

# การพัฒนาชุดฟอกแก๊สชีวภาพต้นแบบด้วยสารละลายที่มีสภาพเป็นกลาง

## Development of biogas scrubber prototype by using neutral solution

ธณวัฒน์ พงษ์สุวรรณ<sup>1\*</sup>  
Tanawat Pongsuwan<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

หนึ่งในปัญหาที่สำคัญของการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพโดยใช้วีเนสเป็นสารตั้งต้นคือแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) แก๊สชนิดนี้เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีสมบัติเป็นสารกัดกร่อนเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ที่มีโลหะเป็นส่วนผสม และมีผลต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ การพัฒนาชุดฟอกแก๊สชีวภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเข้มข้นของแก๊สอันตรายชนิดนี้ก่อนผ่านเข้าสู่เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ หลักการออกแบบชุดฟอกแก๊สชีวภาพต้นแบบมีลักษณะเป็นหอพ่นละอองฝอย ละอองฝอย (น้ำที่ผ่านการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างแล้ว) ที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่จากด้านบนสุดลงสู่ด้านล่างของหอโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและแรงดันของสารละลาย ในขณะที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าสู่ชุดทดลองทางด้านล่างของชุดทดลองทำให้เกิดการไหลแบบสวนกระแส ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการบรรจุวัสดุตัวกลางไว้ภายในสามารถเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดน้ำทิ้งจะไหลออกทางด้านล่างของชุดฟอกแก๊ส และมีความเป็นกรดสูงมาก หลังจากนั้นผ่านน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH  $7.0 \pm 0.2$ ) ก่อนนำกลับมาผ่านเข้าสู่ชุดฟอกแก๊ส เพื่อนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ อัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายหลังปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างแล้วเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สด้านขาเข้าเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อทำการทดสอบโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์  $15,600 \pm 1,300$  มิลลิกรัมต่อลิตร กับชุดฟอกแก๊สต้นแบบ ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงมากกว่าร้อยละ 50

**คำสำคัญ:** แก๊สชีวภาพ วีเนส ชุดฟอกแก๊ส ไฮโดรเจนซัลไฟด์

### Abstract

One of the most important problems for electrical production from the biogas by using vinasse as a reactant is a hydrogen sulfide gas ( $H_2S$ ). This gas is one of many products from microbial metabolism. It is the corrosive substance that causes damage in metal composite parts of the machine and the human respiratory system. The aim of biogas scrubber development was to reduce the hazard gas before pass through the biogas generator. The principle of the scrubber prototype was designed as a spray tower. The droplet (pH adjusted water) was moved from the top to the bottom by gravity and solution pressure while  $H_2S$  was injected from the bottom of the prototype scrubber. The counter-current flow was occurred. The results indicated that the elimination efficiency was enhanced

<sup>1</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

<sup>1</sup> Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi Campus

\* Corresponding author. E-mail: tanawat.p@rmutsb.ac.th

by packing material in the scrubber. The high acidity of drained wastewater had run out of scrubber bottom. After that, the waste solution was passed through the pH adjustment system (pH  $7.0 \pm 0.2$ ) and the solution was returned to the gas scrubber in order to generate the recovery solution. The optimum flow rate of pH adjusted solution was 200 mL/min and the inlet gas flow rate was 50 mL/min. With the prototype scrubber, the concentration of  $H_2S$  was tested in the range of  $15,600 \pm 1,300$  mg/L. The obtained concentration of hydrogen sulfide was lower than 50%.

**Keywords:** biogas, vinasse, gas scrubber, hydrogen sulfide

## บทนำ

จังหวัดสุพรรณบุรีมีอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมักอ้อยและน้ำตาลจำนวน 2 โรงงาน (Suphanburi Provincial Industry Office, 2019) ซึ่งก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการในรูปของของเหลวที่เรียกกันว่า “วีเนส” ลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวขุ่น สีน้ำตาล-ดำ มีกลิ่นเหม็น มีความเป็นกรด และมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมสูงมาก จากรายงานพบว่าการผลิตเอทานอลจำนวน 1 ลิตร ทำให้เกิดของเสียชนิดนี้ขึ้น 8-15 ลิตร (Sangave, & Pandit, 2006) ซึ่งจัดเป็นปริมาณที่มาก และไม่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

จากการศึกษาพบว่า วีเนส มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่ในปริมาณมาก เมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ประกอบกับมีชนิดของจุลินทรีย์และสภาวะที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแก๊สชีวภาพ (Robles-Gonzalez et al., 2010) และเมื่อผ่านแก๊สนี้เข้าสู่เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพแล้วจะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ผลสำรวจในปี 2561 ของพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีพบว่า มีโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP: very small power plant) ที่ประกอบกิจการพลังงานทั้งหมดจำนวน 5 โรงงาน โดยใช้วีเนส

