

# การเร่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กโดยการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์

วีระยุทธ รักษาศักดิ์<sup>1,a</sup>, ยศสรล พิเชียรสุนทร<sup>2</sup>, บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล<sup>1</sup>, ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา<sup>3</sup>, และ ประเสริฐ ภวสันต์<sup>2,b,\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10400

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

<sup>3</sup>วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

E-mail: ballweerayut@gmail.com<sup>a</sup>, prasert.p@chula.ac.th<sup>b,\*</sup>

## บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนอินทรีย์สำหรับเร่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น พีเอช พื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับของเหลวกับก๊าซ และอัตราการป้อนก๊าซ โดยเมื่อใช้หลอดซีเมนขนาด 1 เมตรที่มีวัสดุแพ็คอยู่ใน พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพีเอช ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะมีค่าสูงขึ้น โดยพีเอชที่ให้ค่าประสิทธิภาพการละลายสูงสุดคือ 10 การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยใช้วัสดุแพ็ค ทำให้ประสิทธิภาพของการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้ดีขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์แม้ว่าจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายได้มากขึ้น แต่ทำให้ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง สำหรับระบบการหมุนเวียนน้ำกลับ ถูกออกแบบให้มีการไหลของก๊าซและของเหลวแบบสวนทางกันเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสและการผสมที่ดีขึ้น ซึ่งระบบนี้ให้ค่าประสิทธิภาพการละลายสูงและคงที่ในช่วง 31 – 40% มีอัตราการไหลวนของเหลวที่เหมาะสมที่ 1 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที นอกจากนี้เมื่อนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บในรูปแบบของไบคาร์บอเนตไปทดสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว *Chlorella vulgaris* พบว่าเซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุดและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะใกล้เคียงกับการเพาะเลี้ยงโดยใช้สารละลายซีเดียมไบคาร์บอเนต

## คำสืบค้น

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ, ระบบการหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อทำให้เกิดการสัมผัสมวล, การเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์

# ACCELERATING MICROALGAL GROWTH WITH CO<sub>2</sub> TRANSFORMATION

Weerayut Raksasak<sup>1,a</sup>, Yossaran Pichiansoontorn<sup>2</sup>, Bunyarit Panyapinyopol<sup>1</sup>, Pomthong Malakul<sup>3</sup>, and Prasert Pavasant<sup>2,b,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Sanitary Engineering, Faculty of Public Health, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>3</sup>Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: ballweerayut@gmail.com<sup>a</sup>, supersert@gmail.com<sup>b,\*</sup>

## ABSTRACT

The capture of carbon dioxide in water as inorganic carbon source for microalgal growth was carried out where the effects of pH, gas-liquid contacting area and gas flowrate on dissolved Total Inorganic Carbon (TIC) concentration were examined. The experiments were conducted in 1 m high bubble column and packed column. From the findings, an increase in pH could lead to a greater dissolution of CO<sub>2</sub> and high %CO<sub>2</sub> dissolution efficiency at pH 10. Adding gas-liquid contact area and gas hold up ( $\varepsilon_g$ ) caused a greater dissolution of CO<sub>2</sub>. At high CO<sub>2</sub> flowrate, CO<sub>2</sub> did not have enough contact time with the solution and wastefully released to the atmosphere and this led to low dissolution efficiency. The design of the "Circulating Counterflow Contactor" or C.C.C. system was employed where the liquid and gas were counter-flowed to enhance the contact time and better mixing. The C.C.C. offered a relatively high CO<sub>2</sub> dissolution efficiency in the range of 31 – 40% at the liquid flow rate of 1 L·min<sup>-1</sup> and gas flow rate at 10 cc·min<sup>-1</sup>. Additionally, the carbon dioxide storage in a bicarbonate form was tested for the cultivation of microalgae growth where CO<sub>2</sub>-rich solution from C.C.C. system was employed to cultivate *C. vulgaris*. The results illustrated that this solution provided similar growth character to that of synthetic solution with the addition of NaHCO<sub>3</sub>.

## KEYWORDS

Carbon dioxide capture, circulating counterflow contactor, carbon dioxide transformation.

