน เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม การใช้ปุ๋ยเคมีจากภาคการเกษตร การทำฟาร์มปศุสัตว์และกิจกรรมซักล้างในครัวเรือน เป็นต้น น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมดังกล่าว หากไม่ได้รับการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเตรียมถ่านจากกากกาแฟในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปแบบแอมโมเนียมและธาตุฟอสฟอรัสในรูปแบบออร์โธฟอสเฟตในสภาวะที่เหมาะสมรวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มของการดูดซับธาตุอาหารทั้ง 2 ชนิด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟ

1.1 นำกากกาแฟ (Coffee Ground, CG) มาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปบดให้ละเอียด ร่อนให้ได้ขนาดอนุภาค 0.5-1.0 มิลลิเมตร นำไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (Desiccator)

1.2 นำกากกาแฟที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 มาเผาด้วยเตาไฟฟ้า โดยการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ถ่านกากกาแฟ (Coffee Ground Charcoal, CGC) ทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บในตู้ดูดความชื้น

1.3 นำถ่านกากกาแฟที่เตรียมได้จากข้อ 1.2 มาแช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปรับ pH ด้วยน้ำกลั่น และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ถ่านกากกาแฟที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก (Phosphoric-Coffee Ground Charcoal, P-CGC) ทิ้งให้เย็นและเก็บในตู้ดูดความชื้น

2. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต

นำตัวอย่างกากกาแฟที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย ด้วยการทดลองแบบแบทช์ (batch) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย pH ระยะเวลาสัมผัสและปริมาณตัวดูดซับ

2.1 ความเข้มข้นของสารละลาย

เตรียมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จากแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) โดยละลายสาร NH_4Cl 0.9548 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร

เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) โดยละลายสาร KH_2PO_4 (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) 0.1098 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร

เตรียมสารละลายแอมโมเนียมและฟอสเฟตเข้มข้นเท่ากับ 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 และ 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม 1,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 100.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

2.2 pH

ทำการปรับ pH ของสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 ให้เป็น 5, 7 และ 9 ด้วย 0.1 M HCl หรือ 0.1 M NaOH ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.0 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรองตัวดูดซับออกด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวัดหาค่า pH ที่ได้หลังจากผ่านการดูดซับและวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละของการดูดซับ ดังสมการที่ (1)

$$\% \text{ Adsorption} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_e หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.3 ระยะเวลาสัมผัส

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2.2 โดยทำการทดลองกับสารละลายที่มี pH เท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 2.2 ระยะเวลาสัมผัสที่ทำการศึกษา ได้แก่ 1, 5, 15, 30, 60 และ 120 นาที และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาร้อยละของการดูดซับและปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ดังสมการที่ (2)

$$q = \left(\frac{C_0 - C_e}{m}\right) \times V \quad (2)$$

เมื่อ q หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_e หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลาย ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) m หมายถึง ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) และ V หมายถึง ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

2.4 ปริมาณตัวดูดซับ

การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ CG, CGC และ P-CGC ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2.3 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสที่มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุดที่ได้ในข้อ 2.3 มาทำการทดลองโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัม

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยการใช้แบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order ดังสมการ (3) และ (4) โดยสมการ pseudo-first order เป็นสมการที่อธิบายภายใต้สมมุติฐานของการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ดังนี้

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

เมื่อ k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ลิตรต่อนาที) q_t หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_e หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล และ t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) โดยค่าคงที่อัตราเร็วของ pseudo-first order (k_1) หาได้จากความชันและ $q_{e(cal)}$ หาได้จากจุดตัดของเส้นตรง ตามลำดับ

สมการ pseudo-second order เป็นสมการที่อธิบายภายใต้สมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ ดังนี้

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

เมื่อ k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) q_t หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_e หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม) t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

4. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณตามแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich ตามสมการที่ (5) และ (6) ดังนี้

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

เมื่อ q_e หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e หมายถึง ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) K_L หมายถึง ค่าคงที่ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม) q_m หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log c_e \quad (6)$$

เมื่อ q_e หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) $\frac{1}{n}$ หมายถึง ความเข้มข้นของการดูดซับ K_F หมายถึง ค่าคงที่ Freundlich (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e หมายถึง ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่ภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟ

จากการทบทวนงานวิจัยของ Chaiyan เรื่องการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟ พบว่า การเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C การสูญเสียมวลส่วนใหญ่ ยังไม่สามารถกำจัดไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากวัสดุได้หมด ทำให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพไม่ดี หรือเรียกว่าหัวถ่าน หากเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C พบว่า ปริมาณร้อยละของ

คาร์บอนของถ่านที่ได้สูงขึ้น แต่หากเผาถ่านที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C จะทำให้ได้ถ่านต่ำกว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C มาก ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาถ่าน เพื่อให้ได้ผลผลิตและประสิทธิภาพในการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นถ่านสูงสุดคือ ช่วงอุณหภูมิ 400-600°C ซึ่งควรเผาถ่านให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดการสูญเสียของสารที่สลายตัวเนื่องจากความร้อน และควรควบคุมความสม่ำเสมอของความร้อนและอุณหภูมิของการเผาให้คงที่ จึงจะได้ถ่านที่มีคุณภาพดี [6] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sasikorn ที่ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟ คือ การคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นด้วย H_3PO_4 แช่ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว สอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่า ถ่านกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 มีขนาดและปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.7947 nm และ 0.7517 cm^3/g ตามลำดับ และมีพื้นที่ผิวจากการทดสอบแบบ BET เท่ากับ 1.769 m^2/g ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ NaOH เนื่องจาก H_3PO_4 แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ด้วยตัวเอง จึงเกิดการกัดกร่อนทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น [7] และจากการทบทวนงานวิจัยของ Theeradit พบว่า สารเคมีที่นิยมนำมาใช้กระตุ้น คือ $ZnCl_2$ H_3PO_4 และ KOH เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของสารเคมีแต่ละชนิด พบว่า KOH มีภาวะกัดกร่อนและเป็นสารเคมีอันตราย $ZnCl_2$ สามารถเกิดเป็นสารประกอบกลุ่มซิงค์ที่มีความเสี่ยงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งถ่านที่ได้จากการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ไม่สามารถนำมาใช้กับกลุ่มอุตสาหกรรมยาและอาหารได้ เนื่องจากจะทำให้เกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ส่วน H_3PO_4 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และใช้พลังงานต่ำ [8]

2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตของกากกาแฟ(CG), ถ่านกากกาแฟ (CGC) และถ่านกากกาแฟที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4(P-CGC)

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+) และออร์โธฟอสเฟต (ortho-PO_4^{3-}) มีปัจจัยที่ทำการศึกษา 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลาย pH ของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัสและปริมาณตัวดูดซับ ได้ผลการทดลองดังนี้

2.1 ความเข้มข้นของสารละลาย จากการศึกษาโดยการปรับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นให้เท่ากับ 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 และ 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 1 พบว่า ที่ความเข้มข้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร CG, CGC และ P-CGC มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมได้มากถึงร้อยละ 98.01±0.23, 98.32±0.08 และ 98.16±0.08 ตามลำดับ ขณะที่ CG, CGC และ P-CGC มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตร้อยละ 95.50±0.02, 95.45±0.07 และ 95.64±0.05 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยร้อยละการดูดซับของถ่าน 3 ชนิดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ma ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลายด้วยปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่ผลิตจากฟางข้าว (FCRA) พบว่า ในการดูดซับแบบผสม FCRA มีปริมาณการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดเท่ากับ 65 mg/L และมีปริมาณการดูดซับลดลงตามความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่เพิ่มขึ้น [9]

2.2 pH ของสารละลาย จากการศึกษาโดยการปรับค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นให้เท่ากับ 5, 7 และ 9 ดังภาพที่ 2 พบว่า CG, CGC และ P-CGC มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมได้ดีที่สุดที่ pH 7 เท่ากับร้อยละ 97.85±0.08, 98.63±0.15 และ 98.47±0.17 ตามลำดับ เนื่องจากในสภาวะเป็นกลาง แอมโมเนียมที่อยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ซึ่งสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีสภาพพื้นผิวแสดงอำนาจไฟฟ้าลบได้ดี [10] ขณะที่ CG, CGC และ P-CGC มีประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตดีที่สุดที่ pH 7 เท่ากับร้อยละ 95.54±0.05, 95.40±0.02 และ 95.69±0.02 ตามลำดับ เนื่องจากกากกาแฟสามารถดูดซับได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง เมื่อสารละลายมีความเป็นด่างมากขึ้นส่งผลให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phatthakamon ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ

ออร์โธฟอสเฟตในน้ำของถ่านคาร์บอนจากผักตบชวาในสภาวะที่เหมาะสม พบว่าถ่านคาร์บอนผักตบชวาปริมาณ 0.5 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 87 ที่ pH 7 [11]

2.3 ระยะเวลาสัมผัส จากการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตที่ระยะเวลา 1, 5, 15, 30, 60 และ 120 นาที ดังภาพที่ 3 พบว่า CG มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมดีที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 1 นาที คือ ร้อยละ 99.09±0.27 โดย CGC และ P-CGC สามารถดูดซับได้ดีที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ได้เท่ากับร้อยละ 98.47±0.15 และ 98.32±0.15 ตามลำดับ และ CG สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที เท่ากับร้อยละ 95.88±0.05 ในขณะที่ CGC และ P-CGC สามารถดูดซับได้ดีที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ได้เท่ากับร้อยละ 95.38±0.07 และ 95.62±0.07 ตามลำดับ

2.4 ปริมาณตัวดูดซับ จากการศึกษาปริมาณตัวอย่าง 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัม ที่ใช้ในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย ดังภาพที่ 4 พบว่า ที่ปริมาณตัวดูดซับ 1.0 กรัม มีค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของ CG, CGC และ P-CGC เท่ากับ 97.55±0.15, 98.47±0.08 และ 98.32±0.08 ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 95.64±0.07, 95.30±0.05 และ 95.54±0.07 ตามลำดับ เห็นได้ว่า ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มสูงขึ้นที่ปริมาณ 1.0 กรัมและลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 2.0 กรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่าน 1.0 กรัม อยู่ในสภาวะอิ่มตัวและปริมาณตัวถูกดูดซับถูกจำกัด ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัม ลดลง

3. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของ CG, CGC และ P-CGC ต่อระยะเวลาสัมผัส 1-120 นาที ดังภาพที่ 5 พบว่า ค่าความจุของการดูดซับของ CG, CGC และ P-CGC ที่สภาวะสมดุลการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต 15 นาที โดย CG มีค่าความจุการดูดซับแอมโมเนียมเท่ากับ 1.96 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่า CGC และ P-CGC คือ 1.95 และ 1.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และ CG มีค่าความจุการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 1.91 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่า P-CGC และ CGC คือ 1.90 และ 1.90 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากผลการทดลอง สามารถใช้ศึกษากลไกการดูดซับโดยการใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ 2 แบบ คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สอง (Pseudo-second order) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e-q_t)$ กับ t และ t/q_t กับ t จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น Pseudo-first order และ Pseudo-second order ตามลำดับ ดังภาพที่ 6 และ 7 เมื่อเปรียบเทียบค่า $q_{e,exp}$ ที่ได้จากการทดลองการดูดซับแอมโมเนียมด้วย CG, CGC และ P-CGC ดังตารางที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.007, 0.012 และ 0.007 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กับค่า $q_{e,cal}$ของ Pseudo-first order เท่ากับ 1.979, 1.968 และ 1.965 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และ Pseudo-second order เท่ากับ 1.962, 1.957 และ 1.938 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ พบว่า $q_{e,exp}$ มีค่าใกล้เคียงกับค่า $q_{e,cal}$ ของ Pseudo-second order มากกว่า และลักษณะของกราฟจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ CG, CGC และ P-CGC มีความสอดคล้องกับ Pseudo-second order มากกว่า Pseudo-first order พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี [12] โดยที่ P-CGC มีค่าคงที่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นเร็วกว่า CG และ CGC พิจารณาจากค่า k_2 เท่ากับ 35.735 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที

จากตารางที่ 2 การดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CG, CGC และ P-CGC เมื่อเทียบค่า $q_{e,exp}$ เท่ากับ 0.011, 0.003 และ 0.015 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กับค่า $q_{,ecal}$ ของ Pseudo-first order เท่ากับ 1.916, 1.906 และ 1.912 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และ Pseudo-second order เท่ากับ 1.911, 1.902 และ 1.906 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีความสอดคล้องกับ Pseudo-second order มากกว่า Pseudo-first order และเมื่อพิจารณาค่า R^2 ในแบบจำลอง Pseudo-second order ของ CG, CGC และ P-CGC ที่มีค่าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของ CG, CGC และ P-CGC เป็นแรงทางเคมี [13] โดย CGC เกิดการดูดซับเร็วกว่า CG และ P-CGC พิจารณาจากค่า k_2 เท่ากับ 27.937 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที

4. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตมีค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่า การดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตของ CG, CGC และ P-CGC มีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า โดยสอดคล้องกับสมการ Freundlich มากกว่าสมการ Langmuir พิจารณาได้ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) การดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ไม่มีความสม่ำเสมอ มีรูปแบบของสมการไม่เชิงเส้น โดยมีค่า $\frac{1}{n}$ มากกว่า 1 กล่าวได้ว่า บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะสามารถใช้ในการดูดซับ [14-15]

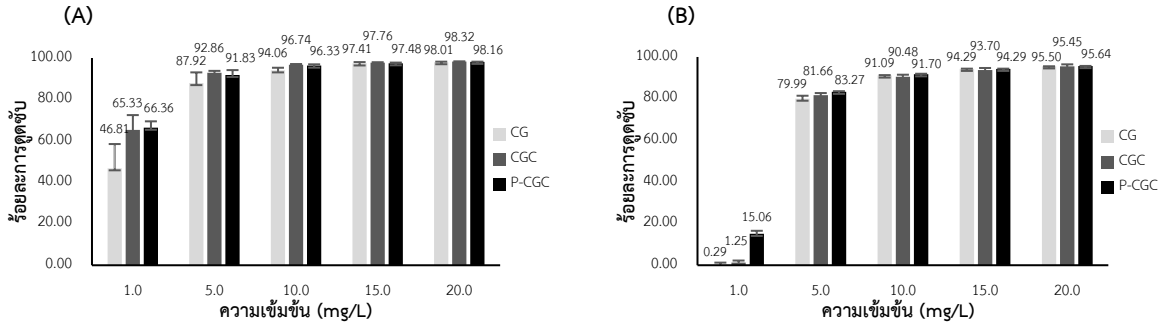
สรุปผลการศึกษา

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับ 3 แบบ พบว่า CG, CGC และ P-CGC มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 โดย CG มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมดีที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 1 นาที ในขณะที่ CGC และ P-CGC สามารถดูดซับแอมโมเนียมได้ดีที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และ CG มีความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ขณะที่ CGC และ P-CGC สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการใช้ดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตคือ 1.0 กรัม โดย CG, CGC และ P-CGC มีความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุลการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต 15 นาที สามารถอธิบายปฏิกิริยาของการดูดซับเป็นไปตามสมการ Pseudo-second order และไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Freundlich จากการศึกษาพบว่า CG, CGC และ P-CGC มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต เพื่อนำไปทำเป็นวัสดุปรับปรุงดินและลดการใช้ปุ๋ยเคมี อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อไป

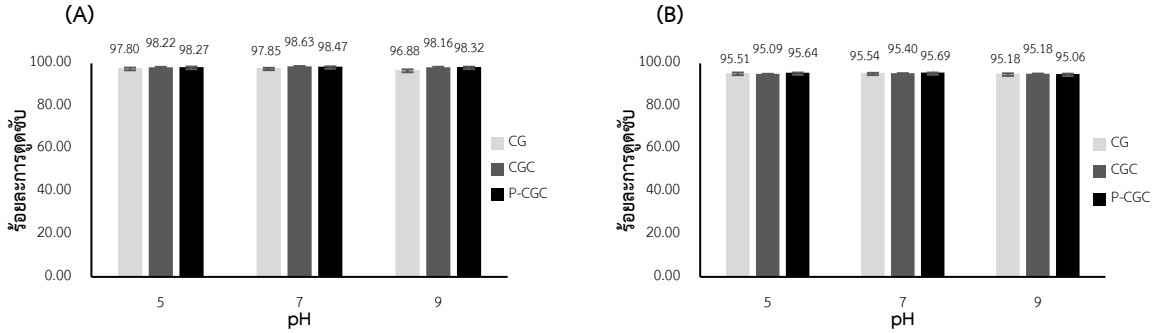
เอกสารอ้างอิง

1. Natthaphong T. Coffee grounds from coffee cups to circular economy concept for biological products. Environmental Journal [internet]. 2019 [cited 2020 Jan 4]; 23: 1-8. Available from: http://www.ej.eric.chula.ac.th/content/6109/66. Thai.
2. Krishna J. Comparative study of heavy metal adsorption from laboratory effluents of eggshell and coffee grounds together with a multi-layer filter system [internet]. 2014 [cited 2019 Dec 17]. Available from: https://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2559/2559240605189.pdf. Thai.