เป็นสารตั้งต้นสำคัญภายในกระบวนการผลิต (Suphanburi Provincial Industry Office, 2019)

แก๊สชีวภาพเป็นแก๊สผสม ประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด แก๊สมีเทนเป็นแก๊สพลังงานที่สำคัญสำหรับเดินเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า และแก๊สสปเน็อนที่มีผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพคือแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากเป็นแก๊สพิษที่มีความเป็นกรดสูง สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยทั่วไป ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่เกินร้อยละ 1 ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ (Table 1) ซึ่งแตกต่างจากน้ำเสียวีเนสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเอทานอล เพราะในกระบวนการผลิตใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$ ) ภายในกระบวนการหมักเพื่อทำการย่อยแป้งและเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลก่อนเข้าสู่กระบวนการกลั่น (Parsaee, Kiani, & Karimi, 2019) เมื่อใช้วีเนสเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ จึงเป็นสาเหตุให้ภายในแก๊สชีวภาพมีสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง

**Table 1** The concentration of mixture gases in biogas from anaerobic degradation.

composition gases	agriculture waste (%)	landfill waste (%)
methane (CH <sub>4</sub> )	49-73	50-60
carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	21-40	40-50
nitrogen (N <sub>2</sub> )	not available	5
hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S)	<1	<1
reference	Onthong, & Juntarachat (2017)	Barros, Tiago, & Silva (2014)

รายงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สพิษชนิดนี้สำหรับกระบวนการอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลัก ได้แก่กระบวนการกำจัดด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก กระบวนการกำจัดด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง และกระบวนการกำจัดด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ

เทคโนโลยีทั้ง 3 กระบวนการ (Table 2) แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบเปียกกับระดับอุตสาหกรรมสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างและวัตถุดิบที่เกี่ยวข้อง ลดการจ้างผู้เชี่ยวชาญสำหรับการดูแลระบบ รวมถึงการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

**Table 2** The comparison of hydrogen sulfide removal technology.

technology	advantages	disadvantages	reference
1. wet technology			
1.1 water scrubber	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high H<sub>2</sub>S removal efficiency</li> <li>- low cost investment</li> <li>- CO<sub>2</sub> co-elimination</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- non-reactivate solution</li> <li>- expensive operation</li> <li>- high pressure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Noorain, Kindaichi, Ozaki, Aoi, &amp; Ohashi (2019)</li> <li>- Rotunno, Lanzini, &amp; Leone (2017)</li> <li>- Urban, Lohmann, &amp; Gómez (2009)</li> </ul>
1.2 chemical scrubber	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high H<sub>2</sub>S removal efficiency</li> <li>- high H<sub>2</sub>S removal loading/day</li> <li>- reactivate (some technology)</li> <li>- lower CH<sub>4</sub> loss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- byproducts presented</li> <li>- difficult technique for operation</li> <li>- specialist requirement</li> <li>- non-reactivate (some technology)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abatzoglou, &amp; Boivin (2009)</li> <li>- Roberts, &amp; Mather (1998)</li> </ul>

**Table 2** The comparison of hydrogen sulfide removal technology (continue).

technology	advantages	disadvantages	reference
2. dry technology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high H<sub>2</sub>S removal efficiency</li> <li>- high biogas purification</li> <li>- high H<sub>2</sub>S removal loading/day</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CH<sub>4</sub> loss during operation</li> <li>- reactivate materials (high temperature process)</li> <li>- high cost for operation and materials</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Weinlaender, Neubauer, Hauth, &amp; Hochenauer (2017)</li> <li>- Wellinger, &amp; Lindberg (2005)</li> </ul>
3. biotechnology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- microorganisms were applied</li> <li>- normal temperature operation</li> <li>- chemicaless technology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- H<sub>2</sub>S has contaminated in biogas</li> <li>- Interference gases from the microbial metabolism</li> <li>- specialist requirement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Duan, Koe, &amp; Yan (2005)</li> <li>- Ramírez, Gómez, Aroca, &amp; Cantero (2009)</li> </ul>

