

การประเมินการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากเศษคาร์บอนเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

CARBON DIOXIDE EMISSIONS ESTIMATION FROM CARBON DIOXIDE ADSORBENT PRODUCTION USING UNBURNED CARBON RESIDUES FROM BIOMASS POWER PLANT

ตุลาการ เกตุวงศ์¹ และ ชินนัทย์ อารีประเสริฐ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, fengcta@ku.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, tulakarn.ke@ku.th

Tulakarn Ketwong¹ and Chinnathan Areeprasert²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, fengcta@ku.ac.th

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, tulakarn.ke@ku.th

วันที่รับบทความ 26 ธันวาคม 2568

วันแก้ไขบทความ 6 มกราคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 30 มกราคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และศักยภาพการลดคาร์บอนสุทธิของวัสดุดูดซับ CO₂ ที่ผลิตจากคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยวัสดุถูกกระตุ้นด้วยสองวิธี ได้แก่ การกระตุ้นด้วยไอน้ำและการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สมบัติเชิงกายภาพ โครงสร้างรูพรุน และความสามารถในการดูดซับ CO₂ ที่อุณหภูมิ 298 K และความดัน 1 bar ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการประเมินการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตแบบ gate-to-gate ผลการศึกษาพบว่าการกระตุ้นทางเคมีให้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับ CO₂ สูงสุด โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 0.089 kgCO₂/kg ขณะที่การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้สมรรถนะต่ำกว่า แม้ว่าการกระตุ้นทางเคมีจะมีการปล่อยคาร์บอนจากการใช้สารเคมีเพิ่มเติม แต่จำนวนรอบการคืนคาร์บอนของวัสดุที่ได้ต่ำกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าการประเมินวัสดุดูดซับ CO₂ ควรพิจารณาทั้งสมรรถนะการดูดซับและการปล่อยคาร์บอนแฝงจากกระบวนการผลิตควบคู่กัน เพื่อให้สามารถเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมและสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างแท้จริงในเชิงระบบ

คำสำคัญ: การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์, ถ่านกัมมันต์, การปล่อยคาร์บอนแฝง, ความคุ้มค่าทางคาร์บอน

ABSTRACT

This study evaluates the carbon dioxide (CO₂) emissions and net carbon reduction potential of CO₂ adsorbents produced from unburned carbon residues generated by a biomass power plant. Two activation methods—steam activation and chemical activation using potassium hydroxide—were investigated. The physical properties, pore structure, and CO₂ adsorption performance at 298 K and 1 bar were analyzed in conjunction with a gate-to-gate carbon emission assessment of the production process. The results demonstrate that chemical activation yields adsorbents with the highest specific surface area and CO₂ adsorption capacity, reaching 0.089 kgCO₂/kg, whereas steam-activated materials exhibit comparatively lower performance. Although chemical activation involves additional carbon emissions associated with chemical consumption, the resulting adsorbent requires a significantly lower number of carbon payback cycles than the steam-activated counterpart. These findings indicate that the evaluation of CO₂ adsorbents

should simultaneously consider adsorption performance and embodied carbon emissions from the production process, enabling the selection of technologies that genuinely contribute to greenhouse gas mitigation from a system-level perspective.

KEYWORDS: Carbon dioxide capture, Activated carbon, Embodied carbon emissions, Carbon payback cycles

1. บทนำ

การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเป้าหมายสำคัญของการพัฒนาระบบพลังงานและอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน โดยเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอน (Carbon Capture Technologies) (Dubey & Arora, 2022) ถือเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยลดการปล่อย CO₂ จากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าและกระบวนการอุตสาหกรรม วัสดุดูดซับคาร์บอนมีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีดังกล่าว (Abd, Othman, & Kim, 2021) เนื่องจากเป็นตัวกลางหลักในการแยกและกักเก็บ CO₂ จากก๊าซไอเสีย สมรรถนะของวัสดุดูดซับ เช่น ความสามารถในการดูดซับ ความจำเพาะต่อ CO₂ และความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำ มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการพัฒนาในปัจจุบันไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการเพิ่มสมรรถนะการดูดซับเท่านั้น แต่ยังให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ มีต้นทุนเหมาะสม และสามารถสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนในภาพรวมได้อย่างแท้จริง (Ketwong, Cholvattanatanakorn, Ding, Wibowo, & Areeprasert, 2023; Serafin & Dziejarski, 2024)

การพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนในปัจจุบันมุ่งเน้นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับและความจำเพาะต่อ CO₂ ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนและสมบัติทางเคมีของพื้นผิว (Foorginezhad, Zerafat, Asadnia, & Rezvannasab, 2024) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตวัสดุดูดซับเหล่านี้มักเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานและทรัพยากรในระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานโดยรวมของกระบวนการ การออกแบบกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานต่ำ ใช้สารเคมีน้อย หรืออาศัยวัตถุดิบเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดคาร์บอนแฝงของวัสดุดูดซับ และช่วยเพิ่มความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในระบบการดักจับคาร์บอนเชิงอุตสาหกรรม

