



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2564

ISSN 1906-6627 (Print)

ISSN 2673-0197 (Online)



ประสิทธิภาพของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในการบำบัดน้ำเสีย จากอาคารที่พักอาศัย

Efficiency of Palm Oil Mill Fly Ash for Residential Building Wastewater Treatment

นฤมล ทองมาก^{1*}, ชันวานี จิใจ¹, วารุณี หะยิมะสาและ¹, ไชนะ มูเล็ง¹ และ พรทิพย์ ศรีแดง²
Narumol Thongmak^{1*}, Sunwanee Jijai¹, Warunee Hajimasalae¹, Saina Muleng¹ and Porntip Sridang²

Received: 13 March 2020, Revised: 21 May 2020, Accepted: 2 June 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัด โดยทำการทดลองแบบแบตช์ (batch test) ผลการทดลองพบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 6 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ 60.00±8.94% ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองคือ 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ 62.96±9.07% สำหรับปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุดคือ 84.62±9.73% สำหรับปริมาณความขุ่นพบว่าแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า การดูดซับ COD ด้วยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

คำสำคัญ: เถ้าลอย, น้ำเสีย, การดูดซับ, ไอโซเทอร์ม

¹ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

¹ Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Sateng, Muang, Yala 95000, Thailand.

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ตำบลสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

² Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanamchandra, Muang, Nakhon Pathom, 73000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): narumol.t@yru.ac.th

ABSTRACT

This research investigated the efficiency of palm oil mill fly ash for residential building wastewater treatment. The objective was to study the effects of pH value, contact time and optimum dosage of palm oil mill fly ash, including removal efficiency. The experiments were carried out in the batch test. Results showed that the optimum pH value was 6 with COD removal efficiency of $60.00 \pm 8.94\%$. The optimum contact time was 60 minutes with COD removal efficiency of $62.96 \pm 9.07\%$. The influence of palm oil mill fly ash dosage on adsorption efficiency was 2 g of palm oil mill fly ash per 100 mL of wastewater, allowing the highest COD removal efficiency of $84.62 \pm 9.73\%$. The turbidity was varied according to palm oil mill fly ash dosage. The study of adsorption isotherm revealed that COD adsorption with palm oil mill fly ash corresponded to Langmuir isotherm.

Key words: fly ash, wastewater, adsorption, isotherm

บทนำ

กิจกรรมของมนุษย์เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของมลสารต่างๆ จนส่งผลให้ความสมดุลของระบบนิเวศในแหล่งน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเสื่อมคุณภาพลงเกิดความน่าเสียของแหล่งน้ำ และมีแนวโน้มทวีความรุนแรง รวมทั้งขยายพื้นที่ขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการขาดการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมและการควบคุมมลพิษทางน้ำที่มีประสิทธิภาพ (Pollution control department, 2018a) ซึ่งโดยทั่วไปหากปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่มากเมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ แหล่งน้ำจะสามารถฟื้นตัวหรือฟอกตัวตามธรรมชาติ (self-purification) ได้ แต่เมื่อน้ำเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของชุมชนและการพัฒนาอุตสาหกรรมจนถึงจุดที่ธรรมชาติไม่สามารถฟื้นตัวหรือฟอกตัวตามธรรมชาติได้ทัน แหล่งน้ำจึงเกิดการเน่าเสียและเสื่อมโทรม จนส่งผลกระทบต่อ การนำไปใช้ประโยชน์ (Department of Industrial Works, 2011) น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

จากบ้านเรือนที่พักอาศัยมีความแตกต่างกันขึ้นกับกิจกรรมการใช้น้ำ ซึ่งส่วนใหญ่ลักษณะน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นนั้นมักปนเปื้อนสิ่งสกปรกจำพวกสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดการเน่าเหม็นได้ง่าย (Department of Environmental Quality Promotion, 2005) โดยมีค่า BOD_5 (biochemical oxygen demand) และ COD (chemical oxygen demand) ประมาณ 110-400 mg/L และ 190-700 mg/L ตามลำดับ (Udomsinrot, 2007)

ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นให้มีคุณภาพที่ดีก่อนระบายออกสู่ที่ระบายน้ำสาธารณะจึงเป็นสิ่งสำคัญ การดูดซับเป็นหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีที่อาศัยตัวดูดซับในการดูดซับหรือแยกสารปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ตลอดจนเจีลและกลี้นอกจากน้ำเสีย (Sirianuntapiboon, 2006) ปัจจุบันมีการทดลองใช้วัสดุดูดซับหรือตัวดูดซับ (adsorbent) ชนิดต่างๆ รวมถึงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลายชนิดในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วพีแคน (Bansode *et al.*, 2004) ถั่วลอยถ่านหิน (Lakdawala and Lakdawala, 2012) และถั่วลอยชาน