ในระดับอุตสาหกรรม การใช้น้ำในการลดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (water scrubber) ทำให้สูญเสียทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญในปริมาณมาก อีกทั้งน้ำที่ออกจากหอฟลอะของฝอยมีสมบัติเป็นกรดที่ไม่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ รวมถึงวิธีการใช้สารเคมี (Fe-chelate solution หรือ metal solution) ที่มีราคาสูงอีกทั้งต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพและกำจัดโลหะปนเปื้อนก่อน และวิธีการปรับสภาพสารละลายเป็นเบสกับหอฟลอะของฝอย (alkali scrubber) ที่ต้องใช้เบสในปริมาณมากในการปรับสภาพให้ pH อยู่ในช่วง 9.0-10.0 เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของหอฟลอะของฝอย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนากระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก โดยใช้สารละลายหลังผ่านหอฟลอะของฝอยแล้ว นำมาปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างจนมีสภาพเป็นกลาง (pH อยู่ในช่วง 7.0) ที่ใช้ปริมาณเบส และต้นทุนต่ำ อีกทั้งส่งผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อมน้อยกว่า ทำการศึกษาผลของการใช้วัสดุตัวกลาง การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่เหมาะสม รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพกับตัวอย่างแก๊สชีวภาพ และลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโดยการนำสารละลายกลับมาใช้ในกระบวนการได้ใหม่

## วิธีการศึกษา

### 1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### 1.1 แก๊สชีวภาพตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

แก๊สชีวภาพตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพจากวีเนส ในอำเภอหนองหญ้าไซ จังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระบบบ่อปิดคลุมขนาด 9,000 ลูกบาศก์เมตร มีระยะเวลาการหมักอินทรีย์สารภายในระบบเท่ากับ 150 ลูกบาศก์เมตร

ต่อวัน และมีอัตราการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 346.70 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตรต่อวัน ความดันของแก๊สชีวภาพตัวอย่างภายในภาชนะบรรจุก๊าซเท่ากับ 1.10 บาร์ ซึ่งมีความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในช่วง  $15,600 \pm 1,300$  มิลลิกรัมต่อลิตร การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบ 6 โมลต่อลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

## 1.2 อุปกรณ์และเครื่องตรวจวัด

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (Mettler Toledo) ผ่านการเทียบกับสารละลายมาตรฐานทุกครั้งก่อนใช้งาน (2.00, 4.01, 7.00, 9.21 และ 11.00) อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สำหรับตรวจวัดแก๊สที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Biogas 5000, Geotech) ในกรณีที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเข้มข้นมากกว่าขีดจำกัดการตรวจวัดของอุปกรณ์ เปลี่ยนไปใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างอากาศ (gas sampling pump, Gastec) ร่วมกับหลอดดักจับแบบเปลี่ยนสี (colorimetric tube, Gastec, GAS4HH)

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแก๊ส (gas sampling bag) ทำขึ้นจากวัสดุประเภทโพลีไวนิลฟลูออไรด์ (PVF) วาล์วเปิดปิดทำจากโพลีคาร์บอเนต (PC) ซึ่งมีประสิทธิภาพการซึมผ่านของแก๊สต่ำ ด้านทานแรงดึงสูง ทนความร้อน และไม่มีผลกระทบจากแก๊สที่มีสมบัติกัดกร่อน ขนาดบรรจุ 10 ลิตร ทำความสะอาดถุงบรรจุเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยแก๊สไนโตรเจน

## 2. การออกแบบชุดทดสอบ

ชุดทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก (Figure 1) ประกอบด้วยชุดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และชุด

ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ชุดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูง 70 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ภายในมีอุปกรณ์กั้นวัสดุทำจากพลาสติกป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลายที่มีความเป็นกรด ภายในชุดทดลองบรรจุวัสดุตัวกลางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด ทางตอนบนของชุดทดสอบติดตั้งอุปกรณ์ทำหน้าที่พ่นสารละลายที่มีลักษณะเป็นละอองฝอย แรงดันของสารละลายเท่ากับ 0.098 บาร์

สารละลายหลังผ่านการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น จะแยกออกจากด้านล่างของชุดทดสอบ เคลื่อนที่เข้าสู่ชุดปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร จนมีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.00, 4.00, 7.00 และ 10.00 ตามลำดับ ก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

วัสดุตัวกลางที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบเป็นพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) มีความพรุนต่ำ ( $0.26 \pm 0.02\%$ ) สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ในช่วงกว้าง อีกทั้งทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีทั้งในสภาพของกรดและด่างได้ดี รูปร่างของวัสดุตัวกลางมีลักษณะเป็นทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร (สุ่มตัวอย่างวัดความหนาด้วยเวอร์เนีย คาลิเปอร์) บรรจุอยู่ในชุดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความสูงของวัสดุตัวกลางที่บรรจุภายในชุดทดสอบเท่ากับ 40 เซนติเมตร