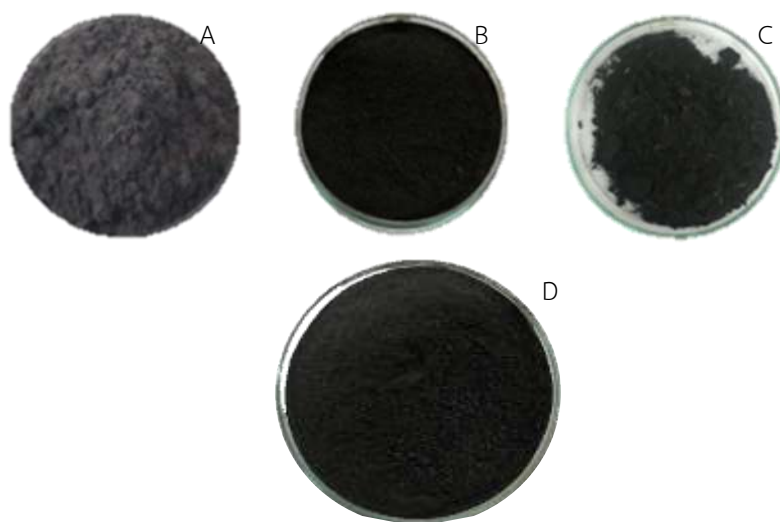
การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับไม่ควรพิจารณาเพียงสมรรถนะการดูดซับในขั้นตอนการใช้งานเท่านั้น แต่จำเป็นต้องคำนึงถึง “การปล่อยคาร์บอนแฝง” (embodied carbon emissions) ที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการผลิตวัสดุดูดซับด้วย (Shah, Amin, Pepe, Mancusi, & Fareed, 2025; Usama et al., 2025) โดยเฉพาะในกรณีของวัสดุที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นเชิงเคมีหรือกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้สารเคมี พลังงานความร้อน และการจัดการของเสียอาจมีปริมาณสูงจนลดทอนประโยชน์สุทธิของการดักจับ CO₂ ในภาพรวม ดังนั้น การประเมินเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนจึงควรพิจารณาในเชิงระบบตลอดวัฏจักรชีวิต โดยเปรียบเทียบปริมาณ CO₂ ที่สามารถดักจับได้กับปริมาณการปล่อยคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการผลิตวัสดุ เพื่อสะท้อนศักยภาพที่แท้จริงของวัสดุดูดซับในการสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบด้านการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตวัสดุดูดซับคาร์บอนจากของเสียโรงไฟฟ้าชีวมวล และเพื่อประเมินศักยภาพการลดคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิของระบบดักจับคาร์บอนดังกล่าว โดยพิจารณาทั้งปริมาณ CO₂ ที่ถูกดักจับได้และปริมาณ CO₂ ที่ปล่อยออกมาในขั้นตอนการผลิตวัสดุ แนวคิดของงานมุ่งเน้นการประเมินเชิงสมดุลอย่างง่าย (carbon balance) เพื่อชี้ให้เห็นว่าวัสดุดูดซับที่มีสมรรถนะการดูดซับสูงอาจไม่จำเป็นต้องเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด หากมีการปล่อยคาร์บอนแฝงสูง ในขณะที่วัสดุที่ผลิตจากของเสียและใช้กระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานต่ำอาจให้ผลการลดคาร์บอนสุทธิที่ดีกว่า และมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในบริบทของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

2. ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

2.1 กระบวนการผลิตตัวดูดซับ

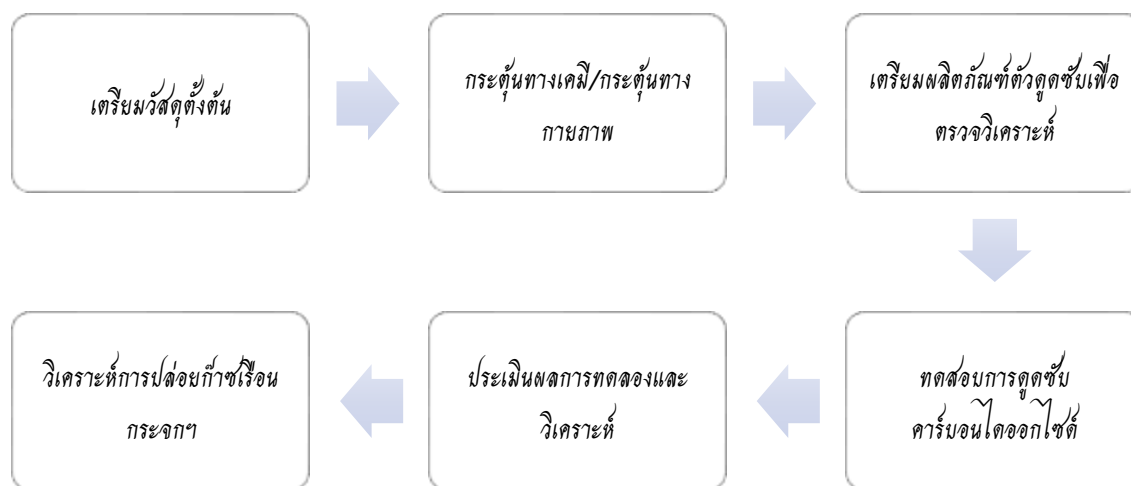
ของเสียของแข็งผสม (compound solid residue) แสดงในรูปที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของบริษัทมิตรผล ตั้งอยู่ในอำเภอนองเรือ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย โดยของเสียของแข็งดังกล่าวประกอบด้วยคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned carbon: UC) ซึ่งถูกแยกออกจากเถ้าลอยด้วยวิธีอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น (gravity separation method) ขั้นตอนเริ่มจากการนำของเสียของแข็งในรูปผงใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตรที่บรรจุน้ำกลั่น จากนั้นทำการกวนสารละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที และปล่อยให้ตกเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าคือ เถ้าตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของบีกเกอร์ ขณะที่อนุภาค UC ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าจะลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ หลังจากนั้นทำการแยก UC ออกจากระบบและนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง เพื่อปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบก่อนกระบวนการกระตุ้น ตัวอย่าง UC ที่แยกได้ถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น โดยใช้ตัวอย่างมวล 0.2 กิโลกรัม ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:10 จากนั้นกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และทำการแยกน้ำออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสารที่ละลายน้ำได้ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติของตัวดูดซับ หลังจากการล้าง ตัวอย่างถูกนำไปอบแห้งในตู้อบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการกระตุ้น



รูปที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย (A) Solid compound; (B) Fly ash; (C) Unburned carbon; (D) Adsorbent product

กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี (chemical activation) เริ่มจากการนำตัวอย่าง UC ที่ผ่านการเตรียมแล้วจำนวน 100 กรัม มาผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:2 โดยเลือกเงื่อนไขดังกล่าวจากผลการทดลองเบื้องต้นและรายงานในวรรณกรรมที่แสดงว่าสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้ดีโดยไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียวัสดุสูงเกินไป สารผสมถูกกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารกระตุ้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นทำการแยกของแข็งออกจากของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง และนำของแข็งไปอบแห้งในตู้อบ ตัวอย่างที่แห้งแล้วถูกนำเข้าเตาเผาไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ PID พร้อมป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบในอัตรา 100 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิของเตาถูกเพิ่มจากอุณหภูมิห้องจนถึง 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ ตัวอย่างถูกปล่อยให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการล้างและปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ และน้ำดีไอออนซ์ เพื่อกำจัดสารตกค้างจาก KOH ที่อาจอุดตันรูพรุนของตัวดูดซับ ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า เถ้าลอยและคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี (AUC-C ตามลำดับ) สำหรับกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (steam activation) ใช้อุปกรณ์และขั้นตอนพื้นฐานเดียวกับกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี แต่ไม่ใช้สารละลาย KOH โดยไอน้ำถูกผลิตจากเครื่องกำเนิดไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120–127 °C และถูกป้อนเข้าสู่ระบบในระหว่างการให้ความร้อนในเตาเผา เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นเชิงกายภาพ ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการนี้เรียกว่า เถ้าลอยและคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S ตามลำดับ) หลังจากได้ผลิตภัณฑ์ตัวดูดซับแล้วจึงนำไปตรวจ

วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วยวิธี Proximate analysis, Ultimate analysis, X-Ray Fluorescence analysis, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ BET surface analysis ทั้งนี้ กระบวนการกระตุ้นเชิงเคมีและเชิงกายภาพที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถอ้างอิงจากงานวิจัย (Ketwong, Cholatthanatanakorn, & Areeprasert, 2025) ขั้นตอนการวิจัยแสดงรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนและกระบวนการศึกษาในงานวิจัย

2.2 กรอบแนวคิดการคำนวณก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตตัวดูดซับ

ในการศึกษานี้ การประเมินการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับดำเนินการในขอบเขตแบบ gate-to-gate โดยพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการรับวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตจนถึงการได้ตัวดูดซับพร้อมใช้งาน ขอบเขตการคำนวณครอบคลุมการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การให้ความร้อนในกระบวนการกระตุ้น (activation) และกระบวนการทำให้วัสดุมีเสถียรภาพก่อนใช้งาน โดยการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ถูกคำนวณจากปริมาณพลังงานที่ใช้จริงคูณกับค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) ที่สอดคล้องกับแหล่งพลังงานนั้น ๆ สำหรับกรณีการใช้วัตถุดิบซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จะไม่พิจารณาการปล่อยคาร์บอนจากการผลิตวัตถุดิบต้นทาง เพื่อลดการนับซ้ำของการปล่อยคาร์บอนในระบบ ผลลัพธ์ของการประเมินจะแสดงในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยต่อหน่วยมวลของวัสดุตัวดูดซับที่ผลิตได้ ($\text{kg CO}_2/\text{kg adsorbent}$) ซึ่งสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับศักยภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุนั้นเพื่อประเมินความสามารถในการลดการปล่อยคาร์บอนสุทธิของระบบโดยรวม

