



## กระบวนการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสียด้วยวัสดุดูดซับ ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ

### Sulfate Adsorption from Wastewater by Absorbent Containing Calcium Carbonate

ทิตยา บัณฑิต, มธุริน หงษ์ร่อน และ ณัฐฐา แสงนรินทร์ เหมจินดา

Thittaya Bandit, Mathurin Hongron and Nutta Sangnarin Hamjinda

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประเทศไทย

*Environmental Science Department, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Thailand*

Received : 3 January 2023

Revised : 23 March 2023

Accepted : 30 March 2023

#### บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตออกจากน้ำเสีย โดยใช้ด้วยวัสดุดูดซับที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ่านกัมและถ่านลอยจากเตาเผาขยะชุมชน โดยทำการศึกษาทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย ปริมาณของตัวดูดซับ ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ในน้ำเสีย ผลการศึกษา พบว่า วัสดุดูดซับทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าประมาณ 22.45 – 46.19% ความสามารถในการดูดซับซัลเฟตมีค่าประมาณ 111 – 215 มิลลิกรัม/กรัม โดยถ่านลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม/ลิตร ค่าพีเอชของสารละลาย เท่ากับ 3 และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 30 นาที ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับซัลเฟตบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด พบว่า ปูนขาวและถ่านลอยมีรูปแบบที่สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นหรือเป็นการดูดซับทางกายภาพ ส่วนการดูดซับด้วยเปลือกหอยนางรมบดและถ่านกัมมีรูปแบบที่สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแลงเมียร์ บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี

**คำสำคัญ :** การบำบัดน้ำเสีย ; กระบวนการดูดซับ ; ซัลเฟต ; ไอโซเทอมการดูดซับ



### Abstract

The research was focus on adsorption efficiency of sulfate by adsorbent containing calcium carbonate including lime oyster powder fine ash and bottom ash from municipal incinerator. Batch experiment were performed as a function of pH, adsorbent dosage, contact time and initial sulfate concentration. The results revealed that all adsorbent materials had the ability to absorb sulfate. At the concentration of 1,000 mg  $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$ , the adsorption efficiencies were 22.45 – 46.19% , and the sulfate adsorption capacities were 110.71 – 215.06 mg/g. The fly ash had the highest absorption efficiency. The optimum condition was 3 g/L of adsorbent, pH of wastewater was 3, and contact time was 30 minutes. The results of adsorption processes of sulfate on the surface of each type of adsorbent showed that lime and fly ash were better correlated to the Freundlich adsorption isotherm. Which shown that the adsorption was multi-layer adsorption or physisorption. Whereas, oyster powder and bottom ash were well fitted with the Langmuir adsorption isotherm, which indicated that adsorption was monolayer adsorption on a homogenous surface or chemisorption.

**Keywords :** wastewater treatment ; adsorption process ; sulfate ; adsorption isotherm

## บทนำ

ซัลเฟต (Sulfate) หรือ ซัลเฟตไอออน (Sulfate ion,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) เป็นส่วนหนึ่งในการก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำหรือเป็นตัวการก่อให้เกิดน้ำเสีย สามารถพบอยู่ทั่วไปในน้ำธรรมชาติเพราะเป็นแหล่งที่มาจากแร่ธาตุตามธรรมชาติ เพราะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมีในเชิงการค้า เช่น กระบวนการผลิตของเหมืองแร่ ไฟฟ้า สารเคมี แก๊สธรรมชาติ การทำกระดาษ การหมัก และอุตสาหกรรมอื่น ๆ (Mohammadi *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019) โดยเฉพาะกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ผลิตปุ๋ย และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จำนวนมาก ทำให้ต้องมีการบำบัดอากาศก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ระบบบำบัดที่นิยมใช้ คือ ระบบบำบัดอากาศเสียแบบเปียก (Wet Scrubber System) ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ทำปฏิกิริยากับ  $\text{CaCO}_3$  เกิดเป็น  $\text{CaSO}_3$  ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ต่อไปเป็น  $\text{CaSO}_4$  (ยิปซัม) (Lee *et al.*, 2018) ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดจากระบบบำบัดอากาศเสียแบบเปียกมักประกอบด้วยซัลเฟต คลอไรด์ ฟลูออไรด์ โลหะหนัก เป็นต้น จึงมักพบว่าบริเวณพื้นที่ที่ระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าว มีปริมาณซัลเฟตปนเปื้อนในน้ำสูง ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทางนิเวศวิทยาและสุขภาพของมนุษย์ (Hao and Xiang, 2020) เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแร่ธาตุในน้ำ การยับยั้งวัฏจักรซัลเฟอร์ การปลดปล่อยไฮโดรเจนซัลไฟด์สู่อากาศ รวมทั้งการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Xue *et al.*, 2019)

กระบวนการในการบำบัดซัลเฟตขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะนำเทคโนโลยีไปปรับใช้ ต้นทุน และปริมาณความเข้มข้นซัลเฟต ได้แก่ การบำบัดทางด้านเคมีด้วยการตกตะกอน (chemical treatment with mineral precipitation) (Mukweho *et al.*, 2019) เมมเบรน (membrane) (Jia & Wang, 2017; Lee *et al.*, 2018) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) การระเหย (Evaporation) (Shaw, 2008) และการบำบัดทางชีวภาพ (biological sulfate removal) (Yan *et al.*, 2019) นอกจากนี้กระบวนการดูดซับก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดซัลเฟตอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถกำจัดซัลเฟตได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง (Ao *et al.*, 2019) การเลือกวัสดุดูดซับที่เหมาะสมการใช้งานจึงเป็นสิ่งสำคัญ ความสามารถในการดูดซับนอกจากจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะแล้วยังขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) วัสดุดูดซับที่ดีจึงต้องมีปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดที่เหมาะสม ปัจจุบันสารดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกาเจล (Silica gel) เรซิน (Resin) และอะลูมินา (Alumina) เป็นต้น วัสดุดูดซับที่ดีควรมีต้นทุนต่ำ ความสามารถในการดูดซับสูง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับวัสดุดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร หรือกากของเสีย (Waiyasusri, 2016; Ao *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2022; Yazan & Dai, 2022) โดยวัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}_2$ ) มีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งจะพบใน หินปูน ปูนขาว เปลือกไข่ (Waiyasusri, 2016) เปลือกหอย (Su *et al.*, 2022) เปลือกปู (Wu *et al.*, 2022) และเถ้าจากเตาเผาขยะ (Yazan & Dai, 2022)

