



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

## การประยุกต์ใช้ฟองขนาดไมครอนเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

### Application of Microbubbles for Carbon dioxide Removal from Biogas

ทรงพล ศีกะชาติ<sup>1)</sup> เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล<sup>2)</sup> สมชาย แซ่อึ้ง<sup>1)</sup> และ ชยุต นันทดุสิต<sup>1)\*</sup>Songphon Suekkachat<sup>1)</sup> Kiattisak Wongsopanakul<sup>2)</sup> Somchai Saeung<sup>1)</sup> and Chayut Nuntadusit<sup>1)\*</sup><sup>1)</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110<sup>2)</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110<sup>1)</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,

Hatyai, Songkhla, 90110, Thailand

<sup>2)</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,

Hatyai, Songkhla, 90110, Thailand

Received: 10 พ.ย.61

Accepted: 21 ธ.ค.61

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพโดยวิธีการดูดซึมด้วยน้ำ (water scrubber) ในการทดลองใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมกับอากาศป้อนผ่านหัวฉีดสร้างฟองขนาดไมครอนแบบหมุนควง (swirl flow type) และให้ฟองแก๊สขนาดเล็กไหลผ่านน้ำในคอลัมน์เพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ในฟองแก๊สละลายในน้ำ โดยการทดลองจะศึกษาที่เงื่อนไขความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 30% 40% และ 50% กำหนดอัตราการป้อนแก๊สผ่านหัวฉีดที่ 0.1 ลิตร/นาที และเปลี่ยนอัตราการไหลน้ำที่ป้อนสู่หัวฉีดที่ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลน้ำมีผลให้ความเร็วน้ำในการตัดเฉือนฟองแก๊สเพิ่มสูงขึ้นทำให้ฟองแก๊สมีขนาดเล็กลง โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองแก๊สที่สร้างได้อยู่ในช่วง 50.44 - 116.04µm และความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากการผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 92.46% ในขณะที่อัตราการไหลน้ำมีผลต่อการล้างคาร์บอนไดออกไซด์เล็กน้อย

**คำสำคัญ :** ฟองอากาศขนาดไมครอน การทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ หัวสร้างฟองแก๊สระดับไมครอน การกำจัด CO<sub>2</sub>

**Abstract**

The objective of the research aims to study carbon dioxide removal from biogas with water absorbance in water scrubber. In this experiment, the mixture between carbon dioxide gas and air was supplied to swirl type microbubble generator and generated microbubble gas then floated to the water column to absorb carbon dioxide gas in water. The experiment conditions consisted of carbon dioxide concentration at 30%, 40% and 50%, the flow rate of mixture gas at 0.1 litre/minute. The flow rate of water supplied to the generator was varied at 10, 15, 20, 25, 30 and 35 litre/minute. The results show that the increasing of water flow rate will increase the swirl velocity in the generator and increase the shear force on gas flow for reducing the size of gas bubble. The average diameter of generated bubble are in range of 50.44-116.04  $\mu\text{m}$ . The carbon dioxide removal performance can reach to 92.46%. While the water flow rate has small effect on carbon dioxide removal.

**Keywords:** Microbubble Biogas purification Microbubble generator CO<sub>2</sub> removal

\*ติดต่อ: chayut.n@psu.ac.th, โทรศัพท์ 0-7428-7035, โทรสาร 0-7455-8830

**1. บทนำ**

แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงฟอสซิลได้แก่ น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหินได้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างหลากหลาย เช่น ของเสียหรือน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ภาคอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ภาคปศุสัตว์ ภาคชุมชนและสถานประกอบการต่างๆ แม้แต่ของเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือจากพืชพลังงานต่างๆ [1]

โดยทั่วไป แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทน 50-70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สอื่น [2] และมีแก๊สบางชนิดเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีฤทธิ์เป็นกรด จะเข้าไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะให้สึกหรอ และไอน้ำที่มากับแก๊สจะเข้าไปในเครื่องยนต์