อ้อย (Chingono *et al.*, 2018) เป็นต้น เนื่องจาก้วยถั่วลอยมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับเพื่อดูดซับมลสารต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ถั่วกลบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสูงถึง 89% (Mor *et al.*, 2016) และถั่วลอยขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงถึง 72% ในการบำบัดน้ำกากส่าที่เกิดขึ้นจากการผลิตเอทานอล (Chingono *et al.*, 2018) จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าถั่วลอยมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในด้านของพื้นที่ผิว การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และความพรุน อีกทั้งเป็นวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้ง (Visa *et al.*, 2012)

ด้วยปาล์มน้ำมันเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจของไทยที่มีการปลูกกันมากโดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ของประเทศ จากข้อมูลการผลิตปาล์มน้ำมันในปี พ.ศ. 2562 พบว่า ประเทศไทยมีผลผลิตรวมทั้งประเทศเท่ากับ 16.80 ล้านตัน (Office of Agricultural Economics, 2020) โดยผลผลิตประมาณ 1 ตัน มีกากของผลปาล์มน้ำมัน (ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และเศษกะลา) เกิดขึ้นประมาณ 0.52 ตัน โดยทั่วไปมักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ซึ่งหลังจากการเผาไหม้กากของผลปาล์มน้ำมันประมาณ 1 ตัน จะมีถั่วเกิดขึ้นประมาณ 0.05 ตัน โดยถั่วที่เหลือจากการเผาไหม้มีการนำไปใช้ประโยชน์ไม่กว้างขวางมากนักเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น (Jaturapitakkul, 2012; Tunsathien, 2013) ด้วยเหตุนี้ถั่วลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจึงเป็นถั่วลอยทางเลือกสำหรับใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การทดสอบหาค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณของถั่วลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับมลสารหรือสิ่งสกปรกในน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยก่อน

ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากการนำถั่วลอยจากแต่ละแหล่งมาใช้เป็นตัวดูดซับนั้นยังมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์

1) อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์หาสารประกอบออกไซด์ใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น ZETIUM (วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-XRF Zetium-001 เทคนิคการทดสอบ X-ray fluorescence spectrometry) สัณฐานและลักษณะพื้นผิวใช้เครื่อง Field emission scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Apreo (เทคนิคการทดสอบ Electron Micrograph) พื้นที่ผิว-รูพรุนใช้เครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2060 (วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-BET 6P-001 เทคนิคการทดสอบ Static volumetric N₂ gas adsorption method) และขนาดอนุภาคใช้เครื่อง Laser particle size analyzer (LPSA) ยี่ห้อ FRITSCH รุ่น ANALYSETTE 22 NanoTec (วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-LPSA2-001 เทคนิคการทดสอบ Laser light scatter particle size analyzer)

2) อุปกรณ์ในการทดลองใช้เครื่องจาร์เทสต์ (jar test) ยี่ห้อ M-LAB รุ่น JR6D เตาให้ความร้อน (COD reactor) ยี่ห้อ M-LAB รุ่น DB-1602 เครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ HACH รุ่น TL3200c และ pH meter ยี่ห้อ Sartorius รุ่น Docu-pH+

2. วิธีการทดลอง

การศึกษาเป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณถั่วลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำ

เสียดังกล่าวที่พักอาศัย โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1) เก็บตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจาก บริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด อำเภอหนองจิก จังหวัดปัตตานี ให้เพียงพอสำหรับการใช้ตลอดการทดลอง และดำเนินการเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยก่อนใช้งานโดยล้างด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 g ของเถ้าลอย ต่อ 10 mL ของน้ำกลั่น และกวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที จากนั้นทำการกรองและอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105-115 °C (Visa *et al.*, 2015)

2) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ สัณฐานและลักษณะพื้นผิว พื้นที่ผิว-รูพรุน และขนาดอนุภาค

3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียดังกล่าวจากบ่อพักน้ำเสียบริเวณหอชาย 5 ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จำนวน 3 รอบตามสภาวะการทดลองที่ทดสอบ และวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียดังกล่าวผ่านพารามิเตอร์ซ้ำ 3 ครั้ง ได้แก่ พีเอช (pH) ความขุ่น (turbidity) บีโอดี (biochemical oxygen demand: BOD₅) และซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) ดังตารางที่ 1

4) ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการดูดซับซ้ำ 2 ครั้ง ได้แก่ ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวที่พักอาศัย ดังนี้

