

การปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ด้วยน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในถังปฏิกรณ์
ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

Improvement of Microalgal *Chlorococcum* Cultivation Using Effluent from
Aquaculture Cultivating System in Airlift Photobioreactor.



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>Chlorococcum</i> ด้วยน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยก
โดย	น.ส.จรีลักษณ์ เปล่งสกุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา ฉัยพรรณรัตน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัษฎราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์)

จรีลักษณ์ เปล่งสกุล : การปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ด้วยน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยก. (Improvement of Microalgal *Chlorococcum* Cultivation Using Effluent from Aquaculture Cultivating System in Airlift Photobioreactor.) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กษิตศ หนูทอง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ (1) การควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* บนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และ (2) ความเป็นไปได้ของการใช้น้ำจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันเพื่อเป็นสารอาหารแก่จุลสาหร่าย *C. humicola* และเพื่อลดต้นทุนการดำเนินงาน

การควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายวิธีแรกใช้การเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกเพื่อเพิ่มการเสียดสีระหว่างวัสดุแขวนลอยและผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง ผลการทดลองพบว่าวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead มีความเหมาะสมต่อการใช้งานร่วมกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก โดยปริมาณที่ใช้อยู่ที่ 5% ของปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วีวีเอ็ม ผลการเพาะเลี้ยงโดยใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกให้น้ำหนักแห้งสูงสุดของจุลสาหร่ายมากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยประมาณ 21% - 25% วิธีที่สองในการควบคุมการเกิดฟิล์มชีวภาพของจุลสาหร่ายคือการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ ผลการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิว SDS ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อให้มีความเข้มข้น 0.0082 มิลลิโมลาร์ สามารถควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดกวนและชนิดอากาศยกซึ่งทำจากอะคริลิกและแก้ว และมีขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร โดยการเติม SDS ในระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายให้น้ำหนักแห้งสูงสุดมากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่เติม SDS ประมาณ 68% - 158% ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ทำจากอะคริลิก และ 28% - 43% ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ทำจากแก้ว

การวิจัยส่วนถัดไปศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้น้ำจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันเพื่อเป็นสารอาหารแก่จุลสาหร่าย *C. humicola* น้ำจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผ่านการเตรียมน้ำขึ้นต้นด้วยการกรองโดยใช้ผ้ากรองในลอนสามารถนำมาใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกที่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ได้นานถึง 24 วัน แม้ว่าผลผลิตจุลสาหร่ายที่ได้รับจะต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 อย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับผลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ผลการทดลองที่ได้รับสามารถยืนยันยืนยันความเป็นไปได้ของการนำน้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาเพิ่มมูลค่าผ่านกระบวนการผลิตชีวมวลจุลสาหร่าย สามารถลดการปล่อยสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกสู่สิ่งแวดล้อม และลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 527.50 บาท ต่อกิโลกรัมของจุลสาหร่าย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ผลผลิตน้ำหนักแห้งจุลสาหร่าย ในการทดลองนี้พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตเฉลี่ยเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นเวลา 24 วัน มีค่าเท่ากับ 82.8% และ 89.1% ตามลำดับ ผลลัพธ์จากงานนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการนำของเสียจากการผลิตสัตว์น้ำกลับมาใช้ประโยชน์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในแง่ของการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าผ่านกระบวนการผลิตชีวมวลจุลสาหร่าย *C. humicola* ช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของเกษตรกร ลดมลพิษจากการปล่อยน้ำเสียที่มีไนเตรทและฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และส่งเสริมแนวคิดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความยั่งยืน

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2566	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5987758720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Chlorococcum, Photobioreactor, Surfactant, Biofilm, Nitrifying biofilter tank

Jareeluk Plengsakul : Improvement of Microalgal *Chlorococcum* Cultivation Using Effluent from Aquaculture Cultivating System in Airlift Photobioreactor. . Advisor: Assoc. Prof. KASIDIT NOOTONG, Ph.D. Co-advisor: Sorawit Powtongsook, Ph.D.

This study aims to improve the cultivation of the microalga *Chlorococcum humicola* in airlift photobioreactors were investigated. The study was divided into two parts as (1) algal biofilm reduction on the surface of photobioreactors, and (2) the feasibility of using the effluent from nitrification in a recirculating aquaculture system as the nutrient source during *C. humicola* cultivation.

The first method for algal biofilm reduction utilized suspended carrier addition to increase physical abrasion on the photobioreactor surface. Results indicated that suspended carriers such as MB5 and beads were suitable for use in airlift photobioreactors, with an optimal amount of suspended carrier determined at 5% and aeration rate maintained at 0.8 vvm. Algal cultivation after suspended carrier addition improved algal biomass concentration by 21% to 25% compared to cultivation without suspended carriers. The second method considered for algal biofilm reduction involved addition of surfactant in the algal growth medium. Addition of SDS at 0.0082 mM effectively controlled biofilm wall growth formation in both stirred-tank and airlift photobioreactors made from acrylic or glass, with photobioreactor volumes ranging from 2 to 60 L, and increased algal biomass concentrations from 68% to 158% in acrylic photobioreactors and from 28% to 43% in glass photobioreactors.

The second part of this research focused on the feasibility of using the effluent from nitrification in a recirculating aquaculture system as the nutrient source for *C. humicola* cultivation. Effluent from a nitrifying unit, after filtration through nylon cloth, was used to cultivate *C. humicola* for 24 days in airlift photobioreactors with MB5 addition. Algal productivities in this study were significantly lower than reported using BG-11 growth medium but algal biomass concentrations were comparable to previous studies. Findings indicated the potential of reutilizing aquaculture effluent for algal cultivation, thereby adding value to aquaculture waste, reducing nitrogen and phosphorus discharge into the environment, and decreasing culture expense by 527.50 Baht per kilogram of algae compared to cultivation using BG-11 growth medium. Average nitrate and phosphate removal efficiencies were determined at 82.8% and 89.1%, respectively. Results demonstrated the concept of adding value to aquaculture waste by reutilization for algal biomass production. This increased the economic efficiency of aquaculture cultivation and achieved environmental protection by reducing nitrate and phosphorus discharge, thereby promoting the concept of sustainable aquaculture.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Environmental Science

Academic Year: 2023

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับการให้องค์ความรู้ที่มีประโยชน์ในการออกแบบงานวิจัย ตลอดจนความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนระหว่างการทำเนิงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัจนราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี และรองศาสตราจารย์ ดร.สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาให้ข้อเสนอแนะ และแนวคิดที่เป็นประโยชน์สำหรับวิทยานิพนธ์ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้อันเป็นประโยชน์สำหรับการประกอบวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งสถานที่ และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณปวีณา ตปนียวรงค์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองในโอกาสที่สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารี ทรงเจริญพระชนมายุ 60 พรรษา จนสามารถสำเร็จการศึกษาอย่างลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมถึงเพื่อน พี่ น้องทุกคนที่คอยสนับสนุน เป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดสำหรับผู้วิจัย จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาตามที่ตั้งใจ

จรีลักษณ์ เปล่งสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 สมมุติฐาน.....	5
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 สัณฐานวิทยาและลักษณะทั่วไปของจุลสาหร่าย <i>Chlorococcum</i>	7
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของจุลสาหร่ายสีเขียว <i>Chlorococcum</i>	7
2.1.2 รังควัตถุในจุลสาหร่ายสีเขียว <i>Chlorococcum</i>	8
2.2 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย <i>Chlorococcum</i>	11
2.2.1 แสง.....	11
2.2.2 อุณหภูมิ.....	14
2.2.3 ค่าพีเอช.....	15
2.2.4 ธาตุอาหาร.....	15

2.2.5 การกวนผสม	17
2.3 ระบบการเพาะเลี้ยงถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง.....	18
2.3.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบถังกวน (Stirred tank photobioreactor).....	18
2.3.2 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบคอลัมน์เติมอากาศ (Bubble column photobioreactor).....	20
2.3.3 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยาน (Airlift photobioreactor).....	21
2.3.4 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบแผ่นแบน (Flat-plate photobioreactor)	23
2.3.5 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบท่อ (Tubular photobioreactor)	23
2.4 รูปแบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย	28
2.4.1 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะ	28
2.4.2 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง	28
2.4.3 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบต่อเนื่อง	28
2.5 ไบโอฟิล์ม	29
2.5.1 การเกิดไบโอฟิล์มสาหร่ายบนพื้นผิว	29
2.5.2 การควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มบนพื้นผิว	31
2.6 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	34
2.6.1 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	34
2.6.2 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย	38
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
2.7.1 การเพาะเลี้ยงถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง.....	38
2.7.2 การควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มบนพื้นผิว	40
2.7.3 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 การเพาะเชื้อจุลสาหร่าย	46

3.2 การลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง.....	47
3.2.1 การใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกเพื่อลดการเกาะติดของจุลสาหร่าย	47
3.2.2 การใช้สารลดแรงตึงผิว	50
3.2.3 เปรียบเทียบการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกและสารลดแรงตึงผิว	53
3.3 ความเป็นไปได้ของการใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i>	54
3.3.1 การเตรียมน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	54
3.3.2 การปรับปรุงธาตุอาหารของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	55
3.3.3 ประสิทธิภาพเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ที่เพาะเลี้ยงจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	56
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	57
3.4.1 ความเข้มข้นแอมโมเนีย	57
3.4.2 ความเข้มข้นไนไตรท์	57
3.4.3 ความเข้มข้นไนเตรท.....	58
3.4.4 ความเข้มข้นฟอสเฟต	58
3.4.5 การหาน้ำหนักเซลล์แห้ง	59
3.4.6 คลอโรฟิลล์.....	59
3.4.7 แครโทีนอยด์	60
3.4.8 ลูทีน เบต้า-แคโรทีน และไวโอลาแซนทีน	60
3.4.9 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (CHN).....	61
3.4.10 การวิเคราะห์กรดไขมัน	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	62
4.1 การลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง.....	62
4.1.1 การใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก.....	62

4.1.2 การใช้สารลดแรงตึงผิว	71
4.1.3 เปรียบเทียบการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกและสารลดแรงตึงผิว	80
4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์เพื่อเพาะเลี้ยง จุลสาหร่าย <i>Chlorococcum</i>	92
4.2.1 การเตรียมน้ำขึ้นต้นจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อใช้เลี้ยงจุลสาหร่าย	93
4.2.2 การปรับปรุงธาตุอาหารของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	98
4.2.3 ประสิทธิภาพเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ที่เพาะเลี้ยงจากน้ำในระบบ เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร....	106
4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.....	113
4.2.5 สมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.....	118
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	123
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	123
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	128
ภาคผนวก.....	130
บรรณานุกรม.....	252
ประวัติผู้เขียน.....	262

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ชนิดและปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่ตรวจพบในจุลสาหร่าย <i>Chlorococcum</i> sp.....	10
ตารางที่ 2-2 รูปแบบถึงปฏิกรณชีวภาพแบบใช้แสงและสภาวะที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัด	25
ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว	33
ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคการกำจัดไบโอฟิล์มแบบต่างๆ.....	34
ตารางที่ 2-5 ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในแต่ละอุณหภูมิ	35
ตารางที่ 2-6 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย.....	45
ตารางที่ 3-1 ส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11	46
ตารางที่ 3-2 สมบัติของวัสดุแขวนลอยพลาสติก	49
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว	51
ตารางที่ 3-4 แสดงสภาวะที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ในแต่ละชุดการทดลอง.....	52
ตารางที่ 3-5 สมบัติของน้ำจากตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	55
ตารางที่ 3-6 วิธีการเตรียมน้ำขึ้นต้นในแต่ละชุดการทดลอง.....	55
ตารางที่ 3-7 อาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย.....	56
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ในปริมาณ 1% ถึง 20% ของปริมาตรถึงปฏิกรณชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.6 ถึง 1.0 วีวีเอ็ม และความเข้มแสง 5,000 ลักซ์	64
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบเบื้องต้นเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก Bead ในปริมาณ 1% ถึง 20% ของปริมาตรถึงปฏิกรณชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.6 ถึง 1.0 วีวีเอ็ม และความเข้มแสง 5,000 ลักซ์	65
ตารางที่ 4-3 การเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร เมื่อมีการควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย .83	

ตารางที่ 4-4 ปริมาณของอาหารเลี้ยงเชื้อ BG-11 วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และสารลดแรงตึงผิว SDS และต้นทุนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้ชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร..... 90

ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบของรงควัตถุภายในจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เมื่อมีการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย..... 91

ตารางที่ 4-6 องค์ประกอบ C H N ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เมื่อมีการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย..... 92

ตารางที่ 4-7 สมบัติของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* 93

ตารางที่ 4-8 สมบัติของน้ำในแต่ละชุดทดลอง..... 98

ตารางที่ 4-9 ข้อมูลการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (W1) น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เพิ่มความเข้มข้นไนเตรทและฟอสเฟตเท่ากับอาหาร BG-11 (W2) อาหาร BG-11 ที่ลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตเท่ากับ ความเข้มข้นของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (W3) และชุดควบคุม..... 105

ตารางที่ 4-10 องค์ประกอบของรงควัตถุภายในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ... 110

ตารางที่ 4-11 องค์ประกอบโดยประมาณของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 110

ตารางที่ 4-12 ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 111

ตารางที่ 4-13 องค์ประกอบ C H N และ S ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 111

ตารางที่ 4-14 ชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 112

ตารางที่ 4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้จุลสาหร่าย <i>C.humicola</i>	117
ตารางที่ 4-16 สมดุลมวลไนโตรเจนที่แสดงการกระจายของไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยง จุล สาหร่าย <i>C. humicola</i> โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	119
ตารางที่ 4-17 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่แสดงการกระจายของฟอสฟอรัสระหว่างการเพาะเลี้ยง จุล สาหร่าย <i>C. humicola</i> โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	122



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 เซลล์จุลสาหร่าย <i>Chlorococcum humicola</i>	8
รูปที่ 2-2 ค่าการดูดกลืนแสงของรงควัตถุในช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร	9
รูปที่ 2-3 การไหลของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง	12
รูปที่ 2-4 วัฏจักรเคลวิน.....	13
รูปที่ 2-5 Phosphorus pathways ที่เป็นไปได้ในยูคาริโอตที่สังเคราะห์ด้วยแสง	17
รูปที่ 2-6 เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบถังกวน เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบร่อนน้ำ	19
รูปที่ 2-7 รูปแบบการไหลของการกวน	20
รูปที่ 2-8 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบคอลัมน์เต็มอากาศ	21
รูปที่ 2-9 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยก	22
รูปที่ 2-10 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบแผ่นแบน	23
รูปที่ 2-11 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบท่อ	24
รูปที่ 2-12 ก) ไบโอฟิล์มจุลสาหร่าย <i>Chlorococcum</i> ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง	30
รูปที่ 2-13 Sodium dodecyl sulphate surfactant monomer (SDS).....	31
รูปที่ 2-14 Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB).....	32
รูปที่ 2-15 Triton X-100.....	32
รูปที่ 3-1 วัสดุแขวนลอยพลาสติก (ก) Bead (ข) MB5	48
รูปที่ 3-2 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร	48
รูปที่ 3-3 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนขนาด 2 ลิตร.....	52
รูปที่ 3-4 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร	54
รูปที่ 4-1 ฟองอากาศที่บริเวณส่วนบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและการเกิดลวดของ ฟองอากาศลงสู่ส่วนดาวน์คัมเมอร์เมื่อทดสอบกับวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5	66

- รูปที่ 4-2 น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ชนิดอากาศยกเมื่อเต็มและไม่เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติก (ก) อัตราการไหลของอากาศ 0.6 วีวีเอ็ม (ข) อัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม 68
- รูปที่ 4-3 น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ก่อนและหลังนำไปโอฟิล์มออกจากผนังในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 14) 70
- รูปที่ 4-4 ค่าการดูดกลืนแสง (OD680) จุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ชนิดเต็มอากาศ ขนาด 1 ลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันของ (ก) CTAB, (ข) SDS และ (ค) Triton X-100 73
- รูปที่ 4-5 (ก) น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถัง กวนและชนิดอากาศยกที่สร้างจากอะคริลิก เมื่อมีและไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (ข) น้ำหนัก เซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยก ที่สร้างจากแก้ว เมื่อมีและไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS 76
- รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายที่ก่อตัวบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ที่สร้างจากอะคริลิก (วันที่ 22) : (ก) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนเมื่อไม่มีการเติมสารลด แรงตึงผิว SDS (ข) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (ค) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (ง) ถัง ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS..... 77
- รูปที่ 4-7 น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ก่อนและหลัง นำไปโอฟิล์มของจุลสาหร่ายออกจากผนัง ในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 22)..... 80
- รูปที่ 4-8 การทดสอบการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติก ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิด อากาศยก ขนาด 60 ลิตร เมื่ออัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.3 วีวีเอ็ม 81
- รูปที่ 4-9 น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ก่อนและหลังนำไปโอฟิล์มออกจากผนัง ในวัน สุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 14) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร 82
- รูปที่ 4-10 น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย (ก) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร (ข) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิด อากาศยกขนาด 60 ลิตร 85

รูปที่ 4-11 การเกิดไบโอฟิล์มในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร (วันที่ 14) (ก) ชุดควบคุม (ข) เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (ค) เติมสารลดแรงตึงผิว SDS 86

รูปที่ 4-12 การเกิดไบโอฟิล์มในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร 87

รูปที่ 4-13 การเก็บเกี่ยวจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 60 ลิตร เมื่อหยุดเติมอากาศอากาศ 89

รูปที่ 4-14 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการเตรียมน้ำขึ้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร 96

รูปที่ 4-15 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการเตรียมน้ำขึ้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร 96

รูปที่ 4-16 ความเข้มข้นไนเตรทในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยการเตรียมน้ำขึ้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร 97

รูปที่ 4-17 ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยการเตรียมน้ำขึ้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร 97

รูปที่ 4-18 น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับ จุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)..... 100

รูปที่ 4-19 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)..... 101

รูปที่ 4-20 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับ จุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11).....	101
รูปที่ 4-21 ความเข้มข้นไนเตรทเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11) ..	104
รูปที่ 4-22 ความเข้มข้นฟอสเฟตเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)	104
รูปที่ 4-23 น้ำหนักแห้งจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร โดยใช้อาหารสูตร BG-11 และน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบกึ่งต่อเนื่อง (24 วัน)	107
รูปที่ 4-24 แคโรทีนอยด์จุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร โดยใช้อาหารสูตร BG-11 และน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบกึ่งต่อเนื่อง (24 วัน)	108
รูปที่ 4-25 ความเข้มข้นแอมโมเนียเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร ที่ใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เวลาเพาะเลี้ยง 24 วัน	115
รูปที่ 4-26 ความเข้มข้นไนเตรทเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระยะเวลา 24 วัน	116
รูปที่ 4-27 ความเข้มข้นฟอสเฟตเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระยะเวลา 24 วัน	116
รูปที่ 4-28 ความเข้มข้นไนไตรท์เมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i> ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระยะเวลา 24 วัน	117
รูปที่ 4-29 สมดุลมวลไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i>	120
รูปที่ 4-30 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่ระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย <i>C. humicola</i>	122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้พัฒนาจากระบบแบบดั้งเดิมซึ่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นต่ำในระบบเปิดไปสู่การเพาะเลี้ยงในระดับความหนาแน่นสูงในระบบปิดซึ่งมีระบบหมุนเวียนน้ำช่วยบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ [1, 2] การเพาะเลี้ยงในระบบปิดสามารถผลิตสัตว์น้ำได้ในปริมาณมากในพื้นที่จำกัดซึ่งตอบสนองต่อความต้องการของตลาดที่สูงขึ้น อีกทั้งลดความเสี่ยงในการติดเชื้อและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งที่มีแอมโมเนียและไนโตรเจนปนเปื้อน ในปัจจุบันระบบหมุนเวียนน้ำของการเพาะเลี้ยงระดับความหนาแน่นสูงนิยมใช้เทคโนโลยีตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน (Nitrifying biofilter) เพื่อเปลี่ยนสารพิษแอมโมเนียและไนโตรเจนให้เป็นไนเตรทซึ่งมีความเป็นพิษต่ำต่อสัตว์น้ำ ทำให้ลดความถี่ของการเปลี่ยนน้ำลงได้อย่างมีนัยสำคัญคือจากเดิมวันละประมาณ 3 ถึง 5 ครั้ง เหลือเดือนละครั้งหรือนานกว่านั้น [3] อย่างไรก็ตามการสะสมของไนเตรทในระบบเพาะเลี้ยงในปริมาณที่สูงเกินไป (> 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) อาจส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดอาการเครียดซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโต [4] ด้วยเหตุนี้เกษตรกรจึงจำเป็นต้องถ่ายน้ำออกจากระบบเลี้ยงอีกครั้งเพื่อลดความเข้มข้นของไนเตรท ซึ่งหากความเข้มข้นของไนเตรทเกินค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนดจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยในสถานการณ์บำบัดไนเตรทอย่างง่ายสามารถทำได้โดยกักน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไว้ในบ่อดินเพื่อให้จุลินทรีย์ในดินบำบัดตามธรรมชาติ วิธีการนี้ทำได้ง่ายแต่ไม่เหมาะกับไนเตรทความเข้มข้นสูงเนื่องจากจุลินทรีย์ตามธรรมชาติมีศักยภาพจำกัดทำให้ต้องใช้เวลาบำบัดนานหรือใช้พื้นที่มาก [5] การใช้ตัวกรองชีวภาพดีไนตริฟิเคชัน (Denitrifying biofilter) เป็นอีกทางเลือกที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหรือจากอุตสาหกรรมอื่นๆ [6, 7] วิธีการนี้มีข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบและดำเนินงาน และจำเป็นต้องใช้บุคลากรควบคุมระบบที่มีความรู้และประสบการณ์ [4, 8] นอกเหนือจากวิธีการในข้างต้น การนำไนเตรทและฟอสเฟตจากน้ำทิ้งไปใช้ประโยชน์ผ่านการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตชีวมวลหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มีมูลค่าสูงยังเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่น่าสนใจ นอกจากนี้ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เกิดจากอาหารส่วนเกินในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญ เนื่องจากปัจจุบันความเข้มข้นของฟอสเฟตอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลเสียต่อระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงมักไม่มีระบบบำบัดฟอสเฟตก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและเร่งการเจริญเติบโตของพืชน้ำ นำไปสู่การเกิดยูโทรฟิเคชันซึ่งทำให้แหล่งน้ำเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว [9] จาก

การค้นคว้าพบว่าการใช้ในเตรทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมหรือน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยตรงมีรายงานอย่างแพร่หลาย [10-12] แต่ยังคงขาดข้อมูลเกี่ยวกับการนำน้ำที่มีไนเตรทและฟอสเฟตที่ได้จากการบำบัดด้วยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันมาศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายทั้งในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ จึงเกิดแนวคิดในการนำจุลสาหร่าย *Chlorococcum* มาใช้เพื่อการบำบัดน้ำมีองค์ประกอบของไนเตรท และฟอสเฟตจากถังบำบัดไนตริฟิเคชัน เนื่องจากธาตุอาหารเหล่านี้เป็นสารอาหารที่จุลสาหร่ายใช้เพื่อการเจริญเติบโต เกิดผลพลอยได้จากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตชีวมวล และใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารอย่างคุ้มค่าถือเป็นข้อได้เปรียบของการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตจากวิธีการอื่น

Chlorococcum เป็นจุลสาหร่ายสีเขียวในดิวิชัน *Chlorophyta* มีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือรูปไข่ ขนาดเซลล์ประมาณ 10 ถึง 20 ไมโครเมตร [13] จุลสาหร่ายชนิดนี้เพาะเลี้ยงได้ง่าย มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่มีค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิในช่วงกว้าง และเติบโตได้ดีภายใต้สภาวะกลางแจ้ง [14, 15] จุดเด่นของจุลสาหร่ายสายพันธุ์นี้คือมีน้ำหนักรวมและเซลล์มีขนาดใหญ่ ทำให้เก็บเกี่ยวเซลล์ได้ง่ายโดยวิธีการกรองหรือการตกตะกอน [16, 17] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าจุลสาหร่าย *Chlorococcum* อุดมด้วยสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ และประกอบด้วยโปรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรตในปริมาณมาก [17-20] ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการนำจุลสาหร่ายสายพันธุ์นี้ไปใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนสัตว์ เช่น ไรแดง หรือ โรติเฟอร์ เพื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนและแคโรทีนอยด์ระหว่างการอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ เช่น กุ้ง หรือ ปลานิล หรือนำชีวมวลจุลสาหร่ายไปสกัดสารกลุ่มแคโรทีนอยด์เพื่อใช้ในการผลิตเวชภัณฑ์และเวชสำอางค์ จากข้อมูลดังกล่าวมาในข้างต้นจะเห็นว่าการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ให้ได้ปริมาณเพียงพอต่อความต้องการใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

จากงานวิจัยในอดีตพบว่า การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายหลายสายพันธุ์ เช่น *Chlorella* *Haematococcus* หรือ *Chaetoceros* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก (Airlift Photobioreactor) ให้การเติบโตมากกว่าการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (Stirred-tank Photobioreactor) ที่มีปริมาตรเท่ากันและภายใต้สภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกัน โดยคาดว่า เป็นผลจากรูปแบบการไหลของของเหลวซึ่งช่วยให้เซลล์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกได้รับแสงในด้านแนวตั้งอย่างเต็มที่ และมีอัตราการถ่ายเทก๊าซค่อนข้างสูง [17, 21, 22] ในส่วนของจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ที่มีขนาดเซลล์ค่อนข้างใหญ่และมีน้ำหนักรวมซึ่งอาจทำให้พฤติกรรมการไหลวนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแตกต่างจากจุลสาหร่ายที่ใช้ศึกษาในการวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งมักมีขนาดเซลล์เล็กและมีน้ำหนักรวมเบา จากการศึกษาเบื้องต้นโดย ศุทธิณี (2557) และ ภูไพเราะ (2559) รายงานว่าการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกให้การเติบโตและมีผลผลิตแคโรทีนอยด์มากกว่าการเพาะเลี้ยงใน

ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน [23, 24] อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวได้รายงานถึงปัญหาการตกตะกอนเมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศต่ำเกินไป และยังพบการเกาะติดของชีวมวลจุลสาหร่ายบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ทำจากอะคริลิกและแก้วในปริมาณมาก ปัญหาการเกาะติดของจุลสาหร่ายทำให้เกิดการบดบังแสงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการเติบโตของจุลสาหร่ายและทำให้ต้องหยุดการเพาะเลี้ยงเป็นครั้งคราวเพื่อนำชีวมวลจุลสาหร่ายออกจากพื้นผิวของผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตชีวมวล จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาถึงแนวทางลดการเกาะติดของชีวมวลจุลสาหร่าย *Chlorococcum* บนพื้นผิวของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง จากการค้นคว้าพบว่าการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงหรือใช้การเคลือบผิวด้วยสารเคมี วิธีการดังกล่าวแม้ว่าสามารถลดการเกาะติดได้แต่มีข้อจำกัด เช่น การขยายขนาดระบบทำได้ยาก มีความเสี่ยงต่อการแตกของเซลล์และค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง [25] อีกหนึ่งแนวทางซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้คือการเติมสารลดแรงตึงผิวในอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่าย [26] ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวที่มีการใช้งาน ได้แก่ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) และ Triton X-100 [26] อย่างไรก็ตามยังขาดผลการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานสารลดแรงตึงผิวในระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ซึ่งประกอบด้วยประเด็นสำคัญอาทิ ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น และปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานโดยไม่ส่งผลกระทบต่อเติบโตของจุลสาหร่ายอย่างมีนัยสำคัญ อีกหนึ่งแนวทางซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อลดการเกาะติดของจุลสาหร่าย *Chlorococcum* บนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงคือการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกซึ่งนิยมใช้เป็นวัสดุเกาะยึดแก่แบคทีเรียในกระบวนการไนตริฟิเคชันเพื่อเพิ่มการเสียดสีระหว่างวัสดุแขวนลอยและผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนในระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* พบว่าสามารถลดการเกาะติดบนผนังได้ดี [27] อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบเบื้องต้นทำให้ทราบว่ายังจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในอีกหลายประเด็นเพื่อให้ได้มาซึ่งสภาวะเหมาะสมของการใช้งานวัสดุแขวนลอยพลาสติก เช่น ชนิดของวัสดุแขวนลอยพลาสติก ขนาดของวัสดุแขวนลอยพลาสติก ปริมาณของวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่เติมลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และความเร็วอากาศในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก เป็นต้น ข้อมูลจากการศึกษาตัวแปรในข้างต้นจะนำไปสู่สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้วัสดุแขวนลอยพลาสติกเคลื่อนที่ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่กระจุกตัวอยู่ในบริเวณผิวน้ำและปิดกั้นการไหลของเหลว นอกจากนี้แม้ว่างานวิจัยในอดีตได้ศึกษาถึงระดับความเข้มข้นแสงที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* แต่การเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกทำให้เกิดการบดบังแสงมากขึ้น

ดังนั้นจึงต้องศึกษาถึงปริมาณความเข้มแสงที่เหมาะสมรวมถึงรูปแบบการให้แสงอีกครั้งหลังทราบข้อมูลเกี่ยวกับชนิดและปริมาณของวัสดุแขวนลอยพลาสติก

อีกหนึ่งประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มผลผลิตจุลสาหร่าย *Chlorococcum* คือรูปแบบการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสม จากการสืบค้นพบว่าการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยทั่วไปนิยมเลือกใช้งานการเพาะเลี้ยงแบบกะ (Batch cultures) แม้ว่าให้ผลผลิตชีวมวลต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่อง (Continuous cultures) หรือกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous cultures) ดังนั้นเพื่อตอบโจทย์เกี่ยวกับการเพิ่มผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายให้เพียงพอต่อความต้องการ จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตชีวมวลที่ได้จากรูปแบบการเพาะเลี้ยงที่กล่าวมาในข้างต้น และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียที่พบในระหว่างการเพาะเลี้ยง โดยข้อมูลที่ได้รับจะเป็นประโยชน์ในการเลือกรูปแบบการผลิตและการพิจารณาขยายขนาดการผลิตต่อไป



1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาถึงแนวทางการปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก
- 2) เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* โดยใช้น้ำจากถังบำบัดไนโตรฟิเคชันของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์
- 3) ประเมินประสิทธิภาพการใช้อุณหภูมิ *Chlorococcum* เพื่อบำบัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์

1.3 สมมติฐาน

- 1) การปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดโดยลดการเกาะติดบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง การปรับความเข้มแสง และการเลือกรูปแบบการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตจุลสาหร่าย *Chlorococcum*
- 2) น้ำจากถังบำบัดไนโตรฟิเคชันของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์สามารถใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* เจริญเติบโตได้เทียบเคียงกับอาหารสูตรมาตรฐาน
- 3) จุลสาหร่าย *Chlorococcum* สามารถใช้บำบัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์เพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร
- 2) อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในช่วง 0.6 ถึง 1.0 วีวีเอ็ม (72 ถึง 120 ลิตรต่อชั่วโมง)
- 3) ความเข้มแสงสีขาวจากหลอดแอลอีดี ในช่วง 5,000 ลักซ์ โดยให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง
- 4) วัสดุแขวนลอยพลาสติก 2 ชนิดที่ใช้ศึกษา ได้แก่ MB5 และ Bead ปริมาณ 1% - 20% ของปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง
- 5) สารลดแรงตึงผิวที่เลือกใช้ได้แก่ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) และ Triton X-100 ความเข้มข้นในช่วง 0.1% ถึง 50% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด

6) รูปแบบการเตรียมน้ำจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระดับความหนาแน่นสูงเชิงพาณิชย์ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) กระจกกรองใยแก้ว 2) กระจกกรองใยแก้ว พร้อมนั่งฆ่าเชื้อ 3) กรองน้ำด้วยผ้ากรองไนลอนที่มีขนาดรู 20 ไมโครเมตร

7) การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้น้ำจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ เพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* เปรียบเทียบการเติบโตของจุลสาหร่ายโดยใช้น้ำ 4 แบบ คือ 1) อาหารสูตร BG-11 2) อาหารสูตร BG-11 ที่ปรับความเข้มข้นของไนเตรทให้เท่ากับความเข้มข้นของน้ำตัวอย่าง 3) น้ำตัวอย่างที่เติมไนเตรทลงไปให้เทียบเท่าปริมาณในอาหารสูตร BG-11 และ 4) น้ำตัวอย่างจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์

8) การขยายขนาดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ใช้ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศขนาด 60 ลิตร ซึ่งอธิบายไว้ในงานวิจัยของณัฐสิทธิ์ (2560) [27]

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในภาพรวมงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการผลิตชีวมวลจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของเกษตรกร นอกจากนี้ยังช่วยลดมลพิษจากการปล่อยน้ำเสียที่มีไนเตรทสูงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อีกทั้งส่งเสริมแนวคิดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความยั่งยืน ทำให้ภาพลักษณ์ของอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งเดิมถูกมองว่าก่อให้เกิดมลพิษที่หลากหลายและมีการใช้ทรัพยากรไม่คุ้มค่าดีขึ้นในกลุ่มประชากรที่เห็นความสำคัญด้านการอนุรักษ์ และนอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการแก้ปัญหาซึ่งพบในระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* คือการเกาะติดของเซลล์บนผนังถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและข้อจำกัดด้านอัตราการผลิตของการเพาะเลี้ยงแบบกะซึ่งหากประสบความสำเร็จจะช่วยให้การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ซึ่งมีศักยภาพในการใช้เป็นอาหารสัตว์น้ำวัยอ่อนหรือเป็นแหล่งของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ในหลายอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถขยายออกไปได้ในวงกว้าง นับว่าเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นใช้เองในประเทศและตอบสนองต่อแนวคิดเศรษฐกิจฐานชีวภาพที่มีแผนการดำเนินงานอย่างจริงจังในเขตระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สันฐานวิทยาและลักษณะทั่วไปของจุลสาหร่าย *Chlorococcum*

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของจุลสาหร่ายสีเขียว *Chlorococcum*

จุลสาหร่ายสีเขียว *Chlorococcum* อยู่ในดิวิชัน *Chlorophyta* มีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือรูปไข่ ขนาดเซลล์ประมาณ 10 - 20 ไมโครเมตร มีสารจำพวกเจลาตินหุ้มเซลล์ มักอยู่รวมกันเป็นกลุ่มโคโลนีประมาณ 2 - 4 เซลล์ ภายในเซลล์มีคลอโรพลาสต์เป็นรูปถ้วยเกือบเต็มเซลล์ และในคลอโรพลาสต์มีคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี จำนวนมากซึ่งบดบังรงควัตถุอื่นๆ จนทำให้มองเห็นเป็นสีเขียวอย่างเดียว ภายในคลอโรพลาสต์ของจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ยังมีแคโรทีนอยด์ประเภทแคโรทีน (Carotene) เป็นรงควัตถุที่มีสีส้ม หรือส้ม แดง เป็นสายยาวของไฮโดรคาร์บอน และแซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) มีสีเหลืองหรือส้ม เหลือง เป็นสายยาวของไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจน เป็นองค์ประกอบ ซึ่งแซนโทฟิลล์มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับระดับออกซิเดชันของโมเลกุล จุลสาหร่าย *Chlorococcum* พบได้ตามแหล่งน้ำจืดทั่วไป โดยทั่วไปเจริญเติบโตอยู่ในน้ำตื้นหรือบริเวณน้ำลึกที่แสงส่องถึงแต่พบการเจริญเติบโตได้บนก้อนหิน ทราช พืช แม้กระทั่งบนหิมะ [28] จุลสาหร่าย *Chlorococcum* สามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายเพราะมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่มีค่าพีเอชและอุณหภูมิในช่วงกว้าง (พีเอช 6.1 - 9 และ อุณหภูมิ 25 - 45 องศาเซลเซียส) ซึ่งทำให้เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง จุดเด่นอีกข้อของจุลสาหร่ายชนิดนี้คือมีน้ำหนักรวมและมีขนาดใหญ่ ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวเซลล์ได้ง่ายโดยวิธีการกรองตะกอน หรือการปั่นเหวี่ยง [19]

การจัดเรียงลำดับอนุกรมวิธานของจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ตั้งแต่ระดับดิวิชันลงไปถึงระดับสกุลสามารถจัดเรียงได้ ดังนี้

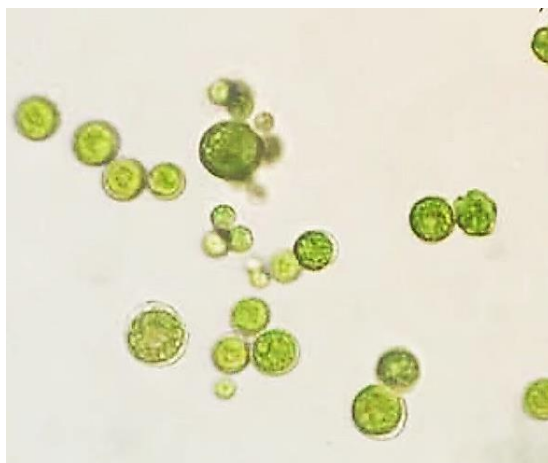
Division *Chlorophyta*

Class *Chlorophyceae*

Order *Chlorococcales*

Family *Chlorococcaceae*

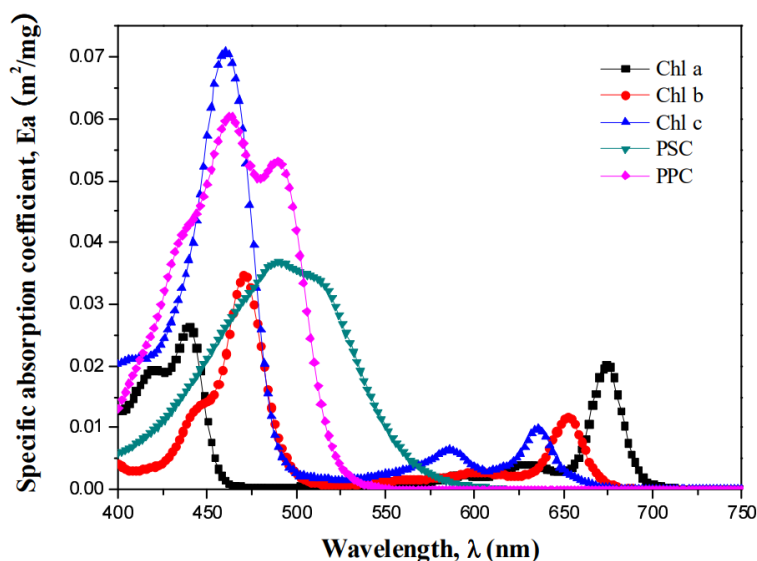
Genus *Chlorococcum*



รูปที่ 2-1 เซลล์จูลสาหร่ายสีเขียว *Chlorococcum humicola*

2.1.2 รงควัตถุในจูลสาหร่ายสีเขียว *Chlorococcum*

รงควัตถุคือสารสีที่ใช้สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ถูกสะสมไว้ในคลอโรพลาสต์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี สำหรับรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของจูลสาหร่ายแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) และแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) [15, 29] คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุหลักในคลอโรพลาสต์มีสีเขียวที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในสารละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล อะซิโตน ไบโตรเลียมอีเธอร์ คลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีม่วง (400 - 450 นาโนเมตร) น้ำเงิน (425 - 500 นาโนเมตร) และ แดง (625 - 675 นาโนเมตร) และจะสะท้อนแสงสีเขียวที่ดูดกลืนน้อยที่สุดออกมา ในส่วนของจูลสาหร่าย *Chlorococcum* พบว่าประกอบไปด้วยคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บีเป็นหลัก คลอโรฟิลล์เอซึ่งดูดกลืนแสงสีม่วงและสีแดง (650 - 700 นาโนเมตร) ได้ดี ขณะที่คลอโรฟิลล์บีทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานจากแสงในช่วงสีน้ำเงินและสีแดง และส่งต่อไปให้คลอโรฟิลล์เอต่อไป ช่วงของการดูดกลืนแสงแสดงดังรูปที่ 2-2 [30] แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์



รูปที่ 2-2 ค่าการดูดกลืนแสงของรงควัตถุในช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร

[30]

แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุสีเหลือง ส้ม หรือแดง พบได้ในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสง เช่น พืชชั้นสูงจุลสาหร่าย และแบคทีเรียบางชนิด โดยรงควัตถุกลุ่มนี้จะดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน และสะท้อนแสงสีเหลืองและส้มออกมา แคโรทีนอยด์เป็นสารจำพวกไขมันที่มีโครงสร้างหลักเป็นสายไฮโดรคาร์บอน [31] แคโรทีนอยด์ในจุลสาหร่ายทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ เป็นตัวช่วยดูดกลืนพลังงานจากแสงเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และป้องกันอันตรายจากสภาวะที่ความเข้มแสงสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้จุลสาหร่ายเกิดความเครียดและเจริญเติบโตได้ลดลง แคโรทีนอยด์ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงจะดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 400 - 550 นาโนเมตร และแคโรทีนอยด์ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากแสงจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 - 600 นาโนเมตร [30] ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากแคโรทีนอยด์ที่จุลสาหร่ายผลิตขึ้นภายใต้สภาวะเครียดในหลายอุตสาหกรรม เช่น เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร ใช้เป็นสารเสริมสร้างภูมิคุ้มกันต้านมะเร็ง [32] ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์น้ำเพื่อให้สัตว์น้ำมีสีส้มสวยงาม [33] หรือใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ปีกเพื่อเร่งให้ไข่แดงมีสีส้มสดใส [34] แคโรทีนอยด์แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ แคโรทีน (Carotene) และแซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) แคโรทีนเป็นรงควัตถุสีส้มหรือส้มแดงประกอบไปด้วย แอลฟา-แคโรทีน (alpha-Carotene) เบต้า-แคโรทีน (Beta-carotene) และไลโคปีน (Lycopene) มีลักษณะเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอนและออกซิเจนเท่านั้น ตัวอย่างของแคโรทีนอยด์กลุ่มแคโรทีน ได้แก่ แอลฟา-แคโรทีน (alpha-Carotene) เบต้า-

แคโรทีน (Beta-carotene) และไลโคปีน (Lycopene) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและยารักษาโรค เนื่องจากมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และยังเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นเรตินอล (Retinol) [31] แชนโทฟิลล์เป็นรงควัตถุสีเหลือง หรือส้มเหลือง มีลักษณะเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนในรูปหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เป็นองค์ประกอบ ทำให้บางครั้งถูกเรียกว่าแคโรทีนอล (Carotenol) หรือ ออกซิแคโรทีน (Oxycarotene) ตัวอย่างของแชนโทฟิลล์ที่พบบ่อยได้แก่ ลูทีน (Lutein) แอนเทอร์ราแซนทิน (Antheraxanthin) ซีแซนทินทิน (Zeaxanthin) และ แอสต้าแซนทินทิน (Astaxanthin) เป็นต้น [20] ผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมารายงานแคโรทีนอยด์หลายชนิด เช่น แคโรทีน ชนิดเบต้า-แคโรทีน และแชนโทฟิลล์ ชนิดลูทีน อะโดนแซนทิน แคนต้าแซนทิน และแอสต้าแซนทิน ในจุลสาหร่าย *Chlorococcum* [35] โดยมีการสะสมในคลอโรพลาสต์และไซโตพลาสซึม [36] ตารางที่ 2-1 แสดงชนิดและปริมาณของแคโรทีนอยด์ในจุลสาหร่าย *Chlorococcum*

ตารางที่ 2-1 ชนิดและปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่ตรวจพบในจุลสาหร่าย *Chlorococcum* sp.

