



การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพด้วยฟองแก๊สระดับไมครอน
Study of Carbon Dioxide Removal from Biogas with Microbubble

ทรงพล ศีกะชาติ
Songphon Suekkachat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพด้วยฟองแก๊สระดับ
ไมครอน
ผู้เขียน นายทรงพล ศีกะชาติ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....กรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างุ้งสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายทรงพล ศีกษชาติ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายทรงพล ศีกะชาติ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพด้วยฟองแก๊สระดับไมครอน
ผู้เขียน	นายทรงพล ศีกะชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพด้วยการนำหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้กับวิธีการล้างแบบดูดซึมด้วยน้ำ ซึ่งหัวฉีดสร้างฟองขนาดไมครอนจะใช้หลักการหมุนวนและตัดเฉือนแก๊สชีวภาพของน้ำเพื่อทำให้เกิดฟองขนาดเล็กลอยผ่านน้ำในคอลัมน์เพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำและแก๊สชีวภาพบริสุทธิ์ลอยขึ้น ในการศึกษาใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปผสมอากาศจำลองเป็นแก๊สชีวภาพและกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที่ และ อัตราการไหลของน้ำที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที่ ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาพฤติกรรมการไหลในคอลัมน์ ส่วนที่ 2 ศึกษาขนาดฟองแก๊ส ส่วนที่ 3 ศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ส่วนที่ 4 ทดสอบล้างแก๊สชีวภาพโดยในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำในคอลัมน์ โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) และศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก โดยการถ่ายภาพฟองด้วยกล้องจุลทรรศน์ และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ ศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก เป็นการกำหนดค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้างที่ 30%, 40% และ 50% ในกรณีอัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ แก๊สที่ลอยออกจะถูกวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนสุดท้ายเป็นทดสอบล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก ด้วยการนำแก๊สชีวภาพจริงจากโรงงานมาล้าง เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทน และหาพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณแก๊สที่ล้างได้

จากผลการศึกษาพบว่า ผลการจำลองการไหลของน้ำในชุดทดลองเมื่อน้ำผ่านท่อทางเข้ามาในหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก จะเกิดการหมุนควงภายในหัวฉีดด้วยความเร็วสูงแล้วออกไปสู่คอลัมน์น้ำตรงปากทางออกด้วยความเร็วสูงสุดในลักษณะการพุ่งออกในแนวตั้งและกระจายตัวออกด้านข้าง แล้วเกิดการหมุนวนบริเวณส่วนล่างของคอลัมน์น้ำ โดยเมื่อเพิ่มความเร็วทางเข้าจะทำให้พื้นที่หมุนวนในบริเวณดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น อัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อการสร้างฟองให้มี

ขนาดเล็กลง โดยที่อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/นาที่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยฟองที่เล็กที่สุด 50 μm ในการทำลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ อัตราการไหลของน้ำและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้าที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้น ซึ่งในอัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 89.2% ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 50% การศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก อัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้นมีผลให้ความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนสูงขึ้น เนื่องจากขนาดฟองที่เล็กลง โดยที่อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่อัตราการไหลน้ำ 20 ลิตร/นาที่ เหมาะสำหรับการใช้งานมากที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานน้อยและมีประสิทธิภาพการล้างแก๊สไม่ต่างกับอัตราการไหลอื่นมาก

Thesis Title	Study of Carbon Dioxide Removal from Biogas with Microbubble
Author	Mr. Songphon Suekkachat
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2018

ABSTRACT

The objective of this research is to apply microbubble generator for biogas purification with water scrubber technique. The microbubble generator was generated the bubble by swirl flow and shear biogas with water to generate small bubble that float to the top of column. CO₂ will be dissolved in the water and purified gas can get thought to the top. This study simulated biogas by mixing CO₂ and air. The experimental conditions are 0.1 litre/min of gas flow rate, 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 litre/min of gas flow rate. The experiment can be divided 4 parts. First part is study about water flow in the column. Second part is study about the size of gas bubble. Third part is study about dissolving of CO₂ in the water. The last one is study about dissolving of biogas in the water. Flow characteristics was simulated with ANSYS Ver.15.0 (Fluent). The bubble size measurement was captured with microscope camera and the diameter of bubble was measured with image processing. The dissolved of CO₂ concentration before cleaning was varied at 30%, 40% and 50% for all water flow rate. Gas was measured with biogas check with infuriate sensor for methane (CH₄ 0-100%) and carbon dioxide (CO₂ 0-100%). The value will be calculated for CO₂ removal and CH₄ enrichment. The biogas upgrading with microbubble generator. Gas for the experiment was collected form the biogas factory to find the CO₂ removal, CH₄ enrichment and energy consumption.

For the result, the simulation shows swirl flow in the nuzzle from high water-flow rate at the inlet to nuzzle outlet with the highest velocity. The water flow pattern at the outlet is stream jet which separate to the side of column. The swirl flow area will increase from water flow rate. The high-water flow rate effect to the diameter of bubble size. The 35 liter/min water flow rate can generate the smallest bubble size

with 50.44 μm . For the CO_2 dissolving, the high-water flow rate and CO_2 concentration before cleaning effect to high CO_2 removal that 35 litre/min water flow rate can generate 89.2% for CO_2 removal at 50% CO_2 concentration and 15 min after experiment. The biogas upgrading, the high-water flow rate effect to biogas purification case from smaller bubble size which the 35 litre/min water flow rate is the best value for methane purifying. The CO_2 removal is not significant to water flow rate. The 20 litre/min water flow rate is the best for the application because of lowest energy consumption and good efficiency.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต ที่เสนอแนวทางการทำวิจัยและเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.ฐานันท์ศักดิ์ เทพญา ดร.สมชาย แซ่อึ้ง และ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตเรืองศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิจัยแก้สชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวัดแก๊สชีวภาพ และขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ทรงพล ศึกชะชาติ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ	4
2.1.1 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ	4
2.1.2 ความเร็วเปลวไฟ (Flame velocity)	5
2.1.3 อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature)	5
2.2 เทคโนโลยีระบบผลิตแก๊สชีวภาพในประเทศไทย	7
2.3 ศักยภาพการผลิตและการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทน	7
2.4 วิธีการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ	8
2.5 ฟองระดับไมครอน (Microbubble)	16
2.5.1 คุณสมบัติของฟองระดับไมครอน	16
2.5.2 การนำฟองระดับไมครอนไปใช้งาน	16
2.6 หลักการสร้างฟองแก๊สระดับไมครอน	17
2.7 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	18
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	18
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ	23
2.8 ช่องว่างการวิจัย	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการศึกษาการวิจัย	31
3.1 การจำลองการไหลในคอลัมน์น้ำ	31
3.1.1 โมเดลที่ใช้ในการจำลอง	31
3.1.2 ขั้นตอนการจำลองการไหล	32
3.2 รายละเอียดชุดทดลอง	34
3.2.1 ชุดทดลองการกำจัดแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ	34
3.2.2 หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	36
3.3 การศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	37
3.3.1 ชุดทดลองวัดฟองขนาดเล็ก	37
3.3.2 วิธีการทดลองการวัดฟองขนาดเล็ก	39
3.4 การศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	39
3.4.1 ชุดทดลองการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ	39
3.4.2 วิธีการทดลองการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ	40
3.5 การศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	42
3.5.1 ชุดทดลองการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ	42
3.5.2 วิธีการทดลองการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ	42
บทที่ 4 ผลการศึกษา	43
4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดลองด้วยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	43
4.2 ผลการศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	47
4.3 ผลการศึกษการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	49
4.4 ผลการศึกษการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	65
4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ	65
4.4.2 ผลงานสุทธิที่ใช้ในการล้างแก๊สชีวภาพ	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	69
5.1 สรุปผลการวิจัย	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก ก. ผลการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีด สร้างฟองขนาดเล็ก	73
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าสมรรถนะในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ของหัวฉีด สร้างฟองขนาดเล็ก	77
ภาคผนวก ค. ผลการศึกษาการการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟอง ขนาดเล็ก	81
ภาคผนวก ง. บทความสำหรับเผยแพร่ 1	83
ภาคผนวก จ. บทความสำหรับเผยแพร่ 2	92
ประวัติผู้เขียน	101

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและความเข้มข้นต่าง ๆ ของแก๊สชีวภาพ	4
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียในไอเสียกับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ	6
ตารางที่ 2.3 คุณภาพพลังงานของประเทศไทย ปี 2556-2559	8
ตารางที่ 2.4 เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพและข้อดีข้อเสียในแต่ละเทคนิค	14
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละวิธีของการทำปฏิกิริยาแก๊สชีวภาพ Kadam	25
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบความพร้อมทางด้านเทคนิคและค่าบำรุงรักษาในแต่ละวิธีของการทำปฏิกิริยาแก๊สชีวภาพ Kadam	26
ตารางที่ 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ	29
ตารางที่ 2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	30
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการกำหนด Spatial discretization	34
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการศึกษาการสร้างฟองขนาดเล็ก	38
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	39
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขในการศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	42
ตารางที่ 4.1 พลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อการผลิตแก๊ส 0.006 m ³ /h	63

รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ผลของ CO ₂ ที่มีต่อความเร็วเปลวไฟของการเผาไหม้มีเทนกับอากาศที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 25°C	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของมีเทนและความชื้น	6
รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Water scrubber ชนิดนำน้ำกลับมาใช้ใหม่	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์กับอุณหภูมิ	10
รูปที่ 2.5 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Pressure swing adsorption	11
รูปที่ 2.6 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Chemical absorption	12
รูปที่ 2.7 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Membrane separation	13
รูปที่ 2.8 หัวฉีดสร้างฟองแบบใช้วัตถุทรงกลมตันในท่อการไหล	18
รูปที่ 2.9 หัวฉีด microbubble ชนิดใช้ของเหลวหมุนวน	18
รูปที่ 2.10 หัวฉีดสร้างฟอง Venturi type	19
รูปที่ 2.11 หัวฉีดสร้างฟอง Ejector type	19
รูปที่ 2.12 หัวฉีดสร้างฟองแบบ Multi fluid mixture device Kawahara	20
รูปที่ 2.13 ระบบผลิต microbubble โดยใช้ความดันทำละลาย	20
รูปที่ 2.14 การสร้าง microbubble โดยใช้ microchannel	21
รูปที่ 2.15 การสร้างฟองโดยใช้แรงเฉือนในท่อและ slit	21
รูปที่ 2.16 ระบบการสร้าง microbubble การหมุนแผ่นรูพรุน	22
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของหัวฉีดสร้างฟอง Venturi tybe คณะ	22
รูปที่ 2.18 ระบบการล้างแก๊สที่ใช้ในการศึกษา	23
รูปที่ 2.19 ระบบทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพด้วยความดันสูง	24
รูปที่ 2.20 ระบบการทดลองของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้ sodium hydroxide	25
รูปที่ 2.21 ระบบ photo bioreactor ที่ใช้ในการทดลอง	27
รูปที่ 2.22 ระบบการดูดซึมที่ใช้ในการทดลอง	27
รูปที่ 2.23 ระบบการไหลสวนของ membrane reactor	28
รูปที่ 3.1 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล	31
รูปที่ 3.2 รายละเอียดของการสร้างกริดในแบบจำลอง	32

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 เรือนไขขอบเขตการไหลในการคำนวณ	33
รูปที่ 3.4 ชุดทดลองที่ใช้การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ	35
รูปที่ 3.5 ลักษณะของหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก	36
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับการศึกษายภาพัดฟองขนาดเล็ก	38
รูปที่ 3.7 ชุดทดลองศึกษาภาพถ่ายฟองขนาดเล็ก	38
รูปที่ 3.8 ชุดทดลองการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีด	40
รูปที่ 4.1 ผลความเร็วของการไหลของน้ำในชุดทดลองที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.2 ผลความเร็วของการไหลน้ำในส่วนล่างชุดทดลองที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ	45
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสแกน x ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนแกน z	46
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันของความเร็วในแนวแกน x บนแกน z กับ อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน	47
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายฟองขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล ที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองในแต่ละอัตราการไหลน้ำ	48
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลง %CO ₂ ที่ทางออกในกรณีความเข้มข้น CO ₂ ทางเข้า 30%	49
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลง %CO ₂ ที่ทางออกในกรณีความเข้มข้น CO ₂ ทางเข้า 40%	50
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลง %CO ₂ ที่ทางออกในกรณีความเข้มข้น CO ₂ ทางเข้า 50%	50
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลง %CO ₂ ที่ทางออกในกรณีอัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ	51
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลง %CO ₂ ทางออกและทางเข้าในกรณีอัตราการไหลต่าง ๆ ของน้ำที่เวลา 2 ชั่วโมง	53
รูปที่ 4.12 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 30%	54
รูปที่ 4.13 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 40%	55
รูปที่ 4.14 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 50%	55
รูปที่ 4.15 ความสามารถการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50% ในเวลา 12 ชั่วโมง	56
รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 30%	57
รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 40%	57
รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 50%	58
รูปที่ 4.19 ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 30%	59
รูปที่ 4.20 ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 40%	59
รูปที่ 4.21 ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์กรณี %CO ₂ ทางเข้า 50%	60

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO ₂ ทางเข้า 30%	61
รูปที่ 4.23 อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO ₂ ทางเข้า 40%	61
รูปที่ 4.24 อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO ₂ ทางเข้า 50%	62
รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกรณีที่มี %CO ₂ ทางเข้า 30%	63
รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกรณีที่มี %CO ₂ ทางเข้า 40%	63
รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกรณีที่มี %CO ₂ ทางเข้า 50%	64
รูปที่ 4.28 ความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนจากแก๊สชีวภาพ	65
รูปที่ 4.29 ความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนต่ออัตราการไหลของน้ำ	66
รูปที่ 4.30 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ	67

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	คือ	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงในน้ำ (mg CO ₂ /hr)
C_r	คือ	ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้าง (%)
C_p	คือ	ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้าง (%)
C_s	คือ	ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำตามเวลา (mg/litre)
C_t	คือ	ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 °C (mg/litre)
$C_{r(CH_4)}$	คือ	ความเข้มข้นมีเทนก่อนการล้าง (%)
$C_{p(CH_4)}$	คือ	ความเข้มข้นมีเทนหลังการล้าง (%)
E	คือ	ประสิทธิภาพในการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ transfer efficiency)
h	คือ	ความลึกจากผิวน้ำถึงหัวฉีดสร้างฟอง (m)
K_La	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ transfer coefficient)
P	คือ	ความดันบรรยากาศที่เติมแก๊ส (mmHg)
P_{in}	คือ	กำลังงานที่ใช้ในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ (kW)
p	คือ	ความดันไอในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C
Q_w	คือ	อัตราการไหลของน้ำ (litre/min)
R_0	คือ	อัตราการถ่ายเทแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg CO ₂ /kW-hr)
t	คือ	เวลา (s)
V	คือ	ปริมาตรน้ำ (litre)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

แก๊สชีวภาพ เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ชนิดหนึ่งที่สามารถดำเนินการผลิตและใช้เป็นพลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน) หรือจัดเป็นพลังงานทางเลือก (Alternative Energy) ที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ[1] เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างหลากหลาย เช่น ของเสียหรือน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ภาคปศุสัตว์ ภาคชุมชนและสถานประกอบการต่าง ๆ แม้แต่ของเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือจากพืชพลังงานต่าง ๆ โดยปกติแก๊สชีวภาพจะต้องมีแก๊สมีเทนอยู่มากกว่า 60 % จึงสามารถนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับขับเคลื่อนปั้มน้ำ เครื่องยนต์ หรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า [2]

แก๊สชีวภาพเป็นกลุ่มแก๊สที่ประกอบไปด้วยแก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์และอื่น ๆ แก๊สแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันบางชนิดจะเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อผสมกับน้ำมีฤทธิ์เป็นกรดกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะให้สึกหรอ และไอน้ำที่มากับแก๊สจะเข้าไปในเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์ขัดข้อง ดังนั้นก่อนที่จะนำแก๊สชีวภาพไปใช้กับเครื่องยนต์ต้องมีการดักไอน้ำและแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์เสียก่อน แก๊สมีเทนเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีสัดส่วนของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่จะเป็นผลทำให้ค่าความร้อนรวมของแก๊สลดลง ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นส่วนผสมในแก๊สชีวภาพนั้น นอกจากจะมีผลทำให้ค่าความร้อนรวมของแก๊สลดลงแล้วยังส่งผลทำให้ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนไม่คงที่ ทำให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เปลวไฟไม่นิ่ง หรืออาจจะเกิดปัญหาไฟดับและเกิดปัญหาการระเบิดเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลง อีกทั้งยังมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในท่อส่งแก๊สอีกด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ หรือการลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพลง จะสามารถลดปัญหาข้างต้นลงได้ และแก๊สชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว เรียกว่า ไบโอมิเทน กระบวนการในการแยกและดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สชีวภาพ หรือกระแสแก๊สต่าง ๆ โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการแยก ซึ่งแต่ละเทคนิคมีศักยภาพที่จะสามารถนำมาพัฒนาให้สามารถปรับปรุงแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมิเทนได้ เทคนิคที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนในแก๊สโดยทั่วไป มี 4 วิธี ได้แก่ การดักจับด้วยน้ำ (Water Scrubber Technology) การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (Pressure Swing

Adsorption) การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน (Amine Absorption Process) และการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation)

ในงานวิจัยจะใช้ระบบแบบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ โดยวิธีดูดซับด้วยน้ำ (Water scrubber) เป็นลักษณะคอลัมน์น้ำทรงกระบอกสูง ปล่อยแก๊สชีวภาพผ่านทางหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่ติดตั้งด้านล่างของคอลัมน์น้ำ เมื่อแก๊สผ่านน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกละลายไปกับน้ำเหลือเพียงแก๊สมีเทน แก๊สที่ลอยผ่านน้ำออกคอลัมน์จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่นำมาประยุกต์ใช้กับการทดลองเป็นแบบหมุนวน (Swirl flow) ซึ่งติดตั้งท่อบังคับการไหลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างฟอง โดยฟองที่สร้างเกิดจากการตัดเฉือนแก๊สด้วยการไหลของน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊สระดับไมครอน โดยฟองแก๊สระดับไมครอนจะมีคุณสมบัติในการทำละลายกับน้ำได้ดี เนื่องจากฟองขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสของผิวแก๊สกับน้ำที่สูงมาก จึงเป็นสมมติฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำด้วยฟองระดับไมครอน ซึ่งสามารถควบคุมขนาดและปริมาณของฟองได้ด้วยการกำหนดอัตราการไหลของน้ำและแก๊ส ข้อดีของหัวฉีดประเภทนี้ คือ การทำงานไม่ซับซ้อน ควบคุมการเกิดฟองได้ง่าย สร้างปริมาณฟองได้มาก และสามารถนำไปใช้กับการล้างแก๊สได้เป็นอย่างดี จากปัญหาที่พบจากการล้างแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับด้วยน้ำ ระบบน้ำต้องใช้แรงดันที่สูงมากจึงทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยและต้องเพิ่มต้นทุนไปกับการสร้างความแข็งแรงให้กับระบบ แก๊สต้องใช้แรงดันในการอัดเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน ในการทดลองจะวัดขนาดฟองในแต่ละช่วงของอัตราการไหลน้ำหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการจำลองอัตราส่วนของแก๊สชีวภาพด้วยการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ ศึกษาผลที่ได้จากความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกัน ทดสอบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการล้างแก๊สชีวภาพจริงผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทน และพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณแก๊สที่ล้างได้ เพื่อนำผลการทดลองไปใช้ต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาการใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กระดับไมครอนเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพในคอลัมน์น้ำ
- (2) ศึกษาประสิทธิภาพในการล้างแก๊สชีวภาพโดยผ่านหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำและแก๊สชีวภาพต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) ใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก โดยใช้หลักการสร้างฟองด้วยการไหลหมุนวนของน้ำตัดเฉือนฟองแก๊ส
- (2) ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้วิธีการดูดซึมด้วยน้ำ
- (3) ศึกษาปรากฏการณ์ไหลที่เกิดขึ้นในคอลัมน์น้ำโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS (Fluent) Ver.15
- (4) ศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล
- (5) ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กโดยการจำลองแก๊สชีวภาพด้วยการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ
- (6) ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และทำบริสุทธิ์มีเทนจากแก๊สชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพให้มีความเข้มข้นของมีเทนสูง 60% ขึ้นไป
- (2) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพจากวิธีการดูดซึมด้วยน้ำที่ใช้ในปัจจุบัน
- (3) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในโรงงานที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียรวมถึงผู้ผลิตแก๊สชีวภาพจากแหล่งต่าง ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

แก๊สชีวภาพมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติไม่ทำให้ติดไฟ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของแก๊สชีวภาพลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่จะนำไปใช้งาน ในบทนี้จะกล่าวถึง คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับแก๊สชีวภาพ ฟองระดับไมครอน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ

2.1.1 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ ประกอบไปด้วยแก๊สมีเทน 50-70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สอื่น ๆ [3] ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและความเข้มข้นต่าง ๆ ของแก๊สชีวภาพ [4]

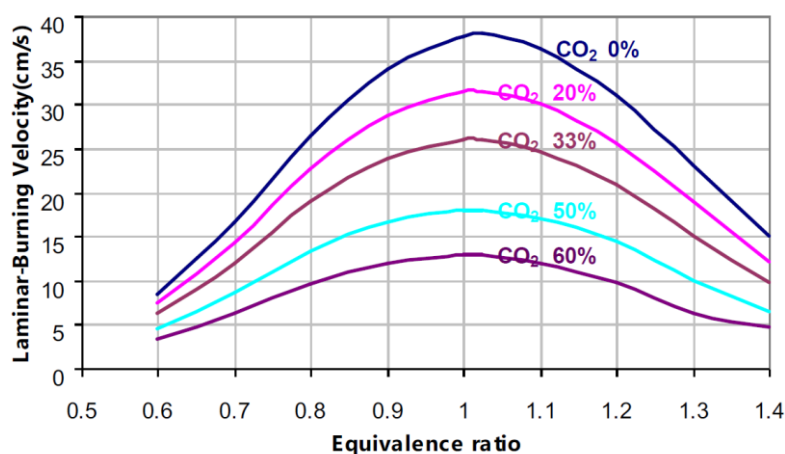
องค์ประกอบ	ความเข้มข้น
CH ₄	50-70 %
CO ₂	20-50 %
H ₂ O (vapor)	0-10 %
N ₂	0-5 %
O ₂	0-2 %
NH ₃	0-1 %
H ₂ S	50-10,000 ppm

อัตราการทดแทนการใช้พลังงานต่างๆ ของแก๊สชีวภาพ 1 m³ (ที่มีแก๊สมีเทน 60%) จะสามารถทดแทนพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ดังนี้ [4]

- 1) แก๊สหุงต้ม (LPG) 0.46 kg
- 2) น้ำมันดีเซล 0.60 litre
- 3) น้ำมันเบนซิน 0.67 litre
- 4) น้ำมันเตา 0.55 litre
- 5) ฟืนไม้ 1.50 kg
- 6) ผลิตกระแสไฟฟ้า 1.2-2.5 kWh (ขึ้นอยู่กับเครื่องยนต์ที่ผลิตไฟฟ้า)

2.1.2 ความเร็วเปลวไฟ (Flame velocity)

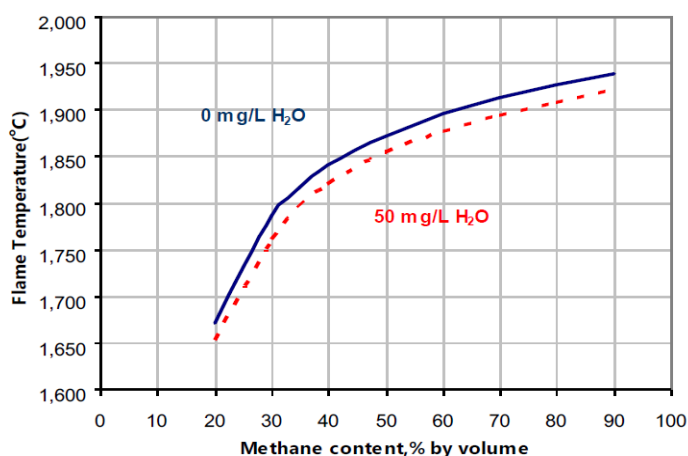
ความเร็วเปลวไฟ คือ ความเร็วของโซนเปลวไฟจากการเผาไหม้ที่ลุกลามเทียบกับความเร็วในการไหลของส่วนผสมเชื้อเพลิง ความเร็วเปลวไฟเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ที่หัวเผาในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำหรือหม้อน้ำมันร้อน และอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยต่างๆ [5] ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเปลวไฟ (Laminar-burning velocity) กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ ดังในรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง ส่งผลให้ความเร็วเปลวไฟสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 ผลของ CO₂ ที่มีต่อความเร็วเปลวไฟของการเผาไหม้มีเทนกับอากาศที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 25°C

2.1.3 อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature)

อุณหภูมิเปลวไฟ เป็นตัวแปรสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบเผาไหม้ และคุณภาพด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความสามารถด้านการถ่ายเทความร้อนและคุณภาพไอเสีย อุณหภูมิเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อแก๊สชีวภาพมีส่วนผสมของมีเทนเพิ่มขึ้น [5] ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของมีเทนในแก๊สชีวภาพตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของมีเทนและความชื้น

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าความเข้มข้นของมีเทนที่ลดลงส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพลดลงตามไปด้วย แก๊สชีวภาพที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นนั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์จะทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ต่ำลงด้วย เนื่องจากเมื่อแก๊สชีวภาพเผาไหม้ และหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์แล้วยังมีความร้อนที่เหลืออีกส่วนหนึ่งที่อยู่ในไอเสียที่ต้องทิ้งไป มวลของแก๊สในไอเสียที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั้น จะพาความร้อนออกไปทิ้งได้มากขึ้น จากการประเมินโดยสมมติแก๊สชีวภาพเผาไหม้กับอากาศที่พอดีทางทฤษฎี จะทำให้ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียที่ปล่องมากขึ้น ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียในไอเสียกับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ [5]

% CH ₄ : CO ₂ (โดยปริมาตร)	% ความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย (คำนวณจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทางทฤษฎี)											
	อุณหภูมิไอเสียที่แตกต่างจากอุณหภูมิล้างแวดล้อม (°C)											
	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250	300	
100:00	4.93	5.35	5.77	6.20	6.62	7.04	7.47	7.89	8.32	10.47	12.66	
70:30	5.19	5.63	6.08	6.52	6.97	7.42	7.86	8.31	8.76	11.04	13.34	
60:40	5.34	5.79	6.25	6.70	7.16	7.62	8.08	8.55	9.01	11.35	13.73	
55:45	5.43	5.89	6.35	6.82	7.29	7.75	8.22	8.69	9.17	11.55	13.97	
50:50	5.54	6.01	6.48	6.96	7.43	7.91	8.39	8.87	9.36	11.79	14.26	
45:55	5.67	7.05	6.64	7.13	7.62	8.11	8.60	9.09	9.59	12.08	14.62	

2.2 เทคโนโลยีระบบผลิตแก๊สชีวภาพในประเทศไทย [5]

จากเอกสารคู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนได้กล่าวถึงเทคโนโลยีระบบการผลิตแก๊สชีวภาพดังนี้

1) ประเภทบ่อหมักแก๊สชีวภาพ

เทคโนโลยีสำหรับแก๊สชีวภาพในประเทศไทยเริ่มใช้กับมูลสัตว์เป็นอันดับแรกและต่อมาเริ่มขยายเข้ามาในภาคอุตสาหกรรม ระบบหมักทำงานโดยอาศัยแบคทีเรียที่ลอยกระจายตัวอยู่ในบ่อ แบคทีเรียในระบบจะมีความเข้มข้นต่ำต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์นานถึง 5 - 45 วัน ทำให้ต้องใช้พื้นที่บ่อใหญ่มาก หากต้องการรวบรวมแก๊สชีวภาพมาใช้ต้องคลุมด้วยพลาสติก เช่น PVC, HDPE

2) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้ระบบหมักผลิตแก๊สชีวภาพกับน้ำเสียอุตสาหกรรมในช่วงแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเสีย รูปแบบระบบหมักส่วนใหญ่เป็นบ่อหมัก โดยแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้เนื่องจากแก๊สที่ได้มีปริมาณน้อย และจุดประสงค์หลักเพื่อการบำบัดน้ำเสีย นอกจากสูญเสียแก๊สชีวภาพแล้ว ยังมีปัญหากลิ่นเหม็นรบกวนจากบ่อหมักและต้องการพื้นที่มากในการสร้างบ่อหมัก ปัจจุบันการใช้ระบบบ่อหมักจึงลดลงมาก การนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์โดยตรงและง่ายที่สุด คือ การนำไปเผาให้ความร้อนในการผลิตไอน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและขับเคลื่อนเครื่องจักรกล

3) ระบบแก๊สชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์

สำหรับประเทศไทย ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ที่มีการใช้เทคโนโลยีระบบแก๊สชีวภาพมากที่สุดคือ ฟาร์มสุกร โดยแบ่งกลุ่มฟาร์มสุกรออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ ฟาร์มขนาดใหญ่ (เทียบเท่าจำนวนสุกรขุนมากกว่า 600 หน่วยปศุสัตว์) ในหนึ่งหน่วยปศุสัตว์เท่ากับ 500 กิโลกรัม เทคโนโลยีระบบแก๊สชีวภาพที่ใช้ ได้แก่ UASB, HSS-UASB และ Covered Lagoon ฟาร์มขนาดกลาง (เทียบเท่าจำนวนสุกรตั้งแต่ 60-600 หน่วยปศุสัตว์) เทคโนโลยีระบบแก๊สชีวภาพที่ใช้ ได้แก่ UASB, MC-UASB-1 และ Covered Lagoon ฟาร์มขนาดเล็ก (เทียบเท่าจำนวนสุกรขุน 6-60 หน่วยปศุสัตว์) เทคโนโลยีระบบแก๊สชีวภาพที่ใช้ ได้แก่ ระบบโดมคงที่ (Fixed Dome) และ ระบบพลาสติกคลุมบ่อดิน (Covered Lagoon)

2.3 ศักยภาพการผลิตและการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทน

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณภาพพลังงานของประเทศไทย ปี 2556-2559 ในตารางระบุถึงพลังงานที่ผลิตในประเทศทั้งหมด และ พลังงานแก๊สชีวภาพ การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของแก๊สชีวภาพ และพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด ในหน่วยพันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) จากตารางจะเห็นว่าการใช้

พลังงานหมุนเวียนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี แสดงให้เห็นถึงการเติบโตของเทคโนโลยีที่ใช้แก๊สชีวภาพและพลังงานหมุนเวียน

ตารางที่ 2.3 คุณภาพพลังงานของประเทศไทย ปี 2556-2559 [6]

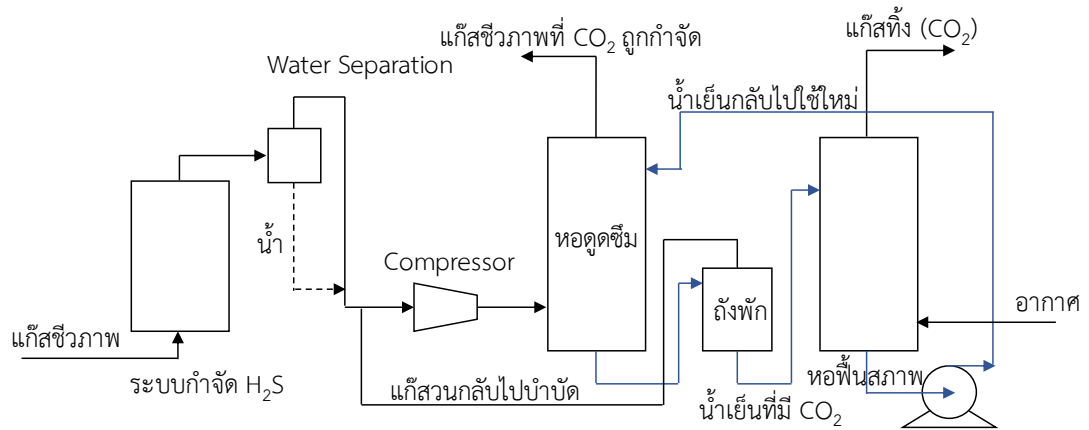
การผลิตและวิธีการใช้	ปี			
	2556	2557	2558	2559
การผลิตแก๊สชีวภาพ	670	906	704	751
การผลิตพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด	9709	10619	11097	18710
การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของแก๊สชีวภาพ	495	727	495	593
การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด	5902	6408	6579	7182

2.4 วิธีการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ

1) การดักจับด้วยน้ำ (Water Scrubber Technology)

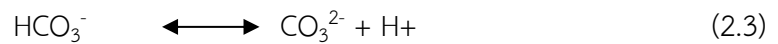
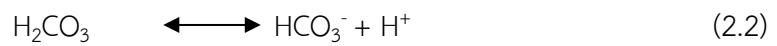
การดักจับด้วยน้ำ เป็นเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการอัดแก๊สชีวภาพผ่านคอลัมน์ดูดซึมด้วยน้ำที่มีความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้หลักการด้านความสามารถในการละลายที่ดีของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ เทคโนโลยีมี 2 แบบ คือ ระบบที่ใช้น้ำครั้งเดียวและระบบที่มีการฟื้นฟูสภาพน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ องค์ประกอบของระบบจะมีหอดูดซึม และหอไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ในกรณีนี้มีการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำและวนน้ำกลับไปใช้ใหม่) ภายในหอมีตัวกลางพลาสติกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล

สำหรับกระบวนการที่มีการวนน้ำกลับมาใช้ใหม่นั้น โดยแก๊สชีวภาพเมื่อผ่านระบบกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้ว เมื่อแยกละอองน้ำออกจะถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์ให้มีความดันสูงประมาณ 13 บาร์(เกจ) เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลาย แก๊สที่ความดันสูงจะเข้าหอดูดซึมทางด้านล่างและจะไหลสวนทางกับน้ำ (อุณหภูมิต่ำประมาณ 10 °C) น้ำที่ใช้กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะถูกนำออกทางด้านล่างและเข้าสู่ถังพักเพื่อลดความดัน แก๊สบางส่วนที่ออกมาจากน้ำจะวนกลับไปทางดูดของคอมเพรสเซอร์ใหม่ ส่วนน้ำก็จะเข้าสู่หอฟื้นฟูสภาพที่ใช้อากาศในการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำออก ซึ่งแก๊สที่ออกจากด้านบนจะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก น้ำที่ผ่านการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปแล้วจะวนกลับไปหอดูดซึมอีกเพื่อละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Water Scrubber ชนิดนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ดังในรูปที่ 2.3

