http://journal.rmutp.ac.th/

ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

ครรชิต เงินคำคง[1]* นิธิวัฒ จำรูญรัตน์[1] จิรายุ หมูคำ[1] ณัฐพงศ์ กันศรี[1] ณัฐพล วงค์ขัติ[1] นันท์นภัส เงินคำคง[2] และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์[2]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

[2] คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[1] เลขที่ 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

[2] เลขที่ 155 หมู่ 2 ตำบลแม่เหียะ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

รับบทความ 5 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 24 กรกฎาคม 2563 ตอบรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อโลก ปัจจุบันการใช้กระบวนการทางชีวภาพเพื่อกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสัญญาณที่ดีในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นชีวมวลในกระบวนการสังเคราะห์แสง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายในการกักเก็บคาร์บอน และผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเจริญของสาหร่าย การศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการเลือกสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอาหารเหลวสูตรซารุค ในถังปฏิกิริยาขนาด 8 ลิตร โดยให้แสงธรรมชาติ และให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ตามลำดับ เป็นเวลา 30 วัน ผลการศึกษา พบว่าสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01 vvm มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.35±0.01 ต่อวัน ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย 0.85±0.00 ค่ามวลสาหร่ายแห้ง 600.00±10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 96.83±0.76 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1,128.00±10.00 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ค่าภาระบรรทุกคาร์บอน 20.41±0.26 กรัมต่อวัน และค่าการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน อยู่ที่ร้อยละ 3.15.±0.02, 3.11.±0.02 และ 3.07.±0.06 ที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ตามลำดับ

คำสำคัญ : การกักเก็บคาร์บอน; การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; สาหร่ายสไปรูลิน่า RMUTL

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6184 7248, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kunchit2516@hotmail.com*

http://journal.rmutp.ac.th/

CO_2 Sequestration Efficiency by *Spirulina* sp. RMUTL

Khanchit Ngoenkhamkhong[1]* Nithiwat Jumroonrat[1] Jirayu Mookam[1] Nattapong Kansri[1] Nuttapon Wongkhat[1] Nannaphat Ngoenkhamkhong[2] and Phisit Seesuriyachan[2]

[1] Faculty of Engineering, Rajamagala University of Thecnology Lanna

[2] Faculty of Agro-Industy, Chiang Mai University

[1] 128 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai 50300

[2] 155 Mae-Hea, Mueang, Chiang Mai 50100

Received 5 June 2020; Revised 24 July 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

Increasing concentrations of CO_2 in the atmosphere is causing severe environmental destruction to the earth. Bio-sequestration of CO_2 is a promising way to completely sequester CO_2 by converting it into biomass by way of photosynthesis. The current research focused on biomass productivity and CO_2 sequestration efficiency using microalgae. The experiment choose *Spirulina* sp. RMUTL by cultivating in working volume 8 liters bioreactor with zarrouk's medium for 24-hrs with light nature and aeration air. The CO_2 (100%) was flushed into the medium with a flow rate were 0.01, 0.02 and 0.03 vvm respectively. The period of all experiments were 30 days. The results showed that the maximum specific growth rate, OD_{560}, algae biomass productivity, efficiency of CO_2 reduction, CO_2 fixation rate and carbon loading rate were 0.35±0.01 d^{-1}, 0.85±0.00, 600.00±10.00 $mg.L^{-1}$, 96.83±0.76%, 1,128.00±18.80 $mg.L^{-1}.d^{-1}$ and 20.41±0.26 g. d^{-1} with 0.01 vvm CO_2 flow rate. The average CO_2 sequestration over 30 days were 3.15.±0.03, 3.11.±0.02 and 3.07.±0.07% in 0.01, 0.02 and 0.03 vvm CO_2 flow rate respectively.