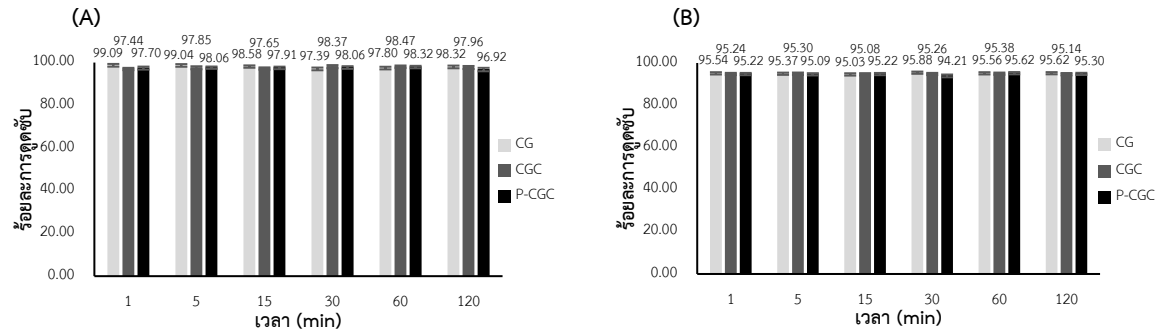
3. Xie Q, Qu S, Zhang Y, Zhao P. Nitrogen-enriched graphene-like carbon architecture with tunable porosity derived from coffee ground as high performance anodes for lithium ion batteries. Applied Surface Science. 2021; 537: 148092 .
4. Theeradit P, Piyathida U. The removal of lead in industrial wastewater by using activated carbon from tamarind wood via H_3PO_4 activation. Journal of Science and Technology. 2017; 25: 191-209. Thai.
5. Saowapa W. Phosphate removal in wastewater by adsorption on calcium carbonate and calcium oxide from eggshell. The Journal of KMUTNB. 2559; 26:475-486. Thai.
6. Chaiyan C, Waraporn T, Pathumthip T. Influence of activating agent on functional group and adsorption efficiency of activated carbon derived from coffee residue [internet]. 2007 [cited 2019 Dec 22]. Available from: https://dspace.rmutk.ac.th/handle/123456789/1492. Thai.
7. Sasikorn S. Adsorption of volatile organic compounds (VOCs) in indoor environment using activated carbon produced from coffee bean residue [dissertation]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2011. Thai.
8. Theeradit P. Activated carbon from agricultural residues by chemical activation for the application of pollutant removal in water. J. Res. Unit Sci. Technol. Environ. Learning. 2017; 8: 196-214. Thai.
9. Ma Z, Li Q, Yue Q, Gao B, Li W, Xu X, et al. Adsorption removal of ammonium and phosphate from water by fertilizer controlled release agent prepared from wheat straw. Chemical Engineering Journal. 2011; 171: 1209-1217.
10. Sopha R. Adsorption of ammonia from domestic wastewater phetchaburi municipal by using rice husk ash and commercial bituminous carbon [dissertation]. Bangkok: Kasetsart University; 2012. Thai.
11. Phatthakamon S. Phosphorus removal in surface water by activated carbon from water hyacinths [internet]. 2018 [cited 2020 Dec 15]. Available from: http://fulltext.rmu.ac.th/fulltext/2561/M126906/Somboot%20Pattakamol.pdf. Thai
12. Hu X, Zhang X, Ngo HH, Guo W, Wen H, Li C, et al. Comparison study on the ammonium adsorption of the biochars derived from different kinds of fruit peel. Science of The Total Environment. 2020; 707: 135544.
13. Kizito S, Luo H, Wu S, Ajmal Z, Lv T, Dong R. Phosphate recovery from liquid fraction of anaerobic digestate using four slow pyrolyzed biochars: Dynamics of adsorption, desorption and regeneration. Journal of Environmental Management. 2017; 201: 260-267.
14. Rawin S, Kowit P. Kinetic and thermodynamic adsorption of methylene blue by modified rice husk. The Journal of KMUTNB. 2011; 21: 337-348. Thai.
15. Jaturun A, Chanchanok S, Panomchai W, Kulyakorn K. Adsorption isotherm of acid dye by activated carbon prepared from spent coffee gounds. Feat Journal. 2017; 2: 115-124. Thai.



