# ผลของสาหร่าย *Scenedesmus sp.* ต่อการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการผลิตไขมัน

# THE EFFECT OF *SCENEDESMUS SP.* ON REDUCING CARBON DIOXIDE AFFECTING LIPID PRODUCTIVITY

***ครรชิต เงินคำคง[1]*** *ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ[1]* *นันท์นภัส เงินคำคง[2]* *บัญจรัตน์ โจลานันท์[1]*

***Khanchit Ngoenkhamkhomg[1]*,*** *Ladawan Wattanchira[1], Nannaphat Ngoenkhamkhomg[2], Bunjarata Jolanun[1]*

*[1]หลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่*

*[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology.*

*[2]สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*

*[2]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industy, Chiang Mai University.*

****Corresponding author, E-mail:*** *Kunchit2516@rmutl.ac.th*

**บทคัดย่อ**

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ต่อการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการผลิตไขมัน โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ในอาหารเหลวสูตรเจเอ็มในถังไบโอรีแอคเตอร์ ปริมาตร 8 ลิตร โดยให้ความเข้มแสงที่ 4,000 ลักซ์ ให้อากาศตลอด 24 ชั่วโมง ในชุดควบคุม โดยชุดการทดลองทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ หลังจากการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 20 วัน ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราการไหล 0.05 vvm การเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.45$\pm$0.09 ต่อวัน มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุดถึง 0.72$\pm$0.04 มวลชีวภาพของสาหร่ายสูงสุด 2,283.33$\pm$125.83 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไขมันเฉลี่ย 10.88$\pm$0.68 ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ร้อยละ 97.90$\pm$1.15

**คำสำคัญ:** สาหร่าย ซีนีเดสมัส การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การผลิตไขมัน

**Abstract**

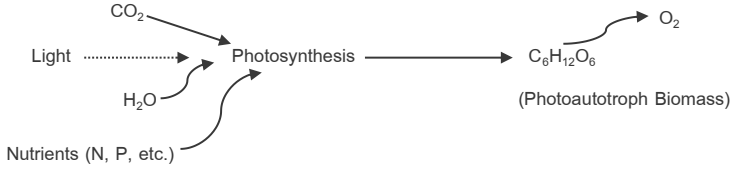
The objective of this research is to study the effect of *Scenedesmus* sp. on reducing carbon dioxide affecting lipid productivity. *Scenedesmus* sp., was cultivated in a liquid formula (8 liters) in an bioreactor using Jaworski's medium, under a 24 hour light intensity of 4,000 lux and with aeration for control. Through a series of experiments to add carbon dioxide (99%) at a flow rate of 0.05, 0.10 and 0.15 vvm, for 20 days, results showed that at a flow rate of 0.05 vvm the growth of algae and reducing carbon dioxide efficiency were higher

than those at the 0.10 and 0.15 vvm flow rates. *Scenedesmus* sp., with a maximum specific growth rate, $OD_{560}$, algae biomass productivity was 0.45±0.09 $d^{-1}$, 0.72±0.04, 2,283.33±125.83 $mg.l^{-1}$. and the average lipid content was 10.88±0.68% by dry weight. The maximum reducing carbon dioxide efficiencies were 97.90±1.15%.

**Keywords:** Algae, *Scenedesmus* sp., Reducing Carbon Dioxide, Lipid Productivity

## บทนำ

การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในบรรยากาศสูงขึ้นเกิดเป็นภาวะโลกร้อนที่มีผลกระทบไปทั่วโลก โดยประเทศไทยมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเช่นกัน แนวทางในการแก้ไขปัญหาและการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นอกจากการลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลในปัจจุบันมีอีกทางเลือกหนึ่งคือการนำศักยภาพของสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้ประโยชน์ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Biological $CO_2$ Mitigation) โดยสาหร่ายจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง และเป็นสารอาหารเพื่อการเจริญเติบโต และสร้างมวลชีวภาพของสาหร่ายดังสมการ (1) [1]




(1)

กระบวนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศด้วยวิธีนี้ สามารถใช้กับพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ถึงแม้ว่าความเป็นไปได้ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยพืชที่ใช้ในการเกษตรโดยทั่วไปนั้นมีเพียงร้อยละ 3-6 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ในปัจจุบัน [2] ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการเจริญของพืชบกนั้นเป็นไปอย่างช้าๆ ในขณะที่พืชน้ำโดยเฉพาะสาหร่ายซึ่งเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก มีทั้งเซลล์เดียวและหลายเซลล์นั้นมีอัตราการเจริญสูงกว่ามาก จึงมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงได้มากกว่าพืชบนบก ไม่ว่าจะเป็นป่าไม้ พืชทางการเกษตรหรือแม้แต่พืชน้ำอื่นๆ [3] การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเป็นแหล่งพลังงานทดแทน ในปัจจุบันประเทศไทยต้องประสบกับปัญหาวิกฤตด้านพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่มีความผันผวนเรื่องราคาและมีแนวโน้มที่จะหมดไปในไม่ช้า [4] ทำให้หลายประเทศทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทยต้องหันไปศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาการผลิตพลังงานทดแทนชนิดอื่นๆ เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการใช้ภายในประเทศ พลังงานทดแทนที่หลายๆ ประเทศให้การยอมรับว่ามีศักยภาพสำหรับการใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมมีหลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล ไบโอดีเซล พลังงานไฮโดรเจน พลังงานน้ำ เป็นต้น จากพลังงานทั้งหมดดังกล่าว พบว่าพลังงานที่มีศักยภาพและมีความเป็นไปได้สูงที่

จะส่งเสริมให้มีการผลิตขึ้นใช้เองภายในประเทศ นั่น คือ น้ำมันไบโอดีเซล [5] ไบโอดีเซลจัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมที่ได้รับการยอมรับว่ามีศักยภาพและเป็นพลังงานสะอาด เนื่องจากไม่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์น้อยมาก และต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด เมื่อเทียบกับน้ำมันปิโตรเลียม [6] และประการสำคัญคือสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบในธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ตลอดเวลา บางครั้งอาจจะเรียกไบโอดีเซลว่า Renewable Energy Resources ในปัจจุบันมีการค้นคว้าวิจัยในด้านการหาแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล โดยได้มุ่งเน้นที่จะนำน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลชีวภาพมาใช้เพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลชีวภาพหรือไบโอดีเซลเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจที่จะผลิตเป็นพลังงานทดแทน [7] ทั้งนี้เพราะไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากพืชน้ำมันหลายชนิด เช่น สาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Botryococcus braunii* จะผลิตน้ำมันปริมาณ 136,900 ลิตรต่อเอเคอร์ต่อปี [8] ซึ่งมีปริมาณสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ และในปัจจุบันต้นทุนในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลยังมีมูลค่าค่อนข้างสูง ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำไบโอดีเซลมาใช้ในเชิงปฏิบัติจริง จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยถึงแหล่งสารตั้งต้นราคาถูก เช่น จากสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ต่างๆ ที่สามารถผลิตน้ำมันเพื่อนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลได้ และยังพบว่าสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. มีปริมาณไขมันสะสมภายในเซลล์ร้อยละ 28–32 ของน้ำหนักแห้ง [8] โดยน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันพืช คือมีส่วนประกอบไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนอยู่ระหว่าง 12–22 อะตอมต่อโมเลกุล [9] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสาหร่ายมีความสำคัญต่อมนุษย์ในด้านต่างๆ ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการนำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ด้านลดก๊าซเรือนกระจก ด้านอาหาร ด้านอุตสาหกรรม ด้านเกษตรกรรม ด้านการแพทย์ ด้านบำบัดน้ำเสียและด้านการใช้เป็นพลังงานชีวภาพ เป็นต้น เพื่อแก้ไขปัญหาการลดลงอย่างรวดเร็วของพลังงานจากน้ำมันและถ่านหินในทุกภูมิภาคของโลก สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กเหล่านี้นับว่าเป็นความหวังอย่างสูงของมนุษย์ที่จะใช้เป็นพลังงานชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต [10]

จากความสำคัญของปัญหานี้จึงมีการศึกษาวิจัยและการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็ก จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เช่น สาหร่าย *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* และ *Spirulina maxima* [11] เพื่อสนับสนุนแนวคิดดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงผลของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ต่อการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการผลิตไขมัน เพื่อเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพิจารณาศักยภาพ ความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในด้านอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์ต่อไป ทั้งในด้านการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการผลิตเป็นพลังงานทดแทนในอนาคต

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedemus* sp.