ทำให้เครื่องยนต์ขัดข้อง ดังนั้นก่อนที่จะนำแก๊สชีวภาพไปใช้กับเครื่องยนต์ต้องมีการดักไอน้ำและแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์เสียก่อน แก๊สมีเทนเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีสัดส่วนของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่จะเป็นผลทำให้ค่าความร้อนรวมของแก๊สลดลง และส่งผลทำให้ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนไม่คงที่ ทำให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เปลวไฟไม่นิ่ง หรืออาจจะเกิดปัญหาไฟดับ โดยปกติแก๊สชีวภาพจะต้องมีแก๊สมีเทนอยู่มากกว่า 50% จึงสามารถนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงขับเคลื่อนเครื่องยนต์ หรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า [3] ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ หรือการลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพลง จะสามารถ

ลดปัญหาข้างต้นลงได้ และแก๊สชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว เรียกว่า ไบโอมีเทน

กระบวนการในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ โดยทั่วไปมี 4 วิธี ได้แก่ วิธีการดักจับด้วยน้ำ (Water Scrubber Technology) เป็นวิธีการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ ซึ่งได้แก๊สมีเทนที่มีความบริสุทธิ์สูงแต่ต้องใช้ปริมาณน้ำและความดันมาก วิธีการดูดซับโดยเปลี่ยนความดัน (Pressure Swing Adsorption) เพื่อควบคุมคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ วิธีนี้จะมีการสูญเสียแก๊สมีเทนน้อยมาก แต่ต้องใช้ความดันสูงและมีขั้นตอนที่ซับซ้อน วิธีการดูดซึมด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน (Amine Absorption Process) วิธีนี้จะมีระบบไม่ซับซ้อนและมีขนาดเล็ก แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนและมีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีสูง และวิธีการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation) มีอายุการใช้งานยาวนานและประหยัดพลังงาน แต่มีต้นทุนสูงและระบบที่ซับซ้อน [4]

จากปัญหาที่พบจากการล้างแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับด้วยน้ำ ระบบน้ำต้องใช้แรงดันที่สูงมาก จึงทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยและต้องเพิ่มต้นทุนไปกับการสร้างความแข็งแรงให้กับระบบ และแก๊สต้องใช้แรงดันในการอัดเข้าสู่ระบบส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน

ในงานวิจัยสนใจศึกษาระบบแบบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพแบบใหม่ โดยวิธีดูดซับด้วยน้ำเป็นลักษณะคอลัมน์น้ำทรงกระบอกสูงปล่อยแก๊สชีวภาพผ่านทางหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่ติดตั้งด้านล่างของคอลัมน์น้ำ เมื่อแก๊สผ่านน้ำคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกละลายไปกับน้ำเหลือเพียงแก๊สมีเทน แก๊สที่ลอยผ่านน้ำออกคอลัมน์จะถูก

วิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่นำมาประยุกต์ใช้กับการทดลองเป็นแบบการไหลวน โดยน้ำจะไหลเข้าหัวฉีดทรงกระบอกในแนวสัมผัสเพื่อสร้างการไหลวน ในขณะที่แก๊สจะไหลเข้าทางด้านท้ายของหัวฉีด และที่บริเวณปากทางออกของหัวฉีด การไหลวนของน้ำจะตัดเฉือนลำแก๊สให้เป็นฟองขนาดเล็ก ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของฟองแก๊สโดยการปรับอัตราการไหลของน้ำและแก๊ส ข้อดีของหัวฉีดประเภทนี้คือ มีโครงสร้างและการทำงานไม่ซับซ้อน และควบคุมการเกิดฟองได้ง่าย

