

การศึกษาชีวมวลทางเลือกต่อการดักจับและกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย

จากเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ ด้วยสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049

Investigation of Alternative Biomass for Carbon Dioxide Capture and Storage from Low-Speed Diesel Engine Exhaust Gas Using *Chlorella* sp. AARL G049

วาสนา คำโสภาส¹, วิชุดา พุ่มพวง¹, ปัญจพร หนาดคำ¹, สุรินทร์ คั่นใจ¹, ธรณิศวรรค์ ดีทายาท², อรรถกร อาสนคำ²,
และทณเกียรติ เกียรติศิริโรจน์²

¹สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Abstract

This research studied the capture and storage of carbon dioxide (CO₂) through the cultivation of *Chlorella* sp. AARL G049 microalgae at the laboratory scale. The study examined the effects of CO₂ concentration in the cultivation system at 3 levels: 0% (100% air), 3% (CO₂ from a gas tank), and 3% (CO₂ from diesel engine exhaust gas), as well as gas flow rates of 0.25, 0.50, and 0.75 vvm on the growth rate of the algae. Experiments were conducted between 08:00 and 16:00 for a period of 4 days. The results showed that the number of algal cells increased over the cultivation period, and higher CO₂ concentrations and flow rates led to greater algal cell growth. The average dry weight of algae cultivated at CO₂ concentrations of 0% (100% air), 3% (from the gas tank), and 3% (from diesel exhaust gas) ranged from 0.27–0.35, 0.47–0.65, and 0.31–0.49 grams per liter, respectively. The biomass productivity and CO₂ capture rates for cultivation at 3% CO₂ (from the gas tank) and 3% CO₂ (from diesel exhaust gas) were 0.0875–0.1325 and 0.0625–0.1075 grams per liter per day, and 0.0839–0.1270 and 0.0599–0.1031 grams of CO₂ per liter per day, respectively.

Additionally, the algae produced from cultivation showed potential for lipid extraction, yielding 0.0025–0.0636 grams per liter, which can be further processed into biodiesel. Therefore, promoting large-scale algal cultivation could not only help reduce atmospheric CO₂ but also serve as a source for renewable fuel production.

Keywords: Carbon capture and storage, Carbon dioxide, Exhaust gas, Low-Speed Diesel Engine, Algae

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดักจับและกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049 ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงที่ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ จากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล) และอัตราการไหลแก๊สที่ 0.25, 0.50 และ 0.75 vvm ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยทดสอบในช่วงเวลา 08.00-16.00 น. เป็นระยะเวลา

¹ Corresponding author: Tel.: 053-942478. E-mail address: ic41062@hotmail.com

4 วัน ผลการศึกษา พบว่า จำนวนเซลล์สาหร่ายมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและอัตราการไหลของแก๊ส CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงมีค่าสูงขึ้น โดยน้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้น CO₂ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) จะมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.27-0.35, 0.47-0.65 และ 0.31-0.49 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับอัตราการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับ CO₂ กรณีการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้น 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) จะให้ค่าอยู่ในช่วง 0.0875-0.1325, 0.0625-0.1075 กรัมต่อลิตรต่อวัน และ 0.0839-0.1270, 0.0599-0.1031 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ สำหรับสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยง มีศักยภาพในการสกัดลิพิดได้ 0.0025-0.0636 กรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ต่อไป ดังนั้น หากมีการส่งเสริมการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระดับอุตสาหกรรม นอกจากจะเป็นวิธีการที่ลด CO₂ สู่สิ่งแวดล้อม ยังสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ: การดักจับและกักเก็บ, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ไอเสีย, เครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ, สาหร่าย

บทนำ

สาหร่ายเป็นชีวมวลทางเลือกในอีกรูปแบบหนึ่ง ที่สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอนาคตได้ เนื่องจากสาหร่ายสามารถแบ่งตัวได้เร็ว และมีสัดส่วนที่เป็นน้ำมันในปริมาณมากเมื่อเทียบกับชีวมวลรูปแบบอื่น ๆ [1] สาหร่ายจะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และพลังงานแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสง เพื่อสร้างสารทางชีวภาพ สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่หลากหลายลักษณะและใช้น้ำเพียงเล็กน้อย ภายในของเซลล์สาหร่าย จะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์จำพวกไขมัน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน นอกจากนี้ สาหร่ายไม่มีเซลล์ulos หรือลิกนิน เหมือนกับวัตถุดิบที่ได้จากพืชชนิดอื่น ๆ ดังนั้นจึงลดความยุ่งยากในกระบวนการแตกตัวของผนังเซลล์สาหร่าย เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเหลว [2, 3] องค์ประกอบของชีวมวลสาหร่าย สามารถแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของชีวมวลสาหร่ายชนิดต่างๆ (% Dry Matter Basis) [1]

