

## การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซึมด้วยน้ำอัดความดัน Biogas Upgrading Using Pressurized Water Scrubbing

สิริชัย คุณภาพดีเลิศ\*<sup>1</sup> ปฏิรูป ผลจันทร์<sup>1</sup> อุเทน กันทา<sup>2</sup> ประเสริฐ ฤกษ์เกรียงไกร<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200  
<sup>2</sup> สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

Sirichai Koonaphapdeeert\*<sup>1</sup> Patiroop Pholchan<sup>1</sup> Uthen Kantha<sup>2</sup> Prasert Rerkkriangkrai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

Tel : 0-5394-4192 E-mail: sirichai@eng.cmu.ac.th

<sup>2</sup> Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

Tel : 0-5394-2007 Email: uthenkuntha@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาระบบปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพโดยอาศัยหลักการดูดซึมด้วยน้ำภายใต้ความดัน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ระบบใช้ก๊าซชีวภาพจริงจากฟาร์มสุกร โดยพบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากร้อยละ 65 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 85 โดยปริมาตร ลดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จนเหลือต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตรและสามารถลดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เหลือ 0 ส่วนในล้านส่วน ได้ในกระบวนการเดียว โดยพบว่าอัตราส่วนอัตราการไหลน้ำต่อก๊าซชีวภาพ (L/G ratio) ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.89 เท่า ที่ความดัน 1.5 บาร์เกจ ในถังดูดซึม

**คำหลัก** การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ การดูดซึมด้วยน้ำ มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์

### Abstract

The main objective of this study is to develop a biogas upgrading system based on the principle of pressurized gas absorption with water in order to increase methane concentration of the biogas. Raw biogas from a piggery was supplied to the system. It was found that the methane concentration was raised from 65%Vol to 85%Vol while the concentration of carbon dioxide was reduced to

below 10%Vol. A trace amount of hydrogen sulfide was also simultaneously reduced to 0 ppmv in the process. It was found that the suitable ratio of water and biogas flow rates (L/G ratio) was 0.89 times at the pressure of 1.5 bar (gauge) in the absorber.

**Keywords:** Biogas upgrading, water scrubbing, Methane, carbon dioxide

### 1. บทนำ

ก๊าซชีวภาพ (biogas) เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (anaerobic process) โดยกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน (methanogens) [1] ในปัจจุบันประเทศไทยมีก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์และอุตสาหกรรมเกษตรอื่นๆ เช่น มันสำปะหลัง ยางพารา กากน้ำตาล ฯลฯ ปีละกว่า 1,700 ล้านลูกบาศก์ฟุต ซึ่งคิดเทียบเท่า 821.5 ตันน้ำมันดิบ [2] ก๊าซชีวภาพนี้สามารถนำไปทดแทนพลังงานฟอสซิลอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ก๊าซชีวภาพยังเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่มีคาร์บอนสมดุล (carbon neutral) ซึ่งไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เป็นแรงผลักดันที่สำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนกันอย่างแพร่หลาย โดยก๊าซชีวภาพสามารถนำไปเผาเพื่อให้ความร้อนโดยตรงหรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายเป็นรายได้อีกด้วย นอกจากนี้ ในกลุ่ม

ประเทศพัฒนาได้แก่ เยอรมันนี สวีเดน ออสเตรเลีย ได้มีการปรับปรุงก๊าซชีวภาพให้มีคุณภาพสูงเพียงพอที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ โดยมีสัดส่วนการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี [3-5]

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งก๊าซ 2 ชนิดหลังนั้นไม่พึงประสงค์ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นไม่มีค่าความร้อนในตัวและไม่สามารถเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงได้ ถ้าหากมีความเข้มข้นมากเกินไปจนทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำกว่าร้อยละ 40 โดยปริมาตร จะทำให้ก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อนต่ำเกินกว่าจะใช้งานได้ [6] ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นก๊าซที่มีกลิ่นเหม็น เมื่อละลายน้ำจะทำให้เกิดสารละลายที่มีฤทธิ์กรดซึ่งสามารถกัดกร่อนผิวโลหะของเครื่องยนต์และระบบท่อส่งก๊าซได้ โดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายอมให้มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่เกิน 100 ส่วนในล้านส่วน ในขณะที่ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มเลี้ยงสุกรมักจะพบในช่วง 500-3,000 ส่วนในล้านส่วน [7] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพก่อนจะนำไปใช้งานเพื่อยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์และเพิ่มประสิทธิภาพการสันดาป ทำให้ลดต้นทุนค่าใช้จ่าย

การจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่ การดูดซับด้วยน้ำ การดูดซับด้วยสารละลายเอมีน การดูดซับด้วยวัสดุ carbon molecular sieve รวมถึงการใช้เมมเบรนในการแยก โดยแต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป [8] โดยมีรายงานวาระบบดูดซับด้วยน้ำ (water scrubbing) เป็นวิธีทางกายภาพที่มีต้นทุนและค่าดำเนินการต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ อีกทั้งสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ในกระบวนการเดียว อีกทั้งไม่มีการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ระบบดูดซับด้วยน้ำเป็นระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ [9-10] ระบบดูดซับด้วยน้ำอาศัยหลักการของความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันของก๊าซในน้ำภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยก๊าซมีเทนซึ่งมีโมเลกุลแบบไม่มีขั้วมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ถึง 40 เท่าและ 115 เท่า ตามลำดับ ทำให้เมื่อก๊าซชีวภาพ

เข้าสู่ถังดูดซับแล้ว ก๊าซมีเทนจะละลายน้ำได้เล็กน้อยในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะละลายน้ำได้มากกว่า โดยน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากผ่านถังคายก๊าซ (desorber) ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างคุ้มค่า [5] โดยในทางทฤษฎีแล้วปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับระหว่างของเหลวกับก๊าซได้แก่อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของของเหลวและก๊าซ ความดันของระบบ พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวกลาง คุณสมบัติของของเหลว เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาาระบบดูดซับด้วยน้ำต้นแบบ (pilot scale) ซึ่งทำการทดสอบเดินระบบโดยใช้ก๊าซชีวภาพจริง จากฟาร์มสุกรใน จ.เชียงใหม่และ จ.ราชบุรี เพื่อหาสภาวะในการดำเนินระบบที่เหมาะสม ได้แก่ ความดันภายในถังดูดซับ และ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของก๊าซและอัตราการไหลของน้ำ (L/G ratio) พร้อมทั้งเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพด้วยการทดลองจริงกับผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองเพื่อใช้ในการออกแบบระบบต่อไป

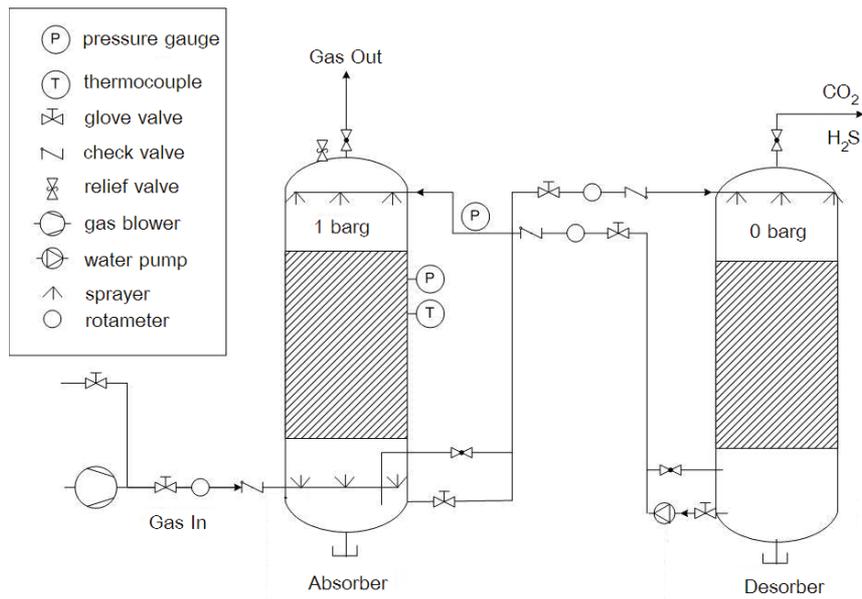
## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นก๊าซชีวภาพจริงที่ได้จากฟาร์มสุกร สอพิมลมาต 3 จ.ราชบุรี และที่ บัวแก้วฟาร์ม อ.สันป่าตอง จ.เชียงใหม่ ซึ่งมีระบบก๊าซชีวภาพแบบ MC-UASB ขนาด 500 ลบ.ม. ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซพบว่า มีก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 62-65 โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 27 - 30 โดยปริมาตร ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 3,500-4,560 ส่วนในล้านส่วน และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 3-4 โดยปริมาตร ในการทดสอบจะดึงก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบโดยตรง

### 2.2 ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ

ระบบดูดซับด้วยน้ำประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ถังดูดซับ (absorber) และถังคายก๊าซ (desorber) ดังแสดงในรูปที่ 1 ถังดูดซับทำจากสแตนเลสสตีลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร มีความหนาของชั้นตัวกลาง (media) 1.5 เมตร ตัวกลางที่ใช้มีชื่อทางการค้าว่าไบโอบอล (bioball) โดยตัวกลางชนิดนี้ผลิตจากวัสดุ



รูปที่ 1 แผนผังแสดงการทำงานของระบบดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ

พลาสติกโพลีโพรพิลีน มีลักษณะเป็นทรงกลม มีพื้นที่ผิว 58 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร เครื่องอัดก๊าซ (gas compressor) เป็นแบบลูกสูบ ใช้น้ำมันเป็นต้นกำลัง ขนาด 0.746 กิโลวัตต์ ทำหน้าที่อัดก๊าซชีวภาพที่แรงดัน 1-1.5 บาร์เกจ ไปยังถังดูดซึม ในขณะที่เดียวกัน ระบบปั๊มน้ำ (Lucky Pro - MSC80) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ จะมีการสูบน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ถังดูดซึมผ่านหัวสเปรย์น้ำ ออกเป็นรูปกรวยตันเพื่อให้พื้นผิวของตัวกลางมีการเปียกน้ำอย่างทั่วถึง โดยมีลักษณะไหลสวนทางกับก๊าซชีวภาพน้ำที่ผ่านถังดูดซึมแล้วจะถูกปั๊มเวียนไปยังถังคายก๊าซซึ่งตัดแปลงจากหอหล่อเย็นขนาดเล็ก (Cooling Man - CMB - 10) จะมีพัดลมระบายอากาศเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศแบบไหลสวนทางกัน (cross flow) โดยทำงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โครงสร้างภายนอกของถังคายก๊าซทำด้วยไฟเบอร์กลาส ภายในบรรจุพลาสติกตัวกลางเพื่อทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิว โดยรองรับอัตราการไหลน้ำได้ 130 ลิตรต่อนาที มีพัดลมระบายอากาศ ขนาด 26 นิ้ว ซึ่งใช้น้ำมันขนาด 0.18 กิโลวัตต์ให้ปริมาณการไหลของอากาศ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

### 2.3 การทดลองระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซ

การทดสอบระบบ ทำโดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพคงที่ที่ 90 ลิตรต่อนาที (normal liter/min) โดยคิดเทียบที่สภาวะมาตรฐานความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อัตราความดันที่ 1 บาร์เกจ โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ระบบในอัตราส่วนน้ำต่อก๊าซชีวภาพ (L/G ratio) เป็น 0.40 จนถึง 1.06 เท่า เพื่อหาผลต่อการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลเรียบร้อยแล้วจึงทำการวัดองค์ประกอบของก๊าซที่เข้าและออกจากระบบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Geotechnical, BM2K2-E000) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยมีความแม่นยำ  $\pm$  ร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร และสอบเทียบโดยเครื่องวิเคราะห์แบบ gas chromatography (รุ่น Agilent 7890A) หลังจากนั้นจึงเลือกสภาวะ L/G ratio ที่เหมาะสม มาทดสอบที่ความดันในถังดูดซึม 1.5 บาร์เกจ ซึ่งเป็นระดับความดันสูงสุดที่เครื่องอัดก๊าซสามารถทำได้ เพื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อร้อยละของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%CO<sub>2</sub> reduction) และ ร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (%CH<sub>4</sub> enrichment) โดยคำนวณตามสมการ (1) และ (2) ดังนี้

$$\%CO_2 \text{ reduction} = \frac{(C_{CO_2,in} - C_{CO_2,out})}{C_{CO_2,in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\%CH_4 \text{ enrichment} = \frac{(C_{CH_4,out} - C_{CH_4,in})}{C_{CH_4,in}} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่  $C_{CO_2,in}$  และ  $C_{CO_2,out}$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซที่เข้าและออกจากถังดูดซึมก๊าซ ตามลำดับ ส่วน  $C_{CH_4,in}$  และ  $C_{CH_4,out}$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในหน่วยร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซที่เข้าและออกจากถังดูดซึมก๊าซ ตามลำดับ