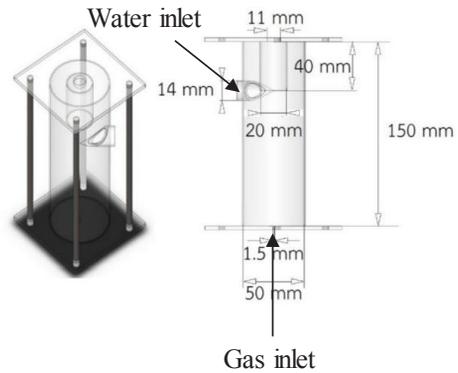
ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำที่มีต่อขนาดของฟองแก๊สเฉลี่ย และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำหรือขนาดฟองแก๊สต่างๆ โดยการจำลองอัตราส่วนของแก๊สชีวภาพด้วยการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ ศึกษาผลที่ได้จากความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกัน ทดสอบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการล้างแก๊สชีวภาพจริง ผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำผลการทดลองไปใช้ต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. การดำเนินงานวิจัย

### 2.1 รายละเอียดชุดทดลองและตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา ชุดทดลองประกอบด้วยคอลัมน์น้ำที่ทำจากท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm สูง 1 m เพื่อให้สามารถเห็นลักษณะการไหลของฟองในคอลัมน์น้ำได้ และหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กทำจากท่ออะคริลิกที่มีความหนา 3 mm ขนาดเส้น

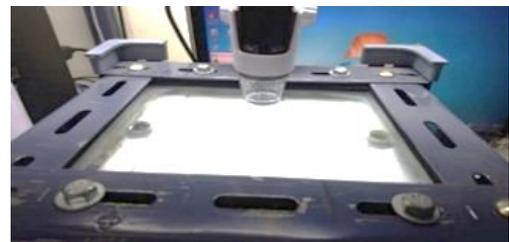
ผ่านศูนย์กลาง 50 mm ยาว 150 mm น้ำจะถูกส่งเข้าหัวฉีดมาทางท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 mm ที่ถูกติดตั้งในแนวสัมผัสของท่อทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนภายในหัวฉีด การหมุนวนของน้ำสร้างความดันต่ำบริเวณตรงกลางของการหมุนวนทำให้เกิดการดูดเข้ามาในหัวฉีดได้เองผ่านทางท่อด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ที่อยู่ด้านหลังของหัวฉีด ก่อนที่แก๊สจะไหลออกจากหัวฉีดทางแผ่นเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm แก๊สจะถูกการไหลวนของน้ำตัดน้อยเป็นฟองขนาดเล็กและไหลเข้าสู่คอลัมน์น้ำจากด้านล่าง ในหัวฉีดได้ติดตั้งท่อบังคับการไหลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ติดกับผนังด้านทางออกของหัวฉีด เพื่อเพิ่มความเร็วของการไหลวนของน้ำ น้ำที่ไหลเข้าหัวฉีดจะถูกส่งจากปั้มน้ำผ่านโรตารีเมเตอร์เพื่อวัดและควบคุมอัตราการไหล หลังจากนั้นน้ำจะไหลออกทางด้านข้างของคอลัมน์น้ำที่อยู่ด้านบนไหลกลับสู่ปั้มน้ำ แก๊สที่ไหลเข้าหัวฉีดจากถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไหลผ่านโรตารีเมเตอร์เพื่อวัดและควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ 2 รายละเอียดหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

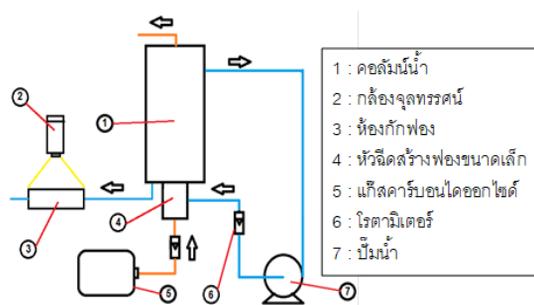
### 2.2 การวัดขนาดฟองแก๊สจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ในการวัดฟองแก๊สขนาดเล็กประกอบด้วย ห้องกักฟองที่ทำจากกระจกใส ขนาดกว้าง 120 mm ยาว 160 mm และสูง 2 mm ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล กำลังขยาย 1,000 เท่า ที่ด้านบนของห้องกักฟองสำหรับถ่ายภาพ