4.1) ทดสอบผลของ pH โดยในการทดลองกำหนดปริมาณของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในปริมาณ 1 g ของเถ้าลอย ต่อ น้ำเสียดังกล่าว 100 mL และปรับค่า pH เป็น 5 6 7 และ 8 ด้วยกรดซัลฟูริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

4.2) ทดสอบผลของระยะเวลาสัมผัส โดยในการทดลองกำหนดปริมาณของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในปริมาณ 1 g ของเถ้าลอย ต่อ น้ำเสียดังกล่าว 100 mL และปรับค่า pH ตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.1) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน คือ 30 60 120 180 และ 240 นาที และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

4.3) ทดสอบปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยในปริมาณที่ต่างกัน คือ 0.3 0.5 1 และ 2 g ต่อ น้ำเสียดังกล่าว 100 mL และปรับค่า pH ตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.1) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในขั้นตอนที่ 4.2) และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

Parameter	Method	Influent	Effluent
pH	Electrometric	✓	✓
Turbidity	Nephelometric	✓	✓
BOD ₅	Azide Modification	✓	-
COD	Closed Reflux	✓	✓

5) ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ในการดูดซับ COD ด้วยเกลือลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ และสมการการดูดซับของแลงเมียร์

สามารถแสดงในรูปของปัจจัยการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ได้ดังสมการที่ (3) เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) (Srikun, 2007; Sun *et al.*, 2010; Chansuvarn, 2016)

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

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (2)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3)$$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

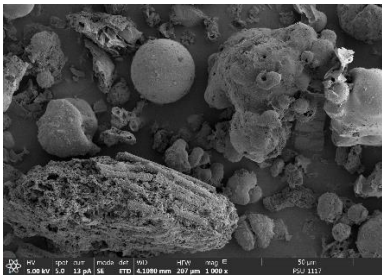
1. คุณสมบัติของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง โดยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีดำ น้ำหนักเบา มีหลายลักษณะรูปทรง เช่น กลมมน

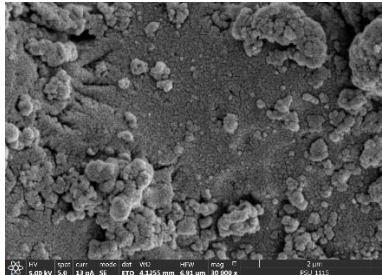
ท่อน และรูปทรงไม่แน่นอน กระจายปะปนกัน (ภาพที่ 2 (ก)) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 53.50 μm มีพื้นที่ผิวขรุขระ มีรูพรุน และบางส่วนเชื่อมต่อนั่นกันเป็นโพรง (ภาพที่ 2 (ข) และ (ค)) มีพื้นที่ผิว 72.05 m^2/g มีรูพรุน 0.0025 μm ทั้งนี้พบเถ้าลอยขนาดเล็กกว่า 1 μm เรียงตัวปะปนบนเถ้าลอยขนาดใหญ่กว่า



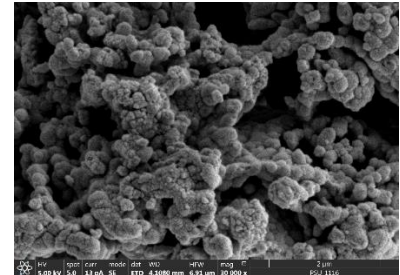
ภาพที่ 1 เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม



(ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า



(ค) กำลังขยาย 30,000 เท่า

ภาพที่ 2 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่พบมากที่สุด ได้แก่ SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 และ MgO ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของออกไซด์ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

พบว่ามีความเท่ากับ 70.67 ซึ่งแสดงว่าเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี เนื่องจากมีสัดส่วนของออกไซด์ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มากกว่า 2.40 (Visa *et al.*, 2012)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีที่ละลายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

Compound	Concentration (%)
F	0.176
Na ₂ O	0.087
MgO	3.649
Al ₂ O ₃	0.421
SiO ₂	29.754
P ₂ O ₅	4.405
SO ₃	0.811
Cl	0.425
K ₂ O	4.747
CaO	8.951
TiO ₂	0.043
MnO	0.111
Fe ₂ O ₃	0.750
CuO	0.066
ZnO	0.025
Rb ₂ O	0.035
SrO	0.033

2. ลักษณะของน้ำเสีย

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา มีค่า pH ความขุ่น และซีโอดี สรุปไว้ในตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยบริเวณหอชาย 5 ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา พบว่ามีค่า pH ความขุ่น BOD₅ และ COD เท่ากับ 7.16±0.27 40.63±12.18 NTU 58.25±22.60 mg/L และ 188.24±68.61 mg/L ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์

