



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ
ด้วยตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดง

โดย

อาทิตย์ อัสวสุชี และคณะ

พฤศจิกายน 2559

สัญญาเลขที่ RDG59D0003

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการจัดไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์จากแก๊สชีวภาพ
ด้วยตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์และดินแดง

คณะผู้วิจัย

อาทิตย์ อัสวสุชี

คันธพจน์ ศรีสถิตย์

ตะวัน สุขน้อย

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

“ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite)” และ “ดินแดง (Red clay)” เป็นวัสดุที่มีมูลค่าต่ำที่เกิดจากการทำเหมืองแร่ลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ลีโอนาร์ไดต์ และดินแดงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็นปัญหาในการจัดการ ภายหลังจึงมีความสนใจที่จะนำวัสดุที่มีมูลค่าต่ำที่เกิดจากการทำเหมืองแร่มาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุดังกล่าว ตัวอย่างเช่น การนำลีโอนาร์ไดต์ และดินแดงมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เช่น เป็นส่วนผสมในปุ๋ย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำลีโอนาร์ไดต์และดินแดงไปใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) โลหะหนัก สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) รวมถึงสีที่ใช้ในการย้อมผ้า ในโครงการวิจัยนี้ลีโอนาร์ไดต์และดินแดงถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ เพื่อกำจัดกลิ่นเหม็นรบกวน และป้องกันการกัดกร่อนโลหะ โดยลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และในสถานะจริงจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดงโดยการเติมแต่งวัสดุที่มีรูพรุน ได้แก่ ถ่านกะลามะพร้าว และสารที่มีสมบัติเป็นเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ งานวิจัยนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ในทุกๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานในระดับประเทศ เนื่องจากภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมสามารถผลิตแก๊สชีวภาพขึ้นใช้เองได้ และเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดปลอดภัย และมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RDG59D0003
 ชื่อโครงการ : โครงการการจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ
 ด้วยตัวดูดซับลีโอนาร์ไต์และดินแดง
 ชื่อนักวิจัย : อาทิตย์ อัสวสุชี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
 คันทัพพจน์ ศรีสถิต
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
 ตะวัน สุขน้อย
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail Address : ausavasukhi@gmail.com
 ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี

ในการศึกษานี้ลีโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้จากการทำเหมืองแม่เมาะถูกใช้เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ การทดลองดูดซับดำเนินการโดยใช้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่มีแก๊สมีเทน (72 เปอร์เซ็นต์) คาร์บอนไดออกไซด์ (28 เปอร์เซ็นต์) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (4,400 พีพีเอ็มโดยปริมาตร) ตัวดูดซับจะถูกบรรจุในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร เครื่องจีโอเทค จีเอ5000 ถูกใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องอัตรา 50 มิลลิลิตรต่อนาที ความจุในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไต์และดินแดงมีค่า 0.2087 และ 0.0134 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ที่สำคัญเมื่อมีไอน้ำและมีการเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับสามารถเพิ่มความจุในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ มากไปกว่านั้นลีโอนาร์ไต์และดินแดงจะถูกปรับปรุงสมบัติโดยการฝังตัวโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวเพื่อเพิ่มการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวอย่างที่เตรียมได้สามารถให้ความจุในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับลีโอนาร์ไต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการปรับปรุง จากการคำนวณความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ลีโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการปรับปรุงสามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสำหรับใช้ในชุมชน

คำสำคัญ: ลีโอนาร์ไต์, ดินแดง, การจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์, แก๊สชีวภาพ, ตัวดูดซับที่มีราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

Project Code : RDG59D0003

Project Title : Hydrogen sulfide removal from biogas by leonardite and red clay adsorbent

Investigator : Artit Ausavasukhi
Rajamangala University of Technology Isan
Khanapoat Srisathit
Mahanakorn University of Technology
Tawan Sooknoi
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail Address : ausavasukhi@gmail.com

Project Period : 1 year

In this study, leonardite and red clay obtained from Mah Moh mine were utilized as low cost and eco-friendly adsorbents for H₂S removal from biogas. The adsorption experiments were performed with a synthetic biogas: CH₄ (72%), CO₂ (28%), and H₂S (4,400 ppmv). The adsorbents were packed in a column of 3.0 cm in diameter. Geotech GA5000 was used to analyze the composition of biogas at a continuous flow rate of 50 mL/min. The H₂S adsorption capacity of leonardite and red clay were 0.2087 and 0.0134 mg/g, respectively. Importantly, the presence of steam and rise in adsorption temperature increases the H₂S adsorption capacity. Moreover, leonardite and red clay were upgraded by sodium hydroxide (NaOH) impregnation and coconut shell biochar (CSB) modification to promote the H₂S adsorption. The prepared samples can provide significantly higher H₂S adsorption capacity and breakthrough time than the non-modified sample. From the economic feasibility calculations, the modified leonardite and red clay can be used as suitable adsorbent for H₂S removal from biogas for community use.

Keywords: Leonardite, Red clay, H₂S removal, Biogas, Low cost and eco-friendly adsorbent

1. บทนำ

“ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite)” [1] และ “ดินแดง (Red clay)” [2] เป็นมูลแร่ มูลดินทรายที่เกิดขึ้นจากการทำเหมืองแร่ลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ส่วนเหลือทิ้งจากการทำเหมืองแร่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็นปัญหาในการจัดการ ภายหลังจึงมีความสนใจที่จะเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว เช่น การนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร [3] เนื่องจากลีโอนาร์ไดต์มีส่วนประกอบเป็น กรดฮิวมิก (Humic acid) กรดฟุลวิก (Fulvic acid) ฮิวมิน (Humin) และมีโลหะอื่นๆ [1, 3] รวมถึงการใช้ดินแดงเป็นส่วนผสมในปุ๋ย [2] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำลีโอนาร์ไดต์และดินแดงไปใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) โลหะหนัก [4-5] สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) [6] สีย้อม [7-9] และฟีนอล [9] อย่างไรก็ตามการศึกษานำลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogensulfide; H_2S) จากแก๊สชีวภาพ ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผสมอยู่ในแก๊สชีวภาพนี้มีกลิ่นเหม็นรบกวนทำให้การใช้งานเป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในภาคครัวเรือนไม่ค่อยได้รับความนิยม นอกจากนี้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังมีสมบัติในการกัดกร่อนโลหะทำให้หัวเตาหุงต้มเกิดเป็นสนิมอุดตันได้ เช่นเดียวกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำให้เครื่องยนต์เกิดการสึกหรอ ทำให้การส่งเสริมการพัฒนาพลังงานทดแทนจากแก๊สชีวภาพไม่ก้าวหน้าเท่าที่ควร

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่ามีการใช้ตัวดูดซับ ได้แก่ เพอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) ร่วมกับปูนซีเมนต์เทาผสมดินเบา [10] ถ่านกัมมันต์ [11] ซีกิ่งเหล็กปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก [11] ซีกิ่งเหล็กไม่ปรับสภาพ [11] ถ่านกัมมันต์ร่วมกับซีกิ่งเหล็กไม่ปรับสภาพ [11] ซีโอไลด์ชนิด X และ Y ซึ่งทำการเติมแต่งเงิน และทองแดงโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน [12] โลหะผสมออกไซด์ซึ่งมีสังกะสีและไททาเนียมเป็นส่วนประกอบ [13] ถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการเติมแต่งโดยวิธีการฝังตัว (Impregnation) โดยใช้คอปเปอร์(II) ไนเตรต ($Cu(NO_3)_2$) [14] ถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการฝังตัว 2 เปอร์เซนต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI) [15] นอกจากนี้ยังมีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพโดยใช้การดูดซับและการดูดซึมทางเคมี ในระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน [16] และใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพที่เรียกว่า “Microaerobic desulphurisation unit; MDU” [17] แม้ว่าจะสามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพได้โดยกระบวนการดูดซับ อย่างไรก็ตามตัวดูดซับซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในช่วงต้นเป็นตัวดูดซับที่มีราคาแพง และมีขั้นตอนการเตรียมที่ยุ่งยาก โครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาติซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (วัสดุสีเขียว) มาใช้เป็นตัวดูดซับ ได้แก่ ลีโอนาร์ไดต์ และดินแดง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมูลค่าต่ำที่ได้จากการทำเหมืองแร่ลิกไนต์ มากไปกว่านั้นตัวดูดซับนี้ยังมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งมีโลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น เหล็กเป็นส่วนประกอบ รวมถึงมีสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน [7-9] ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง ทำให้

โอโนาร์ไต์และดินแดงมีศักยภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ มากกว่านั้นโครงการวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยวิธีการทางเคมี หรือพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite material) เพื่อนำตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในการแก้ปัญหามลกระทบซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