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวัสดุดูดซับที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ่านหินและถ่านลอย ซึ่งถ่านหินและถ่านลอยนำมาจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal incinerator) โดยศึกษาสมบัติของวัสดุดูดซับและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับซัลเฟต

ซึ่งการนำกากของเสียมาใช้เป็นตัวดูดซับซัลเฟตในน้ำเสียถือเป็นการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุดูดซับ และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งอื่นที่ก็ยังเป็นการช่วยในการจัดการของเสียได้อีกด้วย

## วิธีดำเนินการวิจัย

### การศึกษาลักษณะและสมบัติของตัวดูดซับ

วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ปูนขาว เปลือกหอย ถ้ำหนัก และถ้ำลอย (Figure 1) ซึ่งถ้ำหนัก และถ้ำลอยนำมาจากเตาเผาขยะชุมชน ก่อนการทดลองต้องล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อปรับสภาพลดความเป็นด่างลง ส่วน ปูนขาวและเปลือกหอยนางรมบดสำเร็จรูปชนิดบดผงละเอียดสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้ทันที ทำการศึกษา ลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับ ได้แก่ ขนาดอนุภาค (particle size analyzer รุ่น Mastersizer 3000 ยี่ห้อ Malvern) องค์ประกอบ ของวัสดุดูดซับ (X-Ray Diffraction; XRD รุ่น D8 ADVANCE ยี่ห้อ Bruker) ค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ ค่าการนำ ไฟฟ้า และการปลดปล่อยซัลเฟต

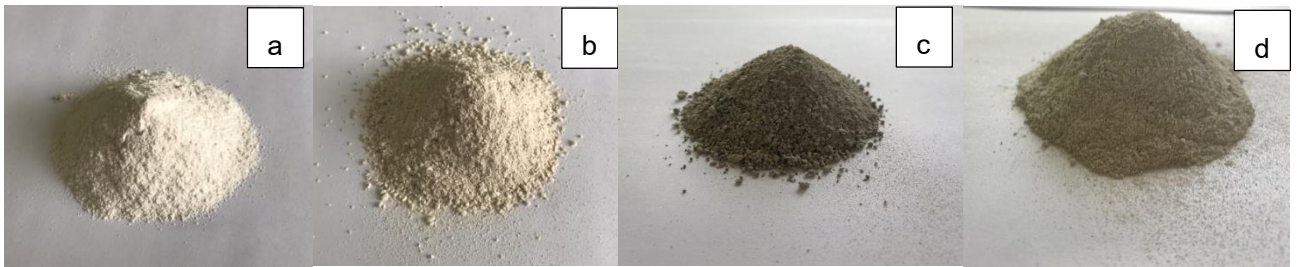


Figure 1 Physical characteristics of lime (a) oyster powder (b) bottom ash (c) fly ash (d)

### การเตรียมสารละลายซัลเฟต

น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมในห้องปฏิบัติการค้ำึงถึงองค์ประกอบของซัลเฟตเป็นหลัก โดยใช้โซเดียมซัลเฟตละลาย น้ำ RO-DI ให้มีความเข้มข้นของซัลเฟตอยู่ในช่วง 1,000 – 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ทำการทดลอง

### การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับซัลเฟต

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียม ได้แก่ ปูนขาว เปลือกหอย ถ้ำหนัก และถ้ำลอยดูดซับซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch adsorption test) ด้วยวิธี Jar test โดย ศึกษาสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้

#### (1) การศึกษาผลของพีเอช

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เติม ปริมาณวัสดุดูดซับ 5 กรัม จากนั้นปรับค่าพีเอช ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้มีค่า 3, 4, 5, 6 และ 7 จากนั้นปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้น ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที เก็บตัวอย่างน้ำ กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตที่เหลือในน้ำ

(2) การศึกษาผลของปริมาณของวัสดุดูดซับ

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เติมวัสดุดูดซับปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม จากนั้นปรับค่าพีเอชให้ชุดการทดลองที่ใช้ ปูนขาว เปลือกหอย ถ้ำหนัก และถ้ำล่อย เท่ากับ 4.0, 3.0, 5.0 และ 5.0 ตามลำดับ จากนั้นปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที เก็บตัวอย่างน้ำ กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตที่เหลือในน้ำ

(3) การศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชให้ชุดการทดลองที่ใช้ ปูนขาว เปลือกหอย ถ้ำหนัก และถ้ำล่อย เท่ากับ 4.0, 3.0, 5.0 และ 5.0 ตามลำดับ และเติมวัสดุดูดซับที่เหมาะสม คือ 2.0 กรัม/ลิตร ยกเว้นถ้ำล่อย 3.0 กรัม/ลิตร จากนั้นปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 125 รอบ/นาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กำหนดระยะเวลาในการกวนด้วยเครื่อง Jar-Test ที่ต่างกัน คือ 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที จากนั้นตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที เก็บตัวอย่างน้ำ กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตที่เหลือในน้ำ

(4) การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตน้ำเสีย

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต 1,000 2,000 3,000 4,000 และ 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชให้ชุดการทดลองที่ใช้ ปูนขาว เปลือกหอย ถ้ำหนัก และถ้ำล่อย เท่ากับ 4.0, 3.0, 5.0 และ 5.0 ตามลำดับ และเติมวัสดุดูดซับที่เหมาะสม คือ 2.0 กรัม/ลิตร ยกเว้นถ้ำล่อย 3.0 กรัม/ลิตร จากนั้นปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 125 รอบ/นาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการกวนด้วยเครื่อง Jar-Test ที่ต่างกัน คือ ปูนขาว เปลือกหอย 60 นาที ถ้ำหนัก 45 นาที และถ้ำล่อย 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที เก็บตัวอย่างน้ำ กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตที่เหลือในน้ำ

นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับ (%adsorption) ซัลเฟต ตามสมการ (1) และความจุการดูดซับซัลเฟตที่สภาวะสมดุลตามสมการ (2)

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

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

โดย  $q_e$  คือ ความจุของการดูดซับซัลเฟตที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของซัลเฟตที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)  $V$  คือ ปริมาตรของสารละลายซัลเฟต (ลิตร) และ  $W$  คือ ปริมาณของวัสดุดูดซับ (กรัม)

### การสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซัลเฟตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับกับความเข้มข้นของซัลเฟตที่สภาวะสมดุล ในการทดลองนี้ใช้แบบจำลองไอโซเทอม 2 แบบ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ได้แก่ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง ดังสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} \left( \frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (3)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

$$R_L = \frac{1}{1+K_L C_0} \quad (5)$$

สมการแลงเมียร์เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  สามารถคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับซัลเฟตสูงสุดของตัวดูดซับ ( $q_m$ ) และค่า  $K_L$  เป็นค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการดูดซับต่ออัตราการคายการดูดซับได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ (5) ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible) ส่วนสมการของฟรุนดลิชจะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  สามารถหาค่าคงที่ของฟรุนดลิช ( $K_F$ ) ซึ่งแสดงปริมาณการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับ และค่า Adsorption Intensity ( $n$ ) ซึ่งแสดงถึงความแรงของการดูดซับ โดยค่า  $n$  และ  $K_F$  สามารถหาได้จากค่าจุดตัดแกน y และ ค่าความชันของกราฟ ตามลำดับ

### การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต

วิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตโดยวิธีการวัดความขุ่น (Turbidimetric method) (AWWA & WEF, 2018) นำน้ำตัวอย่างมา 2.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ RO-DI แล้วใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัพเฟอร์ A ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  30 กรัม  $CH_3COONa \cdot 3H_2O$  5 กรัม และ  $KNO_3$  1 กรัม Conc. Acetic acid 20 มิลลิลิตร ในน้ำ 1 ลิตร) 20 มิลลิลิตร ผสมกันและคนค่อยๆ เติม  $BaCl_2$  1 ซ้อน จับเวลาพอครบ 1 นาทีให้หยุดคนทันที และนำน้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟตที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

### **ผลการวิจัย**

#### ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติของตัวดูดซับ

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบวัสดุดูดซับด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction: XRD) แสดงดัง Figure 2 ปูนขาวบดละเอียด และเปลือกหอยนางรมบดเป็นวัสดุที่ได้มาจากธรรมชาติ ผ่านกระบวนการเผาและบดละเอียด โดยองค์ประกอบของปูนขาวมีความคล้ายคลึงกับผลึกของ calcium carbonate (19.60%), portlandite (0.19%) และ



quartz (0.08%) เปลือกหอยนางรม พบผลึกมีความคล้ายคลึงกับ calcium carbonate (59.86%) รองลงมาคือ quartz (4.48%) และ lime (4.45%) ส่วนเถ้าหนักและเถ้าลอยเป็นของเสียจากกระบวนการเผา (incineration) ขยะชุมชน ซึ่งลักษณะองค์ประกอบของวัสดุขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนของขยะเข้าเตาเผา จากการวิเคราะห์เถ้าหนักพบองค์ประกอบมีความคล้ายคลึงผลึก calcium carbonate (71.50%), Quartz (37.06%) และ calcium hydrogen phosphate hydroxide (14.35%) ส่วนเถ้าลอยองค์ประกอบหลัก คือ calcium carbonate (53.13%) รองลงมาคือ calcium hydrogen phosphate hydroxide (3.52%) และ corundum/ aluminum oxide (3.31%)

Table 1 แสดงลักษณะสมบัติทางกายภาพเคมีบางประการของวัสดุดูดซับ ขนาดอนุภาค ( $D_{50}$ ) ของตัวดูดซับอยู่ระหว่าง 29 – 247 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด 29 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด 1,364 ตารางเมตร/กิโลกรัม เมื่อนำวัสดุดูดซับไปละลายน้ำ พบว่ามีค่า pH เป็นเบสสูง มีค่า pH ระหว่าง 9.83-10.64 นอกจากนี้พบว่าวัสดุดูดซับ 1 กรัม ของปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด เถ้าหนัก และเถ้าลอย สามารถปลดปล่อยซัลเฟตสู่น้ำเสียในระดับความเข้มข้น 6.54, 9.43, 46.25 และ 184.14 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งเถ้าลอยและเถ้าหนักปล่อยซัลเฟตออกมาในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลต่อความเข้มข้นซัลเฟตเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละชุดการทดลอง

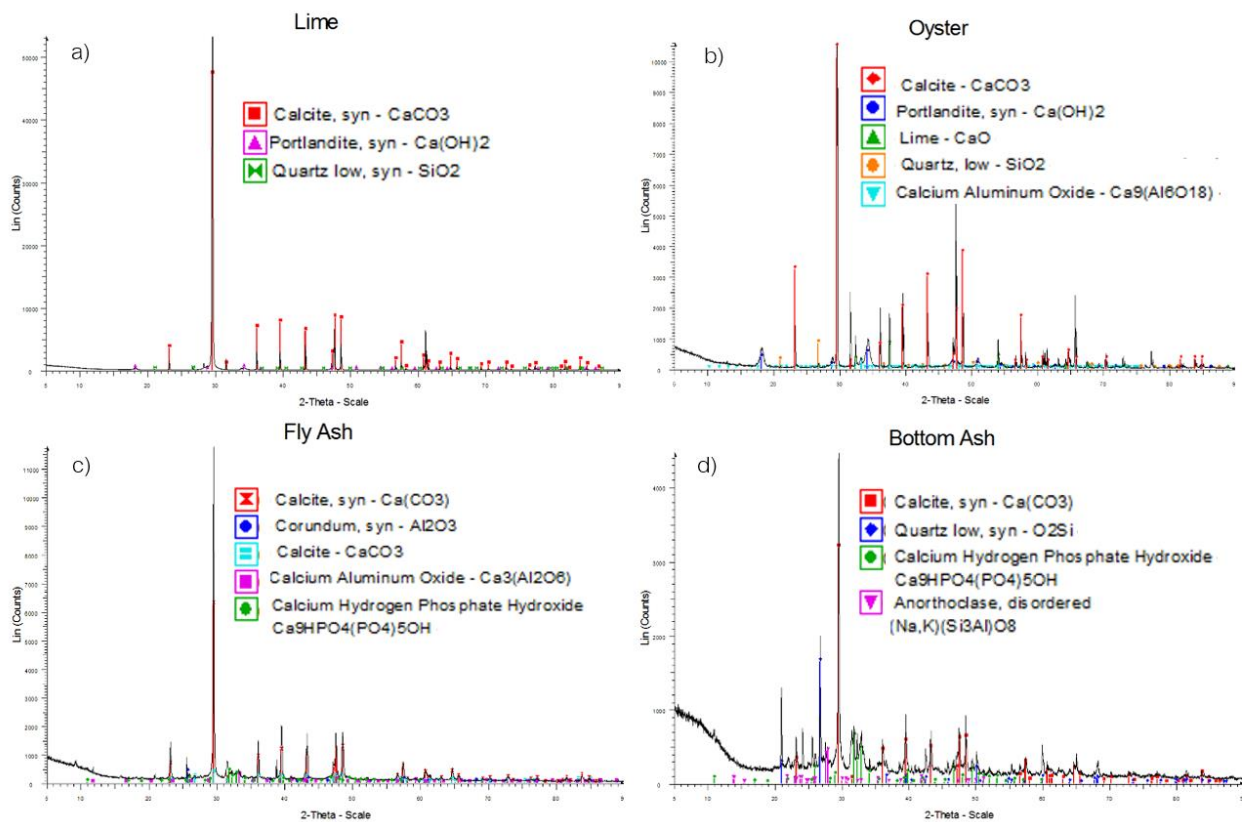


Figure 2 Crystallinity and structure of adsorbents by X-Ray Diffraction spectroscopy

