

การดูดซับและการปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตด้วยฟางข้าวและ แกลบข้าว เพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน

Adsorption and Desorption of Ammonium and Orthophosphate by Rice Straw and Rice Husk for Soil Amendment

ศรัณยพงศ์ กรินทร์ไตรทิพย์ (Saranyapong Karintrithip)* คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ (Kanita Tungkananuruk)^{1**}
ดร.จิตติมารุ่งรัตนอุบล (Dr.Thitima Rungratanaubon)*** ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์ (Dr.Watcharapong Wararam)***

(Received: March 28, 2020; Revised: October 11, 2020; Accepted: October 14, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ฟางข้าว (Rice Straw, RS) แกลบข้าว (Rice Husk, RH) ถ่านฟางข้าว (Rice Straw Biochar, RSB) และ ถ่านแกลบข้าว (Rice Husk Biochar, RHB) ในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย ด้วยการทดลองแบบแบทช์ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณวัสดุดูดซับ โดยสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับชีวภาพทั้ง 4 ชนิดในการดูดซับแอมโมเนียม คือ pH เท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 6 ชั่วโมง และปริมาณวัสดุดูดซับ 7 กรัม/ลิตร ในขณะที่การดูดซับออร์โธฟอสเฟตพบเฉพาะใน RH และ RHB ที่สภาวะเหมาะสมคือ pH เท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 6 ชั่วโมง และปริมาณตัวดูดซับ 7 กรัม/ลิตร สามารถอธิบายการดูดซับได้ด้วยสมการการดูดซับ pseudo second order แสดงว่าการดูดซับส่วนใหญ่เป็นการดูดซับด้วยแรงทางเคมี นอกจากนี้ยังพบว่าแอมโมเนียมและฟอสเฟตสามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึง RS RH RSB และ RHB ที่ผ่านการดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินที่มีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อลดการใช้ปุ๋ยเคมี

ABSTRACT

This research investigates the feasibility of using rice straw (RS), rice husk (RH), rice straw biochar (RSB), and rice husk biochar (RHB) for adsorption of ammonium and orthophosphate from aqueous solution. In batch experiment effect of adsorption variables such as pH, contact time and adsorption dosage were investigated. The optimum conditions of 4 types of bio-adsorbent for ammonium adsorption were pH 5, contact time 2H and adsorbent dose 7 g/L. While only RH and RHB adsorbed orthophosphate at pH 5, contact time 6H and adsorbent dose 7 g/L. Pseudo second order model best described the adsorption which agree with the chemisorption as the rate controlling mechanism. Addition, it was found that ammonium and phosphate were desorbed. Therefore, this research showed that RS, RH, RSB and RHB after ammonium or phosphate adsorption could be used as enrichment with N or P nutrient soil amendment in order to reduce using a chemical fertilizer.

คำสำคัญ: การดูดซับ แอมโมเนียม ออร์โธฟอสเฟต

Keywords: Adsorption, Ammonium, Orthophosphate

¹Corresponding author: kkanita.kt@gmail.com

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการผลิตข้าวเพื่อการบริโภคภายในประเทศและเพื่อการส่งออกในปริมาณมาก ส่งผลให้ฟางข้าวและแกลบข้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้กลายเป็นของเหลือทิ้งปริมาณมาก โดยผลผลิตข้าว 1 ตัน จะมีปริมาณฟางข้าวและแกลบข้าว 1.169 และ 0.230 ตันตามลำดับเป็นผลพลอยได้ [1] จากข้อมูลเพาะปลูกปี 2562 ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวที่ 28.16 ล้านตัน [2] แสดงให้เห็นถึงประเทศไทยจะมีฟางข้าวและแกลบข้าวเกิดขึ้นประมาณ 32.91 และ 6.47 ล้านตันต่อปีตามลำดับ ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีหรือนำไปใช้ประโยชน์ที่มากนัก ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ และส่วนที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ทันก่อนฤดูกาลเพาะปลูกใหม่จึงนิยมเผาก่อให้เกิดฝุ่นและควัน ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศนอกจากนี้การเผายังทำให้ดินสูญเสียความชื้น