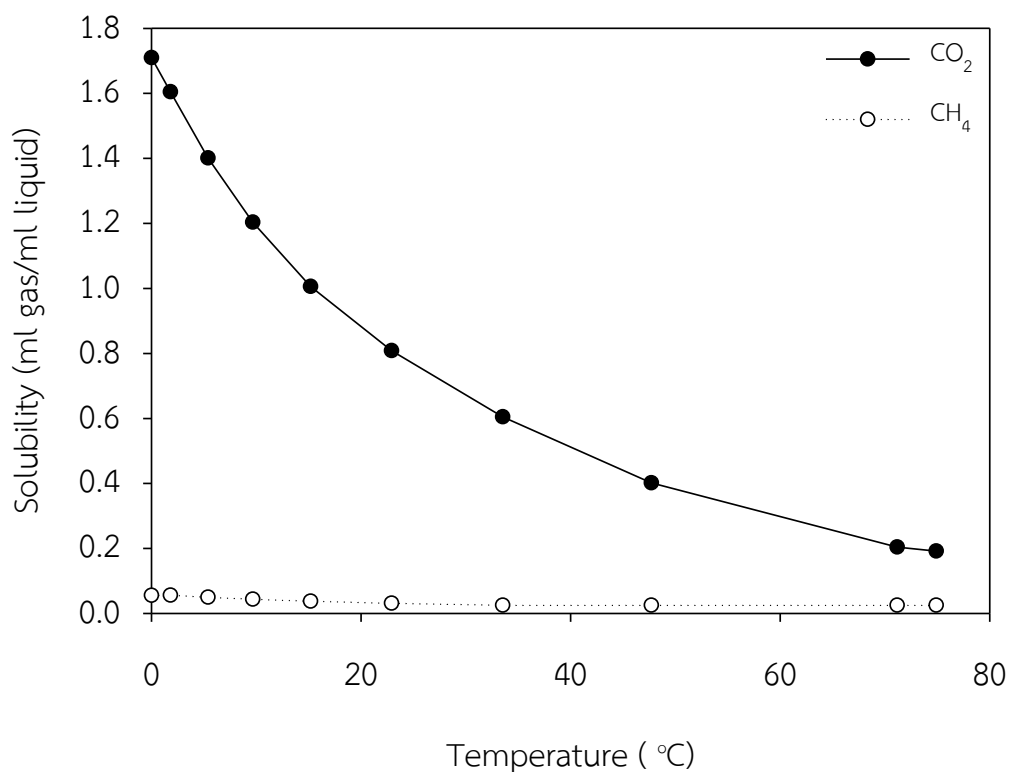


รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
แบบ Water scrubber ชนิดนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ [5]

จากปฏิกิริยาเคมีของ CO_2 กับน้ำที่ให้ Carbonic acid และแตกตัวเป็น Carbonate กับ Bicarbonate โดยทางอ้อมที่น้ำมีคุณสมบัติเป็นกรดเพราะ CO_2 ละลายอยู่ และทำปฏิกิริยากับหินปูนที่อยู่ในรูปของ carbonate เกิดสารประกอบ Bicarbonate ดังนี้



คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกละลายในน้ำมากกว่ามีเทน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกทำละลายในน้ำได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำลงดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์กับอุณหภูมิ [7]

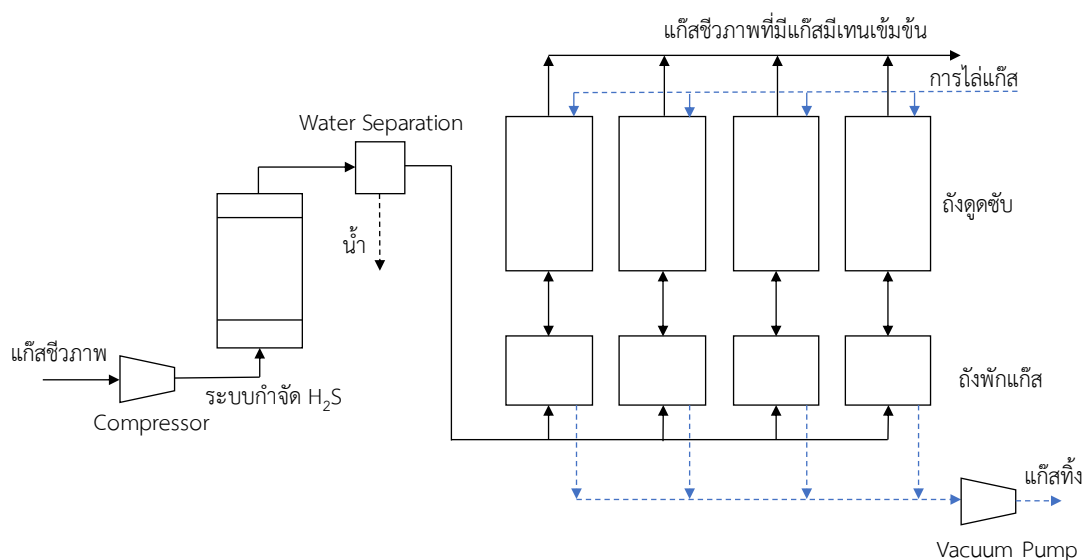
กรณีระบบที่มีการใช้น้ำครั้งเดียว (Single pass) นั้น มีข้อดีคือ จะมีประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง เนื่องจากน้ำที่ใช้จะไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำปนอยู่

สำหรับระบบที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ อาจจะมีประสิทธิภาพการกำจัดไม่ดีเท่าแบบใช้น้ำครั้งเดียว เนื่องจากในการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ไม่สามารถที่จะไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำได้หมด ดังนั้นความสามารถในการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงต่ำลง แต่ระบบนี้จะใช้น้ำน้อยกว่าการใช้น้ำเพียงครั้งเดียว โดยจากระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 330 m³/hr นั้น จะต้องเติมน้ำชดเชยในระบบประมาณ 50 litre/hr ดังนั้นถ้าพื้นที่ใดขาดแคลนน้ำ ก็จะเป็นเรื่องยากที่จะใช้ระบบแบบใช้น้ำครั้งเดียวได้

2) การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (Pressure Swing Adsorption Technology)

การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน เป็นเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องแยกแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน หลักการทำงานใช้การเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สแบบกลับไปกลับมา และสมบัติในการดูดซับของวัสดุต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่นๆ โดยความสามารถในการดูดซับของวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลระบบประกอบด้วย ถึง Adsorption 4 ถึง

สำหรับบรรจุตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หรือ Zeolite การทำงานจะเป็นรอบตามวงจรของการดูดซับ ดังในรูปที่ 2.5

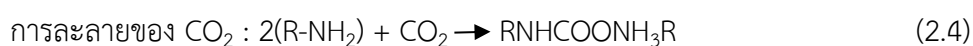


รูปที่ 2.5 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Pressure swing adsorption [5]

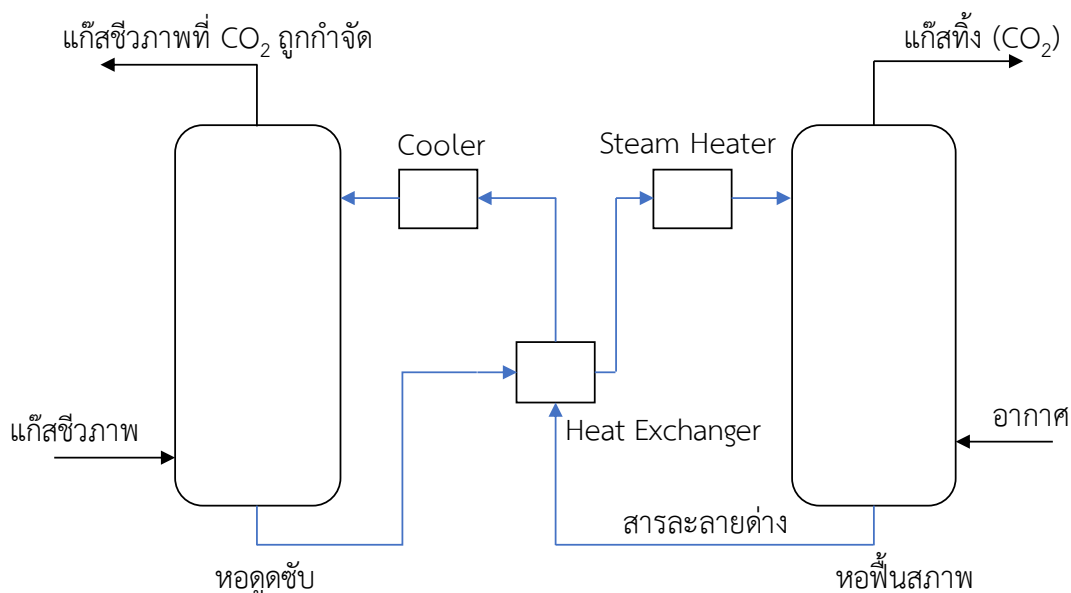
ในสภาวะการทำงานปกติ แต่ละถังจะมีสถานะการทำงานต่างกัน คือ ขั้นตอนการดูดซับ ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพและขั้นตอนการสร้างความดัน (ในช่วง 10-25 บาร์(เกจ) ขึ้นอยู่กับผู้ขายเทคโนโลยี) ในขั้นการดูดซับแก๊สชีวภาพจะเข้าทางด้านล่างของถังดูดซับ ในขั้นตอนนี้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกซิเจน และ ไนโตรเจน จะถูกดูดซับบนตัวดูดซับ แก๊สที่ออกจากถังจะมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทนสูงมากกว่า 97% นอกจากนี้ไฮโดรคาร์บอน Volatile Organic Compounds (VOCs) และน้ำก็จะถูกดักจับไปด้วยก่อนที่ถังจะจับสิ่งเจือปนจนอิ่มตัวขั้นตอนการดูดซับก็จะหยุดลง ถังที่ได้รับการฟื้นฟูสภาพแล้วก็จะทำหน้าที่เป็นถังดูดซับแทนที่ ส่วนถังที่อิ่มตัวก็จะเข้าสู่สถานะการฟื้นฟูสภาพ โดยปรับลดความดันลงจนถึงความดันบรรยากาศ แก๊สที่ออกมาจากถังในช่วงการลดความดันก็อาจจะมีแก๊สมีเทนปนมาบ้าง ซึ่งจะมีการวนกลับไปดูดซับใหม่ หลังจากดึงแก๊สอื่นออกจากตัวดูดซับแล้ว (สิ้นสุดขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ) ก็จะมีการอัดความดันเพื่อเตรียมการเข้าสู่ขั้นตอนการดูดซับอีกครั้งหนึ่ง เวลาต่อหนึ่งรอบของกระบวนการดูดซับจะอยู่ในช่วง 3-5 นาที ในกระบวนการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์จะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (ต้องใช้ความร้อน) ดังนั้นถ้าไม่มีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์ออกก่อน ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากตัวดูดซับเสียสภาพการดูดซับแก๊สอื่น ๆ

3) การใช้สารเคมีในการดูดซึม (Chemical Absorption Technology)

การใช้สารเคมีในการดูดซึม เป็นเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในสารละลายต่าง Amine อาศัยความแตกต่างด้านความสามารถในการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนในสารละลายต่าง Amine เช่น Monoethanolamide (MEA, R-NH₂) หรือ Diethanolamine (DEA) เป็นต้น ปฏิกริยาดังนี้



แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับต่างเอมีนดังสมการที่ข้างต้น ระหว่างการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ องค์ประกอบของระบบจะมีหอดูดซึม และหอไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ในกรณีที่มีการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลาย และวนสารละลายกลับไปใช้ใหม่) ภายในหอนี้ตัวกลางพลาสติกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ดังในรูปที่ 2.6



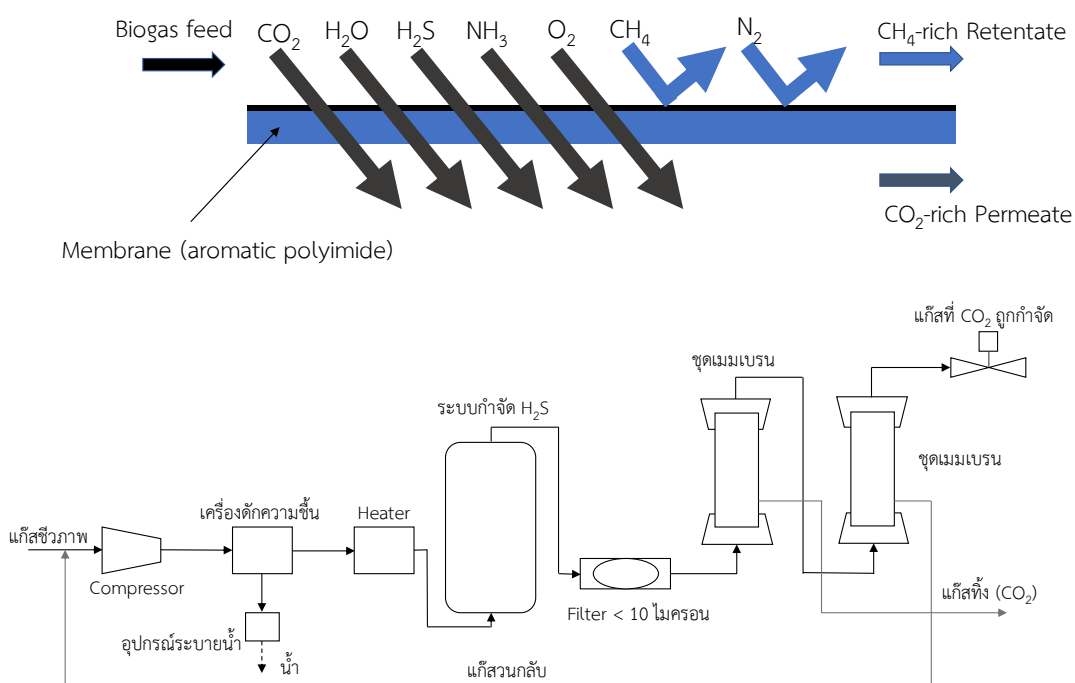
รูปที่ 2.6 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบใช้สารเคมีในการดูดซึม [5]

แก๊สชีวภาพจะเข้าหอดูดซึมทางด้านล่างและจะไหลสวนทางกับสารละลาย แก๊สชีวภาพที่กำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วและมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทนสูงจะออกจากระบบทาง

ด้านบน ส่วนสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไหลออกทางด้านล่างผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน 2 ชุด เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยชุดแรกทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายที่ออกมาจากหอพื้นสภาพและชุดที่สองทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำตามลำดับ แล้วเข้าสู่หอพื้นสภาพ เมื่อเข้าสู่หอ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายที่อุณหภูมิสูงจะถูกไล่ออกจากสารละลาย แก๊สชีวภาพที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะถูกปล่อยทิ้ง ส่วนสารละลายจะถูวนกลับไปใช้ใหม่ที่หอดูดซึม แต่ก่อนที่จะเข้าหอดูดซึมจะมีการลดอุณหภูมิของสารละลายเพื่อช่วยให้สามารถละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น

4) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation Technology)

การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน เป็นเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเลือกซึมผ่านและแพร่ผ่านเมมเบรนที่ใช้เยื่อแผ่นทำจาก Dense polyimide membrane ในการแยกสาร ใช้หลักการความแตกต่างของขนาดโมเลกุลหรือความจำเพาะต่อโมเลกุลของแก๊สแต่ละชนิดในการดึงดูดกัน (Affinity) ทำงานภายใต้ความดัน 6-10 บาร์เกจ ประสิทธิภาพของการแยกขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน หลักการโดยทั่วไปของเทคนิคการแยก คือ การเลือกซึมผ่าน (Selective Permeation) ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Membrane separation [5]

จากเทคนิคในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 4 วิธี งานวิจัยนี้ได้เลือกเทคนิคแบบดูดซึมด้วยน้ำ เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้ความร้อนและสารเคมี โดยสามารถนำมาสรุปข้อดีและข้อเสียดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพและข้อดีข้อเสียในแต่ละเทคนิค [8]

ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
1) Water Scrubber Technology (การอัดแก๊สชีวภาพผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ)	<p>เทคนิคไม่ซับซ้อน</p> <p>ไม่ต้องใช้สารเคมี</p> <p>ได้แก๊สที่มีความบริสุทธิ์ และyield สูง</p> <p>ไม่เกิดสารกัดกร่อนในท่อ</p> <p>ไม่ต้องใช้ความร้อน</p>	<p>ต้องใช้น้ำมากและอุณหภูมิต่ำ</p> <p>มีการปนเปื้อนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนตัวกลางถ้ากำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ดี</p> <p>มีค่าลงทุนสูง</p> <p>เสียค่าพลังงานในการเพิ่มความดันแก๊ส</p>
2) Pressure Swing Adsorption (PSA) (ใช้การเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สแบบกลับไปกลับมาและสมบัติในการดูดซับของวัสดุต่อแก๊ส CO ₂)	<p>ได้แก๊สมีเทนที่มีความบริสุทธิ์สูง >97%</p> <p>ความต้องการในการใช้พลังงานต่ำ และไม่ใช้ความร้อน</p> <p>การสูญเสียแก๊สมีเทนต่ำ</p> <p>กำจัดสิ่งเจือปนได้</p>	<p>ต้องจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน</p> <p>มีขั้นตอนมาก</p> <p>ทำงานที่ความดันสูง</p> <p>เสียค่าพลังงานในการเพิ่มและลดความดัน</p>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพและข้อดีข้อเสียในแต่ละเทคนิค [8]

ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
3) Chemical Absorption Technology (ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในสารละลายต่าง Amine)	กำจัดสิ่งปนเปื้อนในแก๊สได้ เทคนิคไม่ซับซ้อน ตัวระบบมีขนาดเล็ก ไม่จำเป็นต้องทำงานที่ความดันสูง มีการสูญเสียแก๊สมีเทนน้อย	มีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีสูง ใช้พลังงานความร้อนสูงในการฟื้นฟูสภาพสารละลายต่าง ต้องมีหลายหอดูดซึมในการกำจัดสิ่งเจือปนในแต่ละชนิด ต้องมีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
4) Membrane Separation Technology (การเลือกซึมผ่านและแพร่ผ่านเมมเบรน)	ใช้พื้นที่น้อย ไม่มี Moving parts ไม่มีการเติมสารเคมี มีอายุได้นานถึง 10-15 ปี ใช้พลังงานเพิ่ม ความดันไม่มาก ทำให้ประหยัดพลังงาน	ราคาแพง ระบบมีความซับซ้อน ต้องการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง ต้องมีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อน ได้ yield แก๊สมีเทนต่ำ

2.5 ฟองระดับไมครอน (Microbubble)

ฟองระดับไมครอน (Microbubble) คือฟองอากาศที่มีขนาด 50–200 μm เมื่ออยู่ในน้ำจะทำให้ น้ำมีลักษณะขาวขุ่นคล้ายน้ำนม ฟองระดับไมครอนจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างช้า ๆ และแพร่กระจายตัวไปทั่วน้ำ ต่างจากฟองอากาศทั่วไปที่จะมีฟองอากาศบริเวณของแหล่งกำเนิดฟองเท่านั้น ในขบวนการสร้างฟองระดับไมครอนจะได้ฟองระดับนาโน (Nanobubble) เกิดขึ้นเสมอ [9]

2.5.1 คุณสมบัติของฟองระดับไมครอน

ฟองระดับไมครอนมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวของฟองอากาศจำนวนมาก ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการละลายของอากาศลงสู่น้ำได้มากกว่าฟองอากาศทั่วไป ด้วยขนาดของฟองที่เล็กมาก ทำให้ฟองอากาศมีแรงลอยตัว (buoyancy force) ต่ำ ดังนั้นฟองอากาศจึงอยู่ในน้ำได้นาน

ผิวของฟองระดับไมครอนมีประจุลบล้อมรอบ ซึ่งจะป้องกันไม่ให้อฟองรวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ มีคุณสมบัติทำความสะอาดพื้นผิว (surface cleansing)

2.5.2 การนำฟองระดับไมครอนไปใช้งาน

ที่ผ่านมาได้มีการนำฟองระดับไมครอนไปใช้ประโยชน์ดังนี้ [10]

(1) การแพทย์และยา สำหรับสาขาทันตกรรมสามารถใช้ในการทำทำความสะอาดในช่องปาก นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานในการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสามารถช่วยลดการใช้สบู่หรือน้ำยาสารเคมีได้อีกด้วยและยังสามารถนำไปใช้เกี่ยวกับการช่วยเสริมการออกฤทธิ์ของยาให้สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายหรือมีประสิทธิภาพในการออกฤทธิ์บำบัดโรคได้ดีขึ้น

(2) การเกษตร เช่น ในอุตสาหกรรมผักหรือผลไม้สด น้ำที่มีฟองแก๊สขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการล้างทำความสะอาดและรักษาความสดได้ ส่วนอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์ (Aquaculture) ในฟาร์มเลี้ยงกุ้งมีการนำมาช่วยเพิ่มคุณภาพและปริมาณของผลผลิต ทั้งยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดหรือการดูแลคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งหรือสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ ได้ในอุตสาหกรรมการเพาะปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (Hydroponics) คุณภาพของน้ำจัดได้ว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญและต้องคำนึงถึงอย่างมาก จึงมีการนำไปช่วยในการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน เนื่องจากสามารถเพิ่มปริมาณค่าการละลายของแก๊สในน้ำได้ ทำให้น้ำที่ใช้เพาะปลูกมีคุณสมบัติดีส่งผลให้ผลผลิตมีการเจริญเติบโตและมีคุณภาพที่ดีตามมาด้วย

(3) อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เช่น ในงานทดลองของศูนย์วิจัยในประเทศญี่ปุ่นได้มีการรายงานว่าการนำน้ำที่ผ่านการทำให้เกิดฟองขนาดเล็กมาล้างทำความสะอาดอาหารทะเลสดช่วยรักษาความสดได้ดีกว่าการล้างด้วยกรรมวิธีปกติ นอกจากนี้การนำน้ำที่มีฟองของแก๊สไอโซนขนาดเล็กไปใช้ในการล้างทำความสะอาดหรือฆ่าเชื้อในวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอาหารก็ส่งผลที่ดีเช่นกัน

(4) การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment) เช่น การเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของแก๊สชนิดต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือโอโซนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในการแยกไขมันที่ปนอยู่ในน้ำเสีย (Fats-water separation) ของโรงงานเพื่อให้ง่ายต่อการบำบัดในขั้นต่อไปได้ง่ายขึ้น

ด้านอื่น ๆ เช่น การควบคุมโครงสร้างและพัฒนาสมบัติของวัสดุ การควบคุมการไหลของคอนกรีตและการใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนธุรกิจเกี่ยวกับสุขภาพและความงามรวมไปถึงกลุ่มธุรกิจเกี่ยวกับการดูแลสัตว์เลี้ยง

2.6 หลักการสร้างฟองแก๊สระดับไมครอน

ในการสร้างฟองแก๊สระดับไมครอน โดยทั่วไปสามารถทำได้ 4 วิธี ดังนี้

(1) การอัดแก๊สผ่านวัสดุรูพรุนที่ทำจากแผ่นเซรามิก แผ่นโลหะ แผ่นฟิล์มหรือแผ่น พิวเตอร์ การอัดแก๊สผ่านชั้นของวัสดุให้เกิดฟองแก๊สที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ขึ้นไป การลดขนาดของรูพรุนสามารถลดขนาดของฟองแก๊สได้ แต่ขนาดของรูพรุนจะต้องมีขนาดเล็กกว่าฟองแก๊สหลายเท่า มีผลทำให้เกิดการสูญเสียความดันในระบบเพิ่มขึ้น ต้องใช้พลังงานในการเดินปั๊มที่สูงขึ้น และรูพรุนที่อยู่ติดกันมีผลให้ฟองแก๊สที่ปล่อยออกมาเกิดการรวมตัวเป็นฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

(2) การอัดเพิ่มความดันแก๊สให้ละลายในของเหลว การอัดเพิ่มความดันแก๊สเหนือของเหลวจนถึงความดันไออิ่มตัวของแก๊ส จะทำให้แก๊สละลายในของเหลวได้มากขึ้น หลังจากนั้นเปิดวาล์วเพื่อลดความดันในถัง แก๊สที่ละลายในของเหลวจะกลับสู่สถานะแก๊สเกิดเป็นฟองแก๊สระดับไมครอน แต่วิธีนี้มีปัญหาในการสร้างฟองขนาดเล็กให้มีปริมาณที่มากเพียงพอ ชุดอุปกรณ์มีขนาดใหญ่และซับซ้อน นอกจากนี้ใช้พลังงานในการอัดแก๊สที่สูง

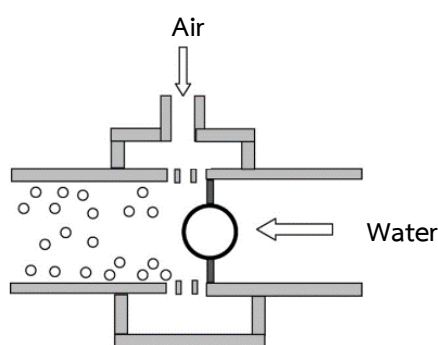
(3) การใช้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านในของเหลว ก่อให้เกิดความสั่นของความดันทำให้ของไหลเกิดความปั่นป่วนในตำแหน่งที่ของเหลวมีความดันต่ำกว่าความดันไอจะเกิดการกลายเป็นฟองแก๊สขนาดเล็ก ความถี่ของคลื่นเหนือเสียงมีผลต่อขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีปัญหาด้านปริมาณฟองแก๊สและการควบคุมขนาดของฟองแก๊ส

(4) วิธีการผสมแก๊สในของเหลวและใช้แรงเฉือนตัดย่อยฟองให้มีขนาดเล็กซึ่งอาจจะใช้ใบพัดหมุนสร้างแรงเฉือนตัดย่อยฟอง หรือบังคับให้ฟองแก๊สไหลปะทะผิวขรุขระหรือผิวแห่งทรงกระบอกจนฟองมีขนาดเล็กลง หรือใช้ของเหลวพ่นด้วยความเร็วสูงจนเกิดบริเวณที่มีความดันต่ำที่สามารถดึงฟองแก๊สเข้ามาผสมในของเหลวอย่างรุนแรงเกิดการเฉือนฟองแก๊สให้มีขนาดเล็กลง วิธีนี้มีข้อดี คือสามารถสร้างฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากได้และสามารถควบคุมขนาดของฟองแก๊สได้ง่ายเพียงควบคุมความเร็วของของเหลวหรือควบคุมความเร็วใบพัดตัดย่อยฟอง

2.7 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

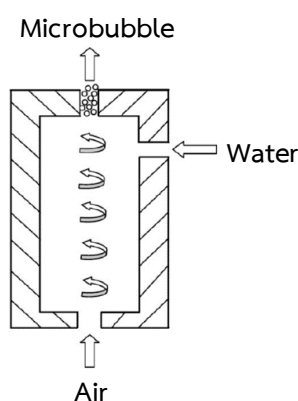
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

Sadatomิ และคณะ [11] ออกแบบอุปกรณ์ฟองระดับไมครอนโดยอาศัยแรงดันของน้ำในท่อซึ่งมีวัตถุทรงกลมตันอยู่ตรงแกนกลางตั้งในรูปที่ 2.8 ทรงกลมตันจะเป็นการเพิ่มความเร็วให้กับของเหลวในท่อเนื่องจากความดันที่ลดลงและเกิดการดูดแก๊สเข้ามาในของไหลอัตโนมัติส่งผลให้เกิดเป็นฟองระดับไมครอน ได้ขนาดฟองที่เล็กที่สุดถึง $10\ \mu\text{m}$



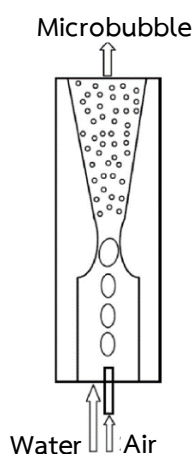
รูปที่ 2.8 หัวฉีดสร้างฟองแบบใช้วัตถุทรงกลมตันในท่อการไหล [11]

Ohnari และคณะ [12] ใช้แรงดันน้ำจากปั๊มสร้างการไหลแบบหมุนทำให้ความดันในแนวแกนกลางลดลง แก๊สจะถูกดูดเข้าสู่พื้นที่ความดันที่ลดต่ำลง ของไหลกับอากาศจะผสมกันแล้วกลายเป็นฟองระดับไมครอน เนื่องจากแรงตึงและแรงเฉือนที่สูง Ohnari ได้พัฒนาตัวสร้างฟองระดับไมครอนแบบทรงกระบอก โดยใช้หลักการดังกล่าว ดังในรูปที่ 2.9 อัตราการไหลของของเหลวสามารถเพิ่มได้ถึง $12\ \text{litre/hr}$ และความเร็วในการหมุนของการผสมแก๊สและของเหลวสามารถใช้ได้ในช่วง $300\text{-}600\ \text{RPS}$ อัตราส่วนของอัตราการไหลแก๊สกับของเหลวอยู่ในช่วง $1/7\text{-}1/15$ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่ผลิตได้อยู่ในช่วง $10\text{-}50\ \mu\text{m}$



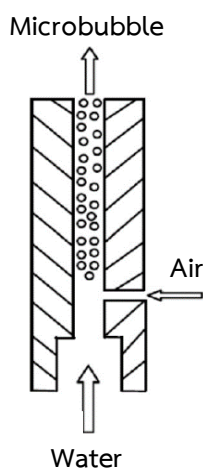
รูปที่ 2.9 หัวฉีด microbubble ชนิดใช้ของเหลวหมุนวน [12]

Fujiwara และคณะ [13] สร้างฟองระดับไมครอนโดยใช้ระบบ Venturi คือ แก๊สและของเหลวจะถูกส่งผ่านท่อ Venturi พร้อม ๆ กันเพื่อสร้างฟองดังในรูปที่ 2.10 แรงดันของไหลจะถูกอัดเข้ามาที่ทางเข้า เมื่อผ่านตัวท่อจะเป็นการเร่งความเร็วของแก๊สและของเหลวเนื่องจากความดันที่ลดลง ทำให้เกิดเป็นฟองระดับไมครอน ขนาด 100 μm



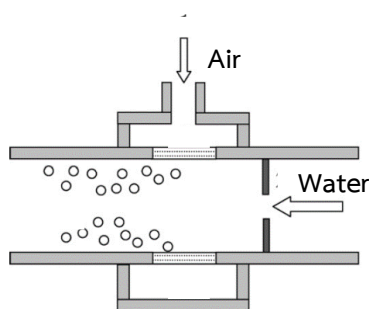
รูปที่ 2.10 หัวฉีดสร้างฟอง Venturi type [13]

Nakatake และคณะ [14] ใช้ผลกระทบของการลู่เข้าและลู่ออกของหัวฉีดจาก Venturi type โดยการเปลี่ยนแปลงความดันเพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็ว ส่งผลให้เกิดบริเวณความดันต่ำ แก๊สจะถูกดูดเข้ามาเองทางด้านข้าง แก๊สกับของเหลวที่ผสมกันจะขยายตัวและความเร็วจะถูกลดลง แรงเฉือนที่เกิดจากการผสมแก๊สกับของเหลวในการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้เกิดเป็นฟองระดับไมครอน 40-50 μm



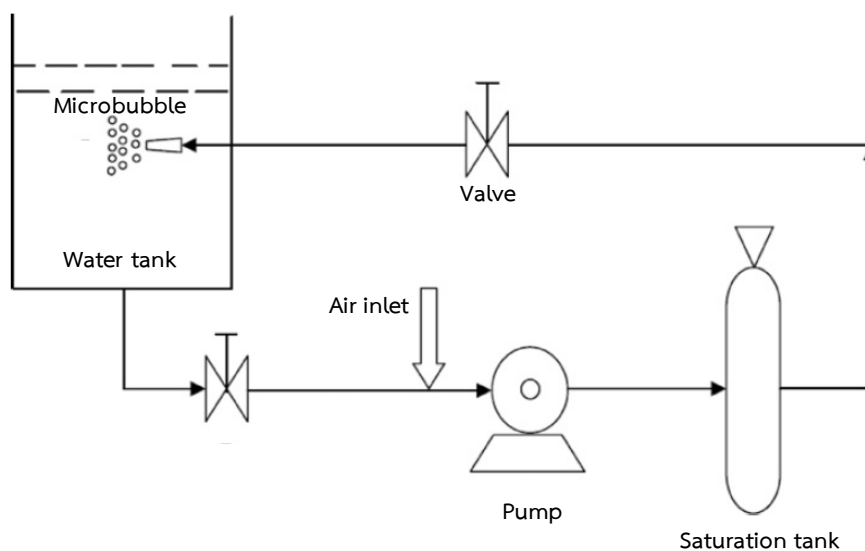
รูปที่ 2.11 หัวฉีดสร้างฟอง Ejector type [14]

Sadatomi และ Kawahara [15] ได้คิดค้นหัวฉีดที่พัฒนามาจากหัวฉีดของ Sadatomi โดยใช้ orifice และท่อที่มีการเจาะรูพรุนแทนวัตถุทรงกลมตัน เมื่อแรงดันน้ำเข้าไปในหัวฉีด ความเร็วของน้ำจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก orifice ความดันที่ทางออกของ orifice จะมีค่าเป็นลบ ทำให้สามารถดูดอากาศผ่านรูพรุน จึงทำให้เกิดเป็นฟองระดับไมครอนขนาด $10\ \mu\text{m}$



รูปที่ 2.12 หัวฉีดสร้างฟองแบบ Multi fluid mixture device Kawahara [15]

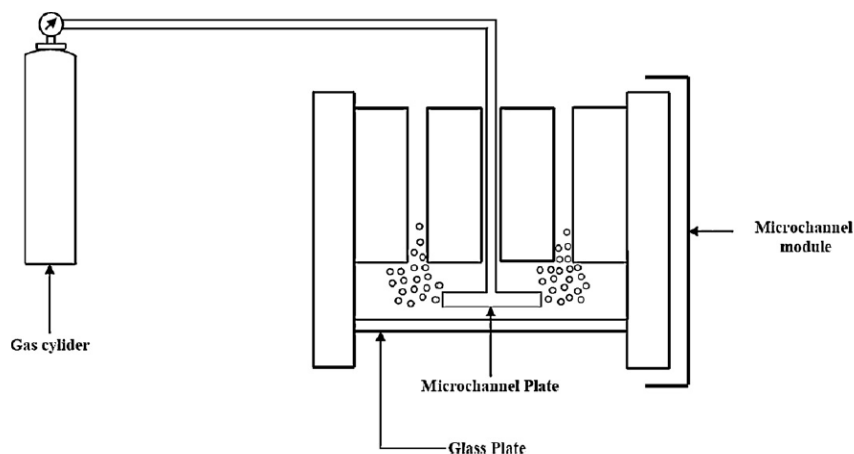
Tsuge และคณะ [16] คิดค้นใช้อากาศละลายในน้ำโดยใช้ความดันที่ 3-4 atm และน้ำจะถูกปล่อยออกผ่านหัวฉีดเข้าสู่ถังน้ำดังในรูปที่ 2.13 เนื่องจากการลดลงของความดันทำให้อากาศอิมัลชันถูกปล่อยออกมาในน้ำในรูปแบบของฟองระดับไมครอน



