



ประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

Efficiency of the Microalgae *Chlorella sp.* TISTR 8432 to CO₂ Capture from Biogas System

ครรชิต เงินคำคง^{1*} นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์¹ สิทธิศักดิ์ แก้วหนัก¹ กฤษณฉัตร เมืองใจ¹ นิตยา ต้นติวา²
นันทน์ภัส มโนนนท์² และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kunchit2516@rmutl.ac.th, 08-6184-7248, 0-5392-1444 ต่อ 2441

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในถังไบโอรีแอกเตอร์ปริมาตร 5 ลิตร ด้วยอาหารสูตร JM ที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ หลังจากการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 16 วัน ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm การเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.589 ± 0.11 ต่อวัน และมวลสาหร่ายสูงสุด $2,800 \pm 100.00$ มก./ล. ประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ $97.48 \pm 0.31\%$ สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบมีปริมาณมีเทนสูงขึ้นเป็น $73.57 \pm 0.81\%$ และสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ $21.60 \pm 1.35\%$

คำสำคัญ คลอเรล TISTR 8432 การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซชีวภาพ

Abstract

The purpose of this research was to study the efficiency of microalgae in capturing CO₂ from the desulfurized biogas. *Chlorella sp.* TISTR 8432 was cultivated in working volume 5 liters bioreactor with Jaworski's medium (JM) at 0.05, 0.10 and 0.15 vvm biogas system flow rates, respectively. After 16 days, the results showed that at 0.05 vvm biogas system flow rate, the growth of algae and CO₂ capture efficiency were better than at 0.10 and 0.15 vvm biogas system flow rates with the maximum specific growth rate was 0.589 ± 0.11 day⁻¹, and the biomass productivity was $2,800 \pm 100.00$ mg/L. The maximum CO₂ capture efficiencies was $97.48 \pm 0.31\%$. The CH₄ increased up to $73.57 \pm 0.81\%$ in biogas effluent, and the maximum enrichment of CH₄ was $21.60 \pm 1.35\%$.

Keywords: *Chlorella sp.* TISTR 8432, CO₂ capture, Biogas

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโลก คือ ปัญหาทางด้านภาวะโลกร้อน (global warming) หรือภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (climate change) โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยสาเหตุหลักเกิดจากก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และไดคลอโรไดฟลูโอโรมีเทน (CFC-12) เป็นต้น แต่สาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในชั้นบรรยากาศของโลก การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าว มีสาเหตุสำคัญมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยทั่วไปก๊าซที่เกิดจากการ

เผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 10-20% [1] ซึ่งมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential; GWP) ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้ ถือเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ จึงมีการศึกษาวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ถือว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ใช้ก๊าซ



คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง และเป็นสารอาหารหลัก เพื่อการเติบโตและสร้างมวลสาหร่าย จึงเป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [2] ก๊าซชีวภาพ (biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน โดยทั่วไปจะหมายถึง ก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักของสารอินทรีย์ โดยกระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ และก้นบ่อแหล่งน้ำนิ่ง กล่าวคือ เมื่อไร้ร่ก้ตามที่มีสารอินทรีย์หมักหมมกันเป็นเวลานานก็อาจเกิดก๊าซชีวภาพได้ [3] ก๊าซชีวภาพจัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ประโยชน์ ไม่ว่าจะนำไปใช้งานรูปของพลังงานความร้อน การเปลี่ยนเป็นพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรม ปศุสัตว์ และเกษตรอุตสาหกรรม จึงมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจำนวนมาก ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้เป็นอย่างดี ก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) 50–70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 30–40% ส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ ซึ่งก๊าซมีเทนสามารถจุดติดไฟได้ ใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้ [4] ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หากยังไม่มีการจัดการที่ดี จะทำให้เกิดการสะสมของก๊าซเรือนกระจกเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในบรรยากาศสูงขึ้นตามมา