ฟางข้าวและแกลบข้าวมีองค์ประกอบที่เป็นโพลีแซคคาไรด์คือ เซลลูโลสและลิกนิน และสิ่งที่เป็นสารอนินทรีย์คือ ซิลิกา ปริมาณสูง เมื่อศึกษาคุณลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าฟางข้าวและแกลบเป็นวัสดุที่มีความพรุน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำฟางข้าวและแกลบข้าวมาใช้ประโยชน์โดยนำมาดูดซับธาตุอาหารในโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่มีธาตุอาหารสูงเพื่อช่วยลดธาตุอาหารก่อนที่จะถูกปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะและก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำที่เรียกว่ายูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ฟางข้าวและแกลบข้าวที่ผ่านการดูดซับธาตุอาหารสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินที่มีธาตุอาหารสูงได้ ในงานวิจัยจะมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารในโตรเจน ในรูปแอมโมเนียม และธาตุอาหารฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟตในสารละลายแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตตามลำดับ ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของฟางข้าวและแกลบข้าว และศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เป็นปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดินที่อุดมด้วยธาตุอาหาร ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ลดปริมาณฟางข้าวและแกลบข้าวโดยนำมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่การเกษตร ลดการใช้ปุ๋ยเคมีในการเพาะปลูก และลดมลภาวะทางน้ำที่จะเกิดขึ้นจากน้ำเสียที่มีปริมาณธาตุอาหารมาก

วิธีการศึกษา

1. การเตรียมตัวดูดซับ

ฟางข้าว (Rice Straw, RS) ที่ใช้ในการทดลองได้จากการเก็บรวบรวมจากนาข้าวในจังหวัดลพบุรี และแกลบข้าว (Rice Husk, RH) จากโรงสีในจังหวัดลพบุรี นำฟางข้าวและแกลบข้าวมาล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก หลังจากนั้นนำมาอบแห้งเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดและเก็บรักษาในถุงพลาสติกป้องกันความชื้น เพื่อนำมาใช้ในการทดลองต่อไป

ถ่านฟางข้าว (Rice Straw Biochar, RSB) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากชาวบ้าน ซึ่งเผาด้วยวิธีภูมิปัญญาท้องถิ่น ที่ดัดแปลงมาจากถังน้ำมัน และถ่านแกลบข้าว (Rice Husk Biochar, RHB) เตรียมจากแกลบข้าวที่ผ่านการล้างและอบแห้ง เผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาบดให้ละเอียดและเก็บรักษาในถุงพลาสติกป้องกันความชื้น เพื่อนำมาใช้ในการทดลองต่อไป

2. การเตรียมสารละลาย

สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมเตรียมจาก แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) โดยละลายสาร NH_4Cl น้ํก 0.9548 กรัม ด้วยน้ํกกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

สำหรับการเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ใช้ในการทดลองจะเตรียมจาก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) โดยละลายสาร KH_2PO_4 (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) น้ํก 0.1098 กรัม ด้วยน้ํกกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร จะได้ สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร

3. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับของวัสดุดูดซับ

3.1 pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการการดูดซับดำเนินการ โดยนำสารละลายแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต ฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เจือจางจากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยใช้วัสดุดูดซับต่อปริมาตรสารละลายที่อัตราส่วน 3 กรัม/ลิตร และปรับ pH ของสารละลายแอมโมเนียมและฟอสเฟตก่อนการดูดซับให้เป็น 5 6 7 และ 8 ด้วย 0.1 M HCl หรือ NaOH แล้วจึงนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (33 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงกรองวัสดุดูดซับออกด้วยกระดาษกรอง ขนาด 45 ไมครอน นำสารละลายที่ได้หลังจากผ่านการกรองมาวัดค่า pH ที่ได้หลังจากผ่านการดูดซับ และวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียมและฟอสเฟตที่เหลือด้วยวิธีเทียบสี (Colorimetric Method) โดยแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการที่ (1)

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

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร) และ C_e คือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหลังจากเข้าสู่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

3.2 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 3.1 โดยเลือกใช้ pH ที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุด ระยะเวลาสัมผัสที่ทำการศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต คือ 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง และ 15 นาที ถึง 24 ชั่วโมงตามลำดับ และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (q_e) ดังสมการที่ (2) และนำข้อมูลไปศึกษาจลนพลศาสตร์ต่อไป

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

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร) C_e คือ ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่ภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร) V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร) และ W คือน้ํกหนักแห้งของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

3.3 ปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

การศึกษาหาปริมาณของ RS, RH, RSB และ RHB ที่เหมาะสม ดำเนินการเช่นเดียวกับ 3.1 โดยทำการทดลองที่ pH และเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้ในข้อ 3.2 โดยทดลองกับปริมาณวัสดุดูดซับต่อปริมาตรสารละลายที่อัตราส่วน 1 3 5 และ 7 กรัม/ลิตร

4. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2 มาคำนวณตามแบบจำลองการดูดซับทั้งแบบ pseudo first order และ pseudo second order ตามสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของ pseudo first order (1/นาที่) q_t คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม) q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม) t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