รูปที่ 2.13 ระบบผลิต microbubble โดยใช้ความดันทำละลาย [16]

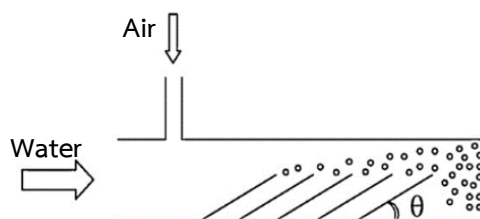
Yasuno และคณะ [17] ได้สร้างฟองโดยการใช้วิธีผ่านช่องระดับไมครอน ดังในรูปที่ 2.14 ขนาดของฟองเฉลี่ยที่สามารถผลิตได้จะอยู่ในช่วง $33.6\text{-}51.1\ \mu\text{m}$ แผ่น microchannel มีขนาด

15×15 mm² มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอยู่ที่ 1 mm ที่ตรงกลาง ขนาดที่ขอบทั้ง 4 ด้าน มีความสูงอยู่ที่ 100 μm และความยาว 10 nm ได้ถูกสร้างลงบนแผ่น microchannel



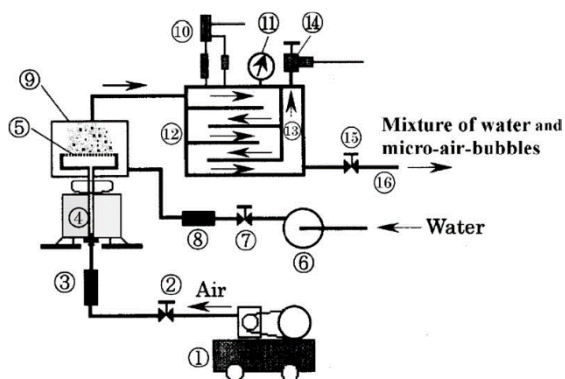
รูปที่ 2.14 การสร้าง microbubble โดยใช้ microchannel [17]

Hasagawa และคณะ [18] ได้พัฒนาหัวฉีดที่ใช้กำลังต่ำและมีขนาดกะทัดรัด โดยภายในท่อจะมี slit ดังในรูปที่ 2.15 ใช้อัตราการไหลอยู่ที่ 13.5 ลิตร/นาที ปี่มจะเป็นตัวสร้างความดันภายในหัวฉีดให้ต่ำกว่าภายนอก ทำให้อากาศถูกดูดเข้ามาได้เองผ่าน slit ที่อยู่ภายในท่อ แรงเฉือนถูกสร้างโดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของของเหลวจากมุมของ slit ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดฟองระดับไมครอน 40-50 μm



รูปที่ 2.15 การสร้างฟองโดยใช้แรงเฉือนในท่อและ slit [18]

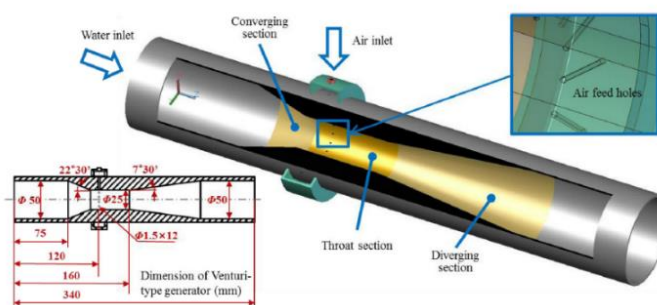
Shigeo Fujikawa และคณะ [19] อัดอากาศผ่านแผ่นรูพรุนออกไปผสมกับน้ำ ในขณะนั้น จะเกิดการหมุนของแผ่นรูพรุนทำให้เกิดการตัดฟองให้มีขนาดเล็กลง ฟองที่ได้จะถูกส่งออกไปพร้อมกับน้ำ โดยสามารถควบคุมขนาดของฟองได้โดยการควบคุมองศาในการสลายตัวของอากาศที่อยู่ในน้ำ เนื่องจากองศาการสลายตัวของอากาศจะมีผลกับการแยกตัวของฟองระดับไมครอนโดยผลการทดลอง ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่ถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 10-20 μm



รูปที่ 2.16 ระบบการสร้าง microbubble การหมุนแผ่นรูพรุน [19]

- (1): air compressor, (2): regulator, (3): airflow gauge, (4): motor กับ shift gear,
 (5): กล่องสร้างฟองโดยใช้แผ่นรูพรุน, (6): ปั๊มน้ำ, (7): regulator, (8): water flow gauge,
 (9): กล่องผสม, (10): ทางปล่อยอากาศออก, (11): safety valve, (12): pressure gauge,
 (13): วาล์วควบคุมอากาศออก (14): reduction valve, (15): ท่อแยก

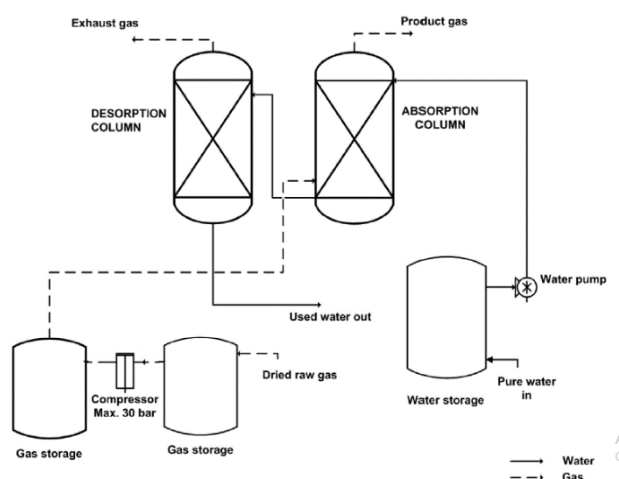
Gabbard และคณะ [20] ได้ออกแบบ Venturi tube ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ constricted section, throat section และ diverging section บริเวณ throat section จะมีรูเจาะขนาด 1.5 mm 15 รู รอบ ๆ สำหรับนำแก๊สเข้าสู่ท่อ เมื่อมีของไหลผ่านจนถึงบริเวณ throat section ทำให้ความเร็วของของไหลสูงขึ้น ส่งผลให้ความดันบริเวณนั้นลดลง หลังจากนั้นเมื่อเริ่มผ่านบริเวณ diverging section ความดันก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเร็วที่ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด แก๊สก็จะเริ่มแตกตัวออกเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก ขนาดของฟอง 0.5–0.6 mm



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของหัวฉีดสร้างฟอง Venturi type [20]

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ

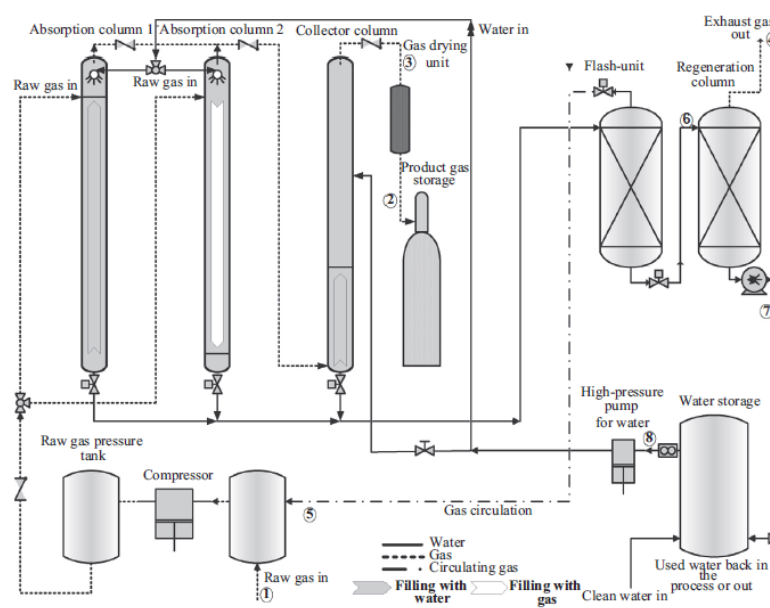
Rasi และคณะ [21] สร้างเครื่องล้างแก๊สชีวภาพ landfill gas แบบไหลสวนน้ำระดับ pilot scale เพื่อใช้สำหรับยานพาหนะโดยศึกษาผลของความดันและอัตราการไหลของน้ำและแก๊สที่ใส่สำหรับการล้าง ผลที่ได้สามารถผลิตมีเทนบริสุทธิ์ใกล้เคียงหรือสูงกว่า 90 % ในการใช้ความดัน 20 bar อัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตร/นาทีก และ ความดัน 30 bar อัตราการไหลน้ำ 5 ลิตร/นาทีก



รูปที่ 2.18 ระบบการล้างแก๊สที่ใช้ในการศึกษา [21]

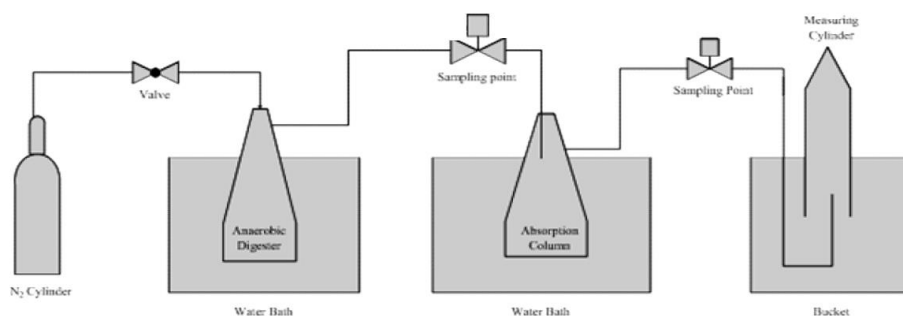
Maile และคณะ [22] ศึกษาการใช้ Monoethanolamide (MEA) เป็นสารดูดซับในระบบต่อเนื่อง มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลองด้วย water bath ในการทดลองจะอยู่ในถังหมักมีลักษณะเป็นฟอง มีการอัดไนโตรเจนเพื่อทำบริสุทธิ์และสร้างเงื่อนไข anaerobic ตลอดการทดลอง ใช้ความเข้มข้นของ MEA เป็น 3 ค่าคือ 10, 20 และ 30 %wt เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ 2 จุด (ก่อนและหลังเข้า absorption column) ผลที่ได้ MEA เป็นสารดูดซับที่ดี สามารถดูดซับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 76, 78 และ 84 %vol (MEA concentration 10,20 และ 30 %wt) ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จาก 66 % ที่อุณหภูมิห้อง ถึง 77% ที่ 40 °C

Rasi และคณะ [23] ใช้วิธีปรับปรุงแก๊สด้วยความดันสูงโดยใช้น้ำเป็นตัวดูดซึม ระบบประกอบด้วย absorption, desorption และ gas drying ระบบ absorption แบ่งเป็น 2 column มี initial pressure 8, 10 bar จนถึง 180 bar น้ำถูกใช้เป็นตัวเพิ่มความดันให้กับแก๊ส ได้ปริมาณ CH_4 อยู่ในช่วง 83-92.1 % CO_2 เหลือ 4.4-6.3 % ไนโตรเจนเหลือ 2.5-7.4 % ประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S 99 % ในแต่ละการทดลองจะใช้เวลาอย่างน้อย 1.5-3 ชั่วโมง น้ำที่ใช้มีอุณหภูมิ 16°C



รูปที่ 2.19 ระบบทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพด้วยความดันสูง [23]

Maile และคณะ [24] ศึกษาการล้างแก๊สด้วยวิธี Chemical absorption โดยใช้ Sodium hydroxide เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการทดลองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ 1M, 2M และ 3M โดยศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ Sodium hydroxide มีผลทำให้อัตราการดูดซับและประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัด CO_2 สูงสุดในการทดลองนี้คือ 66%



รูปที่ 2.20 ระบบการทดลองของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้ sodium hydroxide [24]

Rahul Kadam [25] และคณะ ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ของเทคโนโลยีในการล้างแก๊สชีวภาพที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยนำแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ คือ ความบริสุทธิ์ของมีเทน ความเหมาะสม ปริมาณมีเทนที่สูญเสีย ประสิทธิภาพ พลังงานที่ใช้ ค่าบำรุงรักษา โดย water scrubbing เป็นที่นิยมมากที่สุด ตามด้วย pressure swing adsorption และ chemical absorption ผลจากเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละวิธีของการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ Kadam [25]

Considered parameter	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm ³)	0.23-0.30	0.25-0.30	0.2-0.3	0.05-0.15	0.18-0.20
Consumption for clean biogas (kWh/Nm ³)	0.29-1.00	0.30-0.90	0.4	0.05-0.25	0.14-0.26
Heat consumption (kWh/Nm ³)	None	None	< 0.2	0.50-0.75	None
Heat demand (°C)	-	-	55-80	100-180	-
Cost	Medium	Medium	Medium	High	High

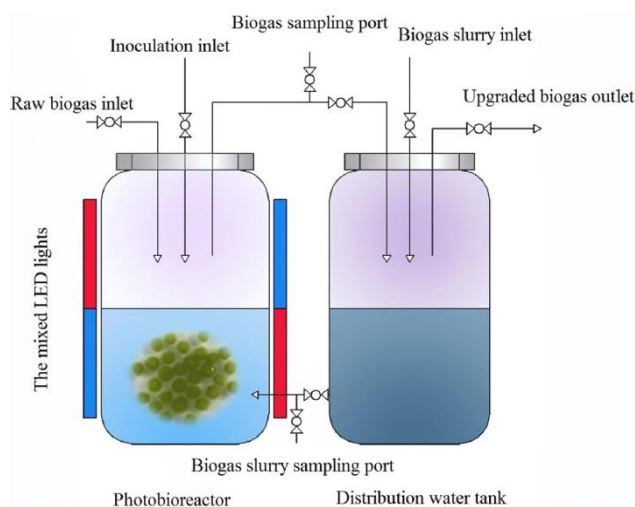
ตารางที่ 2.5 (ต่อ) เปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละวิธีการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ Kadam [25]

Considered parameter	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
CH ₄ losses (%)	< 4	< 2	2-4	< 0.10	< 0.60
CH ₄ recovery (%)	96-98	96-98	96-98	96-99	96-98
Pre-purification	Yes	Recommended	Recommended	Yes	Recommended
H ₂ S co-removal	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N ₂ and O ₂ CO-removal	Possible	No	No	No	Partial
Operation pressure (bar)	3-10	4-10	4-8	Atmospheric	5-8
Pressure at outlet (bar)	4-5	7-10	1.3-7.5	4-5	4-6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบความพร้อมทางด้านเทคนิคและค่าบำรุงรักษาในแต่ละวิธีการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ Kadam [25]

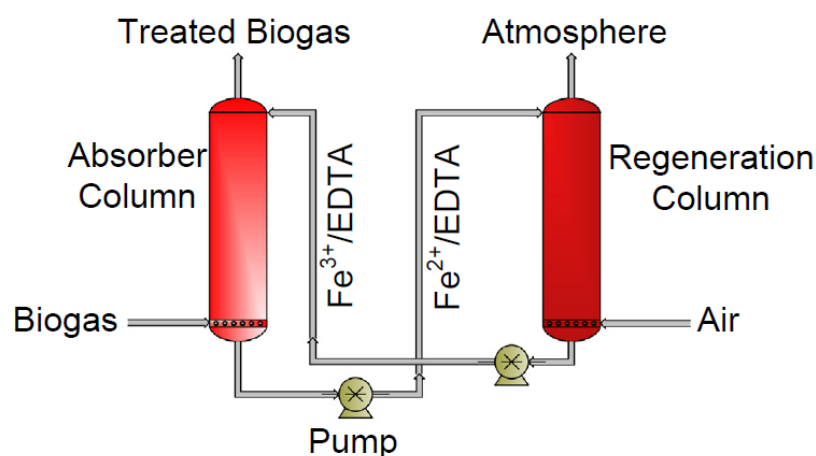
Upgrading technology	Technical availability, (%)	Maintenance cost, (€/yr)
PSA	94	56,000
Water scrubbing	96	15,000
Chemical (amine) scrubbing	91	59,000
Physical absorption	96	39,000
Membrane separation	98	25,000

Weixing Cao และคณะ [26] ศึกษาการนำ fungi 3 ชนิดกับ สาหร่าย *Chlorella vulgaris* มาใช้ในการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ จากผลการทดลองให้เห็นว่า อัตราส่วนช่วงคลื่นแสงของสีแดงและสีน้ำเงินที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 5:5 และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดคือการใช้ *G. lucidum/C. Vulgaris* ด้วยการให้แสง 14 ชั่วโมง และไม่ให้แสง 10 ชั่วโมง ใน 1 วัน โดยมีประสิทธิภาพสูงถึง 75.61 %



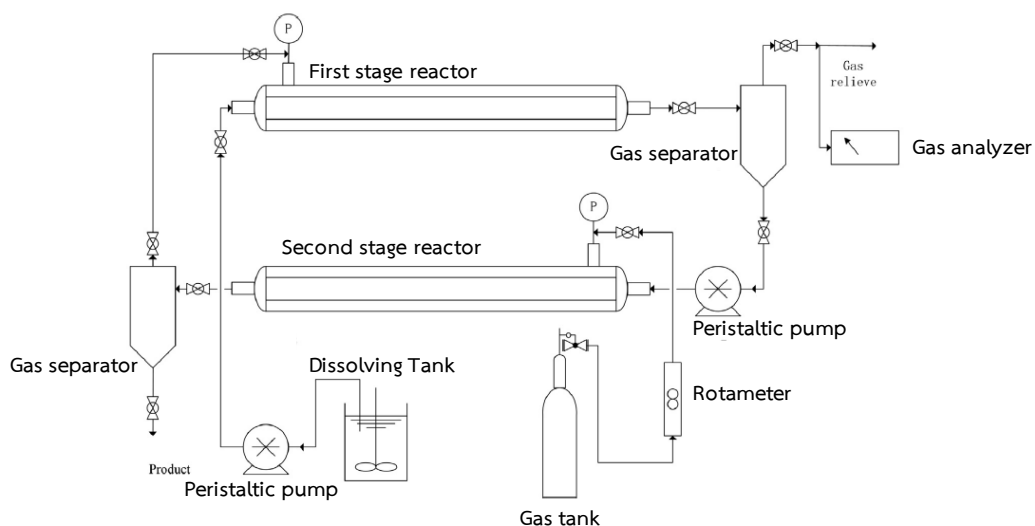
รูปที่ 2.21 ระบบ photo bioreactor ที่ใช้ในการทดลอง [26]

Djeine [27] และคณะ ศึกษาเครื่องทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพโดยใช้สารละลาย Fe-EDTA เป็นตัวดูดซับ CO_2 และ H_2S จากชีวมวลที่เหลือจากการบำบัด ในระดับ bench scale และ pilot scale เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับ ratio L/G, (การไหลของ Fe-EDTA กับการไหลของแก๊ส) กับความแตกต่างของความเข้มข้น Fe-EDTA โดยตามวิธีการ CCRD ผลที่ได้ให้เห็นว่า ทั้ง bench scale และ pilot scale ประสิทธิภาพในการล้าง H_2S จะได้จากค่าของ L/G ที่สูง และความเข้มข้นของ Fe-EDTA ที่สูงตามลำดับ bench scale จะใช้ Fe-EDTA 0.2 mol/litre และ L/G = 1.27 ประสิทธิภาพในการล้าง H_2S อยู่ที่ 99% หลัง 35 นาที เป็นต้นไป สำหรับ pilot scale ประสิทธิภาพสูงสุดในการล้าง H_2S อยู่ที่ 98% และ การล้าง CO_2 18%



รูปที่ 2.22 ระบบการดูดซับที่ใช้ในการทดลอง [27]

Xi และคณะ [28] ศึกษาการไหลสวนทางของ membrane reactors แบบหลาย stage ด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึม CO_2 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเข้มข้นของสาร $\text{Ca}(\text{OH})_2$, อัตราการไหลของน้ำ, สารเติมแต่ง อัตราการไหลของแก๊ส, ระยะห่างของ membrane, และ ความยาวของท่อที่เชื่อมต่อ ผลที่ได้ อัตราการไหลของสารละลายที่สูง, อัตราการไหลแก๊สที่ต่ำ, membrane ที่ยาว, ท่อเชื่อมต่อที่ยาว และ ปริมาณสารเติมแต่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในขณะที่ความเข้มข้นของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หลังจากนั้นได้นำตัวแปรต่าง ๆ ที่ศึกษามาใช้ใน membrane reactor แบบ 2 stage โดยสามารถผลิตแก๊สที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 3% เพิ่มเติมจากผลการทดลอง ควรจะเดินระบบอย่างน้อย 5 ชั่วโมง



รูปที่ 2.23 ระบบการไหลสวนทางของ membrane reactor [28]

Yan และคณะ [29] ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของมีเทนที่มีผลต่อการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพภายใต้ตัวแปร ช่วงแสง LED โดยการใช้สาหร่าย *Chlorella sp* จากการทดลอง แสงผสม LED ทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าใช้แสงสีเดียว โดยอัตราส่วนของช่วงคลื่นแสง LED ที่ดีที่สุดคือ 5:5 (RED:BLUE) และช่วงความเข้มข้นของมีเทนเริ่มต้นที่ดีที่สุดสำหรับการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพคือ 45%-55% สามารถทำบริสุทธิ์มีเทนได้สูงถึง 92.60%

Meier และคณะ [30] ศึกษาผลกระทบของแสง (กลางวัน-กลางคืน) กับการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพื่อทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพในเงื่อนไข lab-scale จากผลการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 1 cycle (กลางวัน-กลางคืน) อยู่ระหว่าง 89-93% และประสิทธิภาพ

ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น

2.8 ช่องว่างการวิจัย

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ

จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ จะเห็นว่าวิธีการล้างแก๊สชีวภาพแบบดูดซึมด้วยน้ำ มีความสามารถในการทำบริสุทธิ์มีเทนและกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูง เมื่อเทียบกับวิธีการล้างแบบอื่น ๆ และเป็นหนึ่งในไม่กี่วิธีที่สามารถกำจัด H₂S ได้ แต่ต้องใช้แรงดันในระบบสูง และต้องควบคุมอุณหภูมิน้ำให้ต่ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

ผู้วิจัย	วิธีการ	ผลที่ได้
Rasi [21]	Water scrubber	CH ₄ สูงกว่า 90 %
Rasi [23]	Water scrubber ความดันสูง	CH ₄ 83-92.1 % CO ₂ เหลือ 4.4-6.3 % N เหลือ 2.5-7.4 % ประสิทธิภาพในการกำจัด H ₂ S 99 %
Maile [22]	Chemical absorption ใช้ monoethanolamide	ประสิทธิภาพในการกำจัด CO ₂ จาก 66 % ที่อุณหภูมิห้อง และ 77% ที่ 40 °C
Maile [24]	Chemical absorption ใช้ Sodium hydroxide เป็นตัวดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	ประสิทธิภาพการกำจัด CO ₂ สูงสุด 66%
Weixing Cao [26]	ใช้สาหร่าย Chlorella vulgaris ในการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพ	ประสิทธิภาพการกำจัด CO ₂ สูงถึง 75.61 %
Djeine [27]	ใช้สารละลาย Fe-EDTA เป็นตัวดูดซึม CO ₂ และ H ₂ S	ประสิทธิภาพสูงสุดในการล้าง H ₂ S อยู่ที่ 98% และการล้าง CO ₂ 18% ในระดับ pilot scale
Xi [28]	Membrane separation แบบ multistage	แก๊สมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 3%
Yan [29]	ใช้สาหร่าย Chlorella sp ในการล้างแก๊สชีวภาพ	CH ₄ สูงถึง 92.60%

ตารางที่ 2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ (ต่อ)

ผู้วิจัย	วิธีการ	ผลที่ได้
Meier [30]	ใช้สาหร่ายเพื่อทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพในระดับ lab-scale	ประสิทธิภาพในการกำจัด CO ₂ ในช่วง 1 cycle (กลางวัน-กลางคืน) อยู่ระหว่าง 89-93%

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

จากการสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กพบว่า หัวฉีดที่ใช้หลักการไหลแบบหมุนควง (swirl type) สามารถสร้างฟองที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 10-50 μm ซึ่งมีหลักการที่ไม่ซับซ้อนสามารถควบคุมขนาดและปริมาณของฟองได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

ผู้ทำวิจัย	การสร้างฟอง	ขนาดฟองเฉลี่ย
Sadatomi [11]	Spherical body in a flowing tube	10 μm
Ohnari [12]	swirl type	10-50 μm
Fujiwara [13]	Venturi type	100 μm
Nakatake [14]	Ejector type	40-50 μm
Sadatomi และ Kawahara [15]	Multi fluid mixture device	10 μm
Tsuge [16]	Pressurized dissolution type	-
Yasuno [17]	Microchannel technique	33.6 - 51.1 μm
Hasagawa [18]	Shear flow in pipe and slits	40-50 μm
Shigeo Fujikawa [19]	rotational porous plate	10-20 μm
Gabbard [20]	Venturi type	500-600 μm

บทที่ 3

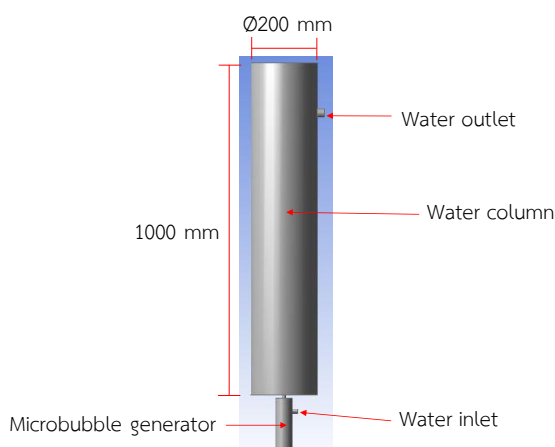
ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

ในบทที่ 3 จะอธิบายถึงส่วนประกอบทั้งหมดของชุดทดลอง ลักษณะและหลักการทำงานของหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลอง วิธีการวัดขนาดฟอง การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการจำลองแก๊สชีวภาพจากการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ และ การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพจริง นำผลการวัดคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้างมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีล้างแก๊สแบบดูดซับด้วยน้ำในปัจจุบัน โดยแนวคิดของงานวิจัยเป็นการใช้วิธีล้างแก๊สแบบดูดซับด้วยน้ำ เมื่อแก๊สชีวภาพผสมกับน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกละลายในน้ำทำให้มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงขึ้น และขนาดฟองที่มีขนาดเล็กลงในระดับไมครอน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การจำลองการไหลในคอลัมน์น้ำ

3.1.1 โมเดลที่ใช้ในการจำลอง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS (Fluent) Ver.15 ในการจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ รูปที่ 3.1 แสดงโมเดลการจำลองการไหลของน้ำ ซึ่งกำหนดให้มีขนาดตามชุดทดลองจริง ในการจำลองจะพิจารณาเฉพาะลักษณะการไหลของน้ำจึงไม่นำแก๊สมาจำลองในโมเดล โมเดลจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่มีทางเข้าน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 mm และทางออกหัวฉีด 11 mm ส่วนที่สองเป็นคอลัมน์น้ำที่มีความสูง 1 m และเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm

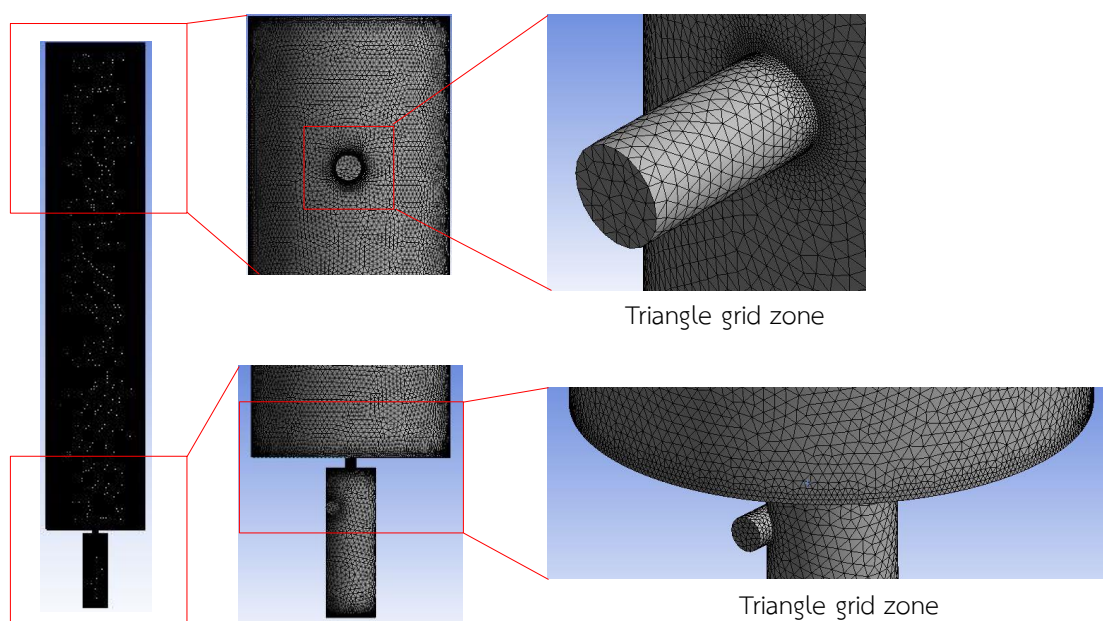


รูปที่ 3.1 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

3.1.2 ขั้นตอนการจำลองการไหล

(1) การสร้างกริด (Meshing)

ใช้การสร้างกริดแบบอิสระด้วยลักษณะของกริดแบบสามเหลี่ยมตลอดทั้งโมเดล โดยเน้นความละเอียดของกริดที่จุดกำเนิดฟองและคอลัมน์น้ำ ซึ่งกริดมีขนาดขนาด 0.5-5 mm จำนวน 2,521,012 elements ดังแสดงในรูปที่ 3.2



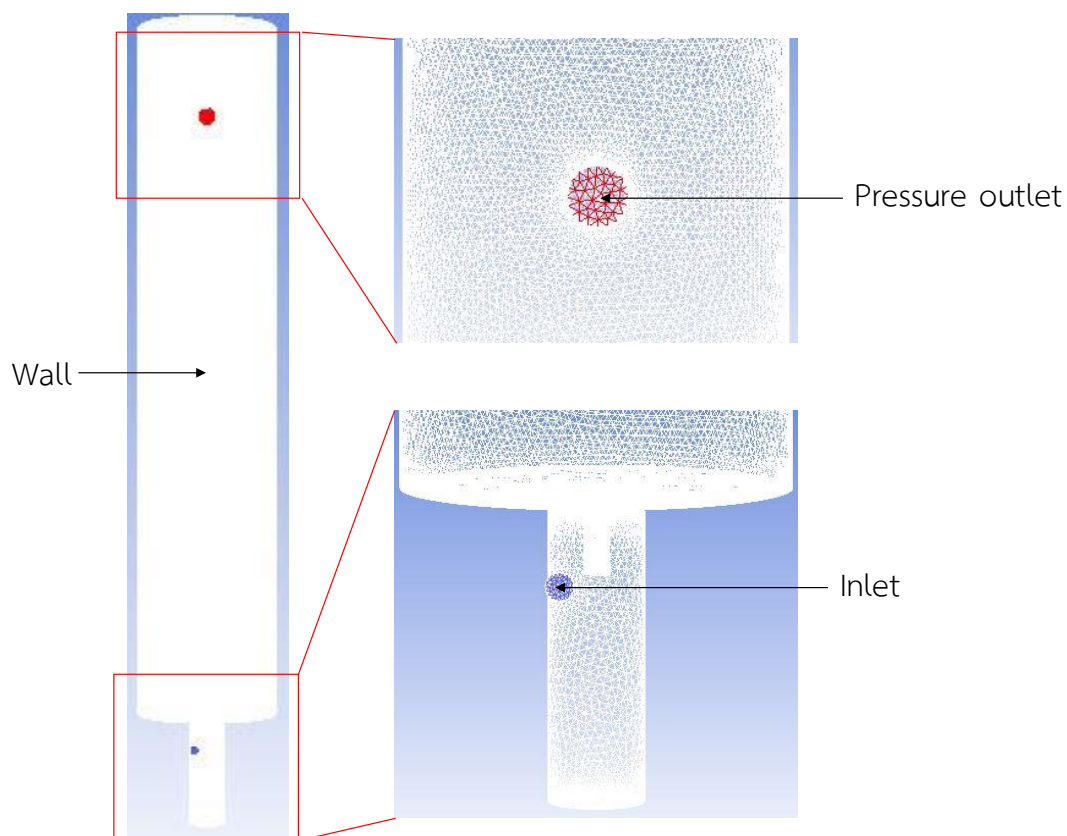
รูปที่ 3.2 รายละเอียดของการสร้างกริดในแบบจำลอง

(2) เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ (Boundary condition)

ในการจำลองการไหลของน้ำในชุดทดลอง ได้วิเคราะห์การไหลเป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน กำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วง สำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบจำลอง SST k- ω model เนื่องจากเป็นโมเดลที่มีการคำนวณที่แม่นยำบริเวณใกล้ผนังและบริเวณที่ไกลออกจากผนังฟุ้งชน [31]

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรก Velocity inlet (สีน้ำเงิน) คือ ผนังที่กำหนดให้เป็นทางเข้าของน้ำ โดยกำหนดลักษณะของทางเข้าในรูปของความเร็วของการไหล ส่วนที่สอง Wall (สีขาว) คือ ผนังที่กำหนดให้เป็นผนังของการไหล ซึ่งพื้นที่ที่กำหนดจะอยู่ในส่วนของผนังของเครื่องกำเนิดฟองอากาศและท่อบังคับการไหล ส่วนที่สาม

Pressure outlet (สีแดง) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหลโดยอยู่ในรูปแบบของความดัน



รูปที่ 3.3 เงื่อนไขขอบเขตการไหลในการคำนวณ

การกำหนดเงื่อนไขของผนังของการไหล ความดันทางออก ความเร็วของน้ำ ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำได้กำหนดดังนี้

เงื่อนไขของผนังของการไหล

กำหนดให้ผนังไม่มีการไถล และไม่มีการเคลื่อนที่

เงื่อนไขของความดันทางออก

กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ

เงื่อนไขของความเร็วทางเข้า

กำหนดความเร็วของไหลที่ทางเข้าให้มีค่าคงที่เท่ากับการทดลองจริงที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที

เงื่อนไขของความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ

กำหนดความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ ณ อุณหภูมิขณะทดลองจริงจะได้ ความหนาแน่นเท่ากับ 997 kg/m^3 และ ความหนืดเท่ากับ $0.000891 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

(3) การคำนวณ

ในการคำนวณจะใช้อัลกอริทึมแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งมีรายละเอียดการกำหนด Spatial discretization ดังแสดงในตารางที่ 3.1

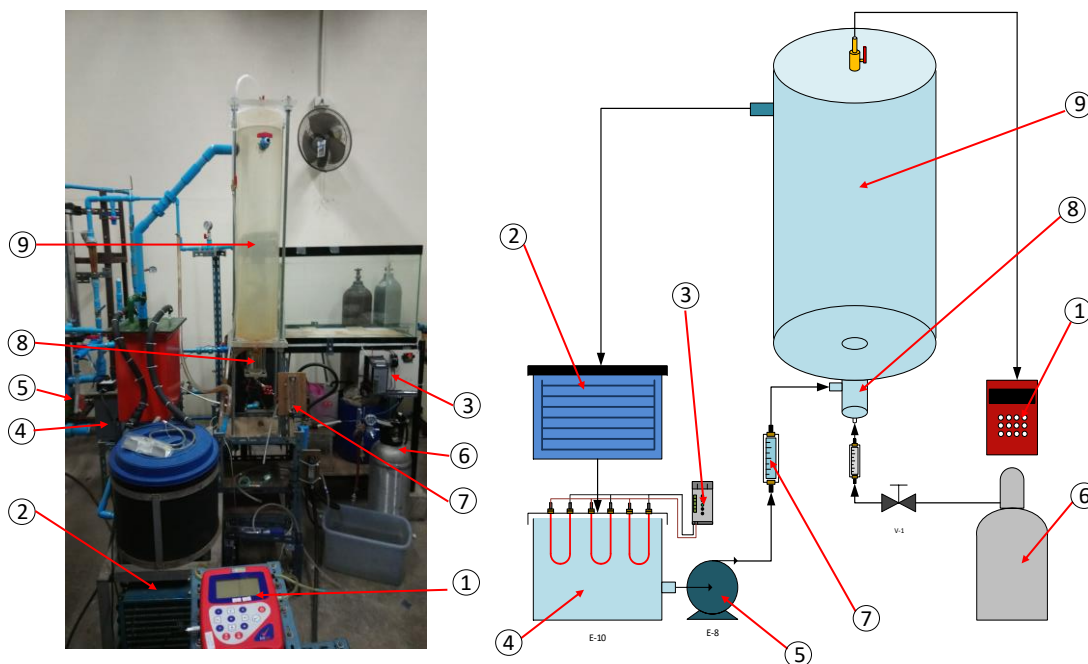
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการกำหนด Spatial discretization

Scheme	SIMPLE
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Second order
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy	Second order upwind
Specific dissipation rate	Second order upwind
Intermittency	Second order upwind
Momentum thickness Re	Second order upwind

3.2 รายละเอียดชุดทดลอง

3.2.1 ชุดทดลองการกำจัดแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ

รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีดูดซับด้วยน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้



- ① biogas analyzer ② ชุดทำความเย็น ③ ชุดควบคุมอุณหภูมิ ④ heater ⑤ ปั๊มน้ำแบบหอยโข่ง
⑥ ตัวอย่างแก๊สชีวภาพ ⑦ rotameter ⑧ หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก ⑨ คอลัมน์น้ำ

รูปที่ 3.4 ชุดทดลองที่ใช้การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

(1) Biogas analyzer รุ่น Biogas check Geotech ใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในการวัดแก๊สมีเทน (CH_4 0-100%) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 0-100%) ออกซิเจน (O_2 0-25%) วัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี แก๊สอื่น ๆ สามารถวัดได้โดยการต่อพอร์ตภายนอก สามารถวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยใช้ anemometer, orifice plate และ pitot tube วัดแรงดัน static และแรงดันต่าง ๆ ค่าแก๊สที่อ่านได้จะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปอย่างน้อย 30 วินาที

(2) ชุดทำความเย็น เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิน้ำให้ต่ำกว่าที่กำหนดซึ่งทำงานร่วมกับฮีตเตอร์เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่

(3) ชุดควบคุมอุณหภูมิ เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ด้วยชุดควบคุม SCR 200-480 VAC 50/60 Hz 45A แสดงค่าผ่านหน้าจอดีจิดอล รุ่น BSC shinko โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไม่เกิน ± 0.5 °C

(4) ฮีตเตอร์ ขนาด 1500 W ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิหลังจากผ่านชุดทำความเย็นเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด

(5) ปั๊มน้ำแบบหอยโข่ง ขนาด 2 แรงม้า รุ่น 2DK 205 สำหรับเดินระบบน้ำให้กับชุดทดลอง

(6) ตัวอย่างแก๊สชีวภาพ เป็นแก๊สที่ใช้สำหรับการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของชุดทดลอง

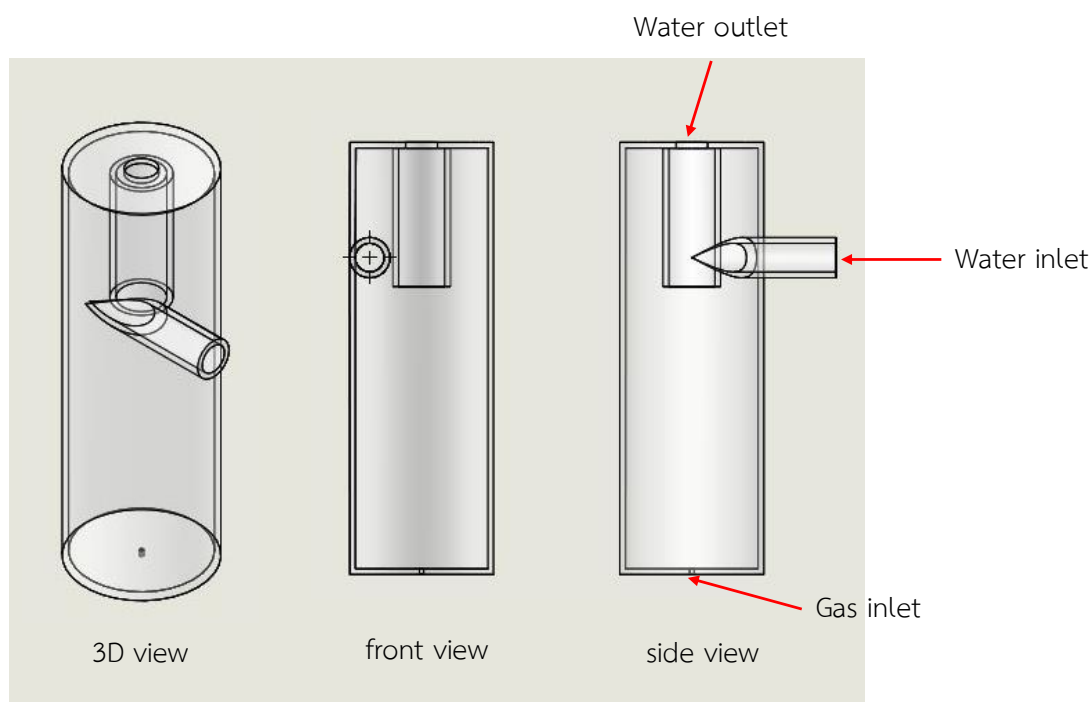
(7) โรตاميเตอร์ เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการไหลในขณะทดลอง โดยใช้วาล์วเพื่อกำหนดอัตราการไหล โรตاميเตอร์น้ำจะใช้ช่วงการวัดที่ 10-60 ลิตร/นาที และสำหรับแก๊สจะใช้ที่ 0-0.1 ลิตร/นาที

(8) หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก ถูกติดตั้งบริเวณด้านล่างของคอลัมน์น้ำเพื่อสร้างฟองแก๊สที่ถูกดูดจากทางด้านล่างของหัวฉีด เพื่อเปลี่ยนขนาดฟองให้เล็กเป็นระดับไมครอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 150 mm

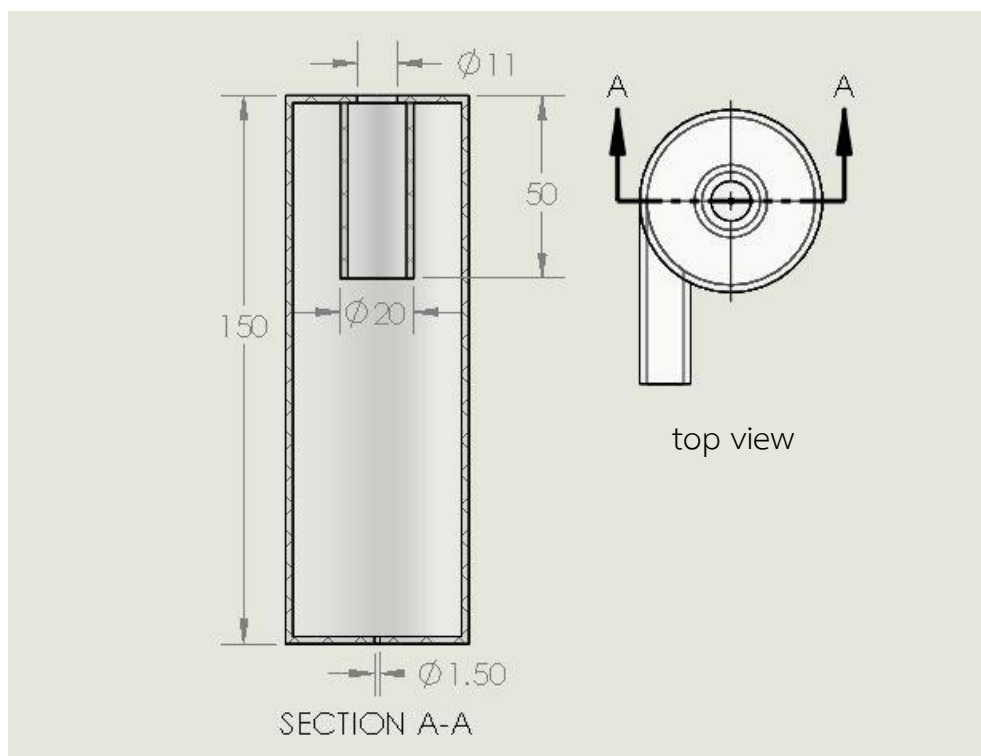
(9) คอลัมน์น้ำ ทำจากอะครีลิกทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm และสูง 100 cm เป็นส่วนหลักที่ใช้สำหรับการทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์และสังเกตขนาดของฟองที่เกิดขึ้น

3.2.2 หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบการไหลหมุนควง ใช้หลักการตัดเฉือนของน้ำผสมกับแก๊สที่ถูกดูดเข้ามาอย่างรุนแรงจนเกิดเป็นฟองขนาดเล็ก โดยมีท่อบังคับการไหลตรงแกนกลางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างฟอง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก



รูปที่ 3.5 ลักษณะของหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก (ต่อ)

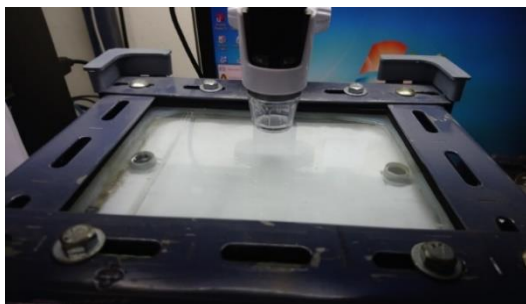
หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กลักษณะทรงกระบอกทำจากอะครีลิก ขนาด ความหนา ยาว และเส้นผ่านศูนย์กลาง 3, 150 และ 50 mm ตามลำดับ น้ำจะถูกส่งเข้ามาทางท่อขนาด 14 mm ที่ถูกติดตั้งในแนวสัมผัสของท่อทรงกระบอก 50 mm เกิดการหมุนวน สร้างความดันต่ำภายในหัวฉีดทำให้แก๊สถูกดูดเข้ามาผสมได้เองผ่านทางท่อด้านล่างขนาด 1.5 mm ไหลผ่านท่อบังคับการไหลขนาด 20 mm ออกทางหัวฉีดที่ปากทางออกขนาด 11 mm แล้วเกิดเป็นฟองขนาดเล็ก

3.3 การศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

การศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อขนาดฟอง

3.3.1 ชุดทดลองวัดฟองขนาดเล็ก

อุปกรณ์ในการวัดฟองขนาดเล็กประกอบด้วย ห้องกักฟองที่ทำจากกระจกขนาดกว้าง ยาว และ สูง 120, 160 และ 2 mm ตามลำดับ ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า (Digital USB Microscope Aopute H1000x 5.0 Mega Pixel) สำหรับถ่ายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

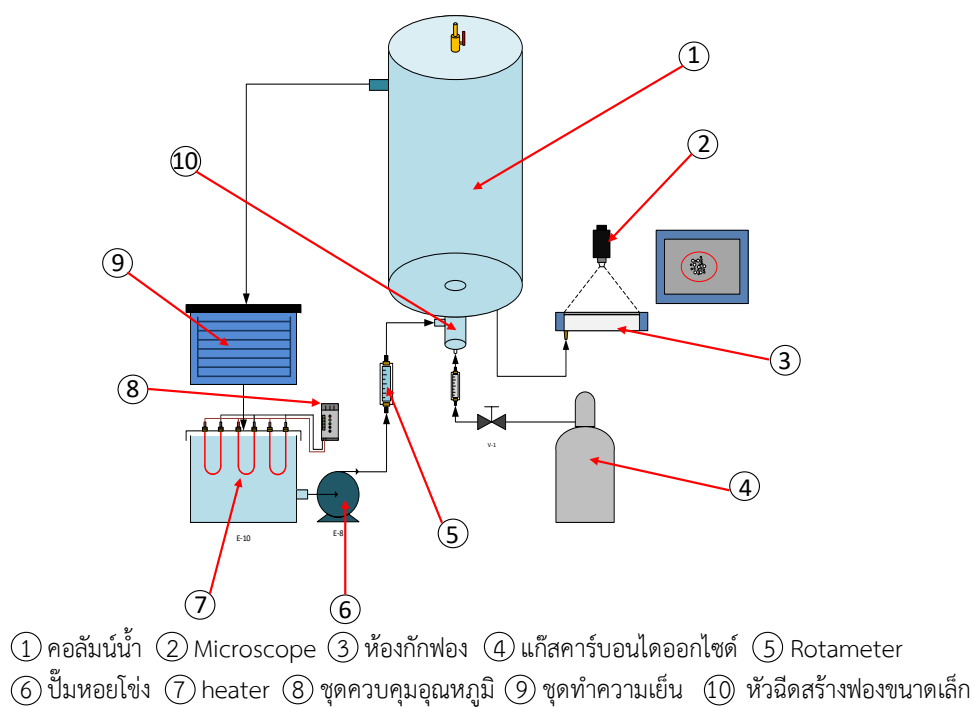


รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับการศึกษายภาพวัตฟองขนาดเล็ก

กำหนดอัตราการไหลแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที เพื่อควบคุมปัจจัยของปริมาณแก๊สไม่ให้มีผลกับขนาดฟองในทุกอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งเงื่อนไขในการศึกษาการสร้างฟองขนาดเล็กแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการศึกษาการสร้างฟองขนาดเล็ก

อัตราการไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35
อัตราการไหลแก๊ส (ลิตร/นาที)	0.1



รูปที่ 3.7 ชุดทดลองศึกษาภาพถ่ายฟองขนาดเล็ก

3.3.2 วิธีการทดลองการวัดฟองขนาดเล็ก

น้ำในคอลัมน์จะถูกดูดผ่านทางวาล์วด้านล่างไหลเข้าห้องกักฟอง เมื่อน้ำไหลผ่านห้องกักฟองจนเต็ม วาล์วตรงทางออกของห้องกักฟองจะถูกปิดเพื่อบันทึกภาพแล้วนำภาพไปหาขนาดฟองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้การเขียนโค้ดผ่านโปรแกรม MATLAB หลักการวิเคราะห์ภาพจะเป็นการนำภาพถ่ายขนาดฟองมาตรวจจับเส้นวงกลมเพื่อหาเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยของ pixel แล้วนำไปคำนวณเป็นเส้นรอบวง หน่วย μm จะถูกแปลงโดยการเทียบ scale ของภาพถ่ายไม้บรรทัดที่กำลังขยายเดียวกันกับภาพถ่ายขนาดฟองเพื่อแปลงเป็นขนาดฟองจริง ๆ ต่อไป ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างภาพ 20 ภาพ ทุก ๆ 5 นาที ขนาดของแต่ละฟองในแต่ละภาพจะถูกนำมาเฉลี่ย

3.4 การศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

การศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกัน กับขนาดฟองในกรณีอัตราการไหลที่เปลี่ยนไป

3.4.1 ชุดทดลองการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

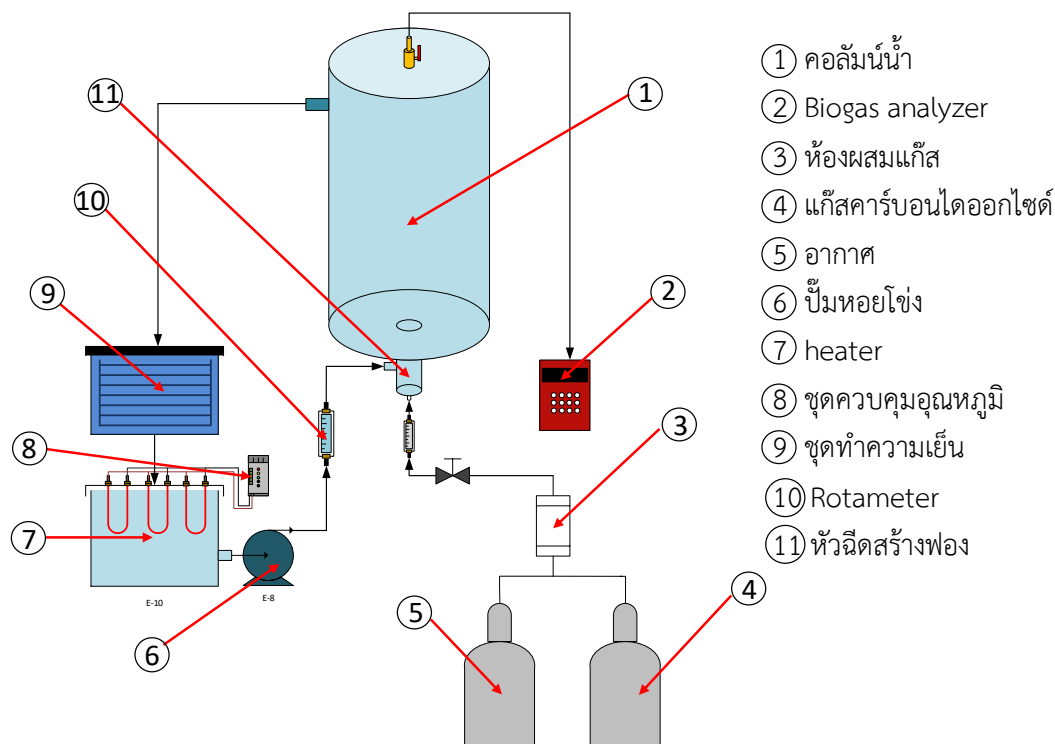
แก๊สที่ใช้ในการทดลองเป็นแก๊สที่ได้จากการผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศในอัตราส่วนที่กำหนดเพื่อจำลองเป็นแก๊สชีวภาพจริงที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลหลังผสมแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เพื่อคงความสามารถในการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งมีเงื่อนไขการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

อัตราการไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35
อัตราการไหลแก๊ส (ลิตร/นาที)	0.1
ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	30, 40, 50
อุณหภูมิน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	25 ± 0.5

แก๊สจะถูกผสมที่ห้องผสม เป็น PVC ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 300 mm แก๊สที่ถูกปล่อยก่อนการผสมจะถูกควบคุมด้วยโรตاميเตอร์ เพื่อกำหนดความเข้มข้น

คาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลอง หลังจากผ่านห้องผสม กำหนดอัตราการไหลของแก๊สที่ 0.1 ลิตร/นาที ส่วนประกอบชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดทดลองการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

3.4.2 วิธีการทดลองการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

แก๊สหลังการล้างจะถูกวัดเพื่อหาค่าประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดแก๊สชีวภาพ ทุก ๆ 15 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการที่ (3.1)

$$\text{CO}_2 \text{ removal (\%)} = \frac{(C_r - C_p)}{C_r} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยที่ C_r คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้าง (%)

C_p คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้าง ณ เวลาใด ๆ (%)

ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกจะถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพื่อนำไปคำนวณหา CO_2 transfer coefficient, CO_2 capacity, CO_2 transfer rate และ CO_2 transfer efficiency ตามสมการที่ (3.2), (3.3), (3.4) และ (3.5)

$$K_L a = 2.303 \left(\frac{\log(C_s - C_t)_1 - \log(C_s - C_t)_2}{t_2 - t_1} \right) \quad (3.2)$$

โดยที่ $K_L a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 transfer coefficient)
 C_s คือ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 °C (mg/litre)
 C_t คือ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำตามเวลา (mg/litre)
 t คือ เวลา (s)

$$CO_2 \text{ capacity} = K_L a \left(C_s \frac{P + 73.53h - p}{760 - p} \right) V \quad (3.3)$$

โดยที่ P คือ ความดันบรรยากาศที่เติมแก๊ส (mmHg)
 h คือ ความลึกจากผิวน้ำถึงหัวฉีดสร้างฟอง (m)
 p คือ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C
 V คือ ปริมาณน้ำ (litre)

$$R_0 = \frac{CO_2 \text{ capacity}}{P_{in}} \quad (3.4)$$

โดยที่ R_0 คือ อัตราการถ่ายเทแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg CO_2 /kW-hr)
 P_{in} คือ กำลังงานที่ใช้ในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ (kW)

$$E = \left(\frac{CO_2 \text{ capacity}}{A} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ E คือ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 transfer efficiency)
 A คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงในน้ำ (mg CO_2 /hr)

3.5 การศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

วัตถุประสงค์ของการศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก คือ การหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพจริงเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มที่ได้กับการทดลองการการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

3.5.1 ชุดทดลองการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ

แก๊สทดลองเก็บจากโรงงานซึ่งเป็นแก๊สที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย โดยแก๊สจะถูกป้อนเข้าชุดทดลองโดยผ่านการสร้างแรงดันต่ำที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก ซึ่งถูกควบคุมอัตราการไหล 0.1 ลิตร/นาที เงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

อัตราการไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	20, 25, 30 และ 35
อัตราการไหลแก๊ส (ลิตร/นาที)	0.1
อุณหภูมิน้ำ (°C)	25±0.5

3.5.2 วิธีการทดลองการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ

แก๊สชีวภาพที่ใช้สำหรับการทดลองจะถูกวัดองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลอง วัดแก๊สบริเวณทางออกทุก ๆ 15 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และการทำบริสุทธิ์มีเทนในแก๊สชีวภาพโดยใช้สมการ (3.1) และ (3.6)

$$\text{CO}_2 \text{ removal (\%)} = \frac{(C_r - C_p)}{C_r} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\text{CH}_4 \text{ enrichment (\%)} = \frac{(C_{p(\text{CH}_4)} - C_{r(\text{CH}_4)})}{C_{r(\text{CH}_4)}} \times 100\% \quad (3.6)$$

โดยที่ $C_{r(\text{CH}_4)}$ คือ ค่าความเข้มข้นมีเทนก่อนการล้าง (%)

$C_{p(\text{CH}_4)}$ คือ ค่าความเข้มข้นมีเทนหลังการล้าง ณ เวลาใด ๆ (%)

ในชุดทดลองจะติดตั้ง pressure gauge บริเวณทางเข้าและทางออกน้ำเพื่อนำไปคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการล้างแก๊สชีวภาพ (Energy consumption) สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับวิธีล้างแก๊สด้วยน้ำที่ถูกใช้ในปัจจุบัน

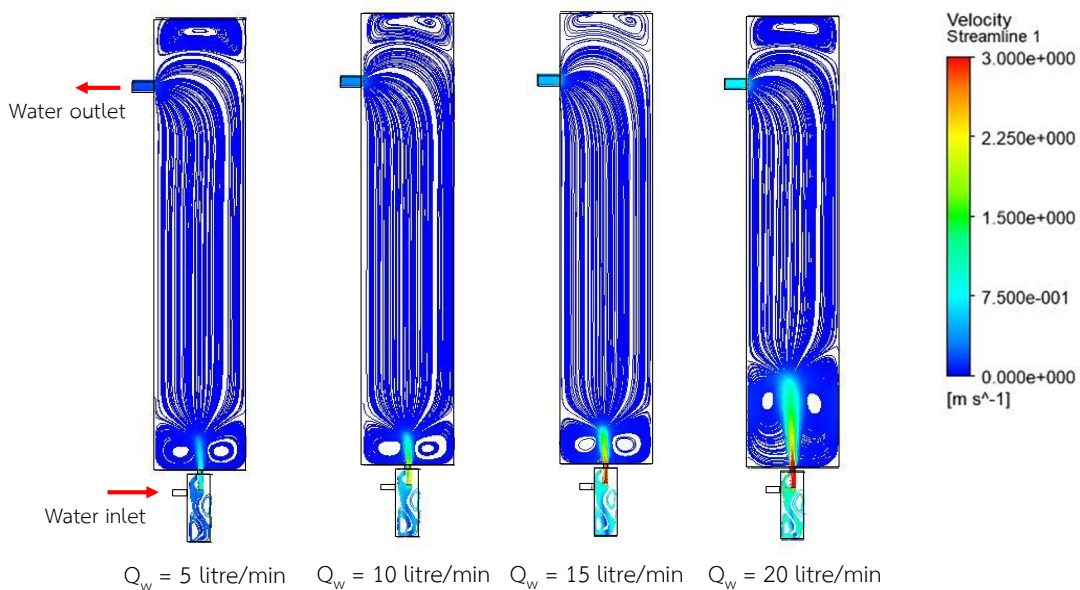
บทที่ 4

ผลการศึกษา

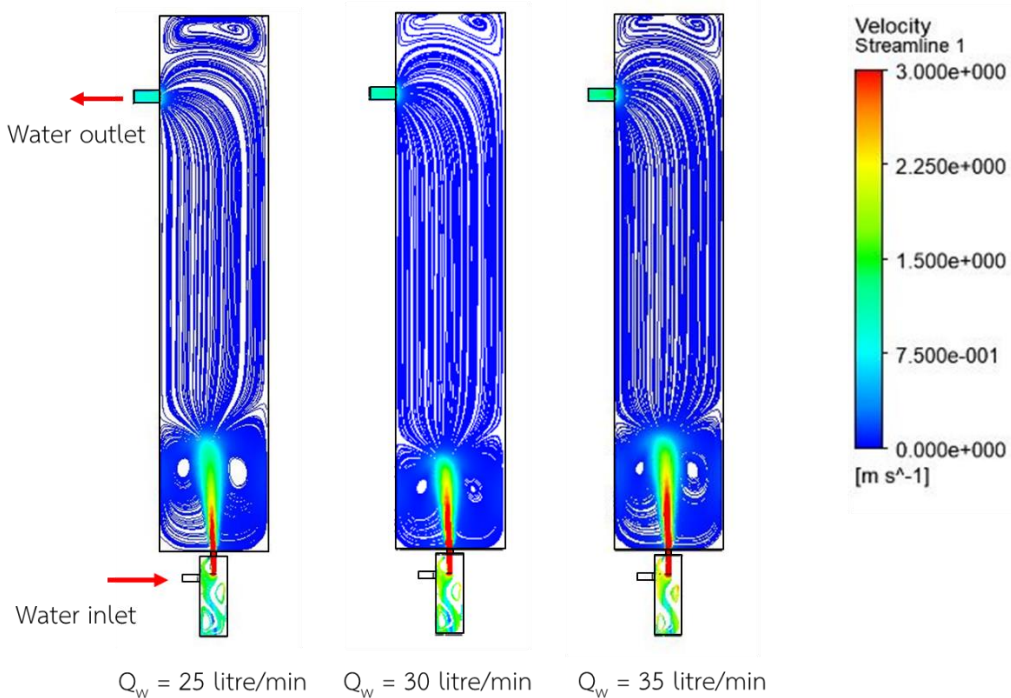
บทนี้จะอธิบายเนื้อหาเป็น 4 ส่วนหลัก ประกอบด้วย การศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดลองด้วย CFD การศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก การศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กด้วยการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ และการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กด้วยแก๊สชีวภาพจริง ซึ่งในรายละเอียดจะอธิบายถึง การจำลองลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดลองจากการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ขนาดของฟองที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำความสามารถในการละลายน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นและขนาดฟองที่ต่างกัน การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพจริง และตัวแปรต่าง ๆ ที่แสดงถึงความสามารถในการละลายน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดลองด้วยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

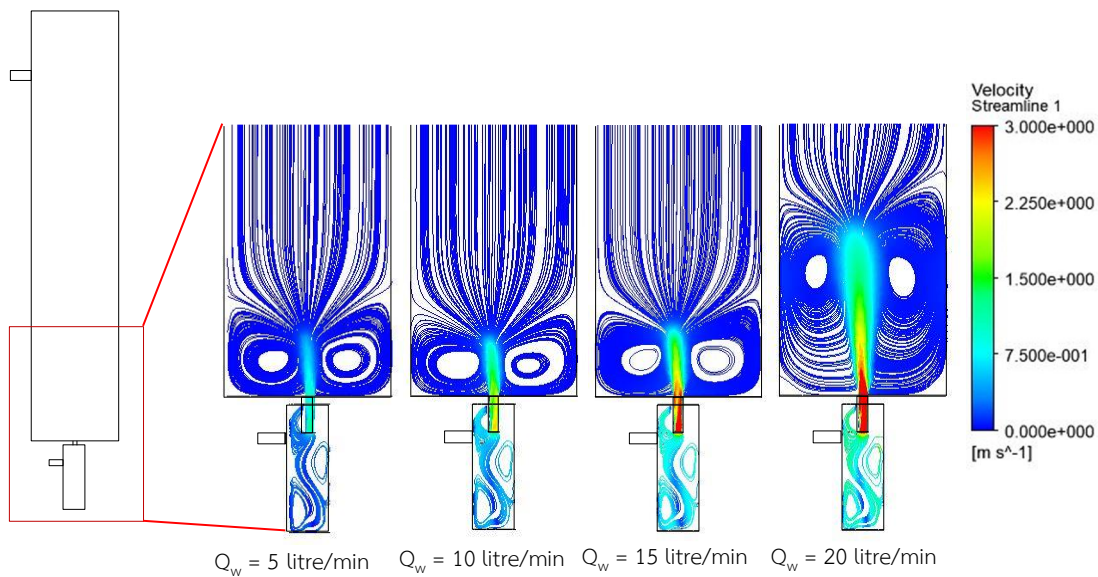
รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองความเร็วการไหลของน้ำภายในชุดทดลองที่อัตราการไหลของน้ำต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณคอลัมน์น้ำมีลักษณะการไหลแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) ส่วนของน้ำที่เกิดการหมุนวน เป็นลักษณะการหมุนวนจากแกนกลางออกทางด้านข้าง จุดที่พุ่งออกจากหัวฉีดจะมีความเร็วสูงที่สุดและลดลงเมื่อเกิดการหมุนวน ซึ่งบริเวณที่เกิดการไหลปั่นป่วนนี้จะช่วยให้แก๊สกับน้ำเกิดการผสมกันได้ดียิ่งขึ้น 2) ส่วนของน้ำที่ไหลในแนวตรงต่อจากส่วนที่หมุนวนด้านล่างจนถึงปากทางออก ในแต่ละอัตราการไหลน้ำจะเห็นว่าลักษณะการไหลของน้ำเป็นรูปแบบเดียวกัน แต่จะมีความแตกต่างกันที่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของน้ำบริเวณปากทางเข้าหัวฉีด จะทำให้ความเร็วที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดสูงและกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ในการหมุนวนกว้างขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูป 4.2



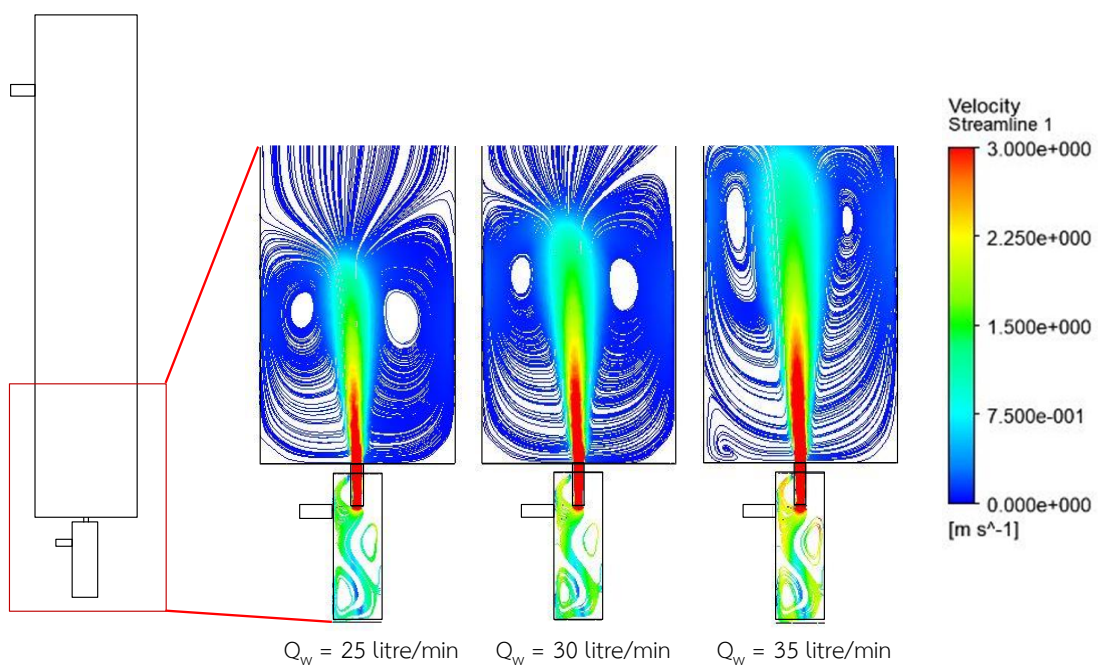
รูปที่ 4.1 ผลความเร็วของการไหลของน้ำในชุดทดลองที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 ผลความเร็วของการไหลของน้ำในชุดทดลองที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ (ต่อ)

