



ผลของความเข้มแสงต่อการผลิตชีวมวลสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

Effect of Light Intensity on the Biomass Production of *Ceratophyllum demersum* L. from Palm Oil Factory Treated Wastewater

อุสมาน ดือราโอ๊ะ¹, ธนิยา เกาสอล^{1*}

Usman Duera-oh¹, Thaniya Kaosol^{1*}

(Received: September 3, 2019; Revised: November 18, 2019; Accepted: November 25, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.) ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มแสงที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันรวมกับการให้แสงเสริมจากหลอดไฟ LED ที่ความเข้มแสง 5,000 และ 10,000 Lux ในเวลากลางคืนต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เนื่องจากความเข้มแสงมีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซึมของธาตุอาหารจึงมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการทำงานของเซลล์ในการผลิตชีวมวลของสาหร่ายเพิ่มขึ้น โดยชุดการทดลองการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดของระบบผสมร่วมระหว่างการให้แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ในเวลาระหว่างช่วงกลางวันและให้แสงสว่างเสริมจากหลอดไฟ LED ที่ความเข้มแสง 10,000 Lux ในเวลากลางคืน ทำการเพาะเลี้ยงในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 10 เท่า พบว่าสามารถผลิตชีวมวลสาหร่ายได้ดีที่สุด โดยให้ผลผลิตชีวมวลเป็นสองเท่าของน้ำหมักแรกเริ่มเลี้ยง ใช้เวลาในการเจริญเติบโตเพียง 4 วัน และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงชะโดเท่ากับร้อยละ 8.17 ต่อวันของน้ำหมักสาหร่ายแห้ง เมื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดเป็นระยะเวลา 18 วัน พบว่า สาหร่ายพวงชะโดสามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีใน 2 สัปดาห์แรกของการเพาะเลี้ยง และสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดอย่างต่อเนื่องจนจบการทดลองกับทุกการเจือจางของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

คำสำคัญ: สาหร่ายพวงชะโด ชีวมวลสาหร่าย ความเข้มแสง อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ น้ำเสีย

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University

*Corresponding Author: thaniya.k@psu.ac.th



Abstract

This research aimed to study the effect of light intensity on the growth of *Ceratophyllum demersum* L. in the treated wastewater of the biogas system of palm oil factory. The comparison of the light intensity from the sun during the day time and the light intensity from artificial light of LEDs at 5,000 and 10,000 Lux during the night time on the algae cultivation was investigated, because the light intensity has an influence on the adsorption rate of nutrient which affects the growth of algae. The results showed that the increasing of light intensity affected the increasing of the cell operation in the biomass production. The algae cultivation experiment of light intensity from the sun during the day time and light intensity from an artificial light of LED at 10,000 Lux for algae cultivation in the treated wastewater which were diluted 10 times, was provided the best biomass production. Within four days, the biomass production was double and the growth rate of *Ceratophyllum demersum* L. was 8.17% per day of dry weight. At 18 days of *Ceratophyllum demersum* L. cultivation, These found that *Ceratophyllum demersum* L. cultivation can provide a good wastewater treatment in two weeks by reducing the total nitrogen and continually reducing the total phosphorus until the end of experiments with all dilution ratio of treated wastewater from palm oil factory.

Keywords: *Ceratophyllum demersum* L. , Algal biomass, Light intensity, Specific growth rate, Wastewater

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจและจำนวนของประชากร ในขณะที่พลังงานที่ได้จากฟอสซิลมีจำนวนอย่างจำกัด และนับวันมีแนวโน้มที่จะยิ่งลดลง (Qadeer, Khalid, Mahmood, & Anjum, 2017) ทำให้ได้มีการพัฒนาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนเพื่อที่จะลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิล และลดการปล่อยของก๊าซเรือนกระจก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันนักวิจัยพยายามในการศึกษาที่จะนำศักยภาพของพืชในอดีตที่มนุษย์ไม่ได้ให้ความสำคัญต่อคุณประโยชน์หันกลับมาใช้ประโยชน์สูงสุด เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ เนื่องจากพืชนั้นมีส่วนประกอบภายในโครงสร้างที่สามารถพิเศษต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นบรรยากาศ



สาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* Linn.) เป็นพรรณไม้ใต้น้ำ (Submerged macrophytes) ที่พบเห็นได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ทั้งในพื้นที่ที่เป็นน้ำกร่อยและน้ำจืด (Pastare, Romagnoli, Rugele, Dzene, & Blumberga, 2015) ซึ่งสาหร่ายพวงชะโดมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดี เพิ่มจำนวนของชีวมวลสาหร่าย (Algal biomass) ได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่มีน้ำขังหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายนั้นขึ้นอยู่กับธาตุอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง โดยสาหร่ายจะใช้ในโตรเจนคาร์บอนที่อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ (Cheewasedtham, Cheewasedtham, & Tjell, 2009) และแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ที่เป็นปัจจัยภายนอก โดยมีอิทธิพลทางอ้อมต่ออัตราการดูดซึมของธาตุอาหารผ่านกระบวนการที่เรียกว่า “Photosynthesis” การสังเคราะห์ด้วยแสง (Munoz & Gueyisse, 2008) ชีวมวลสาหร่ายที่ผลิตได้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) ที่มีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก เป็นพลังงานสะอาดที่สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ (Department of Alternative Energy Development and Energy Conservation, 2010) ส่งผลทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้ ควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่ายเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากของมนุษย์ในยุคปัจจุบันที่มีความสนใจต่อสุขภาพ สาหร่ายสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ในกลุ่มไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารพิษชนิดอื่น ๆ ได้แก่ สารในกลุ่มโลหะหนัก สารตกค้างยาวนาน สารในกลุ่มยาและฮอร์โมน เป็นระบบที่ดูแลง่าย ค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบต่ำ (Division of the Industrial Factory, 2010) และความเข้มของแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยการสังเคราะห์ด้วยแสงในการเร่งการทำงานของเซลล์ ส่งผลทำให้ผลิตชีวมวลสาหร่ายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญของความเข้มของแสงที่ได้จากดวงอาทิตย์ในกลางวันและการให้แสงเพิ่มจากหลอดไฟ LED ในเวลากลางคืนต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายในการผลิตชีวมวล เพื่อศึกษาความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.) ในการผลิตชีวมวลสาหร่าย (Algal biomass) ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการพัฒนาเป็นพลังงานสะอาดที่ยั่งยืนแห่งอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.) ในการผลิตชีวมวลสาหร่าย (Algal biomass) ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