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

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของ pseudo second order (กรัม/มิลลิกรัม·นาที่) q_t คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม) q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม) t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

5. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในช่วง 10 ถึง 160 มิลลิกรัม/ลิตร และทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.1 และ 3.2 นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณตามแบบจำลองของ Freundlich และ Langmuir ตามสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (6)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม) C_e คือ ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร) $\frac{1}{n}$ คือ ความเข้มข้นของการดูดซับ (adsorption intensity) K_f คือ ค่าคงที่ Freundlich (มิลลิกรัม/กรัม) q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัม/กรัม) K_L คือ ค่าคงที่ Langmuir (ลิตร/มิลลิกรัม)

6. การศึกษาการปลดปล่อยแอมโมเนียมและฟอสเฟต

การปลดปล่อยแอมโมเนียม (NH_4^+) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) จาก RS, RH, RSB และ RSB โดยใช้วัสดุดูดซับที่ผ่านการดูดซับในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยนำส่วนที่แห้ง จำนวน 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (33 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 2 3 4 และ 5 วัน และกรองวัสดุดูดซับออก การปลดปล่อยแอมโมเนียมและฟอสเฟตคำนวณด้วยสมการที่ (7)

$$\text{ปริมาณการปลดปล่อย (มิลลิกรัม/กรัม)} = \frac{(C_r \times V)}{W} \quad (7)$$

โดย C_r คือ ความเข้มข้นของ NH_4^+ และ PO_4^{3-} ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร) V คือ ปริมาณของสารละลาย (ลิตร) และ W คือน้ำหนักแห้งของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

ผลการศึกษา

1. ผลการศึกษา pH ต่อการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต

การดูดซับแอมโมเนียมที่ทุก pH ที่ศึกษาพบว่า ทั้งฟางข้าวและแกลบข้าวที่ผ่านการเผาเป็นถ่านชีวภาพ RSB และ RHB ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับมากกว่า ฟางข้าว (RS) และแกลบข้าว (RH) ตามลำดับ โดยที่ pH เท่ากับ 5 RSB และ RHB มีความสามารถในการดูดซับมากกว่า RS และ RH เท่ากับร้อยละ 2.24 และ 6.71 ตามลำดับ เนื่องจากการเผาวัสดุเหลือทิ้งการเกษตรทำให้ได้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น [3]

เมื่อพิจารณาที่ pH ที่เพิ่มมากขึ้นที่ pH 7 และ 8 ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการดูดซับที่ลดน้อยลง ผลสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kizito [4] เป็นผลเนื่องมาจาก pH ที่เพิ่มสูงขึ้น NH_4^+ ส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป NH_3 ซึ่งไม่สามารถดูดซับได้ด้วยตัวดูดซับ [5] แสดงให้เห็นว่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด คือ pH เท่ากับ 5 และตัวดูดซับชนิดถ่านแกลบข้าวมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมมากที่สุด คือ เท่ากับร้อยละ 43.79

การดูดซับออร์โธฟอสเฟตจากภาพที่ 1 ข พบว่าแกลบข้าวและถ่านจากแกลบข้าวมีความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 5 คือร้อยละ 8.1 และ 14.1 ตามลำดับ และลดลงเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อ pH สารละลายอยู่ในช่วง 3 ถึง 7.5 ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ H_2PO_4^- ในขณะที่ pH ของสารละลายอยู่ในช่วง 7.5 ถึง 12.0 ฟอสเฟตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป HPO_4^{2-} เนื่องจาก H_2PO_4^- มีประจุน้อยกว่าจึงส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับ H_2PO_4^- ได้ง่ายกว่าการดูดซับ HPO_4^{2-} [6, 7]

และพบว่าที่ทุก pH ฟางข้าวและถ่านฟางข้าวไม่สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ แต่พบการปลดปล่อยแทน เนื่องจากฟางข้าวมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้พื้นผิวมีสภาพประจุเป็นลบ จากการศึกษาของ Novais อธิบายว่าวัสดุดูดซับที่มีลักษณะเป็นประจุลบ จะขัดขวางการดูดซับสารที่มีประจุลบอย่างฟอสเฟต [8]

2. ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต

ผลการดูดซับแอมโมเนียมของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 15 นาทีถึง 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 2(ก-ง) พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 60 นาทีแรกของการดูดซับ จากนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเข้าสู่ภาวะสมดุล ที่ระยะเวลา 120 นาที RS RH RSB และ RHB มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.85 1.01 2.16 และ 2.46 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