# I. บทนำ

ภาวะโลกร้อนเกิดจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกในช่วงศตวรรษที่ 21 อยู่ในช่วง 1.4 – 5.8 องศาเซลเซียส [1] โดยก๊าซเรือนกระจกที่มีการปลดปล่อยมากคือคาร์บอนไดออกไซด์ อันเป็นสารประกอบของคาร์บอนและออกซิเจนที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต เช่น การหายใจ การคมนาคม การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เป็นต้น และจากการที่ภาวะเรือนกระจกมีความรุนแรงมากขึ้น ทำให้เกิดความพยายามในการลดและดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีด้วยกัน 4 วิธี [2] คือ

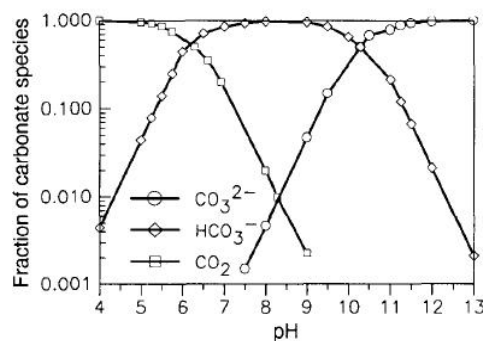
1. การดูดซับทางเคมีโดยอาศัยตัวทำละลาย ซึ่งมักจะใช้ในโรงไฟฟ้า โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับสารตัวทำละลาย สารตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ Monoethanolamine (MEA), Diethanolamine, และ Potassium carbonate เป็นต้น ใช้พลังงานประมาณ 330 – 340 กิโลวัตต์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะถูกปลดปล่อยออกจากตัวทำละลายเหล่านี้ด้วยความร้อน
2. การดูดซับโดยการแยกโดยใช้เมมเบรน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านเยื่อเมมเบรนที่เป็นสารโพลีเมอร์ ซึ่งสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าได้ประมาณ 82 – 88% ของก๊าซที่ปล่อยจากปลายปล่อง ใช้พลังงานประมาณ 70 – 75 กิโลวัตต์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานน้อย
3. การแยกโดยกระบวนการ Cryogenics ซึ่งสามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซอื่นๆ โดยอาศัยความดันและอุณหภูมิ โดยจะทำให้เกิดการลดอุณหภูมิลงเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นกลายเป็นของเหลว ใช้พลังงานประมาณ 600 – 660 กิโลวัตต์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์
4. การดูดซับโดยวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เช่น ซีโอไลต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น โดยวิธีการนี้มีการใช้สำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าได้ 85 – 90% ของก๊าซที่ปล่อยจากปลายปล่อง ใช้พลังงานประมาณ 160 – 180 กิโลวัตต์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับไว้ได้นี้สามารถนำไปกักเก็บได้หลายวิธี เช่น การอัดคาร์บอนไดออกไซด์ลงในช่องว่างหรือหลุมที่มีการขุดเจาะน้ำมันขึ้นมา [2] กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งคือการกักเก็บในรูปของชีวมวล โดยอาศัยกลไกการสังเคราะห์แสงของพืช เช่น การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งเท่ากับเป็นการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์กลับไปเป็นชีวมวลผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ชีวมวลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้โดยการนำไปใช้เป็นอาหารหรือพลังงาน เช่น *Chlorella sp.* สามารถนำมาผลิตเป็นอาหารสัตว์และยา ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่รวดเร็วกว่าพืชบก เช่น *Pseudochoricystis ellipsoidae* สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าพืชบก 10 เท่า [3]

อย่างไรก็ตาม การให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปากปล่องของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลลงในสารอาหารที่เพาะเลี้ยงโดยตรง จะให้อัตราการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เร็วกว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายค่อนข้างมาก คาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่จึงถูกปลดปล่อยออกไปกับก๊าซที่ผิวน้ำ จึงเป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพในแง่ของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นกระบวนการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาเพาะเลี้ยงสาหร่ายจึงควรประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนย่อย คือ ขั้นตอนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และขั้นตอนการนำสารละลายที่ได้มาเพาะเลี้ยงสาหร่าย

ขั้นตอนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำเป็นกระบวนการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปก๊าซลงในของเหลวที่เป็นน้ำ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้อยู่ในหลายรูปแบบ เช่น รูปของกรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) และคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ขึ้นอยู่กับระบบพีเอชของน้ำ รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าที่พีเอชต่ำกว่า 5 คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ และที่พีเอชระหว่าง 5 – 7 จะละลายน้ำในรูปของไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) และที่พีเอชมากกว่า 8 ขึ้นไป จะละลายน้ำในรูปของคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) [4] ซึ่งประสิทธิภาพของการละลายขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว โดยส่วนใหญ่แล้วหากมีระยะเวลาการสัมผัสกันน้อย ก๊าซไม่สามารถละลายได้หมด ทำให้ประสิทธิภาพของการละลายต่ำมาก

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษากระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเอาน้ำที่มีการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบที่ทำการทดลองไปใช้ประโยชน์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อไป



รูปที่ 1

ชนิดของสารประกอบคาร์บอนที่พีเอชต่าง ๆ [4]