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากชุดทดลองแล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส ก่อนดึงตัวอย่างแก๊สออกมาตรวจวัดเพื่อเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อไป

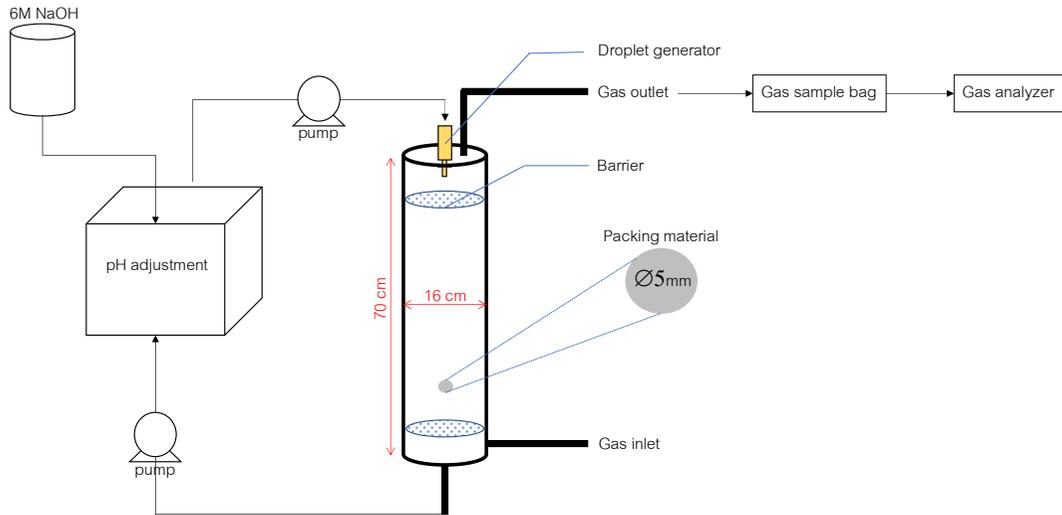


Figure 1 The experimental design of biogas purifying scrubber prototype.

### 3. การออกแบบกระบวนการศึกษาวิจัย

กระบวนการศึกษาควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดลองไว้ที่  $32 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้องขณะทำการเก็บข้อมูล อ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์) แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นที่ 1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุตัวกลาง ขั้นที่ 2 การศึกษาการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ขั้นที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่เหมาะสมของชุดทดสอบทั้งระบบ และขั้นที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของชุดทดสอบ ตามลำดับ

ในการศึกษาวิจัยทำการทดลองแบบกะสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุตัวกลาง และการศึกษาการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมเพื่อความสะดวกต่อการควบคุม ปริมาณสารละลายใช้ภายในระบบเท่ากับ 15 ลิตรต่อรอบการไหลเวียน และทำการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องสำหรับการศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมของชุดทดสอบ

และการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายในแก๊สชีวภาพจริง

การคำนวณหาร้อยละการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นดังสมการ โดยทำการวัดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้านขาเข้า ( $H_2S_{inlet}$ ) หลังจากผ่านชุดทดลองแล้ววัดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายในถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส ( $H_2S_{outlet}$ )

$$\%H_2S_{removal} = \frac{(H_2S_{inlet} - H_2S_{outlet})}{H_2S_{inlet}} \times 100 \quad (1)$$

### 4. วิธีการเก็บข้อมูล

#### 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุตัวกลาง

- ตัวแปรต้น : ชุดทดลองต้นแบบที่มีการบรรจุและไม่บรรจุวัสดุตัวกลางไว้ภายใน
- ตัวแปรตาม : ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตัวแปรควบคุม :	อัตราการไหลของแก๊สด้านขาเข้า 50 มิลลิลิตรต่อนาที	:	ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย $7.0 \pm 0.2$ เปรียบเทียบกับ $10.0 \pm 0.2$
:	อัตราการไหลของสารละลาย 100 มิลลิลิตรต่อนาที	:	อุณหภูมิ $32 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส
:	ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย $7.0 \pm 0.2$		
:	อุณหภูมิ $32 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส		

#### 4.2 การศึกษาการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

ตัวแปรต้น :	ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (2.00, 4.00, 7.00 และ 10.00)
ตัวแปรตาม :	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
ตัวแปรควบคุม :	อัตราการไหลของแก๊สด้านขาเข้า 50 มิลลิลิตรต่อนาที
:	อัตราการไหลของสารละลาย 100 มิลลิลิตรต่อนาที
:	บรรจุวัสดุตัวกลางไว้ในชุดทดลอง
:	อุณหภูมิ $32 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส

#### 4.3 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่เหมาะสมของชุดทดสอบทั้งระบบ

ตัวแปรต้น :	อัตราการไหลของแก๊ส 50, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที
:	อัตราการไหลของสารละลาย 50, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม :	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
ตัวแปรควบคุม :	บรรจุวัสดุตัวกลางไว้ในชุดทดลอง

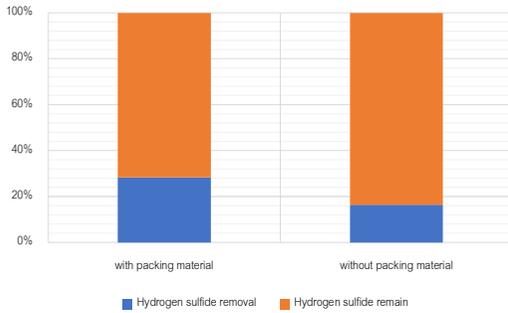
#### 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

ตัวแปรต้น :	แก๊สชีวภาพ
ตัวแปรตาม :	ความเข้มข้นของแก๊สองค์ประกอบในแก๊สชีวภาพ
ตัวแปรควบคุม :	บรรจุวัสดุตัวกลางไว้ในชุดทดลอง
:	อัตราการไหลของแก๊สด้านขาเข้า 50 มิลลิลิตรต่อนาที
:	อัตราการไหลของสารละลาย 200 มิลลิลิตรต่อนาที
:	ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย $7.0 \pm 0.2$ เปรียบเทียบกับ $10.0 \pm 0.2$
:	อุณหภูมิ $32 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส

#### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

##### 1. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุตัวกลาง

การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างหอดูดซับเปล่า โดยใช้สารละลายที่ผ่านการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างแล้วเพียงอย่างเดียว กับหอดูดซับที่มีการบรรจุวัสดุตัวกลางไว้ในร่วมกับสารละลายเพื่อลดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ข้อมูลการศึกษาในเบื้องต้นนี้นำไปสู่การออกแบบวางแผนสำหรับการเก็บผลการทดลองในขั้นต่อไป



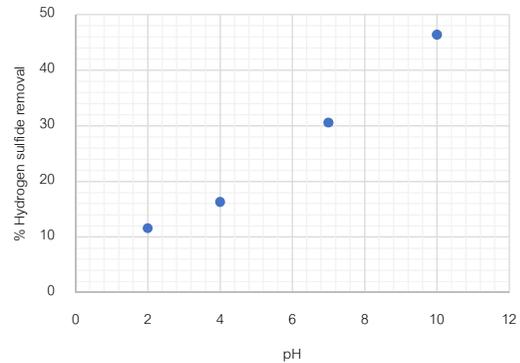
**Figure 2** The comparison of H<sub>2</sub>S removal efficiency between with and without packing material in the scrubber.

ผลการทดลอง (Figure 2) อธิบายได้ว่าการใช้วัสดุตัวกลางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ร้อยละ  $28.32 \pm 1.33$  ในขณะที่ชุดทดสอบที่ไม่มีการบรรจุวัสดุตัวกลางไว้ในกำจัดแก๊สชนิดนี้ได้เพียงร้อยละ  $16.41 \pm 1.45$  เนื่องจากวัสดุตัวกลางที่บรรจุไว้ในสามารถเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างสารละลายกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าการเพิ่มสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเพิ่มมากขึ้น (Jang, Yasin, Park, Lovitt, & Chang, 2017)

## 2. ผลการศึกษาการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของชุดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อีกทางหนึ่ง โดยสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ซึ่งมีสมบัติเป็นเบสแก่ ละลายน้ำได้ง่าย และมีราคาต่ำเมื่อเทียบกับ

เบสแก่ชนิดอื่นๆ จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรม ผลการศึกษาแสดงใน (Figure 3)



**Figure 3** H<sub>2</sub>S removal efficiency at different pH of solution.

น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วโมเลกุลมีรูปร่างแบบมุมงอ และมีสภาพขั้วเท่ากับ 1.86 เดอบาย (Clough, Beers, Klein, & Rothman, 1973) เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีรูปร่างโมเลกุลแบบมุมงอ และมีสภาพขั้วเท่ากับ 0.97 เดอบาย (Viswanathan, & Dyke, 1984) ทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะแก๊สสามารถละลายได้ในน้ำที่มีสถานะเป็นของเหลว ผลการศึกษาจากชุดควบคุมซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำที่สุด สามารถอธิบายได้ว่า สารละลายที่ไหลออกจากตอนกลางของชุดทดสอบเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วทำให้ค่า pH ของสารละลายลดลง เมื่อนำสารละลายที่มีความเป็นกรดและไม่ผ่านการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้การละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง ด้วยเหตุผลเดียวกันสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 ซึ่งมีความเป็นกรดประสิทธิภาพการกำจัดจึงไม่แตกต่างกันมาก