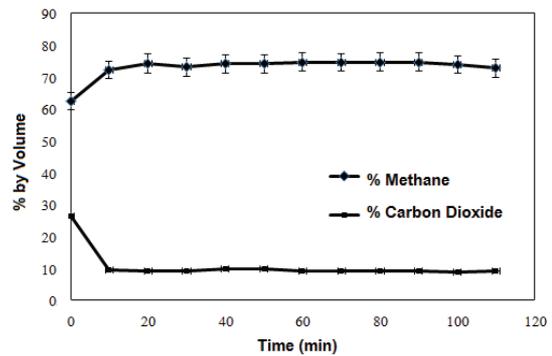
### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 การเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบ

ในการทดสอบระบบโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 90 ลิตรต่อนาที (normal liter/min) และอัตราการไหลน้ำ 80 ลิตรต่อนาที โดยใช้ความดัน 1.5 บาร์เกจ เป็นจำนวน 4 ชั่วโมงการทดลอง โดยมีการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกทุกๆ 5 นาที จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย และหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 28.0 โดยปริมาตร จนเหลือร้อยละ 9.5 โดยปริมาตร ได้ภายในระยะเวลา 20 นาที และระบบเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 20 นาทีเป็นต้นไป โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 0.35 โดยปริมาตรตลอดช่วงการเดินระบบ ในขณะที่ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 75 โดยปริมาตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นร้อยละ 2.8 โดยปริมาตรตลอดช่วงการเดินระบบซึ่งบ่งชี้ว่าระบบเข้าสู่จุดสมดุลภายใน 20 นาทีแรก

ในการทดสอบการเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบดูดซึมนอกจากการจะทำการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เข้าและออกจากระบบ ยังได้มีการตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำที่ใช้ในระบบด้วย น้ำที่ใช้ในระบบดูดซึมเป็นน้ำประปาที่ผลิตขึ้นจากระบบประปาขนาดเล็กในสถานประกอบการ โดยพบว่าค่า pH ของน้ำในระบบเป็นด่างซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นกรด-ด่างของน้ำ โดยพบว่าเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นกรดอ่อน (weak acid) ละลายน้ำ จะทำให้ค่า pH ของน้ำลดลง ในการทดลองพบว่าน้ำสะอาดที่มีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ

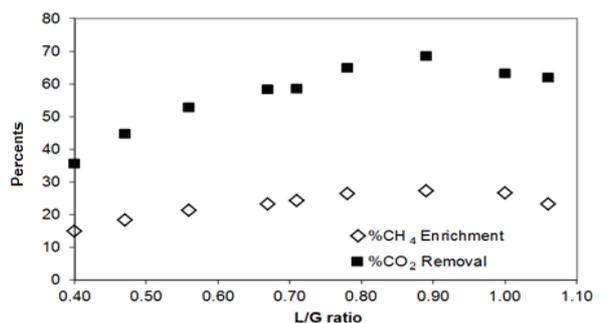
7.5 เมื่อดำเนินระบบที่มีการรบกวนน้ำเข้าสู่ภาวะสมดุลหลังจากระยะเวลา 20 นาทีตั้งแต่เริ่มเดินระบบ พบว่าค่า pH ของน้ำลดลงเหลือ 7.3 และมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ว่า ระบบคายก๊าซ (desorber) สามารถคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำได้เกือบทั้งหมด แต่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนที่ละลายอยู่ในน้ำทำให้ค่า pH ลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบดูดซึมด้วยน้ำอัดความดันที่เวลาต่างๆ หลังเริ่มเดินระบบ

#### 3.2 ผลของ L/G ratio ต่อการทำงานของระบบ

ในการทดสอบระบบโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ 90 ลิตรต่อนาที อัตราความดันที่ 1 บาร์เกจ แล้วปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังดูดซึม พบว่าเมื่อเพิ่มค่า L/G ratio ขึ้นจาก 0.40 เท่าไปจนถึง 1.06 เท่า พบว่าร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%CO<sub>2</sub> reduction) และร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทน (%CH<sub>4</sub> enrichment) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลของค่า L/G ratio ต่อร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนและร้อยละของการลดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

