

การสังเคราะห์วัสดุพรุนสูงจากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ Synthesis of Highly Porous Materials from Industrial Waste Using Adsorbent

ฤดีรัตน์ สันตะโก,^{1*} วรณนิศา แก้ววิชิต,¹ สุธีรพันธ์ พันธุ์เลิศ² และ พิทักษ์ เหล่ารัตน์กุล²
Rudeerat Suntako,^{1*} Wannisa Kaeowwichit,¹ Suteerapun Punlert² and Pitak Laoratanakul²

Received 6 May 2024, Revised 29 July 2024, Accepted 1 August 2024

ABSTRACT

Highly porous materials from industrial waste with ratios of perlite, rice husk, and waste glass, 60:20:20, 60:30:10, and 60:10:30 wt% were burnt at a temperature of 1160°C. The highly porous materials of phase structure, density, water absorption, strength and microstructure were studied. It was found that the highly porous materials with the ratio of perlite, rice husk, and waste glass that was 60:30:10 wt% showed the optimum properties for adsorbent. The phase structure showed SiO₂ in a quartz form and in a cristobalite form. The highly porous materials inhibited the highest water adsorption of 28.61%. The density and strength of the highly porous materials showed 1434.56 kg/m³ and 1379.60 N, respectively, especially, the presence of the small and continuous pore sizes in structure uniform compared to the other ratios. As a result, the highly porous materials can be synthesized with industrial waste. Besides, it is an alternative for increasing the value of waste.

Keywords: Porous materials, Waste, Adsorbent, Rice husk, Perlite

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์วัสดุพรุนสูงจากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมด้วยอัตราส่วนผสมเปอร์เซนต์โดยหนักของเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ และเศษแก้วเป็น 60:20:20, 60:30:10 และ 60:10:30 ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1160 องศาเซลเซียส จากนั้นนำวัสดุพรุนสูงที่สังเคราะห์ได้มาการศึกษาโครงสร้างเฟส ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาค พบว่าวัสดุพรุนสูงที่มีอัตราส่วนของเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ และเศษแก้วเป็น 60:30:10 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ มีโครงสร้างเฟสของซิลิกาที่อยู่ในรูปของของควอตซ์และคริสโตบาไลต์ มีการดูดซึมน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 28.61 % ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1434.56 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังรับแรงอัด 1379.60 นิวตัน โดยเฉพาะการมีรูพรุนขนาดเล็กและต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น จากผลการทดลองจะเห็นว่าวัสดุพรุนสูงสามารถสังเคราะห์ด้วยวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมได้และยังเป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: วัสดุพรุน วัสดุเหลือใช้ วัสดุดูดซับ ซีเถ้าแกลบ เพอร์ไลต์

^{1*} ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen Sub-District, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Khlong Nueng Sub-District, Khlong Luang District, Pathum Thani 12120, Thailand.

* Corresponding author: E-mail address: faasrrs@ku.ac.th

คำนำ

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นและเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสังคมและเศรษฐกิจทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะมลพิษในแหล่งน้ำที่มากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการปล่อยน้ำเสียจากแหล่งชุมชน การทำเกษตรกรรม โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลถึงคุณภาพของแหล่งน้ำทั้งในลักษณะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทำให้เกิดมลพิษในแหล่งน้ำมากขึ้นที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำที่สำคัญมากต่อสิ่งแวดล้อม (Bartolomeu *et al.*, 2018, Stackelberg *et al.*, 2004) โดยกระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับนั้นสำคัญอย่างมากในกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการดักจับโมเลกุลหรืออนุภาคมาเกาะจับและติดบนผิว (Younas *et al.*, 2021) ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ สมบัติของตัวดูดซับ สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ และเวลา (Gopinath *et al.*, 2021, Naef *et al.*, 2021) โดยคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุดูดซับ คือ มีความพรุนตัวสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายในโครงสร้าง คือ ถ้ามีรูพรุนมากและสม่ำเสมอจะทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับได้มากนั่นเอง (Hameed *et al.*, 2020, Yu *et al.*, 2015, Han *et al.*, 2018) ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถมีบริเวณพื้นผิวและบริเวณพื้นผิวภายในโพรงของตัวดูดซับมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ในปริมาณที่มากขึ้นนั่นเอง (Afroze *et al.*, 2018, Sen *et al.*, 2017, Sud *et al.*, 2008)

