

การลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูง  
ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ  
Removal of High Concentrated H<sub>2</sub>S in  
Biogas by Combined Chemical and Biological Processes

ชนากานต์ คล้ายหะนา\*

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

รสสุคนธ์ จะวะนะ

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ตำบลแม่เหียะ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

พฤกษ์ อักกะรังสี

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Chanakan Klaihana\*

Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
Huay Kaew Road, Suthep, Muang, Chiang Mai 50200

Rotsukon Jawana

Energy Research and Development Institute - Nakomping, Chiang Mai University,  
Mae Hia, Muang, Chiang Mai 50100

Pruk Aggarangsi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
Huay Kaew Road, Suthep, Muang, Chiang Mai 50200

---

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการบรรทุุก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และสภาพต่างทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูง ที่เกิดจากการกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของอุตสาหกรรมเอทานอลในสภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 69.5-74.0 ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 25.3-28.1 และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า 10,000 พีพีเอ็ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์ทำงานด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพเพื่อแก้ไขปัญหาการอุดตันของตะกอนซัลเฟอร์ที่ตัวกลางในระบบ ถึงปฏิกรณ์ประกอบด้วยถังปฏิกิริยา ถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และถังพักน้ำ ซึ่งเติมแบคทีเรีย *Paracoccus* sp. เข้าไปในถังเติมอากาศเพียงครั้งเดียว การศึกษาพบว่ามีส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.2-16.5 ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 36.6-53.2 ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ  $99.9 \pm 0.1$  ที่อัตราการบำบัดทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 150 และ 300 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง โดยควบคุมน้ำเสียให้มีสภาพต่างทั้งหมด 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต หากเพิ่มอัตราการบำบัดทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 600 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง และควบคุมสภาพต่างทั้งหมดของระบบให้เป็น 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกกระบบลดลงเหลือ 0-18 พีพีเอ็ม

**คำสำคัญ :** ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์; ที่สภาวะก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูง; สภาพต่างทั้งหมด; กระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ; อุตสาหกรรมเอทานอล

## Abstract

The objective of this research is to investigate the effects of  $H_2S$  loading rate and total alkalinity on removal efficiency of high concentrated  $H_2S$  obtained from biogas production from ethanol industry wastewater (molasses wastewater) by anaerobic digestion. Biogas produced from ethanol wastewater consists of 69.5-74.0 % methane, 25.3-28.1 % carbon dioxide and more 10,000 ppm hydrogen sulfide. The reactor works with combined chemical and biological processes to solve the problem of clogging of the sulfur sediment in the system. The reactor includes reaction tank, aerator tank, sedimentation tank and water tank, with the addition of *Paracoccus* sp. bacteria into aerator tank, filling only once at startup. The results showed that the efficiency of the removal of  $H_2S$  was  $99.9 \pm 0.1$  %, methane was increased 12.2-16.5 % and carbon dioxide was reduced 36.6-53.2 %, in condition of the  $H_2S$  loading rate at 150 and 300  $g H_2S/m^3-h$  and wastewater alkalinity controlled at 4,500  $mg/L$  as  $CaCO_3$ . At the 600  $g H_2S/m^3-h$   $H_2S$  loading rate and 12,000  $mg/L$  as  $CaCO_3$  alkalinity, it was found that a trace amount of hydrogen sulfide was also simultaneously reduced to 0-18 ppm.

**Keywords:** hydrogen sulfide; high concentrated  $H_2S$ ; alkalinity; combined chemical and biological processes; ethanol industry

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมเอทานอลเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ นอกจากจะเป็นการสร้างแหล่ง

พลังงานของประเทศเพื่อทดแทนพลังงานส่วนหนึ่งที่ต้องนำเข้าแล้ว การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบทางการเกษตรของประเทศไทย เช่น อ้อย มันสำปะหลัง มี