สาเหตุที่ระบบสามารถเพิ่มร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนให้สูงขึ้นได้เนื่องจากมีการไหลวนของน้ำเข้าสู่ถังดูดซึมเพิ่มขึ้น ทำให้มีน้ำที่ยังไม่อิ่มตัวด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลเข้าสู่ระบบด้วยอัตราเร็วขึ้น โดยพบว่าค่าร้อยละในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มจากร้อยละ 35.5 เป็นร้อยละ 68.4 ในขณะที่เดียวกันพบว่าค่าร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนจะเพิ่มจากร้อยละ 15.0 เป็นร้อยละ 27.3 เมื่อเพิ่ม L/G ratio จาก 0.40 เท่า เป็น 0.89 เท่า

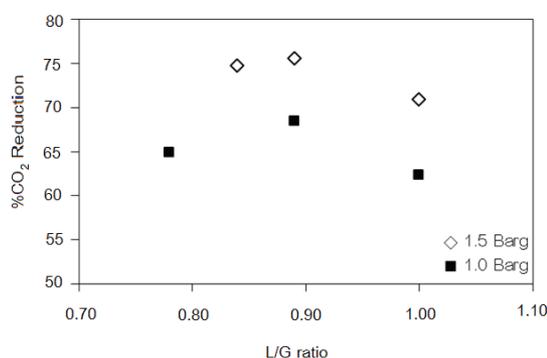
แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน L/G ratio ขึ้นไปเป็น 1.00 และ 1.06 เท่า พบว่า ร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนและร้อยละของการลดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเล็กน้อย ซึ่งตามทฤษฎีการดูดซึมระหว่างก๊าซกับของเหลวแล้วร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนของระบบควรเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่า L/G ratio เพิ่มขึ้น สำหรับผลการศึกษารังนี้ยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด โดยคาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของน้ำบนตัวกลางได้ไม่ดีที่อัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นโดยอาจจะมีการไหลลัดผ่าน (by pass) ในถังดูดซึม ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและก๊าซชีวภาพลดลงและส่งผลให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Cooper *et al.* (ซึ่งศึกษาการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมด้วยน้ำ โดยพบว่า หากมีอัตราส่วนของการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซสูงเกินไป ก๊าซอาจจะถูกของเหลวพาลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ดูดซึมทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำลง เนื่องจากสภาพการไหลแบบสวนทางกัน (countercurrent flows) ถูกรบกวนทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างก๊าซและของเหลวทำได้ไม่เต็มที่ [11]

### 3.3 ผลของแรงดันต่อการทำงานของระบบ

จากการทดสอบหาผลของแรงดันที่มีต่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจากในข้อ 3.2 พบว่าที่อัตราส่วน L/G ratio อยู่ในช่วง 0.8-1.0 เท่า เป็นช่วงที่มีร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด และเป็นช่วงที่มีร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนมากที่สุดด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงดันจาก 1.0 บาร์เกจ เป็น 1.5 บาร์เกจ ที่สภาวะ L/G ratio ดังกล่าว จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันของ

ระบบเป็น 1.5 บาร์เกจ ค่าร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพบว่า ที่ L/G ratio เป็น 0.89 เท่าแล้วร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 68.4 เป็นร้อยละ 75.5 ทำให้ปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80.1 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 84.2 โดยปริมาตร ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มแรงดันภายในถังดูดซึมนอกเหนือจากการเพิ่ม L/G ratio ของระบบ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันของถังดูดซึมและการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวที่เข้าสู่ระบบจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพจึงต้องมีการคำนึงถึงต้นทุนพลังงานเพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

สิ่งที่พบเหมือนกันในทั้ง 2 สภาวะความดัน คือ เมื่อเพิ่มค่า L/G ratio จนเกิน 0.89 เท่า พบว่าร้อยละของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบจะลดลงเล็กน้อย ซึ่งช่วยยืนยันผลการทดลองในข้อ 3.2 ที่พบว่าร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และร้อยละของการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนจะลดลงเล็กน้อยเมื่อ L/G ratio เกินกว่า 0.89 เท่า ซึ่งอาจมีสาเหตุได้ดังข้อสันนิษฐานที่แสดงไว้ในข้อ 3.2



รูปที่ 4 ร้อยละของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%CO<sub>2</sub> reduction) ที่แรงดันภายในถังดูดซึมเป็น 1.5 และ 1 บาร์เกจ

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเข้าและออกจากระบบ จะเห็นว่าโดยก๊าซมีเทนสูงสุดที่ระบบทำได้คือร้อยละ 84.2 โดยปริมาตรจากระบบที่ดูดซึมด้วยความดัน 1.5 บาร์เกจ และ L/G ratio เท่ากับ 0.89 เท่า ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเหลือร้อยละ 8.0 โดยปริมาตร และก๊าซ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก่อนเข้าและหลังเข้าสู่ระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซที่ความดัน 1.5 บาร์เกจ

