วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 26 (No.2) May – August 2021
บทความวิจัย

การเพิ่มกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนของ *Chlorococcum humicola*

An Increase in Domestic Wastewater Treatment Capacity of *Chlorococcum humicola*

ณกรณ์ เที่ยงภักดี, ฉัตรชัย กันยาวุธ* และ อิทธิศักดิ์ เภาโพธิ์
Nakon Thiangpakdee, Chatchai Kunyawut* and Idtisak Paopo
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

Received : 13 August 2020
Revised : 30 September 2020
Accepted : 19 October 2020

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนรูปแบบการเลี้ยงจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพใช้แสงแบบคอลัมน์ฟอง (BCPBR) เพื่อเพิ่มกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นแนวทางที่ดำเนินการได้โดยปรับปรุงอุปกรณ์การเลี้ยงเพียงเล็กน้อย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาการเพิ่มกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการเปลี่ยนการเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* แบบกะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของธาตุอาหารไนโตรเจนรวม (TN) และฟอสฟอรัสรวม (TP) เท่ากับ 13.0 โดยน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ปริมาตร 10 ลิตรถูกนำบำบัดใน BCPBR ด้วยการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะเป็นเวลา 14 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัด TN และ TP เท่ากับร้อยละ 87.52 และ 88.94 ตามลำดับ และมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.250 วัน$^{-1}$ สำหรับการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องนั้นทำการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ทุก 6 วัน จำนวน 4 รอบ พบว่าความเข้มข้นของ TN และ TP ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์นั้นมีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด TN และ TP เท่ากับร้อยละ 60.43 ± 3.55 และ 83.13 ± 2.23 ตามลำดับ และ μ มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.245 ± 0.028 วัน$^{-1}$ ซึ่งแตกต่างจากการเลี้ยงแบบกะเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ในปริมาตรรวม 20 ลิตรเท่ากันพบว่าการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 0.83 ลิตรต่อวัน ในขณะที่การเลี้ยงแบบกะสามารถบำบัดได้ 0.69 ลิตรต่อวัน ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์สามารถทำได้โดยเปลี่ยนรูปแบบเลี้ยงจุลสาหร่ายจากแบบกะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง

คำสำคัญ : จุลสาหร่าย ; น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ ; กำลังการบำบัด ; เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพใช้แสง

Abstract

Changing way of microalgae cultivation in a bubble column photobioreactor (BCPBR) can be employed to increase domestic wastewater treatment capacity which requires less modification of culture apparatus. An objective of this research was to investigate an increase in domestic wastewater treatment capacity by altering cultivation of microalgae *Chlorococcum humicola* from batch to semi- continuous condition. The synthetic wastewater was prepared to match nutrient compositions of domestic wastewater with a molar ratio of total nitrogen (TN) and phosphorus (TP) of 13. The wastewater with a volume of 10 L was treated in the BCPBR by the microalgae under batch culture condition for a period of 14 days. The results revealed that treatment efficiencies of TN and TP were 87.52 and 88.94 %, respectively, with a specific growth rate (μ) of 0.250 d^{-1}. The semi-continuous culture condition with 4 periods of cell harvest and wastewater replacement (every 6 days) provided average treatment efficiencies of TN and TP of 87.52 and 88.94 %, respectively. While an average figure of μ with 0.245 ± 0.028 d^{-1} was a little difference from that of the batch culture condition. Compared with the same volume of 20 L of synthetic domestic wastewater, the semi-continuous culture condition gave treatment capacity of 0.83 L/d while that of the batch culture condition was 0.69 L/d. This indicated that the increase in treatment capacity could be achieved by altering the way of microalgae cultivation, i.e. from batch to semi-continuous condition.

Keywords : microalgae ; synthetic domestic wastewater ; treatment capacity ; photobioreactor

***Corresponding author. E-mail** : chatchai.k@ubu.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลสาหร่ายถูกศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากเซลล์ของจุลสาหร่ายสามารถกำจัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้โดยกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยทั่วไปแล้วธาตุอาหารหลักที่จุลสาหร่ายจำเป็นต้องใช้ในการเจริญเติบโตประกอบด้วยคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งในเซลล์ของจุลสาหร่ายนั้นมีปริมาณของไนโตรเจนร้อยละ 1 – 10 (ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของจุลสาหร่ายและสารอาหารที่จุลสาหร่ายใช้) คาร์บอนร้อยละ 50 โดยประมาณและฟอสฟอรัสน้อยกว่าร้อยละ 1 (Grobbelaar, 2013) ดังนั้นสารอาหารเหลวที่ใช้เลี้ยงจุลสาหร่ายจึงควรมีสารประกอบของธาตุอาหารไนโตรเจนรวม (TN) และฟอสฟอรัสรวม (TP) ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 16 (Redfield, 1958) ในน้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปแล้วมีความเข้มข้นของ TN และ TP อยู่ในช่วง 20 – 70 และ 4 – 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Arbib, 2013) โดยน้ำเสียชุมชนซึ่งมีธาตุอาหารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียมมากกว่า 21.6 – 36.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH มากกว่า 8.0 นั้นจุลสาหร่ายจะไม่สามารถใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เนื่องจากเป็นสภาวะที่เป็นพิษต่อจุลสาหร่าย (Monfet & Unc, 2017) ดังนั้นน้ำเสียชุมชนที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงจุลสาหร่ายจึงควรผ่านการบำบัดในขั้นตอนทุติยภูมิ (Secondary treatment) ซึ่งจะมี TN และ TP คงเหลืออยู่ในช่วง 20 – 40 และ 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะมีอัตราส่วนโดยโมลของ TN:TP อยู่ในช่วง 9 – 44 (McGinn *et al*., 2011) ในกรณีที่อัตราส่วนโดยโมลของ TN:TP ในน้ำเสียชุมชนมากกว่า 16 จะเกิดสภาวะการขาดแคลนฟอสฟอรัสหรือฟอสฟอรัสจำกัด (Phosphorus limitation) และถ้าหากอัตราส่วนโดยโมลของ TN:TP น้อยกว่า 16 จะเกิดสภาวะการขาดแคลนไนโตรเจนหรือไนโตรเจนจำกัด (Nitrogen limitation) ซึ่งทั้งสองกรณีนี้จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบภายในเซลล์ของจุลสาหร่าย (Arbib, 2013)

การเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะโดยทั่วไปแล้วมีประสิทธิภาพสูงในบำบัด TN และ TP ซึ่งมีการป้อนสารอาหารเหลวหรือน้ำเสียชุมชนเพียงครั้งเดียวที่เวลาเริ่มต้นนั้น อย่างไรก็ตามการเลี้ยงแบบนี้มีข้อด้อย คือ ใช้ระยะเวลาในการบำบัดรวมทั้งการล้างทำความสะอาดและเตรียมอุปกรณ์สำหรับการบำบัดในครั้งถัดไปค่อนข้างมาก สำหรับการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องนั้นโดยทั่วไปแล้วมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตชีวมวลซึ่งจะทำการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่าย (เมื่อมีปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 80 ของปริมาณเซลล์ที่มากที่สุด) ออกจากระบบร้อยละ 30 – 50 จากนั้นเติมสารอาหารเหลวใหม่และทำการเลี้ยงต่อไปโดยมีการกำหนดรอบเก็บเกี่ยวให้มีระยะเวลาเพียงพอที่มีเซลล์จุลสาหร่ายเพิ่มขึ้นไปถึงปริมาณเซลล์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับปริมาณเซลล์ที่คงเหลือในระบบหลังจากการเก็บเกี่ยวครั้งแรก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะประยุกต์การเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มความสามารถหรือกำลังในการบำบัด (Treatment capacity) TN และ TP ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ ซึ่งการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์จะดำเนินการเมื่อความเข้มข้นของ TN และ TP ลดลงเหลือน้อยกว่า 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จุลสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวที่ใช้เป็นสายพันธุ์ *Chlorococcum humicola* สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการเลี้ยงได้ค่อนข้างดี เช่น pH ในช่วง 6.5 – 8.5 และอุณหภูมิในช่วง 28 – 32 องศาเซลเซียส โดยเซลล์จุลสาหร่ายมีขนาดใหญ่ทำให้เก็บเกี่ยวได้ง่าย

วิธีดำเนินการวิจัย

จุลสาหร่าย

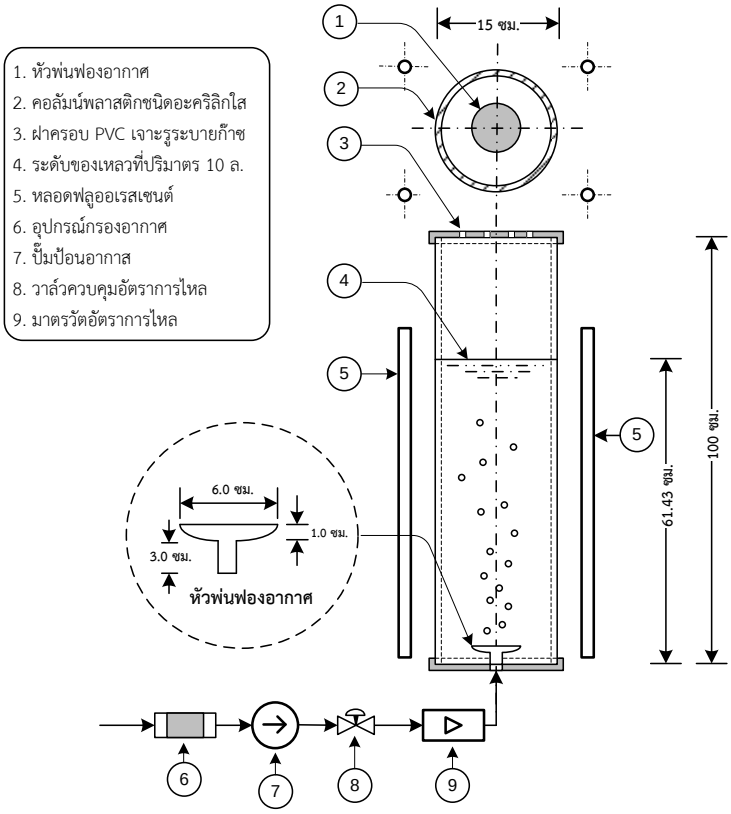
จุลสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorococcum humicola* TISTR 8551 ได้จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) หัวเชื้อจุลสาหร่ายถูกนำมาเพาะขยายจำนวนเซลล์ในห้องปฏิบัติการด้วยสารอาหารเหลวสูตรมาตรฐาน BG-11 ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ TN:TP เท่ากับ 100 (Boussiba & Vonshak, 1991) ผสมด้วยสารละลายธาตุอาหารเสริม (Trace metal A5, TMA5) ในปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรสารอาหารเหลว ควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารอาหารเหลวให้มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5 – 8.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1.0 โมลาร์ ให้แสงสังเคราะห์สีขาวที่มีความเข้มของแสง 50 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที รักษาอุณหภูมิการเลี้ยงจุลสาหร่ายไว้ที่ 28 – 32 องศาเซลเซียส ป้อนอากาศตลอด 24 ชั่วโมง (Wannasutthiwat, 2014)

น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลักและความเข้มข้นใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชนที่ผ่านกระบวนการบำบัดในขั้นตอนทุติยภูมิโดยมีความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของสารประกอบโซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) 1.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารประกอบแอมโมเนียคลอไรด์ (NH_4Cl) 21.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุอาหารฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของสารประกอบไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) 5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (Arbib *et al*., 2014) และผสมด้วยสารละลายธาตุอาหารเสริม (Trace metal A5, TMA5) ด้วยปริมาณ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรของของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ ปรับค่า pH ของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ให้อยู่ในช่วง 6.5 – 8.5 จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ปล่อยให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปบำบัดโดยการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพใช้แสงแบบคอลัมน์ฟอง