ส่วนช่วยเสริมสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจให้กับเกษตรกร ข้อมูลการใช้พลังงานของประเทศไทยจากกระทรวงพลังงานในปี พ.ศ. 2560 พบว่าการใช้พลังงานภาคขนส่งปัจจุบันคิดเป็นร้อยละ 40 ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยมีมูลค่ารวม 10,207489 ล้านบาท ซึ่งส่วนใหญ่เป็นค่าน้ำมันเชื้อเพลิงนำเข้าจากต่างประเทศ เอทานอลในประเทศไทยมีจุดเริ่มต้นที่ภาคเกษตรกรรม โดยวัตถุดิบที่สำคัญ ได้แก่ กากน้ำตาล หรือมันสำปะหลังในรูปมันสด หรือมันเส้น และ ยีสต์ [1] ซึ่งประเทศไทยมีโรงงานผลิตเอทานอล 45 โรงงาน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ  $33.3 \times 10^6$  ลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน (หน่วยปริมาตรของก๊าซ ณ สภาวะมาตรฐานความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) เทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 3.99 เมกะวัตต์ เทียบเท่ากับพลังงานความร้อน 16,660 ตันน้ำมันดิบ และ เทียบเท่ากับก๊าซชีวภาพอัด 15,144.58 ตัน [2] การขยายตัวอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของอุตสาหกรรมเอทานอลส่งผลให้เกิดน้ำเสีย/ของเสียเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก น้ำเสียหรือกากสาที่เหลือทิ้งจากการผลิตเอทานอลมีศักยภาพในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ การสำรวจพบว่า ผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลที่อัตราการผลิตเอทานอล 150,000 ลิตรต่อวัน สามารถนำกากสาผลิตก๊าซชีวภาพ 20,000-30,000 ลูกบาศก์เมตรก๊าซชีวภาพต่อวัน [3] ศักยภาพเชิงพลังงานดังกล่าว ทำให้มีผู้วิจัยสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียเอทานอล และนำพลังงานก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาผลิตกระแสไฟฟ้า หรือเผาตรงในเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อลดต้นทุนในการผลิตเอทานอล แต่ปัญหาที่พบ คือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีความเข้มข้นสูงมากกว่า 10,000 พีพีเอ็ม ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์โลหะต่าง ๆ และปัจจุบันโรงงานเอทานอลแก้ปัญหาด้วยการ

นำเข้าเทคโนโลยีการลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง จึงไม่สามารถลงทุนกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งหมดเพื่อนำมาผลิตไฟฟ้า ทำให้ต้องเผาก๊าซชีวภาพส่วนหนึ่งทิ้งไป ซึ่งหากระบบเผาก๊าซชีวภาพไม่ถูกหลักในการออกแบบทางวิศวกรรม อาจทำให้เกิดมลภาวะที่สร้างปัญหาเรื่องกลิ่นกับชาวบ้านในชุมชนใกล้เคียงได้

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้ป้อนเข้าสู่ระบบ ภายใต้กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic process) ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) หากวัตถุดิบตั้งต้นมีสารในกลุ่มซัลเฟตหรือซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดก๊าซพิษชนิดหนึ่งที่ไม่มีสี ให้กลิ่นไม่พึงประสงค์ คล้ายไข่เน่า มีสูตรทางเคมีว่า  $H_2S$  น้ำหนักโมเลกุล 34.08 มีจุดหลอมเหลวที่  $-85.49$  องศาเซลเซียส จุดเดือด  $-60.33$  องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.54 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท [4] ระดับความเป็นพิษของก๊าซชนิดนี้สามารถแบ่งระดับความเป็นพิษตามระดับความเข้มข้นก๊าซที่ได้รับ แสดงดังตารางที่ 1 จากตารางเห็นได้ว่าก๊าซชนิดนี้ส่งผลเสียต่อมนุษย์ หากได้รับในระดับความเข้มข้นต่ำอาจส่งผลให้เกิดอาการระคายเคือง แต่ถ้าได้รับที่ปริมาณความเข้มข้นสูงอาจทำให้เสียชีวิตได้ นอกจากนี้เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์เครื่องจักรที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ โดยทำให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรสั้นลง

โดยมาตรฐานความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับความปลอดภัยต่อสุขภาพที่กำหนดโดย

มาตรฐานสำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งชาติ กรมแรงงาน ประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) ในช่วงระยะเวลาการสัมผัส 8 ชั่วโมงควรมีค่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่เกิน 10 พีพีเอ็ม หากสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีค่าความเข้มข้นสูงกว่า 600 พีพีเอ็ม เป็นเวลานานกว่า 30 นาที อาจทำให้เสียชีวิตได้ ส่วนของการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องลดก๊าซไฮโดรเจน