Biomass	Carbohydrates	Proteins	Lipids
<i>Chlorella vulgaris</i>	21.0	15.67	41.51
<i>Chlorella sorokiniana</i>	35.7	9.9	18.81
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	22.7	24.8	19.1
<i>Scenedesmus obliquus</i>	13.4	4.66	30.38
<i>Dunaliella salina</i>	32.0	57	9
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	21.0-52.0	8.0-18.0	16.0-40.0
<i>Chlorococum humicola</i>	32.5	-	-
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	22.6	64.7	12.6
<i>Spirogyra</i> sp.	33.0-64.0	6.0-20.0	11.0-21.0
<i>Porphyridium cruentum</i>	40.0-57.0	28.0-39.0	9.0-14.0
<i>Dunaliella salina</i>	85.6	8.46	11.47

จากตารางที่ 1 สาหร่ายแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของ ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนที่แตกต่างกันออกไป และจะเห็นว่า สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* มีองค์ประกอบที่เป็นไขมัน มากกว่า 40 % โดยน้ำหนัก มีรายงานการวิจัยระบุ

ว่า สาหร่ายขนาดเล็กสามารถจะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีการป้อน CO₂ ความเข้มข้นสูง และสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella sp.* AARL G011 จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด [4] นอกจากนี้ ยังมีรายงานการวิจัยอื่น ๆ ที่สนับสนุนว่า *Chlorella vulgaris* และสาหร่ายสายพันธุ์ใกล้เคียงสามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้ CO₂ ความเข้มข้นสูงถึง 10–15% โดยไม่แสดงความเป็นพิษ และยังสามารถเพิ่มผลผลิตชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ [5–7] อีกทั้งยังมีการวิจัยที่รายงานว่า สาหร่ายกลุ่มนี้มีศักยภาพในการดักจับ CO₂ จากแหล่งที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ไอเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน หรือจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ซึ่งไอเสียเหล่านี้สามารถมีความเข้มข้นของ CO₂ อยู่ในช่วง 5–15% โดยปริมาตร [8–11] จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นได้ว่า การนำไอเสียจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ถือเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการปล่อย CO₂ หรือก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งสาหร่ายที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในด้านโภชนาการหรือเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลังงานทางเลือก อย่างไรก็ตาม แหล่งไอเสียที่นำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายส่วนใหญ่ มักมาจากโรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม เครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือเป็นก๊าซผสมที่จำลองสัดส่วนของไอเสีย ขณะที่การใช้ไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำยังไม่มีรายงานการศึกษาอย่างชัดเจน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กภายใต้สภาวะที่มี CO₂ ความเข้มข้นสูง โดยใช้แหล่งก๊าซจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ โดยจะพิจารณาผลของอัตราการป้อน และความเข้มข้นของ CO₂ ที่ได้จากไอเสีย ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย ความสามารถในการดักจับ CO₂ และกักเก็บ CO₂ ในรูปของสาหร่าย และประเมินศักยภาพในการสกัดลิพิดจากสาหร่ายเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไป

วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* AARL G049 ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายในขวดแก้ว ปริมาณ 10 ลิตร จำนวน 6 ขวด ในการเพาะเลี้ยงจะใช้น้ำเลี้ยงสาหร่ายสูตรอาหารของ Jaworski's medium [12] มีการควบคุมอัตราการป้อน CO₂ ให้แก่ระบบชุดเพาะเลี้ยงผ่านหัวจ่ายแก๊ส