ดังนั้น ควรหาวิธีลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ หรือการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง [5] โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นผลให้ก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อนสูงขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ ที่เรียกว่า ไบโอมิเทน (biomethane) การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยน้ำ (water scrubbing method) การดูดติดผิวแบบสลับแรงดัน (pressure swing adsorption method) การดักจับด้วยสารเคมี (chemical scrubbing method) และการแยกชั้นด้วยเมมเบรน (membrane separation method) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีจะใช้พลังงานที่สูง และต้องใช้งบลงทุนจำนวนมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น [6] ด้วยเหตุนี้ การศึกษาวิธีปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ สาหร่ายหลายสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เช่น สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึง 97.07% [7] และ 82.50–99% [8] ด้วยกัน ส่วนสาหร่ายสายพันธุ์ *Spirulina maxima* มีประสิทธิภาพในลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 98% [9] จาก

ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายมีศักยภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางในปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ต้นทุนต่ำ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 สารเคมีและวัสดุ

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษาสายพันธุ์ *Chlorella* sp. TISTR 8432 ได้รับมาจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกชนิดเป็น Analytical Reagent (AR)

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายและการเพิ่มปริมาณ

นำหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Jaworski's medium (JM) โดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.5 จำนวน 2% โดยปริมาตร มาถ่ายลงถังขนาด 50 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว ปริมาตร 40 ลิตร เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย โดยให้แสงจากหลอดไฟสีส้ม (warm white light) ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ (4 in 1 Multi-function environmental meter model ST-8820) โดยให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง และเติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศที่อัตราการเติม 30 ลิตรต่ออนาที ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าการดูดกลืนแสง (Optical density : OD_{560}) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer (HACH model DR/4000U; USA) อยู่ในช่วง 0.3–0.5 เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการทดลองขั้นต่อไป

2.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณ CO_2 จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm

2.2.2.1 การเตรียมระบบผลิตก๊าซชีวภาพเตรียมระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังหมักขนาด 200 ลิตร วันแรกเติมน้ำมูลสุกร (หัวเชื้อ) 100 ลิตร ลงในถังหมัก และเติมมูลสุกร 20 ลิตร (โดยชั่งมูลสุกร 800 กรัม ละลายน้ำให้ครบ 20 ลิตร) เติมน้ำลงในถังหมัก และวันที่ 2–5 เตินมูลสุกร 20 ลิตร ทุกวันจนครบ 5 วัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้เกิดก๊าซ และสร้างระบบเก็บก๊าซชีวภาพแบบแทนที่น้ำที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำขนาด 200 ลิตร และถังบรรจุก๊าซขนาด 160 ลิตร ต่อท่อก๊าซจากถังหมักเข้าสู่ถังบรรจุก๊าซเพื่อให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไหลมาเก็บยังถังเก็บ หลังจากนั้นต่อจากถังเก็บเข้าชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำขึ้นมาจากผงซีลิก ($\text{H}_2\text{S} > 100$ ppm) โดยใช้เครื่อง peristaltic pump (Watson marlow model 502S; UK) (รูปที่ 1)

2.2.2.2 นำหัวเชื้อสาหร่ายที่ได้จากข้อ 2.2.1 มาถ่ายลงในถังไบโอรีแอกเตอร์ขนาด 10 ลิตร ปริมาตรทำการ 5 ลิตร



(ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) มาทำการศึกษา โดยเติมก๊าซชีวภาพจากถังเก็บที่อัตราการไหล 0.05 vvm ตลอดเวลาการทดลอง โดยใช้เครื่อง peristaltic pump ในการดูจ่ายปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยให้แสงไฟจากหลอดไฟสีส้ม ค่าความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ และให้อากาศจากปั๊มเติมอากาศที่อัตราการเติม 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 วัน และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วัน หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำเติมและเปลี่ยนอัตราการเติมก๊าซชีวภาพจาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.15 vvm โดยทำการวิเคราะห์ดังนี้

1) การเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปค่ามวลสาหร่าย [10] และในรูปอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate; μ) โดยนำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณ เพื่อคำนวณอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1 [11]

$$\mu = \ln(N/N_0) / t \quad (1)$$

เมื่อ

- μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (วัน⁻¹)
- N = มวลสาหร่ายวันเก็บตัวอย่าง (มก./ล.)
- N₀ = มวลสาหร่ายเริ่มต้น (มก./ล.)
- t = เวลา (วัน)