วิธีการวิจัย

1. ชุดอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

ทำการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.) (ภาพที่ 1-ก) ณ สภาพต่าง ๆ (ตารางที่ 1 และภาพที่ 1-ข ถึง 1-ง) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในการเจริญเติบโต โดยใช้การทดลองการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในระบบเปิด (Open pond) แบบแบทช์ (Batch) โดยมีขนาดถัง กว้าง x ยาว x สูง คือ 30 x 50 x 30 cm (ภาพที่ 2)

ตารางที่ 1 สภาพต่าง ๆ สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ระดับความเข้มข้นของน้ำเสีย	ความเข้มของแสง	สาหร่าย : น้ำเสีย
1. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงาน	Sunlight	
สกัดน้ำมันปาล์ม เจือจาง 5 เท่า	Sunlight + LED 5,000 Lux	60 g : 38 L
	Sunlight + LED 10,000 Lux	
2. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงาน	Sunlight	
สกัดน้ำมันปาล์ม เจือจาง 10 เท่า	Sunlight + LED 5,000 Lux	60 g : 38 L
	Sunlight + LED 10,000 Lux	

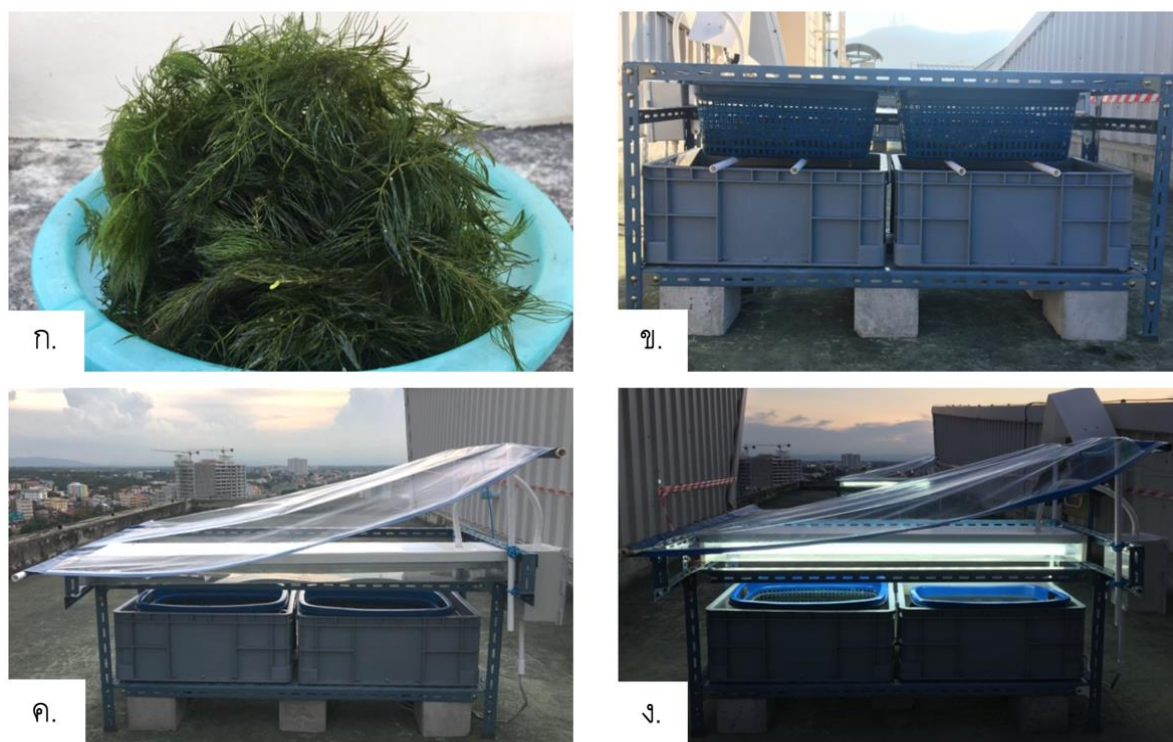
2. การเจริญเติบโตและการผลิตชีวมวลของสาหร่าย

ทำการวิเคราะห์สาหร่ายทุก ๆ 3 วัน เป็นระยะเวลา 18 วัน โดยยกตะกร้าพลาสติกที่อยู่ด้านในของระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายขึ้นเหนือระดับผิวหน้า สะเด็ดน้ำออกจากสาหร่าย 5-10 นาที (ภาพที่ 1-ข) (Algal Bioresources Research Center, Kasetsart University, 2014) แล้วชั่งน้ำหนักสาหร่ายเพื่อนำมาคำนวณผลผลิตของชีวมวล (Biomass production) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ของสาหร่ายพวงชะโด จากสมการที่ 1 และ 2

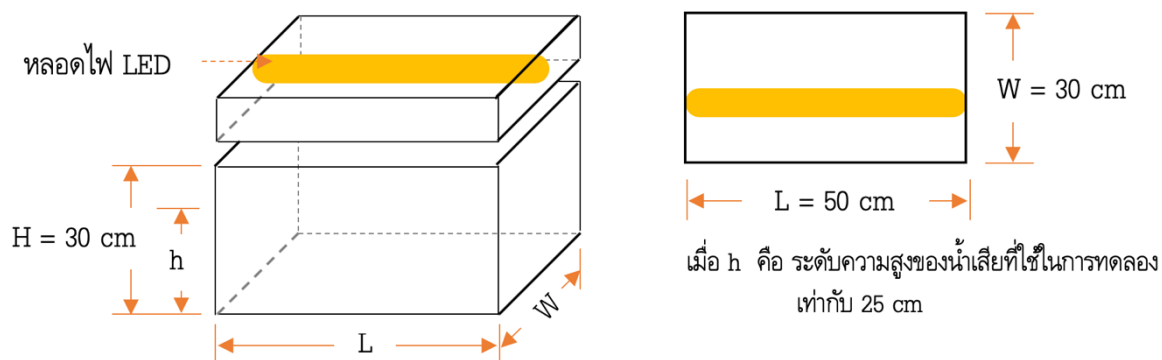
$$\text{Biomass production (g/L/d)} = \frac{(X_1 - X_0)}{(T_1 - T_0)} \quad (1)$$

$$\text{Specific growth rate (d}^{-1}\text{)} = \frac{\left[\frac{\ln(X_1)}{\ln(X_0)} \right]}{(T_1 - T_0)} \quad (2)$$

เมื่อ X_0 และ X_1 คือ มวลของสาหร่าย (g/L) ในวันที่ T_0 และ T_1 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ชุดการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงกะโด, สาหร่ายพวงกะโด (1-ก) การสะเด็ดน้ำ (1-ข) เพาะเลี้ยงสาหร่ายในเวลากลางวัน (1-ค) เพาะเลี้ยงสาหร่ายในเวลากลางคืนด้วยแสงจากหลอดไฟ LED ที่ระดับความเข้มแสงที่แตกต่างกัน (1-ง)



ภาพที่ 2 ขนาดถังสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงกะโด



3. พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่ายพวงชะโด

เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด เพื่อทำประเมินผลการบำบัดโดยเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการบำบัดตลอดจนจบการทดลอง โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์หลัก ๆ ได้แก่ ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อุณหภูมิ (Temperature) COD ในโตรเจน ฟอสฟอรัส ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และสี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เครื่องมือและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลอง

Parameter	Method
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Direct Measurement Electrometric Method (4500-H ⁺ B.)
อุณหภูมิ (Temperature)	Gravimetric Method
ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (COD)	Closed reflux (Titrimetric method) (5220 C.)
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	Kjeldahl Nitrogen Method (4500-N _{org} B.)
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (PO ₄ -P)	Spectrophotometer Ascorbic Acid Method (4500-P D.)
ของแข็งแขวนลอย (SS)	Dried at 103-105 °C Method (2540 E.)
ความขุ่น (Turbidity)	Nephelometric Method (2130 B.)
สี (Color)	Spectrophotometer (2120 F.)

ที่มา: APHA, AWWA & NEF (2005)

ผลการวิจัย

1. สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำเสียนำมาใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพของบริษัท ตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด นำมาใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าน้ำเสียมีลักษณะของสี (Color) ที่เข้มอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายพวงชะโด ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดต้องเจือจางให้มีค่า COD และระดับสีของน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Rattanaya, Jariyaboon, Kongjan, Cheewasedtham, & Bunyakan, 2016; Travieso et al., 2006) จึงได้ทำการเจือจาง 5 และ 10 เท่า เพื่อให้ได้น้ำเสียสำหรับเลี้ยงสาหร่ายให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโด (ตารางที่ 3)



ตารางที่ 3 ประเมินสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำเสียสำหรับใช้เลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด

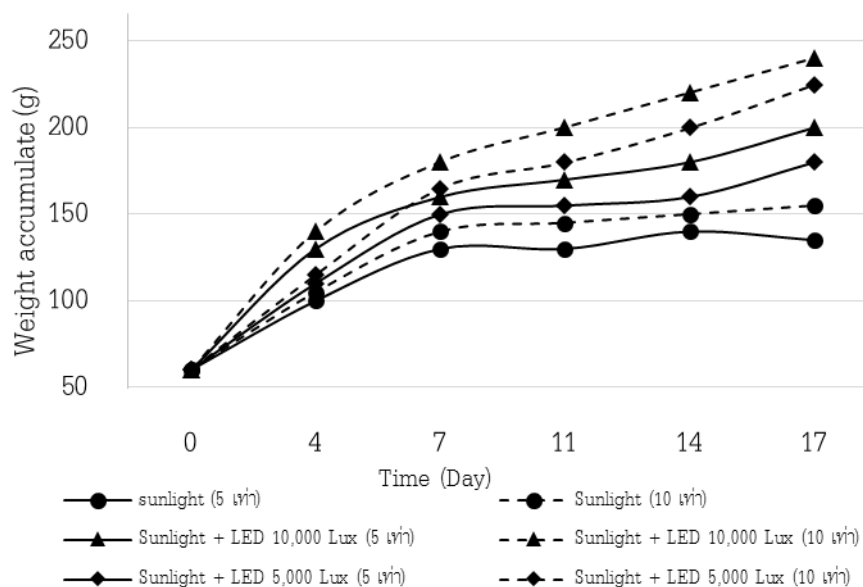
parameter	Color	pH	Temp	COD	TKN	PO ₄ -P	SS
Unit	Pt-Co	-	°C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Effluent	-	8.4±0.04	28±0.06	2,706±285	178±7.39	22±2.21	1,060±247
Effluent; Dilute 5 เท่า	3,679±0.58	8.4±0.03	29±0.06	522±16.4	41±0.56	3±0.00	91±5.03
Effluent; Dilute 10 เท่า	2,065±1.73	8.4±0.03	28±0.06	361±16.4	24±0.32	2±0.00	47±1.15

หมายเหตุ: Effluent คือ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพ

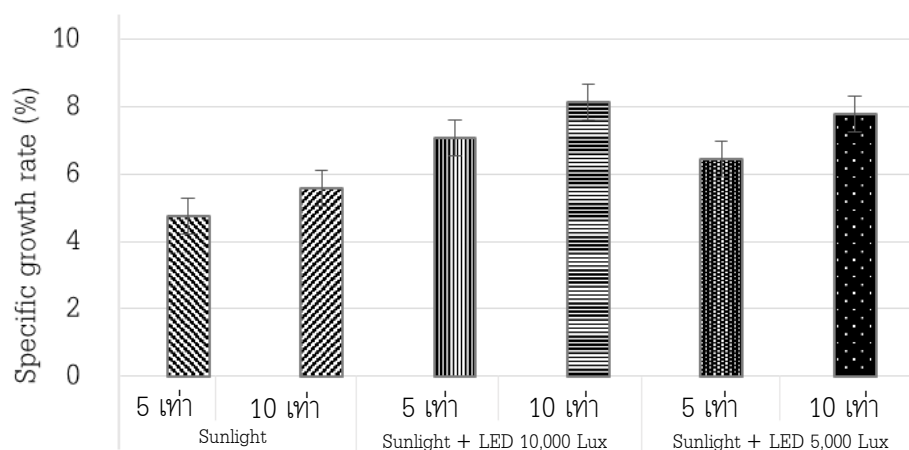
2. ความเข้มของแสงและความเข้มข้นของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยสาหร่ายพวงชะโด