ในขณะที่ผลการศึกษาการดูดซับออร์โธฟอสเฟตพบว่า RS และ RSB ยังคงไม่สามารถดูดซับได้แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาสัมผัส การศึกษาของ Yin แสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไปถ่านชีวภาพจะมีพื้นผิวเป็นประจุลบ ทำให้การดูดซับออร์โธฟอสเฟต ซึ่งมีประจุลบเป็นไปได้น้อย [9] และผลการดูดซับออร์โธฟอสเฟตใน RH และ RHB แสดงดังภาพที่ 2 (ข และ ช) พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการดูดซับ และความสามารถใน

การดูดซับเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 6 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.17 และ 0.21 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

3. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo First Order และ Pseudo Second Order ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1 สำหรับการดูดซับแอมโมเนียม และ ตารางที่ 2 สำหรับการดูดซับออร์โธฟอสเฟต จากตารางที่ 1 พบว่าการดูดซับแอมโมเนียมของ RS RH RSB และ RHB เป็นไปตาม Pseudo Second Order พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของ Pseudo Second Order มีค่ามากกว่า R^2 ของ Pseudo First Order และ ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมของสมการ Pseudo Second Order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการ Pseudo First Order แสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และขึ้นกับเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับแบบกึ่งสอง สามารถบอกได้ว่าการดูดซับดังกล่าวเป็นการดูดซับด้วย แรงทางเคมี [10]

จากตารางที่ 2 การดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย RH และ RHB สามารถอธิบายได้ด้วย Pseudo Second Order จากค่า R^2 ที่มีค่ามากกว่า Pseudo First Order และผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า Pseudo First Order แสดงว่าการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของ RH และ RHB เป็นแรงทางเคมี เช่นเดียวกับการศึกษาของ Antunes [11] ซึ่งเป็นแรงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างออร์โธฟอสเฟตและสารกลุ่มฟีนอล (-OH) [12]

4. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3 สำหรับแอมโมเนียม และตารางที่ 4 สำหรับออร์โธฟอสเฟต เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มากกว่า พบว่า การดูดซับแอมโมเนียมของ RS RSB RH และ RHB ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า สมการ Freundlich และในทางเดียวกันการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของ RH และ RHB สอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า Freundlich แสดงว่าพื้นผิวของถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็น homogeneous และกระบวนการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวดูดซับเพียงชั้นเดียว ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีจุดอิ่มตัวที่แน่นอน [13]

5. ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต

ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับพบว่า ปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด จากภาพที่ 3 (ก) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น โดยวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด RS RSB RH และ RHB เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 1 กรัม/ลิตร เป็น 7 กรัม/ลิตร ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมจากร้อยละ 11.2 15.4 24.8 และ 29.7 ตามลำดับ เพิ่มขึ้นเป็น 34.0 43.0 54.0 และ 57.8 ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ [14]

และในทางเดียวกันสำหรับการดูดซับออร์โธฟอสเฟต พบว่า RH และ RHB มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับจาก 1 กรัม/ลิตร เป็น 7 กรัม/ลิตร จากร้อยละ 7.9 และ 12.7 ตามลำดับ เป็นร้อยละ 10.1 และ 15.9 ตามลำดับ ในขณะที่ RS และ RSB พบว่าไม่สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้แม้จะมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและพบการปลดปล่อยฟอสเฟตที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น

6. ผลการศึกษาการปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตจากวัสดุดูดซับ

การศึกษาการปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตเพื่อทราบถึงปริมาณแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการเกษตรต่อไป โดยผลการปลดปล่อย

แอมโมเนียมและออร์โทฟอสเฟตในช่วงเวลาต่าง ๆ จากภาพที่ 4 พบว่าวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีการปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โทฟอสเฟต

ปริมาณแอมโมเนียมที่ปลดปล่อยมาจาก N-RSB และ N-RHB ที่ผ่านการดูดซับเท่ากับ 0.33 และ 0.34 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่ปลดปล่อยมาจาก N-RS และ N-RH ที่ผ่านการดูดซับ คือ 0.26 และ 0.27 มิลลิกรัม/กรัม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการคายซับจะเกิดขึ้นมากในวันแรกและลดลงเรื่อยๆ ในวันถัดไป โดยการปลดปล่อยแอมโมเนียมในสารละลายขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านชีวภาพและสภาพสิ่งแวดล้อม [15, 16] สอดคล้องกับการศึกษาของ Tian ได้ทำการทดลองโดยใช้ถ่านชีวภาพจากไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) และวัสดุรองนอนไก่ (poultry litter) เปรียบเทียบ 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าไม้เนื้อแข็งมีการปลดปล่อยไนโตรเจนเพียงเล็กน้อย ในขณะที่วัสดุรองนอนไก่พบว่าการปลดปล่อยไนโตรเจนมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [17]