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดนำวัสดุเหลือใช้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการสังเคราะห์วัสดุพรุนสูงเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุพรุนสูงที่ดี คือ มีรูพรุนสูงและสม่ำเสมอ มีค่าการดูดซึมน้ำสูง ความหนาแน่นต่ำ และกำลังรับแรงอัดที่มาก เพื่อสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้และมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี (Haque A.N.M.A. *et al.*,

2022) จากคุณสมบัติของวัสดุพรุนที่ดี จึงมีความจำเป็นที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุในการสังเคราะห์วัสดุพรุนสูง คือ ต้องมีน้ำหนักเบา มีความพรุนตัวสูง สามารถดูดซับน้ำได้ดี และมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ (Du *et al.*, 2023) โดยวัสดุเหลือใช้ ได้แก่ เพอร์ไลต์เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการสลายตัวของหินภูเขาไฟ ซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูง มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และสามารถดูดซับน้ำได้มาก (Makrygiannis *et al.*, 2022) โดยส่วนใหญ่มักถูกนำไปใช้ในงานด้านก่อสร้าง เพื่อลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างและเป็นฉนวนกันความร้อนและความเย็นได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการรักษาและปรับสภาพดินทางเกษตรกรรมได้อีกด้วย ซีเมนต์กลบได้จากการนำกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยซีเมนต์กลบ มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก มีความพรุนน้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวสูง ดูดซับความชื้นและสารเคมีได้ดี (อรอนงค์ และคณะ, 2554, Jiang *et al.*, 2019) และเศษแก้วเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแก้วและจากการใช้งาน ซึ่งมีองค์ประกอบซิลิกาในปริมาณมาก สามารถเพิ่มแข็งแรงให้กับวัสดุพรุนได้ (Oenema *et al.*, 2020, Rad L.R. *et al.*, 2021, Sahoo *et al.*, 2019, Sun *et al.*, 2014) การนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ทดแทนสารตั้งต้นที่ใช้ในปัจจุบัน จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตและยังเน้นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านการดูดซับต่อไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการสังเคราะห์วัสดุพรุนสูงจากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมและวัสดุจากธรรมชาติ ได้แก่ เพอร์ไลต์ ซีเมนต์กลบ และเศษแก้ว ที่ผ่านกระบวนการเผา แล้วศึกษาสมบัติของวัสดุพรุนสูงที่สังเคราะห์ได้โดยศึกษาโครงสร้างเฟส ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาค เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุพรุนสูงที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

ทำการบดซีเถ้าแกลบและเพอร์ไลต์ด้วยเครื่องบดผสมเป็นเวลา 1 และ 1.50 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 212 และ 300 ไมโครเมตรตามลำดับ สำหรับเศษแก้วทำการบดละเอียดแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 533 ไมโครเมตร

การศึกษาโครงสร้างเฟสของวัตถุดิบ

ศึกษาโครงสร้างเฟสของซีเถ้าแกลบ เพอร์ไลต์ และเศษแก้วด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่มุม 2θ ตั้งแต่ 10 ถึง 70 องศา

การขึ้นรูปวัสดุพูนสูง

ทำการบดผสมเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ และเศษแก้ว ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (Table 1) โดยทำการบดผสมเป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องบดผสม จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องปั้นผสมโดยการฉีดพ่นละอองในระหว่างการขึ้นรูปเพื่อให้ส่วนผสมจับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมขนาด 15-20 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้วัสดุพูนสูงก่อนเผา แล้วนำไปเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง 1160°C ด้วยอัตราการเผา 500°C ต่อชั่วโมง และใช้ระยะเวลาในการเผาที่อุณหภูมิสูงสุด 5 นาที จะได้วัสดุพูนสูงหลังเผา

การศึกษาโครงสร้างเฟสของวัสดุพูนสูง

ศึกษาโครงสร้างเฟสของวัสดุพูนสูงที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่มุม 2θ ตั้งแต่ 10 ถึง 70 องศา

การศึกษาความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของวัสดุพูนสูง

นำวัสดุพูนสูงในแต่ละอัตราส่วน จำนวน 5 ตัวอย่าง ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปทำการต้ม โดยใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำลงไป 200 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิความร้อนของเตาไฟฟ้า 250°C เป็นเวลา

5 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นตัวลง 19 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักอิมมิดิเนต แล้วใช้กระดาษทิชชูซับที่ผิวของวัสดุพูนสูงก่อนนำไปชั่งน้ำหนักอิมมิดิเนตผิวแห้งในอากาศ เพื่อหาค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ

การศึกษากำลังรับแรงอัดของวัสดุพูนสูง

ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุพูนสูงในแต่ละอัตราส่วนด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Instron 4502 โดยใช้หม้อเตอร์ในการขับเคลื่อนหัวทดสอบให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งผ่านเกลียวหนอนเพื่อให้เกิดแรงอัดหรือแรงกด

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุพูนสูง

ทำการขัดวัสดุพูนสูงด้วยเครื่องขัดชิ้นงานให้ผิวเรียบเป็นระนาบก่อน แล้วนำไปศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนสูงด้วยกล้อง Optical Microscope (OM) และศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคตัดขวางของวัสดุพูนสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงสร้างเฟสของเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ เศษแก้ว และวัสดุพูนสูง

จากการศึกษาโครงสร้างเฟสของเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ เศษแก้ว และวัสดุพูนสูง (Figure 1) พบว่าเพอร์ไลต์มีโครงสร้างเฟสของซิลิกา (SiO_2) ที่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) (Inan *et al.*, 2022) (Figure 1(a)) ซีเถ้าแกลบมีโครงสร้างเฟสของซิลิกา (SiO_2) ที่อยู่ในรูปแบบอสัณฐานรวมอยู่ด้วยที่อยู่ในรูปของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) (Shi *et al.*, 2022) (Figure 1(b)) เศษแก้วมีโครงสร้างเฟสแบบอสัณฐานของซิลิกา (SiO_2) ที่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) (Ahmad *et al.*, 2022) (Figure 1(c)) สำหรับโครงสร้างเฟสของวัสดุพูนสูงที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ และเศษแก้วด้วยอัตราส่วน 60:30:10 พบว่ามีโครงสร้างเฟสของซิลิกา (SiO_2) ที่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) และในรูปของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) (Figure

1(d)) ซึ่งยืนยันได้ว่าวัสดุรูปทรงที่เตรียมได้มีส่วนผสมโครงสร้างเฟสของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วเป็นส่วนประกอบในวัสดุรูปทรงนั้นเอง

ความหนาแน่นวัสดุรูปทรงสูง

ความหนาแน่นของวัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วแตกต่างกัน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1160 °C (Figure 2) พบว่าวัสดุรูปทรงสูงที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วด้วยอัตราส่วน 60:20:20, 60:30:10 และ 60:10:30 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1519.59, 1434.56 และ 1371.36 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

การดูดซึมน้ำของวัสดุรูปทรงสูง

การดูดซึมน้ำของวัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วแตกต่างกัน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1160 °C (Figure 3) พบว่าวัสดุรูปทรงสูงที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วด้วยอัตราส่วน 60:20:20, 60:30:10 และ 60:10:30 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 22.38, 28.61 และ 21.53 % ตามลำดับ จะเห็นว่าวัสดุรูปทรงที่มีอัตราส่วน 60:30:10 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด

กำลังรับแรงอัดของวัสดุรูปทรงสูง

กำลังรับแรงอัดของวัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วแตกต่างกัน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1160 °C (Figure 4) พบว่าวัสดุรูปทรงสูงที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วด้วยอัตราส่วน 60:20:20, 60:30:10 และ 60:10:30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1932.87, 1379.60 และ 1432.03 นิวตัน ตามลำดับ

โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุรูปทรงสูง

โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วแตกต่างกัน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1160 °C ที่ศึกษาด้วยกล้อง Optical Microscope (OM) กำลังขยาย 20 เท่า (Figure 5) พบว่าวัสดุรูปทรงสูงที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ชี้ถั่วแกลบ และเศษแก้วที่แตกต่างกัน มีลักษณะโครงสร้างจุลภาค