โครงการวิจัยนี้ “การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพด้วยตัวดูดซับลิโอโนาร์ไต์และดินแดง” จะเป็นก้าวสำคัญที่ก่อให้เกิดประโยชน์ในทุกๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานในระดับประเทศ เนื่องจากภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมสามารถผลิตแก๊สชีวภาพขึ้นใช้เองได้ และเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดปลอดภัย และมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ นอกจากนี้การผลิตแก๊สชีวภาพส่วนหนึ่งสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือทิ้ง จึงเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรทำให้เกษตรกรมีรายได้ที่ดีขึ้น และยังเป็นวิธีการจัดการขยะที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มมูลค่าของลิโอโนาร์ไต์และดินแดงทำให้ผู้ประกอบการมีรายได้สูงขึ้น และการศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับ และความสามารถในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการนำลิโอโนาร์ไต์และดินแดงนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านกระบวนการดูดซับอื่นๆ

2. วัตถุประสงค์

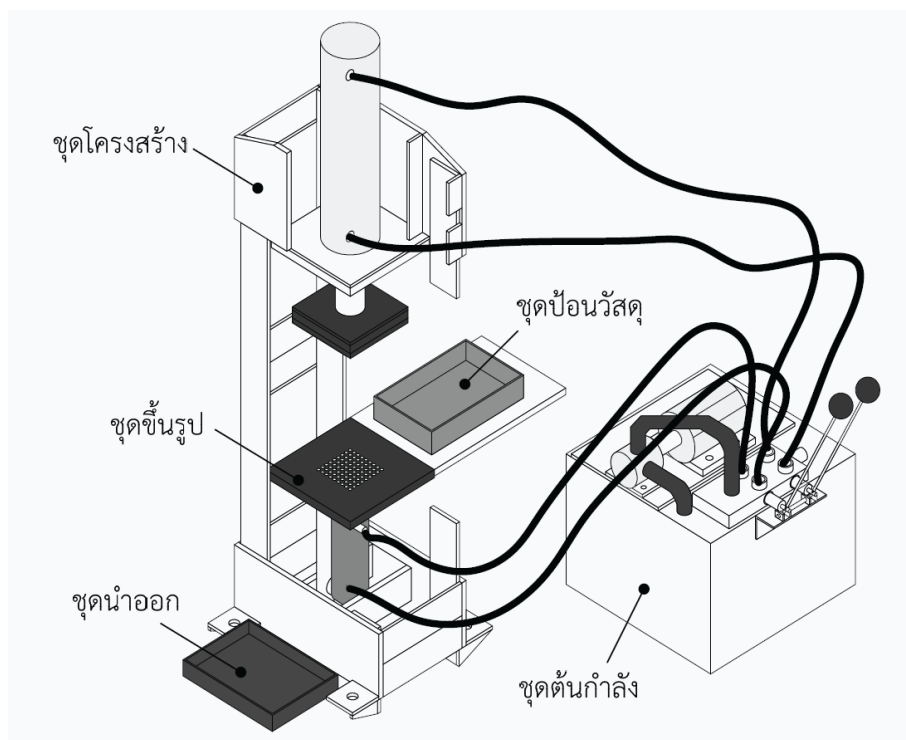
- 2.1 เพื่อเข้าใจคุณลักษณะ และสมบัติในการเป็นตัวดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลิโอโนาร์ไต์และดินแดง
- 2.2 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปตัวดูดซับ
- 2.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
- 2.4 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพที่ผลิตขึ้นในชุมชน และศึกษาต้นทุนการดำเนินการ

3. วิธีทดลอง

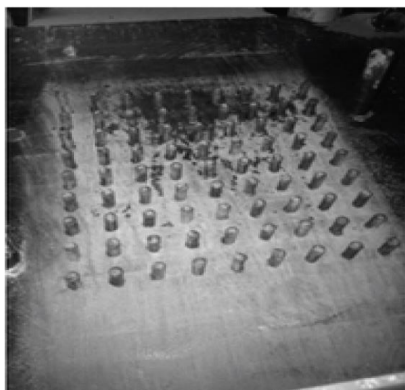
3.1 การเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

3.1.1 ลิโอโนาร์ไต์และดินแดง

ขึ้นรูปตัวดูดซับลิโอโนาร์ไต์ และดินแดงโดยใช้อุปกรณ์ขึ้นรูปตัวดูดซับโดยใช้ปั๊มไฮดรอลิกอัดลิโอโนาร์ไต์หรือดินแดงในแม่พิมพ์ทรงกระบอก (รูปที่ 1 และ 2)



รูปที่ 1 แบบจำลองเครื่องขึ้นรูปตัวดูดซับ



รูปที่ 2 เครื่องขึ้นรูปตัวดูดซับและการทำงาน

โดยตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์ และดินแดงที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมีลักษณะทางกายภาพเป็นรูปทรงกระบอก (รูปที่ 3) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.4 เซนติเมตร และความสูง 0.7 เซนติเมตร ตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์ที่เตรียมได้จะเรียกว่า Leonardite ในขณะที่ตัวดูดซับดินแดงที่เตรียมได้จะเรียกว่า Red clay



ลิโอนาร์ไต์



ดินแดง

รูปที่ 3 ลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก

3.1.2 ลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำลิโอนาร์ไต์หรือดินแดงที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีปริมาณเบส 10-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยวิธีการฝังตัว (Impregnation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า $x\text{NaOH}/\text{Leo}$ ในขณะที่ตัวดูดซับดินแดงที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า $x\text{NaOH}/\text{RC}$ เมื่อ x คือเปอร์เซ็นต์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในตัวอย่าง

3.1.3 ลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าว

นำลิโอนาร์ไต์หรือดินแดงมาผสมกับถ่านกะลามะพร้าว (Coconut shell biochar; CSB) ให้มีปริมาณถ่านกะลามะพร้าวในช่วง 10-70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน อบให้แห้ง และขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับ ตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า $x\text{CSB}/\text{Leo}$ ในขณะที่ตัวดูดซับดินแดงที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า $x\text{CSB}/\text{RC}$ เมื่อ x คือเปอร์เซ็นต์ของถ่านกะลามะพร้าวในตัวอย่าง

3.1.4 ลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยฟอยเหล็ก

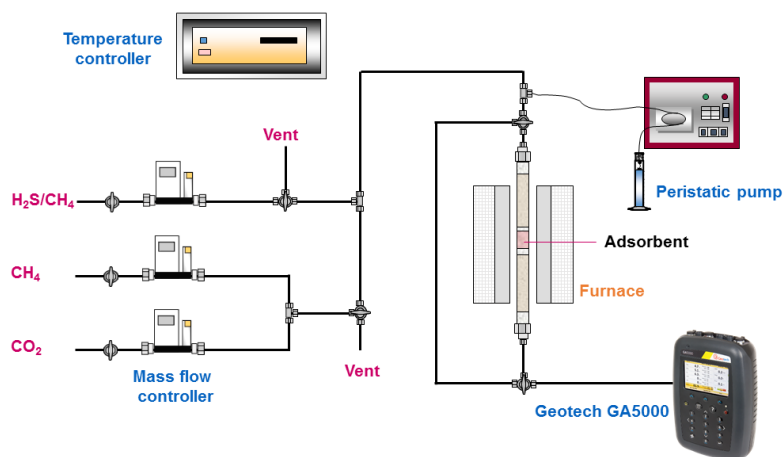
นำลิโอนาร์ไต์หรือดินแดงมาผสมกับฟอยเหล็กที่ผ่านการล้างทำความสะอาดโดยให้มีปริมาณฟอยเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน อบให้แห้ง และขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับ ตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า $50\text{Fe}/\text{Leo}$ ในขณะที่ตัวดูดซับดินแดงที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า $50\text{Fe}/\text{RC}$

3.2 การทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้แผงทดสอบการดูดซับ (รูปที่ 4 และ 5) ซึ่งประกอบด้วยแนวท่อแก๊สหลักจำนวน 3 แนว เพื่อสร้างแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ (Synthetic biogas) สำหรับใช้ทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพในห้องปฏิบัติการวิจัย



รูปที่ 4 แผงทดสอบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัย



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงแผงทดสอบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากรูปที่ 5 แนวท่อแก๊สหลักมีจำนวน 3 แนว ประกอบด้วย 1) แก๊สมีเทน (CH_4) ซึ่งผสมอยู่กับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ความเข้มข้น 10,000 พีพีเอ็ม 2) แก๊สมีเทน (CH_4) และ 3) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยสามารถปรับอัตราส่วนของแก๊สผสมดังกล่าวให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Mass flow

controller) เมื่อปรับอัตราการไหลของแก๊สมีเทนซึ่งผสมอยู่กับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 10,000 พีพีเอ็ม ด้วยอัตราการไหล 12 มิลลิลิตรต่อนาที แก๊สมีเทนด้วยอัตราการไหล 19 มิลลิลิตรต่อนาที และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอัตราการไหล 19 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีอัตราการไหลรวมเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนเป็น 72 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 เปอร์เซ็นต์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4,400 พีพีเอ็ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของแก๊สชีวภาพ

ในขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ชั่งตัวดูดซับให้มีปริมาณต่างๆ เช่น 30, 100, 150, 200 และ 250 กรัม จากนั้นใส่ใยแก้วลงในท่อพีวีซี และอัดให้มีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วจึงบรรจุตัวดูดซับ พร้อมทั้งวัดความสูงของตัวดูดซับที่ใส่ลงไป จากนั้นใส่ใยแก้วลงไปอีกชั้น เพื่อกันการหลุดออกของตัวดูดซับ นำท่อพีวีซีที่ผ่านการบรรจุตัวดูดซับแล้ว มาพันด้วยสายยาง (บริเวณรอบท่อพีวีซี) ที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นต่อท่อพีวีซีเข้ากับแผงทดสอบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (รูปที่ 4) เปิดวาล์วท่อแก๊ส (ที่ได้รับการปรับอัตราการไหลแล้ว) เพื่อส่งแก๊สไหลผ่านเข้ามาในท่อพีวีซีที่มีตัวดูดซับบันทึกค่าความเข้มข้นของแก๊สที่หลุดออกมาโดยอ่านจากเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Geotech GA5000) ตามช่วงเวลาต่างๆ จนกระทั่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์หลุดออกมา นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (Breakthrough curve) และคำนวณเวลาในการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (Breakthrough time) และความจุในการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (Breakthrough capacity)

3.3 การคืนสภาพตัวดูดซับ

นำตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้วมาทำการศึกษาการคืนสภาพโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อทำการไล่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากตัวดูดซับ จากนั้นนำตัวดูดซับที่ผ่านการคืนสภาพแล้วกลับมาทดสอบการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ใหม่อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับตอนเริ่มต้น

3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

ศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transformed Infrared Spectroscopy; FTIR) โดยวิเคราะห์การสั่นของพันธะที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับของไฮโดรเจนซัลไฟด์ตั้งแต่เลขคลื่น 4000-600 เซนติเมตร⁻¹

ศึกษาการเกิดขึ้นของซัลเฟต โดยนำตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จำนวน 3 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนจำนวน 300 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองตัวอย่างออก นำน้ำที่ได้จากการกรองจำนวน 10 มิลลิลิตร มาเติมสารละลาย

แบเรียมไนเตรต ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์ปริมาณของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยการชั่งน้ำหนัก

3.5 การทดสอบการดูดซับในสภาวะจริง

นำตัวดูดซับที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์มาใช้จริง โดยดำเนินการทดสอบที่วิสาหกิจชุมชนทองม้วนเปรมชัย ตำบลบึง อำเภอนิโนสูง จังหวัดนครราชสีมา โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ วัดอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพและความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Geotech GA5000) และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม จากนั้นสร้างระบบการไหลของแก๊สเพื่อนำแก๊สจากบ่อหมักเข้าสู่ถังดูดซับแก๊ส (รูปที่ 6) และนำแก๊สจากถังดูดซับแก๊สไปสู่เตาเผาโดยใช้ท่อพีวีซีเป็นวัสดุในการสร้างท่อนำแก๊ส ซึ่งจะมีวาล์วเพื่อควบคุมการไหลของแก๊ส โดยการทดลองนี้จะใช้ถังดูดซับแก๊สแบบคู่เพื่อให้สามารถใช้งานแก๊สชีวภาพได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6 แผนผังทดสอบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกสร้างขึ้นที่วิสาหกิจชุมชนทองม้วนเปรมชัย

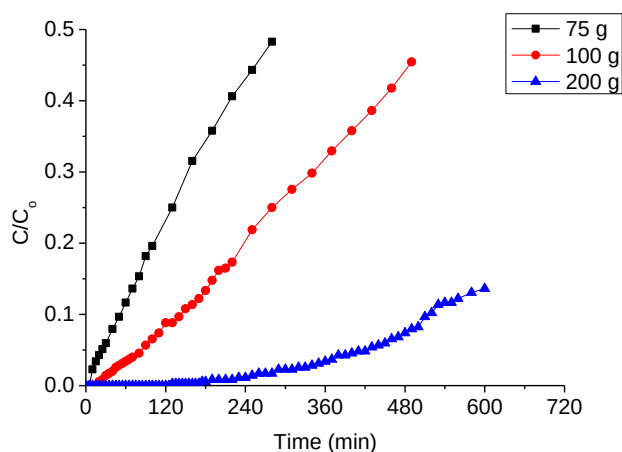
4. ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 สมบัติของตัวดูดซับ

ลีโอนาร์ไดต์และดินแดงถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี เทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ เทคนิคการเปลี่ยนแปลงโดยความร้อนเมื่อใช้แก๊ส ไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เทคนิคการดูดซับแก๊ส [18] พบว่าดินแดงมีแร่ควอตซ์ (Quartz) เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งมีธาตุองค์ประกอบเป็นซิลิกอน นอกจากนี้ยังมีแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งมีธาตุองค์ประกอบเป็นซิลิกอน อลูมิเนียม โลหะกลุ่มอัลคาไล และอัลคาไลน์เอิร์ท และแร่แมกนีไทต์ (Magnetite) ซึ่งมีธาตุองค์ประกอบเป็นเหล็ก ในขณะที่ลีโอนาร์ไดต์มีแร่ควอตซ์และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบฟีดของยิปซัม (Gypsum) อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นอะโรมาติกส์พอลิเมอร์ (Aromatic polymer) ของสารประกอบฟีนอล (Phenolic compound) และมีหมู่ฟังก์ชันของเอมีน แอลดีไฮด์ โดยตัวดูดซับดินแดงและลีโอนาร์ไดต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 21.78 และ 10.26 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จากสมบัติดังกล่าวทำให้เชื่อว่าลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

4.2 ผลของชนิดและปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

เมื่อทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ลีโอนาร์ไดต์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 75, 100 และ 200 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ปริมาณของตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากรูปที่ 7 พบว่าเวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (Breakthrough time) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์ ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณของลีโอนาร์ไดต์จะทำให้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนมีเวลาสัมผัสกับ

ตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์ได้นานขึ้น ทำให้ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี เมื่อคำนวณความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (Breakthrough capacity) ที่อัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าศูนย์ ($C/C_0 > 0$) ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดงต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

ปริมาณของ ตัวดูดซับ (g)	ความสูงของตัว ดูดซับในคอลัมน์ (cm)	เวลาในการดูดซับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จนกระทั่งเกิดการหลุด ออก (min)	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดการหลุดออก (mg/g)
<i>ตัวดูดซับ Leonardite</i>			
75	15	5	0.0223
100	19	15	0.0501
150	25	45	0.1002
200	30	125	0.2087
<i>ตัวดูดซับ Red clay</i>			
200	24	5	0.0083
250	30	10	0.0134

สภาวะในการดูดซับ: ตัวดูดซับ Leonardite และ Red clay, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 75-250 กรัม

จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับทั้งในกรณีของลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite) และดินแดง (Red clay) ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเวลาสัมผัสกับตัวดูดซับนานขึ้นดังที่ได้อธิบายในข้างต้น และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของลีโอนาร์ไดต์ และดินแดงที่ปริมาณเท่ากันคือที่ 200 กรัม พบว่าลีโอนาร์ไดต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าดินแดง โดยลีโอนาร์ไดต์ให้เวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออก และความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกมีค่าสูงกว่า

4.3 ผลของอุณหภูมิและไอน้ำต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่อุณหภูมิของการดูดซับต่างๆ ในช่วง 10-50 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์ และดินแดงจำนวน 200 กรัม ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

อุณหภูมิ ในการดูดซับ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (min)	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดการหลุดออก (mg/g)
<i>ตัวดูดซับ Leonardite</i>		
10	20	0.0334
30	125	0.2087
40	210	0.3506
50	390	0.6512
<i>ตัวดูดซับ Leonardite + ไอน้ำอิ่มตัวที่ 30 องศาเซลเซียส</i>		
30	150	0.2504
<i>ตัวดูดซับ Red clay</i>		
30	10	0.0083
50	110	0.1469

สภาวะในการดูดซับ: ตัวดูดซับ Leonardite และ Red clay, อุณหภูมิ 10-50 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 200 กรัม

จากตารางที่ 2 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการดูดซับของไฮโดรเจนซัลไฟด์กับตำแหน่งที่ว่างไวบนพื้นผิวของลีโอนาร์ไดต์ และดินแดงเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงมีค่าเพิ่มขึ้น [19] โดยในกรณีของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินแดงพบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการดูดซับ โดยการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดินแดงให้ค่าความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเพียง 0.0083 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ถ้าใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 50 องศาเซลเซียสจะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเป็น 0.1469 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กที่เป็นส่วนประกอบในดินแดงสามารถเกิดปฏิกิริยากับ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการดูดซับ ซึ่งการดูดซับดังกล่าวน่าจะเป็นการดูดซับทางเคมี

เมื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไอน้ำต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก โดยใช้ตัวดูดซับลีโอนาร์ไคต์จำนวน 200 กรัมที่อุณหภูมิของการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเมื่อแก๊สชีวภาพที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์มีไอน้ำปน จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของลีโอนาร์ไคต์ดีขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมตัวกับน้ำและแตกตัวเป็นซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) [20] ทำให้ยึดจับกับตำแหน่งที่ว่องไวที่เป็นประจุบวกในลีโอนาร์ไคต์ได้ดีขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ (หรือซัลไฟด์ไอออน) กับตำแหน่งที่ว่องไวในตัวดูดซับลีโอนาร์ไคต์เกิดขึ้นในลักษณะใด หรือเกิดขึ้นกับตำแหน่งว่องไวชนิดใด จะได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.10