ในการศึกษาจะใช้ CO₂ ความเข้มข้น 99.95% ที่บรรจุในถัง ถูกป้อนมาผสมกับอากาศ และควบคุมความเข้มข้นของ CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงให้มีค่าเท่ากับ 0 (อากาศ 100%) และ 3% เพื่อนำไปเทียบผลกับการใช้ CO₂ ที่ได้จากแก๊สไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ ที่ความเร็วรอบ 1,450 rpm ภาระโหลด 30 % ซึ่งควบคุมความเข้มข้นที่ 3 % เช่นกัน (ไอเสียจากเครื่องยนต์ จะถูกนำมาผ่านชุดลดอุณหภูมิไอเสีย จากอุณหภูมิ 70 °C บริเวณทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ณ จุด A ตามภาพที่ 3 (ก) ลดลงเหลือ 35 °C บริเวณทางออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ณ จุด B จากนั้นก๊าซไอเสียจะถูกป้อนเข้าสู่ชุดกรองเขม่า ก่อนจ่ายเข้าสู่ชุดควบคุมเงื่อนไข (ที่มีเครื่องวัดอัตราการไหลและความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่ง C) และชุดเพาะเลี้ยงต่อไป) ในการทดสอบได้ทำการควบคุมอัตราการไหลแก๊สที่ 0.25 ,0.50 และ 0.75 vvm (ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรน้ำต่อนาที) ทำการทดสอบในช่วงเวลา 08.00-16.00 น. เพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 4 วัน ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีค่าค่อนข้างคงที่ จากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ค่าการเจริญเติบโตโดยการนับเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ร่วมกับ Haemocytometer, ค่าความหนาแน่นชีวมวล, ค่าการดูดกลืนแสง (Optical density, OD), และวิเคราะห์หาอัตราการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต โดยพิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้ [13]

$$p = \frac{X_t - X_0}{t - t_0} \quad (1)$$

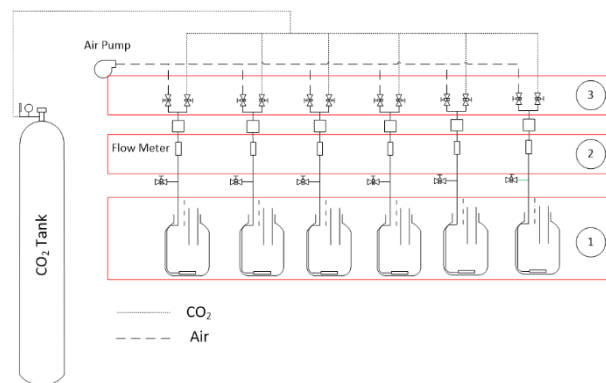
เมื่อ p = อัตราการผลิตสาหร่าย (g/l•d)
 X_t = ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (g/l) ที่เวลาการเพาะเลี้ยง t
 X_0 = ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (g/l) ที่เวลาการเพาะเลี้ยงเริ่มต้น หรือ t_0
 อัตราการดักจับ CO_2 สามารถคำนวณได้จากปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในสาหร่ายและอัตราการผลิตสาหร่ายดังแสดง
 ในสมการ (2)

$$F_{\text{CO}_2} = C_C \cdot p \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_C} \right) \quad (2)$$

เมื่อ F_{CO_2} = อัตราการดักจับ CO_2 (g CO_2 /l•d)
 M_{CO_2} = มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (g/mol)
 M_C = มวลอะตอมของคาร์บอน (g/mol)
 C_C = ปริมาณคาร์บอนในสาหร่าย (g carbon/g dry weight)

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049 ในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 1 (ก) การทดลองเพาะเลี้ยงจะทำการเตรียมน้ำเลี้ยงสาหร่ายสูตรอาหารของ Jaworski's medium บรรจุไว้ในขวดแก้ว 6 ขวด (หมายเลข 1) โดยแบ่งขวดออกเป็น 3 ชุด แต่ละชุดมี 2 ขวด ทำการทดสอบพร้อมกัน ภายใต้เงื่อนไขการทำงาน 3 ค่า โดยทำการควบคุมอัตราการไหลแก๊สที่ 0.25 ,0.50 และ 0.75 vvm (ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรน้ำต่อนาที) (หมายเลข 2) จ่ายให้แก่ชุดเพาะเลี้ยง ในการทดสอบจะใช้อัตราการป้อน CO_2 ที่ความเข้มข้น 0 (อากาศ 100%) และ 3% (หมายเลข 3) ผลการทดสอบที่ได้จากชุดเพาะเลี้ยง 2 ชุด ในแต่ละชุดจะนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อแสดงผล และเปรียบเทียบ ทั้งนี้ภาพตัวอย่างการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแสดงดังภาพที่ 1 (ข)