ภายในที่แตกต่างกัน โดยวัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วน 60:20:20 มีลักษณะโครงสร้างภายในที่มีความพรุน และพบขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่สูงจะเกิดรูพรุนจะมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมาก เนื่องจากมีแรงดึงผิวลดลงหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้ฟองอากาศภายในชิ้นงานมีการรวมตัวกันจนกลายเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ ก่อนที่จะพยายามดันตัวออกมาภายนอกชิ้นงาน (Mishra *et al.*, 2010, Xu *et al.*, 2011) (Figure 5(a)) วัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วน 60:30:10 มีลักษณะโครงสร้างภายในที่มีรูพรุนขนาดเล็กปริมาณมาก เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงรูพรุนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อน ทำให้วัตถุดิบที่ผสมเกิดการหลอมเหลว และเกิดฟองอากาศจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ จนเมื่อเย็นตัวลง ฟองอากาศก็จะถูกกักไว้ภายในซึ่งนำไปสู่การเกิดช่องว่างของรูพรุน (Mishra *et al.*, 2010, Xu *et al.*, 2011) (Figure 5(b)) วัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วน 60:10:30 มีลักษณะโครงสร้างภายในมีลักษณะของฟองอากาศเกิดขึ้นเป็นรูพรุนที่ผิว ซึ่งมีขนาดและปริมาณของฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเผา เนื่องจากอัตราส่วนของปริมาณเศษแก้วที่มากส่งผลให้เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาอุณหภูมิสูง วัตถุดิบจะเกิดการหลอมเหลวมาก ทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ (Figure 5(c)) จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุรูปทรงด้วยกล้อง Optical Microscope (OM) จะเห็นว่าวัสดุรูปทรงสูงที่มีอัตราส่วน 60:20:20 มีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่จำนวนมาก วัสดุรูปทรงที่มีอัตราส่วน 60:30:10 มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยขนาดของรูพรุนมีความสม่ำเสมอ และมีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดรูพรุนที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ สำหรับวัสดุรูปทรงที่มีอัตราส่วน 60:10:30 มีรูพรุนขนาดใหญ่ และขนาดของรูพรุนไม่สม่ำเสมอ

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคตัดขวางของวัสดุรูปทรงสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 100 (Figure 6) เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นผิวภายในให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า มีรูพรุนในโครงสร้างภายในของวัสดุรูพรุนสูงที่มีขนาดแตกต่างกัน มีทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ปะปนกัน เนื่องจากมีอัตราส่วนของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน รวมถึงการกระจายตัวของซีเมนต์อีกด้วย และพบรูพรุนต่อเนื่องในวัสดุรูพรุนสูง โดยรูพรุนต่อเนื่อง คือ รูพรุนขนาดเล็กๆ ที่อยู่ภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำได้อย่างมาก จากภาพ SEM พบว่าวัสดุรูพรุนสูงที่มีอัตราส่วน 60:20:20 มีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและใหญ่ โดยมีทั้งรูพรุนแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง (Figure 6(a)) วัสดุรูพรุนที่มีอัตราส่วน 60:30:10 มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและเป็นรูพรุนแบบต่อเนื่อง (Figure 6(b)) สำหรับวัสดุรูพรุนที่มีอัตราส่วน 60 : 10 : 30 มีรูพรุนขนาดใหญ่ และเป็นรูพรุนแบบไม่ต่อเนื่อง (Figure 6(c))

ดังนั้นจากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าวัสดุรูพรุนสูงที่มีอัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ซีเมนต์ และเศษแก้ว 60:30:10 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากมีค่าการดูดซับน้ำสูงที่สุดกว่าอัตราส่วนอื่นและมีรูพรุนขนาดเล็กที่เป็นลักษณะแบบรูพรุนต่อเนื่อง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและยังเป็น

รูพรุนต่อเนื่องจำนวนมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายในโครงสร้าง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุดูดซับได้อย่างดีเยี่ยม เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของวัสดุรูพรุน จะพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุรูพรุนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าวัสดุรูพรุนที่มีอัตราส่วน 60:30:10 จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าวัสดุรูพรุนที่มีอัตราส่วน 60:10:30 เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างภายในที่มีปริมาณเศษแก้วมากกว่า ทำให้มีการหลอมเหลวในปริมาณมาก เกิดฟองอากาศขึ้นเป็นรูพรุนที่ผิวขนาดใหญ่ การเกิดรูพรุนไม่สม่ำเสมอ และไม่มีการเกิดรูพรุนที่ต่อเนื่องภายในโครงสร้างภายใน จึงทำให้มีความหนาแน่นน้อยกว่า แต่มีกำลังอัดมากกว่าอยู่เล็กน้อย ในขณะที่วัสดุรูพรุนอัตราส่วน 60:30:10 มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของรูพรุนมีความสม่ำเสมอ และมีรูพรุนต่อเนื่องจำนวนมาก อย่างไรก็ตามวัสดุรูพรุนอัตราส่วน 60:30:10 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด 1379.60 นิวตัน ก็ยังมีความแข็งแรงที่สามารถมีความคงทนต่อการใช้งานในระยะยาวและสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์เป็นวัสดุดูดซับได้ดี

Table 1 Preparation formula of highly porous materials from perlite, rice husk and waste glass

Perlite (wt%)	Rice husk (wt%)	Waste glass (wt%)
60	20	20
60	30	10
60	10	30

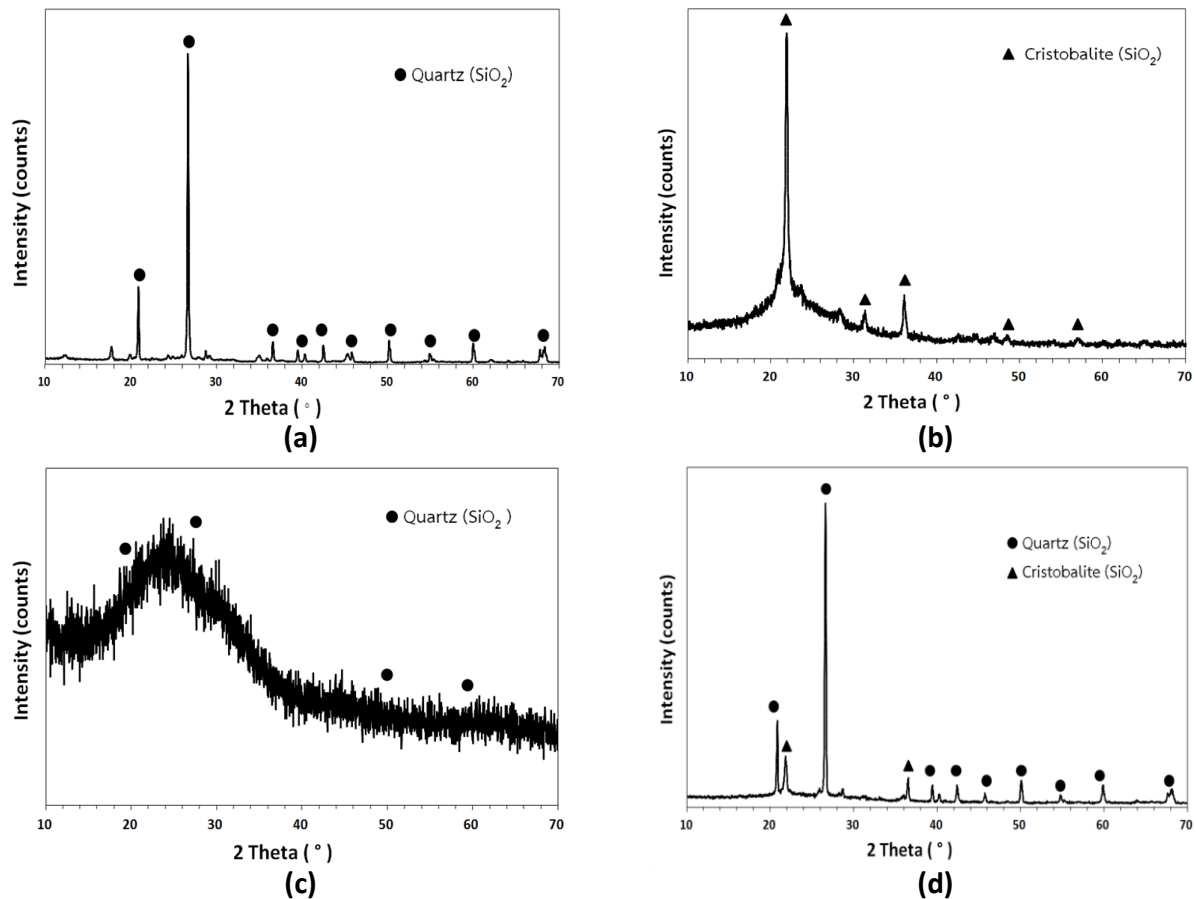


Figure 1 Phase structure of (a) perlite, (b) rice husk (c) waste glass and (d) porous material with ratio of perlite : rice husk : waste glass of 60:30:10

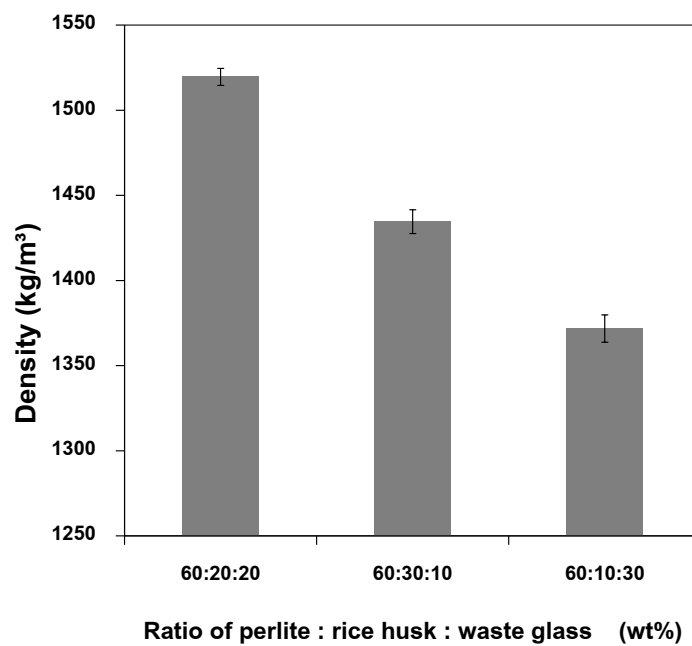


Figure 2 Density of porous materials with different ratios of perlite : rice husk : waste glass at temperature 1160°C

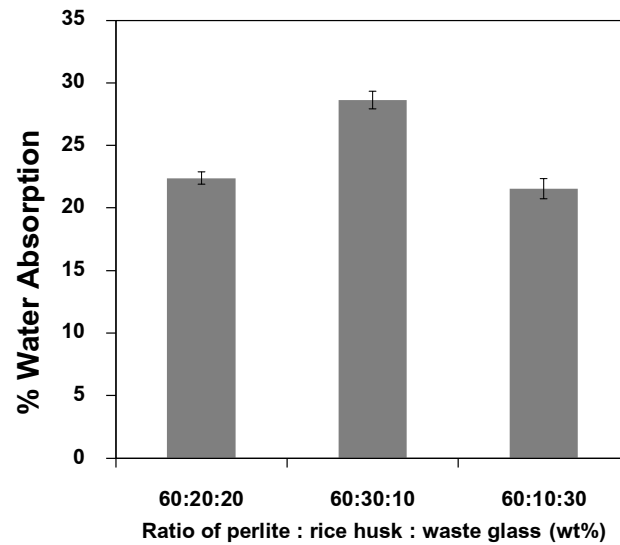


Figure 3 Water absorption of porous materials with different ratios of perlite : rice husk : waste glass at temperature 1160°C

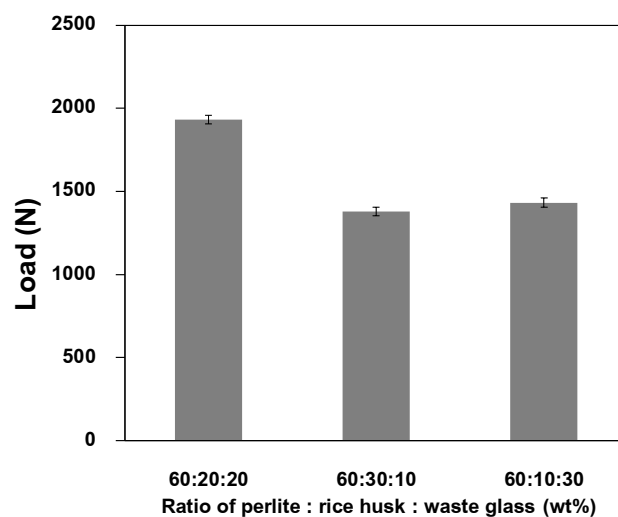


Figure 4 Loading of porous materials with different ratios of perlite : rice husk : waste glass at temperature 1160°C

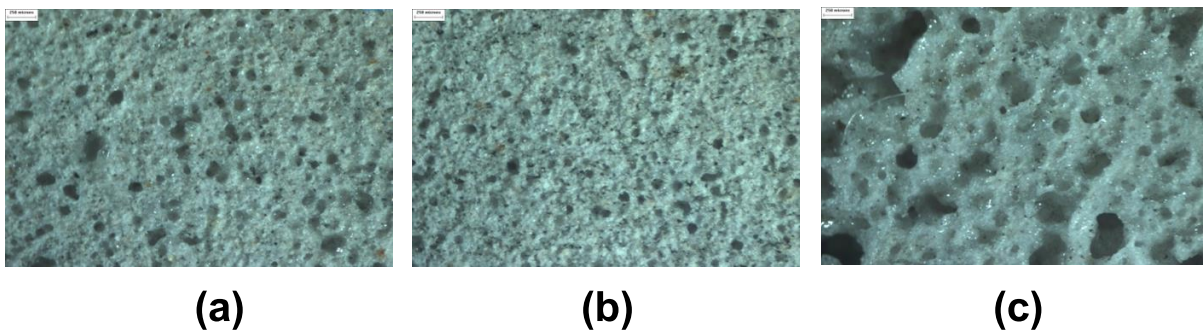


Figure 5 OM microstructures at 20 magnification of porous materials with different ratios of perlite : rice husk : waste glass at temperature 1160°C (a) 60:20:20 (b) 60:30:10 และ (c) 60:10:30

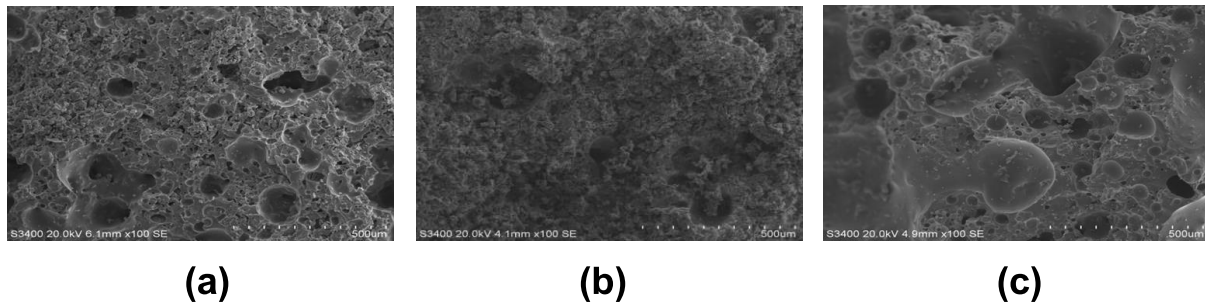


Figure 6 SEM images at 100 magnification of porous materials with different ratios of perlite : rice husk : waste glass at temperature 1160°C (a) 60:20:20 (b) 60:30:10 และ (c) 60:10:30

สรุป

จากการสังเคราะห์วัสดุรูพรุนสูงที่อัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ และเศษแก้ว แตกต่างกัน ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1160°C พบว่า อัตราส่วนในการสังเคราะห์วัสดุรูพรุนสูงที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วนผสมที่มีเพอร์ไลต์ ซีเถ้าแกลบ และเศษแก้ว เท่ากับ 60 : 30 : 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีโครงสร้างเฟสของซิลิกา (SiO_2) ที่อยู่ในรูปของของควอตซ์ (Quartz) และในรูปของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1434.56 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 28.61 เปอร์เซ็นต์ และกำลังรับแรงอัด 1379.60 นิวตัน ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อเป็นวัสดุดูดซับได้ดีและยังเป็นทางเลือกในการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาเพิ่มมูลค่าอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่การทำงานวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- อรอนงค์ จุลพันธ์, ธงไทย วิฑูรย์ และเมตตา เจริญพานิช. (2554). การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซพอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ. *วิศวกรรมสาร มก.* 24(75). 103-120.
- Afroze S., and Sen T.K. (2018). A review on heavy metal ions and dye adsorption from water by agricultural solid waste adsorbents. *Water, Air and Soil Pollution*, 229, 225(2018). doi: 10.1007/s11270-018-3869-z
- Ahmad J., Martínez-García R., de-Prado-Gil J., Irshad K., El-Shorbagy M.A., Fediuk R., and Vatin N.I. (2022). Concrete with partial substitution of waste glass and recycled concrete aggregate. *Materials*, 15(2), 430. doi: 10.3390/ma15020430
- Bartolomeu M., Neves M., Faustino M., and Almeida A. (2018). Wastewater chemical contaminants: Remediation by advanced oxidation processes. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 17, 1573-1598. doi: 10.1039/c8pp00249e.
- Du J., Ma A., Wang X., and Zheng X. (2023). Review of the preparation and application of porous materials for typical coal-based solid waste. *Materials*, 16, 5434. doi: 10.3390/ma16155434.