2. เพื่อศึกษาถึงอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการผลิตไขมัน

## วิธีดำเนินการวิจัย

**1. สารเคมีและวัสดุ**

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษาสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้รับมาจากภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Jaworski's Medium (JM) และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกชนิดเป็น Analytical Reagent (AR)

**2. การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย**

นำหัวเชื้อสาหร่าย *Scenedesmus* sp. มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร JM เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย โดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นมีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายอยู่ที่ 0.8 จำนวนร้อยละ 2 โดยปริมาตร มาเทลงถังขนาด 80 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลวปริมาตร 50 ลิตร ให้แสงจากหลอดไฟสีส้ม (Warm White Light) ค่าความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ (4 in 1 Multi-Function Environmental Meter Model ST-8820; Taiwan) โดยให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง และเติมอากาศจากเครื่องปั๊มอากาศที่อัตราการเติม 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (Optical Density: $OD_{560}$) อยู่ในช่วง 0.3-0.5 โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Biochrom Libra Model S12; UK) เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการทดลองขั้นต่อไป

**3. ศึกษาผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อผลผลิตของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ที่อัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน**

นำหัวเชื้อสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงไว้ในข้อ 2 มาทำการศึกษา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดยทำการทดลองในถังไบโอรีแอคเตอร์ขนาด 10 ลิตร ปริมาตรสาหร่าย 8 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 หรือชุดควบคุมเติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง อัตรา 30 ลิตรต่อนาที ในขณะที่ชุดที่ 2 ซึ่งเป็นชุดการทดลองนั้นนอกจากเติมอากาศแล้วทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm ตลอดเวลาการทดลองโดยใช้เครื่อง Peristaltic Pump (Watson Marlow Model 502S; UK) ในการดูดจ่ายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วัน เป็นเวลา 20 วัน โดยศึกษาถึงการเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปน้ำหนักแห้ง [12] และผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลแตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยพิจารณาจากค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ($\mu$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2) [13] หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำเดิม และเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.15 vvm (vvm = ปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรอาหารต่อนาที)

$$\mu = \ln (N_2 - N_1) / (t_2 - t_1) \qquad (2)$$

เมื่อ

$\mu$ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)
$N_1$ = มวลสาหร่ายเริ่มต้นในการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$N_2$ = มวลสาหร่ายวันเก็บตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$t_1$ = ระยะเวลาเริ่มต้นในการทดลอง (วัน)
$t_2$ = ระยะเวลาวันเก็บตัวอย่าง (วัน)

**4. ศึกษาค่าความเป็นกรดด่าง**

ศึกษาผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลว โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (Ohaus model starter 3100; USA) โดยทำการตรวจวัดตัวอย่างทุกๆ 2 วัน

**5. ศึกษาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.**

ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังออกจากถังไบโอรีแอคเตอร์ โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ (Geotech model biogas 5000; UK) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. จากสมการ (3) [14]

$$\text{ประสิทธิภาพการลด } CO_2 \text{ (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซ } CO_2 \text{ ก่อนเข้าชุดการทดลอง - ปริมาณก๊าซ } CO_2 \text{ หลังออกจากชุดการทดลอง}}{\text{ปริมาณก๊าซ } CO_2 \text{ ก่อนเข้าชุดการทดลอง}} \times 100 \quad (3)$$

**6. ศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตไขมันสาหร่ายของ *Scenedesmus* sp.**

การวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน (Lipid Content) ของสาหร่าย โดยใช้วิธีซอกเล็ต (Soxhlet Extraction) [15]

**7. การรวบรวมข้อมูล**

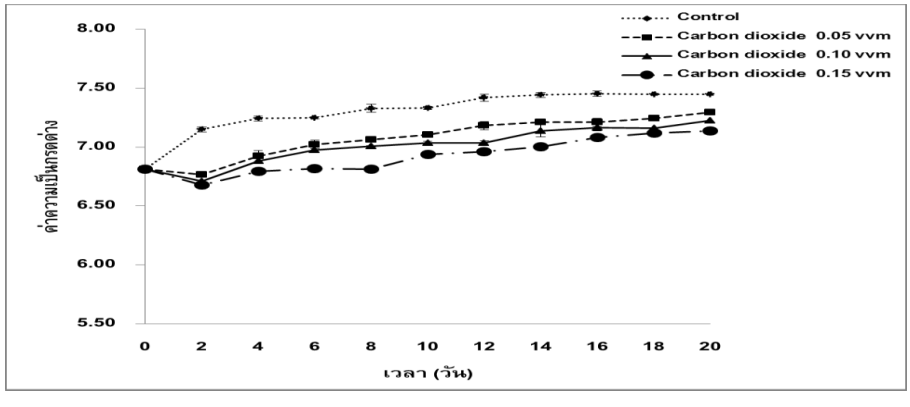
นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab version 16 (Minitab Inc. USA) และวิเคราะห์ความแตกต่างในแนวนอนด้วยวิธี Tukey simultaneous ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## ผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการผลิตไขมันของสาหร่าย *Scenedemus* sp. โดยมีผลการศึกษาดังนี้

**1. ความเป็นกรดด่าง (pH)**

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวโดยสาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวเมื่อเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 99) ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10, 0.15 vvm และชุดควบคุม มีค่าอยู่ระหว่าง 6.77±0.02-7.29±0.02, 6.71±0.06-7.23±0.02, 6.68±0.01-7.14±0.03 และ 6.81±0.02-7.45±0.01 ตามลำดับ (ภาพที่ 1)




**ภาพที่ 1** ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลว

**2. ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (Optical Density: $OD_{560}$)**

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเมื่อเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 99) ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10, 0.15 vvm และชุดควบคุม คือ 0.72±0.04, 0.63±0.02, 0.59±0.01 และ 0.50±0.01 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) และพบว่า ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มลดลง (Phase of Declining Relative Growht) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารอาหารที่ลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

**ตารางที่ 1** ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย มวลชีวภาพของสาหร่าย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และปริมาณไขมันของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10, 0.15 vvm และชุดควบคุม (control)

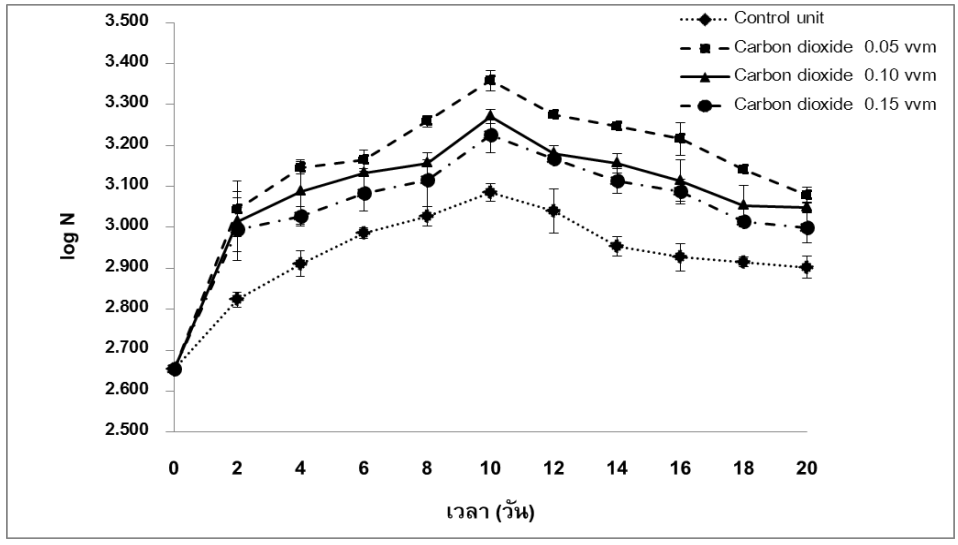
| | $CO_2$ flow rates | | | |
|---|---|---|---|---|
| **parameter** | **control** | **0.05 vvm** | **0.10 vvm** | **0.15 vvm** |
| $OD_{max}$ | 0.50±0.01C | 0.72±0.04C | 0.63±0.02A | 0.59±0.01B |
| Algae $biomass_{max}$ (mg/L) | 1,216.67±57.74C | 2,283.33±125.83A | 1,866.67±76.38B | 1,683.33±160.73B |
| $\mu_{max}$ ($d^{-1}$) | 0.20±0.02B | 0.45±0.08A | 0.42±0.08A | 0.39±0.09A |
| Efficiency of $CO_2$ reducing (%) | - | 94.66±1.76A | 92.67±1.98AB | 91.70±2.02B |
| Lipid content | 9.20±0.52B | 10.88±0.68A | 10.18±0.28AB | 9.68±0.19AB |

**หมายเหตุ:** ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (A, B และ C) ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ด้วยวิธี Tukey simultaneous

**3. ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate:$\mu$)**

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่อัตราการไหล 0.05, 0.10, 0.15 vvm และชุดควบคุม คือ 0.45±0.08, 0.42±0.08, 0.39±0.09 และ 0.20±0.02 ต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

เมื่อพล็อตหาค่าความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ระหว่างค่า log N และเวลา พบว่าในทุกชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าชุดควบคุม โดยมีการเจริญเติบโตสูงที่สุดในวันที่ 10 แต่หลังจากนั้นสาหร่ายจะเข้าสู่ระยะหยุดการเจริญเติบโต ทำให้การเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย (ค่า log N) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 2) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบ Batch Culture สาหร่ายจะใช้สารอาหารที่มีอยู่ในอาหารตั้งต้นในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงเวลาแรกๆ แต่เมื่อระยะผ่านไปทำให้สารอาหารเริ่มหมดไป ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลง ดังนั้นควรทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบ Continuous Culture ซึ่งเป็นการเติมสารอาหารเข้าสู่ถังไบโอรีแอคเตอร์ตลอดเวลาเพื่อให้มีอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน




**ภาพที่ 2** ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp.

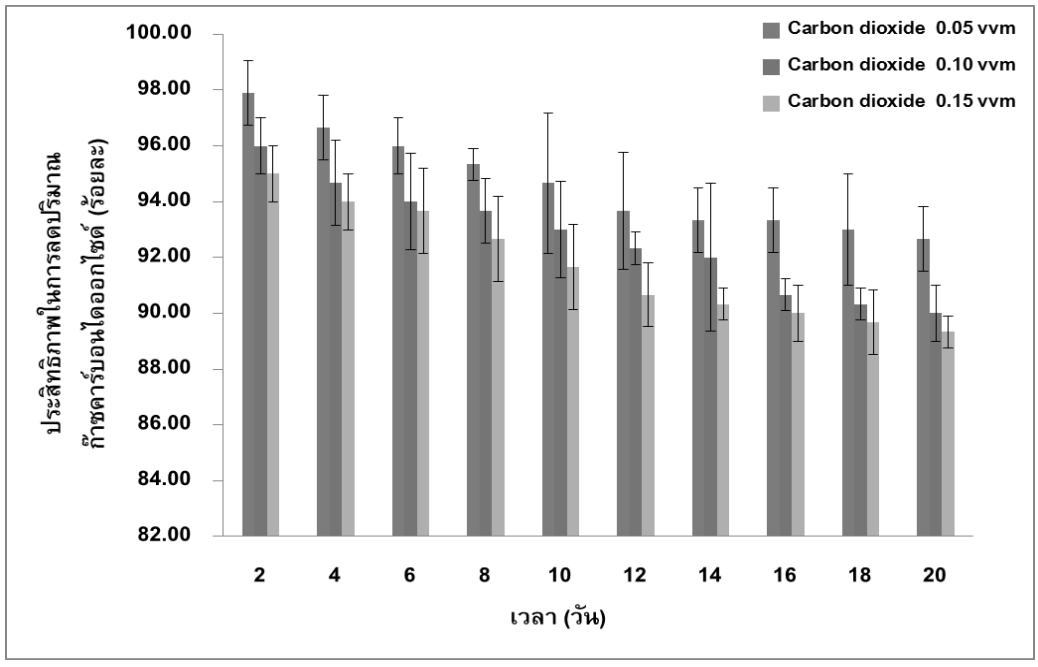
**4. ค่ามวลชีวภาพของสาหร่าย (Algae Biomass)**

จากการศึกษา ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่ามวลชีวภาพของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า มวลชีวภาพของสาหร่ายสูงสุดของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10, 0.15 vvm และชุดควบคุม คือ 2,283.33±125.83, 1,866.67±76.38, 1,683.33±160.33 และ 1,216.67±57.74 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

จากตารางที่ 1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีประสิทธิภาพดีที่สุด พบว่า เมื่อสาหร่ายมีการเจริญเติบโตเต็มที่จะเกิดการสังเคราะห์แสงได้ดี ส่งผลให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

**5. ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Reducing Carbon Dioxide) และปริมาณไขมัน (Lipid Content) ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.**

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า ชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ร้อยละ 94.66±1.76, 92.68±1.98 และ 91.70±2.02 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 2 คือ ร้อยละ 97.90±1.15, 96.00±1.00 และ 95.00±1.00 ตามลำดับ (ภาพที่ 3) ส่วนการศึกษาปริมาณไขมันของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า ชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10, 0.15 vvm และชุดควบคุม มีการผลิตไขมันเฉลี่ยที่ 10.88±0.68, 10.18±0.28, 9.68±0.19 และ 9.20±0.52 ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 1)




**ภาพที่ 3** ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

## สรุปและอภิปรายผล

1. ผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลว พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างมีผลต่อการเจริญเติบโต และมวลชีวภาพของสาหร่าย โดยในชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm มีค่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและมีมวลสาหร่ายมากกว่าชุดควบคุม และในชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05 vvm พบว่าในวันที่ 10 สาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีมวลชีวภาพของสาหร่ายมากที่สุด และค่าความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 6.77$\pm$0.025 ถึง 7.29$\pm$0.02 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาหร่าย *Scenedesmus* sp. เจริญเติบโตได้ดีที่มีสภาวะความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 6.77$\pm$0.02 ถึง 7.29$\pm$0.02 โดยทั่วไปสาหร่าย *Scenedesmus* sp. สามารถเจริญเติบโตอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรดด่างเป็นกลาง ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายบางสายพันธุ์ เช่น *Scenedesmus obliques* คือ 7.00 [16] และอยู่ระหว่าง 5.33-7.08 [17] สาหร่าย *Scenedesmus quadricauda* คือ 7.00 [18] และสาหร่าย *Scenedesmus* sp. R-16 คือ 7.00 [19]

2. ผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีแนวโน้มลดลง จากรายงานวิจัยของ Hanagata et al. [20] พบว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าร้อยละ 60 สาหร่าย *Scenedesmus* sp. จะไม่ค่อยเจริญเติบโต ดังนั้นการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp. สูงที่สุด จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง

3. ผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกันมีผลต่อค่ามวล

ชีวภาพของสาหร่าย และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า อัตราการไหล 0.05 vvm การเจริญเติบโตของสาหร่ายดีกว่าที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm อาจเป็นเพราะว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไปทำให้สาหร่ายไม่สามารถปรับตัวได้ จากรายงานวิจัยของธราดล ภิรมย์ชาติ [21] พบว่า การให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ สาหร่ายไม่มีการเติบโตเพิ่มขึ้นจากวันแรกที่ทำการเพาะเลี้ยง ซึ่งผู้วิจัยได้ให้ความเห็นไว้ว่าอาจเกิดการยับยั้งการเติบโต เนื่องมาจากสาหร่ายได้รับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาก และอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05 vvm เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้มีมวลชีวภาพของสาหร่ายสูงสุด สอดคล้องกับจากรายงานวิจัยของพัชริดา จันทรมณี และคณะ [22] พบว่า เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 98 เป็นแหล่งคาร์บอนให้กับสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* สามารถเจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็ว มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.519 ต่อวัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. และจากงานวิจัยของ Tongprawhan et al. [23] เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพร้อยละ 50 อัตราการไหล 0.01 vvm พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus armatus* TISTR 8653 มีอัตราการเจริญเติบโตในชุดการทดลองดีกว่าชุดควบคุม โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.317 ต่อวัน และ 0.053 ต่อวัน ตามลำดับ จากรายงานวิจัยของ Shivhare et al. [24] พบว่า ค่ามวลชีวภาพของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* เพิ่มขึ้นจาก 5,241 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 14,224 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนเติมและหลังเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ Nayak et al. [25] ได้ศึกษาถึงการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพของสาหร่าย *Scenedesmus* IMMTCC-6 เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99.90 ที่อัตราการไหล 0.20 vvvm พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus* IMMTCC-6 มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.42 ต่อวัน และมวลชีวภาพของสาหร่ายอยู่ที่ 71.70 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน มากกว่าชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.23 ต่อวัน และมวลชีวภาพของสาหร่ายอยู่ที่ 16.10 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนรายงานวิจัยของ Ho et al. [26] พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus obliquus* CNW-N เจริญเติบโตได้เร็วโดยที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 ในสภาวะที่ขาดไนโตรเจน และยังพบว่ามีปริมาณการผลิตมวลชีวภาพของสาหร่ายอยู่ที่ 292.50 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 1.19 ต่อวัน ส่วนงานการวิจัยของ Toledo-Cervantes et al. [12] พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus obtusiusculus* เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5 และ 10 ที่อัตราการไหล 0.40 vvm พบว่า มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายอยู่ที่ 0.37 ต่อวัน และ 0.38 ต่อวัน ตามลำดับ และมวลชีวภาพของสาหร่ายอยู่ที่ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 5,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนรายงานวิจัยของ Al-Shatri et al. [27] พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 50 ที่อัตราการไหล 1.50 vvm มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะถึง 0.105 ต่อวัน และมีมวลชีวภาพของสาหร่ายมากถึง 1,406 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมากกว่างานวิจัยของ Al-Shatri et al. [27] และงานวิจัยของ Toledo-Cervantes et al. [12] อาจเป็นเพราะว่ามีการเติมก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันออกไป และค่าความเป็นกรดด่างส่งผลต่อการเจริญเติบโต ซึ่งงานวิจัยของ Al-Shatri et al. [27] และ Toledo-Cervantes et al. [12] ควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง และสูตรอาหารที่เลี้ยงก็แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ใช้สูตรอาหาร Jawork's medium (JM) ส่วน Al-Shatri et al. [27] ใช้สูตรอาหาร Bold's basal medium (BBM) และ Toledo-Cervantes et al. [12] ใช้สูตรอาหาร BG-11 สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้น จะต้องมีองค์ประกอบต่างๆ กัน เช่น สายพันธุ์สาหร่าย ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ อุณหภูมิ ความเข้มของแสง รวมไปถึงองค์ประกอบของถังไบโอรีแอคเตอร์

4. ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ทุกสายพันธุ์มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งบางสายพันธุ์ เช่น *Scenedesmus obliquus* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึงร้อยละ 67 [28], 92 [29] และ 28.08 [30] แสดงว่าสาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีศักยภาพในการที่จะลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการใช้สาหร่ายดังกล่าว จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป ส่วนการศึกษาปริมาณไขมันของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันส่งผลให้สาหร่าย มีการผลิตปริมาณไขมันแตกต่าง อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีปริมาณไขมันมากที่สุด แต่ปริมาณไขมันทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามปริมาณไขมันของสาหร่ายอาจมาจากสายพันธุ์ของสาหร่าย และผลการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการสะสมของปริมาณไขมัน ซึ่งดูจากอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว แต่สาหร่ายมีการสะสมไขมันภายในเซลล์น้อย ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการสะสมปริมาณไขมันของสาหร่าย จะต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ต้องมีองค์ประกอบต่างๆ กัน เช่น สายพันธุ์ของสาหร่าย ความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ อุณหภูมิ ความเข้มของแสงรวมไปถึงองค์ประกอบของถังไบโอรีแอคเตอร์ [7] จะเห็นได้ว่าสาหร่ายนอกจากจะมีประโยชน์ในด้านอาหาร ยารักษาโรค พลังงานและผลิตไบโอดีเซลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งแล้วยังสามารถใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นการช่วยลดโลกร้อนอีกทางหนึ่ง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

**เอกสารอ้างอิง**


[1] รัตนภรณ์ ลีสิงห์. (2554). จากสาหร่ายขนาดเล็กสู่เชื้อเพลิงชีวภาพ : โอกาสและความท้าทาย. *ว.วิทย. มข.* 39(3): 34-349.

[2] Wang, B., Y. Li, N. Wu and C.Q. Lan. (2008). Mimi-review $CO_2$ bio-mitigation using microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol*. 7: 707–718.

[3] รัตนภรณ์ ลีสิงห์. (2550). ไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก. *ว.วิทย. มข.* 35(3): 135-143.

[4] นุชนาถ แช่มช้อย. (2557). สาหร่ายขนาดเล็ก : การเพาะเลี้ยงและการนำมาใช้ประโยชน์. *วารสารมฉก. วิชาการ*. 17(34): 169-183.

[5] พนิดา รัตนพลที; และ ผกาวดี แก้วกันเนตร. (2551). ศักยภาพการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก. *วารสารศูนย์บริการวิชาการ*. 16(12): 9-13.

[6] ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. (2559). *การผลิตไบโอดีเซล*. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2559, จาก http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/biodesel.html

[7] ผกาวดี แก้วกันเนตร; พรเทพ ถนนแก้ว; และ ฒาลิศา ยุอมรพิทักษ์. (2553). *การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบปิด/ระบบเปิดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกในการผลิตพลังงานทดแทนไบโอดีเซลที่ยั่งยืน*. รายงานวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

[8] Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 25: 294-306.

[9] Chelf, P. (1990). Environmental control of lipid and biomass production in two diatom species. *J. Appl. Phyco*. 2: 121-129.

[10] ยุวดี พีรพรพิศาล. (2556.) *สาหร่ายน้ำจืดในประเทศไทย*. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: โชตนาพริ้นท์ จำกัด.

[11] Chan, A. (2011). *Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas*. Ph.D. The University of Guelph, Canada.

[12] Toledo-Cervantes, A., M. Morales, E. Novelo; and S. Revah. (2013). Carbon dioxide Fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*. *Bioresource Technology*. 130: 652-658.

[13] Vonshak, A. (1986). *Microalgae : Laboratory Growth Techniques and Outdoor Biomass Production. In Coombs, J., Hall , D.O., Long , S.P. and Scurlock , J.M.O. (eds.)*.Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis. 2nd. Pergamon Press.

[14] Kao, C.-Y., S.-Y. Chiu, T.-T. Huang, L. Dai, L.-K. Hsu; and C.-S. Lin. (2012). Ability of a mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide capture for biogas upgrading. *Applied Energy*. 39: 76-183.

[15] American Public Health Association (APHA), The American Water works Association (AWWA), The Water EnvironmentFederation (WEF). (2005). *Standard Methods for extermination of water and wastewater. 21st edition*. Washington, DC.

[16] Hodaifa, G., M.E. Martinez; and S. Sanchez. (2009). Influence of pH on the culture of *Scenedesmus obliquus* in olive-mill wastewater. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 14: 854-860.

[17] Lane, A.E.; and J.E. Burris. (1981). Effects of environmental pH on the internal pH of Chlorella pyrenoidosa, Scenedesmus quadricauda, and Euglena mutablis. *Plant Physiol*. 68: 439-442.

[18] Morais, M. G. D.; and J.A.V. Costa. (2007). Carbon dioxide fixation by *Cholrella kessleri, C. vulguris, Scenedesmus obiquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. *Biotechnol Lett*. 29: 1349-1352.

[19] Ren, H.-Y., B.-F. Liu, C. Ma, L. Zhao; and N.-Q. Ren. (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.

[20] Hanagata, N., T. Takeuchi, Y. Fukuju, D.J. Barnes; and I. Karube. (1992). Tolerance of Microalgae to high $CO_2$ and high temperature. *Phytochemistry*. 31: 3345-3348.

[21] ธราดล ภิรมย์ชาติ. (2545). *การออกแบบและทดสอบถังเลี้ยงสาหร่าย Baffled Bobble Photobioreactor เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[22] พัชริดา จันทรมณี; พัชรี หอวิจิตร; และ Tim C. Keener. (2556). ผลของก๊าซชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตในเซลล์สาหร่าย *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus obliquus*. ใน *เอกสารการสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*. หน้า 9-18. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[23] Tongprawhan, W., S. Srinuanpan; and B. Cheirsilp. (2014). Biocapture of $CO_2$ from biogas by Oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid. *Bioresource Technology*. 170: 90-99.

[24] Shivhare, S., A.K. Mishra, V.K. Sethi; and A.K.S. Bhadoria. (2014). Biomass, growth rate and biochemical analysis of *Scenedesmus obliquus* algae in shahpura lake Bhopal (MP). *International Journal of Advance Research*. 2(4): 1-14.

[25] Nayak, M., S. S. Rath, M. Thir unavoukkarasu, P.K. Panda, B.K. Mishra; and R.C. Mohanty. (2013). Maximizing biomass productivity and $CO_2$ biofixation of microalga, *Scenedesmus* sp. by using sodium hydroxide. *J.Microbiol. Biotechnol*. 23(9): 1260-1268.

[26] Ho, S.-H., W.-M. Chen; and J.-S. Chang. (2010). *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential candidate for $CO_2$ mitigation and biodiesel production. *Bioresource Technology*. 101: 8725-8730.

[27] Al-Shatri, A., E. Ali, N. Al-Shorgani; and M. Sahaid. (2014). Growth of *Scenedesmus dimorphus* in different algal media and pH profile due to secreted metabolites. *African Journal of Biotechnology*. 13(16): 1714-1720.

[28] Li, F.-F., Z. Yang, R. Zeng, G. Yang, X. Chang, J.-B. Yan; and Y.-L. Hou. (2011). Microalgae capture of $CO_2$ from actual flue gas discharged from a combustion chamber. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50(10): 6496-6502.

[29] ครรชิต เงินคำคง. (2559). *การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยจุลสาหร่าย*. ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม). เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[30] Morais, M. G. D.; and J.A.V. Costa. (2007). Biofication of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obiquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactors. *Biotechnology*. 129: 439-445.