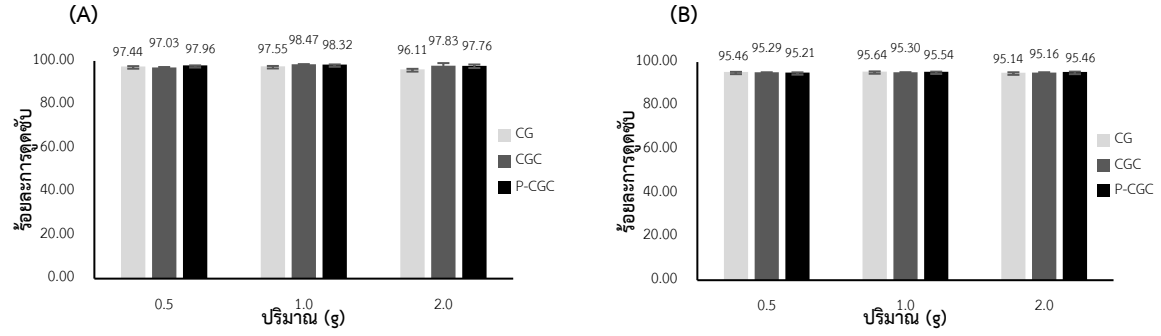
ภาพที่ 1 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียม(A) และออร์โธฟอสเฟต(B) ในสารละลายแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1.0-20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ CG, CGC และ P-CGC



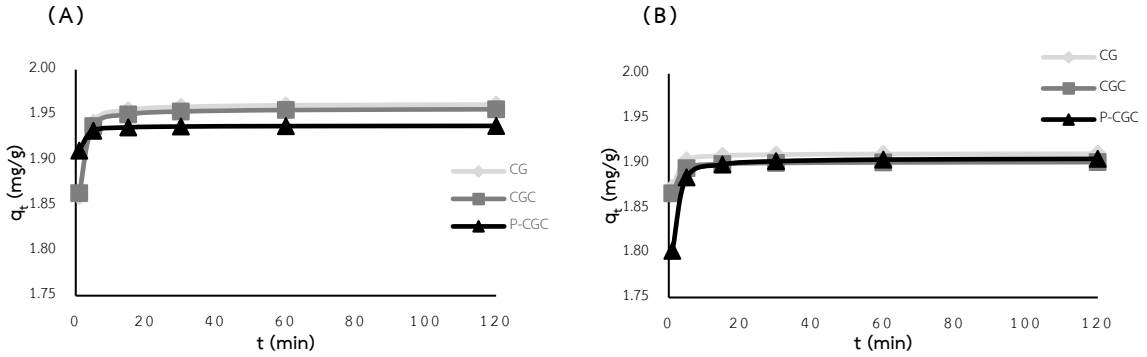
ภาพที่ 2 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียม(A) ออร์โธฟอสเฟต(B) ในสารละลายที่มี pH เท่ากับ 5, 7 และ9 ของ CG, CGC และ P-CGC