4.4 ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับเกรดการค้า

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของตัวดูดซับลีโอนาร์ไคต์ และตัวดูดซับทางการค้า ได้แก่ ตัวดูดซับ 1, ตัวดูดซับ 2, ตัวดูดซับ 3 และ ตัวดูดซับ 4 ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติ และเคลย์ ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยลีโอนาร์ไคต์และตัวดูดซับทางการค้าต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

ชนิดของตัวดูดซับ	ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ (cm)	เวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (min)	ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (mg/g)
Leonardite	25	45	0.1002
ตัวดูดซับ 1	24.5	10	0.0223
ตัวดูดซับ 2	24	10	0.0223
ตัวดูดซับ 3	22	25	0.0557
ตัวดูดซับ 4	22	15	0.0334

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 150 กรัม

จากตารางที่ 3 พบว่าตัวดูดซับลีโอนาร์ไคต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่าตัวดูดซับทางการค้าซึ่งมีส่วนประกอบเป็นซีโอไลต์ และเคลย์

4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

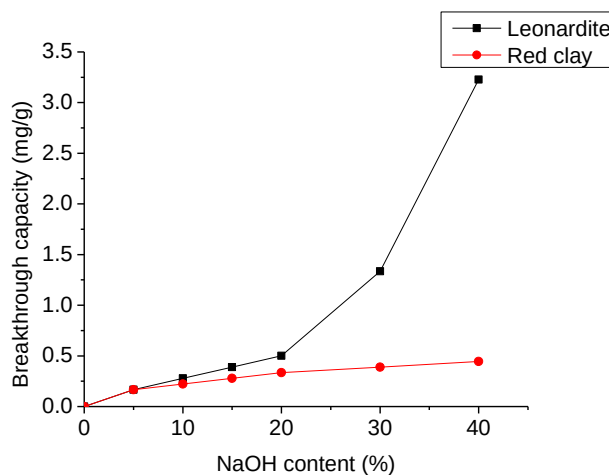
แม้ว่าลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติใดๆ จะมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ อย่างไรก็ตามถ้ามีการนำลีโอนาร์ไดต์และดินแดงไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะจริง จำเป็นจะต้องใช้ปริมาณของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงในปริมาณมาก ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไดต์และดินแดง โดยการปรับสภาพให้มีสมบัติเป็นเบสเพิ่มมากขึ้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

ชนิดของตัวดูดซับ	เวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (min)	ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (mg/g)
Leonardite	-	-
5NaOH/Leo	15	0.1670
10NaOH/Leo	25	0.2783
15NaOH/Leo	35	0.3896
20NaOH/Leo	45	0.5009
30NaOH/Leo	120	1.3357
40NaOH/Leo	290	3.2279
Red clay	-	-
5NaOH/RC	15	0.1670
10NaOH/RC	20	0.2226
15NaOH/RC	25	0.2783
20NaOH/RC	30	0.3339
30NaOH/RC	35	0.3896
40NaOH/RC	40	0.4452

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม, ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ 5 เซนติเมตร

จากตารางที่ 4 พบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพลีโอนาร์ไดต์และดินแดงให้มีสมบัติเป็นเบสเพิ่มมากขึ้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์มีค่าสูงขึ้นมาก โดยลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 30 กรัม ไม่สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะการทดลองนี้ได้ แต่เมื่อนำลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมาเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (5NaOH/Leo และ 5NaOH/RC) จะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเป็น 0.1670 และ 0.1670 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ มากไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในลีโอนาร์ไดต์และดินแดงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้นโดยในกรณีของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (40NaOH/Leo และ 40NaOH/RC) จะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเป็น 3.2279 และ 0.4452 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นเบสแก่ทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดอ่อนได้มากขึ้น [20-21] อย่างไรก็ตามในกรณีของการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับของดินแดงให้มีสมบัติเป็นเบสเพิ่มมากขึ้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของลีโอนาร์ไดต์ที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 ผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดงด้วยการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทั้งนี้อาจเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากอาจทำปฏิกิริยากับซิลิกอนและอลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบในดินแดง ทำให้ความเป็นเบสต่ำลง และอาจนำไปสู่การลดลงของพื้นที่ผิว [22] ในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงเป็นผลทำให้การเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในดินแดง (40NaOH/RC) ทำให้ความจุของการดูดซับ จนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในลีโอนาร์ไดต์ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์

4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่าน กะลามะพร้าว

นอกจากการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงโดยการปรับสภาพให้มีสมบัติเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาการเพิ่ม ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงโดยการเติมแต่งถ่าน กะลามะพร้าว (Coconut shell biochar; CSB) ซึ่งเป็นวัสดุที่เตรียมได้จากการเผาถ่าน กะลามะพร้าวในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง ประเทศไทย [23] ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวให้ผลการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วย ถ่านกะลามะพร้าวต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุด ออก

ชนิดของตัวดูดซับ	เวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (min)	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุด ออก (mg/g)
Leonardite	-	-
15CSB/Leo	30	0.3339
30CSB/Leo	40	0.4452
45CSB/Leo	80	0.8905
50CSB/Leo	150	1.6696
70CSB/Leo	350	3.8958
CSB	335	3.7289
Red clay	-	-
15CSB/RC	25	0.2783
30CSB/RC	55	0.6122
45CSB/RC	120	1.3357
50CSB/RC	280	3.1167
60CSB/RC	410	4.5637

ชนิดของตัวดูดซับ	เวลาในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (min)	ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (mg/g)
70CSB/RC	450	5.0090
CSB	335	3.7289

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม, ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ 8 เซนติเมตร

จากตารางที่ 5 พบว่าถ่านกะลามะพร้าว (CSB) ที่มีสมบัติเป็นรูพรุนมีความสามารถในการดูดซับสูง โดยถ่านกะลามะพร้าวจำนวน 30 กรัมให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกมีค่าเท่ากับ 3.7289 มิลลิกรัมต่อกรัม อย่างไรก็ตามถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับที่มีราคาสูงกว่าตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดง ดังนั้นการใช้ลีโอนาร์ไดต์และดินแดงเป็นส่วนผสมจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตตัวดูดซับ และยังคงประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้ลีโอนาร์ไดต์และดินแดงยังสามารถช่วยในการขึ้นรูปถ่านกะลามะพร้าวโดยทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) ทำให้เหมาะสมกับการเตรียมตัวดูดซับไปใช้งานในสภาวะจริงที่มีอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพสูง โดยในกรณีของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมาเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (15CSB/Leo และ 15CSB/RC) จะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเป็น 0.3339 และ 0.2783 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ มากไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกะลามะพร้าวในลีโอนาร์ไดต์และดินแดงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้นโดยในกรณีของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (70CSB/Leo และ 70CSB/RC) จะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเป็น 3.8958 และ 5.0090 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับซึ่งมีค่าความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกเท่ากับ 3.7289 มิลลิกรัมต่อกรัม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Danh Nguyen-Thanh และคณะ [24] ที่พบว่าการเติมเบนโทไนด์เป็นตัวช่วยประสานถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมแต่งโลหะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าลีโอนาร์ไดต์และดินแดงซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับและตัวประสานไม่มีส่วนรบกวนทำให้รูพรุนของถ่านกะลามะพร้าวเกิดการอุดตัน (Pore blocking) ดังนั้นลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพในปริมาณสูง

4.7 ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวและเบส

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของลีโอนาร์ไต์และดินแดงโดยการเตรียมให้เป็นวัสดุประกอบที่มีส่วนผสมของถ่านกะลามะพร้าวจำนวน 50 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มาเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 15 เปอร์เซ็นต์ ตัวดูดซับของลีโอนาร์ไต์และดินแดงที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะถูกเรียกว่า 15NaOH/50CSB/Leo และ 15NaOH/50CSB/RC ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยลีโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวและเบสต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

ชนิดของตัวดูดซับ	เวลาในการดูดซับ	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง
	ไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิด การหลุดออก (min)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุด ออก (mg/g)
15NaOH/Leo	35	0.3896
50CSB/Leo	150	1.6696
15NaOH/50CSB/Leo	380	4.2297
15NaOH/RC	25	0.2783
50CSB/RC	280	3.1167
15NaOH/50CSB/RC	120	1.3357

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

จากตารางที่ 6 พบว่าการใช้ลีโอนาร์ไต์ที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (15NaOH/50CSB/Leo) จะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.2297 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ใช้ตัวดูดซับลีโอนาร์ไต์ที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (15NaOH/Leo) และลีโอนาร์ไต์ที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (50CSB/Leo) เนื่องจากมีตำแหน่งที่ว่างไวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของการใช้ดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (15NaOH/50CSB/RC) จะให้ความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุด

ออกเป็น 1.3357 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้อาจเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมแต่งเพิ่มเข้าไป อาจทำปฏิกิริยากับซิลิกอนและอลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบในดินแดง ทำให้ความเป็นเบสต่ำลง และนำไปสู่การลดลงของพื้นที่ผิว [22] ดังนั้นในกรณีของการปรับปรุงสมบัติการดูดซับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไดต์อาจทำได้ทั้งในกรณีการปรับปรุงทางเคมีโดยการเติมแต่ง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีสมบัติเป็นเบส การปรับปรุงโดยเตรียมเป็นวัสดุประกอบโดยการเพิ่ม วัสดุที่เป็นรูปพรุนช่วยในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เช่นในกรณีของการเติมแต่งถ่าน กะลามะพร้าว มากไปกว่านั้นอาจปรับปรุงประสิทธิภาพของลีโอนาร์ไดต์โดยการเติมแต่งทั้งวัสดุ ที่มีรูปพรุนและสารเคมีที่มีสมบัติเป็นเบส ทำให้การประยุกต์ใช้งานลีโอนาร์ไดต์เป็นตัวดูดซับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยฝอย เหล็ก

มากกว่านั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของลีโอนาร์ไดต์ และดินแดงโดยการเตรียมให้เป็นวัสดุประกอบที่มีส่วนผสมของฝอยเหล็กจำนวน 50 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วย ฝอยเหล็กต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

ชนิดของตัวดูดซับ	เวลาในการดูดซับ	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง
	ไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิด การหลุดออก (min)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุด ออก (mg/g)
Leonardite	-	-
50CSB/Leo	150	1.6696
50Fe/Leo	15	0.1670
Red clay	-	-
50CSB/RC	280	3.1167
50Fe/RC	15	0.1670

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

จากตารางที่ 7 พบว่าการเติมแต่งฝอยเหล็กลงในลีโอนาร์ไดต์และดินแดงในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (50Fe/Leo และ 50Fe/RC) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของลีโอนาร์ไดต์และดินแดงได้ เนื่องจากโลหะเหล็กสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ [25]

อย่างไรก็ตามโลหะเหล็กมีพื้นที่ผิวต่ำทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่าในกรณีที่มีการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณที่เท่ากัน

4.9 การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมีศักยภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ ในส่วนนี้จะได้ศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในสภาวะเดิม ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณ ตัวดูดซับ (g)	เวลาในการดูดซับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จนกระทั่ง เกิดการหลุดออก (min)	ความจุของการดูดซับ จนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดการหลุดออก (mg/g)
Leonardite	200	125	0.2087
ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1	200	115	0.1920
ผ่านการดูดซับครั้งที่ 2	200	25	0.0417
60CSB/RC	30	410	4.5637
ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1	30	290	3.2280
ผ่านการดูดซับครั้งที่ 2	30	235	2.6158
30NaOH/Leo	30	120	1.3357
ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1	30	15	0.1670
30NaOH/RC	30	30	0.3340
ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1	30	10	0.1113

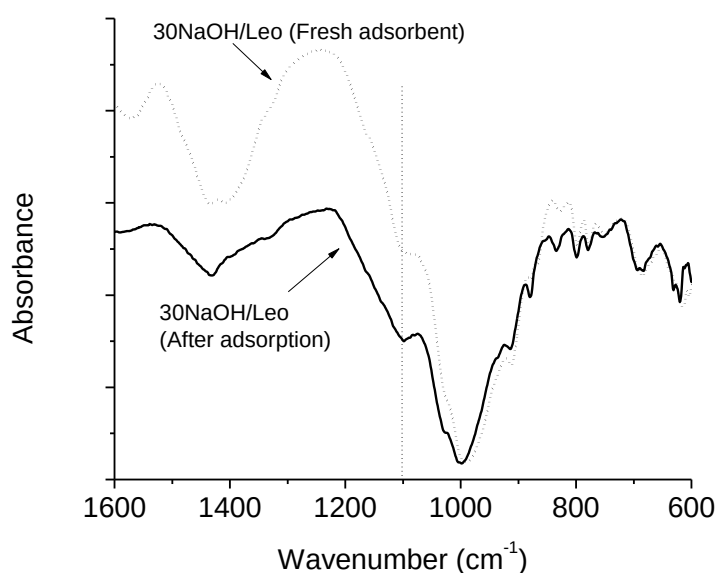
สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 8 พบว่าตัวดูดซับต่างๆ ที่นำกลับมาใช้ใหม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดต่ำลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการปรับปรุงลีโอนาร์ไดต์และดินแดงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่ำมาก ในขณะที่ลีโอนาร์ไดต์ที่ไม่ได้รับการเติมแต่งและดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวมีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่สูง โดย

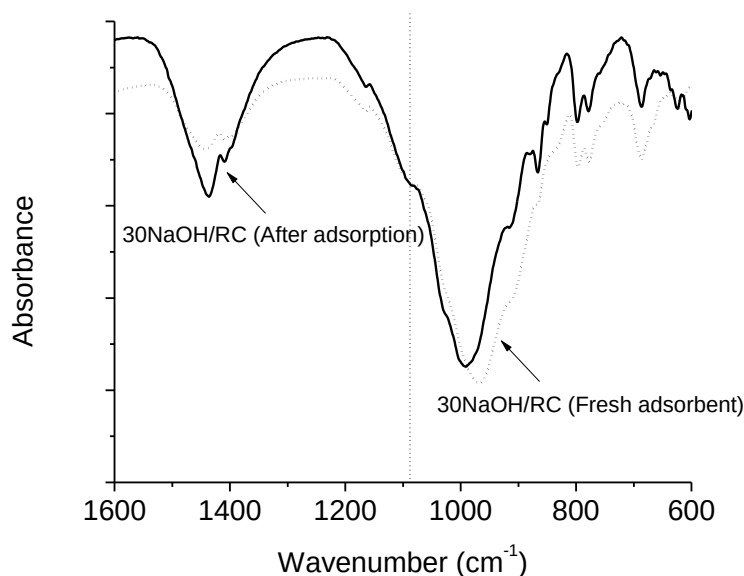
การนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งแรกมีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ของการดูดซับครั้งแรก อย่างไรก็ตามการนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 กลับมีประสิทธิผลลดต่ำลงไปมาก

4.10 กลไกการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

เมื่อนำตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่ง และไม่ได้รับการเติมแต่งไปหาปริมาณซัลเฟต (Sulfate; SO_4^{2-}) ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยแบเรียมไนเตรต พบว่าปริมาณของซัลเฟตของตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อเกิดการดูดซับจะสามารถถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นซัลเฟต โดยในกรณีของตัวดูดซับลีโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งจะสามารถสังเกตการเกิดขึ้นของซัลเฟตได้อย่างชัดเจนโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 สเปกตรากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของลีโอนาร์ไดต์ที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 10 สเปกตรากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากรูปที่ 9 และ 10 พบว่าตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จะให้สัญญาณการสั่นของหมู่ซัลเฟตเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ $1100 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ [26] ส่วนในกรณีของการดูดซับอื่นๆ ที่ไม่ได้รับการเติมแต่งด้วยเบส สังเกตสัญญาณการสั่นของหมู่ซัลเฟตได้ไม่ชัดเจน สอดคล้องกับผลของประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ต่อเวลาและความจุของการดูดซับจนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (ตารางที่ 8) โดยตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถนำกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คาดว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของซัลไฟด์ (Sulfide; S^{2-}) ที่มีอันตรกิริยากับเหล็กและสารอินทรีย์ของตัวดูดซับ (ในกรณีของลิโอนาร์ไดต์) โดยมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนน้อยที่เกิดการออกซิเดชันเป็นซัลเฟต ในขณะที่ตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดการดูดซับอาจเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide; Na_2S) และเกิดการออกซิเดชันต่อยอดอากาศ (เมื่อนำออกมาจากภาชนะบรรจุ) เกิดเป็นโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ก่อนที่จะเกิดการออกซิเดชันต่อเป็นโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate; Na_2SO_4) [27]

ส่วนในกรณีของการดูดซับด้วยลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการเติมแต่ง หรือการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจเกิดอันตรกิริยากับเหล็กที่เป็นส่วนประกอบทั้งในกรณีของลิโอนาร์ไดต์และดินแดง (ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) โดยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำหน้าที่ให้คู่อิเล็กตรอนกับเหล็กซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันซึ่งมี d -ออร์บิทัล (d -orbital) ที่ว่างซึ่งทำหน้าที่รับคู่อิเล็กตรอนได้ [28] ส่วนในกรณี

ของสารอินทรีย์ที่อยู่ในลีโอนาร์ไดต์ สารอินทรีย์ดังกล่าวมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบส เช่น หมู่เอมีน ซึ่งอาจเกิดอันตรกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีสมบัติเป็นกรดได้ดี [29] ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากไฮโดรเจนจำนวน 2 อะตอมของไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจนของหมู่เอมีนในสารประกอบอินทรีย์ของลีโอนาร์ไดต์ [30] และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดการดูดซับนี้อาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนที่ว่องไวที่พื้นผิว (Active surface oxygen) หรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง เมื่อทำการทดลองเผาสารอินทรีย์ที่อยู่ในลีโอนาร์ไดต์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าลดลงอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในลีโอนาร์ไดต์เป็นตำแหน่งที่ว่องไวในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.11 การประเมินค่าใช้จ่ายในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

สมมุติให้วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับมีราคา ดังแสดงในตารางที่ 11 ดังนั้นตัวดูดซับชนิดต่างๆ จะมีราคาต่อกิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 11 ประมาณการราคาของวัสดุดูดซับ