แคโรทีนอยด์	ร้อยละของแคโรทีนอยด์รวม
เบต้า-แคโรทีน	22.6
แอสต้าแซนทิน	17.3
ลูทีน	31.2
อื่นๆ	28.9

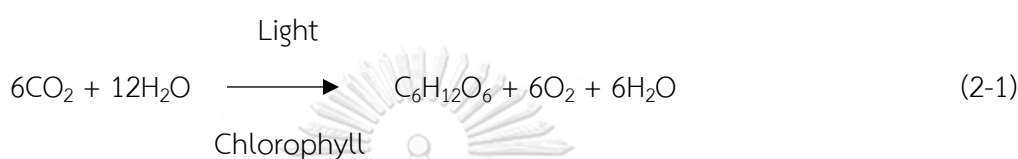
[20]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย Jumraschai (2018) ทำการเพาะเลี้ยง *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ปริมาตร 2 ลิตร ให้แสงสีขาวอมฟ้าที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ AD/AR เท่ากับ 3 และมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.8 วีวีเอ็ม (1.6 ลิตรต่อนาที) ให้ความเข้มชั้นของแคโรทีนอยด์เท่ากับ 6.45 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร (4.78 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง) และขยายขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกขนาด 60 ลิตร และดำเนินการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเป็น 268.14 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งพบว่าสามารถเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายให้เติบโตและผลิตแคโรทีนอยด์ได้ดี ความเข้มชั้นของแคโรทีนอยด์เท่ากับ 4.40 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร (3.52 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง) และมีลูทีนและเบต้าแคโรทีนในปริมาณ 30% และ 8 % ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ตามลำดับ

2.2 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *Chlorococcum*

2.2.1 แสง

แสงเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายเนื่องจากเป็นพลังงานในการสังเคราะห์แสง การสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่จุลสาหร่ายนำพลังงานแสงอาทิตย์ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นน้ำตาลโดยใช้พลังงานจากแสงแดดซึ่งเก็บเกี่ยวโดยคลอโรฟิลล์ ดังแสดงในสมการที่ 2-1

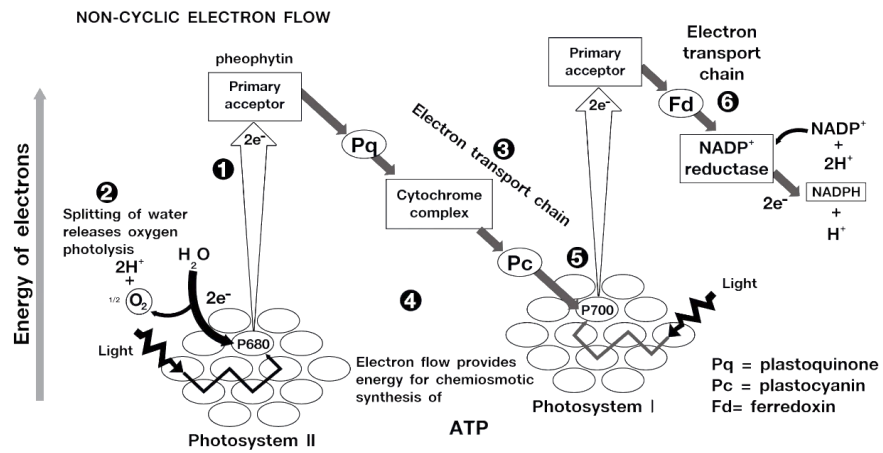


กลไกการสังเคราะห์ด้วยแสง

กลไกการสังเคราะห์ด้วยแสงของจุลสาหร่ายเป็นกลไกการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นวัตถุดิบ จุลสาหร่ายจะใช้พลังงานจากแสงในช่วงคลื่นที่เรียกว่า Photosynthetically Active Radiation (PAR) ซึ่งมีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 - 700 นาโนเมตร แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ปฏิกิริยาใช้แสงและปฏิกิริยาไม่ใช้แสง

1) ปฏิกิริยาใช้แสง (light reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการแสง เกิดขึ้นบริเวณไทลาคอยด์ของคลอโรพลาสต์โดยรงควัตถุจะรับพลังงานแสงแล้วนำมาใช้ในการสร้างสารพลังงานสูง ได้แก่ ATP และ NADPH นำไปใช้ในการสร้างสารอินทรีย์ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานแสงในการแตกตัวของน้ำ เรียกว่า โฟโตลิซิส (photolysis) หรือโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ได้ไฮโดรเจน ไอออนอิเล็กตรอน และออกซิเจน

การถ่ายทอดอิเล็กตรอนโดยวิธีนี้ใช้ระบบแสง 2 ระบบ คือ ระบบแสง I (photosystem I หรือ PSI) และระบบแสง II และมีตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย คือ NADP^+ เนื่องจากการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำจึงเรียกได้อีกชื่อว่า กระบวนการโฟโตลิซิส (photolysis) คลอโรฟิลล์ของระบบแสง I จะดูดกลืนพลังงานจากแสงอาทิตย์และถ่ายทอดไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยา ทำให้มีการปล่อยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงออกมาและถ่ายทอดไปยังตัวรับอิเล็กตรอนต่างๆ ตามลำดับ (ตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก เพอริดอกซิน พลาสโทควิโนน ระบบไซโทโครม และพลาสโทไซยานิน) ซึ่งตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะส่งอิเล็กตรอนกลับคืนให้ศูนย์กลางปฏิกิริยา



รูปที่ 2-3 การไหลของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง

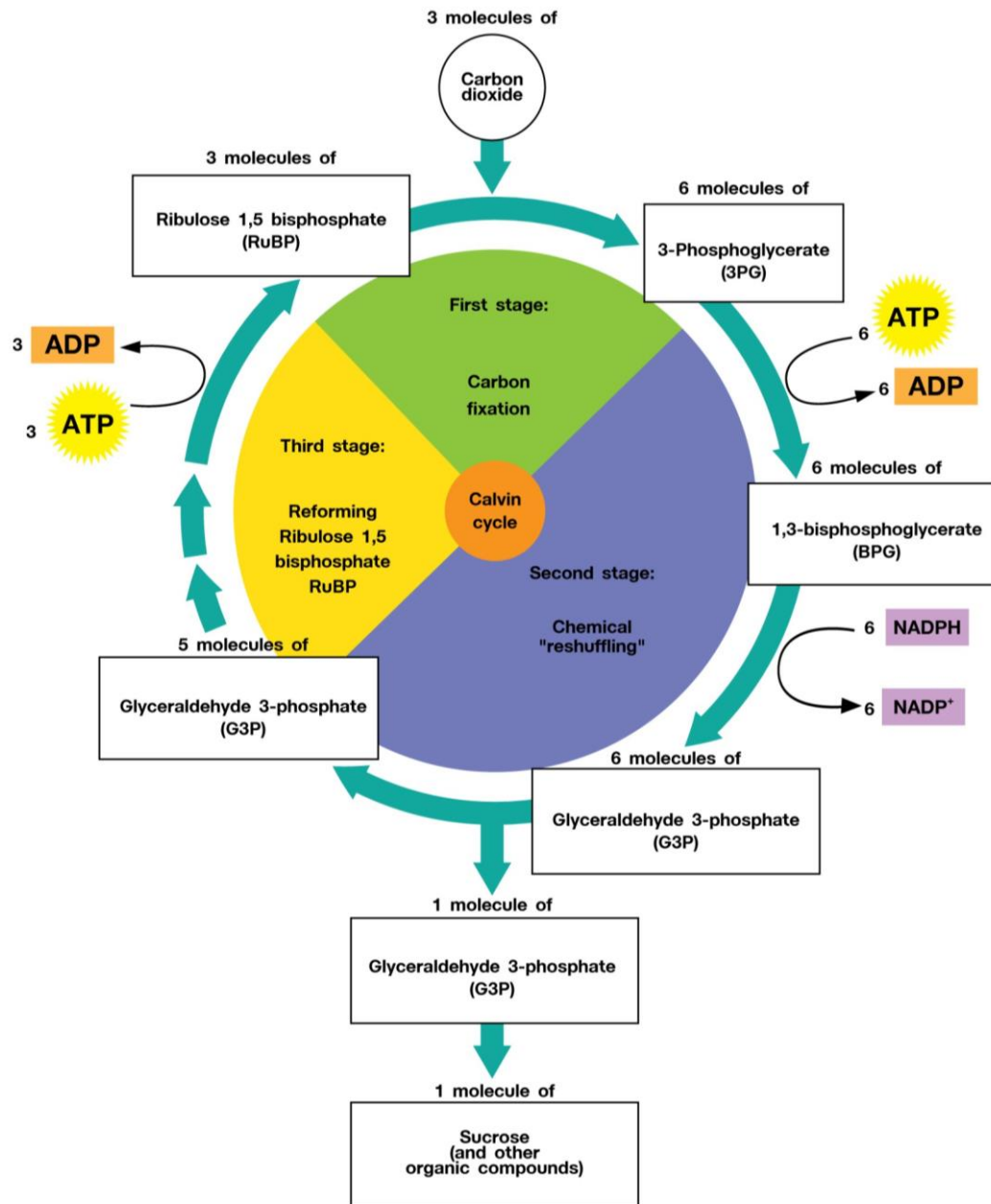
2) ปฏิกิริยาไม่ใช้แสง (dark reaction) หรือปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation reaction) หรือวัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) เป็นการนำเอาพลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสงมาสังเคราะห์สารอินทรีย์เกิดขึ้นที่บริเวณสโตรมาของคลอโรพลาสต์ ประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ

1. คาร์บอกซีเลชัน (carboxylation) เป็นขั้นตอนที่ ribulose - 1, 5-bisphosphate (RuBP) เข้ารวมกับ CO_2 และเกิดเป็นสารที่มีคาร์บอน 3 อะตอม ได้แก่ 3-phosphoglycerate (PGA) 2 โมเลกุล (ขั้นตอนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์)

2. รีดักชัน (reduction) เป็นขั้นตอนที่ PGA ถูกรีดิวซ์เป็น glyceraldehyde-3-phosphate (G3P) ซึ่งเป็นสารประเภทน้ำตาลตัวแรกที่เกิดขึ้นในวัฏจักรคัลวิน ในขั้นตอนนี้จะมีการใช้สารพลังงานสูงที่ได้จากปฏิกิริยาแสง คือ ATP และ NADPH (ขั้นตอนการรีดิวซ์)

3. รีเจนเนอเรชัน (regeneration) เป็นขั้นตอนที่จะสร้างโมเลกุล RuBP ขึ้นมาใหม่ เพื่อนวนกลับไปเป็นตัวรับ CO_2 ในขั้นตอนที่ต้องอาศัยพลังงานจาก ATP ซึ่งได้จากปฏิกิริยาแสง (ขั้นตอนการสร้าง RuBP ขึ้นมาใหม่)

Stroma of Chloroplast



รูปที่ 2-4 วัฏจักรเคลวิน

ประสิทธิภาพโดยรวมของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของเซลล์จุลสาหร่ายมีข้อจำกัดโดยเซลล์ไม่สามารถใช้แสงที่มีความเข้มสูงได้ การสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย *Chlorococcum* จะเกิดในสภาวะความเข้มแสงต่ำในช่วง 4,000 – 300,000 ลักซ์ ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ (400 - 700 นาโนเมตร) [37] ความเข้มแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย โดยเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจาก 2,700 -5,200 ลักซ์ ทำให้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและพบว่าการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแสง ได้รับอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงตกกระทบที่ผิวถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเพิ่มจาก 3,000 - 21,000 ลักซ์ นอกจากนี้มีรายงานของ Wannachod (2018) ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบต่อเนื่อง โดยใช้อาหาร BG-11 พบว่าการเพิ่มความเข้มแสงจาก 3,500 ลักซ์ เป็น 100,000 ลักซ์ ทำให้ชีวมวลของจุลสาหร่าย (น้ำหนักแห้ง) เพิ่มขึ้นจาก 440 เป็น 854 มิลลิกรัมต่อลิตร [17] และ Rayati (2020) ทำการศึกษานี้ผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *Chlorococcum oleofaciens* เพาะเลี้ยงโดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิตร ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ 50, 100, 200, 400 และ 800 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 20 วัน พบว่าผลผลิตชีวมวลสูงสุด 367.82 ± 21.63 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ที่ความเข้มแสง 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งสูงกว่าความเข้มแสง 50 และ 100 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที อย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความเข้มแสงที่ 400 และ 800 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที [38]

2.2.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย อุณหภูมิถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกกลุ่มของจุลสาหร่าย ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มจุลสาหร่ายที่ชอบหรือทนอุณหภูมิสูงและกลุ่มจุลสาหร่ายที่ชอบและทนอุณหภูมิต่ำ การศึกษาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum littorale* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแสง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 8 - 28 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการเจริญจำเพาะ (Specific growth rate) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนได้รับอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth) ที่ 25 องศาเซลเซียส และเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาก่อนหน้านี้รายงานว่าจุลสาหร่าย *Chlorococcum* สามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายเพราะมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิในช่วงกว้างระหว่าง 25 - 45 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เหมาะสมแก่การเพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะกลางแจ้ง [19] เจริญเติบโตได้เร็วภายใต้สภาวะกลางแจ้ง Ota และคณะ (2015) ทำการศึกษานี้ผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *Chlorococcum littorale* เพาะเลี้ยงโดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด

200 มิลลิลิตร ที่ ให้ CO_2 5% (v/v) ความเข้มแสง 100 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 16, 22 และ 28 องศาเซลเซียส อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.066, 0.091 และ 0.037 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าจุลสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ที่ อุณหภูมิ 16 - 28 องศาเซลเซียส [39]

2.2.3 ค่าพีเอช

ความเป็นกรดต่างเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อเมแทบอลิซึมของ จุลสาหร่าย และในบทบาทต่อการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์[40] โดยที่ค่าพีเอชในช่วง 7-9 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะอยู่ในรูปของเกลือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อค่า พีเอชมากกว่า 9.5 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปเกลือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และเมื่อค่าพีเอช ประมาณ 5 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปก๊าซที่ละลายน้ำ ค่าพีเอชมีผลต่อ กระบวนการสังเคราะห์แสง รวมทั้งการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของ สาหร่าย นอกจากนี้ค่าพีเอชเป็นสาเหตุให้สารประกอบโลหะที่เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นบางชนิด ตกตะกอนทำให้จุลสาหร่ายขาดธาตุอาหารบางชนิดผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าจุลสาหร่าย *Chlorococcum* มีความทนทานต่อค่าความเป็นกรดต่างในช่วงกว้างตั้งแต่ pH 6.1 - 9 [19]

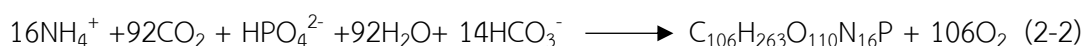
2.2.4 ธาตุอาหาร

จุลสาหร่ายต้องการธาตุอาหารหลัก (Macronutrients) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ ธาตุอาหารรอง (Micronutrients) ได้แก่ เหล็ก แมกนีเซียม โบรอน โมลิบดีนัม โพแทสเซียม โคบอลต์ สังกะสี โดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีความสำคัญมากในการผลิตไขมัน มีการศึกษารายงานว่า อาหารเลี้ยงเชื้อที่ขาดไนโตรเจนช่วยเร่งให้สาหร่ายผลิตไขมันมากขึ้น หากขาดธาตุอาหารหลักหรือธาตุ อาหารเสริมสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาของสาหร่ายขนาดเล็ก เนื่องจากการขัดขวางกระบวนการเมแทบอลิซึม [41] โดยในที่นี้จะกล่าวผลกระทบของไนโตรเจนและ ฟอสฟอรัสที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายเป็นหลัก ซึ่งสรุปได้ดังนี้

2.2.4.1 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย โดยมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับ เมแทบอลิซึมภายในเซลล์ ได้แก่ การผลิตคาร์โบไฮเดรต โปรตีน การผลิตสารสีและปริมาณไขมัน รวมถึงระบบการสังเคราะห์แสง โดยจุลสาหร่ายสามารถใช้ไนโตรเจนจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ เกลือ แอมโมเนีย ไนเตรท และยูเรีย จะถูกสาหร่ายรีดิวซ์เป็นแอมโมเนียมก่อนที่จะนำเข้าสู่เซลล์ ในน้ำเสีย

โดยทั่วไปหากมีไนโตรเจนอยู่ในน้ำมากจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น และหากมีแอมโมเนียมมาก ค่าความเป็นกรดต่างจะลดลง กระบวนการนำไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของ จุลสาหร่ายอธิบายได้ด้วยสมการ 2-2 [42]



หมายเหตุ $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$ = องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายขนาดเล็ก

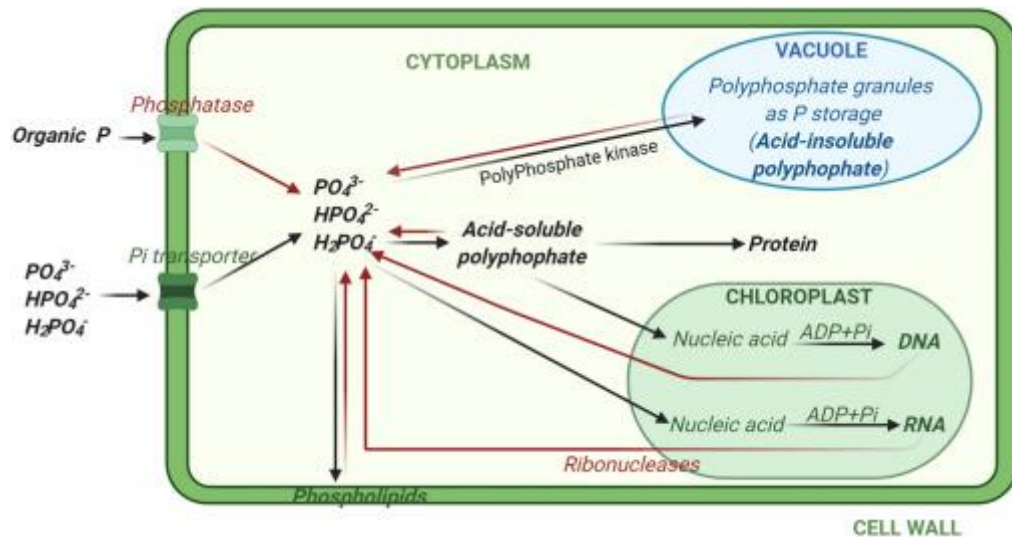
การดูดซึมไนโตรเจนในจุลสาหร่ายนั้นมาจากแหล่งไนโตรเจนทั้งหมด 3 แหล่ง ได้แก่ แอมโมเนียม ไนเตรท และไนไตรท์ โดยเปลี่ยนไนเตรทเป็นไนไตรท์ในไซโตซอล (cytosol) จากนั้นจึงเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียมในคลอโรพลาสต์โดยใช้รีดักเตส (เอนไซม์ที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน) เช่น ไนเตรทรีดักเตส (NR) และไนไตรท์รีดักเตส (NiR) [43] นอกจากนี้เซลล์ของจุลสาหร่ายจะจับ ไนไตรท์และแอมโมเนียมที่มากเกินความสามารถในการดูดซึมของเซลล์ เพื่อหลีกเลี่ยงความเป็นพิษ ภายในเซลล์ของจุลสาหร่าย [44] ในกรณีที่ไนเซลล์ของจุลสาหร่ายมียูเรียแต่ไม่มีแอมโมเนีย ยูเรีย สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนแหล่งเดียวในจุลสาหร่ายได้ [45], [46]

2.2.4.2 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดนิวคลีอิก ฟอสโฟไลปิด และ เอทีพี ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์จุลสาหร่าย โดย เมแทบอลิซึมที่เกี่ยวข้องกับฟอสฟอรัสของเซลล์จุลสาหร่ายทั้งหมดเริ่มต้นเมื่อมีการขนถ่าย Pi (Inorganic phosphate รวมถึง PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} และ H_2PO_4^-) เข้าไปในเซลล์ (รูปที่ 2-5) [47] บทบาทของโพลีฟอสเฟตในเซลล์คือการรักษาเสถียรภาพของโปรตีน และเพื่อปกป้องเซลล์จากการ รวมตัวของโปรตีนภายใต้ความเครียดของเซลล์ [48] ภายใต้สภาวะที่มีแสงโพลีฟอสเฟตที่ละลายใน กรด (acid-soluble polyphosphate หรือ ASP) ของเซลล์จะใช้สำหรับการผลิต DNA และโปรตีน ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง [49] ส่วนการสังเคราะห์ RNA และฟอสโฟลิปิดส่วนใหญ่ มาจากเซลล์ Pi (Inorganic phosphate) หลังจากได้รับจากแหล่งฟอสฟอรัสจากภายนอกเซลล์ [47] โดยการถ่ายโอนฟอสเฟตไปยัง RNA จะอยู่ในกระบวนการยับยั้งแสง

ในรูปที่ 2-5 ฟอสฟอรัสส่วนเกินจะถูกสะสมและจัดเก็บเป็นเม็ดโพลีฟอสเฟตในรูปของ โพลีฟอสเฟตที่ไม่ละลายในกรด (acid-insoluble polyphosphate หรือ AISP) ในแวคิวโอล (vacuole) เพื่อใช้ในอนาคตภายใต้ภาวะขาด Pi [50] AISP ใช้เพื่อถ่ายโอนไปยังสารประกอบ

ฟอสฟอรัสของเซลล์อื่นๆ เพื่อรักษาความมีชีวิตของสาหร่ายภายใต้การขาดแคลน Pi [49] อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เซลล์สะสม AISP ในการจัดเก็บ P และเร่งการใช้ ASP มากขึ้น [51] และการสร้างฟอสโฟไลปิดในเซลล์จุลสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นภายใต้การเพาะเลี้ยงที่อุดมด้วยฟอสเฟต [52]



รูปที่ 2-5 Phosphorus pathways ที่เป็นไปได้ในยูคาริโอตที่สังเคราะห์ด้วยแสง

2.2.5 การกวนผสม

การกวนคือกระบวนการผสมสองชั้นตอนขึ้นไปเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงการกวนจะส่งเสริมการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันของเฟสของแข็ง (จุลสาหร่าย) ของเหลว (อาหารในการเพาะเลี้ยง) และเฟสก๊าซ (โดยปกติคืออากาศ) ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย การแลกเปลี่ยนก๊าซ-ของเหลวถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งคาร์บอนที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยจะได้รับอิทธิพลจากผลกระทบ 3 ประการ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และตัวถูกละลาย (Solute) กฎของเฮนรีได้อธิบายถึงผลกระทบของความดันที่มีต่อการละลายไว้ว่า ความสามารถในการละลายของก๊าซในของเหลวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของก๊าซนั้นเหนือพื้นผิวของสารละลาย อุณหภูมิมีผลสำคัญต่อความสามารถในการละลายของก๊าซ ยิ่งอุณหภูมิสูง ความสามารถในการละลายของก๊าซก็จะยิ่งลดลง อย่างไรก็ตามการรักษาอุณหภูมิและความต้องการสารอาหารถือเป็นสิ่งสำคัญในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ดังนั้นการควบคุมการกวนและการเติมอากาศจึงเป็นเพียงเครื่องมือเดียวในการปรับปรุงการแลกเปลี่ยนก๊าซ การผสมมีความสำคัญต่อการป้องกันปัญหาการตกตะกอนและช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ช่วยให้การสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่ายเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการแบ่งชั้น

ด้วยความร้อน (เช่น ในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง) และเพื่อปรับปรุงการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างอาหารเลี้ยงเชื้อกับอากาศ นอกจากนี้ยังช่วยในการรักษาความเข้มข้นของเซลล์จุลสาหร่ายให้เป็นเนื้อเดียวกันในตัวกลาง การผสมสามารถทำได้โดยวิธีทางกล เช่น ใบพัด หรือ การเป่าอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง [41] เมื่อการกวนผสมทำได้ไม่เพียงพอการตกตะกอนอาจเกิดขึ้นได้ (ความเร็วในการตกตะกอนอาจแตกต่างกันระหว่าง 0.1 ถึง 2.6 เซนติเมตรต่อชั่วโมงในสภาวะคงที่ [53]) และเซลล์ที่สะสมไว้อาจตายและสลายตัว ส่งผลให้ผลผลิตและผลิตภัณฑ์ลดลง ([54], [55]) อย่างไรก็ตามแรงปั่นกวนที่มีมากเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ ทั้งนี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของจุลสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาจะมีหน้าที่ในการต้านทานแรงเฉือน (Shear force) ที่ได้รับจากการปั่นกวน ([56], [57])

2.3 ระบบการเพาะเลี้ยงถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

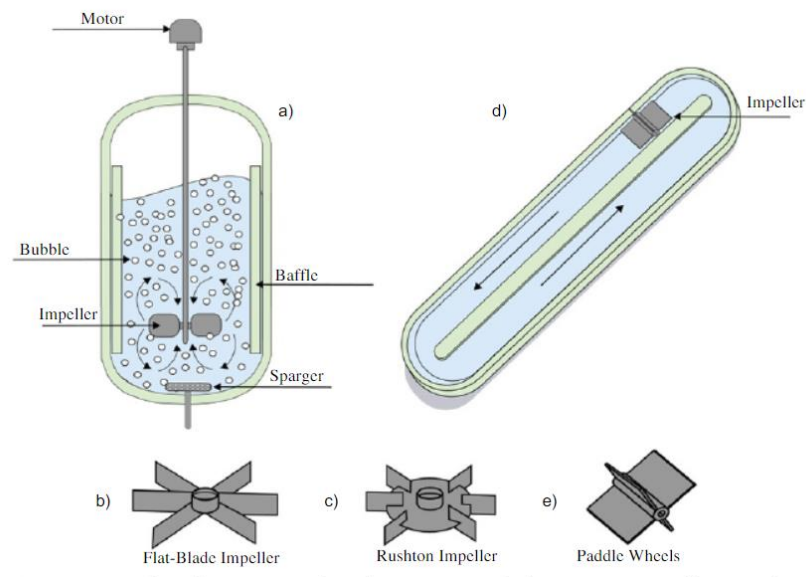
การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบปิดใช้งานถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงซึ่งประกอบด้วย 3 ภูมิภาค คือ 1) ภูมิภาคของเหลว ซึ่งเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจุลสาหร่าย 2) ภูมิภาคของแข็ง ซึ่งเป็นเซลล์จุลสาหร่าย และ 3) ภูมิภาคก๊าซ ซึ่งหมายถึงอากาศ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายมีหลายรูปแบบ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบถังกวน (Stirred tank photobioreactor)

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบถังกวนเป็นถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในห้องปฏิบัติการมากที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย ตัวถังปฏิกรณ์มีขนาดเล็กทำด้วยวัสดุแก้ว เช่น ขวดตุรกรีน มีการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก สัดส่วนของความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2.1 ถึง 6.1 [58] ถังกวนที่มีขนาดใหญ่ติดตั้งตัวกั้น (Baffle) ตรงส่วนกลางของถังเพื่อป้องกันการเกิดวอร์เท็กซ์ (Vortex) ช่วยให้เกิดการผสมของจุลสาหร่ายดีขึ้น แต่ถังปฏิกรณ์ประเภทนี้ไม่นิยมใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายที่มีปริมาณมาก เนื่องจากจะเกิดการผสมได้ไม่ดีนักและประสบปัญหาการกระจายตัวของอากาศที่ไม่เพียงพอ อีกสาเหตุหนึ่งคือไม่สามารถขยายขนาดถังปฏิกรณ์และเปลี่ยนไปใช้ใบกวนที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากจะมีแรงเฉือนที่สูงจนเป็นอันตรายต่อเซลล์และเกิดการบดบังแสงจากเซลล์สาหร่ายด้วยกันเองได้ง่าย ลักษณะของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบถังกวน [58] ดังรูปที่ 2-6

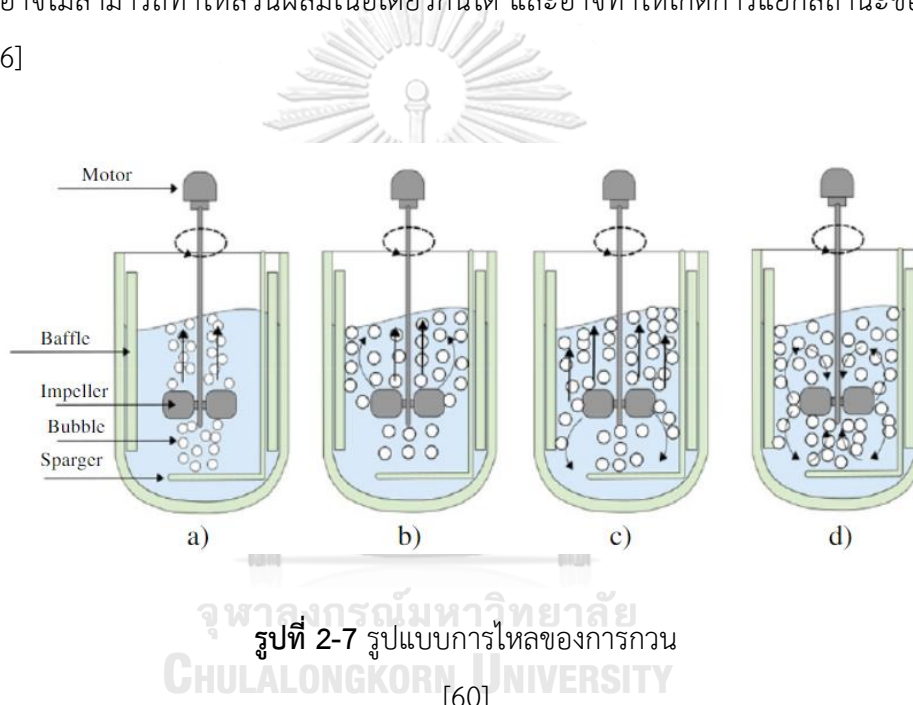
ในถังปฏิกรณ์จะมีใบพัด (Impeller) ซึ่งประเภทของการเคลื่อนที่ของของไหลถูกกำหนดโดยรูปร่างของใบพัด โดยการไหลตามแนวแกนที่เกิดจากกระแสขนานกับแกนใบพัดและการไหลในแนวรัศมีที่เกิดจากกระแสในทิศทางแนวสัมผัสหรือแนวรัศมี ใบพัดหลักสามประเภท ได้แก่ propellers,

blades, และ turbines [59] โดย Propellers เป็นใบพัดที่มีความเร็วสูงและไหลตามแนวแกน สำหรับใช้ในของเหลวความหนืดต่ำและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดขนาดเล็กจะทำงานระหว่าง 1,150 - 1750 รอบต่อนาที หรือ 400 - 800 รอบต่อนาที ในใบพัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ใบพัดเหล่านี้จะตัดกระแสตัวอย่างแรงทำให้เกิดกระแสน้ำที่มีความปั่นป่วนสูง [59] ส่วนใบพัดประเภท blades เหมาะสำหรับช่วงความหนืดสูง ทำงานที่ความเร็วระหว่าง 20 - 150 รอบต่อนาที ใบพัดเหล่านี้สร้างการไหลในแนวรัศมีเป็นพิเศษ และเมื่อทำงานด้วยความเร็วสูงและมีการการไหลของเหลวออกด้วยความเร็วสูงเช่นกัน จะสร้างกระแสน้ำวนที่ทำให้การผสมภายในถังปฏิกรณ์ดีขึ้น และใบพัดประเภท turbines จะมีประสิทธิภาพในช่วงความหนืดที่กว้าง ในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ turbines จะสร้างกระแสน้ำแรงที่คงอยู่ทั่วทั้งถัง โกลีใบพัดจะมีโซนกระแสน้ำเร็ว ความปั่นป่วนสูง และแรงเฉือนที่รุนแรง การไหลจะเป็นแนวรัศมีกระตุ้นให้เกิดการหมุนวน ซึ่งจะต้องถูกจำกัดด้วย deflectors หรือ diffuser rings เพื่อให้การผสมมีประสิทธิภาพมากขึ้น [59] ใบพัดทั่วไปในระบบปิดไม่เพียงแต่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเท่านั้น แต่ยังใช้สำหรับกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์อีกด้วย [60] โดยรูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับรูปทรงของใบพัด ความเร็วการกวน และการไหลของก๊าซ (รูปที่ 2-7) ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้: (A) ความเร็วต่ำและอัตราการไหลของก๊าซสูงมาก (B) การหมุนต่ำและอัตราการไหลของก๊าซสูง; (C) การหมุนปานกลางและอัตราการไหลของก๊าซปานกลาง และ (D) การหมุนสูงและอัตราการไหลของก๊าซต่ำ



รูปที่ 2-6 เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบถังกวน เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบร่องน้ำ และใบพัดหลัก 3 ตัวที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

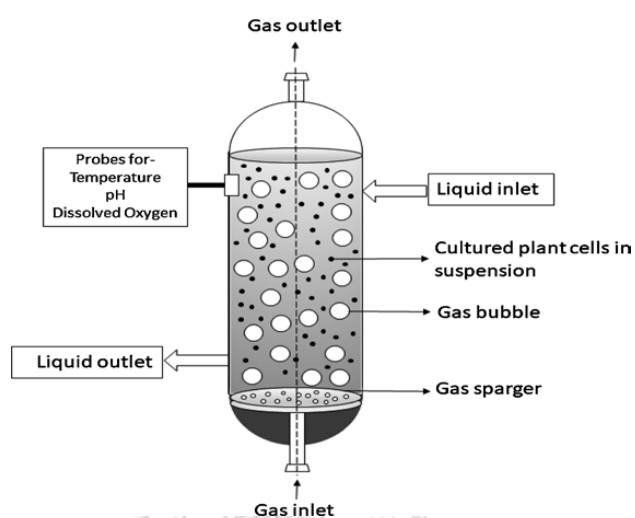
นอกจากนี้ยังมี Sparger ที่ใช้เพื่อกระจายฟองอากาศให้สม่ำเสมอในขนาดที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะอยู่ที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ระบบกระจายมีความสำคัญและต้องได้รับการออกแบบองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น การกระจายขนาดฟอง การไหลเวียนของอากาศสูงสุด การรวมตัว ความสม่ำเสมอของส่วนผสม และความต้านทานการสึกหรอ และอื่นๆ [61] เป็นที่ทราบกันว่า การออกแบบตัวกระจายก๊าซมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์ โดยจะสร้างฟองที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มม. ซึ่งสามารถรักษาระบบการไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างเสถียรโดยมีความเร็วของแก๊สพื้นผิวสูง [61], [62], [63], [64], [65] ในทางกลับกัน Spargers ที่สร้างฟองอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 มิลลิเมตร จะต้องทำงานที่ความเร็วของก๊าซต่ำ มิฉะนั้นอาจไม่สามารถทำให้ส่วนผสมเนื้อเดียวกันได้ และอาจทำให้เกิดการแยกสถานะของสารขึ้น [63], [66]



2.3.2 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบคอลัมน์เติมอากาศ (Bubble column photobioreactor)