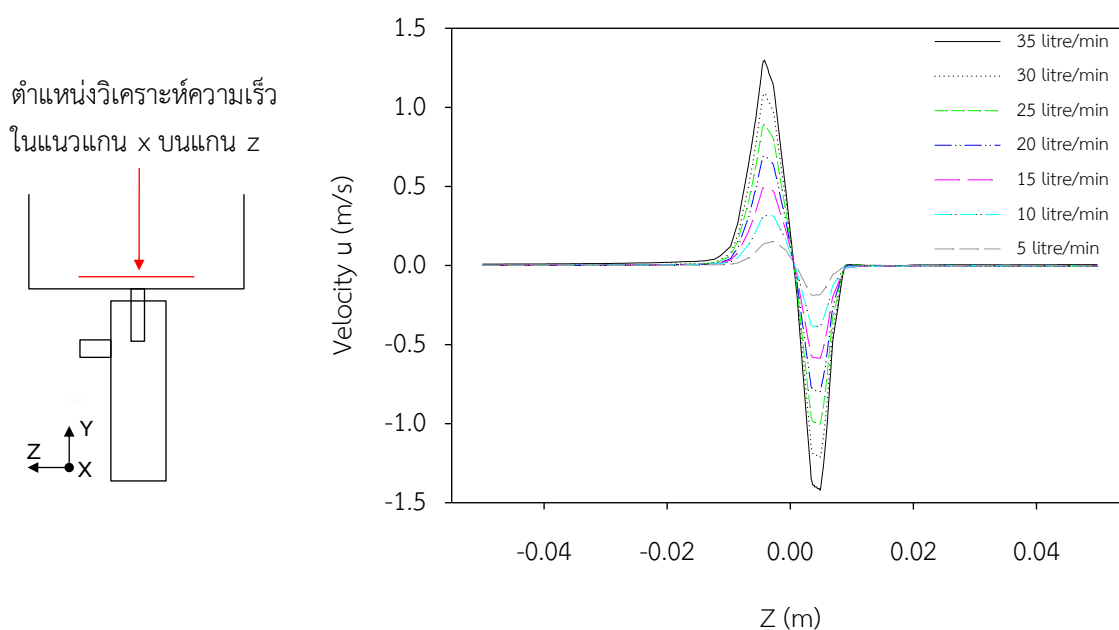


รูปที่ 4.2 ผลความเร็วของการไหลน้ำในส่วนล่างชุดทดลองที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ



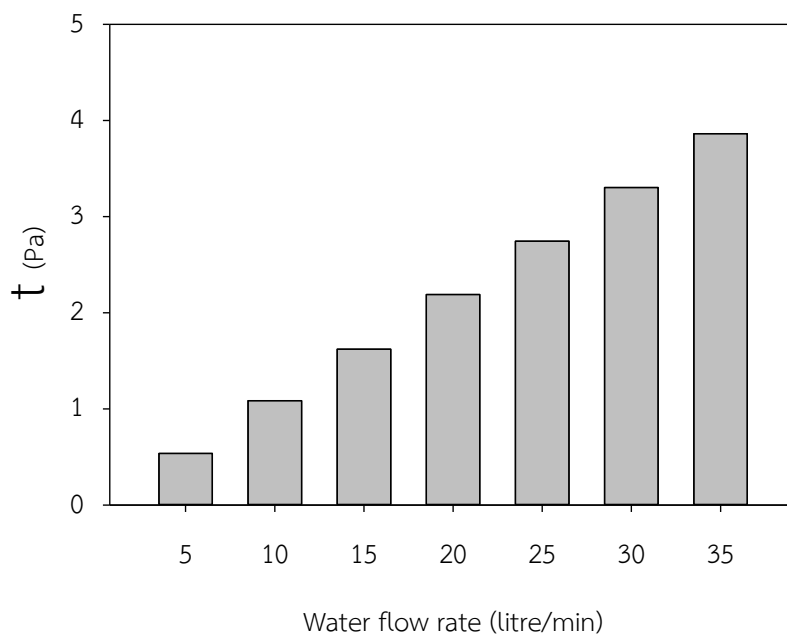
รูปที่ 4.2 ผลความเร็วของการไหลน้ำในส่วนล่างชุดทดลองที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ (ต่อ)

รูปที่ 4.3 แสดงความเร็วในแนวสัมผัสของแกน z ภาพรวมของรูปแบบความเร็วแนวสัมผัส จะเห็นว่ามีความเร็วสูงในบริเวณแกนกลางของชุดทดลองและจะลดต่ำลงตามระยะที่ออกจาก แกนกลางจนถึงขอบนอก อัตราการไหลของน้ำแปรผันตรงกับความเร็วในแนวสัมผัสแกน x บนแกน z โดยที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที มีความเร็วในแนวสัมผัสสูงสุด ซึ่งความเร็วในแนวสัมผัส ที่มาก จะส่งผลให้เกิดแรงตัดเฉือนเกิดเป็นฟองขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสแกน x ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนแกน z

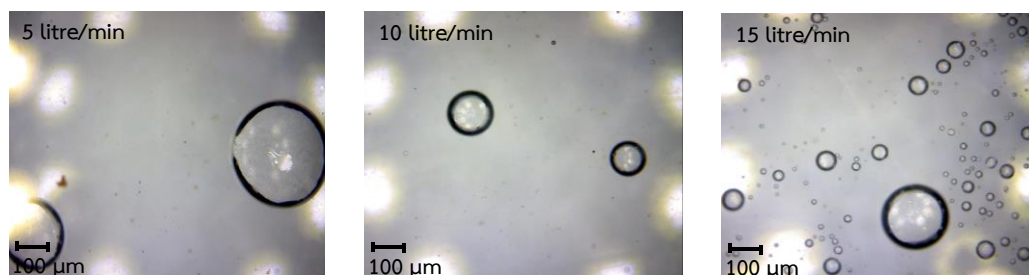
รูปที่ 4.4 แสดงความชันของกราฟความเร็วในแนวสัมผัสบนแกน z ในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า ความชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที มีความชันสูง ที่สุด โดยความชันสูงแสดงให้เห็นถึงแรงตัดเฉือนที่มากซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสามารถในการ สร้างฟองขนาดเล็กและปริมาณฟองที่มาก



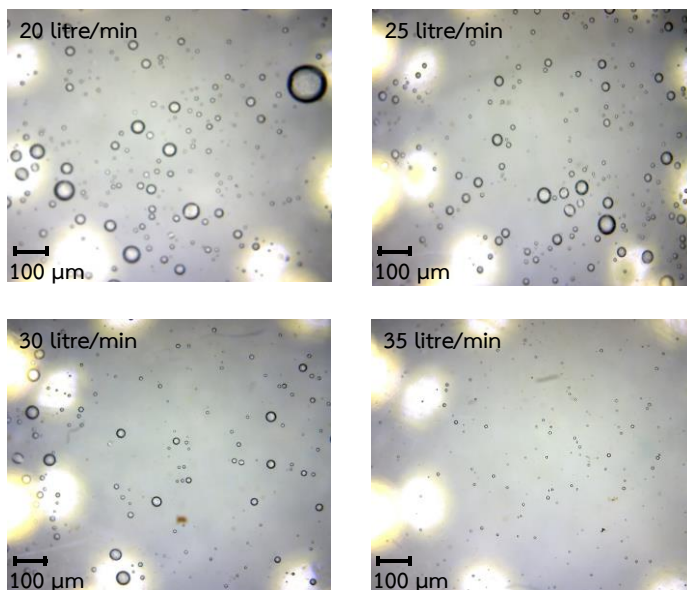
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันของความเร็วในแนวแกน x บนแกน z กับ อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน

4.2 ผลการศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

จากผลการทดลองในแต่ละอัตราการไหลของน้ำพบว่าสามารถผลิตฟองที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอน แต่จะมีขนาดและปริมาณฟองที่แตกต่างกัน ซึ่งในอัตราการไหลน้ำ 5, 10 และ 15 ลิตร/นาที แก๊สที่ถูกดูดเข้ามาจะไม่มีความเสี่ยง มีขนาดฟองที่ใหญ่และปริมาณฟองน้อย ในอัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตร/นาที ขึ้นไป ขนาดฟองจะเริ่มเล็กลงและมีปริมาณฟองมากตามอัตราการไหลของน้ำที่มากขึ้น โดยที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที จะมีขนาดและปริมาณฟองที่ดีที่สุด ซึ่งภาพถ่ายขนาดฟองที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราการไหลของน้ำแสดงดังรูปที่ 4.5

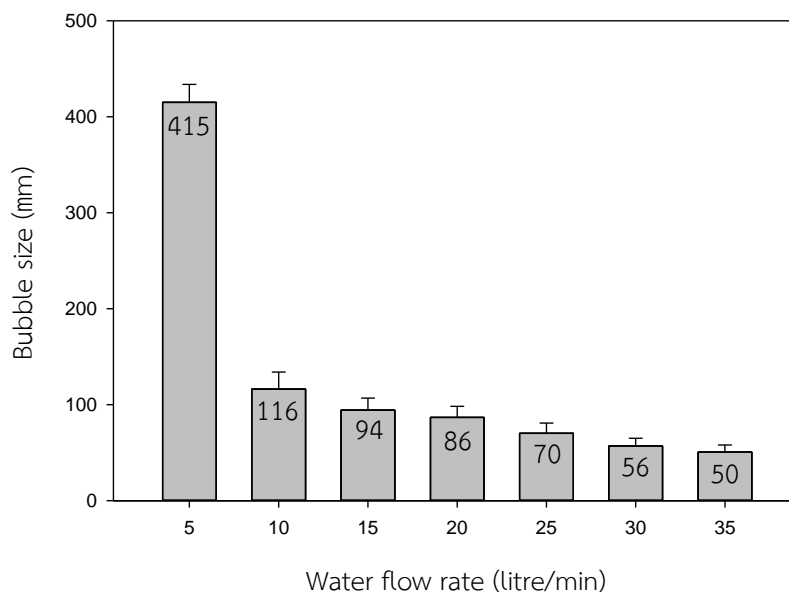


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายฟองขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล ที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายฟองขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล ที่อัตราการไหลน้ำต่าง ๆ (ต่อ)

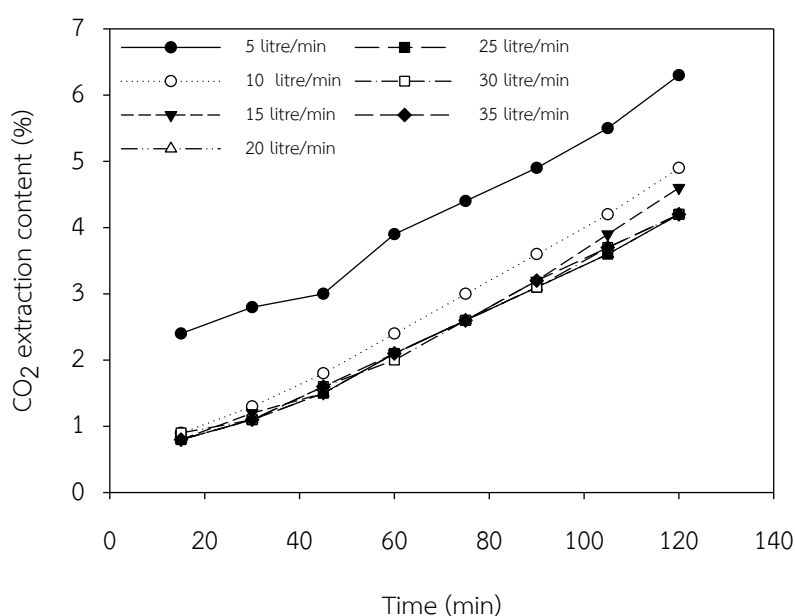
จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายฟองจากกล้องจุลทรรศน์พบว่า อัตราการไหลน้ำ 5 ลิตร/นาที มีขนาดฟองที่ใหญ่ที่สุด 415 µm เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ขนาดฟองจะเล็กลง ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นเรื่อย ๆ ความแตกต่างของขนาดฟองจะเริ่มน้อยลง โดยที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที มีขนาดฟองที่เล็กที่สุด 50 µm ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองในแต่ละอัตราการไหลน้ำ

4.3 ผลการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

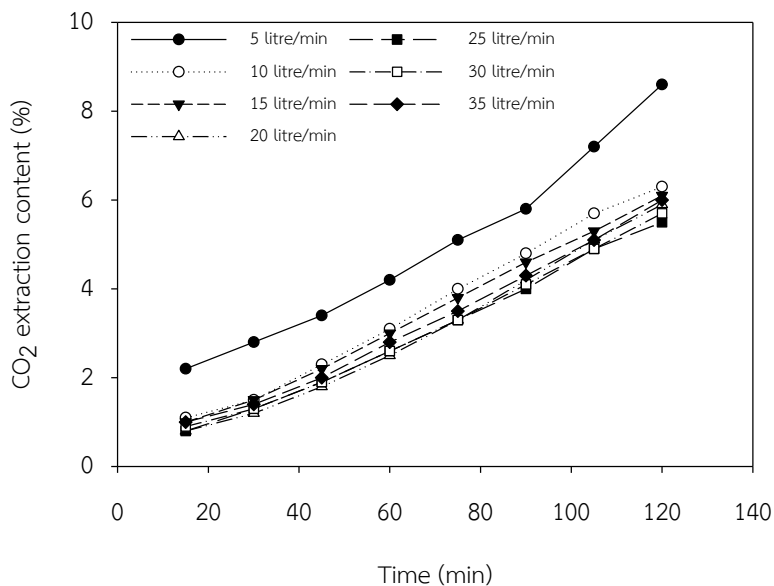
รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออก (CO₂ extraction content) กำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 30% จะเห็นว่าในทุกอัตราการไหลของน้ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้างจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ตามคุณภาพน้ำที่ลดลงเนื่องจากค่าความเป็นกรดของน้ำที่เกิดจากการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ในเวลา 15 นาทีแรกหลังการทดลอง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทางออกสูงสุด 2.4% ที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที โดยมีปริมาณคาร์บอนสูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง 6.3% มีความแตกต่างกับอัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตร/นาที ถึง 1.4%



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลง %CO₂ ที่ทางออกในกรณีความเข้มข้น CO₂ ทางเข้า 30%

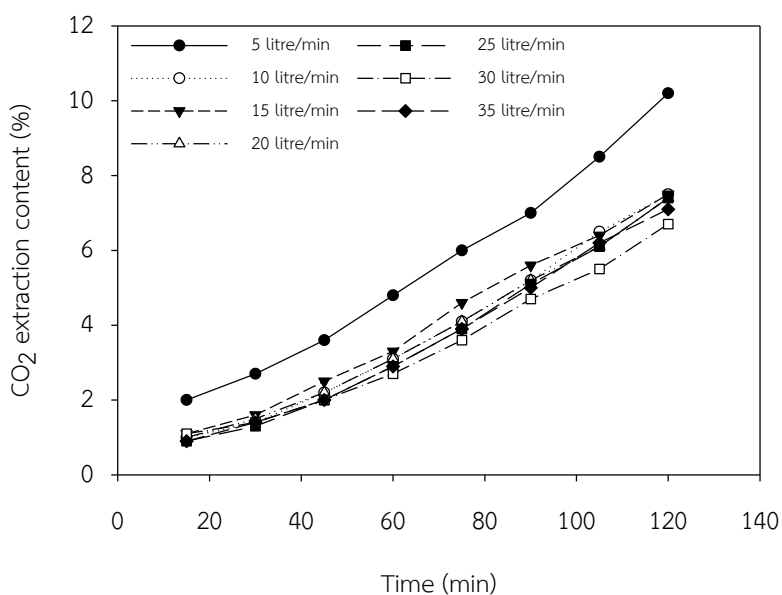
รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออก กำหนดความเข้มข้น 40% พบว่าอัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที ยังคงมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงสุด ซึ่งมีค่า 8.6% ที่เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่น ๆ จะเห็นว่าความแตกต่างของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกยังคงน้อยและเริ่มกระจายตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.7

กรณีกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลอง 50% ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าที่เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกในแต่ละอัตราการไหลน้ำมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ยกเว้นกรณีที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงสุด 10.2%



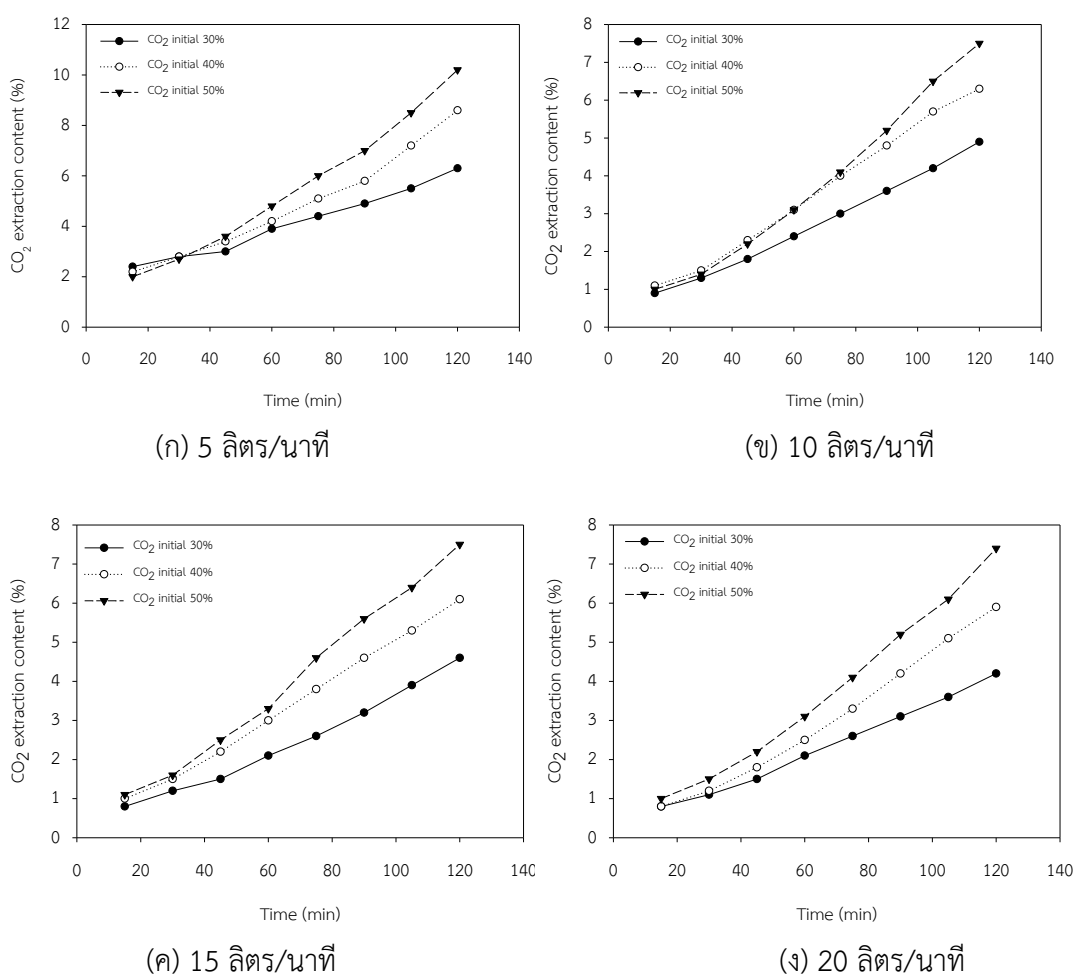
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลง %CO₂ ที่ทางออกในกรณีความเข้มข้น CO₂ ทางเข้า 40%

จากการทดลองทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกสูงและแตกต่างจากกรณีอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด เมื่อกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองสูงขึ้น ปริมาณแก๊สตรงบริเวณทางออกจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและทำให้ความแตกต่างในแต่ละอัตราการไหลลดลง

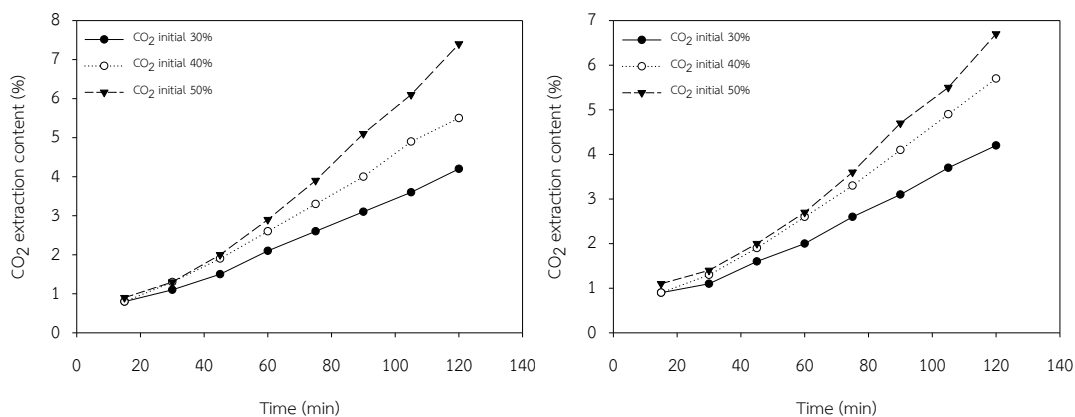


รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลง %CO₂ ที่ทางออกในกรณีความเข้มข้น CO₂ ทางเข้า 50%

รูปที่ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลาที่ทางออกชุดทดลอง โดยเปรียบเทียบกรณีอัตราการไหลน้ำเดียวกันในแต่ละความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในทุกอัตราการไหลของน้ำ ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 50% จะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงสุด ตามด้วย 40% และ 30% แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้างมีผลต่อการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าขนาดฟองที่เล็กลง ซึ่งเมื่อปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้างสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงขึ้นตามไปด้วย

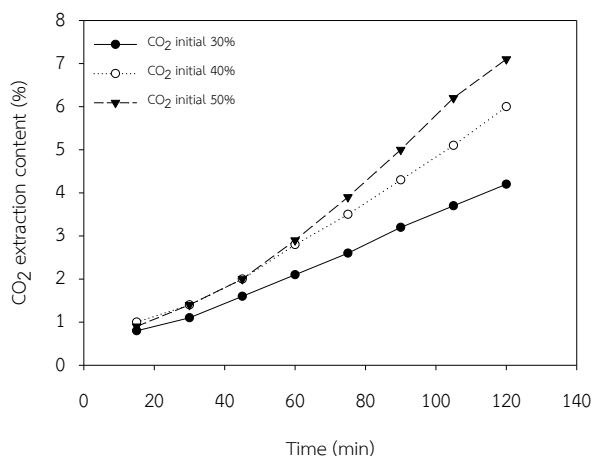


รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลง %CO₂ ที่ทางออกในกรณีอัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ



(จ) 25 ลิตร/นาที่

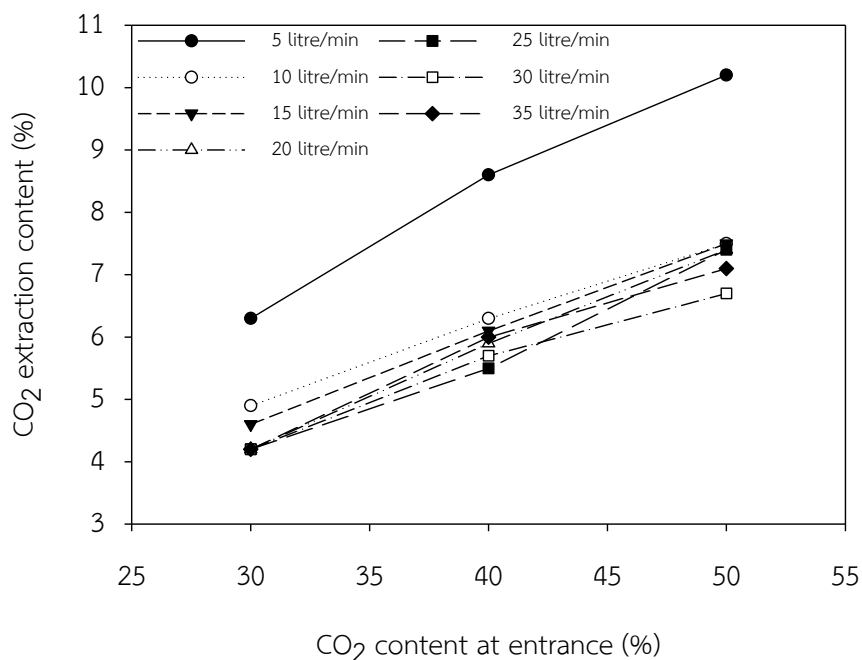
(ฉ) 30 ลิตร/นาที่



(ข) 35 ลิตร/นาที่

รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลง %CO₂ ที่ทางออกในกรณีอัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ (ต่อ)

รูปที่ 4.11 แสดงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกและทางเข้าที่กรณีอัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ ที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 30% มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที่ มีค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในทุกกรณี อัตราการไหลของน้ำ 20-35 ลิตร/นาที่ ลักษณะความแตกต่างของคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มเปลี่ยนแปลงจากที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 30% ที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 50% จะเห็นว่า ที่อัตราการไหลน้ำ 10 และ 15 ลิตร/นาที่ ยังคงมีค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ตามด้วยที่อัตราการไหลของน้ำ 20 และ 25 ลิตร/นาที่ ซึ่งที่อัตราการไหลของน้ำ 30 และ 35 ลิตร/นาที่มีแนวโน้มของการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกน้อยลง



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลง %CO₂ ทางออกและทางเข้าในกรณีอัตราการไหลต่าง ๆ ของน้ำที่เวลา 2 ชั่วโมง

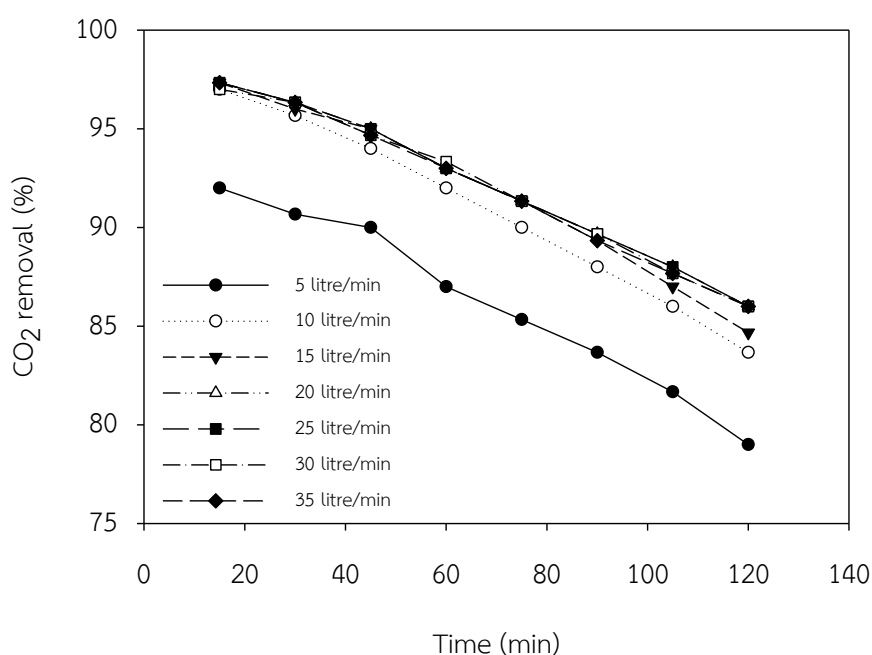
รูปที่ 4.12 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% พบว่าแนวโน้มของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราการไหลน้ำมีความใกล้เคียงกัน โดยอัตราการไหลน้ำ 5 ลิตร/นาที มีความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด 79% ที่เวลา 2 ชั่วโมง และที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 97.33% ที่เวลา 15 นาที สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยคือ 90.97%

ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40% ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าอัตราการไหลน้ำ 5 ลิตร/นาที ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำสุด 78.5% ที่เวลา 2 ชั่วโมงหลังเริ่มการทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 97.5% ที่เวลา 15 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในแต่ละอัตราการไหล 91.27% ในอัตราการไหลน้ำระหว่าง 20-35 ลิตร/นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกันน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12

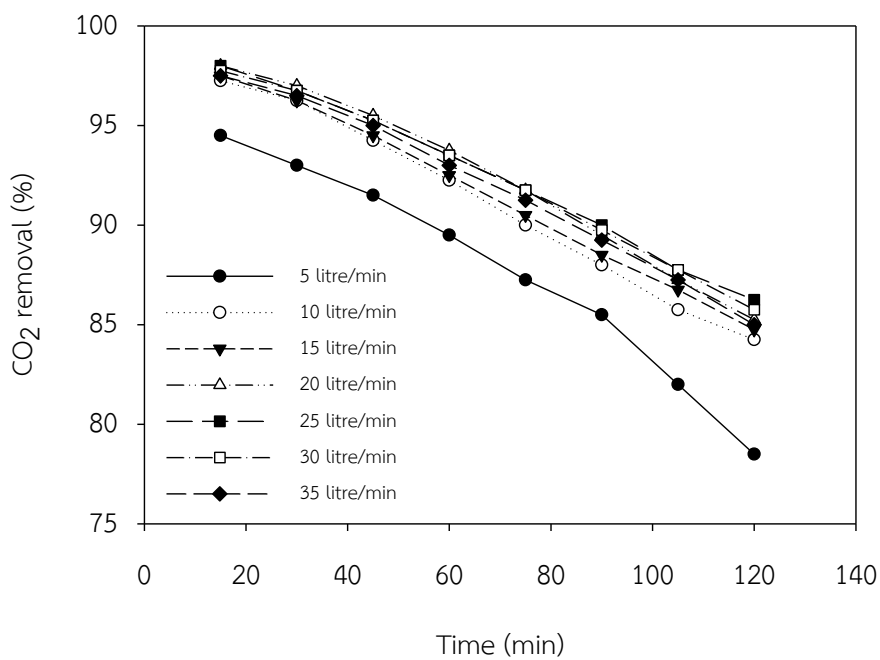
รูปที่ 4.14 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50% จะเห็นว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงสุด 98.2% ที่เวลา 2 ชั่วโมง

แนวโน้มของผลการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.12 และ 4.13 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 91.94%

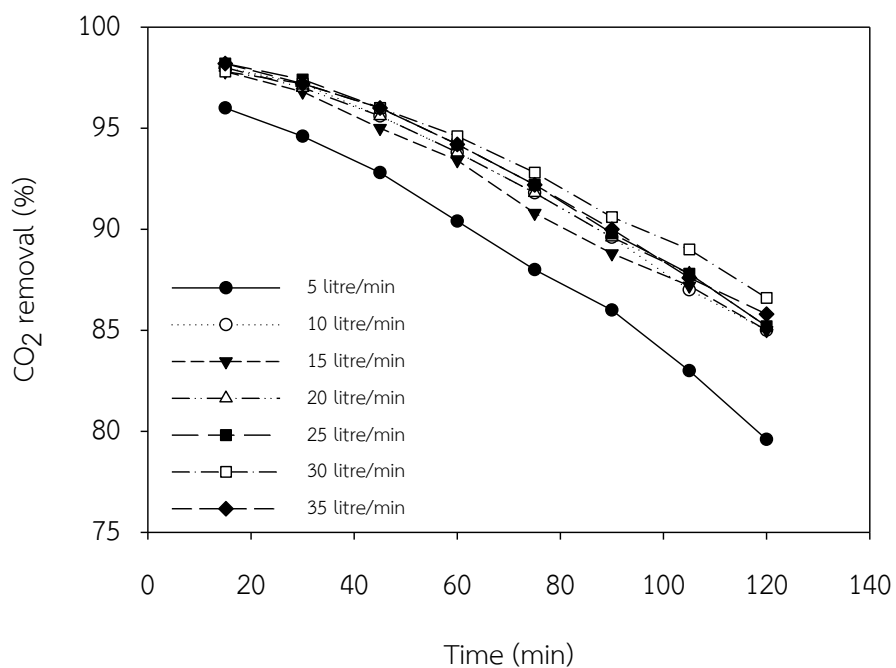
จากความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองจะทำให้ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะสังเกตได้จากที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 30% 40% และ 50% จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น 97.33% 97.5% และ 98.2% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong Xiao [21] โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 98% ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 50% และความแตกต่างของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราการไหลน้ำลดลง แต่เนื่องจากอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองเพียง 0.1 ลิตร/นาที ทำให้เห็นความแตกต่างไม่มากนัก



รูปที่ 4.12 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 30%

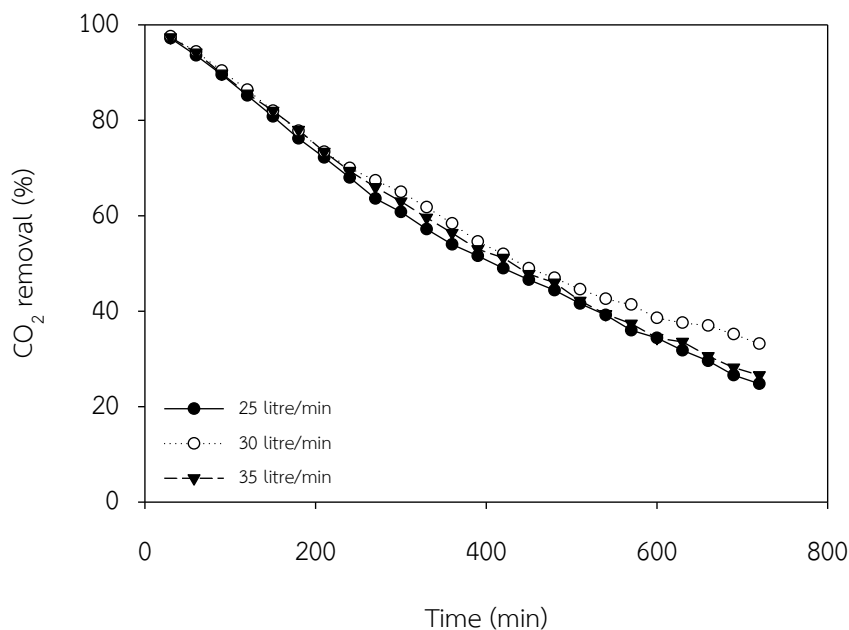


รูปที่ 4.13 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 40%



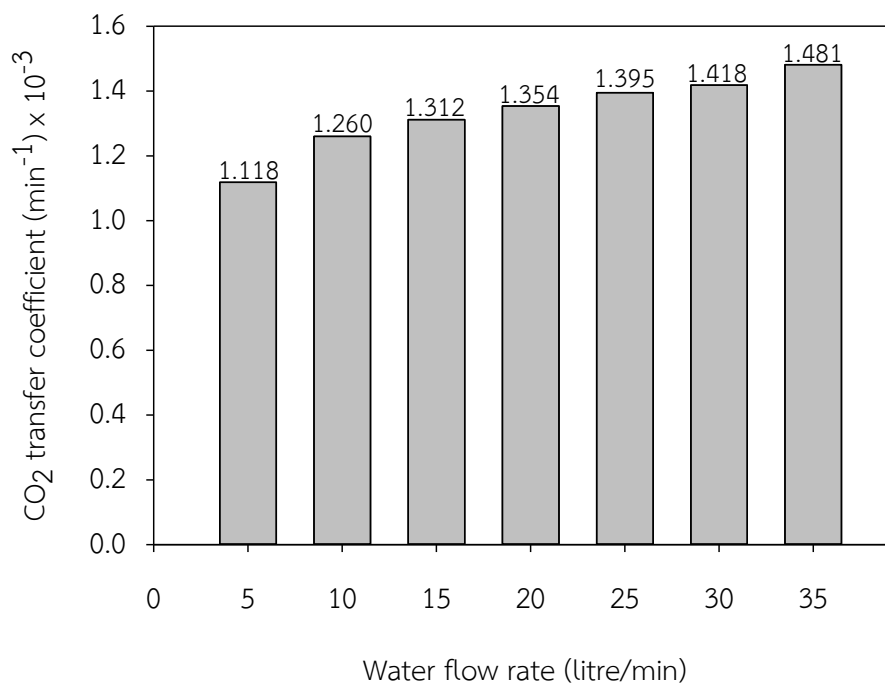
รูปที่ 4.14 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 50%