- Gopinath, K.P., Vo D.V., Prakash D.G., Joseph A., Viswanathan S., and Arun J. (2021). Environmental applications of carbon-based materials: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 557-582. doi: 10.1007/s10311-020-01084-9.
- Hameed A. Alharbi A., Abdelrahman E., Mabrouk E., Hegazey R., Algethami E., Al-Ghamdi Y.O., and Youssef H.M. (2020). Facile hydrothermal fabrication of analcime and zeolite X for efficient removal of Cd(II) ions from aqueous media and polluted water. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30, 4117-4128. doi: 10.1007/s10904-020-01565-y.
- Han L., Song J., Zhang Q., Liu T., Luo Z., and Lu A. (2018). Synthesis, structure and properties of $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ transparent glass-ceramics. *Silicon*, 10, 2685-2693. doi: 10.1007/s12633-018-9806-3.
- Haque A.N.M.A., Sultana N., Sayem A.S.M., and Smriti S.A. (2022). Sustainable adsorbents from plant-derived agricultural wastes for anionic dye removal: A review. *Sustainability*, 14(17), 11098. doi: 10.3390/su141711098.
- Inan S., Kusumkar V.V., Galamboš M., Viglašová E., Roskopfová O., and Da no M. (2022). Isotherm, kinetic, and selectivity studies for the removal of ^{133}Ba and ^{137}Cs from aqueous solution using turkish perlite. *Materials*, 15(21), 7816. doi: 10.3390/ma15217816
- Jiang Z., and Hu D. (2019). Molecular mechanism of anionic dyes adsorption on cationized rice husk cellulose from agriculture wastes. *Journal of Molecular Liquids*, 276, 105-114. doi: 10.1016/j.molliq.2018.11.153.
- Makrygiannis I., and Tsetsekou A. (2022). Effect of expanded perlite in the brick mixture on the physicochemical and thermal properties of the final products. *Journal of Composites Science*, 6(7), 211. doi: 10.3390/jcs6070211.
- Mishra D.P., and Das S.K., (2010). A study of physico-chemical and mineralogical properties of talcher coal fly ash for stowing in underground coal mines. *Materials Characterization*, 61(11), 1252-1259. doi: 10.1016/j.matchar.2010.08.008.
- Naef. A., Qasem A., Ramy H.M., and Dahiru U.L. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Clean Water*. 4, 36. doi: 10.1038/s41545-021-00127-0.
- Oenema J., Harmel J., Velez R., Meijerink M., Eijsvogel W., Poursaeidesfahani A., Vlugt T.J., Zecevic J., and Jong K.P. (2020). Influence of nanoscale intimacy and zeolite micropore size on the performance of bifunctional catalysts for n-heptane hydroisomerization. *ACS Catalysis*, 10(23), 14245-14257. doi: 10.1021/acscatal.0c03138.
- Rad L.R., and Anbia M. (2021). Zeolite-based composites for the adsorption of toxic matters from water: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106088. doi: 10.1016/j.jece.2021.106088.
- Sahoo M., and Kale P. (2019). Restructured porous silicon for photovoltaic: A review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 289, 109619. doi: 10.1016/j.micromeso.2019.109619.

- Sen T.K. (2017). *Air, gas and water pollution control using industrial and agricultural solid wastes adsorbents* (1 Ed.). New York: .CRC-Press/Taylor & Francis.
- Shi Y., Qian M., Wang X., Zhang W., Zhang X., and Wang X., Zhu Y. (2022). Effect of rice husk-based silica on the friction properties of high density polyethylene composites. *Materials*, 15(9), 3191. doi: 10.3390/ma15093191.
- Stackelberg P.E., Furlong E.T., Meyer M.T., Zaugg S.D., Henderson A.K., and Reissman D.B. (2004). Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant. *Science of The Total Environment*, 329(1-3), 99-113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.03.015.
- Sud D., Mahajan G., and Kaur M.P. (2008). Agriculture waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions-A review. *Bioresource Technology*, 99(14), 6017-6027. doi: 10.1016/j.biortech.2007.11.064.
- Sun Z., Li M., and Zhou Y. (2014). Recent progress on synthesis, multi-scale structure, and properties of Y-Si-O oxides. *International Materials Reviews*, 59(7), 357. doi: 10.1179/1743280414Y.0000000033.
- Xu X., Li Q., Cui H., Pang J., Sun L., An H., and Zhai J. (2011). Adsorption of fluoride from aqueous solution on magnesia-loaded fly ash cenospheres. *Desalination*, 272(1-3), 233-239. doi: 10.1016/j.desal.2011.01.028.
- Younas F., Mustafa A., Farooqi Z.U.R., Wang X., Younas S., Mohy-Ud-Din W., Hameed M.A., Abrar M.M., Maitlo A.A., Noreen S., and Hussain M.M. (2021). Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations and environmental implications. *Water*, 13(2), 215. doi: 10.3390/w13020215.
- Yu Y., Guo D., and Fang J. (2015). Synthesis of silica aerogel microspheres by a two-step acid-base sol-gel reaction with emulsification technique. *Journal of Porous Materials*, 22, 621-628. doi: 10.1007/s10934-015-9934-8.