2.1 ผลของการเจริญเติบโตของสาหร่าย

การทดลองการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในระบบเปิด (Open pond) แบบแบทช์ (Batch) ที่ระดับสภาวะความเข้มแสงแตกต่างกันเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในการเจริญเติบโต เป็นระยะเวลา 18 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ผสมระหว่างการให้แสงจากดวงอาทิตย์ช่วงกลางวัน และแสงจากหลอด LED ที่ความเข้มแสง 10,000 Lux ในเวลากลางคืน ที่เลี้ยงสาหร่ายในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 10 เท่า มีผลผลิตของชีวมวลสาหร่ายได้ดีที่สุด Sunlight + LED 5,000 Lux (10 เท่า), Sunlight + LED 10,000 Lux (5 เท่า), Sunlight + LED 5,000 Lux (5 เท่า), Sunlight (10 เท่า) และ Sunlight (5 เท่า) ตามลำดับ (ภาพที่ 3) เนื่องจากสาหร่ายพวงชะโดสามารถผลิตชีวมวลเป็นสองเท่าของน้ำหนักริมเริ่มต้น ใช้เวลาในการเจริญเติบโตเพียง 4 วัน เมื่อเลี้ยงต่อไปเป็นเวลา 7, 11, 14 และ 17 วัน ตามลำดับ พบว่าชีวมวลของสาหร่ายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นั่นคือ 3.0, 3.3, 3.7 และ 4.0 เท่าของน้ำหนักแรกเริ่มเลี้ยง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Cheirsilp & Torpee (2012) พบว่า สาหร่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นแสงเพิ่มขึ้นถึง 10,000 Lux ในทางกลับกันความเข้มแสงที่สูงมากเกินไป ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยับยั้งด้วยแสง ส่งผลให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลง (Park, Craggs, & Shilton, 2011) และพบว่าเมื่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงชะโดเท่ากับร้อยละ 8.17 ต่อวันของน้ำหนักริมต้น (ภาพที่ 4) โดยคำนวณจากสมการที่ 2 สาหร่ายพวงชะโดสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพของน้ำเสียที่บำบัดแล้วเจือจาง 10 เท่าได้ดี เนื่องจากระดับของสีในน้ำเสียมีผลกระทบน้อยที่สุดต่อการสังเคราะห์แสง ทำให้เกิดการงอกของกิ่งก้านสาขาใหม่ อีกทั้งยังเพิ่มชีวมวลสาหร่ายได้อย่างรวดเร็วจากการทดลองพบว่า สาหร่ายพวงชะโดมีการเจริญเติบโตรวดเร็วเมื่อเลี้ยงในน้ำเสียที่มีค่า COD ที่เหมาะสม มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงชะโดต่อวัน เท่ากับ ร้อยละ 3.51



ภาพที่ 3 น้ำหนักของสาหร่ายพวงพะโคในการเพาะเลี้ยงในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



ภาพที่ 4 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงพะโคในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

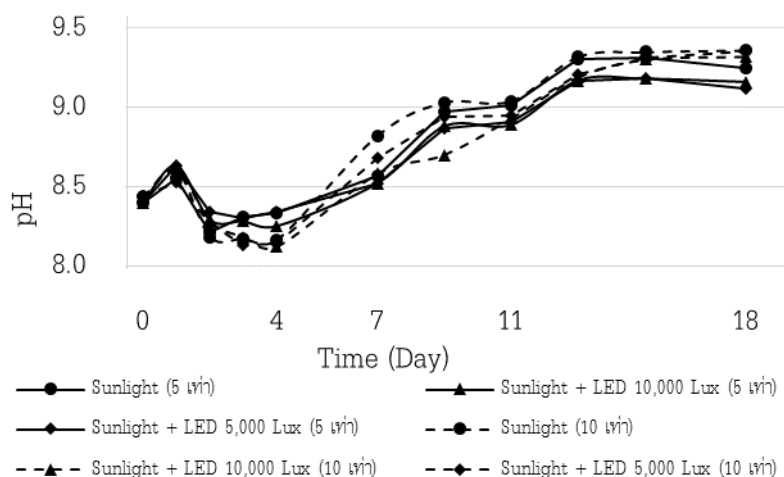
2.2 ประสิทธิภาพของสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

(1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบหลังการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงพะโคในระบบเปิด อิงแบบธรรมชาติ และระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงพะโคแบบ



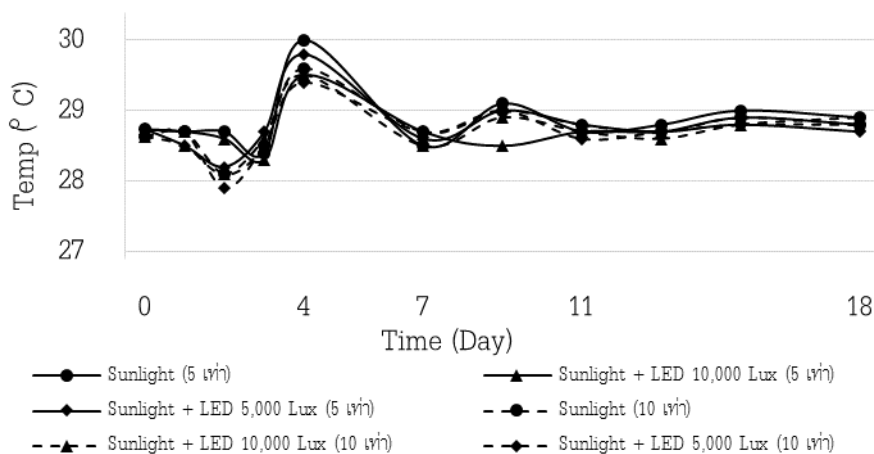
ผลระหว่างความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ กับความเข้มแสงจากหลอดไฟ LED ความเข้มแสง 5,000 และ 10,000 Lux พบว่า pH ในน้ำเลี้ยงที่ใช้เพาะเลี้ยงมีค่าที่ลดลงหลังจากใส่สาหร่ายพวงชะโกลงในบ่อเพาะเลี้ยง (หลังวันที่ 1 ของการเพาะเลี้ยง) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ช่วงแรกของการเพาะเลี้ยงเป็นช่วงที่สาหร่ายปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ (ภาพที่ 5) ค่า pH จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ชุดการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายจะดูดใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงในกลางวัน และช่วงเวลากลางคืนโดยให้ความสว่างจากหลอดไฟ LED ทำให้ค่า pH สูงขึ้น ส่งผลให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้เป็นอย่างดี (Duangsawast & Somsiri, 1985) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pinkayan (1978) จากผลการศึกษาพบว่า ฟิชน้ำจะสามารถดูดซับธาตุอาหารได้ดีขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับค่า pH ซึ่งค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5-9.0



ภาพที่ 5 ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโกลงในน้ำเลี้ยงที่ผ่านการบำบัดแล้ว

(2) อุณหภูมิ (Temperature)

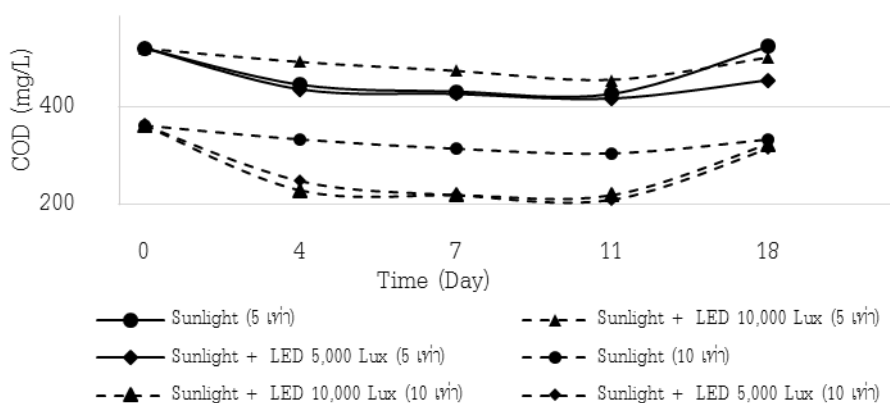
อุณหภูมิภายในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโกลงในช่วง 27 ถึง 31 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 6) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Park, Craggs, & Shilton (2011) พบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และจะมีการเจริญเติบโตได้สูงสุดเมื่อมีอุณหภูมิที่เหมาะสม อุณหภูมิที่เหมาะสมต่ออัตราการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 28 ถึง 35 องศาเซลเซียส จะทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) สูงขึ้นส่งผลทำให้สาหร่ายสามารถดูดซับธาตุอาหารเพิ่มขึ้นด้วย (Phromaya, 2009) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันจะทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลงหรือหยุดการเจริญเติบโต (อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส หรือ สูงกว่า 40 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 6 อุณหภูมิภายในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

(3) สารอินทรีย์ทั้งหมด (Chemical Oxygen Demand; COD)

ค่า COD หรือความสกปรกในรูปของ COD ที่เปลี่ยนไปตามเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด จะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 5 และ 10 เท่า ค่า COD จะลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดผ่านไป 2 สัปดาห์ (ภาพที่ 7) เนื่องจากสาหร่ายพวงชะโดที่มีอายุขัยที่นานแล้วบางส่วนเกิดการเน่าเปื่อย หากต้องการนำสาหร่ายพวงชะโดใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ควรเก็บเกี่ยวสาหร่ายพวงชะโดทุก ๆ 2 สัปดาห์ เพื่อป้องกันการเกิดฟองและแผ่นฟิล์มขึ้นบนผิวน้ำของน้ำในบ่อสำหรับเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด และทำให้ส่งกลิ่นเหม็นได้



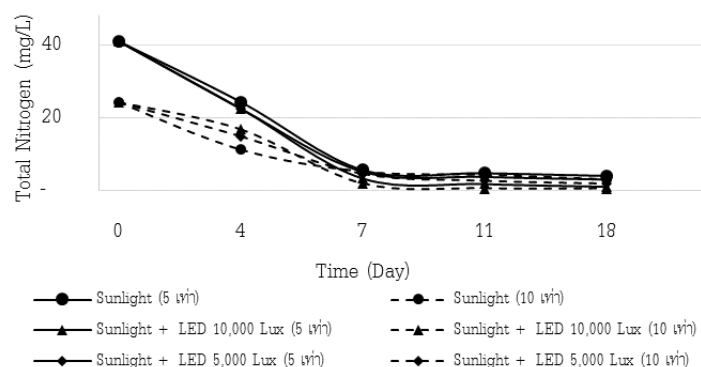
ภาพที่ 7 ค่า COD ในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



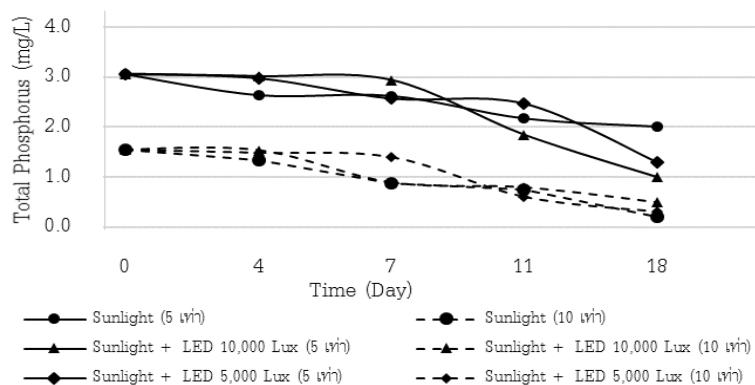
(4) ธาตุอาหาร

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากสาหร่ายจะใช้สังเคราะห์โปรตีน และกรดอะมิโน ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโต จึงมีผลทำให้ไนโตรเจนมีปริมาณที่ลดลงตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยง จากการทดลองพบว่าการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโศกของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพทุก ๆ ชุดการทดลองมีค่าไนโตรเจนทั้งหมดลดลงอย่างต่อเนื่อง และชุดการทดลองที่สามารถกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีที่สุดคือ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบผสมระหว่างความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์กับความเข้มแสงจากหลอด LED 10,000 Lux โดยสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจาก 24 mg/L เหลือ 0.5 mg/L (ภาพที่ 8) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 97.94

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มชีวมวลของสาหร่าย และฟอสฟอรัสยังช่วยทำให้ pH ของน้ำเสียคงที่ จากผลการทดลองพบว่า ฟอสฟอรัสในระบบเพาะเลี้ยงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 9) เนื่องจากสาหร่ายดูดซึมฟอสฟอรัสส่งผลต่อการเจริญเติบโตทำให้เพิ่มชีวมวลของสาหร่าย