**Table 1** Physicochemical properties of adsorbents

Adsorbent	D <sub>50</sub> (µm)	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /kg)	pH	EC (mS/cm)	Sulfate (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /g-L)
Lime	139	436	10.47	2.45	6.54
Oyster shell	42	1,114	10.64	0.10	9.43
Bottom ash	247	510	9.84	0.66	46.25
Fly ash	29	1,364	9.83	4.14	184.14

ผลของความเป็นกรดต่างที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสีย

การศึกษาผลของความเป็นกรดต่างที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตความเข้มข้น 2,150 ± 138 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้วัสดุดูดซับ 5 กรัม ระยะเวลาสำหรับการทดลอง 60 นาที ผลการทดลองแสดงดัง Figure 3(a) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปูนขาวมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด (24.86%) ที่ pH เท่ากับ 4.0 และประสิทธิภาพในการดูดซับไม่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยพบว่าช่วงค่า pH ที่ 3.0 - 7.0 มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกันระหว่าง 22.59 - 24.86% ที่ใช้เปลือกหอยนางรมพบ ว่า ภาพรวมแนวโน้มประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตลดลงเมื่อค่า pH สูงขึ้นและมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อค่า pH เท่ากับ 7.00 โดยประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตมากที่สุดที่ค่า pH เท่ากับ 3.00 ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟต 20.87% กรณีใช้ถ่านกัมพูชา พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น แต่ลดลงเมื่อค่า pH มากกว่า 5.00 โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ระหว่าง 4.49 – 12.63% ส่วนในกรณีที่ใช้ถ่านลอย พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าอยู่ระหว่าง 21.02 – 25.43% แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5.00 ทั้งชุดการทดลองที่ใช้ถ่านกัมพูชาและถ่านลอยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด คือ 12.63 และ 25.43% ตามลำดับ โดยภาพรวมจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อใช้ปูนขาวและถ่านลอยในการดูดซับซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน และมากกว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อใช้เปลือกหอยนางรมและถ่านกัมพูชาในทุกสภาวะ

ดังนั้นสภาวะความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุดของน้ำเสียที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตดีที่สุดคือ ชุดการทดลองที่ใช้ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ่านกัมพูชา และถ่านลอย เท่ากับ 4.00 3.00 5.00 และ 5.00 มีความสามารถในการดูดซับซัลเฟตสูงสุด เท่ากับ 108.35 83.76 129.60 และ 300.47 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ผลของน้ำหนักของวัสดุดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสีย

การทดลองชุดนี้ทำเพื่อศึกษาผลของน้ำหนักของวัสดุดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตความเข้มข้น 2,232 ± 132 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า pH น้ำเสียของชุดการทดลองดังผลการทดลองข้างต้น โดยใช้ระยะเวลาสำหรับการทดลอง 60 นาที ผลการทดลองแสดงดัง Figure 3(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในชุดการทดลองที่ใช้ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด และถ่านกัมพูชาในการดูดซับซัลเฟตมีแนวโน้มประสิทธิภาพ ในการดูดซับตามน้ำหนักของวัสดุดูดซับ ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 18.37 – 25.38% โดยปริมาณปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด และ ถ่านกัมพูชา ที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตสูงที่สุดเท่ากัน คือ 2 กรัม/ลิตร ส่วนในกรณีที่ใช้ถ่านลอย พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นทุกสภาวะซึ่งอยู่ระหว่าง 25.37 – 43.42% ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุดูดซับจาก 1-3 กรัม/ลิตร โดยชุดการทดลองที่ใช้ถ่านลอย 3 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด คือ 43.42% จากนั้นให้ประสิทธิภาพใน



การดูดซับครั้งที่  $41.42 \pm 1.42\%$  โดยชุดการทดลองที่ใช้ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ้ำหนัก และถ้ำลอลยดูดซับมีค่าความเข้มข้นซัลเฟตที่เหลืออยู่ประมาณ 1,540 1,583 1,671 และ 1,324 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และวัสดุดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับซัลเฟตเท่ากับ 261.73 245.2 247.82 และ 338.74 มิลลิกรัม/กรัม

#### ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสีย

การทดลองชุดนี้เพื่อศึกษาผลของเวลาในการดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสีย โดยกำหนดให้ปัจจัยค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำหนักของวัสดุดูดซับมีค่าตามผลการทดลองขั้นต้น ความเข้มข้นของซัลเฟตน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ  $2,127 \pm 107$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที ได้ผลการวิเคราะห์ดัง Figure 3(c) แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตบนผิววัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาสัมผัสที่มากขึ้น แต่เมื่อถึงจุดที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดแล้วจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยระยะเวลาสัมผัสที่ทำให้ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ้ำหนัก และ ถ้ำลอลย ดูดซับซัลเฟตได้สูงสุดคือ 60, 60, 45 และ 30 นาที ซึ่งในสภาวะดังกล่าว ทำให้ความสามารถในการดูดซับซัลเฟต เท่ากับ 255.64, 217.30, 328.00 และ 313.69 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ถ้ำลอลยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด และใช้เวลาในการดูดซับน้อยเมื่อเทียบกับถ้ำหนัก ปูนขาว และเปลือกหอยนางรมบด ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำลอลยมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

#### ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสีย

การทดลองชุดนี้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ในน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสีย โดยกำหนดให้ปัจจัยค่าความเป็นกรด-ต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำหนักของวัสดุดูดซับ และระยะเวลาที่มีค่าตามผลการทดลองขั้นต้น ผลการทดลองดัง Figure 3(d) วัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตมากที่สุดที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (1,000 มิลลิกรัม/ลิตร) โดยปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ้ำหนัก และถ้ำลอลย ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เท่ากับ 34.73 22.45 33.90 และ 46.19% ตามลำดับ หรือมีความสามารถในการดูดซับซัลเฟตสูงสุด เท่ากับ 194.59 110.71 174.96 และ 215.06 มิลลิกรัม/กรัม โดยพบถ้ำลอลยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด และให้ความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับปูนขาว และประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทั้งหมด

#### ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ผลการทำนายพฤติกรรมดูดซับของซัลเฟตบนผิววัสดุดูดซับแต่ละชนิดในสภาวะที่เหมาะสมที่แสดงใน Table 2 โดยใช้สมการไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์ (Figure 4) และไอโซเทอมของการดูดซับของฟรุนดลิช (Figure 5) โดยค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแสดงดัง Table 2 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับซัลเฟตด้วยปูนขาวและถ้ำลอลยมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของฟรุนดลิชมากกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์ ส่วนการดูดซับด้วยเปลือกหอยนางรมบดและถ้ำหนักมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมของการดูดซับของฟรุนดลิช

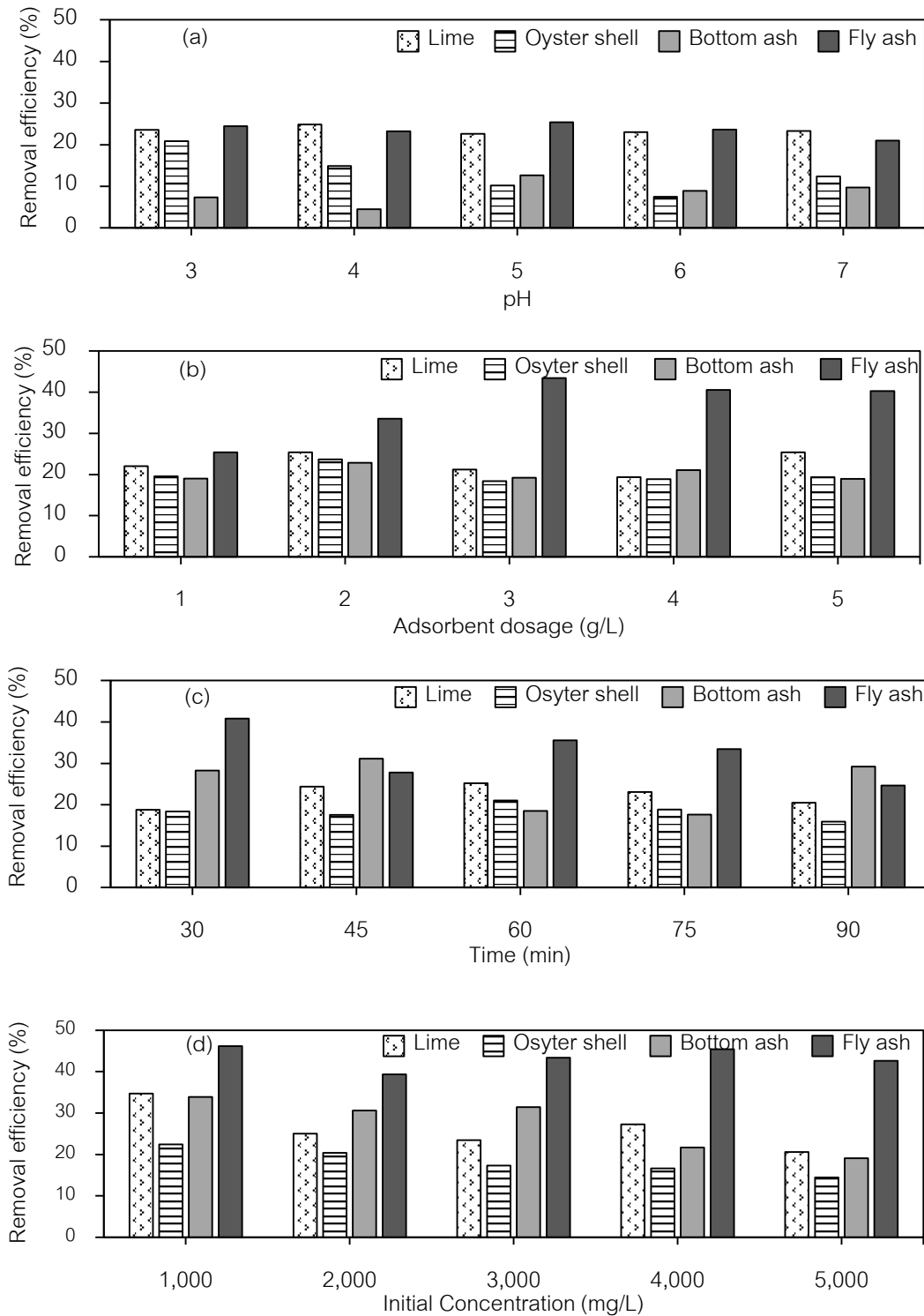
**Table 2** Langmuir and Freundlich isotherm constants for the adsorption of sulfate

Absorbent	Langmuir adsorption isotherm				Freundlich adsorption isotherm		
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$1/R_L$	$R^2$	$1/n$	$K_F$ (L/g)	$R^2$
Lime	909.09	$3.51 \times 10^{-4}$	0.32-0.74	0.9049	0.6851	1.97	0.9157
Oyster powder	769.23	$2.20 \times 10^{-4}$	0.43-0.81	0.9986	0.7089	1.04	0.9900
Bottom ash	909.09	$3.71 \times 10^{-4}$	0.31-0.72	0.9490	0.5791	4.50	0.8691
Fly ash	10000.00	$2.77 \times 10^{-5}$	0.85-0.97	0.9372	0.9807	0.29	0.9639

### วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและแร่ของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด ได้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่คล้ายคลึงกับผลึกของ calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) และ Lime ( $\text{CaO}$ ) มากที่สุด จึงอาจส่งผลให้วัสดุดูดซับทั้งหมดมีกระบวนการดูดซับที่คล้ายคลึงกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim *et al.* (2021) ได้ทำการศึกษารูปแบบของแร่ธาตุจากโรงเตาเผาขยะชุมชนพบว่าส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของ Lime ( $\text{CaO}$ ) และ Phoo-ngernkham & Hanjitsuwan (2016) รายงานว่าเจ้าหน้าที่จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีองค์ประกอบหลัก คือ ธาตุซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบวัสดุดูดซับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ขนาดอนุภาคมีผลต่ออัตราเร็วการดูดซับตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) โดยในการศึกษาครั้งนี้ถ่านลอยมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และพื้นที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือเปลือกหอยนางรมบด ปูนขาว และ ถ่านหิน ตามลำดับ เมื่อนำวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดละลายน้ำพบว่าสภาพเป็นเบสสูง อาจเกิดจากกระบวนการเผาวัสดุดูดซับได้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Villarruel-Moore *et al.*, 2022) เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น และได้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีสภาพเป็นเบส

