



การศึกษาทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยถ่านกัมมันต์
และดูดซึมโดยน้ำ

**Experimental Study on the Carbon Dioxide Adsorption by Activated Carbon
and Absorption by Water**

จิระศักดิ์ เพ็งคุณ

Jirasak Pengkun

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**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยถ่านกัมมันต์และ ดูดซึมโดยน้ำ
ผู้เขียน	นายจิระศักดิ์ เฟื่องคุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ดร.สมชาย แซ่อึ้ง)

(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ

(ดร.สมชาย แซ่อึ้ง)

.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะ-
วงศ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทกุลิต)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฤทธิ์ทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
เครื่องกล

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร. สมชาย แซ่เอ็ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นาย จีระศักดิ์ เฟื่องคุณ)

นักศึกษา

ขอรับรอง ว่ารายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นต้นฉบับที่ยังไม่ได้นำเสนอต่อสถาบันการศึกษาที่ใดมาก่อน

ลงชื่อ.....

(นาย จีระศักดิ์ เฟื่องคุณ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยถ่านกัมมันต์และดูดซึมโดยน้ำ
ผู้เขียน	นายจิระศักดิ์ เฟื่องคุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทดลองหาพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และการดูดซึมด้วยน้ำ ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตการทดลองจะแบ่งการทดลองออกเป็น สองส่วนใหญ่ๆ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง เป็นการทดลองหาสถานะความดันและอัตราการไหลของก๊าซรวมทั้งค่า pH ของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการดูดซึมก๊าซของน้ำและการดูดซับก๊าซของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งทดลองหาพฤติกรรมการดูดซึมและดูดซับก๊าซของน้ำและถ่านกัมมันต์หลังการฟื้นฟูสภาพ ส่วนการทดลองที่สองเป็นการทดลองหาพฤติกรรมการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำและการดูดซับของถ่านกัมมันต์ภายใต้ ค่าความดัน อัตราการไหลของก๊าซ และค่า pH ของน้ำที่ได้จากผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง ซึ่งการทดลองส่วนที่หนึ่งจะใช้น้ำปริมาตรรวม $7,000 \text{ cm}^3$ ถ่านกัมมันต์ปริมาตรรวม $4,000 \text{ cm}^3$ และค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $1,894.86 \text{ mg}$ ต่อปริมาตรก๊าซรวม $1,000 \text{ cm}^3$ ส่วนการทดลองที่สองจะใช้น้ำและถ่านกัมมันต์เท่ากับการทดลองส่วนที่หนึ่งแต่ก๊าซที่ใช้สำหรับทดลองจะใช้ก๊าซผสมที่ได้จากการผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซออกซิเจนในอัตราส่วน 3:3:4 โดยการทดลองทั้งสองส่วนดังกล่าวข้างต้นจะใช้วิธีการทดลองแบบ เบดนิ่ง (fixed bed) และใช้เทคนิคการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบสลับความดัน (PSA) รวมทั้งทำการทดลองที่สถานะอุณหภูมิห้อง (30°C) และทำการตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านน้ำและถ่านกัมมันต์ทุกๆ หนึ่งนาทิจนกระทั่งได้ค่าความเข้มข้นของก๊าซตามที่ต้องการ

ผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง พบว่าที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14 เป็นสถานะเงื่อนไขที่น้ำและถ่านกัมมันต์สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดและยังพบอีกว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะดูดซับได้ดีกว่าการใช้น้ำดูดซึมถึง 4.532 เท่า และหากใช้ถ่านกัมมันต์และน้ำร่วมกันจะสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นถึง 0.21% คิดเป็น 99.37% ของค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นที่ใช้สำหรับทดลอง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าน้ำ

และถ่านกัมมันต์ไม่เหมาะที่จะฟื้นฟูสภาพด้วยเทคนิคลดความดันแต่หากจำเป็นต้องใช้เทคนิคนี้ในฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ควรใช้วิธีอื่นร่วมด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากผิวของน้ำและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดียิ่งขึ้น

ผลการทดลองส่วนที่สอง พบว่าถ่านกัมมันต์และน้ำสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมได้ โดยในส่วนของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าน้ำแต่ถ่านกัมมันต์จะไม่สามารถดูดซับก๊าซที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ เช่น ก๊าซออกซิเจน ส่วนน้ำนั้นถึงแม้จะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์แต่ก็สามารถดูดซับก๊าซชนิดอื่นๆ ที่ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถดูดซับได้ เช่น ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น

Thesis Title	Experiment study on the Carbon Dioxide adsorption by Activated Carbon and absorption by water
Author	Mr. Jirasak Pengkun
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2013

ABSTRACT

This research studies the behavior of the carbon dioxide capture. Adsorption with activated carbon and absorption by water. Under the scope of the trial, which the trial is divided into two parts as follows: Part one is an experiment for pressure and rate. Flow of gas, including the pH of the water is suitable for gas absorption of water and adsorption of activated carbon, including experimental behaviors absorption and adsorption of water and carbon . Late recovery of the second trial will be a test for the behavior of absorption of carbon dioxide in the gas mixture of water and carbon under pressure , flow rate of the gas and the pH of the water from the result. in one experiment The experiments in which one to use a total volume of 7,000 cm³ activated carbon to total volume 4,000 cm³ and the concentration of carbon dioxide from the user. Trial is equal to 1,894.86 mg per volume of 1,000 cm³ gas, the second trial will be used. Water and activated carbon is equal to the experimental one, but gas is used for experimental gas mixtures . Derived from a combination of carbon dioxide. Methane and oxygen in a ratio of 3:3:4 by experiments on both the above methods use a stationary bed (fixed bed) and a technique for trapping carbon dioxide pressure swing (PSA).experimental conditions including room temperature (30°C) with a formal analysis of the concentration of carbon dioxide. After water and activated carbon every minute until I either get the concentration of the gas as needed.

One of the findings Found that the cost of gas at 10 bar pressure, gas flow rate of 1,000 cm³/min and the pH of the water is equal to 14 conditions to water and carbon dioxide to capture the best and also met. that the use of activated carbon for carbon dioxide adsorption to better absorb the water absorption to 4.532 times if using activated carbon, activated carbon and water together to capture carbon dioxide has increased. to 0.21% , representing 99.37 % of the concentration of carbon dioxide that is used for the trial also found that water and activated

carbon unfit recovery by reducing the pressure , but if you need to use . Pressure in water and activated carbon regeneration should go the other way as well. It will help to purge. Carbon dioxide out of the body of water, and surface porosity of activated carbon better.

The second part of the research found that activated carbon can trap water and carbon dioxide in the gas mixture by the activated carbon will absorb carbon dioxide. Over water, but can not absorb carbon with a particle size smaller than the pores of activated carbon such as carbon, oxygen, and the waters were even less carbon dioxide absorption activated carbon, but it. Other gases can be absorbed by activated carbon can absorb the oxygen.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผู้จัดทำจักใคร่ขอขอบพระคุณ ดร.สมชาย แซ่เอ็ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงส์ ที่ปรึกษาในการทำวิจัยรวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน พร้อมทั้งมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งด้านทุนทรัพย์และคำชี้แนะในการทำวิจัยตลอดมา

สุดท้ายรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีมิได้หากไม่ได้รับคำชี้แนะและความช่วยเหลือจาก คณะกรรมการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ที่กรุณาตรวจสอบความถูกต้องของรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏในรายนามในเอกสารอ้างอิงซึ่งผู้วิจัยได้ใช้อ้างอิงข้อมูล ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณท่านทั้งหลายไว้ ณ โอกาสนี้

จิระศักดิ์ เฟื่องคุณ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(12)
รายการรูป	(15)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(22)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	6
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	6
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	7
2.1 เทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology)	7
2.2 กระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ	9
2.3 สารดูดซับ	12
2.4 สารดูดซึม	13
2.5 กระบวนการดูดซับและดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และน้ำ	14
2.6 เทคนิคที่ใช้ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์	17
2.7 เทคนิคที่ใช้สำหรับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ	18
2.8 ไอโซเทอมการดูดซับ	19
2.9 ลักษณะกราฟเบรคทรูจ์ของการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับการ ทดลองแบบ Fixed bed	23
บทที่ 3 เครื่องมืออุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง	26
3.1 แผนผังการทดลองดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	26
3.2 ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	27

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	28
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	30
3.5 วิธีการทดลอง	33
3.6 คุณสมบัติวัสดุสำหรับทดลอง	34
บทที่4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	36
4.1 เงื่อนไขการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด	36
4.2 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และค่าการแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพืชน้ำ	43
4.3 กราฟจุดเริ่มอิ่มตัวในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และน้ำ (Break through Curve)	45
4.4 การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากฟื้นฟูสภาพสารดูดซับและดูดซึม	47
4.5 พฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำและถ่านกัมมันต์	51
บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการวิจัย	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	63
ก. กราฟผลการทดลอง	64
ข. ตารางแสดงผลการทดลองและการคำนวณ	78
ค. ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง	94
ง. การคำนวณออกแบบเบื้องต้น	108
จ. รูปชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รูปขณะทำการทดลองและประวัติผู้จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์	141

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 คุณสมบัติของน้ำและถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับการทดลอง	34
3.2 คุณสมบัติของก๊าซชนิดต่างๆที่ใช้สำหรับการทดลอง	35
4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของน้ำที่ค่า PH- ของน้ำ ค่าต่างๆ	42
ภาคผนวก	
ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำที่ค่า PH- ของน้ำเท่ากับ 7 อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min	79
ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์- ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min	79
ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำที่มีค่า PH- เท่ากับ 7 และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	79
ข.4 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์- ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	80
ข.5 ค่าพารามิเตอร์ไอโซเทอมการดูดซึ่มแบบฟรุนคลิชของถ่านกัมมันต์	80
ข.6 ค่าพารามิเตอร์ไอโซเทอมการดูดซึ่มแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์	80
ข.7 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของแบบจำลองฟรอยด์ลิชและแบบจำลองแลง- มัวร์	81
ข.8 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำที่ค่าความ- ดันต่างๆ	81
ข.9 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำที่ค่า PH- ต่างๆ	82
ข.10 ค่า C/C ₀ ของน้ำที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min ความดัน- ของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14 ณ เวลาต่างๆ	82
ข.11 ค่า C/C ₀ ของถ่านกัมมันต์ที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min - ความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ณ เวลาต่างๆ	83

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
ข.12	ค่า C/C_0 ของชุดดักจับก๊าซที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ - ความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14 ณ เวลาต่างๆ	84
ข.13	ค่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในนาที่แรกของน้ำและระยะเวลาอิ่มตัว	85
ข.14	ค่า PH ของน้ำก่อนและหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ	85
ข.15	ค่า PH ของน้ำก่อนและหลังการดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	85
ข.16	ค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในนาที่แรกของถ่านกัมมันต์และระยะเวลาอิ่มตัว	86
ข.17	ปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ถูกถ่านกัมมันต์และน้ำดักจับได้สูงกว่าหรือเท่ากับ 80% ของปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ปล่อยผ่านระบบหลังฟื้นฟูสภาพ	86
ข.18	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่วัดได้หลังผ่านน้ำ	87
ข.19	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่วัดได้หลังผ่านถ่านกัมมันต์	88
ข.20	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่วัดได้หลังจากผ่านชุดดักจับก๊าซ	90
ข.21	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่วัดได้หลังจากผ่านการดักจับก๊าซด้วยเทคนิค PSA (Loop1)	91
ข.22	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่วัดได้หลังจากผ่านการดักจับก๊าซด้วยเทคนิค PSA (Loop2)	92
ข.23	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่วัดได้หลังจากผ่านการดักจับก๊าซด้วยเทคนิค PSA (Loop3)	93
ง.1	ผลการคำนวณหารัศมีและขนาด \emptyset ของท่อเหล็กสำหรับสร้างถังดูดซึม	109
ง.2	ผลการคำนวณหารัศมีและขนาด \emptyset ของท่อเหล็กสำหรับสร้างหอดูดซับ	110
ง.3	ความดันสูงสุดที่ถังดูดซึมด้วยน้ำและหอดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถรับได้	114
ง.4	คุณสมบัติหน้าแปลนเหล็ก 16 k (ชนิดBlind)	114
ง.5	คุณสมบัติและขนาดท่อที่ใช้สำหรับส่งก๊าซ	114
ง.6	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะ	128

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
ง.7	ค่าความปลอดภัยในการออกแบบ	128
ง.8	มาตรฐานท่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม (JIS)	129
ง.9	คุณสมบัติทางกลของท่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม (JIS)	130
ง.10	คุณสมบัติหน้าแปลนขนาด 100 และ 125 mm ชนิด Blind	131
ง.11	คุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับรับแรงดันสูง (JIS)	132
ง.12	คุณสมบัติท่อทองแดง แบบ k แบบ M และแบบ L	133
ง.13	ค่าความขรุขระภายในผิวท่อ (ท่อใหม่)	134
ง.14	ค่าแฟกเตอร์ความเสียหายของท่อเหล็ก (ท่อใหม่)	134
ง.15	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (k) สำหรับวาล์ว ข้องอและสามทาง	135
ง.16	ขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์	136

รายการรูป

รูป		หน้า
2.1	บ่อหมักก๊าซธรรมชาติ	7
2.2	แรงการกระจาย	10
2.3	แรงไฟฟ้าสถิต	10
2.4	การคัดแยกสารของเมมเบรน	11
2.5	การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นพลังงาน	12
2.6	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	13
2.7	กลไกการดูดซับ	15
2.8	เปอร์เซ็นต์การแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) ที่ค่า PH ของน้ำ- ต่างๆ	17
2.9	การดูดซับแบบสลับความดัน	18
2.10	กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำแบบ Water Scrubbing	19
2.11	ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (Two films theory)	21
2.12	กราฟเบรคทรูจของการดูดซับเพื่อออกแบบหอดูดซับ	24
3.1	แผนผังการทดลองดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	26
3.2	ส่วนประกอบของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	27
3.3	ปั๊มสร้างแรงดัน	28
3.4	ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	29
3.5	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ	29
3.6	กระดาษลิตมัส	29
3.7	มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน	29
3.8	มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	30
3.9	มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซมีเทน	30
3.10	แผนผังการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสม	33
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของการดูดซับก๊าซ- คาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและค่าความดันของก๊าซที่ค่า PH ของน้ำเท่า- กับ 7 และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min	37

รายการรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และค่าความดันของก๊าซที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min	37
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระยะเวลาในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำจืดกระทั่งอิ่มตัวและค่าความดันของก๊าซที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 7	38
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระยะเวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จนถึงกระทั่งอิ่มตัวและค่าความดันของก๊าซที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min	38
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและอัตราการไหลของก๊าซที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 7	39
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	40
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระยะเวลาในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำจืดกระทั่งอิ่มตัวและค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 7	40
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระยะเวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จนถึงกระทั่งอิ่มตัวและค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	41
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและค่า PH ของน้ำที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	42
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระยะเวลาในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำจืดกระทั่งอิ่มตัวและค่า PH ของน้ำที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	42

รายการรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
4.11	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์	43
4.12	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์	44
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความดันของก๊าซที่ ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 7	44
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และค่า PH ของน้ำ ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min	45
4.15	กราฟเบรกทรูจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C ₀ และเวลาที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14	46
4.16	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้ำสามารถดูดซึมได้ ณ นาทีแรกหลังผ่านน้ำ กับจำนวนครั้งการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min ความดันก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า PH ของน้ำ เท่ากับ 14	48
4.17	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำจืดสัมพันธ์กับจำนวนครั้งการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min ความดันของก๊าซเท่ากับ 10bar และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14	48
4.18	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่า PH ของน้ำก่อนและหลังการทดลองดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์กับจำนวนครั้งการทดลอง ที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	49
4.19	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับในนาทีแรกหลังผ่านถ่านกัมมันต์ กับจำนวนครั้งการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และความดันก๊าซเท่ากับ 10 bar	50

รายการรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
4.20	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จนกระทั่งอิ่มตัวกับจำนวนครั้งการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และความดันก๊าซเท่ากับ 10 bar	50
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซที่ผ่านตัวดูดซึ่มกับเวลาที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14	52
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซที่ผ่านตัวดูดซับกับเวลาที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14	53
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซที่ผ่านตัวดูดซับและดูดซึ่มกับเวลา ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14	53
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซที่ผ่านตัวดูดซับและดูดซึ่มกับเวลา ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 14 - ทดลองโดยเทคนิคแบบ PSA	54
ภาคผนวก		
	กราฟ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกน้ำดูดซึ่มและเวลา ที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 - cm ³ /min และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 7	65
	กราฟ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกน้ำดูดซึ่มและเวลา ที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า PH ของน้ำเท่ากับ 7	66

รายการรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
กราฟ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกน้ำดูดซึมและเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 - cm^3/min และค่าความดันของก๊าซเท่า 10 bar	67
กราฟ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm^3/min	68
กราฟ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และเวลาที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar	69
กราฟ ก.6 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุณฑลิต	70
กราฟ ก.7 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงมัวร์	70
กราฟ ก.8 แสดงปริมาณ Free CO_2 และ ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซึมที่ค่าความดันของก๊าซค่าต่างๆที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm^3/min	71
กราฟ ก.9 แสดงปริมาณ Free CO_2 และ ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซึมที่ค่า PH ต่างๆของน้ำ ณ ความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลเท่ากับ 1,000 cm^3/min	71
กราฟ ก.10 เบลคทรูจ์ของน้ำ PH 14 ปริมาตร 7,000 cm^3	72
กราฟ ก.11 เบลคทรูจ์ของถ่านกัมมันต์ ปริมาตร 4,000 cm^3	72
กราฟ ก.12 เบลคทรูจ์ของน้ำ PH 14 ปริมาตร 7,000 cm^3 และถ่านกัมมันต์ปริมาตร 4,000 cm^3	73
กราฟ ก.13 ผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพของน้ำ (ก)	73
กราฟ ก.13 ผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพของน้ำ (ข)	74
กราฟ ก.14 ผลการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (ก)	74
กราฟ ก.14 ผลการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (ข)	75

รายการรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
กราฟ ก.15 ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซ-ผสมของน้ำที่มีค่า PH เท่ากับ 14 ปริมาตร 7,000 cm ³	75
กราฟ ก.16 ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซ-ผสมของถ่านกัมมันต์ ปริมาตร 4,000 cm ³	76
กราฟ ก.17 ผลการทดลองพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซ-ผสมของน้ำและถ่านกัมมันต์	76
กราฟ ก.18 ผลการทดลองพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซ-ผสมของน้ำและถ่านกัมมันต์	77
ง.1 ความดันที่กระทำต่อพื้นที่หน้าของท่อตามตามแนวเส้นรอบวง	112
ง.2 ความดันที่กระทำกับฝาปิดท่อส่งผลให้เกิดความเค้นตามแนวยาวของท่อ	113
ง.3 เส้นทางเดินก๊าซ Line 1 และ Line 2	117
กราฟ ง.4 ชาร์ตสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อ	137
DWG: ASSEMBLY	142
DWG: BASE	143
DWG: WARTER TANK	144
DWG: ACTIVATED CARBON COLUMN	145
DWG: TUBE SENT GAS 1	146
DWG: TUBE SENT GAS 2	147
DWG: TUBE VACUUM GAS 3	148
ภาพการทดลอง	149

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ภาคตัดที่แรงกระทำ ในแนวตั้งฉาก	cm ²
ASBR	Anaerobic Sequence Batch Reactor	-
a	ค่าปริมาณของตัวถูกดูดซับจนกระทั่งอิ่มตัวแบบ- ชั้นเดียว	μg/g
b	ค่าคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ(ค่าพลังงานของการดูด- ติดผิว)	cm ³ /μg
CH ₄	ก๊าซมีเทน	-
CO ₂	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	-
C _t	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่เวลา- ต่างๆ	mg/cm ³
C ₀	ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	mg/cm ³
d _n	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	m
E	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น	psi ,GPa ,N/m ²
F	แรงดัน	N
Free CO ₂	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปฟองก๊าซ	mole
<i>f</i>	ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor)	-
GAC	Granular Activated Carbon	-
g	ความเร่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของโลก	m/s ²
H ⁺	ไฮโดรเจนไอออน	-
HCO ₃ ⁻	ไบคาร์บอเนตไอออน	-
H ₂ O	น้ำ	-
h _m	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง	m
K	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง	m
K _F	ค่าคงที่ของฟรอนดิชแสดงความสามารถในการดูด- ซับแบบหลายชั้น	cm ³ /g
<i>l</i>	ความสูงทั้งหมดของชั้นวัสดุดูดซับ	cm

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย	หน่วย
l_m	ระยะขอบเขตการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer-Zone)	cm
M	มวลของสาร Adsorbent ที่สภาวะสมดุล	g
MWCO	Molecular Weight cut off	-
NF	Nano filtration	-
NH ₃	ก๊าซแอมโมเนีย	-
n_F	ค่าคงที่ของฟรุนดลิช(ค่าแสดงความแข็งแรงในการดูดติดผิว)	-
P	ความดันภายนอกที่กระทำ	N, kgf, lbf
PSA	Pressure swing adsorption	-
pH	Potential of Hydrogen ion ค่าที่แสดงความเป็นกรดเป็นเบสของน้ำ	-
P_{eq}	ค่าความดันของสาร Adsorbate ที่สภาวะสมดุล	bar
P_{vac}	ความดันสุญญากาศ	bar
Q	อัตราการไหลของก๊าซ	cm ³ /min
q_e	ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาตรสารดูดซับก๊าซ 1 กรัม	mg/g
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)	-
Re	ค่า Reynolds number	-
RMS	ค่า Non-normalized root mean square	-
RO	Reverse Osmosis	-
TSA	Temperature swing adsorption	-
UF	Ultra filtration	-
V	ปริมาตรน้ำ	cm ³
VSA	Vacuum swing adsorption	-
X	มวลของสาร Adsorbate ที่สภาวะสมดุล	mg

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย	หน่วย
σ	ค่าความเค้น	Pa ,N/m ² ,kgf/mm ² ,psi
σ_w	ความเค้นใช้งาน	N/m ²
σ_y	ความเค้นจุดเริ่มเสียหายหรือความเค้นคราก	N/m ²
θ	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป	Radian
\emptyset	เส้นผ่านศูนย์กลาง	cm, mm
μ	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (Coefficient of Viscosity)	N.s/m ²
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³
K	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง	m
γ	น้ำหนักจำเพาะของสาร	N/m ³ ,

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันพลังงานส่วนใหญ่ที่มนุษย์นำมาใช้กว่า 85% เป็นพลังงานที่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล [6] ซึ่งพลังงานเหล่านี้นับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงและมีราคาเพิ่มสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวมนุษย์จึงได้มองหาพลังงานชนิดอื่นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่มีอยู่บนโลกเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งพลังงานจากก๊าซชีวภาพก็เป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่มนุษย์ให้ความสนใจโดยก๊าซชีวภาพนั้นเกิดจากกระบวนการหมักด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก๊าซที่ได้จะมีลักษณะเป็นก๊าซผสมมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-40% และก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย (NH_3) และไอน้ำ (H_2O) อีกเล็กน้อย [12] เมื่อนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิง พบว่าค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ปริมาณมากซึ่งก๊าซชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่ติดไฟจึงทำให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำลง

เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในก๊าซชีวภาพให้น้อยลงได้มีผู้วิจัยหาวิธีสำหรับดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลายวิธี เช่น วิธีดูดซับซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองประเภท ดังนี้ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับเคมี [24] สำหรับวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารดูดซับนั้นมีหลายชนิดเช่น น้ำ สารละลายเอมีน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลิกาเจล แมงกานีส ซีโอไลต์ และถ่านกัมมันต์ ยกตัวอย่างการใช้ซีโอไลต์ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซแบบสลับความดัน ซึ่งพบว่าซีโอไลต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดร้อยละ 96 ของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยผ่านในขณะทำการทดลอง [19] และ การศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธี Scrubber ซึ่งพบว่าสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง ร้อยละ 93 ของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [3] สำหรับน้ำนอกจากจะช่วยดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วยังมีคุณสมบัติสามารถดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อีกด้วย [10]

เทคนิคที่นำมาใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีหลายเทคนิคเช่น Water Scrubbing, PSA, VSA, TSA และ Membrane [3] โดยเทคนิคที่ได้รับความนิยมอันดับต้นๆใน

การนำไปใช้ในงานทั่วไปมีดังนี้ Pressure swing adsorption (PSA) และ Water Scrubbing แต่เนื่องจากแต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดีและข้อเสีย เช่น Water Scrubbing มีข้อดีคือขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการบำรุงรักษาแต่ก็มีข้อเสียคือต้องสร้างหอดูดซึมก๊าซขนาดใหญ่รวมทั้งใช้น้ำและพลังงานจำนวนมาก ส่วนเทคนิคการดูดซับแบบ Pressure swing adsorption ก็มีข้อดีคล้ายกับ Water Scrubbing และประสิทธิภาพใกล้เคียงกันแต่ก็มีข้อเสียคือไม่สามารถดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนได้อีกทั้งอาจมีการสูญเสียก๊าซมีเทนได้หากเปิดปิดวาล์วในเวลาที่ไม่เหมาะสม [16]

จากการศึกษาข้อมูลพบว่าในพื้นที่ภาคใต้มีน้ำมากประกอบกับน้ำมีคุณสมบัติที่สามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีดังที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนถ่านกัมมันต์นอกจากจะมีคุณสมบัติในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วยังสามารถดูดซับความชื้นรวมทั้งมีราคาค่อนข้างถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป จึงได้ศึกษาวิจัยการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำและดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคนิคการดักจับก๊าซแบบสลับความดันเพื่อหาพฤติกรรมการดูดซับและดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์

1.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้

กรมควบคุมมลพิษได้เผยแพร่หลักการออกแบบชุดดูดซับกลิ่นเหม็นของก๊าซไข่เน่า โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ [11] ซึ่งลักษณะของชุดดูดซับกลิ่นที่กรมควบคุมมลพิษออกแบบนั้นมีรูปทรงเป็นท่อทรงกระบอกภายในบรรจุถ่านกัมมันต์ โดยชุดดูดซับกลิ่นใช้หลักการทำงานในการดูดซับกลิ่นแบบสลับความดัน (PSA)

คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการนำก๊าซชีวภาพ (Biogas) ไปใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม [12] เอกสารฉบับนี้ได้กล่าวถึง กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งผลผลิตที่ได้จะได้ก๊าซที่มีลักษณะเป็นก๊าซผสม ซึ่งก๊าซส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซอื่นๆอีกเล็กน้อยรวมทั้งไอน้ำด้วย

กริวรรณ รัตนโกสมและวีรศักดิ์ สังข์นุ่น ได้ทำการศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดและชนิดเกล็ดเป็นตัวดูดซับก๊าซซึ่งผลจากการ

ทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้ดีที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 1.5 bar ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดนั้นสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้ดีที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 0.5 bar จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะแปรเปลี่ยนตามค่าความดันของก๊าซและชนิดของถ่านกัมมันต์ [13]

จิราภรณ์ วงศ์สุวรรณ ได้เผยแพร่บทความเรื่องการดูดซึมทางเคมี โดยกล่าวถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับกับสารดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกันส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารถูกดูดซับเดิมในลักษณะการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ ซึ่งพันธะเคมีเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมาก และในระหว่างการดูดซึมจะมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 kJ/mole จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้เมื่อต้องการกำจัดสารที่ถูกดูดซับออกจากผิวสารดูดซับจึงทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น สำหรับตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับทางเคมีมีหลากหลายชนิดยกตัวอย่างเช่น สารละลายเอมีน สารละลายแคลเซียมและสารละลายลิเทียม จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การดูดซับทางเคมีจะฟื้นฟูสภาพได้น้อยหรือจะต้องใช้พลังงานกระตุ้นในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ [15]

เดชา นัตรศิริเวช ได้เผยแพร่เอกสารเรื่องกระบวนการดูดซับ โดยกล่าวว่ากระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้เกิดขึ้นระหว่าง 2 สภาวะเช่น ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็งโดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งการดูดซับจะมีอยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี จากงานเอกสารนี้ทำให้ทราบว่า การดูดซับระหว่างก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็งสามารถดูดซับได้ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ [16]

ปภัศ ชนะโรคลมวิชัย,รัตนวรรณ เกียรติโกมลและวิรัช อาจหาญ ได้ศึกษาการเพิ่มศักยภาพก๊าซชีวภาพเพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ [19] โดยการทดลองจะใช้ชุดทดลองที่มีหลักการดูดซับแบบสลับความดันที่ประกอบด้วยหอดูดซับซึ่งภายในหอดูดซับจะบรรจุตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X จำนวน 2 หอ และทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลา จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มค่าความดันหรือลดอุณหภูมิให้กับระบบจะส่งผลทำให้การดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้ผลดีขึ้นโดยสัดส่วนความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 96% v/v

ศิรินุช ลอยหา ได้ศึกษาวิจัยการนำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เช่นการดูดซับแก๊สเสียโดยจากการศึกษาพบว่าซีโอไลต์สามารถดูดซับแก๊สเสียจำพวก CO_2 , SO_x และ NO_x ได้เป็นอย่างดี [25]

สมชาย คารารัตน์ ได้ศึกษาการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับกำจัดก๊าซเรือนกระจก โดยใช้หลักการหมุนเวียนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยา ASBR ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวิธีดังกล่าวสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 และ 60 สำหรับถังปฏิกิริยาที่ใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร และกรดอินทรีย์ระเหยง่ายผสมตามลำดับ งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าจุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้ [27]

Akzu Z ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับสีของผ้าโดยสีที่ใช้ทดลองมีจำนวนสองสีคือ สีฟ้าและสีเทา ซึ่งการทดลองจะเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำสีระหว่าง pH 1-14 ผลจากการทดลองพบว่าผ้าสามารถดูดซับสีฟ้าได้ดีที่สุดที่ค่า pH 4 ส่วนสีเหลืองสามารถดูดซับได้ดีที่ค่า pH 6.5 จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงหลักการดูดซับของของแอมมัวร์และฟรูดิช [1]

Cheng-Hsiu Yu, Chih-Huang, Chung-Sung Tan ได้ศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซับและการดูดซึมด้วยเทคนิคต่างๆ จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูล พบว่าการดูดซับทางเคมีสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้ดีกว่าการดูดซับทางกายภาพแต่พบว่ามีข้อเสียคือ สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าวิธีการดูดซับทางกายภาพถึง 60 % โดยพลังงานส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับการฟื้นฟูสภาพสารเคมี [2]

C Ofori Boateng and E.M.Kwofie ได้ศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพก่อนนำไปเก็บหรือบรรจุถังด้วยวิธี Water Scrubbing จากการทดลองพบว่าการดักจับก๊าซด้วยวิธี Water Scrubbing สามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้สูงสุด 93 % V/V [3]

E Ryckebosch, M. Drouillon and H. Vervaeren ได้ศึกษาเทคนิคที่ใช้แปรสภาพก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่ามีเทคนิคที่สามารถนำมาทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพให้บริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นหลายเทคนิคเช่น Water scrubbing , Biological , Scrubbing Amine , PSA และ Membrane technology โดยแต่ละเทคนิคมีหลักการทำงานดังนี้

-Water scrubbing เป็นเทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ โดยให้ก๊าซทำละลายกับผิวน้ำโดยตรงภายในชุดดูดซึมก๊าซ ซึ่งจะมีการป้อนก๊าซชีวภาพที่ถูกลดให้มีแรงดันสูงเข้าทางด้านล่างของชุดดูดซึมก๊าซและทำสเปรย์น้ำเข้าสู่ชุดดูดซึมก๊าซทางด้านบนของชุดดูดซึมก๊าซ เพื่อให้ผิวก๊าซสัมผัสกับผิวน้ำและละลายเข้าไปในน้ำโดยตรง ส่วนก๊าซที่เหลือจากกระบวนการดูดซับจะมีสัดส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงหรือก๊าซมีเทนในปริมาณที่สูงขึ้นและมีอัตราการสูญเสียก๊าซมีเทนคิดเป็น 2 % ของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนทั้งหมด โดยทั่วไปวิธีนี้

สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 97% ของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด

-Pressure swing absorption (PSA) เป็นเทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ ด้วยวิธีดูดซับ โดยจะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวของแข็งที่มีรูพรุนที่บรรจุอยู่ในชุดดูดซับ อาศัยความแตกต่างของความดันภายในระบบช่วยในการดูดซับ โดยระบบจะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งน้ำไว้ที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับในช่วงความดันสูงและจะคายก๊าซที่ดูดซับออกมาในช่วงความดันต่ำ ส่วนก๊าซมีเทนที่เหลือจะมีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยมีอัตราการสูญเสียก๊าซมีเทนประมาณ 3-10% ไม่มีความแน่นอนขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเปิดปิดวาล์วของชุดดูดซับ โดยทั่วไปวิธีการนี้สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 95-98% ของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด

-Biological เป็นเทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพโดยใช้อินทรีย์วัตถุในการตั้งหรือเปลี่ยนสภาพก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ใช้สาหร่ายเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นพลังงานวิธีนี้ยังไม่ค่อยนิยมแพร่หลายมากนัก ส่วนใหญ่อยู่ในขั้นตอนการทดลองและวิจัย

-Scrubbing Amine เป็นเทคนิคการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน ซึ่งมีหลักการคล้ายๆกับแบบ Water scrubbing เพียงแต่เปลี่ยนจากน้ำมาเป็นสารละลายเอมีน โดยก๊าซที่เหลือจากกระบวนการดูดซับจะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนในปริมาณที่สูงขึ้นและมีอัตราการสูญเสียก๊าซมีเทนน้อยกว่า 1-2% ของความเข้มข้นก๊าซมีเทนทั้งหมด โดยทั่วไปวิธีนี้สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 99% ของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดแต่เนื่องจากมีอันตรายมากหากเกิดการรั่วของระบบและมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานคือจะใช้กับก๊าซที่ไม่มีสารอื่นเจือปนรวมทั้งใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับสูง

-Membrane technology เป็นเทคนิคการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหลักการเยื่อเลือกผ่าน วิธีนี้สามารถทำการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกือบทั้งหมดแต่เนื่องจากมีราคาค่อนข้างแพงจึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก ส่วนใหญ่จะนิยมนำไปใช้ในการทดลองหรือวิจัยเป็นหลัก

จากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าเทคนิคที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้งาน โดยทั่วไปส่วนใหญ่มีสองเทคนิค คือ Water scrubbing และ PSA เพราะทั้งสองเทคนิคนี้ใช้เทคโนโลยีไม่สูงมากประกอบกับการซ่อมบำรุงทำได้ง่ายรวมทั้งมีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีและไม่มีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ [4]

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์และดูดซึมด้วยน้ำ

1.3.2 เพื่อสร้างชุดทำดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้นแบบที่ใช้เทคนิคการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบสลับความดัน (PSA) โดยมีน้ำและถ่านกัมมันต์เป็นตัวดักจับก๊าซ

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบพฤติกรรมและลักษณะการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และการดูดซึมของน้ำ

1.4.2 ได้ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.4.3 ได้นำองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาในเรื่องการดูดซับและดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำและถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้กับงานจริง

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 สร้างชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ขั้นต่ำ 80 % ของปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยเข้าสู่ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.2 ทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ อัตราการไหลของก๊าซที่ 1,000 3,000 5,000 7,000 9,000 และ 10,000 cm^3/min ความดันของก๊าซที่ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 bar และค่าความเป็นเบสของน้ำที่ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7, 9, 11, 13 และ 14 โดยจะทดลองค่าตัวแปรต่างๆดังกล่าวข้างต้นตามที่ขอบเขตการทดลองกำหนด

1.5.3 ศึกษาพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมที่ผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซออกซิเจนในอัตราส่วน 3:3:4 ในชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้นแบบ โดยใช้กระบวนการดูดซึมด้วยน้ำและดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เท่านั้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology)

เทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology) คือ องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้สิ่งมีชีวิตหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของสิ่งมีชีวิต เช่น เอนไซม์หรือโปรตีนชนิดต่างๆ เป็นต้น เพื่อให้เกิดประโยชน์กับมนุษยชาติ โดยองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพอาจก่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดกระบวนการสร้างหรือก่อให้เกิดสิ่งใหม่และกระบวนการทำลาย การศึกษาด้านเทคโนโลยีชีวภาพจึงต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารพันธุกรรมและพฤติกรรมของสารพันธุกรรมรวมทั้งวิธีการสำคัญต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการด้านเทคโนโลยีชีวภาพเพื่อนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีชีวภาพที่เก่าแก่ที่สุดในประวัติศาสตร์ของมนุษยชาติก็คือ เทคโนโลยีการหมัก (Fermentation Technology) ซึ่งมีพลังงานเป็นผลพลอยได้ในรูปแบบของก๊าซชีวภาพที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดจากการที่อินทรีย์วัตถุถูกย่อยสลายด้วยกลุ่มแบคทีเรียที่มีชื่อเรียกว่า เมทาโนจีนิก (Methanogenic) หรือเมทาโนเจนส์ (Methanogens) ในสภาพที่ไม่มีอากาศ (Anaerobic) หรือปราศจากออกซิเจนดังรูปที่ 2.1 ทำให้เกิดก๊าซชนิดต่างๆ ขึ้นดังนี้



รูปที่ 2.1 บ่อหมักก๊าซธรรมชาติ [12]

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

มีเทน (CH_4) 50% - 70%

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	30% - 40%
ไฮโดรเจน (H ₂)	5% - 10%
ไนโตรเจน (N)	1% - 2%
ไอน้ำ (H ₂ O)	0.3%
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	มีปริมาณน้อย

จากส่วนประกอบข้างต้นพบว่าหากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ในปริมาณสูงจะทำให้ค่าความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพลดต่ำลง เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ดังนั้นก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงควรลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ให้อยู่ในปริมาณต่ำๆก่อน [12]

2.1.1 คุณสมบัติของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.1.1.1 คุณสมบัติของก๊าซมีเทน

ก๊าซมีเทน (Methane) เป็นสารประกอบคาร์บอนที่มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศมีสูตรทางเคมีคือ CH₄ เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น เบากว่าอากาศ มีจุดเดือดที่ -161.6 °C และจุดหลอมเหลวที่ -182.5°C สามารถติดไฟและละลายน้ำได้ 35 mg ต่อน้ำ 1,000 cm³ ที่อุณหภูมิ 15°C เมื่อนำก๊าซมีเทน 1 โมเลกุล ไปเผาไหม้จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล และน้ำ 2 โมเลกุล โดยก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้ซึ่งจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาน้อยหลังการเผาไหม้และพบว่าก๊าซมีเทน 1 m³ สามารถให้พลังงานออกมาได้ประมาณ 11,355.925 KJ [22]

2.1.1.2 คุณสมบัติของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นก๊าซที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม ต่อหนึ่งโมเลกุล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสูตรเคมีคือ CO₂ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งมักจะเรียกว่า น้ำแข็งแห้ง (Dry ice) มีค่าความหนาแน่น 1.98 kg/m³ ซึ่งมากกว่าอากาศถึง 1.5 เท่า ส่วนโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ (O=C=O) มีสมบัติที่เด่นชัดคือ ไม่ติดไฟ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะกลายเป็นของแข็งที่มีสีขาวที่อุณหภูมิ -78°C โดยไม่ผ่านการเป็นของเหลวก่อนหากจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น

ของเหลวต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 5.1676 bar โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้ 0.134 mg ต่อ น้ำ 1.000 cm³ ที่ 15°C ซึ่งหลังจากละลายในน้ำแล้วน้ำจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิกและจะเปลี่ยนรูปเป็นไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในภายหลัง [21]

2.2 กระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ

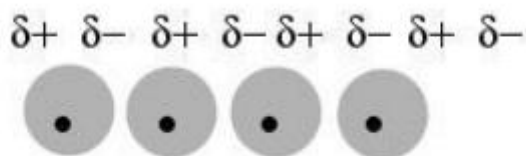
กระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพนั้นเป็นกระบวนการดักจับหรือทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกหรือแยกตัวออกจากก๊าซชีวภาพที่ผสมอยู่ซึ่งกรรมวิธีในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพที่พบเห็นโดยทั่วไปมีดังนี้

2.2.1 การแยกด้วยวิธีดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้เกิดขึ้นระหว่างสาร 2 สถานะเช่น ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (Adsorbent) โดยในการดูดซับจะมีอยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [15] ซึ่งรายละเอียดดังนี้

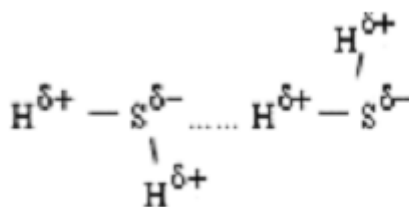
2.2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force)

แรงการกระจาย (Dispersion force) หรือแรงลอนดอน (London force) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่ค้นพบโดยลอนดอน (Fritz-London) เมื่อปี ค.ศ. 1950 แรงชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วหรือระหว่างอะตอมของพวกแก๊สเฉื่อย เนื่องมาจากการกระจายของหมอกอิเล็กตรอนซึ่งเกิดการไม่สมมาตรเพราะการเคลื่อนที่ตลอดเวลาของอิเล็กตรอนทำให้เกิดขั้วขึ้นชั่วคราวบนอะตอมหรือโมเลกุลสารนั้นๆ ขั้วที่ตรงข้ามกันจะเกิดการดึงดูดกันจึงเกิดแรงชนิดนี้ขึ้น ซึ่งแสดงการยึดระหว่างพันธะดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แรงการกระจาย [15]

แรงไฟฟ้าสถิต เป็นแรงในกลุ่มโมเลกุล (สารประกอบ โคเวเลนต์) ที่มีขั้วแต่ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจน โดยขั้วที่ต่างกันจะเกิดแรงดึงดูดกันอย่างอ่อนๆ ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แรงไฟฟ้าสถิต [15]

จากการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงาน ความร้อนค่อนข้างน้อยหรือต่ำกว่า 20 kJ/mole และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายหรือสามารถฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับได้ง่าย โดยสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่บริเวณรอบๆผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของสารถูกละลายในสารละลายนั้น สำหรับสารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับมีหลายชนิดเช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล แกรไฟต์ และอัลคาไรด์ เป็นต้น [16]

2.2.1.2 การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อสารถูกดูดซับกับสารดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้มีการคายพลังงานความร้อนออกมาค่อนข้างสูงประมาณ 50-400 kJ/mole จึงทำให้การกำจัดสารถูกดูดซับออกจากผิวสารดูดซับทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้

จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น สำหรับสารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับทางเคมี มีหลายชนิดเช่น สารละลายแคลเซียมและสารละลายลิเทียม เป็นต้น[16]

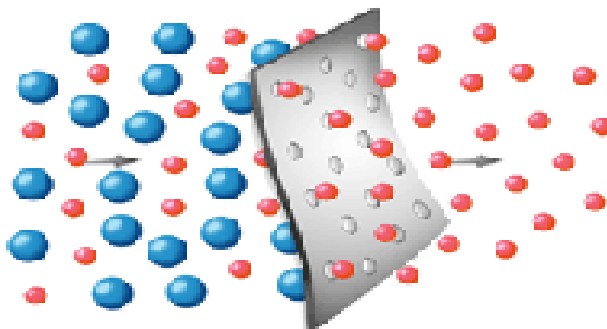
2.2.2 การแยกด้วยวิธีดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นกระบวนการการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นจากกลไก 2 อย่าง คือ ก๊าซถ่ายเทจากกระแสก๊าซไปยังผิวร่วมของก๊าซและของเหลวที่มีการเคลื่อนไหวแบบปั่นป่วน (Turbulent) บริเวณใกล้ๆผิวร่วมของเหลวและก๊าซโดยก๊าซจะเข้าสู่ของเหลวด้วยกลไกที่เรียกว่า Molecular diffusion ส่วนของเหลวเองก็จะแพร่โมเลกุลเข้าสู่ก๊าซในลักษณะกระบวนการกลับกัน การดูดซึมจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือการดูดซึมทางกายภาพ และการดูดซึมทางเคมี

การดูดซึมทางกายภาพจะเป็นการดูดซึมระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำกับก๊าซ O_2 , CH_4 และ CO_2 ซึ่งการดูดซึมแบบนี้จะดูดซึมได้ปริมาณไม่มากส่วนการดูดซึมทางเคมีจะเป็นการดูดซึมระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่มีขั้วเช่นเดียวกัน [15]

2.2.3 การแยกด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนหรือเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation)

เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane technology) เป็นกระบวนการกรองสารหลายๆชนิดโดยใช้หลักการเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดหรือวัสดุแผ่นเมมเบรนเท่านั้น โดยแผ่นเมมเบรนสามารถแยกสารออกจากกันด้วยคุณสมบัติเลือกผ่าน (Semi-permeable) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเราสามารถเลือกใช้ตามคุณสมบัติของสารดังนี้ ถ้าแยกสารที่มีโมเลกุลใหญ่ที่ไม่ใช้ความดันในการแยกจะใช้แผ่นเมมเบรนแบบ Microfiltration (MF) หรือ Ultra filtration (UF) ในขณะที่ถ้าเป็นสารโมเลกุลเล็กและต้องใช้ความดันสูงๆในการแยกจะใช้เมมเบรนแบบ Nano filtration (NF) และ Reverse Osmosis (RO) [26]



รูปที่ 2.4 การคัดแยกสารของเมมเบรน [26]

2.2.4 การแยกด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological)

สำหรับวิธีการทางชีวภาพจะเป็นการใช้พืชหรือแบคทีเรียในการตรึงและเปลี่ยนรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นพลังงานเช่นการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินแล้วเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นเป็นแป้งหลังจากนั้นจะนำสาหร่ายมาสกัดเอาน้ำมันตามลำดับ ลักษณะการเลี้ยงสาหร่ายจะเลี้ยงในภาชนะต่างๆดังรูป 2.5 หรือการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นน้ำส้มสายชูของแบคทีเรียซึ่งจะเกิดขึ้นจากการหมักเป็นต้น [27]



รูปที่ 2.5 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นพลังงาน [27]

2.3 สารดูดซับ

สารดูดซับที่ใช้ในกระบวนการดูดติดผิวมีด้วยกันหลายชนิดเช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ดินเหนียวประเภทต่างๆ แอคติเวตเต็ดซีลิกา แอคติเวตเต็ดอลูมินา ซีลิกาเจล [23] แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และถ่านกะลามะพร้าว เป็นต้น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันพบว่าถ่านกัมมันต์นับเป็นสารดูดซับที่ดีและนิยมใช้กันมาก ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก โดยการทำให้มีรูพรุนหรือมีโพรงภายในเนื้อถ่านจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะผลิตในที่อับอากาศเพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ โดยมีขั้นตอนการผลิตโดยทั่วไป 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 อบแห้ง (Dehydration) ใช้อุณหภูมิอบไอน้ำที่ 100-170 °C

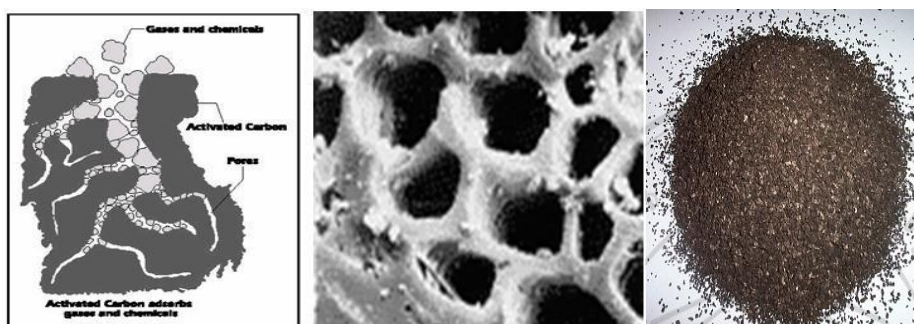
ขั้นตอนที่ 2 ทำให้เป็นถ่าน (Carbonization) ใช้เตาเผาแบบไร้อากาศที่ 400-600 °C

ขั้นตอนที่ 3 ทำให้มีรูพรุนจำนวนมาก (Activation) เเผาที่ 750-950 °C

ปัจจุบันถ่านกัมมันต์หากแบ่งตามลักษณะรูปร่างจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แบบผง แบบเกล็ด และแบบอัดเม็ด แต่จากการศึกษาข้อมูลพบว่าถ่านกัมมันต์แบบผงไม่เหมาะสำหรับใช้ในการดูดซับก๊าซเพราะหลังจากการดูดซับก๊าซจนกระทั่งอิ่มตัวแล้ว เมื่อนำไปทำการฟื้นคืนสภาพจะฟื้นสภาพได้น้อยทำให้ต้องทิ้งถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ไม่สามารถฟื้นสภาพได้ในปริมาณมากและในส่วนถ่านกัมมันต์แบบอัดเม็ดถึงแม้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับก๊าซดีที่สุดและสามารถฟื้นคืนสภาพได้ดีแต่ก็มีข้อเสียคือราคาค่อนข้างแพงดังนั้นในปัจจุบันจึงพบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการดูดซับก๊าซมากเพราะราคาไม่แพง อีกทั้งความสามารถในการดูดซับก็ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ชนิดแบบอัดเม็ดและที่สำคัญสามารถฟื้นสภาพได้ดีอีกด้วย [18]

2.3.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated carbon;GAC)

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated carbon) เป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุน (Pores) ขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและขนาดรูพรุนก็แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิต โดยนิยมนำไปใช้ดูดซับก๊าซหรือไอของสารเนื่องจากมีลักษณะเป็นเกล็ดทำให้อากาศสามารถผ่านได้ดีและที่สำคัญสามารถฟื้นสภาพได้ทั้งหมด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750-950 °C [18]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [18]

2.4 สารดูดซึม

วัสดุสารดูดซึมที่ใช้ในกระบวนการดูดซึมสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทดังนี้ ประเภทที่หนึ่ง แบบไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Nonaqueous Systems)

ประเภทนี้จะใช้ของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์เช่น ไดเมทิลอนาลีน (Dimethylalanine) และ เอมีน (Amines) เป็นตัวทำละลายแทนน้ำข้อจำกัดของของเหลวหรือสารละลายเหล่านี้คือสามารถที่จะใช้ได้เฉพาะกับกระแเสอากาศเสียที่มีสารมลพิษปนเปื้อนอยู่เป็นก๊าซล้วนๆ ไม่มีอนุภาคอื่นเจือปนเพราะถ้าหากว่ามีอนุภาคอื่นเจือปนอยู่ในกระแเสอากาศแล้วจะทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างตัวทำละลายดังกล่าวกับอนุภาคที่เจือปนทำให้กลายเป็น กาก ตะกอน (Sludges) ซึ่งยากที่จะกำจัดออกไปในภายหลัง

ประเภทที่สอง แบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous systems)

ประเภทนี้จะนำไปใช้กับก๊าซที่ต้องการกำจัดออก โดยก๊าซจะต้องมีความสามารถในการละลาย (Solubility) ในน้ำที่เพียงพอ ณ อุณหภูมิของกระแเสอากาศเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตสำหรับก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะต้องใช้น้ำในการบำบัดเป็นปริมาณมากจึงไม่เหมาะสม ส่วนก๊าซที่เหมาะสมสำหรับใช้น้ำในการบำบัดได้แก่ ก๊าซไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) และ ก๊าซไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric) เป็นต้น และยังใช้น้ำที่มีค่า pH สูงหรือมีค่าความเป็นด่างก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรดได้ปริมาณสูงขึ้นในบางครั้งจึงมีการใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีค่า pH สูงๆ หรือ เติมสารเคมีที่มีความเป็นด่างลงในน้ำเพื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำให้สูงขึ้น เช่น การเติมโซดาไฟ หรือ ปูนขาว เป็นต้น [11]

2.5 กระบวนการดูดซับและดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และน้ำ

2.5.1 กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์

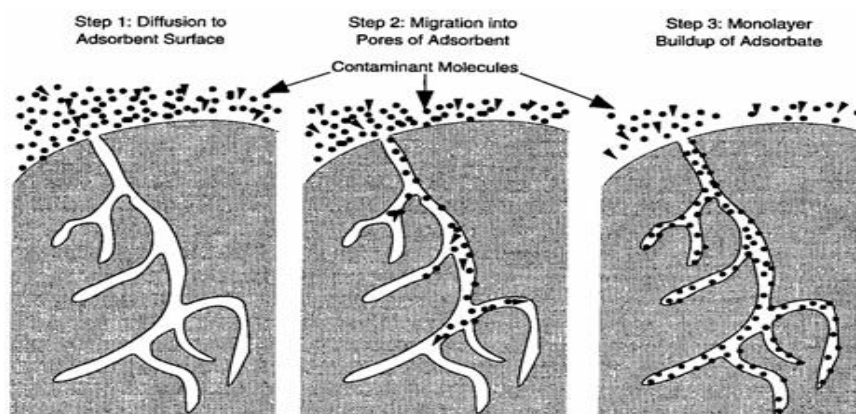
กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์มี 3 ขั้นตอนดังภาพที่ 2.7 โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนส่วนนี้

ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะติดที่ผิวภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ

การแพร่ในขั้นตอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพกับความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้โมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลจากก๊าซชีวภาพซึ่งเข้มข้นมากกว่าไปยังผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีเข้มข้นน้อยกว่า เมื่อถึงผิวของถ่านกัมมันต์ก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนดังขั้นตอนที่ 2 การเคลื่อนที่นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนในช่วงแรกขณะที่รูพรุนมีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่โดยการแพร่แบบเป็นกลุ่มก้อน (Bulk-diffusion) การชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซเมื่อขนาดของรูพรุนเล็กลง การเคลื่อนที่ที่จะเปลี่ยนเป็นการแพร่แบบผิว (Surface diffusion) ดังขั้นตอนที่ 3 การชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวในรูพรุนของสารดูดซับ จนกระทั่งอิมิตัวดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการดูดซับ [11]

ซึ่งหลังจากจุดนี้ไปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะดูดซับได้ลดลงจนไม่สามารถดูดซับได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีดังนี้

1. อุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิต่ำๆ ถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงแต่หากอุณหภูมิสูงๆ ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะลดลง

2. พื้นผิวสัมผัส คือ หากมีพื้นที่ผิวมากก็ยังสามารถดูดซับได้มากขึ้นตามไปด้วย

3. ความดัน คือ ความดันของก๊าซสูงๆ จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซของถ่านกัมมันต์สูงขึ้นตามไปด้วย เพราะ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกอัดตัวเข้าตามรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้เพิ่มมากขึ้น

4. อัตราการไหลของก๊าซ คือ อัตราการไหลของก๊าซที่ความเร็วช้าๆ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับก๊าซได้ดีเพราะก๊าซที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์จะสัมผัสผิวถ่านกัมมันต์ได้นานมากกว่าอัตราการไหลของก๊าซสูงๆ [11]

2.5.2 กระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำ

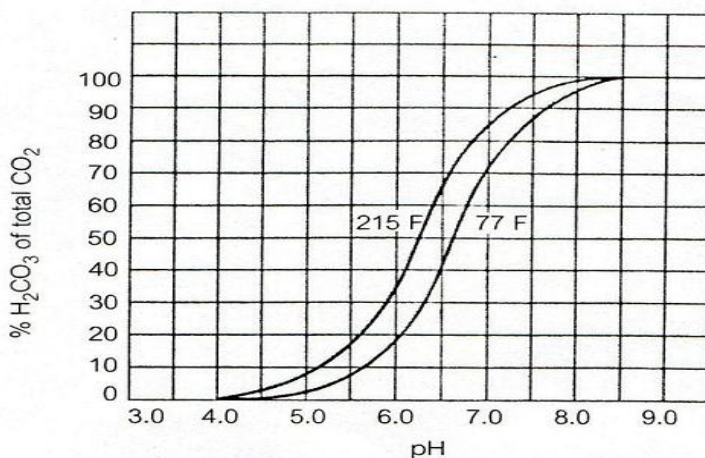
การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ (Absorption) เป็นการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) ที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการละลาย (Soluble gas) น้ำออกจากก๊าซชีวภาพไปยังน้ำหรือตัวทำละลายที่เป็นของเหลว (Solvent liquid) โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จัดให้มีการสัมผัสกันระหว่างก๊าซชีวภาพและตัวทำละลายดังกล่าวโดยใช้แรงผลักดัน (Driving force) เป็นตัวผลักดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร แรงผลักดันที่ใช้ในการผลักดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการกำจัดออกจากก๊าซชีวภาพไปสู่ตัวทำละลายได้แก่ ความดันย่อย (Partial pressure) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ถูกปล่อยออกมากับ ความดันไอ (Vapor pressure) ของก๊าซชีวภาพดังกล่าวที่ผิวหน้าของสารละลายที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น การดูดซึมจะเกิดขึ้นเมื่อแรงผลักดันมีค่าเป็นบวกกล่าวคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะออกจากกระแสก๊าซชีวภาพไปสู่ น้ำเมื่อมีดันสูงๆ แต่หากแรงผลักดันเป็นลบจะไม่มีการดูดซึมเกิดขึ้นแต่จะเกิดการ ดีซอร์ปชัน (Desorption) หรือ สตรีปปิง (Stripping) ได้แก่กระบวนการที่ก๊าซแยกออกจากตัวทำละลายไปสู่อากาศปฏิกิริยาที่มีผลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของน้ำมีดังนี้

1.พื้นที่ผิวสัมผัสของฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่สัมผัสกับน้ำคือหากมีพื้นที่ผิวมากก็ยิ่งทำให้เกิดการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก

2.ความดัน คือ การเพิ่มความดันยิ่งมากขึ้นความสามารถในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

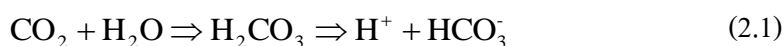
3.เวลา คือ หากขังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำนานๆ โอกาสที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายหรือสัมผัสกับน้ำก็มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

4.ความเป็นกรดเบสของน้ำ คือ การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำนั้นใช้หลักการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำหรือเรียกว่าละลายในน้ำซึ่งการละลายจะแปรผันตามค่า pH ของน้ำดังรูปที่ 2.8 ดังนี้



รูปที่ 2.8 เปอร์เซนต์การแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ค่า pH ของน้ำต่างๆ [1]

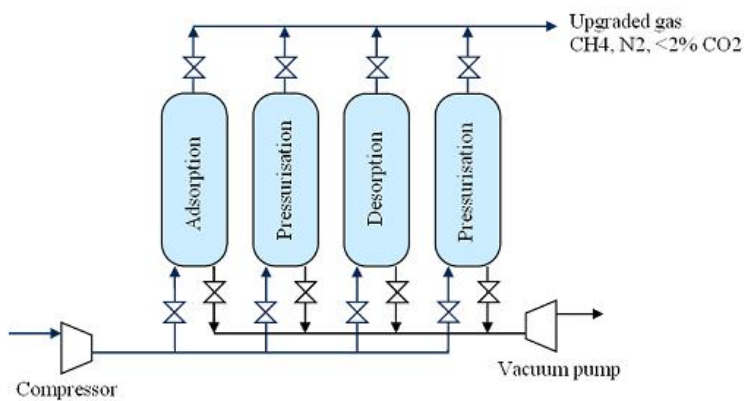
เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำจะแตกตัวได้สมการดังนี้



จากสมการข้างบนจะเห็นได้ว่าเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ละลายน้ำแล้ว จะแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนไอออน (H⁺) และ ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻) ซึ่งการแตกตัวจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าที่ ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 4.0 หรือต่ำกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำโดยไม่มีการแตกตัวจะอยู่ในรูป Free CO₂ และเมื่อ ค่า pH ของน้ำสูงขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะแตกตัวออกกลายเป็นไบคาร์บอเนตมากขึ้น [10]

2.6 เทคนิคที่ใช้ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์

2.6.1 เทคนิคการดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption: PSA) มีหลักการดังนี้ การดูดซับสารจะเกิดขึ้นในช่วงความดันของก๊าซสูงๆและจะทำการคายสารที่ถูกดูดซับออกมาในช่วงความดันของก๊าซต่ำๆหรือความดันสูญญากาศ (วิธีนี้เหมาะกับสารที่มีสภาพเป็นไอที่ความดันบรรยากาศ) ซึ่งมีลักษณะวงจรกิจกรรมการทำงานและรูปทรงดังรูป 2.9 [6]



รูปที่ 2.9 การดูดซับแบบสลับความดัน [6]

ซึ่งเทคนิคนี้มีข้อดีคือใช้เทคโนโลยีไม่สูงมากนักและสามารถสร้างขนาดเล็กๆได้ และข้อเสียคืออาจมีการสูญเสียก๊าซมีเทนได้เมื่อเปิดปิดวาล์วในช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสมและความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับสารดูดซับ

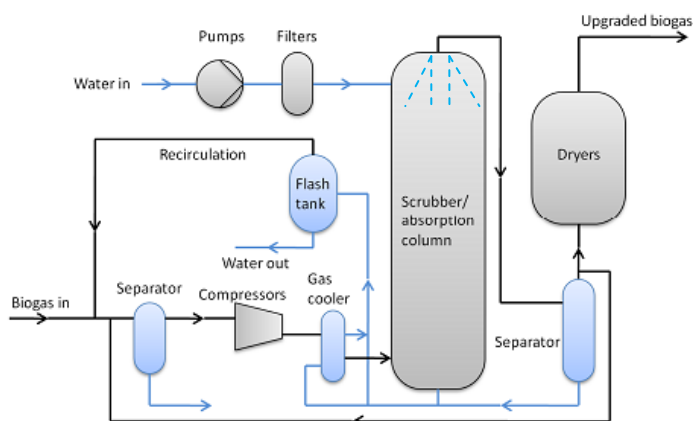
2.6.2 เทคนิคการดูดซับ แบบสลับอุณหภูมิ (Temperature Swing Adsorption:TSA) มี

หลักการดูดซับสารด้วยกระบวนการแบบสลับอุณหภูมิโดยการดูดซับสารจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำๆและจะคายสารที่ถูกดูดซับออกมาในช่วงอุณหภูมิสูงๆซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานสูงมากในการลดอุณหภูมิให้กับระบบดูดซับ [13]

2.7. เทคนิคที่ใช้สำหรับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ

2.7.1 เทคนิคการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการสัมผัสผิว (Water Scrubbing) จะ

ใช้หลักการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สัมผัสกับพื้นผิวน้ำเมื่อสัมผัสกับพื้นผิวน้ำโมเลกุลของน้ำจะดึงโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้เรียกการดึงนี้ว่าการละลายตัวระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในผิวน้ำ โดยการละลายจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพื้นผิวสัมผัสระหว่างน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีมากและอุณหภูมิของน้ำต่ำๆ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือใช้เทคโนโลยีไม่ซับซ้อนมากนัก แต่ก็มีข้อเสียเช่นกันคือใช้พลังงานมากในการสร้างละอองน้ำและต้องสร้างหอดูดซึมขนาดใหญ่ๆจึงจะทำให้มีประสิทธิภาพสูงซึ่งมีกระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังรูป 2.10 [3]



รูปที่ 2.10 กระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำแบบ Water Scrubbing [3]

2.7.2 หลักการดูดซึมแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption) หรือ PSA คือการดูดซึมสารที่ความดันสูงและคายสารที่ถูกดูดซึมออกที่ความดันต่ำซึ่งความดันที่ก๊าซสามารถละลายตัวในน้ำได้คืออยู่ที่ความดันช่วงประมาณ 10-20 bar [5]

2.8 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นข้อมูลเชิงเคมีฟิสิกส์พื้นฐานสำหรับการประมาณความสามารถในการกระบวนการดูดซับ เนื่องจากสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการดูดซับและคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับได้ ไอโซเทอมการดูดซับจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะการดูดซับสมดุล โดยทั่วไปแบบจำลองการดูดซับที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างไอโซเทอมการดูดซับมีดังนี้

2.8.1 แบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Freundlich model) กล่าวว่า การดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวแบบที่ไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) ไม่เรียงเป็นชั้นเดียวแบบ Monolayer พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณที่เกิดพันธะ (Binding site) ของสารดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัวเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกิดปฏิกิริยาต่อกันและระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัดแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับอธิบายการดูดซับก๊าซทางกายภาพ โดยสามารถคำนวณหาค่าปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนสารที่ดูดซับ หนัก 1 กรัม ได้ดังสมการที่ 2.2 [8]

$$q_e = \frac{X}{M} = K_F P_{eq}^{1/n_F} \quad (2.2)$$

หากจัดสมการที่ 2.2 ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังนี้

$$\log q_e = \log \frac{X}{M} = \log K_F + \frac{1}{n_F} \log P_{eq} \quad (2.3)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสารที่ดูดซับ หนัก 1 กรัม
	X	คือ มวลของสาร Adsorbate ที่สภาวะสมดุล (mg)
	M	คือ มวลของสาร Adsorbent ที่สภาวะสมดุล (g)
	K_F	คือ ค่าคงที่ของฟรอนดิชแสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (cm^3/g)
	$1/n_F$	คือ ค่าคงที่ จะแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกละลาย
	P_{eq}	คือ ความดันของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สภาวะสมดุล (mg/cm^3)

2.8.2 แบบจำลองของแลงมัวร์ (Langmuir model) เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐานว่า โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่ง (Adsorption site) ที่แน่นอน โดยแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่าๆกันและคงที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารบนพื้นผิวสารดูดซับได้ดังสมการที่ 2.4 [1]

$$q_e = \frac{X}{M} = \frac{abP_{eq}}{1 + bP_{eq}} \quad (2.4)$$

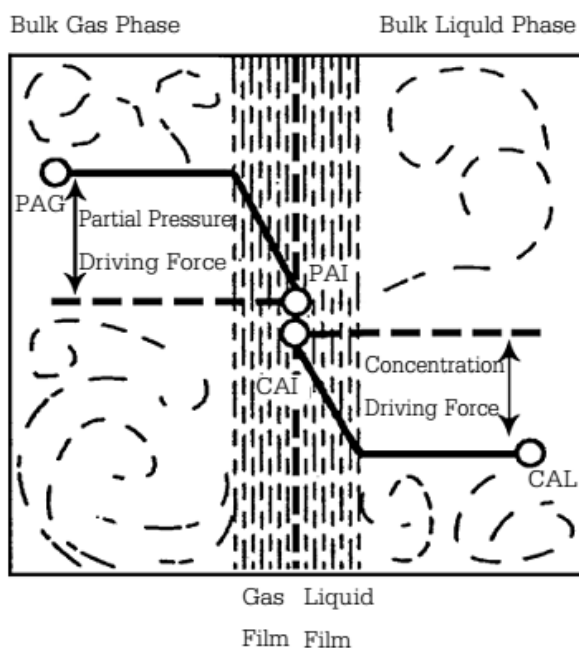
หากจัดสมการ 2.4 ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังนี้

$$\frac{P_{eq}}{q_e} = \frac{1}{ba} + \frac{P_{eq}}{a} \quad (2.5)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสารดูดซับ หนัก 1 กรัม
	X	คือ มวลของสาร Adsorbate ที่สภาวะสมดุล (mg)
	M	คือ มวลของสาร Adsorbent ที่สภาวะสมดุล (g)

- a คือ ค่าปริมาณของสารที่ถูกดูดซับจนกระทั่งอิ่มตัวแบบชั้นเดียว (cm^3/g)
- b คือ ค่าคงที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
- P_{eq} คือ ความดันของสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สภาวะสมดุล (mg/cm^3)

2.8.3 แบบจำลองของการดูดซึมทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (Two films theory) แบบจำลองนี้อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายมวลที่มีอยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวบริเวณระหว่างผิวของ ก๊าซและของเหลวโดยทฤษฎีนี้สมมติว่าส่วนของก๊าซและของเหลวมีการผสมอย่างสมบูรณ์ทำให้ผิวของส่วนที่เป็นก๊าซและของเหลวสัมผัสกันและมีการถ่ายโอนมวลสารของสิ่งที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวโดยการแพร่กระจายของโมเลกุลทะลุผ่านเยื่อที่กั้นระหว่างก๊าซกับของเหลวจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อการแพร่กระจายของโมเลกุลของสารเข้าสู่จุดสมดุลแล้วค่าความความดันย่อยของสาร A ในสถานะก๊าซจะเปลี่ยนจาก P_{AG} เป็น P_{AI} ที่ผิวระหว่างเนื้อเยื่อทั้ง 2 ในทำนองเดียวกันค่า ความเข้มข้นของมวลสารในสถานะของเหลวจะเปลี่ยนจาก C_{AL} เป็น C_{AI} ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะหาอัตราส่วนการเคลื่อนย้ายมวลสารได้โดยสมการที่ 2.6 และ 2.7 [15]



รูปที่ 2.11 ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (Two films theory) [15]

$$N_A = K_g (P_{AG} - P_{AI}) \quad (2.6)$$

$$N_A = K_l (C_{AL} - C_{AI}) \quad (2.7)$$

เมื่อ	N_A	คือ อัตราส่วนของการเคลื่อนย้ายองค์ประกอบของสาร A (mole/hr.m ²)
	K_g	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสถานะก๊าซ (mole/hr.m ² .N/m ²)
	K_i	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสถานะของเหลว (mole/hr.m ² .N/m ²)
	P_{AI}	คือ ความดันของก๊าซในของเหลวที่จุดสมดุล (N/m ²)
	C_{AI}	คือ ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่จุดสมดุล (mole)
	P_{AG}	คือ ความดันของก๊าซก่อนทดลองที่ (N/m ²)
	C_{AL}	คือ ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวก่อนทดลอง (mole)

2.8.4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมและดูดซับต่อปริมาณสารดูดซึม และดูดซับ 1 กรัม

$$Q_c = \frac{C_o - C_I}{M} \quad (2.8)$$

เมื่อ	Q_c	คือ ปริมาณก๊าซที่ถูกดักจับได้ต่อปริมาณสารที่ใช้ดักจับ 1 กรัม (mg/g)
	C_o	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (mg)
	C_I	คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ (mg)
	M	คือ มวลของน้ำ (g)

2.8.5 ปริมาณก๊าซถูกดักจับ

$$Q_p = C_{0p} - C_{1p} \quad (2.9)$$

Q_p	คือ ปริมาณการดูดซับก๊าซ (%)
C_{0p}	คือ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซก่อนทดลอง (%)
C_{1p}	คือ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซก่อนทดลอง (%)

2.8.6 เปอร์เซนต์การดักจับก๊าซ

$$\text{เปอร์เซนต์การดูดซับก๊าซ (\%)} = \left[\frac{\text{ปริมาณก๊าซที่ถูกดักจับ (Q}_p\text{)}}{\text{ความเข้มข้นของก๊าซทดลอง (C}_{op}\text{)}} \right] \times 100 \quad (2.10)$$

-หาค่า Non-normalized root mean square (RMS) ของการดูดซับก๊าซ

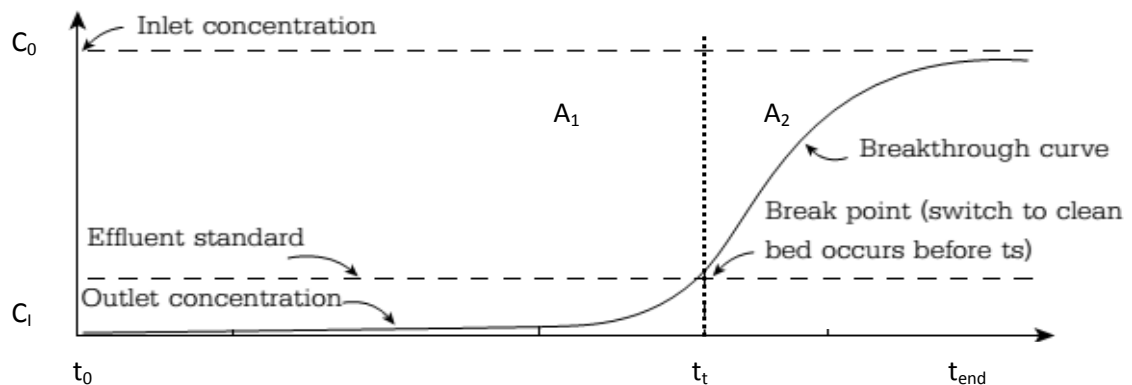
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_{\text{cal}} - q_{\text{exp}})^2}{N}} \quad (2.11)$$

เมื่อ	RMS	คือ Non-normalized root mean square
	N	คือ เวลาที่ใช้ดูดซับทั้งหมด 72 นาที
	q _{cal}	คือ ปริมาณก๊าซที่ถูกถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ดูดซับตามทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 1050 mg/g
	q _{exp}	คือ ปริมาณก๊าซที่ถูกถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ดูดซับที่ได้จากการทดลอง (mg/g)

2.9 ลักษณะกราฟเบรคทวร์จของการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับการดูดซับและดูดซึมแบบFixed-beds

Fixed bed เป็นระบบการดูดซับและดูดซึมที่ให้ก๊าซไหลผ่านชั้นสารดูดซับและดูดซึมที่อยู่กับที่ไม่มีมีการขึ้นลงในลักษณะเดียวกับการกรอง การดูดติดผิวจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนที่ปล่อยสารเข้าระบบของชั้นสารดูดติดและเคลื่อนบนชั้นสารดูดติดผิวจนกระทั่งหมดสภาพการดูดติดผิวดังแสดงในรูปที่ 2.12 ณ จุดที่การดูดติดผิวเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ เรียกว่า จุดเริ่มอิ่มตัวในการดูดซับและดูดซึม (Breakthrough) และหลังจากจุดนี้ต่อไปกราฟจะเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการดูดติดผิวที่ค่อย ๆ หมดสภาพลงจนไม่สามารถดูดซับก๊าซได้อีก เรียกส่วนโค้งนี้ว่า Breakthrough Curve จนสิ้นสุดการดูดซับโดยจุดที่สิ้นสุดการดูดซับเรียกว่า จุดที่ไม่สามารถดูดซับและดูดซึมสารได้อีก (Exhaustion Point) ส่วนใหญ่นิยมใช้กันที่ 95% ของความเข้มข้นของก๊าซที่ปล่อยเข้าระบบ กราฟเบรคทวร์จโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) กรณีที่เส้นกราฟมีความลาดชันมาก ๆ แสดงว่า การดูดติดผิวมี Film Transfer Coefficient และ Internal Diffusion Coefficient สูงหรือ Freundlich Adsorption Isotherm มีลักษณะความลาดชันต่ำ ($1/n_f$ มีค่าน้อย) เมื่อการดูดซับก๊าซที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการดูดซับออกจากก๊าซผสม มีค่าความเข้มข้น

เริ่มต้นเท่ากับ C_0 และค่าความเข้มข้นของก๊าซหลังผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุสารดูดติดผิววัดได้ที่ทางออกของก๊าซหลังผ่านคอลัมน์ที่เวลาต่าง ๆ หรือปริมาตรก๊าซต่างๆ เรียกว่าค่า C_1 ซึ่งค่า C_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงค่าความเข้มข้นที่สูงสุดที่ยอมรับได้ และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่าความเข้มข้นของก๊าซเท่ากับ C_0 ซึ่งเป็นเวลาหรือปริมาตรที่สารดูดติดผิวหมดสภาพในการดูดติดผิว [11]



รูปที่ 2.12 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับเพื่อออกแบบหอดูดซับ [11]

2.9.1 เปอร์เซนต์ปริมาณก๊าซที่ถูกทำบริสุทธิ์ ณ เวลาต่างๆของเบรคทรูจ

$$A_1 = \int_{t_0}^{t_1} \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right) dt \quad (2.12)$$

$$A_2 = \int_{t_1}^{t_{end}} \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right) dt \quad (2.13)$$

เมื่อ	t_0	คือ เวลาเริ่มต้นที่ก๊าซไหลผ่านชุดดักจับก๊าซ (min)
	t_1	คือ เวลาที่นาฬิกาที่ก๊าซไหลผ่านชุดดักจับก๊าซ (min)
	t_{end}	คือ เวลาที่สารทำบริสุทธิ์ก๊าซอิ่มตัว (min)
	C_0	คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (mg)
	C_1	คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (mg)
	A_1	คือ เปอร์เซนต์ก๊าซที่ถูกดักจับก่อนจุดเริ่มอิ่มตัว ณ เวลาต่างๆ (Breakthrough Time) (%)

A_2 คือ เปอร์เซนต์ก๊าซที่ถูกดักจับหลังจุดเริ่มอิ่มตัว ณ เวลาต่างๆ

จนกระทั่งไม่สามารถดูดซับได้อีก (%)

-การหาระยะขอบเขตการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Zone) ของถ่านกัมมันต์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.13 ดังนี้

$$l_m = l \left[1 - \frac{t_1}{t_2} \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ l_m คือ ระยะขอบเขตการถ่ายเทมวลสาร (cm)

l คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นวัสดุดูดซับ (cm)

t_1 คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซึมหรือดูดซับ ณ จุดค่าอิ่มตัวที่ยอมรับได้ (min)

t_2 คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซึมหรือดูดซับ ณ จุดค่าอิ่มตัวที่สารดูดซึมหรือดูดซับหยุดการซึมหรือดูดซับ (min)

-การหาระยะขอบเขตการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Zone) ของน้ำสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$H_m = H \left[\frac{V_z}{V_{t_2} - V_z} \right] \quad (2.15)$$

เมื่อ H_m คือ ระยะขอบเขตการถ่ายเทมวลสาร (cm)

H คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซึม (cm)

