บทความวิจัย

การผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟเพื่อใช้ในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

วิภารัตน์ คิดถูก อมรรัตน์ ทองจับ ธงชัย สอนเพีย และ วราภรณ์ จังธนสมบัติ*
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
พิชาภพ ปรีเปรม
สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 7053 8919 อีเมล: waraporn.jung.aor@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.11.004
รับเมื่อ 21 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 19 พฤษภาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 20 พฤษภาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 3 พฤศจิกายน 2563
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียคือ ซิลิกาเจล งานวิจัยจำนวนมากศึกษาการผลิตซิลิกาเจลจากวัตถุดิบต่างๆ แต่ไม่ค่อยมีรายงานเกี่ยวกับการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ชนิดของสารละลายด่าง [โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)] ความเข้มข้นของสารละลายด่าง (1, 2, 3 และ 4 โมลาร์) และอุณหภูมิ (70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส) ที่ใช้ในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ และ 2) ศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาในการสัมผัส (30, 45 และ 60 นาที) จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟคือ ทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งนี้ เนื่องจากที่สภาวะนี้สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้มากที่สุด นอกจากนี้ ความเข้มข้นของซิลิกาที่สกัดได้จากสภาวะนี้ ยังแตกต่างจากที่สภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p<0.01$) โดยร้อยละผลผลิตของซิลิกาเจลเท่ากับ 40.25 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บ่งชี้ว่า ซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากหินแร่ภูเขาไฟเป็นซิลิกาอสัณฐาน สำหรับผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ พบว่า ซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟสามารถกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากถึงร้อยละ 89.52–92.67 โดยเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 92.67

คำสำคัญ: ซิลิกาเจล หินแร่ภูเขาไฟ ตะกั่ว น้ำเสียสังเคราะห์

การอ้างอิงบทความ: วิภารัตน์ คิดถูก, อมรรัตน์ ทองจับ, ธงชัย สอนเพีย, พิชาภพ ปรีเปรม และ วราภรณ์ จังธนสมบัติ, "การผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟเพื่อใช้ในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 309–318, เม.ย.–มิ.ย. 2564.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31, ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2564
The Journal of KMUTNB., Vol. 31, No. 2, Apr.–Jun. 2021

Research Article

Production of Silica Gel from Volcanic Rock for Treatment of Lead in Synthetic Wastewater

Wiparat Kittook, Amornrat Thongjub, Thongchai Sornpai and Waraporn Jungtanasombut*
Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University, Kanchanaburi, Thailand
Pichapop Preeprem
Department of Agriculture, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 7053 8919, E–mail: waraporn.jung.aor@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.11.004
Received 21 April 2020; Revised 19 May 2020; Accepted 20 May 2020; Published online: 3 November 2020
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

One adsorbent that has been widely used for water treatment is silica gel. Many research works include the production of silica gel from various raw materials, but the one produced from volcanic rock has rarely been reported. The purposes of this research were 1) to investigate the optimum conditions for producing silica gel from volcanic rock. The examined parameters consisted of types of alkaline solution (KOH and NaOH), concentration of alkaline solution (1, 2, 3 and 4 M) and temperature (70, 80 and 90°C) used to extract silica from volcanic rock, and 2) to study the ability of silica gel from volcanic rock to remove lead (Pb^{2+}) from synthetic wastewater. The considered factor was contact time (30, 45 and 60 minutes). The results and statistical analysis revealed that the optimum conditions were using 4 M NaOH at 90°C for 3 hours able to obtain the highest quantity of silica. In addition, the concentration of extracted silica had highly significant difference compared to other conditions (p<0.01). The percent yield of silica gel was 40.25. The X-ray diffraction pattern indicated that silica gel produced from volcanic rock was amorphous silica, which could remove lead (Pb^{2+}) from synthetic wastewater up to 89.52–92.67%. Increasing contact time resulted in the increased ability of lead (Pb^{2+}) removal. The contact time of 60 minutes could remove 92.67% of lead from synthetic wastewater.