ภาพที่ 8 ไนโตรเจนทั้งหมดในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโศกในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

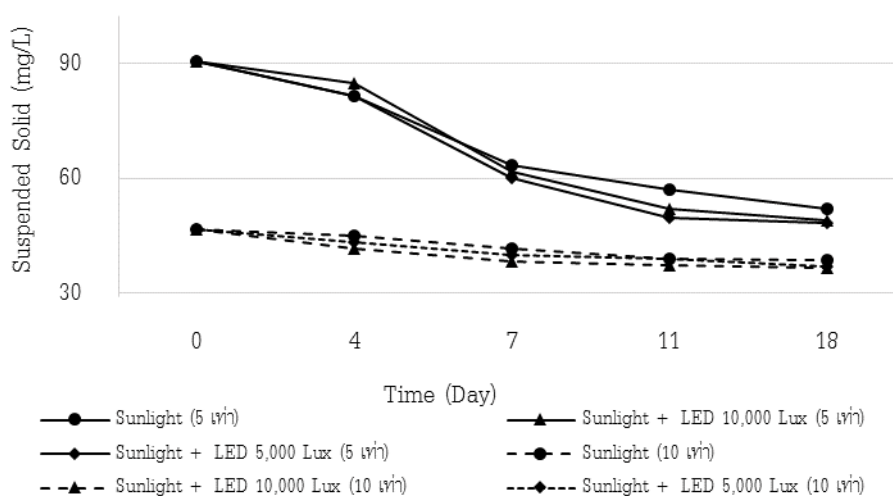


ภาพที่ 9 ฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโศกในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



(5) ของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)

ของแข็งแขวนลอยที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด 18 วัน พบว่าการบำบัดด้วยสาหร่ายของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพทุก ๆ ชุดการทดลอง มีค่าของสารแขวนลอยลดลงอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 10) เนื่องจากสาหร่ายสามารถดูดซับของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงได้ และการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำนิ่งทำให้ของแข็งแขวนลอยเกิดการตกตะกอน



ภาพที่ 10 ของแข็งแขวนลอยในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

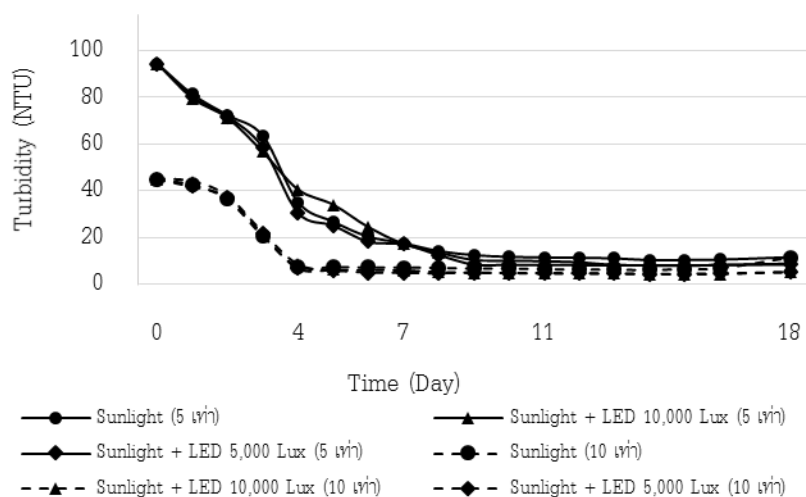
(6) ความขุ่น (Turbidity) และสี (Color)

ค่าความขุ่นของน้ำเสียจากระบบบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการทดลองเป็นเวลา 18 วัน ของการเพาะเลี้ยงสาหร่าย พบว่า การบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพทุก ๆ ชุดการทดลอง ค่าความขุ่นของน้ำเสียในชุดระบบเพาะเลี้ยงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 11) เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุอาหาร และความเข้มแสงที่ได้รับในการสังเคราะห์ และเมื่อค่าของของแข็งแขวนลอยลดลงจะส่งผลทำให้ความขุ่นลดลงตามไปด้วย

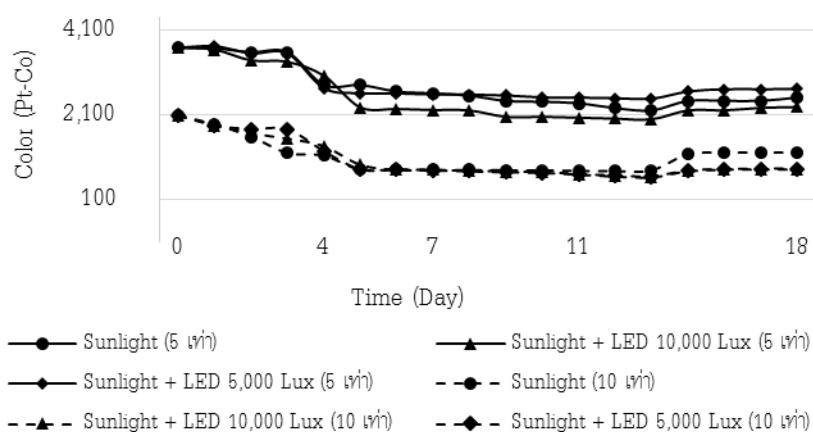
การวิเคราะห์ค่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียจากระบบบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการทดลองเป็นเวลา 18 วันของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด พบว่า การบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโด มีค่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดหมักก๊าซชีวภาพทุก ๆ ชุดการทดลอง ค่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียในชุดระบบเพาะเลี้ยงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 12) เนื่องจากการดูดซับสีภายใต้การสังเคราะห์แสงของสาหร่าย โดยเปลี่ยน



จากโมเลกุลที่มีสีให้กลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี (Dilek, Taplamacioglu, & Tarlan, 1999) สำหรับการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโคของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 5 เท่า และ 10 เท่า มีค่าของระดับสีที่เพิ่มขึ้น หลังครบ 2 สัปดาห์ของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโค จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำเสียจากระบบบำบัดที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโค ณ สภาวะที่แตกต่างกัน พบว่า การกำจัดสีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 10 เท่า ด้วยระบบผสมร่วมระหว่างการให้แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันและการให้แสงเพิ่มเติมจากหลอดแอลอีดี (LED) ที่ความเข้มข้นแสง 10,000 Lux สามารถกำจัดปริมาณของสีในน้ำเสียได้ดีที่สุดจาก 2,065 Pt-Co เหลือ 625 Pt-Co มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีคิดเป็นร้อยละ 69.7