จากภาพที่ 4 (ข) พบการปลดปล่อยออร์โทฟอสเฟตในวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 ชนิด ในขณะที่ P-RS และ P-RSB แม้ไม่สามารถดูดซับออร์โทฟอสเฟตได้แต่มีความสามารถในการปลดปล่อยออร์โทฟอสเฟตได้ โดยปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่ปลดปล่อยออกมาจาก P-RS P-RSB P-RH และ P-RHB มีการปลดปล่อยที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยในวันที่ 5 ปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่ปลดปล่อยมาจาก P-RSB และ P-RHB ที่ผ่านการดูดซับมีค่าเท่ากับ 1.82 และ 1.11 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่ปลดปล่อยมาจาก RS และ RH ที่ผ่านการดูดซับที่มีค่าเท่ากับ 0.69 และ 0.52 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การปลดปล่อยออร์โทฟอสเฟตขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านชีวภาพและสภาพสิ่งแวดล้อม [18-20] นอกจากนี้ Luo ได้ทำการศึกษากากถ่านชีวภาพจาก ฟางข้าว (Rice Straw, RS) มูลสุกร (Swine Manure, SM) และการดัดแปลงฟางข้าวและมูลสุกรด้วย $MgCl_2$ (RSM and SMM) พบว่าการปลดปล่อยฟอสเฟตลดลงจาก $SMM > RS > SM > RSM$ เป็นผลมาจากขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กส่งผลให้มีการปลดปล่อยฟอสเฟตที่ลดน้อยลง [21]

สรุปผลการศึกษา

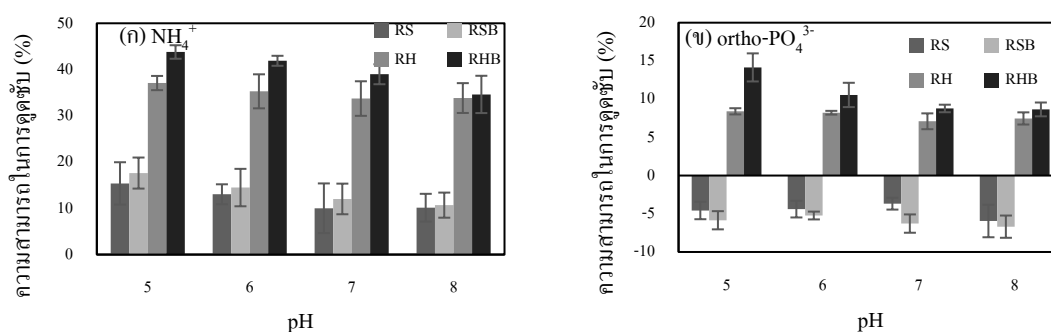
ตัวดูดซับทางชีวภาพทั้ง 4 ชนิดที่เตรียมขึ้น พบว่าวัสดุดูดซับที่ผ่านการเผา ได้แก่ RSB และ RHB มีความสามารถในการดูดซับที่มากกว่า RS และ RH ตามลำดับ โดยมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมได้ดีที่สุดที่ pH เท่ากับ 5 และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง ในขณะที่การดูดซับออร์โทฟอสเฟตพบว่าทุก pH และระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษา RS และ RSB ไม่สามารถดูดซับออร์โทฟอสเฟตได้ แต่อย่างไรก็ตามพบการดูดซับออร์โทฟอสเฟตใน RH และ RHB เป็นผลเนื่องมาจากองค์ประกอบของวัสดุดูดซับที่ต่างกัน โดยสามารถดูดซับได้ดีที่สุดที่ pH เท่ากับ 5 และมีระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 6 ชั่วโมง และสามารถอธิบายการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โทฟอสเฟตได้ด้วย สมการ Pseudo Second Order และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลอง Langmuir และการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวดูดซับจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ และพบว่าวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โทฟอสเฟตได้อย่างช้า จึงมีแนวโน้มที่สามารถนำวัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่มีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ ดังนั้นฟางข้าวและแกลบข้าวสามารถถูกพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินทางเลือกเพื่อลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้



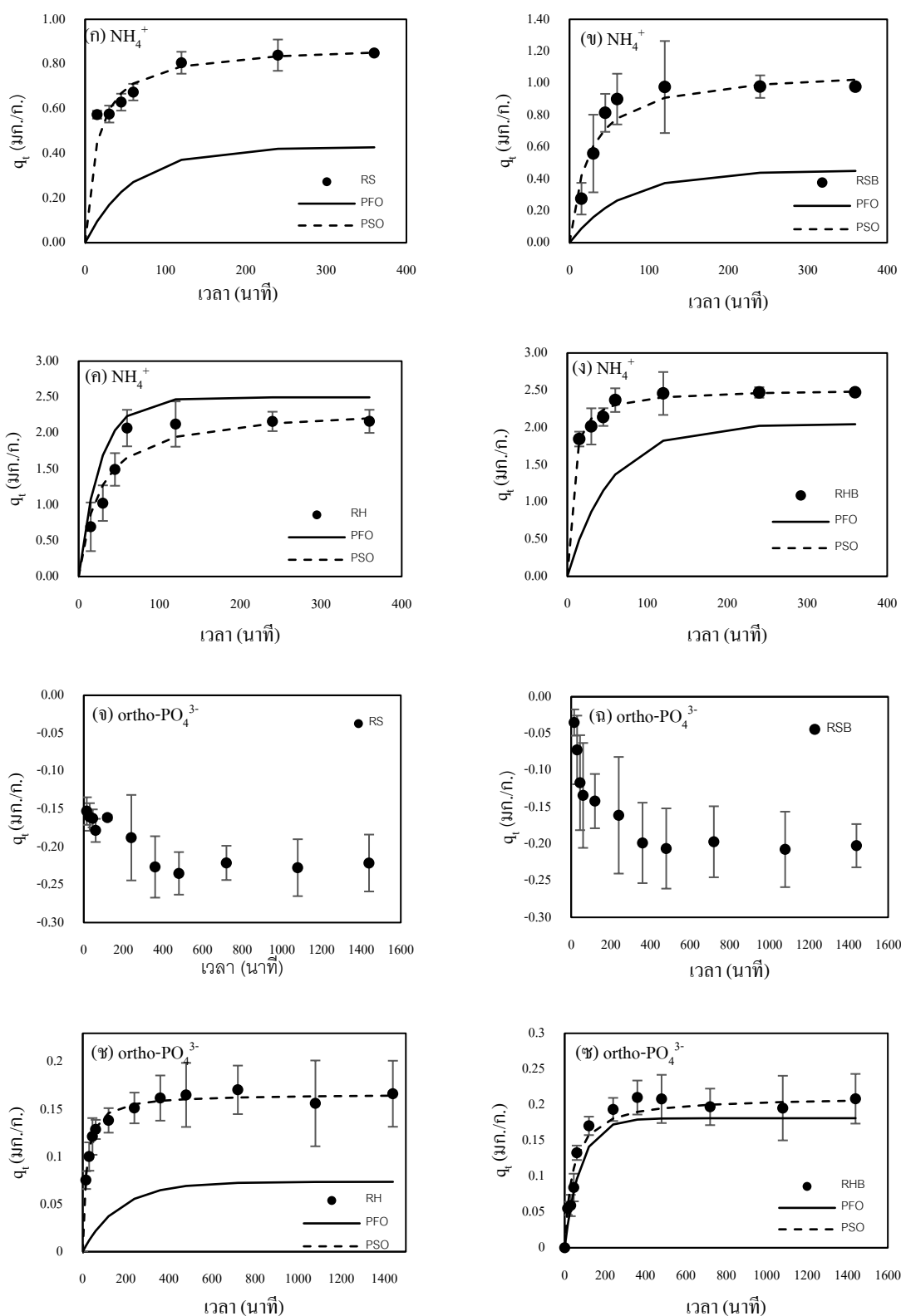
เอกสารอ้างอิง

1. Efficiency DoAEDa. Analysis of biomass ratio and coefficient of biomass [Internet]. 2018 [updated 10 October 2018]. Available from: https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=48362. Thai
2. Association TRE. Rice Production [Internet] 2020 [updated 29 september 2020]. Available from: <http://www.thairiceexporters.or.th/production.htm>. Thai
3. Zheng Y, Han X, Li Y, Yang J, Li N, An N. Effects of Biochar and Straw Application on the Physicochemical and Biological Properties of Paddy Soils in Northeast China. *Scientific Reports*. 2019;9(1):16531.
4. Kizito S, Wu S, Kipkemoi Kirui W, Lei M, Lu Q, Bah H, et al. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry. *Science of The Total Environment*. 2015;505:102-112.
5. Hou J, Huang L, Yang Z, Zhao Y, Deng C, Chen Y, et al. Adsorption of ammonium on biochar prepared from giant reed. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23(19):19107-19115.
6. Li R, Wang JJ, Zhou B, Awasthi MK, Ali A, Zhang Z, et al. Enhancing phosphate adsorption by Mg/Al layered double hydroxide functionalized biochar with different Mg/Al ratios. *Science of The Total Environment*. 2016;559:121-129.
7. Li R, Wang JJ, Zhou B, Awasthi MK, Ali A, Zhang Z, et al. Recovery of phosphate from aqueous solution by magnesium oxide decorated magnetic biochar and its potential as phosphate-based fertilizer substitute. *Bioresource Technology*. 2016;215:209-214.
8. Novais SV, Zenero MDO, Tronto J, Conz RF, Cerri CEP. Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with MgCl₂ for phosphorus adsorption. *Journal of Environmental Management*. 2018;214:36-44.
9. Yin Q, Ren H, Wang R, Zhao Z. Evaluation of nitrate and phosphate adsorption on Al-modified biochar: Influence of Al content. *Science of The Total Environment*. 2018;631-632:895-903.
10. Xu D, Cao J, Li Y, Howard A, Yu K. Effect of pyrolysis temperature on characteristics of biochars derived from different feedstocks: A case study on ammonium adsorption capacity. *Waste Management*. 2019;87:652-660.
11. Antunes E, Jacob MV, Brodie G, Schneider PA. Isotherms, kinetics and mechanism analysis of phosphorus recovery from aqueous solution by calcium-rich biochar produced from biosolids via microwave pyrolysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018;6(1):395-403.