## II. อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

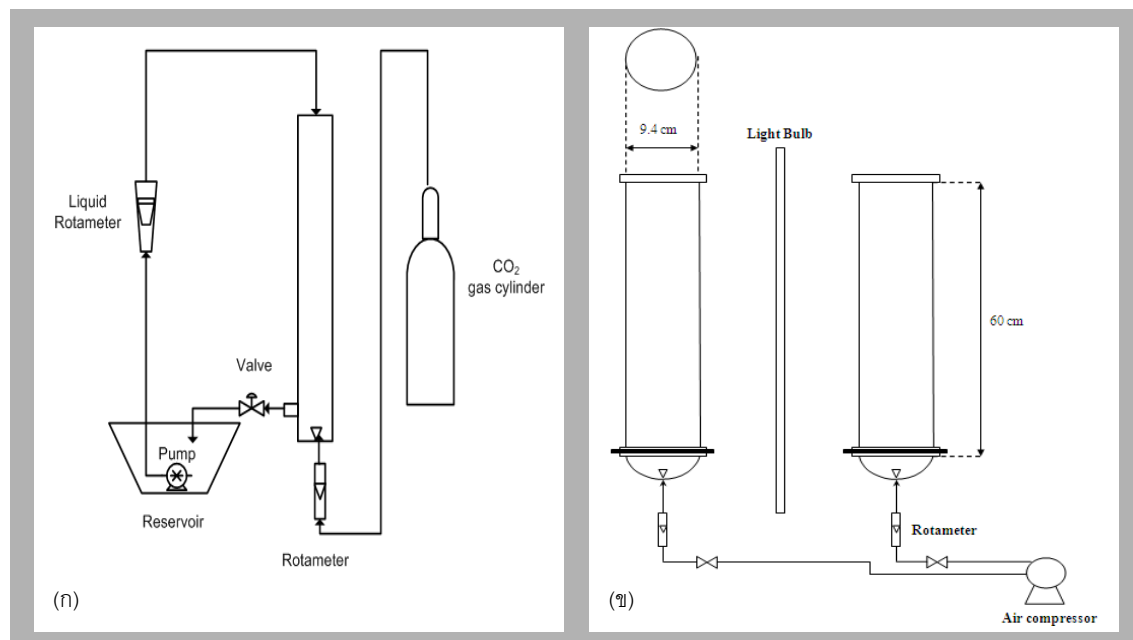
การศึกษาค้นคว้านี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของสารคาร์บอนอนินทรีย์แบบต่าง ๆ ที่ละลายน้ำ เช่น  $\text{HCO}_3^-$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  โดยศึกษาผลของระดับพีเอช (6, 8, 10) พื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว และอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่ระบบ (10 – 40 มิลลิลิตรต่อนาที) โดยทำการทดลองในคอลัมน์เป่าอากาศธรรมดา (Bubble column) และคอลัมน์แบบมีวัสดุแพ็ค (Packed column) ที่ความสูง 1 เมตร ใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากแร่ธาตุจำนวน 5 ลิตรที่ปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ เพื่อให้ได้พีเอชตามต้องการ จะมีการปรับพีเอชทุก ๆ 15 นาที เพื่อรักษาระดับพีเอชตามที่กำหนดในแต่ละการศึกษา จากนั้นทำการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตรา 10 – 40 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเดินระบบแล้วทำการเก็บน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตรทุก 15 นาที เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง เพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ในน้ำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC Analyses) จากนั้นทำการออกแบบระบบที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพิ่มการหมุนเวียนของน้ำที่ผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุแพ็คแบบต่อเนื่องจากถังเก็บน้ำโดยให้ชื่อระบบว่า ระบบการหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อทำให้เกิดการสัมผัสมวล ดังรูปที่ 1 โดยทำการศึกษาในคอลัมน์ความสูง 1 เมตร มีอัตราการไหลเวียนน้ำที่ 1 – 3 ลิตรต่อนาที ที่อัตราการปล่อยก๊าซ 10 – 100 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากแร่ธาตุจำนวน 15 ลิตร และมีการควบคุม pH ให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ เมื่อเดินระบบแล้วทำการเก็บน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตรทุก 15 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ในน้ำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC Analyses) หลังจากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้ไปทำการ

เพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยใช้ปริมาณน้ำสำหรับเพาะเลี้ยง 2.8 ลิตรที่มีแสงสว่างตลอดเวลา (ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง) ดังแผนผังการดำเนินงานที่แสดงในรูปที่ 2

## รูปที่ 2

รูปแบบของระบบการทดลอง

(ก) ระบบการดักจับ CO<sub>2</sub> แบบ CCC และ (ข) ระบบการเพาะเลี้ยง *Chlorella vulgaris*



หลังจากทำการตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC Analyses) แล้วจะมีการนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบได้ดังสมการ 1

$$\text{เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ} = \frac{TIC \times V_L}{PQ_G t M_w / RT} \quad (1)$$