L/G ratio	ความดัน ถึงจุดซึม Barg	ขาเข้า					ขาออก				
		CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	BAL*	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	BAL*
		%Vol	%Vol	%Vol	ppmv	% Vol	% Vol	% Vol	% Vol	ppmv	% Vol
0.78	1.5	63.4	31.9	0.3	4327	4.4	83.2	8.1	0.9	0	7.7
0.89	1.5	63.3	31.8	0.4	4370	4.5	84.2	8.0	0.9	0	6.8
1.06	1.5	63.3	31.9	0.3	4560	4.3	82.3	9.3	0.9	0	7.1

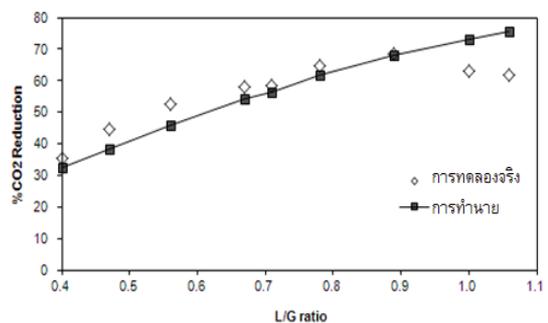
ppmv = ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร

\*BAL = ก๊าซอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพนอกเหนือจาก CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>S

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เหลือ 0 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร สำหรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี จึงถูกกำจัดออกไปได้ในกระบวนการเดียวกัน จะเห็นว่า ก๊าซชีวภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนต่อปริมาตรสูงขึ้นทำให้มีค่าความร้อนต่อปริมาตรสูงขึ้นด้วย ถ้านำไปเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์สันดาปภายในอื่นๆ จะมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการสันดาปของเครื่องยนต์ได้ นอกจากนี้การที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัดออกจากก๊าซชีวภาพจนเหลือปริมาณต่ำมากทำให้ลดปัญหาการกัดกร่อนเครื่องยนต์ได้ จากผลการทดลองจะเห็นว่าคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ผ่านระบบดูดซึมด้วยน้ำดีซีขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับร้อยละของก๊าซออกซิเจนในก๊าซชีวภาพพบว่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.3-0.4 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 0.9 โดยปริมาตร เนื่องจากก๊าซออกซิเจนมีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 37 เท่า ทำให้ก๊าซออกซิเจนไม่ได้ถูกกำจัดออกจากก๊าซชีวภาพในระบบดูดซึมนี้ ในขณะที่ ปริมาตรโดยรวมของก๊าซขาออกลดลง จึงพบว่าร้อยละของก๊าซออกซิเจนในก๊าซขาออกเพิ่มขึ้นจากเดิม สำหรับ ก๊าซอื่นๆที่เป็นส่วนประกอบในก๊าซชีวภาพ (%BAL) พบว่าจะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นจากประมาณร้อยละ 4.5 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 7.8 โดยปริมาตร ซึ่งมีเหตุผลที่คล้ายคลึงกัน เพราะก๊าซอื่นๆ ได้แก่ ไนโตรเจนและอาร์กอน ถูกดูดซึมด้วยน้ำได้น้อยเมื่อเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สัดส่วนของก๊าซดังกล่าวในก๊าซที่ออกจากถังดูดซึมจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

### 3.4 การทำนายผลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากการเปรียบเทียบร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับผลจากที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม ChemCad ver. 6.0 (Chemstations Inc., Houston) ซึ่งกำหนดให้ใช้การตั้งค่าเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซึมเป็นแบบ Sour Water ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบ semi-empirical ของข้อมูลจริงจากระบบดูดซึมด้วยน้ำในอุตสาหกรรม โดยกำหนดค่าอุณหภูมิการทำงานเป็น 30 °C สำหรับการทดสอบระบบที่ความดัน 2 บาร์เกจ พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบร้อยละของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

จะเห็นว่าแบบจำลองจะทำนายค่าร้อยละของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยเฉพาะในช่วง L/G ratio ระหว่าง 0.40-0.89 เท่า ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างเฉลี่ยเพียงร้อยละ 7.3 เมื่อเทียบกับ