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพใช้แสงแบบคอลัมน์ฟอง (Bubble column photobioreactor, BCPBR) ที่ใช้เลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อบำบัดนำเสียชุมชนสังเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 1 นั้นเป็น BCPBR ชุดเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยของ Kunyawut *et al*. (2019) โดยคอลัมน์ทำจากพลาสติกชนิดอะคริลิกใสทรงกระบอกเพื่อให้แสงส่องผ่านได้และสามารถสังเกตพฤติกรรมการไหลของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์และการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย ที่ส่วนล่างของคอลัมน์ติดตั้งหัวพ่นอากาศชนิดออริฟิสแผ่นเรียบแข็ง (Rigid orifice sparger) อากาศถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างของคอลัมน์ผ่านมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศซึ่งจะเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของความเร็วผิวของก๊าซ (Superficial gas velocity, U_G) เทียบกับพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ ติดตั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์รอบ BCPBR เพื่อให้แสงประดิษฐ์สีขาวสำหรับจุลสาหร่ายใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง



ภาพที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพใช้แสงแบบคอลัมน์ฟอง

การบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

บรรจุน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ปริมาตร 10 ลิตร ที่ผสมด้วย TMA5 1 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ลงใน BCPBR จากนั้นเติมหัวเชื้อจุลสาหร่ายที่มีความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ $5.88\text{x}10^{6} \pm 0.29\text{x}10^{6}$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ (Thiangpakdee *et al.*, 2020) ทำการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะเป็นเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิ 28 – 32 องศาเซลเซียส ป้อนอากาศเข้าสู่ BCPBR โดยควบคุมให้ U_G มีค่าระหว่าง 0.1 – 0.3 เซนติเมตรต่อวินาที เพื่อทำให้เกิดการไหลแบบฟองก๊าซขนาดเล็กแขวนลอยในของเหลวภายในคอลัมน์ซึ่งเป็นพฤติกรรมทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมกับการเลี้ยงจุลสาหร่าย (Fan, 1989) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตรโดยรวมระหว่าง CO_2 และของเหลว ($k_L a$) อยู่ในช่วง $2.54\text{x}10^{-3}$ – $5.48\text{x}10^{-3}$ วินาที$^{-1}$ (Kunyawut *et al.*, 2019) ให้แสงประดิษฐ์สีขาวที่มีความเข้มของแสง 50 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยช่วงเวลาให้แสงต่อมืดเท่ากับ 12/12 ชั่วโมง ปรับค่า pH ของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ให้มีค่าระหว่าง 6.5 – 8.5 ด้วยสารละลายกรด HCl 0.1 โมลาร์ เก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมงเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษา ยกเว้นการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่เก็บตัวอย่างทุก 72 ชั่วโมง

จากนั้นทำการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการเลี้ยงที่มีต่อ ความสามารถหรือกำลังในการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ โดยการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องนั้นในช่วงแรกทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะเช่นเดียวกับการเลี้ยงแบบกะ เมื่อความเข้มข้นของ TN (แอมโมเนียมและไนเตรท) และ TP ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนของสหภาพยุโรป (European Union Directive 98/15/CE) (โดยที่ TN และ TP มีความเข้มข้นน้อยกว่า 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) จึงเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ออกจาก BCPBR ด้วยปริมาตร 5 ลิตร (ร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่เวลาเริ่มต้น) จากนั้นเติมน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ซึ่งผสมด้วย TMA5 ที่เตรียมไว้ใส่ใน BCPBR ให้มีปริมาตร 10 ลิตร จากนั้นทำการเลี้ยงจุลสาหร่ายต่อไปภายใต้สภาวะเช่นเดียวกันกับก่อนการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นของ TN และ TP ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจึงทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียสังเคราะห์จำนวน 3 รอบ ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาเช่นเดียวกับการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะ โดยความหนาแน่นของเซลล์จุลสาหร่ายทำการวิเคราะห์โดยประยุกต์ใช้การนับเซลล์เม็ดเลือดโดยใช้สไลด์นับเซลล์ (Haemacytometer) (Krichanavaruk, 2007) ความเข้มข้นของสารประกอบไนเตรทวิเคราะห์โดยวิธีตามมาตรฐาน 4500- NO_3^- B. Nitrogen (Nitrate) Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method (APHA, 2005) ความเข้มข้นของสารประกอบแอมโมเนียและฟอสเฟตวิเคราะห์โดยใช้วิธีของ Strickland & Parson (1972) และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) วิเคราะห์โดยวิธีตามมาตรฐาน APHA (2005) พารามิเตอร์ทุกเทอมในข้างต้นถูกวัดและนำมาวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจึงมาหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนด้วยวิธีมาตรฐานทางสถิติ สำหรับอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) และผลผลิตจำเพาะ (Specific productivity) ของจุลสาหร่ายนั้นสามารถประเมินได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\mu = \frac{\ln(N_2) - \ln(N_1)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

$$SP = \frac{N_2 - N_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

โดยที่ μ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลสาหร่าย (วัน$^{-1}$) SP คือ ผลผลิตจำเพาะ (เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อวัน) N_1 และ N_2 คือ ความหนาแน่นของเซลล์จุลสาหร่าย (เซลล์ต่อมิลลิลิตร) ที่เวลาเพาะเลี้ยง t_1 และ t_2 (วัน) ตามลำดับ ในการประเมินหาค่าของ μ นั้นใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในระยะทวีคูณเพื่อลดผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นที่ค่อนข้างน้อยของปริมาณเซลล์จุลสาหร่ายในระยะปรับตัวของจุลสาหร่าย (Vaičiulyte *et al*., 2014) และประสิทธิภาพการบำบัด TN และ TP ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์สามารถประเมินได้จากสมการที่ (3)