รูปที่ 3 ภาพถ่ายอุปกรณ์ในการวัดฟองแก๊สขนาดเล็ก

น้ำในคอลัมน์น้ำจะถูกดูดผ่านทางวาล์วด้านล่างของคอลัมน์น้ำดังแสดงในรูปที่ 1 ไหลเข้าห้องกักฟอง เมื่อน้ำไหลผ่านห้องกักฟองจนเต็ม วาล์วตรงทางออกของห้องกักฟองจะถูกปิด เพื่อบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล แล้วนำภาพไปหาขนาดฟองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพต่อไป ในแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลอง

การทดลองจะใช้การเก็บตัวอย่างภาพ 20 ภาพ ทุกๆ 5 นาที ขนาดของแต่ละฟองในแต่ละภาพจะถูกนำมาเฉลี่ย ในการทดลองกำหนดอัตราการไหลน้ำ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที และอัตราการไหลแก๊สของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 ลิตร/นาที เพื่อเปรียบเทียบขนาดของฟองแก๊สที่ทุกอัตราการไหลของน้ำ

### 2.3 การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

แก๊สที่ใช้ในการทดลองเป็นแก๊สที่ได้จากการผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศเพื่อจำลองแก๊สชีวภาพจริงโดยอัตราส่วนกำหนดที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 30%, 40% และ 50% รูปที่ 4 แสดงชุดทดลองศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก แก๊สและอากาศจะถูกผสมที่ห้องผสมที่ทำจากท่อและฝา PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 300 mm อัตราการไหลของแก๊สและอากาศจะวัดและควบคุมด้วยโรตารีเตอร์ เพื่อกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลอง หลังจากผ่านห้องผสม แก๊สผสมจะถูกกำหนดอัตราการไหลที่ 0.1 ลิตร/นาที และทดลองที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที และระหว่างการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าหัวฉีดที่ 25°C เพื่อลดอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยได้เพิ่มชุดทำความเย็นและชุดทำความร้อนในชุดทดลอง แก๊สที่บริเวณที่ออกชุดทดลองจะถูกเก็บไว้ในถุงเก็บแก๊สแล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สชีวภาพ (Biogas analyzer) รุ่น Biogas check Geotech ใช้หลักการ

ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในการวิเคราะห์แก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 4

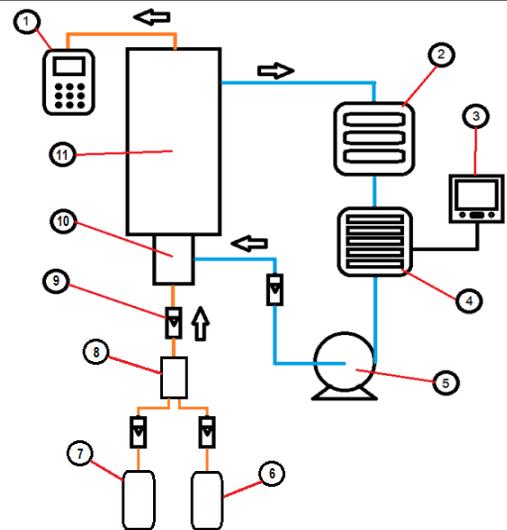
สำหรับการหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$CO_2 \text{ removal } (\%) = \frac{(C_r - C_p)}{C_r} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่  $C_r$  คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางเข้าหัวฉีด

$C_p$  คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากคอลัมน์น้ำ

- 1 : เครื่องวัดแก๊สชีวภาพ, 2 : ชุดลดความเย็น
- 3 : ชุดควบคุมอุณหภูมิ, 4 : ฮีตเตอร์, 5 : บั๊มน้ำ,
- 6 : อากาศ, 7 : แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์,
- 8 : ห้องกักฟอง, 9 : โรตารีเตอร์,
- 10 : หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก, 11 : คอลัมน์น้ำ