การคำนวณการปล่อย CO_2 แบบ gate-to-gate ในงานนี้กำหนดขอบเขตตั้งแต่จุดรับวัตถุดิบเข้าสู่โรงงานผลิตตัวดูดซับจนถึงได้ผลิตภัณฑ์ตัวดูดซับพร้อมใช้งาน โดยรวมการใช้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน/ไอน้ำ เชื้อเพลิงสำหรับเตา/หม้อไอน้ำ (ถ้ามี) น้ำ และสารเคมีในขั้นตอนล้าง/ปรับสภาพ/activation รวมถึงการจัดการของเสียภายในโรงงาน จากนั้นคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยสมการผลคูณระหว่างปริมาณกิจกรรม (Activity Data) และค่าปัจจัยการปล่อย (Emission Factor) ของแต่ละรายการ แล้วรวมผลทั้งหมดและปรับด้วยอัตราผลได้ (yield) เพื่อรายงานเป็นคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อหน่วยตัวดูดซับ ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg-adsorbent}$) ก่อนนำไปเทียบกับศักยภาพการดักจับ CO_2 ของตัวดูดซับเพื่อประเมินการลด CO_2 สุทธิ

2.3 ขั้นตอนการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตและตัวชี้วัดต่างๆ

การประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับในงานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้ขอบเขตการประเมินแบบ gate-to-gate ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การรับวัตถุดิบเข้าสู่โรงงาน การแปรรูป และการผลิตจนได้ตัวดูดซับที่พร้อมใช้งาน โดยไม่รวมการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่งวัตถุดิบนอกโรงงาน การใช้งานตัวดูดซับ และการจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน การคำนวณการปล่อยคาร์บอนแฝง (embodied carbon) พิจารณาจากแหล่งการปล่อยหลัก ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้พลังงานความร้อน และการใช้สารเคมีในกระบวนการกระตุ้นตัวดูดซับ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมจากกระบวนการผลิต ($\text{CO}_2 \text{ emission, total}$) คำนวณจากผลรวมของการปล่อยจากแต่ละกิจกรรมตามสมการดังนี้

$$CO_2 \text{ emission}_{total} = \sum(E_i \times EF_i) \quad (1)$$

โดยที่ E_i คือปริมาณการใช้ทรัพยากรหรือพลังงานในกระบวนการที่ i (เช่น kWh ของไฟฟ้า หรือ MJ ของพลังงานความร้อน) และ EF_i คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (emission factor) ที่สอดคล้องกับทรัพยากรนั้น

สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้า การปล่อยคาร์บอนคำนวณจาก

$$CO_2 \text{ electricity} = E_{elec} \times EF_{elec} \quad (2)$$

โดยที่ E_{elec} คือปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต (kWh) และ EF_{elec} คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยของระบบไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงจากค่าเฉลี่ยของโครงข่ายไฟฟ้า (0.399 kgCO₂/kg) โดยกระบวนการที่ใช้ไฟฟ้าและนำมาคำนวณคือ การใช้ไฟฟ้าจากการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ และการใช้ไฟฟ้าจากกระบวนการบัด

การใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตคือ KOH ใช้ในกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี การปล่อยคาร์บอนคำนวณจาก

$$CO_2 \text{ chemical} = m_{chem} \times EF_{chem} \quad (3)$$

โดยที่ m_{chem} คือมวลของสารเคมีที่ใช้ (kg) และ EF_{chem} คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยของสารเคมีเท่ากับ 1.4 kgCO₂/kgKOH ดัชนีความคุ้มค่าทางคาร์บอนระบุจำนวนรอบน้อยที่สุดที่ต้องใช้ตัวดูดซับซ้ำเพื่อให้เกิดความคุ้มค่า (Carbon Payback Cycles) จากการผลิต คำนวณจากสมการ

$$N_{payback} = CO_2 \text{ footprint prod} / CO_2 \text{ adsorbed} \quad (4)$$

การประเมินนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า ข้อมูลการใช้พลังงานและวัตถุดิบเป็นค่าเฉลี่ยของกระบวนการในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งอาจให้ค่าสูงเกินค่าเฉลี่ยของระบบในอุตสาหกรรม การใช้เตาไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนในห้องปฏิบัติการแตกต่างจากระบบอุตสาหกรรมที่ให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้มีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่า คิดอัตราการใช้ไฟฟ้าสำหรับการผลิตอยู่ที่ร้อยละ 40 ของกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ได้ใช้งานตลอดเวลา นอกจากนั้นยังไม่คิดอัตราการสูญเสียในกระบวนการผลิต และกระบวนการผลิตคิดเต็มประสิทธิภาพของขนาดเตา (300 กรัมต่อครั้ง)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการผลิตตัวดูดซับและคุณสมบัติ