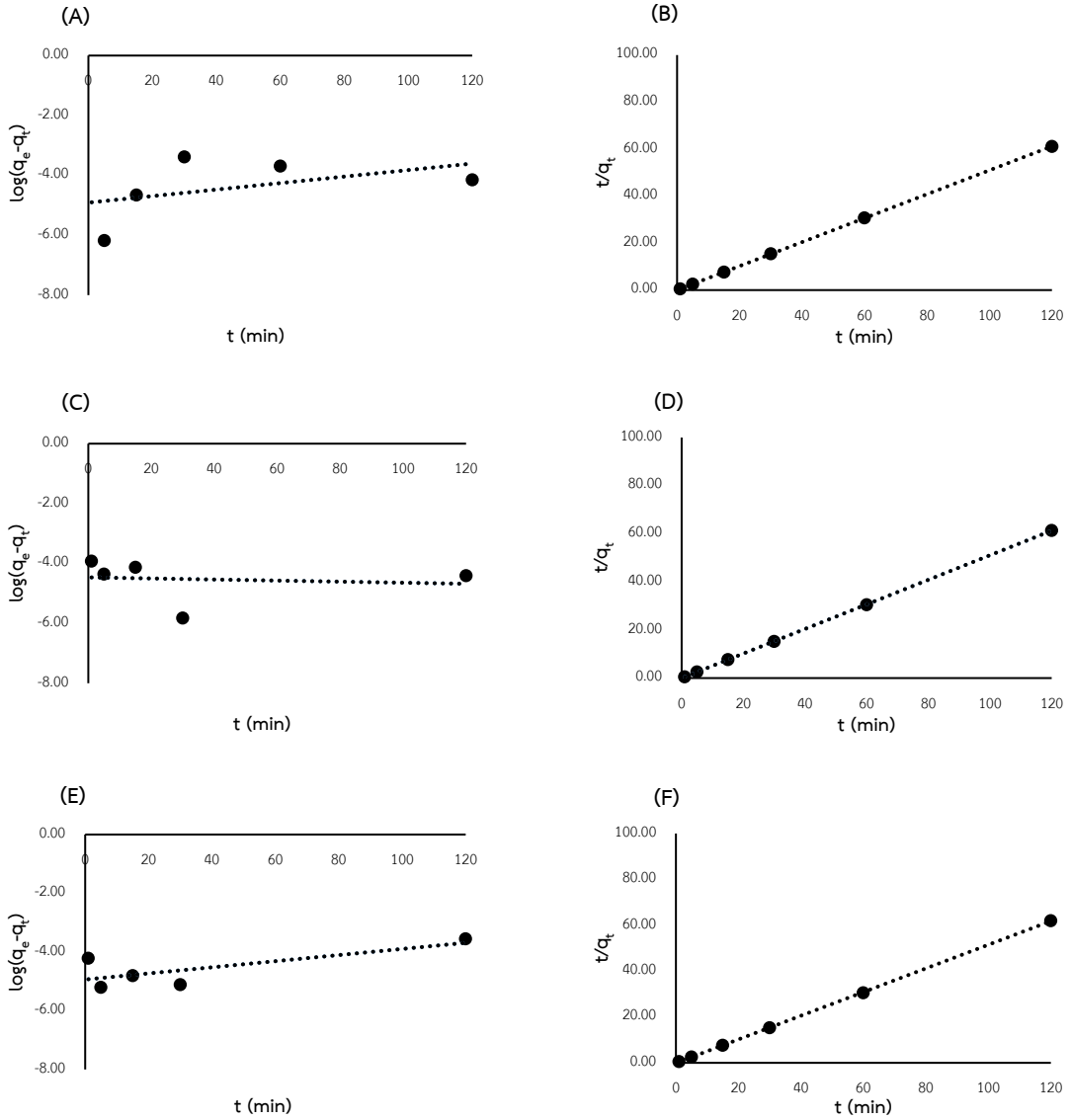
ภาพที่ 3 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียม(A) ออร์โธฟอสเฟต(B) ของ CG, CGC และ P-CGC ที่ระยะเวลาสัมผัส 1-120 นาที



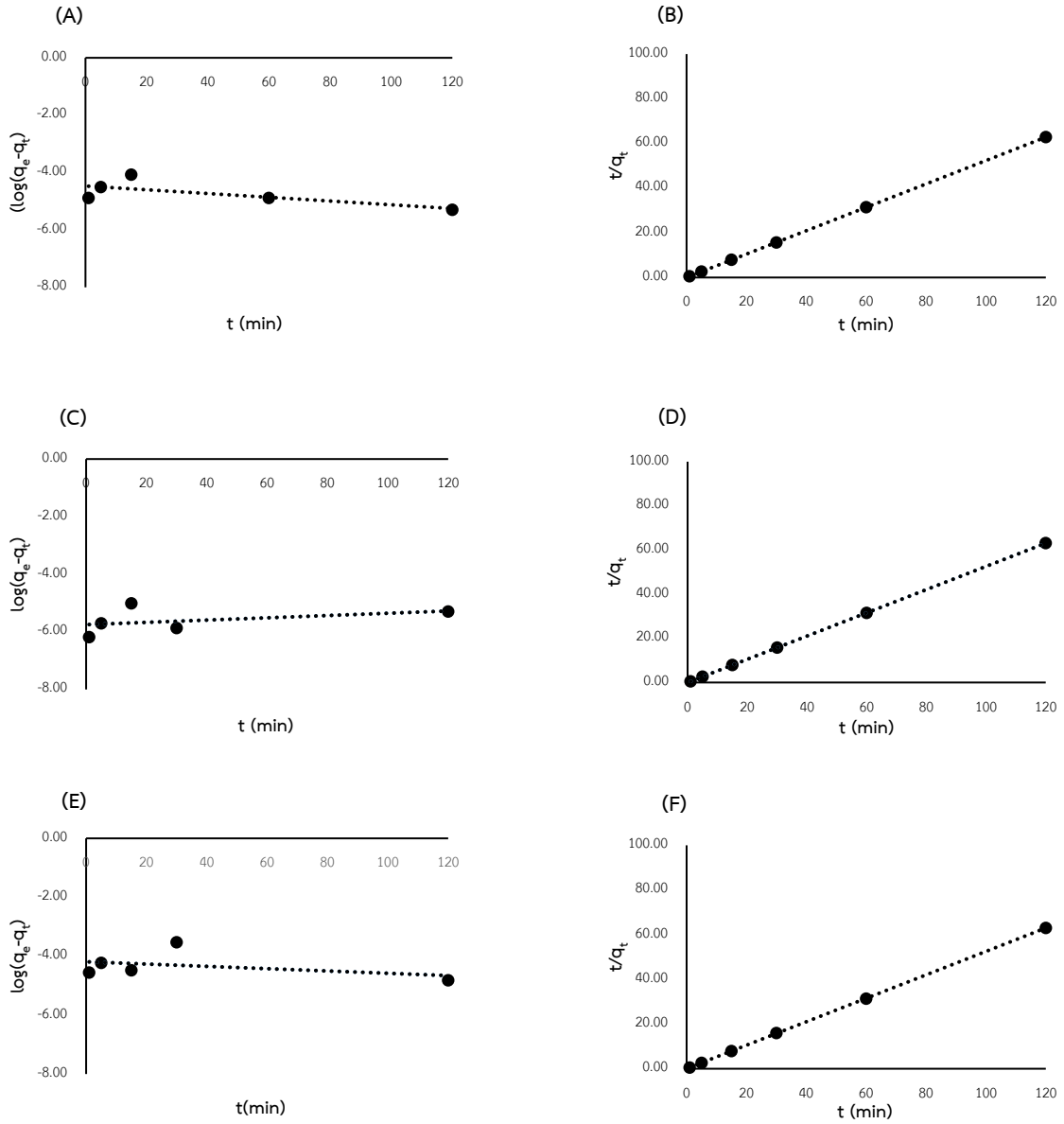
ภาพที่ 4 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียม(A) ออร์โธฟอสเฟต(B) ของ CG, CGC และ P-CGC ปริมาณ 0.5-2.0 กรัม