รูปที่ 4 ชุดทดลองศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

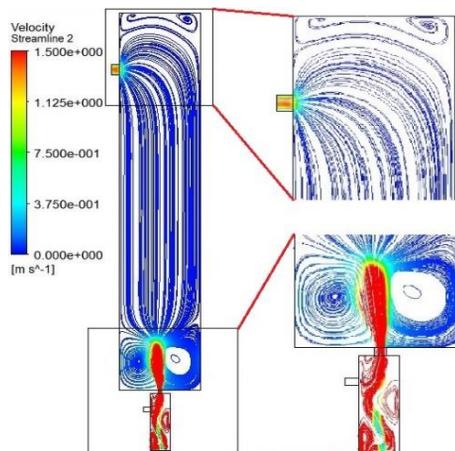
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดลอง

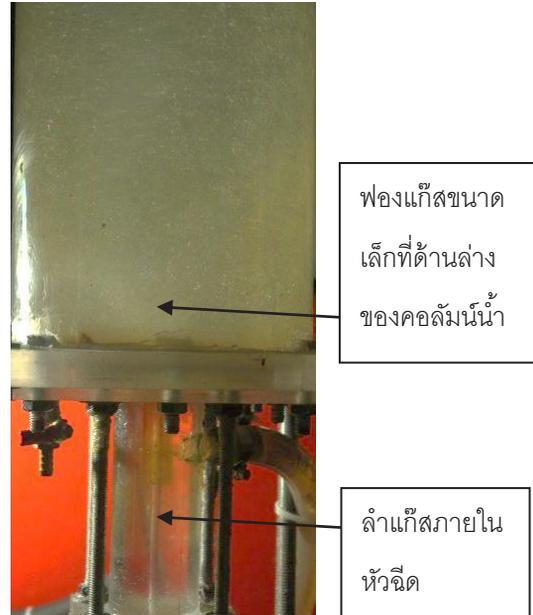
รูปที่ 5 แสดงความเร็วและเส้นทางการไหลของน้ำในหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กและคอลลิมน์น้ำที่ได้มาจากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS Ver.15 (Fluent) โดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST k- $\omega$  ที่เงื่อนไขอัตราการไหล 35 ลิตรต่อวินาที

จากรูปพบการไหลหมุนวนของน้ำภายในหัวฉีด มีลักษณะเป็นเกลียวไม่สมมาตร บริเวณปากทางออกของหัวฉีดสามารถสังเกตเห็นลำน้ำที่มีความเร็วสูง และการไหลวนรอบลำเจ็ทที่บริเวณด้านล่างของคอลลิมน์น้ำ ซึ่งเกิดการหมุนควงของลำเจ็ท แต่เหนือจากบริเวณด้านล่างของคอลลิมน์ น้ำจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของคอลลิมน์และไหลออกจากคอลลิมน์ที่ตำแหน่งทางออก

รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายของลำอากาศภายในหัวฉีดและภาพการเกิดฟองขนาดเล็กที่ทางออกของหัวฉีดที่บริเวณด้านล่างของคอลลิมน์น้ำ



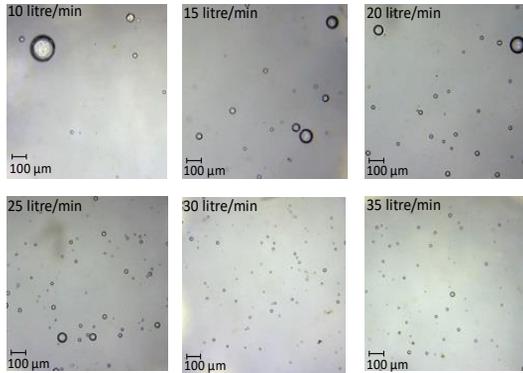
รูปที่ 5 แสดงเส้นทางการไหลและความเร็วของน้ำในหัวฉีดและคอลลิมน์น้ำที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 35 ลิตรต่อวินาที