สำหรับการทดสอบโดยใช้แก๊สไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำ จะมีการเดินเครื่องยนต์ ตามภาพที่ 2 ไอเสียจากเครื่องยนต์ จะถูกนำมาผ่านชุดลดอุณหภูมิไอเสีย ตามภาพที่ 3 ก่อนควบคุมเงื่อนไขและป้อนเข้าสู่ชุดเพาะเลี้ยงต่อไป



(ก) แผนภาพการทำงาน

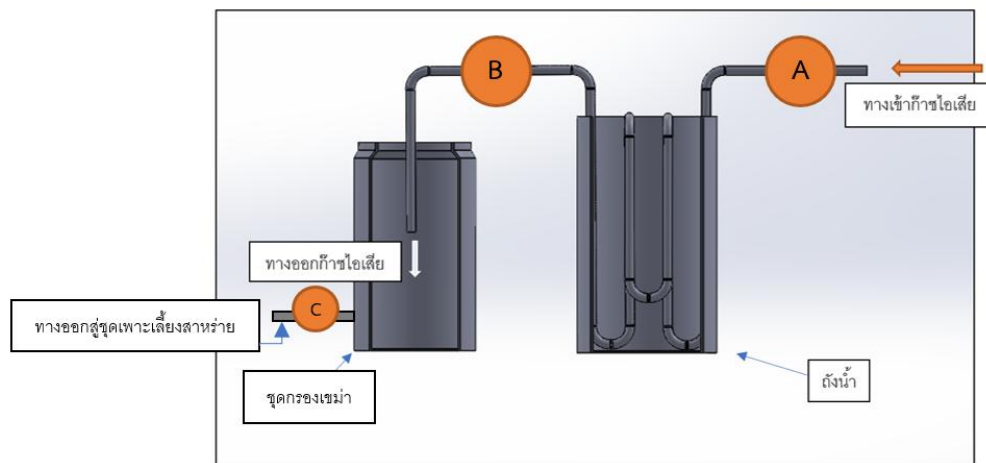


(ข) การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049

ภาพที่ 1 ระบบชุดเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049



ภาพที่ 2 เครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำ



(ก)



(ข)



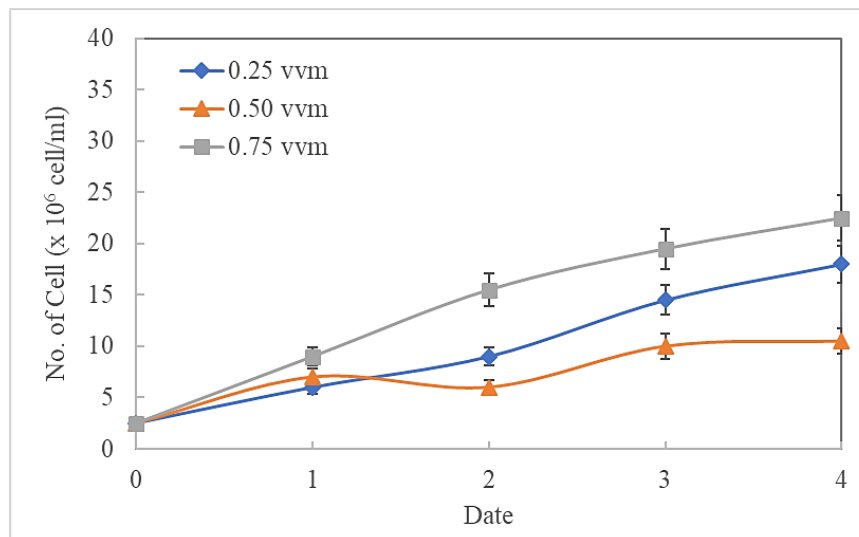
(ค)

ภาพที่ 3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ก) ไดอะแกรมแสดงชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (ค) ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