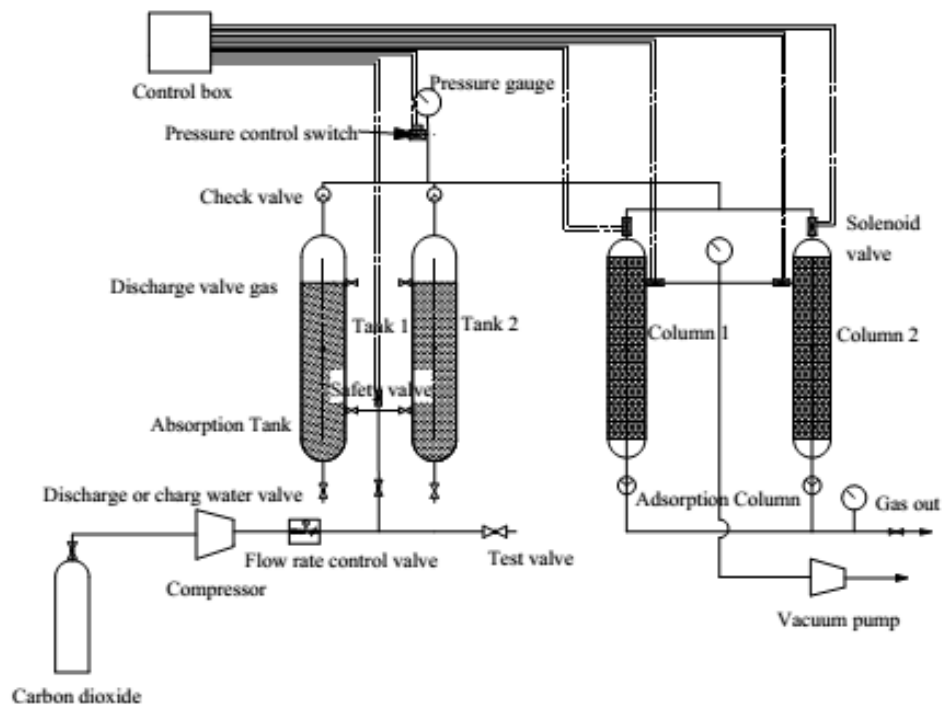
V_{t_2} คือ ปริมาตรก๊าซที่ผ่านการบำบัดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพของสารดูดซึม (cm³)

V_z คือ ปริมาตรก๊าซที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทروج์ถึงจุดหมดสภาพของสารดูดซึมหรือมีค่าเท่ากับ $V_{t_2} - V_{t_1}$ (cm³)

บทที่ 3

เครื่องมืออุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

3.1 แผนผังการทดลองดักจับคาร์บอนไดออกไซด์



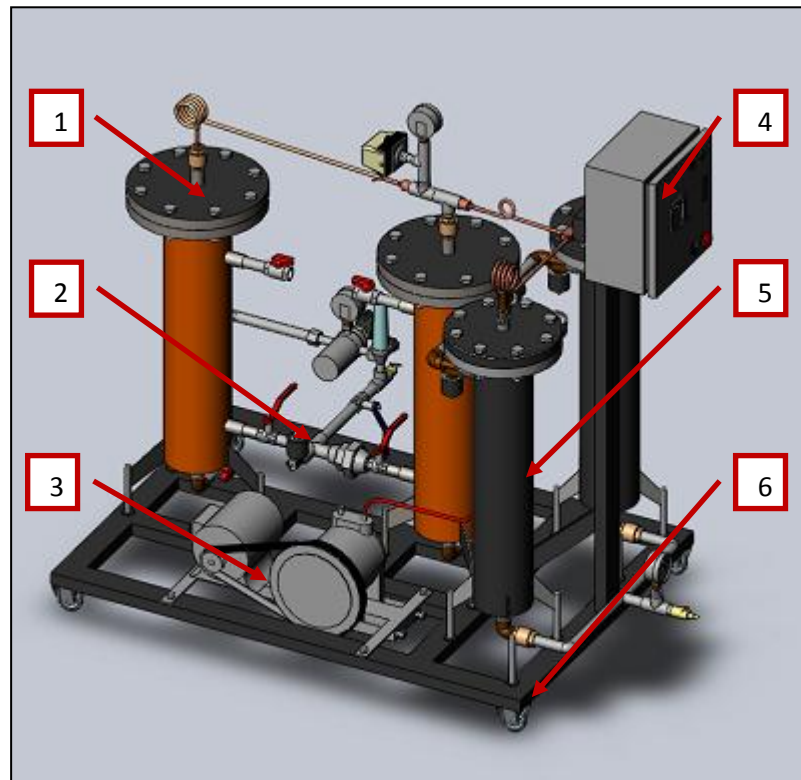
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

หลักการทำงาน

การทำงานของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้หลักการทำงานแบบสลับความดัน (PSA) ซึ่งจะมีการควบคุมการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติคือการควบคุมการจ่ายก๊าซเข้าสู่ระบบจะควบคุมด้วยวาล์วจ่ายก๊าซเมื่อก๊าซผ่านเข้าสู่ระบบไปยังถังดูดซับด้วยน้ำและเคลื่อนที่ต่อไปยังหอดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ระบบจะถูกควบคุมด้วยสวิตซ์ตั้งเวลา (Timer) ซึ่งจะทำงานต่อเนื่องไปจนกระทั่งน้ำและถ่านกัมมันต์ไม่สามารถจะดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกจึงหยุดการทำงานหรือปิดสวิตซ์ไปในตำแหน่ง OFF ซึ่งในการควบคุมการหยุดของระบบจะสามารถเลือกควบคุมระบบได้สองแบบ คือ หยุดระบบด้วยมนุษย์ควบคุมและหยุดระบบด้วยการตั้งเวลาการทำงานด้วย Timer เพื่อทำการเปลี่ยนถ่านน้ำและถ่านกัมมันต์ชุดใหม่เข้าสู่ระบบ

3.2 ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีฝาปิดด้านบน และมีส่วนประกอบ 6 ส่วนดังนี้



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ส่วนประกอบของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีดังนี้

1. ถังดูดซึมด้วยน้ำ
2. ระบบท่อส่งก๊าซ
3. ปั๊มทำสุญญากาศ
4. กล่องควบคุมระบบการทำงาน
5. หอดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
6. ฐานรอง

เนื่องจากต้องการศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้น้ำปริมาตร $7,000 \text{ cm}^3$ และถ่านกัมมันต์ปริมาตร $4,000 \text{ cm}^3$ (1.92 kg) โดยมีความดันก๊าซในการทดลองสูงสุด

10 bar รวมทั้งใช้รูปทรงชุดคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ได้ออกแบบข้างต้นสิ่งที่จำเป็นต้องทราบในการออกแบบคือต้องเลือกวัสดุที่ทนแรงดันตามที่ขอบเขตกำหนดและมีขนาดเพียงพอต่อปริมาตรความจุของน้ำและถ่านกัมมันต์ที่จะนำมาคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีข้อจำกัดที่สำคัญคือราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายรวมทั้งทนความดันดันได้มากกว่า 10 bar

จากการคำนวณและค้นหาคุณสมบัติของวัสดุพบว่าท่อเหล็ก ND 5B G3454 และ ND 4B G3454 มีความเหมาะสมสำหรับนำมาสร้างชุดคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยขนาดท่อเหล็กที่เหมาะสมสำหรับสร้างถังคักจับด้วยน้ำนั้นมีความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 13.98 cm สูง 53.1 cm ส่วนหอคักจับด้วยถ่านกัมมันต์ เนื่องจากต้องการให้มีความสูงเท่ากับถังคักจับด้วยน้ำจึงเลือกใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.43 cm ในส่วนท่อทางเดินก๊าซนั้นเลือกใช้ท่อเหล็กขนาด 2.0 cm และท่อทองแดง ขนาด 0.6 cm โดยจะใช้ท่อทองแดงในส่วนบริเวณที่ต่อกับฝาปิด เช่น ฝาปิดถังคักจับและฝาปิดหอคักจับและใช้นี้อัตยิดฝาปิดถึงน้ำขนาด เบอร์ M22 ส่วนฝาปิดหอคักจับด้วยน้ำใช้นี้อัตยิด เบอร์ M20 ซึ่งในการยึดนี้อย่างนั้นจะใช้โบลท์ จำนวน 8 ตัวต่อฝาปิดหนึ่งฝาตามค่ามาตรฐานการรับแรงของหน้าแปลนชนิด 16 k ที่รับแรงได้สูงสุด 16 bar

เพื่อให้ชุดทำคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำงานแบบสลับความดันและควบคุมอัตราการไหลของก๊าซได้จึงออกแบบให้มีวาล์วปรับตั้งอัตราการไหลของก๊าซที่สามารถปรับตั้งอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิ 0-60°C พร้อมกับมีวาล์วแม่เหล็กคอยควบคุมการจ่ายก๊าซเข้าสู่หอคักจับด้วยถ่านกัมมันต์และระบบไฟควบคุมวงจรชุดคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งระบบจะทำงานได้เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ จ่ายเข้าไปเลี้ยงวงจรไฟของระบบควบคุมชุดคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3.3 ปั๊มสร้างแรงดัน

1. ปั๊มสร้างแรงดัน

คุณสมบัติ

ยี่ห้อ :PUMA XM-2550

ใช้ไฟ :AC 220 Volt

กำลัง: 3 HP

กินกระแส: 1 แอมแปร์

ขนาดความจุของถัง:50,000cm³

สร้างแรงดันได้สูงสุด:10 bar



รูปที่ 3.4 ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.ชุดทำบริสุทธิ์ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์

คุณสมบัติ

ขนาดความจุของหอคูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ 1 หอ: $4,900 \text{ cm}^3$

ขนาดความจุของถังดูดซึมด้วยน้ำ 1 ถัง: $7,600 \text{ cm}^3$

วัสดุที่ใช้สร้างเหล็กท่อกลมดำ ND G3454 ตามมาตรฐาน JIS

ควบคุมความดันใช้งานสูงสุด: 11 bar



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ

3.เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ

ยี่ห้อ:Geoteth รุ่น WEE/GB052TQ Version 14

แหล่งพลังงาน: ใช้ถ่านขนาด 9 โวลต์ใช้วิเคราะห์ก๊าซได้ 3

ชนิด : CH_4 , CO_2 และ O_2 หลักการทำงาน:ใช้เคลื่อนอิน

ฟารัดวิเคราะห์ความยาวของช่วงเคลื่อนของก๊าซ CH_4 , CO_2

ส่วนก๊าซ O_2 จะใช้เซลล์ไฟฟ้าในการตรวจวิเคราะห์การแตก

ตัวของไอออนของก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 3.6 กระดาษลิตมัส

4.กระดาษลิตมัส

คุณสมบัติ

ใช้วัดค่า pH ตั้งแต่ 1-14

5.มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน

คุณสมบัติ

ใช้วัดค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนตั้งแต่ 1,000 -

$25,000 \text{ cm}^3$ ใช้กับอุณหภูมิก๊าซไม่เกิน 50°C และความ

ดันก๊าซสูงสุด 8 bar



รูปที่ 3.7 มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน



6.มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คุณสมบัติ

ใช้วัดค่าอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 1,000 - 25,000 cm³/min ใช้กับอุณหภูมิก๊าซไม่เกิน 60°C และความดันสูงสุด 10 bar ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์

รูปที่ 3.8 มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



7.มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซมีเทน

คุณสมบัติ

ใช้วัดค่าอัตราการไหลของก๊าซมีเทนตั้งแต่ 880-16,500 cm³/min อุณหภูมิก๊าซไม่เกิน 40°C และค่าความดันก๊าซสูงสุด 17 bar

รูปที่ 3.9 มาตรวัดอัตราการไหลก๊าซมีเทน

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้ ส่วนแรก ทดลองหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์ ส่วนที่สอง ทดลองหากราฟเบรคทอร์จของชุดดักจับก๊าซ ส่วนที่สาม ทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ ส่วนที่สี่ ทดลองหาพฤติกรรมการดูดซับและดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของชุดดักจับก๊าซซึ่งแต่ละการทดลองจะมีขั้นตอนดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง ทดลองหาสภาวะเงื่อนไขการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดของน้ำและถ่านกัมมันต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1.เตรียมน้ำและถ่านกัมมันต์พร้อมกับเตรียมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 2.บรรจุน้ำและถ่านกัมมันต์ก๊าซในชุดดักจับก๊าซ

3. ปล่อยก๊าซเข้าสู่ชุดคักจับก๊าซ

4. วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของก๊าซจากเครื่องมือวิเคราะห์ที่วาล์วทดสอบส่วนผสม
ก๊าซ

5. ปรับตั้งวาล์วควบคุมแรงดันและวาล์วปรับอัตราการไหลของก๊าซให้ได้ค่าความ
ดัน

อัตราการไหลของก๊าซ และค่า pH ของน้ำ ตามที่ขอบเขตการทดลองกำหนดแล้วเปิดวาล์วทดสอบ
ก๊าซ

6. เปิดวาล์วปล่อยก๊าซเข้าสู่ชุดคักจับก๊าซ

7. นำเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซมาตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซที่ด้านทางออก
ก๊าซของชุดคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเริ่มตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซทุกๆ 1 นาที
จนกระทั่งอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ โดยสังเกตที่
ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่าความเข้มข้นของก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์ที่ด้านทางออกเท่ากับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทิศทาง
ป้อนเข้าสู่ระบบ

8. ทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 1-7 แต่เปลี่ยนน้ำและถ่านกัมมันต์พร้อมปรับค่าความ
ดัน อัตราการไหลของก๊าซและค่า pH ของน้ำตามเงื่อนไขต่างๆที่ขอบเขตการทดลองกำหนด

ส่วนที่สอง ทดลองหากราฟเบรคทรูจ์ของชุดคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนนี้จะ
ทดลองภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองส่วนที่หนึ่งที่ผ่านมา ซึ่งการ
ทดลองหากราฟเบรคทรูจ์ของชุดคักจับก๊าซจะมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนที่
หนึ่งแต่เลือกเงื่อนไขการทดลองที่น้ำและถ่านกัมมันต์สามารถคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี
ที่สุด

ส่วนที่สาม ทดลองหาการคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์
ซึ่งในการทดลองนี้จะเลือกสภาวะเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองส่วนที่หนึ่ง
ที่ผ่านมา เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทดลองโดยมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนที่หนึ่ง
แต่จะเพิ่มเติมบางส่วนคือ การทดลองส่วนนี้จะทำการดูดซับและดูดซึมรวมทั้งฟื้นฟูสภาพน้ำและ
ถ่านกัมมันต์จนกระทั่งน้ำและถ่านกัมมันต์ไม่สามารถคักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกหรือดูด
ซับได้คงที่ โดยจะใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ครั้งละ 30 นาที เนื่องจากเป็น
ช่วงระยะเวลาที่ไม่ยาวนานจนเกินไปและไม่สิ้นจนเกินไปรวมทั้งสามารถดูพฤติกรรมของการคายก๊าซ

ของน้ำและถ่านกัมมันต์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งในส่วนของน้ำจะลดความดันให้เหลือ 0 bar และในส่วนของถ่านกัมมันต์จะลดความดันช่วงฟื้นฟูสภาพ P_{vac} เท่ากับ -1.02 bar

ส่วนที่สี่ ทดลองหาพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การทดลองส่วนนี้จะเลือกสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองส่วนที่หนึ่งที่ผ่านมาเป็นสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นในการทดลองหาพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของชุดดักจับก๊าซ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.เตรียมน้ำและถ่านกัมมันต์รวมทั้งก๊าซผสมที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซออกซิเจนในอัตราส่วนส่วนผสม 29.3:28.7:42 %V/V

2.บรรจุน้ำและถ่านกัมมันต์ก๊าซในชุดดักจับก๊าซ

3.ปล่อยก๊าซผสมเข้าสู่ชุดดักจับก๊าซ

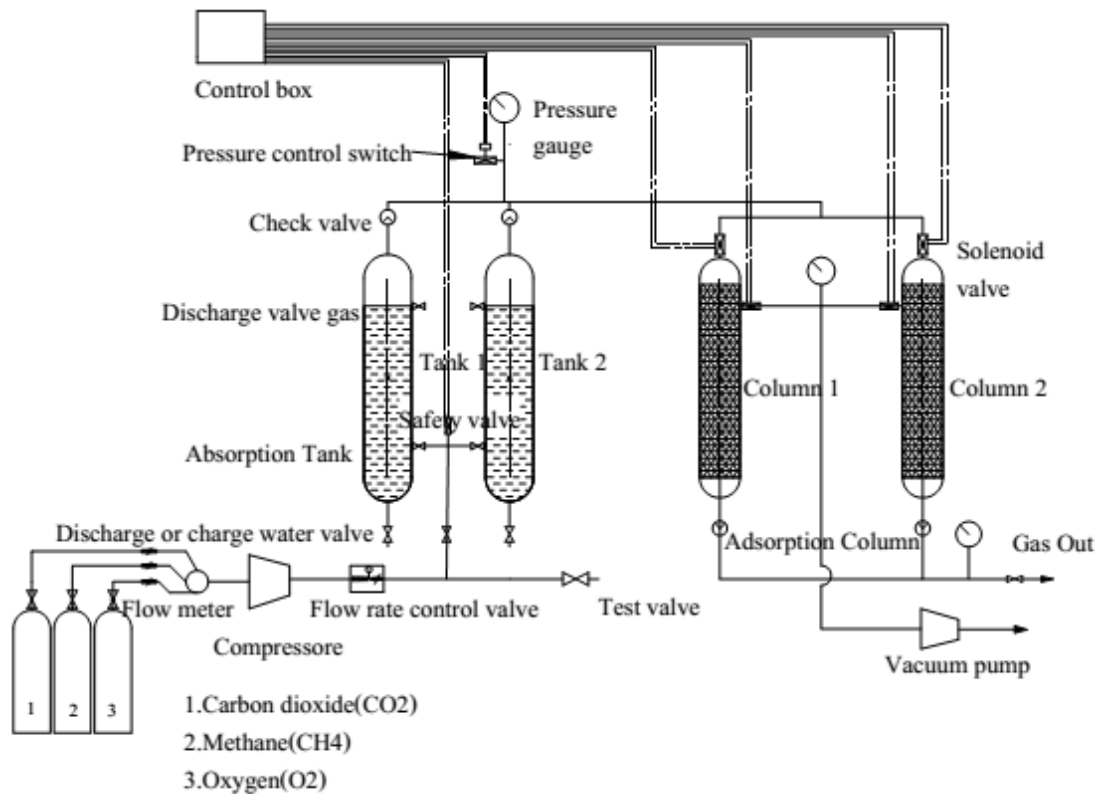
4.วิเคราะห์ค่าส่วนความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ โดยเครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมก๊าซที่วาล์วทดสอบส่วนผสมก๊าซ

5.ปรับตั้งวาล์วควบคุมแรงดันที่ปั๊มและวาล์วควบคุมการไหลของก๊าซแต่ละชนิดที่ถึงของก๊าซนั้นๆ ให้ได้ค่าตามที่กำหนดแล้วปิดวาล์วทดสอบส่วนผสมก๊าซ

6.เปิดวาล์วปล่อยก๊าซเข้าสู่จุดชิมที่ 1 เปิดสวิตช์หมายเลขที่ 1, 5 ไปในตำแหน่งเปิด (ON)

7.นำเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซมาตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ด้านทางออกก๊าซของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเริ่มวัดและวิเคราะห์ ค่าความเข้มข้นก๊าซชนิดต่างๆ ทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเกิน 20% v/v ของค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ทดลองเริ่มต้นเล็กน้อย

8.ทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 1-7 แต่เปลี่ยนน้ำและถ่านกัมมันต์ส่วนในการทดลองดักจับก๊าซแบบ PSA จะเลือกช่วงระยะเวลาการเปิดปิดวาล์วเพื่อฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ตามผลการทดลองการดักจับก๊าซของสารแต่ละชนิดข้างต้นที่ผ่านมาเป็นเงื่อนไขทดลองเริ่มต้น



ภาพที่ 3.10 แผนผังการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสม

3.5 วิธีการทดลอง

วิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้วิธีการทดลองแบบ เบนนิ่ง (fixed-bed) และเทคนิคการดูดซับแบบสลับความดัน (PSA) ซึ่งวิธีการทดลองแบบ เบนนิ่งนี้จะบรรจุน้ำและถ่านกัมมันต์ในภาชนะปิดเพื่อควบคุมให้ปริมาณน้ำและถ่านกัมมันต์คงที่แล้วปล่อยก๊าซที่ใช้สำหรับการทดลองให้ไหลผ่านน้ำและถ่านกัมมันต์พร้อมกับเพิ่มค่าความดันและอัตราการไหลของก๊าซตามที่เงื่อนไขการทดลองกำหนด โดยในส่วนการทดลองที่ 1,2 และ 4 จะทำการทดลองดูดซับและดูดซึมครั้งเดียวแล้วเปลี่ยนถ่ายน้ำและถ่านกัมมันต์ สำหรับการทดลองส่วนที่ 3 ที่ไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำและถ่านกัมมันต์แต่จะทำการฟื้นฟูสภาพแทน ซึ่งในกระบวนการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ จะลดความดันช่วงฟื้นฟูสภาพลงให้เหลือ -1.02 bar ส่วนน้ำนั้นจะลดความดันลงให้เท่ากับ 0 bar โดยจะทดลองทำการดูดซับและดูดซึมก๊าซเช่นนี้จนกระทั่งน้ำและถ่านกัมมันต์ไม่สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้หรือดักจับได้ในปริมาณที่ต่ำกว่าที่ขอบเขตการทดลองกำหนดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง

3.6 คุณสมบัติวัสดุสำหรับการทดลอง

สำหรับน้ำและถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับการทดลองแต่ละชนิดมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำและถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

ถ่านกัมมันต์	น้ำ [7]
-ปริมาตร: 4,000 cm ³ -ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาด 8×16 mesh หรือ 1.19×2.38 mm -ความหนาแน่น: 480 kg / m ³ . -ความชื้น: 8 % w/w -ค่า pH: 9-11. -พื้นที่ผิวสัมผัส: 1100 m ² / g. -ดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์: 50 % w/w -ความสามารถดูดติดผิวโมเลกุลขนาดเล็ก: 1050 mg/g	-ปริมาตร: 7,000 cm ³ -ความหนาแน่น: 1,000 kg / m ³ . -ค่า pH : 7-14. -สีตามสารแขวนลอย -จุดเดือด 100 °C -จุดเยือกแข็งและจุดหลอมเหลว 0 °C -มวลอะตอม 18 g/mole -ความหนืด(μ) 1.0×10 ⁻³ N.s/m ² ที่ ความดันบรรยากาศ

หมายเหตุ ในการเตรียมน้ำให้มีค่า pH ตามความต้องการนั้นจะใช้น้ำบริสุทธิ์ที่มีค่า pH 7 ผสมกับน้ำปูนขาวที่มีค่าความเป็นเบสเข้มข้น โดยจะเจือจางค่า pH ของน้ำปูนขาวจนกระทั่งได้น้ำที่มีค่า pH ตามที่ต้องการ (pH หมายถึงค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ที่อยู่ในน้ำค่า pH ของน้ำจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 14 โดยมีค่าเป็นกลางที่ pH 7 ที่อุณหภูมิ 25 °C)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของก๊าซชนิดต่างๆที่ใช้สำหรับการทดลอง

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) [13]	ก๊าซมีเทน (CH ₄) [14]	ก๊าซออกซิเจน (O ₂) [17]
-ความหนาแน่น: 1.98 kg/m ³ ที่ 0 C และ 1.777 kg / m ³ ที่ 30 °C -ไม่ติดไฟ -ไม่มีสี -จุดหลอมเหลว -78.5 °C -จุดเดือด -56.6 °C -มวลอะตอม 44 g/mole -รัศมีอะตอม 116.3 pm -สามารถละลายน้ำได้ 0.134 mg ต่อ น้ำ 1.000cm ³ ที่ 15 °C -ความหนืด(μ) 1.5277×10 ⁻⁵ N.s/m ² ที่ อุณหภูมิ 30 °C -ค่าน้ำหนักจำเพาะ 19.4238 N/m ³	-ความหนาแน่น: 0.717 kg/m ³ ที่ 0 C และ 0.646 kg / m ³ ที่ 30 °C -ติดไฟ -ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น (สถานะแก๊ส) -จุดเดือด -161.6 °C -จุดหลอมเหลว -182.5 °C -มวลอะตอม 16 g/mole -รัศมีอะตอม 108.7 pm -สามารถละลายในน้ำได้ 35 mg ต่อ น้ำ 1.000cm ³ ที่ 15 °C -จุดวาบไฟ -188 °C -ความหนืด(μ) 1.1368×10 ⁻⁵ N.s/m ² ที่ อุณหภูมิ 30 °C -ค่าน้ำหนักจำเพาะ 7.03377N/m ³	-ความหนาแน่น: 1.43 kg/m ³ ที่ 0 C และ 1.287 kg / m ³ ที่ 30 °C -ไม่ติดไฟแต่ช่วยให้ไฟติด -ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น (สถานะแก๊ส) -จุดเดือด -218.79 °C -จุดหลอมเหลว -182.962 °C -มวลอะตอม 32 g/mole -รัศมีอะตอม 48 pm -สามารถละลายน้ำได้ 0.034 mg ต่อ น้ำ 1.000cm ³ ที่ 15 °C -ความหนืด(μ) 2.07793×10 ⁻⁵ N.s/m ² ที่ อุณหภูมิ 30 °C -ค่าน้ำหนักจำเพาะ 14.0283 N/m ³