สำหรับสารละลายที่ทำการปรับสภาพ pH เท่ากับ 10 การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด จึงสามารถอธิบายถึงความสำคัญของค่า pH ของสารละลายได้ว่า สารละลายที่มีความเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพของชุดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษานของ Morton (2008) ซึ่งอธิบายไว้ว่าที่ pH ของสารละลายต่ำกว่า 4.0 ประสิทธิภาพการละลายของ H<sub>2</sub>S ในน้ำจะลดต่ำลง ในขณะที่ pH ของสารละลายมากกว่า 10.0 ประสิทธิภาพการละลายของ H<sub>2</sub>S ในน้ำจะเพิ่มขึ้นมาก ถึงแม้ว่าสารละลายที่มีค่า pH เป็น 10.0 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงที่สุดก็ตาม การนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้จริงในระดับ

อุตสาหกรรมจำเป็นต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น ผลการทดลองถึงการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายจากช่วง 2.2-3.1 ให้เป็น 10.0±0.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhenqi, Yincheng, & Wenyi (2009) อธิบายไว้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสอดคล้องกับปริมาณของเบสที่ใช้

### 3. อัตราการไหลที่เหมาะสมของชุดทดสอบทั้งระบบ

การศึกษ้อัตราการไหลของระบบประกอบด้วย อัตราการไหลของสารละลายที่ผ่านการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างแล้ว และอัตราการไหลของแก๊สด้านขาเข้าระบบ

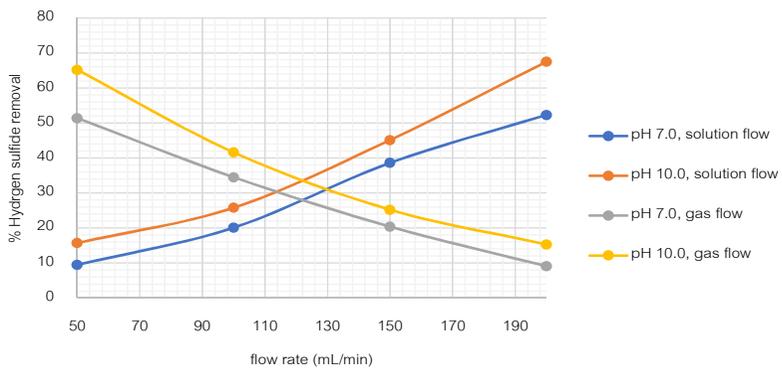
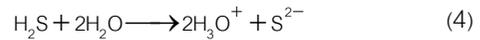
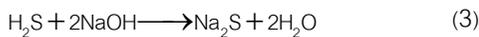
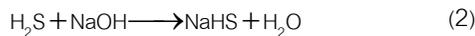


Figure 4 Optimization of gas and solution flow rate for H<sub>2</sub>S removal.

จากผลการทดลอง (Figure 4) อธิบายได้ว่า อัตราการไหลของสารละลายหลังปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างแล้ว มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันโดยตรงกับประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากสารละลายใหม่หลังการปรับสภาพที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรสามารถเกิดปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผิวด้านนอกของละอองฝอยได้มากกว่า

สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Gantina, Iriani, & Wachjoe (2020) ในทางตรงข้ามอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์กลับมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ กล่าวคือ อัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นแสดงว่าระยะเวลาที่แก๊สอยู่ในชุดทดลองลดลง ทำให้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สประสิทธิภาพจะลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับสารละลายที่ใช้

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายที่ผ่านวัสดุตัวกลาง ทำให้ความเร็วของสารละลายลดลง การถ่ายโอนมวลสารจึงเพิ่มขึ้น (Moustiri, Hebrard, & Roustan, 2002) ในขณะที่อัตราการไหลของสารละลายที่มีลักษณะเป็นละอองฝอยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไฮดรอกไซด์และน้ำสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากขึ้น (Wicaksono, Hermana, & Slamet, 2018) สารละลายหลังการปรับสภาพที่ค่า pH  $10.0 \pm 0.2$  มีประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าสารละลายหลังการปรับสภาพที่ค่า pH  $7.0 \pm 0.2$  เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายมีความเข้มข้นสูงกว่าจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของละอองฝอยได้มากกว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (2) และ (3) (Choo, Lau, Mohamed, & Lee, 2013)