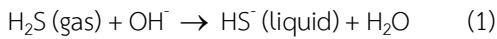
ซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพให้มีสัดส่วนไม่เกิน 100-200 พีพีเอ็ม ซึ่งกระบวนการทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำ แต่มักพบปัญหาการอุดตันของตะกอนซัลเฟตในถังปฏิกรณ์ จึงส่งผลให้ไม่สามารถจัดการตะกอนเหล่านี้ได้ในระยะยาว จึงทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการล้างระบบและตัวกลางบ่อยครั้ง เกิดความยุ่งยาก และซับซ้อนในการใช้งานระบบ [6]

**Table 1** Effects of H<sub>2</sub>S concentrations on human body [5]

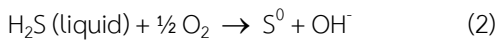
H <sub>2</sub> S concentrations (ppm)	Effects
30	Loss of smell after 2-15 minutes (olfactory nerves).
100	Coughing, eye irritation, altered breathing, drowsiness after 15-30 minutes
200	Marked conjunctivitis and respiratory tract irritation after 1 hour. Pulmonary edema may occur from prolonged exposure
500	Staggering, serious damage to eye, and death after 30-60 minutes
700	Rapid unconsciousness, “knockdown”, breathing stops, death within minutes

วิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การกำจัดแบบแห้ง เช่น กระบวนการดูดซับ และการกำจัดแบบเปียก เช่น การดูดซึมด้วยสารละลายต่าง การกำจัดด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น เทคโนโลยีเติมอากาศ ระบบฟอกชีวภาพ ระบบตัวกรองชีวภาพ และระบบกรองชีวภาพแบบหยด [7] ซึ่งกระบวนการดูดซับและการดูดซึมด้วยสารละลายต่าง มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดก๊าซเสีย แต่มีต้นทุนค่าพลังงาน ค่าสารเคมี และค่าการกำจัดของเสีย เพื่อใช้ในการเดินระบบกำจัดของก๊าซจากของเสียสูง ขณะที่การกำจัดด้วยจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพและมีต้นทุนในการเดินระบบต่ำกว่า เนื่องจากใช้ปริมาณสาร

เคมีน้อย (สารอาหารจุลินทรีย์และสารปรับพีเอช) กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพโดยการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพและเคมี ก๊าซที่ได้จากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนประกอบด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หลักการทำงานของกระบวนการนี้ คือ ภายในถังปฏิกรณ์เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สัมผัสกับสารละลายน้ำต่าง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกดูดซับภายใต้สภาวะต่าง (ค่าพีเอช 8-9) ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ 1



ส่วนภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีกลุ่มแบคทีเรียประเภทซัลเฟอร์ออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย (sulfur oxidizing bacteria, SOB) ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.0-9.0 ที่อุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส ซัลไฟด์ที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีข้างต้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อได้รับออกซิเจนในปริมาณที่พอเหมาะ กล่าวคือ เมื่อซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์จะได้ธาตุกำมะถันหรือซัลเฟอร์ ดังสมการที่ 2



ผลศึกษากระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนในโรงงานผลิตน้ำยางข้นของ Chaiprapat และคณะ [8] ใช้กระบวนการลดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบใช้ออกซิเจนโดยถังกรองก๊าซชีวภาพแบบกรวด สามารถลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซผสมจากความเข้มข้นเฉลี่ย 2,234.8 พีพีเอ็ม ให้เหลือน้อยกว่า 500 พีพีเอ็ม และงานวิจัยของ Namung และคณะ [9] ได้จำลองกระบวนการแยกก๊าซชีวภาพด้วยแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ แบคทีเรียกลุ่ม SOB คือ *Acidithiobacillus thiooxidans* โดยป้อนความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ 5,000 พีพีเอ็ม ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเหลือประมาณ 400 พีพีเอ็ม ซึ่งกระบวนการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพให้ประสิทธิภาพการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูง แต่ปัญหาที่พบจากกระบวนการผลิตทั้ง 2 กระบวนการ คือ การอุดตันที่ตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากมีซัลเฟตเกาะที่ตัวกลาง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสภาพความเป็นต่างทั้งหมด ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

สูง ดังนั้นจึงได้ศึกษากระบวนการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูงในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ เพื่อลดการอุดตันของตะกอนที่ตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ ด้วยการแยกถังปฏิกิริยาและถังตกตะกอนออกจากกัน โดยถังปฏิกิริยาจะป้อนก๊าซชีวภาพให้สัมผัสกับน้ำเสีย เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายในน้ำเสีย แล้วน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยาจะถูกส่งไปยังถังเติมอากาศ ซึ่งมีจุลินทรีย์สายพันธุ์ SOB ทำหน้าที่เปลี่ยนซัลไฟด์ที่ละลายในน้ำเสียเป็นซัลเฟอร์ โดยมีการป้อนอากาศเข้าไปเพียงเล็กน้อย จากนั้นแยกตะกอนซัลเฟอร์ออกจากระบบภายในถังตกตะกอนและเวียนน้ำส่วนใสไปสัมผัสกับก๊าซชีวภาพในถังปฏิกิริยาต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 วิธีการวิจัย

2.1.1 การเตรียมก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เตรียมโดยหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ CMU-CD มีลักษณะเป็นบ่อหมักแบบทรงขนาด 1,100 ลิตร ซึ่งน้ำเสียเอทานอลที่ใช้นำมาจากบริษัท ธนภักดี จำกัด อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งดำเนินกิจการผลิตสุราและสุราผสมที่ใช้วัตถุดิบกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต การเดินระบบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละวันได้นำน้ำเสียมาเจือจางด้วยน้ำประปาในอัตราส่วนน้ำเสียต่อน้ำประปา 1 : 4 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) และปรับค่าสภาพต่างทั้งหมดให้เป็น 1,250 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ด้วยสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และควบคุมระยะเวลาที่เก็บน้ำของระบบให้คงที่ 16 วัน

2.1.2 การเตรียมสารทำงานที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เตรียมจากน้ำออกถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ โดยนำมาเติมกับสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับเพิ่มสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงที่ทดลองตัวอย่าง เช่น น้ำออกถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพมีสภาพต่างทั้งหมด 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต หากต้องการเพิ่มสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียให้เป็น 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ควรเติมสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปอีก  $480-360 = 120$  กรัม ดังแสดงในรูปที่ 1

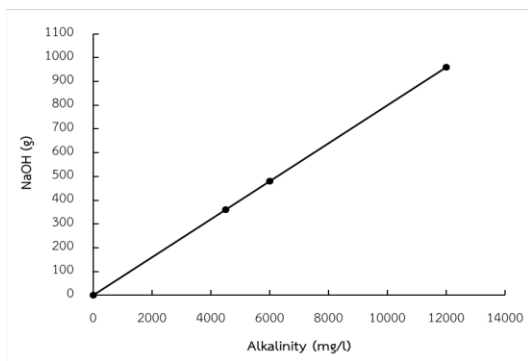


Figure 1 Volume of sodium hydroxide versus alkalinity concentration

2.1.3 ระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ

ระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ทำจากท่อพีวีซีสำเร็จรูปแบบทึบแสงหนา 8.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ (A) ขนาดปริมาตร 10 ลิตร ความสูง 150 เซนติเมตร ซึ่งตรงกลางของคอลัมน์มีตะแกรงที่รองรับตัวกลางไบโอบอลขนาด 1 นิ้ว ความสูงตัวกลาง 50 เซนติเมตร โดยมีปริมาตรตัวกลางใช้งาน 3.93 ลิตร ส่วนด้านล่าง

ของถังปฏิกรณ์สามารถรองรับน้ำเสียที่ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนไหลไปยังถังเติมอากาศ โดยใช้ปั๊มรีด (peristaltic pump) เพื่อป้อนก๊าซชีวภาพที่เข้าระบบ และควบคุมปริมาณก๊าซชีวภาพที่ไหลผ่านมิเตอร์ก๊าซชีวภาพที่ติดตั้งไว้ได้โดยการปรับความเร็วรอบของปั๊มรีด โดยมีท่อก๊าซออกกระบบและท่อกระจายน้ำเสียอยู่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ ส่วนที่ 2 ถังเติมอากาศ (B) ขนาดปริมาตรใช้งาน 7 ลิตร ภายในติดตั้งหัวทรายเพื่อกระจายอากาศเข้าไป 4 หัว โดยใช้ปั๊มลม (HIBLOW-HP100) ขนาด 95 วัตต์ และควบคุมอัตราการไหลอากาศให้ 1.6 ลิตรต่อนาที ส่วนที่ 3 ถังตกตะกอน (C) ขนาดปริมาตรใช้งาน 7 ลิตร ทำหน้าที่แยกตะกอนซัลเฟอร์ออกจากน้ำเสียและให้น้ำส่วนใสไหลผ่านรางรับน้ำออกเข้าสู่ถังพักน้ำ (D) โดยมีปั๊มน้ำเสียขนาด 150 วัตต์ ติดตั้งอยู่ภายในถังพักน้ำเพื่อทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำส่วนใสกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ ออกแบบและพัฒนาโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2.2 วิธีการทดลอง

การศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ ได้เติมแบคทีเรียกลุ่ม SOB ความเข้มข้น  $1 \times 10^6$  CFU/mL ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.0-8.0 เข้าไปในถังเติมอากาศเพียงครั้งเดียว ปริมาตร 0.7 ลิตร จากนั้นควบคุมอัตราการไหลอากาศ 1.6 ลิตรต่อนาที และควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย 0.8 ลิตรต่อนาที ตลอดระยะเวลาทดลอง โดยเริ่มทดลองที่อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 150 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ที่สภาพต่างทั้งหมด 4,500 6,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ จากนั้นปรับเพิ่มอัตราการ

บรรทุก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 300 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ที่สภาพต่างทั้งหมด 4,500, 6,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ และปรับเพิ่มอัตราภาระบรรทุก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 600 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ที่สภาพต่างทั้งหมด 4,500, 6,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ

แคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ โดยแต่ละการทดลองมีระยะเวลาทดลองวันละ 8 ชั่วโมง เป็นเวลา 5 วัน ตลอดจนติดตามระบบด้วยการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ค่า oxidation reduction potential (ORP) และค่าพีเอชของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบต่อไป

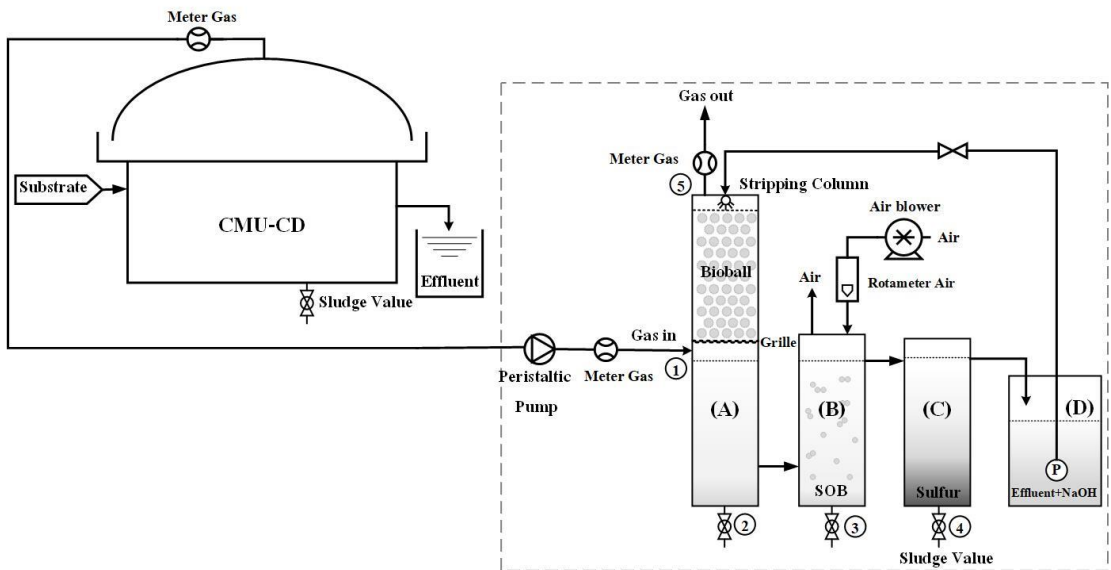


Figure 2 Lab-scale reactors: (A) reaction tank, (B) aeration tank, (C) sedimentation tank, and (D) storage tank

### 2.3 วิธีการตรวจวัด

การทดลองได้เก็บข้อมูลโดยการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถังปฏิกิริยาและก๊าซชีวภาพออกจากถังปฏิกิริยาด้วยมิเตอร์ก๊าซชีวภาพ พร้อมทั้งตรวจวัดค่าองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) รวมถึงวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียในถังปฏิกิริยา ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) และค่าโออาร์พี (ORP) ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 2 ด้วยความถี่ทุก ๆ 30 นาที ในช่วง 4

ชั่วโมงแรก และทุก ๆ 60 นาที จนครบ 8 ชั่วโมง ที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที และตรวจวัดสภาพต่างทั้งหมด (alkalinity) ของน้ำเสียในถังปฏิกิริยาก่อนทำการทดลอง ด้วยวิธีการไตเตรท โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เมื่อสิ้นสุดการทดลองแต่ละครั้ง ได้ตั้งตะกอนออกจากถังตกตะกอนร้อยละ 10 ของปริมาตรน้ำในถังตกตะกอน เพื่อป้องกันการสะสมตัวของตะกอนซัลเฟอร์ในระบบ

**Table 2** Parameters for biogas system operation

Parameters	Position sampling	Methods
Component of biogas	No. (1), (5)	GFM Series Portable Gas Analysers
pH	No. (2), (3), (4)	Horiba LAQUA twin Compact pH Meter - pH11
ORP	No. (2), (3), (4)	ORP electrode InLab Redox Flow

**Table 3** Characteristics of influent and effluent from biogas reactor

Parameters	Influent	Effluent
pH	5.0	7.2
TCOD (mg/L)	29,074	5,971
Total nitrogen (mg/L)	838	396
Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	1,310	4,804
Total volatile solid (mg/L)	34,935	11,439
Volatile solids (mg/L)	23,850	5,917
Potassium (mg/L)	N/A	1,331
Sulfate (mg/L)	N/A	1,652
Sulfide (mg/L)	N/A	22.40

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

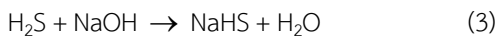
การเตรียมก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล โดยหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ CMU-CD มีลักษณะเป็นบ่อหมักแบบราง ขนาด 1,100 ลิตร พบว่ามีสมบัติทางเคมีของน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3 ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 11,000-12,000 พีพีเอ็ม ก๊าซมีเทนร้อยละ 69.5-74.0 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 25.3-29.0 เป็นต้น

การเดินระบบที่สภาพต่างทั้งหมด 4,500, 6,000 และ 9,000 มิลลิลิตรต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นระยะเวลา 5 วัน วันละ 8 ชั่วโมง พบว่าอัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 150

กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 100.0±0.0 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ สุเมธ และคณะ [10] ที่ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น เพื่อผลิตกรดซัลฟูริกด้วยระบบกรองชีวภาพร่วมกับการดูดซึมทางเคมี โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 95 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ส่วนที่อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 300 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 99.9±0.1, 99.9±0.1



และ  $100.0 \pm 0.0$  ที่สภาพต่างทั้งหมด 4,500, 6,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ เมื่อป้อนก๊าซชีวภาพเข้าระบบมากขึ้นโดยมี อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 600 กรัม ไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง พบว่าระบบ มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ  $88.7 \pm 3.8$ ,  $98.9 \pm 0.8$ ,  $99.4 \pm 0.8$  ที่สภาพต่างทั้งหมด 4,500, 6,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ โดยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบถูกดูดซับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามปฏิกิริยาทางเคมีในขั้นตอนแรกตั้ง สมการที่ (3) และขั้นตอนที่ 2 โซเดียมซัลไฟด์จะถูก ออกซิไดซ์เป็นซัลเฟอร์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เพื่อสามารถฟื้นฟูสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กลับไปใช้ใหม่ได้อีกตั้งสมการที่ 4



เมื่อพิจารณาสภาพต่างทั้งหมด 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (รูปที่ 3) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าลดลง ที่อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องจากระยะเวลาที่กักเก็บก๊าซในชั้นตัวกลาง สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเสียลดลง ส่งผลให้ ความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง หากต้องการเดินระบบที่อัตราการระบรทุกก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 600 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อ ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ควรควบคุมน้ำเสียให้มีสภาพต่าง ทั้งหมด 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียม คาร์บอเนต จึงส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยร้อยละ 99.8 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Rattana และคณะ [11] ที่ศึกษา ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซ ชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานน้ำยางชันด้วยการใช้

สารละลาย Fe (III) EDTA เป็นสารดูดซับ ซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าระบบ 15,000-26,000 พีพีเอ็ม โดยมีประสิทธิภาพกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยร้อยละ 97 เห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า การทดลองครั้งนี้เพียงเล็กน้อย อาจเนื่องจากชนิดของ สารละลายที่ใช้ในการดูดซับที่ต่างกัน

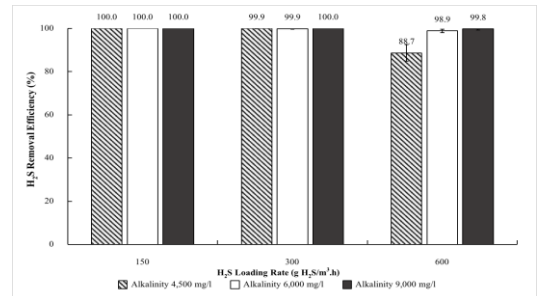


Figure 3 H<sub>2</sub>S removal efficiency at different alkalinity and H<sub>2</sub>S loading rates

ตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลมาผ่านระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพในสภาวะต่าง ๆ ส่งผลให้ก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ร้อยละ 14.9-88.4 เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายได้ในน้ำเสียที่มีสภาพต่าง ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับสภาพต่างทั้งหมดและค่าพีเอชของน้ำเสีย [11] และส่งผลให้มีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.5-28.3 หากเดินระบบที่อัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 150 และ 300 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง และควบคุมสภาพต่างทั้งหมดของระบบให้เป็น 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ  $99.9 \pm 0.1$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่มีสภาพต่างทั้งหมดเพียงพอต่อการเดินระบบ หากเพิ่มอัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้สูงถึง

600 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง พบว่าทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง โดยมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกระบบอยู่ในช่วง 657-1,822 พีพีเอ็ม เมื่อปรับสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียให้เป็น 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าระบบสามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี โดยมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0-225 พีพีเอ็ม ซึ่งยังไม่สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทดลองโดยการปรับสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสีย ให้มีค่า 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าระบบสามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีขึ้น โดยมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกระบบมีค่าต่ำกว่า 50 พีพีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพสำหรับนำไปใช้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าควรน้อยกว่า 100

พีพีเอ็ม [12] เนื่องจากงานวิจัยนี้ทดลองในระยะเวลาค่อนข้างสั้น จึงไม่สามารถติดตามผลการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม SOB ในกระบวนการทางชีวภาพ หากต้องการนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบใช้งานจริง ควรศึกษาหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อไป

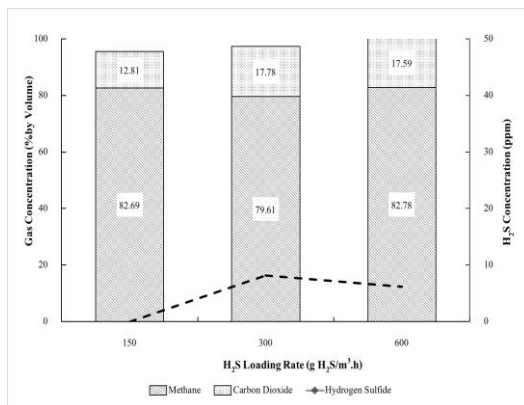


Figure 4 Concentrations of Methane, Carbon dioxide and Hydrogen sulfide in reaction tank

Table 4 Influent and effluent biogas, pH and ORP value of wastewater in biogas tank

H <sub>2</sub> S loading rate (gH <sub>2</sub> S/m <sup>3</sup> .h)	Alkalinity (mg/L)	Influent biogas				Effluent biogas				pH	ORP (mV)
		CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)		
150	4,500	71.0±0.9	27.4±0.4	0	12,000	82.7±0.5	12.8±1.6	0	0	8.2±0.1	-360±30.7
	6,000	71.5±0.9	27.2±0.5	0	12,000	91.8±1.5	4.2±1.0	0	0	8.8±0.4	-326±5.9
	9,000	72.4±0.8	25.9±0.4	0	11,500	90.8±2.5	3.0±0.7	0	0	9.9±0.3	-316±20.7
300	4,500	71.0±1.7	28.1±0.8	0	12,000	79.6±1.7	17.8±1.8	0	0-22	8.3±0.1	-298±28.2
	6,000	71.9±1.3	26.6±0.5	0	12,000	81.9±1.2	16.1±0.9	0	0-36	8.5±0.2	-320±7.9
	9,000	72.6±0.8	25.7±0.3	0	12,000	86.3±1.6	11.2±2.0	0	0	9.1±0.3	-313±56.0
600	4,500	71.9±0.6	25.9±0.5	0	12,000	76.1±0.4	22.0±0.4	0	657-1,822	8.2±0	-355±27.8
	6,000	73.0±1.2	27.0±0.7	0	12,000	77.0±0.8	22.1±0.5	0	63-299	8.1±0.1	-332±13.7
	9,000	71.9±0.8	26.1±0.2	0	12,000	79.3±1.7	18.6±1.3	0	0-225	8.9±0.3	-340±25.4