โดย  $TIC$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนอินทรีย์ (กรัมต่อลิตร);  $V_L$  คือ ปริมาณน้ำในคอลัมน์ (ลิตร);  $P$  คือ ความดัน (บาร์);  $Q_G$  คือ ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบ (ลิตรต่อนาที);  $t$  คือ เวลาในการเดินระบบ (นาที);  $M_w$  คือ น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล);  $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ  $0.082 \text{ bar} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตของเซลล์จำเพาะ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2

$$\mu = \frac{\ln(N_2) - \ln(N_1)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

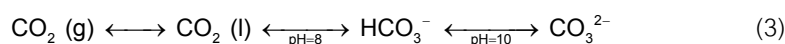
โดย  $\mu$  คือ อัตราการเจริญเติบโตของเซลล์จำเพาะ (ต่อชั่วโมง);  $N_1$  คือ ความเข้มข้นของเซลล์ที่เวลา  $t_1$  (เซลล์ต่อมิลลิลิตร);  $N_2$  = ความเข้มข้นของเซลล์ที่เวลา  $t_2$  (เซลล์ต่อมิลลิลิตร);  $t_1$  = เวลาเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 (ชั่วโมง);  $t_2$  = เวลาเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 (ชั่วโมง)

### III. ผลการศึกษา

#### 3.1 ผลของพีเอชต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์รวมในน้ำ

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงผลของระดับพีเอชและเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพการละลายของ CO<sub>2</sub> โดยเมื่อพิจารณาถึงผลของเวลาจะพบว่า ที่อัตราการป้อนก๊าซเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพการละลายมีค่าสูงสุดที่เวลา 15 นาที และมีค่าลดลงที่เวลานานขึ้น โดยระดับการละลายนี้ขึ้นกับระดับ pH ของสารละลาย ทั้งนี้สาเหตุที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุดสำหรับเหตุการณ์นี้คือ ในช่วงแรกของการดำเนินงาน ค่าความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในน้ำยังคงมีน้อย ทำให้ผลต่างความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในอากาศและในน้ำมีค่าสูง จึงเกิดแรงขับเคลื่อนในการพาให้ CO<sub>2</sub> ในเฟสของก๊าซละลายเข้าไปในของเหลวได้ค่อนข้างเร็ว หลังจากนั้นเมื่อระดับของ CO<sub>2</sub> มีค่าสูงขึ้น แรงขับเคลื่อนนี้จะมีค่าน้อยลง ทำให้ความเร็วในการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสมีค่าน้อยลงตามไปด้วย

การปรับค่าพีเอชเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเคลื่อนสมดุลไปในทิศทางที่ช่วยเพิ่มศักยภาพในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อระดับ pH เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าประสิทธิภาพการละลายของ CO<sub>2</sub> มีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก CO<sub>2</sub> ที่ละลายน้ำได้เปลี่ยนรูปไปเป็นไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนต ทำให้ผลต่างความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในเฟสก๊าซและของเหลวมีค่าคงที่มากขึ้น เพราะ CO<sub>2</sub> ที่ละลายน้ำได้เปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบตัวอื่นแล้ว ตามสมการที่ 3



เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการละลาย (สมดุลคาร์บอน)		
	พีเอช 6	พีเอช 8	พีเอช 10
15	22.26	35.83	45.28
30	20.00	23.92	33.41
45	17.98	22.91	26.76
60	16.35	20.42	23.38

ตารางที่ 1

ประสิทธิภาพของการละลาย CO<sub>2</sub> ที่มีระดับ pH ต่างๆ ที่อัตราการป้อนก๊าซ CO<sub>2</sub> 10 มิลลิลิตรต่อนาที ในคอลัมน์ที่ไม่มีแพคกิ้ง

#### 3.2 ผลของพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์รวมในน้ำ

การป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในคอลัมน์ที่มีวัสดุแพคกิ้งขนาด 1 เซนติเมตรวางขวางทางไหลของฟองก๊าซ ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการยืนยันผลของระดับ pH อีกครั้งหนึ่งว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายได้ดีที่สุดที่ pH = 10 โดยให้ประสิทธิภาพของการละลายสูงสุดเท่ากับ 51.87% ที่เวลา 15 นาที (อัตราการป้อนก๊าซเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที) ผลการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์รวมในน้ำที่พีเอช 10 จะมีความต่างกันเล็กน้อยในคอลัมน์แบบที่ให้ก๊าซโดยไม่วัสดุแพคกิ้ง (Bubble column) และคอลัมน์แบบมีวัสดุ (Packed column) โดยประสิทธิภาพของการละลายทั้งสองระบบที่ 15 นาทีคือ 45.28% (Bubble column) และ 51.87% (Packed column) และที่ 60 นาทีคือ 23.38% (Bubble column) และ 29.76% (Packed column) จะ

