วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 29 (ฉบับที่ 3) กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2567
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 29 (No.3) September – December 2024 บทความวิจัย

การศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับโลหะบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกเม็ดบ๊วย

Study of Carbon Dioxide Adsorption on Metals Supported on Activated Carbon Prepared from Apricot Stones

ธนศักดิ์ เคียนทอง[1], ชาญณรงค์ อัศวเทศานุภาพ[2] และ มาลี สันติคุณาภรณ์[1*]

Thanasak Keanthong[1], Channarong Asavatesanupap[2] and Malee Santikunaporn[1*]

[1]*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประเทศไทย*

[2]*ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประเทศไทย*

[1]*Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University, Thailand*

[2]*Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University, Thailand*

Received : 18 June 2024, Received in revised form : 2 August 2024, Accepted : 15 August 2024

Available online : 9 September 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : สองเรื่องเร่งด่วนที่ได้รับความสนใจศึกษาเป็นอย่างมากจากนักวิจัย คือ 1) การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงาน เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือ การระบวนการดูดซับ และ 2) การลดขยะให้เหลือศูนย์ โดยการนำกลับมาใช้ใหม่และแปรรูปเป็นสินค้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกเม็ดบ๊วยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปอาหาร รวมถึงศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมโลหะ Zn, Cu หรือ Ce รวมทั้งโลหะร่วม CuZn และ CeZn

วิธีดำเนินการวิจัย : เปลือกเม็ดบ๊วยถูกเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ (ASAC) โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และคาร์บอไนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับโลหะถูกเตรียมขึ้นโดยการเติมโลหะ 1.0wt% Zn, 1.0wt% Cu หรือ 1.0wt% Ce รวมทั้งโลหะร่วมระหว่าง 0.5wt% Cu กับ 1.0wt% Zn หรือ 0.5wt% Ce กับ 1.0wt% Zn ด้วยวิธีจุ่มชุบเพื่อปรับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ASAC ลักษณะรูปพรรณสัณฐานของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนถูกวิเคราะห์ด้วยการดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจน สำหรับการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0 องศาเซลเซียส

ผลการวิจัย : ตัวดูดซับโลหะมีพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้น ยกเว้น 1.0Ce/ASAC และมีขนาดรูพรุนเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ASAC ตัวดูดซับ 1.0Zn/ASAC มีปริมาณพื้นที่ผิวสูงที่สุด (756.90 ตารางเมตรต่อกรัม) และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุด (1.90 นาโนเมตร) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับโลหะชนิดอื่น ๆ ผลที่ได้จากไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า การปรับสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยการเติมโลหะช่วย

เพิ่มปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.0Zn/ASAC มีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90.49 ลูกบากศ์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 1.0Ce/ASAC (90.01 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) และ 0.5Ce1.0Zn/ASAC (89.91 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) ส่วนปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดคือ ASAC มีค่าเท่ากับ 86.76 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

สรุปผลการวิจัย : พื้นที่ผิว BET และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเติมโลหะ Zn, Cu, Ce หรือโลหะร่วม CuZn และ CeZn ลงบนถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการเติมโลหะ ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เรียงลำดับได้ดังนี้คือ 1.0Zn/ASAC > 1.0Ce/ASAC > 0.5Ce1.0Zn/ASAC > 1.0Cu/ASAC > 0.5Cu1.0Zn/ASAC > ASAC

คำสำคัญ : การดูดซับ ; ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ; ถ่านกัมมันต์ ; เปลือกเม็ดบ๊วย

Abstract

Background and Objectives : Two urgent matters receiving much attention from many researchers are: (1) reducing the amount of greenhouse gases that cause global warming, especially carbon dioxide, which is generated from combustion to produce energy. The most applicable technology for CO_2 capture is an adsorption process; (2) zero waste through the recycling process and transformation into value-added goods. The objective of this research is to study the CO_2 adsorption on activated carbon made from apricot stones, a waste product from a food processing factory, and to investigate the CO_2 adsorption on activated carbon added Zn, Cu, and Ce metals, including CuZn and CeZn metals.