Keywords: Silica Gel, Volcanic Rock, Lead, Synthetic Wastewater

Please cite this article as: W. Kittook, A Thongjub, T. Sornpai, P. Preeprem, and W. Jungtanasombut, "Production of silica gel from volcanic rock for treatment of lead in synthetic wastewater," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 309–318, Apr.–Jun. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ปัญหามลพิษทางน้ำ เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในประเทศที่กำลังพัฒนา เนื่องจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมผลิตสีและเม็ดสี อุตสาหกรรมเครื่องหนัง อุตสาหกรรมผลิตสารกำจัดศัตรูพืช และอุตสาหกรรมการพิมพ์และการถ่ายภาพ อาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยเฉพาะโลหะตะกั่ว ซึ่งเป็นสารพิษที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ เกิดโรคมะเร็ง และไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางกายภาพ มีแนวโน้มที่จะถูกสะสมในสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสุขภาพพลานามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในน้ำ [1]–[3] ดังนั้นการบำบัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จึงได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบัน มีวิธีการต่างๆ มากมายที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย เช่น วิธีการตกตะกอนทางเคมี วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และวิธีอัลตราฟิลเตรชัน แต่วิธีที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียคือ วิธีการดูดซับ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก และสามารถนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ [4], [5] ซิลิกาเจลเป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องจากมีรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีความเสถียรเชิงกลและเชิงเคมีสูง [6]–[8]

วิธีการผลิตซิลิกาเจลแบบดั้งเดิมคือ นำโซเดียมซิลิเกต ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตซิลิกาเจล มาทำปฏิกิริยากับกรดในสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ซิลิกาเกิดการตกตะกอนเป็นซิลิกาเจล แต่เนื่องจากการผลิตโซเดียมซิลิเกตต้องใช้อุณหภูมิสูง จึงต้องใช้พลังงานในการผลิตมาก ดังนั้นต้นทุนในการผลิตจึงสูง [9]–[11] ด้วยเหตุนี้ทำให้มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ศึกษาการผลิตซิลิกาเจลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เช่น แกลบ [12] ขี้เถ้าแกลบ [13] ชานอ้อย [14] เถ้าชานอ้อย [15] เถ้าซังข้าวโพด [16] ข้าวสาลี [9] และเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม [10], [17] เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้แก่เศษวัสดุเหลือใช้ ซึ่งขั้นตอนในการผลิตซิลิกาเจลเริ่มจากนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเผาให้เป็นเถ้าเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน เพนโตส เส้นใย เซลลูโลส และลิกนิน ออกจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [2] จากนั้นทำการสกัดซิลิกาออกจากเถ้าด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะได้สารละลายโซเดียม ซิลิเกต และทำการตกตะกอนซิลิกาด้วยการปรับค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายโซเดียมซิลิเกตด้วยสารละลายกรด จะได้ซิลิกาเจล [9]–[16]

จังหวัดกาญจนบุรี เป็นจังหวัดหนึ่งในประเทศไทยที่มีแหล่งแร่ที่สำคัญ [18] แร่บางชนิด เช่น แร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นแร่อโลหะ มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 43.0–68.6 [19] ดังนั้นการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก และไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาให้เป็นเถ้าเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ จึงช่วยลดพลังงานและต้นทุนในการผลิต อีกทั้งยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับหินแร่ภูเขาไฟอีกด้วย แต่จากการตรวจเอกสารพบว่า มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่รายงานเกี่ยวกับการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ โดยงานวิจัยของ Mourhly และคณะ [20] ได้ทำการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูไมท์ โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จากนั้นทำการตกตะกอนซิลิกาเจลด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้ยังไม่มีงานวิจัยใดที่เปรียบเทียบผลของชนิดของสารละลายด่างต่อการผลิตซิลิกาเจลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและหินแร่ภูเขาไฟ แต่ในงานวิจัยของ Sudjarwo และ Bee [21] ได้รายงานว่า สารละลายด่างที่นิยมใช้ในการสกัดซิลิกา คือ สารละลาย NaOH และ KOH ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาผลของสารละลายด่างทั้งสองชนิดนี้ต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสีย โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ และศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ชนิดของสารละลายด่าง (KOH และ NaOH) ความเข้มข้นของสารละลายด่าง (1, 2, 3 และ 4 โมลาร์) และอุณหภูมิ (70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส) ที่ใช้ในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ และตอนที่ 2) ศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสีย โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาในการสัมผัส (30, 45 และ 60 นาที) ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนในการทดลองต่างๆ แสดงดังต่อไปนี้