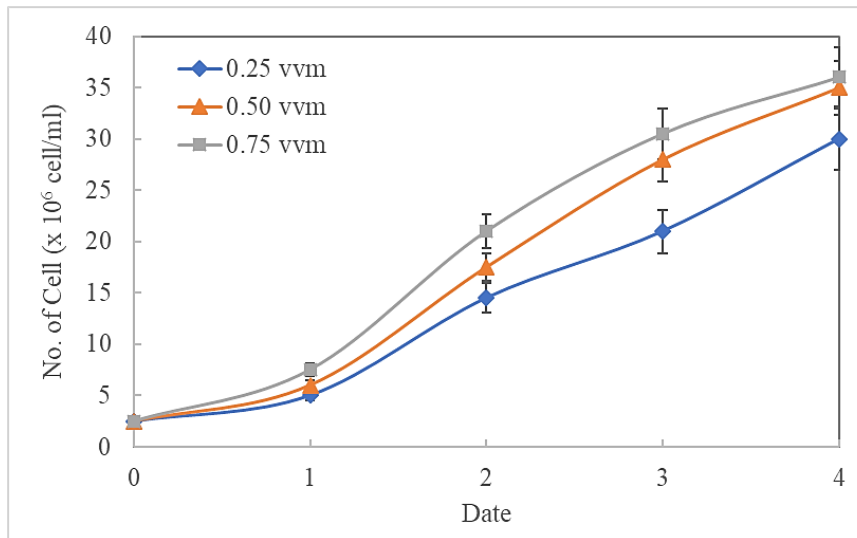
ทั้งนี้ หลังจากทำการทดลองและคำนวณอัตราการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับ CO_2 แล้ว ค่าที่ได้ได้ถูกนำไปใช้ในการประเมินศักยภาพการสกัดลิพิดจากสาหร่าย ซึ่งจะใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล โดยอ้างอิงข้อมูลงานวิจัยของ Mata, et al. 2010 [14]

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

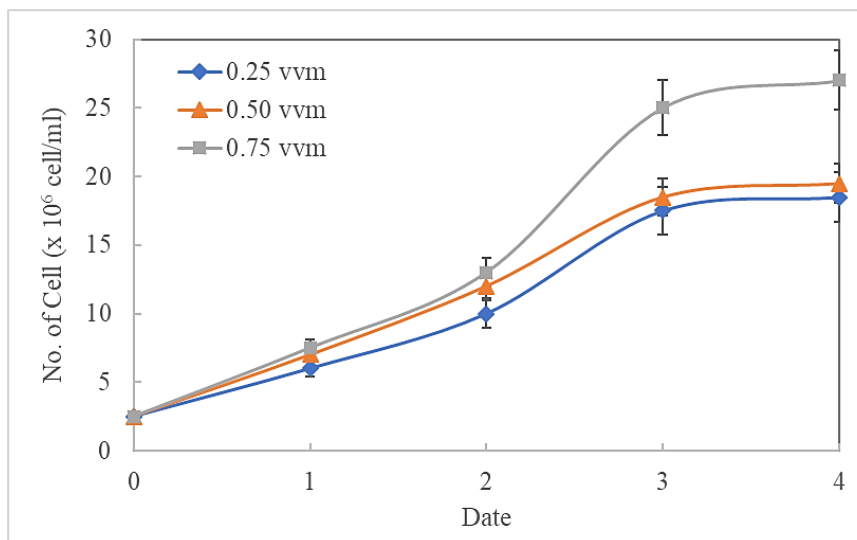
การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049 ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำเลี้ยงสาหร่ายสูตรอาหาร Jaworski's medium ควบคุมความเข้มข้นของ CO_2 ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงให้มีค่าเท่ากับ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO_2 จากถังบรรจุ) และ 3% (CO_2 ในไอเสียจากเครื่องยนต์) ควบคุมอัตราการไหลแก๊สที่ 0.25, 0.50 และ 0.75 vvm ทดสอบในช่วง 08.00-16.00 น. เป็นระยะเวลา 4-5 วัน สามารถแสดงผลอัตราการเติบโตของสาหร่ายในรูปจำนวนเซลล์สาหร่ายตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยงได้ดังภาพที่ 4



(ก) 0% CO_2



(ข) 3% CO₂ (CO₂ from tank)