ภาพที่ 11 ความขุ่นในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโคในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



ภาพที่ 12 ค่าสีในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโคในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



อภิปรายผล

ความสามารถในการผลิตชีวมวลสาหร่ายขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย แหล่งของธาตุอาหาร และสภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยง (Bernnan & Owende, 2010; Mata, Martins, & Caetano, 2010) งานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพโรงงานน้ำมันปาล์มในการเพาะเลี้ยง ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของโรงงานน้ำมันปาล์มมีลักษณะของสีที่เข้มอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพด้วยแสงของสาหร่ายพวงชะโด น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องทำการเจือจางให้มีค่า COD และระดับสีของน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Rattanaya et al., 2016; Travieso et al., 2006) จึงได้ทำการเจือจางน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว เป็น 5 และ 10 เท่า ตามลำดับ เพื่อลดค่าสารอินทรีย์และสีในน้ำเสียสำหรับเลี้ยงสาหร่ายให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโด

จากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ผสมรวมระหว่างการให้แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ช่วงกลางวันและให้แสงเสริมจากหลอด LED ที่ความเข้มข้นแสง 10,000 Lux ในเวลากลางคืน ที่เลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 10 เท่า มีผลผลิตของชีวมวลสาหร่าย (Algal biomass production) ได้ดีที่สุด เนื่องจากสาหร่ายพวงชะโดสามารถผลิตชีวมวลเป็นสองเท่าของน้ำหนักแรกเริ่มเลี้ยง โดยใช้เวลาเพียง 4 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Cheirsilp & Torpee (2012) พบว่า การเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นแสงเพิ่มขึ้นถึง 10,000 Lux ความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะเพิ่มการสังเคราะห์ด้วยแสงและช่วยเร่งการทำงานของเซลล์ ในทางกลับกันถ้าใช้ความเข้มแสงที่สูงมากเกินไปทำให้เกิดปรากฏการณ์ยับยั้งด้วยแสง (Photo inhibition) ทำให้ลดความสามารถในการเจริญเติบโตของสาหร่าย (Park, Craggs, & Shilton, 2011)

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงชะโดที่เลี้ยงในน้ำเสียที่เจือจาง 10 เท่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.17 ต่อวันของน้ำหนักสาหร่ายแห้ง เนื่องจากสาหร่ายพวงชะโดสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพของน้ำเสียที่บำบัดแล้วเจือจาง 10 เท่าได้ดี ระดับของสีในน้ำมีความเข้มข้นน้อย จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพด้วยแสงน้อยที่สุด ทำให้เกิดการงอกของกิ่งก้านสาขาใหม่ได้อย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ Rattanaya et al. (2016) และ Travieso et al. (2006) จากการทดลองพบว่าสาหร่ายพวงชะโดมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วเมื่อเลี้ยงในน้ำเสียที่มีค่า COD ที่เหมาะสม มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงชะโดต่อวันเท่ากับ ร้อยละ 3.51 ซึ่งผลผลิตชีวมวลที่ได้ยังสามารถเป็นแนวทางเลือกใหม่ในการนำมาเป็นวัสดุต้นแบบในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะอาด และยังทำให้สาหร่ายได้รับความสนใจใน



การพัฒนาเป็นพลังงานแห่งอนาคต เนื่องจากสาหร่ายเป็นพืชชั้นต่ำที่มีการเจริญเติบโตเร็ว (Algae bloom) ส่งผลทำให้แหล่งอาหารในบริเวณแหล่งน้ำนั้น ๆ ลดลงไปด้วย

ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยสาหร่ายพวงชะโดที่เพาะเลี้ยงสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด จาก 24 mg/L เหลือ 0.5 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 97.94 สอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยของ Saeleum (2003) บำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้สาหร่ายพวงชะโด ซึ่งการศึกษานี้จะพบว่าสาหร่ายพวงชะโดสามารถลดปริมาณ COD, ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เท่ากับร้อยละ 80, 76 และ 100 ตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Rodcharoen, Sawain, & Kraipitthayakorn (2014) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสียโรงงานปาล์มน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่าระดับค่าความเข้มข้นที่ร้อยละ 50 ของน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ใน ไตรท์ และไนเตรท เท่ากับร้อยละ 98.44±0.17, 86.18±3.97 และ 85.27±1.20 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ ร้อยละ 98.68±0.13

จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการกำจัดธาตุอาหารในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักก๊าซชีวภาพของโรงงานปาล์มน้ำมันของสาหร่ายได้ดี และจากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดหมักก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโดมีปริมาณที่ลดลงเรื่อย ๆ จะส่งผลต่อปริมาณความขุ่นและสี ทำให้มีค่าที่ลดลงตามไปด้วย สีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 10 เท่า ด้วยระบบผสมระหว่างการใช้แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันและการให้แสงเพิ่มเติมจากหลอด LED ที่ความเข้มข้นแสง 10,000 Lux สามารถกำจัดปริมาณของสีในน้ำเสียได้ดีที่สุดจาก 2,065 Pt-Co เหลือ 625 Pt-Co มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีคิดเป็นร้อยละ 69.7 เช่นเดียวกับรายงานผลการวิจัยของ Chanchitpricha (1999) ประสิทธิภาพการกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบพบว่า สาหร่ายสามารถกำจัดสีได้ดีขึ้น โดยมีปัจจัยหลาย ๆ ด้าน ทั้งทางด้านปริมาณความเข้มข้นของธาตุอาหาร ปริมาณความเข้มของแสงที่ได้รับ รวมทั้งความเข้มข้นของเซลล์ของสาหร่ายเริ่มต้น

สรุป

ความเข้มแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.) ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จากการศึกษาพบว่า ชุด



การทดลองการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโคของระบบผสมร่วมระหว่างการให้แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ ในเวลาระหว่างช่วงกลางวันและให้แสงสว่างเสริมจากหลอดไฟ LED ที่ความเข้มแสง 10,000 Lux ในเวลากลางคืน เลี้ยงในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบหมักก๊าซชีวภาพเจือจาง 10 เท่า ซึ่งเป็นสภาวะที่มีธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต สามารถผลิตชีวมวลสาหร่ายได้ดีที่สุด โดยมีผลผลิตชีวมวลเป็นสองเท่าของน้ำหนักรากเริ่มเลี้ยง ซึ่งใช้เวลาในการเจริญเติบโตเพียง 4 วัน และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายพวงชะโคเท่ากับร้อยละ 8.17 ต่อวันของน้ำหนักรากแห้ง และเมื่อทดสอบเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงชะโคเป็นระยะเวลา 18 วัน พบว่า สาหร่ายพวงชะโคสามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีใน 2 สัปดาห์ของการเพาะเลี้ยง และสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด อย่างต่อเนื่องจนจบการทดสอบกับทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า สาหร่ายพวงชะโคที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เจือจาง 10 เท่า มีศักยภาพในการผลิตชีวมวลสาหร่ายเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทนในอนาคต และเป็นการนำร่องสู่การผลิตมวลสาหร่ายที่ให้ผลผลิตที่ดีและลดต้นทุนในการผลิตสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. หากนำสาหร่ายพวงชะโค (*Ceratophyllum demersum* L.) มาเป็นพืชน้ำที่ใช้สำหรับการบำบัดเสีย ควรมีสารอาหารที่เพียงพอและเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และควรเก็บเกี่ยวสาหร่ายพวงชะโค ทุก ๆ 2 สัปดาห์ มิฉะนั้นอาจจะเกิดการเน่าเสียของน้ำที่บำบัดเพิ่มขึ้นได้
2. ความเข้มแสงจากหลอดไฟ LED ที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายในเวลากลางคืน ส่งผลให้สาหร่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นแสงเพิ่มขึ้นถึง 10,000 Lux และมีโอกาสที่จะผลิตชีวมวลได้เพิ่มขึ้นอีก หากใช้ความเข้มแสงที่สูงกว่า 10,000 Lux สำหรับการเพาะเลี้ยงของสาหร่ายพวงชะโค

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากเงินรายได้ส่วนกลางมหาวิทยาลัย ปังบประมาณ 2562 และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



รายการอ้างอิง (References)

- Algal Bioresources Research Center, Kasetsart University. (2014). Culture of *Caulerpa lentillifera* *J. Agardh*. Retrieved from <http://abrc.fish.ku.ac.th/th/>. (in Thai).
- APHA, AWWA and WEF. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st Ed, American Public Health Association, New York.
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sust Energ Rev*, 14: 557-577.
- Chanchitpricha, C. (1999). The use of microalgae for color and chemical oxygen demand removal in treated molasses. Master Thesis, Science (Environmental Sanitation). Mahidol University. (in Thai).
- Cheewasedtham, C., Cheewasedtham, W., & Tjell, J. (2009). Marine algae as biomass for energy production. Proposal submitted to EGAT. Thailand.
- Cheirsilp, B., & Torpee, S. (2012). Enhanced growth and lipid production of microalgae under mixotrophic culture condition: Effect of light intensity, glucose concentration and fed – batch cultivation. *Bioresource Technology*, 110(0), 510-516.
- Dilek á, F.B., Taplamacioglu á, H.M., & Tarlan E. 1999. Colour and AOX removal from pulping effluents by algae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 52, 585-591.
- Department of Alternative Energy Development and Energy Conservation. (2010). Production operating guide and safe use of biogas for ranch farms. Bureau of Energy Research, Bangkok. (in Thai).
- Division of the Industrial factory. (2010). Operation manual regarding design manufacturing quality control and the use of biogas for Industrial factory. (1st ed.). Bangkok: Ministry of Industry. (in Thai).
- Duangawast, M., & Somsiri, C. (1985). Properties of water and analysis methods for fisheries research. National inland fisheries institute, (pp.115). Bangkok: Department of Fisheries. (in Thai).
- Mata, T.M., Martins, A.A., & Caetano, N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew Sust Energ Rev*, 14: 217-232.
- Munoz, R., & Gueysse, B. (2008). Algae-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research*, 40(15), 2799-2815.



- Park, J.B.K., Craggs, R.J., & Shilton, A.N. (2011). Wastewater treatment high rate algae ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102, 35-42.
- Pastare, L., Romagnoli, F., Rugele, K., Dzene, I., & Blumberga, D. (2015). Biochemical methane potential from anaerobic digestion of the macrophyte *Ceratophyllum demersum*: A batch test study for Latvian conditions. *Energy Procedia*. 72, 310-316.
- Phromaya, C. (2009). Algal – cultivation. Faculty of Fisheries Technology and Water Resources. Maejo University. (in Thai).
- Pinkayan, S. (1978). Evaluation of environmental change study of environmental impact at Nam Pong project Northerneast. *Thailand*. Prepare of National Energy Administration by SEATEC Consulting Engineer. Latvian conditions. *Energy Procedia*. 72, 310-316.
- Qadeer, s., Khalid, A., Mahmood, S., & Anjum, M. (2017). Utilizing oleaginous bacteria and fungi for cleaner energy production. *J Clean Prod*, 168: 917-928.
- Rattanaya, T., Jariyaboon, R., Kongjan, P., Cheewasedtham, C., & Bunyakan, C. (2016). Cultivation of *Ceratophyllum demersum* L. by wastewater from biogas scrubber. 39th National Graduate Research Conference & 4th International Graduate Research Conference (2016), Assumption University of Thailand, Suvarnabhumi campus, Samuthprakarn, Thailand 30th June-1th July, 2016.
- Rodcharoen, S., Sawain, A., & Kraipitthayakorn, W. (2014). Efficiency of cyanobacterium, *Phormidium* sp. for wastewater treatment of palm oil industry. Rethink: Social Development for Sustainability in ASEAN Community, 11-13 June 2014. (in Thai).
- Saeleum, S. (2003). Utilization of wastewater from biogas ponds in pig farm as nutrients for freshwater algae. A thesis of mater degree of Science, Mahidol University.
- Travieso, L., Benitez, F., Sanchez, E., Borja, R., Martin, A., & Colmenarejo, M.F. (2006). Batch mixed culture of *Chlorella vulgaris* using settled and diluted piggery waste. *Ecological Engineering*, 28(2), 158-165.