จากข้อมูลคุณสมบัติเชิงกายภาพและเคมีของตัวอย่าง UC, AUC-S และ AUC-C สามารถอธิบายพฤติกรรมของผลได้และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นโดยแสดงในตารางที่ 1 จากผล proximate analysis พบว่า UC หลังการล้างมีปริมาณเถ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 19.30 wt% (Unwashed-UC) เหลือ 15.02 wt% ขณะที่ปริมาณ fixed carbon เพิ่มขึ้นจาก 52.90 เป็น 61.71 wt% สะท้อนว่าการล้างสามารถกำจัดสิ่งเจือปนอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกไปบางส่วน ส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในด้าน ultimate analysis UC มีปริมาณคาร์บอนสูง (~51 wt%) และออกซิเจนสูง (~32 wt%) ซึ่งทำให้โครงสร้างคาร์บอนมีความไวต่อกระบวนการกระตุ้น โดยเฉพาะการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ในกรณีของ AUC-S การกระตุ้นเชิงกายภาพส่งผลให้เกิดการแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของคาร์บอน (carbon burn-off) ส่งผลให้สูญเสียมวลและคาร์บอนมากกว่า จึงสอดคล้องกับผลได้ที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางเคมี

เมื่อพิจารณา องค์ประกอบอินทรีย์ พบว่า UC มี CaO และ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลัก การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) ทำให้ปริมาณ SiO₂ และ CaO ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนเฟส การละลายบางส่วน หรือการเกิด

โครงสร้างอณูพื้นฐาน ขณะที่ยังคงมี CaO ในระดับค่อนข้างสูง (11.50%) ซึ่งอาจส่งผลต่อความเสถียรเชิงโครงสร้างของวัสดุในทางตรงกันข้าม การกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH (AUC-C) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอินทรีย์อย่างเด่นชัด โดยเฉพาะการลดลงของ CaO (จาก 6.45% ใน UC เหลือ 3.93%) และ SO_3 ขณะเดียวกันพบว่า K_2O เพิ่มขึ้นเป็น 2.20% ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกตัวหรือคั่งค้างของโพแทสเซียมจากสารกระตุ้น นอกจากนี้ ปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับ SiO_2 ทำให้เกิดสารประกอบที่ละลายน้ำได้และถูกชะล้างออก ส่งผลให้โครงสร้างแร่ถูกกำจัดบางส่วนโดยไม่ทำลายโครงสร้างคาร์บอนหลักมากนัก ดังนั้น ผลได้ที่สูงกว่าของ AUC-C เมื่อเทียบกับ AUC-S จึงสอดคล้องกับข้อมูลเชิงองค์ประกอบที่แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นทางเคมีสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในระดับไมโครพอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูญเสียคาร์บอนและมวลรวม ในขณะที่ยังสามารถกำจัดเฟสอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเศษคาร์บอนเหลือทิ้งและตัวดูดซับที่ผลิตได้

Item	Proximate Analysis (wt%)				Ultimate Analysis (wt%)				
	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash	C	H	O	N	
Unwashed- UC	11.10	16.70	52.90	19.30	49.88	1.52	28.90	0.45	
UC	10.25	13.02	61.71	15.02	51.35	1.35	31.95	0.46	
Item	Inorganic Composition (%)								
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO
Unwashed- UC	1.26	14.40	1.34	1.48	1.97	13.90	2.91	1.77	0.22
UC	2.45	15.65	0.85	1.45	0.89	6.45	2.97	1.01	0.21
AUC-S	1.42	11.40	1.20	1.48	0.92	11.50	2.52	1.71	0.15
AUC-C	3.93	15.80	0.66	0.16	2.20	3.93	1.15	0.34	0.06