2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ

2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ หินแร่ภูเขาไฟที่ใช้ในการทดลองนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจาก บริษัท 2 เอ็ม อโกรเท็ค จำกัด ซึ่งขั้นตอนการเตรียมหินแร่ภูเขาไฟเพื่อใช้ในการผลิตซิลิกาเจลเริ่มจาก ทำการร่อนหินแร่ภูเขาไฟด้วยตระแกรงร่อนเบอร์ 60 เพื่อให้ได้แร่ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร จากนั้นนำหินแร่ภูเขาไฟไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

2.1.2 การศึกษาผลของชนิดของสารละลายด่างต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ ในงานวิจัยนี้ สารละลายด่างที่ใช้ในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟคือ สารละลาย KOH และสารละลาย NaOH โดยความเข้มข้นที่ใช้คือ 4 โมลาร์ และตัวแปรที่ควบคุมคือ 1) อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) ต่อปริมาตร (มิลลิลิตร) ของหินแร่ภูเขาไฟกับสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัด 2) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด และ 3) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด ซึ่งในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) ต่อปริมาตร (มิลลิลิตร) ของหินแร่ภูเขาไฟกับสารละลายด่างที่ใช้คือ 1:50 และทำการสกัดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนการสกัดเริ่มจาก ชั่งหินแร่ภูเขาไฟใส่ลงในขวดพลาสติกที่ทนต่อความร้อนและแรงดันสูง จากนั้นเติมสารละลายด่างลงในขวดแล้วปิดฝาให้สนิท และเขย่าขวดเป็นจำนวน 30 ครั้ง แล้วนำขวดจุ่มลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยทุกๆ 30 นาที จะทำการเขย่าขวดเป็นจำนวน 30 ครั้ง

2.1.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายด่างต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ ในขั้นตอนนี้ทำการทดลองเหมือนขั้นตอนในข้อ 2.1.2 โดยตัวแปรที่ควบคุมคือ 1) อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) ต่อปริมาตร (มิลลิลิตร) ของหินแร่ภูเขาไฟกับสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัด 2) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 3) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ 4) ชนิดของสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัด ซึ่งชนิดของสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัดซิลิกาจะพิจารณาจากผลการทดลองในข้อ 2.1.2 เนื่องจากเป็นสารละลายด่างที่สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้ดีที่สุด โดยความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ศึกษาประกอบด้วย ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4 โมลาร์ ตามลำดับ

2.1.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ ในขั้นตอนนี้ทำการทดลองเหมือนขั้นตอนในข้อ 2.1.2 โดยตัวแปรที่ควบคุมคือ 1) อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) ต่อปริมาตร (มิลลิลิตร) ของหินแร่ภูเขาไฟกับสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัด 2) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ 3) ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัด ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัดซิลิกาจะพิจารณาจากผลการทดลองในข้อ 2.1.2 และ 2.1.3 เนื่องจากเป็นสภาวะที่สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้ดีที่สุด โดยอุณหภูมิที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2.1.5 การตกตะกอนซิลิกา การตกตะกอนซิลิกาเริ่มจากนำสารละลายที่ได้จากการสกัดหินแร่ภูเขาไฟโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด มาทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ให้มีค่าเป็นกลาง (pH=7) แล้วตั้งสารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ซิลิกาเจลเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ จากนั้นทำการกรองและล้างซิลิกาเจลด้วยน้ำกลั่น แล้วนำซิลิกาเจลที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วทำการบดซิลิกาเจลให้ละเอียดด้วยโกร่งบด และเก็บไว้ใน

โถดูดความชื้นเพื่อใช้ในขั้นตอนการศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลในการกำจัดโลหะหนักต่อไป

2.1.6 การวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาในสารละลาย ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาในสารละลายตามวิธีมาตรฐาน ASTM D859-00 [22] เพื่อหาความเข้มข้นของซิลิกาที่สกัดได้จากหินแร่ภูเขาไฟที่สภาวะต่างๆ ที่ศึกษา

2.1.7 การตรวจสอบวัฏภาคของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ วัฏภาคของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากหินแร่ภูเขาไฟถูกตรวจสอบโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrometer)

2.1.8 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ คณะผู้วิจัยได้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยแต่ละปัจจัยที่ศึกษาจะทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของซิลิกาที่สกัดได้ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Ducan Multiple's Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ

2.2 การศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสีย

2.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีโลหะตะกั่วในรูปของ Pb^{2+} อยู่แทนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อควบคุมปริมาณของโลหะตะกั่วในน้ำเสีย โดยการผลิตน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มจาก ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.2 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ ปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาสัมผัส ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยขั้นตอนการทดลองเริ่มจากชั่งซิลิกาเจลจำนวน 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติก จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไปในขวด ปิดฝาให้สนิท และทำการเขย่าเป็นจำนวน 30 ครั้ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ ตามที่ศึกษา แล้วทำการกรองสารละลาย และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AA-6200 ซึ่งร้อยละของการกำจัดตะกั่วของซิลิกาเจล สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (1)

$$\text{การกำจัดตะกั่ว (\%)} = \frac{C_{\text{เริ่มต้น}} - C_{\text{ที่เหลือ}}}{C_{\text{เริ่มต้น}}} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ $C_{\text{เริ่มต้น}}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$C_{\text{ที่เหลือ}}$ = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์หลังถูกบำบัดด้วยซิลิกาเจล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะตะกั่วด้วยซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ

คณะผู้วิจัยได้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำ และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของร้อยละของการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะตะกั่วด้วยซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ

3. ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ

3.1.1 การศึกษาผลของชนิดของสารละลายด่างต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ จากการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟด้วยสารละลาย KOH และสารละลาย NaOH โดยใช้ความเข้มข้น 4 โมลาร์ และทำการสกัดที่อุณหภูมิ 90

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า สารละลาย NaOH สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้ดีกว่าสารละลาย KOH อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p<0.01) แสดงดังตารางที่ 1 โดยปริมาณซิลิกาที่สกัดได้มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,357.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 1 ผลของชนิดของสารละลายด่างต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ

ชนิดของสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัด	ปริมาณซิลิกาที่สกัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SD	%RSD
สารละลาย NaOH	1357.50 a	0.10	0.01
สารละลาย KOH	851.13 b	18.76	2.20

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติของสิ่งทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายด่างต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายด่างต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ โดยทำการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ (1–4 โมลาร์) ณ อุณหภูมิ 90 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้ดีที่สุด โดยความเข้มข้นของซิลิกาที่สกัดได้แตกต่างจากที่ความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p<0.01) แสดงดังตารางที่ 2 ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณของซิลิกาที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น

3.1.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ จากการทดลองการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ (70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้ดีที่สุด และแตกต่างจากที่อุณหภูมิอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p<0.01) แสดงดังตารางที่ 3 ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณของซิลิกาที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ

ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการสกัด	ปริมาณซิลิกาที่สกัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SD	%RSD
1 โมลาร์	356.03 d	2.71	0.76
2 โมลาร์	662.57 c	9.61	1.45
3 โมลาร์	1101.67 b	7.57	0.69
4 โมลาร์	1379.67 a	19.88	1.44

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติของสิ่งทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

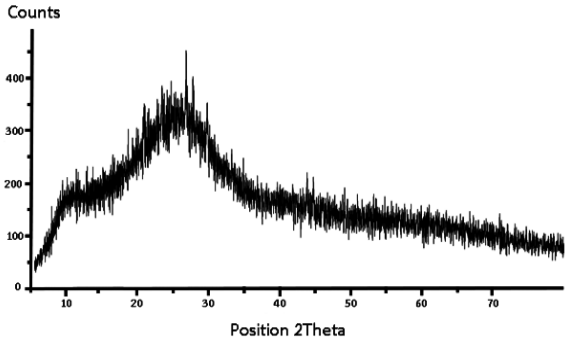
ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ

อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (องศาเซลเซียส)	ปริมาณซิลิกาที่สกัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SD	%RSD
70	640.74 c	11.47	1.79
80	892.30 b	16.71	1.87
90	1155.26 a	39.99	3.46

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติของสิ่งทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3.1.4 การตกตะกอนซิลิกา จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ (ชนิดของสารละลายด่าง ความเข้มข้นของสารละลายด่าง และอุณหภูมิ) ที่มีผลต่อการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ คณะผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ทำการสกัดด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงทำการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟโดยใช้สภาวะดังกล่าว และทำการตกตะกอนซิลิกาเจลด้วยสารละลายกรด H_2SO_4 ซึ่งร้อยละผลผลิตของซิลิกาเจลที่ได้มีค่าเท่ากับ 40.25±0.59 (%RSD = 1.47)

