



ความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลเหลือใช้

รจิตรา ทันตาเร้ว* และ พฤกษ์ อักกะรังสี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รสสุคนธ์ จະวะนะ

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 1028 4742 อีเมล: rajitra1990@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.04.002

รับเมื่อ 9 มิถุนายน 2564 แก้ไขเมื่อ 2 สิงหาคม 2564 ตอบรับเมื่อ 26 สิงหาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 19 เมษายน 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านชีวภาพ ประกอบด้วย ถ่านซังข้าวโพดจากกระบวนการคาร์บอนเซชัน (C), ถ่านซังข้าวโพดจากกระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 (C_A), ถ่านกะลามะพร้าวจากกระบวนการคาร์บอนเซชัน (CO), ถ่านกะลามะพร้าวจากกระบวนการคาร์บอนเซชัน ภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 (CO_A), ถ่านกิ่งไม้จากกระบวนการคาร์บอนเซชัน (B) และถ่านกิ่งไม้จากกระบวนการคาร์บอนเซชัน ภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 (B_A) ชีวมวลผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 ± 10 องศาเซลเซียส ถูกนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับโดยป้อนก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากน้ำเสียเอทานอลสู่เครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ $4,300 \pm 20$ กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง พบว่า ความสามารถในการดูดซับ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่าน C, CO และ B เท่ากับ 2.33 ± 0.09 , 3.66 ± 0.63 และ 5.56 ± 0.77 ตามลำดับและความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่าน C_A , CO_A และ B_A เท่ากับ 1.58 ± 0.90 , 1.84 ± 0.75 , 1.26 ± 0.20 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ่าน B มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่าถ่าน C และ ถ่าน CO และพบว่า กระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 ไม่มีผลต่อการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับ อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลเสียต่อกระบวนการนี้

คำสำคัญ: การดูดซับ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ชีวมวลเหลือใช้ กระบวนการคาร์บอนเซชัน ถ่านชีวภาพ

การอ้างอิงบทความ: รจิตรา ทันตาเร้ว, พฤกษ์ อักกะรังสี และ รสสุคนธ์ จະวะนะ, “ความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของ ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลเหลือใช้,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 1-11, เลขที่บทความ 233-065146, ก.ค.-ก.ย. 2566.



Hydrogen Sulfide Adsorption Capability of Biochar Produced from Residual Biomass

Rajittra Tantarew* and Pruk Aggarangsi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiangmai, Thailand

Rotsukon Jawana

Energy Research and Development Institute - Nakorping, Chiang Mai University, Chiangmai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 1028 4742, E-mail: rajittra1990@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.04.002

Received 9 June 2021; Revised 2 August 2021; Accepted 26 August 2021; Published online: 19 April 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study aimed to investigate the adsorption capacity of hydrogen sulfide (H_2S) by biochar prepared from agricultural waste. The biochar samples include carbonized corn cob (C), carbonized corn cob under CO_2 rich atmospheres (C_A), carbonized coconut shell (CO), carbonized coconut shell under CO_2 rich atmospheres (CO_A), carbonized woodchips (B) and carbonized woodchips under CO_2 rich atmospheres (B_A). All samples were carbonized at the controlled temperature (500 ± 10 °C). H_2S adsorption capability were evaluated in a continuous manner using actual biogas produced from ethanol waste with controlled H_2S loading rates of $4,300 \pm 20$ g/ m^3 -h. The experimental measurement of the H_2S adsorption capacity of C, CO, and B were 2.33 ± 0.09 , 3.66 ± 0.63 , and 5.56 ± 0.77 g H_2S /g Adsorbent material, respectively. The adsorption capacity of C_A , CO_A , and B_A were 1.58 ± 0.90 , 1.84 ± 0.75 , and 1.26 ± 0.20 g H_2S /g Adsorbent material. It is thus clear that carbonized woodchip (B) has significantly higher adsorption capacity than carbonized corn cob (C) and coconut shell (CO). Concisely, carbonization under CO_2 rich atmosphere cannot enhance adsorption capacity; instead it induces negative effects in most cases.