$$TE = \left(\frac{C_{in} - C_f}{C_{in}}\right) \times 100 \quad (3)$$

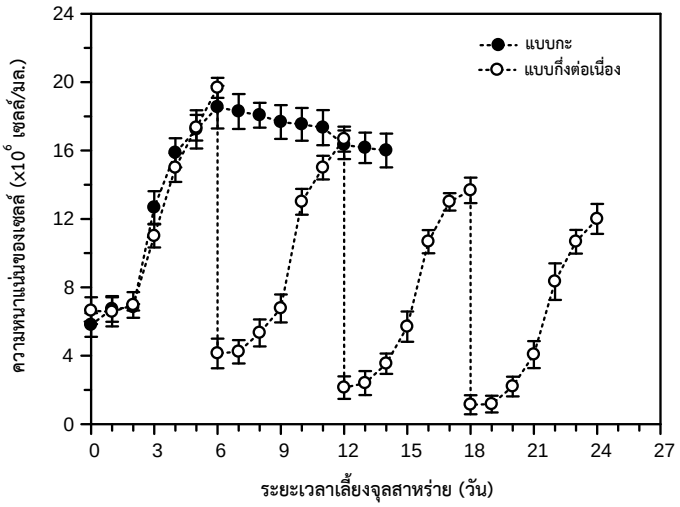
โดยที่ TE คือ ร้อยละของการบำบัด TN หรือ TP ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ C_{in} และ C_f คือ ปริมาณของ TN และ TP ที่เวลาเริ่มต้นและเวลาสุดท้ายของการบำบัด โดยการประเมินประสิทธิภาพการเลี้ยงแบบกะนั้น C_f คือ ความเข้มข้นของ TN หรือ TP ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง ณ วันที่เป็นจุดกึ่งกลางของการเจริญเติบโตในระยะคงตัวของจุลสาหร่าย สำหรับการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องนั้น C_f คือ ความเข้มข้นของ TN หรือ TP ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง ณ วันที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน

ผลการวิจัย

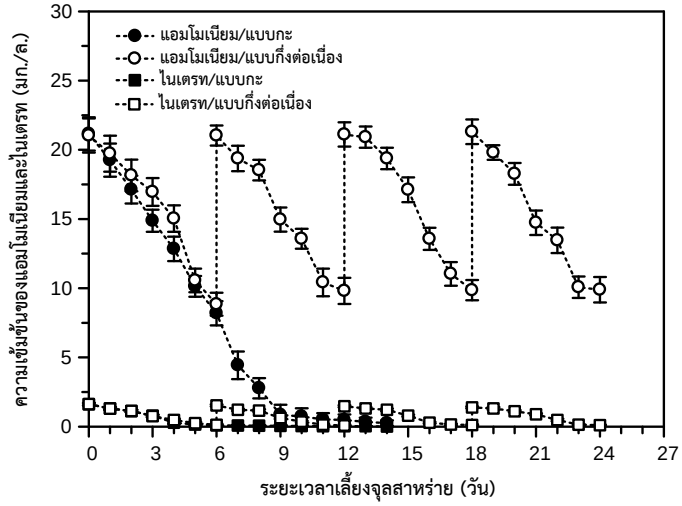
พฤติกรรมการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย

ภาพที่ 2 แสดงการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorococcum humicola* ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่มีความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ $5.80 \times 10^6 \pm 0.28 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าการเลี้ยงภายใต้สภาวะแบบกะนั้นจุลสาหร่ายมีการเจริญเติบโตในระยะการปรับตัว (Lag phase) ในช่วง 2 วันแรก และเข้าสู่ในระยะทวีคูณ (Exponential phase) ในวันที่ 3 – 6 โดยในวันที่ 6 มีความหนาแน่นของเซลล์จุลสาหร่ายมากที่สุดเท่ากับ $18.54 \times 10^6 \pm 1.84 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.250 วัน$^{-1}$ จากนั้นจึงเข้าสู่ระยะคงตัว (Stationary phase) ในวันที่ 7 – 9 ซึ่งจุลสาหร่ายมีอัตราการแบ่งเซลล์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับอัตราการตายของเซลล์ จุลสาหร่ายเข้าสู่การเจริญเติบโตในระยะตาย (Death phase) ในวันที่ 10 – 14 สำหรับการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง จากพฤติกรรมการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* ภายใต้สภาวะการเลี้ยงแบบกะจึงทำให้สามารถกำหนดวันเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายได้เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงในวันที่ 6 ซึ่งเป็นวันที่มีความเข้มข้นของ TN และ TP คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์น้อยกว่า 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน (ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5) หลังจากเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ใหม่ให้มีปริมาตรเท่ากับ 10 ลิตร ทำการเลี้ยงต่อไปและเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายรวมทั้งเติมน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ทุก 6 วัน จำนวน 3 รอบ รวมระยะเวลาในการเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็น 24 วัน (เมื่อรวมการเลี้ยงในวันที่ 0 – 6 ด้วย ในงานวิจัยนี้จะพิจารณารวมเป็น 4 รอบ) ภาพที่ 2 แสดงการเจริญเติบโตของเซลล์จุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะแบบกึ่งต่อเนื่องใน BCPBR โดยในวันแรกของการเลี้ยงนั้นมีความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ $6.63 \times 10^6 \pm 0.15 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร และเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงในวันที่ 6 พบว่ามีปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้นเป็น $19.67 \times 10^6 \pm 0.19 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร และมีความเข้มข้นของ TN และ TP คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์น้อยกว่า 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 หลังจากเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายโดยนำน้ำเสียชุมชนหลังเคราะห์ออกไป 5 ลิตร และเติมน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่เตรียมไว้เข้าไปใหม่ 5 ลิตร พบว่ามีปริมาณเซลล์จุลสาหร่ายเริ่มต้นในการเพาะเลี้ยงรอบที่ 2 เท่ากับ $4.13 \times 10^6 \pm 0.87 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ทำการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องต่อไปอีก 2 รอบ พบว่ามีปริมาณเซลล์จุลสาหร่ายเริ่มต้นในการเลี้ยงรอบที่ 3 และ 4 เท่ากับ $2.13 \times 10^6 \pm 0.36 \times 10^6$ และ $1.13 \times 10^6 \pm 0.12 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ทุกรอบจะมีความหนาแน่นเริ่มต้นของเซลล์จุลสาหร่ายลดลง ดังนั้นภายใต้ระยะเวลาเลี้ยง 6 วัน เท่ากันในแต่ละรอบเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงแต่ละรอบจึงทำให้มีความหนาแน่นของเซลล์จุลสาหร่ายลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าเท่ากับ $16.67 \times 10^6 \pm 0.33 \times 10^6$, $13.33 \times 10^6 \pm 0.19 \times 10^6$ และ $12.00 \times 10^6 \pm 0.33 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร สำหรับการเลี้ยงในรอบที่ 2 – 4 ตามลำดับ และมีค่า μ เท่ากับ 0.259, 0.285, 0.218 และ 0.217 วัน$^{-1}$ สำหรับการเลี้ยงในรอบที่ 1 – 4