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบคอลัมน์เติมอากาศเป็นถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมอากาศจากหัวจ่ายบริเวณก้นถัง มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง รูปแบบการไหลของของเหลวภายในถังจะเป็นแบบไร้ทิศทาง เพื่อให้เกิดการแขวนลอยของเซลล์ภายในถัง ระบบนี้จำเป็นต้องมีการเติมอากาศด้วยอัตราที่สูง (1-2.5 ลิตรต่ออนาที) [67] และต้องควบคุมไม่ให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทอากาศลดลง ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้หัวจ่ายอากาศและควบคุมอัตราการเติมอากาศให้เหมาะสม ระบบนี้มีข้อดี คือ มีต้นทุนต่ำและทำความสะอาดง่าย แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้อัตราการ

ไหลของอากาศสูง ถึงจะเกิดการผสมกันได้ดี แต่ขณะเดียวกันการเติมอากาศที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดฟองจนสร้างความเสียหายต่อเซลล์ได้ ลักษณะของถังปฏิกรณ์ประเภทนี้มีอยู่หลายรูปแบบดังรูปที่ 2-8 ทั้งแบบคอลัมน์ปกติ แบบรูปกรวย เพื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ และอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น sieve tray เพื่อทำลายฟองอากาศขนาดใหญ่และป้อนสำหรับไหลวนน้ำ เพื่อให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น



รูปที่ 2-8 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบคอลัมน์เติมอากาศ

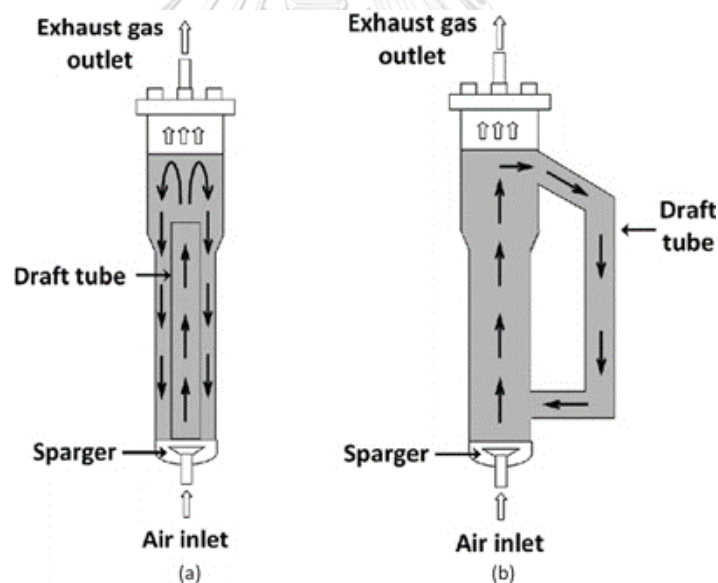
[68]

2.3.3 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยก (Airlift photobioreactor)

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกมีการให้อากาศเพื่อกวนของเหลวภายในระบบ เช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เติมอากาศ โดยมีการเติมอากาศจากหัวจ่ายบริเวณก้นถังแตกต่างกันตรงที่ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกจะมีท่อ draft (Draft tube) อยู่ภายใน สามารถช่วยลดปัญหาการขาดอาหารและการไหลเวียนของอากาศที่ไม่เพียงพอได้ นอกจากนี้ยังมีแรงเฉือนที่ต่ำ เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย รูปแบบการไหลของของเหลวภายในถังจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีการไหลขึ้น (Riser) จากผลของการให้อากาศ และส่วนที่มีการไหลลง (Downcomer) เป็นส่วนที่ไม่มี การให้อากาศ

หลักการการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก จะอาศัยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลว เมื่อมีอากาศผสมอยู่ในบริเวณที่แตกต่างกัน โดยอากาศจะถูกป้อนจากทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ทำให้ในส่วนฐานของถังปฏิกรณ์มีฟองอากาศอยู่เป็นจำนวนมากส่งผลให้ของเหลวใน

บริเวณนี้มีความหนาแน่นลดลง และเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ ในส่วนบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งมีความดันต่ำกว่าด้านล่างจะพบว่า ฟองอากาศที่ละลายอยู่ในของเหลวจะถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้ของเหลวมีความหนาแน่นมากขึ้นและเริ่มตกลงสู่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์อีกครั้ง อัตราการหมุนเวียนของของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความสูงของถังปฏิกรณ์ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของส่วน Downcomer ต่อพื้นที่ส่วน Riser อัตราไหลอากาศ เป็นต้น ข้อดีของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกคือ ประหยัดพลังงานและมีแรงเฉือนต่ำ แต่ข้อจำกัดคือเหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ดังนั้นถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกจึงถูกนำมาใช้งานด้านเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย เนื่องจากช่วยให้จุลสาหร่ายเกิดการกระจายตัวรับแสงและดูดซึมสารอาหารได้อย่างทั่วถึง ซึ่งมีผลต่อการเติบโตและอัตราการผลิตชีวมวล ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีด้วยกัน 2 รูปแบบหลัก คือแบบท่อด้านใน (Internal-loop airlift photobioreactor) และแบบท่อด้านนอก (External-loop airlift photobioreactor) ดังรูปที่ 2-9



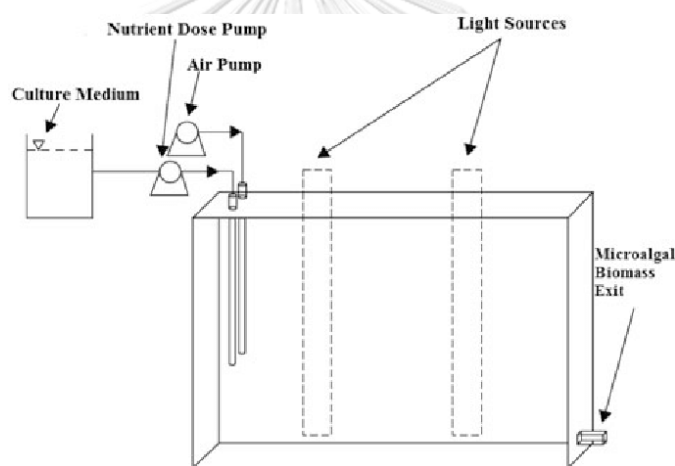
รูปที่ 2-9 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยก

ก.) แบบ Internal-loop airlift photobioreactor

ข.) แบบ External-loop airlift photobioreactor

2.3.4 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบแผ่นแบน (Flat-plate photobioreactor)

ถังปฏิกรณ์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบน มีระยะให้แสงส่องผ่านน้อยกว่า 20 เซนติเมตรเพื่อให้สาหร่ายสามารถรับแสงได้อย่างทั่วถึง และลดการบดบังแสงระหว่างเซลล์สาหร่ายด้วยกันเอง ดังรูปที่ 2-10 การไหลเวียนภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดแผ่นแบนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วน Riser และ Downcomer โดยลมเป่าลงจากท่ออากาศและพาของเหลวขึ้นด้านบน จากนั้นของเหลวบางส่วนจะถูกหมุนลงมา จึงเกิดการไหลเวียนภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง [23] โดยระบบนี้มีข้อดีคือ ความบางของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแผ่นจะลดข้อจำกัดเรื่องแสงในการเพาะเลี้ยง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยง การสังเคราะห์แสง และการเติบโตของสาหร่ายมีมากขึ้น [70] แต่มีข้อจำกัดคือขยายขนาดถังปฏิกรณ์ได้ยาก [71]



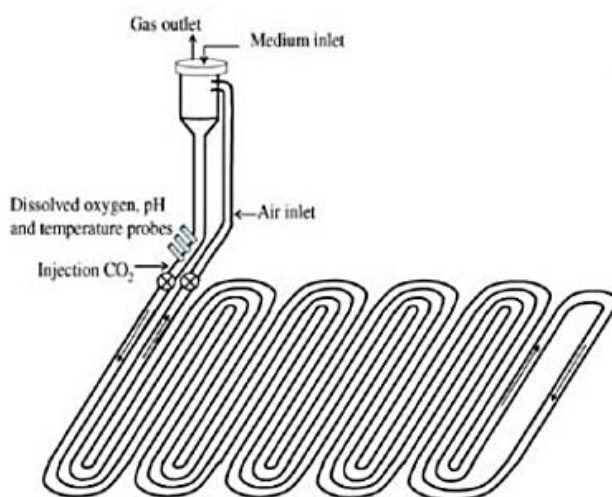
รูปที่ 2-10 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบแผ่นแบน

[72]

2.3.5 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบท่อ (Tubular photobioreactor)

เป็นถังปฏิกรณ์ที่นิยมใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายกลางแจ้งเพราะมีพื้นที่รับแสงมาก สามารถติดตั้งได้ทั้งแนวนอนหรือแนวเอียง ระบบการไหลเวียนสามารถใช้การไหลเวียนโดยเครื่องสูบลมหรือการไหลเวียนแบบอากาศยกก็ได้ ถังปฏิกรณ์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือมีค่าการถ่ายโอนออกซิเจนค่อนข้างต่ำ มักเกิดปัญหาหากต้องการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ เช่น ภาวะ Overheating ในถังปฏิกรณ์ [73] นอกจากนี้ยังทำความสะอาดยาก และอาจเกิดความแตกต่างของ pH, DO, CO₂ ตามแนวท่อ เซลล์จุลสาหร่ายมีความหนาแน่นที่มากกว่าน้ำส่งผลให้เซลล์จมลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง พฤติกรรมนี้อาจส่งผลดีในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปสกัดผลิตภัณฑ์และทำให้

บริสุทธิ์ แต่ในการเพาะเลี้ยงนั้นเมื่อเซลล์จมอยู่ที่ก้นถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง จะส่งผลให้เซลล์ได้รับอาหาร และแสงที่ไม่เพียงพอ เป็นผลเสียต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ได้ อีกทั้งจุลสาหร่ายสีเขียว *Chlorococcum* มีขนาดเซลล์ที่ค่อนข้างใหญ่ ซึ่งมีขนาดเซลล์ประมาณ 7.8 - 15.2 ไมโครเมตร ทำให้เกิดปัญหา การจมตัวสู่ก้นถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง [74, 75] รูปแบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบท่อ ดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบท่อ

[76]

ตารางที่ 2-2 รูปแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและสภาวะที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัด

ตารางที่ 2-2 รูปแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและสภาวะที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัด

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง	สภาวะ	ผลผลิต	ข้อดี	ข้อจำกัด	อ้างอิง
ชนิดถังกวน	<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 2 ลิตร • ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ • อัตราการไหลของอากาศ 0.97-2.3 ลิตรต่อนาที 	<ul style="list-style-type: none"> • ความเข้มข้นของผลผลิตสูงสุด 0.04 กรัมต่อลิตรต่อวัน • อัตราการผลิตชีวมวลสูงสุด 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน 	<ul style="list-style-type: none"> • ตัวถังปฏิกรณ์มีขนาดเล็ก ใช้พื้นที่น้อยเหมาะกับบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด 	<ul style="list-style-type: none"> • ปัญหาการกระจายตัวของอากาศที่ไม่เพียงพอ • ขยายขนาดถึงปฏิกรณ์ยาก เนื่องจากจะมีแรงเฉือนที่สูงจนเป็นอันตรายต่อเซลล์ 	[17]
ชนิดคอลัมน์เติมอากาศ	<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 10 ลิตร • ความเข้มของแสง 3,500 ลักซ์ • ช่วงเวลาการให้แสงต่อมีแต่เท่ากับ 12 ชั่วโมง/12 ชั่วโมง 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.162 ต่อวัน - ผลผลิตจำเพาะ 0.742 กรัมต่อลิตรต่อวัน 	<ul style="list-style-type: none"> • ผลผลิตชีวมวลสูง • ง่ายต่อการขยายขนาด • ใช้พลังงานต่ำ • พองอากาศส่งเสริมการรับแสงของเซลล์ภายในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> • มีโอกาสก่อตัวของไบโอฟิล์มบนผนังถังปฏิกรณ์ • การตกตะกอนของเซลล์เป็นไปได้ง่ายต้องใช้วิธีการไหลอากาศสูงเพื่อให้ของเหลวผสมกันได้ดี 	[77]

ถึงปฏิบัติการชีวภาพ แบบใช้แสง	สถานะ	ผลผลิต	ข้อดี	ข้อจำกัด	อ้างอิง
<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 4 ลิตร • AD/AR เท่ากับ 3.87 • ความเข้มแสง 5,000 - 100,000 ลักซ์ • อัตราการไหลอากาศ 0.97 - 2.3 ลิตรต่อนาที 	<ul style="list-style-type: none"> - นำหนักชีวมวลสูงสุด 1,008 มิลลิกรัมต่อลิตร • ปริมาณแคโรทีนอยด์ 5.54 มิลลิกรัมต่อลิตร 	<ul style="list-style-type: none"> • ผลผลิตชีวมวลสูง • การใช้แสงมีประสิทธิภาพ • ประสิทธิภาพการใช้ CO₂ สูง 	<ul style="list-style-type: none"> • ยากต่อการขยายขนาด • ความปั่นป่วนไม่เพียงพอจากกลไกของอากาศยก 	[24]	
<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 2 ลิตร • AD/AR 3.18 • อัตราการเติมอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม • ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ 	<ul style="list-style-type: none"> • นำหนักแห้งสูงสุด 800 มิลลิกรัมต่อลิตร • ปริมาณแคโรทีนอยด์สูงสุด 7.67 มิลลิกรัมต่อลิตร 	<ul style="list-style-type: none"> • ประสิทธิภาพการใช้ CO₂ สูง 	<ul style="list-style-type: none"> • มีโอกาสก่อตัวของไบโอฟิล์มบนผนังถังปฏิกรณ์ 	[23]	
<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 2 ลิตร • AD/AR 3 • อัตราการเติมอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม • ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ • ปริมาตร 60 ลิตร 	<ul style="list-style-type: none"> • นำหนักแห้งสูงสุด 1,360+16.7 มิลลิกรัมต่อลิตร • นำหนักแห้งสูงสุด 1,240 + 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร 	<ul style="list-style-type: none"> • ประสิทธิภาพการใช้ CO₂ สูง 	<ul style="list-style-type: none"> • มีโอกาสก่อตัวของไบโอฟิล์มบนผนังถังปฏิกรณ์ 	[27]	

ถึงปฏิบัติการชีวภาพ แบบใช้แสง	สถานะ	ผลผลิต	ข้อดี	ข้อจำกัด	อ้างอิง
ชนิดแผ่นแบน	<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 1.4 ลิตร • ความเข้มแสง 148,000 ลักซ์ • อัตราการไหลของอากาศ 3 ลิวิเอม 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการผลิตชีวมวล 380 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง 	<ul style="list-style-type: none"> • พื้นที่ผิวในการรับแสงมีขนาดใหญ่ • ความสามารถในการเข้าถึงแสงที่สม่ำเสมอทั่วถึง • ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูง 	<ul style="list-style-type: none"> • ยากต่อการขยายขนาด • การควบคุมอุณหภูมิการเพาะเลี้ยงเป็นไปได้ยาก 	[14]
ชนิดท่อยาว	<ul style="list-style-type: none"> • ปริมาตร 10 ลิตร ความยาว 1 เมตร จำนวน 34 ท่อ • ความเข้มแสง 32,400 ลักซ์ • อัตราการไหลอากาศ 2 ลิตร ต่อนาที 	<ul style="list-style-type: none"> - น้ำหนักชีวมวลของจุลสาหร่ายสูงสุด 8.8 กรัมต่อลิตร - ปริมาตรแคโรทีนอยด์ 41.8 มิลลิกรัมต่อลิตร 	<ul style="list-style-type: none"> • ผลผลิตชีวมวลสูง • พื้นที่ผิวในการรับแสงมีขนาดใหญ่ • เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง 	<ul style="list-style-type: none"> • ใช้พื้นที่ขนาดใหญ่สำหรับการติดตั้ง • ความผันผวนที่เกินไปได้ของ pH ความเข้มข้นของ O₂ ที่ละลายและ CO₂ ตามความยาวของท่อ • มีโอกาสก่อตัวของไบโอฟิล์มบนผนังถังปฏิกรณ์ และการปนเปื้อน • ยากต่อการขยายขนาด 	[19]

2.4 รูปแบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสามารถทำหลายวิธี สำหรับจุลสาหร่ายสีเขียว *Chlorococcum* พบว่ามีรูปแบบการเพาะเลี้ยงหลายแบบ ได้แก่ แบบกะ (Batch) แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยมีรายละเอียดดังนี้หลักที่ใช้เพื่ออธิบายประเภทของการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ดังนี้

2.4.1 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะ

การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะจะเติมอาหารเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการเพาะเลี้ยง และไม่มี การเติมสารอาหารเพิ่มเติมอีกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวเซลล์ ขณะทำการเพาะเลี้ยง การเพาะเลี้ยงแบบกะนี้ เป็นระบบการเพาะเลี้ยงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตชีวมวล และผลิตภัณฑ์ในออยด์ [78] อย่างไรก็ตามอัตราการเติบโตของจุลสาหร่ายในช่วงท้ายของการเพาะเลี้ยงจะมีแนวโน้มลดลงจนเป็นศูนย์ เนื่องจากจะเกิดสภาวะขาดอาหาร หรือมีการสะสมของของเสียและสารพิษที่จุลสาหร่ายสร้างขึ้นจนไม่เหมาะสมในการเจริญเติบโต

2.4.2 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง

การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องจะที่มีการเติมสารอาหารเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเป็นระยะ การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องมีข้อดีคือสามารถควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ อดี โดยเฉพาะในเรื่องของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เข้าระบบที่อาจมีปริมาณไม่เหมาะสมจนเกิดผลลบต่อการ เกิดปฏิกิริยาหรือเรียกว่า Substrate Inhibition ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ก็มีข้อเสียคือต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการควบคุมปริมาณอาหารที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ เนื่องจากปริมาณอาหารมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2.4.3 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบต่อเนื่อง

การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบต่อเนื่องจะมีการเติมสารอาหารเข้าและดึงสารออกจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงตลอดเวลา โดยจะควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายให้อยู่ใน ระยะทวีคูณ (Exponential phase) ตลอดเวลา ระบบเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่องจะให้ผลผลิตต่อหน่วย เวลา (Productivity) สูงกว่า ระบบการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์ สำหรับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ แขนวนลอยที่มีการกวนผสมสมบูรณ์และ ไม่มีการรีไซเคิลเซลล์ (Completely-Mixed Suspended

Growth Bioreactor with No Recycle) หากดำเนินการภายใต้สภาวะคงตัวจะพบว่า ค่าอัตราการเจือจาง (Dilution Rate, D) มีค่าเท่ากับ อัตราการเจริญจำเพาะซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$D = F/V = \mu \quad (2-3)$$

เมื่อ F = อัตราการไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

V = ปริมาณของเหลวในถังปฏิกรณ์

D = อัตราการเจือจาง

จากสมการที่ 2-3 จะเห็นว่าสามารถปรับอัตราการเจริญจำเพาะของจุลสาหร่ายในระบบการเพาะเลี้ยงได้ โดยปรับอัตราการไหลของอาหารภายในระบบเท่านั้น และหากค่าอัตราการเจือจางมากกว่าค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด ($D > \mu_m$) จะพบว่าเซลล์ในถังปฏิกรณ์จะไม่สามารถใช้อาหารได้ทันและจะถูกชะออกจากถังปฏิกรณ์ ลักษณะแบบนี้เรียกว่า สภาวะ Washout มิงงานรายงานวิจัย ศุทธิณี (2557) ศึกษาสภาวะแวดล้อมเพื่อทำให้เกิดการสะสมแคโรทีนอยด์ในจุลสาหร่าย *C. humicola* ภายใต้ระบบการเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่อง ผลการทดลองในระบบแบบต่อเนื่องพบว่าจุลสาหร่าย *C. humicola* มีอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.36 ต่อวัน การศึกษาในระบบเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่องซึ่งใช้ขวดคูลูแรนจำนวน 5 ขวด วางเรียงต่อกัน และใช้อาหารสูตร BG-11 ควบคุมอัตราการเจือจางที่ 0.35 ต่อวัน [24]

2.5 ไบโอฟิล์ม

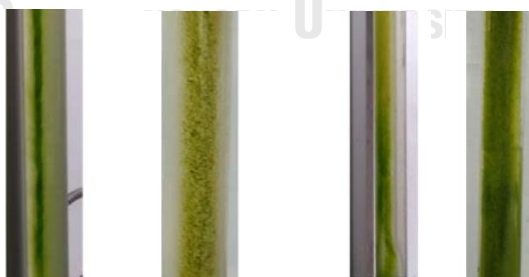
2.5.1 การเกิดไบโอฟิล์มสาหร่ายบนพื้นผิว

ไบโอฟิล์ม (Biofilm) ประกอบด้วยกลุ่มของจุลสาหร่ายขนาดเล็ก รวมถึงไซยาโนแบคทีเรีย เฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย และจุลินทรีย์อื่นๆ ซึ่งฝังอยู่ในสารพอลิเมอร์นอกเซลล์ extracellular polymeric substance (EPS) ที่เซลล์ผลิตขึ้น [79] ปัจจัยความเครียดในสภาวะการเจริญเติบโต เช่น ความเข้มของแสง อุณหภูมิ ค่า pH การขาดสารอาหาร และสารพิษ เกี่ยวข้องกับการหลั่งของสารพอลิเมอร์นอกเซลล์จุลสาหร่าย [80] โดยจะถูกหลั่งออกมานอกเซลล์ในลักษณะเป็นเมือกก่อให้เกิดไบโอฟิล์มเริ่มจากการยึดติดเริ่มต้นของเซลล์จุลสาหร่าย จากเซลล์จุลสาหร่ายที่อยู่อย่างอิสระในของไหลมาแนบติดบนพื้นผิววัสดุ (Substrate) โดยจุลสาหร่ายบางส่วนสามารถยึดเกาะได้ดีและเซลล์บางส่วนหลุดจากพื้นผิววัสดุได้ โดยที่เซลล์จุลสาหร่ายเกิดการยึดติดโดยไม่หลุดออก เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยว (Adhesion force) ที่แข็งแรงขึ้นระหว่างเซลล์จุลสาหร่ายกับพื้นผิววัสดุ ส่งผลให้เซลล์จุลสาหร่ายที่ยึดติดสามารถเจริญและขยายเซลล์ต่อไปได้ การก่อตัวของไบโอฟิล์มได้รับอิทธิพลจาก

วัสดุ การยึดเกาะ สายพันธุ์ของสาหร่าย และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพองค์ประกอบทางเคมีของสารเคลือบผิวกลาง รูปทรงเรขาคณิตของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและอุทกพลศาสตร์ [81] แรงที่กระทำต่อเซลล์จุลสาหร่ายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสร้างไบโอฟิล์ม ซึ่งหมายถึงสมดุลของแรงระหว่างแรงโน้มถ่วง แรงลอยตัว แรงยึดเหนี่ยว และแรงต้านแรงยึดเหนี่ยวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุและพารามิเตอร์ของตัวกลางของไหล การทำลายแรงยึดเหนี่ยวนั้นจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยภายนอกมาเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่าง แรงเฉือนของของไหลรอบตัวจุลสาหร่ายหรือการชะล้างจากสารซักล้างหรือสารฆ่าเชื้อ เป็นต้น ปัญหาการเกาะติดของจุลสาหร่ายทำให้เกิดการบดบังแสงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการเติบโตของจุลสาหร่ายและทำให้ต้องหยุดการเพาะเลี้ยงเป็นครั้งคราวเพื่อนำชีวมวลจุลสาหร่ายออกจากพื้นผิวของผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตชีวมวล รูปที่ 2-12 การเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ก)



(ข)

รูปที่ 2-12 ก) ไบโอฟิล์มจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน ข) ไบโอฟิล์มจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดท่อยาว

[27, 82]

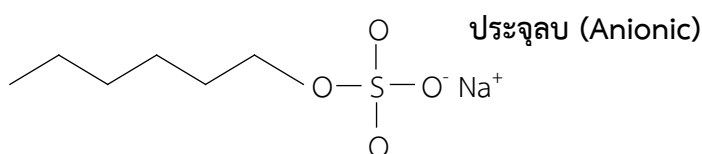
2.5.2 การควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มบนพื้นผิว

การควบคุมไบโอฟิล์มบนพื้นผิวที่ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงคือการป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวของไบโอฟิล์มหรือกำจัดไบโอฟิล์มบนพื้นผิวที่ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง โดยวิธีการที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การใช้เทคนิคเชิงกลทำลายแรงยึดเหนี่ยวโดยใช้แรงขจัดของวัสดุกับผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง [83] การใช้เทคนิคทางเคมีโดยการเติมสารเคมีเพื่อลดความสามารถในการยึดเกาะของไบโอฟิล์ม หรือการปรับสภาวะการให้อากาศและออกแบบระบบเพาะเลี้ยงเพื่อให้เกิดอุทกพลศาสตร์ที่เหมาะสม [84] เทคโนโลยีอัลตราโซนิก [85] เป็นต้น

2.5.2.1 เทคนิคทางเคมีโดยการเติมสารลดแรงตึงผิว

กลไกการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือปรับแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างเซลล์และพื้นผิว รวมทั้งกำจัดสารพอลิเมอร์นอกเซลล์ extracellular polymeric substance (EPS) ที่เซลล์ผลิตขึ้นเพื่อช่วยยึดเกาะระหว่างเซลล์และพื้นผิว [26] สารลดแรงตึงผิวเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่สามารถรวมกับน้ำได้ดี และส่วนหางที่ไม่รวมกับน้ำแต่สามารถละลายในน้ำมันได้ดี สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวโดยส่วนหัวซึ่งเข้ากับน้ำได้ดีจะแสดงประจุและบ่งบอกคุณสมบัติของสารนั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

1) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) สารนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัว และส่วนหัวจะมีประจุเป็นลบ สารจำพวกนี้ถูกนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก แชมพู ครีมอาบน้ำ เพราะมีคุณสมบัติในการทำทำความสะอาดดีมีฟองมากและละลายน้ำได้ดี สารที่ใช้ในกลุ่มนี้ได้แก่ Sodium dodecyl sulphate (SDS) [86] รูปที่ 2-13 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว Sodium dodecyl sulphate ชนิดประจุลบซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{12}H_{25}SO_4Na^+$ โดยที่ส่วนที่ไม่ชอบน้ำคือ $C_{12}H_{25}$ และส่วนที่ชอบน้ำ คือ SO_4^- โดย Sodium dodecyl sulphate มีค่า LD50 977 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยไม่เป็นสารก่อมะเร็ง (เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีดังแสดงในภาคผนวก ก) ตารางที่ 2-3 แสดงสมบัติของ SDS



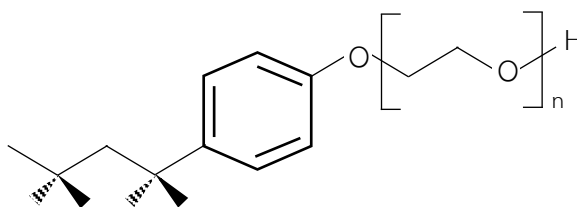
รูปที่ 2-13 Sodium dodecyl sulphate surfactant monomer (SDS)

2) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) สารกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำแล้วส่วนหัวจะมีประจุบวก นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เคลือบผ้าเพื่อให้ความลื่นและป้องกันไฟฟ้าสถิต สารกลุ่มนี้นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการผลิตครีมนวดผม หรือ ปรับผ้านุ่ม เพราะไม่มีฟองและเกาะพื้นผิวได้ดี ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ซึ่งมีโครงสร้างแสดงแสดงในรูปที่ 2-14 ตารางที่ 2-3 แสดงสมบัติของ CTAB (เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีดังแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ 2-14 Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)

3) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) สารกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะไม่แตกตัวจึงไม่มีประจุ คุณสมบัติของสารกลุ่มนี้จะแตกต่างกันไป ตั้งแต่ละลายน้ำได้จนไม่ละลายน้ำ สารที่ไม่ละลายน้ำนิยมใช้เป็นตัวดับฟองและอิมัลซิไฟเออร์ ส่วนสารที่ละลายน้ำมักใช้เป็นสารทำความสะอาด แต่เนื่องจากมีฟองน้อยจึงมักใช้คู่กับ LAS (Linear Alkylbenzene Sulfonic Acid) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว หรือ Anionic Surfactant อื่นๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารนี้ ได้แก่ ผงซักฟอก สารขจัดคราบฝังแน่น ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ได้แก่ Triton X-100 ซึ่งแสดงในรูปที่ 2-15 ตารางที่ 2-3 แสดงสมบัติของ Triton X-100 (เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีดังแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ 2-15 Triton X-100

4) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Zwitterionic surfactant) สารกลุ่มนี้มีทั้งประจุบวกและลบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อละลายน้ำจะแสดงประจุได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม โดยถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรดจะแสดงประจุบวก ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นด่างจะแสดงประจุลบ คุณสมบัติของสารกลุ่มนี้คือ หนน้ำกระด้าง อ่อนละมุนต่อผิวสามารถ มีคุณสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิต และให้ความนุ่มได้ ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ได้แก่ สารกลุ่ม Betaine เช่น Mirataine BETC 30 [86]

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว	มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	ประจุ	ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์
CTAB	364.4	บวก	1.1 มิลลิโมลาร์
SDS	288.3	ลบ	8.2 มิลลิโมลาร์
Triton X-100	628	ไม่มีประจุ	0.5 มิลลิโมลาร์

2.5.2.2 เทคนิคเชิงกล

เทคนิคเชิงกลอาศัยการทำลายแรงยึดเหนี่ยวโดยใช้แรงขจัดของวัสดุกับผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง โดยมีการประยุกต์ใช้วัสดุขจัด เช่น ลูกยางหนาม [87] เทคนิคเชิงกลเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการดำเนินการ แต่อาจก่อให้เกิดความเสียหายของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเนื่องจากการขัดสีเป็นเวลานาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.2.3 หลักการทางอุทกพลศาสตร์

การกำจัดไบโอฟิล์มโดยหลักการทางอุทกพลศาสตร์คือการใช้ความเค้นเฉือน (Shear force) ที่ผนังเพียงพอที่จะทำลายความเสถียรของไบโอฟิล์ม ผลกระทบของแรงเฉือนสามารถทำลายเสถียรภาพของไบโอฟิล์มจุลสาหร่ายขนาดเล็กได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องกำหนดค่าวิกฤตของความเค้นเฉือนซึ่งสามารถป้องกันการก่อตัวของและไบโอ

ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคการกำจัดไบโอฟิล์มแบบต่างๆ

วิธีการ	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด
การเติมสารเคมี	สารลดแรงตึงผิวปรับแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างเซลล์และพื้นผิว รวมทั้งกำจัดพอลิเมอร์นอกเซลล์สารในไบโอฟิล์มที่ช่วยยึดเกาะระหว่างเซลล์และพื้นผิว	1. เกือบเกี่ยวผลผลิตง่าย 2. ระบบเพาะเลี้ยงมีความต่อเนื่อง ไม่ต้องหยุดระบบเพื่อเติมสารเคมี	1. ค่าใช้จ่ายสูงในการซื้อสารเคมี 2. อาจมีสารเคมีตกค้าง
เชิงกล	ใช้ตัวกลางเคลื่อนที่ในน้ำเพื่อสร้างแรงเสียดสีเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจุลสาหร่ายและพื้นผิว	1. ง่ายต่อการดำเนินการ 2. มีประสิทธิภาพสูง	1. เกิดรอยขีดข่วนพื้นผิวถึงปฏิกรณ์ 2. ต้องหยุดระบบเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต 3. ใช้พลังงานสูง
เพิ่มประสิทธิภาพ	การใช้แรงเฉือนของของไหลเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจุลสาหร่ายและพื้นผิว	1. เกือบเกี่ยวผลผลิตง่าย 2. ระบบเพาะเลี้ยงมีความต่อเนื่อง	1. ใช้พลังงานสูง 2. เซลล์ของสาหร่ายได้รับความเสียหายจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น
อุทกพลศาสตร์	ยึดเหนี่ยวระหว่างจุลสาหร่ายและพื้นผิว	เกือบเกี่ยวผลผลิตง่าย	ได้รับความเสียหายจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.6.1 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ของเสียที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มาจากการสะสมของเศษอาหารที่เหลือจากการกินและถูกสัตว์น้ำขับถ่ายออกมาในรูปของยูเรีย ยูเรียจะถูกย่อยสลายต่อไปตามธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยงกลายเป็นสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) ไนโตรท์ (NO_2) และไนเตรท (NO_3) การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดมีการปรับสภาพน้ำในบ่อเลี้ยงเพื่อลดปริมาณของเสียก่อนนำน้ำที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ลดการปล่อยน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในปัจจุบันอาจจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ระบบเปิด (Open System) ระบบกึ่งปิด (Semi Closed Systems) และระบบปิด (Closed System) โดย

ระบบเปิดจะไม่สามารถควบคุมน้ำ สภาพแวดล้อม สัตว์น้ำ หรือพาหะได้ ส่วนระบบปิดเป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำแต่อาจมีการชดเชยน้ำในส่วนที่ระเหยไป

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเนื่องจากน้ำเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ แหล่งของออกซิเจนสำหรับการหายใจ และเป็นที่ยอมรับของเสียจากสัตว์น้ำ ดังนั้นการควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงจึงมีความสำคัญ พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำที่สำคัญต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen) เป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำเนื่องจากมีบทบาทในกระบวนการเมตาบอลิซึมของสัตว์น้ำ แหล่งที่มาของออกซิเจนในแหล่งน้ำมาจากการดูดซับจากอากาศลงน้ำ และจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชและพีชน้ำ

2) อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสัตว์น้ำเนื่องจากสัตว์น้ำเป็นสัตว์เลือดเย็นที่อุณหภูมิของร่างกายจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำ โดยอุณหภูมิในบ่อและในแหล่งน้ำจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับปริมาณแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมินั้นส่งผลต่ออัตราเมตาบอลิซึมและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำก็จะลดลงด้วย

ตารางที่ 2-5 ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	14.62
5	12.77
10	11.29
15	10.08
20	9.09
25	8.26
30	7.56
35	6.95
40	6.41

3) สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมี 3 ชนิด คือ แอมโมเนีย ไนไตรท์ และ ไนเตรท แหล่งของแอมโมเนียในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและการย่อยสลายของเศษอาหารส่วนเกิน

โดยจุลินทรีย์ผ่านปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) แอมโมเนียในน้ำมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ แอมโมเนีย (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ โดยที่แอมโมเนียจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมไอออน [88] เมื่อแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการที่สัตว์น้ำมีจำนวนหนาแน่นจะทำให้การขับถ่ายของสัตว์น้ำลดลง ส่งผลให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือดซึ่งทำให้เลือดมีพีเอชสูงขึ้น รวมถึงลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน การปล่อยน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงจะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง [88] และอาจทำให้เกิดการรวมตัวกับคลอรีนในระบบผลิตน้ำประปาทำให้เกิดสารกลุ่มคลอรามินซึ่งทำให้น้ำประปามีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ และหากมีการสัมผัสโดยมนุษย์ที่ความเข้มข้น 400 พีพีเอ็ม นาน 30-60 นาที อาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเนื้อเยื่อต่างๆ และหากได้รับในปริมาณสูงที่ความเข้มข้น 5,000 - 12,000 พีพีเอ็ม จะส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจหดตัวเกิดภาวะขาดออกซิเจนอย่างเฉียบพลันและทำให้เสียชีวิตได้

4) ไนไตรท์ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ในสภาวะที่มีออกซิเจนจากแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB) หรือบางครั้งอาจเกิดจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์และไนเตรทติดกันในสภาวะขาดออกซิเจน ไนไตรท์เป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยสามารถถูกดูดซึมเข้าทางเหงือกของสัตว์น้ำได้ ไนไตรท์จะออกซิไดซ์กับเหล็กเฟอร์รัส (FeO) ในฮีโมโกลบินกลายเป็นเหล็กในรูปเฟอร์ริก ทำให้เกิดเมธฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งมีความสามารถในการรับออกซิเจนต่ำกว่าฮีโมโกลบินจึงทำให้เลือดมีสีน้ำตาลและการขนส่งออกซิเจนมีประสิทธิภาพลดลง ภาวะดังกล่าวความเข้มข้นของไนไตรท์ว่าโรคเลือดน้ำตาล (Brown blood disease)

5) ไนเตรทในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของแอมโมเนียไปเป็นไนเตรทภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนโดยอาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่ม AOB และ NOB (Nitrite Oxidizing Bacteria) ไนเตรทมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยแต่การสะสมในปริมาณสูง (มากกว่า 50 พีพีเอ็ม) อาจทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำและจุลสาหร่ายในแหล่งน้ำธรรมชาติจนเร่งการเกิดยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ซึ่งส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำลงอย่างเฉียบพลันทำให้น้ำเน่าเสียและมีกลิ่นเหม็น ส่งผลให้สัตว์น้ำไม่สามารถดำรงอยู่ได้ การบริโภคน้ำที่มีไนเตรทปนเปื้อนในทารกอายุน้อยกว่า 6 เดือน ส่งผลทำให้เกิดโรค Blue baby syndrome หรือ Methemoglobinemia ภาวะดังกล่าวทำให้ Hemoglobin ในเลือดเปลี่ยนไปเป็น methemoglobin ซึ่งไม่สามารถจับกับออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ทารกเกิดอาการตัวเขียวเนื่องจากการขาดออกซิเจน

6) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นสารประกอบของกำมะถันซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำค่อนข้างสูง การสะสมไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อหรือในแหล่งน้ำอาจเกิดจากการเน่าสลายของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศหรือการรีดิวซ์ซัลเฟตโดยแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตในสภาวะขาดออกซิเจนโดยที่ระดับพีเอชต่ำยังส่งผลทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย ในมนุษย์หากสัมผัสไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 100 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเนื้อเยื่อต่างๆ หรือถ้าได้รับในปริมาณสูงที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 1,000 ppm จะทำให้หยุดหายใจเฉียบพลันจนเสียชีวิตได้นอกจากนี้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้เกิดฝนกรดและเกิดการกัดกร่อนในท่อระบายน้ำเสีย

7) ความขุ่น (Turbidity) เป็นคุณสมบัติของน้ำในการดูดซับและการกระจายแสง สาเหตุของความขุ่นอาจเกิดจากอนุภาคดินเหนียวสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ขนาดเล็กแพลงก์ตอนหรือจุลินทรีย์ต่างๆที่อาศัยอยู่ในน้ำในน้ำที่มีความขุ่นมากเกินไปอาจทำให้เกิดการอุดตันที่เหงือกของสัตว์น้ำส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของสัตว์น้ำหรืออาจทำให้แสงส่องผ่านลงไปใต้น้ำน้อยลงและยังส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำและแพลงก์ตอนพืชด้วย

8) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเป็นกรดหรือพีเอชเป็นค่า \log ของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายใช้เป็นค่าที่ชี้ถึงสภาวะความเป็นกรดหรือด่างของสารละลายนั้นน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 9 ความแตกต่างของระดับพีเอชในแหล่งน้ำนั้นจะส่งผลโดยตรงถึงปริมาณและชนิดของสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยสัตว์น้ำส่วนใหญ่จะตายที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 4 และสูงเกินกว่า 10 อีกทั้งที่ระดับพีเอชต่ำยังส่งผลให้ซัลไฟด์ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ มากขึ้นซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำสูงส่วนที่ระดับพีเอชสูงแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) มากขึ้นซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำสูงโดยความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ

9) ความกระด้าง (Hardness) ความกระด้างของน้ำเกิดจากน้ำที่มีส่วนผสมของธาตุโลหะที่อยู่ในสภาพ ไอออนที่มีประจุ +2 ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โดยแคลเซียมเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างโครงสร้างและเปลือกของสัตว์น้ำส่วนแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรฟิลล์ธาตุทั้งสองชนิดนี้ก็เป็นอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชและแพลงก์ตอนพืชอีกด้วยซึ่งน้ำที่มีความกระด้างสูงอาจทำให้เกิดตะกอนในระบบหม้อน้ำต่างๆโดยเกณฑ์การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง

10) ความเป็นด่าง (Alkalinity) ความเป็นด่างของน้ำหมายถึงความสามารถในการสะเทินกรดของน้ำความเป็นด่างส่วนใหญ่เกิดจากไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และอาจจะมีคาร์บอเนต (CO_3^{2-})

หรือไฮดรอกไซด์ (OH⁻) รวมอยู่ด้วยโดยน้ำที่มีความเป็นด่างสูงจะมีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงของพีเอชได้ ดีการเพิ่มความเป็นด่างของน้ำสามารถทำได้โดยการเติมวัสดุปูนเช่นหินปูน (CaCO₃) หรือปูนขาว (Ca(OH)₂) เป็นต้นในน้ำที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้ค่าพีเอชในน้ำสูงขึ้นด้วยซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.6.2 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสามารถบรรเทาปัญหาการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นเมื่อทำการเพาะเลี้ยงด้วยระบบดังกล่าวปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำคือคุณภาพน้ำภายในระบบ เนื่องจากไม่มีการถ่ายเทน้ำออกจากระบบเลยทำให้เกิดการสะสมของปริมาณสารอาหารทั้งในส่วนที่เป็นเศษอาหารที่เหลือจากการกิน รวมไปถึงมูลที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำ ซึ่งล้วนเป็นแหล่งอาหารที่ดีของแพลงก์ตอนพืชและสัตว์ รวมไปถึงจุลชีพแต่ละชนิดที่มีอยู่ในน้ำทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของสิ่งมีชีวิตดังกล่าว เกิดการใช้ออกซิเจนในกระบวนการหายใจเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้น้ำในระบบเพาะเลี้ยงขาดออกซิเจน ส่งผลให้สัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงขาดออกซิเจนในการหายใจ ในปัจจุบันระบบหมุนเวียนน้ำของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระดับความหนาแน่นสูงนิยมใช้เทคโนโลยีตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน (Nitrifying biofilter) เพื่อเปลี่ยนสารพิษแอมโมเนียหรือไนเตรทให้เป็นไนเตรทซึ่งมีความเป็นพิษต่ำต่อสัตว์น้ำ ทำให้สามารถลดความถี่ของการเปลี่ยนน้ำลงได้อย่างมีนัยสำคัญ (Nurit, 2013) อย่างไรก็ตามการสะสมของไนเตรทในระบบเพาะเลี้ยงในปริมาณที่สูงกว่า 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร อาจส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดอาการเครียดซึ่งส่งผลต่ออัตราการเติบโต [4] เกษตรกรจึงจำเป็นต้องถ่ายน้ำออกจากระบบเลี้ยงเพื่อลดความเข้มข้นของไนเตรทซึ่งหากไม่ได้รับการบำบัดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำธรรมชาติตามมาและเร่งการเกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชันและทำให้แหล่งน้ำเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว [9, 42] การนำไนเตรทจากน้ำทิ้งไปใช้ประโยชน์ผ่านการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตชีวมวลหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มีมูลค่าสูงยังเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่น่าสนใจ จากการค้นคว้าพบว่าการใช้ไนเตรทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมหรือน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยตรงมีรายงานอย่างแพร่หลาย [10]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การเพาะเลี้ยงถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

จากงานวิจัยในอดีตพบว่า การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายหลายสายพันธุ์ เช่น *Chlorella* *Haematococcus* หรือ *Chaetoceros* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกให้การเติบโต

มากกว่าการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนที่มีปริมาตรเท่ากันและภายใต้สภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกัน โดยคาดว่าเป็นผลจากรูปแบบการไหลของของเหลวซึ่งช่วยให้เซลล์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกได้รับแสงในด้านแนวตั้งอย่างเต็มที่ และมีอัตราการถ่ายเทก๊าซค่อนข้างสูง [17, 21, 22] ในส่วนของจุลสาหร่าย *Chlorococcum* ที่มีขนาดเซลล์ค่อนข้างใหญ่และมีน้ำหนักมากซึ่งอาจทำให้พฤติกรรมการไหลวนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแตกต่างจากจุลสาหร่ายที่ใช้ศึกษาในการวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งมักมีขนาดเซลล์เล็กและมีน้ำหนักเบา โดยมีรายงานวิจัย Wannachod (2018) ทำการเพาะเลี้ยง *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน ปริมาตร 2 ลิตร เพาะเลี้ยงในร่มความเข้มแสง 3,500 ลักซ์ ควบคุมอัตราการไหลอากาศ 0.97 - 2.3 ลิตรต่อนาที ให้น้ำหนักชีวมวลสูงสุด 0.55 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคโรทีนอยด์ 2.43 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นรวมทั้งผลผลิตสูงสุด 0.04 กรัมต่อลิตรต่อวันสำหรับชีวมวล และ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และให้ชีวมวลสูงสุด แคโรทีนอยด์สูงสุดที่ความเข้มแสง 100,000 ลักซ์ และ 2% (v/v) CO₂ น้ำหนักชีวมวลสูงสุด 0.71 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคโรทีนอยด์ 4.19 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร [17] ในขณะที่ Wannasutthiwat (2014) ทำการเพาะเลี้ยง *C. humicola* โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ปริมาตร 4 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่อท่อใน 10 ซม.ต่อ 5 ซม. ความสูงของท่อ/ท่อใน 55 เซนติเมตร/25 เซนติเมตร และ AD/AR เท่ากับ 3.87 เพาะเลี้ยงในร่มความเข้มแสง 5,000 - 100,000 ลักซ์ ควบคุมอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.97-2.3 ลิตรต่อนาที พบว่าให้น้ำหนักชีวมวลสูงสุด 1,008 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคโรทีนอยด์ 5.54 มิลลิกรัมต่อลิตร สูงกว่าการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน

ภูไพรัมย์ (2016) ทำการเพาะเลี้ยง *C. humicola* ในถังแบบอากาศยกขนาด 2 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางถึง 9 เซนติเมตร ความสูงถึง 45 เซนติเมตร ความยาวท่อตราฟ 25 เซนติเมตร AD/AR 3.18 ศึกษาผลของอัตราการไหลที่ 0.1, 0.3, 0.6, 0.8 และ 1.25 วีวีเอ็ม ผลการทดลองพบว่าเมื่อให้อัตราการเติมอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม ให้น้ำหนักแห้ง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแคโรทีนอยด์สูงสุด 7.67 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์เพิ่มสูงขึ้นจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ผลผลิตจะได้น้อยลงซึ่งอาจเนื่องมาจากความเข้มแสงในการทดลองน้อยกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ [23]

นอกจากนี้งานวิจัย Jumraschai (2018) ทำการเพาะเลี้ยง *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ปริมาตร 2 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่อท่อในเท่ากับ 9 เซนติเมตร/4.5 เซนติเมตร บรรจุของเหลวที่ระดับความสูง 34 เซนติเมตร ให้แสงสีขาวอมฟ้าที่ความเข้มแสง 67.03 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที AD/AR เท่ากับ 3 และมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.8 วีวีเอ็ม (1.6 ลิตรต่อนาที) ให้น้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ $1,360 \pm 16.7$ มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์สูงสุดเท่ากับ 6.45 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร (4.78 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง) และขยายขนาดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกขนาด

60 ลิตร และดำเนินการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 25,000 ลักซ์ พบว่าสามารถเพาะเลี้ยง จุลสาหร่ายให้เติบโตและผลิตแคโรทีนอยด์ได้ดี โดยให้น้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ $1,240 \pm 10.0$ มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์เท่ากับ 4.40 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร (3.52 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง) [27]

2.7.2 การควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มบนพื้นผิว

ปัญหาการเกาะติดของจุลสาหร่ายทำให้เกิดการบดบังแสงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการเติบโตของจุลสาหร่าย และทำให้ต้องหยุดการเพาะเลี้ยงเป็นครั้งคราวเพื่อนำชีวมวลจุลสาหร่ายออกจากพื้นผิวของผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตชีวมวล จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาถึงแนวทางการเกาะติดของชีวมวลจุลสาหร่าย *Chlorococcum* บนพื้นผิวของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง จากการค้นคว้าพบว่าการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงหรือใช้การเคลือบผิวด้วยสารเคมี วิธีการดังกล่าวแม้ว่าสามารถลดการเกาะติดได้แต่มีข้อจำกัด เช่น การขยายขนาดระบบทำได้ยาก มีความเสี่ยงต่อการแตกของเซลล์ และค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง [25] อีกหนึ่งแนวทางซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้คือการเติมสารลดแรงตึงผิวในอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่าย [26] อย่างไรก็ตามยังขาดผลการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานสารลดแรงตึงผิวในระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* โดยสารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการใช้กำจัดไบโอฟิล์มแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งใช้สารลดแรงตึงผิวในการใช้กำจัดไบโอฟิล์มแบคทีเรีย *Simões* (2005) ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB และ SDS เพื่อลดการก่อตัวของไบโอฟิล์ม *Pseudomonas fluorescens* พบว่า CTAB เท่านั้นที่ทำให้เกิดการยับยั้งแบคทีเรียทั้งหมดโดยมีผลทำให้เซลล์แตกเนื่องจากการทำลายผนังเซลล์ของ *Pseudomonas fluorescens* โดยพบว่า SDS สามารถลดการก่อตัวของไบโอฟิล์ม *Pseudomonas fluorescens* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [89]

นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้วิธีเชิงกลโดย Nawar และคณะ [87] ศึกษาวิธีการลดไบโอฟิล์มจุลสาหร่ายด้วยวิธีเชิงกลโดยใช้ลูกบอลแหลม (Spike ball) โดยสายพันธุ์จุลสาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา คือ *Chlorella vulgaris* ซึ่งเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดท่อยาวปริมาตร 480 ลิตร ผลการศึกษาพบว่าลูกบอลแหลมช่วยทำให้น้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเกิดความปั่นป่วนซึ่งลดการจมตัวของจุลสาหร่าย ท่อยาวบางส่วนถูกนำออกเพื่อวิเคราะห์ลักษณะไบโอฟิล์มที่เกาะอยู่บนท่อแก้ว ไบโอฟิล์มที่มองเห็นได้ชัดเจนจากการส่องผ่านแสงเกิดขึ้นภายใน 15 - 20 วัน การกำจัดไบโอฟิล์มเริ่ม

พื้นที่หลังจากใส่ลูกบอลแหลมซึ่งมีตะกอนลดลงอย่างเห็นได้ชัดใน 3 วัน นอกจากนี้เมื่อนับจำนวนเซลล์จุลสาหร่ายพบการเพิ่มจำนวนเซลล์ (6.95×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร) เนื่องจากประสิทธิภาพการควบคุมไบโอฟิล์มที่ดีขึ้น การใช้ลูกบอลแหลมเป็นวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดในการกำจัดไบโอฟิล์ม และมีรายงานวิจัย Deng และคณะ (2016) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการดัดแปลงตัวกลางพลาสติกด้วยฟองน้ำในระบบไฮบริดระหว่างระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเคลื่อนที่ MBBR (S-MBBR) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าการดัดแปลงตัวกลางพลาสติกด้วยฟองน้ำในระบบไฮบริด S-MBBR-MBR ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูง และวัสดุฟองน้ำดัดแปลงแขวนลอยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และสารอาหารโดยรวมและสามารถช่วยยืดระยะเวลาในการเดินระบบของระบบไฮบริด เนื่องจากวัสดุฟองน้ำแขวนลอยช่วยการลดการอุดตันระหว่างเดินระบบ [90]

อีกทั้งยังมีรายงานการกำจัดไบโอฟิล์มโดยมีโดยใช้อุทกพลศาสตร์สำหรับระบบปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงซึ่งทำจากวัสดุแก้วและอะคริลิก เต็มอากาศโดยลมจากคอมเพรสเซอร์ ควบคุมความเข้มแสงที่ 100 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที การเพาะเลี้ยง *Chlorella vulgaris* ที่ 7 - 10 วัน จนเกิดการสร้างไบโอฟิล์มและหยุดการเพาะเลี้ยงเมื่อไบโอฟิล์มพัฒนาเต็มพื้นที่บนผนังท่อ เริ่มการกำจัดไบโอฟิล์มโดยตั้งค่าอัตราการไหลของน้ำโดยใช้ชุดวาล์วควบคุม 1.4 - 33.6 ลิตรต่อวินาที สำหรับหลอดแก้ว และ 18.6 - 63.0 ลิตรต่อวินาที สำหรับหลอดอะคริลิก พบว่าไบโอฟิล์มถูกกำจัดอย่างสมบูรณ์ในท่อแก้วเมื่อน้ำมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 1.77 เมตรต่อวินาที และมีความเค้นเฉือน 9 ปาสคาล ในท่ออะคริลิกพบว่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่กำจัดไบโอฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์คือ 2.27 เมตรต่อวินาที และความเค้นเฉือน 14 ปาสคาล จากผลการทดลองพบว่าการกำจัดฟิล์มชีวภาพทำได้โดยกำหนดค่าของความเค้นเฉือนผนังให้เหมาะสมและเพื่อให้การทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาขนาดเล็ก และค่าของความเค้นเฉือนของผนังที่วัดได้สามารถนำมาปรับใช้เพื่อขยายขนาดเพิ่มเติมได้ [91] นอกจากนี้ Belohlav และคณะ (2020) [82] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุทกพลศาสตร์และการกำจัดไบโอฟิล์มโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบท่อยาวปริมาตร 100 ลิตร ซึ่งสร้างอะคริลิกและถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบแผ่นแบน ปริมาตร 75 ลิตร ซึ่งสร้างจากวัสดุโพลีเมทิลเมทาคริลิต เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* การกำจัดไบโอฟิล์มโดยตั้งค่าความเค้นเฉือนที่ผนังเพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะอุทกพลศาสตร์ต่อการลดไบโอฟิล์มที่ก่อตัวขึ้น ผลการศึกษาพบว่าจุลสาหร่าย *C. vulgaris* ซึ่งเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแผ่นแบนมีค่าวิกฤตของความเค้นเฉือนที่ผนัง 0.2 ปาสคาล ส่วนในระบบท่อทดลองอย่างง่ายที่มีการไหลแบบหนึ่งมิติ การอธิบายพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์ทำได้ง่ายกว่าและกำหนด

พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการก่อตัวของฟิล์มชีวภาพได้แม่นยำกว่า การทดลองในระบบท่อแบบง่ายนี้ มุ่งเน้นไปที่การกำจัดไบโอฟิล์มที่ก่อตัวขึ้นแล้ว โดยไบโอฟิล์มก่อตัวขึ้นบนผนังโพร่งใสอย่างสมบูรณ์ และออกจากพื้นผิวเมื่อความเค้นเฉือนที่ผนังเท่ากับ 53 ปาสคาล ดังนั้นจากผลการทดลองสรุปได้ว่า ผลลัพธ์ของความเค้นเฉือนวิกฤติสามารถใช้เพื่อเลือกสภาวะการทำงานของระบบการเพาะเลี้ยงหรือ เพื่อปรับปรุงทรงเรขาคณิตที่มีผลต่อสภาพอุทกพลศาสตร์

2.7.3 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

การเพาะเลี้ยงระดับความหนาแน่นสูงนิยมใช้เทคโนโลยีตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนสารพิษแอมโมเนียและไนโตรทให้เป็นไนเตรทซึ่งมีความเป็นพิษต่ำต่อสัตว์น้ำ [3] อย่างไรก็ตาม การสะสมของไนเตรทในระบบเพาะเลี้ยงในปริมาณที่สูงเกินไป อาจส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดอาการเครียด ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโต [4] จึงจำเป็นต้องถ่ายน้ำออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ บางส่วนเพื่อลดความเข้มข้นของไนเตรท การนำไนเตรทและฟอสเฟตจากน้ำทิ้งไปใช้ประโยชน์ผ่านการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตชีวมวลหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มีมูลค่าสูงยังเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่น่าสนใจ แต่ยังคงขาดข้อมูลเกี่ยวกับการนำน้ำที่มีไนเตรท และฟอสเฟตที่ได้จากการบำบัดด้วยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันมาศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายทั้งในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ จากการค้นคว้าพบว่าการใช้ไนเตรทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมหรือน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยตรงมีรายงานอย่างแพร่หลาย ดังนี้ Sri-uam (2014) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการเพาะเลี้ยงปลาไนล (*Oreochromis niloticus*) โดยทำการทดลองเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorella* sp. แพลงก์ตอนสัตว์ (*Moina macrocopa*) และพืชน้ำ ร่วมกับการเลี้ยงปลาไนลที่ความหนาแน่น 20, 25 และ 50 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร ที่สภาวะกลางแจ้งในระบบ Integrated Multi-Trophic Recirculating Aquaculture System (IMRAS) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สามารถควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนโตรท ไนเตรท และฟอสเฟต ในระบบให้ต่ำกว่าระดับที่เป็นอันตรายต่อการเพาะเลี้ยงปลาไนลตลอดช่วงเวลาการเพาะเลี้ยงได้ โดยให้อัตราการผลิตปลาไนลสูงสุดที่ 11 ± 1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับความหนาแน่นปลาไนลเริ่มต้น 50 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร พืชน้ำสามารถดูดซึมปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 9.52 และ 11.4 โดยให้อัตราการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีความแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ สาหร่ายพวงชะโด เทปตรง เทปเกลียว และ ดาวกระจาย ตามลำดับ ไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในระบบประมาณร้อยละ 39.67 ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจนผ่าน

กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ในส่วนของฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ที่ประมาณร้อยละ 54.46 ซึ่งตกตะกอนลงสู่ดินกันถึงบำบัด [92]

Sucunthowong (2019) ศึกษาการใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไนเตรทจากระบบเพาะเลี้ยงปลาไนล์เพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Scenedesmus armatus* โดยใช้ไนล์เสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลาไนล์แบบหมุนเวียนที่มีไนเตรทสูง โดยเปรียบเทียบกับ การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *S. armatus* ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองให้ผลการผลิตชีวมวลและปริมาณรงควัตถุในเซลล์ *S. armatus* แตกต่างในกรณีใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บไว้จากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ไนล์เสียที่มีไนเตรทสูงจากระบบเพาะเลี้ยงปลาไนล์ด้วยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันมาใช้ประโยชน์ได้ และสามารถทดแทนอาหาร BG-11 ที่มีราคาสูงกว่า ผลการประเมินสมดุลมวลคาร์บอนและไนโตรเจนจากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายพบว่าประมาณร้อยละ 3 - 12 ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่ระบบ และร้อยละ 33 ถึง 85 ของไนเตรทในน้ำเสียถูกเปลี่ยนไปเป็นชีวมวลจุลสาหร่าย ทั้งนี้ขึ้นระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ผลการทดลองที่ได้รับแสดงให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสามารถใช้ของเสียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ [93]

Karlsson (2022) ศึกษาการใช้จุลสาหร่ายขนาดเล็ก 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Chlorella vulgaris*, *Nitzschia pusilla*, *Staurastrum monticulosum* และ *Scenedesmus* sp. เพื่อบำบัดธาตุอาหารส่วนเกินในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงปลาแบบปิด และศึกษาความสามารถของจุลสาหร่ายในการเจริญเติบโต ผลผลิตชีวมวล และการกำจัดธาตุอาหาร ทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่าจุลสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียสูงที่สุด โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียได้ 96% จุลสาหร่าย *C. vulgaris* มีอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดที่ร้อยละ 88 จุลสาหร่าย *C. vulgaris* และ จุลสาหร่าย *N. pusilla* ให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุด 0.28 กรัมต่อลิตร และ 0.17 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการวิจัยบ่งชี้ว่าการใช้จุลสาหร่ายมีศักยภาพในการบำบัดสารอาหารจากน้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ [94]

Tejido-Nuñez (2022) ศึกษาการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายขนาดเล็ก 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Chlorella vulgaris* และ *Tetradesmus obliquus* โดยใช้ไนล์จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดระยะเวลาเพาะเลี้ยง 29 วันพบว่าจุลสาหร่าย *C. vulgaris* ให้น้ำหนักแห้ง 4.43 กรัมต่อลิตร และจุลสาหร่าย *T. obliquus* ให้น้ำหนักแห้ง 6.71 กรัมต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. vulgaris* โดยใช้ไนล์จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตโดยเฉลี่ยเท่ากับ 99.7% และ 99.7% ตามลำดับ และเมื่อใช้ไนล์จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่

ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคประสิทธิภาพการบำบัดในเตรทโดยเฉลี่ยเท่ากับ 78.7% และ 97.0% ตามลำดับ เมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *T. obliquus* โดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคให้ประสิทธิภาพการบำบัดในเตรทและฟอสเฟตโดยเฉลี่ยเท่ากับ 69.3% และ 99.7% ตามลำดับ และเมื่อใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคประสิทธิภาพการบำบัดในเตรทโดยเฉลี่ยเท่ากับ 80.6% และ 99.7%ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดในเตรทและฟอสเฟตของจุลสาหร่ายแต่ละชนิดขึ้นกับการเตรียมน้ำขั้นต้นโดยจุลสาหร่าย *C. vulgaris* จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าเมื่อน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ ในขณะที่จุลสาหร่าย *T. obliquus* จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าเมื่อน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ [95]



ตารางที่ 2-6 การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

การทดลอง	ชนิดสาหร่าย	ปริมาตร (ลิตร)	ผลผลิตชีวมวล จุลสาหร่าย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				อ้างอิง
				NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	COD	
Nasir et al. (2015)	<i>Chlorella</i> sp.	2	-	-	-	63.1	-	[12]
Gao et al. (2016)	<i>C. vulgaris</i>	4	42.6	-	-	82.7	-	[11]
Marinho-Soriano et al. (2019)	<i>G. birdiae</i>	0.1	-	34	100	93.5	-	[96]
Guo et al. (2013)	<i>P. subcordiformis</i>	0.3	-	-	98	95	-	[97]
Ansari et al. (2017)	<i>A. falcatus</i>	0.5	160.79	86.45	80.85	98.52	61	[98]
Ansari et al. (2017)	<i>C. sorokiniana</i>	0.5	107.85	98.21	75.76	~100	69	[98]
Ansari et al. (2017)	<i>S. obliquus</i>	0.5	89.61	88.7	77.7	~100	-	[98]
Kuo et al. (2016)	<i>Chlorella</i> sp.	1	129.6	77	83	99	80	[99]
Cardoso et al. (2023)	<i>Spirulina</i> sp.	1	20 ± 0.05	-	81.10	99.97	89.34	[100]
Sucunthowong et al. (2019)	<i>S. armatus</i>	2	110	-	33-85	-	-	[93]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์หัวเชื้อจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* (TISTR 8461) และสถานที่ปฏิบัติการจากห้องปฏิบัติการของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 การเพาะเชื้อจุลสาหร่าย

ผสมหัวเชื้อจุลสาหร่ายปริมาตร 5 มิลลิลิตร และอาหารเลี้ยงเชื้อ BG-11 (ตารางที่ 3-1) ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดปากขวดด้วยจุกสำลีเพื่อป้องกันการสัมผัสกับสภาวะภายนอก เพาะเลี้ยงด้วยแสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ (86.17 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถ่ายเชื้อทุกสัปดาห์เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอในการทดลอง

ตารางที่ 3-1 ส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11

ส่วนประกอบ	กรัมต่อลิตร
NaNO ₃	1.500
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	0.040
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.075
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.036
Na ₂ CO ₃	0.020
Citric acid	0.006
Ferric ammonium citrate	0.006
EDTA	0.001
Trace metal mix A5	1 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3-1 ส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11ต่อ

ส่วนประกอบ	กรัม/ลิตร
Trace metal mix A5	1 มิลลิกรัม
H ₃ BO ₃	2.860
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.810
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.390
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.222
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.079
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.050

[101]

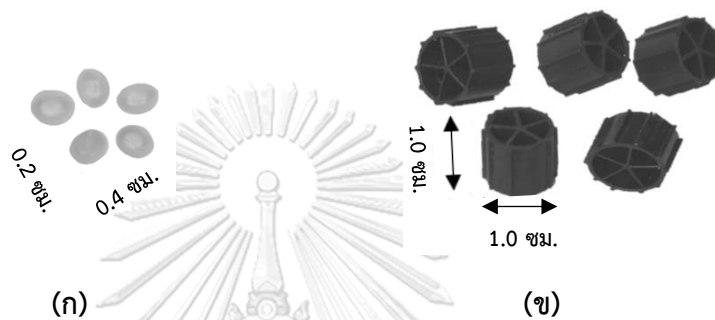
3.2 การลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

3.2.1 การใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกเพื่อลดการเกาะติดของจุลสาหร่าย

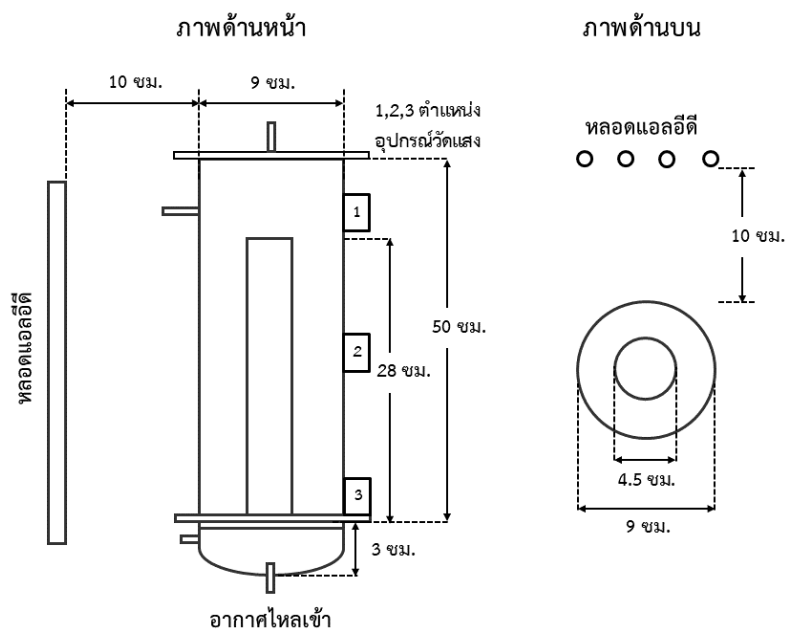
3.2.1.1 ปริมาณวัสดุแขวนลอยพลาสติกและประสิทธิภาพการไหลวนที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

ปริมาณวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงมีผลต่อปริมาณแสงที่สามารถส่องผ่านไปสู่อุณหภูมิของจุลสาหร่าย การทดลองส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณของวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่ควรใส่ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และทดสอบความสามารถในการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องเติมโตของจุลสาหร่าย การทดลองนี้เลือกใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก 2 ชนิด ที่ทำได้ง่ายตามท้องตลาด ได้แก่ MB5 และ Bead (รูปที่ 3-1) ซึ่งมีสมบัติแสดงในตารางที่ 3-2 ทำการทดลองโดยเติมน้ำปริมาตร 2 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก (รูปที่ 3-2) เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจนมีปริมาตร 1%, 5%, 10%, 15% และ 20% ของปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในช่วง 0.6 ถึง 1.0 วีวีเอ็ม (72 ถึง 120 ลิตรต่อชั่วโมง) ติดตั้งเครื่องวัดแสงที่บริเวณด้านหน้าของคอลัมน์ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและบริเวณด้านหลัง (ทิศตรงข้ามหลอดไฟแอลอีดี) ที่ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของคอลัมน์ (รูปที่ 3-2) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเข้มแสงขาเข้าและขาออก หากมีความแตกต่างมากแสดงให้เห็นว่าแสงสามารถส่องผ่านได้น้อย โดยวัดความเข้มแสงทุก 30 วินาที เป็นเวลา 5 นาที ในแต่ละปริมาตรของวัสดุแขวนลอยพลาสติกจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และตรวจวัดเวลาไหลวน (Circulation time, t_c) ซึ่งนิยามว่าเป็นเวลาที่วัสดุแขวนลอยพลาสติก

เคลื่อนที่ผ่านส่วนของเหลวไหลขึ้น (Riser) และผ่านส่วนของเหลวไหลลง (Downcomer) กลับมาที่จุดเริ่มต้นอีกครั้ง ทำการตรวจวัดเวลาไหลวนและสังเกตลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ในการทดลองนี้จะทำวัสดุแขวนลอยพลาสติก 1 ชั้น เพื่อเป็นตัวแทนและง่ายต่อการสังเกต ทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ในแต่ละคู่ของชนิดวัสดุแขวนลอยพลาสติกและอัตราการไหลของอากาศ โดยพิจารณาระยะเวลาการไหลวนและรูปแบบในการเคลื่อนที่ หากใช้เวลานานแสดงว่าการไหลวนเคลื่อนที่ของวัสดุแขวนลอยพลาสติกเป็นไปได้ยาก



รูปที่ 3-1 วัสดุแขวนลอยพลาสติก (ก) Bead (ข) MB5



รูปที่ 3-2 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร

ตารางที่ 3-2 สมบัติของวัสดุแขวนลอยพลาสติก

คุณสมบัติ	วัสดุแขวนลอยพลาสติก	
	MB5	Bead
วัสดุ	HDPE	HDPE
ขนาด กว้าง x ยาว (เซนติเมตร)	1.0 x 1.0	0.2 x 0.4
ความถ่วงจำเพาะ	0.95	0.95
พื้นที่ผิวจำเพาะ ¹	859	642

(ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)

¹ www.siamcarpshop.com

3.2.1.2 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายร่วมกับการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกร่วมกับการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกเพื่อลดการเกาะติดบนผนัง เตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อปริมาตร 0.2 ลิตร และอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ปริมาตร 1.8 ลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกตามผลการทดลองที่ 3.2.1.1 ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* แบบกะเป็นเวลา 15 วัน ให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ (87.17 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที) ตลอด 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดควบคุมซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอย ขณะที่ชุดทดลองได้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยเติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยและปรับอัตราการไหลของอากาศโดยอ้างอิงจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.1.1 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ในชุดควบคุมและชุดทดลอง ระหว่างการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงทุกวันเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักรเซลล์แห้ง นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะชุดจุลสาหร่ายที่ติดอยู่บนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงออกให้มากที่สุด และเป่าอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอีกประมาณ 15 นาที เพื่อผสมชีวมวลจุลสาหร่ายและของเหลวให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักรเซลล์แห้ง

3.2.2 การใช้สารลดแรงตึงผิว

3.2.2.1 ชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เดิมอากาศร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เริ่มต้นการทดลองโดยเตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อจุลสาหร่ายปริมาตร 100 มิลลิลิตร และอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ปริมาตร 899 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ พร้อมกับเติมสารลดแรงตึงผิวปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เดิมอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 6.2 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคอลัมน์ 7.0 เซนติเมตร และความสูงคอลัมน์ 46 เซนติเมตร จนได้ปริมาตรของเหลวทั้งหมด 1,000 มิลลิลิตร การทดลองนี้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ 1) Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) 2) Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) 3) Triton X-100 (ตารางที่ 3-3) โดยทดสอบผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายที่ความเข้มข้นในช่วง 1% ถึง 50% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration) หมายถึงความเข้มข้นที่สารลดแรงตึงผิวเริ่มจับกันเป็นไมเซลล์ ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวขึ้นกับการรวมตัวของโมเลกุลเพนไมเซลล์ (micelle) ในสารละลาย ซึ่งรูปร่างจะเป็นทรงกลมเหมือนลูกบอล โดยโมเลกุลจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มโดยหันส่วนที่มีขั้วออกมาด้านนอกและด้านในเป็นสวนที่ไม่มีขั้ว) ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* แบบกะเป็นเวลา 9 วัน โดยให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วีวีเอ็ม การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดควบคุมซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว ขณะที่ชุดทดลองได้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยเติมสารลดแรงตึงผิว ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง ระหว่างการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำ 1 มิลลิลิตร จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เดิมอากาศทุกวันเพื่อนำมาตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร โดยพิจารณาเลือกชุดทดลองที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงเทียบเคียงกับชุดควบคุม

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว

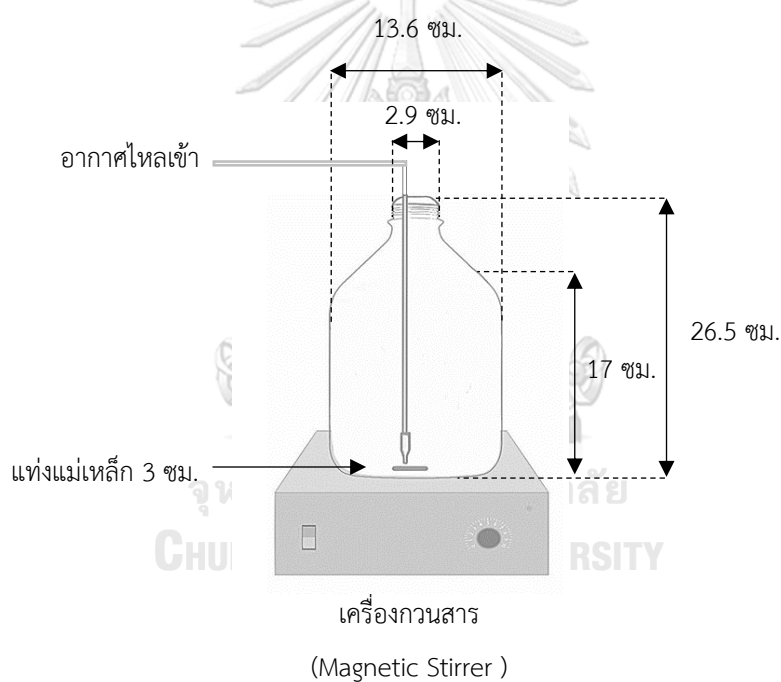
สารลดแรงตึงผิว	มวล โมเลกุล (กรัม/โมล)	ประจุ	ความเข้มข้นวิกฤต ของการเกิดไมเซลล์
Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide	364.4	บวก	1.1 มิลลิโมลลาร์
Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)	288.3	ลบ	8.2 มิลลิโมลลาร์
Triton X-100	628	ไม่มีประจุ	0.5 มิลลิโมลลาร์

3.2.2.2 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิว

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยก ซึ่งทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ อะคริลิก และแก้ว การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดควบคุมซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว ขณะที่ชุดทดลองได้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยเติมสารลดแรงตึงผิว (ตารางที่ 3-4) เตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อปริมาตร 200 มิลลิลิตร และอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ปริมาตร 1,798 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ เติมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวอ้างอิงจากผลการทดลองหัวข้อ 3.2.2.1 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงทั้งสองประเภท ให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายจนเข้าสู่ระยะคงตัว จากนั้นเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายที่ผสมในอาหารเหลวออกครึ่งหนึ่ง (1 ลิตร) ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และเติมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11ที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวจนมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้น (2 ลิตร) จากนั้นเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็นเวลา 2 วัน และทำการเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายที่ผสมในอาหารเหลวออกครึ่งหนึ่งของปริมาตรถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และเติมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11ที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จนมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้นอีกครั้ง ดำเนินการเพาะเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นของจุลสาหร่ายลดลงอย่างมาก ระหว่างการทดลองจะเก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร ทุกวันเพื่อนำมาวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ในชุดควบคุมและชุดทดลอง นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะชุดจุลสาหร่ายที่ติดอยู่บนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงออกให้มากที่สุด และเป่าอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอีกประมาณ 15 นาที เพื่อผสมชีวมวลจุลสาหร่ายและของเหลวให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง

ตารางที่ 3-4 แสดงสถานะที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในแต่ละชุดการทดลอง

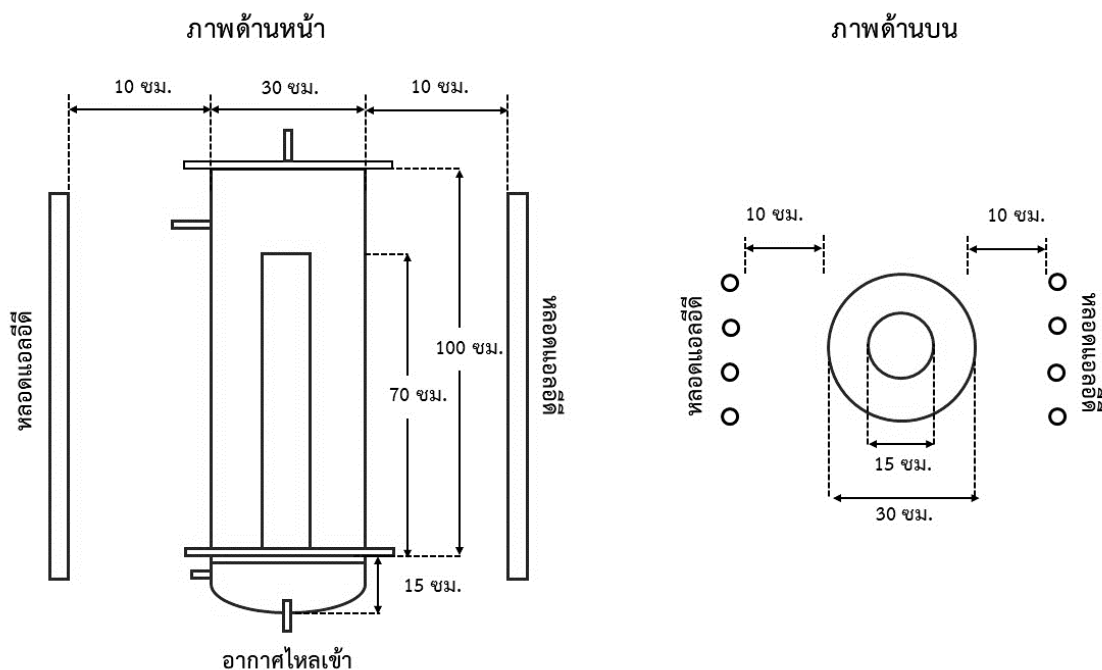
ชุดทดลอง	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง	วัสดุ	การเติมสารลดแรงตึงผิว
T1	ถังกวน	อะคริลิกใส	ไม่มีเติม
T2	อากาศยก	อะคริลิกใส	ไม่มีเติม
T3	ถังกวน	อะคริลิกใส	เติม
T4	อากาศยก	อะคริลิกใส	เติม
T5	ถังกวน	แก้ว	ไม่มีเติม
T6	อากาศยก	แก้ว	ไม่มีเติม
T7	ถังกวน	แก้ว	เติม
T8	อากาศยก	แก้ว	เติม



รูปที่ 3-3 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนขนาด 2 ลิตร

3.2.3 เปรียบเทียบการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกและสารลดแรงตึงผิว

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร เพื่อเปรียบเทียบการลดการเกาะติดบนผนังของจุลสาหร่ายโดยใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกและสารลดแรงตึงผิว โดยเลือกจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 เตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อปริมาตร 0.2 ลิตร และอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ปริมาตร 1.8 ลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และผสมหัวเชื้อปริมาตร 6 ลิตร และอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ปริมาตร 54 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร ตามการออกแบบ Jumraschai (2018) (รูปที่ 3-4) ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* แบบกะเป็นเวลา 15 วัน ให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ 2 ด้าน ตรงข้ามกัน ตลอด 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดควบคุมซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยและสารลดแรงตึงผิว ขณะที่ชุดทดลองได้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยเติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยและสารลดแรงตึงผิว ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.3 วีวีเอ็ม ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ในชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร ทุกวันจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเพื่อวิเคราะห์หน้าหนักเซลล์แห้ง นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะชุดจุลสาหร่ายที่ติดอยู่บนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงออกให้มากที่สุด และเป่าอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอีกประมาณ 15 นาที เพื่อผสมชีวมวลจุลสาหร่ายและของเหลวให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์หน้าหนักเซลล์แห้ง และกรณีที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก



รูปที่ 3-4 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร

[27]

3.3 ความเป็นไปได้ของการใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

C. humicola

3.3.1 การเตรียมน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกร่วมกับการลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.2 เตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อปริมาตร 0.2 ลิตร โดยน้ำจากระบบตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันสำหรับเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นแหล่งสารอาหารเพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยตรวจวัดสมบัติของน้ำดังตารางที่ 3-5 จากนั้นทำการปรับสภาพน้ำโดยเก็บในที่มืดและมีการเติมอากาศตลอดเวลาเป็นเวลาประมาณ 1 เดือน ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง โดยเติมปริมาตร 1.8 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* แบบกะเป็นเวลา 15 วัน ให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดควบคุม โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำข้างต้นที่ไม่ผ่านการเตรียมน้ำขั้นต้น และชุดทดลองซึ่ง

นำน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำข้างต้น ผ่านวิธีการเตรียมน้ำขึ้นต้น (ตารางที่ 3-6) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วีวีเอ็ม ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ในชุดควบคุมและชุดทดลอง ระหว่างการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร ทุกวันจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ความเข้มข้นของไนโตรเจน ความเข้มข้นของไนเตรท และความเข้มข้นของฟอสเฟต

ตารางที่ 3-5 สมบัติของน้ำจากตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น	หน่วย
ไนเตรท	72.5 ± 6.42	มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร
ไนไตรท์	0.035 ± 0.001	มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร
แอมโมเนียรวม	0.068 ± 0.001	มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร
ฟอสเฟต	3.67 ± 0.11	มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย	10.6 ± 2.51	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี	54.3 ± 8.61	มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3-6 วิธีการเตรียมน้ำขึ้นต้นในแต่ละชุดการทดลอง

ชุดทดลอง	วิธีการเตรียมน้ำขึ้นต้น
ชุดควบคุม	ไม่มีการกรอง
F1	กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C)
F2	กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C) และผ่านเครื่องนึ่งแรงดันไอน้ำ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
F3	กรองน้ำด้วยผ้ากรองไนลอนที่มีขนาดรู 20 ไมโครเมตร

3.3.2 การปรับปรุงธาตุอาหารของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกร่วมกับการลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.2 เตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อปริมาตร 0.2 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาตร 1.8 ลิตร ที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการจากหัวข้อ 3.2.1 คุณสมบัติ

ของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำดังตาราง 3-5 เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* แบบกะเป็น เวลา 15 วัน ให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดทดลองได้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยใช้แหล่งอาหารแตกต่างกัน 4 ชุดทดลอง (ตารางที่ 3-7) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ระหว่างการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร ทุกวันจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเพื่อวิเคราะห์น้ำหนัก เซลล์แห้ง ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ความเข้มข้นของไนโตรเจน ความเข้มข้นของไนเตรท และความเข้มข้นของฟอสเฟต

ตารางที่ 3-7 อาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ชุดทดลอง	แหล่งอาหารและการปรับธาตุอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย
ชุดควบคุม	อาหารสูตร BG-11
W1	น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่มีการปรับปรุงธาตุอาหาร
W2	น้ำระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ปรับธาตุอาหารโดยเติมไนเตรทและฟอสเฟต ลงไปให้เทียบเท่าปริมาณในอาหารสูตร BG-11
W3	อาหารสูตร BG-11 ที่ปรับความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตให้ เท่ากับความเข้มข้นของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

3.3.3 ประสิทธิภาพเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิด อากาศยกร่วมกับการลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.2 เตรียมหัวเชื้อ จุลสาหร่าย *C. humicola* ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นผสมหัวเชื้อปริมาตร 6 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาตร 54 ลิตร ที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการจากหัวข้อ 3.2.1 เพาะเลี้ยง จุลสาหร่าย *C. humicola* ให้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ 2 ด้าน ตลอด 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส การทดลองนี้ประกอบด้วยชุดควบคุมที่เพาะเลี้ยง จุลสาหร่ายโดยใช้อาหารสูตร BG-11 ขณะที่ชุดทดลองได้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยใช้แหล่งอาหารจาก ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายจนเข้าสู่ระยะคงตัว จากนั้นเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายที่ผสม ในอาหารเหลวออกครึ่งหนึ่ง (30 ลิตร) ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และเติมอาหาร เลี้ยงเชื้อสูตร BG-11ที่ไม่มีเซลล์จุลสาหร่ายและสารลดแรงตึงผิวจนมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้น

(60 ลิตร) จากนั้นเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็นเวลา 2 วัน และทำการเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายที่ผสมในอาหารเหลวออกครึ่งหนึ่งของปริมาตรถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และเติมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11ที่ไม่มีเซลล์จุลสาหร่ายและสารลดแรงตึงผิว จนมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้นอีกครั้ง ดำเนินการเพาะเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นของจุลสาหร่ายลดลงอย่างมาก ระหว่างการทดลองจะเก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร ทุกวันเพื่อนำมาวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง และเปรียบเทียบผลผลิตชีวภาพและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ในชุดควบคุมและชุดทดลอง นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะชุดจุลสาหร่ายที่ติดอยู่บนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงออกให้มากที่สุด และเป่าอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอีกประมาณ 15 นาที เพื่อผสมชีวมวลจุลสาหร่ายและของเหลวให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ ปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (C H N S) องค์ประกอบกรดไขมัน องค์ประกอบกรดอะมิโนในองค์ประกอบของเซลล์จุลสาหร่าย ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ความเข้มข้นของไนโตรท์ ความเข้มข้นของไนเตรท และความเข้มข้นของฟอสเฟตในอาหารเหลว เพื่อคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดความเข้มข้นของไนเตรท และความเข้มข้นของฟอสเฟต อีกทั้งคำนวณผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายทั้งหมดที่ได้จากระบบเพื่อจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบ

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.1 ความเข้มข้นแอมโมเนีย

การวิเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนียจะใช้วิธี Salicylate-Hypochlorite method ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Bower and Holm-Hansen [102] โดยทำการกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเติมสารละลายซาลิไซเลตคตะลิสต์ 0.6 มิลลิลิตร และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรด์ 1.0 มิลลิลิตร ทำให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการ Vortex ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ถึง 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร คำนวณผลที่ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน (หากไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส)

3.4.2 ความเข้มข้นไนโตรท์

การวิเคราะห์ความเข้มข้นไนโตรท์จะใช้วิธี Colorimetric method ซึ่งดัดแปลงจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland and Parsons [103] ทำการกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C ปิเปตตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมซัลฟานิลลาไมด์ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่า

และตั้งทิ้งไว้ 2 ถึง 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที แต่ไม่เกิน 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร คำนวณผลที่ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน (หากไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันทีได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส)

3.4.3 ความเข้มข้นไนเตรท

การวิเคราะห์ความเข้มข้นไนเตรทจะใช้วิธี UV Screening method ซึ่งดัดแปลงจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก APHA (1998) [104] ทำการกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันทีที่กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไปสำหรับการวิเคราะห์แบบดังกล่าวทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออนที่การดูดกลืนแสง ไม่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรทในตัวอย่างน้ำโดยค่าที่คำนวณได้จะต้องทำการหักลบกับปริมาณไนเตรทที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากตามวิธีวิเคราะห์ที่ 3.5.2 จะมีปริมาณไนเตรทรวมอยู่ด้วยเปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเตรทมาตรฐาน (หากไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันทีได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส)

3.4.4 ความเข้มข้นฟอสเฟต

การวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตจะใช้วิธี Ascorbic acid method ซึ่งดัดแปลงจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก APHA (1998) [104] ทำการกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันทีโดยเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมรีเอเจนต์ผสม (Ammonium molybdate solution Ascorbic acid และ Potassium antimony-tartrate solution) ลงในตัวอย่างด้วยอัตราส่วนของรีเอเจนต์ผสมต่อปริมาณของเหลวตัวอย่าง 1:10 ทำให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการ Vortex ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที และไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร คำนวณผลที่ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน (หากไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันทีได้ควรเก็บตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส)

3.4.5 การหาน้ำหนักเซลล์แห้ง

การหาน้ำหนักเซลล์แห้งดำเนินการตามวิธีการของ APHA (1998) [104] โดยนำตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร มากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C แล้วจึงนำกระดาษกรองไปอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเปรียบเทียบกับน้ำหนักกระดาษกรองก่อนและหลังการอบปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้ง (หน่วย: มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถคำนวณได้จากสมการ

น้ำหนักเซลล์แห้ง (มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{น้ำหนักเซลล์แห้ง} = (A-B) \times (1,000/C)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักกระดาษกรองที่ผ่านการกรองหลังอบแห้ง (มิลลิกรัม) และ

B คือ น้ำหนักกระดาษกรอง (มิลลิกรัม) และ

C คือ ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

น้ำหนักเซลล์แห้งที่ได้รับสามารถนำไปคำนวณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (μ_m) ได้จากสมการ

$$\mu_m = (\ln X_2 - \ln X_1) / (t_2 - t_1)$$

เมื่อ X_1 และ X_2 คือ น้ำหนักเซลล์แห้งในระยะเอกซีโพเนนเชียลที่ระยะเวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ

3.4.6 คลอโรฟิลล์

การวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ดำเนินการตามวิธีการของ Strickland Parsons (1972) [103] โดยนำตัวอย่างน้ำประมาณ 1.5 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงให้เซลล์แยกจากอาหารเลี้ยงเชื้อจากนั้นบดให้เซลล์แตกเติมอะซิโตนความเข้มข้น 90% โดยปริมาตร ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เพื่อสกัดคลอโรฟิลล์สกัดจนสังเกตเห็นเซลล์ที่ใส แล้วนำตัวอย่างไปกรองก่อนนำของเหลวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 665 645 และ 630 นาโนเมตร ด้วย UV-Vis Spectrophotometer รุ่น PowerWave HT Microplate Spectrophotometer ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A = (11.6E_{665} - 1.31E_{645} - E_{630}) \times V_a/V_b$$

เมื่อ	A	คือ ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	E_{665}	คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 665 นาโนเมตร
	E_{645}	คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 645 นาโนเมตร
	E_{630}	คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 630 นาโนเมตร
	V_a	คือ ปริมาตรสารละลายอะซิโตนและเซลล์จุลสาหร่าย
	V_b	คือ ปริมาตรตัวอย่าง

3.4.7 แคโรทีนอยด์

การวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ดำเนินการตามวิธีการของ Strickland Parsons (1972) [103] โดยนำตัวอย่างน้ำประมาณ 1.5 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงให้เซลล์แยกจากอาหารเลี้ยงเชื้อจากนั้นบดให้เซลล์แตกเติมอะซิโตนความเข้มข้น 90% โดยปริมาตร ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เพื่อสกัดคลอโรฟิลล์สกัดจนสังเกตเห็นเซลล์ที่ใส แล้วนำตัวอย่างไปกรองก่อนนำของเหลวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 480 นาโนเมตร ด้วย UV-Vis Spectrophotometer รุ่น PowerWave HT Microplate Spectrophotometer ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์รวม (มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$B = (4 \times E_{480}) \times V_a/V_b$$

B	คือ ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
E_{480}	คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 480 นาโนเมตร
V_a	คือ ปริมาตรสารละลายอะซิโตนและเซลล์จุลสาหร่าย
V_b	คือ ปริมาตรตัวอย่าง

3.4.8 ลูทีน เบต้า-แคโรทีน และไวโอลาแซนทีน

คำนวณหาปริมาณลูทีน เบต้า-แคโรทีน และไวโอลาแซนทีน ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ซึ่งใช้คอลัมน์ชนิด C-18 เฟสเคลื่อนเป็นแบบ isocratic ประกอบไปด้วยอะซิโตนไนโตรเจน ไคคลอโรมีเทน เมทานอล และน้ำกลั่น (79.9, 10, 10, 0.1% โดยปริมาตรตามลำดับ) โดยมีอัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการฉีดตัวอย่าง (วิธีการสกัดตัวอย่างดัง

ภาคผนวก ค) ที่ปริมาตร 20 ไมโครลิตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 452 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Shimadzu 3221106417 ประกอบด้วย Photo-diode Array detector รุ่น SPD-M20A

3.4.9 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (CHN)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารอินทรีย์ (CHN) โดยหลักการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash Combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ อย่างมีสัดส่วนที่แน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ธาตุคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และธาตุไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ (H_2O) จากนั้นจึงแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิดต่อไป โดยทำการส่งตัวอย่างโดย 1 ตัวอย่าง ใช้ปริมาณ 50 กรัม ส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.4.10 การวิเคราะห์กรดไขมัน

ทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันด้วยเครื่อง GC-FID โดยใช้ Column VertiBond™ stationary phase คือ 100% polyethyleneglycol โดยปริมาณของกรดไขมันจะแสดงผลเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อคิดเทียบให้ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดเป็นร้อยละ 100 เตรียมตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester) ตามกรรมวิธีของ AOAC (2000) การวิเคราะห์กรดไขมันทำการส่งตัวอย่างโดย 1 ตัวอย่าง ใช้ปริมาณ 50 กรัม เพื่อวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

งานวิจัยส่วนนี้ศึกษาแนวทางเพื่อลดการเกาะติดของจุลสาหร่าย *C. humicola* บนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงโดยเลือกศึกษา 2 แนวทาง คือ (1) การเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก และ (2) การเติมสารลดแรงตึงผิว โดยผลการทดลองจากทั้งสองแนวทางมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก

4.1.1.1 ปริมาณวัสดุแขวนลอยพลาสติกและประสิทธิภาพการไหลวนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

การทดลองในส่วนนี้ได้ศึกษาถึงปริมาณวัสดุแขวนลอยพลาสติกและประสิทธิภาพการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก โดยเลือกทดสอบวัสดุพลาสติก 2 ชนิด คือ MB5 และ Bead วัสดุแขวนลอยพลาสติกทั้งสองชนิดนิยมใช้เป็นตัวกลางเพื่อตรึงจุลินทรีย์สำหรับบำบัดแอมโมเนียในถังบำบัดน้ำไนโตรฟิเคชัน และมีจุดเด่นในการนำมาใช้งานวิจัยนี้เนื่องจากมีความคงทน น้ำหนักเบา ลอยน้ำได้ และหาได้ง่ายในท้องถิ่น ทำการทดลองโดยเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงจนมีปริมาตร 1% (20 มิลลิลิตร), 5% (100 มิลลิลิตร), 10% (200 มิลลิลิตร), 15% (300 มิลลิลิตร) และ 20% (600 มิลลิลิตร) และเติมน้ำจนมีปริมาตร 2 ลิตร และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในช่วง 0.6 ถึง 1.0 วีวีเอ็ม โดยสังเกตลักษณะการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกตัวแทนและตรวจวัดเวลาไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติก จากตารางที่ 4-1 และ 4-2 พบว่าการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกทั้งสองชนิดระหว่างส่วนไรเซอร์และดาวนคัมเมอร์สามารถทำได้ยากเมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศต่ำกว่า 0.6 วีวีเอ็ม การไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกระหว่างส่วนไรเซอร์และดาวนคัมเมอร์ทำได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.6 เป็น 1.0 วีวีเอ็ม ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลระยะเวลาการไหลวนที่ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 1.0 วีวีเอ็ม จะพบฟองอากาศกระจุกตัวในปริมาณมากที่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและเกิดการเสียดลุดของฟองอากาศลงสู่บริเวณส่วนดาวนคัมเมอร์ (รูปที่ 4-1) ซึ่งอาจทำให้ชีวมวลจุลสาหร่ายถูกพัดพาขึ้นไปติดกับผนังด้านบนและอาจเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของวัสดุแขวนลอยพลาสติก ความสามารถในการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกทำได้ไม่ดีเมื่อเติมลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในปริมาณ 1% ของปริมาตรของเหลวในถัง เนื่องจากในสภาวะดังกล่าววัสดุแขวนลอยพลาสติกจะถูกฟองอากาศที่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขัดขวางไม่ให้เคลื่อนที่ลงสู่ส่วน

ดาวนั้คัมเมอร์ได้สะดวก การไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกเมื่อเติมลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในปริมาณ 15% และ 20% ของปริมาตรของเหลวในถังเกิดขึ้นได้ไม่สะดวกเช่นกัน โดยในกรณีเป็นผลจากการขัดขวางของฟองอากาศบริเวณส่วนบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและจากการชนกันเองของวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่มีจำนวนมากเกินไป การไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติกทำได้ดีขึ้นเมื่อเติมลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในปริมาณ 5% และ 10% ของปริมาตรของเหลวในถัง โดยสามารถยืนยันได้จากการสังเกตและเวลาการไหลวน (Circulation time, t_c) ที่น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการไหลวนเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่ 15% และ 20% ของปริมาตรถัง (ตารางที่ 4-1 และ 4-2)

นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ใช้ในการทดลองได้รับความเข้มแสงเฉลี่ยที่พื้นผิวด้านหน้าประมาณ 5,000 ลักซ์ ขณะที่ความเข้มแสงส่องผ่านเมื่อไม่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่พื้นผิวด้านหลังลดลงเหลือ $3,895 \pm 129$, $3,824 \pm 137$ และ $3,767 \pm 156$ ลักซ์ เมื่อควบคุมอัตราการให้อากาศที่ 0.6, 0.8 และ 1.0 วีวีเอ็ม ตามลำดับ จากข้อมูลในตารางที่ 4-1 และ 4-2 จะเห็นว่าความเข้มแสงส่องผ่านที่พื้นผิวด้านหลังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงมีค่าลดลงตามปริมาณวัสดุแขวนลอยพลาสติกที่เติมลงไป และความเข้มแสงส่องผ่านที่พื้นผิวด้านหลังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงลดลงมากกว่า 50% เมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกมากกว่า 10% ของปริมาตรถัง ผลการทดลองที่ได้รับแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงานแสงจากการกระเจิงและบดบังกันเองของวัสดุแขวนลอยพลาสติก โดยประเด็นดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อปริมาณแสงที่จุลสาหร่ายจะได้รับเมื่อนำวัสดุพลาสติกแขวนลอยไปใช้งานจริง จากผลการทดลองทั้งหมดในข้างต้น จึงเลือกใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ในปริมาณ 5% และ 10% ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.6 และ 0.8 วีวีเอ็ม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในการทดลองถัดไป

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ในปริมาณ 1% ถึง 20% ของปริมาณทรายถึงปริมาณชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.6 ถึง 1.0 วีเอ็ม และความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

พารามิเตอร์	อัตราการไหล ของอากาศ (วีเอ็ม)	วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (% ของปริมาณทรายถึงปริมาณชีวภาพแบบใช้แสง)				
		1%	5%	10%	15%	20%
ความเข้มแสงส่องผ่าน (ลักซ์)	0.6	3,392 ± 210 ^{aB}	3,114 ± 261 ^{bAB}	2,610 ± 124 ^{cA}	2,282 ± 252 ^{dA}	1,997 ± 205 ^{eA}
	0.8	3,297 ± 222 ^{aA}	3,050 ± 460 ^{bA}	2,598 ± 228 ^{cA}	2,082 ± 325 ^{dB}	1,898 ± 242 ^{dAB}
	1.0	3,481 ± 160 ^{aB}	3,292 ± 184 ^{bB}	2,570 ± 115 ^{cA}	2,156 ± 221 ^{dAB}	1,854 ± 213 ^{eB}
การไหลวนของวัสดุ แขวนลอยพลาสติก (นาที่ต่อรอบ)	0.6	0.288 ± 0.036 ^{aA}	0.201 ± 0.030 ^{bA}	0.197 ± 0.017 ^{bA}	0.198 ± 0.023 ^{bA}	0.279 ± 0.018 ^{aA}
	0.8	0.233 ± 0.010 ^{aB}	0.185 ± 0.018 ^{bA}	0.189 ± 0.028 ^{bA}	0.192 ± 0.026 ^{bA}	0.213 ± 0.009 ^{abB}
	1.0	0.124 ± 0.008 ^{aC}	0.120 ± 0.013 ^{aB}	0.119 ± 0.014 ^{aB}	0.146 ± 0.023 ^{aB}	0.146 ± 0.011 ^{aC}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันบนแอนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันบนแอนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบเบื้องต้นเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก Bead ในปริมาณ 1% ถึง 20% ของปริมาณถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.6 ถึง 1.0 วีเอ็ม และความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

พารามิเตอร์	อัตราการไหลของอากาศ(วีเอ็ม)	ปริมาณวัสดุแขวนลอยพลาสติก Bead (% ของปริมาณถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง)				
		1%	5%	10%	15%	20%
ความเข้มแสง	0.6	3,393 ± 159 ^{aA}	3,173 ± 244 ^{bA}	2,685 ± 209 ^{cA}	2,201 ± 219 ^{dA}	2,088 ± 154 ^{dA}
ส่องผ่าน (ลักซ์)	0.8	3,183 ± 238 ^{aB}	2,831 ± 273 ^{bB}	2,536 ± 370 ^{cA}	2,249 ± 258 ^{dA}	1,906 ± 162 ^{eB}
	1.0	3,371 ± 169 ^{aA}	3,086 ± 186 ^{bA}	2,695 ± 232 ^{cA}	2,149 ± 185 ^{dA}	1,940 ± 148 ^{eB}
การไหลวนของวัสดุ	0.6	0.175 ± 0.016 ^{abA}	0.169 ± 0.016 ^{aA}	0.181 ± 0.015 ^{abca}	0.202 ± 0.016 ^{bccA}	0.208 ± 0.008 ^{cA}
แขวนลอยพลาสติก (นาที่ต่อรอบ)	0.8	0.172 ± 0.009 ^{abA}	0.165 ± 0.015 ^{aA}	0.172 ± 0.011 ^{abA}	0.192 ± 0.007 ^{bccA}	0.194 ± 0.011 ^{cAB}
	1.0	0.125 ± 0.018 ^{aB}	0.111 ± 0.013 ^{ab}	0.113 ± 0.015 ^{ab}	0.166 ± 0.014 ^{bb}	0.171 ± 0.020 ^{bb}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันเอนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันเอนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



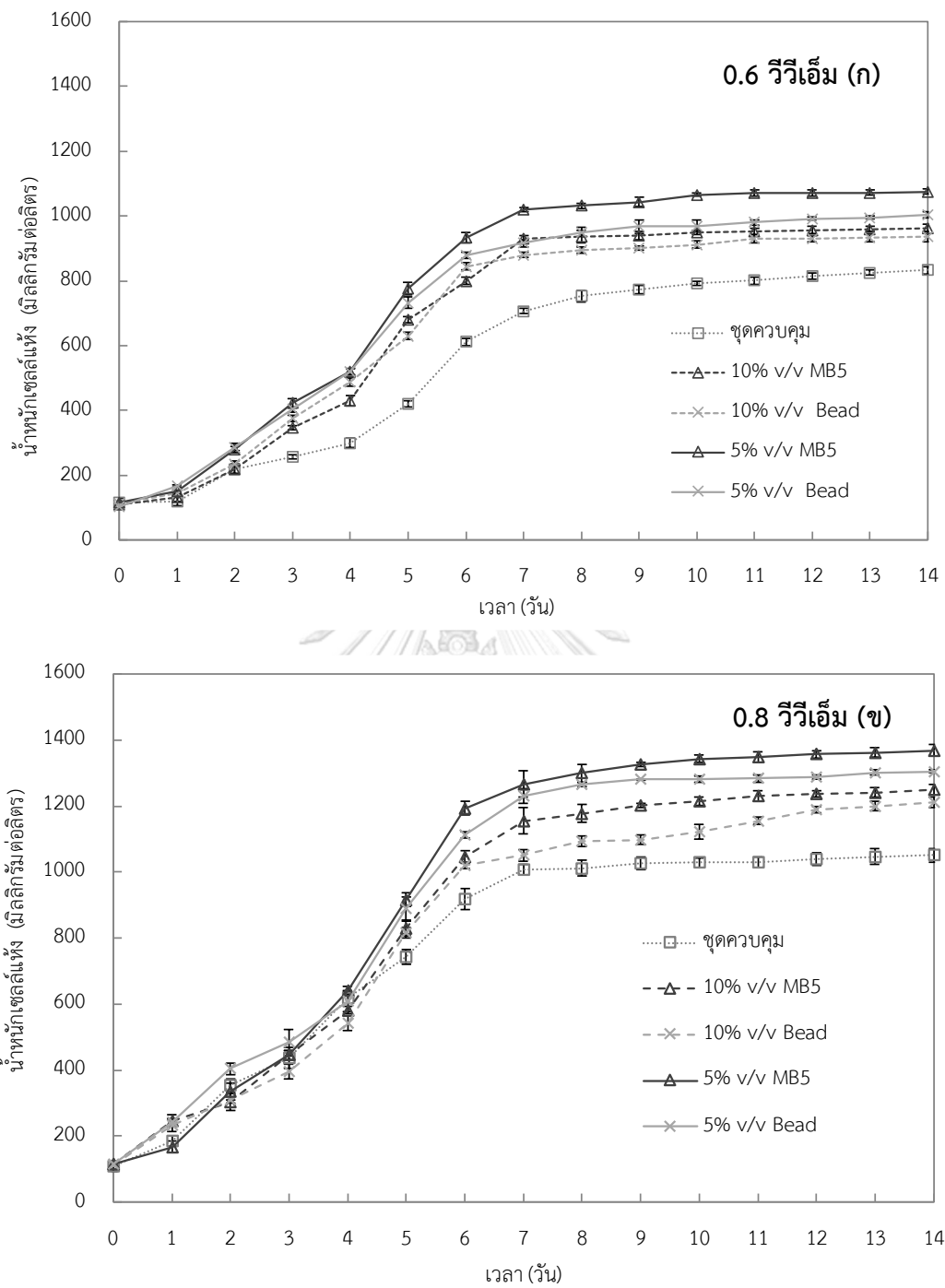
รูปที่ 4-1 ฟองอากาศที่บริเวณส่วนบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและการเล็ดลอดของ ฟองอากาศลงสู่ส่วนดาวน์คัมเมอร์เมื่อทดสอบกับวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ที่อัตราการไหลของอากาศ 1.0 วีวีเอ็ม

4.1.1.2 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ร่วมกับการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก

การทดลองในส่วนนี้ได้ศึกษาการควบคุมการเกาะติดของจุลสาหร่าย *C. humicola* บนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกโดยเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ในปริมาณ 5% และ 10% ของปริมาตรของเหลวในถัง โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก ผลกระทบจากการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกสามารถสังเกตได้ชัดเจนเมื่อใช้งานพร้อมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้อัตราการไหลของอากาศในช่วง 0.6 ถึง 1.0 วีวีเอ็ม ซึ่งอ้างอิงมาจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1.1 โดยอัตราการไหลของอากาศในช่วงดังกล่าวทำให้วัสดุแขวนลอยพลาสติกไหลวนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงได้ดีกว่าอัตราการให้อากาศต่ำกว่า 0.6 วีวีเอ็ม อีกทั้งให้ผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายมากกว่าการควบคุมอัตราการไหลของอากาศสูงกว่า 1.2 วีวีเอ็ม [23, 27] อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้ยังมีค่าสูงกว่าการวิจัยในอดีตซึ่งใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดอากาศยกในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายและจุลินทรีย์ [21, 105-109] โดยอัตราการให้อากาศที่สูงในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาจเป็นผลจากขนาด

เซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* ที่มีขนาดใหญ่และมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มเซลล์ จากรูปที่ 4-2 จะเห็นว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายระหว่างถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่เต็มและไม่เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติกไม่แตกต่างกันมากนักในช่วงวันที่ 2-5 ทั้งอัตราการการไหลของอากาศที่ 0.6 และ 0.8 วีวีเอ็ม ผลการทดลองที่ได้รับคาดว่าเกี่ยวข้องกับปริมาณจุลสาหร่ายที่มีไม่มากในช่วงเริ่มต้นการเพาะเลี้ยงซึ่งทำให้การเติมหรือไม่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายมากนัก ผลกระทบจากการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกทั้งสองชนิดมีความชัดเจนมากขึ้นหลังเวลาผ่านไปหนึ่งสัปดาห์ โดยการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ไม่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก พบว่ามีไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายเกิดขึ้นบนผนังในปริมาณไม่แตกต่างกันในทั้งสองอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ทดสอบ ผลการทดลองที่ได้รับอาจเป็นบ่งชี้ในเบื้องต้นว่าอัตราการไหลของอากาศระหว่าง 0.6 และ 0.8 วีวีเอ็ม ไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายบนผนังอะคริลิกใสของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกมากนัก อย่างไรก็ตามผลการทดลองในส่วนนี้ขัดแย้งกับงานวิจัยบางส่วนในอดีตซึ่งรายงานปริมาณไบโอฟิล์มบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ [109, 110]

เมื่อพิจารณาระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้สังเกตเห็นว่าไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงมีปริมาณลดลงเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก ซึ่งสามารถนำไปใช้อธิบายกราฟน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายที่มีความแตกต่างกันมากขึ้นระหว่างการเพาะเลี้ยงที่เต็มและไม่เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติกตั้งแต่วันที่ 2 เมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.6 วีวีเอ็ม และตั้งแต่วันที่ 5 เมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.8 วีวีเอ็ม จากรูปที่ 4-2 พบว่าน้ำหนักแห้งสุดท้ายของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในวันที่ 14 เมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.8 วีวีเอ็ม พร้อมการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (5%) Bead (5%) MB5 (10%) และ Bead (10%) มีค่าเท่ากับ $1,350 \pm 25.60$ $1,302 \pm 29.50$ $1,274 \pm 28.1$ และ $1,280 \pm 26.1$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่าย ($1,084 \pm 39.0$ มิลลิกรัมต่อลิตร) ในชุดควบคุมที่ไม่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการทดลองที่ได้รับมีความคล้ายกันเมื่อลดอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.6 วีวีเอ็ม (รูปที่ 4.2) อย่างไรก็ตามพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 1.0 วีวีเอ็ม จะพบฟองอากาศปริมาณมากบริเวณส่วนบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและพบชีวมวลจุลสาหร่ายทั้งเปียกและแห้งถูกพัดพาขึ้นไปเกาะติดบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเหนือผิวน้ำอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบการเกิดไบโอฟิล์มอย่างชัดเจนบริเวณส่วนโค้งบริเวณฐานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเมื่อไม่มีการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกคล้ายกับกรณีการเพาะเลี้ยงที่อัตราการไหลของอากาศต่ำ

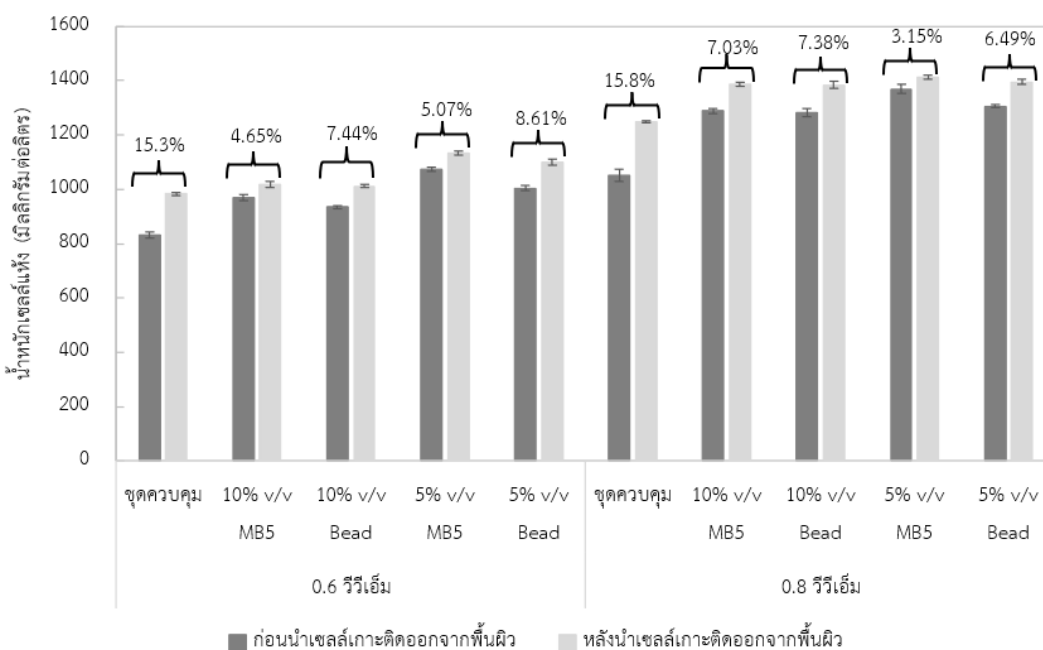


รูปที่ 4-2 น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ชนิดอากาศยกเมื่อเต็มและไม่เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติก (ก) อัตราการไหลของอากาศ 0.6 วิวีเอ็ม (ข) อัตราการไหลของอากาศ 0.8 วิวีเอ็ม

ประสิทธิภาพของการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกเพื่อควบคุมการเกาะติดของไบโอฟิล์ม จุลสาหร่ายบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกสามารถยืนยันได้จากผลต่างของ น้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการชูดไบโอฟิล์มออกจากผนังเมื่อเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยง หากความแตกต่างระหว่างน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการชูดไบโอฟิล์มออกมีค่าน้อยจะ หมายถึงปริมาณไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเช่นกันหรือการเติมวัสดุแขวนลอย พลาสติกเพื่อควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายเกาะติดทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากรูปที่ 4.3 พบว่า ผลต่างระหว่างน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการชูดไบโอฟิล์มในกรณีไม่เติมวัสดุแขวนลอย พลาสติกมีค่าเท่ากับ 195 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.8 วีวีเอ็ม และ 140 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.6 วีวีเอ็ม ซึ่งคิดเป็นผลต่างเท่ากับ 15.3% และ 15.8% ตามลำดับ ผลต่างระหว่างน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายเมื่อเติมวัสดุแขวนลอย พลาสติกทั้งสองชนิดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนอยู่ที่ 1.54% ถึง 6.69% สำหรับ MB5 และ 2.01% ถึง 4.73% สำหรับ Bead ในทั้งสองอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ทดสอบ ดังนั้นการเติมวัสดุแขวนลอย พลาสติกเพื่อสร้างแรงขัดขวางระหว่างไบโอฟิล์มและพื้นผิวสามารถควบคุมการเกาะติดของไบโอฟิล์ม บนพื้นผิวอะคริลิกใสของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองที่ได้รับ พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.6 เป็น 0.8 วีวีเอ็ม อาจไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการ ควบคุมการเกาะติดของ ไบโอฟิล์ม ซึ่งแสดงได้จากค่าผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายซึ่งไม่แตกต่าง กันมากนักในทั้งสองอัตราการไหลของอากาศ โดยในกรณีของ MB5 ผลต่างของน้ำหนักแห้ง จุลสาหร่ายมีค่าระหว่าง 4.65% ถึง 5.07% สำหรับ 0.6 วีวีเอ็ม และ 3.15% ถึง 7.03% สำหรับ 0.8 วีวีเอ็ม ขณะที่ในกรณีของ Bead ผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายมีค่าระหว่าง 7.44% ถึง 8.61% สำหรับ 0.6 วีวีเอ็ม และ 6.49% ถึง 7.38% สำหรับ 0.8 วีวีเอ็ม

อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.6 เป็น 0.8 วีวีเอ็ม ส่งผลดีต่อผลผลิต ชีวมวลจุลสาหร่ายที่ได้จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงทั้งกรณีที่มีการเติมและไม่เติมวัสดุแขวนลอย พลาสติก ผลการศึกษาที่ผ่านชี้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ส่วนไรเซอร์สามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพการไหลวนของเหลวและเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคของเหลวและก๊าซ ส่งผลให้มีการกระจายตัวของสารอาหาร เพิ่มโอกาสในการรับแสง และกำจัดออกซิเจนละลายน้ำออก จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงได้ดีขึ้น [111, 112] อีกหนึ่งข้อสังเกตจากการทดลองคือวัสดุ แขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead มีความสามารถไม่แตกต่างกันในการควบคุมไบโอฟิล์มบนผนัง ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก แม้ว่าวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 จะมีโครงสร้างที่ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมซึ่งทำให้เกิดรอยขีดข่วนกับไบโอฟิล์มบนพื้นผิวและเกิดการหลุดออกได้ง่าย ข้อสังเกตดังกล่าวตรงข้ามกับงานวิจัยในอดีตซึ่งพบว่าชนิด ขนาด และรูปร่างของวัสดุแขวนลอย

พลาสติกมีผลต่อความสามารถในการควบคุมไบโอฟิล์มบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพ [113] อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยมีความเห็นว่าผลการทดลองที่ได้รับอาจมีความเกี่ยวข้องกับจำนวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติก Bead ต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่มากกว่าจำนวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ซึ่งทำให้ความถี่ของ Bead ในการชนกับไบโอฟิล์มบนของผนังมีค่าสูงกว่า



รูปที่ 4-3 จำนวนเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ก่อนและหลังนำไบโอฟิล์มออกจากผนังในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 14)

อีกหนึ่งประเด็นที่สำคัญของการใช้งานวัสดุแขวนลอยพลาสติกทั้งสองชนิดคือความสะดวกในการนำวัสดุแขวนลอยพลาสติกออกจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงหลังจากเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยเมื่อหยุดการเป่าอากาศจะพบว่าวัสดุแขวนลอยพลาสติกทั้งสองชนิดจะลอยขึ้นสู่น้ำขณะที่เซลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* เริ่มจมตัวลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ส่งผลให้เกิดการแยกระหว่างวัสดุแขวนลอยพลาสติกและผลิตภัณฑ์อย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุแขวนลอยพลาสติกทั้งสองชนิดสามารถลอยตัวและเคลื่อนที่ในของเหลวได้สะดวกเช่นกัน ข้อดีทั้งหมดดังกล่าวเป็นผลมาจากค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ที่น้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเล็กน้อย ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมแก่การใช้งานในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก Spike ball ในการควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. vulgaris* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง

ชนิดที่อายุยาว พบว่าการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ไม่ประสบปัญหาการติดของวัสดุแขวนลอยพลาสติกบริเวณส่วนโค้งหรือข้อต่อของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง [87] นอกจากนี้วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead มีความเสี่ยงต่ำในการสร้างความเสียหายกับพื้นผิวที่ทำจากแก้วเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เม็ดทรายหรือลูกแก้ว [114] จากผลการทดลองจึงทำให้สรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมแก่การใช้งานการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead คือ 5% ของปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ส่วนไรเซอร์ที่ 0.8 วีวีเอ็ม ภายใต้สภาวะได้ความรับความเข้มข้นของชีวมวลจุลสาหร่ายก่อนการชุดผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเท่ากับ $1,350 \pm 25.6$ และ $1,302 \pm 29.5$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าความเข้มข้นของชีวมวลจุลสาหร่ายจากการเพาะเลี้ยงที่ไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยประมาณ 21% ถึง 25% ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกเป็นทางเลือกที่ง่ายสำหรับลดการเกาะติดของไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* และสามารถนำแนวคิดนี้ไปใช้งานกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกแบบอื่นๆ และจุลสาหร่ายสายพันธุ์อื่นๆ ที่แสดงถึงการเกาะติดบนพื้นผิว

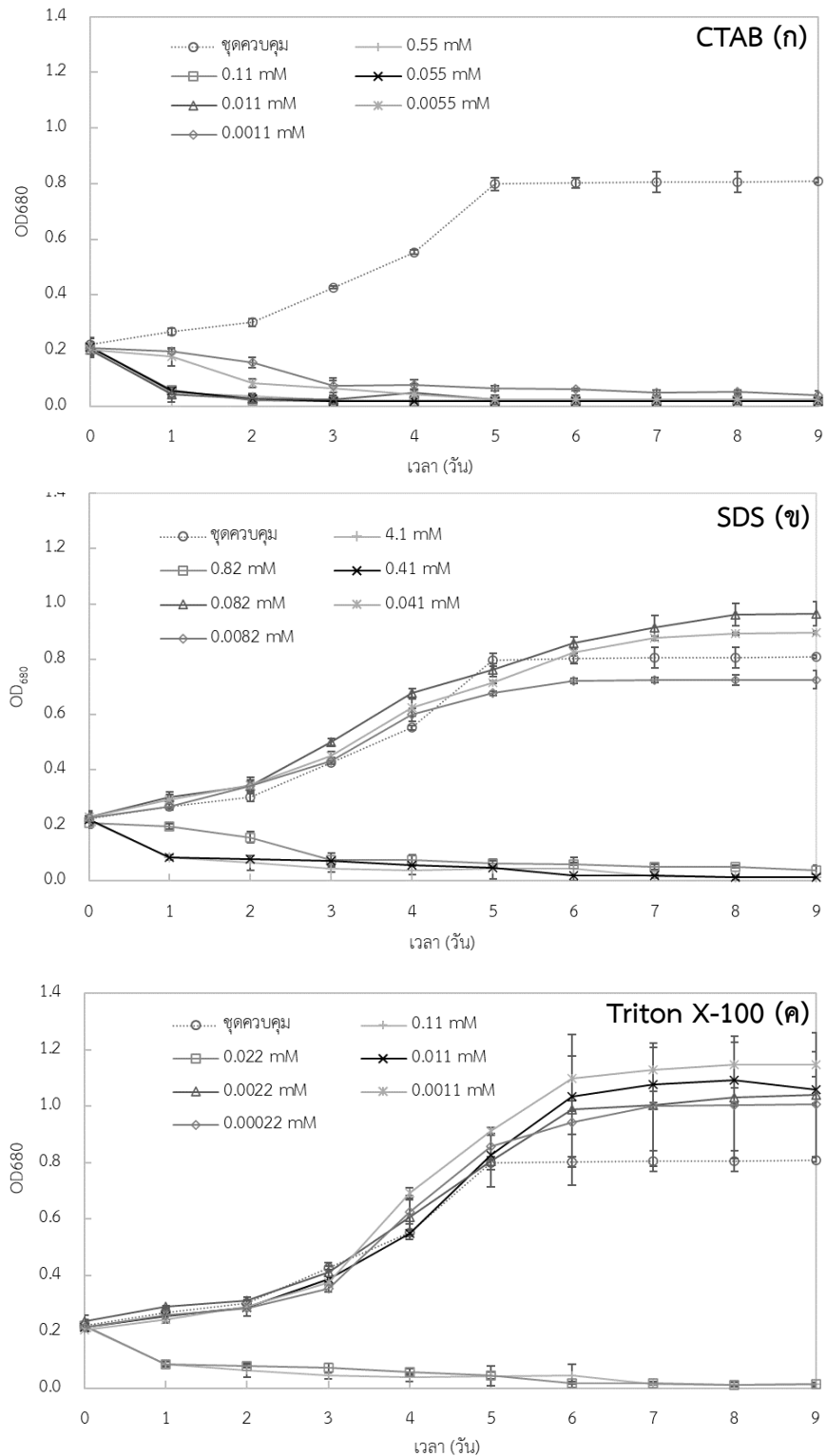
4.1.2 การใช้สารลดแรงตึงผิว

4.1.2.1 ชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

การทดลองนี้ศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยเลือกทดสอบสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ 1) Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) 2) Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) 3) Triton X-100 โดยเลือกใช้ความเข้มข้นในช่วง 0.1% ถึง 50% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration) ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด ดำเนินการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เติมอากาศขนาด 1 ลิตร เป็นเวลา 9 วัน ระหว่างการทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วีวีเอ็ม เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกะเป็นระยะเวลา 9 วัน ผลการทดลองดังรูป 4-4 พบว่า CTAB ส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* ทำให้จุลสาหร่ายตายลงหลังจากเพาะเลี้ยงภายในระยะเวลา 1 วัน เนื่องจากสารลดแรงตึงผิว CTAB ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์แตก [115] โดย CTAB เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุบวกซึ่งเกิดแรงยึดเหนี่ยวไฟฟ้าสถิตกับตำแหน่งที่มีประจุลบบนผนังเซลล์จุลสาหร่าย [116] แรงยึดเหนี่ยวไฟฟ้าสถิตเหล่านี้สร้างความเครียดในผนังเซลล์ซึ่งทำให้การซึมผ่านของผนังเซลล์ผิดปกติและนำไปสู่การสลายของผนังเซลล์ [117] ผลการทดลองจากการทำวิทยานิพนธ์สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาผลจากการใช้

สารลดแรงตึงผิว CTAB ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. vulgaris* ซึ่งพบว่าการเติม CTAB ส่งผลให้อัตราการเติบโตลดลงอย่างมากเนื่องจากผนังเซลล์ผิดปกติจากการถูกทำลาย [118]

จุลสาหร่าย *C. humicola* สามารถเจริญเติบโตได้เทียบเคียงกับชุดควบคุมเมื่อเติม SDS ความเข้มข้น 0.0082, 0.041 และ 0.082 มิลลิโมลาร์ โดยได้รับความหนาแน่นเซลล์จุลสาหร่ายสูงสุดเมื่อ SDS มีความเข้มข้น 0.082 มิลลิโมลาร์ อย่างไรก็ตามเมื่อเติม SDS ความเข้มข้นมากกว่า 0.41 มิลลิโมลาร์ (>5% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์) จะส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายและทำให้จุลสาหร่ายตายลงเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน หลังจากเริ่มเพาะเลี้ยง ดังรูป 4-4 (ข) จุลสาหร่าย *C. humicola* สามารถเจริญเติบโตได้เทียบเคียงกับชุดควบคุมเมื่อเติม Triton X-100 ที่ความเข้มข้นที่ 0.00022, 0.0011, 0.0022 และ 0.011 มิลลิโมลาร์ โดยได้รับความหนาแน่นเซลล์จุลสาหร่ายสูงสุดเมื่อ Triton X-100 มีความเข้มข้น 0.0011 มิลลิโมลาร์ แต่เมื่อเติม Triton X-100 ความเข้มข้นมากกว่า 0.022 มิลลิโมลาร์ (>10% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์) จะส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายและทำให้จุลสาหร่ายตายลงเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน หลังจากเริ่มเพาะเลี้ยง ดังรูป 4-4 (ค) จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิด (SDS และ Triton X-100) 0.1% ถึง 5% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ส่งผลในเชิงบวกต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* แม้ว่าสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 จะให้ความหนาแน่นเซลล์จุลสาหร่ายสูงกว่าสารลดแรงตึงผิว SDS แต่ Triton X-100 ถูกห้ามใช้ในสหภาพยุโรปตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2564 เนื่องจากการก่อสารพิษระหว่างการย่อยสลาย [119] ดังนั้นในการทดลองถัดไปเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* จึงเลือก SDS ความเข้มข้น 0.0082 มิลลิโมลาร์ เพื่อลดผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายและสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4-4 ค่าการดูดกลืนแสง (OD680) จุลสหาย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ชนิดเติมอากาศ ขนาด 1 ลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันของ (ก) CTAB, (ข) SDS และ (ค) Triton X-100

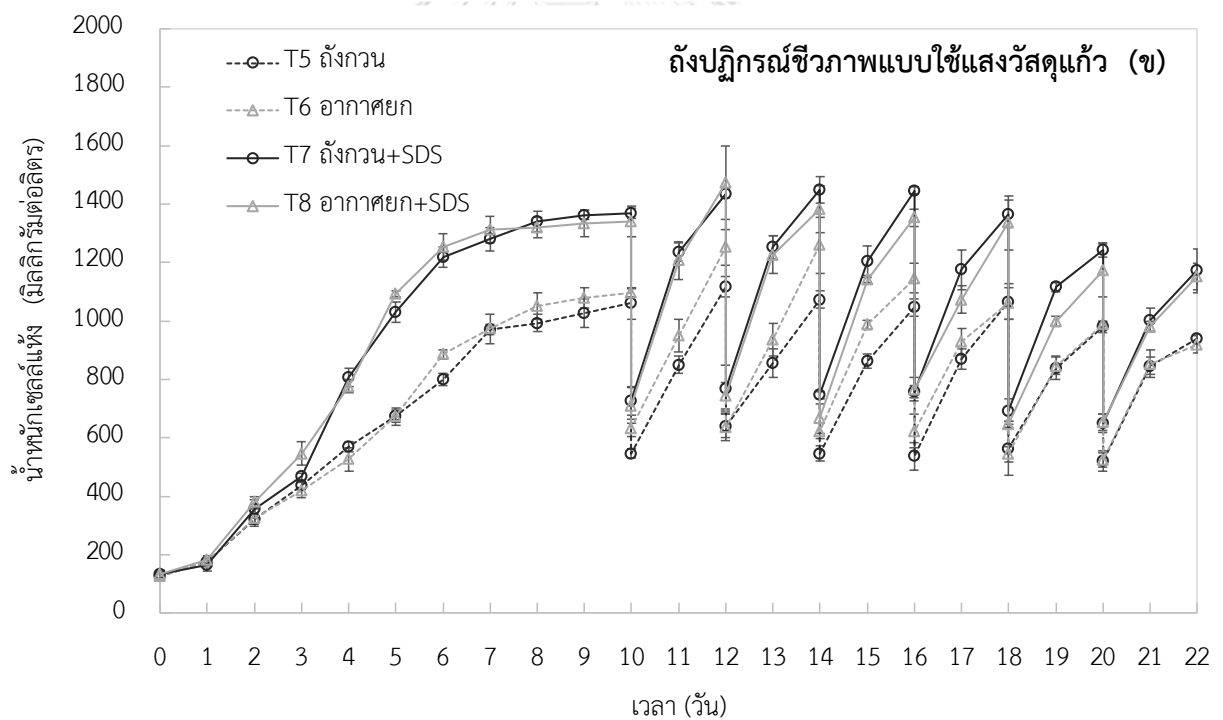
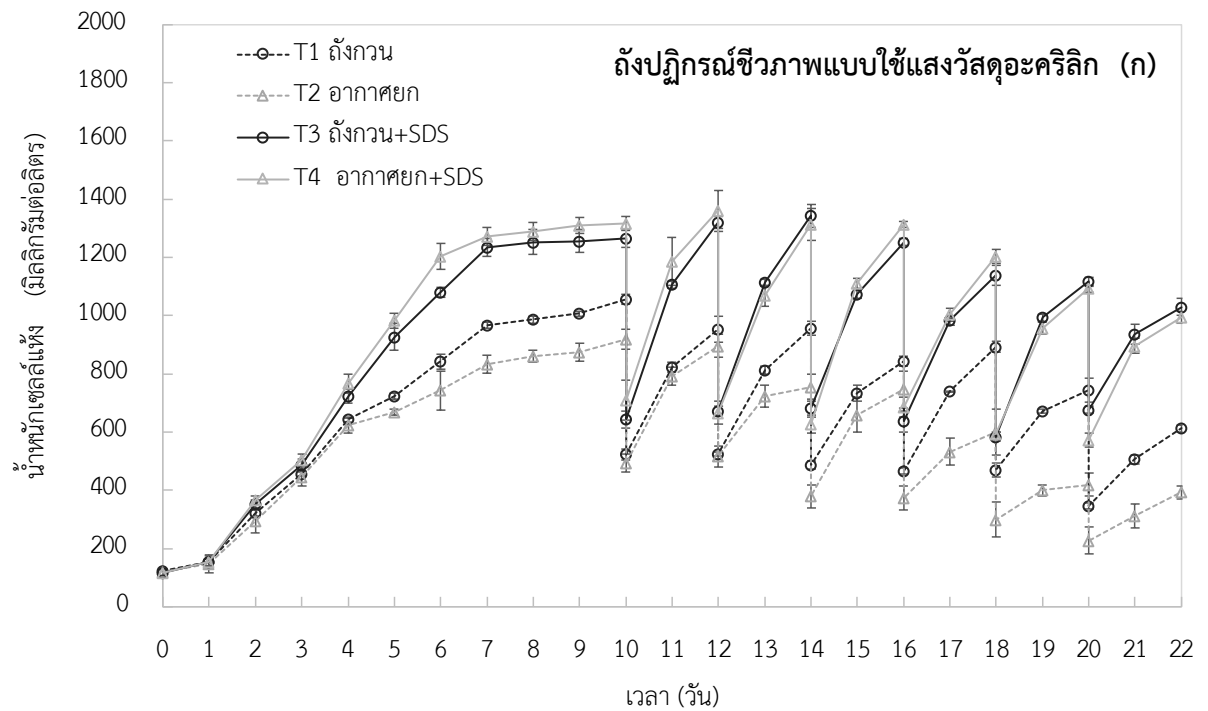
4.1.2.2 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิว

การทดลองนี้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยก ซึ่งทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ อะคริลิก และแก้ว โดยชุดทดลองเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งเติม SDS ความเข้มข้น 0.0082 มิลลิโมลาร์ และชุดควบคุมซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว ระหว่างการทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วีวีเอ็ม จากรูปที่ 4-5 (ก) แสดงน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกที่สร้างจากอะคริลิก เมื่อมีและไม่มีการเติม SDS ผลการทดลองพบว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในช่วงวันที่ 1 - 4 ไม่แตกต่างกันเมื่อพิจารณาจากอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด โดยอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (T3) และไม่เติม SDS (T1) มีค่าเท่ากับ 0.58 และ 0.55 ต่อวัน ตามลำดับ อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกเมื่อเติม SDS (T4) และไม่เติม SDS (T1) มีค่าเท่ากับ 0.56 และ 0.59 ต่อวัน ตามลำดับ จากนั้นในช่วงวันที่ 5 - 8 พบว่าอัตราการเติบโตจำเพาะลดลงมากกว่า 50 % ในชุดทดลองที่ไม่เติม SDS ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมการเกิด ไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายจนสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนบนพื้นผิวถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงทั้งชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งมีรายงานการก่อตัวของไบโอฟิล์มจุลสาหร่าย *C. humicola* หลังจากเพาะเลี้ยงผ่านไป 5 วัน ภายใต้อัตราการไหลของอากาศและความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งนี้ [27] น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในการเก็บเกี่ยวครั้งแรก (วันที่ 10) มีค่าเท่ากับ $1,267 \pm 30.6$ และ $1,317 \pm 25.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T3) และชนิดอากาศยก (T4) สูงกว่าเมื่อไม่เติม SDS ซึ่งมีน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T1) และชนิดอากาศยก (T2) เท่ากับ $1,006 \pm 50.3$ และ 873 ± 30.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 19.87 และ 43.21 ตามลำดับ

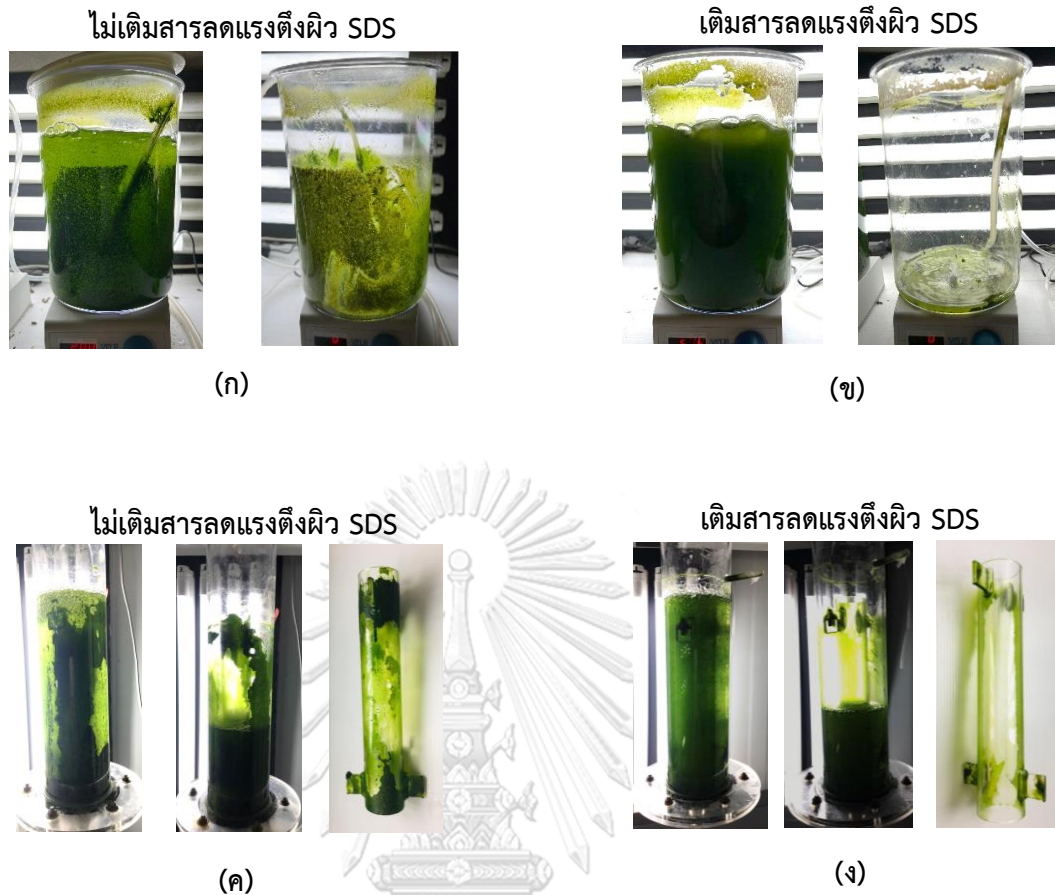
ในช่วงวันที่ 11 - 22 พบว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไปรวมถึงชุดทดลองที่มีเติม SDS โดยมีสาเหตุจากความเข้มข้นของ SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงลดลง เนื่องจากมีการเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายระหว่างการเพาะเลี้ยง โดยนำเซลล์จุลสาหร่ายซึ่งแขวนลอยอยู่ในอาหารเหลวออกครึ่งหนึ่งของปริมาตรการเพาะเลี้ยงและเติมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ทดแทนลงไปโดยไม่มีสารลดแรงตึงผิว ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

SDS ลดต่ำลง ผลการทดลองที่ได้รับชี้ให้เห็นว่าควรเติม SDS ร่วมกับการเติมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 เป็นระยะเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวให้สามารถควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน [120] น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในวันที่ 22 จากการเพาะเลี้ยงที่เติม SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T3) และชนิดอากาศยก (T4) มีค่าเท่ากับ $1,030 \pm 30.0$ และ 993 ± 20.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขณะที่น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายจากการเพาะเลี้ยงเมื่อไม่เติม SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T1) และชนิดอากาศยก (T2) เท่ากับ 813 ± 23.09 และ 393 ± 20.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยพบว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายของการเก็บเกี่ยวครั้งสุดท้าย (วันที่ 22) ลดลงต่ำกว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในครั้งแรก (วันที่ 10) เนื่องจากเกิดการก่อตัวไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายจำนวนมากเมื่อเลี้ยงต่อเนื่องเป็นเวลานาน รูปที่ 4-6 แสดงการก่อตัวของไบโอฟิล์มจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกเมื่อไม่เติม SDS เปรียบเทียบกับพื้นผิวถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเมื่อเติม SDS

จากรูปที่ 4-5 (ข) แสดงน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกจากวัสดุแก้ว ผลการทดลองที่ได้คล้ายคลึงกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกจากวัสดุอะคริลิก น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในวันสุดท้ายของเพาะเลี้ยง (วันที่ 22) ที่มีการเติม SDS สูงกว่าเมื่อไม่เติม SDS โดยมีค่าเท่ากับ $1,173 \pm 75.06$ และ $1,153 \pm 46.19$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T7) และชนิดอากาศยก (T8) ตามลำดับ ในขณะที่น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายเมื่อไม่เติม SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T5) และชนิดอากาศยก (T6) มีค่าเท่ากับ 940 ± 17.32 และ 940 ± 17.32 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสังเกตการก่อตัวไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายมากในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS เปรียบเทียบกับพื้นผิวถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว SDS จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนจากวัสดุแก้ว ขนาด 2 ลิตร เมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ให้ผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายสูงที่สุด



รูปที่ 4-5 (ก) จำนวนสปอร์เชื้อราจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถึงปฏิบัติการชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถึงกวนและชนิดอากาศยกที่สร้างจากอะคริลิก เมื่อมีและไม่มีสารลดแรงตึงผิว SDS (ข) จำนวนสปอร์เชื้อราจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถึงปฏิบัติการชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถึงกวนและชนิดอากาศยกที่สร้างจากแก้ว เมื่อมีและไม่มีสารลดแรงตึงผิว SDS



รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายที่ก่อตัวบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่สร้างจากอะคริลิก (วันที่ 22) : (ก) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (ข) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (ค) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (ง) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS

รูปที่ 4-7 แสดงความแตกต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการขูดไบโอฟิล์มออกจากผนังเมื่อเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยง พิจารณาชุดทดลอง T1 T2 T3 และ T4 ซึ่งเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงจากวัสดุอะคริลิก พบว่าเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ความแตกต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T1) และชนิดอากาศยก (T2) เท่ากับ 380 และ 337 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ความแตกต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T3) และชนิดอากาศยก (T4) เท่ากับ 56.7 และ 63.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยความแตกต่างของน้ำหนักแห้งก่อนและหลังนำไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายออกจากพื้นผิวถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่มีค่าน้อย แสดงให้เห็นว่ามีการก่อตัวของไบโอฟิล์มน้อย และเมื่อพิจารณาชุดทดลอง T5 T6 T7 และ

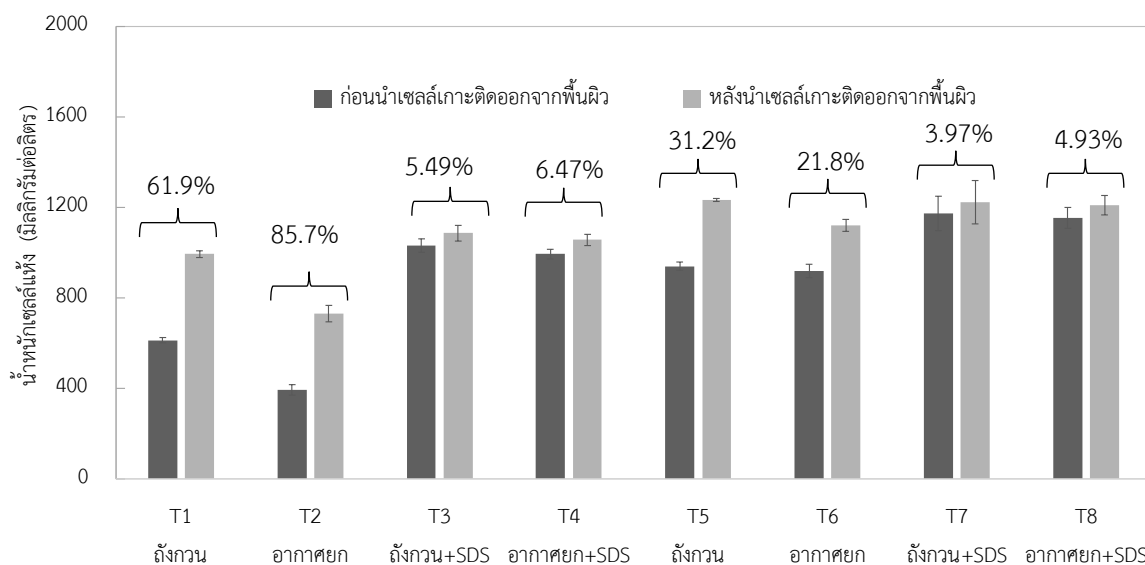
T8 ซึ่งเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงจากวัสดุแก้ว พบว่าเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ความแตกต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T5) และชนิด อากาศยก (T6) เท่ากับ 239 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อการเติมสารลดแรงตึงผิวความ แตกต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T7) และชนิด อากาศยก (T8) เท่ากับ 46.7 และ 60.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาร้อยละผลต่างของน้ำหนักแห้งก่อนและหลังนำไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายที่ เกาะติดพื้นผิวถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงร่วมกับจุลสาหร่ายแขวนลอยในวันสุดท้าย ซึ่งมีการเติม สารลดแรงตึงผิว SDS พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (ชุดทดลองที่ 3) และชนิดอากาศยก (ชุดทดลองที่ 4) จากวัสดุอะคริลิก ให้ผลต่างเท่ากับ 5.49% และ 6.37% ตามลำดับ และเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (ชุดทดลองที่ 7) และชนิด อากาศยก (ชุดทดลองที่ 8) จากวัสดุแก้ว ให้ผลต่างเท่ากับ 3.97% และ 4.93% ตามลำดับ ซึ่งมีร้อย ละผลต่างใกล้เคียงกันทั้งสองวัสดุ ซึ่งให้เห็นว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวส่งผลเชิงบวกต่อการควบคุม ไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายทั้งอะคริลิกและแก้ว ในขณะที่การก่อตัวไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายจะ สัมพันธ์กับชนิดของวัสดุพื้นผิวที่ใช้หากไม่มีการเติม SDS โดยพบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T1) และชนิดอากาศยก (T2) จากอะคริลิก ให้ผลต่างเท่ากับ 61.9% และ 63.3% ตามลำดับ ในขณะที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T5) และ ชนิดอากาศยก (T6) จากแก้วมีค่าเท่ากับ 31.2% และ 21.8% ตามลำดับ โดยอะคริลิกให้ผลต่างสูง กว่าแก้ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจุลสาหร่าย *C. humicola* มีแนวโน้มก่อไบโอฟิล์มของ จุลสาหร่ายบนพื้นผิวอะคริลิกมากกว่าพื้นผิวแก้วเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยผลดังกล่าว สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งพบว่าอะคริลิกมีลักษณะของพื้นผิวส่วนไม่ชอบน้ำ (surface hydrophobicity) และความหยาบพื้นผิวอะคริลิกสูง เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการยึดเกาะ ระหว่างพื้นผิวอะคริลิกกับจุลสาหร่ายได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวแก้วกับ จุลสาหร่าย *C. humicola* [121, 122] แม้ว่าแก้วจะมีแนวโน้มการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายน้อย กว่าแต่การใช้แก้วมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ความเสี่ยงต่อความเสียหายของพื้นผิวระหว่างการ ติดตั้ง การใช้งาน และต้นทุนของวัสดุและการก่อสร้างที่สูง

การทดลองเลือกใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกซึ่งมีลักษณะ ทางอุทกพลศาสตร์ของไหลที่แตกต่างจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดท่อยาวซึ่งใช้งานอย่าง แพร่หลายในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเชิงพาณิชย์ [123] ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนมี การออกแบบที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการดำเนินการเพาะเลี้ยง และพบได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ ขณะที่ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกมีอัตราการถ่ายโอนระหว่างก๊าซและของเหลวที่ค่อนข้าง

สูง เกิดแรงเฉือนต่ำ สามารถผสมของเหลวที่ดี และมีรูปแบบการไหลเวียนของของเหลวที่แน่นอน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย [123, 124] การศึกษาที่ผ่านมายังแสดงให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายหลายชนิดรวมทั้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ให้ผลผลิตชีวมวลที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและแบบเติมอากาศ [22, 124, 125] นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกใช้พื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดท่อยาวเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาผลของการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยก พบว่าสามารถควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงได้ใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS โดยผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการขูดไบโอฟิล์มออกจากผนังเมื่อเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยงระหว่างถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T3) และชนิดอากาศยก (T4) จากวัสดุอะคริลิกมีค่าเท่ากับ 5.50% และ 6.38% ตามลำดับ และผลต่างของน้ำหนักแห้งเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T7) และชนิดอากาศยก (T8) จากแก้วมีค่าเท่ากับ 3.97% และ 4.93% ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการควบคุมไบโอฟิล์มที่ใกล้เคียงกันของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงทั้ง 2 รูปแบบอาจเนื่องมาจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงในการทดลองมีขนาดเล็ก (2 ลิตร) ส่งผลให้แรงเฉือนของเหลวใกล้เคียงกันและการผสมของเหลวที่ดีในทั้งสองระบบ เมื่อถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงมีขนาดใหญ่ขึ้นผลของอุทกพลศาสตร์อาจทำให้เกิดการหลุดออกของไบโอฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนซึ่งมีแรงเฉือนที่สูงจากการเคลื่อนที่ของใบพัดหรืออุปกรณ์ช่วยการผสม [126] อย่างไรก็ตาม รูปแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงจะส่งผลต่อการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายที่เจริญเติบโตบนผนังได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS โดยพบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T1) และชนิดอากาศยก (T2) จากวัสดุอะคริลิก ให้ผลต่างเท่ากับ 61.9% และ 63.3% ตามลำดับ ในขณะที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวน (T5) และชนิดอากาศยก (T6) จากแก้วมีค่าเท่ากับ 31.2% และ 21.8% ตามลำดับ



รูปที่ 4-7 น้ำหนักเซลล์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ก่อนและหลังนำไปโอฟิล์มของจุลสาหร่ายออกจากผนัง ในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 22)

4.1.3 เปรียบเทียบการใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติกและสารลดแรงตึงผิว

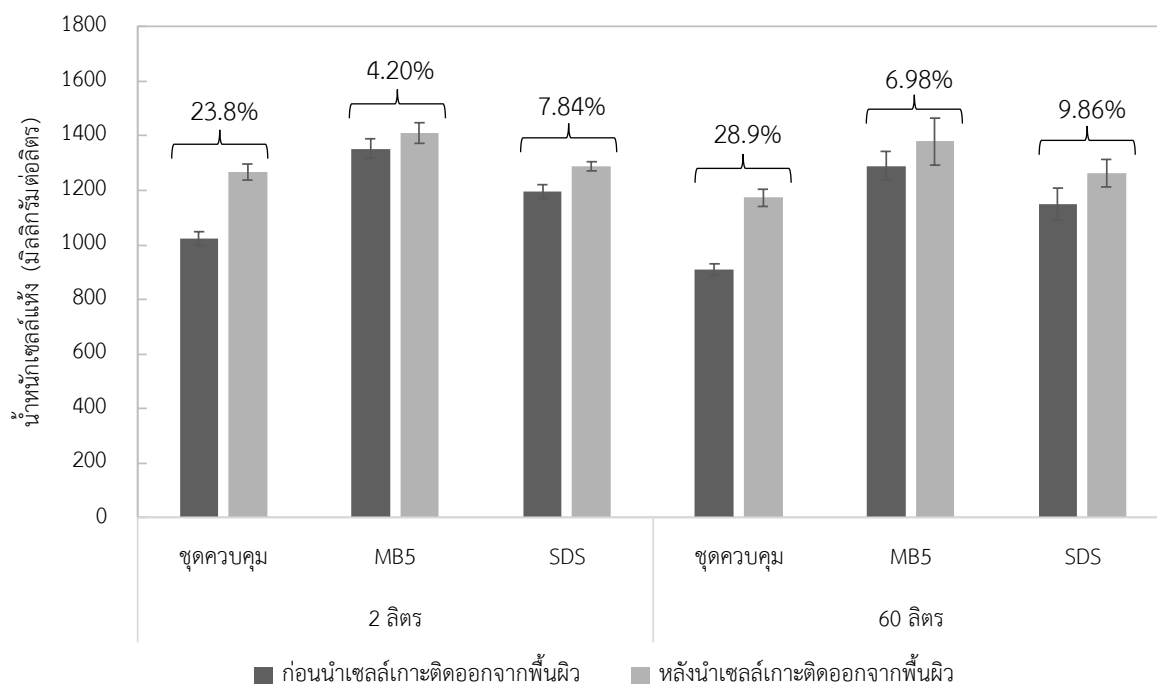
การทดลองในส่วนนี้ศึกษาการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 เปรียบเทียบกับการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ร่วมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร การทดลองประกอบด้วยชุดทดลองที่เติม MB5 5% ของปริมาตรของเหลวในถัง และชุดทดลองที่เติม SDS เข้มข้น 0.0082 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่ชุดควบคุมเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยและสารลดแรงตึงผิว ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 0.3 วีวีเอ็ม ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์เติมอากาศทำให้เมื่อมีการขยายขนาดใหญ่ขึ้น สามารถให้อัตราการไหลของอากาศสูงสุดเพียง 0.3 วีวีเอ็ม เมื่อทำการทดสอบเบื้องต้นพบว่าวัสดุแขวนลอยพลาสติกสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศ 0.3 วีวีเอ็ม ดังรูปที่ 4-8 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร ตามลำดับ ระหว่างทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4-8 การทดสอบการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติก ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร เมื่ออัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.3 วีวีเอ็ม

จากรูปที่ 4-9 แสดงผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการชูดไบโอฟิล์มออกจากผนังเมื่อเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่เติม MB5 ชุดทดลองที่เติม SDS และชุดควบคุมโดยมีค่าเท่ากับ 64.1 93.3 และ 243 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการชูดไบโอฟิล์มออกจากผนังเมื่อเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่เติม MB5 ชุดทดลองที่เติม SDS และชุดควบคุมโดยมีค่าเท่ากับ 90.0, 113 และ 263 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่เติม MB5 และชุดทดลองที่เติม SDS ให้ผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยการเติม MB5 ให้ผลต่างน้อยกว่าเมื่อเติม SDS แสดงให้เห็นว่าการเติม MB5 ให้ประสิทธิภาพในการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายที่ดีกว่าการเติม SDS อย่างไรก็ตามการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกจำเป็นต้องมีการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสม เช่น อัตราการไหลของอากาศเข้าเพื่อให้วัสดุแขวนลอยพลาสติกก่อสภาพของไหล (Fluidization) การออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่เหมาะสมเพื่อลดการติดตัวของตัวกลางพลาสติกในส่วนโค้ง และจำเป็นต้องปรับปรุงความ เข้มแสงให้เหมาะสมเมื่อมีการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ในขณะที่การเติมสารลดแรงตึงผิวง่ายต่อการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเมื่อต้องการขยายขนาด เนื่องจากพิจารณาเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพียงปัจจัยเดียว

เมื่อพิจารณาผลต่างของน้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนและหลังการชุบไปโอฟิล์มออกจากผนังเมื่อเสร็จสิ้นการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร ให้ผลต่างเท่ากับ 4.76% และ 6.97% ตามลำดับ เมื่อเติม MB5 และผลต่างเท่ากับ 7.80% และ 9.85% ตามลำดับ เมื่อเติม SDS จากผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายลดลงเล็กน้อยในทุกชุดทดลอง โดยอาจเป็นผลจากข้อจำกัดของอัตราการไหลของอากาศสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ต่ำกว่า จึงส่งผลต่อสภาพทางอุทกพลศาสตร์ที่สภาวะต่ำกว่าเมื่อมีการขยายขนาด แม้ว่าประสิทธิภาพการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 60 ลิตรจะน้อยกว่าขนาด 2 ลิตร แต่เมื่อพิจารณาอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ขนาด 60 ลิตร ในชุดทดลองที่เติม MB5 และชุดทดลองที่เติม SDS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.38 ± 0.02 และ 0.46 ± 0.06 ต่อวันตามลำดับ (จากตารางที่ 4-3) โดยอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดในการทดลองครั้งนี้สูงกว่างานวิจัยก่อนหน้าซึ่งการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยไม่มีการควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอากาศยกขนาด 60 ลิตร ควบคุมความเข้มแสงที่ 20,000 ลักซ์ ให้อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.20 ± 0.001 ต่อวัน [27]



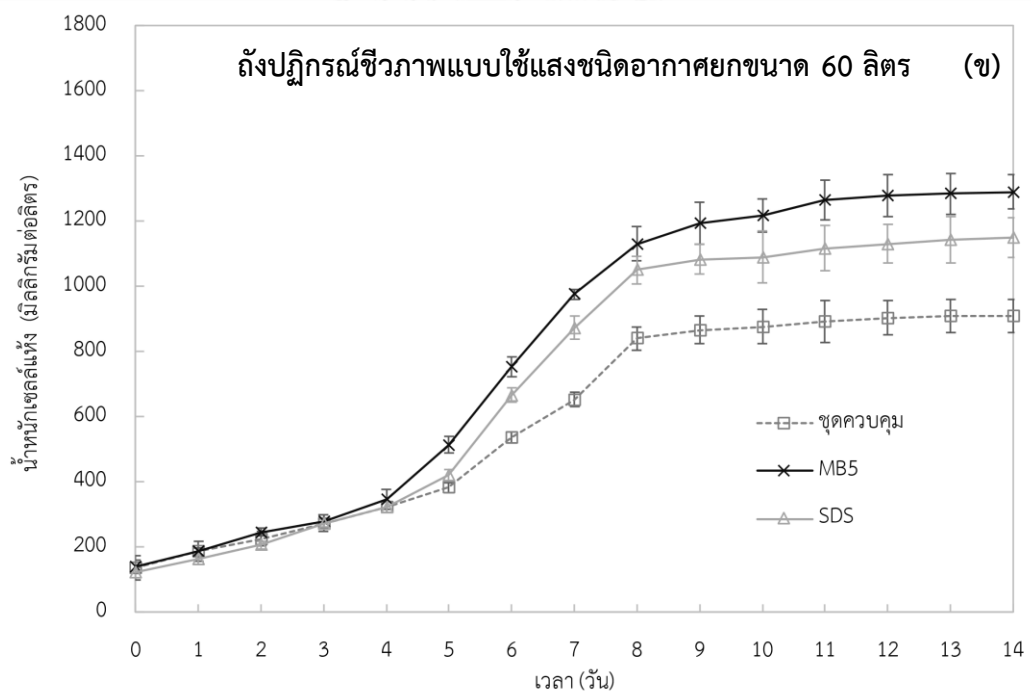
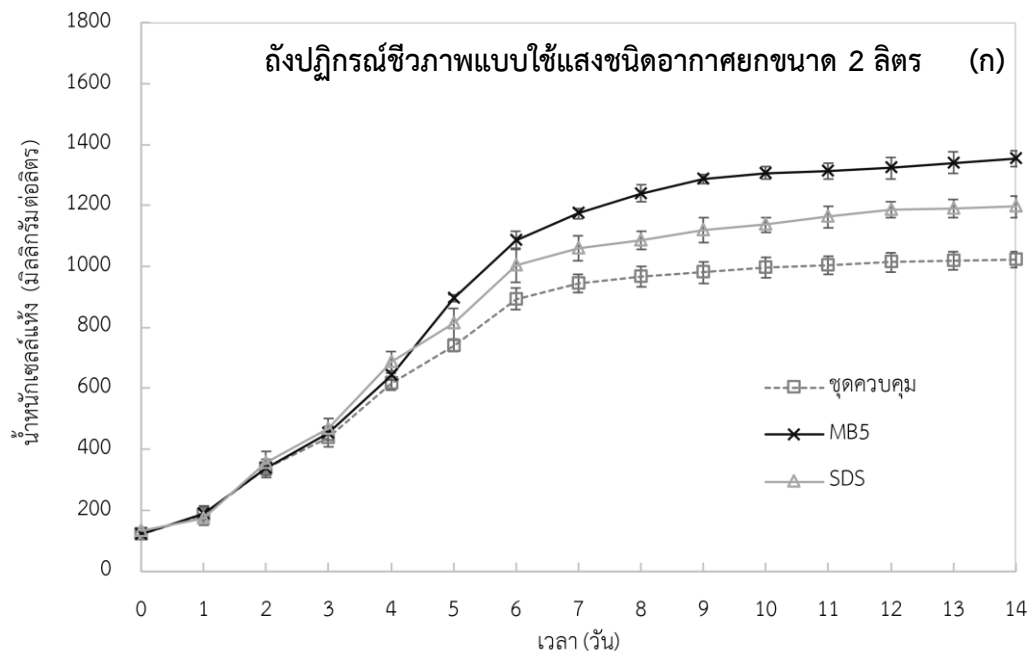
รูปที่ 4-9 น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ก่อนและหลังนำไปโอฟิล์มออกจากผนัง ในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 14) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร

ตารางที่ 4-3 การเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร เมื่อมีการควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย

การเจริญเติบโต	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศ			ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศ		
	ขนาด 2 ลิตร	ขนาด 60 ลิตร		ขนาด 2 ลิตร	ขนาด 60 ลิตร	
	ชุดควบคุม	MB5	SDS	ชุดควบคุม	MB5	SDS
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ	0.34 ± 0.03^a	0.35 ± 0.03^a	0.38 ± 0.02^{ab}	0.34 ± 0.04^a	0.38 ± 0.02^{ab}	0.46 ± 0.06^b
สูงสุด (ต่อวัน)	$1,023 \pm 5.77^a$	$1,345 \pm 12.5^b$	$1,197 \pm 15.3^{ce}$	910 ± 50.3^d	$1,290 \pm 52.9^{be}$	$1,150 \pm 60.0^c$
น้ำหนักแห้ง (วันที่ 14) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	105 ± 3.15^a	139 ± 3.82^b	119 ± 3.82^c	81.1 ± 0.64^d	117 ± 5.13^{ce}	106 ± 4.01^{ae}
ผลผลิตชีวมวล (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)	0.58 ± 0.04^a	0.86 ± 0.03^b	0.72 ± 0.03^{cd}	0.67 ± 0.06^{ac}	0.82 ± 0.04^{bd}	0.74 ± 0.03^{cd}
ผลผลิตแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)	0.90 ± 0.04^a	1.39 ± 0.01^b	1.12 ± 0.02^{cd}	0.96 ± 0.05^{ac}	1.28 ± 0.13^{bd}	1.13 ± 0.07^{cd}
ผลผลิตคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)						

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันบนบรรทัดแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

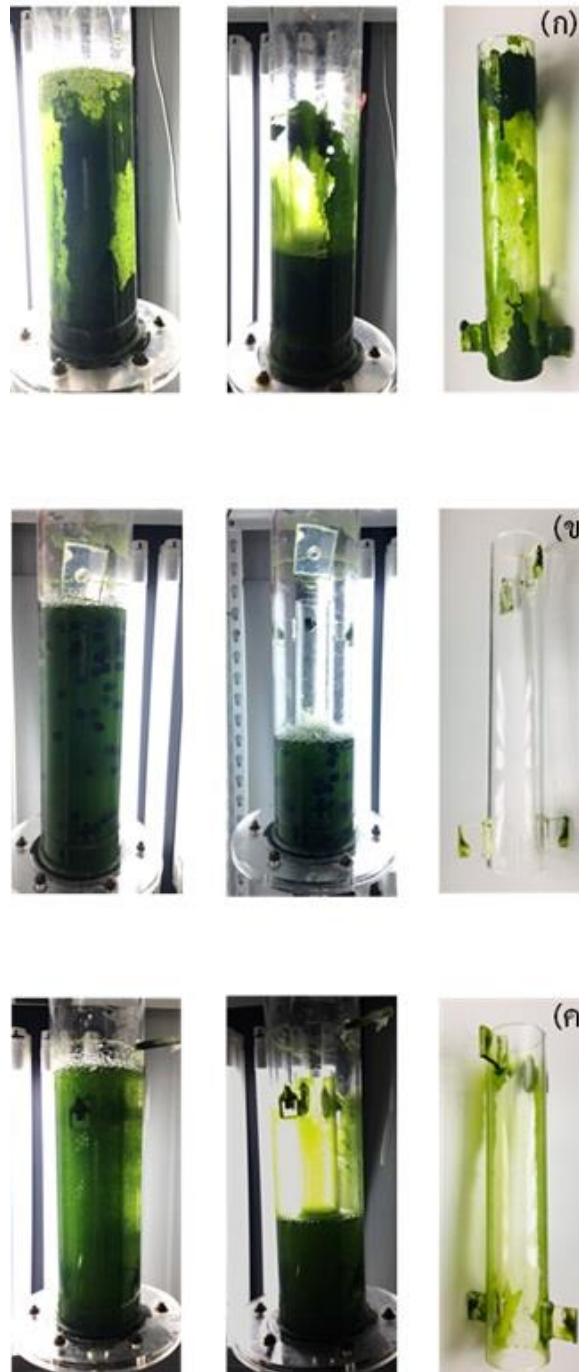
เมื่อพิจารณารูปที่ 4-10 พบว่าน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ขนาด 60 ลิตร มีระยะการปรับตัว (Lag phase) อยู่ในช่วง 0 - 5 วันแรก ในทุกชุดการทดลอง และเข้าสู่ช่วงการเติบโตระยะทวีคูณ ในช่วงวันที่ 6 - 8 โดยผลที่ได้แตกต่างกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งมีระยะการปรับตัวเพียง 0 - 3 วันแรก และเข้าสู่การเติบโตระยะทวีคูณเร็วกว่า (ช่วงวันที่ 4 - 6) โดยระยะการปรับตัวที่นานกว่าเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ขนาด 60 ลิตร อาจเป็นผลจากการส่องผ่านของแสงไปสู่ด้านตรงข้ามของถังปฏิกรณ์ที่ไม่เหมาะสม และปริมาณแสงไม่เพียงพอเนื่องจากระยะส่องผ่านของแสงที่ยาวขึ้นจากการขยายขนาด จึงแนะนำให้มีการปรับปรุงตำแหน่งการให้แสงหรือเพิ่มความเข้มแสงเมื่อถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงมีขนาดใหญ่ขึ้น จากรูปที่ 4-10 แสดงการเกิดไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร (วันที่ 14) จากการสังเกตพบไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายเกาะติดบริเวณท่อกราฟท์และบริเวณพื้นผิวภายในรอบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเป็นจำนวนมากในชุดควบคุม (รูปที่ 4-11 (ก)) ในขณะที่ชุดทดลองซึ่งเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ไม่พบการก่อตัวของไบโอฟิล์มจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง (รูปที่ 4-11 (ข)) และชุดทดลองซึ่งเติม SDS พบการก่อตัวของไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายเล็กน้อยบริเวณท่อ กราฟท์และบริเวณพื้นผิวภายในรอบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง (รูปที่ 4-11 (ค)) ผลที่ได้คล้ายคลึงกันเมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร (รูปที่ 4-12)



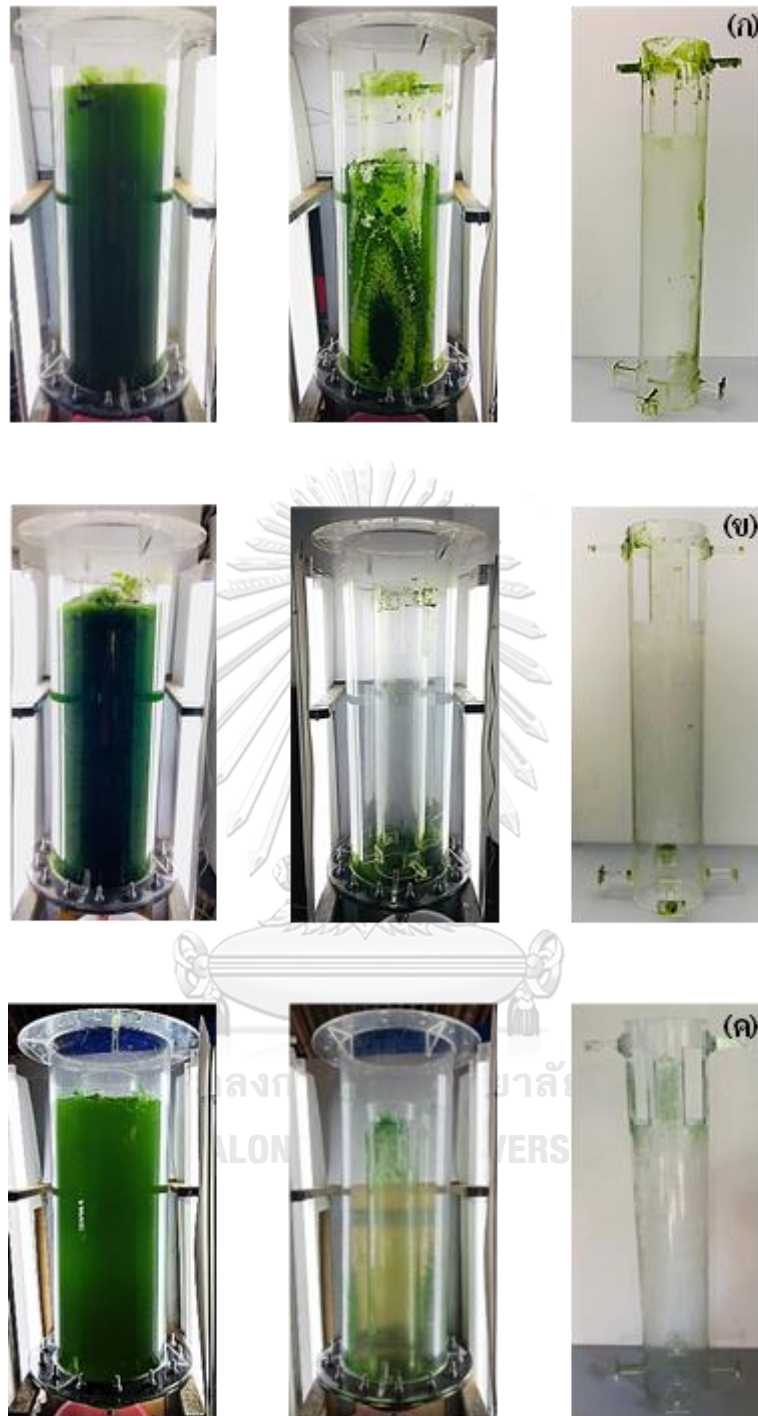
รูปที่ 4-10 จำนวนสปอร์แห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อการควบคุมไปโอฟิล์มของจุลสาหร่าย

(ก) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร

(ข) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร



รูปที่ 4-11 การเกิดไบโอฟิล์มในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร (วันที่ 14)
 (ก) ชุดควบคุม (ข) เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (ค) เติมสารลดแรงตึงผิว SDS



รูปที่ 4-12 การเกิดไบโอฟิล์มในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร (วันที่ 14) (ก) ชุดควบคุม (ข) เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (ค) เต็มสารลดแรงตึงผิว SDS

เมื่อพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์โดยคำนวณต้นทุนเมื่อเติม MB5 และการเติม SDS (ตารางที่ 4-4) ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เพื่อควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย ต้นทุนเหล่านี้ไม่รวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานอื่นๆ เช่น ต้นทุนด้านพลังงานสำหรับการเติมอากาศ ต้นทุนด้านพลังงานการให้แสงสว่าง เนื่องจากทุกชุดทดลองมีต้นทุนดังกล่าวเท่ากัน เมื่อคำนวณต้นทุนทางเคมีสำหรับอาหารเลี้ยงเชื้อ BG-11 และสารละลาย SDS คิดเป็นจำนวน 0.70 และ 0.20 บาทต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ต้นทุนของ MB5 คิดเป็นจำนวน 1.8 บาทต่อลิตร (180 บาทต่อกิโลกรัม) เนื่องจาก SDS ที่เติมเข้าไปในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงมีปริมาตรน้อยดังนั้นอาหารเลี้ยงเชื้อ BG-11 จึงเป็นค่าใช้จ่ายหลักในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 1 กะ จากการคำนวณต้นทุนนี้เห็นได้ชัดว่าการเติม SDS เพื่อควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่ายเพิ่มต้นทุนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพียงเล็กน้อย สำหรับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 1 กะ ในขณะที่ค่าใช้จ่ายสำหรับการเติม MB5 เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 285% อย่างไรก็ตาม MB5 มีความทนทานและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายอาจต้องคำนึงถึงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระยะยาว เมื่อพิจารณาการดำเนินงานหนึ่งปี (ประมาณการเพาะเลี้ยงที่ 30 กะต่อปี) ความแตกต่างของค่าใช้จ่ายเมื่อเติม MB5 และ SDS ลดลงอย่างมากเหลือน้อยกว่า 10 % (ตารางที่ 4-4) ทั้งนี้ต้นทุนของสารเคมีของ SDS และ MB5 สามารถลดลงอีกในการเพาะปลูกเลี้ยงจุลสาหร่ายในเชิงพาณิชย์เนื่องจากการซื้อสารเคมีและวัสดุเหล่านี้ในปริมาณมากมีแนวโน้มของราคาที่ต่ำลง

เมื่อพิจารณาคุณภาพของจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการเติม MB5 และ SDS พบว่าคุณภาพของจุลสาหร่ายไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงโดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ BG-11 เพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ด้วย HPLC พบว่าจุลสาหร่าย *C. humicola* ประกอบด้วยรงควัตถุหลายชนิด รวมถึงคลอโรฟิลล์ ลูทีน เบต้า-แคโรทีน ไวโอลาแซนทีน และนีโอแซนทีน (ตารางที่ 4-5) โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [127, 128] แม้ว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สะสมภายในจุลสาหร่ายมีค่าไม่แตกต่างกันในทุกชุดทดลองอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่ลดลงเมื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดที่ไม่มีการควบคุมไบโอฟิล์มจุลสาหร่าย ซึ่งความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่ลดลงสอดคล้องกับการนำหนักแห้งของจุลสาหร่ายที่ลดลง อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดลองนี้ไม่พบแอสตาแซนทีน โดยมีรายงานพบปริมาณแอสตาแซนทีนที่สูงในจุลสาหร่าย *Chlorococcum* sp. เมื่อเพาะเลี้ยงในสภาวะเครียด เช่น สภาวะจำกัดไนโตรเจน ความเข้มของแสงสูง และสารอนุมูลอิสระ [15, 129, 130] ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ไนโตรเจน (N), และซิลเฟอร์ (S) ในจุลสาหร่ายแห่งนี้พบว่าจะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4-6) เมื่อเพาะเลี้ยงร่วมกับการเติม MB5 และ SDS การสังเกตนี้สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์แคโรทีนอยด์ ดังนั้นการเติม MB5

และการเติม SDS ไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อเติม MB5 5% ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 2 ลิตร ให้ความเข้มข้นแห้งจุลสาหร่ายก่อนการชุดที่ $1,353 \pm 25.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 32.2% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ($1,023 \pm 25.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร) ในขณะที่การเติม SDS ให้น้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายสูงที่สุดเท่ากับ $1,197 \pm 35.1$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 16.9% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้เมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 60 ลิตร การเติม MB5 5% ให้น้ำหนักแห้งจุลสาหร่ายก่อนการชุดเท่ากับ $1,290 \pm 52.9$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 41.8% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (910 ± 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในขณะที่การเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ให้น้ำหนักแห้งสูงที่สุดเท่ากับ $1,150 \pm 60.0$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 26.4% เมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโต ผลผลิตจุลสาหร่าย และผลผลิตแคโรทีนอยด์ (ตารางที่ 4-4) พบว่าการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจาก 2 ลิตร เป็นขนาด 60 ลิตร มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และการใช้สารลดแรงตึงผิว SDS ให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงที่สูงที่สุด นอกจากนี้ประเด็นที่สำคัญของการใช้งานวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 คือความสะดวกในการเก็บเกี่ยวผลผลิตจุลสาหร่ายหลังจากสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยเมื่อหยุดการเป่าอากาศจะพบว่าวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำดังรูปที่ 4-13 ขณะที่เซลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* เริ่มจมตัวลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ส่งผลให้เกิดการแยกระหว่างวัสดุแขวนลอยพลาสติกและผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายอย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการเก็บเกี่ยวเซลล์ของจุลสาหร่าย



รูปที่ 4-13 การเก็บเกี่ยวจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 60 ลิตร เมื่อหยุดเติมอากาศ

ตารางที่ 4-4 ปริมาณของอาหารเลี้ยงเชื้อ BG-11 วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และสารลดแรงตึงผิว SDS และต้นทุนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้ชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร

รายการ	การควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย		
	ไม่มีการควบคุม	เติม SDS	เติม MB5
การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 1 กะ			
ปริมาตรอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 (ลิตร)	54.0	54.0	54.0
ปริมาตรสารลดแรงตึงผิว SDS (ลิตร)	-	0.06	-
มวลวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (กิโลกรัม)	-	-	0.60
ราคาอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 (บาท)	37.8	37.8	37.8
ราคาสารลดแรงตึงผิว SDS (บาท)	-	0.20	-
ราคาวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (บาท)	-	-	108.0
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	37.8	38.8	145.8
การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 30 กะ			
ราคาอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 (บาท)	1,134	1,134	1,134
ราคาสารลดแรงตึงผิว SDS (บาท)	-	6.00	-
ราคาวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 (บาท)	-	-	108.0
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	1,134	1,140	1,242

หมายเหตุ: 1) ต้นทุนอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 0.70 บาทต่อลิตร, ต้นทุนสารลดแรงตึงผิว SDS 3.33 บาทต่อลิตร, ต้นทุนวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 180 บาทต่อกิโลกรัม 2) วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 เติมเข้าไปเพียงครั้งเดียวและนำมาใช้ซ้ำในการเพาะเลี้ยงกะต่อไป

ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบของรงควัตถุภายในจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เมื่อมีการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย

รงควัตถุ	การควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย		
	ไม่มีการควบคุม	เติม MB5	เติม SDS
ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	10.9 ± 0.71 ^a	15.2 ± 0.67 ^b	14.2 ± 0.48 ^b
ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	11.9 ± 0.51 ^a	11.81 ± 0.51 ^a	12.3 ± 0.27 ^a
ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	6.96 ± 0.81 ^a	8.51 ± 0.22 ^b	7.92 ± 0.47 ^c
ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	6.56 ± 1.03 ^a	6.61 ± 0.39 ^a	6.60 ± 0.26 ^a
ลูทีน (% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด)	29.93	27.07	27.07
เบต้า-แคโรทีน (% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด)	5.89	5.07	5.51
ไวโอลาแซนทีน (% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด)	18.47	16.34	16.82
นีโอแซนทีน (% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด)	42.41	43.76	44.18
ไม่ระบุ	6.30	10.44	8.27

หมายเหตุ: ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4-6 องค์ประกอบ C H N ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เมื่อมีการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย

องค์ประกอบธาตุ	การควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย		
	ไม่มีการควบคุม	เติม MB5	เติม SDS
C (% ของน้ำหนักแห้ง)	44.70 ± 0.37 ^a	45.35 ± 0.62 ^a	44.61 ± 0.41 ^a
H (% ของน้ำหนักแห้ง)	6.73 ± 0.15 ^a	7.23 ± 0.51 ^a	6.83 ± 0.29 ^a
N (% ของน้ำหนักแห้ง)	6.47 ± 0.03 ^a	6.87 ± 0.13 ^a	6.72 ± 0.08 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์เพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum*

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูงในระบบปิดมีระบบหมุนเวียนน้ำช่วยบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งนิยมใช้เทคโนโลยีตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน (Nitrifying biofilter) เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรท์ให้เป็นไนเตรทซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามการสะสมของไนเตรทในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในปริมาณสูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ [4] จำเป็นต้องมีการถ่ายน้ำออกจากระบบเลี้ยงเพื่อลดความเข้มข้นของไนเตรท จึงมีแนวคิดในการนำจุลสาหร่ายมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำมีองค์ประกอบของธาตุอาหารส่วนเกินจากถังบำบัดไนตริฟิเคชัน เนื่องจากมีธาตุอาหารซึ่งจุลสาหร่ายใช้เพื่อการเจริญเติบโต เกิดผลพลอยได้จากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตชีวมวล และใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารอย่างคุ้มค่าถือเป็นข้อได้เปรียบของการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตจากวิธีการอื่น

การทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์เพื่อการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการศึกษานี้ นำมาจากถังบำบัดไนตริฟิเคชันในระบบเพาะเลี้ยงปลาชนิดแบบปิด ศูนย์วิจัยและพัฒนาพันธุ์กรรมสัตว์น้ำปทุมธานี สมบัติของน้ำดังตาราง 4-7 โดยงานวิจัยในอดีตซึ่งนำน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายจะมุ่งเน้นการทดลองขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ด้วยระยะเวลาการทดลองสั้น [131] หรือการใช้น้ำผ่านการฆ่าเชื้อโรคในห้องปฏิบัติการ [97, 99, 132] แต่ยังคงขาดการทดลองในสภาวะจริง เช่น จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่

อาการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิตในน้ำที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย [133] หรือที่มีสารอาหารไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยละเอียด การทดลองประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาการเตรียมน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขึ้นต้นเพื่อให้สามารถนำมาใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* และ 2) การปรับปรุงธาตุอาหารและศึกษาศักยภาพของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola*

ตารางที่ 4-7 สมบัติของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola*

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น	หน่วย
ไนเตรท	72.5 ± 6.42	มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร
ไนไตรท์	0.035 ± 0.001	มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร
แอมโมเนียรวม	0.068 ± 0.001	มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร
ฟอสเฟต	3.67 ± 0.11	มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย	10.6 ± 2.51	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีไอดี	54.3 ± 8.61	มิลลิกรัมต่อลิตร

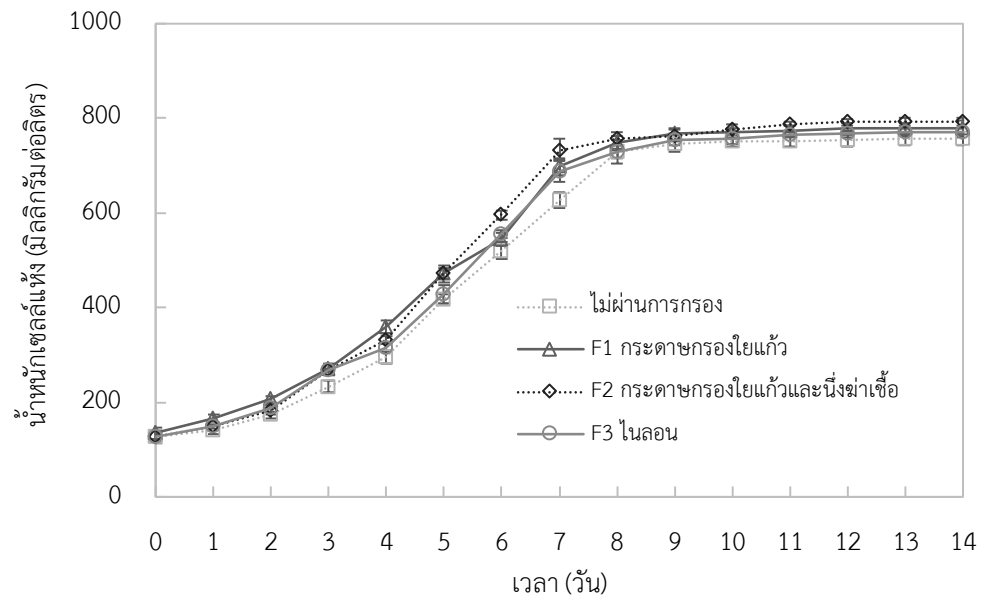
4.2.1 การเตรียมน้ำขึ้นต้นจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อใช้เลี้ยงจุลสาหร่าย

น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งถูกบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันอาจมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบกระบวนการเตรียมน้ำขึ้นต้นสำหรับใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยได้ทำการทดสอบกระบวนการเตรียมน้ำทั้งหมด 3 ชุดทดลอง ได้แก่ การกรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F1) การกรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปผ่านเครื่องนึ่งแรงดันไอน้ำ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที (F2) และการกรองน้ำด้วยผ้ากรองไนลอนที่มีขนาดรูกรอง 20 ไมโครเมตร (F3) โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ได้แก่ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่ผ่านการกรอง จากนั้นทำการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% และเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร ผสมหัวเชื้อจุลสาหร่ายปริมาตร 0.2 ลิตร โดยระหว่างการทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วิวีเอ็ม ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในวันที่ 14 ในชุดทดลอง F1 F2 F3 และชุดควบคุม เท่ากับ 778 ± 17.6 ,

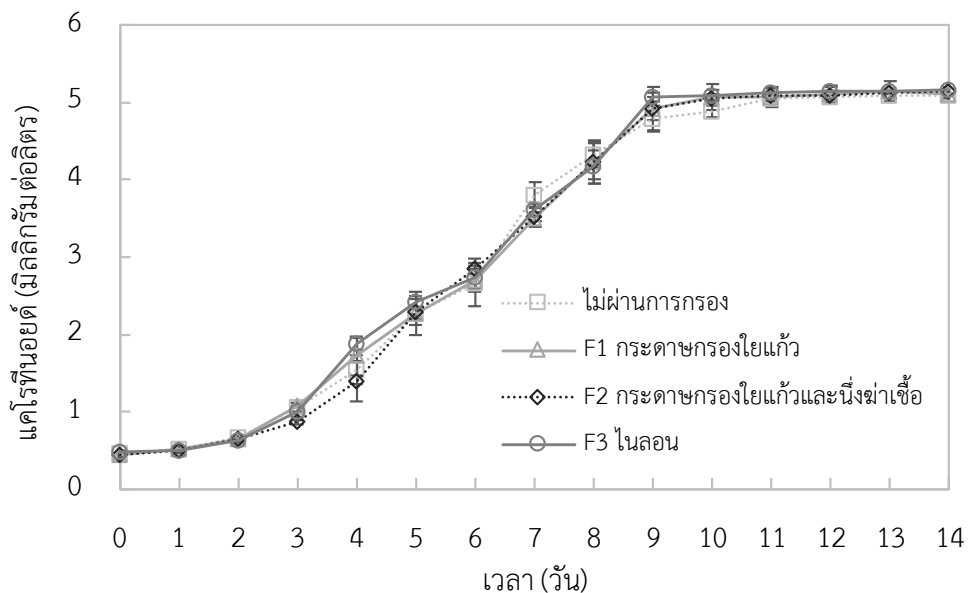
793 ± 7.60, 770 ± 7.66 และ 757 ± 12.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4-14) และความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่ายในวันที่ 14 ในชุดทดลอง F1 F2 F3 และชุดควบคุม เท่ากับ 3.11 ± 0.05, 3.14 ± 0.03, 3.17 ± 0.02 และ 3.09 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4-15) โดยน้ำหนักแห้งและความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่ายระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งให้เห็นว่าน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้สามารถใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมน้ำขึ้นต้นได้แก่ การกรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว การกรองด้วยไนลอน รวมไปถึงกระบวนการนิ่งเพื่อฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากให้น้ำหนักแห้งและความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่ายไม่แตกต่างกัน ถือเป็นข้อได้เปรียบอย่างยิ่งเนื่องจากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในห้องปฏิบัติการจะทำการฆ่าเชื้อโรคอาหารเลี้ยงที่นำมาใช้เพาะเลี้ยงด้วยการนิ่งฆ่าเชื้อโรคก่อนทำการเพาะเลี้ยงซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Han (2016) ซึ่งทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* ในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การตกตะกอน การใช้อัลตราโซนิก และการนิ่งฆ่าเชื้อด้วยแรงดันไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดในแต่ละวิธีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าจุลสาหร่าย *S. obliquus* สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกตะกอนโดยไม่จำเป็นต้องนิ่งฆ่าเชื้อด้วยแรงดันไอน้ำ [134]

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นไนเตรทของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายพบว่ามีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 73.5 ± 1.06 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร จากนั้นความเข้มข้นลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง สามารถตรวจวัดเข้มข้นไนเตรทในชุดทดลอง F1 F2 F3 และชุดควบคุมได้ 8.86 ± 1.51, 10.1 ± 1.82, 8.01 ± 2.64 และ 6.32 ± 1.23 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4-16) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่าความเข้มข้นไนเตรทลดลง 86.1% - 91.4% ในขณะที่ความเข้มข้นฟอสเฟตของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 3.56 ± 0.04 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร จากนั้นความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก ความเข้มข้นฟอสเฟตวันสุดท้ายของชุดทดลอง F1 F2 F3 และชุดควบคุม มีค่าเท่ากับ 0.44 ± 0.07, 0.39 ± 0.11, 0.51 ± 0.02 และ 0.27 ± 0.03 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4-17) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่าความเข้มข้นฟอสเฟตลดลง 85.9 - 92.8 % ทั้งนี้ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการใช้สารอาหารของจุลสาหร่ายในแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกัน

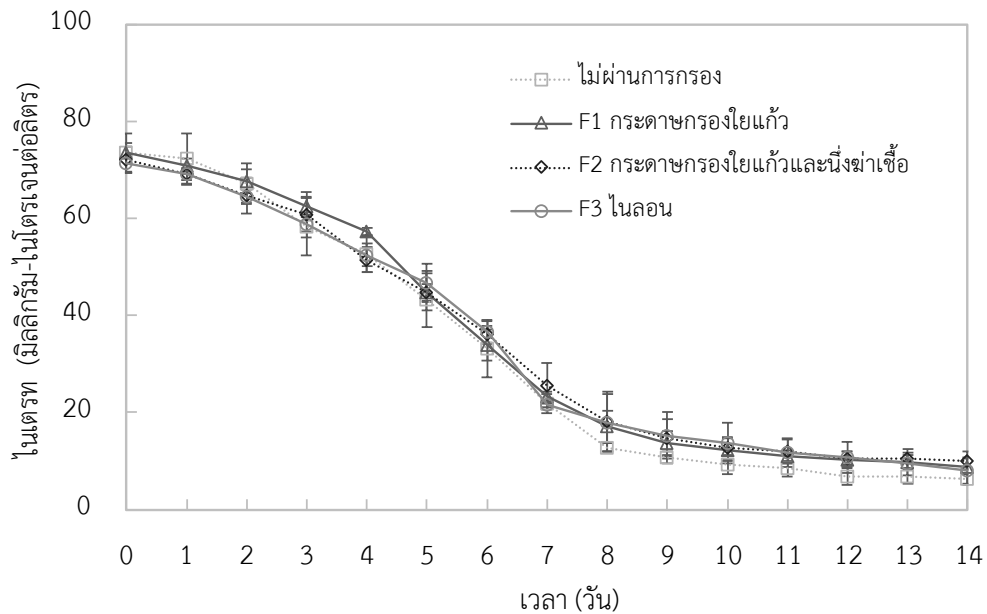
เมื่อพิจารณาผลการการเจริญเติบโตและการใช้สารอาหารของจุลสาหร่ายระหว่างชุดทดลอง และชุดควบคุมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ไม่มีองค์ประกอบของจุลินทรีย์ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายหรือจุลินทรีย์ที่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในทุกชุดทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีรายงานว่าจุลินทรีย์บางชนิดสามารถส่งเสริมการตรึงไนโตรเจนและจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนบางชนิดสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายโดยการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตจากการหายใจและการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ [135] นอกจากนี้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีของแข็งแขวนลอยต่ำ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในแง่ของการขัดขวางการส่องผ่านของแสงแม้ในชุดทดลองที่ไม่ผ่านการกรอง [136] อย่างไรก็ตามมีรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ระบุว่าจุลสาหร่ายสามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารในของแข็งแขวนลอยหรือตะกอนสำหรับการเจริญเติบโตได้ เนื่องจากตะกอนอาจมีการสะสมของธาตุอาหารของจุลสาหร่าย [137] แม้ว่าการเตรียมน้ำขึ้นต้นไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการใช้สารอาหารของจุลสาหร่าย แต่เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น การปนเปื้อนของโรติเฟอร์ซึ่งมีขนาดประมาณ 40 ไมครอน ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้วิธีการเตรียมน้ำขึ้นต้นด้วยการกรองโดยใช้ผ้ากรองไนลอนขนาด 20 ไมครอน เนื่องจากสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบเพาะเลี้ยงขนาดใหญ่ได้ง่าย



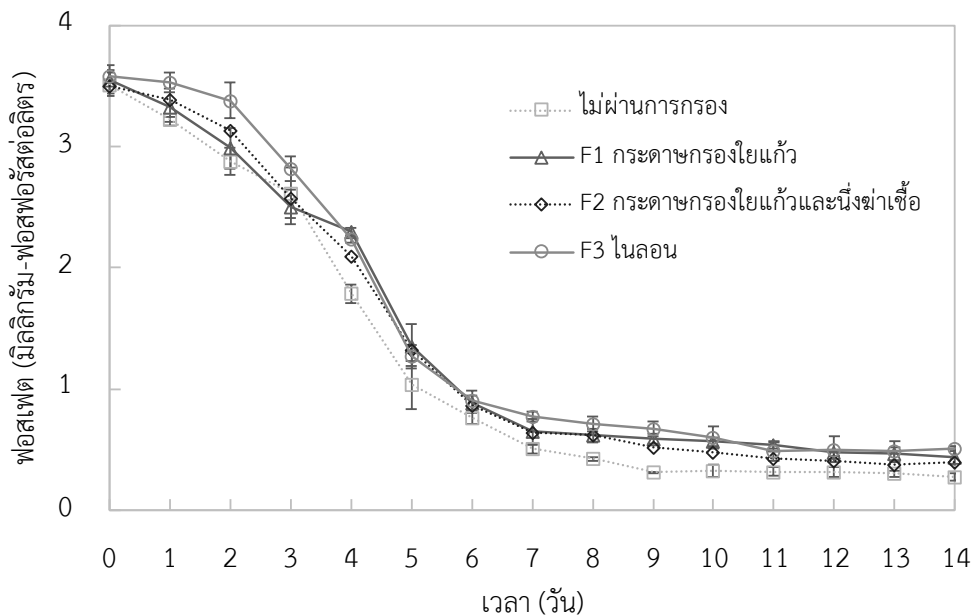
รูปที่ 4-14 จำนวนสปอร์เชื้อราของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการเตรียมน้ำขั้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระจกกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระจกกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 4-15 ความเข้มข้นแคโรทีนอยต์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการเตรียมน้ำขั้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระจกกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระจกกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 4-16 ความเข้มข้นไนเตรทในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยการเตรียมน้ำขึ้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วและนึ่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 4-17 ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยการเตรียมน้ำขึ้นต้น (F1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (F2) กรองน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้วและนึ่งฆ่าเชื้อ (F3) กรองน้ำด้วยไนลอน และชุดควบคุมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร

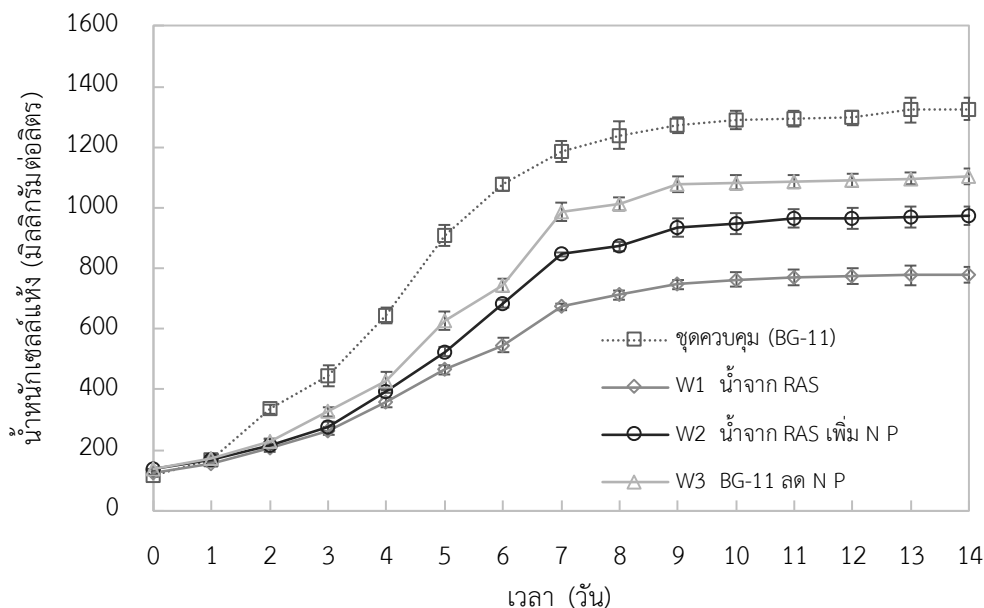
4.2.2 การปรับปรุงธาตุอาหารของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองในส่วนนี้ศึกษาการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่าย ชุดทดลองประกอบด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (W1) น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เพิ่มความเข้มข้นไนเตรทและฟอสเฟตให้เทียบเท่าอาหารสูตร BG-11 (W2) อาหารสูตร BG-11 ที่ปรับความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตให้เท่ากับความเข้มข้นของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยยังคงธาตุอาหารรองและธาตุอาหารที่จำเป็นในปริมาณน้อย (Trace elements) เท่าเดิม (W3) และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11) เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรเพาะเลี้ยง ระหว่างการทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงที่ 0.8 วีวีเอ็ม ตารางที่ 4-8 แสดงสมบัติของน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 4-8 สมบัติของน้ำในแต่ละชุดทดลอง