รูปที่ 4.15 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50% ในเวลา 12 ชั่วโมง จะเห็นว่าทุกอัตราการไหลของน้ำ มีความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่แตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ยังคงให้ประสิทธิภาพในลักษณะเดิม

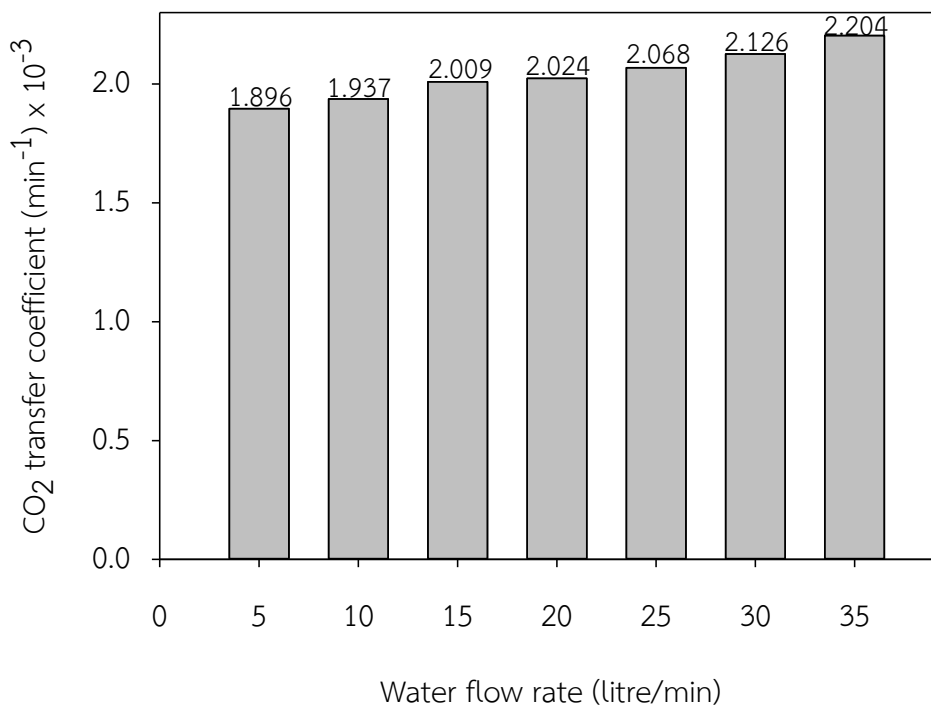


รูปที่ 4.15 ความสามารถการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 50% ในเวลา 12 ชั่วโมง

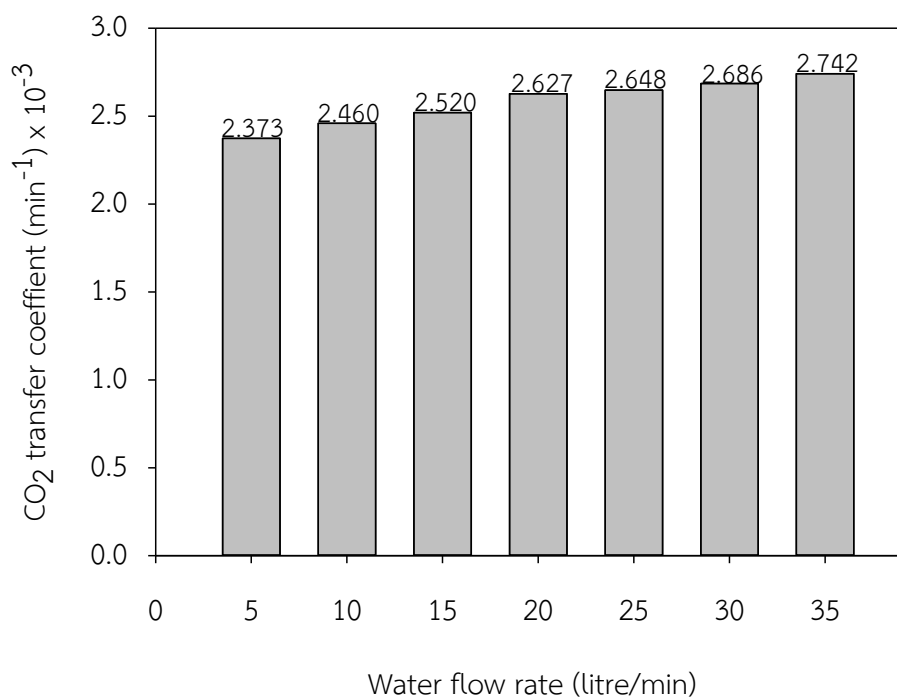
รูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ transfer coefficient) กับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้าต่าง ๆ ซึ่งได้จากการคำนวณความชันของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ โดยคำนวณที่อุณหภูมิของน้ำขณะทดลอง 25 °C จะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเนื่องจากขนาดฟองที่เล็กลง และเห็นถึงความแตกต่างชัดเจนขึ้นเมื่อเทียบกับกราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ข้างต้น



รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 30%

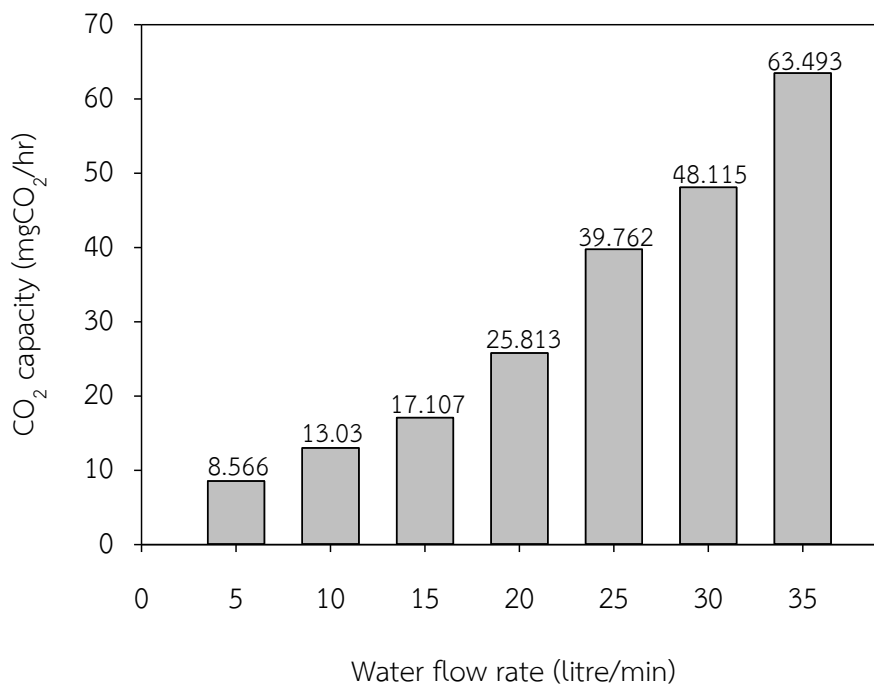


รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 40%

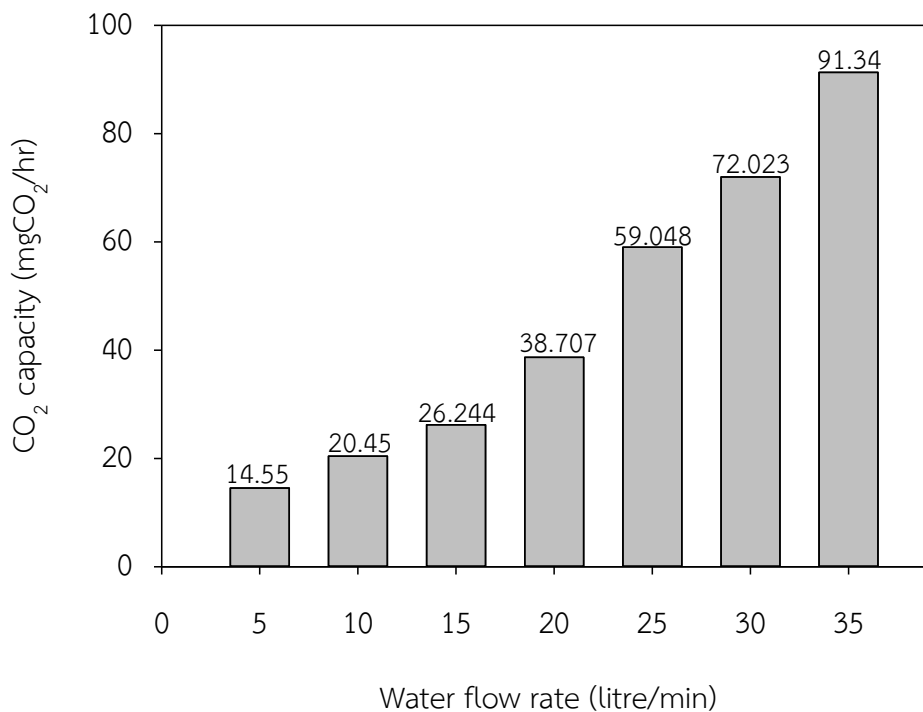


รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 50%

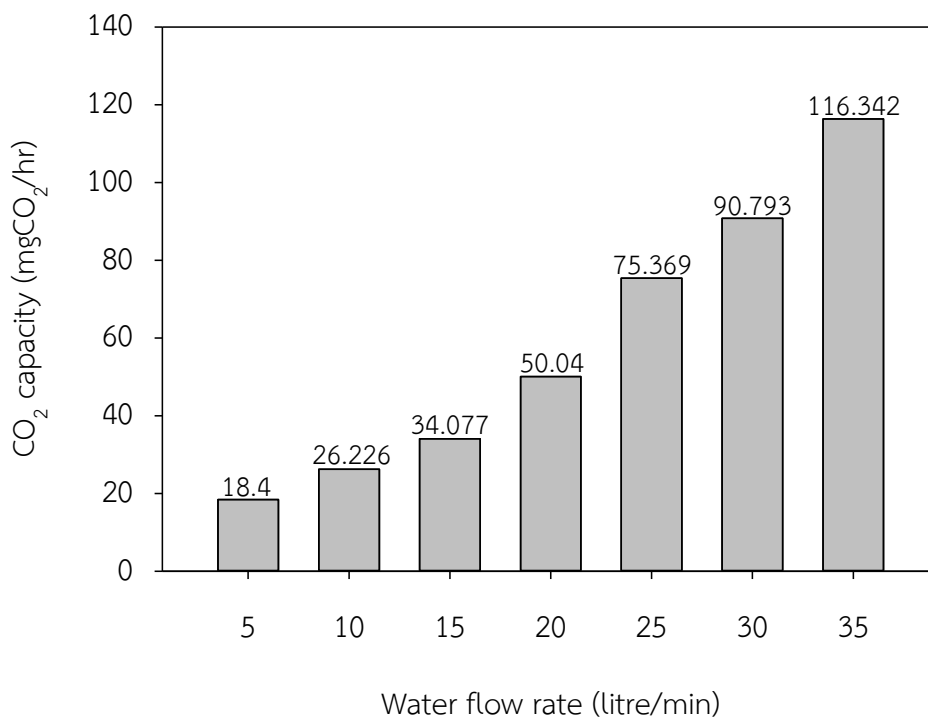
รูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 แสดงความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (CO₂ capacity) เปรียบเทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้างต่าง ๆ จากกราฟจะเห็นว่า ค่าความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอัตราการไหลของน้ำ และแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดฟองที่เล็กลงจะส่งผลต่ออัตราการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแปรผันตรงกับความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.19 ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 30%

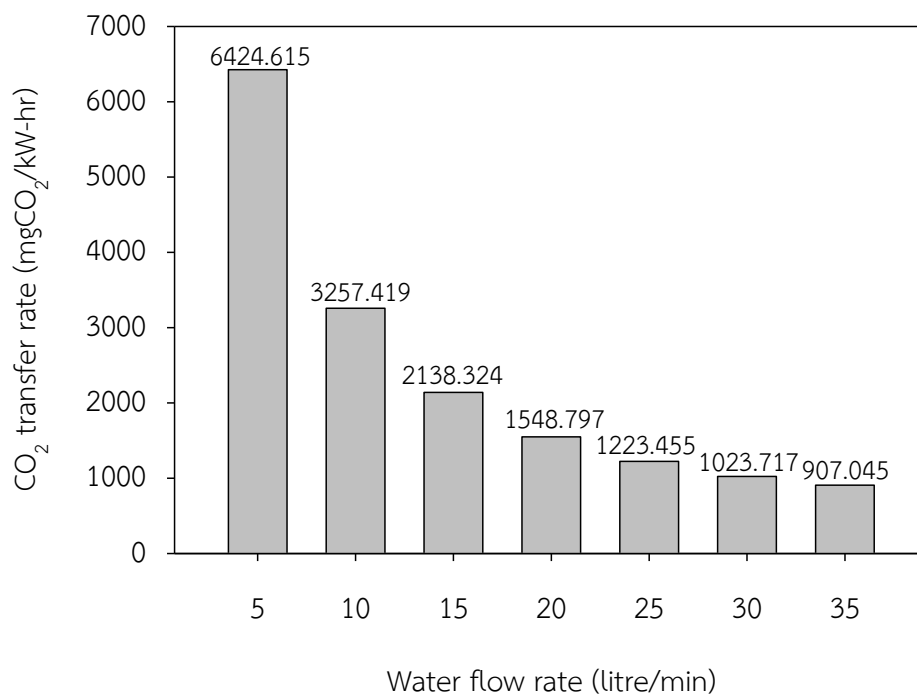


รูปที่ 4.20 ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 40%

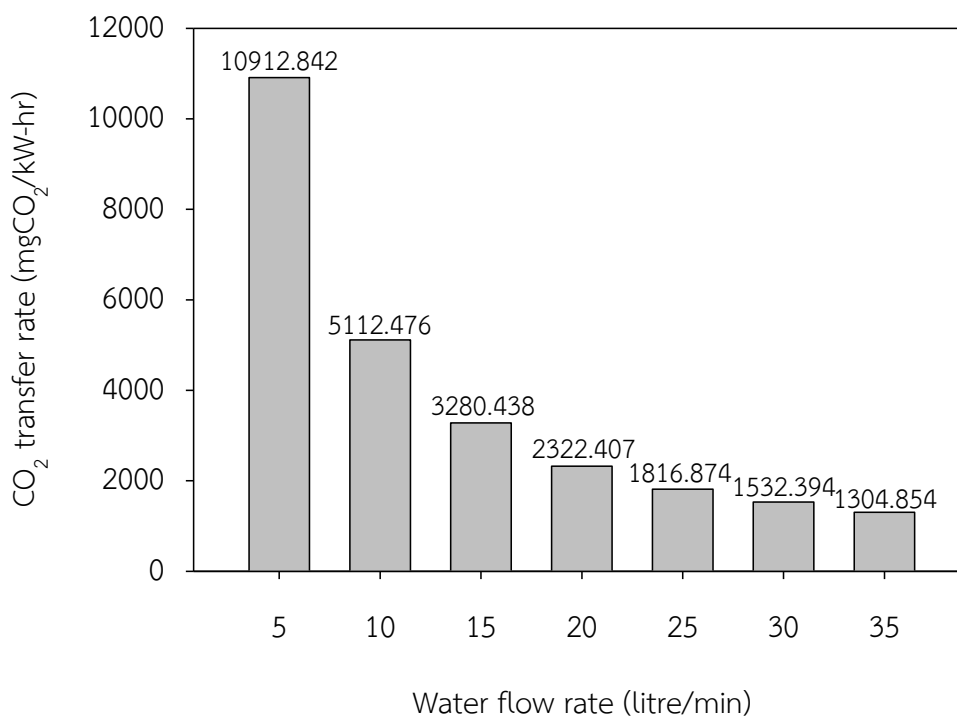


รูปที่ 4.21 ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์กรณีนี้ที่ %CO₂ ทางเข้า 50%

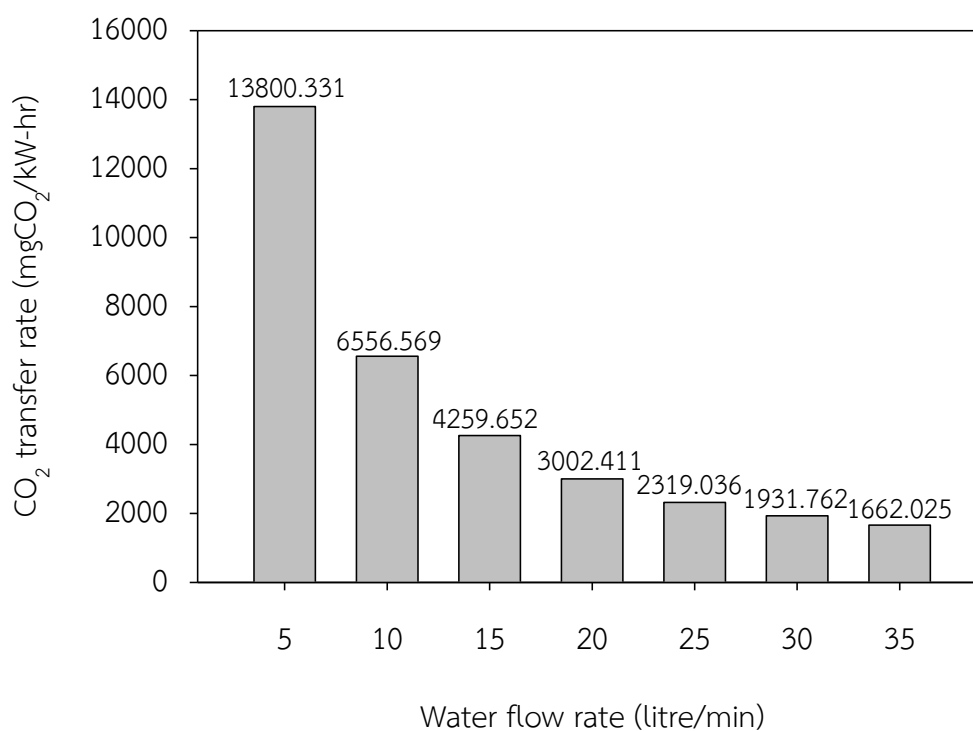
รูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 แสดงอัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (CO₂ transfer rate) ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นต่าง ๆ พบว่า แนวโน้มของกราฟจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำต้องใช้พลังงานมากขึ้นหลายเท่าตัวเมื่อเทียบกับแก๊สที่ใส่ในปริมาณน้อยและเท่าเดิม ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลดลง เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น จะเห็นว่า อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.22 อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 30%

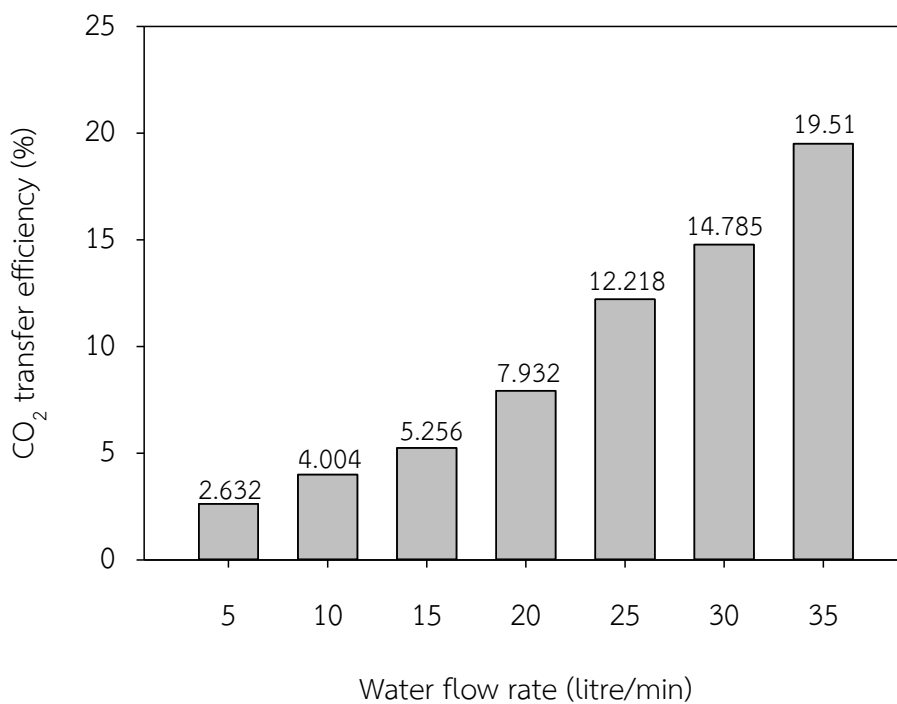


รูปที่ 4.23 อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 40%

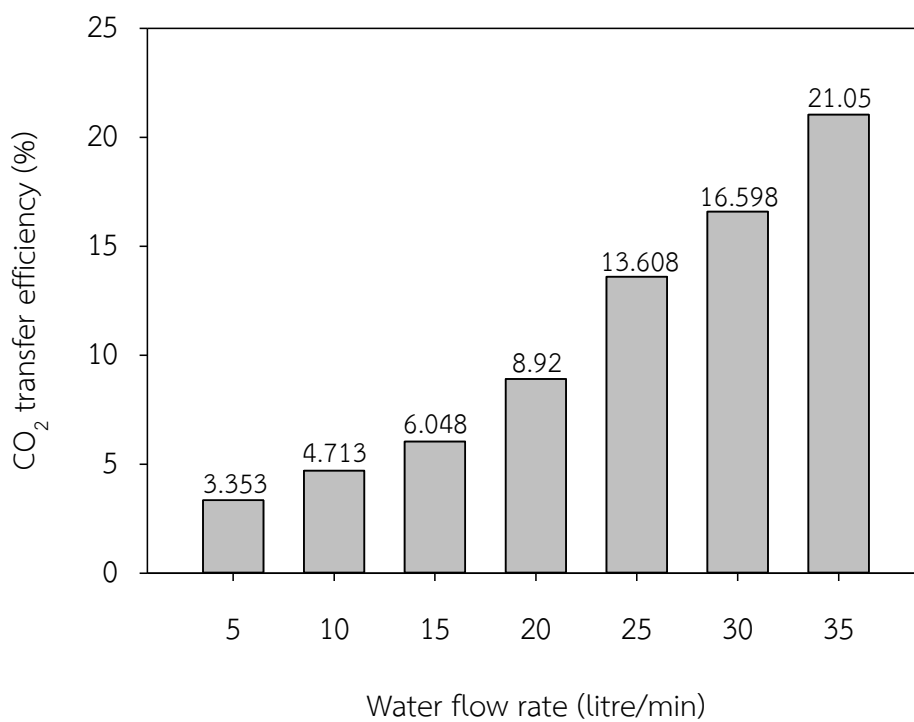


รูปที่ 4.24 อัตราการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี %CO₂ ทางเข้า 50%

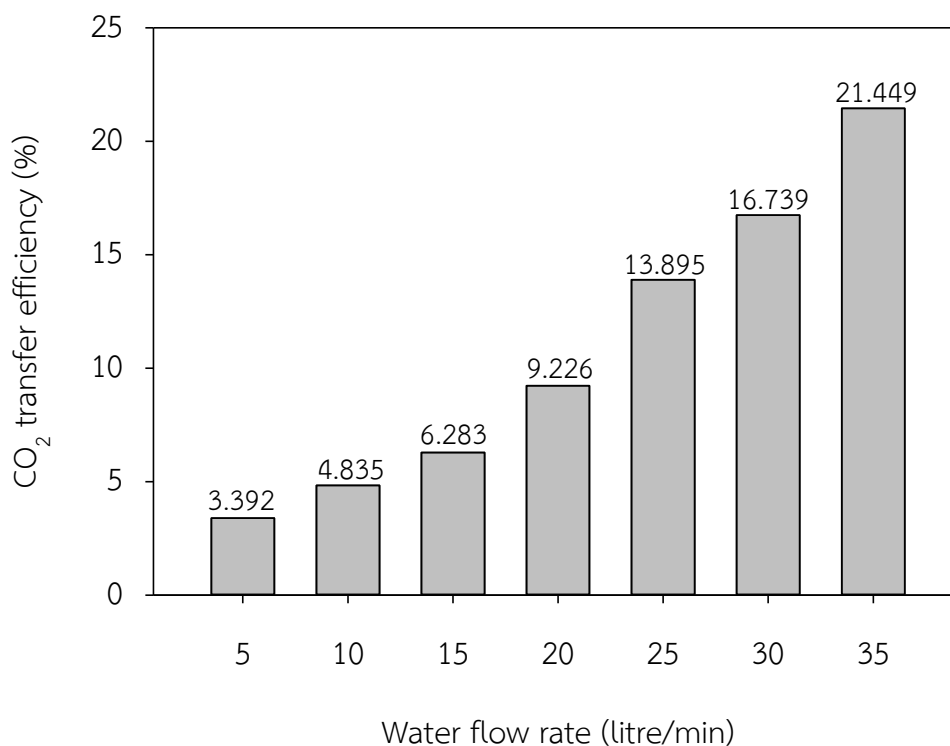
ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ transfer efficiency) กับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางเข้าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 จะเห็นว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที มีประสิทธิภาพการถ่ายเทสูงที่สุด 19.51% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของฟองที่เล็กลงและพื้นที่การไหลวนในคอลัมน์น้ำที่มากส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดี โดยสอดคล้องกับความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกรณที่ %CO₂ ทางเข้า 30%



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกรณที่ %CO₂ ทางเข้า 40%



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกรณที่ %CO₂ ทางเข้า 50%

ตารางที่ 4.1 แสดงพลังงานที่ใช้ในระบบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ในระบบล้างแก๊ส ด้วยวิธีดูดซึมด้วยน้ำทั่วไปจะต้องใช้พลังงานอยู่ที่ 0.30-0.90 kWh/Nm³ [25] จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ ตั้งแต่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตร/นาที ขึ้นไป มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน เนื่องจากปริมาณแก๊สที่ใช้ในการล้างมีปริมาณเพียง 0.006 m³/h

ตารางที่ 4.1 พลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อการล้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.006 m³/h

Water flow rate (litre/min)	Energy (kWh)	Energy consumption (kWh/Nm ³)	CO ₂ removal (%)
35	0.07	11.667	92.51
30	0.047	7.833	92.45
25	0.0325	5.417	92.36
20	0.0167	2.778	92.23
15	0.008	1.333	91.65

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) พลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อการล้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.006 m³/h

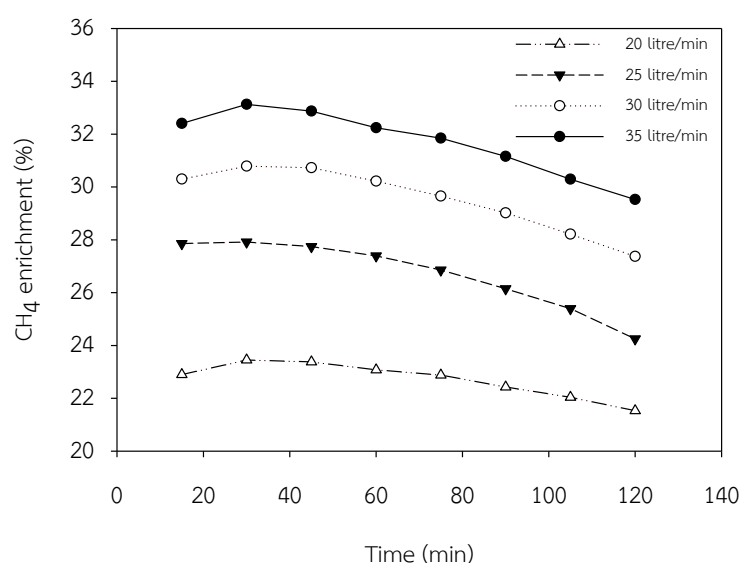
Water flow rate (litre/min)	Energy (kWh)	Energy consumption (kWh/Nm ³)	CO ₂ removal (%)
10	0.004	0.667	91.35
5	0.001	0.222	87.56

4.4 ผลการศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

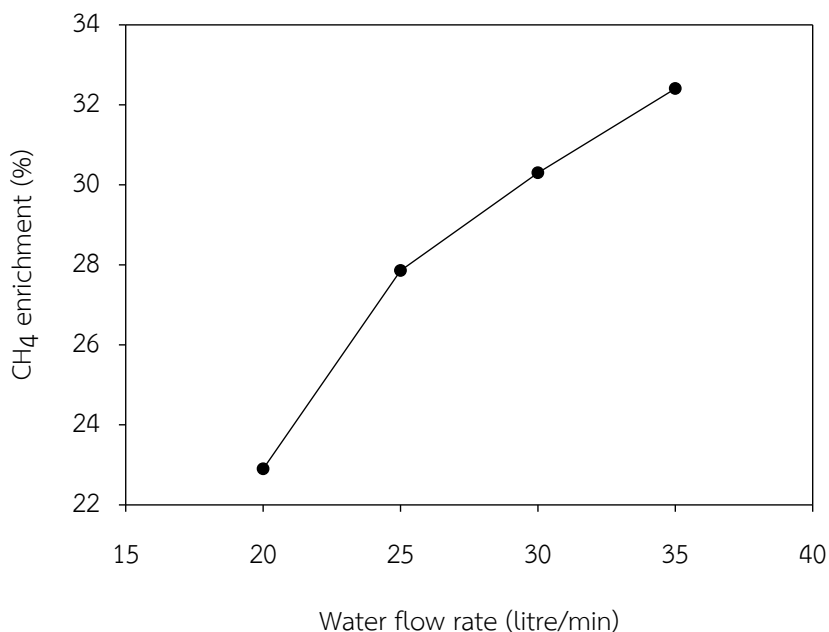
จากผลการทดลองความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนจากแก๊สชีวภาพ (CH₄ enrichment) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพสูงสุด 33.13% ที่เวลา 30 นาทีหลังการทดลอง และประสิทธิภาพในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนจะลดลงตามอัตราการไหลของน้ำ โดยประสิทธิภาพการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนของอัตราการไหลน้ำ 20 ลิตร/นาที่ ต่ำที่สุด จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการทำบริสุทธิ์มีเทนไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีการล้างด้วยน้ำแบบทั่วไป เนื่องจากแก๊สมีเทนก่อนการล้างมีความเข้มข้นสูงถึง 70% หากปริมาณมีเทนต่ำกว่าเดิม จะทำให้ประสิทธิภาพในการล้างสูงขึ้น

เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำที่ต่ำกว่า 20 ลิตร/นาที่ ไม่สามารถดูดแก๊สเข้าในระบบเอง และควบคุมแก๊สไม่เสถียร จึงไม่นำมาทดลอง



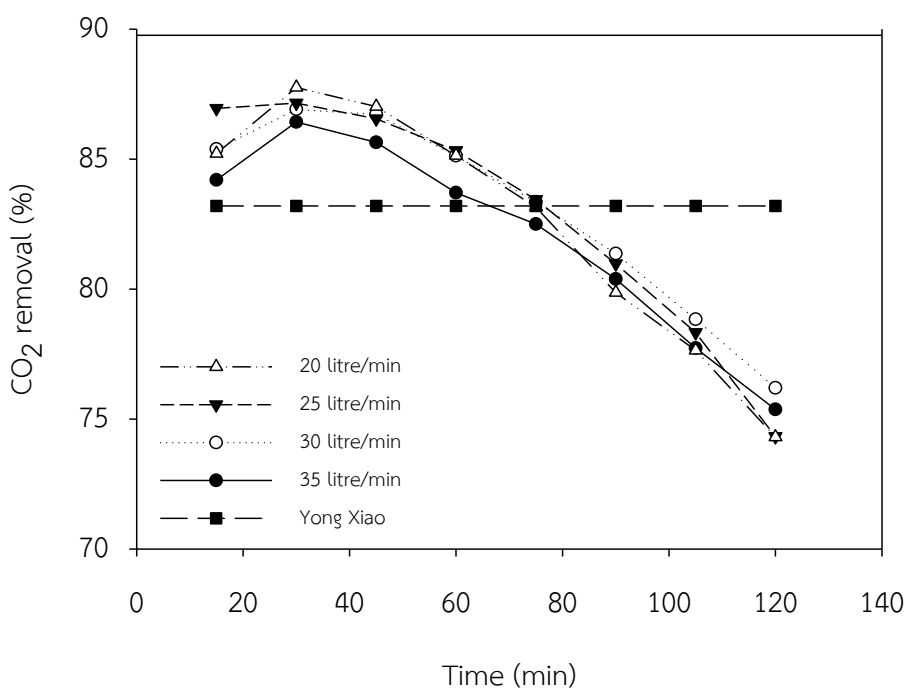
รูปที่ 4.28 ความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนจากแก๊สชีวภาพ

รูปที่ 4.29 แสดงความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทน จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของฟองที่เล็กลง โดยความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนสูงสุด 32.24% ที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที เวลา 15 นาทีหลังการทดลอง



รูปที่ 4.29 ความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนต่ออัตราการไหลของน้ำ

รูปที่ 4.30 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพจะเห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละการไหลน้ำมีความแตกต่างกันไม่มีความสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากการผสมคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ โดยประสิทธิภาพสูงสุด 87% ที่เวลา 30 นาทีหลังการทดลอง จากการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yong Xiao [32] เป็นการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธี water scrubber ซึ่งให้ประสิทธิภาพคงที่ 83.2% เนื่องจากการควบคุมคุณภาพน้ำ แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของ Yong Xiao ต่ำกว่าการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงนาทีที่ 80 และต่ำลงตามความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.30 ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ

4.1.2 พลังงานสุทธิที่ใช้ในการล้างแก๊สชีวภาพ

จากผลการวัดความดันตรงทางเข้าและออกชุดทดลองเพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการล้างแก๊สชีวภาพในอัตราการผลิตแก๊ส $0.006 \text{ m}^3/\text{h}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ที่อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/นาที่ ต้องใช้พลังงานในการล้างแก๊สสูงสุด ซึ่งมากกว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตร/นาที่ ถึง 3 เท่า เมื่อลดอัตราการไหลของน้ำลงจะทำให้พลังงานที่ใช้จะลดลงเป็นเท่าตัวของพลังงานที่ใช้ในตอนแรก ซึ่งที่อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/นาที่ กับ 20 ลิตร/นาที่ มีการใช้พลังงานแตกต่างกันถึง 10 เท่า โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่และความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนที่ไม่แตกต่างกันมาก อัตราการไหลของน้ำที่ 20 ลิตร/นาที่ จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากที่สุด และอัตราการไหลของน้ำที่ 35 ลิตร/นาที่ จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนที่ไม่แตกต่างจากอัตราการไหลของน้ำอื่น ๆ มากนัก

ตารางที่ 4.2 พลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อการผลิตแก๊ส 0.006 m³/h

Water flow rate (litre/min)	Energy (kWh)	Energy consumption (kWh/Nm ³)	CH ₄ enrichment (%)	CO ₂ removal (%)
35	0.068	11.380	32.24	83.71
30	0.029	4.946	30.22	85.13
25	0.013	2.229	27.39	85.33
20	0.008	1.4039	23.07	85.14

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการนำหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ ใช้หลักการทำงานของหัวฉีดแบบการหมุนควงและตัดเฉือนของน้ำ (Swirl flow) สำหรับการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพจะใช้วิธีการดูดซึมด้วยน้ำ (Water Scrubber) เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กได้เป็นอย่างดี ในการทดลองจะศึกษา ลักษณะการไหลของน้ำด้วยการจำลองการไหล อัตราการไหลของน้ำที่มีอิทธิพลต่อขนาดฟอง ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ ก่อนการล้าง และการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย อัตราการไหลของแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที่ อัตราการไหลของน้ำ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที่ ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้าง 30%, 40% และ 50% ควบคุมอุณหภูมิน้ำขณะทดลอง 25 ± 0.5 °C ตลอดการทดลอง

จากการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำภายในชุดทดลองด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ (CFD) เพื่อนำผลมาใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กและคอลัมน์น้ำ การศึกษาขนาดฟอง จะกำหนดอัตราการไหลน้ำเพื่อสังเกตลักษณะของฟองที่เกิดขึ้น และการศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากการดูดซึมด้วยน้ำที่อัตราการไหลน้ำในแต่ละกรณีแล้ววัดค่าคาร์บอนไดออกไซด์ทางออกเพื่อนำไปคำนวณเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทนต่อไป จากผลการศึกษารูปได้ดังนี้

(1) จากผลการจำลองการไหลของน้ำในชุดทดลอง พบว่าเมื่อน้ำผ่านท่อทางเข้ามาในหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก จะเกิดการหมุนควงภายในหัวฉีดด้วยความเร็วสูงแล้วออกไปสู่คอลัมน์น้ำตรงปากทางออกด้วยความเร็วสูงสุดในลักษณะการพุ่งออกในแนวตั้งและกระจายตัวออกด้านข้าง แล้วเกิดการหมุนวนบริเวณส่วนล่างของคอลัมน์น้ำ โดยเมื่อเพิ่มความเร็วทางเข้าจะทำให้พื้นที่หมุนวนในบริเวณดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราการไหล 35 ลิตร/นาที่ เกิดพื้นที่หมุนวนมากที่สุด หลังจากการหมุนวนจะเกิดลักษณะการไหลแบบราบเรียบและมีความเร็วที่ต่ำจนถึงปากทางออกของคอลัมน์น้ำ

(2) จากผลการศึกษาภาพขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองเล็กลง และมีจำนวนฟองมากขึ้น โดยที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที่ มีขนาดฟองที่ใหญ่ที่สุด และมีปริมาณฟองน้อย สำหรับที่อัตราการไหล

ของน้ำ 35 ลิตร/นาที่ จะมีฟองขนาดเล็กสุดและมีปริมาณฟองมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ ที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตร/นาที่ จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองใกล้เคียงกัน

(3) จากผลการศึกษาการการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 30% จะเห็นความแตกต่างมากที่สุด และที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดในทุกกรณี เนื่องจากมีขนาดฟองที่ใหญ่และพื้นที่ในการหมุนวนน้อย เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำเพื่อนำไปคำนวณเป็น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 transfer coefficient), ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 capacity), อัตราการถ่ายเทแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 transfer rate) และ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 transfer efficiency) ทำให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน โดยขนาดฟองที่เล็กลงส่งผลให้ ตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นอัตราการถ่ายเทแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากระบบใช้พลังงานสุทธิตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ อัตราการถ่ายเทแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แปรผกผันกับตัวแปรอื่นๆ

(4) จากการศึกษาการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก จะเห็นว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำมีอิทธิพลต่อการทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทน เนื่องจากขนาดของฟองแก๊สที่เล็กลง แต่สำหรับการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการล้างแก๊ส พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที่ ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการทำบริสุทธิ์แก๊สสูงสุด แต่ต้องใช้พลังงานสูงถึง 10 เทวา เมื่อเทียบกับที่อัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตร/นาที่ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับที่อัตราการไหลอื่น ๆ แต่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยการประยุกต์ใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

(1) จากผลการศึกษาการการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก เนื่องจากปริมาณแก๊สที่ใช้ในการทดลองน้อยมาก ส่งผลให้เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ชัดเจน หากเพิ่มปริมาณแก๊สที่ใช้ในการล้างจะส่งผลให้ พลังงานที่ใช้ลดลงไปด้วย

(2) ในการนำไปใช้งานจริง ควรมีการควบคุมระดับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงอยู่ตลอดเวลา

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (ออนไลน์) http://biogas.dede.go.th/biogas/web_biogas/.
- [2] ณัฐพล, “ศึกษาการใช้ก๊าซชีวภาพกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนขนาดเล็ก”.
- [3] ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ, “การประหยัดพลังงานในอุปกรณ์ที่ใช้งานแก๊สชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม”.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “คู่มือ ไปโอแก๊ส เซฟตี้,” 2556.
- [5] คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้แก๊สชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2553
- [6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (ออนไลน์) <http://enedss.dede.go.th/EnergyBalance/Index#ReportDetail>.
- [7] Biogas upgrading technologies developments and innovations Anneli Petersson, Arthur WELLINGER 2009
- [8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน,” 2554.
- [9] Micro-NanoBubble Technology (ออนไลน์) <http://www.mnbtechthailand.com/>.
- [10] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, “การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ Micro/nano-bubble สู่อนาคตอุตสาหกรรมไทย,” พ.ศ. 2553 .
- [11] M. Sadatomi, “Microbubble producing apparatus,” 2003.
- [12] H. Ohnari, “All about microbubbles,” 2006.
- [13] A. Fujiwara, “Technique microbubble generation using a venturi tube,” 2006.
- [14] Y. Nakatake, “T. Eguchi, Improved combustion in diesel engines with fuel containing ejector-generated microbubble,” 2007.
- [15] A. K. M. Sadatomi, “Fluids mixer and fluids mixing method,” 2008.
- [16] H. Tsuge, “Fundamental of microbubbles and nanobubbles,” 2010.
- [17] M. Yasuno, “Monodispersed microbubble using microchannel technique,” 2004.
- [18] H. Hasegawa, “Electrical potential of microbubble generated by shear flow in pipe with slits,” 2008.
- [19] S. Fujikawa, “The control of micro-air-bubble generation by a rotational porous plate,” 2003.

- [20] G. C.H., “Development of a Venturi Type Bubble Generator for Use in the Molten-salt Reactor Xenon Removal System,” 1972.
- [21] S. Rasi, “Landfill gas upgrading with countercurrent water wash,” 2007.
- [22] O. I. Maile, “The potency of Monoethanolamine in Biogas Purification and Upgrading,” 2017.
- [23] S. Rasi, “Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process,” 2013.
- [24] O. Maile, “Chemical Absorption of Carbon Dioxide in Biogas Purification,” 2017.
- [25] R. Kadam, “Recent advancement in biogas enrichment and its applications,” 2017.
- [26] W. Cao, “Simultaneously upgrading biogas and purifying biogas slurry using cocultivation of *Chlorella vulgaris* and three different fungi under various mixed light wavelength and photoperiods,” 2017.
- [27] D. C. S. Maia, “Removal of H₂S and CO₂ from biogas in bench scale and the pilot scale using a regenerable Fe-EDTA solution,” 2017.
- [28] X. Liu, “Continuous process of biogas purification and co-production of nano calcium carbonate in multistage membrane reactors,” 2015.
- [29] C. Yan, “Influence of influent methane concentration on biogas upgrading and biogas slurry purification under various LED (light-emitting diode) light wavelengths using *Chlorella* sp,” 2014.
- [30] L. Meier, “Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: Effect of light/dark photoperiod,” 2017.
- [31] Ansys fluent, version 12.0; Theory guide, Ansys Inc: Canonsburg, Pennsylvania, United States.
- [32] Y Xiao, “Removal from biogas by water washing system”, 2014

ภาคผนวก ก.

ผลการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกชุดทดลองของการทดลองการทำ
ละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 30%

Q_w (litre/min)	5	10	15	20	25	30	35
t (min)							
15	2.4	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8
30	2.8	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1
45	3	1.8	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6
60	3.9	2.4	2.1	2.1	2.1	2	2.1
75	4.4	3	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
90	4.9	3.6	3.2	3.1	3.1	3.1	3.2
105	5.5	4.2	3.9	3.6	3.6	3.7	3.7
120	6.3	4.9	4.6	4.2	4.2	4.2	4.2

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกชุดทดลองของการทดลองการทำ
ละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 40%

Q_w (litre/min)	5	10	15	20	25	30	35
t (min)							
15	2.2	1.1	1	0.8	0.8	0.9	1
30	2.8	1.5	1.5	1.2	1.3	1.3	1.4
45	3.4	2.3	2.2	1.8	1.9	1.9	2
60	4.2	3.1	3	2.5	2.6	2.6	2.8
75	5.1	4	3.8	3.3	3.3	3.3	3.5
90	5.8	4.8	4.6	4.2	4	4.1	4.3
105	7.2	5.7	5.3	5.1	4.9	4.9	5.1
120	8.6	6.3	6.1	5.9	5.5	5.7	6

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกชุดทดลองของการทดลองการทำ
ละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 50%

Q_w (litre/min)	5	10	15	20	25	30	35
t (min)							
15	2	1	1.1	1	0.9	1.1	0.9
30	2.7	1.4	1.6	1.5	1.3	1.4	1.4
45	3.6	2.2	2.5	2.2	2	2	2
60	4.8	3.1	3.3	3.1	2.9	2.7	2.9
75	6	4.1	4.6	4.1	3.9	3.6	3.9
90	7	5.2	5.6	5.2	5.1	4.7	5
105	8.5	6.5	6.4	6.1	6.1	5.5	6.2
120	10.2	7.5	7.5	7.4	7.4	6.7	7.1

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองการทำละลาย
คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 30%

Q_w (litre/min)	5	10	15	20	25	30	35
t (min)							
15	92.00	97.00	97.33	97.33	97.33	97.00	97.33
30	90.67	95.67	96.00	96.33	96.33	96.33	96.33
45	90.00	94.00	95.00	95.00	95.00	94.67	94.67
60	87.00	92.00	93.00	93.00	93.00	93.33	93.00
75	85.33	90.00	91.33	91.33	91.33	91.33	91.33
90	83.67	88.00	89.33	89.67	89.67	89.67	89.33
105	81.67	86.00	87.00	88.00	88.00	87.67	87.67
120	79.00	83.67	84.67	86.00	86.00	86.00	86.00

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 40%

Q_w (litre/min)	5	10	15	20	25	30	35
t (min)							
15	94.50	97.25	97.50	98.00	98.00	97.75	97.50
30	93.00	96.25	96.25	97.00	96.75	96.75	96.50
45	91.50	94.25	94.50	95.50	95.25	95.25	95.00
60	89.50	92.25	92.50	93.75	93.50	93.50	93.00
75	87.25	90.00	90.50	91.75	91.75	91.75	91.25
90	85.50	88.00	88.50	89.50	90.00	89.75	89.25
105	82.00	85.75	86.75	87.25	87.75	87.75	87.25
120	78.50	84.25	84.75	85.25	86.25	85.75	85.00

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเข้า 50%

Q_w (litre/min)	5	10	15	20	25	30	35
t (min)							
15	96.00	98.00	97.80	98.00	98.20	97.80	98.20
30	94.60	97.20	96.80	97.00	97.40	97.20	97.20
45	92.80	95.60	95.00	95.60	96.00	96.00	96.00
60	90.40	93.80	93.40	93.80	94.20	94.60	94.20
75	88.00	91.80	90.80	91.80	92.20	92.80	92.20
90	86.00	89.60	88.80	89.60	89.80	90.60	90.00
105	83.00	87.00	87.20	87.80	87.80	89.00	87.60
120	79.60	85.00	85.00	85.20	85.20	86.60	85.80

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าสมรรถนะในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ของหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ transfer coefficient)

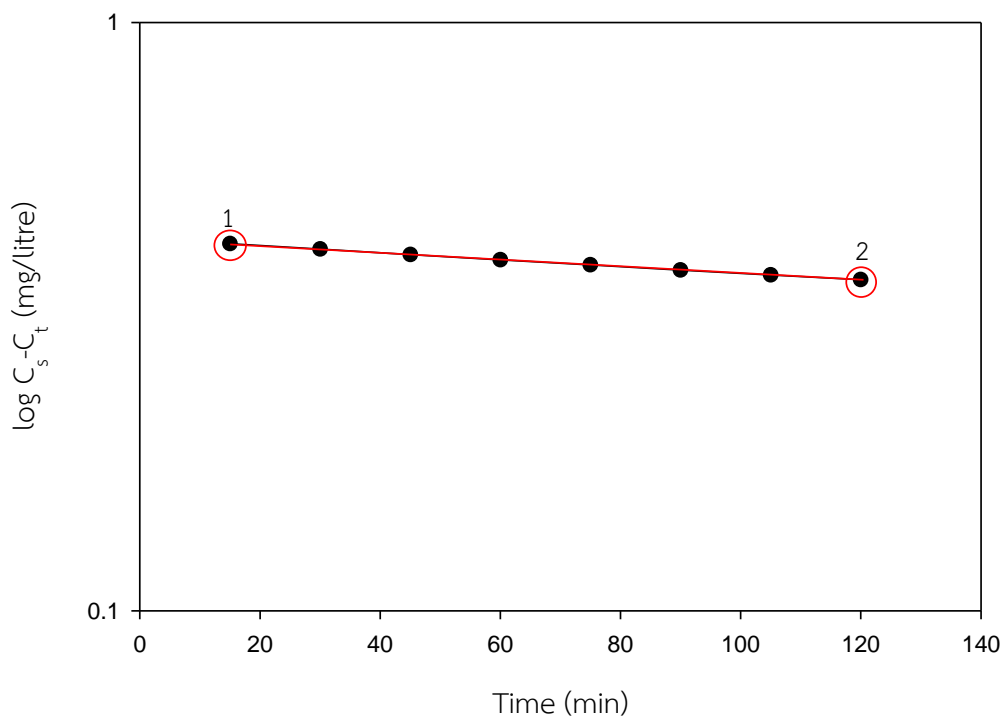
ตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้ เป็นผลทดลองกรณีอัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้า 30% โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. อุณหภูมิน้ำที่ใช้ 25 °C ตลอดการทดลอง
2. จากตารางค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 °C ($C_s=0.43$ mg/litre) นำไปลบกับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำเทียบกับเวลาต่างๆ ดังแสดงในตาราง (ข.1)

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณของค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำเทียบกับเวลา

Times (min)	C_t (mg/litre)	C_s-C_t (mg/litre)
15	0.009	0.420
30	0.018	0.411
45	0.026	0.403
60	0.034	0.395
75	0.042	0.387
90	0.050	0.379
105	0.057	0.372
120	0.064	0.365

3. นำค่า C_s-C_t มาคำนวณเป็น log เพื่อหาความชันของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์แบบ log ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $C_s - C_t$ ที่เวลาต่าง ๆ

4. นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ (ข.1)

$$K_L a = 2.303 \left(\frac{\log(C_s - C_t)_1 - \log(C_s - C_t)_2}{t_2 - t_1} \right) \quad (\text{ข.1})$$

$$K_L a = 2.303 \left(\frac{\log(0.420)_1 - \log(0.365)_2}{120 - 15} \right)$$

$$K_L a = 1.3401 \text{ mg/litre}$$

ความสามารถในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 capacity)

ในการทดลองมีความดันรวมในระบบ $P=882.67 \text{ mmHg}$ ความลึกจากผิวน้ำถึงจุดเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ $h=1 \text{ m}$ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 25°C $p=23.756 \text{ mmHg}$ ปริมาตรน้ำที่ใช้ทั้งหมด $V=87 \text{ litre}$ นำค่าต่าง ๆ ไปแทนในสมการ (ข.2)

$$\text{CO}_2 \text{ capacity} = K_L a \left(C_s \frac{P+73.53h-p}{760-p} \right) V \quad (\text{ข.2})$$

$$\text{CO}_2 \text{ capacity} = 1.3401 \left(0.43 \frac{882.671 + 73.53(1) - 23.756}{760 - 23.756} \right) 87$$

$$\text{CO}_2 \text{ capacity} = 63.493 \text{ kg-CO}_2/\text{hr}$$

อัตราการถ่ายเทแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (R_0)

เป็นการนำความสามารถในการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์หารด้วยพลังงานที่ใช้ในการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ในการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 35 ลิตร/นาที ใช้พลังงานทั้งหมด 0.07 kW

$$R_0 = \frac{\text{CO}_2 \text{ capacity}}{P_{in}} \quad (\text{ข.3})$$

$$R_0 = \frac{63.493}{0.07}$$

$$R_0 = 907.045 \text{ kg-CO}_2/\text{hr}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ (E)

ปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกเติมมีค่า 54240 mg-CO₂/hr และปริมาณแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 0.006 m³/min แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ (ข.4)

$$E = \left(\frac{\text{CO}_2 \text{ capacity}}{A} \right) 100 \quad (\text{ข.4})$$

$$E = \left(\frac{63.493}{54240 * 0.006} \right) 100$$

$$E = 19.51 \%$$

ภาคผนวก ค.

ผลการศึกษาระบบการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลความสามารถในการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพของการทดลองการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ

Q_w (litre/min)	20	25	30	35
t (min)				
15	22.89	27.85	30.29	32.40
30	23.44	27.91	30.78	33.12
45	23.37	27.74	30.72	32.87
60	23.072	27.39	30.21	32.24
75	22.87	26.85	29.65	31.84
90	22.42	26.14	29.01	31.15
105	22.035	25.39	28.21	30.29
120	21.528	24.25	27.37	29.52

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพของการทดลองการล้างแก๊สชีวภาพด้วยน้ำ

Q_w (litre/min)	20	25	30	35
t (min)				
15	85.21	86.95	85.38	84.2
30	87.76	87.16	86.92	86.43
45	87.02	86.55	86.72	85.64
60	85.14	85.33	85.13	83.71
75	83.16	83.44	83.35	82.5
90	79.87	80.97	81.36	80.38
105	77.65	78.33	78.84	77.73
120	74.31	74.33	76.2	75.37

ภาคผนวก ง.

บทความสำหรับเผยแพร่ 1

Application of microbubble technique for CO₂ and CH₄ entrapment in biogas

Application of microbubble technique for CO₂ and CH₄ entrapment in biogas

Songphon Suekkhachat, Somchai Saeung and Chayut Nuntadusit*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai,
Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author; E-mail: chayut.n@psu.ac.th, Tel. 0-7428-7035, Fax. 0-7455-8830

Submitted date month, year; accepted in final form date month, year (To be completed by JCST)
Available online date month year

Abstract

Biogas has been found as the alternative renewable resource to replace fossil fuels, which contains 53-70% of CH₄, 30-50% of CO₂ and other gases. Water scrubber is the most popular technique for biogas cleaning due to economic and also high purification output. This research aimed to investigate biogas upgrading by using microbubble that generated from a developed swirl nozzle. The water flow rates were controlled of 10, 15, 20, 25, 30 and 35 litre/min. The bubble varied in the range of 50.44-116.04 µm for entire experiment. CO₂ removal from pilot scale by entrapping CO₂ reached 83.06%, and CH₄ was recovered to 96.26% at conditions of 35 litre/min of water, 0.1 litre/min of constant gas flow rate. Finally, flow characteristics from simulation result inside reactor including with nozzle part were discussed to understand flow phenomena.

Keywords: *microbubble, microbubble generator, application of microbubble, biogas upgrading, biogas purification, water scrubber*

1. Introduction

Due to increasing fuel prices, greenhouse gas emissions and high energy demands from the ever-increasing developing world, the new and high technology for process developments of sustainable and renewable resource energy were needed (Fan et al., 2016; Kainiemi et al., 2015; Mao et al., 2014). Biogas has been exploited as one of the alternative sources of renewable energy that has potential to supplement the current energy requirements. Its advantage shown that the physical and chemical properties were similar to those of natural gas. The biogas potential was able to replace natural gas in all applications such as the production of heat, electricity, and can use as vehicle fuel or NGV (Natural Gas Vehicle). Biogas was also economical and environmentally advantageous because it helped minimize land, water, and air pollution by utilizing waste to produce energy.

Biogas was normally obtained by anaerobic digestion process of organic matter. The typical compositions contained of CH₄ (53–70 %), CO₂ (30–50 %) by volume (Yang *et al.*, 2014), and other compounds such as H₂S, and NH₃. Due to its flammability and renewability, biogas production and utilization have increasingly been seen as an emerging alternative energy technology. However, raw biogas still needed several purification processes to reach application standards, involving removal of CO₂ and other trace gas compounds.

There were four main techniques to remove impurities from biogas. First, Pressure Swing Adsorption (PSA) was a sensitive process that required H₂S removal before the adsorption which could harm the adsorbing material. It also incurred some high cost of operation. Second, cryogenic separation was not often to use as it required a number of process equipment such as heat exchangers, turbines, and compressors irrespective of the fact that it produced upgraded gas of high purity. It also had the highest cost of purification, which compared to the other techniques. Third, membrane separation was also used widely because it yielded high methane quality gas. Although it yielded high purity gas that was often achieved by increasing the number of modules, which leded to lose methane. Finally, Chemical absorption was often preferred in industrial applications because it had high efficiencies, removed H₂S completely, operated at low pressures, and had higher reaction rates.

2. Objectives

The objective of the present study was to investigate the new technique to purify biogas from small-scale biogas plants by entrapping CO₂ and CH₄ recovery including of developing nozzle that used to generate the swirling flow. The condition to create microbubble and size measurement were also experimented. Amount of CO₂ removal and CH₄ recovery were used to assess the ability to use microbubble technique for biogas upgrading. Moreover, flow simulation was also conducted to explain the flow phenomena.

3. Materials and methods

3.1 Experimental setup

The pilot scale was set as shown the flow of circuit and experimental apparatus in Fig 1. An acrylic column reactor of 1 m high and 20 cm of diameter for biogas upgrading system was connected horizontally with microbubble generator at the bottom. For water flow circuit, 1 hp centrifugal pump was used to circulate water as a media to upgrade the biogas. The water flow rates were varied of 10, 15, 20, 25, 30 and 35 litre/min. Water inlet temperature was controlled via PID control unit, which was set at 25 °C. The flow rate was adjusted by ball valve which installed at the discharge section and was monitored from rotameter. For raw biogas flow section, the room temperature gas was flowed vertically into reactor from the base of microbubble generator, which connected from low-pressure raw biogas container. When water pump was started to circulate the flow of water circuit, raw biogas was drawn into the microbubble generator by influencing of low-pressure that generated from swirling flow inside the generator. After water temperature was constant, the gas inlet was released to let into microbubble generator. For present study, constant gas flow rate was kept at 0.1 litre/min.

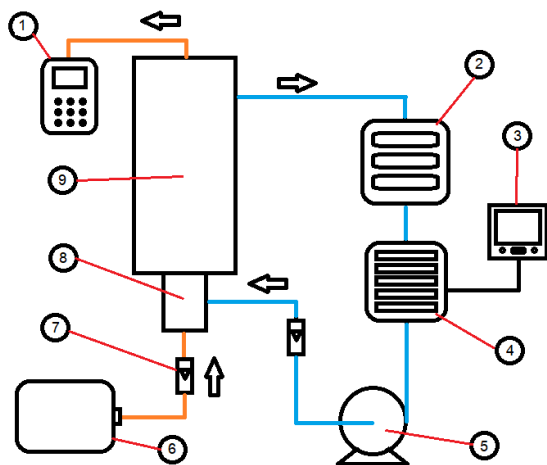


Figure 1 Flow circuit (blue: water, orange: gas) and experimental apparatus of biogas upgrading pilot scale: (1) biogas analyzer, (2) cooling unit, (3) temperature control unit, (4) heater chamber, (5) pump, (6) raw biogas container, (7) gas flow meter, (8) microbubble generator and (9) reactor

Duration of gas scrubbing was 15 min before taking the sample to analyze the gas product. Then upgraded gas product was sucked by potable gas analyzer (Geotech, Leamington, UK) from the upper section of reactor to analyze the gas quality.

3.2 Microbubble generator

Figure 2 shows the actual image of reactor and microbubble generator. Water inlet (nozzle) with diameter of 14 mm was attached horizontally at tangent generator wall. Swirling flow of injected water due to the attachment position of nozzle induced raw gas at the bottom from gas container to mix with water for scrubbing purpose.

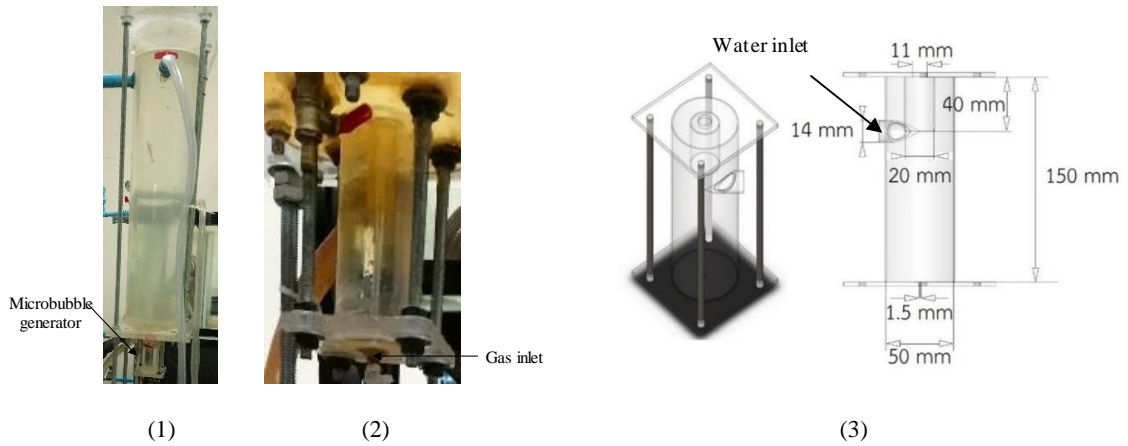


Figure 2 actual image of: (1) water column and (2) microbubble generator and (3) details of microbubble generator

3.3 Microbubble size measurement

Microbubble in the sampling water inside the glass chamber was measured by using high resolution camera as shown the details of the process in Figure 3. The glass chamber dimensions were 12 width, 16 long and 0.2 cm thickness. Image processing method via MATLAB coding was employed to average the bubble diameter from the sampling picture that taken from high microscope camera which 1000x magnification and 5.0 megapixels resolution. For each of water flow rate, the sampling water was drained every 15 min from reactor to measure bubble size. An average diameter of bubbles was received from 10 sampling pictures.

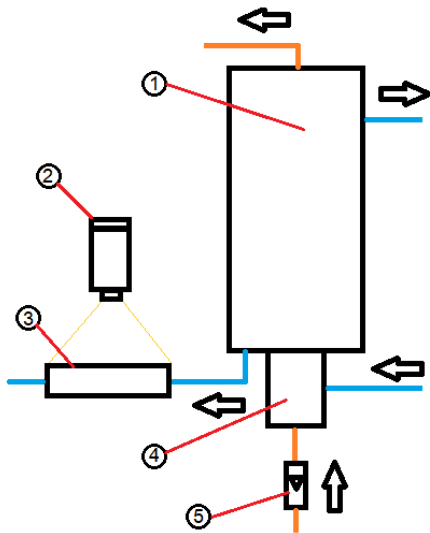


Figure 3 Experiment setup for bubble size measurement (1) Water column, (2) microscope camera, (3) glass chamber, (4) microbubble generator and (5) flow meter

3.4 Biogas upgrading evaluation

The CO_2 removal efficiency and CH_4 enrichment of different compounds were calculated from equation (1) and (2), respectively:

$$\text{CO}_2 \text{ removal (\%)} = \frac{(C_r - C_p)}{C_r} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{CH}_4 \text{ enrichment (\%)} = \frac{(C_p(\text{CH}_4) - C_r(\text{CH}_4))}{C_r(\text{CH}_4)} \times 100\% \quad (2)$$

Where $C_r(\text{CH}_4)$ is the content of compound in raw gas, and $C_p(\text{CH}_4)$ is the content of compound in product gas.

3.5 Computational method

The governing equations for mass, momentum, energy, turbulent kinetic energy (k) and the specific dissipation (ω) are discretized in a three-dimensional computational domain to yield a set of algebraic equations, which are solved by imposing the boundary conditions with the second order upwind scheme using Ansys-Fluent 15.0. SIMPLE algorithm has been employed for pressure velocity coupling to solve pressure correction equation. In the present study, the SST k- ω turbulence model has been used.

4. Results and Discussion

This topic presents the experimental results of biogas upgrading from the pilot scale which employs the developed microbubble generator to induce the gas inlet automatically by affecting of swirling flow.

4.1 Generated microbubble

Figure 4 shows the sampling bubble that take from the glass chamber by using microscope camera. The results show that the size is decreased when water flow rate is increased. Every bubble that present in this picture is accounted to calculate bubble diameter. It is notice that regardless the result of bubble density. Nevertheless, high density bubble can be seen for high water flow rate condition, i.e., 30 litre/min and 35 litre/min.

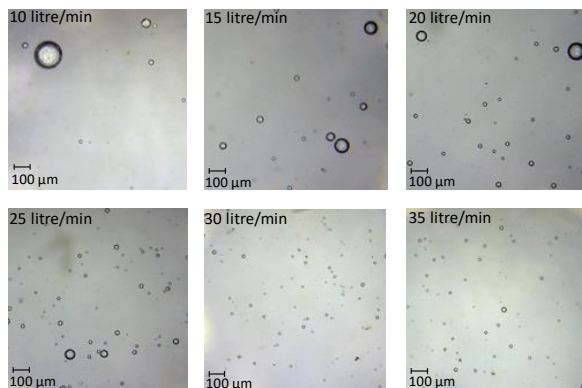


Figure 4 Sampling bubble from microscope camera

Figure 5 shows the average diameter of the bubbles according to the water flow rate. The range of the bubble size lies between 50.44-116.04 μm for entire experiment. According to the raw picture, smaller bubble are achieved from increasing the water flow rate. Almost half of size decreasing is obtained by adding the flow from 10 litre/min to 35 litre/min. At the higher water flow rate the different of bubble size was decreased

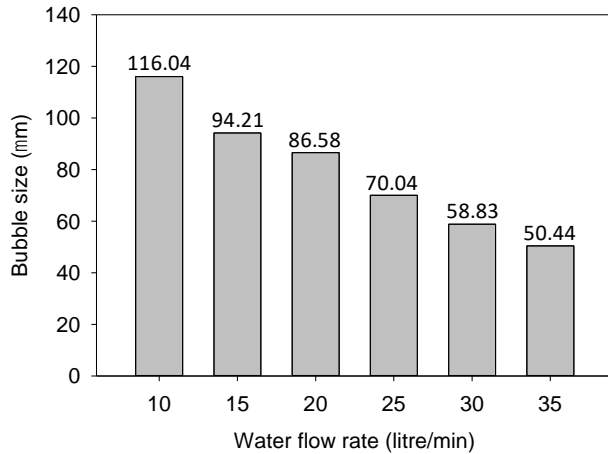


Figure 5 Bubble size of each water flow rate

4.2 Biogas upgrading

Figure 6 shows the effect of water flow rate to the CH₄ enrichment. The maximum of CH₄ enrichment is obtained at water flow rate of 35 litre/min. This result shows that the smallest bubble dominates to enrichment factor. At 30 minutes from the starting of the upgrading process, the enrichments for all water flow rate show reach to the maximum. It is concluded that the bubble size does not affect to maximum enrichments time.

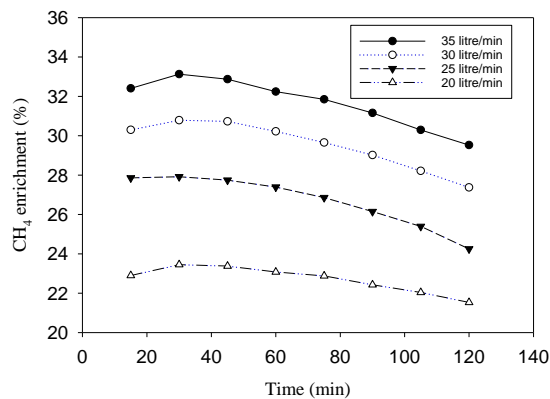


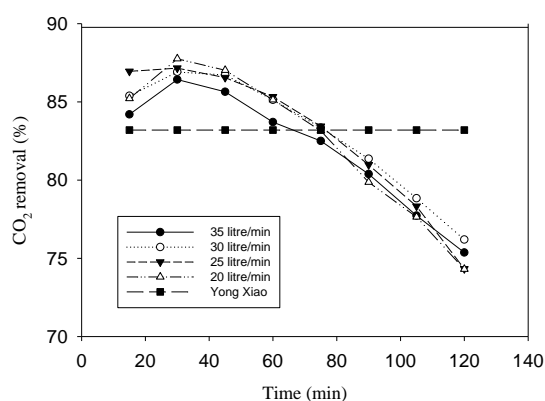
Figure 6 Amount of CH₄ recovery according to the testing time

To consider the factors of simplicity and economic, these four methods were rather complex process. Water scrubbing was the most popular used technology for biogas cleaning and upgrading (Thrän *et al.*, 2014) due to simple and economic. The maximum CH₄ enrichment shows in figure 6 is 33.13% at 30 minutes after purification which CH₄ content before purification was higher than 70%. The CH₄ enrichment can be improved from low CH₄ concentration before purification. The comparison of different pilot and commercial biogas upgrading parameters are shown in the Table 1.