3.15 การตรวจสอบตรวจสอบวัฏภาคของซิลิกาเจล



รูปที่ 1 XRD Pattern ของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ

จากหินแร่ภูเขาไฟ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Pattern) ของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากหินแร่ภูเขาไฟ โดยใช้สภาวะในการผลิตดังแสดงในงานวิจัยนี้ บ่งชี้ว่า ซิลิกาเจลที่ผลิตได้เป็นซิลิกาอสัณฐาน (รูปที่ 1)

3.2 การศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสีย

ในการทดลองนี้ปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาสัมผัส ซึ่งประกอบด้วยที่ระยะเวลา 30, 45, และ 60 นาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากขึ้น ร้อยละของการกำจัดโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) จะเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟสามารถกำจัดโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากถึงร้อยละ 92.67 และแตกต่างจากที่ระยะเวลาอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p<0.01) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อร้อยละของการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละของการกำจัดตะกั่ว	SD	%RSD
30	89.52 c	0.64	0.71
45	90.80 b	0.96	1.05
60	92.67 a	0.29	0.31

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติของสิ่งทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟ ภายใต้สภาวะของการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดซิลิกาจากหินแร่ภูเขาไฟ เพื่อผลิตเป็นซิลิกาเจล คือ ทำการสกัดหินแร่ภูเขาไฟด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ร้อยละผลิตของซิลิกาเจลเท่ากับ 40.25 ทั้งนี้ เนื่องจากขนาดของโซเดียมไอออน (Na^+) มีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่าง Na^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จึงมากกว่า ส่งผลให้โอกาสที่ OH^- จะไปจับกับโมเลกุลของน้ำลดลง ดังนั้น OH^- จึงสามารถสัมผัสกับหินแร่ภูเขาไฟได้มากขึ้น ซิลิกาในหินแร่ภูเขาไฟจึงถูกกัดกร่อนและถูกสกัดออกมาได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [23] ที่ได้รายงานไว้ว่า ด่าง NaOH มีความสามารถในการกัดกร่อนแก้ว ซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ได้มากกว่าด่าง KOH

นอกจากนี้ เมื่อปริมาณโมลของ OH^- ที่ใช้ในการสกัดซิลิกา มีเพียงพอต่อการแยกซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟ หรืออีกนัยหนึ่งคือ เมื่ออัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ระหว่างสารละลายด่างกับซิลิกาในขณะที่เกิดปฏิกิริยามีความเหมาะสม จะทำให้สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพบว่า สารละลายด่าง NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ สามารถสกัดซิลิกาออกจากหินแร่ภูเขาไฟได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [24], [25] ที่รายงานว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณของซิลิกาที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น

ในขณะเดียวกัน หากอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดสูงขึ้น โมเลกุลของสารจะได้รับพลังงานสูงขึ้น ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และเกิดอัตราการชนกันระหว่างโมเลกุลสารเพิ่มขึ้น ดังนั้นการสกัดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จึงทำให้สามารถละลายซิลิกาออกมาได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [26]–[28] ที่รายงานว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณของซิลิกาที่สกัดได้จากวัตถุดิบจะเพิ่มขึ้น และจากรูปแบบของรังสีเอกซ์บ่งชี้ว่า ซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากหินแร่ภูเขาไฟเป็นซิลิกาอสัณฐาน เนื่องจากพีคที่ได้เป็นพีคกว้าง

และมีพีคหลักปรากฏอยู่ในช่วง 2θ = 15–35 องศา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่ได้รายงานไว้ [9], [10], [17], [20], [29] และเนื่องจากซิลิกาอสัณฐานมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าซิลิกาผลึก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า จึงทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าซิลิกาผลึก [30], [31] ดังนั้นซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นซิลิกาอสัณฐาน จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถดูดซับโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดี

จากผลการศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ สามารถสรุปได้ว่า ซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากหินแร่ภูเขาไฟสามารถกำจัดโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) ได้มากถึงร้อยละ 89.52–92.73 ดังนั้นซิลิกาเจลจากหินแร่ภูเขาไฟจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียได้ โดยปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย คือ ระยะเวลาในการสัมผัส หรือระยะเวลาในการดูดซับ ซึ่งจากผลการทดลองบ่งชี้ว่า เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัส พื้นผิวของตัวดูดซับ (ซิลิกาเจล) ที่ยังคงว่างอยู่จะมีโอกาสสัมผัสกับตัวถูกดูดซับ (โลหะหนัก) ได้มากขึ้น ดังนั้นการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณตัวถูกดูดซับ (โลหะหนัก) ที่เหลืออยู่ในสารละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [28], [32]–[34] ที่รายงานว่า เมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนทำให้ตัวดูดซับอิ่มตัวด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (ไอออนของโลหะหนัก) ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะคงที่