BOD₅ และ COD ซึ่งให้น้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยบริเวณหอชาย 5 ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลาจัดอยู่ในประเภทของลักษณะน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นน้อย (Pollution control department, 2018b) ซึ่งลักษณะน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกิจกรรมในการใช้น้ำที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่่มาจากการอุปโภคบริโภค การชำระล้างร่างกาย การขับถ่าย การซักล้าง ตลอดจนการประกอบอาหาร

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย

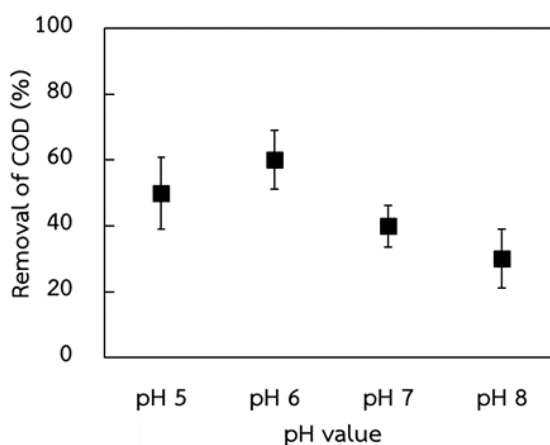
Parameter	Average±SD	Range
pH	7.16±0.27	0.53
Turbidity (NTU)	40.63±12.18	27.30
BOD ₅ (mg/L)	58.25±22.60	54.00
COD (mg/L)	188.24±68.61	171.45

3. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

3.1 ผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลของค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อปรับค่า pH ที่ค่าต่างๆ กัน คือ 5 6 7 และ 8 โดยใช้ปริมาณแฉ่ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 g ต่อน้ำเสีย 100 mL ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และตั้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า แฉ่ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ 50.00±10.95% 60.00±8.94% 40.00±6.32% และ 30.00±8.94% ตามลำดับ เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า pH ของสารละลายมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูด

ซับ คือ การกำจัด COD เพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึง 6 จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลง เมื่อค่า pH ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ค่อยๆ ลดลงจาก 60.00±8.94% จนกระทั่ง 30.00±8.94% เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kulkarni *et al.* (2011) ที่พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่า pH 6 และหลังจากนั้นประสิทธิภาพลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า pH ทั้งนี้อาจเกิดจากที่ค่า pH ต่ำ ประจุบวกถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ และทำให้เกิดการดึงดูดไฟฟ้าสถิตสูงระหว่างพื้นผิวประจุบวกของวัสดุดูดซับและสารประกอบอินทรีย์ (Nayl *et al.*, 2017)



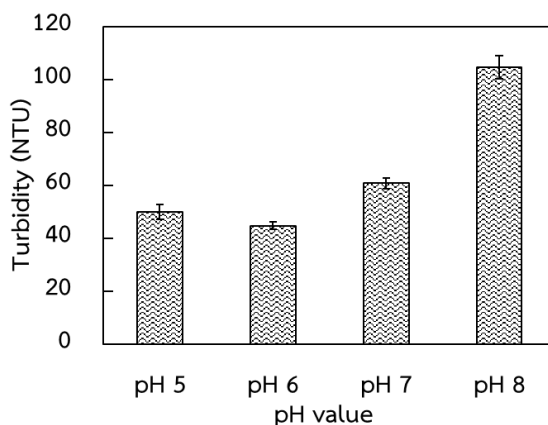
ภาพที่ 3 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นที่เหลืออยู่ในน้ำ ตัวอย่างเมื่อตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4

พบว่า ที่ค่า pH 5 และ 6 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 49.93±2.72 และ 44.67±1.37 NTU โดยความขุ่นที่

เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจาก
 ใต้ออกจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่แขวนลอยค้าง
 อยู่ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้ภายใน 1 ชั่วโมง
 เนื่องจากการทดลองใช้ใต้ออกจากโรงงานสกัด

น้ำมันปาล์มขนาดรวม (ไม่ได้มีการคัดแยกขนาดของ
 ใต้ออก) แต่เมื่อวางทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า
 ค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ
 4.96 ± 0.17 และ 4.84 ± 0.02 NTU