Keywords: Adsorption, Hydrogen Sulfide, Biomass, Carbonized, Biochar

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานที่มนุษย์นำมาใช้มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งนับวันยังมีปริมาณลดน้อยลงเรื่อยๆ และราคาพลังงานที่สูงขึ้นมนุษย์จึงจำเป็นต้องหาพลังงานจากแหล่งอื่นๆ โดยต้องเป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถสร้างขึ้นได้จากวัตถุดิบที่มีอยู่บนโลกเพื่อนำมาทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยพลังงานจากก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่มีมนุษย์กำลังให้ความสนใจอยู่ในปัจจุบัน

ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานสะอาดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการย่อยสลายชีวมวล (Biomass) ที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Bacteria) โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4) มีปริมาณมากถึง 55–70 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีประมาณ 30–45 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซอื่นๆ อีกประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) [1] จะเห็นได้ว่าในก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก จึงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ โดยก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 9.7 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

จากองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพดังกล่าวพบว่า มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) อยู่จึงทำให้ไม่สามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ได้โดยตรง เนื่องจากอาจทำให้เกิดการผุกร่อนของอุปกรณ์และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานได้ ซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ โดยก๊าซชีวภาพจากการหมักวัตถุดิบอาจมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นประมาณ 800 ถึง 4,000 พีพีเอ็ม ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ [2] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพก่อนนำไปใช้งาน

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ โดยโมเลกุลที่

ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ข้อดีของการดูดซับคือเป็นระบบพื้นฐานที่ง่ายต่อการควบคุมและบำรุงรักษา มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ และสามารถดูดซับสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นได้มาก อาจเหมาะสมในการบำบัดอากาศเสียที่มีปริมาณมาก และความเข้มข้นของกลิ่นต่ำ [3]

ถ่านชีวภาพ คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนซึ่งสามารถผลิตจากชีวมวล หรือวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น เหง้ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กิ่งไม้ กะลามะพร้าว เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนและประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O_2), ไนโตรเจน (N), ซัลเฟอร์ (S) และซีลีเนียม โครงสร้างจะเปลี่ยนไปตามประเภทของชีวมวล โดยเฉพาะธาตุคาร์บอน ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ล้วนได้มาจากการนำชีวมวลหรือวัสดุทางการเกษตร ซึ่งวัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อนำไปเผาในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกัน ตั้งแต่ระดับประมาณ 400–900 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลผลิตคือถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ จำนวนมากมายแตกต่างกันไป จากคุณสมบัติความมีรูพรุนของถ่านชีวภาพทำให้ผู้ทำการวิจัยมีแนวคิดนำถ่านชีวภาพมาใช้ในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนการใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนและมีราคาที่สูงกว่า แม้ว่าปริมาณรูพรุนของถ่านชีวภาพจะมีน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ แต่ถ่านชีวภาพอาจช่วยดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพได้เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถนำชีวมวลที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันมาทำการกระตุ้น (Activation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอนด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น โดยการทำให้รูพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ 1) การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นกระบวนการกระตุ้นด้วยก๊าซหรือไอน้ำ และ 2) การกระตุ้นทางเคมี เป็นกระบวนการกระตุ้นด้วยโดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [6] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดปรับปรุงกระบวนการ



ผลิตถ่านชีวภาพในขั้นตอนคาร์บอนเนชันโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มปริมาณรูพรุนของถ่านชีวภาพให้ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านชีวภาพจากกระบวนการคาร์บอนเนชันสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น ไม้ ฟาง ชังข้าวโพด ตอข้าวโพด กะลามะพร้าว ชานอ้อย แกลบ เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้เป็นชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร เมื่อนำมาผลิตถ่านชีวภาพจึงมีต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตพลังงานที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ จากงานวิจัยของ Guofeng Shang และคณะ [4] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์และกลไกของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านชีวภาพ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านชีวภาพที่ผลิตจากการบур ไม้ไผ่ และเปลือกข้าว จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์เรียงตามลำดับได้ดังนี้ ถ่านการบур > ถ่านไม้ไผ่ > ถ่านเปลือกข้าว > ถ่านกัมมันต์ จากงานวิจัยของ Sumathi Sethupathi และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการดูดซับ CH_4 , H_2S และ CO_2 เพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้งหมด 4 ชนิด คือ งา ถั่วเหลือง ต้นอ้อ (เกาหลี) ต้นอ้อ (ญี่ปุ่น) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแทนตายตัว (Fixed Bed) จากการทดลองพบว่า CH_4 ไม่ถูกดูดซับด้วยถ่านชีวภาพ แต่ถ่านชีวภาพสามารถดูดซับ CO_2 และ H_2S ได้โดยความสามารถในการดูดซับเรียงตามลำดับได้ดังนี้ ถ่านงา > ถ่านถั่วเหลือง > ถ่านอ้อ (เกาหลี) > ถ่านอ้อ (ญี่ปุ่น) และงานวิจัยของสรณ์ [6] ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมสารมลพิษในกลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศเสียโดยใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 3 ชนิด ได้แก่ กรดไนตริก (HNO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และแอมโมเนียมไนเตรด (NH_4NO_3) เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล มีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้เพื่อการดูดซับอากาศเสียที่เป็นก๊าซผสมของก๊าซอินทรีย์และก๊าซอนินทรีย์ ซึ่งจากการศึกษาความสามารถในการ