ลำดับ	วัสดุ	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
1	ลีโอนาร์ไดต์	0.25
2	ดินแดง	0.25
3	โซเดียมไฮดรอกไซด์	25
4	ถ่านกะลามะพร้าว	7
5	ฝอยเหล็ก	10

ตารางที่ 12 ประมาณการราคาของตัวดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

ลำดับ	วัสดุ	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดการหลุดออก (mg/g)	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
1	Leonardite	0.2087	0.25
2	Red clay	0.0134	0.25
3	5NaOH/Leo	0.1670	1.49
4	10NaOH/Leo	0.2783	2.73
5	15NaOH/Leo	0.3896	3.96
6	20NaOH/Leo	0.5009	5.20
7	30NaOH/Leo	1.3357	7.68
8	40NaOH/Leo	3.2279	10.15
9	5NaOH/RC	0.1670	1.49

ลำดับ	วัสดุ	ความจุของการดูดซับจนกระทั่ง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดการหลุดออก (mg/g)	ราคา (บาทต่อ กิโลกรัม)
10	10NaOH/RC	0.2226	2.73
11	15NaOH/RC	0.2783	3.96
12	20NaOH/RC	0.3339	5.20
13	30NaOH/RC	0.3896	7.68
14	40NaOH/RC	0.4452	10.15
15	15CSB/Leo	0.3339	1.26
16	30CSB/Leo	0.4452	2.28
17	45CSB/Leo	0.8905	3.29
18	50CSB/Leo	1.6696	3.63
19	70CSB/Leo	3.8958	4.98
20	15CSB/RC	0.2783	1.26
21	30CSB/RC	0.6122	2.28
22	45CSB/RC	1.3357	3.29
23	50CSB/RC	3.1167	3.63
24	60CSB/RC	4.5637	4.30
25	70CSB/RC	5.0090	4.98
26	15NaOH/50CSB/Leo	4.2297	7.34
27	15NaOH/50CSB/RC	1.3357	7.34
28	50Fe/Leo	0.1670	5.13
29	50Fe/RC	0.1670	5.13

เงื่อนไขการประเมินค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้แก๊สชีวภาพ

- 1) สมมติให้ค่าติดตั้งระบบแก๊สชีวภาพขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร พร้อมอุปกรณ์ดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่า 6,000 บาท และมีอายุการใช้งาน 5 ปี และสมมติให้มีการใช้แก๊สชีวภาพจากบ่อหมักด้วยอัตรา 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยใช้ 4.67 ชั่วโมงต่อวัน นอกจากนี้ยังสมมติให้แก๊สชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตรทดแทนการใช้แก๊สหุงต้มได้ 0.46 กิโลกรัม (แก๊สหุงต้มจำนวน 1 ถังมีน้ำหนัก 15 กิโลกรัม) ดังนั้นจะมีค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งระบบแก๊สชีวภาพคิดเป็นจำนวนเงิน 57.39 บาทต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง

- 2) สมมุติให้ใช้มูลสุกรเพื่อรักษาระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจำนวน 1,460 กิโลกรัมต่อปี และสมมุติให้มูลสุกรมีราคา 1.50 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นจะมีค่าใช้จ่ายจากการรักษาระบบแก๊สชีวภาพคิดเป็นจำนวนเงิน 104.74 บาทต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง
- ถ้าสมมุติให้แก๊สชีวภาพมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 857 พีพีเอ็ม ดังนั้นค่าใช้จ่ายในส่วน of ตัวดูดซับสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 13 และถ้าสมมุติให้แก๊สหุงต้ม 1 ถังมีราคา 380 บาท จะทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายจากการใช้แก๊สหุงต้มได้ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ประมาณการราคาของตัวดูดซับต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถังและการประหยัดค่าใช้จ่ายต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง

ลำดับ	ตัวดูดซับ	ราคาของตัวดูดซับต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง(บาท)	การประหยัดค่าใช้จ่ายต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง (บาท)
1	Leonardite	50.81	167.06
2	40NaOH/Leo	133.38	84.48
3	50CSB/Leo	92.23	125.64
4	70CSB/Leo	54.22	163.65
5	45CSB/RC	104.48	113.38
6	50CSB/RC	49.41	168.46
7	60CSB/RC	39.97	177.90
8	70CSB/RC	42.17	175.70
9	15NaOH/50CSB/Leo	73.61	144.26

จากตารางที่ 13 พบว่าตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า 80 บาทต่อถัง) โดยไม่ต้องมีการปรับสภาพ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ลิโอนาร์ไต์เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะจริงจำเป็นจะต้องใช้ปริมาณของลิโอนาร์ไต์เป็นจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวในช่วง 45-70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนในกรณีของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยในการปรับสภาพลิโอนาร์ไต์ที่ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ (40NaOH/Leo) สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้เพียง 84.48 บาทต่อถัง แต่การใช้ตัวดูดซับนี้จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปนมาในแก๊สชีวภาพด้วย โดยมีความจุของการดูดซับจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหลุดออกเท่ากับ 0.0367 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งจะทำให้แก๊สชีวภาพมีค่าความร้อน (Heating value) เพิ่มขึ้น

4.12 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

เมื่อทำการทดลองในห้องปฏิบัติการจนได้ตัวดูดซับที่มีศักยภาพในการนำไปใช้กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพในชุมชน คณะผู้วิจัยฯ จึงได้จัดโครงการ “ถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพระดับชุมชนและครัวเรือนอย่างยั่งยืน” โดยจัดกิจกรรมการเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อใช้ในระดับชุมชนและครัวเรือน และถ่ายทอดเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับ ผู้เข้าร่วมโครงการจะได้รับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมให้ประชาชนได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางด้านการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างสังคมไทยที่เป็นฐานความรู้ด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มากไปกว่านั้นโครงการนี้จะช่วยส่งเสริมและกระตุ้นให้ผู้ร่วมโครงการมีความสนใจและเพิ่มพูนความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีซึ่งเป็นการสร้างบุคลากรทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ รูปถ่ายและรายละเอียดของโครงการแสดงได้ดังนี้

โครงการนี้มีผู้เข้าร่วมโครงการเป็นผู้บริหารจำนวน 2 คน อาจารย์จำนวน 7 คน เจ้าหน้าที่จำนวน 1 คน บุคคลทั่วไปจำนวน 37 คน นักศึกษาจำนวน 7 คน และนักเรียนจำนวน 10 คน รวมจำนวนทั้งสิ้น 64 คน โครงการนี้จัดขึ้นที่วิสาหกิจชุมชน ทองม้วนเปรมชัย ตำบลบึงอำเภอนโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา โดยนายกองค์การบริหารส่วนตำบลบึง นายศักดิ์ชาย ไทกลาง ผู้นำชุมชน ผู้สนใจ อาจารย์ และนักเรียนเข้าร่วมลงทะเบียนในโครงการ และได้รับเกียรติจาก ดร. ณัฐกรณ์ ณ หนองคาย คุปเมธานนท์ หัวหน้าสาขาวิชาเคมีประยุกต์ เป็นตัวแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ กล่าวเปิดโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพระดับชุมชนและครัวเรือนอย่างยั่งยืน (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 ดร. ณัฐธิดาณณ สุภเมธานนท์ กล่าวเปิดโครงการ

จากนั้น ผศ. ดร. ไกรสิทธิ์ วสุเพ็ญ รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา ฝ่ายบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชี้แจงรายละเอียดในการบริการวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานให้กับชุมชน (รูปที่ 12)



รูปที่ 12 ผศ. ดร. ไกรสิทธิ์ วสุเพ็ญ ชี้แจงรายละเอียดในการบริการวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หลังจากนั้น นายศักดิ์ชาย ไท่กลาง นายกองค์การบริหารส่วนตำบลบึง กล่าวต้อนรับผู้บริหาร วิทยากร คณาจารย์ นักศึกษา สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และประชาชน (รูปที่ 13) พร้อมถ่ายรูปร่วมกันเป็นที่ระลึก (รูปที่ 14)



รูปที่ 13 นายศักดิ์ชาย ไทกลาง นายกองค์การบริหารส่วนตำบลบึง กล่าวต้อนรับ



รูปที่ 14 ผู้บริหารของ มทร.อีสาน อีสาน และผู้บริหารองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และผู้เข้าร่วมโครงการถ่ายภาพเป็นที่ระลึก

ในส่วนของการบรรยายได้เชิญวิทยากรจำนวน 4 ท่านมาบรรยายให้ความรู้ ผู้บรรยายท่านที่ 1 ได้แก่ ผศ. พงษ์ศักดิ์ นาใจคง อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานกล่าวบรรยายความสำคัญของเทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 15)



รูปที่ 15 ผศ. พงษ์ศักดิ์ นาใจคง กล่าวบรรยาย

ผู้บรรยายท่านที่ 2 ได้แก่ ดร. ปณิตดา เพชรลั่น อาจารย์สาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน กล่าวบรรยาย กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 16)