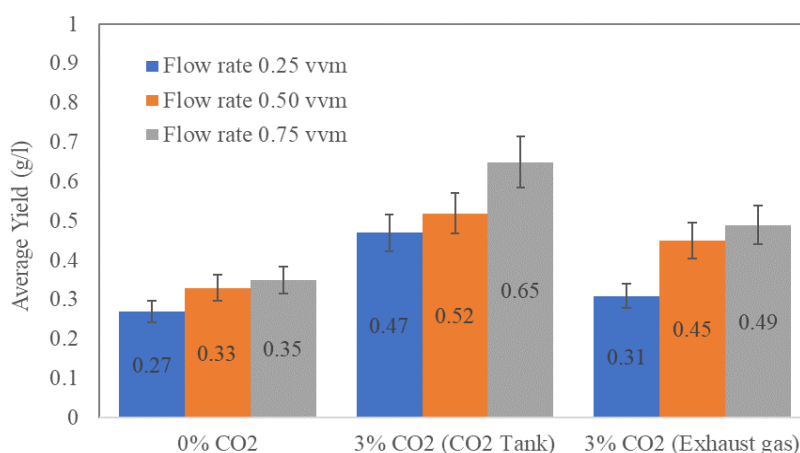
(ค) 3% CO₂ (CO₂ from exhaust gas)

ภาพที่ 4 จำนวนเซลล์สาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049 ที่ได้จากการเพาะเลี้ยง

โดยควบคุมอัตราการไหลของ CO₂ ในช่วง 0.25-0.75 vvm

จากภาพที่ 4 จะได้ว่า จำนวนเซลล์สาหร่ายมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สที่ป้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยง จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้น CO₂ 3% จะมีผลทำให้จำนวนเซลล์สาหร่ายมีค่าเพิ่มขึ้น สูงกว่าการป้อนที่ความเข้มข้น 0% เนื่องจากเซลล์สาหร่ายได้รับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเซลล์สาหร่ายจากการป้อน CO₂ ที่ความเข้มข้น 3% จากถังบรรจุ เทียบกับ CO₂ จากไอเสียจากการเดินเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำพบว่า จำนวนเซลล์สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงโดยการป้อน CO₂ จากไอเสียเครื่องยนต์ จะมีค่าน้อยกว่าการป้อน CO₂ จากถังบรรจุ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการกรองไอเสียจากเครื่องยนต์อาจยังคงมีเขม่า หรือมีแก๊สพิษหลงเหลืออยู่ และเมื่อไอเสียถูกป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยง ทำให้การเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร และอาจส่งผลให้เซลล์สาหร่ายเกิดการตายขึ้น ทำให้จำนวนเซลล์ลดน้อยลงกว่า การใช้ CO₂ จากถังบรรจุ

จากข้อมูลข้างต้น สามารถแสดงค่าน้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยง ตามภาพที่ 5 จากภาพจะเห็นว่า น้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่ได้ตามเงื่อนไขการเพาะเลี้ยง ให้ผลสอดคล้องกับจำนวนเซลล์สาหร่ายในภาพที่ 4 โดยน้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้ง ที่เพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้น CO₂ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) จะมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.27-0.35, 0.47-0.65 และ 0.31-0.49 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยง โดยควบคุมความเข้มข้น CO₂ ที่ 0% จะมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ เหนือพล (2555) [15] ที่ได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ในแนวตั้ง และมีการควบคุมระยะเวลาการให้แสงสว่าง ซึ่งพบว่า สาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยง จะมีปริมาณ 0.2933-0.3933 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ การควบคุมความเข้มข้น CO₂ ที่ 3% ทั้งจากถังบรรจุ และจากไอเสียเครื่องยนต์ ที่ป้อนเข้าสู่ชุดเพาะเลี้ยง ยังส่งผลให้น้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่สูงกว่าผลงานวิจัยของเหนือพล เหนือพล (2555) [15] อีกด้วย



ภาพที่ 5 น้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยง ที่ความเข้มข้น CO₂ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) และควบคุมอัตราการไหล CO₂ ในช่วง 0.25-0.75 vvm

อัตราการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) โดยพิจารณาปริมาณธาตุคาร์บอนในสาหร่าย (C_c) ที่ 26.15 % โดยน้ำหนัก [2] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