3.2 คุณสมบัติเชิงโครงสร้างรูพรุนและความสามารถในการดูดซับ

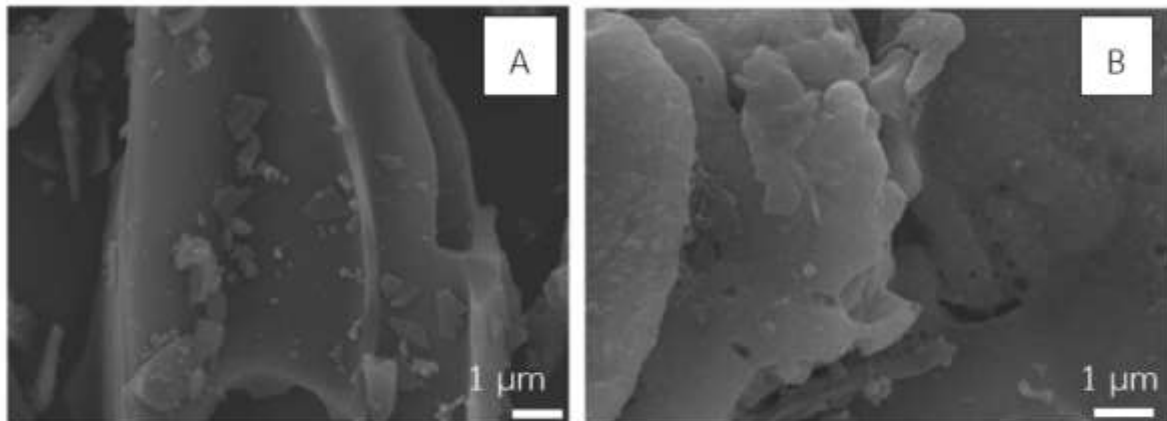
จากข้อมูลคุณสมบัติเชิงโครงสร้างรูพรุนของตัวอย่าง UC, AUC-S และ AUC-C สามารถอธิบายผลของกระบวนการกระตุ้นต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้อย่างชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 2 ตัวอย่าง UC แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูงที่ 275.21 m^2/g โดยมีสัดส่วนพื้นที่ไมโครพอร์สูงถึง 222.45 m^2/g คิดเป็นสัดส่วนหลักของพื้นที่ผิวทั้งหมด สะท้อนว่าโครงสร้างของ UC หลังการล้างมีลักษณะเด่นเป็นรูพรุนขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3 เหมาะสมต่อการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม ปริมาตรรูพรุนรวมยังอยู่ในระดับปานกลาง (0.136 cm^3/g) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.97 nm ซึ่งอยู่ในช่วงไมโครพอร์ถึงเมโซพอร์ขนาดเล็ก สำหรับ AUC-S การกระตุ้นด้วยไอน้ำส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 330.49 m^2/g และพื้นที่ไมโครพอร์เพิ่มขึ้นเป็น 279.35 m^2/g แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นเชิงกายภาพสามารถพัฒนาไมโครพอร์เพิ่มเติมได้

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาตรรูพรุนรวมมีเพียงเล็กน้อย (0.143 cm^3/g) ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยลดลงเหลือ 1.74 nm บ่งชี้ว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำเน้นการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นหลัก พร้อมกับการเกิด carbon burn-off บางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับการสูญเสียมวลที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้าม AUC-C ซึ่งผ่านการกระตุ้นทางเคมี แสดงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนอย่างเด่นชัด โดยพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 511.63 m^2/g และพื้นที่ไมโครพอร์สูงถึง 402.98 m^2/g ขณะเดียวกัน ปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวเป็น 0.311 cm^3/g และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยขยายเป็น 2.43 nm ผลดังกล่าวสะท้อนว่าการกระตุ้นด้วย KOH ไม่เพียงแต่สร้างไมโครพอร์จำนวนมาก แต่ยังช่วยขยายบางส่วนของไมโครพอร์ไปสู่เมโซพอร์ ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนมีความหลากหลายและเปิดโล่งมากขึ้น กล่าวโดยสรุปการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและไมโครพอร์ในระดับจำกัด ขณะที่การกระตุ้นทางเคมี (AUC-C) มีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจนในการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนทั้งในด้านพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุน ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการดูดซับที่คาดว่าจะสูงกว่า และสอดคล้องกับผลได้ที่ยังคงอยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับการกระตุ้นเชิงกายภาพ

ในบรรดาตัวอย่าง UC, AUC-C ให้สมรรถนะสูงสุด โดยมีค่าการดูดซับ CO_2 ที่ความดัน 1 bar เท่ากับ 2.03 mmol/g ซึ่งสะท้อนถึงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนอย่างมีประสิทธิภาพจากการกระตุ้นทางเคมี โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน รวมถึงการขยายไมโครพอร์บางส่วนไปสู่เมโซพอร์ ส่งผลให้มีตำแหน่งดูดซับ CO_2 มากขึ้น นอกจากนี้ อาจมีการเกิดหรือคงอยู่ของหมู่ฟังก์ชันบนผิวคาร์บอนที่เอื้อต่อการยึดจับ CO_2 สำหรับ UC ในสภาพหลังการล้าง พบว่ามีค่าการดูดซับ CO_2 เท่ากับ 1.34 mmol/g ที่ 1 bar ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีศักยภาพในการดูดซับ CO_2 ได้ดีแม้ยังไม่ผ่านการกระตุ้น เนื่องจาก UC มีโครงสร้างคาร์บอนที่มีความพรุนตามธรรมชาติจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดโครงข่ายของไมโครพอร์และเมโซพอร์จำนวนมาก รวมถึงมีปริมาณคาร์บอนสูงและมีสิ่งเจือปนอินทรีย์ต่ำ ส่งผลให้พื้นผิวเหมาะสมต่อการดูดซับ CO_2 ผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์ เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) สมรรถนะการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 1.50 mmol/g แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นเชิงกายภาพสามารถช่วยพัฒนาไมโครพอร์เพิ่มเติมและเพิ่มพื้นที่ผิวได้ แม้ว่าการเพิ่มขึ้นจะไม่เด่นชัดเท่าการกระตุ้นทางเคมี เนื่องจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำยังคงทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนบางส่วนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยสรุป ลำดับสมรรถนะการดูดซับ CO_2 ของตัวอย่าง UC-based คือ $\text{AUC-C} > \text{AUC-S} > \text{UC}$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการกระตุ้นทางเคมีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มศักยภาพการดูดซับ CO_2 ของ UC ขณะที่ UC เองก็มีความสามารถในการดูดซับ CO_2 ในระดับที่ดีอยู่แล้วจากโครงสร้างคาร์บอนและความพรุนตามธรรมชาติของวัสดุ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงโครงสร้างรูพรุน