ดูดซับของถ่านกัมมันต์ในถังปฏิกิริยาพบว่า ผลจากการปรับสภาพทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับทางกายภาพ แต่มีความสามารถในการดูดซับไอของเบนซีนและเอทิลเบนซีนลดลง ในขณะที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้น 537.61 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้จึงได้นำชังข้าวโพดกะลามะพร้าวและกิ่งไม้ซึ่งเป็นชีวมวลเหลือใช้มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการคาร์บอนเนชันเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซชีวภาพ วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวหากไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อาจจะถูกเผาทำลายทิ้งซึ่งก่อให้เกิดปัญหาหมอกควัน ผู้ทำการวิจัยเล็งเห็นว่าชีวมวลเหลือใช้เหล่านี้มีประโยชน์ สามารถนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อลดการเผาทิ้งในที่โล่งอาจก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันอีกด้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลเหลือใช้ด้วยกระบวนการคาร์บอนเนชันและกระบวนการคาร์บอนเนชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 และหาจุดอิ่มตัวในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบแทนตายตัว

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการคาร์บอนเนชัน

ในการเตรียมถ่านชีวภาพเพื่อใช้สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ได้นำชีวมวลที่เตรียมไว้ ได้แก่ ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว และกิ่งไม้ที่ตากแห้งแล้วบรรจุลงในถังเหล็ก ความสูง 45 เซนติเมตร ความกว้าง 34 เซนติเมตร และความหนา 1 ± 0.2 มิลลิเมตร ก่อนนำเข้าสู่เตาเผาไร้อากาศ เมื่อชีวมวลได้ถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาไร้อากาศและได้รับความร้อนจากห้องเผาไหม้ จากคุณสมบัติการนำความร้อนของเหล็กซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 73 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน จึงตั้งสมมติฐานว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาและในถังเหล็กมีค่าเท่ากัน โดยการเตรียมถ่านได้ทำการเตรียมในสองลักษณะคือ 1) ถ่านชีวภาพจากกระบวนการคาร์บอนเนชันที่อุณหภูมิ 500 ± 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 2) ถ่านชีวภาพจากกระบวนการคาร์บอนเนชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2

โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500 ± 10 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งในขณะที่ทำการคาร์บอนในเซชันได้มีการปล่อยก๊าซ CO_2 เข้าสู่ถังเหล็กที่บรรจุชีวมวลตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ ด้วยอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการได้นำถ่านชีวภาพออกมาและนำไปบดและคัดขนาดให้มีขนาด ≤ 5 มิลลิเมตร ก่อนนำไปใช้ทดลองในขั้นตอนต่อไป

2.2 ขั้นตอนการเตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพ

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยทำจากท่อแก้วทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.25 เซนติเมตร ความสูง 7 เซนติเมตร (รูปที่ 1) โดยใช้จุกยางที่เจาะรูบริเวณกึ่งกลางเพื่อใส่แท่งแก้วลงปิดบริเวณด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อใช้เป็นทางเข้าและทางออกของก๊าซชีวภาพ โดยบริเวณด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ได้ใส่เส้นใยแก้วเข้าไปเพื่อทำการดักวัสดุติดซับไม่ให้หลุดปนออกไปก๊าซชีวภาพในระหว่างทำการทดลอง

2.3 ขั้นตอนการเตรียมชุดการทดลอง

เนื่องจากถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดลองมีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากันจึงกำหนดความสูงของถ่านชีวภาพที่บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากันที่ความสูง 5 เซนติเมตร [7]