Methodology : Apricot stones were converted into activated carbon (ASAC) by chemical activation with potassium hydroxide and carbonization at 750°C. Metallic adsorbents were prepared by adding 1.0wt%Zn, 1.0wt%Cu, 1.0wt%Ce, 0.5wt%Cu1.0wt%Zn, and 0.5wt%Ce1.0wt%Zn by impregnation technique to modify the ASAC-activated carbon surface. The morphology characteristics of these prepared adsorbents were analyzed by scanning electron microscopy, and their surface area, pore volume, and average pore size were determined by N_2 physisorption. For the CO_2 adsorption, adsorption isotherm was investigated at 0°C.

Main Results : All metallic adsorbents had a higher surface area, except 1.0Ce/ASAC, and a smaller pore size when compared with ASAC-activated carbon. A 1.0 Zn/ASAC adsorbent possesses the highest surface area (756.90 m2/g) and the biggest pore size (1.90 nm) when compared with other metallic adsorbents. The CO_2 adsorption isotherms' results showed that the modified ASAC-activated carbons with metals can enhance the CO_2 capacity. The CO_2 capacity of 1.0Zn/ASAC was 90.49 cm^3/g, which was the highest value. The next order was

1.0Ce/ASAC (90.01 cm^3/g) and then 0.5Ce1.0Zn/ASAC (89.91 cm^3/g), whereas the CO_2 capacity of ASAC-activated carbon was 699.83 cm^3/g, which was the lowest value.

Conclusions : The BET surface area and pore size of ASAC-activated carbon affected the CO_2 capacity. Adding metals (1.0Zn, 1.0Cu, 1.0Ce, 0.5Cu1.0Zn, and 0.5Ce1.0Zn) to ASAC-activated carbon made it absorb more CO_2 than ASAC-activated carbon alone. The CO_2 capacity of the studied adsorbents was in the order: 1.0Zn/ASAC > 1.0Ce/ASAC > 0.5Ce1.0Zn/ASAC > 1.0Cu/ASAC > 0.5Cu1.0Zn/ASAC > ASAC.

Keywords : adsorption ; carbon dioxide ; activated carbon ; apricot stones

***Corresponding author. E-mail** : smalee@engr.tu.ac.th

บทนำ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต เช่น การหมักและแปรรูปอาหาร (Acevedo *et al*., 2020) การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้พลังงาน (Wang *et al*, 2015) เป็นต้น การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวการในการสร้างมลพิษในอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในบรรยากาศถือเป็นเป้าหมายที่สำคัญของนานาชาติ โดยในปี 2050 มีเป้าหมายร่วมกันในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง 50% จากข้อตกลงของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovermental Panel on Climate Change, IPCC) (Acevedo *et al*., 2020)

หนึ่งในทางเลือกที่ได้รับความสนใจเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ คือ การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage, CCS) ซึ่งการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่มีความเฉพาะเจาะจงในการเลือกดักจับก๊าซสูง และปริมาณการใช้พลังงานต่ำ จึงส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการต่ำ เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น (Acevedo *et al*., 2020; Rubin *et al*., 2005) ตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่เหมาะสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นควรมีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสม เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นกรด ดังนั้นพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะต้องถูกปรับแต่งให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเลือกดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Lin *et al*., 2018) นอกจากสมบัติของตัวดูดซับแล้ว สภาวะในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับด้วย โดยเฉพาะอุณหภูมิ (Hoang *et al*., 2023) ดังนั้น การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉพาะจากกระบวนการเผาไหม้จึงทำการลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียลง ก่อนเข้ากระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ วัสดุที่นำมาใช้ในดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ซีโอไลท์ (Zeolites) เซรามิก (Clays) โครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks) โครงข่ายโลหะอินทรีย์แบบซีโอไลท์ (Zeolite-like metal-organic frameworks) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) (Majchrzak & Nowak, 2017)