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.พลยุทธ ศุขสมิติ ที่ได้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคในการวิเคราะห์สาร บริษัท 2 เอ็ม อโกรเท็ค จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์มอบหินแร่ภูเขาไฟให้แก่คณะผู้วิจัย เพื่อใช้ในการทดลอง สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] I. Sheet, A. Kabbani, and H. Holail, “Removal of heavy metals using nanostructured graphite oxide, silica nanoparticles and silica/graphite oxide composite,” *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 130–138, 2014.

[2] P. Yusmaniar, A. Purwanto, E. A. Putri, and D. Rosyidah, “Adsorption of Pb(II) using silica gel composite from rice husk ash modified 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES)-activated carbon from coconut shell,” in *Proceedings AIP*, 2017, pp. 020034-1–020034-7.

[3] M. Amrollahi, M. T. Ghaneian, M. Tabatabaee, and M. H. Ehrampous, “Highly efficient adsorbent from removal heavy metal ions modified by a novel Schiff base ligand,” *Journal of Nanosturctures*, vol. 8, no. 4, pp. 374–382, 2018.

[4] R. Kumar, T. N. Abraham, and S. K. Jain, “The removal of cadmium ions from aqueous solutions using silica support immobilized with 2-hydroxyacetophenone-3-thiosemicarbazone,” in *Proceedings 2nd International Conference on Environmental Science and Development*, 2011, pp. 48–52.

[5] L. Sartore and K. Dey, “Preparation and heavy metal ions chelating properties of multifunctional polymer-grafted silica hybrid materials,” *Advance in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, pp. 1–11, 2019.

[6] L. B. Khalil, A. A. Attia, and Th. El. Nabarawy,

"Modified silica for the extraction of cadmium(II), copper(II) and zinc(II) ions from their aqueous solutions," *Adsorption Science & Technology*, vol. 19, no. 7, pp. 511–523, 2001.

[7] P. Tzvetkova and R. Nickolov, "Modified and unmodified silica gel used for heavy metal ions removal from aqueous solutions," *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 47, no. 5, pp. 498–504, 2012.

[8] S. S. Mohanty, N. Dash, S. P. Nanda, and R. K. Dey, "Synthesis, characterization and removal of heavy metal ions from water bodies using novel hybrid materials bases on silica," *ISOR Journal of Applied Chemistry*, vol. 9, no. 10, pp. 2278–5736, 2016.

[9] K. G. Patel, N. M. Misra, and R. R. Shettigar, "Preparation and characterization of silica gel from wheat straw," *International Journal of Chemical Engineering and Application*, vol. 7, no. 5, pp. 344–347, 2016.

[10] P. S. Utama, R. Yamsaengsung, and C. Sangwichien, "Silica gel derived from plam oil mill fly ash," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 121–126, 2018.

[11] P. Suansomboon, M. Bunrak, and W. Jungtanasombut, "Production and characterization of silica gel from hydrochloric acid treated sugarcane bagasse," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 27, no. 2, pp. 226–237, 2019 (in Thai).

[12] F. Ghorbani, A. M. Sanati, and M. Maleki, "Production of silica nanoparticles from rice husk as agricultural waste by environmental friendly technique," *Environmental Studies of Persian Gulf*, vol. 2, no. 1, pp. 56–65, 2015.

[13] R. S. Kumar, M. Vinjamur, and M. Mukhopadhyay, "A simple process to prepare silica aerogel microparticles from rice husk ash," *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 4, no.5, pp. 321–325, 2013.

[14] H. Mokhtar and R. M. Tajuddin, "The effect of nanosilica extracted from sugarcane bagasse on formulation of flat sheet nanofiltration membrane," *International Journal of Chemical Engineering and Application*, vol. 7, no. 5, pp. 323–326, 2016.

[15] V. Hariharan and G. Sivakumar, "Studies on synthesized nanosilica obtained from bagasse ash," *International Journal of ChemTech Research*, vol. 5, no. 3, pp. 1263–1266, 2013.