2) ค่าความเป็นกรดต่าง โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (ohaus model starter 3100; USA)

3) ศึกษาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 โดยวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าถัง และหลังจากออกจากถังไบโอรีแอกเตอร์ โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ (geotech model Biogas 5000; UK) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 คำนวณได้จากสมการที่ 2 [12]

$$CO_2 \text{ capture efficiency (\%)} = \frac{\text{Influent of } CO_2 - \text{Effluent of } CO_2}{\text{Influent of } CO_2} \times 100 \quad (2)$$

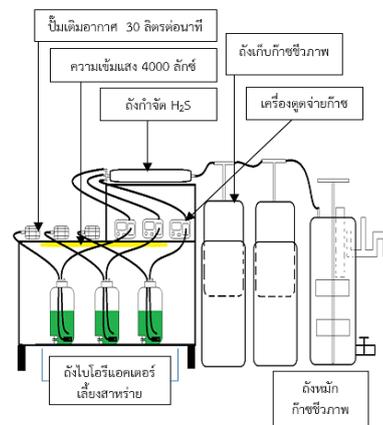
4) เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3 [12]

$$CH_4 \text{ enrichment (\%)} = \frac{\text{Influent of } CH_4 - \text{Effluent of } CH_4}{\text{Influent of } CH_4} \times 100 \quad (3)$$

3. ผลการทดลองและอภิปราย

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm

ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm สาหร่ายเจริญได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ชุดทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ โดยมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.82 ± 0.06-7.40 ± 0.00, 6.42 ± 0.06-7.40 ± 0.00 และ 6.30 ± 0.05-7.40 ± 0.00 ตามลำดับ (รูปที่ 2) โดยค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.589 ± 0.11, 0.405 ± 0.00 และ 0.347 ± 0.00 ต่อวัน ตามลำดับ (รูปที่ 3) มีมวลสาหร่ายสูงสุด 2,800 ± 100.00, 2,100 ± 100.00 และ 1,300 ± 100.00 มก./ล. ตามลำดับ (รูปที่ 4) ส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.15 vvm ในวันแรกๆ ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าลดต่ำลงมาก เป็นเพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่เติมลงไปมีปริมาณมาก ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดต่ำลง เมื่อสาหร่ายปรับตัว (lag phase) เข้ากับสภาวะได้และเข้าสู่ช่วงเจริญเติบโต (exponential phase) จึงมีความต้องการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง เมื่อสาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์หมดไปสาหร่ายจะดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) มาเป็นคาร์บอเนต (CO₃⁻) และไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าความเป็นกรดต่างค่อยๆ เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ทำการศึกษถึงผลของการเติมก๊าซชีวภาพลงในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. MM-2 พบว่าเมื่อเติมก๊าซชีวภาพลงไปค่าความเป็นกรดต่างลดลงจาก 8.50 มาอยู่ที่ 6.50 เมื่อหยุดเติมค่าความเป็นกรดต่างค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น [12] ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. MTF-7 เมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพลงไปค่าความเป็นกรดต่างลดลงจากช่วง 7.90-8.20 มาอยู่ที่ 6.30-6.50 [13] และสาหร่าย *Spirulina platensis* เมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพลงไปพบว่าค่าความเป็นกรดต่างลดลงจาก 9.60 มาอยู่ที่ 7.00 [14]

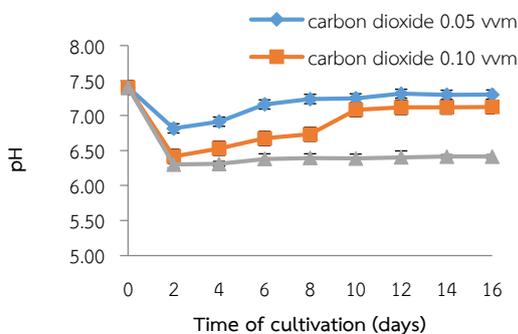


รูปที่ 1 แผนภาพอธิบายขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

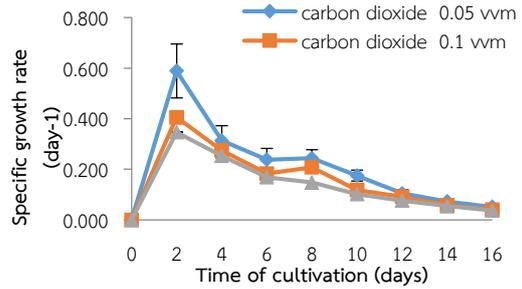


จากการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง และมวลสาหร่ายในชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพในอัตราคาร์บอนไดออกไซด์ 0.05 vvm พบว่าในวันที่ 8 สำหรับ *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีมวลสาหร่ายมากที่สุด และค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 7.24 ± 0.02 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 เจริญเติบโตได้ดีที่มีสภาวะความเป็นกรดต่างที่ 7.24 ± 0.02 โดยทั่วไป สำหรับ *Chlorella* sp. เติบโตได้ดีในค่าความเป็นกรดต่างช่วงกว้าง และสามารถเติบโตในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่มีสภาวะเป็นกรดเล็กน้อยจนถึงกลาง ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายบางสายพันธุ์ เช่น *Chlorella vulgaris* คือ 6.30 [15] สำหรับ *Chlorella homishpaera* คือ 6.70 [16] และสำหรับ *Chlorella minutissima* คือ 6.00 [18]

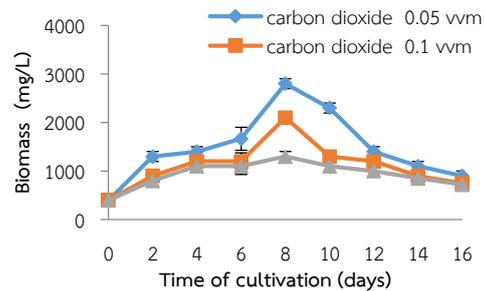
จากการศึกษา พบว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราคาร์บอนไดออกไซด์ 0.05 vvm มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราคาร์บอนไดออกไซด์ 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ และทุกชุดการทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดในวันที่ 2 แสดงว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในทุกชุดการทดลองมีการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ จึงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีการเจริญเติบโตได้ดีเมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(N/N_0)$ กับค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 (รูปที่ 5) พบว่าการเติมก๊าซชีวภาพลงไปในนั้นทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นสาหร่ายจะเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตช้าลง และเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตหยุดนิ่งทำให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและค่า $\ln(N/N_0)$ ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารอาหารที่ลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย



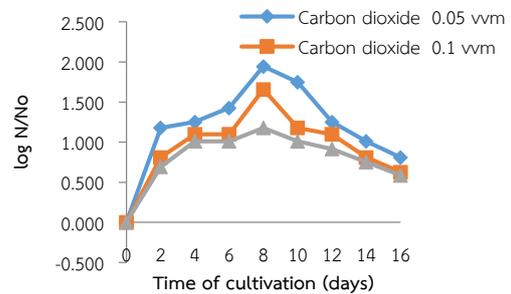
รูปที่ 2 ผลของก๊าซชีวภาพต่อค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



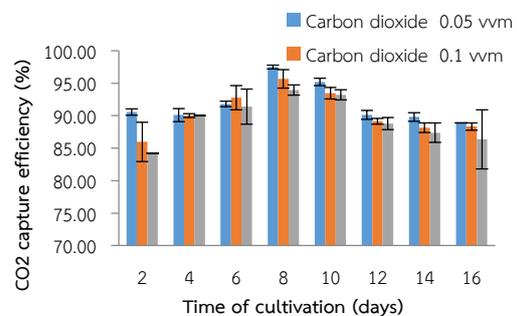
รูปที่ 3 ผลของก๊าซชีวภาพต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



รูปที่ 4 ผลของก๊าซชีวภาพต่อมวลสาหร่าย (Biomass) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลของก๊าซชีวภาพที่อัตราคาร์บอนไดออกไซด์ต่างกันต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการลดของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนก๊าซมีเทน และผลของก๊าซชีวภาพต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432

Gas flow rate	0.05 vvm	0.10 vvm	0.15 vvm
Influent of CO ₂ (%)	18.50 ± 1.15	18.50 ± 0.41	18.20 ± 0.22
Effluent of CO ₂ (%)	0.47 ± 0.06	0.80 ± 0.26	1.10 ± 0.17
Efficiency of maximum CO ₂ capture (%)	97.48 ± 0.31 ^a	95.68 ± 1.43 ^b	93.96 ± 0.95 ^b
Influent of CH ₄ (%)	60.50 ± 0.50 ^a	63.00 ± 1.00 ^b	62.67 ± 1.70 ^b
Effluent of maximum CH ₄ (%)	73.57 ± 0.81 ^b	72.33 ± 0.58 ^b	68.33 ± 0.58 ^a
Enrichment of maximum CH ₄ (%)	21.60 ± 1.35 ^a	14.81 ± 0.92 ^b	9.04 ± 0.92 ^c
Maximum specific growth rate (day ⁻¹)	0.589 ± 0.11 ^a	0.405 ± 0.00 ^b	0.347 ± 0.00 ^c

หมายเหตุ: อักษร a, b และ c ที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05) โดยวิธี Tukey and Duncan

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนในอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm

	Time of cultivation (days)							
	2	4	6	8	10	12	14	16
Gas flow rate 0.05 vvm								
Influent of CO ₂ (%)	21.20 ± 1.14	19.80 ± 1.51	18.50 ± 2.31	18.50 ± 1.15	21.10 ± 1.50	16.50 ± 1.54	14.70 ± 0.80	9.00 ± 1.18
Effluent of CO ₂ (%)	2.00 ± 1.00	1.97 ± 0.21	1.53 ± 0.06	0.47 ± 0.06	0.97 ± 0.12	1.63 ± 0.12	1.50 ± 0.10	1.00 ± 0.00
Efficiency of CO ₂ mitigation (%)	90.57 ± 0.47	90.07 ± 1.05	91.81 ± 0.42	97.48 ± 0.31	95.42 ± 0.55	90.10 ± 0.70	89.80 ± 0.68	88.89 ± 0.00
Influent of CH ₄ (%)	40.00 ± 0.25	60.70 ± 1.25	61.70 ± 0.26	60.50 ± 0.50	57.50 ± 0.70	41.40 ± 1.97	39.70 ± 1.47	25.40 ± 1.22
Effluent of CH ₄ (%)	43.00 ± 1.00	66.87 ± 0.55	71.20 ± 0.82	73.57 ± 0.81	64.50 ± 1.30	45.30 ± 0.75	42.83 ± 1.40	27.40 ± 0.75
Enrichment of CH ₄ (%)	7.50 ± 2.50	9.83 ± 1.83	15.40 ± 1.33	21.60 ± 1.35	12.17 ± 2.26	9.42 ± 1.82	7.84 ± 3.54	7.87 ± 2.97
Gas flow rate 0.10 vvm								
Influent of CO ₂ (%)	19.00 ± 0.82	19.67 ± 0.47	19.33 ± 0.47	18.50 ± 0.41	19.87 ± 0.26	16.13 ± 0.26	13.50 ± 0.51	10.00 ± 0.15
Effluent of CO ₂ (%)	2.67 ± 0.58	1.97 ± 0.06	1.40 ± 0.36	0.80 ± 0.26	1.30 ± 0.17	1.77 ± 0.06	1.60 ± 0.10	1.17 ± 0.06
Efficiency of CO ₂ mitigation (%)	85.96 ± 3.04	90.00 ± 0.29	92.76 ± 1.87	95.68 ± 1.43	93.46 ± 0.87	89.05 ± 0.36	88.15 ± 0.74	88.33 ± 0.58
Influent of CH ₄ (%)	42.17 ± 3.01	57.00 ± 4.36	62.67 ± 1.70	63.00 ± 1.00	62.67 ± 0.47	40.30 ± 0.98	39.00 ± 0.10	26.00 ± 1.12
Effluent of CH ₄ (%)	43.33 ± 0.58	62.00 ± 1.00	70.00 ± 2.08	72.33 ± 0.58	71.47 ± 0.50	45.30 ± 0.75	41.67 ± 0.58	27.33 ± 0.58
Enrichment of CH ₄ (%)	2.76 ± 1.37	8.77 ± 1.75	11.16 ± 3.32	14.81 ± 0.92	14.04 ± 0.80	12.41 ± 1.87	6.84 ± 1.48	5.13 ± 2.22
Gas flow rate 0.15 vvm								
Influent of CO ₂ (%)	19.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00	19.67 ± 1.25	18.20 ± 0.22	19.67 ± 0.47	16.33 ± 0.47	14.00 ± 0.65	11.00 ± 0.75
Effluent of CO ₂ (%)	3.00 ± 0.00	2.00 ± 0.20	1.67 ± 0.58	1.10 ± 0.17	1.30 ± 0.17	1.83 ± 0.15	1.77 ± 0.21	1.50 ± 0.50
Efficiency of CO ₂ mitigation (%)	84.21 ± 0.00	90.00 ± 0.00	91.53 ± 2.94	93.96 ± 0.95	93.39 ± 0.88	88.77 ± 0.94	87.38 ± 1.49	86.36 ± 4.55
Influent of CH ₄ (%)	42.00 ± 1.00	56.00 ± 3.61	62.67 ± 0.94	62.67 ± 1.70	62.00 ± 1.00	40.47 ± 0.81	38.00 ± 0.55	25.00 ± 0.92
Effluent of CH ₄ (%)	43.67 ± 0.58	58.00 ± 1.00	68.00 ± 1.53	68.33 ± 0.58	62.33 ± 0.58	43.67 ± 1.53	40.33 ± 1.73	25.67 ± 0.58
Enrichment of CH ₄ (%)	3.97 ± 1.37	3.57 ± 1.79	9.04 ± 2.44	9.04 ± 0.92	0.54 ± 0.93	7.90 ± 3.77	5.26 ± 4.56	2.67 ± 2.30