Table 1. Comparison of different pilot and commercial biogas upgrading technologies

Considered parameter	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm ³)	0.23-0.30	0.25-0.30	0.2-0.3	0.05-0.15	0.18-0.20
Consumption for clean biogas (kWh/Nm ³)	0.29-1.00	0.30-0.90	0.4	0.05-0.25	0.14-0.26
Heat consumption (kWh/Nm ³)	None	None	< 0.2	0.50-0.75	None
Heat demand (°C)	-	-	55-80	100-180	-
Cost	Medium	Medium	Medium	High	High
CH ₄ losses (%)	< 4	< 2	2-4	< 0.10	< 0.60
CH ₄ recovery (%)	96-98	96-98	96-98	96-99	96-98
Pre-purification	Yes	Recommended	Recommended	Yes	Recommended
H ₂ S co-removal	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N ₂ and O ₂ co-removal	Possible	No	No	No	Partial
Operation pressure (bar)	3-10	4-10	4-8	Atmospheric	5-8
Pressure at outlet (bar)	4-5	7-10	1.3-7.5	4-5	4-6

Figure 7 presents amount of CO₂ removal relating to the water flow rate. The result indicates that the water flow rate does not significant affect to CO₂ removal while the trends of the results show similar pattern that reach the maximum values at the 30 minutes of running process and continuously decline after that. The mean values from the present study is deviated of $\pm 10\%$ from the result of previous study (Yong Xiao et al.,2014).

**Figure 7** CO₂ removal for gas flow rate of 0.1 litre/min

4.3 Flow characteristics

Figure 8 shows velocity streamline for water flow 35 litre/min at center-plane of reactor and bubble generator from simulation result. The swirling flow from the generator induces the gas inlet from inlet at the bottom. Consequently, high velocity is injected into reactor. Large counter rotating flow is established due to shear force effect. This phenomenon presents to all cases of water flow rate. After high velocity stream merges into large volume of water inside reactor, the laminar flow is presented at the middle section. For upper section, stream lines are compressed at the outlet while top section region shows the quiescent fluid.

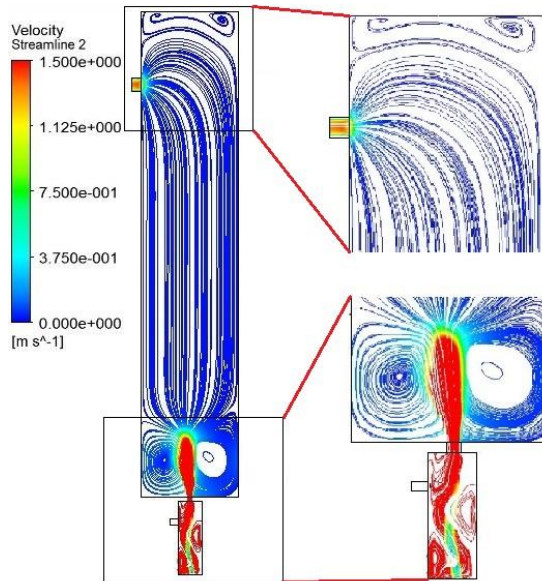


Figure 8 Velocity streamline at the center plane

5. Conclusions

The experiment of biogas upgrading was conducted from the pilot scale in the laboratory. Based on the experiment results, the following main conclusions can be stated:

1. Water flow rate direct affects to bubble size, which is obtained smaller bubble from the higher water flow rate.
2. Bubble size affect to amount of CH₄ recovery due to increase contacting area of biogas to water. Moreover, smaller bubble has lower floating speed which benefit to the enrichment. For CO₂ removal, the water flow rates show less affect to the removal value.
3. The swirling flow form the developed microbubble generator induces the gas inlet automatically from inlet at the bottom. This benefit could be impacted to apply for applications extend.

6. Acknowledgements

Thank you for supporting by faculty of engineering, Prince of Songkla University. Many thanks to Songkhla canning factory for biogas sampling hatyai, Thailand.

7. References

- Andriani, D., Wresta, A., Atmaja, T.D., Saepudin, A., (2014). A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 172, 1909–1928. DOI: 10.1007/s12010-013-0652-x
- Ashok, K., M, Arnab., Patro, P., (2015). Heat transfer enhancement from a small rectangular channel with different surface protrusions by a turbulent cross flow jet. *International Journal of Thermal Sciences.* 32-41. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.07.003
- Fan, W., Liu, Y., Wang, K., (2016). Detailed experimental study on the performance of Monoethanolamine, Diethanolamine, and Diethylenetriamine at absorption/regeneration conditions. *Journal of Cleaner Production*, 125, 296-308. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.144
- Fernández-Delgado, J.M., Mostbauer, P., Knapp, A., Müller, W., Tertsch, S., Bockreis A., & Insam, H. (2018). Biogas purification with biomass ash. *Waste Management*, 71, 224-232. DOI: 0.1016/j.wasman.2017.09.043

- Jürgensen, L., Ehimen, E.A., Born, J., Holm-Nielsen, J.B., (2014). Utilization of surplus electricity from wind power for dynamic biogas upgrading: northern Germany case study. *Biomass Bioenergy* 66, 126–132. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.02.032
- Kainiemi, L., Eloneva, S., Toikka, A., Levanen, J., Järvinen, M., (2015). Opportunities and obstacles for CO₂ mineralization: CO₂ mineralization specific frames in the interviews of Finnish carbon capture and storage (CCS) experts. *Journal Cleaning Production*. 94, 352-358.
- Li, Y., Wang, L., Hu, X., Jin, P., & Song, X. (2018). Surface modification to produce superhydrophobic hollow fiber membranecontactor to avoid membrane wetting for biogas purification under pressurized conditions. *Separation and Purification Technology*, 194, 220-230. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.11.041
- Mao, X.Q., Zeng, A., Hu, T., Xing, Y.K., Zhou, J., Liu, Z.Y., (2014). Co-control of local air pollutants and CO₂ from the Chinese coal-fired power industry. *J. Clean. Prod.* 67, 220-227. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.017
- Maile, O.I., (2017). The potency of monoethanolamine in biogas purification and upgrading. *South African Journal of Chemical Engineering*. 24, 122-127. DOI: 10.1016/j.sajce.2017.06.004
- Maile, O.I., Tesfagiorgis, H., Muzenda, E., (2015). A review of possible absorbent regeneration in biogas purification and upgrading. In: International Conference on Energy, Environment and Climate Change. *Republic of Mauritius, pp.*, 140-150. DOI: 10.1016/j.sajce.2017.06.004
- Muñoz, R., Meier, L., Diaz, I., Jeison, D., (2015). A review on the state-of-the-art of physical chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 14, 727–759. DOI: 10.1007/s11157-015-9379-1
- Serejo, M.L., Posadas, E., Boncz, M.A., Blanco, S., Garcia-Encina, P., Muñoz, R., (2015). Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial processes. *Environ. Sci. Technol.* 49, 3228–3236. DOI: 10.1021/es5056116
- Thrän, D., Billig, E., Persson, T., Svensson, M., Daniel-Gromke, J., Ponitka, J., Seiffert, M., (2014). Biomethane—status and factors affecting market development and trade. IEA task 40 and task 37 Joint Study.
- Toledo-Cervantes, A., Serejo, M.L., Blanco, S., Pérez, R., Lebrero, R., Muñoz, R., (2016). Photosynthetic biogas upgrading to bio-methane: boosting nutrient recovery via biomass productivity control. *Algal Res.* 17, 46–52 DOI: 10.1016/j.algal.2016.04.017.
- Xiao, Y., Yuan, H., Pang, Y., Chen, S., (2014) CO₂ Removal from Biogas by water washing system. *Chinese journal of chemical engineering*. 950-953. DOI: 10.1016/j.cjche.2014.06.001

ภาคผนวก จ.

บทความสำหรับเผยแพร่ 2

การประยุกต์ใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

การประยุกต์ใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ

Application of Microbubbles for Carbon dioxide Removal from Biogas

ทรงพล ศีกะชาติ¹, สมชาย แซ่ฮ้อ¹ และ ชยุต นันทดูลิต^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพโดยวิธีการดูดซึมด้วยน้ำ (water scrubber) ซึ่งนำหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กแบบหมุนควงตัดเฉือนน้ำ (swirl flow type) และติดตั้งท่อบังคับการไหลมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ จากการลดขนาดของฟองแก๊สทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสกับน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบสูงขึ้น โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาขนาดฟองแก๊สจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก และ การศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก ในการทดลองกำหนดอัตราการไหลน้ำ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที อัตราการไหลแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที และระหว่างทดลองควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 25 °C จากผลการทดลองพบว่า ขนาดของฟองที่สร้างได้อยู่ในช่วง 50.44-116.04 μm ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากการผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 92.46% ในแต่ละอัตราการไหลน้ำมีผลต่อการล้างคาร์บอนไดออกไซด์เล็กน้อย

Abstract

The objective of the research aims to study carbon dioxide removal from biogas with water scrubber which apply with swirl flow microbubble generator to increase the carbon dioxide removal. From decreasing the bubble size can be more contact area effect to increasing the carbon dioxide removal. The main study are microbubble size and CO₂ removal. The condition of the experiment are 10, 15, 20, 25, 30 and 35 litre/min water flow rate, 0.1 litre/min gas flow rate, 25°C of water was controlled. The result are the size of bubble can generated in range 50.44-116.04 μm . The carbon dioxide removal can reach to 92.46%.

Keywords: Microbubble, Biogas purification, Microbubble generator, CO₂ removal

1. บทนำ

แก๊สชีวภาพ เป็นพลังงานหมุนเวียน ชนิดหนึ่งที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน) จัดเป็นพลังงานที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างหลากหลาย [1] เช่น ของเสียหรือน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมแปรรูป

อาหาร ภาคอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ภาคปศุสัตว์ ภาคชุมชนและสถานประกอบการต่าง ๆ แม้แต่ของเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือจากพืชพลังงานต่าง ๆ โดยปกติแก๊สชีวภาพจะต้องมีแก๊สมีเทนอยู่มากกว่า 60 % จึงสามารถนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงขับเคลื่อนเครื่องยนต์หรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า [2]

แก๊สชีวภาพเป็นกลุ่มแก๊สที่ประกอบไปด้วยแก๊สหลายชนิด ได้แก่ แก๊สมีเทน 50-70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สอื่น [3] แก๊สบางชนิดเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีฤทธิ์เป็นกรด จะเข้าไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะให้สึกหรอ และไอน้ำที่มากับแก๊สจะเข้าไปในเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์ขัดข้อง ดังนั้นก่อนที่จะนำแก๊สชีวภาพไปใช้กับเครื่องยนต์ต้องมีการดักไอน้ำและแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์เสียก่อน แก๊สมีเทนเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีสัดส่วนของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่จะเป็นผลทำให้ค่าความร้อนรวมของแก๊สลดลง ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นส่วนผสมในแก๊สชีวภาพนั้นนอกจากจะมีผลทำให้ค่าความร้อนรวมของแก๊สลดลงแล้วยังส่งผลทำให้ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนไม่คงที่ ทำให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เปลวไฟไม่นิ่งหรืออาจจะเกิดปัญหาไฟดับและเกิดปัญหาการระเบิดเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลง อีกทั้งยังมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในท่อส่งแก๊สอีกด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ หรือการลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพลง จะสามารถลดปัญหาข้างต้นลงได้ และแก๊สชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว เรียกว่า ไบโอมีเทน

กระบวนการในการแยกและดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ โดยเทคนิคที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนในแก๊สโดยทั่วไป มี 4 วิธี ได้แก่ การดักจับด้วยน้ำ (Water Scrubber Technology) เป็นวิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ ซึ่งได้แก๊สมีเทนที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่ต้องใช้ปริมาณน้ำและความดันมาก การดูดซับโดยเปลี่ยนความดัน (Pressure Swing Adsorption) เพื่อควบคุมคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ วิธีนี้จะสูญเสียแก๊สมีเทนน้อยมาก แต่ต้องใช้ความดันสูงและมีขั้นตอนที่ซับซ้อน การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน (Amine Absorption Process) วิธีนี้จะมีระบบไม่ซับซ้อนและมี

ขนาดเล็ก แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนและมีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีสูง และการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation) มีอายุการใช้งานยาวนานและประหยัดพลังงาน แต่มีต้นทุนสูงและระบบที่ซับซ้อน [4]

ในงานวิจัยสนใจศึกษาระบบแบบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพ โดยวิธีดูดซับด้วยน้ำ (water scrubber) เป็นลักษณะคอลัมน์น้ำทรงกระบอกสูง ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมกับอากาศเพื่อจำลองเป็นแก๊สชีวภาพ [5] ผ่านทางหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่ติดตั้งด้านล่างของคอลัมน์น้ำ เมื่อแก๊สผ่านน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกละลายไปกับน้ำเหลือเพียงแก๊สมีเทน แก๊สที่ลอยผ่านน้ำออกคอลัมน์จะถูกวิเคราะห์ห้องคัปประกอบเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กที่นำมาประยุกต์ใช้กับการทดลองเป็นแบบ swirl flow ซึ่งติดตั้งท่อบังคับการไหลภายในหัวฉีด เพื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนวน โดยฟองที่สร้างเกิดจากการตัดเฉือนระหว่างการไหลของน้ำและแก๊ส ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฟองขนาดเล็กซึ่งสามารถควบคุมขนาดและปริมาณของฟองได้ด้วยการกำหนดอัตราการไหลของน้ำและแก๊ส ข้อดีของหัวฉีดประเภทนี้ คือ การทำงานไม่ซับซ้อน ควบคุมการเกิดฟองได้ง่าย สร้างปริมาณฟองได้มาก และสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแก๊สกับน้ำได้สูง

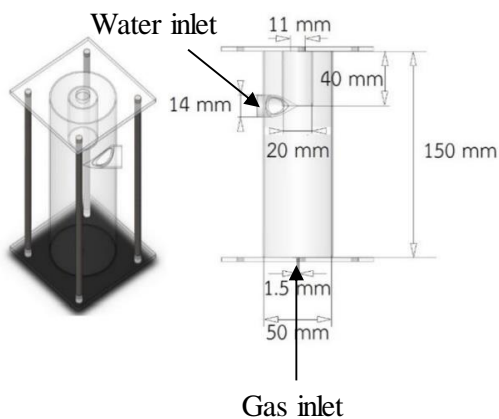
จากปัญหาที่พบจากการล้างแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับด้วยน้ำ ระบบน้ำต้องใช้แรงดันที่สูงมากจึงทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยและต้องเพิ่มต้นทุนไปกับการสร้างความแข็งแรงให้กับระบบ แก๊สต้องใช้แรงดันในการอัดเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน ในการทดลองจะวัดขนาดฟองในแต่ละช่วงของอัตราการไหลน้ำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการสร้างฟองจากการนำมาใช้กับชุดทดลองเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการจำลองอัตราส่วนของแก๊สชีวภาพด้วยการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ ศึกษาผลที่ได้จาก

ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกัน ทดสอบ การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการล้างแก๊สซีภาพจริง ผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ทำบริสุทธิ์แก๊สมีเทน และพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณแก๊สที่ล้างได้ เพื่อนำผลการทดลองไปใช้ต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 รายละเอียดตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

จากรูปที่ 1 แสดงหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก ลักษณะทรงกระบอกทำจากท่ออะครีลิก ขนาดความหนา 3 mm ยาว 150 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm น้ำจะถูกส่งเข้ามาทางท่อขนาด 14 mm ที่ถูกติดตั้งในแนวสัมผัสของท่อทรงกระบอก 50 mm เกิดการหมุนวน สร้างความดันต่ำภายในหัวฉีดทำให้เกิดการดูดเข้ามาผสมตัวเองผ่านทางท่อด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm และไหลผ่านท่อบังคับการไหลขนาด 20 mm ออกทางหัวฉีดที่ปากทางออกขนาด 11 mm เกิดเป็นฟองขนาดเล็ก



รูปที่ 1 แสดงหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

2.2 การศึกษาขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

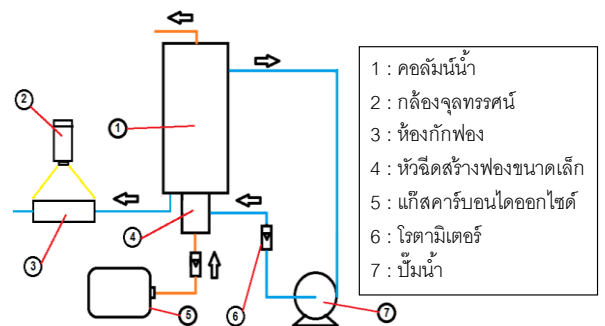
อุปกรณ์ในการวัดฟองขนาดเล็กประกอบด้วย ห้องกักฟองที่ทำจากกระจกขนาดกว้าง 120 mm ยาว 160 mm และสูง 2 mm ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า (Digital USB Microscope

Aopute H1000x 5.0 Mega Pixel) บริเวณด้านบนของห้องกักฟอง สำหรับถ่ายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับการศึกษาถ่ายภาพวัดฟองขนาดเล็ก

น้ำในคอลัมน์จะถูกดูดผ่านทางวาล์วด้านล่างไหลเข้าห้องกักฟอง เมื่อน้ำไหลผ่านห้องกักฟองจนเต็ม วาล์วตรงทางออกของห้องกักฟองจะถูกปิดเพื่อบันทึกภาพแล้วนำภาพไปหาขนาดฟองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพต่อไป ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะใช้เวลาเก็บตัวอย่างภาพ 20 ภาพ ทุก ๆ 5 นาที ขนาดของแต่ละฟองในแต่ละภาพจะถูกนำมาเฉลี่ย โดยมีส่วนประกอบชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3

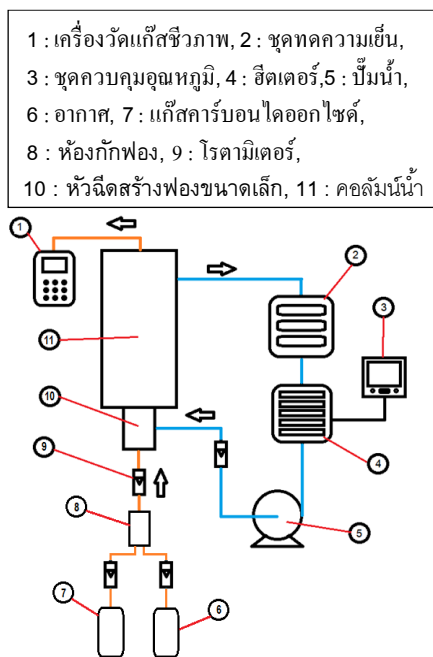


รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองศึกษาภาพถ่ายฟองขนาดเล็ก

ในการทดลองกำหนดอัตราการไหลน้ำ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที และอัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 ลิตร/นาที เพื่อควบคุมปัจจัยของปริมาณแก๊สไม่ให้มีผลกับขนาดฟองในทุกอัตราการไหลของน้ำ

2.3 การศึกษาการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

แก๊สที่ใช้ในการทดลองเป็นแก๊สที่ได้จากการผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศโดยอัตราส่วนที่กำหนดเพื่อจำลองแก๊สชีวภาพจริงที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 30%, 40% และ 50% โดยกำหนดอัตราการไหลน้ำ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ลิตร/นาที อัตราการไหลหลังผสมแก๊ส 0.1 ลิตร/นาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C เพื่อคงความสามารถในการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยมีส่วนประกอบของชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงชุดทดลองการศึกษาการทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

แก๊สจะถูกผสมที่ห้องผสม เป็น PVC ทางกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 300 mm แก๊สที่ถูกปล่อยก่อนการผสมจะถูกควบคุมด้วยโรตารีมิเตอร์ เพื่อกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลอง หลังจากผ่านห้องผสม แก๊สจะถูกกำหนดอัตราการไหลที่ 0.1 ลิตร/นาที

การหาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ removal สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

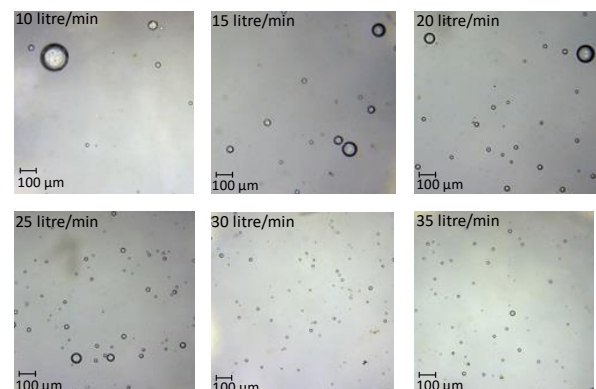
โดยที่ C_r คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการล้าง

C_p คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้าง

3. ผลการทดลอง

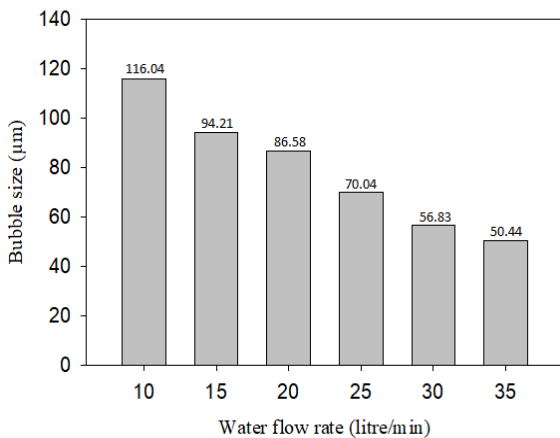
3.1 ขนาดฟองจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

จากผลการทดลองในแต่ละอัตราการไหลพบว่าสามารถผลิตฟองที่มีขนาดเล็กออกมาได้แต่จะมีขนาดและปริมาณฟองที่แตกต่างกัน ซึ่งที่อัตราการไหล 10 และ 15 ลิตร/นาที แก๊สที่ถูกดูดเข้ามาจะไม่มีความเสี่ยงมีขนาดฟองที่ใหญ่และน้อย สำหรับอัตราการไหล 20 ลิตร/นาที ขึ้นไป ขนาดฟองจะเริ่มเล็กลงและมีปริมาณมากตามอัตราการไหลที่มากขึ้น ที่อัตราการไหล 35 ลิตร/นาที จะมีขนาดฟองและปริมาณที่ดีที่สุด โดยภาพถ่ายขนาดฟองที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราการไหลแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพถ่ายฟองแก๊สโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล

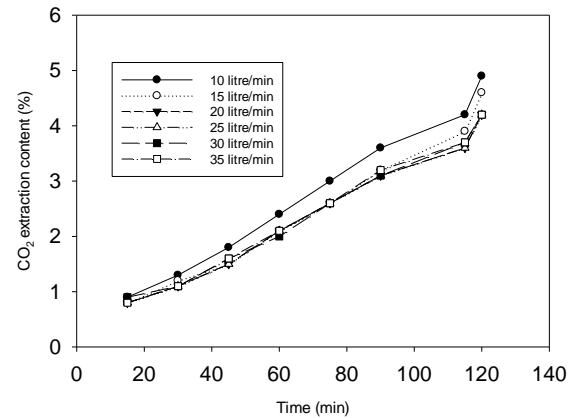
จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายฟองจากกล้องจุลทรรศน์พบว่า อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตร/นาที มีขนาดฟองที่ใหญ่ที่สุด 116.04 μm เมื่ออัตราการไหลน้ำเพิ่มขึ้น ขนาดฟองจะเล็กลง ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่ออัตราการไหลน้ำสูงขึ้นเรื่อย ๆ ความแตกต่างของขนาดฟองจะเริ่มน้อยลง โดยขนาดฟองของอัตราการไหลน้ำระหว่าง 30 และ 35 ลิตร/นาที มีความแตกต่างเพียง 6.39 μm เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำต่าง ๆ

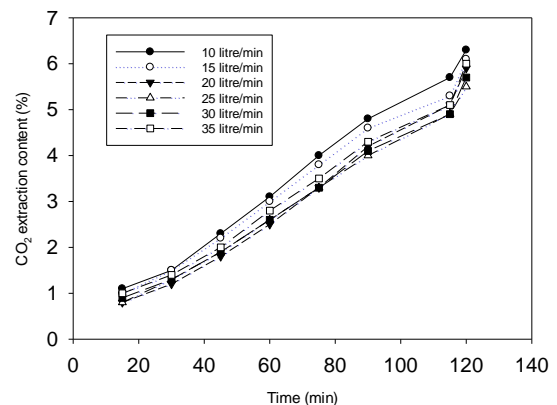
3.2 การทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็ก

รูปที่ 7 แสดงค่าของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออก กำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมกับอากาศที่ความเข้มข้น 30% จะเห็นว่าในภาพรวมในทุกกรณีคาร์บอนไดออกไซด์หลังการล้างจะเพิ่มขึ้นตามเวลาซึ่งมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะเพิ่มขึ้นเวลา เนื่องจากค่าความเป็นกรดของน้ำที่เกิดจากการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ในเวลา 15 นาทีแรกหลังการทดลองมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทางออกสูงสุด 0.9% โดยอัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตร/นาที จะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกมามากที่สุด ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง 4.9 % มีความแตกต่างกับที่เงื่อนไขอัตราการไหล 15 ลิตร/นาที เพียง 0.3%



รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกที่ความเข้มข้น 30%

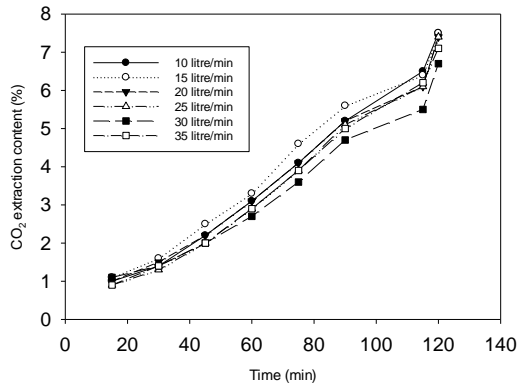
รูปที่ 8 แสดงค่าคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออก กำหนดความเข้มข้น 40% พบว่า อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตร/นาที ยังคงมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงสุด 6.3% ที่เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่น ๆ จะเห็นว่าความแตกต่างของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกยังคงน้อยและเริ่มกระจายตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 7



รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกที่ความเข้มข้น 40%

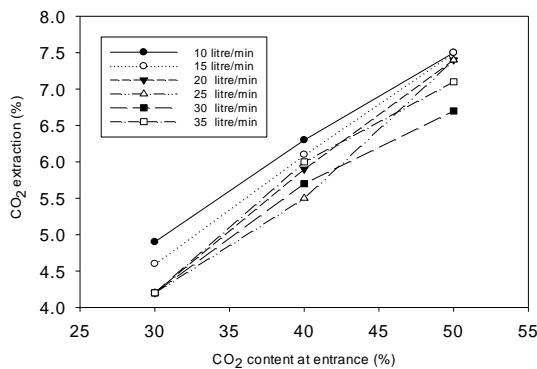
กรณีกำหนดค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลอง 50% ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าที่เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกในแต่ละอัตราการ

ไหลน้ำมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของน้ำที่ 15 ลิตร/นาที มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตรงทางออกสูงสุด 7.5%



รูปที่ 9 แสดงแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกที่ความเข้มข้น 50%

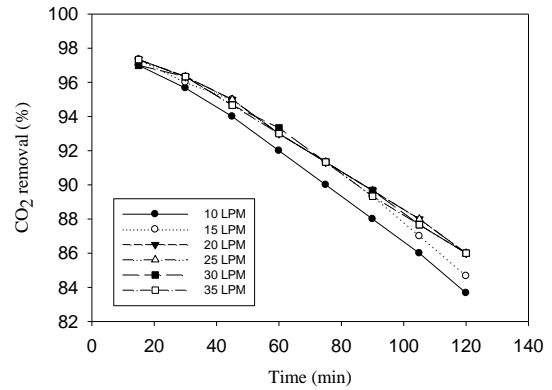
จากการทดลองทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า เมื่อกำหนดค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองสูงขึ้น ปริมาณแก๊สตรงทางออกจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและทำให้ความแตกต่างในแต่ละอัตราการไหลลดลง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกและทางเข้าที่กรณีอัตราการไหลต่าง ๆ ของน้ำ

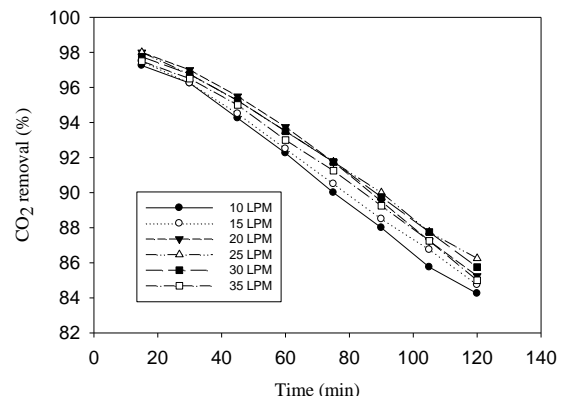
รูปที่ 11 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% พบว่าแนวโน้มของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราการไหลของน้ำไม่มีความแตกต่างกันมาก โดยที่

อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตร/นาที มีความสามารถในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ต่ำสุด สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยคือ 91.77%



รูปที่ 11 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30%

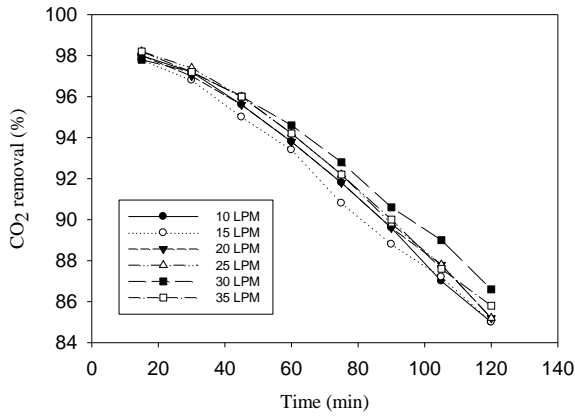
ความสามารถการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40% ดังแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นว่าอัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตร/นาที ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำสุด 85% ที่เวลา 2 ชั่วโมงหลังเริ่มการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 91.87% จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 20-35 ลิตร/นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกันน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 10



รูปที่ 12 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40%

รูปที่ 13 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50% จะเห็นว่าผล

การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับรูปที่ 10 และ 11 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.46%

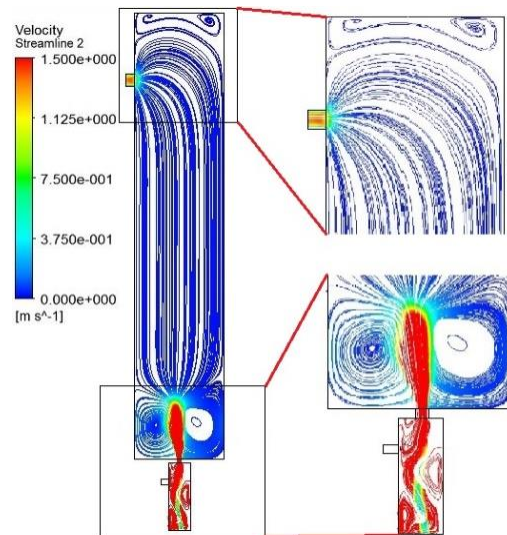


รูปที่ 13 แสดงความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50%

จากค่าความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยกำหนดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการทดลองจะทำให้ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong Xiao [6] โดยประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 98% ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 50% โดยใช้พลังงานของปั๊มเพียงอย่างเดียวเนื่องจากตัวหัวฉีดสามารถดูดแก๊สเข้าสู่ระบบได้เองและความแตกต่างของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราการไหลน้ำลดลง แต่เนื่องจากอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองเพียง 0.1 ลิตร/นาที ทำให้เห็นความแตกต่างไม่มากนัก ระยะเวลาในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากสภาพน้ำที่มีความเป็นกรดมากขึ้นจากการทำละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.3 การศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดลองด้วย CFD

จากรูปที่ 14 แสดงผลการจำลองความเร็วของการไหลของน้ำภายในชุดทดลองซึ่งคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys v 15 (fluent) ด้วย k ω -SST model ทุกอัตราการไหลน้ำมีลักษณะการไหลของน้ำที่เหมือนกัน เมื่อพิจารณาคอลัมน์น้ำจะเห็นว่า ลักษณะการไหลแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของน้ำที่เกิดการหมุนวน เป็นลักษณะการหมุนวนจากจุดตรงกลางออกทางด้านข้าง ซึ่งจุดที่พุ่งออกจากหัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กจะมีความเร็วสูงที่สุดและลดความเร็วลงเมื่อเกิดการหมุนวน และส่วนของน้ำที่ไหลในแนวตรงต่อจากส่วนที่หมุนวนด้านล่างจนไปถึงปากทางออก



รูปที่ 14 แสดงผลความเร็วของการไหลของน้ำในชุดทดลอง



รูปที่ 15 ภาพถ่ายการไหลของน้ำในชุดทดลอง

4. สรุปผลการทดลอง

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

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัยในครั้งนี้ และศูนย์ปฏิบัติการงานวิจัยแก๊สชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดแก๊สชีวภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้แก๊สชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2553

[2] ณัฐพล, “ศึกษาการใช้ก๊าซชีวภาพกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนขนาดเล็ก”.

[3] ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ, “การประหยัดพลังงานในอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม

[4] Maile, O.I., Tesfagiorgis, H., Muzenda, E., (2015). A review of possible absorbent regeneration in biogas purification and upgrading. In: International Conference on Energy, Environment and Climate Change. Republic of Mauritius, pp., 140-150.

[5] Rongwong, W., Boributh, S., Assabumrungrat, S., Laosiripojana, N., Jiraratananon, R., (2012). Simultaneous absorption of CO_2 and H_2S from biogas by capillary membrane contactor. J. Membr. Sci, 392-393, 38-47

[6] Xiao, Y., Yuan, H., (2004). CO_2 removal from biogas by water washing system, Chinese Journal of Chemical Engineering, 950-953

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายทรงพล ศีกะชาติ	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6010120092	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่
สำเร็จการศึกษา		
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2560

ทุนการศึกษา

ทุนการศึกษาปริญญาตรี-โท 5 ปี

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

(1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ทรงพล ศีกะชาติ, สมชาย แซ่อึ้ง และ ชยุต นันทดุสิต, 2561 “การประยุกต์ใช้หัวฉีดสร้างฟองขนาดเล็กเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 ระหว่างวันที่ 3-6 กรกฎาคม 2559 จังหวัดมุกดาหาร

(2) บทความทางวิชาการ (Journal paper)

Songphon Suekkhachat, Somchai Saeung, and Chayut Nuntadusit, 2018, “Application of microbubble technique for CO₂ and CH₄ entrapment in biogas”, Journal of Current Science and Technology (JCST), Vol.8 No.2 , July – December, 67-74.

ทรงพล ศีกะชาติ, เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล, สมชาย แซ่อึ้ง และ ชยุต นันทดุสิต, 2561 “การประยุกต์ใช้ฟองขนาดไมครอนเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ”, วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2561, หน้า 71 - 80