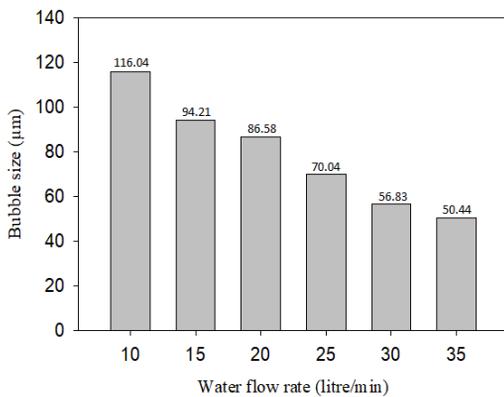
รูปที่ 6 ภาพถ่ายของลำอากาศภายในหัวฉีดและฟองอากาศขนาดเล็กที่ด้านล่างของคอลลิมน์น้ำ

#### 3.2 ขนาดฟองแก๊สจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายฟองแก๊สโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำต่างๆ จากภาพถ่ายในแต่ละอัตราการไหลพบว่าสามารถผลิตฟองที่มีขนาดเล็กออกมาได้ ในภาพฟองมีลักษณะกลมมีขนาดของฟองแก๊สและปริมาณฟองแก๊สที่แตกต่างกัน ซึ่งที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ 10 และ 15 ลิตร/วินาที แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดเข้ามาจะไม่คงที่ ทำให้มีขนาดฟองที่ใหญ่และปริมาณฟองน้อย สำหรับอัตราการไหลน้ำ 20 ลิตร/วินาที ขึ้นไปขนาดฟองแก๊สจะเริ่มเล็กลงและมีปริมาณมากขึ้น ที่อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/วินาที จะมีขนาดฟองแก๊สเล็กที่สุดและมีปริมาณฟองมากที่สุด โดยภาพถ่ายขนาดฟองที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราการไหลน้ำแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพถ่ายฟองแก๊สโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลที่เงื่อนไขอัตราการไหลแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที ที่อัตราการไหลน้ำต่างๆ



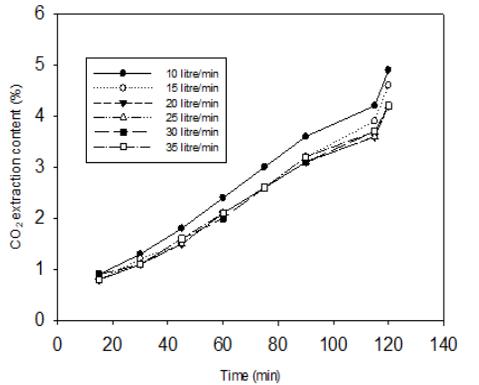
รูปที่ 8 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำต่างๆ

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำต่างๆ จากการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพโดยเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊สที่บันทึกได้ทั้งหมดในแต่ละเงื่อนไขพบว่า เมื่ออัตราการไหลน้ำเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยฟองแก๊สจะเล็กลง โดยที่อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตร/นาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองเฉลี่ยที่ 116.04 µm แต่สังเกตได้ว่า เมื่ออัตราการไหลน้ำสูงขึ้น ความแตกต่างของ

ขนาดฟองแก๊สจะเริ่มลดลง โดยขนาดของฟองแก๊สเฉลี่ยที่อัตราการไหลน้ำ 30 และ 35 ลิตร/นาที มีความแตกต่างเพียง 6.39 µm เท่านั้น การลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊สมีผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างผิวฟองแก๊สและน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพิ่มสูงขึ้น