ภาพที่ 4 ปริมาณความขุ่นที่ระดับ pH แตกต่างกัน

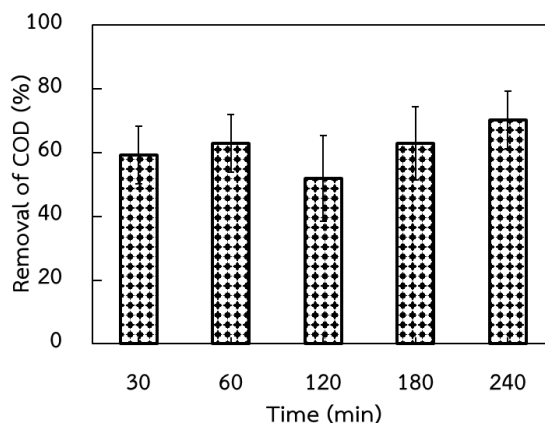
จากผลการทดลองอิทธิพลของค่า pH ต่อ
 ประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อทำการทดลองปรับค่า
 pH ที่ค่าต่าง ๆ กัน คือ 5 6 7 และ 8 ดังข้างต้น พบว่า
 ที่ค่า pH 6 เป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ
 เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่สูง
 และไม่มีปัญหาความเป็นกรดของน้ำที่ผ่านการ
 ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นจึงเลือกค่า pH 6 เพื่อนำไปใช้
 ในการทดลองถัดไป

3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับ

การทดสอบผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อ
 ประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อดำเนินการทดลองที่
 ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน คือ 30 60 120 180 และ 240
 นาที ที่ปริมาณใต้ออกจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 g
 ต่อน้ำเสีย 100 mL ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และ
 ปรับค่า pH เท่ากับ 6 (ผลที่ได้จากหัวข้อ 3.1) และใช้
 ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง

ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการ
 กำจัด COD ดังภาพที่ 5 มีค่าประมาณ $62.96 \pm 9.07\%$
 ในช่วง 60 นาทีแรก และประสิทธิภาพในการกำจัด

COD มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาสัมผัส
 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในช่วงแรกของการดูด
 ซับพื้นผิวของวัสดุดูดซับยังคงมีที่ว่างมาก แม้ว่า
 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัส
 เพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มคงที่
 และเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาดูดซับผ่านไปช่วงเวลา
 หนึ่ง (Hawari *et al.*, 2009) และพบว่าที่ระยะเวลา
 สัมผัสที่ 120 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัด COD
 ลดต่ำลง เนื่องจากกลไกการดูดซับอาจเกิดลักษณะ
 ผันกลับได้ (การดูดซับทางกายภาพ) ในบางพื้นที่บน
 ผิวใต้ออกจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และเมื่อ
 พิจารณาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อค่าความขุ่น
 พบว่าอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสไม่ส่งผลต่อค่า
 ความขุ่น โดยค่าความขุ่นที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่าง
 กันมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 26 ถึง 36 NTU ซึ่งเป็นค่า
 ใกล้เคียงกับค่าความขุ่นของน้ำเสียเริ่มต้น ดังนั้น
 ระยะเวลาสัมผัสที่นำไปใช้ในการทดลองถัดไปจึง
 เลือกใช้ระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 60 นาที

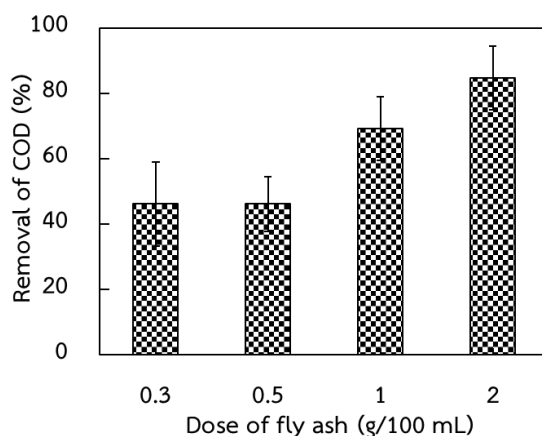


ภาพที่ 5 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

3.3 ผลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการทดสอบอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ทดลองที่ปริมาณของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.3 0.5 1 และ 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL และปรับค่า pH เท่ากับ 6 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที (ผลที่ได้จากหัวข้อ 3.1 และ 3.2) และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง

ผลการทดลองจากการใช้เถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ สูงกว่า เถ้าลอยขานอ้อย และเถ้าลอยแกลบ (ตารางที่ 4) มีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุน ($0.0025 \mu\text{m}$) มีบางส่วนเชื่อมต่อนั่นกันเป็นโพรง และมีเถ้าลอยขนาดเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ เรียงตัวปะปนบนเถ้าลอยขนาดใหญ่กว่า (อนุภาคเฉลี่ย $53.50 \mu\text{m}$) ส่งผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD โดยพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD (ภาพที่ 6) เพิ่มขึ้นจาก $46.15 \pm 12.87\%$ เป็น $84.62 \pm 9.73\%$ เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL



ภาพที่ 6 ผลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ศึกษาวัสดุดูดซับประเภทต่างๆ (ตารางที่ 4)