Material	Surface Area (m^2/g)	Micropore Area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Average Pore Diameter (nm)
UC	275.21	222.45	0.136	1.97
AUC-S	330.49	279.35	0.143	1.74
AUC-C	511.63	402.98	0.311	2.43



ภาพที่ 3 SEM images (A) UC-based Adsorbent; (B) FA-based Adsorbent

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Sample	Experimental conditions	Evaluation method	S_{BET} (m^2/g)	Adsorption capacity (mmol/g)	Adsorption capacity (kgCO_2/kg)
UC	298 K, 1 bar	Micromeritics 3Flex	275.2	1.34	0.059
AUC-S	298 K, 1 bar	Micromeritics 3Flex	330.5	1.50	0.066
AUC-C	298 K, 1 bar	Micromeritics 3Flex	511.5	2.03	0.089

3.3 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความคุ้มค่าทางคาร์บอน

ในด้าน การปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิต พบว่า AUC-S มีการปล่อยคาร์บอนรวมสูงกว่า AUC-C โดยมีค่าเท่ากับ 10.0267 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$ ซึ่งมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก ขณะที่ AUC-C มีการปล่อยคาร์บอนรวม 9.3667 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$

โดยแม้จะมีการปล่อยคาร์บอนเพิ่มเติมจากการใช้สารเคมี (KOH และ HCl) เท่ากับ 0.7000 kg CO₂/kg แต่การปล่อยคาร์บอนจากไฟฟ้ากลับต่ำกว่า AUC-S อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้การปล่อยคาร์บอนรวมของ AUC-C ต่ำกว่าโดยรวม สะท้อนว่าการกระตุ้นทางเคมีสามารถออกแบบกระบวนการให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานได้ดีกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม หากเทียบกับการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตด้วยวัตถุดิบมาตรฐาน (ถ่านหิน) ซึ่งอยู่ที่ 9.5 kg CO₂/kg ถือว่ามีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แต่สูงกว่าการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตที่ใช้ชีวมวลอื่นๆ (Vilén, Laurell, & Vahala, 2022) เมื่อพิจารณา สมรรถนะการดูดซับ CO₂ พบว่า AUC-C แสดงความสามารถในการดูดซับสูงกว่าชัดเจน โดยมีค่า adsorption capacity เท่ากับ 0.089 kg CO₂/kg เทียบกับ 0.066 kg CO₂/kg ของ AUC-S ความแตกต่างนี้สอดคล้องกับการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่เด่นชัดกว่าจากการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับก๊าซ CO₂ การประเมิน Carbon Payback Cycles ซึ่งสะท้อนจำนวนรอบการใช้งานที่วัสดุดูดซับต้องผ่านเพื่อชดเชยการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิต พบว่า AUC-C ต้องการเพียง 106 รอบ ในขณะที่ AUC-S ต้องการสูงถึง 152 รอบ ค่า Carbon Payback Cycles ที่ต่ำกว่าของ AUC-C บ่งชี้ถึงความได้เปรียบเชิงสิ่งแวดล้อมในระยะยาว เนื่องจากสามารถคืนคาร์บอนได้เร็วกว่าและมีศักยภาพในการใช้งานเชิงพาณิชย์มากกว่า โดยสรุป แม้ AUC-C จะมีการปล่อยคาร์บอนจากการใช้สารเคมีเพิ่มเติม แต่ด้วยสมรรถนะการดูดซับ CO₂ ที่สูงกว่าและจำนวนรอบ Carbon Payback Cycles ที่ต่ำกว่า ทำให้ AUC-C แสดงศักยภาพที่เหนือกว่า AUC-S ทั้งในด้านประสิทธิภาพการใช้งานและความยั่งยืนเชิงสิ่งแวดล้อม ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกเทคนิคการกระตุ้นที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา activated carbon สำหรับการดักจับ CO₂ ในบริบทของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของวัสดุ

โดยทั่วไป activated carbon สำหรับการดักจับ CO₂ แบบ physical adsorption สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้หลายรอบ ทั้งนี้จำนวนรอบการใช้งานขึ้นอยู่กับโครงสร้างรูพรุน วิธีการฟื้นฟูสมบัติ (regeneration) และความรุนแรงของสภาวะใช้งาน จากรายงานในวรรณกรรม วัสดุ activated carbon ที่ได้จากชีวมวลหรือของเสียและผ่านการกระตุ้นด้วย KOH มักสามารถใช้งานได้ประมาณ 80–120 รอบการดูดซับ-คายซับ (adsorption-desorption cycles) โดยยังคงสมรรถนะการดูดซับ CO₂ มากกว่า 80–90% ของค่าเริ่มต้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการดูดซับแบบแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก และเหมาะสมต่อการใช้งานระยะยาวในระบบดักจับคาร์บอนเชิงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Sample	Carbon Emission from Electricity (kgCO ₂ /kg)	Carbon Emission from Chemicals (kgCO ₂ /kg)	Total Carbon Emission (kgCO ₂ /kg)	Adsorption capacity (kgCO ₂ /kg)	Carbon Payback Cycles (Times)
AUC-S	10.0267	-	10.0267	0.066	152
AUC-C	8.6667	0.7000	9.3667	0.089	106

4. สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

งานวิจัยนี้ได้ประเมินศักยภาพของการผลิตวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (UC) ซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยเปรียบเทียบผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) และการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH (AUC-C) ทั้งในด้านสมบัติเชิงโครงสร้าง ความสามารถในการดูดซับ CO₂ และการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิต ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการกระตุ้นทางเคมีสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้ AUC-C มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และความสามารถในการดูดซับ CO₂ สูงกว่า UC และ AUC-S อย่างชัดเจน แม้กระบวนการกระตุ้นทางเคมีจะมีการปล่อยคาร์บอนเพิ่มเติมจากการใช้สารเคมี แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับสมรรถนะการดูดซับ CO₂ พบว่า AUC-C มีจำนวนรอบการคืนคาร์บอน (Carbon Payback Cycles) ต่ำกว่า แสดงถึงความได้เปรียบด้านการลดคาร์บอนสุทธิในระยะยาว งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกเทคนิคการกระตุ้นที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพการดักจับ CO₂ และความยั่งยืนเชิงสิ่งแวดล้อมของวัสดุดูดซับ โดยการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับการออกแบบกระบวนการผลิตที่คำนึงถึงคาร์บอนแฝง สามารถเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการสนับสนุนเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม

ตามการเลือกใช้วัสดุแต่ละชนิดควรพิจารณาพร้อมกับต้นทุนการผลิตและบริบทของการใช้งานจริง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมทั้งด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ / Acknowledgements

ตุลาการ เกตุวงศ์ รับทุนสนับสนุนจากภาคีวิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- Abd, A. A., Othman, M. R., & Kim, J. (2021). A review on application of activated carbons for carbon dioxide capture: present performance, preparation, and surface modification for further improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43329-43364.
- Dubey, A., & Arora, A. (2022). Advancements in carbon capture technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133932.
- Foorginezhad, S., Zerafat, M., Asadnia, M., & Rezvannasab, G. (2024). Activated porous carbon derived from sawdust for CO₂ capture. *Materials Chemistry and Physics*, 317, 129177.
- Ketwong, T., Cholatthanatanakorn, N., & Areeprasert, C. (2025). Investigation on low-cost CO₂ absorbents from bagasse fly ash and unburned carbon residues from biomass power plant. *Biomass Futures*, 100006.
- Ketwong, T., Cholatthanatanakorn, N., Ding, L., Wibowo, H., & Areeprasert, C. (2023). Utilization of bagasse fly ash for the production of low-cost ammonia adsorbents in poultry farm. *Waste management*, 172, 347-357.
- Serafin, J., & Dziejarski, B. (2024). Activated carbons—preparation, characterization and their application in CO₂ capture: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(28), 40008-40062.
- Shah, H. H., Amin, M., Pepe, F., Mancusi, E., & Fareed, A. G. (2025). Overview of environmental and economic viability of activated carbons derived from waste biomass for adsorptive water treatment applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(32), 19084-19109.
- Usama, M., Khan, H., Khan, M. I., Hamid, A., Tariq, R., Bibi, A., . . . Hussain, S. (2025). Waste plastic derived activated carbon for simultaneous removal of hazardous antibiotics: Multiscale modelling and life cycle analysis. *Separation and Purification Technology*, 364, 132487.
- Vilén, A., Laurell, P., & Vahala, R. (2022). Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. *Journal of Environmental Management*, 324, 116356.