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของความเป็นกรดต่างของน้ำเสียที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตดีที่สุดที่สุดในชุดการทดลองที่ใช้ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ่านหิน และถ่านลอย เป็นวัสดุดูดซับ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.00 3.00 5.00 และ 5.00 ตามลำดับ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ เท่ากับ 24.86 20.87 12.63 และ 25.43% ตามลำดับ ความเป็นกรดต่างมีผลต่อการดูดซับกล่าวคือเมื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำเสียจะเกิดแรงผลักดันระหว่าง  $\text{H}^+$  ทำให้การดูดซับต่ำลง (Masukume *et al.*, 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sangaroonleard (2015) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่ และเปลือกหอยแครงสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลเรดได้ดีในสารละลายที่มี pH ต่ำ และเมื่อ pH สูงขึ้น ปริมาณดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มที่ลดลง อีกทั้งค่า pH มีผลต่อการดูดซับคือทำให้เกิดสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ กรณีค่า pH ลดลง จะส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) บนพื้นที่ผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) เกิดได้มากขึ้น (Muhamad *et al.*, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง ที่พบว่าเปลือกหอยนางรมบดและถ่านลอยมีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูงจึงมีความเป็นไปได้ว่าบริเวณผิวของเปลือกหอยนางรมบดและถ่านลอยมีโอกาสเกิด  $\text{H}_3\text{O}^+$  และดูดซับ  $\text{SO}_4^{2-}$  สูง



**Figure 3** Effect of pH (a); adsorbent dosage (b); contact time (c); and initial sulfate concentration (d); on treatment of sulfate in synthesis wastewater

ปริมาณปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด และ เถ้าหนัก ที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตสูงที่สุดเท่ากัน คือ 2 กรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ เท่ากับ 18.37 – 25.38% ส่วนในกรณีที่ใช้เถ้าลอย พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นทุกสภาวะเมื่อใช้เถ้าลอย เท่ากับ 3 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุด คือ 43.42% ปริมาณวัสดุดูดซับปริมาณมากขึ้น ทำให้เกิดการอิ่มตัวของ การดูดซับ และไม่สามารถที่จะดูดซับเพิ่มได้ วัสดุดูดซับแต่ละชนิดอาจดูดซับซัลเฟตเข้าไปที่ตัวดูดซับมากเกินไปหากใส่ปริมาณวัสดุดูดซับมากจนปลดปล่อยซัลเฟตออกมา (Moreroa-Monyelo *et al.*, 2022) ด้วยเหตุอาจเป็นเหตุให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง และการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับหรือค่าปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าลดลง

จากผลการทดลองเวลาการดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสมากขึ้นส่งผลกระทบให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตในสารละลายมีค่าลดลง เนื่องจากระยะเวลาเริ่มต้นพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมากทำให้อัตราการดูดซับสูงในช่วงแรก และเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับจึงทำให้อัตราการดูดซับลดลง (Kavitha and Namasivayam, 2007) โดยจากการทดลอง พบว่า ทั้งปูนขาว และ เปลือกหอยนางรมบดมีประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟต 25.2% และ 21.06% ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดของเถ้าหนักและเถ้าลอยคือที่ระยะเวลาสัมผัส 45 และ 30 นาที ตามลำดับ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ 31.16 และ 40.83% ตามลำดับ การที่สารถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมาก เกิดการแพร่ของสารละลายมายังผิวของตัวดูดซับ จากนั้นปริมาณดูดซับจำเพาะในช่วงหลังมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการแพร่ของสารละลายจากผิวของตัวดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับจึงทำให้อัตราการดูดซับลดลง (Ahmadishoar *et al.*, 2017) และเมื่อเวลาในการดูดซับนานขึ้น (มากกว่า 60 นาที) จะเกิดการคายทำให้มี ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอีกครั้ง (Kavitha and Namasivayam, 2007)

วัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตมากที่สุดที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ โดยปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด เถ้าหนัก และเถ้าลอย ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟต เท่ากับ 34.73 22.45 33.90 และ 46.19% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นในขณะที่ปริมาณวัสดุดูดซับคงที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น แต่ปริมาณวัสดุดูดซับเท่าเดิม เป็นการเพิ่มแรงดันให้กับการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายกับความเข้มข้นของซัลเฟตบนผิวของวัสดุดูดซับที่เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตที่ความเข้มข้นสูงต่ำลง (Sukpreabprom *et al.*, 2020; Solgi *et al.*, 2020)

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดัง Table 3 ซึ่งวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับซัลเฟต ในช่วง 22.45 - 46.19% โดยสภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน เถ้าลอยมีศักยภาพในการดูดซับสูงที่สุด (46.19%) ในระยะเวลาที่น้อยที่สุด และค่า pH ที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ สูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ นั้นหมายถึงการใช้สารเคมีเพื่อปรับ pH น้อยที่สุด ถึงแม้ว่าต้องใช้ปริมาณตัวดูดซับมากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น แต่เถ้าลอยเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาขยะชุมชน การถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมบำบัด

น้ำเสีย เป็นการลดปริมาณของเสียที่ต้องถูกนำไปกำจัด อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงธาตุพิษอื่น ๆ ที่เจือปนในถ้ำลอย Lin & Chen (2022) ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลท์จากถ้ำลอยโดยกระบวนการ alkali-fusion and hydrothermal synthesis process ซึ่งสามารถกำจัดโลหะหนักและไดออกซินในถ้ำลอยได้

ไอโซเทอมการดูดซับซัลเฟตด้วยปูนขาวและถ้ำลอยมีความสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ บ่งชี้ว่าเกิดกระบวนการดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer adsorption) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ และมีแนวโน้มของการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่อย่างไรก็ตาม ค่า  $1/n$  มีค่าน้อยกว่า 1 นั้นหมายถึงปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับปูนขาวมีพื้นผิวจำกัดมากกว่า ถ้ำลอยสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟต ส่วนการดูดซับด้วยเปลือกหอยนางรมบดและถ้ำหนักมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิช บ่งชี้ว่าเกิดกระบวนการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monogeneous adsorption surface) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ และมีแนวโน้มของการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) โดยค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล ( $R_L$ ) ของ เปลือกหอยนางรมบดและถ้ำหนักมีค่าระหว่าง 0.43-0.81 และ 0.31-0.72 ตามลำดับ นั่นคือ  $0 < R_L < 1$  หมายความว่าซัลเฟตไอออนจะถูกดูดซับได้ดีบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