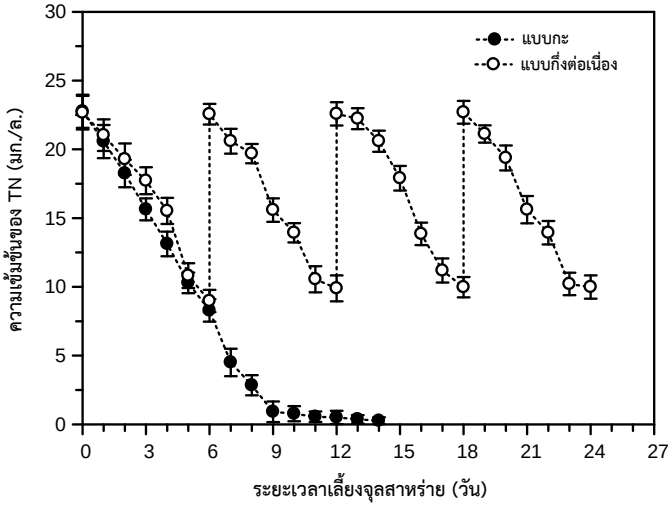
ตามลำดับ (โดยมีค่าเฉลี่ยของ μ ทั้ง 4 รอบเท่ากับ 0.245 ± 0.028 วัน$^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ μ ของการเลี้ยงแบบกะ) โดยก่อนการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์แต่ละรอบนั้นมีปริมาณของ TN และ TP คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 และเมื่อเปรียบเทียบค่า SP ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงถึงสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ใช้แสงในการผลิตชีวมวล สำหรับการเลี้ยงแบบกะพบว่า SP มีค่าเท่ากับ 2.12x10^{6} เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อวัน ในขณะที่การเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง SP นั้นมีค่าเฉลี่ย 4 รอบการเลี้ยงเท่ากับ 2.00x10^{6} ± 0.14x10^{6} เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อวัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่ารูปแบบการเลี้ยงจุลสาหร่ายมีผลกระทบต่อสมรรถนะของ BCPBR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพียงเล็กน้อย



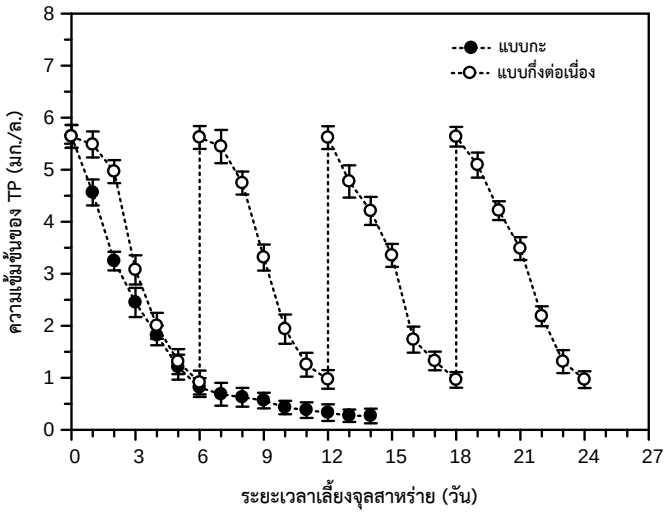
ภาพที่ 2 ความหนาแน่นของเซลล์จุลสาหร่ายที่เลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องใน BCPBR



ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นของไนโตรเจนรวม (TN) ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

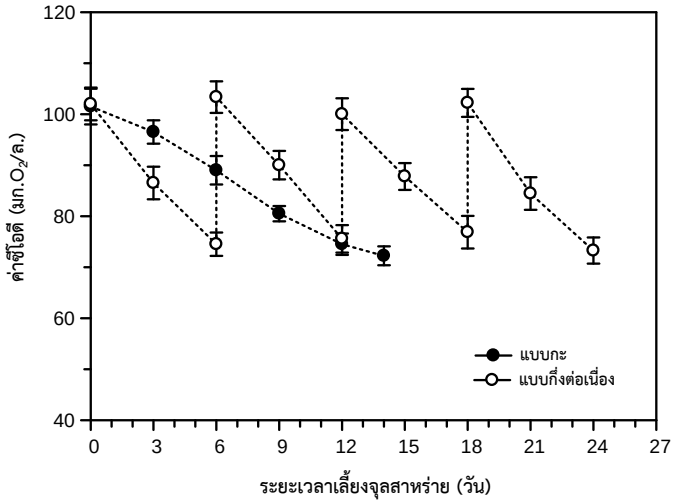


ภาพที่ 5 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสรวม (TP) ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