CO ₂ Concentration	อัตราการผลิตสาหร่าย (g/L/day)			อัตราการดักจับ CO ₂ (g _{CO2} /L/day)			ปริมาณผลิต (g/L/day)		
	FR 0.25 vvm	FR 0.50 vvm	FR 0.75 vvm	FR 0.25 vvm	FR 0.50 vvm	FR 0.75 vvm	FR 0.25 vvm	FR 0.50 vvm	FR 0.75 vvm
0%	0.0250	0.0400	0.0450	0.0240	0.0384	0.0431	0.0025-0.0120	0.0040-0.0192	0.0045-0.0216
3% (CO ₂ From Tank)	0.0875	0.1000	0.1325	0.0839	0.0959	0.1270	0.0088-0.0420	0.0100-0.0480	0.0133-0.0636
3% (CO ₂ From Exhaust gas)	0.0625	0.0975	0.1075	0.0599	0.0935	0.1031	0.0063-0.0300	0.0098-0.0468	0.0108-0.0516

หมายเหตุ FR คือ อัตราการไหลของ CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยง

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่า อัตราการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับ CO₂ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นและอัตราการไหลของแก๊ส CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงมีค่าสูงขึ้น โดยอัตราการการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับ CO₂ กรณีการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้น 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) จะให้ค่าอยู่ในช่วง 0.0875-0.1325, 0.0625-0.1075 กรัมต่อลิตรต่อวัน และ 0.0839-0.1270, 0.0599-0.1031 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ

จากข้อมูลการผลิตสาหร่ายข้างต้น หากนำสาหร่ายแห้งที่ได้ไปทำการสกัดลิพิด โดยพิจารณาศักยภาพการสกัดลิพิดจากสาหร่ายที่ 10-48% [14] จะได้ว่า สาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในงานวิจัยนี้ จะสามารถสกัดลิพิดได้ 0.0025-0.0636 กรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งหากนำลิพิดไปใช้ประโยชน์ในเชิงพลังงาน ลิพิดจากสาหร่ายจะมีศักยภาพในการผลิตเป็นไบโอดีเซลสูงถึง 94 % โดยน้ำหนัก [14] ดังนั้น การส่งเสริมการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระดับขยายขนาดจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ ตัวอย่างเช่น การส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมที่มีไอเสียเกิดขึ้นในระบบ ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เมตร จะสามารถดักจับ CO₂ จากไอเสียได้น้อยกว่า 2,186.35 กิโลกรัมต่อปี สามารถผลิตสาหร่ายได้ไม่ต่ำกว่า 2,281.25 กิโลกรัมต่อปี (คิดที่เงื่อนไขการเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยป้อนก๊าซ CO₂ ที่ได้จากไอเสีย ที่ความเข้มข้น 3% ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ 0.25vvm) และสามารถสกัดลิพิดได้ไม่ต่ำกว่า 227.125 กิโลกรัมต่อปี (คิดที่ 10%โดยน้ำหนัก) จากการประเมินจะเห็นได้ว่า สาหร่ายเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพเชิงพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง และนอกเหนือจากศักยภาพในเชิงพลังงานแล้ว สาหร่ายยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอาหาร การแพทย์ หรือเวชภัณฑ์ได้ และยิ่งไปกว่านั้น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายยังช่วยดักจับและลดปริมาณก๊าซ CO₂ จากกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการขับเคลื่อนการพัฒนาอย่างยั่งยืน ทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม พลังงาน และเศรษฐกิจชีวภาพ

สรุปผลการศึกษา

การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. AARL G049 ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยควบคุมความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงให้มีค่าเท่ากับ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ จากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำ ที่ถูกนำมาผ่านชุดลดอุณหภูมิ และควบคุมเงื่อนไขก่อนป้อนเข้าสู่ชุดเพาะเลี้ยงสาหร่าย) ควบคุมอัตราการไหลแก๊สที่ 0.25, 0.50 และ 0.75 vvm และทดสอบในช่วง 08.00-16.00 น. โดยใช้ใช้น้ำเลี้ยงสาหร่ายสูตรอาหารของ Jaworski's medium พบว่า จำนวนเซลล์สาหร่ายมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและอัตราการไหลของแก๊ส CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงมีค่าสูงขึ้น โดยน้ำหนักเฉลี่ยของสาหร่ายแห้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้น CO₂ 0% (อากาศ 100%), 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) จะมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.27-0.35, 0.47-0.65 และ 0.31-0.49 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราการผลิตสาหร่าย และอัตราการดักจับ CO₂ กรณีการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้น 3% (CO₂ จากถังบรรจุ) และ 3% (CO₂ ในไอเสียจากเครื่องยนต์) จะให้ค่าอยู่ในช่วง 0.0875-0.1325, 0.0625-0.1075 กรัมต่อลิตรต่อวัน และ 0.0839-0.1270, 0.0599-0.1031 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ สาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในงานวิจัยนี้ มีศักยภาพในการสกัดลิพิดได้ 0.0025-0.0636 กรัมต่อลิตรต่อวัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ในสถานะคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูง จากไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำ เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และโครงการพัฒนาการเพิ่มคุณภาพแก๊สชีวภาพ และเชื้อเพลิงชีวภาพ ภายใต้การจัดการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (ปีที่ 2)