#### 4. สรุป

ผลของอัตราภาวะบรรจุทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสภาพต่างทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูงในก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการร่วมเคมีและชีวภาพ พบว่าระบบสามารถรองรับอัตราภาวะบรรจุทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากถึง 600 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง หากสามารถควบคุมสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียให้มีค่า 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ย  $9.5 \pm 0.3$  และมีค่าไออาร์พีเฉลี่ย  $-356 \pm 15.7$  มิลลิโวลต์ โดยระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ  $99.9 \pm 0.1$  และมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกกระบบลดลงเหลือ 0-18 พีพีเอ็ม ทั้งนี้การนำพลังงานก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากของเสียอุตสาหกรรมเอทานอลมาผลิตพลังงานทดแทน อาจลดต้นทุนในการผลิตเอทานอลได้ และสามารถรองรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมเอทานอลที่เพิ่มขึ้นในอนาคตอีกด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ทุนวิจัยภายในจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

#### 6. References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2017, Energy Balance of Thailand, Report, Ministry of Energy, Bangkok, 78 p. (in Thai)
- [2] Department of Alternative Energy Deve

lopment and Efficiency, 2015, Alternative Energy Development Plan 2015- 2036, Available Source: [http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015\\_Final\\_version.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf), October 20, 2018. (in Thai)

- [3] Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute Kasetsart University, 2006, The Utilization of Wastes from Ethanol Industry, Report, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Bangkok, 20 p. (in Thai)
- [4] HSDB, 2014, Hydrogen Sulfide. Available Source: <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-in/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+576>, December 19, 2018.
- [5] Ekburanawat, W., 2012, Hydrogen Sulfide, Available Source: [http://www.summacheva.org/index\\_thaitox\\_hydrogen\\_sulfide.htm](http://www.summacheva.org/index_thaitox_hydrogen_sulfide.htm), December 19, 2018. (in Thai)
- [6] Arunraj, P., Bunyakan, C. and Chungsiriporn, J., 2009, Hydrogen sulfide removal by absorption and oxidation reaction with potassium permanganate in packed column absorber, pp. 113- 119, 7th PSU-Engineering Conference, Prince of Songkla University, Songkla. (in Thai)
- [7] Pongkiatkul, P., 2015, Biogas Technology Available Source: <http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/02/KM%20DIW%20Presentation.pdf>, December 19, 2018. (in Thai)
- [8] Chaiprapat, S., Mardthing, R., Kantachote,

- D. and Karnchanawong, S., 2011, Removal of hydrogen sulfide by complete aerobic oxidation in acidic biofiltration, *Process Biochem.* 46: 344-352.
- [9] Namgung, H.K., Ahn, H.Y. and Song, J., 2012, Development of a two-phase bioreactor for biological removal of hydrogen sulfide from biogas, *Energy Procedia* 14: 1143-1148
- [10] Chaiprapat, S., Kantachote, D. and Charnnok, B., 2012, Remove Hydrogen Sulfide Simultaneously with Sulfuric Acid Production from Biogas in Concentrated Rubber Latex Industry by Chemical Absorption and Combined with Biofiltration, Research Report, Prince of Songkla University, Songkla, 161 p. (in Thai)
- [11] Rattana, S., Juntima, C. and Janya, I., 2009, Removal of H<sub>2</sub>S in biogas from concentrated latex industry with iron(III) chelate in packed column, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 100: 195-230.
- [11] Tiipayawong, N. and Thanompongchart, P., 2010, Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in a packed column reactor, *Energy* 35: 4531-4535.
- [12] Do, K.U., Nghiem, T.D., Shin, D.K., Nguyen, T.T.H., Ly, B.T. and Tran, D.C., 2016, Application of iron-based adsorbent (FEOOH) to remove hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) from biogas, *J. Sci. Technol.* 54: 35-41.