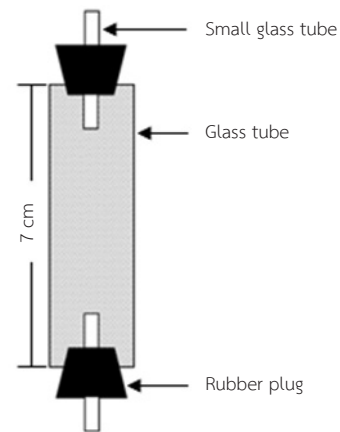
ทำการเตรียมเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมด 6 ชุด ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ทดสอบถ่าน C โดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มาบรรจุถ่านชีวภาพที่ความสูง 5 เซนติเมตร ปริมาณ 1.60 กรัม

ชุดการทดลองที่ 2 ทดสอบถ่าน C_A โดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มาบรรจุถ่านชีวภาพที่ความสูง 5 เซนติเมตร ปริมาณ 1.64 กรัม

ชุดการทดลองที่ 3 ทดสอบถ่าน CO โดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มาบรรจุถ่านชีวภาพที่ความสูง 5 เซนติเมตร ปริมาณ 4.10 กรัม

ชุดการทดลองที่ 4 ทดสอบถ่าน CO_A โดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มาบรรจุถ่านชีวภาพที่



รูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์

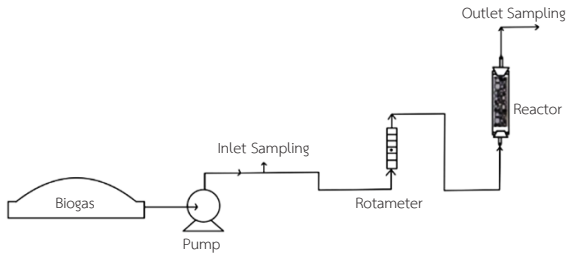
ความสูง 5 เซนติเมตร ปริมาณ 3.40 กรัม

ชุดการทดลองที่ 5 ทดสอบถ่าน B โดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มาบรรจุถ่านชีวภาพที่ความสูง 5 เซนติเมตร ปริมาณ 1.77 กรัม

ชุดการทดลองที่ 6 ทดสอบถ่าน B_A โดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มาบรรจุถ่านชีวภาพที่ความสูง 5 เซนติเมตร ปริมาณ 1.72 กรัม

2.4 วิธีการดำเนินการดูดซับ

เริ่มต้นดำเนินการทดลองโดยการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพก่อนเข้าระบบทุกครั้งด้วยเครื่อง Biogas Analyzer ยี่ห้อ Gas Data รุ่น GFM Series เพื่อควบคุมอัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของแต่ละการทดลองให้คงที่ด้วยการปรับอัตราการไหลก๊าซชีวภาพก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยป้อนก๊าซชีวภาพด้วยปั๊มรีดยี่ห้อ Watson Marlow รุ่น 323S/D ผ่านโรตารีเตอร์ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุวัสดุติดซับภายใน จากด้านล่างชั้นสู่ด้านบน (รูปที่ 2) และทำการจดบันทึกองค์ประกอบก๊าซชีวภาพออกเครื่องปฏิกรณ์ทุกๆ 30 นาที ด้วยเครื่อง Biogas Analyzer จนกระทั่งวัสดุติดซับเข้าสู่จุดอิ่มตัว จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณกับค่าก่อนการทดลอง โดยคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด



รูปที่ 2 กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.5 การคำนวณอัตราการบรรทุก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้เตรียมขึ้นจากการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1,100 ลิตรโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากแป้งมันประมาณ 557 กรัม โดยเติมสารเคมีแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 34.6 กรัม เพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้แก่ น้ำเสีย และเติมสารเคมีไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) 20.7 กรัม เพื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสให้แก่ น้ำเสีย จากนั้นผสมน้ำประปา ปริมาตร 44 ลิตร และน้ำเสียเอทานอลปริมาตร 2 ลิตร ซึ่งการเติมน้ำเสียเอทานอลครั้งนี้เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้แก่ระบบ จากนั้นเติมสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 110.88 กรัม เพื่อเพิ่มสภาพต่างทั้งหมดให้แก่ระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน และบ่มน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้เข้าสู่ถังหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาใช้ในการทดลอง ในการควบคุมอัตราการบรรทุก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในหน่วยกรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ที่เข้าระบบให้คงที่ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง จะต้องทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพให้ก๊าซป้อนเข้าระบบอยู่ในช่วงที่ทำการศึกษาดูดซับ โดยคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพตามสมการที่ (1)

$$\text{Loading} = \frac{\text{gas flow} \times H_2S_{\text{input}} \times 34.08 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{\text{filter volume} \times 22.41 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \quad (1)$$