ภายใต้โครงการการพัฒนาต้นแบบพลังงานทดแทน เพื่อใช้ในชุมชนสีเขียว, โครงการทำหยาไทย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Priyadarshani, I. and Rath, B. (2012). Commercial and industrial applications of micro algae – A review. **Journal of Algal Biomass Utilization**. 3(4), 89-100.
- [2] เหนือพล ดวงเปื้อน. (2556). ผลกระทบของวัฏจักรมีดและสว่างต่อผลผลิตสาหร่ายขนาดเล็กในปฏิกรณ์แบบ **แนวตั้ง**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] ยุวดี พิรพรพิศาล. (2546). **สาหร่ายวิทยา**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- [4] จิรนนท์ ศรีพุทธา. (2556). การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นสูง **เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ**. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 79(5), 707–718.
- [6] Sydney, E. B., Sturm, W., de Carvalho, J. C. M., Thomaz-Soccol, V., Larroche, C., Pandey, A. and Soccol, C. R. (2010). Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. **Bioresource Technology**, 101(15), 5892–5896.
- [7] Kao, C-Y., Chen, T-Y., Chang, Y-B., Chiu, T-W., Lin, H-Y., Chen, C-D., Chang, J-S. and Lin, C-S. (2014). Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella* sp. **Bioresource Technology**. 166, 485-493.
- [8] Mortensen, L.M and Gislerød, H.R. (2016).The growth of *Chlorella sorokiniana* as influenced by CO₂, light, and flue gases. **Journal of Applied Phycology**. 28, 813–820.
- [9] Matsumoto, M., Mayumi, T., and Yoshino, T. (1997). CO₂ fixation and oil production by microalgae grown on flue gas from gas engine. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. 83(2), 263–265.
- [10] Zhao, B., Su, Y., Zhang, Y. and Cui, G. (2015).Carbon dioxide fixation and biomass production from combustion flue gas using energy microalgae. **Energy**. 89, 347-357.
- [11] Hende, S.V.D., Vervaeren, H. and Boon, N. (2012). Flue gas compounds and microalgae: (bio-) chemical interactions leading to biotechnological opportunities. **Biotechnology Advances**. 30(6), 1405-24.
- [12] Sostarie, M., Golob, J., Bricelj, M., Klinar, D. and Pivec, A. (2009). Studies on the Growth of *Chlorella vulgaris* in Culture Media with Different Carbon Sources. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**. 23 (4), 471–477.
- [13] เหนือพล ดวงเปื้อน ญัฐนี วรยศ และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2556). “การวิเคราะห์ต้นทุนและการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของชีวมวลจากสาหร่ายขนาดเล็กที่เพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเปิดแนวตั้ง”, ใน การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 12), วันที่ 14-15 มีนาคม 2556 ณ โรงแรมแอมฟิเรียลโกลด์เอ็นไทรแองเกิ้ล รีสอร์ท อำเภอสองแคว จังหวัด เชียงราย.

- [14] Mata, T.M., Martins, A.A. and Caetano, N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14, 217–232.
- [15] เหนือพล ดวงเป็ยง ญัฐนี วรยศ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และกันยาพร ไชยวงศ์. (2555). “ผลของความเข้มข้นสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กที่เพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพระบบเปิดแบบแนวตั้ง”, ใน การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 11), วันที่ 8-9 มีนาคม 2555 ณ โรงแรมนิว แทรวิล บีช รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี.