

สาหร่ายลดโลกร้อน

CO₂ Mitigation by Algae

กรรชิต เงินคำคง^{1*} นันทน์ภัส เงินคำคง² และ พิสิฐ ศรีสุริยจันทร์²

Khanchit Ngoenkhamkhong^{1*}, Nannaphat Ngoenkhamkhong² and Phisit Seesuriyachan²

Received: 17 July 2020, Revised: 7 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสาเหตุหลักในการเกิดก๊าซเรือนกระจก นับเป็นปัญหาท้าทายด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในระดับโลก การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ *Chlorella* sp., *Spirulina* sp. และ *Scenedesmus* sp. โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ปริมาตรสาหร่าย 5 ลิตร ให้ความเข้มแสงที่ 4,000 ลักซ์ และให้อากาศ โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm อย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 20 วัน ผลการศึกษา พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.43 ± 0.05 ต่อวัน มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (OD_{560}) สูงสุดถึง 0.62 ± 0.02 มวลสาหร่ายสูงสุด $2,166.70 \pm 57.70$ มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 97.33 ± 0.58 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง $4,073.30 \pm 108.50$ มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และค่าประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน คือ 3.88 ± 0.01 โมล จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่า การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการกักเก็บคาร์บอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: สาหร่าย, การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซเรือนกระจก

¹ หลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50300

¹ Department of Environmental, Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Lanna, Muang, Chiang Mai 50300, Thailand.

² สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

² School of Agro-Industry, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50100, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kunchit2516@hotmail.com Tel: 08 6184 7248

ABSTRACT

The increasing of atmospheric carbon dioxide (CO₂), one of the greenhouse gases, is a global critical environmental issue. The objective of this research was to study the efficiency of CO₂ reduction using 3 algae strains (*Chlorella* sp., *Spirulina* sp. and *Scenedesmus* sp.). The three strains were cultivated in 5 liter photobioreactor under the light intensity of 4,000 lux. They were continuously sparged with CO₂ (99%) at a flow rate of 0.05 vvm for 20 days. The results found that *Chlorella* sp. expressed the highest efficiency with the maximum specific growth rate, cell density (OD₅₆₀), biomass productivity, efficiency of CO₂ reduction and CO₂ fixation rate of 0.43±0.05 d⁻¹, 0.62±0.02, 2,166.70±57.70 mg.l⁻¹., 97.33±0.58%, and 4,073.30±108.50 mg.l⁻¹.d⁻¹, respectively. The average CO₂ sequestration obtained in 20 days was 3.88±0.01 mole. In addition, the efficiency of CO₂ reduction and CO₂ sequestration were significantly different ($p<0.05$).

Key words: algae, CO₂ mitigation, greenhouse gas

บทนำ

ปัญหาโลกร้อนจัดว่าเป็นความท้าทายที่สำคัญระดับโลกโดยที่ทุกฝ่ายก็ได้เห็นพ้องต้องกันในการหาทางลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ โดยมีการให้สัตยาบันในอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC) (Srethasirrot *et al.*, 2014) หน่วยงานระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC) ได้เสนอรายงานทุกๆ 5 ปี โดยสรุปว่าโลกได้ร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์ นั่นคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศในปริมาณที่มากและในอัตราที่เร็วมาก (Chidthaisong, 2010) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวมีสาเหตุสำคัญมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 10-20 (Ho *et al.*, 2011) ซึ่งมีศักยภาพในการทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น (Global warming potential; GWP)

ปัจจุบันเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญแนวทางในการแก้ไขปัญหาและการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากการลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ในปัจจุบันมีอีกทางเลือกหนึ่งคือการนำศักยภาพของสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Biological CO₂ mitigation) โดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นสำคัญในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นน้ำตาลซึ่งเป็นสารที่ให้พลังงาน กระบวนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศด้วยวิธีนี้สามารถใช้กับพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ สาหร่ายซึ่งเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก มีทั้งเซลล์เดี่ยวและหลายเซลล์นั้นเมื่ออัตราการเจริญเติบโตสูงมาก จึงมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้มากกว่าพืช ไม่ว่าจะเป็นป่าไม้ พืชทางการเกษตรตลอดจนพืชน้ำอื่นๆ (Ahn *et al.*, 2012) สาหร่ายหลายสายพันธุ์มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เช่น *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพ ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง

ร้อยละ 97.07 (Mann *et al.*, 2009) และร้อยละ 82.50-99.00 (Man and Keat, 2013) และสาหร่าย *Spirulina maxica* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีถึงร้อยละ 98.00 (Chan, 2011) ส่วนสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* ประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีถึงร้อยละ 67.00 (Li *et al.*, 2011) ด้วยกัน การศึกษาวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่องมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการต่างๆ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่าย ถือเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์ด้วยแสง ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. คณะผู้วิจัยได้วางกรอบแนวคิดและตั้งสมมุติฐานของการศึกษา ประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. อาหารเลี้ยงสาหร่าย (Barsanti and Gualtieri, 2014)

1.1 สูตรอาหาร Jaworski's medium สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp.

1.2 สูตรอาหาร Zarrouk's medium สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina* sp.

2. สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. โดยเก็บสาหร่ายมาทำการขยายพันธุ์จากสระน้ำหลังโรงอาหาร เมื่อปี พ.ศ. 2558 ทำการเพาะเลี้ยงมาแล้ว 7 ปี ที่ห้องปฏิบัติการชีววิทยาสิ่งแวดล้อม หลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

3. การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ นำหัวเชื้อสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด มาเลี้ยงในอาหารสำหรับสาหร่ายแต่ละชนิด โดยวัดหัวเชื้อเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดดูดกลืนแสง (Cary 60 Agilent, Germany) ที่ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (Optical density : OD₅₆₀) ที่ 0.80 แล้วนำมาถ่ายลงถึงปฏิกรณ์แบบให้แสง (ถังพลาสติกสีขาวขุ่น) ขนาด 80 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว ปริมาตร 50 ลิตร เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย ให้แสงไฟจากหลอดไฟสีขาว (Warm white light) (LX-73 Digicon; Taiwan) ความเข้มแสงประมาณ 4,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง และให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศอัตรา 30 ลิตรต่อนาที (AP-10 Yamano; China) ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าความหนาแน่นของเซลล์ (OD₅₆₀) อยู่ในช่วง 0.30-0.50 เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการศึกษาต่อไป

4. ศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน และประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์

นำหัวเชื้อตั้งต้นสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงไว้ มาทำการศึกษาโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ขั้ว โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบให้แสง (Thermo Scientific Nalgeng: USA) ขนาด 10 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลวปริมาตร 5

ลิตร เติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง อัตรา 30 ลิตรต่อนาที เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 99) อัตราการไหล 0.05 vvm ตลอดเวลาการทดลองใช้เครื่องดูดจ่ายก๊าซ (Watson Marlow Model 502S; UK) ทำการศึกษาเป็นเวลา 20 วัน เก็บตัวอย่าง ทุกๆ 2 วัน ศึกษาพารามิเตอร์ดังนี้

4.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

วัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปของค่าความหนาแน่นของเซลล์ (OD_{560}) ชีวมวล (Biomass algae) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโต

4.2 วัดความเป็นกรดด่าง ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH Meter; Eutech pH 700, Singapore)

4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด

ทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่การทดลอง (Influent of CO_2) และที่ออกจากชุดการทดลอง (Effluent of CO_2) ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ (Biogas 5000 Geotek; UK) นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการ 1 (Kao *et al.*, 2012a)

$$\text{Efficiency of } CO_2 \text{ reduction} = \left(\frac{\text{Influent of } CO_2 - \text{Effluent of } CO_2}{\text{Influent of } CO_2} \right) \times 100 \quad (1)$$

4.4 ศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด (CO_2 fixation rate)

นำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณหาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด ดังสมการ 2 (Ho *et al.*, 2011)

$$CO_2 \text{ fixation rate (mg.L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) = 1.88 \times \text{biomass productivity} \quad (2)$$

4.5 ศึกษาการกักเก็บคาร์บอนในสาหร่ายแต่ละชนิด (CO_2 sequestration)