เมื่อ *Loading* คือ อัตราการบรรทุก๊าซ H_2S (กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

Gas flow คือ อัตราการไหลของก๊าซ H_2S (ลิตรต่อชั่วโมง)

H₂S_{input} คือ ความเข้มข้นของก๊าซ H_2S (ppm)

Filter volume คือ ปริมาตรของตัวดูดซับ (ลูกบาศก์เมตร) และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพตามสมการที่ (2)

$$q_e = \frac{\sum [(C_{\text{input}} - C_{\text{output}}) \times \text{Flow} \times \text{Time}]}{m} \quad (2)$$

เมื่อ q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับ (กรัมต่อกรัม)

C_{input} คือ ความเข้มข้นก๊าซ H_2S ขาเข้า (กรัมต่อลิตร)

C_{output} คือ ความเข้มข้นก๊าซ H_2S ขาออก (กรัมต่อลิตร)

Flow คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อนาที)

Time คือ เวลา (นาที)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

3. ผลการทดลอง

3.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนด้วยเทคนิค BET แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ถ่าน C มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด รองลงมาคือ B_A , CO, B, CO_A และ C_A ตามลำดับ และพบว่า B_A มีขนาดรูพรุนสูงที่สุด รองลงมาคือ B, CO, C_A , C และ CO_A ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพจะเห็นได้ว่ากระบวนการคาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพได้ ทั้งนี้จากการทดลองของอาจเนื่องจากอุณหภูมิของกระบวนการคาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO_2 ยังไม่สูงพอที่จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นได้ [8]

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller Method; BET) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุนและการศึกษารูปร่าง ของรูพรุน

โดยอาศัยหลักการดูดซับระหว่างของแข็งกับตัวเร่งปฏิกิริยา และก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซชนิดอื่นที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน เป็นตัวดูดซับ [9] การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพ ใช้เครื่องมือยี่ห้อ Quanta Chrome รุ่น Autosorb เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว และวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน พื้นที่ผิวของผงตัวอย่างและปริมาตรของรูพรุนในแบบต่างๆ โดยใช้หลักการ Vacuum Volumetric Technique ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของแต่ละวัสดุดูดซับ

ชนิดถ่านชีวภาพ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)	ค่าเฉลี่ยรูพรุน (\AA)
C	11.34	0.0217	38.33
C _A	8.33	0.0220	52.76
CO	10.89	0.0230	42.15
CO _A	8.75	0.0158	35.98
B	9.82	0.0253	51.45
B _A	10.99	0.0298	54.23

จากการจำแนกประเภทของวัสดุรูพรุน ได้แก่ พอลิเมอร์คาร์บอน กระจก อะลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ และโลหะ ตามมาตรฐาน IUPAC [10] โดยถ่านชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุรูพรุนประเภทคาร์บอน ขนาดรูพรุนจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ไมโครพอร์จนถึงเมโซพอร์ จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนพบว่า ถ่านชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุรูพรุนคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวความพรุนสูงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงเมโซพอร์ ซึ่งมีความสามารถในการแพร่ผ่านต่ำ-ปานกลางตามมาตรฐานของ IUPAC

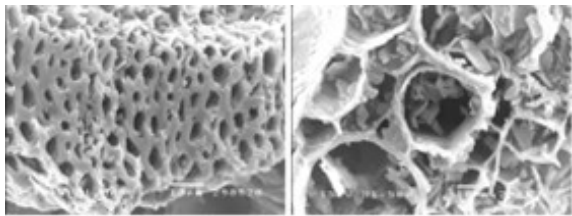
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้เครื่องมือยี่ห้อ DO SEM

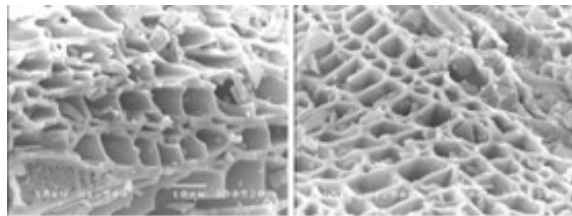
(Scanning Electron Microscope) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยายสูง Resolution ของ SEI 3.5 นาโนเมตร และ BEI 4.5 นาโนเมตร กำลังขยายภาพตั้งแต่ 15–200,000 เท่า ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3–5