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

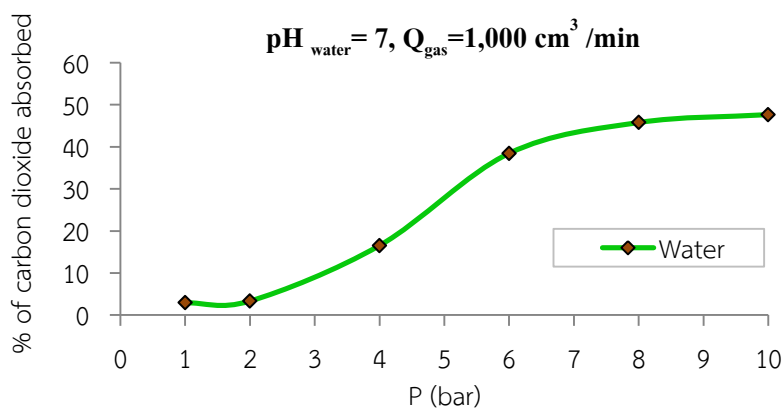
ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้ ส่วนแรก คือ ผลทดลองการหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์ ส่วนที่สอง คือ ผลการทดลองหากราฟเบรคทรูจของชุดดักจับก๊าซ ส่วนที่สาม คือ ผลทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ ส่วนที่สี่ คือ ผลทดลองการหาพฤติกรรมการดูดซับและดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของชุดดักจับก๊าซซึ่งแต่ละผลการทดลองจะมีรายละเอียดดังนี้

4.1 เงื่อนไขการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด

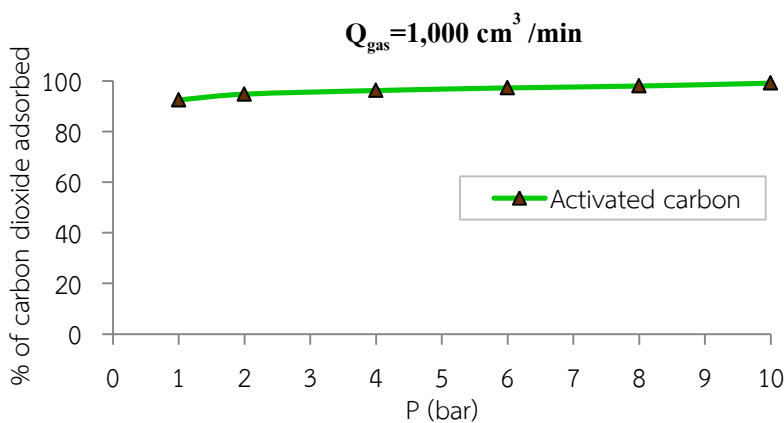
การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดของน้ำและถ่านกัมมันต์จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ทดลองหาความดันที่เหมาะสม ทดลองที่ความดันของก๊าซ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 bar
2. ทดลองหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เหมาะสม ทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 3,000 5,000 7,000 9,000 และ 10, 000 cm^3/min
3. ทดลองหาค่า pH ของน้ำที่เหมาะสม ทดลองที่ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7, 9, 11, 13 และ 14

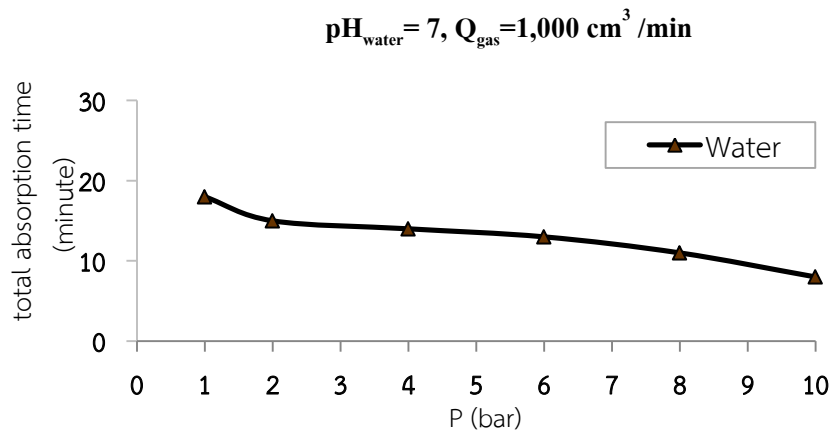
โดยการทดลองทั้งสามส่วนนี้จะใช้น้ำปริมาตร $7,000 \text{ cm}^3$ และถ่านกัมมันต์ $4,000 \text{ cm}^3$ รวมทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น $1,894.86 \text{ mg}$ ต่อปริมาตรก๊าซ $1,000 \text{ cm}^3$ และรูหัวฉีดก๊าซขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.1 cm ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องพร้อมกับเปลี่ยนแปลงค่าความดัน อัตราการไหลของก๊าซและค่า pH ของน้ำตามแต่ละเงื่อนไขการทดลองข้างต้นกำหนด โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทดลองเพียงหนึ่งครั้งแล้วเปลี่ยนถ่ายน้ำและถ่านกัมมันต์เป็นสารชุดใหม่



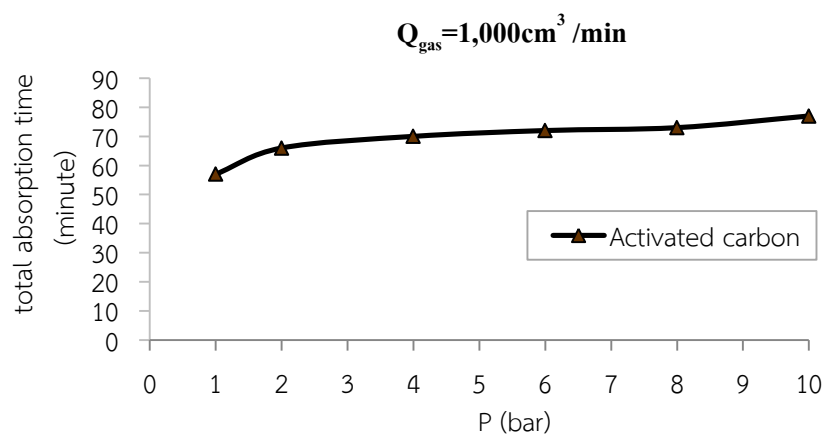
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและค่าความดันของก๊าซ ที่ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7 และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และค่าความดันของก๊าซ ที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min



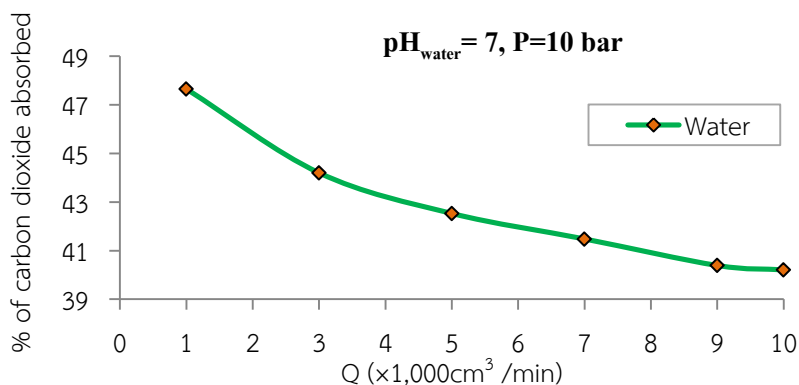
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำ จนกระทั่งอิ่มตัวและค่าความดันของก๊าซที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3 / \text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7



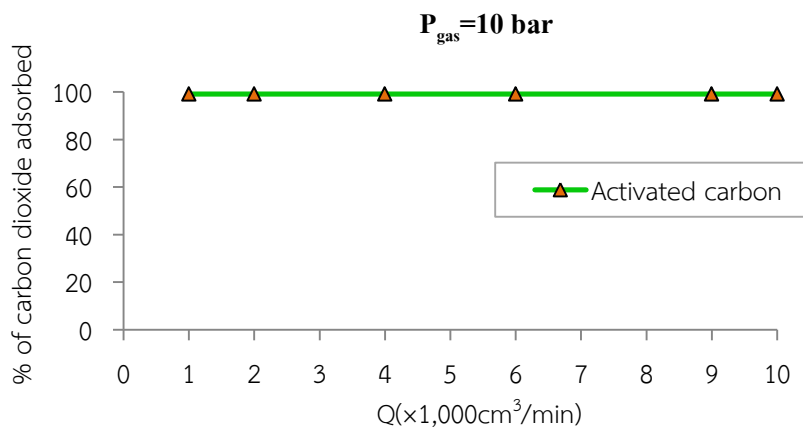
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จนกระทั่งอิ่มตัวและค่าความดันของก๊าซ ที่ ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3 / \text{min}$

จากรูปที่ 4.1 พบว่าน้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เร็วขึ้นเมื่อค่าความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดในแต่ละค่าความดันเริ่มจากความดัน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 bar ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดังนี้ 3.03 3.34 16.54 38.45 45.77 และ 47.65 จากผลการคำนวณดังกล่าวพบว่าที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar น้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดแต่หากดูข้อมูลกราฟระยะเวลาอิ่มตัวของน้ำดังรูปที่ 4.3 จะพบว่าระยะเวลาในการดูดซึมก๊าซ-

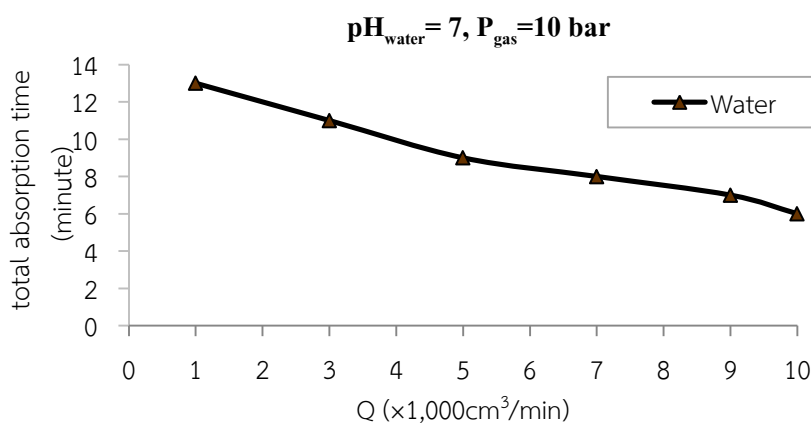
คาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำสั่นลงเมื่อความดันของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นดังนี้ 18, 15, 14, 13, 11 และ 9 นาที ตามลำดับ จากการทบทวนเอกสารทำให้ทราบว่า เมื่อความดันของก๊าซเพิ่มขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถละลายหรือแตกตัวในน้ำได้เพิ่มขึ้นแต่เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับการทดลองมีปริมาตรจำกัดหรือคงที่จึงทำให้ระยะเวลาการอิ่มตัวของน้ำสั่นลง ส่วนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นตามค่าความดันของก๊าซ จากผลการคำนวณพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุดในแต่ละค่าความดันได้ดังนี้ 92.51 94.80 96.24 97.28 98.02 และ 99.16 ที่ความดันของก๊าซเท่ากับ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 bar ตามลำดับและยังพบว่าระยะเวลาในการอิ่มตัวของถ่านกัมมันต์จะยาวนานยิ่งขึ้นเมื่อค่าความดันของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นดังรูป 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้นอนุภาคอะตอมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกบีบอัดให้แทรกตัวและติดตามผนังรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้มากยิ่งขึ้น



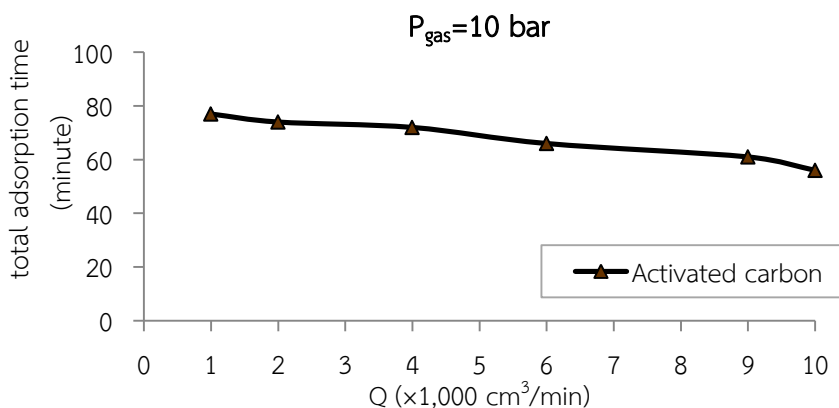
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและอัตราการไหลของก๊าซ ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar

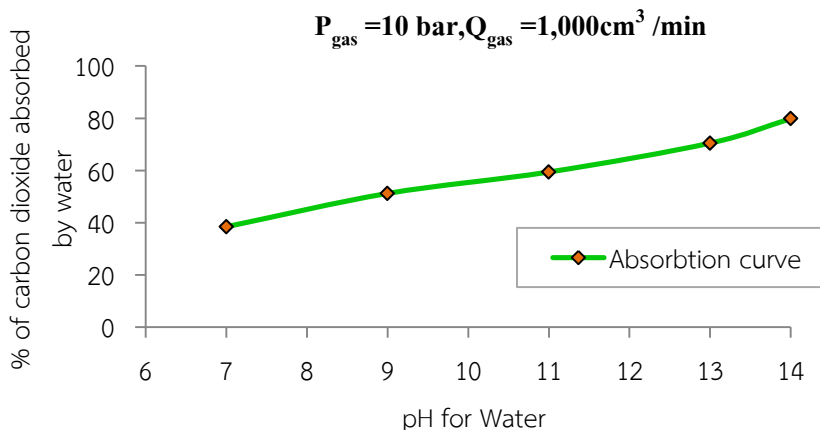


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำจนกระทั่งอิ่มตัวและค่าอัตราการไหลของก๊าซ ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7

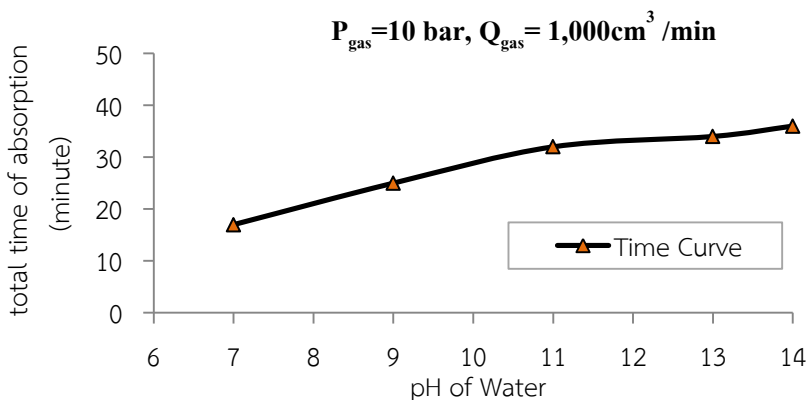


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จนกระทั่งอิ่มตัวและค่าอัตราการไหลของก๊าซ ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar

จากรูปที่ 4.5 พบว่าหากเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของก๊าซให้สูงมากยิ่งขึ้นจะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำลดลง จากผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำที่สูงสุดในแต่ละค่าอัตราการไหลของก๊าซได้ดังนี้ 47.65 44.20 42.53 41.48 40.39 และ 40.21 ที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 3,000 5,000 7,000 9,000 และ 10,000 cm^3/min ตามลำดับและยังส่งผลต่อระยะเวลาในการอิ่มตัวของน้ำทำให้ดูดซับก๊าซได้สั้นลงดังรูปที่ 4.7 ส่วนถ่านกัมมันต์พบว่าหากอัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.6 ส่วนระยะเวลาในการอิ่มตัวของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดซับของน้ำ เมื่อค่าอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์สั้นลงแสดงดังรูป 4.8 โดยจะลดลงเหลือ 56 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 10,000 cm^3/min ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่าสาเหตุที่ค่าการดูดซับก๊าซของถ่านกัมมันต์ไม่ลดลง เนื่องจากถ่านกัมมันต์ยังมีพื้นที่สำหรับดูดซับก๊าซอีกมากแต่ประกออบกับแรงบีบอัดที่ใช้บีบอัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ให้ติดผิวถ่านกัมมันต์ไม่มากพอจึงทำให้ระยะเวลาอิ่มตัวสั้นลง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและค่า pH ของน้ำ ที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำจนกระทั่งอิ่มตัวและค่า pH ของน้ำ ที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar

ตาราง 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของน้ำที่ค่า pH ของน้ำ ค่าต่างๆ

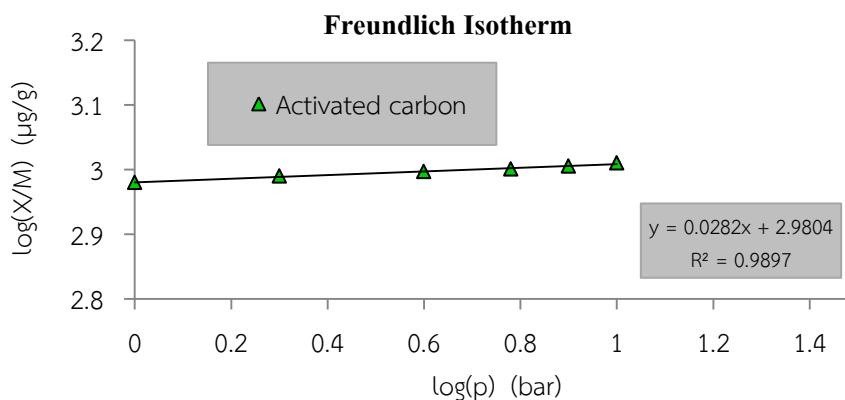
ค่า pH ของน้ำ	7	9	11	13	14
การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (% v/v)	38.45%	51.20%	59.40%	70.47%	79.83%

4.2 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และค่าการแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในผิวน้ำ

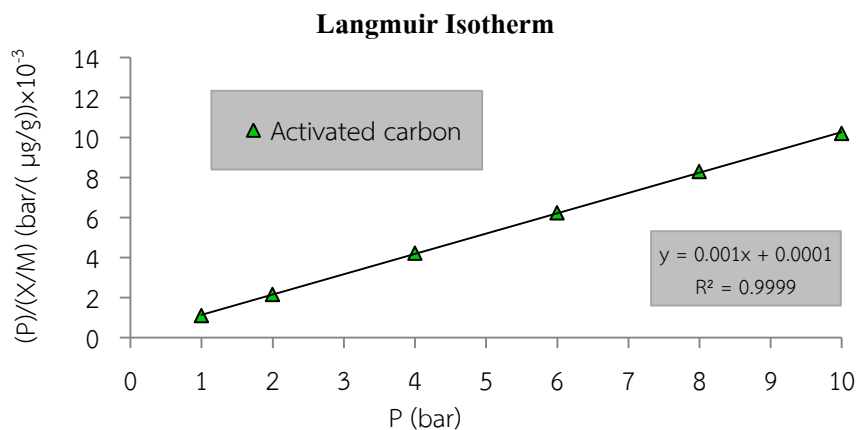
ผลจากการทดลองหาเงื่อนไขการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับน้ำและถ่านกัมมันต์ก่อนหน้านี้สามารถนำมาคำนวณหาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์ เพื่อหาค่า K_F , n_F , R^2 , a และ b ดังตัวอย่างการคำนวณที่ ค.4 และ ค.5 และค่าการแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในผิวน้ำดังตัวอย่างการคำนวณที่ ค.3 ในภาคผนวก ค ซึ่งจากการคำนวณได้ผลดังนี้

4.2.1 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลจากการคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (Correlation coefficient : R^2) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ แสดงว่าไอโซเทอมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์แบบแลงมัวร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาอธิบายการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังปรากฏตามรูปที่ 4.12 ซึ่งหมายความว่า การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์นี้เป็นการดูดซับทางเคมีและดูดซับได้เพียงชั้นเดียวหากต้องการจะฟื้นฟูสภาพต้องใช้พลังงานเข้ามากระตุ้น เพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวของพันธะเคมีที่เกิดขึ้นจากการดูดซับจึงจะทำให้ฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ได้ผลดี



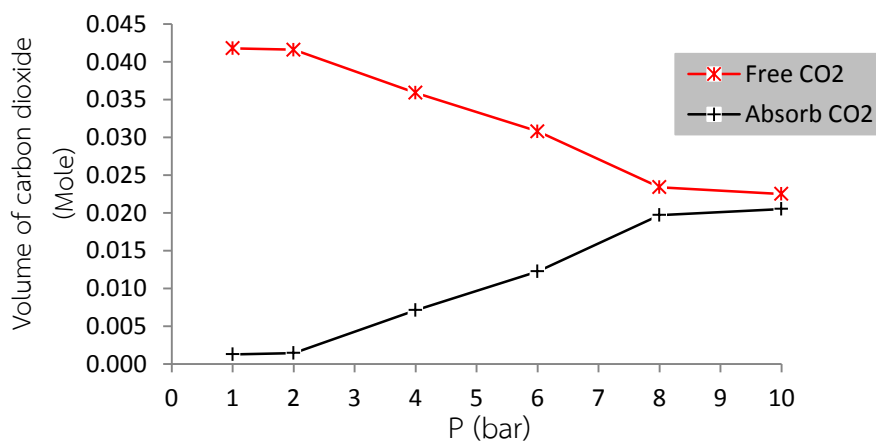
รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์



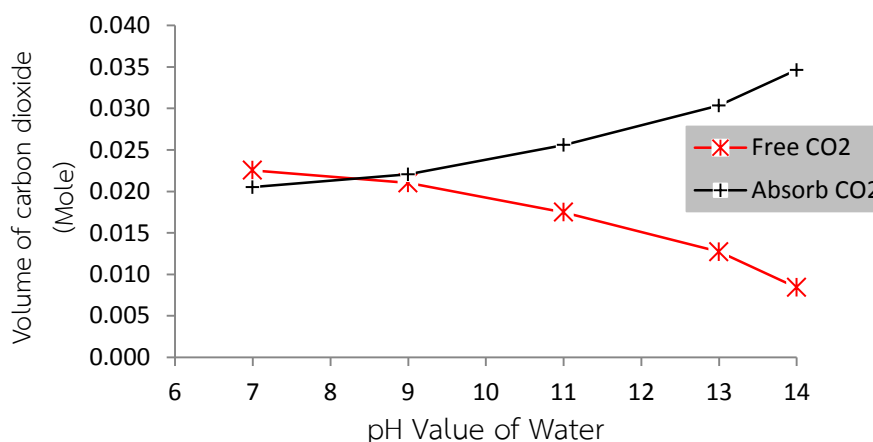
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์

จากผลการคำนวณพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด (a) เท่ากับ 1 mg ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 g ที่สถานะสมดุลและมีค่าพลังงานของการดูดซับผิวเท่ากับ (b) $0.01 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งหากเทียบตามข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับการทดลองทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับการทดลองยังมีศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกมาก

4.2.2 ค่าการแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในผิวน้ำ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกตัวและค่าความดันของก๊าซ ที่ ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7

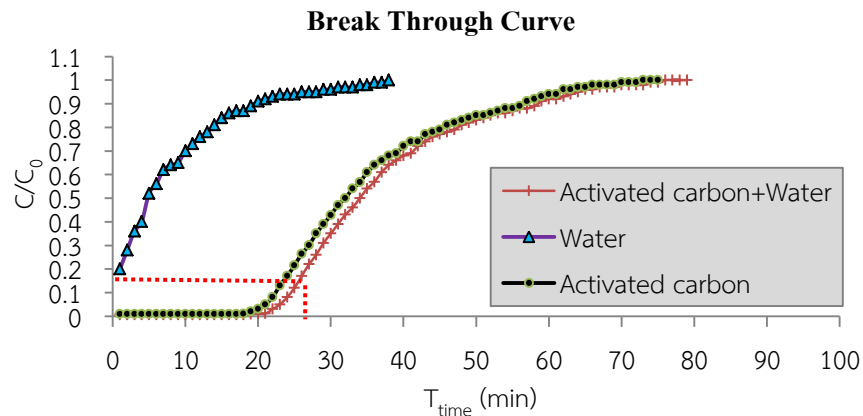


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกตัวและค่า pH ของน้ำ ที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm^3/min

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าเมื่อความดันของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกตัวอยู่ในรูป Free CO_2 จะลดน้อยลงและหากค่า pH ของน้ำเพิ่มสูงขึ้นยิ่งทำให้ปริมาณการแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูป Free CO_2 มีปริมาณน้อยลงยิ่งขึ้นเช่นกัน ส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายหรือแตกตัวในรูปของสารละลายกรดคาร์บอนิกจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เมื่อค่าความดันความดันของก๊าซและค่า pH ของน้ำสูงขึ้น

4.3 กราฟจุดเริ่มอิ่มตัวในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และน้ำ (Break through Curve)

การทดลองหาจุดเริ่มอิ่มตัวหรือกราฟเบรคทวร์จของการเคลื่อนย้ายมวลสารของน้ำและถ่านกัมมันต์ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการทดลองจะใช้น้ำปริมาตร $7,000 \text{ cm}^3$ และถ่านกัมมันต์ $4,000 \text{ cm}^3$ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น $1,894.86 \text{ mg}$ ต่อปริมาตรก๊าซ 1000 cm^3 รั้วหัวฉีดก๊าซเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 cm โดยการทดลองจะเลือกเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองในส่วนที่หนึ่งที่ผ่านมาเป็นค่าเงื่อนไขการทดลอง จากการทดลองส่วนที่หนึ่งได้ค่าดังนี้ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14 โดยจะทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง (30°C) และทดลองเพียงหนึ่งครั้งแล้วเปลี่ยนถ่านน้ำและถ่านกัมมันต์ชุดใหม่เข้าสู่ระบบ ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.15 กราฟเบรกทวูจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 และระยะเวลาที่ก๊าซไหลผ่านชุดดักจับก๊าซ ที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางเข้า (C/C_0) หลังไหลผ่านน้ำที่มีปริมาตร $7,000 \text{ cm}^3$ ในนาที่แรกมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.201 ซึ่งหมายความว่าน้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 0.216 mg/g หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางเข้าของน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งระยะเวลาผ่านไป 38 นาที ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางเข้าจะเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าน้ำหยุดการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนถ่านกัมมันต์พบว่าสามารถวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางเข้าได้เท่ากับ 0.0083 ในนาที่แรก ซึ่งหมายความว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 0.979 mg/g เป็นระยะเวลานาน 18 นาที หลังจากนั้นค่า C/C_0 จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งเวลาผ่านไป 73 นาที ค่า C/C_0 จึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1 และเมื่อนำน้ำและถ่านกัมมันต์มาดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกันพบว่าค่า C/C_0 ที่วัดได้เท่ากับ 0.0063 ในนาที่แรกซึ่งหมายความว่าสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ $1,882.92 \text{ mg}$ ต่อนาที่โดยรวมระยะทั้งหมดได้เท่ากับ 23 นาที หลังจากนั้นค่า C/C_0 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งค่าเท่ากับ 1 ที่นาที่ ที่ 76 ของการทดลอง เนื่องจากช่วงเบรกทวูจ์สูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.2 หรือสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยที่สุด 80 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนได-