พบว่า เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย

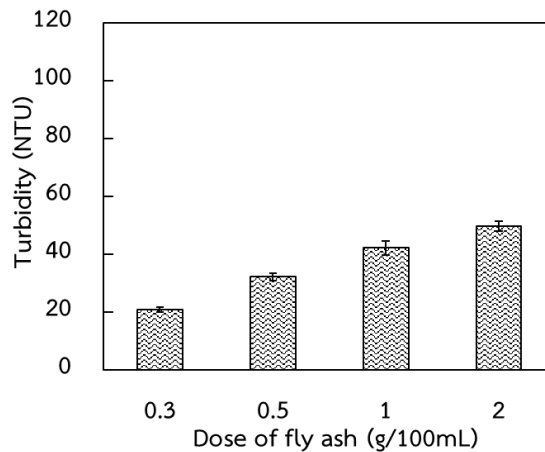
และเถ้าลอยแกลบ เป็นต้น ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิว (surface Area) และจำนวนตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Sites) ที่เพิ่มขึ้น (Chingono *et al.*, 2018) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan and Gandhimathi (2009) ที่ศึกษาการกำจัด ไอออนโลหะหนักออกจากน้ำชะขยะชุมชนโดยใช้ เถ้าลอยถ่านหินเป็นตัวดูดซับ และพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย ถ่านหินเพิ่มขึ้นจาก 0.5 g/L เป็น 2 g/L

การประยุกต์ใช้เถ้าลอยจากโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มเพื่อการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พัก

อาศัยจากงานวิจัยนี้ พบว่า เถ้าลอยจากโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มมีศักยภาพเป็นตัวดูดซับและกำจัด สารอินทรีย์ในรูป COD ดังนั้นจึงเป็นวัสดุดูดซับที่มี ต้นทุนต่ำ ซึ่งที่ผ่านเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 436,800-578,998 ตันต่อปี มักถูกทิ้งในพื้นที่โรงงาน หรือใช้ ถมที่ และมีการศึกษาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตปูพื้นทางเท้า รวมถึงศึกษา ใช้เป็นวัสดุสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ตามลำดับ (Jaturapitakkul, 2012; Piyang *et al.*, 2018; Waijarean and Asavapisit, 2019)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับและคุณสมบัติของเถ้าลอย

Type	Physical and chemical characteristics	Removal efficiency	References
palm oil mill fly ash (เถ้าลอยจากโรงงานสกัด น้ำมันปาล์ม)	70.67 of SiO ₂ /Al ₂ O ₃ 72.05 m ² /g of surface area 0.0025 μm of pore size 53.5 μm of average particle size	84.62% of COD	This study
coal fly ash (เถ้าลอยถ่านหิน)	<20 μm of particle size >63-90 μm of particle size	99.00% of uranium 95.80% of uranium	Police <i>et al.</i> , 2020
bagasse fly ash (เถ้าลอยขานอ้อย)	2.75 of SiO ₂ /Al ₂ O ₃ 90-125 μm of particle sizes	72.00% of COD	Chingono <i>et al.</i> , 2018
palm oil fuel ash (เถ้ากากปาล์มน้ำมัน)	90-100 μm of particle sizes	99.60% of Hg(II) ion	Syafiqah and Yussof, 2018
activated rice husk ash (เถ้าแกลบที่ผ่านการ กระตุ่น)	14.68 of SiO ₂ /Al ₂ O ₃ <710 μm of particle size	89% of phosphate	Mor <i>et al.</i> , 2016



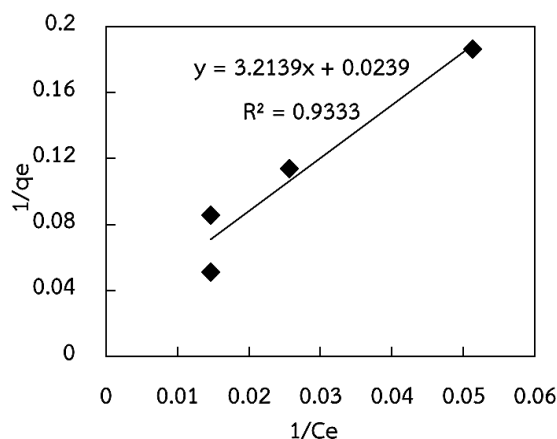
ภาพที่ 7 ค่าความขุ่นที่ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแตกต่างกัน ที่ระยะเวลาตกตะกอน 1 ชั่วโมง

สำหรับค่าความขุ่นที่พบเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ค่าความขุ่นที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างหลังจากตั้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยดังภาพที่ 7 ซึ่งหากมีการใช้ปริมาณเถ้าลอยในการดูดซับมาก ก็จะมีส่วนของเถ้าลอยแขวนลอยค้างอยู่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีบางส่วนของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 พบว่า เมื่อมี