คำนวณจากสมการ 3 (Kargupta *et al.*, 2015)

$$CO_2 \text{ sequestration (mole)} = \frac{F_{in} - F_{out}}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ F_{in} = เปรอร์เซ็นต์โมลคาร์บอนที่เข้าระบบ

F_{out} = เปรอร์เซ็นต์โมลคาร์บอนที่ออกจากระบบ

dt = ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป

5. การรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติใช้โปรแกรม Minitab version 16 (Minitab Inc., USA) และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Tukey simultaneous tests ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

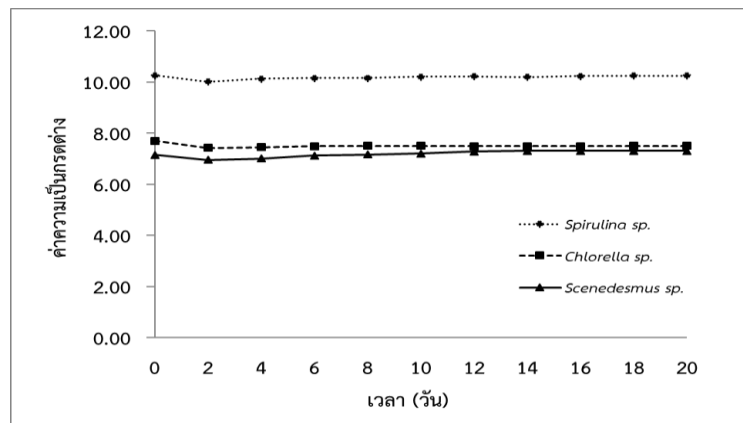
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดด่างของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus*

sp. และ *Spirulina* sp. มีค่าความเป็นกรดต่างของอาหารเหลวเมื่อเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm พบว่า มีค่าอยู่

ระหว่าง 7.43 ± 0.02 - 7.70 ± 0.01 , 6.95 ± 0.06 - 7.31 ± 0.05 และ 10.02 ± 0.13 - 10.25 ± 0.00 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดต่างของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

จากภาพที่ 1 พบว่า ในวันแรกๆ ค่าความเป็นกรดต่างของสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. มีค่าความเป็นกรดต่างลดลงจาก 7.70 ± 0.01 มาอยู่ที่ 7.43 ± 0.02 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Ngoenkhomkhong *et al.* (2017) ที่ทำการศึกษาถึงการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างจะลดลงจาก 7.35 มาอยู่ที่ 6.92 หลังจากนั้นเมื่อสาหร่ายปรับตัวได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนได้ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์แสงทำให้ค่าความเป็นกรดต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นค่าความเป็นกรดต่างคงที่ (Shuler *et al.*, 1922) โดยทั่วไปทั้งสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. เจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดต่างกว้าง กล่าวคือค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella vulgaris* อยู่ในช่วง 6.48-8.58 (Morais and Costa, 2007) ส่วนสาหร่าย *Scenedesmus* sp. R-16 อยู่ในช่วง 6.00-

11.00 (Ren *et al.*, 2013) และสาหร่าย *Scenedesmus quadricauda* อยู่ในช่วง 5.00-7.00 (Lane and Burris, 1981)

ส่วนสาหร่าย *Spirulina* sp. มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 10.02 ± 0.13 - 10.25 ± 0.00 ซึ่งถือว่าเหมาะสม โดยทั่วไปสาหร่าย *Spirulina* sp. เจริญเติบโตได้ดีค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเหมาะสมอยู่ในช่วง 9.00-11.00 (Zeng *et al.*, 2012) ทำให้มวลสาหร่ายและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูง ส่วนสาหร่าย *Spirulina maxima* อยู่ในช่วง 8.50-9.50 (Morais and Costa, 2007) และอยู่ในช่วง 9.04-9.88 (Oliveira *et al.*, 1999)

2. ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและมวลสาหร่าย

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ตารางที่ 1) พบว่า ความหนาแน่นของเซลล์ สาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. มีค่าความ

หนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด คือ 0.62 ± 0.02 , 0.52 ± 0.01 และ 0.45 ± 0.02 ตามลำดับ โดยสาหร่าย *Chlorella* sp. มีมวลชีวภาพสูงสุด รองลงมาเป็นสาหร่าย *Scenedesmus* sp. และสาหร่าย *Spirulina* sp. ที่ $2,166.70 \pm 57.70$, $2,066.70 \pm 76.40$ และ $2,033.30 \pm 76.40$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm สาหร่าย *Chlorella* sp. มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายและมวลชีวภาพสูงสุด เนื่องจากสาหร่ายมีการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ จึงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นไป

ในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Ngoenkhamkhong *et al.* (2017) พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด คือ 0.91 ± 0.02 และยังสามารถเลี้ยงกับรายงานวิจัยของ Sumardiono *et al.* (2014) จากการศึกษาการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพาะเลี้ยงสาหร่าย พบว่าสาหร่ายมีอัตราการการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.39 ต่อวัน และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่ามวลสาหร่ายมาหาค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด คือ 0.43 ± 0.05 , 0.36 ± 0.01 และ 0.35 ± 0.00 ต่อวัน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด (OD_{max}) มวลสาหร่ายสูงสุด (Algae biomass_{max}) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (μ_{max}) ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

Parameter	Microalgae		
	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Scenedesmus</i> sp.	<i>Spirulina</i> sp.
OD_{max}	0.62 ± 0.02^a	0.52 ± 0.01^b	0.45 ± 0.02^c
Algae biomass _{max} (mg/L)	$2,166.70 \pm 57.70^a$	$2,066.70 \pm 76.40^a$	$2,033.30 \pm 76.40^a$
μ_{max} (d ⁻¹)	0.43 ± 0.05^a	0.36 ± 0.01^b	0.35 ± 0.00^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ($\pm$ S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (a, b และ c) ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey simultaneous

3. ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Efficiency of CO₂ reduction) อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ fixation rate) และประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน (CO₂ sequestration) ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

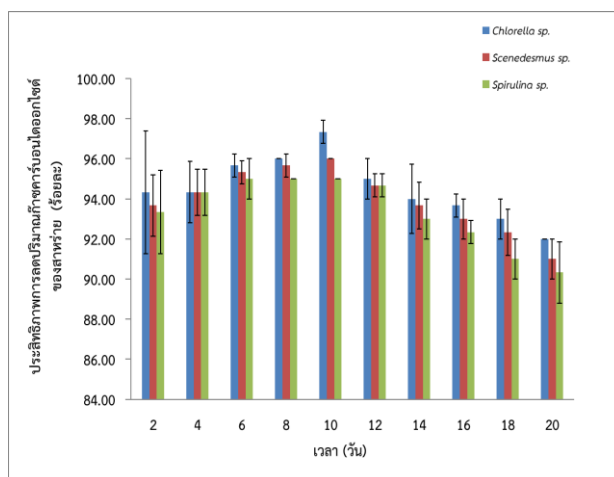
จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. พบว่า มีประสิทธิภาพ

ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ร้อยละ 94.53 ± 1.54 , 94.07 ± 1.73 และ 93.60 ± 1.99 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 คือ ร้อยละ 97.33 ± 0.58 , 96.00 ± 0.00 และ 95.00 ± 0.00 ตามลำดับ (ภาพที่ 2) จากตารางที่ 2 พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ร้อยละ 97.33 ± 0.58 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mann *et al.* (2009) พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp.

มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 97.07 และบางสายพันธุ์ลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เช่น สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8263 ร้อยละ 86.70 (Tongprawhan *et al.*, 2014) สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ร้อยละ 98 (Chan, 2011) และร้อยละ 80 (Serejo *et al.*, 2015) ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. MTF-7 ร้อยละ 95 (Chiu *et al.*, 2011) เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยๆ เนื่องจากสารอาหารจะลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้น (Sumardiono, 2014) และจากการศึกษา พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีซึ่งถือว่ามีความแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Chiu *et al.* (2011) ในอัตราการเติมก๊าซที่อัตราการไหล 0.05 vvm แต่แตกต่างกับงานวิจัยของ Kao *et al.* (2012b) ในอัตราการเติมก๊าซที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ 0.05 vvm ผลการศึกษารุ่นนี้ พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า งานวิจัยของ Kao *et al.* (2012b) ผลที่ต่างกันอาจเป็นเพราะปัจจัยจากแสงที่ต่างกันซึ่งในการทดลองเลี้ยงสาหร่ายของ Kao *et al.* (2012b) ใช้แสงอาทิตย์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย แต่ในการทดลองนี้ใช้แสงจากหลอดไฟสีขาวในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายซึ่งสามารถควบคุมได้ และถึงปฏิกิริยา อุณหภูมิที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสภาพอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศจึงทำให้การทดลองมีความแตกต่างกัน (Toledo-Cervantes *et al.*, 2013) แต่อย่างไรก็ตามสาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างพบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 (Efficiency of CO₂ reduction) อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 (CO₂ fixation rate) และประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน (CO₂ sequestration) ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