จากสมการเคมีที่ (4) สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่าสารละลายที่ออกจากชุดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อเข้าสู่ชุดปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างจะมีค่า pH ลดต่ำลง เนื่องจากมีการเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจึงทำให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีสมบัติเป็นกรดอ่อนสามารถละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ลดลงเพราะผลของไอออนร่วมที่มีอยู่ในสารละลาย (Chang, 2010)

#### 4. ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพที่นำมาทดสอบกับชุดทดลองประกอบด้วยแก๊สชนิดต่างๆ ทำการทดสอบด้วยสภาวะที่ผ่านการศึกษาและแปรผลข้อมูลจากแต่ละขั้นตอนแล้ว โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยสารละลายที่ผ่านการปรับสภาพแล้วที่ pH  $7.0 \pm 0.2$  และ  $10.0 \pm 0.2$  (Table 3)

**Table 3** The concentration of gases in biogas before and after pass through the scrubber prototype.

composition gases	before	after	
		pH 7.0	pH 10.0
methane (CH <sub>4</sub> )	52.3±1.3%	59.6±1.7%	62.3±1.2%
carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	45.8±1.8%	40.3±1.6%	38.1±1.4%
hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S)	15,600±1,300 ppm	7,025±473.8 ppm	5,890±396.7 ppm

ชุดทดสอบที่สารละลายหลังปรับสภาพที่ pH 7.0 และ 10.0 สามารถลดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพได้ร้อยละ 55.0 และ 62.2 ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายที่มีค่า pH 7.0 มีความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนต่ำกว่า pH 10.0 การเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จึง

ลดลงถึงแม้ว่าโมเลกุลของน้ำในสารละลายสามารถเข้าร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วยก็ตาม แต่การละลายของแก๊สชนิดนี้ในน้ำเกิดขึ้นได้น้อยมาก เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีร่วมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพกับไฮดรอกไซด์และน้ำได้เช่นกันดังสมการ

## สรุป

การเพิ่มวัสดุตัวกลางเป็นการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างสารละลายกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ พื้นที่ผิวจะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น อัตราการไหลของแก๊สที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของสารละลายที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสถานะได้ดี ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสารละลายที่มีความเป็นเบสเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่สภาพความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ  $7.0 \pm 0.2$  จึงมีประสิทธิภาพด้อยกว่า  $10.0 \pm 0.2$  (ร้อยละ 55.0 และ 62.2 ตามลำดับ) แต่สามารถลดการใช้สารเคมีได้ 63 บาทต่อลูกบาศก์เมตรต่อรอบ

ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพหลังผ่านชุดทดลองแล้วยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับเครื่องยนต์ต้นกำลังเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เพราะขีดจำกัดสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถรองรับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ไม่เกิน 150-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ขึ้นอยู่กับเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพแต่ละรุ่นและบริษัทผู้ผลิต) ทว่าซึ่งบ่งลงทุนสำหรับการใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการต่อยอดโดยใช้สารละลายที่มีสมบัติเป็นกลางผสมกับการใช้เทคโนโลยีชีวภาพเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดปริมาณของเสียต่อไป

## คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา รวมถึงคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนให้ดำเนินงานวิจัยนี้ และบริษัท ที. เอ็ม. เพาเวอร์ แมเนจเม้นต์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ บุคลากร และตัวอย่างแก๊สชีวภาพเพื่อทำการทดสอบ