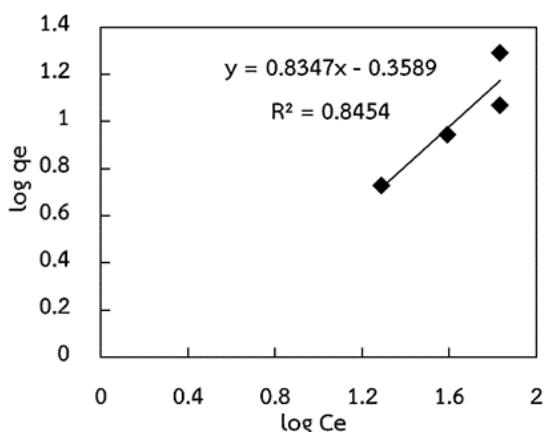
การเพิ่มระยะเวลาตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 g) ค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างสามารถลดลงได้มากกว่า 85 %

3.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

จากข้อมูลการทดลองผลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการกำจัด COD มาพิจารณาความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และ ฟรุนดิช (Freundlich isotherm) (Al-Zboon *et al.*, 2011) (ภาพที่ 8 และ 9)



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับ COD ด้วยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับ COD ด้วยเกลือจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้สมการการดูดซับของฟรุนดิช

ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ภาพที่ 8) และฟรุนดิช (ภาพที่ 9) มีค่าเท่ากับ 0.9333 และ 0.8454 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) นี้ให้เห็นว่าข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องและสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้ดีกว่าแบบฟรุนดิช โดยมีค่า q_m (ปริมาณของสารถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว) เท่ากับ 41.84 mg/g มีค่า K_L (ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ) เท่ากับ 0.007 L/mg และมีค่า R_L (ปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สถานะสมดุล) เท่ากับ 0.51 ซึ่งหมายถึงมีการดูดซับที่ดี คือ มีค่า R_L อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ (Pandey *et al.*, 2010) รูปแบบการดูดซับแบบแลงเมียร์นั้นการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โมเลกุลจะถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยมีโมเลกุลเดียวไม่เกิดการซ้อนทับกันในแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว และมีจำนวนที่แน่นอนของพื้นผิวบนตัวดูดซับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับกลไกการดูดซับทางเคมี (Tungkananuruk and Tungkananuruk, 2012; Painmanakul, 2014)

สรุป

จากผลศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยทดสอบค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเกลือจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมความเร็วรอบในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ผลการศึกษาคือประสิทธิภาพการกำจัด COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่า pH 6 และหลังจากนั้นประสิทธิภาพลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า pH ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมจากการทดลอง คือ 6 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุด คือ ประมาณ $60.00 \pm 8.94\%$ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีค่าประมาณ $62.96 \pm 9.07\%$ ในช่วง 60 นาทีแรก และประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความขุ่น ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลอง คือ 60 นาที สำหรับผลของปริมาณเกลือจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD

เพิ่มขึ้นตามปริมาณแฉะล่อยที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณแฉะล่อยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุด คือ $84.62 \pm 9.73\%$ และพบว่า ปริมาณความขุ่นแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแฉะล่อยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และจากการศึกษาไอโซเทอร์ม พบว่าการดูดซับ COD ด้วยแฉะล่อยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีค่า R^2 ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ เท่ากับ 0.9333 ค่า q_m เท่ากับ 41.84 mg/g มีค่า K_L เท่ากับ 0.007 L/mg และมีค่า R_L เท่ากับ 0.51 โดยค่า R_L อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ ซึ่งถือได้ว่าแฉะล่อยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความสามารถในการดูดซับที่ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยจากงบประมาณการศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2562 บริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แฉะล่อย และขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัย และทุกท่านที่สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Al-Zboon, K., Al-Harashsheh, M.S. and Hani, F.B. 2011. Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials** 188(1-3): 414-421.

Bansode, R.R., Losso, J.N., Marshall, W.E., Rao, R.M. and Portier, R.J. 2004. Pecan shell-based granular activated carbon for treatment of chemical oxygen demand

(COD) in municipal wastewater.

Bioresource Technology 94: 129-135.

Chansuvarn, W. 2016. **Research Report no Modification of adsorbent surface for removal of lead(II) ion from aqueous solution.** Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)

Chingono, K.E., Sanganyado, E., Bere, E. and Yalala B. 2018. Adsorption of sugarcane vinasse effluent on bagasse fly ash: A parametric and kinetic study. **Journal of Environmental Management** 224: 182-190.