[16] E. A., Okoronkwo, P. E. Imoisili, and S. O. O. Olusunle, "Extraction and characterization of amorphous silica from corn cob ash by sol-gel method," *Chemistry and Material Research*, vol. 3, no.4, pp. 68–72, 2013.

[17] P. S. Utama, R. Yamsaengsung, and C. Sangwichien, "Production and characterization of precipitated silica from plam oil mill fly ash using CO_2 impragnation and mechanical fragmentation," *Brazillian Journal of Chemical Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 531–530, 2019.

[18] Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment. *District classification for geological management and mineral resources Kanchanaburi province*. Bangkok: Advanced Vision Service Company Limited Press, 2008 (in Thai).

[19] T. Phungrassami, W. Pisitro, S. Atipan, and P. Limaunsanno. *Academic report. Mineralogy book series 3*, mineral feldspar. Songkla: Office Of Scientific Instrument and Testing, Prince of

Songkla University Press, 2015 (in Thai).

[20] A. Mourhly, M. Khachani, A. El. Hamidi, M. Kacimi, M. Halim, and S. Arsalane, "The synthesis and characterization of low-cost mesoporous silica SiO_2 from local pumice rock," *Nanomaterials and Nanotechnology*, vol. 5, no. 35, pp. 1–7, 2015.

[21] W. A. A. Sudjarwo and M. M. F. Bee, "Synthesis of silica gel from waste glass bottles and its application for the reduction of free fatty acid (FFA) on waste cooking oil," in *Proceedings AIP*, 2017, pp. 020019-1–020019-6.

[22] *Standard test method for silica in water*, ASTM D859-00, 2000.

[23] S. T. Bashir, L. Yang, J. J. Liggat, and J. L. Thomason, "Kinetics of dissolution of glass fiber in hot alkaline solution," *Journal of Materials Science*, vol. 53, pp. 1710–1722, 2018.

[24] I. U. Haq, K. Akhtar, and A. Malik, "Effect of experimental variables on the extraction of silica from the rice husk ash," *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, vol. 36, no. 3, pp. 382–387, 2014.

[25] N. U. Amin, S. Khattak, S. Noor, and I. Ferroze, "Synthesis and characterization of silica from botoom ash of sugar industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 117, pp. 207–211, 2016.

[26] P. Pengthamkeerati, T. Satapanajaru, N. Sananwai, A. Boonrite, and P. Welutung, "Extracting silica from biomass fly ash by using alkaline hydrothermal treatment and silica precipitation by using organic acids," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 175–182, 2018 (in Thai).

[27] J. R. Dodson, "Wheat straw ash and its use as a silica source," Ph.D. dissertation, Department of Chemistry, University of York, 2011.

[28] A. El. S. Manaa, "Extraction of highly pure silica from local rice straw and activation of the left carbon for chromium (VI) adsorption," *Chemical Technology An Indian Journal*, vol. 10, no. 6, pp. 242–251, 2015.

[29] L. Simatupang, R. Siburian, P. Sitanggang, M. Doloksaribu, M. Situmorang, and H. Marpaung, "Synthesis and application of silica gel base on Mount Sinabung's fly ash for Cd(II) removal with fixed bed column," *Rasayan Journal of Chemistry*, vol. 11, no. 2, pp. 819–827, 2018.

[30] P. Worathanakul, "Sol-Gel technology: Synthesis of silica from sugarcane bagasse," *Technology Promotion and Innomag Magazine*, vol. 36, no. 209, pp. 39–41, 2010 (in Thai).

[31] K. Sawaspath, "Effect of nanosilica and calcium carbonate activation using microwave on properties of dicalcium silicate," M.S. thesis, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2015 (in Thai).

[32] A. Said, M. P. Hakim, and Y. Rohyami, "The effect of contact time and pH on methylene blue removal by volcanic ash," in *Proceedings ICCBES'14*, 2014, pp. 11–13.

[33] Rahmi, and Lelifajri, "Influence of heat treatment on eggshell particles as low cost adsorbent for methylene blue removal from aqueous solution," *Rasayan Journal of Chemistry*, vol. 10, no. 2, pp. 634–642, 2017.

[34] A. A. Alghamdi, A. B. A. Odayni, W. S. Saeed, A. A. Kahtani, F. A. Alharthi, and T. Aouak, "Efficient adsorption of lead (II) from aqueous phase solutions using polypyrrole-based activated carbon," *Materials*, vol. 12, no. 12, pp. 1–16, 2019.