12. Eduah JO, Nartey EK, Abekoe MK, Henriksen SW, Andersen MN. Mechanism of orthophosphate (PO₄-P) adsorption onto different biochars. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;17:100572.
13. 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.
14. Li J, Li B, Huang H, Lv X, Zhao N, Guo G, et al. Removal of phosphate from aqueous solution by dolomite-modified biochar derived from urban dewatered sewage sludge. *Science of The Total Environment*. 2019;687:460-469.

15. Chen L, Chen XL, Zhou CH, Yang HM, Ji SF, Tong DS, et al. Environmental-friendly montmorillonite-biochar composites: Facile production and tunable adsorption-release of ammonium and phosphate. *Journal of Cleaner Production*. 2017;156:648-659.
16. El Sharkawi HM, Tojo S, Chosa T, Malhat FM, Youssef AM. Biochar-ammonium phosphate as an uncoated-slow release fertilizer in sandy soil. *Biomass and Bioenergy*. 2018;117:154-160.
17. Tian J, Miller V, Chiu PC, Maresca JA, Guo M, Imhoff PT. Nutrient release and ammonium sorption by poultry litter and wood biochars in stormwater treatment. *Science of The Total Environment*. 2016;553:596-606.
18. Ibn Ferjani A, Jellali S, Akrou H, Limousy L, Hamdi H, Thevenin N, et al. Nutrient retention and release from raw exhausted grape marc biochars and an amended agricultural soil: Static and dynamic investigation. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;19:100885.
19. Wang Q, Xu L, Guo D, Wang G, Song X, Ma Y. The continuous application of biochar in field: effects on P fraction, P sorption and release. *Chemosphere*. 2021;263:128084.
20. Zhao Y, Zhao L, Mei Y, Li F, Cao X. Release of nutrients and heavy metals from biochar-amended soil under environmentally relevant conditions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(3):2517-2527.
21. Luo L, Wang G, Shi G, Zhang M, Zhang J, He J, et al. The characterization of biochars derived from rice straw and swine manure, and their potential and risk in N and P removal from water. *Journal of Environmental Management*. 2019;245:1-7.



ภาพที่ 1 ผลของ pH ต่อการดูดซับ (ก) แอมโมเนียมและ (ข) ออร์โธฟอสเฟต ของ RS RSB RH และ RHB (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย: 20 มก./ล. ปริมาณวัสดุดูดซับ: 3 ก./ล. และระยะเวลาสัมผัส: 360 นาที)



ภาพที่ 2 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (ก-ง) แอมโมเนียม และ (จ-ซ) ออร์โธฟอสเฟต ของ RS RSB RH และ RHB (ความเข้มข้นเริ่มต้น: 20 มก./ล. และปริมาณวัสดุดูดซับ: 3 ก./ล.)



ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียของ RS RSB RH และ RHB

adsorbent	$q_{e, \text{exp}}$ (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order		
		$q_{e, \text{cal}}$ (มก./ก.)	k_1 (1/นาที)	R^2	$q_{e, \text{cal}}$ (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	R^2
RS	0.85	0.43	0.017	0.991	0.89	0.078	0.999
RSB	1.01	0.45	0.015	0.924	1.10	0.038	0.992
RH	2.16	2.50	0.038	0.867	2.36	0.017	0.992
RHB	2.41	2.05	0.018	0.913	2.52	0.070	0.999

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับออร์โทฟอสเฟตของ RH และ RHB

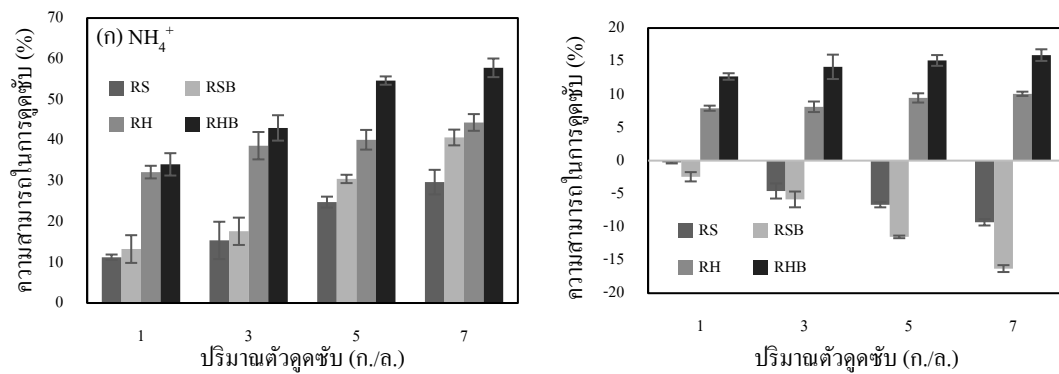
adsorbent	$q_{e, \text{exp}}$ (มก./ก.)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order		
		$q_{e, \text{cal}}$ (มก./ก.)	k_1 (1/นาที)	R^2	$q_{e, \text{cal}}$ (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	R^2
RH	0.17	0.142	0.002	0.968	0.181	0.050	0.998
RHB	0.21	0.168	0.003	0.772	0.234	0.028	0.997

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของไอโซเทอรั่มการดูดซับแอมโมเนียของ RS RSB RH และ RHB

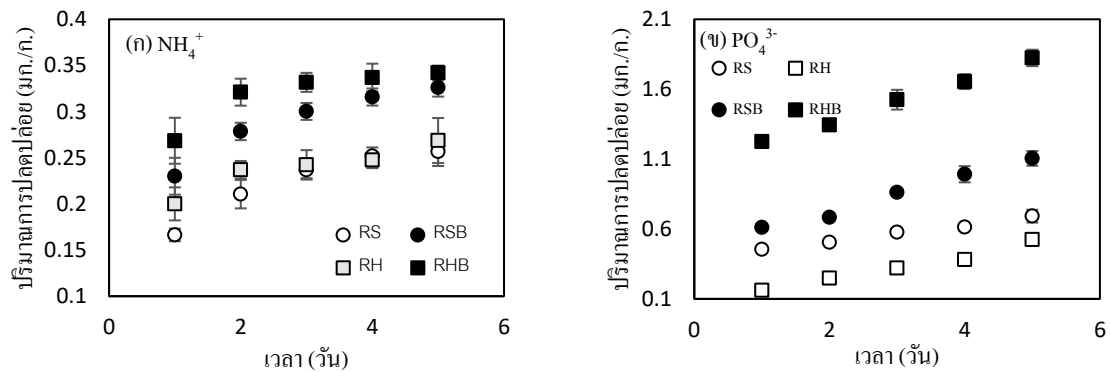
adsorbent	Langmuir			Freundlich		
	q_{max} (มก./ก.)	K_L (ล./มก.)	R^2	K_F (มก./ก.)	n	R^2
RS	1.874	0.049	0.989	0.666	3.464	0.946
RSB	2.389	0.042	0.984	0.686	3.129	0.969
RH	3.059	0.030	0.991	0.030	9.833	0.915
RHB	3.252	0.252	0.999	1.393	12.887	0.915

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอรั่มการดูดซับแอมโมเนียของ RH และ RHB

adsorbent	Langmuir			Freundlich		
	q_{max} (มก./ก.)	K_L (ล./มก.)	R^2	K_F (มก./ก.)	n	R^2
RH	0.671	0.019	0.979	0.236	1.874	0.975
RHB	0.823	0.021	0.973	0.292	2.096	0.971



ภาพที่ 3 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ (ก) แอมโมเนียมและ (ข) ออร์โธฟอสเฟตของ RS RSB RH และ RHB
(ความเข้มข้นเริ่มต้น: 20 mg/L pH เริ่มต้น: 5 และระยะเวลาสัมผัส: 120 นาทีสำหรับ NH₄⁺ และ 360 นาทีสำหรับ Ortho-PO₄³⁻)



ภาพที่ 4 ผลการคายซับ (ก) แอมโมเนียม และ (ข) ฟอสเฟต ของ RS RSB RH และ RHB