รูปที่ 16 ดร. ปณิตดา เพชรลั่น กล่าวบรรยาย

ผู้บรรยายท่านที่ 3 ได้แก่ ผศ. ดร. อาทิตย์ อัสวสุชี อาจารย์สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน กล่าวบรรยาย กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 17) และอบรมเชิงปฏิบัติการเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ



รูปที่ 17 ผศ. ดร. อาทิตย์ อัสวสุชี กล่าวบรรยาย และอบรมเชิงปฏิบัติการ

จากนั้นนักศึกษาสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และผู้ช่วยนักวิจัยโครงการวิจัย “การจัดทำไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพด้วยตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดง” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ร่วมอบรมเชิงปฏิบัติการการเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 18) โดยมีนักเรียนในพื้นที่เป็นตัวแทนของผู้เข้าร่วมอบรมฯ ช่วยกันเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 19)



รูปที่ 18 นักศึกษาและผู้ช่วยนักวิจัยร่วมอบรมเชิงปฏิบัติการการเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ



รูปที่ 19 นักเรียนเป็นตัวแทนของผู้เข้าร่วมอบรมฯ ช่วยกันเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ

ผู้บรรยายท่านที่ 4 ได้แก่ อ. คันธพจน์ ศรีสถิตย์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กล่าวบรรยายเทคโนโลยีการขึ้นรูปตัวดูดซับ (รูปที่ 20)



รูปที่ 20 อ. คันธพจน์ ศรีสถิตย์ กล่าวบรรยาย

ภายหลังจากการบรรยายคณะวิทยากรได้พาผู้สนใจเข้าร่วมชมระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 21) และระบบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 22) ที่วิสาหกิจชุมชนชนนทอ้งม่วงนเปรมชัย ซึ่งมีนางเปรมกมล คุณเจริญ เป็นประธานกลุ่ม



รูปที่ 21 ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพที่วิสาหกิจชุมชนชนนทอ้งม่วงนเปรมชัย



รูปที่ 22 ระบบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากชีวภาพที่วิสาหกิจชุมชนขนมทองม้วนเปรมชัย

โดยระบบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพจะออกแบบให้เป็นถังคู่ (รูปที่ 6) โดยถังจะมีขนาด 50 ลิตร สำหรับการใส่ลีโอนาร์ไต์ที่ไม่ได้รับการเติมแต่งเป็นตัวดูดซับ และถังขนาด 25 ลิตร สำหรับการใส่ลีโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ เมื่อถึงหนึ่งเกิดการดูดซับจนไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก ก็สามารถผ่านแก๊สชีวภาพไปยังอีกถังหนึ่งซึ่งภายในบรรจุตัวดูดซับที่ใหม่ (Fresh adsorbent) ส่วนตัวดูดซับที่เต็มแล้วจะถูกนำไปทิ้ง โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม

ภายหลังจากเสร็จสิ้นการบรรยาย และชมระบบการผลิตแก๊สชีวภาพอย่างยั่งยืน ดร. ณัฐฉัตรณิณ ศุภเมธานนท์ หัวหน้าสาขาวิชาเคมีประยุกต์มอบเกียรติบัตรให้กับ นางเปรมกมล คุณเจริญ ประธานกลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนมทองม้วนเปรมชัย ซึ่งเป็นตัวแทนของผู้เข้าร่วมอบรม ฯ เป็นผู้รับมอบ (รูปที่ 23)



รูปที่ 23 ดร. ณัฐฉัตรณิณ ศุภเมธานนท์ หัวหน้าสาขาวิชาเคมีประยุกต์มอบเกียรติบัตร

คณะผู้วิจัยฯ นอกจากจะดำเนินโครงการบริการวิชาการ เพื่อเสริมสร้างสังคมแห่งปัญญาโดยจัดโครงการ “ถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพระดับชุมชนและครัวเรือนอย่างยั่งยืน” ยังส่งเสริมและกระตุ้นให้นักศึกษาหันมาสนใจและเพิ่มพูนความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งเป็นการสร้างบุคลากรทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ โดยให้นักศึกษาเข้าร่วมเป็นวิทยากรในภาค

การอบรมเชิงปฏิบัติการการเตรียมตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ โดยคณาจารย์ และนักศึกษาได้ถ่ายภาพร่วมกันเป็นที่ระลึกในการจัดโครงการฯ (รูปที่ 24)



รูปที่ 24 คณาจารย์และนักศึกษาถ่ายภาพเป็นที่ระลึกในการจัดโครงการฯ

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 ตัวดูดซับลีโอนาร์ไคต์และดินแดงมีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และมีตำแหน่งที่ว่องไวในการดูดซับเป็นหลัก และสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบส

5.2 สามารถขึ้นรูปตัวดูดซับดินแดงและลีโอนาร์ไคต์เพื่อใช้ในห้วงปฏิบัติการสำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ และใช้ในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพในสภาวะจริง

5.3 ประสิทธิภาพการดูดซับของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับเป็น 50 องศาเซลเซียส และมีไอน้ำในขณะที่เกิดการดูดซับ

5.4 การเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการฝังตัวบนลีโอนาร์ไคต์และดินแดงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

5.5 การเตรียมวัสดุประกอบของลีโอนาร์ไคต์และดินแดงกับถ่านกะลามะพร้าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพได้

5.6 ตัวดูดซับลีโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่ง และไม่ได้รับการเติมแต่งสามารถนำไปใช้พัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ถังดูดซับแบบเบดนิ่งคู่ เพื่อให้เกิดการใช้งานแก๊สชีวภาพได้อย่างต่อเนื่อง โดยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในช่วง 80-180 บาทต่อการทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ

5.6 ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ตัวดูดซับสามารถถูกกำจัดโดยการฝังกลบโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากตัวดูดซับเตรียมขึ้นจากวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดย

ซัลไฟด์จะเปลี่ยนเป็นซัลเฟตเมื่อสัมผัสกับอากาศ หรือออกซิเจนที่เป็นตำแหน่งที่ว่างไว้ในกรดซัลฟูริก

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิวัฒน์ ไตรฤกษ์, พลยุทธ ศุภสมิตติ, จินดารัตน์ โตกมลธรรม, 2552, “การเตรียมสารประกอบเกลืออิมเมต จากดินปนถ่านหินจากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง”, www.dpim.go.th/articles/article?catid=128&articleid=701 [5 สิงหาคม 2557].
- [2] Sutisa Pinitpaitoon, 2012, “Enhancing Productivity of Red Clay Soil for Maize Cropping by Organic Fertilizer Application in Combination with Mineral Fertilizers”, Graduate School, Kasetsart University.
- [3] วิวัฒน์ ไตรฤกษ์, 2550, “ดินปนถ่านหินเพื่อการเกษตรกรรม”, www.dpim.go.th/purchase/article?catid=128&articleid=2011 [5 สิงหาคม 2557].
- [4] Lao, C., Zeledo'n, Z., Gamisans, X., Sole', M., 2005, “Sorption of Cd(II) and Pb(II) from Aqueous Solutions by a Low-rank Coal (Leonardite)”, Separation and Purification Technology, 45, 79-85.
- [5] Santana Tantiwit, 2011, “Arsenic Removal from Gold Mine Water by Using Red Clay as Adsorbent”, Graduate School, Chiang Mai University.
- [6] Zeledo'n, Z., Lao, C., Xavier, F., Sole, M., 2007, “Removal of PAHs from Water Using an Immature Coal (Leonardite)”, Chemosphere, 67, 505-512.
- [7] Ausavasukhi A., Kamposoen C., Kengnok O., 2016, “Adsorption characteristics of Congo red on carbonized leonardite”, Journal of Cleaner Production, 134, 506-514.
- [8] อาทิตย์ อัครสุชี, ชลหวรรณ คำภูแสน, อัจฉรา เก่งนอก, นิตี กองสิน, นฤมล งามดี., 2557, “การดูดซับทองแดงจากสารละลายด้วยลีโอนาร์ไดต์ที่ผ่านการคาร์ไบไนซ์”, การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 33, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- [9] อาทิตย์ อัครสุชี, ชลหวรรณ คำภูแสน, อัจฉรา เก่งนอก, นิตี กองสิน และ นฤมล งามดี., 2557, “การดูดซับฟีนอลและสีย้อมจากสารละลายด้วยลีโอนาร์ไดต์และดินแดง”, การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตไทรน้อย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.
- [10] สุขชน ตั้งทวีวัฒน์, อองอาจ ส่องสี, บุญล้อม ชีวะอิสระกุล., 2555, “การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในชุมชน”, แก่นเกษตร, 40(2), 201-204.