Keywords : CO_2 Sequestration; Carbon Dioxide Reduction; *Spirulina* sp. RMUTL

** Corresponding Author. Tel.: +668 6184 7248, E-mail Address: Kunchit2516@hotmail.com*

1. บทนำ

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันมีสาเหตุมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งเป็นตัวเร่งสำคัญที่ก่อให้เกิดการสั่งสมของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศทำให้ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกและความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้นในทุกภูมิภาคของโลก อาทิ อุณหภูมิเฉลี่ยที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในฤดูน้ำหลาก และน้อยลงในฤดูน้ำแล้ง จำนวนวันที่อากาศร้อนเพิ่มมากขึ้นและจำนวนวันที่อากาศเย็นลดลง โดยส่งผลให้เกิดภัยธรรมชาติ เช่น อุทกภัย ภัยแล้ง และวาตภัย ที่รุนแรงและบ่อยครั้งขึ้น เป็นต้น ซึ่งกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในหลายสาขา รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ ชนิดพันธุ์พืช ชนิดพันธุ์สัตว์ การย้ายถิ่นฐานของประชากร และการแพร่กระจายของโรค โดยเฉพาะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [1] ซึ่งรายงานของคณะกรรมาธิการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) ได้ระบุให้เป็นภูมิภาคที่มีความเปราะบางสูงต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือภาวะโลกร้อน (Global Warming) และปัญหานี้นับวันทวีความรุนแรงมากขึ้น ทั้งในแง่พื้นที่ สภาพอากาศที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวันของประชาชน และผลลัพธ์ที่ตามมาซึ่งอาจยากจะฟื้นกลับคืนมา หลายชาติทั่วโลกและประเทศไทยได้ร่วมการประชุมนานาชาติเกี่ยวกับปัญหาดังกล่าว ซึ่งปัจจุบันเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ [2] โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งในปัจจุบันเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารหลักเพื่อการเติบโตและสร้างมวล ซึ่งเป็นวิธีที่จะช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอน [3] ในขณะเดียวกันสาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถตกตะกอนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้อีกด้วย นั้นถือว่าเป็นการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างถาวรหรือได้อย่างเป็นระยะเวลายาวนาน อีกทั้งยังพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปในระหว่างการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถกระตุ้นอัตราการผลิตสารชีวมวล โดยสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chorococcum littorale* สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ให้กลายเป็นสารชีวมวลได้สูงถึง 16.70 กรัมต่อลิตรต่อวัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีแนวโน้มมากที่สุดในการใช้เพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สาหร่ายจึงเป็นสิ่งมีชีวิตอีกชนิดหนึ่งที่ช่วยบรรเทาปรากฏการณ์โลกร้อนเช่นเดียวกับพืชทั่วไป [4]

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL โดยคณะผู้วิจัยได้วางกรอบแนวคิดและตั้งสมมุติฐานของการศึกษา โดยศึกษาถึงอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ส่งผลให้สาหร่ายมีการกักเก็บคาร์บอน รวมไปถึงการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้สาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีประโยชน์อย่างมาก และยังช่วยแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Spirulina* sp. RMUTL ได้มาจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Zarrouk's Medium และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาทุกชนิดเป็น Analytical Grade (AR)

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

2.2.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายและการเพิ่มปริมาณ

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้ได้ตามปริมาตรที่ต้องการ โดยนำหัวเชื้อสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Zarrouk's Medium โดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.10 ทำการเพาะเลี้ยงจนมีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายอยู่ที่ 0.80 ใช้ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงประมาณ 45 วัน มาถ่ายลงถังขนาด 80 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว ปริมาตร 50 ลิตร เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย โดยใช้แสงจากธรรมชาติและให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศผ่านหัวทรายเพื่อช่วยกวนน้ำป้องกันการตกตะกอนของเซลล์สาหร่าย ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) อยู่ในช่วง 0.30-0.50 โดยใช้เครื่อง UV- Visible Spectrophotometer (Biochrom Libra Model S12; UK) เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการทดลองขั้นต่อไป

2.2.2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการเติมก๊าซที่แตกต่างกันของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