## เอกสารอ้างอิง

- Abatzoglou, N., & Boivin, S. (2009). A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(1), 42-71.
- Barros, R. M., Tiago, F. G. L., & da Silva, T. R. (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, 65, 150-164.
- Clough, S. A., Beers, Y., Klein, G. P., & Rothman, L. S. (1973). Dipole moment of water from Stark measurements of H<sub>2</sub>O, HDO, and D<sub>2</sub>O. *The Journal of Chemical Physics*, 59(5), 2254-2259.
- Chang, R. (2010). *Chemistry*. Boston: McGraw-Hill.
- Choo, H. S., Lau, L. C., Mohamed, A. R., & Lee, K. T. (2013). Hydrogen sulfide adsorption by alkaline impregnated coconut shell activated carbon. *J. Eng. Sci. Technol*, 8(6), 741-753.
- Duan, H., Koe, L. C. C., & Yan, R. (2005). Treatment of H<sub>2</sub>S using a horizontal biotrickling filter based on biological activated carbon: reactor setup and performance evaluation. *Applied microbiology and biotechnology*, 67(1), 143-149.
- Gantina, T. M., Iriani, P., & Wachjoe, C. K. (2020). Biogas purification using water scrubber with variations of water flow rate and biogas pressure. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450, 012011.
- Jang, N., Yasin, M., Park, S., Lovitt, R. W., & Chang, I. S. (2017). Determination of volumetric gas-liquid mass transfer coefficient of carbon monoxide in a batch cultivation system using kinetic simulations. *Bioresource technology*, 239, 387-393.
- Morton, C. M. (2008). The effect of pH on hydrogen sulfide and carbon dioxide absorption in packed towers. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2008(4), 671-683.

- Moustiri, S., Hebrard, G., & Roustan, M. (2002). Effect of a new high porosity packing on hydrodynamics of bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(5), 419-426.
- Noorain, R., Kindaichi, T., Ozaki, N., Aoi, Y., & Ohashi, A. (2019). Biogas purification performance of new water scrubber packed with sponge carriers. *Journal of cleaner production*, 214, 103-111.
- Onthong, U., & Juntarachat, N. (2017). Evaluation of biogas production potential from raw and processed agricultural wastes. *Energy Procedia*, 138, 205-210.
- Parsaee, M., Kiani, M. K. D., & Karimi, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and bioenergy*, 122, 117-125.
- Robles-Gonzalez, V., Lopez-Lopez, E., Martinez-Jeronimo, F., Ortega-Clemente, A., Ruiz-Ordaz, N., Galindez-Mayer, J., & Poggi-Varaldo, H. M. (2010). Combined treatment of mezcal vinasses by ozonation and aerobic biological post-treatment. In *Proceedings of 14th International Biotechnology Symposium (Vol. 1418)*. Rimini, Italy: University of Bologna.
- Ramírez, M., Gómez, J. M., Aroca, G., & Cantero, D. (2009). Removal of hydrogen sulfide by immobilized *Thiobacillus thio-parus* in a biotrickling filter packed with polyurethane foam. *Bioresource Technology*, 100(21), 4989-4995.
- Roberts, B. E., & Mather, A. E. (1988). Solubility of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in a mixed solvent. *Chemical Engineering Communications*, 72(1), 201-211.
- Rotunno, P., Lanzini, A., & Leone, P. (2017). Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. *Renewable energy*, 102, 417-432.
- Sangave, P. C., & Pandit, A. B. (2006). Enhancement in biodegradability of distillery wastewater using enzymatic pretreatment. *Journal of Environmental Management*, 78(1), 77-85.
- Suphanburi Provincial Industry Office. (2019). *List of Industrials in Suphanburi province data is presented as of 31 August 2019*. Retrieved January 3, 2020, from <http://www.industry.go.th/suphanburi/index.php/activityreport/302-31-59-1?path=> (in Thai)
- Urban, W., Lohmann, H., & Gómez, J. S. (2009). Catalytically upgraded landfill gas as a cost-effective alternative for fuel cells. *Journal of Power Sources*, 193(1), 359-366.
- Viswanathan, R., & Dyke, T. R. (1984). Electric dipole moments and nuclear hyperfine interactions for H<sub>2</sub>S, HDS, and D<sub>2</sub>S. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 103(2), 231-239.
- Weinlaender, C., Neubauer, R., Hauth, M., & Hochenauer, C. (2017). Removing H<sub>2</sub>S from biogas using sorbents for solid oxide fuel cell applications. *Chemie Ingenieur Technik*, 89(9), 1247-1254.
- Wellinger, A., & Lindberg, A. (2005). *Biogas upgrading and utilization. IEA Bioenergy Task 24: energy from biological conversion of organic waste*. London: IEA Bioenergy.
- Wicaksono, A. M., Hermana, J., & Slamet, A. (2018). Reducing CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Gas in Biogas Using Wet Scrubber Method with Ca(OH)<sub>2</sub> Solution. In *11th International conference on advances in agricultural, biological, civil and environmental science* (pp. 67-71). Bali, Indonesia: Dignified Researchers in Agricultural, Biological and Life Sciences.

Zhenqi, N., Yincheng, G., & Wenyi, L. (2009).  
Experimental studies on CO<sub>2</sub> Capture in a spray  
scrubber using NaOH solution. In *2009  
International Conference on Energy and  
Environment Technology* (pp. 52–55), Guilin,  
Guangxi, China: IEEE.