Department of Environmental Quality Promotion. 2005. **Guidebook for Community Wastewater Management.** 4th ed. Thammasat Printing house, Bangkok. (in Thai)

Department of Industrial Works. 2011. **Water Pollution Treatment Systems Textbook.** 7th ed. Department of Industrial Works, Ministry of industry, Bangkok. (in Thai)

Hawari, A., Rawajfih, Z. and Nsour, N. 2009. Equilibrium and thermodynamic analysis of zinc ions adsorption by olive oil mill solid residues. **Journal of Hazardous Materials** 168: 1284-1289.

Jaturapitakkul, C. 2012. Biomass ash from industrial: Problems, limitations and utilization. **Concrete Journal** 17: 1-10. (in Thai)

Kulkarni, S.J., Patil, S.V. and Bhalerao, Y.P. 2011. Fly ash adsorption studies for organic matter removal accompanying increase in

- dissolved oxygen. **International Journal of Chemical Engineering and Applications** 2(6): 434-438.
- Lakdawala, M.M. and Lakdawala, J.M. 2012. Adsorption study of BOD content from sugar industry wastewater by low cost material fly ash. **Der Chemica Sinica** 3(2): 497-502.
- Mohan, S. and Gandhimathi, R. 2009. Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. **Journal of Hazardous Materials** 169: 351-359.
- Mor, S., Chhoden, K. and Ravindra, K. 2016. Application of agro-waste rice husk ash for the removal of phosphate from the wastewater. **Journal of Cleaner Production** 129: 673-680.
- Nayl, A.E.A., Elkhashab, R.A., Malah, T.E., Yakout, S.M., El-Khateeb, M.A., Ali, M.M.S. and Ali, H.M. 2017. Adsorption studies on the removal of COD and BOD from treated sewage using activated carbon prepared from date palm waste. **Environmental Science and Pollution Research** 24: 22284-22293.
- Office of Agricultural Economics. 2020. **Palm Oil**. Available Source: <http://mis-app.oae.go.th/product/ปาล์มน้ำมัน>, May 5, 2020. (in Thai)
- Painmanakul, P. 2014. **Unit Processes for Environmental Engineering**. 1st ed. Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- Pandey, P.K., Sharma, S.K. and Sambhi, S.S. 2010. Kinetics and equilibrium study of chromium adsorption on zeoliteNaX. **International Journal of Environmental Science and Technology** 7(2): 395-404.
- Piyang, T., Sagulsawasdipan, K. and Sawain, A. 2018. A study of palm oil fuel ash in manufacturing in production footpaths concrete slabs. **Wichcha Journal** 37(1): 81-94. (in Thai)
- Police, S., Maity, S., Chaudhary, D.K., Dusane, C.K., Sahu, S.K. and Kumar, A.V. 2020. Effect of coal fly ash's particle size on U adsorption in water samples and thermodynamic study on adsorption. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology** 2: 32-38.
- Pollution control department. 2018a. **Water Pollution**. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_polwater.html, September 25, 2018. (in Thai)
- Pollution control department. 2018b. **Domestic Wastewater**. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html, September 29, 2018. (in Thai)
- Sun, D., Zhang, X., Wu, Y. and Liu, X. 2010. Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. **Journal of Hazardous Materials** 181: 335-342.
- Srikun, S. 2007. The Study of adsorption of dye and lead ion with activated carbon prepared from durian peels. Master Thesis of Engineering in Chemical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (in Thai)

- Sirianuntapiboon, S. 2006. **Wastewater Treatment System**. Top, Bangkok. (in Thai)
- Syafiqah, M.S.I. and Yussof, H.W. 2018. Adsorption of mercury from aqueous solutions using palm oil fuel ash as an adsorbent - batch studies. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 334: 1-5.
- Tungkananuruk, N. and Tungkananuruk, K. 2012. **Principle of Chemical Water Quality Analysis**. 2nd ed. Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Tunsathien, P. 2013. A study of properties of palm oil fuel from various sources for use in concrete. Master Thesis of Engineering in Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Udomsinrot, K. 2007. **Wastewater Engineering**. 4th ed. Siam Stationery Supply, Bangkok. (in Thai)
- Visa, M., Andronic, L. and Duta, A. 2015. Fly ash-TiO₂ nanocomposite material for multi-pollutants wastewater treatment. **Journal of Environmental Management** 150: 336-343.
- Visa, M., Isac, L. and Duta, A. 2012. Fly ash adsorbents for multi-cation wastewater treatment. **Applied Surface Science** 258: 6345-6352.
- Waijarean, N. and Asavapisit, S. 2019. Synthesis of geopolymer from water treatment residue and palm oil fuel ash. **The Journal of Industrial Technology** 15(2): 70-86. (in Thai)