**Table 3** Optimum conditions for treatment of sulfate in synthesis wastewater

Adsorbent	pH	Weight (g/L)	HRT (min)	Initial Conc. (mg/L)	Efficiency (%)	Adsorption capacity (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /g)
Lime	4.00	2	60	1,000	34.73	194.59
Oyster shell	3.00	2	60	1,000	22.45	110.71
Bottom ash	5.00	2	45	1,000	33.90	174.96
Fly ash	5.00	3	30	1,000	46.19	215.06

### สรุปผลการวิจัย

ปูนขาว เปลือกหอยนางรมบด ถ้ำหนัก และถ้ำลอย มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดอนุภาค 29 – 247 ไมโครเมตร โดยถ้ำลอยมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด 29 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด 1,364 ตารางเมตร/กิโลกรัม วัสดุดูดซับทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลเฟตความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร 22.45 – 46.19% ความสามารถในการดูดซับซัลเฟต เท่ากับ 111 – 215 มิลลิกรัม/กรัม โดยถ้ำลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 3 กรัม/ลิตร ค่าพีเอชน้ำเสีย เท่ากับ 3 และระยะเวลาในการดูดซับ เท่ากับ 30 นาที ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับซัลเฟตบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด พบว่า ปูนขาวและถ้ำลอยมีรูปแบบที่สอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของฟรุนดลิช บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นหรือเป็นการดูดซับทางกายภาพ ส่วนการดูดซับด้วยเปลือกหอยนางรมบดและถ้ำหนักมีรูปแบบที่สอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์ บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี

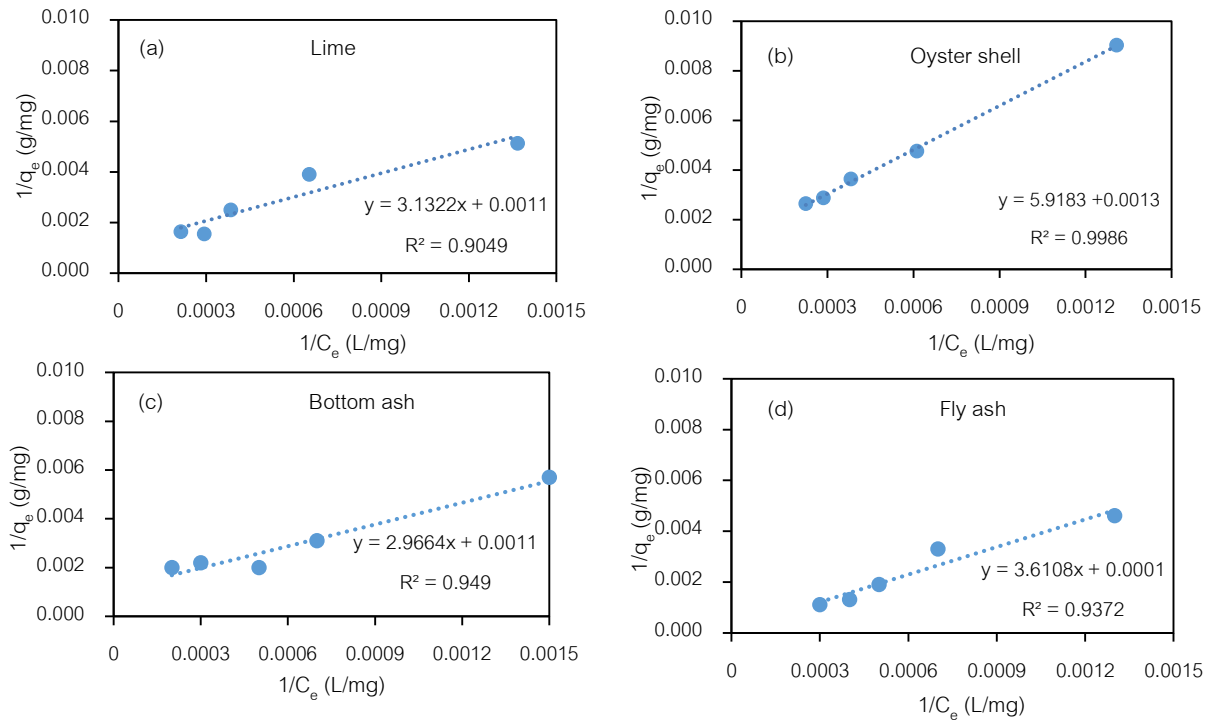


Figure 4 Langmuir adsorption isotherm of lime (a); oyster powder (b); bottom ash (c); and fly ash (d)

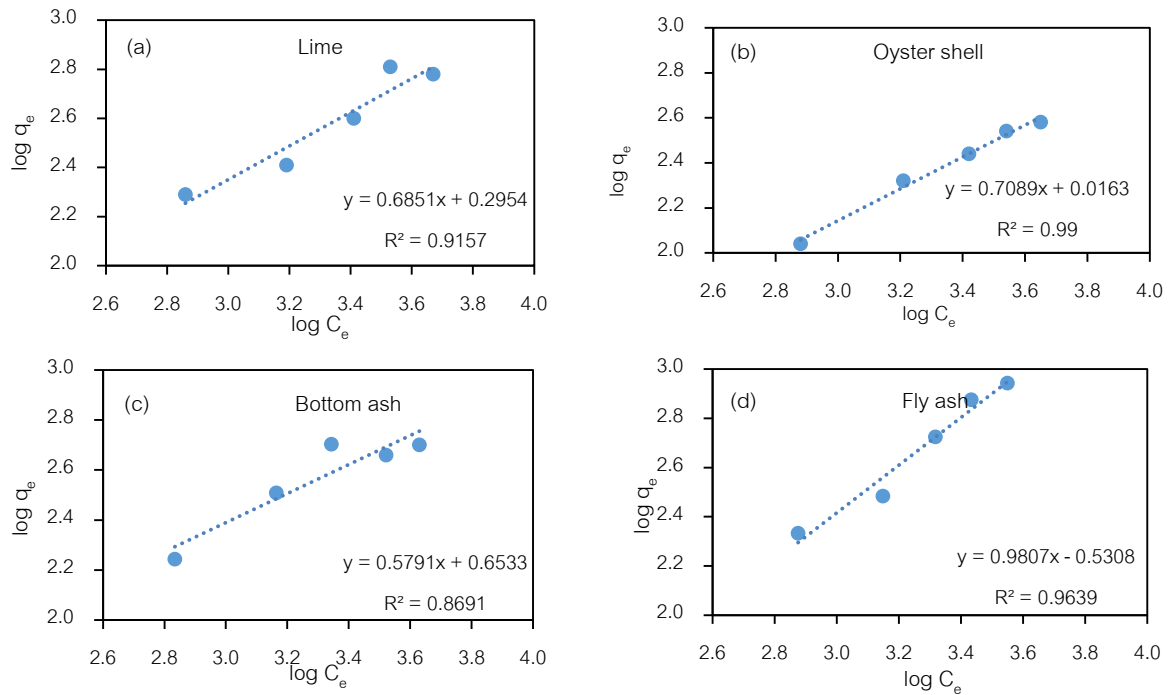


Figure 5 Freundlich adsorption isotherm of lime (a); oyster powder (b); bottom ash (c); and fly ash (d)





## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือวิเคราะห์ สำหรับทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งสำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร และบริษัท ซีแอนดีจี เอ็นไวรอนเมนทอล โปรดักชั่น (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เก้าอี้และเก้าอี้ลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

## เอกสารอ้างอิง

- Ahmadishoar, J., Bahrami, S.H., Movassagh, B., Amirshahi, S. H., & Arami, M. (2017). Removal of disperse blue 56 and disperse red 135 dye from aqueous dispersions by modified montmorillonite nano clay. *Chem Ind Chem Eng Q*, 23(1), 21-29.
- Ao, H., Cao, W., Hong, Y., Wu, J., & Wei, L. (2019). Adsorption of sulfate ion from water by zirconium oxide-modified biochar derived from pomelo peel. *Sci Total Environ*, 708, 135092.
- AWWA & WEF (2018) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Baltimore, Washington DC.
- Jia, F., & Wang, J. (2017). Treatment of flue gas desulfurization wastewater with nearzero liquid discharge by nanofiltration-membrane distillation process. *Separ Sci Technol*, 53(1) 146-153.
- Kavitha, D. & Namasivayam, C. (2007). Experimental and kinetic studies on methylene blue adsorption by Coir Pith carbon. *Bioresource Technology*, 98, 14-21.
- Kim, K., Kim, K., & Kim, M. (2021). Characterization of municipal solid-waste incinerator fly ash, vitrified using only end-waste glass. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128557.
- Lee, S., Kim, Y. & Hong, S. (2018). Treatment of industrial wastewater produced by desulfurization process in a coal-fired power plant via FO-MD hybrid process. *Chemosphere*, 210, 44-51.
- Lin, Y., & Chen, J. (2021). Resourcization and valorization of waste incineration fly ash for the synthesis of zeolite and applications, *Chem Eng J*, 9(6),106549.



- Masukume, M., Onyango, M. S., & Maree, J. P. (2014). Sea shell derived adsorbent and its potential for treating acid mine drainage. Department of Chemical, *Metall Mater Sci Eng.* 133, 52-59.
- Muhamad, N., Paothong, S., Tansam, U., & Soomthornnon, P. (2016). Adsorptive removal of textile dye by spent tea leaves. (Research report). Yala Rajabhat University, Yala. (in Thai)
- Mohammadi, M., Mowla, D., Esmailzadeh, F., & Ghasemi, Y. (2018). Cultivation of microalgae in a power plant wastewater for sulfate removal and biomass production: a batch study. *J Environ Chem Eng*, 6, 2812–2820.
- Moreroa-Monyelo, M., Falayi, T., Ntuli, F. & Magwa, N. (2022). Studies towards the adsorption of sulphate ions from acid mine drainage by modified attapulgite clays. *S Afr J Chem Eng*, 42, 241–254.
- Mukwevho, M., Chirwa, E., & Maharajh, D. (2019). The effect of pH and temperature on biological sulphate reduction. *Chem Eng Trans*, 74, 517–522.
- Phoo-ngernkham, T. & Hanjitsuwan, S. (2016). Effect of portland cement on physical properties of bottom ash geopolymers mortar. *Engng. J. CMU.*, 24(3), 81-88.
- Sangaroonleard, W., (2015). Adsorption of methyl red dye by activated carbon from egg shell and ark shell by chemical activation method. *Sci Tech Nakhon Sawan Raj Uni J*, 7(7), 1-14. (in Thai)
- Shaw, W.A. (2008). Benefits of evaporating FGD purge water. *J Power*, 152(3), 59-66.
- Solgi, M., Tabil, L.G., & Wilson, L.D. (2020). Modified Biopolymer Adsorbents for Column Treatment of Sulfate Species in Saline Aquifers. *Materials*, 13, 2408.
- Su, H., Guo, X., Zhang, X., Zhang, Q., Huang, D., Lin, L., & Qiang, X. (2022). Ultrafine biosorbent from waste oyster shell: A comparative study of Congo red and Methylene blue adsorption. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101124.
- Sukpreabprom, H. Attapinyo, T. and Seephuak, S. (2020). Equilibrium and kinetics adsorption of disperse blue 56 on white jute fiber. *Burapha Science Journal*, 26(2). 852-868. (in Thai)



- Villarruel-Moore, A., Reinhart, D. & Sohn, Y. (2022). Incinerator ash characterization – Implications for elevated temperature landfills. *Waste Manag*, 153, 72-80.
- Waiyasusri S. (2016). Phosphate removal in wastewater by adsorption on calcium carbonate and calcium oxide from eggshell. *The Journal of KMUTNB*, 26(3), 475-486. (in Thai).
- Wu, J., Yang, J., Feng, P., Wen, L., Huang, G., Xu, C., & Lin, B. (2022). Highly efficient and ultra-rapid adsorption of malachite green by recyclable crab shell biochar. *J Ind Eng Chem*, 113, 206-214.
- Xue, J., Yu, X., Yuan, Z., Griffith, S.M., Lau, A.K.H., Seinfeld, J.H. & Yu, J.Z. (2019). Efficient control of atmospheric sulfate production based on three formation regimes. *Nat. Geosci.*, 12, 977–982.
- Yan, j., Yuan, w., Liu, j., Ye, w., Lin, j., Xie, j., Huang, x., Gao, S. Xie, J., Liu, S., Chen, W. & Zhang, H. (2019). An integrated process of chemical precipitation and sulfate reduction for treatment of flue gas desulphurization wastewater from coal-fired power plant. *Journal of Cleaner Production*, 228, 63-72.
- Yazan, A., & Dai, J. (2022). Effects of delayed addition of polycarboxylate ether on one-part alkali-activated fly ash/slag pastes: Adsorption, reaction kinetics, and rheology, *Construct Build Mater*, 323, 126611.