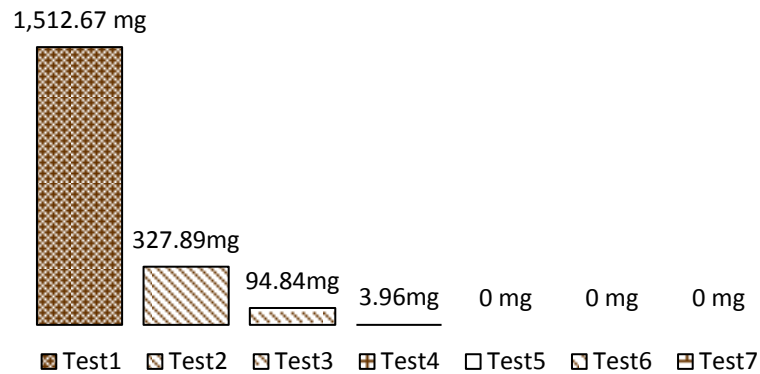
ออกไซด์เริ่มต้นที่ปล่อยผ่านตัวชุดดักจับก๊าซ เพื่อให้เป็นไปตามที่ขอบเขตการทดลองกำหนด จึงควรฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ เมื่อใช้น้ำและถ่านกัมมันต์ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1894.6 mg ต่อปริมาตรก๊าซรวม 1,000 cm³ ที่นาที่ที่ 26 หลังจากเริ่มการดักจับก๊าซ

4.4 การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์

การทดลองเพื่อหาค่าการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์จะใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ได้จากการทดลองส่วนที่หนึ่งที่ผ่านมา โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ทดลองหาค่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และระยะเวลาที่ดูดซึมจนกระทั่งอิ่มตัวของน้ำหลังจากฟื้นฟูสภาพ (ใช้น้ำปริมาตร 7,000 cm³) ส่วนที่สอง ทดลองหาค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และระยะเวลาดูดซับจนกระทั่งอิ่มตัวของถ่านกัมมันต์ (ใช้ถ่านกัมมันต์ ปริมาตร 4,000 cm³)

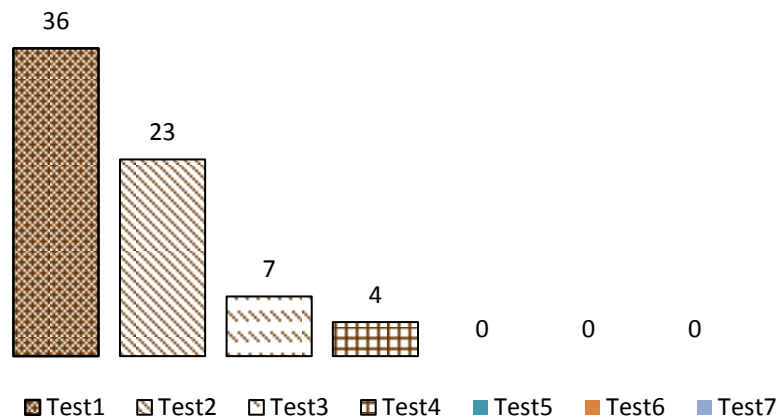
การทดลองจะใช้หัวฉีดก๊าซที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 0.1 cm โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้สำหรับทดลองมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1894.68 mg ต่อปริมาตรก๊าซ 1,000 cm³ โดยจะทำการทดลองจนกระทั่งการดูดซึมและดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์มีค่าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การทดลองนี้จะไม่เปลี่ยนถ่ายน้ำและถ่านกัมมันต์หลังจากทำการดักจับก๊าซจนกระทั่งอิ่มตัวแต่จะทำการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคลดความดัน โดยใช้ระยะเวลาฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ทั้งหมดครั้งละ 30 นาทีและทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง (30°C)

volume of Carbon dioxide absorption in frist minute



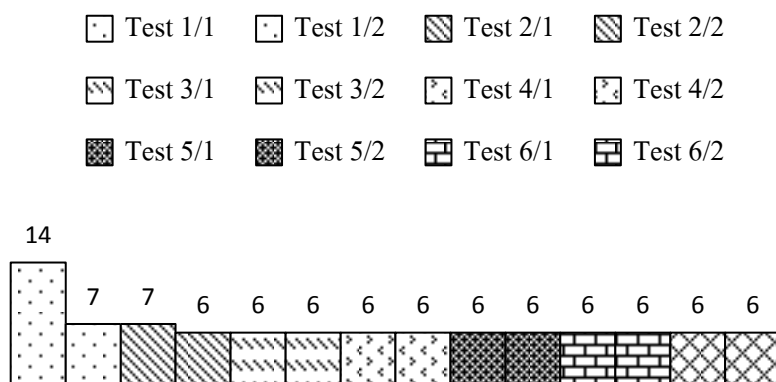
รูปที่ 4.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้ำดูดซึมได้ ณ นาทีแรกหลังผ่านน้ำและจำนวนครั้งของการทดลอง ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ ความดันก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า pH ของน้ำ เท่ากับ 14

Total Time of absorption (minute)



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำ จนกระทั่งอิ่มตัวกับจำนวนครั้งการทดลอง ที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ ความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า pH ของน้ำ เท่ากับ 14

pH of Water

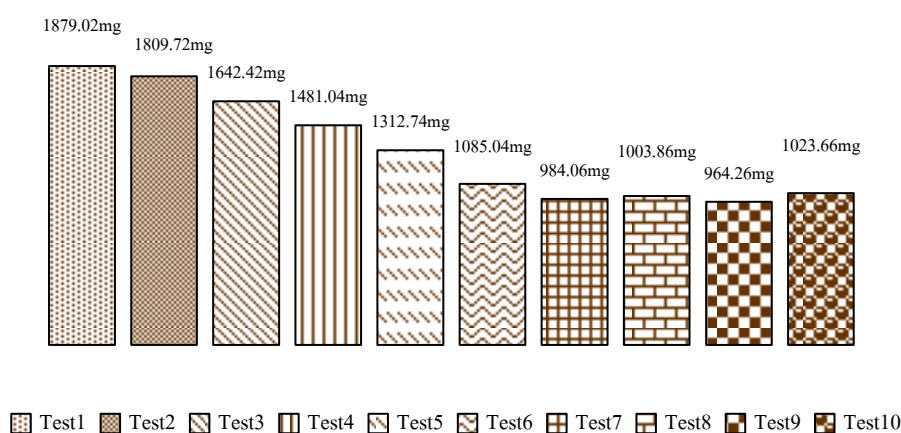


รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำก่อนและหลังทำการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจำนวนครั้งของการทดลอง ที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำในการทดลองครั้งที่หนึ่งน้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดเท่ากับ 79.83 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นที่ปล่อยเข้าสู่ระบบหรือน้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ 1,512.67 mg ซึ่งหลังจากปล่อยให้ น้ำดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนกระทั่งน้ำอิ่มตัวรวมเวลาได้ทั้งหมด 36 นาที และหลังจากทำการฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยเทคนิคลดความดันแล้วนำน้ำมาดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฟื้นฟูสภาพอีก 3 ครั้ง พบว่าน้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยลงตามลำดับ จนกระทั่งไม่สามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกหลังจากฟื้นฟูสภาพน้ำครั้งที่ 4 และจากกราฟ ค่า pH ของน้ำที่แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำของการทดลองครั้งที่ 1 ค่า pH ของน้ำจะลดลงจาก pH 14 เป็น pH 7 และจะลดลงเหลือ pH 6 ในการทดลองดูดซึมครั้งที่ 2 ส่วนการทดลองครั้งต่อไป ค่า pH ของน้ำจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจากการทบทวนเอกสารทำให้ทราบว่าสาเหตุที่ค่า pH ของน้ำลดลงเมื่อทำการทดลองดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งที่ 1 และ 2 เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้น้ำมีสภาพกลายเป็นกรดคาร์บอนิกอ่อนๆ ส่งผลให้ค่า pH ของน้ำหลังทำการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ลดลงเหลือ 7 และ 6 ตามลำดับ แต่เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพด้วยเทคนิคลดความดัน ค่า pH ของน้ำหลังการฟื้นฟูสภาพยังคงเท่าเดิมแสดงว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงละลายฝังตัวอยู่ในผิวน้ำไม่แยกตัวออกจากผิวน้ำแต่จะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H⁺) และ ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻) และเมื่อนำน้ำไปดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และทำ

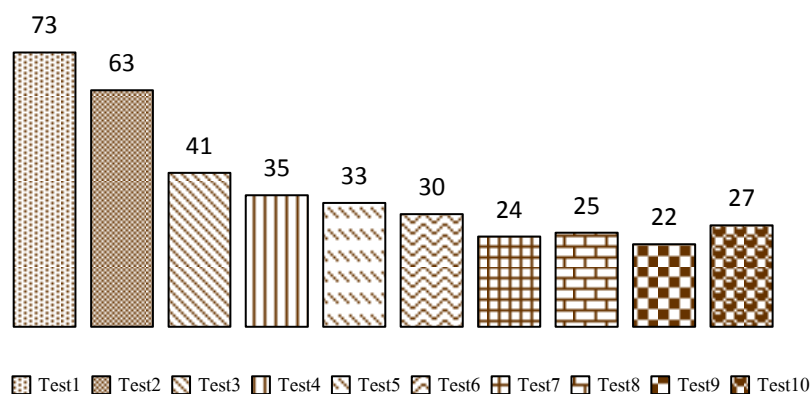
การฟื้นฟูสภาพอีกหนึ่งครั้งจะพบว่าค่า pH ของน้ำยังคงที่เท่ากับ pH 6 และดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยลงแสดงว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายหรือแตกตัวเป็น ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ได้น้อยลง ซึ่งจากการทดลองพบว่า การฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยการลดความดันให้เท่ากับ 0 บาร์ จะสามารถฟื้นฟูสภาพน้ำได้เพียงสามครั้ง โดยฟื้นฟูสภาพน้ำได้มากที่สุดเท่ากับ 28.92% ในการฟื้นฟูสภาพน้ำครั้งที่ 2

volume of Carbon dioxide absorption in frist minute



รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับในนาที่แรกหลังผ่านถ่านกัมมันต์และจำนวนครั้งการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และความดันก๊าซเท่ากับ 10 bar

Total Time of absorption (minute)



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จนกระทั่งอิ่มตัวและจำนวนครั้งการทดลอง ที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ในครั้งแรกสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 99.16 % หรือสามารถดูดซึมได้เท่ากับ 1879.02 mg ในเวลาที่แรกและสามารถดูดซับได้นาน 73 นาที ถ่านกัมมันต์จึงอิ่มตัว หลังจากนั้นนำไปทำการฟื้นฟูสภาพและทำการดูดซับอีก 6 ครั้ง ปรากฏว่าค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะลดลงตามลำดับจนกระทั่งเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในการทดลองดูดซับครั้งที่ 7 เป็นต้นไป โดย ซึ่งจากการคำนวณพบว่า การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคลดความดันให้เหลือ -1.02 บาร์จะสามารถฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ได้สูงสุดเท่ากับ 99.31% ในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ครั้งที่หนึ่งหลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหลังการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 7 เป็นต้นไป

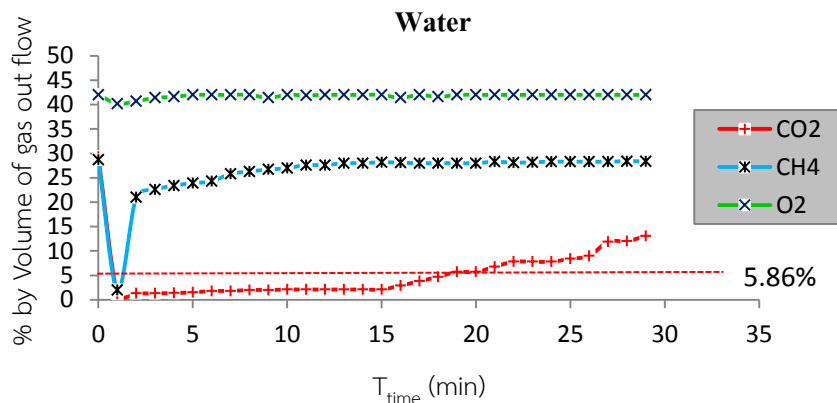
4.5 พฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำและถ่านกัมมันต์

การทดลองเพื่อหาพฤติกรรมการดักจับก๊าซผสมของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้น้ำและถ่านกัมมันต์เป็นตัวดักจับก๊าซจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก หาพฤติกรรมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำ โดยใช้น้ำปริมาตร 7,000 cm³

ส่วนที่สอง หาพฤติกรรมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของถ่านกัมมันต์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาตร 4,000 cm³

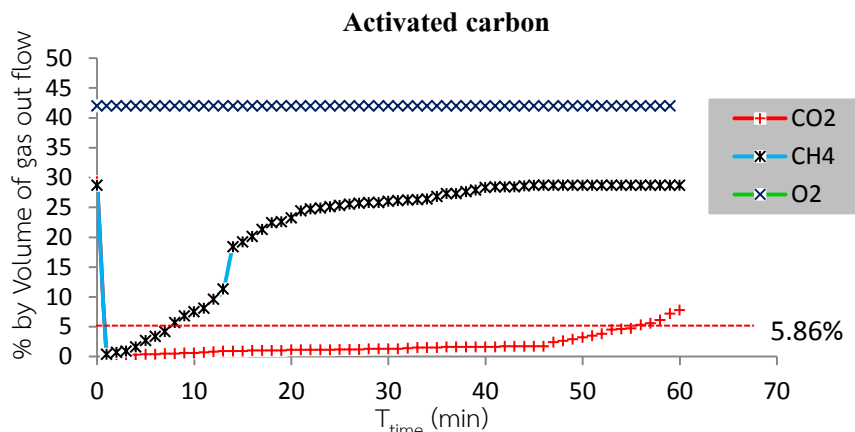
ส่วนที่สาม หาพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำปริมาตร 7,000 cm³ และถ่านกัมมันต์ปริมาตร 4,000 cm³

ในการทดลองจะใช้รูหัวฉีดก๊าซที่มีขนาดเส้นกลางเท่ากับ 0.1 cm อัตราส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์:ก๊าซมีเทน:ก๊าซออกซิเจน มีความเข้มข้น ดังนี้ 29.3%:28.7%:42% ต่อปริมาตรก๊าซ 1000 cm³ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min ค่าความดันก๊าซเท่ากับ 10 bar รวมทั้ง ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14 ซึ่งจะทำการทดลองหนึ่งครั้งแล้วเปลี่ยนน้ำและถ่านกัมมันต์

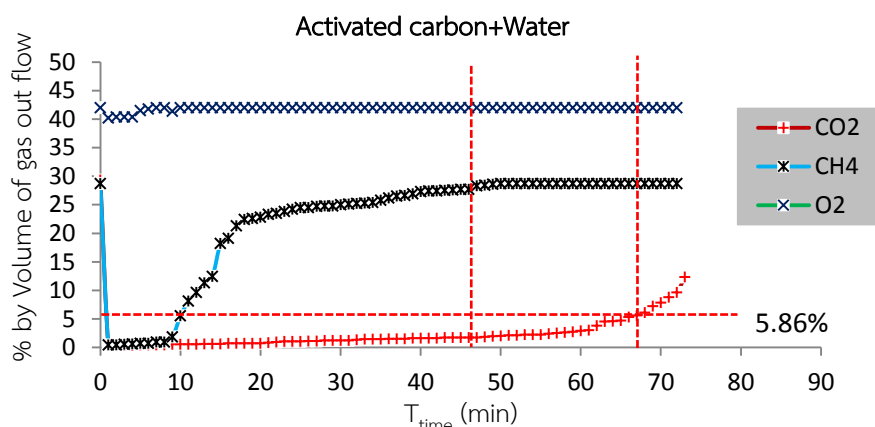


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆที่วัดได้หลังไหลผ่านน้ำกับเวลา ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14

จากรูปที่ 4.21 พบว่าน้ำสามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดจากการคำนวณเท่ากับ 82.7% ของความเข้มข้นเริ่มต้น ในนาทีแรกหลังจากนั้นจะดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15 นาที ค่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำก็จะลดลงอย่างรวดเร็วและจะเกินค่าที่ขอบเขตยอมรับได้ เมื่อเวลาผ่านไป 19 นาที รวมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้ำดูดซึมได้ในเวลา 19 นาที เท่ากับ 9,608.19 mg ส่วนพฤติกรรมดูดซึมก๊าซมีเทนของน้ำในช่วง 1 นาที แรกน้ำจะดูดซึมก๊าซมีเทนได้สูงสุด 93.17% ของความเข้มข้นเริ่มต้น หลังจากนั้นน้ำจะดูดซึมก๊าซมีเทนได้ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งหยุดการดูดซึมเมื่อเวลาผ่านไป 16 นาที รวมปริมาณก๊าซมีเทนที่น้ำดูดซึมได้ในเวลา 16 นาที เท่ากับ 444.34 mg ส่วนก๊าซออกซิเจนนั้นน้ำจะสามารถดูดซึมได้เล็กน้อยประมาณ 1.64 % ของเข้มข้นก๊าซออกซิเจนเริ่มต้นในนาทีแรกและหยุดดูดซึมเมื่อเวลาผ่านไป 4 นาทีรวมปริมาณก๊าซออกซิเจนที่น้ำดูดซึมได้ในเวลา 4 นาที เท่ากับ 52.82 mg



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ก๊าซโดยปริมาตรของก๊าซต่างๆที่ไหลผ่าน ถ่านกัมมันต์กับเวลาที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14



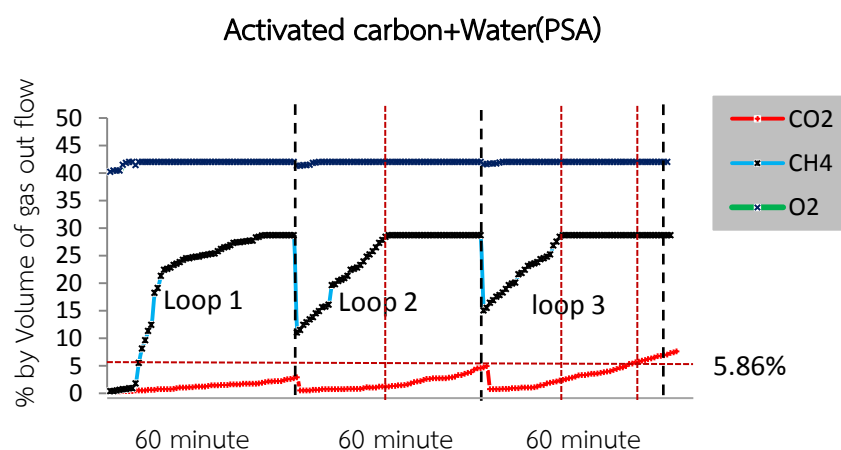
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซชนิดต่างๆที่วัดได้หลัง ผ่านน้ำและถ่านกัมมันต์กับเวลาที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของ ก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14

จากรูปที่ 4.22 พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 98.97% ในนาที่แรกและหลังจากนั้นค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ ถ่านกัมมันต์จะลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งนาที่ที่ 45 ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนได- ออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จะลดลงเหลือ 97.28% และจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนเกินค่าที่ขอบเขต กำหนดเมื่อเวลาผ่านไป 56 นาที่ รวมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้ใน เวลา 56 นาที่ เท่ากับ 30,637 mg ส่วนก๊าซมีเทน ในช่วง 4 นาที่แรกจะใช้เวลาแทรกผ่านถ่านกัมมันต์

หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ 100% หลังเวลาผ่านไป 47 นาที นับจากเริ่มต้นทำการทดลอง ส่วนก๊าซออกซิเจนนั้นเนื่องจากมีขนาดอะตอมที่เล็กจึงสามารถแทรกผ่านถ่านกัมมันต์ได้ 100%

จากรูปที่ 4.23 พบว่าชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 99.96% ในนาที่แรกและหลังจากนั้นค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งมีค่าความเข้มข้นเกิน 20% ของค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในนาที่ที่ 67 ส่วนก๊าซมีเทนในช่วง 45 นาทีแรกก๊าซมีเทนจะแทรกตามรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีปริมาณรวม 3,148.9 mg และละลายในน้ำ 547.6 mg หลังจากนั้นความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนก๊าซออกซิเจนนั้นจะมีการดูดซึมเล็กน้อยจากน้ำปริมาณ 57.9 mg

จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าระยะเวลาที่มีความเหมาะสมที่จะทำการปิดวาล์วจ่ายก๊าซเข้าสู่ชุดดักจับก๊าซและเปิดวาล์วดูดก๊าซที่ถูกดูดซับและดูดซึมออก เพื่อฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ โดยควรปิดวาล์วจ่ายก๊าซ และเปิดวาล์วฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ในช่วงนาที่ ที่ 46-67 เพราะหากปิดวาล์วจ่ายก๊าซและเปิดวาล์วฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ก่อนเวลาที่กล่าวมาจะทำให้มีการสูญเสียก๊าซมีเทนในปริมาณมากแต่หากปิดวาล์วจ่ายก๊าซและเปิดวาล์วฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์หลังนาที่ที่ 67 ค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงกว่า 20 % ของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นของการทดลองหรือเกินค่าที่ขอบเขตยอมรับได้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซที่ผ่านน้ำและถ่านกัมมันต์และเวลา ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14 ทดลองโดยเทคนิคแบบ PSA

จากรูปที่ 4.24 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการเลือกช่วงระยะเวลาปิดวาล์วจ่ายก๊าซ และเปิดวาล์วพื้นสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ในช่วงนาที่ ที่ 60 ซึ่งพบว่าชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดในแต่ละ Loop เรียงตามลำดับได้ดังนี้ 99.96% ,98.46% และ 97.30% โดยความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีลักษณะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องและระยะเวลาในการอิ่มตัวของน้ำและถ่านกัมมันต์จะเร็วขึ้นตามจำนวน Loop การทำงานของชุดดักจับก๊าซ ส่วนก๊าซมีเทนพบว่าเมื่อ Loop การดักจับก๊าซเพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหรือรวดเร็วตามไปด้วยเนื่องจากอนุภาคอะตอมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะไปอุดตันช่องรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทำให้ก๊าซมีเทนเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้น้อยลง ส่วนก๊าซออกซิเจนนั้นจะมีการดูดซึมเล็กน้อยจากน้ำใน Loop 1 และเมื่อจำนวน Loop การดักจับก๊าซเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซึมก๊าซออกซิเจนของชุดดักจับก๊าซจะลดลงเนื่องจากน้ำอิ่มจากการดูดซึมก๊าซใน Loop 1 อีกทั้งมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซที่ไม่มีขั้วทำให้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้น้อยที่อุณหภูมิห้องประกอบกับมีขนาดอะตอมที่เล็กทำให้สามารถแทรกผ่านถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจากการทดลองนี้จะสังเกตเห็นว่าเมื่อจำนวน Loop การดักจับก๊าซเพิ่มขึ้นช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเปิดปิดวาล์วชุดดักจับก๊าซสำหรับพื้นสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์จะสั้นลงดังนี้ Loop 2 ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมคือ นาที่ที่ 29-59 ส่วน Loop 3 ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมคือ นาที่ที่ 26-48

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้น้ำและถ่านกัมมันต์เป็นตัวดักจับก๊าซ เพื่อทดลองหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำปริมาตร 7,000 cm³ และถ่านกัมมันต์ปริมาตร 4,000 cm³ โดยจะศึกษาค่าความดัน อัตราการไหลของก๊าซและค่า pH ของน้ำเทียบกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับหลังผ่านน้ำและถ่านกัมมันต์ พร้อมทั้งทดลองหาค่าการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยเทคนิคลดความดันตามค่าที่ขอบเขตกำหนด เพื่อหาจำนวนครั้งที่น้ำและถ่านกัมมันต์สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกินหรือเท่ากับค่าที่ขอบเขตกำหนด รวมทั้งดูความเหมาะสมของกระบวนการฟื้นฟูสภาพด้วยเทคนิคลดความดันว่าเหมาะสมที่จะใช้ฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์หรือไม่ ซึ่งการทดลองดังที่กล่าวมาข้างต้นจะใช้วิธีการทดลองแบบ เบดนิ่ง (Fixed-bed) ส่วนการทดลองสุดท้ายจะเป็นการทดลองหาพฤติกรรมการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมซึ่งได้จากการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซออกซิเจนในอัตราส่วน 3:3:4 การทดลองส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อหาช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับควบคุมวาล์วจ่ายก๊าซและวาล์วฟื้นฟูน้ำและถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับใช้ออกแบบระบบควบคุมการดักจับก๊าซที่ใช้หลักการดักจับก๊าซแบบสลับความดัน ซึ่งจะใช้วิธีการทดลอง แบบ เบดนิ่งหรือเบดอยู่กั๊บที่และเทคนิคการดูดซับแบบสลับความดัน (PSA)

จากผลการทดลองพบว่าสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์ คือ ที่ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14 เป็นสภาวะเงื่อนไขที่น้ำและถ่านกัมมันต์ สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดภายใต้ขอบเขตการทดลอง โดยกระบวนการแยกก๊าซที่เกิดขึ้นในส่วนของน้ำจะเป็นการดูดซึมทางเคมีส่วนถ่านกัมมันต์จะมีการดูดซับทั้งแบบเคมีและแบบกายภาพ

จากข้อมูลผลการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่าความดันของก๊าซ

เท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 14 มาวิเคราะห์และนำมาสร้างกราฟเบรคทูล์จ์ของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าน้ำถึง 4.532 เท่าหรือ 0.763 mg ต่อน้ำหนักของน้ำและถ่านกัมมันต์ 1 กรัม แต่หากนำน้ำและถ่านกัมมันต์มาดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกันจะช่วยให้สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มสูงขึ้นจากเดิมถึง 0.21% ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ 99.37% ของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยเข้าสู่ชุดดักจับก๊าซ ณ เวลานั้นและยังทำให้ทราบว่าที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1894.86 mg ชุดดักจับก๊าซสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า 80 % เป็นระยะเวลา 26 นาที หลังจากเริ่มทดลอง

จากการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำและถ่านกัมมันต์หลังฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคลดความดัน พบว่าน้ำสามารถใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียง 1 ครั้ง รวมค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่เริ่มทดลองจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวที่ขอบเขตงานวิจัยยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 1,524.3 mg ส่วนถ่านกัมมันต์สามารถใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 3 ครั้งจึงจะทำให้ค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดต่ำกว่าเกณฑ์ที่ขอบเขตงานวิจัยกำหนด รวมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้ทั้งหมดเท่ากับ 68,205.1 mg ซึ่งจากการทดลองฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ยังพบอีกว่าการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคลดความดัน สามารถฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ได้สูงสุดเท่ากับ 28.92% และ 106.16% เรียงตามลำดับ

จากผลการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสม พบว่าชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้น้ำปริมาตร $7,000 \text{ cm}^3$ และถ่านกัมมันต์ปริมาตร $4,000 \text{ cm}^3$ เป็นตัวดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมได้แต่ในส่วนการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคลดความดันให้เหลือ -1.02 bar และ 0 bar ไม่เหมาะที่จะใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพน้ำ ส่วนถ่านกัมมันต์หากจะใช้วิธีดังกล่าวควรมีระบบอื่นๆเพิ่มเติมอีกเพื่อให้สามารถฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ได้ดียิ่งขึ้น ส่วนระยะเวลาการปิดวาล์วจ่ายก๊าซและเปิดวาล์วฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์พบว่าหากใช้กับก๊าซผสมที่มีค่าอัตราความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่เท่ากับหรือต่ำกว่า 580.1 mg และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมากกว่าหรือเท่ากับ 212.9 mg ต่อปริมาตรก๊าซ 1000 cm^3 ควรทำการปิดวาล์วจ่ายก๊าซและเปิดวาล์วฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ในช่วง นาทีที่ 46-67, 29-63 และ 25-49 ตามจำนวนรอบในการดักจับก๊าซครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับเพื่อลดการสูญเสียก๊าซมีเทนในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ได้ทราบว่าน้ำและถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยในการออกแบบชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้น้ำและถ่านกัมมันต์เป็นตัวดักจับก๊าซนั้นสิ่งที่ควรคำนึงถึงมากเป็นลำดับต้นๆในการออกแบบ คือ ค่าความดันของก๊าซและค่า pH ของน้ำ เพราะค่าทั้งสองนี้เป็นค่าตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์ โดยในส่วนของความดันควรเลือกค่าความดันที่สูงๆในการออกแบบแต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ด้วยและควรออกแบบระบบให้ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดักจับก๊าซหลัก เพราะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าน้ำส่วนน้ำนั้นควรใช้เป็นตัวปรับแต่งสภาพก๊าซเพื่อให้ น้ำและถ่านกัมมันต์ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ระยะเวลานานควรใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นพลังงานให้กับน้ำและถ่านกัมมันต์รวมกับการฟื้นฟูสภาพด้วยเทคนิคลดความดันตามแบบ PSA ยกตัวอย่างเช่น การนำถ่านกัมมันต์ไปเผาที่อุณหภูมิสูงๆหรือนำน้ำไปต้มให้ร้อนเพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเนื้อน้ำและถ่านกัมมันต์ เพราะกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์จะทำให้เกิดพันธะทางเคมีซึ่งจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะสูงมากดังนั้นการฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีสลับความดันซึ่งเป็นการฟื้นฟูสภาพทางกายภาพเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์ได้ปริมาณมากพอ ส่วนตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลต่อค่าการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและถ่านกัมมันต์มีหลายอย่างเช่น อัตราการไหลของก๊าซ ปริมาณน้ำและถ่านกัมมันต์ และระยะเวลาในการเปิดปิดวาล์วสำหรับจ่ายหรือฟื้นฟูสภาพน้ำและถ่านกัมมันต์หากใช้เทคนิคดักจับก๊าซแบบสลับความดัน (PSA) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะเป็นส่วนประกอบเสริมที่ควรให้ความสำคัญด้วยเช่นกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

-เพื่อให้ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นระยะเวลานานควรใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยการเปลี่ยนถ่ายน้ำหรือนำน้ำไปกระตุ้นด้วยพลังงานเพื่อทำลายพันธะเคมีที่เกิดจากการดูดซับก๊าซแทนการฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยวิธีการลดความดันเพียงอย่างเดียว เพราะการฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยเทคนิคลดความดันนั้นสามารถฟื้นฟูสภาพน้ำและไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำได้น้อยมาก

-เพื่อลดการสูญเสียก๊าซมีเทนให้สูญเสียน้อยที่สุดควรตั้งเวลาควบคุมการเปิดปิดวาล์วของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสองหน่วยให้ทำงานในช่วงเวลาที่กำหนดหลังจากปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบ

-ควรมีระบบหมุนเวียนน้ำเข้าและนำน้ำออกจากระบบเพื่อนำน้ำส่วนที่ผ่านการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปฟื้นฟูสภาพเพื่อให้น้ำคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมอยู่ออก

-ควรควบคุมค่า pH ของน้ำหลังการฟื้นฟูสภาพให้มี ค่า pH เท่ากับ 14 เพื่อให้สามารถดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณมากๆ

-เพื่อลดการสูญเสียก๊าซมีเทนที่ละลายหรือถูกดูดซับทั้งจากน้ำและถ่านกัมมันต์ควรเพิ่มหอพักและคัดแยกก๊าซเสียอีก 1 หอเพื่อนำก๊าซมีเทนที่สูญเสียไปกับน้ำและถ่านกัมมันต์กลับเข้าสู่ระบบ

-เพื่อให้ชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถตามที่กล่าวมาข้างต้นควรรีใช้กับก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นไม่เกิน 95.7 % ของความเข้มข้นทั้งหมดในปริมาตรก๊าซ 1,000 cm³

เอกสารอ้างอิง

- [1] Akzu,Z. (2001). Biosorption of reactive dyes by dried activate sludge:equilibrium and kinetic modeling.Biochem.Eng.J.7:79-84.
- [2] Cheng-Hsiu Yu, Chih-Huang,Chung-Sung Tan. (2012). A Review of co₂ capture by absorption and adsorption. Aerosol and air quality reseach 12:745-769.
- [3] C. Ofori Boateng and E.M.Kwofie. (2009). Water Scrubbing: A Better option for Biogas Purification for Effective Storage. Malaysia: Penang.
- [4] E. Ryckebosch,M. Drouillon and H. Vervaeren. (2011). Techniques for transformation of biogas to biogas to biomethane. Research group Enbichem, Belgium.
- [5] Isabel A.A.C.Esteves,Marta S.S. Lopes, pedro M.C.Nunes,Jose P.B. Mota. (2008). Adsorption of natural gas and biogas components on activated carbon.Caparica,Portugal.
- [6] Margareta Persson. (2003). Evaluation of upgrading technicques for biogas. Technical University of Lund, Sweden.
- [7] Pao-Chi Chen. (2012). Absorption of carbon dioxide in a bubble-columm scrubber. Intech, Taiwan.
- [8] Weeranuch Lang,Chomawan Dejma,Sarote Sirisansaneeyakul and Nobuo sakairi. (2009). Kinetic Modeling of Nonylphenol Biosorption and Desorption by Immobilized Non-living Fungal Mycelium grown in Chitosan Beads.M.E.Thesis,Kasetsart University.
- [9] William S. Janna. (1993). Introduction to fluid mechanics. 3rd Ed. International Thomsan Publishing, PWS Publishing Company.
- [10] กมล จันทร์วงศ์. (2553). เทคโนโลยีเมมเบรน (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: <http://www.toprich.co.th/th/knowledge/the-features-of-membrane/>
[6 พฤษภาคม 2556].
- [11] กรมควบคุมมลพิษ. (2552). การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm
[1 มิถุนายน 2555].

- [12] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2552). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้งานก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [13] กวีวรรณ รัตนโกสม. (2555). ศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [14] คุณสมบัติท่อทองแดง แบบ K M และ L. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: http://www.engineeringtoolbox.com/copper-tubes-dimensions-pressured_84.html
[3 มกราคม 2557]
- [15] จิราภรณ์ วงศ์สุวรรณ. (2556). การดูดซึมทางเคมี. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: http://www.kasetpibul.net/lms/claroline/backends/download.php?url=L3BhcnQ0X0Fic29ycHRpb24tNl9zbGlkZXMtLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=AFE323_002e.
[6 พฤษภาคม 2556].
- [16] เดชา นัตรีศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] นิตยา มหาผล. (2550). ฝนกรด. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนเล่มที่ 15 . กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์หอรัษฎากรพิพัฒน์.
- [18] บุญรักษ์ กาจนวราวิชย์. (2552). ถ่านปลุกฤทธิ์. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: <http://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/552->
[1 มิถุนายน 2555].
- [19] ปกีส ชนะโรค, กงจักร ลมวิชัย, รัตนวรรณ เกียรติโกมลและวีรัชย์ ออาจหาญ. (2555). การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดัน. รายงานประชุมทางวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ณ จังหวัดเชียงใหม่. 23 – 24 กุมภาพันธ์ 2555.
- [20] ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, นัตรีชัย ลากรังสิรัตน์. (2550). คู่มืองานท่อ Piping quick reference. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [21] วิกีพีเดีย. (สารานุกรมเสรี) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์>
[3 สิงหาคม 2556].
- [22] วิกีพีเดีย. (สารานุกรมเสรี) ก๊าซมีเทน. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซมีเทน>.

[3 สิงหาคม 2556].

- [23] วิกีพีเดีย. (สารานุกรมเสรี) ชีลิกาเจล. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/ชีลิกอนไดออกไซด์>

[6 พฤษภาคม 2556]

- [24] วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล. (2550). กลศาสตร์การเปลี่ยนรูปวัสดุ. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์. กรุงเทพฯ.

- [25] ศิรินุช ลอยหา. (2556). ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์. (ว.วิทย์.มข.41) 1:56-66.

- [26] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). (2542). การใช้รถยนต์ไฮโดรเจน โดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน. (ออนไลน์). สืบค้นได้จาก: http://ornl.gov/info/ornlreview/v38_1_05/article06.shtml

[1 มิถุนายน 2555].

- [27] สมชาย ดารารัตน์. (2555). การพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซเรือนกระจก. (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://biomethanation.blogspot.com/2012/03/asbr-1-2-1-10-1-0.html>

[1 มิถุนายน 2555]

ภาคผนวก

รายละเอียดเนื้อหา

-ภาคผนวก ก กราฟผลการทดลอง

-ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดลองและการคำนวณ

-ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง

-ภาคผนวก ง การคำนวณออกแบบเบื้องต้น

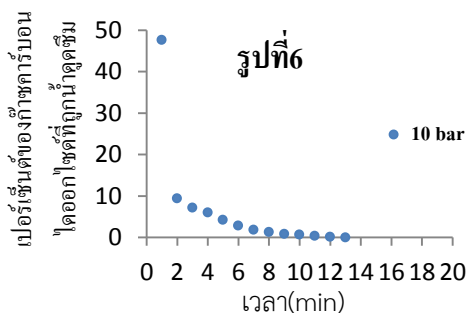
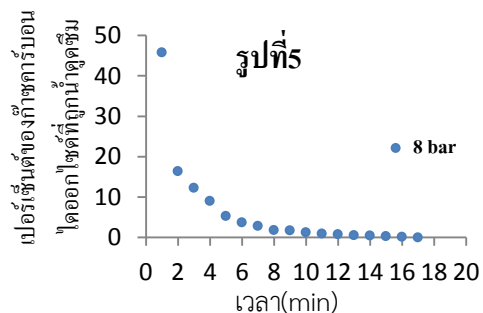
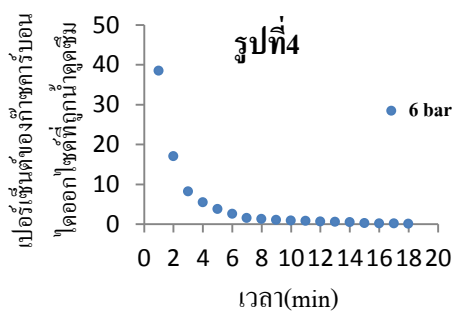
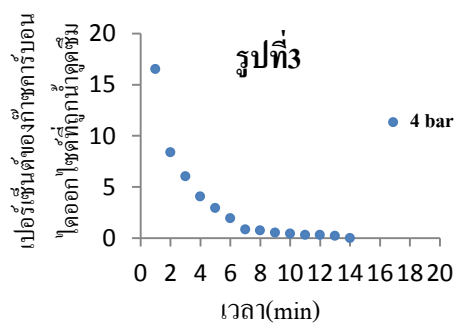
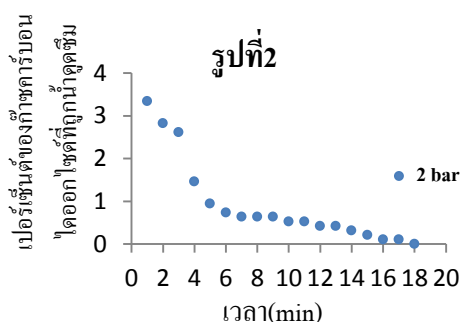
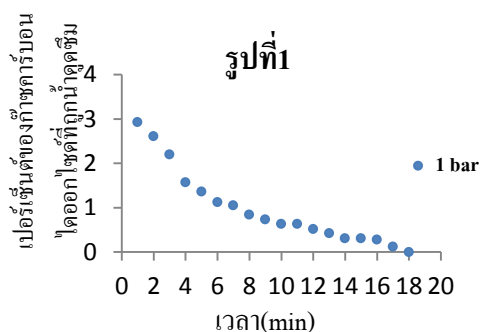
-ภาคผนวก จ รูปชุดคัทจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รูปการทดลองและประวัติผู้จัดทำรายงาน
วิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ก
กราฟผลการทดลอง

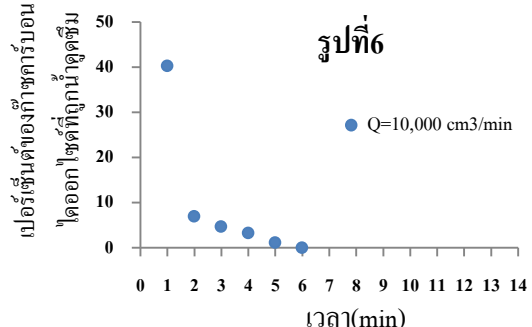
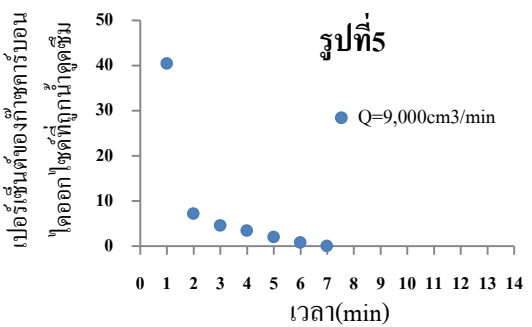
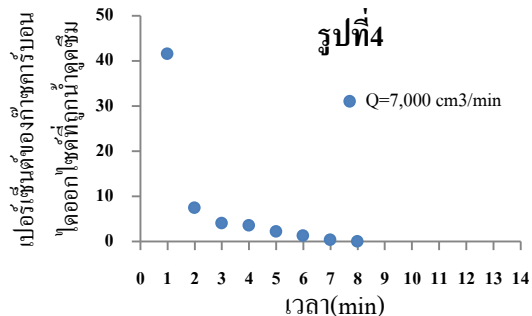
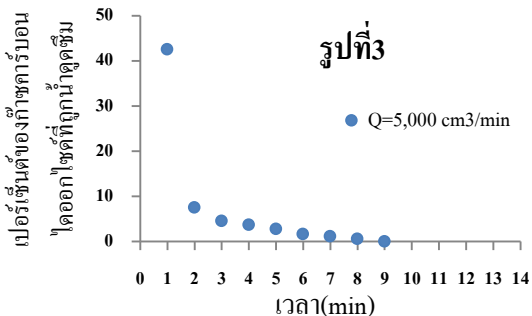
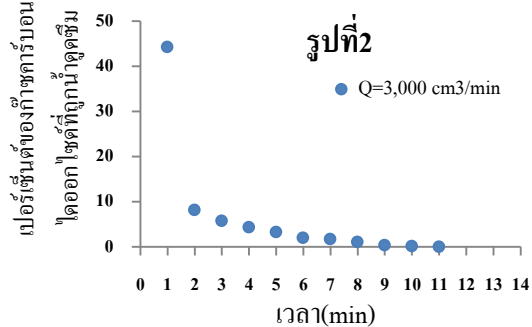
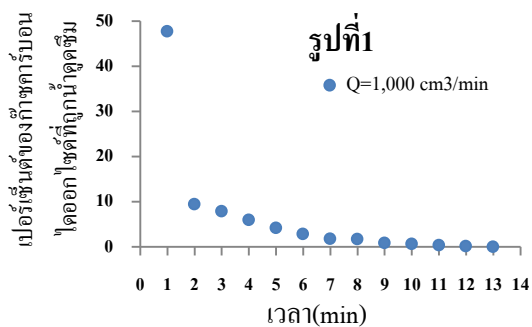
กราฟผลการทดลอง

1. ผลการทดลองหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการดักจับก๊าซ

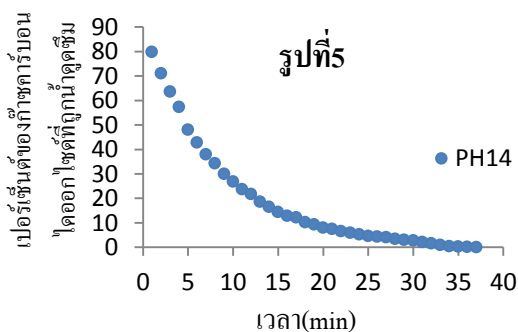
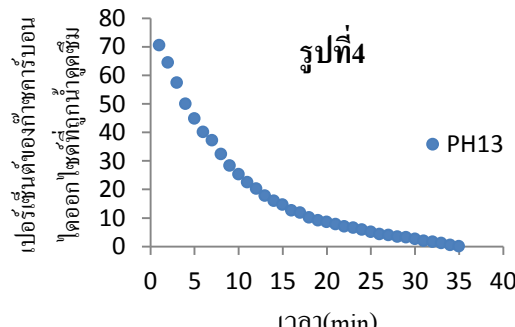
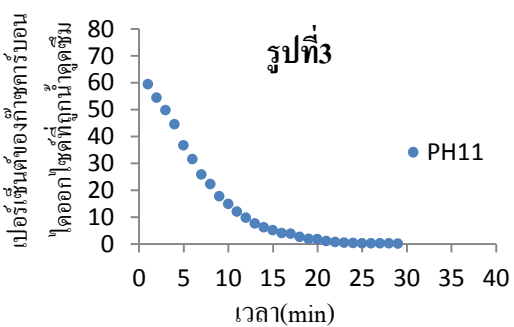
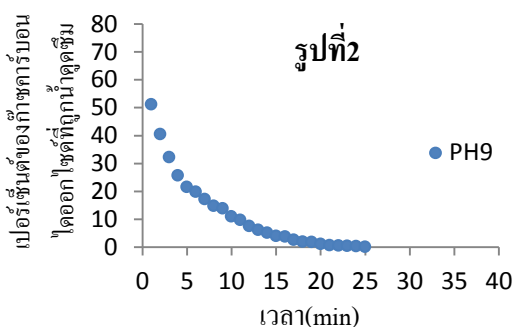
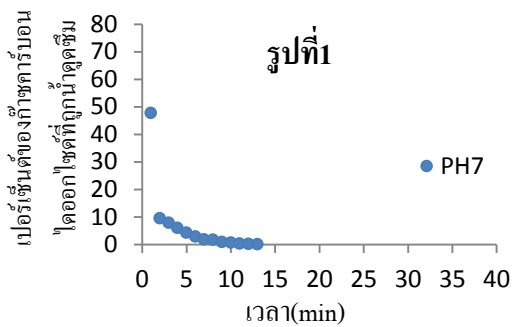
กราฟ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกน้ำดูดซึมและเวลาที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7



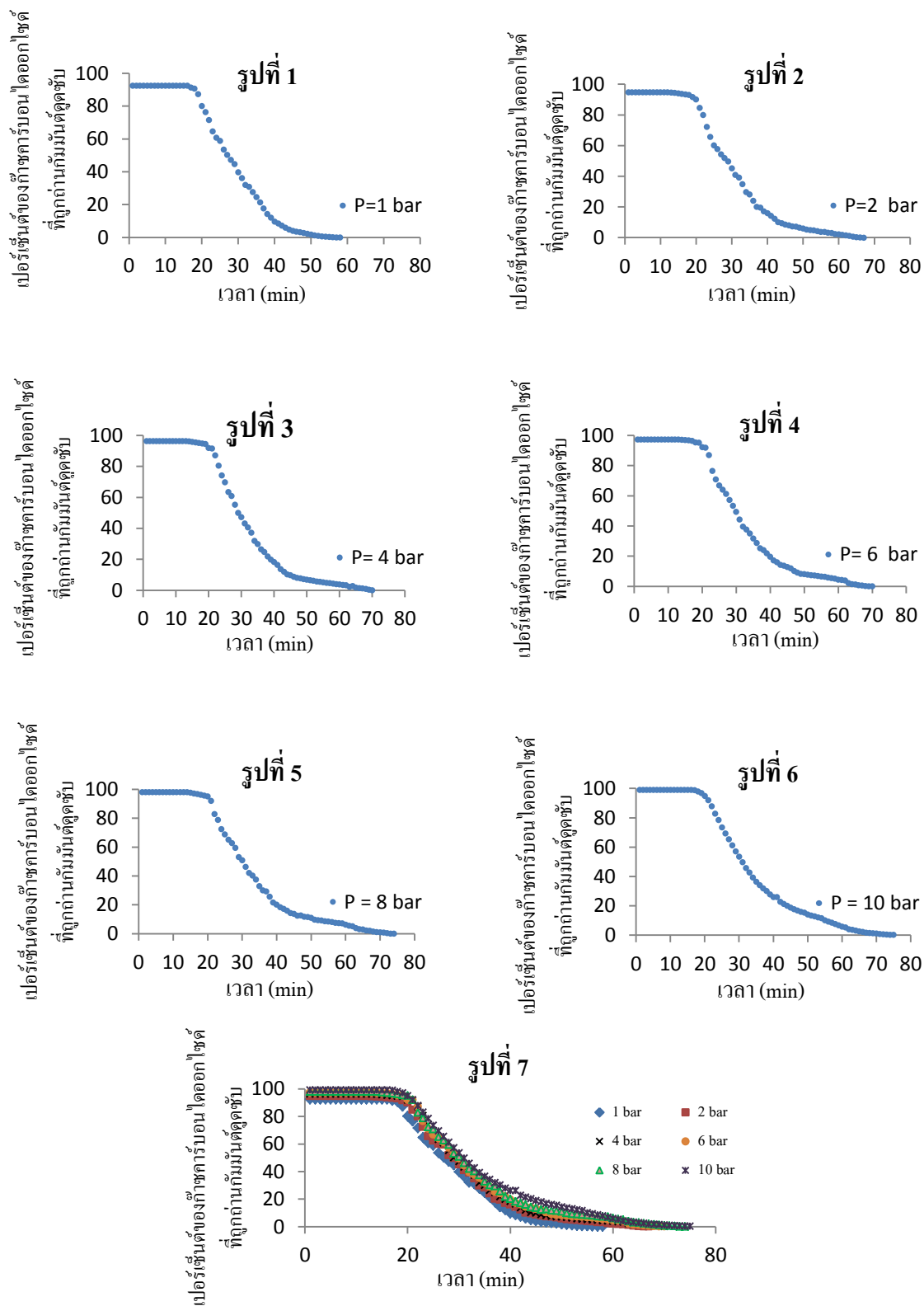
กราฟ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไดออกไซด์ที่ถูกน้ำดูดซึมและเวลา ที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7