ค่าจริง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่ม L/G ratio เป็น 1.00 เท่า และ 1.06 เท่า พบว่าร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบจริงลดลงและไม่เป็นไปตามทฤษฎี ทำให้มีความแตกต่างของค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองจริงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 22.0 เมื่อเทียบค่าจริง

สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นคาดว่ามีความมาจากการกำหนดพารามิเตอร์ที่ป้อน เข้าสู่แบบจำลอง เช่น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวกลางที่ไม่แม่นยำ นอกจากนี้ ในแบบจำลองยังกำหนดให้มีความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพคงที่และอุณหภูมิของการทดสอบคงที่ที่ 30 °C ในขณะที่ในการทดสอบจริงพบว่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพมีความแปรปรวนและอุณหภูมิของถังดูดซึมอาจมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้เล็กน้อยในระหว่างการทดลอง ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจัยหนึ่งที่เป็นไปได้ในสภาวะจริงคือไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำจะเพิ่มแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้การกระจายของน้ำบนผิวของตัวกลางทำได้ไม่ดี ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวต่ำลง [3] ดังนั้นในการออกแบบระบบจริง จำเป็นต้องคำนึงเผื่อค่าความปลอดภัยในการออกแบบเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

#### 4.สรุป

ในการศึกษานี้ได้สร้างระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพต้นแบบเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทน โดยพบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นมีเทนจากร้อยละ 63.3 โดยปริมาตรไปเป็นร้อยละ 84.2 โดยปริมาตร สามารถลดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากร้อยละ 31.8 โดยปริมาตร เหลือร้อยละ 8.0 โดยปริมาตร นอกจากนั้น ยังสามารถลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จาก 4,370 ส่วนในล้านส่วน ให้เหลือ 0 ส่วนในล้านส่วนได้ในกระบวนการเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพมีคุณภาพสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าระบบดูดซึมมีค่า L/G ratio ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 0.89 เท่า ทั้งการทดสอบระบบที่ 1 บาร์เกจ และ 1.5 บาร์เกจ โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถช่วยทำนายร้อยละของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบดูดซึมได้ทีละระดับหนึ่ง โดยมี

ความคลาดเคลื่อนของค่าร้อยละของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือร้อยละ 22.0 ของค่าจริง การออกแบบระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซึมด้วยน้ำอัดความดันจึงแนะนำให้มีการเผื่อค่าความปลอดภัยเพื่อให้ระบบทำงานได้ตามที่ต้องการ

#### กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของ “โครงการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ” ซึ่งดำเนินการโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภายใต้การสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ปี 2551

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Walsh, J., Ross, C., Smith, M., Harper, S., and Wilkins, A. 1988. Biogas Utilization Handbook. The Environmental, Health, and Safety Division, Georgia Tech Research Institute. Atlanta.
- [2] สำนักข่าวแห่งชาติ กรมประชาสัมพันธ์. 2551. รายงานพิเศษไปโอดีเซล: เรื่องของไปโอแก๊ส กรุงเทพฯ.
- [3] Electrigaz Technologies. 2008. Feasibility study - biogas upgrading and grid Injection in the Fraser Valley, BC Innovation Council, British Columbia, Canada.
- [4] Peterssen, A. and Wellinger, A. 2009. Biogas Upgrading Technologies - developments and innovations, IEA Bioenergy Task 37.
- [5] Rasi, S.E. 2009. Biogas Composition and Upgrading to Biomethane, University of Jyväskylä Jyväskylä, Finland.
- [6] Bari, S. 1996. Effect of carbon dioxide on the performance of biogas/diesel duel-fuel engine. Renewable Energy, 9(1-4): 1007-1010.
- [7] Van Haren, M. and Fleming, R. 2005. Electricity and heat production using biogas from the anaerobic digestion of livestock manure - literature review, University of Guelph, Ontario, Canada.

- [8] Nicolas, A. and Steve, B. 2009. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(1): 42-71.
- [9] de Hullu, J., Maassen, J., van Meel, P., Shazad, S., and Vaessen, J. 2008. Biogas upgrading, comparing different techniques, Eindhoven, Netherlands.
- [10] Dirkse, E.H.M. 2008. Biogas upgrading using the DMT TS-PWS® Technology, Joure, Netherlands.
- [11] Cooper, C. M., Christl, R. J., and Perry, L. C. 1941. Packed tower performance at high liquor rates. *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 37: 979-996.