Parameter	Algae		
	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Scenedesmus</i> sp.	<i>Spirulina</i> sp.
Efficiency of CO ₂ reduction _{max} (%)	97.33±0.58 ^a	96.00±0.00 ^b	95.00±0.00 ^c
CO ₂ fixation rate _{ave20day} (mg.L ⁻¹ .d ⁻¹)	4,073.30±108.50 ^a	3,885.30±143.60 ^a	3,822.70±143.60 ^a
CO ₂ sequestration _{max} (mole)	3.88±0.01 ^a	3.71±0.02 ^b	3.66±0.01 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (a, b และ c) ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey simultaneous

จากการศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. พบว่า มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 คือ 4,073.30±108.50, 3,885.30±143.60 และ 3,822.70±143.60 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และยังพบว่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และยังพบว่าสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์มีประสิทธิภาพในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 หลังจากนั้นการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารอาหารที่ลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย สาหร่ายจะใช้สารอาหารที่มีอยู่ในอาหารตั้งต้นในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงเวลาแรกๆ แต่เมื่อระยะผ่านไปทำให้สารอาหารเริ่มหมดไป ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลงส่งผลให้การตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงตามไปด้วย (Sumardiono, 2014) ดังนั้นควรทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบต่อเนื่อง (Continuous culture) ซึ่งเป็นการเติมสารอาหารเข้าสู่ถังไบโอรีแอคเตอร์

ตลอดเวลา เพื่อให้มีอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วันสูงสุด คือ 3.88±0.01 โมล ซึ่งแตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

สรุป

จากการศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในถังปฏิกรณ์แบบให้แสง บรรจุอาหารเหลวปริมาตร 5 ลิตร ให้ความเข้มแสงที่ 4,000 ลักซ์ และให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศอัตรา 30 ลิตรต่อนาที ตลอดเวลานอกจากเติมอากาศแล้วทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 อัตราการไหล 0.05 vvm เป็นเวลา 20 วัน ผลการศึกษา พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนสูงสุด โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.43±0.02 ต่อวัน

มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุดถึง 0.62 ± 0.02 มวลสาหร่ายสูงสุด $2,166.70 \pm 57.70$ มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 97.23 ± 0.68 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง $4,073.30 \pm 108.50$ มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และค่าประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน คือ 3.88 ± 0.01 โมล ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายดังกล่าว จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้ทุนอุดหนุนทุนวิจัยส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยที่มุ่งเป้า ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน)

เอกสารอ้างอิง

- Ahn, J.W., Hwangbo, K., Lee, S.Y., Choi, H.G., Park, Y.I., Liu, J.R. and Jeong, W.J. 2012. Shorth communication anew arctic *Chlorella* species for biodiesel production. **Bioresource Technology** 125: 340-343.
- Barsanti, L. and Gualtieri, P. 2014. **Algae Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology**. 2nd ed. Taylor & Francis Group, NewYork.
- Chan, A. 2011. Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas. Master of Applied Science, The University of Guelph, Canada.
- Chidthaisong, A. 2010. **Thailand Climate Change Information**. The Thailand Research Fund's Research development and Co-ordination Center for Global Warming and Climate Change, Bangkok. (in Thai)
- Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Huang, T.T., Lin, C.J., Ong, S.C., Chen, C.D., Chang, J.S. and Lin, C.S. 2011. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulphur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. **Bioresource Technology** 102: 9135-9142.
- Ho, S.H., Chen, C.Y., Lee, D.J. and Chang, J.S. 2011. Research review paper: Perspectives on microalgae CO₂-emission mitigation systems - A review. **Biotechnology Advances** 29: 189-198.
- Kao, C.Y., Chiu, S.Y., Huang, T.T., Dai, L., Hsu, L.K. and Lin, C.S. 2012a. Ability of a mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide capture for biogas upgrading. **Applied Energy** 39: 76-183.
- Kao, C.Y., Chiu, S.Y., Huang, T.T., Dai, L., Wang, G.H, Tseng, C.P., Chen, C.H. and Lin, C.S. 2012b. A mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. for the carbon dioxide capture from biogas. **Biomass and Bioenergy** 36: 32-140.
- Kargupta, W., Ganesh, A. and Mukherji, S. 2015. Estimation of carbon dioxide sequestration Potential of microalgae grown in a batch photobioreactor: Short Communication. **Bioresource Technology** 180: 370-375.
- Lane, A.E. and Burris, J.E. 1981. Effects of environmental pH on the internal pH of *Chlorella pyrenoidosa*,

- Scenedesmus quadricauda* and *Euglena mutabilis*. **Plant Physiol** 68: 439-442.
- Li, F.F., Yang, Z., Zeng, R., Yang, G., Chang, X., Yan, J.B. and Hou, Y.L. 2011. Microalgae capture of CO₂ from actual flue gas discharged from a combustion chamber. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 50(10): 6496-6502.
- Man, K.L. and Keat, T.L. 2013. Effect of carbon source towards the growth of *Chlorella vulgaris* for CO₂ bio-mitigation and biodiesel production. **International Journal of Greenhouse Gas Control** 14: 169-176.
- Mann, G., Schlegel, M., Schumann, R. and Sakalauskas, A. 2009. Biogas-condition with microalgae. **Agronomy Research** 7(1): 33-38.
- Morais, M.G.D. and Costa, J.A.V. 2007. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. **Biotechnol Lett** 29: 1349-1352.
- Ngoenklamkhong, K., Cheunbarn, S., Cheunbaen, T. and Ngoenklamkhong, N. 2017. The Efficiency of CO₂ Capture by Green Microalgae. **RMUTI Journal** 10(2): 119-129. (in Thai)
- Oliveira, M.A.C., Monteiro, L.D., Robb, P.G. and Leite, S.G.F. 1999. Growth and Chemical composition of *Spirulina maxima* and *Spirulina patensis* biomass at different temperature. **Aquaculture International** 7: 261-275.
- Ren, H.Y., Liu, B.F., Ma, C., Zhao, L. and Ren, N.Q. 2013. A new lipid-rich microalga *Scenedesmus* sp. strain R-16 isolated using Nile red staining: effects of Carbon and nitrogen sources and initial pH on the biomass and lipid production. **Biotechnology for biofuels** 6(143): 1-10.
- Serejo, M.L., Olmos, E.P., Boncz, M., Blanco, S., Garcia-Encina, P.A. and Munoz, R. 2015. Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial process. **Environmental Science & Technology** 49(5): 1-16.
- Shuler, M.L., Kargi, F. and De Lisa, M. 1922. **Bioprocess engineering: basic concept**. 3rd ed. Prentical Hall, Englewood Cliffis New Jersey, United State.
- Srethasitrot, B., Chidthaisong, A. and Chinwanno, S. 2014. **Climate@risk**. Bangkok Business Publishing, Bangkok. (in Thai)
- Sumardiono, S., Yono, B., Syaichurrozi, I. and Sasongko, S.B. 2014. Utilization of biogas as carbon dioxide provider for *Spirulina platensis* culture. **Biological Sciences** 6(1): 53-59.
- Toledo-Cervantes, A., Morales, M., Novelo, E. and Revah, S. 2013. Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*. **Bioresource Technology** 130: 652-658.
- Tongprawhan, W., Srinuanpa, S. and Cheirsilp, B. 2014. Biocapture of CO₂ from biogas by Oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid. **Bioresource Technology** 170: 90-99.
- Zeng, X., Danquah, M.K., Zhang, S., Zhang, X., Wu, M., Chen, X.D., Ng, I.S., Jing, K. and Lu, Y.

2012. Autotrophic cultivation of *Spirulina platensis* for CO₂ fixation and phycocyanin production. **Chemical Engineering** 183: 192-197.