จากการศึกษาของ Gourani และคณะ [11] และ Md-Desa และคณะ [12] พบว่า โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย รูพรุนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อไปยังรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดเล็ก โดยรูพรุนขนาดใหญ่จะถูกใช้เป็นทางเข้าของสารมลพิษไปในถ่านกัมมันต์ ในขณะที่รูพรุนขนาดกลางจะถูกใช้เป็นเส้นทางลำเลียงและรูพรุนขนาดเล็กจะถูกใช้เป็นพื้นที่ดูดซับที่อยู่ภายในของถ่านกัมมันต์ จึงส่งผลให้สารมลพิษสามารถถูกดูดซับทั้งในบริเวณรูพรุนทุกขนาด

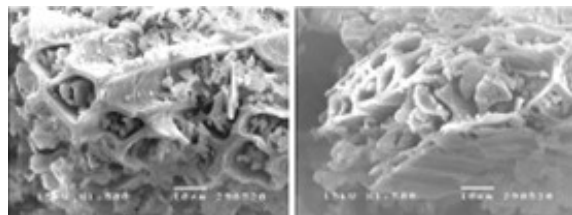
การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพในงานวิจัยนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพ ในการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ่านกัมมันต์และถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่าน C (รูปที่ 3 (ก)), C_A (รูปที่ 3 (ข)), CO (รูปที่ 4 (ก)) และ CO_A (รูปที่ 4 (ข)) จะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของโครงสร้างของถ่านชีวภาพที่ถูกทำลายจนเกิดการแตกหักได้อย่างชัดเจน และยังสังเกตเห็นลักษณะของโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว แต่รูพรุนดังกล่าวปรากฏสิ่งปิดคลุมซึ่งอาจกีดขวางการเคลื่อนผ่านของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่จะเข้าสู่โครงสร้างภายในของถ่านชีวภาพ ลักษณะดังกล่าวอาจจะทำให้ความสามารถของถ่านชีวภาพในการยอมให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าสู่โครงสร้างภายในของถ่านชีวภาพลดลง จึงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ลดลงตามไปด้วย ส่วนถ่าน B (รูปที่ 5 (ก)) และ B_A (รูปที่ 5 (ข)) จะสังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างของรูพรุนบนพื้นผิวมีลักษณะของรูพรุนที่ลึกเข้าไปด้านใน ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างที่ช่วยให้การไหลผ่านของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโครงสร้างของถ่านชีวภาพได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gourani และคณะ [11] และ Md-Desa และคณะ [12] จึงทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถถูกดูดซับได้โดยพื้นผิวส่วนใหญ่ที่อยู่ภายในโครงสร้างของถ่านชีวภาพ



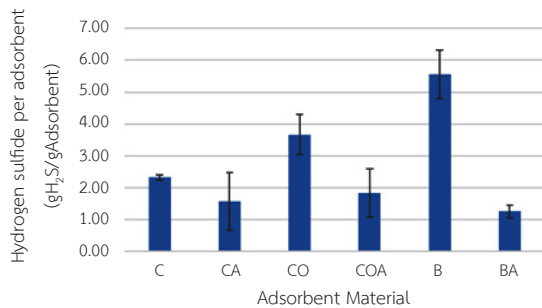
(ก) (ข)
รูปที่ 3 ถ่าน C (ก) และ ถ่าน C_A (ข)



(ก) (ข)
รูปที่ 5 ถ่าน B (ก) และ B_A (ข)



(ก) (ข)
รูปที่ 4 ถ่าน CO (ก) และ ถ่าน CO_A (ข)



รูปที่ 6 ความสามารถในการดูดซับก๊าซ H₂S ของแต่ละวัสดุดูดซับ

3.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากระบบ Anaerobic Covered Lagoon ได้ทำการตรวจวัดสัดส่วน ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จำนวน 3 ซ้ำ ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง โดยใช้ตัวกลางวัสดุดูดซับ C, C_A, CO, CO_A, B และ B_A ซึ่งมีค่าองค์ประกอบก๊าซชีวภาพเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2

3.4 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ พบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อปริมาตรถ่านชีวภาพ