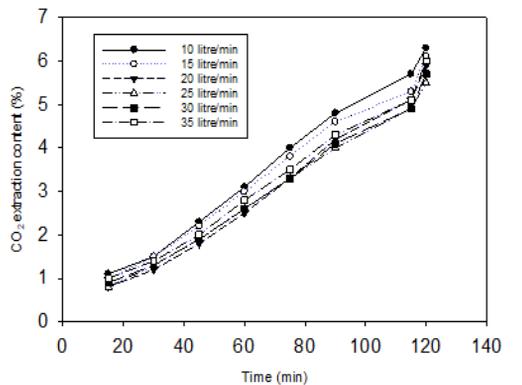
### 3.3 การทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำ โดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออก เมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 30% จะเห็นว่าในทุกอัตราการไหลของน้ำ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้างจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะเพิ่มขึ้นเวลาเนื่องจากการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในเวลา 15 นาทีแรกหลังการทดลองมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทางออกสูงสุด 0.9% โดยอัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตร/นาที จะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกมามากที่สุด ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง 4.9% มีความแตกต่างกับที่เงื่อนไขอัตราการไหล 15 ลิตร/นาที เพียง 0.3%

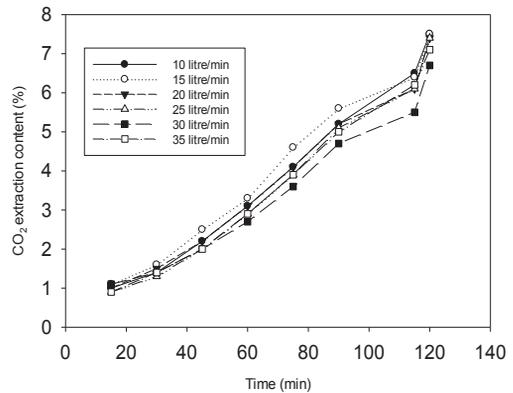


รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกที่ความเข้มข้น 30%

รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออก เมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 40% พบว่า อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตร/นาที ยังคงมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงสุด 6.3% ที่เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่นๆ จะเห็นว่าความแตกต่างของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ

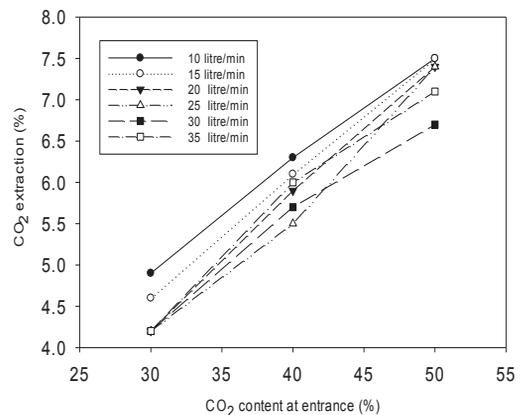


รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกที่ความเข้มข้น 40%



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกที่ความเข้มข้น 50%

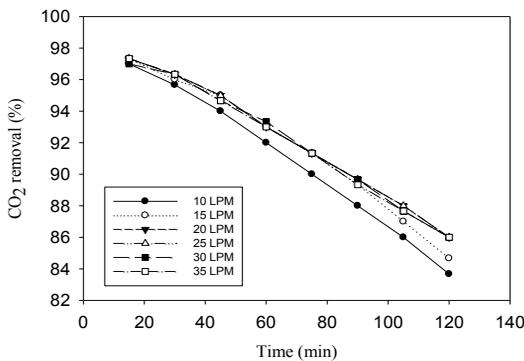
กรณีกำหนดค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 50% ที่ทางเข้าหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าที่เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกในแต่ละอัตราการไหลนั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของน้ำที่ 15 ลิตร/นาที



รูปที่ 12 แสดงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกที่เวลา 2 ชั่วโมงตามความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางเข้าหัวฉีดที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำต่างๆ

จากการทดลองทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า เมื่อกำหนดค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางเข้าหัวฉีดสูงขึ้น ปริมาณแก๊สที่ทางออกจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและทำให้ความแตกต่างในแต่ละอัตราการไหลลดลง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 12