เห็นได้ว่าประสิทธิภาพของคอลัมน์ที่มีวัสดุแพ็คกิ้งมีค่าสูงกว่าคอลัมน์แบบไม่มีวัสดุแพ็คกิ้งเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก วัสดุแพ็คกิ้งทำหน้าที่ในการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว ทำให้พื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก การใช้วัสดุแพ็คกิ้งทำให้เกิดการรวมตัวของฟองก๊าซเป็นฟองขนาดใหญ่อยู่ภายในระบบ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นการลดพื้นที่ผิวของก๊าซ หรือพื้นผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวนั่นเอง การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ด้วยวัสดุแพ็คกิ้ง จึงถูกชดเชยด้วยการลดลงของพื้นที่ผิวของฟองก๊าซจากการรวมตัวกันของฟองก๊าซนี้

## ตารางที่ 2

ผลจากพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวต่อประสิทธิภาพการละลายของ  $\text{CO}_2$  ที่อัตราการป้อนก๊าซ  $\text{CO}_2$  10 มิลลิลิตรต่อนาที่ในคอลัมน์ที่มีวัสดุแพ็คกิ้ง

เวลา (นาที่)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการละลาย (สมดุลคาร์บอน)					
	พีเอช 6		พีเอช 8		พีเอช 10	
	บน	กลาง	บน	กลาง	บน	กลาง
15	16.83	21.77	42.00	29.33	46.15	51.87
30	23.93	28.22	27.80	26.47	37.21	35.33
45	25.37	29.32	25.11	25.05	33.41	29.83
60	24.84	26.53	20.58	21.04	29.76	23.74

## 3.3. ผลของอัตราการไหลของก๊าซ $\text{CO}_2$ ต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์รวมในน้ำ

การศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{CO}_2$  ได้จัดทำขึ้นในคอลัมน์แบบมีวัสดุแพ็คกิ้ง ที่พีเอช 10 และให้ก๊าซ  $\text{CO}_2$  ในอัตรา 10 – 40 มิลลิลิตรต่อนาที่ พบว่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามระดับของอัตราการไหลที่มากขึ้นดังตารางที่ 3 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์รวมในน้ำจะสูงสุดที่ 10 มิลลิลิตร ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ให้สู่ระบบที่อัตราการไหลสูงไม่มีเวลาเพียงพอที่จะละลายน้ำได้ทัน ดังนั้น ถึงแม้จะมี  $\text{CO}_2$  ที่ละลายน้ำได้ในปริมาณมาก ที่อัตราการป้อนของก๊าซสูง ๆ นี้  $\text{CO}_2$  ส่วนใหญ่จึงหลุดรอดออกจากระบบไปพร้อมกับฟองก๊าซขาออก นอกจากนี้ การให้ก๊าซที่อัตราการไหลสูง ๆ ยังช่วยส่งเสริมการรวมตัวกันของก๊าซ เป็นการลดพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ทำให้ประสิทธิภาพการละลายที่ 40 มิลลิลิตรต่อนาที่มีค่าค่อนข้างต่ำมาก

## ตารางที่ 3

ผลของอัตราการไหลของก๊าซต่อประสิทธิภาพการละลายของ  $\text{CO}_2$  ที่อัตราการป้อนก๊าซ  $\text{CO}_2$  10 มิลลิลิตรต่อนาที่ในคอลัมน์ที่มีวัสดุแพ็คกิ้ง

เวลา (นาที่)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการละลาย			
	10 มิลลิลิตร/นาที่	20 มิลลิลิตร/นาที่	30 มิลลิลิตร/นาที่	40 มิลลิลิตร/นาที่
15	30.94	10.64	7.47	8.66
30	29.98	14.71	9.53	7.45
45	23.86	12.27	9.40	7.04
60	21.11	11.02	8.91	7.64

### 3.4. ผลของระบบ Circulation Counterflow Contractor (C.C.C.) ต่อการละลายของคาร์บอนอนินทรีย์รวมในน้ำ

จากการศึกษาโดยสร้างระบบปฏิบัติการ C.C.C. ที่สามารถเหนี่ยวนำให้น้ำหมุนเวียนในทิศทางที่สวนทางกับการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ โดยให้อัตราการไหลของของเหลวอยู่ในช่วง 1 – 3 ลิตรต่อนาที และให้อัตราการป้อนก๊าซเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์เท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที และดำเนินการที่ระดับ pH เท่ากับ 10 มีการปรับพีเอชทุกๆ 15 นาที พบว่าประสิทธิภาพของการละลายของคาร์บอนอนินทรีย์รวมในน้ำจะสูงสุดที่อัตราการป้อนน้ำหมุนเวียนในระบบ 1 ลิตรต่อนาที เท่ากับ 43% ที่ 60 นาที ซึ่งมีปริมาณของคาร์บอนอนินทรีย์ละลายในน้ำ 93.83 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการหมุนเวียนน้ำกลับที่ 2 ลิตรต่อนาทีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดที่ 30 นาทีเท่ากับ 24% และมีปริมาณของคาร์บอนอนินทรีย์ละลายในน้ำ 28.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4 จากการทดลองนี้พบว่าอัตราการไหลของของเหลวในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของก๊าซจะช่วยช่วยให้ก๊าซเคลื่อนที่ได้ช้าลง ทำให้อยู่ในระบบได้นานขึ้น เป็นการเพิ่มเวลาในการถ่ายเทมวลสารจากก๊าซสู่ของเหลว อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วของของเหลวนี้ได้ก่อให้เกิดผลเสียต่อการถ่ายเทมวลเช่นกัน เนื่องจากเมื่อฟองก๊าซถูกหน่วงการเคลื่อนที่ จะเกิดการสะสมของก๊าซเป็นฟองขนาดใหญ่ตามช่องว่างของวัสดุแพคเกจซึ่งลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว

เวลา (นาที)	ปริมาณและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการละลายของคาร์บอนอนินทรีย์ในน้ำ					
	1 ลิตรต่อนาที		2 ลิตรต่อนาที		3 ลิตรต่อนาที	
	ปริมาณ (mg/L)	เปอร์เซ็นต์	ปริมาณ (mg/L)	เปอร์เซ็นต์	ปริมาณ (mg/L)	เปอร์เซ็นต์
15	15.41	28.52	16.08	29.76	21.76	40.28
30	35.44	32.81	28.40	26.28	40.82	37.78
45	62.87	38.80	45.35	27.98	65.31	40.30
60	93.83	43.42	83.24	38.52	84.08	38.91

ตารางที่ 4

ประสิทธิภาพและปริมาณของการละลาย  $\text{CO}_2$  ที่มีผลจากระบบ Circulation Counterflow Contractor (C.C.C.)

ในระบบนี้ เมื่อเพิ่มอัตราการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่คอลัมน์ จะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น โดยใช้อัตราการไหลเวียนน้ำกลับที่ 1 ลิตรต่อนาทีเข้าสู่ระบบและให้อัตราการป้อนก๊าซต่างกัน ทำการปรับ pH ให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ผลการศึกษาสามารถแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการละลายของ  $\text{CO}_2$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซจาก 10 เป็น 40, 70 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3 โดยมีปริมาณการละลายของคาร์บอนอนินทรีย์ในน้ำสูงสุดเท่ากับ 2.31 กรัมต่อลิตร ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที (300 นาที) และประสิทธิภาพของการละลายสูงสุดเท่ากับ 39.3% (15 นาที) จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบการหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อทำให้เกิดการสัมผัสมวลนี้มีความเหมาะสมระดับหนึ่งในการนำมาใช้เป็นระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะต้องทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินงานในระบบขนาดใหญ่ต่อไป



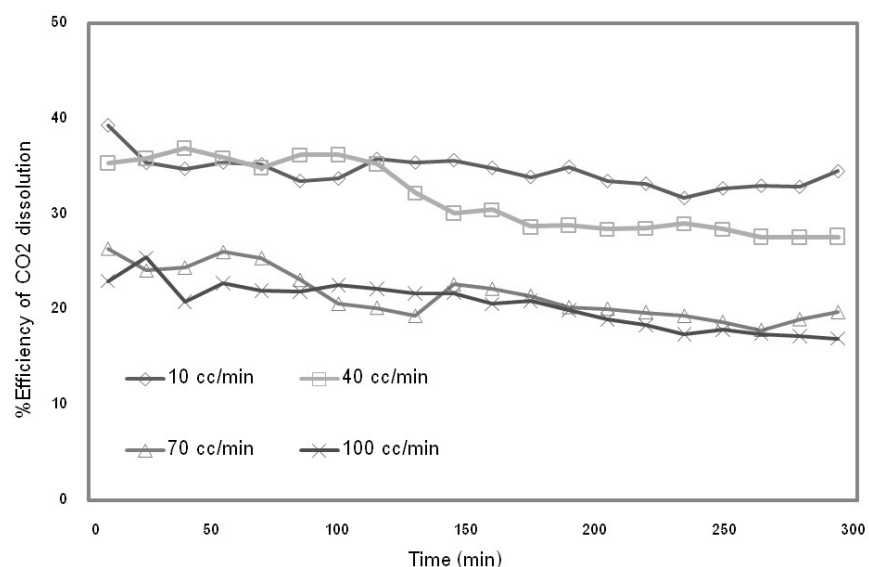
### ตารางที่ 5

ประสิทธิภาพของการ  
ละลาย  $\text{CO}_2$  ที่ระดับ  
อัตราการปล่อยก๊าซ 10,  
40, 70 และ 100 cc/min  
จากระบบ C.C.C.