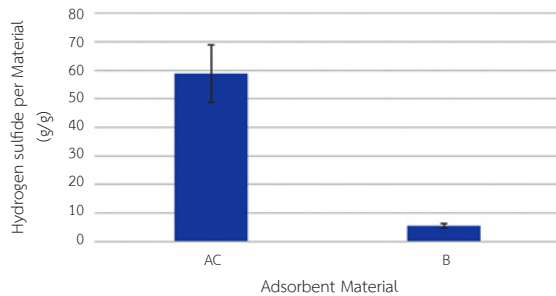
ที่แตกต่างกัน ณ สภาวะคงที่ พบว่า B มีค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มากที่สุดเท่ากับ 5.56 ± 0.77 กรัมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกรัมของ B ส่วนถ่านชีวภาพที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยที่สุดคือ B_A มีค่าเท่ากับ 1.26 ± 0.20 กรัมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกรัมของ B_A จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพทุกชนิดที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้บรรยากาศก๊าซ CO₂ มีความสามารถในการดูดซับก๊าซ H₂S ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเริ่มต้นของการทดลองแต่ละวัสดุดูดซับ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ชนิดถ่านชีวภาพ					
	C	C _A	CO	CO _A	B	B _A
CH ₄ (%)	62.6 ± 1.2	62.2 ± 2.7	64.7 ± 2.1	66.0 ± 1.2	66.8 ± 4.9	64.50 ± 0.95
CO ₂ (%)	35.8 ± 0.6	36.8 ± 2.7	35.57 ± 0.8	35.0 ± 0.6	33.5 ± 3.6	35.3 ± 0.61
O ₂ (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H ₂ S (ppm)	1,286.7 ± 144.3	1,253.3 ± 115.5	1,203.3 ± 80.8	1,310.0 ± 108.2	1,146.7 ± 3.7	1,040.0 ± 69.3

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



รูปที่ 7 ความสามารถในการดูดซับก๊าซ H_2S ของถ่าน AC เปรียบเทียบกับถ่าน B

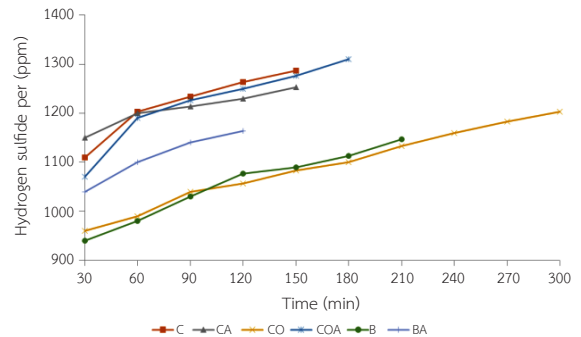
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (AC) กับถ่าน B พบว่า ถ่าน AC มีค่าความสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 58.80 ± 10.17 g/g (รูปที่ 7)

3.5 จุดอิ่มตัวในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านชีวภาพในถังปฏิกรณ์แบบแท่นตายตัว

เมื่อทดลองไปเรื่อยๆ ถึงจุดอิ่มตัว เรียกว่า Breakthrough Point หรือเวลาที่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซับถึงจุดอิ่มตัว ทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกเท่ากับขาเข้า จากการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพ C, C_A , CO, CO_A , B และ B_A มีจุดอิ่มตัวที่ระยะเวลา 150, 150, 300, 180, 210 และ 120 นาที ตามลำดับ (รูปที่ 8)

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ ประกอบด้วย ถ่าน C, ถ่าน C_A , ถ่าน CO, ถ่าน CO_A , ถ่าน B และถ่าน B_A พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 2.33 ± 0.09 , 1.58 ± 0.90 , 3.66 ± 0.63 , 1.84 ± 0.75 , 5.56 ± 0.77 และ 1.26 ± 0.20 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ และมีจุดอิ่มตัวของถ่านชีวภาพที่ระยะเวลา 150, 150, 300, 180, 210 และ 120 นาที ตามลำดับ จากค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่า ถ่าน B มีค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 8 จุดอิ่มตัวในการดูดซับก๊าซ H_2S ของแต่ละวัสดุดูดซับ

สูงที่สุด และมีจุดอิ่มตัวที่ระยะเวลา 210 นาที แต่เมื่อเทียบกับถ่าน AC พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 10.6 เท่า ดังนั้นการนำถ่าน B ไปใช้ประโยชน์หรือทดแทนถ่าน AC ควรทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่อแบบอนุกรม อาจสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและบำรุงรักษาเครื่องปฏิกรณ์ได้