ภาพที่ 3 แสดงความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ภายใต้การเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในสองวันแรกของการเลี้ยงซึ่งเป็นระยะปรับตัวของจุลสาหร่ายนั้นแอมโมเนียมและไนเตรทมีความเข้มข้นลดลงเล็กน้อย และลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 3 – 6 ซึ่งเป็นการเจริญเติบโตในเป็นระยะทวีคูณของจุลสาหร่าย เมื่อเปรียบเทียบการใช้หรือบำบัดแอมโมเนียมและไนเตรทของจุลสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ใน BCPBR ภายสภาวะแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องพบว่าจุลสาหร่ายใช้ธาตุอาหารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียมและไนเตรทในกระบวนการสังเคราะห์แสงในปริมาณ

ที่แตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเป็นเช่นเดียวกับการใช้ธาตุอาหารฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปฟอสเฟตรวม (เนื่องจากในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์นั้นมีเฉพาะ K_2HPO_4) ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งการเลี้ยงแบบกะนั้นเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงหรือบำบัดในวันที่ 6 พบว่ามีความเข้มข้นของ TN และ TP คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เท่ากับ 8.25 ± 0.82 และ 0.81 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องนั้นความเข้มข้นของ TN และ TP เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง 6 วัน ก่อนที่จะทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์พบว่ามีค่าเฉลี่ย (4 รอบ) เท่ากับ 9.55 ± 0.38 และ 0.95 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน การที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียม (รวมทั้ง TN) และ TP ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ของการเลี้ยงแบบกะมีค่าน้อยกว่ากรณีการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องในระหว่างวันที่ 2 – 4 ดังแสดงในภาพที่ 3 – 5 นั้นอาจมีปัจจัยที่ทำให้เซลล์จุลสาหร่ายที่เลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงน้อยกว่า เช่น มีการบดบังแสงกันเองเซลล์จุลสาหร่ายบางส่วน (Shelf-shading effect) (Krichnavaruk *et al*., 2005) ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของเซลล์ที่น้อยกว่าสำหรับกรณีของการเลี้ยงแบบกะในช่วงเวลาดังกล่าว (ภาพที่ 2) อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงในวันที่ 6 พบว่า μ ของการเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องในรอบที่ 1 นั้นมีค่าเท่ากับ 0.250 และ 0.259 วัน$^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์พบว่ามีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เลี้ยงจุลสาหร่ายดังแสดงในภาพที่ 6 โดยเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงในวันที่ 6 (ก่อนที่จะทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์) สำหรับการเลี้ยงแบบกะมีค่าซีโอดีเท่ากับ 89.00 ± 2.80 มิลลิกรัม O_2 ต่อลิตร และการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องนั้นมีค่าซีโอดีเฉลี่ย (4 รอบ) เท่ากับ 75.04 ± 2.69 มิลลิกรัม O_2 ต่อลิตร การลดลงของค่าซีโอดีนั้นอาจเกิดขึ้นจากการบำบัดร่วมระหว่างจุลสาหร่ายและแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ (Kabir *et al*., 2018) ซึ่งการเลี้ยงจุลสาหร่ายใน BCPBR นั้นมีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนจากแบคทีเรียในอากาศได้ค่อนข้างมากเนื่องจากจำเป็นต้องเจาะรูฝาปิดด้านบนของ BCPBR เพื่อระบายออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย เมื่อเปรียบประสิทธิภาพการบำบัด TN, TP และการลดค่าซีโอดีในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ระหว่างการเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องใน BCPBR พบว่ามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 6 ค่าซีโอดี (COD) ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัด TN, TP และซีโอดี น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

สภาวะการเลี้ยง	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)		
	TN	TP	ซีโอดี
แบบกะ [a]	63.60	85.60	12.32
แบบกึ่งต่อเนื่อง [b]	60.43 ± 3.55	83.13 ± 2.23	26.33 ± 2.23

หมายเหตุ : [a] ประเมินวันที่ 6 ของการเลี้ยง [b] ประเมินโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการเลี้ยง 4 รอบ (รอบละ 6 วัน)

วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* แบบกะ 14 วัน ในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าจุลสาหร่ายสามารถบำบัด TN และ TP โดยเซลล์จุลสาหร่ายสามารถใช้เป็นธาตุอาหารในกระบวนการสังเคราะห์แสง น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วน TN:TP เท่ากับ 13 โดยประมาณ ดังนั้นจึงอยู่ภายใต้สภาวะที่มีปริมาณไนโตรเจนจำกัดหรือมีฟอสฟอรัสมากเกินพอ สำหรับการเลี้ยงแบบกะนั้นจะเห็นได้ว่า TN จะถูกใช้ไปจนเกือบหมดในช่วงวันที่ 9 – 14 ซึ่งเป็นการเจริญเติบโตในระยะตายของจุลสาหร่าย (ดังแสดงในภาพที่ 4) ในขณะที่ยังคงมีความเข้มข้นของ TP คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ในปริมาณที่มากกว่า TN ในช่วงวันที่ 9 – 14 (ดังแสดงในภาพที่ 5) ซึ่งการใช้ธาตุอาหารไนโตรเจนในกระบวนการสังเคราะห์แสงนั้นจุลสาหร่ายจะใช้แอมโมเนียมก่อนเนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่อปริมาณของแอมโมเนียมในสารอาหารเหลือไม่มากจุลสาหร่ายจะเริ่มใช้ไนเตรทโดยเซลล์จุลสาหร่ายจะเปลี่ยนไนเตรทให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อนจึงนำไปใช้ได้ (Cai *et al*., 2013; Monfet & Unc, 2017) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทที่คงเหลือน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์สำหรับการเลี้ยงแบบกะดังแสดงในภาพที่ 3 โดยในระหว่างวันที่ 0 – 3 พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทลดลงรวดเร็วในระหว่างวันที่ 3 – 6 ซึ่งในเป็นช่วงที่จุลสาหร่ายเจริญเติบโตในระยะทวีคูณ เมื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัด TN และ TP ของการเลี้ยงแบบกะ ณ วันที่ 8 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของการเจริญเติบโตในระยะคงตัวของจุลสาหร่ายพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 78.84 และ 87.23 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Arbib *et al*. (2013) สำหรับน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน TN:TP เท่ากับ 13 เช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสภาวะการเลี้ยงและองค์ประกอบของน้ำเสียชุมชนที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ TN (แอมโมเนียมและไนเตรท) และ TP ที่คงเหลือในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดวันที่ 6 พบว่ามีค่าน้อยกว่า 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าซีโอดีมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิกรัม O_2 ต่อลิตร (ดังแสดงในภาพที่ 6) ซึ่งน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์มีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน ดังนั้นการเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งจุลสาหร่ายเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะตายจึงไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์เมื่อพิจารณาในแง่ของระยะเวลาที่ต้องใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน การเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องโดยกำหนดให้เก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ทุก 6 วัน พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของ TN และ TP ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนและมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับการเลี้ยงแบบกะถึงแม้ว่า μ ของแต่ละรอบการเลี้ยงจะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ดังแสดงในตารางที่ 1) ซึ่งเป็นผลมาจากสมรรถนะที่ดีของ BCPBR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Kunyawut *et al*., 2019) ดังนั้นการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง 1 ครั้งเป็นเวลา 24 วัน จึงมีกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เท่ากับ 20 ลิตร ซึ่งมากกว่ากรณีการเลี้ยงแบบกะซึ่งต้องดำเนินการเลี้ยงถึง 2 ครั้งเป็นเวลา 28 วัน เมื่อรวมเวลา 1 วัน ที่จำเป็นต้องใช้ในการล้างและเตรียม BCPBR ให้พร้อมสำหรับการเลี้ยงครั้งต่อไป (โดยเฉพาะระบบการบำบัด