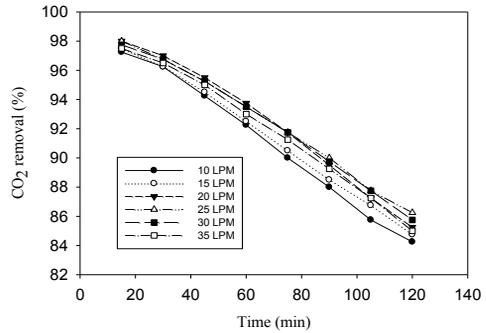
รูปที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 30% พบว่าแนวโน้มของความสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราการไหลของน้ำไม่มีความแตกต่างกันมาก โดยที่อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตร/นาที มีความสามารถในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยคือ 91.77%



**รูปที่ 13** การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 30%

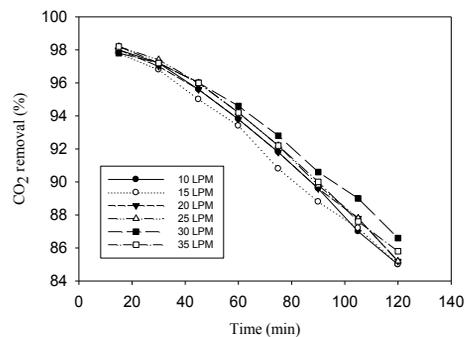
ความสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40% ดังแสดงในรูปที่ 14 จะเห็นว่าอัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตร/นาที ยังคงมีประสิทธิผลต่ำสุด 85% ที่เวลา 2 ชั่วโมงหลังเริ่มการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 91.87% จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 20-35 ลิตร/นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกันน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 13



**รูปที่ 14** การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 40%

รูปที่ 15 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 50% จะเห็นว่าผลการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับรูปที่ 10 และ 11 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.46%



**รูปที่ 15** การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 50%

จากค่าความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองจะทำให้ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong Xiao [6] โดยประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 98% ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 50% โดยใช้พลังงานของบี้มเพียงอย่างเดียวเนื่องจากตัวหัวฉีดสามารถดูดแก๊สเข้าสู่ระบบได้เองและความแตกต่างของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราการไหลน้ำลดลง แต่เนื่องจากอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองเพียง 0.1 ลิตร/นาที ทำให้เห็นความแตกต่างไม่มากนัก ระยะเวลาในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากสภาพน้ำที่มีความเป็นกรดมากขึ้นจากการทำละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4. สรุปผลการทดลอง

อัตราการไหลของน้ำมีผลต่อการเกิดขนาดและปริมาณฟองแก๊ส ซึ่งอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับขนาดฟองที่เล็กลงและปริมาณฟองที่มากขึ้น โดยขนาดฟองที่เล็กที่สุด 50.44  $\mu\text{m}$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ 98.2% ที่เวลา 15 นาที หลังการทดลอง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัยและเชื้อเพื่อสถานที่ทำวิจัยในครั้งนี้ และศูนย์ปฏิบัติงานวิจัยแก๊สชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดแก๊สชีวภาพ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้แก๊สชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม; 2553.
- [2] ปภัส ชนะโรค. การพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพสำหรับใช้ในยานพาหนะ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2554.
- [3] การประหยัดพลังงานในอุปกรณ์ที่ใช้งานแก๊สชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 20 ธันวาคม 2560]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.asewexpo.com/Portals/seminar/Presentation/6%20JuneEnergy%20Saving-Biogas%20Surachai>.
- [4] Angelidaki I, et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. Science Direct. 2018; 36(2): 452-466.
- [5] Rongwong W, et al. Simultaneous absorption of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S from biogas by capillary membrane contactor. Science Direct. 2012; 392-393(1): 38-47.
- [6] Xiao Y, et al. CO<sub>2</sub> removal from biogas by water washing system. ScienceDirect. 2004; 22(8): 950-953.