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้บรรยากาศ CO_2 ก่อให้เกิดผลเสียต่อความสามารถในการดูดซับ H_2S อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการดูดซับของงานวิจัยนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับสารองค์ประกอบที่ถูกดูดซับโดยไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจึงสามารถย้อนกลับได้ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางกายภาพจะไม่มี ความจำเพาะเจาะจง โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถจับหรือเกาะได้ทั่วทั้งพื้นผิวบริเวณใดก็ได้ อย่างไรก็ตาม โดย การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น ถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการปรับสภาพสามารถดูดซับสารมลพิษโดยกระบวนการดูดซับทางกายภาพเนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับสารองค์ประกอบที่ถูกดูดซับหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่ผลจากการปรับสภาพจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลง [6]

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทย ได้แก่ ช้างข้าวโพด กะลามะพร้าว และ กิ่งไม้ มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันเพื่อใช้ประโยชน์ในการ



ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนเครื่องจักร หรืออุปกรณ์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพในการให้ความร้อนและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนได้จากการทดลองจะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี หากนำถ่านชีวภาพไปใช้ในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อขยะ หรือฟาร์มปศุสัตว์ขนาดเล็กที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำ หรืออาจต่อยอดจากงานวิจัยนี้โดยนำถ่านชีวภาพไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารพิษชนิดอื่นๆ หรือมีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยการปรับปรุงคุณภาพของถ่านชีวภาพด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพให้มากขึ้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนสถานที่ในการวิจัย และรวมทางด้านอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] O. W. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. P. Minh, and N. Lyczko, "A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies," UCD Dooge Centre for Water Resources Research, School of Civil Engineering, University College Dublin, Newstead, Belfield, Dublin 4, Ireland, January 2017.
- [2] M.A.M.Khraisheh, M.A.Al-Ghouti, S.J.Allen, and M.N.Ahmad, "Effect of OH and silanol groups in the removal of dyes from aqueous solution using diatomite," *Water Research*, vol. 39, no. 5, pp. 922-932, 1979.
- [3] Office of Agricultural Economics. (2018, March). *Agricultural Statistics of Thailand 2018*. [Online] (in Thai). Available: [http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/maize%20province%2061\(1\).pdf](http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/maize%20province%2061(1).pdf)
- [4] G. Shang, G. Shen, L. Liu, Q. Chen, and Z. Xu, "Kinetics and mechanisms of hydrogen sulfide adsorption by biochars," *Bioresource Technology*, vol. 133, pp. 495-499, 2013.
- [5] S. Sumathi, M. Zhang, A. U. Rajapaksha, S. R. Lee, N. M. Nor, A. R. Mohamed, M. Al-Wabel, S. S. Lee, and Y. S. Ok, "Biochars as Potential Adsorbers of CH₄, CO₂ and H₂S," *Sustainability*, vol. 9, no. 1, pp. 121, 2017.
- [6] S. Suwannachot, "Adsorption capacity for organic and inorganic gas of the impregnated coconut base activated carbon," Ph.D. dissertation, Department of Environmental Management Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, 2016 (in Thai).
- [7] V. Tanusilp and S. Laowansiri, "Hydrogen sulfide Removal from Biogas by Activated Carbon and Iron," presented at the 9th National Kasetsart University Kamphangsaen Conference, Nakhonpathom, Thailand, 2012 (in Thai).
- [8] M. Tangsatitkulchai and C. Tangsatitkulchai, "Preparation and Adsorption of Wood-Based Activated carbon," Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Rep. SUT1-102-50-12-38, 2007 (in Thai).
- [9] A. Wongkaew, "A study of preparation conditions of bimetallic oxides (Copper and Ferric) affecting to their physical properties and catalytic activity to CO oxidation reaction," presented at Burapha University International Conference, Chonburi, Thailand, July 3-4, 2014 (in Thai).
- [10] P. Rungrojchaipon, "Porous Materials?,"



- Journal of Science Ladkrabang*, vol. 20, no. 1, pp. 63, 2011 (in Thai).
- [11] M. Gourani, A. Sadighzadeh, and F. Mizani, "Effect of impregnating materials in activated carbon on Iodine -131 removal efficiency," *Radiation Protection and Environment*, vol. 37, no. 3, pp. 179-183, 2014.
- [12] N.-S. Md-Desa, Z. A. Ghani, S. Abdul-Talib, and C.-C. Tay, "Optimization of activated carbon preparation from spent mushroom farming Waste (SMFW) via box-behnken design of response surface methodology," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol.49, no.1, pp. 461-468, 2016.