ภาพที่ 5 ความจุการดูดซับแอมโมเนียม(A) ออร์โธฟอสเฟต(B) ที่ระยะเวลาสัมผัส 1-120 นาที ของ CG, CGC และ P-CGC ในสารละลายแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต ตามลำดับ



ภาพที่ 6 จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมเชิงเส้นตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของ CG(A,B), CGC(C,D) และ P-CGC(E,F) ตามลำดับ



ภาพที่ 7 จลนพลศาสตร์การดูดซับออร์โธฟอสเฟตเชิงเส้นตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของ CG(A,B), CGC(C,D) และ P-CGC(E,F) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของการดูดซับแอมโมเนียมในสารละลายด้วย CG, CGC และ P-CGC

ตัวดูดซับ	$q_{e,exp}$ (mg g^{-1})	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
		$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	k_1 (min^{-1})	R^2	$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	k_2 (g $mg^{-1}min^{-1}$)	R^2
CG	0.007	1.979	0.011	0.210	1.962	9.275	1.000
CGC	0.012	1.968	0.002	0.014	1.957	10.160	1.000
P-CGC	0.007	1.965	0.010	0.547	1.938	35.735	0.999

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในสารละลายด้วย CG, CGC และ P-CGC

ตัวดูดซับ	$q_{e,exp}$ (mg g^{-1})	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
		$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	k_1 (min^{-1})	R^2	$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	k_2 (g $mg^{-1}min^{-1}$)	R^2
CG	0.011	1.916	0.007	0.511	1.911	25.593	1.000
CGC	0.003	1.906	0004	0.175	1.902	27.937	1.000
P-CGC	0.015	1.912	0.004	0.154	1.906	9.116	1.000

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแอมโมเนียมของ CG, CGC และ P-CGC

ตัวดูดซับ	Langmuir			Freundlich		
	q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)	1/n	R^2
CG	0.520	1.153	0.498	3.973	2.624	0.533
CGC	0.093	3.843	0.701	2.273	8.725	0.745
P-CGC	0.571	0.654	0.044	2.362	8.820	0.844

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของ CG, CGC และ P-CGC

ตัวดูดซับ	Langmuir			Freundlich		
	q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)	1/n	R^2
CG	0.324	3.139	0.771	10.403	10.024	0.782
CGC	0.202	4.787	0.296	9.230	22.750	0.456
P-CGC	0.106	7.850	0.432	6.820	26.847	0.542