- [11] วงศ์วิวรรธ ฐนุศิลป์, สุนันทา เลาว์ณย์ศิริ., 2555, “การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเหล็ก” การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.
- [12] Kumar P., Sung C.-Y., Muraza O., Cococcioni M., Hashimi S.A., McCormick A., Tsapatsis M., 2011, “H₂S adsorption by Ag and Cu ion exchanged faujasites”, *Microporous and Mesoporous Materials*, 146, 127-133.
- [13] Polychronopoulou K., Fierro J.L.G., Efstathiou A.M., 2005, “Novel Zn-Ti-based mixed metal oxides for low-temperature adsorption of H₂S from industrial gas streams”, *Applied Catalysis B: Environmental*, 57, 125-137.
- [14] Huang C.-C., Chen C.-H., Chu S.-M., 2006, “Effect of moisture on H₂S adsorption by copper impregnated activated carbon”, *Journal of Hazardous Materials*, 136, 866-873.
- [15] Pipatmanomai S., Kaewluan S., Vitidsant T., 2009, “Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm”, *Applied Energy*, 86, 669-674.
- [16] กฤษ ศรีบุญเรือง, สมศักดิ์ พิทักษานุรัตน์., 2556, “การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจากระบบถังหมักแบบสองขั้นตอนโดยใช้ปฏิกิริยาการดูดซับและการดูดซึมทางเคมี”, การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, เชียงราย.
- [17] Ramos I., Pérez R., Fdz-Polanco M., 2013, “Microaerobic desulphurisation unit: A new biological system for the removal of H₂S from biogas”, *Bioresource Technology*, 142, 633-640.
- [18] อาทิตย์ อัสวสุชี, 2558, “โครงการการวิเคราะห์คุณลักษณะของลีโอนาร์โดต์และดินแดงจากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะจังหวัดลำปางและการใช้งานเป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า,
- www.trf.or.th/index.php?option=com_attachments&task=download&id=3150 [25 พฤศจิกายน 2559].
- [19] Hazrati N., Abdouss M., Vahid A., Miran B.A.A., Mohammadalizadeh A., 2014, “Removal of H₂S from crude oil via stripping followed by adsorption using ZnO/MCM-41 and optimization of parameters”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 997-1006.
- [20] Sitthikhankaew R., Chadwick D., Assabumrungrat S., Laosiripojana N., 2014, “Effects of humidity, O₂, and CO₂ on H₂S adsorption onto upgraded and KOH impregnated activated carbons”, *Fuel Processing Technology*, 124, 249-257.

- [21] Choo H.S., Lau L.C., Mohamed A.R., Lee K.T., 2013, "Hydrogen sulfide adsorption by alkaline impregnated coconut shell activated carbon", *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(6), 741-753.
- [22] Seidel H., Csepregi L., Heuberger A., Baumgartel H., 1990, "Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers", *Journal of the Electrochemical Society*, 137(11), 3612-3626.
- [23] บริษัทไทยซุมิ จำกัด, 2553, "เตาเผาถ่านขนาดเล็กโดยถัง 200 ลิตร", <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/brazier1.php> [27 พฤศจิกายน 2559].
- [24] Nguyen-Thanh D., Badosz T.J., 2005, "Activated carbons with metal containing bentonite binders as adsorbents of hydrogen sulfide", *Carbon*, 43, 359-367.
- [25] Mebel A.M., Hwang D.Y., 2001, "Theoretical study of the reaction mechanism of Fe atoms with H₂O, H₂S, O₂ and H⁺", *The Journal of Physical Chemistry A*, 105, 7460-7467.
- [26] Periasamy A., Muruganand S., Palaniswamy M., 2009, "Vibrational studies of Na₂SO₄, K₂SO₄, NaHSO₄ and KHSO₄ crystals", *Rasayan Journal of Chemistry*, 2(4), 981-989.
- [27] Sigot L., Ducom G., Germain P., 2016, "Adsorption of hydrogen sulfide (H₂S) on zeolite (Z): Retention mechanism", *Chemical Engineering Journal*, 287, 47-53.
- [28] Lin C., Qin W., Dong C., 2016, "H₂S adsorption and decomposition on the gradually reduced α -Fe₂O₃(001) surface: A DFT study", *Applied Surface Science*, 387, 720-731.
- [29] Jaiboon V., Yoosuk B., Prasassarakich P., 2014, "Amine modified silica xerogel for H₂S removal at low temperature", *Fuel Processing Technology* 128, 276-282.
- [30] Ma X., Wang X., Song C., 2009, "Molecular basket sorbents for separation of CO₂ and H₂S from various gas streams", *Journal of the American Chemical Society* 131, 5777-5783.

7. การนำลิโธนาไรต์และดินแดงไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพในชุมชน

7.1 สร้างอุปกรณ์ดูดซับโดยต่อกับท่อส่งแก๊สจากถังหมักแก๊สชีวภาพที่ทำจากท่อพีวีซี (รูปที่ 6) โดยเลือกถังพลาสติกให้มีขนาด 25-50 ลิตร โดยอาจทำเป็นถังเดี่ยวหรือถังคู่ขึ้นกับงบประมาณ และปริมาณการใช้แก๊ส

7.2 เตรียมตัวดูดซับลีโอนาร์โดต์และดินแดงโดยใช้วิธีการในหัวข้อ 3.1

7.3 บรรจุตัวดูดซับลงในถังดูดซับ เปิดวาล์วนำแก๊สชีวภาพเข้าสู่ถังดูดซับทางด้านล่าง แก๊สชีวภาพที่ผ่านการดูดซับออกทางด้านบนจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยไม่มีการปนเปื้อน

7.4 เมื่อตัวดูดซับไม่สามารถจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ซึ่งสังเกตจากกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้น ให้ปิดวาล์วแก๊ส ในกรณีที่มี 2 ถังคู่ ให้ผ่านแก๊สชีวภาพไปยังถังที่บรรจุตัวดูดซับที่ใหม่เพื่อใช้งานต่อไป และนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วออกจากถัง และกำจัด ก่อนที่จะบรรจุตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการใช้งานลงไป ส่วนในกรณีที่มีถังเดียวจำเป็นต้องหยุดการใช้งาน และนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วออกจากถัง และกำจัด ก่อนที่จะบรรจุตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการใช้งานลงไป

8. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

8.1 ตัวดูดซับลีโอนาร์โดต์ และดินแดงมีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงควรนำตัวดูดซับดังกล่าวมาทดสอบการดูดซับกับสารชนิดอื่นๆ เช่น กลิ่นปัสสาวะของแมว เพื่อใช้เป็นวัสดุกำจัดกลิ่น (ทรายแมว)

8.2 ดินแดงมีซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบหลักจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.-กฟผ.

1. การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

- อาทิตย์ อัสวสุชี, นิสา เขตในเมือง, แคทลียา ไกล่กลาง, ดวงนภา พินิจกิจ, คันธพจน์ ศรีสถิตย์, ตะวัน สุขน้อย “ลีโอนาร์โดต์และดินแดงตัวดูดซับที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ” การประชุมวิชาการระดับชาติ พะเยาวิจัย ครั้งที่ 6 “ศิลปวัฒนธรรมวิจัย เพื่อประเทศไทย 4.0 วันที่ 26-27 มกราคม 2560 ณ หอประชุมพญางำเมือง มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา

แผนกิจกรรมหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง
1. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	1.1 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	1.1.1 รวบรวมงานวิจัยในระดับชาติ และนานาชาติ 1.1.2 วิเคราะห์และสังเคราะห์งานวิจัย
2. เพื่อให้ได้อุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็นในการวิจัย	2.1 จัดซื้ออุปกรณ์ และสารเคมีที่จำเป็นต่อการเตรียมตัวดูดซับและการทดสอบการดูดซับ	2.1.1 จัดซื้ออุปกรณ์ 2.1.2 จัดซื้อสารเคมี
3. เพื่อให้ได้ตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติเหมาะสม และได้เทคโนโลยีการขึ้นรูปตัวดูดซับ	3.1 เตรียมตัวดูดซับให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสม	3.1.1 เตรียมตัวดูดซับด้วยกระบวนการทางเคมี 3.1.2 เตรียมตัวดูดซับเป็นวัสดุประกอบ 3.1.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ 3.1.4 ขึ้นรูปตัวดูดซับ
4. เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์	4.1 ทดสอบการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมได้ในขั้นที่ 3	4.1.1 ศึกษาผลของชนิดตัวดูดซับ 4.1.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพตัวดูดซับ 4.1.3 ศึกษาผลของเวลา 4.1.4 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ 4.1.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิ 4.1.6 ศึกษาผลของความชื้นและปริมาณออกซิเจน

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง
5. เพื่อให้ได้เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ	ทดสอบการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะจริงกับชุมชนที่ใช้แก๊สชีวภาพ	5.1.1 ออกแบบระบบการกำจัดแก๊สชีวภาพ 5.1.2 ศึกษาการกำจัดแก๊สชีวภาพ 5.1.2 ถ่ายทอดเทคโนโลยี
6. เพื่อให้ได้งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ และเผยแพร่ผลการศึกษา	6.1 รวบรวมข้อมูล และเขียนรายงานการวิจัย	6.1.1 รวบรวมข้อมูล 6.1.2 เขียนรายงานการวิจัย 6.1.3 เขียนงานวิจัยเพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือระดับนานาชาติ

ผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)
6 เดือนที่ 1	1. รวบรวมข้อมูล จัดซื้ออุปกรณ์และสารเคมี 2. เตรียมตัวดูดซับ 3. ทดสอบการดูดซับ	1. ได้ข้อมูล อุปกรณ์และสารเคมี 2. ได้ตัวดูดซับ 3. ได้ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ
6 เดือนที่ 2	1. ทดสอบการดูดซับ (ต่อ) 2. จัดทำงานวิจัยฉบับสมบูรณ์	1. ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ 2. ได้งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ และสามารถเผยแพร่ผลงานวิจัย