นำหัวเชื้อสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงไว้ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.30-0.50 มาทำการศึกษาโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดยทำการทดลองในถังปฏิกิริยาขนาด 10 ลิตร พื้นที่ทำการ 8 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) ให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศผ่านหัวทรายเพื่อช่วยกวนน้ำป้องกันการตกตะกอนของเซลล์สาหร่าย ในขณะที่ชุดที่ 2 ซึ่งเป็นชุดการทดลองนั้นทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01 vvm ตลอดเวลาการทดลองโดยใช้เครื่องดูดจ่ายสารเคมี (Watson Marlow Model 502S; UK) ในการดูดจ่ายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 30 วัน โดยให้แสงธรรมชาติและให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศผ่านหัวทรายเพื่อช่วยกวนน้ำป้องกันการตกตะกอนของเซลล์สาหร่าย ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วัน หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำเดิมและเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 0.01 เป็น 0.02 และ 0.03 vvm (vvm = ปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรอาหารต่อนาที) ตามลำดับ

2.2.3 ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปของค่าการดูดกลืนแสง รูปค่ามวล [6] เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโตของสาหร่าย รวมไปถึงอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; μ) โดยนำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณ เพื่อดูแนวโน้มอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย ดังสมการที่ (1) [6]

$$\mu = \ln(N_2 - N_1) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

โดยที่

μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)

N_1 = มวลสาหร่ายเริ่มต้นการทดลอง (กรัมต่อลิตร)

N_2 = มวลสาหร่ายวันเก็บตัวอย่าง (กรัมต่อลิตร)

t_1 = ระยะเวลาเริ่มต้นการทดลอง (วัน)

t_2 = ระยะเวลาวันเก็บตัวอย่าง (วัน)

2.2.4 ศึกษาค่าความเป็นกรดด่าง

โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (Sartorius Meter PP-50; Germany)

2.2.5 ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าชุดการทดลอง (Influent of CO_2) และทำการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือจากการใช้ของสาหร่ายที่ออกจากชุดการทดลอง (Effluent of CO_2) โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ (Biogas 5000 Geoteck; UK) ต่อเข้ากับชุดการทดลอง (ถังปฏิกิริยา) และทำการตรวจวัดทุก ๆ 2 วัน ตลอดการทดลองในชุดการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) [7]

$$Efficiency\ of\ CO_2 reduction = \frac{(Influent\ of\ CO_2 - Effluent\ of\ CO_2)}{Influent\ of\ CO_2} \times 100 \quad (2)$$

2.2.6 ศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL (CO_2 Fixation Rate)

โดยนำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณหาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด ทำการศึกษาทุก ๆ 2 วัน ตลอดการทดลอง ดังสมการที่ (3) [8]

$$CO_2 fixation\ rate = 1.88 \times biomass \quad (3)$$

2.2.7 ศึกษาการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL (CO_2 Sequestration)

โดยคำนวณจากสมการที่ (4) [9]

$$CO_2\ Sequestration = \frac{(In\ of\ CO_2 - Out\ of\ CO_2)}{dt} \quad (4)$$

โดยที่

$In\ of\ CO_2$ = ร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าระบบ

$Out\ of\ CO_2$ = ร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกระบบ

dt = ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป

2.2.8 ศึกษาภาระบรรทุกคาร์บอน (Carbon Loading Rate; CLR.) ที่คิดเข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยชีวมวลของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

โดยคำนวณจากสมการที่ (5)

$$CLR. = \frac{CO_2 Influent}{Conc.\ of\ microalgae} \quad (5)$$

โดยที่

$CO_2 Influent$ = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบ (กรัมต่อวัน)

$Conc.\ of\ microalgae$ = น้ำหนักของสาหร่ายทั้งหมดในถังไบโอรีเอคเตอร์ (กรัม)

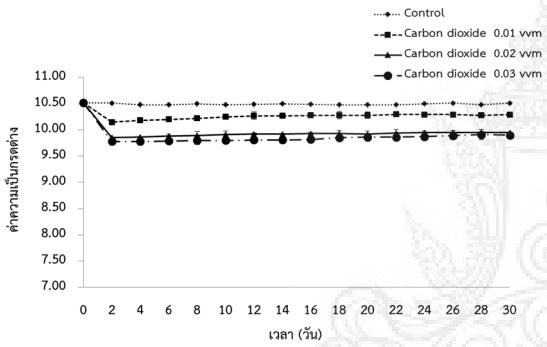
2.3 การรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย มวลสาหร่าย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระบรรทุกคาร์บอน และการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่ายที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกันมาวิเคราะห์ความแตกต่างโดยเปรียบเทียบทุกคู่พร้อมกันในแนวนอนด้วยวิธี Tukey simultaneous ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม Minitab version 16 (Minitab Inc., USA)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ค่าความเป็นกรดด่าง

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม พบว่า มีค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวอยู่ระหว่าง 10.15±0.0.04-10.52±0.01, 9.85±0.01-10.52±0.01, 9.75±0.04-10.52±0.01 และ 10.48±0.01-10.52±0.01 ตามลำดับ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดด่างของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

3.2 ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนาแน่นสูงสดของเซลล์สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL (ตารางที่ 1) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม คือ 0.85±0.00, 0.77±0.02, 0.62±0.01 และ 0.58±0.01 ตามลำดับ

จากการศึกษายังพบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีแนวโน้มลดลง และค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายในทุกชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมากกว่าชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL เนื่องจากสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ในทุกชุดการทดลองมีการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญจึงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นสาหร่ายจะเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตช้าลง ทำให้ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มลดลง เมื่อสาหร่ายเข้าสู่ระยะหยุดการเจริญเติบโต ทำให้ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01 vvm มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุดของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL สูงที่สุดต่อวัน จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง

3.3 มวลสาหร่ายแห้ง (Algae Biomass)

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมวลสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ค่ามวลสาหร่ายเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม คือ 600.00±10.00, 425.00±8.66, 391.67±18.93 และ 378.33±70.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และยังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดด่างและมวลสาหร่าย พบว่า การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไดซ์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อมวลสาหร่าย โดยชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01 vvm มีมวลสาหร่ายมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม จากรายงานวิจัยของ Z. Xianhai et al.

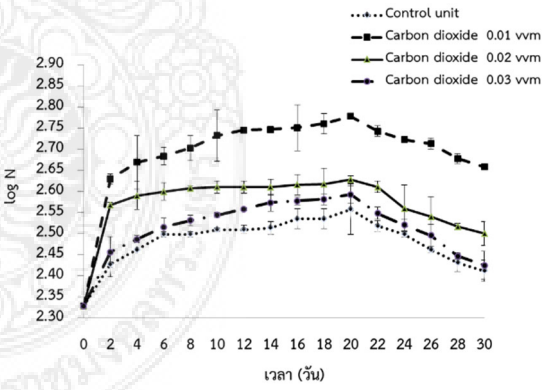
[10] พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างมีผลต่อค่ามวลสาหร่ายและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และยังพบว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* จะเจริญเติบโตได้ดีจะมีค่าความเป็นด่างอยู่ที่ 9.00 และมีค่ามวลสาหร่ายมากถึง 5,410 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนรายงานการวิจัยของ M.A.C. de Oliveira et al. [11] พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina maxima* อยู่ในช่วง 8.50-9.50 ทำให้มีค่ามวลสาหร่ายและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่สูง

ตารางที่ 1 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด (OD_{560}) มวลสาหร่ายแห้งสูงสุด (Algae Biomass) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Specific Growth Rate) ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม

Parameter	CO_2 flow rates			
	Control	0.01 vvm	0.02 vvm	0.03 vvm
OD_{max}	0.58±0.01D	0.85±0.00A	0.77±0.02B	0.62±0.01C
Algae $biomass_{max}$ (mg/L)	378.33±70.06B	600.00±10.00A	425.00±8.66B	391.67±18.93 B
μ_{max} (d^{-1})	0.12±0.03B	0.35±0.01A	0.28±0.01A	0.15±0.04B

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (A, B, C และ D) ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey simultaneous

รูปที่ 2 สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่ได้จากการศึกษากำลังขยาย 1,500X (Scanning Electron Microscope; JEOL JSM-5910LV)



รูปที่ 3 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเจริญของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

3.4 ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; μ)

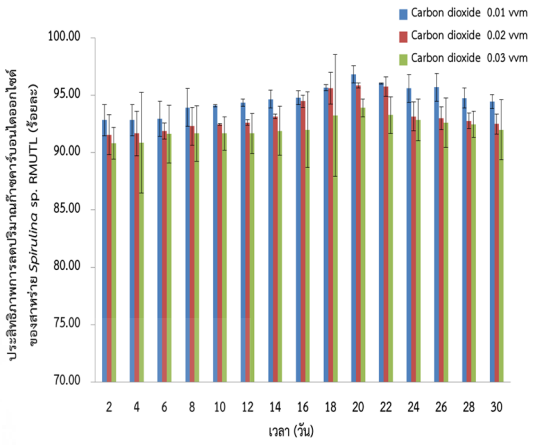
จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม คือ 0.35±0.01, 0.28±0.01, 0.15±0.04 และ 0.12±0.03 ต่อวัน ตามลำดับ และยังพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง log N และเวลา เมื่อมีการ

เติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 3) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในทุกชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีส่วนสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่แตกต่างกันไป [12]

3.5 การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Efficiency of CO_2 Reduction) ค่าอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Fixation Rate) ค่าภาระบรรทุกคาร์บอน (Carbon Loading Rate; CLR.) และการกักเก็บคาร์บอน (CO_2 Sequestration) ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ร้อยละ 94.63±1.02, 93.26±1.47 และ 92.17±0.88 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 20 คือ ร้อยละ 96.83±0.76, 95.87±0.21 และ 93.90±0.79 ตามลำดับ (รูปที่ 4) เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยๆ ลดลงเพราะว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL เมื่อเวลานานขึ้นสารอาหารเริ่มหมดลง

จากการศึกษายังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดด่างกับประสิทธิภาพการลดก๊าซ



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีที่สุดในวันที่ 20 อยู่ที่ร้อยละ 96.83±0.76 ซึ่งมีค่าความเป็นด่างอยู่ที่ 10.28±0.01 สอดคล้องกับรายงายวิจัยของ B. Melanie et al. [13] พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างมีผลต่อประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina platensis* ผลการศึกษาพบว่าสาหร่าย *Spirulina* platensis มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 9.50-10.00 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 90-100 ส่วนงานวิจัยของ Z. Xianhai et al. [10] พบว่า *Spirulina platensis* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องมีอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดเวลาโดยมีอัตราการเติมอยู่ที่ 20 มิลลิเมตรต่อลิตรต่อวัน และ C. Alison [14] ทำการศึกษาการใช้สาหร่ายในการบำบัดน้ำเสียและลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า สาหร่าย *Spirulina maxima* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ถึงร้อยละ 98 แสดงถึงสาหร่าย *Spirulina* sp. สามารถทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ได้ดี สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ

F. M. Salih [15] พบว่า สาหร่าย *Cyanidium caldarium* และสาหร่าย *Scenedesmus* sp. สามารถทนต่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ (% Volume/Volume) 100 และ 80 ตามลำดับ ซึ่งมีศักยภาพในการที่จะลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (Efficiency of CO_2 Reduction) อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (CO_2 Fixation Rate) ภาระบรรทุกคาร์บอนเฉลี่ย (Carbon Loading Rate; CLR.) และการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน (CO_2 Sequestration) ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm

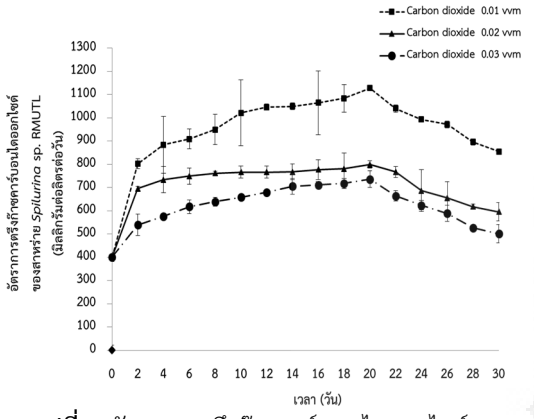
Parameter	CO_2 flow rates		
	0.01 vvm	0.02 vvm	0.03 vvm
Efficiency of CO_2 $reduction_{ave}$ (%)	94.63±1.02A	93.26±1.47B	92.17±0.88C
CO_2 fixation $rate_{ave}$ ($mg.L^{-1}.d^{-1}$)	943.50±170.90A	707.30±101.90B	617.90±91.70B
$CLR._{ave}$ ($g.d^{-1}$)	20.41±0.26A	54.44±0.83B	93.49±1.50C
CO_2 $sequestration_{ave}$ (%)	3.15±0.03A	3.11±0.02A	3.07±0.07A

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (A, B และ C) ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey Simultaneous

จากการศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยอยู่ที่ 943.50±170.90, 707.30±101.90 และ 617.90±91.70 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และมีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สูงสุดในวันที่ 20 คือ 1,128.00 ±18.80, 799.00±16.30 และ 736.30±35.60 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รูปที่ 5) จากรายงานวิจัยของ M. Michele Greque de and C. Jorge Alberto Viera [16] พบว่า สาหร่าย *Spirulina sp.* มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 413 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนสาหร่าย *Spirulina platensis* มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 920 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน [17] และ 220 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน [18] ส่วนค่าภาระบรรทุกคาร์บอน (Carbon Loading Rate; CRL.) ที่เข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยมวลสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ 20.41±0.26, 54.44±0.83 และ 93.49±1.50 กรัมต่อวัน ตามลำดับ

จากตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยสูงสุดที่อัตราการไหล 0.01 vvm คือ ร้อยละ 94.63±1.02 เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนค่าอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL เฉลี่ยสูงสุด คือ 943.50±170.90 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และเมื่อนำข้อมูลอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลทั้ง 3 ชนิด ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของลักษณะอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย พบว่า อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีความ

แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ส่วนอัตราการไหลที่ 0.02 และ 0.03 vvm ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)



รูปที่ 5 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ค่าการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm อยู่ที่ร้อยละ 3.15±0.03, 3.11±0.02 และ 3.07±0.07 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) เมื่อนำข้อมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่ายที่ได้จากการศึกษาไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของลักษณะการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย พบว่า อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

4. สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอน รวมไปถึงศึกษาอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน และให้ผลผลิตที่ดี ในอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ผลการศึกษา พบว่า ที่อัตราการไหล 0.01 vvm การเจริญเติบโตของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนดีกว่าที่อัตราการไหล 0.02 vvm และ 0.03 vvm โดยสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.35±0.01 ต่อวัน มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด 0.85±0.00 มวลสาหร่ายสูงสุด 600.00±10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 96.83±0.76 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 1,128.00±18.80 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนค่าภาระบรรทุกคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยมวลสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ 20.41±0.26 กรัมต่อวัน และค่าการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน อยู่ที่ร้อยละ 3.15.±0.02

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้สาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีประโยชน์อย่างมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้การการกำจัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดมลพิษเป็นจำนวนมาก และยังช่วยแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้ทุนอุดหนุนจากสำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, *Report of Climate Change*, *1st ed.* Thailand: Text & Journal Public Company Limited, 2016.

[2] Thairath. (2020, December 14). Climate Change. [Online]. Availiable: www.thairath.co.th/news/foreign/1723933

[3] J.-W., Ahn, K. Hwangbo, S. Y. Lee, H.-G. Choi, Y.-L. Park, J. R. Liu and W.-J. Jeong, "Shorth communication anew arctic *Chlorella* species for biodiesel production," *Bioresource Technology*, vol. 125, pp. 340-343, Dec. 2012.

[4] P. Chitsanuphong, "Feasibility study of carbon dioxide recycling uning a biological wastewater treatment system for industrial sources," *Journal of Enviromental management*, vol. 11, pp. 106-133, Dec. 2015.

[5] A. Toledo-Cervantes, M. Marcia, N. Eberto and R. Sergio, "Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*," *Bioresource Technology*, vol. 130, pp. 652-658, Dec. 2012.

[6] H. Seyedmahdi, A. Abbas, A. saeed, H. Mohamad Sadegh and M. Fatemeh, "Growht response of *Spirulina platensis* PCC9108 to elevated CO_2 levels and flue gas," *Biological Journal of Microorganism*, vol. 2, no. 8, pp. 29-36, Nov. 2014.

[7] K. Chien-Y, C. Sheng-Yi, H. Tzu-Ting, D. Le, H. Ling-Kang and L. Chih-Shern, "Abitity of a mutant strain of the microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 176-183, Jan. 2012.

[8] H. Shih-Hsin, C. Chun-Yen, L. Duu-Jong and C. Jo-Shu, "Perspectives on microalgal CO_2-emission mitigation systems-A review," *Biotechnology Advances*, vol. 29, pp. 189-198, Nov. 2010.

[9] K. Wriju, G. Anuradda and M. Suparna, "Estimation of carbon dioxide sequestration potential of microalgae grown in a batch photobioreactor," *Bioresource Technology*, vol. 180, pp. 370-375, Jan. 2015.

[10] Z. Xianhai, D. Michael K., Z. Shiduo, Z. Xia, W. Mengyang, C. Xiao Dong, N. I-Son, J. Keju and L. Yinghua, "Autotrophic cultivation of *Spirulina platensis* for CO_2 fixation and phycocyanin production," *Chemical Engineering Journal*, vol. 183, pp. 192-197, Dec. 2011.

[11] M.A.C. de Oliveira, M.P.C. Monterio, P.G. Robb and S.G.F. Lewite, "Growth and Chemical composition of *Spirulina maxima* and *Spirulina patensis* biomass at different temperature," *Aquaculture International*, vol. 7, pp. 261-275, Jul. 1999.

[12] E. Suali and R. Sarbatly, "Conversion of microalgae to biofuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 4316-4342, Aug. 2012.

[13] B. Melanie, D. Ignacio, D. Antonio, S. Armando Gonzalez and M. Raul, "Microalgal-Biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents," *Environmental Science & Technology*, vol. 48, pp. 573-581, Dec. 2013.

[14] C. Alison, *Use of microalgeae in wastewater treatment to remove*

contaminants and purify biogas, 1st ed, Canady: University of Guelph, 2011.

[15] F. M. Salih, "Microalgae tolerance to high concentrations of carbon dioxide: A review," *Environmental Protection*, vol. 2, pp. 648-654, Jan. 2011.

[16] M. Michele Greque de and C. Jorge Alberto Vieira, "Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors," *Biotechnol Lett*, vol. 29, pp. 1349-1352, May. 2007.

[17] A. Kumar, X. Yuan, A.K. Sahu, S.J. Ergas, H. Van Langenhove, and J. Dewulf, "A hollow fiber membrane photo-bioreactor for CO_2 sequestration from combustion gas coupled with wastewater treatment: a process engineering approach," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 85, pp. 387–394, Mar. 2010.

[18] E.B. Sydney, W. Sturm, J.C. de Carvalho, V. Thomaz-Soccol, C. Larroche, A. Pandey, and C.R. Soccol, "Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 5892–5896, Aug. 2010.