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 6 และ ตารางที่ 1 และ 2) ผลการศึกษา พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีประสิทธิภาพที่สุด

รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 97.48 ± 0.31, 95.68 ± 1.43 และ 93.96 ± 0.95% ตามลำดับ สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบมีปริมาณก๊าซ



มีเทนสูงขึ้นเป็น 73.57 ± 0.81 , 72.33 ± 0.58 และ $68.33 \pm 0.58\%$ ตามลำดับ และสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 21.60 ± 1.35 , 14.81 ± 0.92 และ $9.04 \pm 0.92\%$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีประสิทธิภาพดีที่สุดพบว่า เมื่อสาหร่ายมีการเจริญเติบโตเต็มที่ จะเกิดการสังเคราะห์แสงได้ดี ส่งผลให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงขึ้น โดยพบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ระหว่าง 88.89 ± 0.00 - $97.48 \pm 0.31\%$ ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงขึ้น โดยพบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ระหว่าง 88.89 ± 0.00 - $97.48 \pm 0.31\%$ ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

4. สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน พบว่าผลของอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีอัตราการเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 80% ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากเดิม 70% เป็น 87% โดยมีอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.1 vvm และเมื่อเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.3 vvm สาหร่าย *Chlorella* sp. MM-2 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดถึง 74% ปริมาณก๊าซมีเทน เพิ่มขึ้นสูงสุด 85.5% [12] สาหร่าย *Chlorella* sp. MB-9 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 86.3% และมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 85-90% โดยมีอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm และเมื่อเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. MB-9 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 80.3% และมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นสูงสุด 88.3% เมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหลมากขึ้นประสิทธิภาพในลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนจะลดลง [21] จากการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ค่อยๆ ลดลง เนื่องจากปริมาณสารอาหารเริ่มลดลงในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และ

ประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 สอดคล้องกับ รายงานวิจัยของ Chan (2011) ที่สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 98% และรายงานวิจัยของ Kao *et al.*, (2012) สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 86.3% เมื่อใช้อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm เท่ากัน แสดงว่าอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหลเท่ากัน แต่ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับได้ผลที่ต่างกัน อาจเป็นเพราะว่าปัจจัยอื่น เช่น สายพันธุ์สาหร่าย ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ และองค์ประกอบของถังไบโอรีแอคเตอร์ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสภาพอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ จึงทำให้การทดลองมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายดังกล่าว จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนการสนับสนุนจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์และงานบริการสู่ชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Xinahai, Z., Micchael, K.D., Shiduo, Z., Xia, Z., Mengyang, W., Xiao, D.C., I-Son, N., Keju, J. and Yinghua, L. (2012). Autotrophic cultivation of *Spirulina patensis* for CO₂ fixation and phycocyanin production, *Chemical Engineering*, vol. 183, December 2011, pp. 192-197.
- [2] Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources, *Energy Conversion and Management*, vol. 51, December 2010, pp. 2738-2749.
- [3] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม (2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [4] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2556). *เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ และการนำไปใช้ประโยชน์*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา



- http://biogas.erdil.or.th/biogasTech_sub_adv.php.
 เข้าดูเมื่อวันที่ 3/09/2556.
- [5] นุชนาถ แซ่ม้อย (2557). สำหรับรายขนาดเล็ก : การเพาะเลี้ยงและการนำมาใช้ประโยชน์, *วารสาร มฉก. วิชาการ*, 17(34), มก-มย. 2557, หน้า 169-183.
- [6] Zhao, Q., E. Leonhardt, C. MacConnell, C. Frear and S. Chen. (2010). Purification technologies for biogas generated by anaerobic digestion, *CSANR Research Report 2010*.
- [7] Mann, G., Schlegel, M. Schumann, R. and Sakalauskas, A. (2009). Biogas-condition with Microalgae, *Agronomy Research*, vol. 7(1), pp. 33-38.
- [8] 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*, vol. 14, February 2013, pp. 169-176.
- [9] Chan, A. (2011). Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas. Ph.D. The University of Guelph, Canada. 136p.
- [10] Toledo-Cervantes, A, Morales, M., Novelo, E. and Revah, S. (2013). Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*, *Bioresource Technology*, vol. 130, December 2012, pp. 652-658.
- [11] 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.
- [12] Kao, C-Y., Chiu, S-Y., Huang, T-T., Dai, L., Hsu L-K. and Lin, C-S. (2012). Ability of a mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide capture for biogas upgrading, *Applied Energy*, vol. 39, January 2012, pp. 76-183.
- [13] 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 carbondioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures, *Bioresource Technology*, vol. 102, July 2011, pp. 9135-9142.
- [14] Sumardiono, S., Yono, B., Syaichurrozi, I. and Sasongko, S.B. (2014). Utilization of biogas as carbon dioxide provider for *Spirulina platensis* culture, *Biological Sciences*, vol. 6(1), January 2014, pp. 53-59.
- [15] Malis-Arad, S. and McGowan, R. E. (1982). Alkalinity-induced aggregation in *Chlorella vulgaris* II changes in the cell wall during the cell cycle, *Plant and Cell Physiology*, vol. 23(1), September 1982, pp. 11-17.
- [16] ผกาวดี แก้วกันเนตร และพนิดา รัตน์พลที (2551). ศักยภาพการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก, *วารสารศูนย์บริการวิชาการ*, 16(1), มกราคม 2551, หน้า 9-13.
- [17] Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture, biotechnology and applied phycology*, USA : Blackwell Publishing.
- [18] Sankar, V., Daniel, D.K. and Krastanov, A. (2011). Carbon dioxide fixation by *Chlorella minutissima* batch cultures in a stirred tank bioreactor, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, vol. 25(3), April 2014, pp. 2468-2476.
- [19] 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*, vol. 49(5), February 2015, pp. 3228-3244.
- [20] Tongprawhan, W., Srinuanpan, S. and Cheirsilp, B. (2014). Biocapture of CO₂ from biogas by Oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid, *Bioresource Technology*, vol. 170, August 2014 pp. 90-99.



- [21] Kao, C-Y., Chiu, S-Y., Huang, T-T., Dai, L., Wang, G-H., Tseng, C-P., Chen, C-H. and Lin, C-S. (2012). A mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. for the carbon dioxide capture from biogas, *Biomass and Bioenergy*, vol. 36, November 2011, pp. 132-140.