น้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่ที่มีปริมาตรมากกว่า 20 ลิตร) ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาถึง 29 วันโดยประมาณ ซึ่งนานกว่าการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องถึง 5 วัน ดังนั้นสำหรับการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ปริมาตร 20 ลิตรเท่ากันนั้น การเลี้ยงแบบกะสามารถบำบัดได้ 0.69 ลิตรต่อวัน ในขณะที่การเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถบำบัดได้ 0.83 ลิตรต่อวัน (มากกว่าร้อยละ 20.3) เมื่อพิจารณาภาพที่ 2 พบว่าความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นของรอบการเลี้ยงถัดไปนั้นมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นของรอบก่อนหน้า จึงทำให้ความหนาแน่นของเซลล์เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงในแต่ละรอบมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของเซลล์ของรอบการเลี้ยงก่อนหน้า (เนื่องจาก μ และ SP ของการลี้ยงแต่ละรอบมีค่าใกล้เคียงกัน) และการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องจึงดำเนินการได้เพียง 4 รอบ (โดยการเลี้ยงในรอบที่ 4 นั้นมีความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นใน BCPBR เพียงร้อยละ 17 ของความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นของรอบที่ 1) ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์แล้วจึงควรเติมเซลล์จุลสาหร่ายเข้าไปใน BCPBR เพื่อปรับให้ความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นรอบการเลี้ยงก่อนหน้าซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มรอบการเลี้ยงได้มากขึ้น (ทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ได้ในปริมาณที่มากขึ้นโดยไม่ต้องเสียเวลาในการล้างและเตรียมอุปกรณ์ดังเช่นการเลี้ยงแบบกะ)

โดยทั่วไปแล้วจุลสาหร่ายจะไม่สามารถบำบัดหรือลดค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามการลดลงของค่าซีโอดีในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 6 ชี้ให้เห็นว่ามีการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่อยู่ในอากาศเข้ามาในระบบการเพาะเลี้ยง การที่ค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่ใช้เลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง (การเลี้ยงรอบที่ 1) ลดลงได้มากกว่ากรณีที่เลี้ยงแบบกะในวันเดียวกันนั้นอาจเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของแบคทีเรียในปริมาณที่มากกว่า โดยการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องจำนวน 4 รอบนั้นสามารถลดค่าซีโอดีโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 26.33 ในขณะที่การเลี้ยงแบบกะเพื่อให้ค่าซีโอดีลดลงในปริมาณใกล้เคียงกันนั้นต้องใช้ระยะเวลาถึง 14 วัน (ภาพที่ 6) นอกจากนี้แล้วการป้อนอากาศเข้าสู่ BCPBR ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าออกซิเจนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* นั้นอาจมีปริมาณเพียงพอสำหรับแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (Bangboonreuang *et al*., 2015) ดังนั้นการปนเปื้อนของแบคทีเรียในปริมาณเล็กน้อยนั้นส่งผลดีต่อการลดค่าซีโอดีในน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ได้ ทั้งนี้การติดตั้งอุปกรณ์กรองอากาศก่อนเข้าสู่ปั๊มนั้นช่วยลดหรือจำกัดการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่จะเข้าสู่ระบบการเลี้ยง อย่างไรก็ตามในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจริงนั้นโดยทั่วไปจะมีการปนเปื้อนของแบคทีเรียอยู่แล้ว ดังนั้นสำหรับการเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะนั้นค่าซีโอดีอาจลดลงได้มากเมื่อจุลสาหร่ายการเติบโตในระยะทวีคูณและระยะคงที่ เมื่อการเลี้ยงเข้าสู่ระยะตายของจุลสาหร่ายซึ่งมีปริมาณของเซลล์ที่ตายมากกว่าเซลล์ที่ปกติจะทำให้ pH ของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเน่าเสียของเซลล์จุลสาหร่ายที่ตายส่งผลให้ค่าซีโอดีกลับมามีค่าเพิ่มขึ้นหรือมากกว่าระยะแรกของการเลี้ยง ดังนั้นการควบคุม pH ในน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าน้อยกว่า 8.5 จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด ในงานวิจัยนี้ pH ของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ถูกควบคุมให้มีค่าระหว่าง 6.5 – 8.5 ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงทั้งแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องเพื่อควบคุมให้ค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน

สรุปผลการวิจัย

การเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* แบบกะ 14 วัน สามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ TN:TP เท่ากับ 13 โดยน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์มีคุณภาพน้ำตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงในวันที่ 6 และมี

ประสิทธิภาพการบำบัด TN และ TP ได้ร้อยละ 63.60 และ 85.60 ตามลำดับ การลดลงของค่าซีโอดีนั้นอาจเป็นผลมาจากการบำบัดร่วมของแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศที่สัมผัสกับผิวหน้าของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ การเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องที่มีการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่ายและเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงทุก 6 วัน จำนวน 4 รอบ มีประสิทธิภาพการบำบัด TN และ TP ใกล้เคียงกับกรณีของการเลี้ยงแบบกะโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 60.43 ± 3.55 และ 83.13 ± 2.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) และผลผลิตจำเพาะ (SP) ของการเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องมีใกล้เคียงกันโดย μ มีค่าเท่ากับ 0.250 และ 0.245 ± 0.028 วัน$^{-1}$ ตามลำดับ และ SP มีค่าเท่ากับ 2.12×10^6 และ $2.00 \times 10^6 \pm 0.14 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ส่งผลให้การเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* แบบกึ่งต่อเนื่องมีกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์มากกว่าการเลี้ยงแบบกะถึงร้อยละ 20.3 โดยประมาณ เนื่องจากไม่ต้องใช้ระยะในการล้างและเตรียมอุปกรณ์ระหว่างรอบการเลี้ยงดังเช่นการเลี้ยงแบบกะเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์โดยใช้ระยะเวลาเท่ากัน ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขการเลี้ยงจุลสาหร่ายที่สามารถควบคุมสมรรถนะของอุปกรณ์การเลี้ยง เช่น BCPBR ให้มีค่าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นการสามารถเพิ่มกำลังการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์สามารถดำเนินการได้โดยการเปลี่ยนรูปแบบเลี้ยงจุลสาหร่ายจากแบบกะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์การวัดและสอบทานความหนาแน่นของเซลล์จุลสาหร่าย

เอกสารอ้าง

APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th edition. Washington, DC: American Public Health Association.

Arbib, Z., Ruiz, J., Àlvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., Barragan, J., & Perales, J.A. (2013). Photobiotreatment: Influence of nitrogen and phosphorus ratio in wastewater on growth kinetics of *Scendesmus obliquus*. *International Journal of Phytoremediation*, *15*(8), 774-788.

Arbib, Z., Ruiz, J., Àlvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., & Perales, J.A. (2014). Capability of different microalgae species for phytoremediation process: Wastewater tertiary treatment, CO_2 bio-fixation and low cost biofuels production. *Water Research*, *49*, 465-474.

Bangboonreuang, T., Kongchan, P., & Chamchoi, N. (2015). Biomass production and wastewater treatment efficiency Spirulina TISTR 8222. *Huachiew Chalermprakiet University Journal*, *19*(37), 55-70. (in Thai)

Boussiba, A. & Vonshak, A. (1991). Astraxantin accumulation in the green alga *Haematococcus pluviaris*. *Plant Cell Physiology*, *32*(7), 1077-1082.

Cai, T., Park, S.Y., & Li, Y.B. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospect. *Sustainable Energy Review*, *19*, 360-369.

Grobbelaar, J.U. (2013). Inorganic algal nutrition. In A. Richmond & Q. Hu. (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. 2nd edition. (pp. 123-133). New Jersey: Wiley Blackwell.

Kabir, F., Gulfiraz, M., Raja, G.M., Inam-ul-Haq, M., Armad, M.S., Nasir, M.F., Awais, M., & Batool, I. (2018). Nutrients utilization and biomass production by microalgae culture development in wastewater. *Journal of Bioscience*, *12*(6), 460-469.

Krichnavaruk, S., Loataweesup, W., Powtongsook, S. & Pavasant, P., (2005). Optimal growth conditions and cultivation of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactor. *Chemical Engineering Journal*, *105*, 91-98.

Krichnavaruk, S., Powtongsook, S. & Pavasant, P. (2007). Enhanced production capacity of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactors. *Bioresource Technology*, *98*, 2123-2130.

Kunyawut, C., Paopo, I., & Krommuang, A. (2019). Development of a bubble photobioreactor for microalgal culture. *Burapha Science Journal*, *24*(2), 471-488. (In Thai)

McGinn, P.J., Dickinson, K.E., Bhatti, S., Frigon, J.C., Guitot, S.R., and O'Leary, S.J.B. (2011). Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: Opportunities and limitation. *Photosynthesis Research*, *47*, 109-231.

Monfet, E. & Unc, A. (2017). Defining wastewaters used for cultivation of algae. *Algal Research*, *24*, 520-528.

Redfield, A.C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, *46*, 205-211.

Strickland, J.D.H. & Parsons, T.R. (1972). *A Practical handbook of seawater analysis*. Fisheries Research Board of Canada. Canada: Alger Press.

Thiangpakdee, N., Kunyawut, C., & Paopo, I. (2020). An effect of initial cell density of microalgae *Chlorococcum humicola* on treatment efficiency of domestic wastewater. In *Proceeding of the 12th Graduate Research Conference*. (pp. 981-988). Ubon Ratchathani. Graduate school, Ubon Ratchathani Rajabhat University. (in Thai)

Vaičiulytė, S., Padovani, G., Kostkevičienė, J., & Carlozzi, P. (2014). Batch growth of *Chlorella Vulgaris* CCALA 869 versus semi-continuous regimen for enhancing oil-rich biomass productivity. *Energies*, *7*, 3840-3857.

Wannasutthiwat, S., (2014). *Growth and enhancement of carotenoids production in microalga Chlorococcum humicola in continuous condition*. MEng Thesis. Bangkok: Graduate school, Chulalongkorn University. (in Thai)