ถ่านกัมมันต์เป็นหนึ่งในวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุคาร์บอนที่สามารถเตรียมได้จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร และสามารถดัดแปลงสภาพของพื้นผิวได้ (Hoang *et al*., 2023) กระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) และขั้นตอนการปรับสภาพผิว (Activation) สำหรับขั้นตอนการคาร์บอไนเซชันเป็นกระบวนการเผาภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (Hadoun *et al*., 2013) ส่วนขั้นตอนการปรับสภาพผิวถูกแบ่งเป็น 2 วิธี คือ การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการทางกายภาพโดยการใช้ไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิใช้ในการคาร์บอไนเซชันระหว่าง 400 ถึง 850 องศาเซลเซียส และการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมี โดยการแช่ในสารละลายกรดหรือด่าง เช่น กรดฟอสฟอริก กรดซิติก โพแทสเซียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Jansri & Santikunaporn, 2021) เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์จึงได้รับความสนใจนำมาใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความทนทานต่อสภาพกรด-ด่าง มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น (Hoang *et al*., 2023)นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาสภาพพื้นผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการเติมโลหะบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ A.somy และคณะ (Somy *et al*., 2009) ได้ศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่จุ่มชุบด้วยโลหะเดี่ยว Fe, Cr, Zn และโลหะคู่ Zn/Cr, Zn/Fe ผลการศึกษาพบว่า Cr_2O ดูดซับ CO_2 ได้มากที่สุดคือ 3.39 มิลลิโมลต่อกรัม และรองลงมาคือ Zn–Fe_2O_3 ที่อัตราส่วน Zn/Fe ร้อยละ 0.5 โดยมวล สามารถดูดซับได้ 2.73 มิลลิโมลต่อกรัม จึงสรุปว่าการจุ่มชุบร่วมกับโลหะ Zn มีส่วนช่วยให้การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น Hosseini และคณะ (Hosseini *et al*., 2015) ได้ศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ที่แปรสภาพผิวโดยการจุ่มชุบโลหะ Cu และ Zn ที่อัตราส่วนต่างกัน พบว่า ค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 2.25 โมลต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 100 กิโลปาสคัล นอกจากนั้น Smykowski และคณะ (Smykowski *et al*., 2013) ได้ศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ที่มีโลหะ Cu, Zn, Ni และ Pd บนซีโอไลท์ พบว่าโลหะ Cu และ Zn บนซีโอไลท์สามารดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เพราะระยะระหว่างแคทไอออนกับโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสั้นและมีพลังในการดูดซับต่ำ ในขณะเดียวกัน M. Younas และคณะ (Younas *et al*, 2016) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์มและชุบด้วยสารละลาย $Ni(NO_3)_26H_2O$ ร้อยละ 16-28 โดยน้ำหนักกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์ม (PSAC) ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH ร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนัก พบว่า PSAC มีปริมาณการดูดซับสูงสุดซึ่งเท่ากับ 48.2 มิลลิกรัมต่อกรัม

ในงานวิจัยนี้นำเปลือกเม็ดบ๊วยที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลไม้ทางภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบท่อระบายน้ำทิ้งมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันและกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นถ่านกัมมันต์ (ASAC) และใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษาปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นและเปรียบเทียบกับตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมโลหะสังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) และซีเรียม (Ce) รวมถึงโลหะร่วมระหว่าง CuZn และ CeZn เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและสารเคมี

เปลือกเม็ดบ๊วยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลไม้จากบริษัทดอยคำผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 49.8 ดังแสดงใน Table 1 เริ่มจากการล้างทำความสะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกะเทาะเปลือกแยกเมล็ดด้านในออก สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, Kem Aus) ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$, Kem Aus) คอปเปอร์(II)ไตรไฮเดรต ($Cu(NO_3)_2.3H_2O$, Carlo-Erba Reagents) ซีเรียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($Ce(NO_3)_3.6H_2O$, Thermo Scientific) ซึ่งสารเคมีดังกล่าวเป็นเกรดวิเคราะห์ทั้งหมด ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.995%

Table 1 Elemental composition of agricultural wastes that can be used for activated carbon preparation

Material	Amount; wt%					Reference
	C	H	N	O	S	
Apricot stones	49.8	5.8	5.4	38.9	0.1	(Jansri & Santikunaporn, 2021)
Cherry seed	53.9	7.1	0.3	38.4	0.3	(Li & Zhao, 2013)
Grape seed	55.4	7.0	1.5	35.9	0.2	(Li & Zhao, 2013)
Cashew nut shell	67.5	5.7	1.0	25.8	-	(González-Domínguez *et al*., 2024)

การเตรียมถ่านกัมมันต์

เปลือกเม็ดบ๊วยที่ผ่านการกะเทาะและล้างทำความสะอาด 100 กรัม ถูกนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบดถ่านด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ และนำไปคัดแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker) ให้ได้ขนาด 140 ถึง 280 ไมโครเมตร นำถ่านที่ได้ไปจุ่มชุบด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 36 โดยมวล ด้วยอัตราส่วนระหว่าง ถ่าน : KOH เท่ากับ 1:1 โดยมวล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นให้ทำการกรองและนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ถ่านที่ได้ถูกนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 750องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 75 มิลลิลิตร/นาที ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันแล้วถูกนำมาทำปฏิกิริยาสะเทิน (Neutralization reaction) ด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง (ที่ pH 7) และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Suphasuta Dueanchai, 2021) จะได้ถ่านกัมมันต์เม็ดบ๊วย (ASAC) ที่พร้อมใช้