เวลา (นาที)	ปริมาณและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ 1 ลิตรต่อนาที							
	10 มิลลิลิตรต่อนาที		40 มิลลิลิตรต่อนาที		70 มิลลิลิตรต่อนาที		100 มิลลิลิตรต่อนาที	
	ปริมาณ (mg/L)	%	ปริมาณ (mg/L)	%	ปริมาณ (mg/L)	%	ปริมาณ (mg/L)	%
15	23.36	39.31	96.49	35.40	139.57	26.42	160.86	23.00
30	42.04	35.38	199.81	35.89	245.55	24.12	364.26	25.46
45	61.95	34.75	305.40	36.97	365.11	24.43	441.04	20.82
60	84.18	35.42	396.34	35.93	518.70	26.06	652.03	22.80
75	104.68	35.23	480.39	34.89	645.70	25.44	772.22	21.99
90	119.36	33.48	595.81	36.21	694.14	23.13	928.65	21.92
105	140.31	33.73	712.26	36.29	719.72	20.61	1,088.69	22.58
120	170.09	35.78	789.23	35.27	793.89	20.19	1,234.70	22.21
135	189.38	35.41	808.46	32.22	846.44	19.34	1,341.65	21.71
150	211.84	35.65	835.97	30.15	1,072.04	22.64	1,492.57	21.74
165	227.85	34.86	931.88	30.47	1,153.87	22.20	1,554.86	20.59
180	241.70	33.90	955.64	28.71	1,233.38	21.45	1,714.17	20.93
195	269.97	34.95	1,045.46	28.88	1,261.48	20.26	1,766.13	19.97
210	278.50	33.48	1,106.58	28.45	1,350.48	20.09	1,811.09	19.01
225	295.81	33.19	1,182.94	28.54	1,420.13	19.71	1,874.75	18.37
240	301.23	31.68	1,277.10	29.04	1,497.13	19.33	1,899.72	17.42
255	330.27	32.70	1,335.64	28.44	1,541.37	18.69	2,068.73	17.86
270	352.71	32.98	1,378.53	27.74	1,558.54	17.85	2,135.85	17.47
285	370.99	32.86	1,450.61	27.59	1,786.36	18.98	2,228.42	17.22
300	409.97	34.50	1,543.89	27.81	1,972.65	19.73	2,308.26	16.98

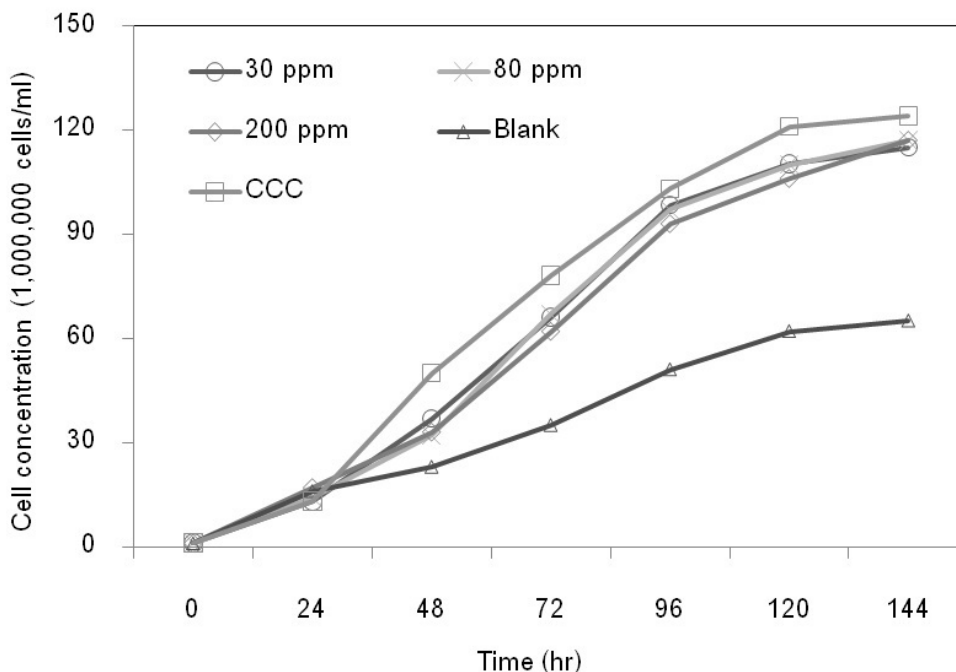
### รูปที่ 3

เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ  
ของการละลาย  $\text{CO}_2$  ที่  
ระดับอัตราการปล่อยก๊าซ  
10, 40, 70 และ 100  
cc/min จากระบบ  
C.C.C.



### 3.5. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยใช้คาร์บอนอนินทรีย์ในรูปของโซเดียมไบคาร์บอเนตและคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจากระบบ Circulation Counterflow Contractor (C.C.C.) ที่พีเอช 7

การศึกษาในส่วนนี้ออกแบบขึ้นเพื่อทดสอบว่าสารอนินทรีย์คาร์บอนจากระบบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ สามารถนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ได้ ซึ่งสาหร่ายสามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีทั้งในรูป  $\text{CO}_2$  และในรูปของ  $\text{NaHCO}_3$  จึงได้ทำการทดลองโดยใช้คาร์บอนอนินทรีย์ในรูปของ  $\text{NaHCO}_3$  และ  $\text{CO}_2$  ที่ได้จากระบบ Circulation Counterflow Contractor (C.C.C.) แต่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากระบบ C.C.C. อยู่ในรูปของ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{NaHCO}_3$  ที่พีเอช 10 มีความเข้มข้นประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงต้องทำการปรับค่า pH ลงเป็น 7 เพื่อให้คาร์บอนอนินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $\text{NaHCO}_3$  เปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงโดยใช้สารอาหาร M4N [5] ในน้ำเพาะเลี้ยงที่มีการปรับค่าความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตเท่ากับ 0, 30, 80, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำคาร์บอนอนินทรีย์จากระบบ C.C.C. ทำการทดลองดังรูปที่ 4 พบว่าสามารถเพาะเลี้ยงปริมาณเซลล์เซลล์ได้สูงสุดเท่ากับ 65, 115, 117, 118 และ 124 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตดังกล่าว และมีอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์มีค่าเท่ากับ 0.864, 1.080, 1.056, 1.032 และ 1.104 ต่อวันตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบ C.C.C. จะได้ปริมาณเซลล์สูงสุดที่ 124 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรและอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดเท่ากับ 1.104 ต่อวัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการเพาะเลี้ยงด้วยสารเคมี  $\text{NaHCO}_3$  เป็นการลดปริมาณการปลดปล่อยของเสีย หรือปรับของเสียให้มีประโยชน์มากขึ้น



รูปที่ 4

กราฟการเจริญเติบโตของ  
*Chlorella vulgaris*

## IV. สรุปผลการศึกษา

ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนอินทรีย์สำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว มีค่าสูงในสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ในที่นี้ผลที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 10 โดยให้ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 51.87% ที่เวลา 15 นาที เมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยของคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ประสิทธิภาพการละลายลดลง และมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 30.94% ที่ 15 นาทีที่ 10 มิลลิตรต่อนาที เมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวโดยใช้วัสดุแพ็ค จะทำให้ประสิทธิภาพของการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้ดีขึ้น

ระบบการหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อทำให้เกิดการสัมผัสมวลจะให้ค่าประสิทธิภาพในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 39.3% และคงที่ในช่วง 31 – 40% โดยอัตราการไหลวนของของเหลวที่เหมาะสมอยู่ที่ 1 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 10 มิลลิตรต่อนาที เมื่อมีการเพิ่มอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบที่ 40, 70 และ 100 มิลลิตรต่อนาที จะทำให้ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีค่าลดลง

นอกจากนี้การนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บในรูปแบบของไบคาร์บอเนตไปทดสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว *Chlorella vulgaris* พบว่าเซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีปริมาณเซลล์สูงสุดเท่ากับ 124 ล้านเซลล์ต่อมิลลิตร และจากการคำนวณอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์พบว่ามีความเท่ากับ 1.104 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการเพาะเลี้ยงด้วยสารเคมี  $\text{NaHCO}_3$  จะพบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้นี้จึงเป็นการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ และเพิ่มผลผลิตของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Chlorella vulgaris* ได้ดียิ่งขึ้น

## V. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากคณบดีกลุ่มวิชาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโครงการ “การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย (CC311A)” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บรรณานุกรม

- [1] G. Pipitone and O. Bolland, "Power generation with CO<sub>2</sub> capture: Technology for CO<sub>2</sub> purification," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 3, no. 5, pp. 528-534, 2009.
- [2] H. H. Khoo and R. B. H. Tan, "Life cycle investigation of CO<sub>2</sub> recovery and sequestration," in *Environmental Science and Technology*, vol. 40, pp. 4016-4024, 2006.
- [3] ASTV ผู้จัดการออนไลน์. (5 เมษายน 2554). โรงไฟฟ้าราชบุรีนำร่องผันคาร์บอนไดออกไซด์เลี้ยงสาหร่ายผลิตไบโอดีเซล. ข่าวหน้าแรกวิทยาศาสตร์ [ออนไลน์]. Available: <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9540000041597>
- [4] C. Fleischer, S. Becker, and G. Eigenberger, "Detailed modeling of the chemisorption of CO<sub>2</sub> into NaOH in a bubble column," *Chemical Engineering Science*, vol. 51, no. 10, pp. 1715-1724, 1996.
- [5] M. Morita, Y. Watanabe, and H. Saiki, "High photosynthetic productivity of green microalga *Chlorella sorokiniana*," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 87, pp. 203-218, 2000.