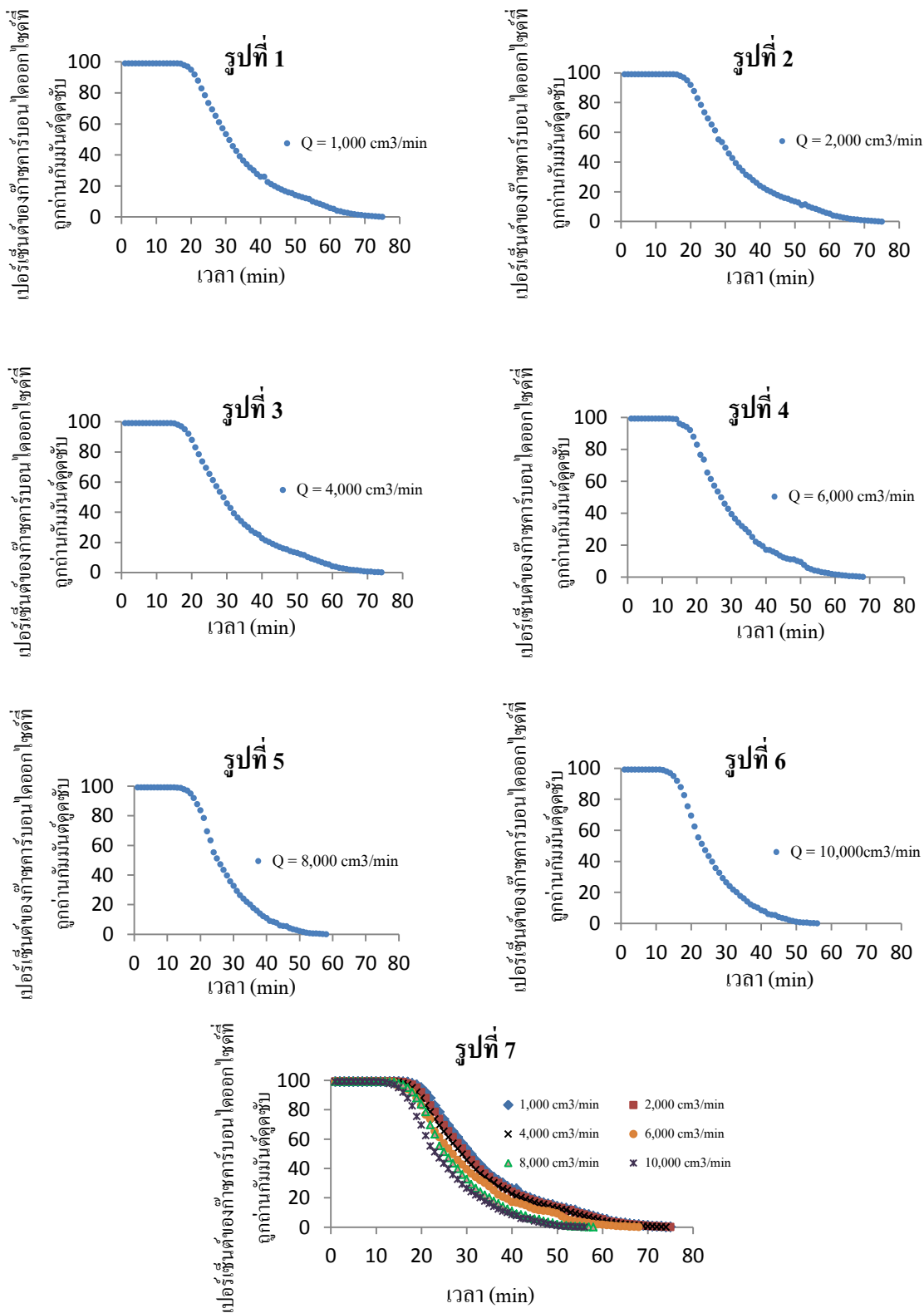
กราฟ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกน้ำดูดซึมและเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และค่าความดันของก๊าซเท่า 10 bar



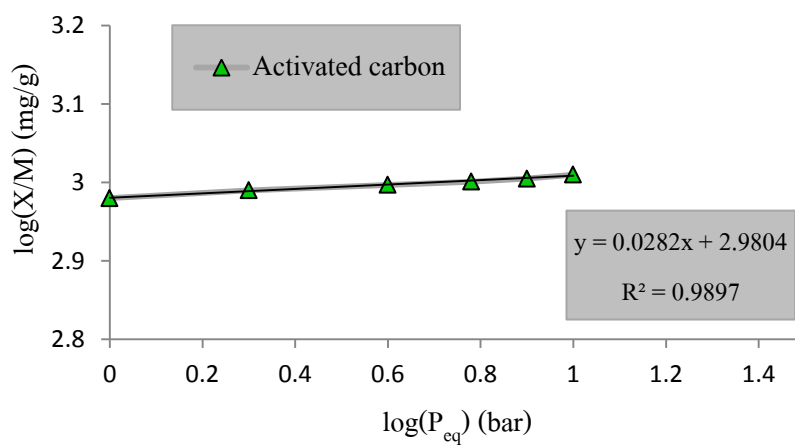
กราฟ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และเวลาที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min



กราฟ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไดออกไซด์โดยปริมาตรของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์และเวลาที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar

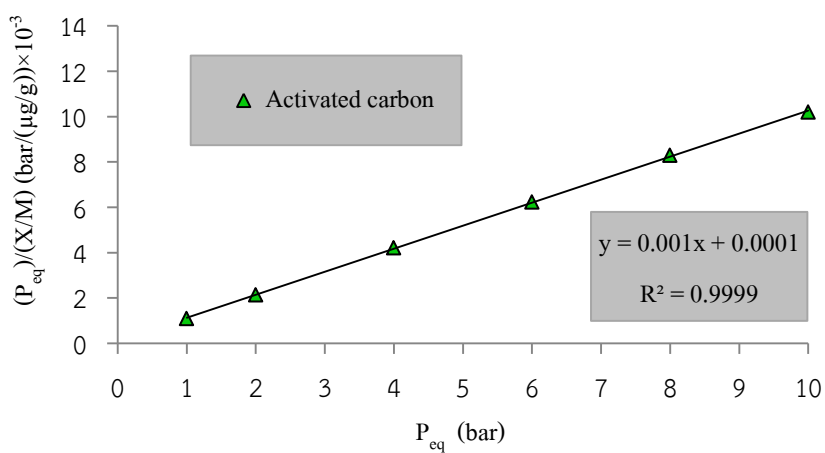


Freundlich Isotherm

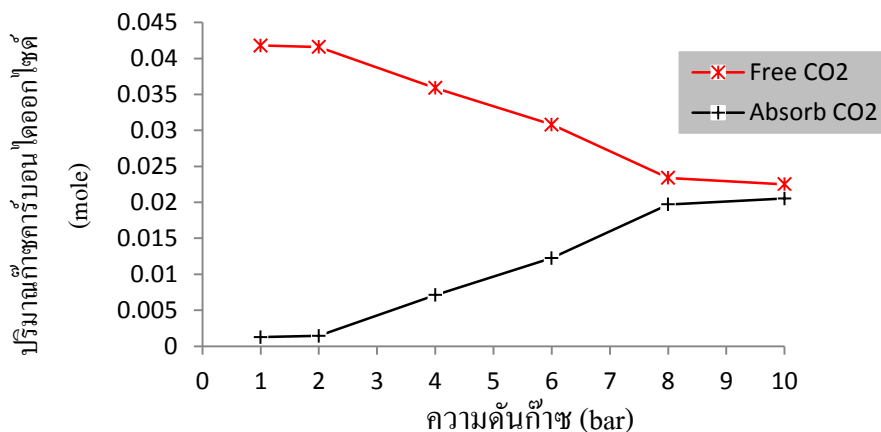


กราฟ ก.6 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช

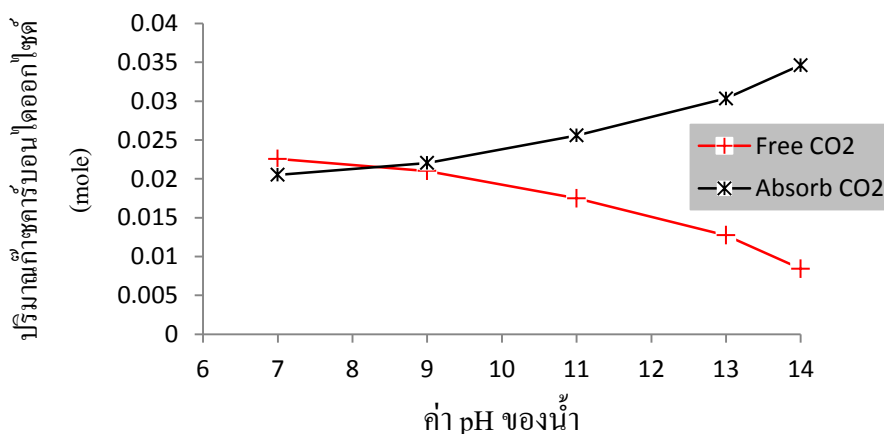
Langmuir Isotherm



กราฟ ก.7 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงมัวร์



กราฟ ก.8 แสดงปริมาณ Free CO₂ และ ปริมาณ CO₂ ที่ถูกดูดซึม ณ ค่าความดันของก๊าซค่าต่างๆที่ อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min

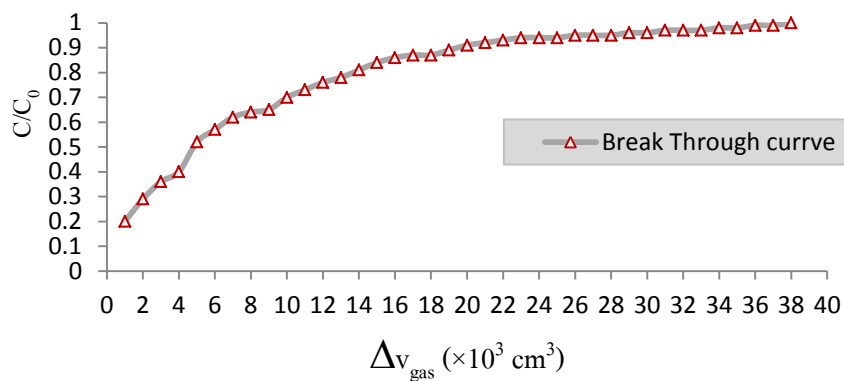


กราฟ ก.9 แสดงปริมาณ Free CO₂ และ ปริมาณ CO₂ ที่ถูกดูดซึมที่ค่า pH ของน้ำต่างๆ ณ ความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลเท่ากับ 1,000 cm³/min

2.ผลการทดลองหากราฟเบรคทรูจ์ของชุดดักจับก๊าซ

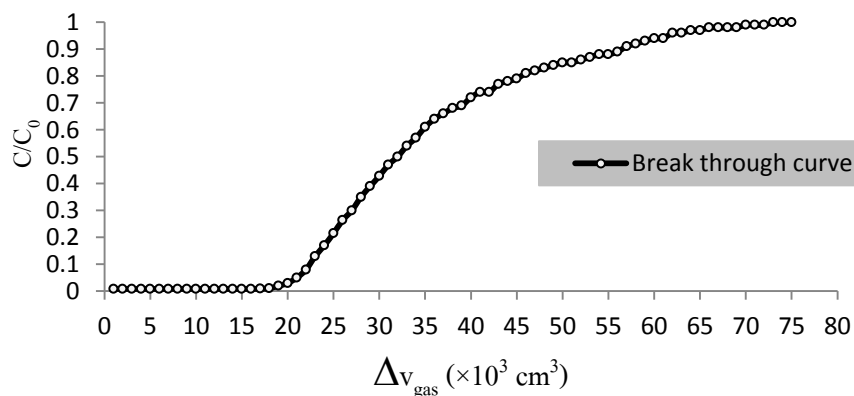
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก ต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) และเวลา ที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min

น้ำ

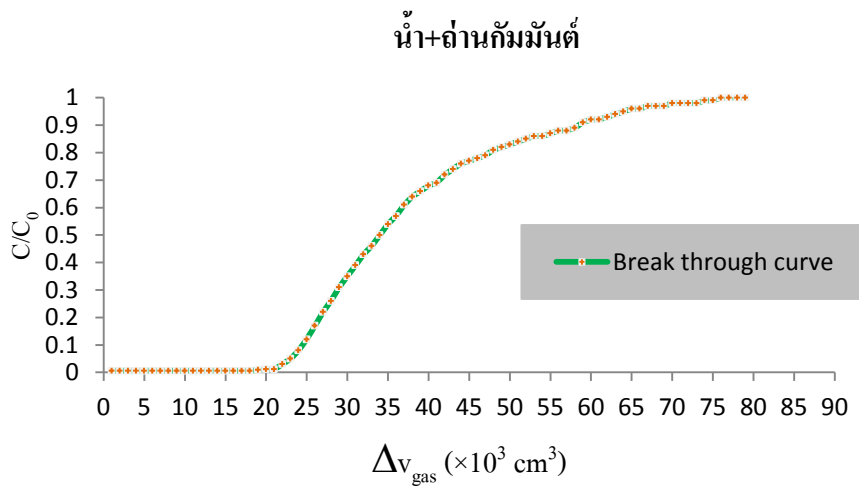


กราฟ ก.10 เบรคทรูจ์ของน้ำ pH 14 ปริมาตร 7,000 cm^3

ถ่านกัมมันต์



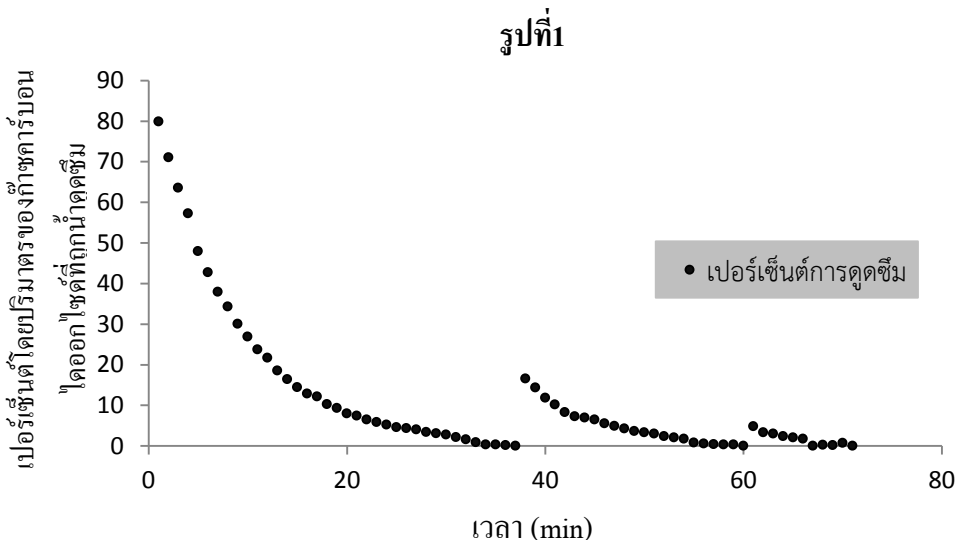
กราฟ ก.11 เบรคทรูจ์ของถ่านกัมมันต์ ปริมาตร 4,000 cm^3



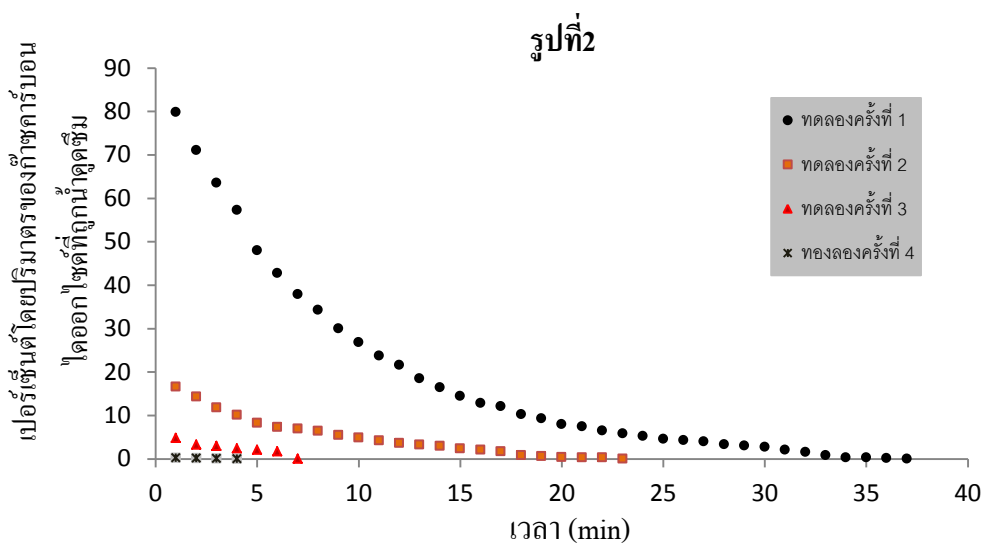
กราฟ ก.12 เบรคทรูจ์ของน้ำ pH 14 ปริมาตร 7,000 cm³ และถ่านกัมมันต์ ปริมาตร 4,000 cm³

3.ผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพตัวดักจับก๊าซ

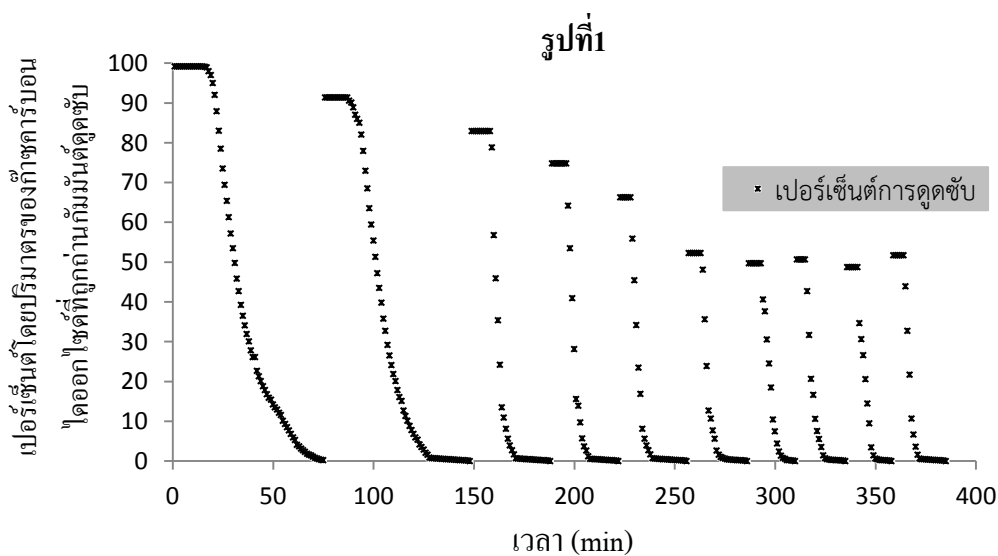
แสดงกราฟผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังฟื้นฟูสภาพวัสดุดักจับก๊าซภายใต้ความดันของก๊าซช่วงคูชัมเท่ากับ 10 bar และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min และความดันช่วงฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0 bar สำหรับน้ำและ -1.02 bar สำหรับช่วงฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดใช้ระยะเวลาฟื้นฟูสภาพครั้งละ 30 นาที



กราฟ ก.13 ผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพของน้ำ (ก)

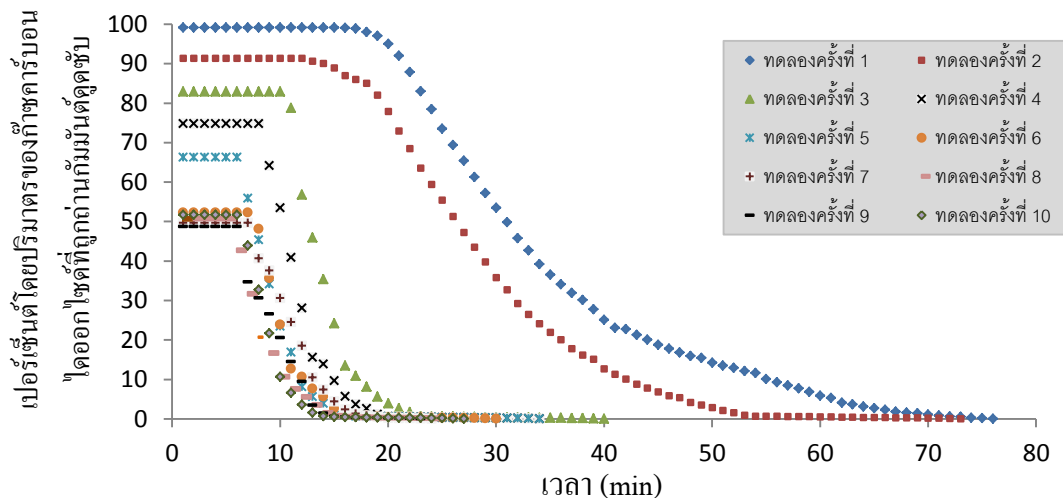


กราฟ ก.13 ผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพของน้ำ (จ)



กราฟ ก.14 ผลการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (ก)

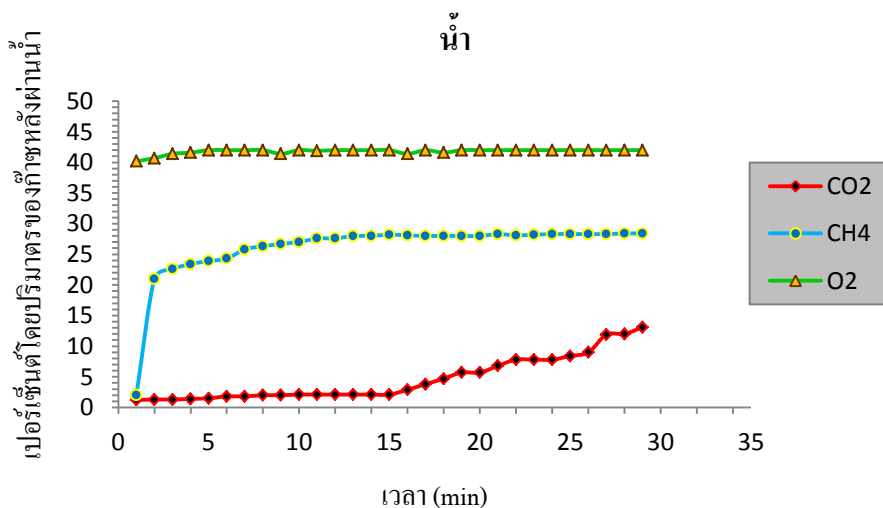
รูปที่ 2



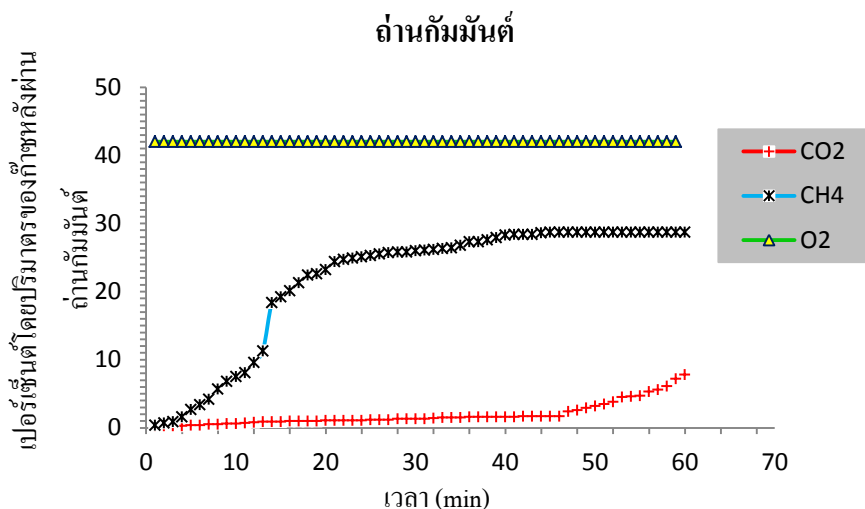
กราฟ ก.14 ผลการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (ข)

4. การทดลองพฤติกรรมการดูดซับและดูดซึมก๊าซผสมของชุดดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

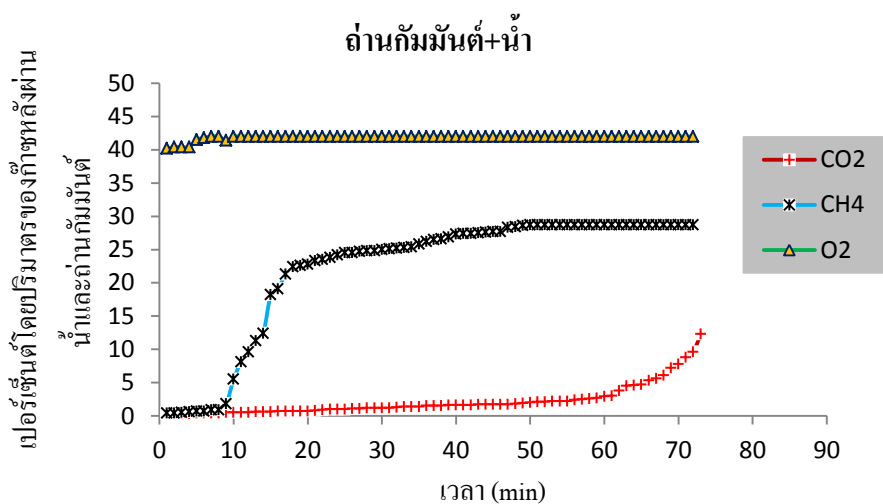
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซชนิดต่างๆ ที่วัดได้หลังผ่านชุดดักจับก๊าซและเวลาที่ ค่าความดันของก๊าซเท่ากับ 10 bar อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1,000 cm³/min



กราฟ ก.15 ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำที่มีค่า pH เท่ากับ 14 มีปริมาตร 7,000 cm³

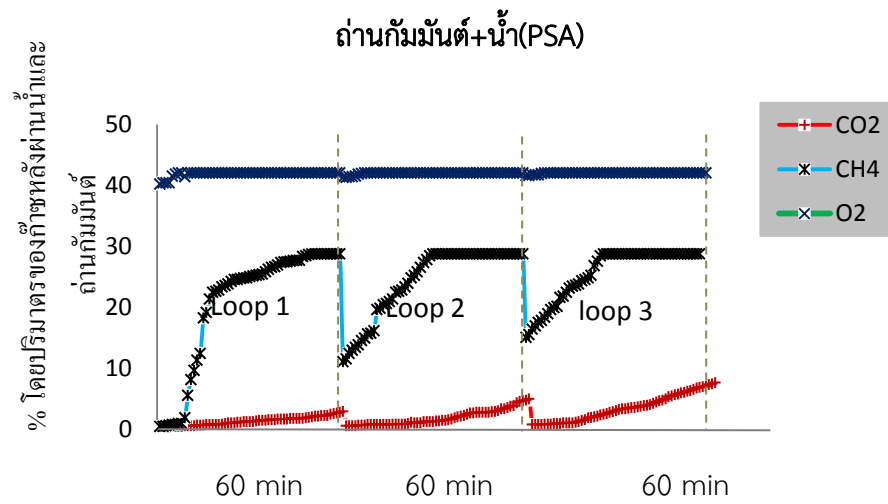


กราฟ ก.16 ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของถ่านกัมมันต์มีปริมาตร $4,000 \text{ cm}^3$



กราฟ ก.17 ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซับและดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำและถ่านกัมมันต์

แสดงกราฟผลการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังฟื้นฟูสภาพวัสดุด้วยก๊าซภายใต้ความดันของก๊าซช่วงดูดซับเท่ากับ 10 bar และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ $1,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ และความดันช่วงฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0 bar สำหรับน้ำและ -1.02 bar สำหรับช่วงฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดใช้ระยะเวลาฟื้นฟูสภาพครั้งละ 30 นาที



กราฟ ก.18 ผลการทดลองพฤติกรรมการดูดซับและดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมของน้ำและถ่านกัมมันต์