การเตรียมตัวดูดซับโลหะ

ตัวดูดซับโลหะบนถ่านกัมมันต์ถูกเตรียมโดยวิธีจุ่มชุบแบบเปียก (Wet impregnation) เริ่มจากชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 15 กรัม ใส่ลงในสารละลายของโลหะที่เตรียมไว้ดังแสดงใน Table 1 จำนวน 30 มิลลิลิตร หลังจากนั้นให้นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นกรองและนำของแข็งที่กรองได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิลิตร/นาที

การตรวจวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้น

ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ถูกวิเคราะห์เพื่อศึกษารูปพรรณสัณฐานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM (FESEM, JEOL-7800F)) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM (FESEM, JEOL-7800F)) และวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET surface area) และการกระจายตัวขนาดรูพรุน (Pore size distribution) ด้วยการวัดปริมาณการดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจน โดยการเพิ่มความดัน (สูงสุด 1 bar) ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส หลังจากการไล่ก๊าซออกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนและความพรุน รุ่น Belsorp mini X, BEL MicrotracBEL Corp. (Akpasi & Isa, 2022)

การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกศึกษาด้วยเครื่อง Autosorb iQ automated gas sorption analyzer โดยทำการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งก่อนการวิเคราะห์การดูดซับ ทำการไล่ก๊าซออกจากตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ผลการวิจัย

ตัวดูดซับที่ถูกเตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกเม็ดบ๊วย (ASAC) โลหะเดี่ยวบนถ่านกัมมันต์ (1.0Zn/ASAC, 1.0Cu/ASAC และ 1.0Ce/ASAC) และโลหะร่วมบนถ่านกัมมันต์ (0.5Cu1.0Zn/ASAC และ 0.5Ce1.0Zn/ASAC) ถูกวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราด (SEM) ดังแสดงใน Figure 1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ ASAC พบว่ามีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จำนวนมากกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ในขณะที่ตัวดูดซับที่มีการเติมโลหะลงไปนั้น นอกจากจะมีรูพรุนแล้ว ลักษณะการกระจายตัวของโลหะที่ปกคลุมบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด สำหรับตัวดูดซับ 1.0Zn/ASAC จะพบการรวมตัวกันของอนุภาคโลหะ ทำให้อนุภาคโลหะมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวปกคลุมรูพรุนของถ่านกัมมันต์ สำหรับตัวดูดซับ 1.0Cu/ASAC และ 0.5Cu1.0Zn/ASAC จะมีลักษณะของการกระจายตัวของอนุภาคโลหะและลักษณะรูพรุนคล้ายกัน กล่าวคือ ลักษณะของพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วบริเวณ และมีอนุภาคโลหะ

ขนาดเล็กกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ส่วนตัวดูดซับ 1.0Ce/ASAC และ 0.5Ce1.0Zn/ASAC พบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคโลหะเกาะปกคลุมรูพรุน ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กและน้อยลง ในขณะที่ตัวดูดซับ 0.5Ce1.0Zn/ASAC จะมีการกระจายตัวของอนุภาคโลหะบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากที่สุด

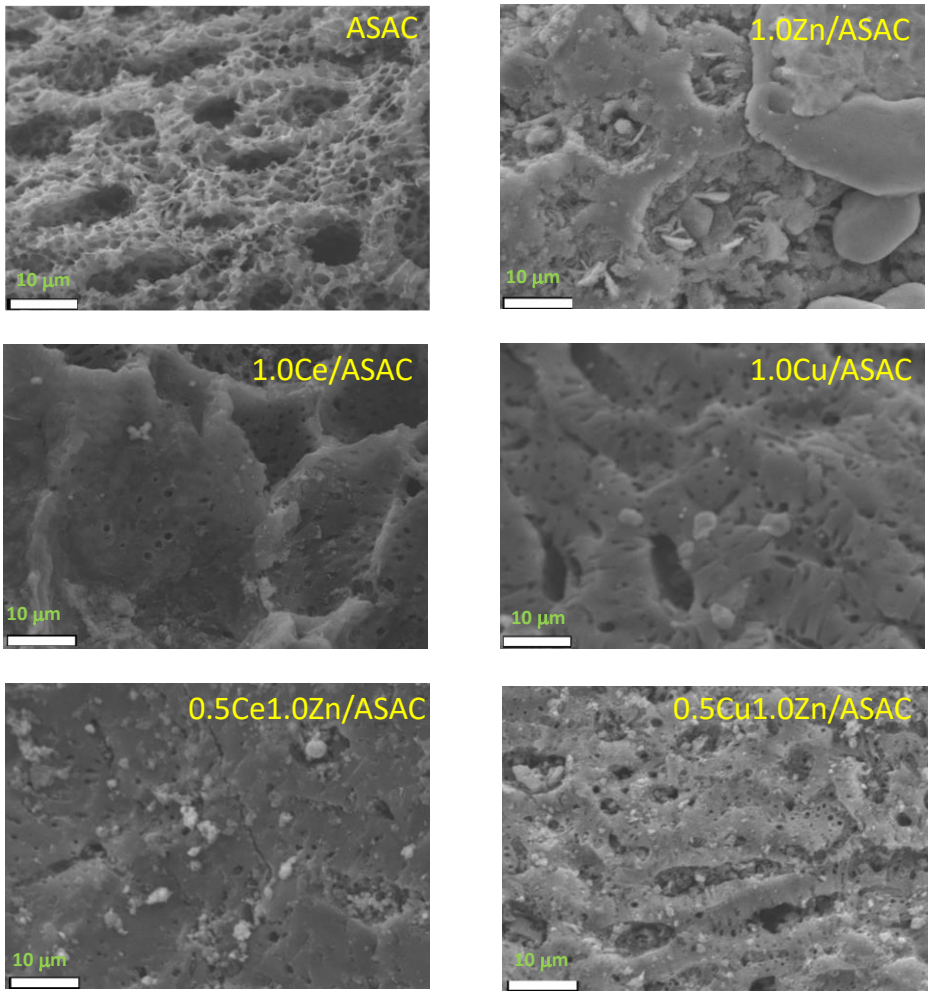

Figure 1 Scanning electron microscope (SEM) images at 1000x magnification of ASAC-activated carbon and metallic adsorbents

Table 2 Physical properties of ASAC-activated carbon and metallic adsorbents prepared in this study

Adsorbent	BET surface area (m^2/g)	Pore volume (cm^3/g)	Average pore volume (nm)
ASAC	699.83	0.34	1.92
1.0Zn/ASAC	756.90	0.36	1.90
1.0Cu/ASAC	704.23	0.32	1.82
1.0Ce/ASAC	682.42	0.32	1.84
0.5Cu1.0Zn/ASAC	753.94	0.35	1.84
0.5Ce1.0Zn/ASAC	731.91	0.35	1.88

Table 2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET และวิเคราะห์รูพรุนของวัสดุดูดซับ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ ASAC ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกเม็ดบ๊วยมีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง 699.83 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.34 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.92 นาโนเมตร เมื่อมีการเติมโลหะลงไปบนถ่านกัมมันต์พบว่า ตัวดูดซับโลหะส่วนใหญ่มีพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้น และขนาดรูพรุนเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย ยกเว้นตัวดูดซับ 1.0Ce/ASAC ที่ปริมาณพื้นที่ผิว BET ลดลงจาก 699.83 เป็น 682.42 ตารางเมตรต่อกรัม พิจารณาตัวดูดซับโลหะเดียวคือ 1.0Zn/ ASAC มีพื้นที่ผิว BET สูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 756.90 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.36 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.90 นาโนเมตร รองลงมาคือ ตัวดูดซับ 1.0Cu/ASAC (704.23 ตารางเมตรต่อกรัม) และ 1.0Ce/ASAC (682.42 ตารางเมตรต่อกรัม) และเมื่อมีการเติมโลหะ Cu และ Ce ร่วมกับโลหะ Zn พบว่า พื้นที่ผิว BET ลดลงดังนี้คือ ตัวดูดซับ 0.5Cu1.0Zn/ASAC (753.94 ตารางเมตรต่อกรัม) > 0.5Ce1.0Zn/ASAC (731.91 ตารางเมตรต่อกรัม) นอกจากนี้ตัวดูดซับ 1.0Zn/ASAC ยังมีปริมาณรูพรุนสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวดูดซับ 0.5Cu1.0Zn/ASAC และ 0.5Ce1.0Zn/ASAC ซึ่งมีปริมาณรูพรุนใกล้เคียงกัน ในขณะที่ ตัวดูดซับ 1.0Cu/ASAC และ 1.0Ce/ASAC มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดและน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ ASAC สำหรับขนาดรูพรุนพบว่า ตัวดูดซับ ASAC > 1.0Zn/ASAC > 0.5Ce1.0Zn/ASAC, 0.5Cu1.0Zn/ASAC > 1.0Cu/ASAC, 1.0Ce/ASAC ซึ่งขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.88 ถึง 2.00 นาโนเมตร

Table 3 แสดงปริมาณสูงสุดในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยนี้ ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ ASAC ที่ 0 องศาเซลเซียส เท่ากับ 82.55 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อมีการเติมโลหะลงบนถ่านกัมมันต์ ASAC ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนได้ออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาตัวดูดซับที่มีการเติมโลหะ พบว่า 1.0Zn/ASAC สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90.49 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาเฉพาะตัวดูดซับโลหะเดียวพบว่า 1.0Ce/ASAC (90.01 ลูกบาศก์

เซนติเมตรต่อกรัม) สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า 1.0Cu/ASAC (89.20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) เล็กน้อย แม้ว่าพื้นที่ผิวของ 1.0Ce/ASAC จะต่ำกว่า 1.0Cu/ASAC แต่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า เมื่อมีการเติมโลหะ Ce หรือ Cu ร่วมกับ Zn พบว่า ความสามารถของตัวดูดซับทั้งสอง (0.5Cu1.0Zn/ASAC และ 0.5Ce1.0Zn/ASAC) มีค่าต่ำกว่าปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ 1.0Zn/ASAC เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้งสองมีต่ำกว่าของ 1.0Zn/ASAC และพบว่าตัวดูดซับ 0.5Ce1.0Zn/ASAC มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับ 0.5Cu1.0Zn/ASAC

Table 3 CO_2 capacity obtained from the studied adsorbents

Adsorbent	CO_2 capacity (cm^3/g)
ASAC	82.55
1.0Zn/ASAC	90.49
1.0Cu/ASAC	89.20
1.0Ce/ASAC	90.01
0.5Cu1.0Zn/ASAC	86.76
0.5Ce1.0Zn/ASAC	89.91

Table 4 Comparisons of CO_2 uptakes at 1 bar on various activated carbons

Adsorbent	CO_2 capacity (cm^3/g)	Temperature (°C)	Reference
ASAC	82.55	0	This work
1.0Zn/ASAC	90.49	0	This work
ACCu1-1073	92.38	0	(Acevedo *et al*., 2020)
ACCu2-1073	53.16	0	(Acevedo *et al*., 2020)
ACCu3-1073	112.00	0	(Acevedo *et al*., 2020)
AC	14.72	30	(Akpasi & Isa, 2022)
NaOH-PSAC	24.43	30	(Younas *et al*., 2016)

Table 4 แสดงความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ASAC และ 1.0Zn/ASAC ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยนี้เทียบกับตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยอื่น ถ่านกัมมันต์ ASAC และ 1.0Zn/ASAC ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกเม็ดบัวและกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีปริมาณดูดซับก๊าซคาร์บอนได้ออกไซด์ 82.5 และ 90.49 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งมีปริมาณดูดซับก๊าซคาร์บอนได้ออกไซด์อยู่ในช่วง 14.72 – 112.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (Acevedo *et al*., 2020)

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวดูดซับที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับโลหะที่มีการเติมโลหะเดี่ยวและโลหะร่วม ได้แก่ Zn, Cu, Ce, CuZn และ CeZn ตามลำดับ จะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ 1.0Cu/ASAC และ 0.5Cu1.0Zn/ASAC มีความคล้ายคลึงกับของตัวดูดซับ ASAC ส่วนตัวดูดซับ 0.5Ce1.0Zn/ASAC มีลักษณะสัณฐานวิทยาที่ต่างจากตัวดูดซับ 1.0Zn/ASAC และ 1.0Ce/ASAC โดยโลหะปกคลุมพื้นผิว แต่ไม่เห็นการรวมตัวกันของโลหะขนาดใหญ่บนพื้นผิว ทำให้เห็นรูพรุนไม่ชัดเจน ซึ่งคาดว่าเป็นผลของการเผาที่อุณหภูมิสูง และยังส่งผลให้รูพรุนขนาดใหญ่ยุบตัวลงได้ (Daptardar, Koti, & Rajmohan, 2015) สำหรับตัวดูดซับ 0.5Ce1.0Zn/ASAC จึงมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าตัวดูดซับ 1.0Ce/ASAC แต่ตัวดูดซับ 0.5Ce1.0Zn/ASAC มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าตัวดูดซับ 1.0Zn/ASAC ดังนั้นลักษณะสัณฐานวิทยาจึงส่งผลต่อพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับซึ่งทำให้มีค่าต่างจากตัวดูดซับ ASAC และตัวดูดซับโลหะก็มีค่าแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 0 องศาเซลเซียสจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับ ASAC ด้วยการเติมโลหะในการศึกษานี้สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับส่งผลต่อปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะพื้นที่ผิว BET และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ตัวดูดซับ ASAC มีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิว BET ค่อนข้างต่ำและมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่สุด เมื่อเทียบกับตัวดูดซับโลหะ ตัวดูดซับ 1.0Ce/ASAC ซึ่งมีพื้นที่ผิว BET น้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าตัวดูดซับ ASAC แต่กลับมีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับ ASAC ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากขนาดรูพรุนที่เล็กลง (1.82 < 1.92 นาโนเมตร) ตัวดูดซับ 0.5Ce1.0Zn/ASAC มีพื้นที่ผิว BET (731.91 ตารางเมตรต่อกรัม) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (1.88 นาโนเมตร) ค่อนข้างสูง สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับ 1.0Zn/ASAC และ 1.0Ce/ASAC ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเมื่อจุ่มชุบโลหะ Ce ร่วมกับ Zn โลหะทั้งสองมีคุณสมบัติทางเคมีที่ฤทธิ์เสริมกัน (Synergistic effect) (Jin *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2024) ส่งผลให้มีความเหมาะสมในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Hosseini *et al*., 2015)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกเม็ดบ๊วยโดยผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และคาร์บอไนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียสในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยอื่น ดังนั้นการดัดแปลงสมบัติทางกายภาพและลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณพื้นที่ BET มา และขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ไม่เล็กและใหญ่เกินไป (Younas *et al*., 2016) เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกดูดซับได้ดีภายในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 2.00 นาโนเมตร (Kozhukharov *et al*., 2022; Lee & Park, 2013)

สรุปผลการวิจัย

ถ่านกัมมันต์ ASAC ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกเม็ดบ๊วยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถูกคาร์บอไนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียสก่อให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2.00 นาโนเมตรซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเติมโลหะ Zn, Cu และ Ce ลงบนถ่านกัมมันต์ช่วยในการปรับสภาพทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นและขนาดรูพรุนเล็กลงซึ่งส่งผลต่อปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับโลหะบนถ่านกัมมันต์มีค่าสูงกว่าปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ ASAC ตัวดูดซับ 1.0Zn/ASAC มีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวดูดซับ 1.0Ce/ASAC และ 0.5Ce1.0Zn/ASAC ซึ่งเป็นผลมาจากการเสริมกันของโลหะ Ce และ Zn ส่วนตัวดูดซับ 0.5Cu1.0Zn/ASAC มีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ดังนั้นลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2566 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทดอยคำผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ที่สนับสนุนเม็ดบ๊วยซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับการนำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ T. Keanthong ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต และทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในระดับมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

Acevedo, S., Giraldo, L., & Moreno-Pirajan, J. C. (2020). Adsorption of CO_2 on activated carbons prepared by chemical activation with cupric nitrate. *ACS Omega*, *5*(18), 10423-10432. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00342

Akpasi, S. O., & Isa, Y. M. (2022). Effect of operating variables on CO_2 adsorption capacity of activated carbon, kaolinite, and activated carbon–Kaolinite composite adsorbent. *Water-Energy Nexus, 5*, 21-28.

Daptardar, V., Koti, D., & Rajmohan, D. (2015). Adsorption of BTX vapors on activated carbon pellets prepared from waste cashew nut shell. *Journal of Environmental Science and Technology*, *12*, 1-7.

González-Dominguez, J. M., Fernández-González, C., Alexandre-Franco, M., & Gómez-Serrano, V. (2024). Surface chemistry of cherry stone-derived activated carbon prepared by H_3PO_4 activation. *Processes, 12*(1), 149-156.

Hadoun, H., Sadaoui, Z., Souami, N., Sahel, D., & Toumert, I. (2013). Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H3PO4 chemical activation. *Applied Surface Science*, *280*, 1-7.

Hoang, T.-D., Bandh, S. A., Malla, F. A., Qayoom, I., Bashir, S., Peer, S. B., & Halog, A. (2023). Carbon-based synthesized materials for CO_2 adsorption and conversion: Its potential for carbon recycling. *Recycling*, *8*(4), 1-50.

Hosseini, S., Bayesti, I., Marahel, E., Babadi, F. E., Abdullah, L. C., & Choong, T. S. (2015). Adsorption of carbon dioxide using activated carbon impregnated with Cu promoted by zinc. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *52*, 109-117.

Jansri, N., & Santikunaporn, M. (2021). The Studies of Carbonization Temperature and Amount of Phosphoric Acid on Phenol Adsorption on Activated Carbon Prepared from Apricot Stones. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 32*(1), 26-37. doi:10.14416/j.kmutnb.2021.03.004 (in Thai)

Jin, S., Bang, G., Liu, L., & Lee, C.-H. (2019). Synthesis of mesoporous MgO–CeO_2 composites with enhanced CO_2 capture rate via controlled combustion. *Microporous and Mesoporous Materials,* 288, 109-117.

Kozhukharov, S., Girginov, C., Tsanev, A., & Boshkova, N. (2022). Synergistic effect of Zn electrodeposition and cerium conversion coating on the corrosion performance of low carbon steel. *Applied Surface Science, 602*, 154-164.

Lee, S.-Y., & Park, S.-J. (2013). Determination of the optimal pore size for improved CO_2 adsorption in activated carbon fibers. *Journal of Colloid and Interface Science,* 389(1), 230-235.

Li, P. Z., & Zhao, Y. (2013). Nitrogen‐Rich Porous Adsorbents for CO_2 Capture and Storage. *Chemistry–An Asian Journal, 8*(8), 1680-1691.

Lin, Y., Xu, Y., Loh, C. H., & Wang, R. (2018). Development of robust fluorinated TiO_2/PVDF composite hollow fiber membrane for CO_2 capture in gas-liquid membrane contactor. *Applied Surface Science, 436*, 670-681.

Majchrzak, A., & Nowak, W. (2017). Separation characteristics as a selection criteria of CO_2 adsorbents. *Journal of CO2 Utilization, 17*, 69-79.

Rubin, E., Meyer, L., & De Coninck, H. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage: Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK*.

Smykowski, D., Szyja, B., & Szczygiel, J. (2013). DFT modeling of CO_2 adsorption on Cu, Zn, Ni, Pd/DOH zeolite. *Journal of Molecular Graphics and Modelling, 41*, 89-96.

Somy, A., Mehrnia, M. R., Amrei, H. D., Ghanizadeh, A., & Safari, M. (2009). Adsorption of carbon dioxide using impregnated activated carbon promoted by Zinc. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 3*(3), 249-254.

Suphasuta Dueanchai. (2021). Modified activated carbon from apricot stones for hydrogen sulfide removal In B.E. thesis. (pp72). Pathumthani : Thammasat University, THAILAND.

Wang, M., Joel, A. S., Ramshaw, C., Eimer, D., & Musa, N. M. (2015). Process intensification for post-combustion CO_2 capture with chemical absorption: A critical review. *Applied Energy*, *158*, 275-291.

Wickramaratne, N. P., & Jaroniec, M. (2013). Activated carbon spheres for CO_2 adsorption. *ACS applied materials & interfaces, 5*(5), 1849-1855.

Younas, M., Leong, L. K., Mohamed, A. R., & Sethupathi, S. (2016). CO_2 adsorption by modified palm shell activated carbon (PSAC) via chemical and physical activation and metal impregnation. *Chemical Engineering Communications, 203*(11), 1455-1463.

Zhang, Y., Li, Z., Zhao, B., Wang, Z., & Liu, J. (2024). Ce ions and polyaniline co-intercalation into MOF-derived porous V_2O_5 nanosheets with a synergistic energy storage mechanism for high-capacity and super-stable aqueous zinc-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A, 12*(3), 1725-1735.