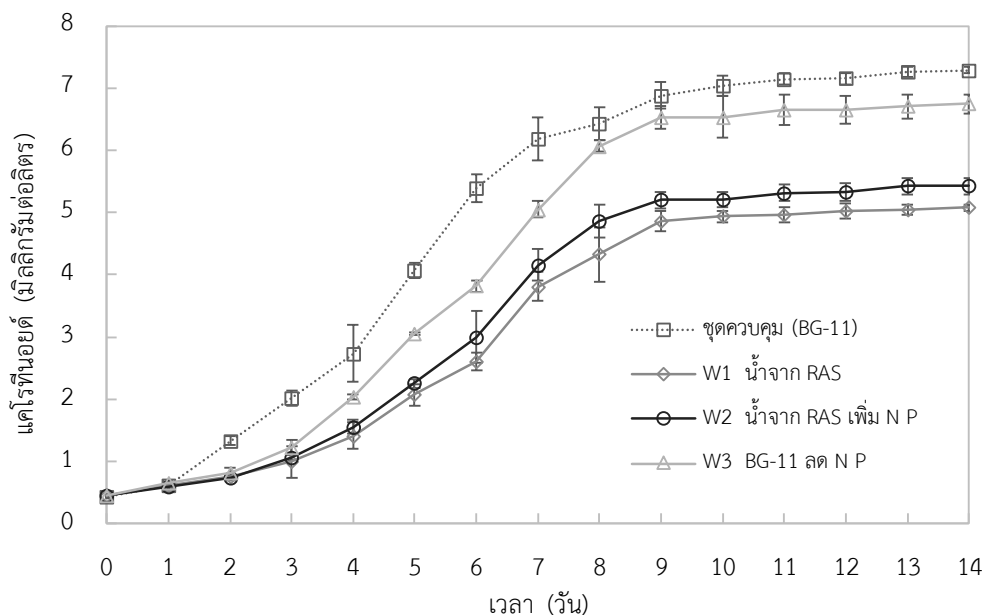
พารามิเตอร์	BG-11 (ชุดควบคุม)	น้ำจากระบบ เพาะเลี้ยง สัตว์น้ำ (W1)	น้ำจากระบบ เพาะเลี้ยงสัตว์ น้ำเพิ่ม N P (W2)	BG-11 ลด N P (W3)
ไนเตรท (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)	257.1 ± 8.00	72.5 ± 6.42	252.5 ± 8.95	68.4 ± 2.00
ไนไตรท์ (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)	0.013 ± 0.002	0.035 ± 0.001	0.035 ± 0.005	0.015 ± 0.002
แอมโมเนียรวม (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)	0.049 ± 0.004	0.068 ± 0.001	0.067 ± 0.006	0.035 ± 0.004
ฟอสเฟต (มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร)	6.35 ± 0.01	3.67 ± 0.11	6.54 ± 0.13	3.59 ± 0.11
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	10.6 ± 2.51	12.3 ± 2.52	-
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	54.3 ± 8.61	48 ± 5.00	-

ผลการติดตามการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* พบว่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดไม่มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4-9) และเมื่อพิจารณาน้ำหนักแห้งสูงสุด (วันที่ 14) ดังแสดงในรูปที่ 4-18 พบว่าชุดควบคุมให้น้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ $1,327 \pm 37.9$ มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ชุดทดลอง W1 ให้น้ำหนักแห้งต่ำสุดเท่ากับ 780 ± 26.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากชุดทดลอง W1 ใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งความเข้มข้นไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 65.1 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุม 70% และความเข้มข้นฟอสเฟตที่เริ่มต้นเพียง 3.57 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ต่ำกว่าชุดควบคุม 40% โดยเมื่อคำนวณการใช้ไนโตรเจนและฟอสเฟตของจุลสาหร่ายตลอดระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน ในชุดควบคุมพบว่าจุลสาหร่ายใช้ความเข้มข้นไนโตรเจนเท่ากับ 102.8 ± 5.9 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร และความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 6.41 ± 0.08 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ดังนั้นความเข้มข้นไนโตรเจนและฟอสเฟตในชุดทดลอง W1 จึงไม่เพียงพอต่อการใช้ธาตุอาหารของจุลสาหร่าย อีกทั้งไม่มีการเติมธาตุอาหารรองและธาตุอาหารที่จำเป็นในปริมาณน้อยที่จุลสาหร่ายต้องการ โดยธาตุอาหารดังกล่าวมีส่วนช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ เช่น ธาตุเหล็กมีส่วนช่วยดูดซึมไนโตรเจน และเป็นองค์ประกอบของรงควัตถุ [138] แมงกานีสเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสาหร่ายเซลล์เดียวหลายชนิดเนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย มีรายงานว่า การเติมแมงกานีสลงในอาหารเลี้ยงจุลสาหร่ายส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเติบโตของจุลสาหร่าย [139] โดยเมื่อพิจารณาน้ำหนักแห้งในชุดทดลอง W2 แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นไนโตรเจนและฟอสเฟตให้เทียบเท่าอาหารสูตร BG-11 แต่เนื่องจากไม่มีการเติมธาตุอาหารรองและธาตุอาหารที่จำเป็นในปริมาณน้อย จึงอาจเป็นสาเหตุให้น้ำหนักแห้งในชุดทดลอง W2 ต่ำกว่าชุดควบคุม อย่างไรก็ตามแม้ว่าน้ำหนักแห้งสูงสุดในชุดทดลอง W1 และ W2 ที่ได้จะแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ผลที่ได้ก็เทียบเคียงกับการทดลองก่อนหน้าโดย ภูไพรัมย์ ภูไพบูลย์ (2559) เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้อาหารเพาะเลี้ยง BG-11 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ในช่วงเริ่มต้นถึงทวีคูณและปรับเพิ่มความเข้มแสงเป็น 100,000 ลักซ์ ให้น้ำหนักแห้งเท่ากับ 880 มิลลิกรัมต่อลิตร [23]

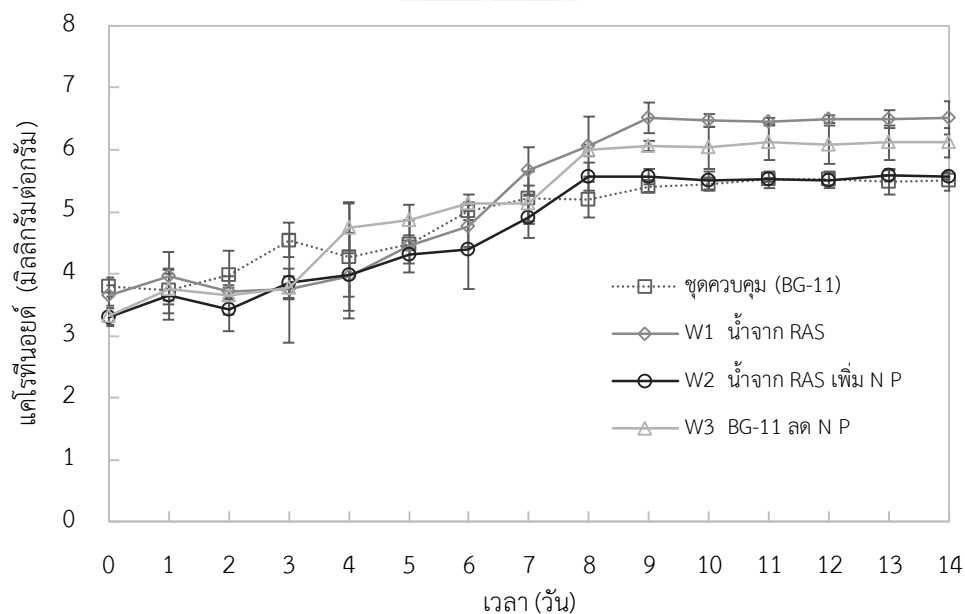


รูปที่ 4-18 น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้ น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับ จุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ดังแสดงในรูปที่ 4-19 พบว่าชุดควบคุมให้ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ในวันที่ 14 สูงสุดเท่ากับ 7.29 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ชุดทดลอง W1 ให้เข้มข้นแคโรทีนอยด์ในวันที่ 14 ต่ำสุดเท่ากับ 5.08 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายพบว่าชุดทดลอง W1 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 6.51 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และรองลงมาคือชุดทดลอง W3 เท่ากับ 6.11 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดทดลอง W2 มีค่าเท่ากับ 5.50 ± 0.16 และ 5.58 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากชุดทดลอง W1 และ W3 มีความเข้มข้นไนโตรเจนในปริมาณจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นไนโตรเจนลดลงจะส่งผลให้ความสามารถในการผลิตแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* เพิ่มขึ้น [18] เมื่อพิจารณาจากรูป 4-19 พบว่าในช่วงแรกของการเพาะเลี้ยง (วันที่ 0 - 7) ปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อน้ำหนักแห้งในแต่ละชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน จนกระทั่งวันที่ 8 - 14 พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อน้ำหนักแห้งในชุดทดลอง W1 และ W3 เพิ่มขึ้นจนกระทั่งสูงกว่าชุดควบคุมและชุดทดลอง W2 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนโตรเจนใน W1 และ W3 ซึ่งลดต่ำลงจนเกิดภาวะจำกัดไนโตรเจน โดยมีการศึกษาก่อนหน้านี้รายงานว่า การขาดไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยง สามารถส่งผลให้จุลสาหร่าย *Chlorococcum* sp. เกิดความเครียดและผลิตแคโรทีนอยด์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้นได้ [28]



รูปที่ 4-19 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้ น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)



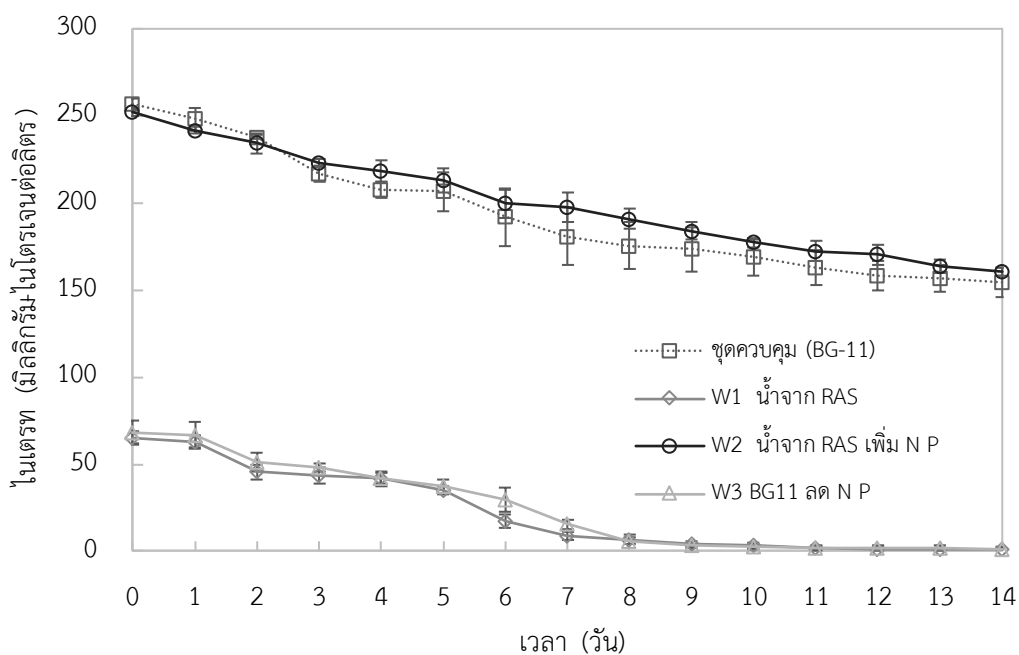
รูปที่ 4-20 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้ น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)

รูปที่ 4-21 และ 4-22 แสดงความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย เมื่อพิจารณาการใช้ธาตุอาหารไนเตรทของจุลสาหร่ายในชุดควบคุม (ในอาหารสูตร BG-11) ซึ่งมีความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นเท่ากับ 257.3 ± 3.05 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร โดยในระยะเริ่มต้นจนถึงระยะการเติบโตแบบทวีคูณ (วันที่ 0 - 8) จุลสาหร่ายใช้ในเตรทเท่ากับ 81.8 ± 10.6 มิลลิกรัม-ไนโตรเจน ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายเท่ากับ 154.5 ± 8.4 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร คิดเป็นความเข้มข้นทั้งหมดที่ใช้ไปเท่ากับ 102.8 ± 5.9 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4-21) สำหรับความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 6.58 ± 0.08 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร โดยระยะเริ่มต้นจนถึงระยะการเติบโตแบบทวีคูณ (วันที่ 0 - 8) จุลสาหร่ายใช้ฟอสเฟตเข้มข้นเท่ากับ 6.35 ± 0.05 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงเท่ากับ 0.17 ± 0.01 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร คิดเป็นความเข้มข้นทั้งหมดที่ใช้ไปเท่ากับ 6.41 ± 0.08 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร (รูปที่ 4-22) ชุดทดลอง W1 มีความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 65.08 ± 4.19 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายเท่ากับ 0.74 ± 0.97 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร และความเข้มข้นฟอสเฟสเท่ากับ 3.57 ± 0.06 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงเท่ากับ 0.31 ± 0.01 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ชุดทดลอง W2 ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 252.5 ± 2.24 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายเท่ากับ 160.8 ± 2.44 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตรและความเข้มข้นฟอสเฟสเท่ากับ 6.54 ± 0.17 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงเท่ากับ 0.27 ± 0.01 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร และชุดทดลอง W3 ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 68.4 ± 6.56 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายเท่ากับ 1.07 ± 1.31 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร และความเข้มข้นฟอสเฟสเท่ากับ 3.59 ± 0.06 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลือในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงเท่ากับ 0.33 ± 0.03 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร

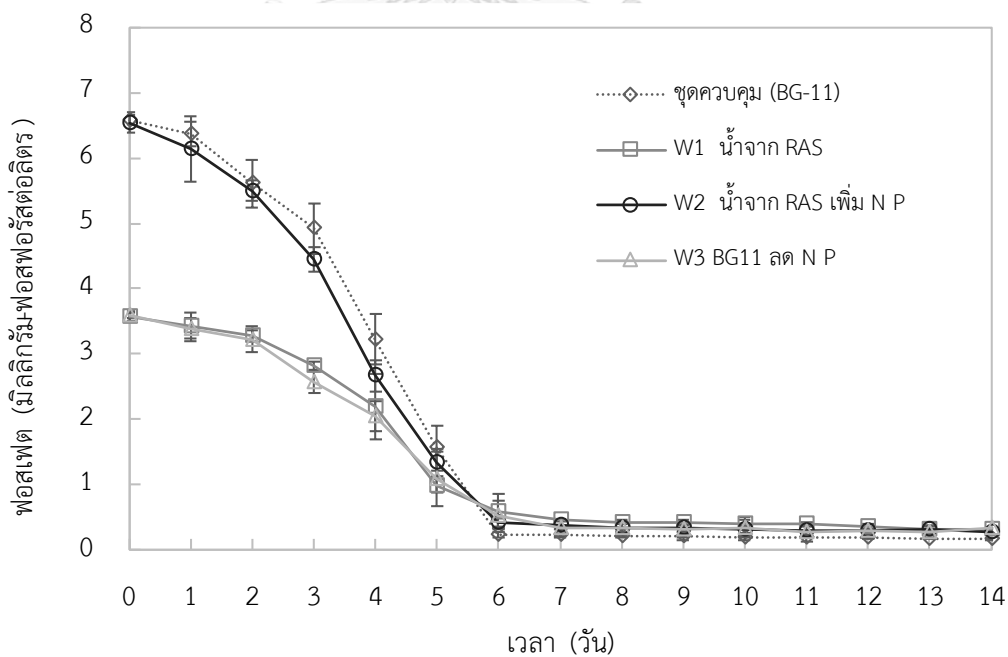
จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นไนเตรทในชุดทดลอง W1 และ W3 ไม่เพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดที่ใช้ไปในชุดควบคุม (102.8 ± 5.9 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) ขณะที่ความเข้มข้นไนเตรทในชุดควบคุมและชุดทดลอง W2 ที่จุลสาหร่ายใช้เพื่อการเจริญเติบโตคิดเป็น 37% - 40% ของความเข้มข้นเริ่มต้นเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นไนเตรทมากเกินไปเกินความต้องการของจุลสาหร่าย โดยมีรายงานวิจัยแนะนำสูตรอาหารมาตรฐานที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายควรมีอัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (N:P) สูงกว่า 16:1 เพื่อให้จุลสาหร่ายมีการเจริญเติบโตปกติและไม่ขาดแคลนธาตุอาหาร [140] โดยอ้างอิงจากองค์ประกอบทั่วไปในจุลสาหร่ายมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P$ ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 16:1

[141] เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในชุดควบคุมและชุดทดลอง W2 พบว่ามีอัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 100:1 ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมไนโตรเจนมากกว่าอัตราส่วนที่แนะนำมากเกินไป อย่างไรก็ตามหากพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในชุดทดลอง W1 และ W3 พบว่าชุดทดลองทั้งสองมีอัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 43:1 ซึ่งถือว่าเพียงพอเช่นกัน แต่เนื่องจากปริมาณของฟอสฟอรัสซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำเกินไป จึงไม่เพียงพอต่อการใช้ของจุลสาหร่าย เนื่องจากฟอสฟอรัสมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างกรดนิวคลีอิก เมื่ออยู่ในสภาวะจำกัดฟอสฟอรัส และอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพด้วยแสงของจุลสาหร่าย [142]

เมื่อพิจารณาผลการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายจากตาราง 4-8 แม้ว่าการใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะให้ผลผลิตต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น แต่ในแง่ของการใช้ประโยชน์จากน้ำทิ้งที่เกิดจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนการผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายจัดเป็นการใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารอย่างคุ้มค่า ช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และลดการปล่อยธาตุอาหารส่วนเกินลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยปัจจุบันมักใช้ตัวกรองชีวภาพดีไนตริฟิเคชัน (Denitrifying biofilter) [6, 7] ซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบและดำเนินงาน และจำเป็นต้องใช้บุคลากรควบคุมระบบที่มีความรู้และประสบการณ์ [4, 8] นอกจากนี้การใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายยังช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการใช้อาหารสูตร BG-11 ได้ถึง 527.50 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตน้ำหนักแห้งจุลสาหร่าย จากการคำนวณต้นทุนด้านสารเคมีพบว่าค่าใช้จ่ายสารเคมีเพื่อผลิตอาหารสูตร BG-11 ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็นค่าใช้จ่ายหลักในด้านสารเคมี ดังนั้นน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีศักยภาพที่จะนำมาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตามการเพาะเลี้ยงที่ต้องการผลผลิตจุลสาหร่ายสูงมีข้อเสนอแนะให้เพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ในแต่ละรอบการเพาะเลี้ยง โดยความเข้มข้นฟอสเฟตที่แนะนำเท่ากับ 6.35 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นเท่ากับในอาหารสูตร BG-11 และความเข้มข้น ไนเตรทที่แนะนำเท่ากับ 105 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่จุลสาหร่ายใช้อย่างเพียงพอโดยอ้างอิงจากผลการทดลองในชุดทดลอง W1 (อาหารสูตร BG-11) โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มความเข้มข้นให้สูงเทียบเคียงอาหารสูตร BG-11 เนื่องจากความเข้มข้นไนเตรทในอาหารสูตร BG-11 มีปริมาณมากเกินไปสำหรับการใช้ของจุลสาหร่าย การเพิ่มความเข้มข้นไนเตรทที่สูงเกินไปอาจนำไปสู่การสูญเสียสารอาหารที่มีราคาสูงโดยไม่จำเป็น



รูปที่ 4-21 ความเข้มข้นไนเตรทเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)



รูปที่ 4-22 ความเข้มข้นฟอสเฟตเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อเพาะเลี้ยงในชุดทดลองที่ใช้น้ำเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11)

ตารางที่ 4-9 ข้อมูลการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (W1) น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เพิ่มความเข้มข้นไนเตรทและฟอสเฟตเท่ากับอาหาร BG-11 (W2) อาหาร BG-11 ที่ลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตเท่ากับค่าความเข้มข้นของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (W3) และชุดควบคุม

การเจริญเติบโต	ชุดควบคุม (BG-11)	น้ำจากระบบ เพาะเลี้ยง สัตว์น้ำ (W1)	น้ำจากระบบ เพาะเลี้ยงสัตว์ น้ำเพิ่ม N P (W2)	BG-11 ลด N P (W3)
อัตราการเจริญเติบโต	0.37 ± 0.04^a	0.30 ± 0.07^a	0.35 ± 0.05^a	0.38 ± 0.02^a
จำเพาะสูงสุด (ต่อวัน)				
น้ำหนักแห้ง (วันที่ 14) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1,327 \pm 37.9^a$	780 ± 26.5^c	973 ± 30.6^d	$1,103 \pm 25.2^b$
ผลผลิตชีวมวล (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)	140.4 ± 5.64^a	73.8 ± 2.17^c	92.1 ± 2.60^d	109.5 ± 2.60^b
ผลผลิตคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)	1.08 ± 0.01^a	0.66 ± 0.02^c	0.79 ± 0.01^d	0.86 ± 0.01^b
ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.29 ± 0.06^a	5.08 ± 0.05^c	5.43 ± 0.13^d	6.74 ± 0.16^b
ปริมาณแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.56 ± 0.02^a	0.62 ± 0.08^b	0.57 ± 0.02^a	0.64 ± 0.02^b
ผลผลิตแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน)	0.75 ± 0.03^b	0.48 ± 0.05^a	0.55 ± 0.03^a	0.70 ± 0.01^b

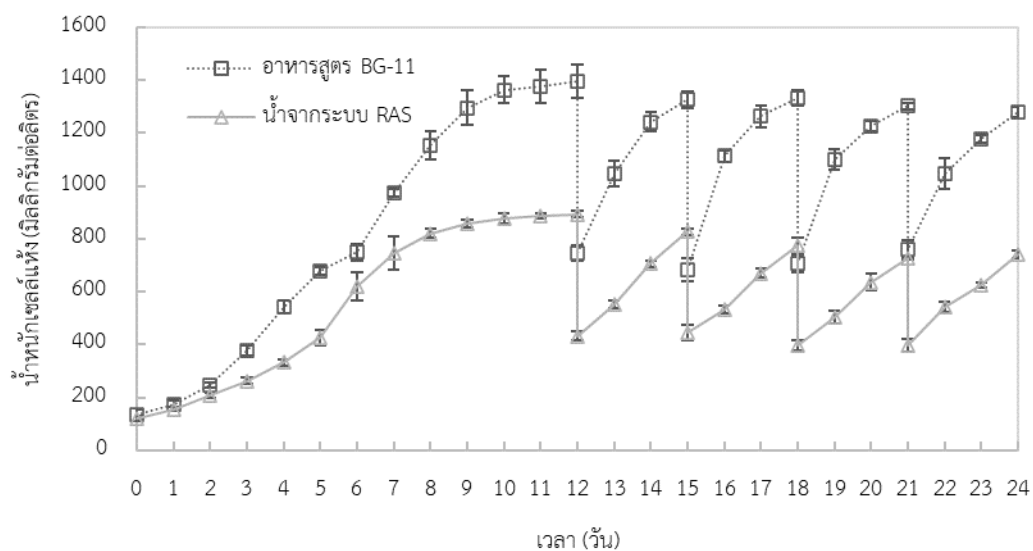
หมายเหตุ ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.3 ประสิทธิภาพเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร

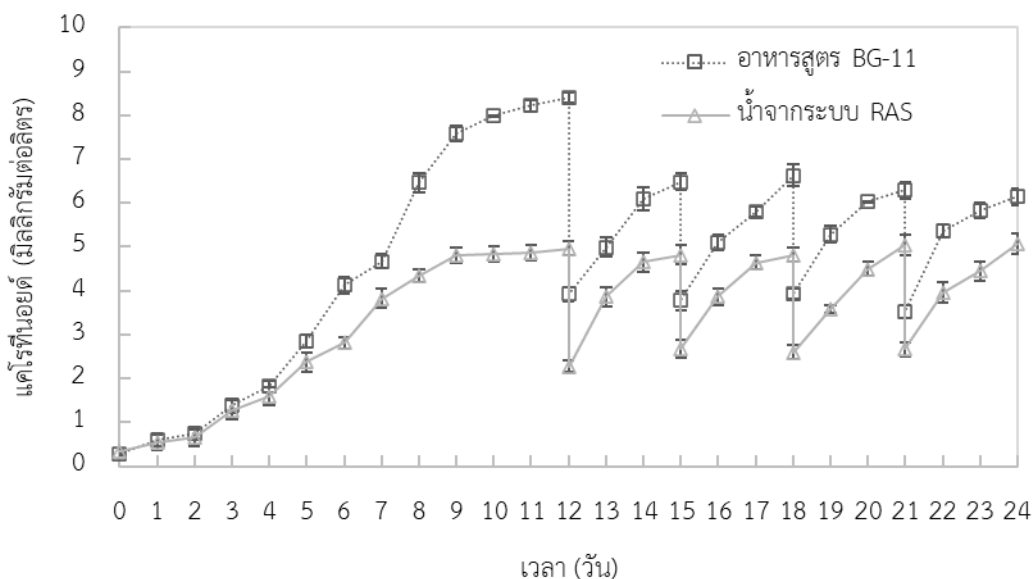
การทดลองในส่วนนี้ศึกษาประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร ด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองไนลอน และชุดควบคุม (อาหารสูตร BG-11) เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรของเหลวในถัง ทั้งชุดทดลองและชุดควบคุม ระหว่างทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ โดยให้แสงสองฝั่งของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.3 วีวีเอ็ม ผลการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายจากน้ำหนักแห้ง รูปที่ 4-23 แสดงการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบว่าจุลสาหร่ายมีการเจริญเติบโตในระยะเวลาปรับตัวในช่วง 3 วันแรก และเข้าสู่ในระยะทวีคูณในวันที่ 4 - 9 ให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.31 ± 0.06 ต่อวัน จากนั้นจึงเข้าสู่ระยะคงตัวในวันที่ 10 - 12 จึงทำการเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายรอบแรก (วันที่ 12) น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายที่ได้เท่ากับ 839 ± 11.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มเพาะเลี้ยงรอบถัดไปโดยน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายในการเก็บเกี่ยวรอบสุดท้าย (วันที่ 24) เท่ากับ 740 ± 34.6 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยพบว่าน้ำหนักแห้งวันที่เก็บเกี่ยวในแต่ละรอบมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย สามารถเพาะเลี้ยงต่อเนื่องได้อย่างน้อย 4 รอบ โดยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในแต่ละรอบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.26 ± 0.06 ต่อวัน ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เต็มอากาศโดยใช้น้ำเสียชุมชนแบบกึ่งต่อเนื่องพบอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.245 ± 0.028 ต่อวัน [143]

รูปที่ 4-24 พิจารณาความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ในแต่ละรอบการเก็บเกี่ยวพบว่ามีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายพบว่ามีความเข้มข้นสูงสุด 7.43 ± 0.58 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง พบว่าสูงกว่าการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารสูตร BG-11 เนื่องจากความเข้มข้นของไนโตรเจนมีปริมาณจำกัด จึงเกิดภาวะการจำกัดไนโตรเจนโดยมีรายงานว่า การขาดไนโตรเจนระหว่างเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorococcum* sp. จะทำให้จุลสาหร่ายเกิดความเครียดและเริ่มผลิตแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น [28] เกิดการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ทุติยภูมิในจุลสาหร่ายสีเขียวเนื่องมาจากการสภาวะความเครียด [144-147] ซึ่งแคโรทีนอยด์มีบทบาทในการปกป้องเม็ดสีที่ใช้สังเคราะห์แสง เอนไซม์ เยื่อหุ้มเซลล์ และนิวเคลียสต่อการทำลายของโฟโตออกซิเดชัน [148, 149] นอกจากนี้มีรายงานว่าภายใต้สภาวะดังกล่าวในจุลสาหร่ายขนาดเล็ก เช่น *Chlorella* และ *Haematococcus* จะผลิตแคโรทีนอยด์ทุติยภูมิสะสมเพื่อตอบสนองต่อสภาวะความเครียด และทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันผลของโฟโตออกซิเดชัน [150, 151] เมื่อพิจารณาประเภทของแคโรทีนอยด์ ได้แก่ ลูทีน เบต้า-

แคโรทีน และไวโอลาแซนทีน พบว่าจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีองค์ประกอบที่ไม่แตกต่างจากการเพาะเลี้ยงโดยอาหาร BG-11 สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยอาหาร BG-11 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอากาศยกขนาด 60 ลิตร โดยให้แสง 20,000 ลักซ์ [27]



รูปที่ 4-23 น้ำหนักแห้งจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร โดยใช้อาหารสูตร BG-11 และน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบกึ่งต่อเนื่อง (24 วัน)



รูปที่ 4-24 แครอทินอยด์จุลสารห่วย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร โดยใช้อาหารสูตร BG-11 และน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบกึ่งต่อเนื่อง (24 วัน)

ตารางที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบโดยประมาณของจุลสารห่วย *C. humicola* เมื่อเพาะเลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและอาหารสูตร BG-11 พบว่าจุลสารห่วยที่เลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าจุลสารห่วยที่เลี้ยงอาหารสูตร BG-11 ในขณะที่ปริมาณโปรตีนและไขมันในจุลสารห่วยที่เลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสูงกว่าจุลสารห่วยที่เลี้ยงอาหารสูตร BG-11 เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต่ำกว่าอาหารสูตร BG-11 โดยมีรายงานว่าจุลสารห่วยมีแนวโน้มที่จะสะสมไขมันและโปรตีนมากขึ้นภายใต้ความเครียด เช่น สภาวะไนโตรเจนที่จำกัด [152-154] สอดคล้องกับงานวิจัย Illman และคณะ (2000) ที่ทำการเพาะเลี้ยงจุลสารห่วย *Chlorella vulgaris* ในสภาวะจำกัดไนโตรเจนพบว่ามีปริมาณไขมันมากกว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีการจำกัดไนโตรเจนในการเพาะเลี้ยง [155] มีรายงานว่าภายใต้สภาวะจำกัดไนโตรเจนจะกระตุ้นไดเอซิลกลีเซอรอล (diacylglycerol) อะซิลทรานสเฟอเรส (acyltransferase) ซึ่งเปลี่ยนอะซิล-โคเอ (acyl-CoA) ให้เป็นไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) [156] ทั้งนี้วิจัยในอดีตเกี่ยวกับการใช้น้ำเสียเพื่อเพาะเลี้ยงจุลสารห่วยมักมุ่งเน้นศึกษาการสะสมไขมันเป็นหลักมีการศึกษาเป็นส่วนน้อยที่รายงานถึงคาร์โบไฮเดรต เมื่อพิจารณาชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสารห่วย *C. humicola* (ตารางที่ 4-12) พบว่าปริมาณกรดไขมันแต่ละชนิดในจุลสารห่วยที่เลี้ยงใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการสะสมกรดไขมันในเซลล์สูงกว่าเมื่อใช้อาหารสูตร BG-11 ผลที่ได้อาจไม่ชัดเจนนัก โดยธาตุอาหารไนโตรเจนต่ำเป็นปัจจัยที่ช่วยกระตุ้นให้

จุลสาหร่าย *C. humicola* มีการสังเคราะห์และสะสมกรดไขมันภายในเซลล์เพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันและลดการเสื่อมสภาพของเซลล์จากการได้รับแสงในระหว่างการเลี้ยง [157] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณกรดไขมันแต่ละชนิดพบว่าจุลสาหร่ายมีการสะสมกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดไลโนเลอิก (Linoleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวโอเมก้า 6 เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ไนโตรเจน (N), และซัลเฟอร์ (S) ในเซลล์จุลสาหร่ายแห่งนี้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4-13) เมื่อพิจารณาชนิดของกรดอะมิโนตารางที่ 4-14 ชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* พบว่าจุลสาหร่ายที่เลี้ยงน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณปริมาณกรดอะมิโนแต่ละชนิดเป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายต่ำกว่าจุลสาหร่ายที่เลี้ยงอาหารสูตร BG-11 เพียงเล็กน้อย จากผลการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้องค์ประกอบภายในเซลล์จุลสาหร่ายมีความคล้ายคลึงกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายด้วยอาหารสูตร BG-11 และผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงโดยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน มีค่าเท่ากับ 97.9 ± 3.61 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน แม้ว่าผลที่ได้ต่ำกว่าการใช้อาหารสูตร BG-11 (165 ± 0.55 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน) แต่ผลผลิตชีวมวลที่ได้สูงกว่าการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่เพาะเลี้ยงแบบกะ (73.8 ± 2.17 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน) ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของจุลสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ 60 ลิตร รูปแบบกึ่งต่อเนื่องมีความเหมาะสมและเป็นไปได้ในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4-10 องค์ประกอบของรงควัตถุภายในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

รงควัตถุ	หน่วย	อาหารสูตร BG-11	น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
ผลผลิตคลอโรฟิลล์	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน	1.78±0.04	1.22±0.08
ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อกรัม	10.78±0.21	12.46±0.15
ผลผลิตแคโรทีนอยด์	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน	0.84±0.01	0.62±0.02
ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อกรัม	5.09	6.33
ลูทีน	% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด	28.64	27.07
เบต้า-แคโรทีน	% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด	8.43	9.01
ไวโอแลแซนทีน	% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด	15.77	14.49
นีโอแซนทีน	% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด	41.01	40.15
ไม่ระบุ	% ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด	6.15	9.28

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4-11 องค์ประกอบโดยประมาณของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

องค์ประกอบโดยประมาณ	หน่วย	อาหารสูตร BG-11	น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
แคลอรี	Kcal/100g	398.9	410.1
คาร์โบไฮเดรต	g/100g	37.6	34.7
ปริมาณความชื้น	g/100g	6.28	6.69
เถ้า	g/100g	5.58	4.78
ไขมันทั้งหมด	g/100g	9.28	11.2
โปรตีนรวม	g/100g	41.2	42.6

ตารางที่ 4-12 ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชนิดของกรดไขมัน	ปริมาณกรดไขมัน (g/100g)	
	อาหารสูตร BG-11	น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
กรดไขมันอิ่มตัว		
Luuric acid (C12:0)	0.18	0.24
Tridecanoic acid (C13:0)	0.07	0.07
Myristic acid (C14:0)	0.02	0.02
Palmitic acid (C16:0)	1.90	2.11
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.03	0.04
Stearic acid (C18:0)	0.05	0.08
Behenic acid (C22:0)	0.05	0.06
Lignoceric acid (C24:0)	0.02	0.03
กรดไขมันไม่อิ่มตัว		
Palmitoleic acid (C16:1)	0.02	0.04
cis-9-Oleic acid (C18:1n9c)	0.75	0.95
cis-11-Eicosenoic acid (C20:1)	0.02	0.02
Linoleic acid (C18:2n6c)	1.13	2.02
gamma-Linolenic acid (C18:3n6)	0.01	0.04
alpha-Linolenic acid (C18:3n3)	0.43	1.02

ตารางที่ 4-13 องค์ประกอบ C H N และ S ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ธาตุ	ร้อยละองค์ประกอบ	
	อาหารสูตร BG-11	น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
C	44.4 ± 0.37	45.0 ± 0.44
H	6.74 ± 0.03	6.94 ± 0.10
N	6.73 ± 0.15	7.16 ± 0.52
S	0.33 ± 50.01	0.36 ± 0.06

ตารางที่ 4-14 ชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชนิดกรดอะมิโน	ปริมาณกรดอะมิโน (มิลลิกรัม/100 กรัม)	
	อาหารสูตร BG-11	น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
Aspartic acid	3,136	2,861
Glutamic acid	3,772	3,424
Serine	1,499	1,406
Histidine	346	312
Glycine	1,991	1,816
Threonine*	1,795	1,576
Arginine	2,198	1,956
Alanine*	2,903	2,628
Tyrosine	977	888
Cystine	3,813	3,568
Valine*	1,609	1,329
Methionine*	253	228
Phenylalanine*	1,700	1,464
Isoleucine*	945.9	774
Tryptophan*	412.8	486
Leucine*	2,829	2,469
Lysine*	1,487	1,324
Proline	2,366	2,179

* อะมิโนจำเป็น

4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

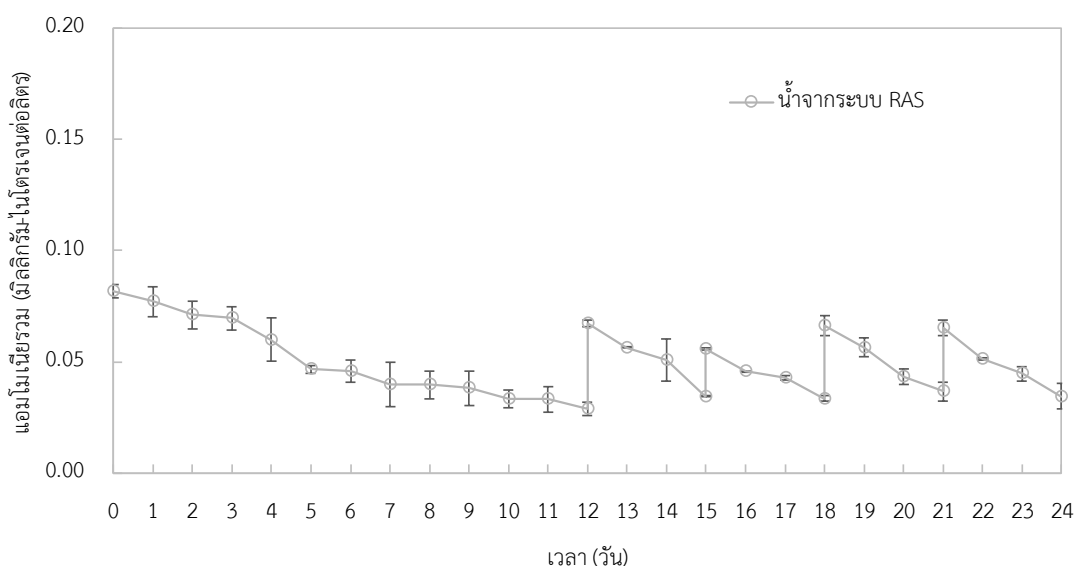
ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองไนลอน และเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรเพาะเลี้ยง ระหว่างทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ อัตราการไหลของอากาศ 0.3 วีวีเอ็ม เมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกะ ที่ระยะเวลา 12 วัน พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 0.082 ± 0.003 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร โดยในช่วง 0-3 วัน ความเข้มข้นลดลงเล็กน้อยเนื่องจากจุลสาหร่ายมีการเจริญเติบโตในระยะเวลาปรับตัว จากนั้นความเข้มข้นลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 4 - 9 เมื่อจุลสาหร่ายเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะทวีคูณ และความเข้มข้นวันที่ 12 เท่ากับ 0.029 ± 0.004 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4-25) เนื่องจากจุลสาหร่ายจะใช้แอมโมเนียในกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นอันดับแรกเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียลดต่ำลงจุลสาหร่ายจึงเริ่มใช้ในเตรท ทั้งนี้จุลสาหร่ายจะเปลี่ยนไนเตรทให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมาก่อนนำมาใช้ [158] เมื่อพิจารณาความเข้มข้นไนเตรทซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 65.08 ± 4.20 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร และความเข้มข้นวันที่ 12 เท่ากับ 3.35 ± 1.45 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ลดลงเท่ากับ 62.45 ± 2.21 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4-26) จากนั้นพิจารณาความเข้มข้นฟอสเฟตพบว่าความเข้มข้นฟอสเฟตลดลงเล็กน้อยใน 0 - 2 เนื่องจากจุลสาหร่ายมีการเจริญเติบโตในระยะเวลาปรับตัวจากนั้นจะจึงลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 3 - 6 ซึ่งจุลสาหร่ายเจริญเติบโตเข้าสู่ในระยะทวีคูณ และความเข้มข้นฟอสเฟตลดต่ำหลังจากวันที่ 6 เหลือความเข้มข้นเพียง 0.99 ± 0.12 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร และความเข้มข้นวันที่ 12 เท่ากับ 0.266 ± 0.058 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร (รูปที่ 4-27) โดยคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเท่ากับ 94.9% และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับ 92.6% เมื่อทำการเพาะเลี้ยงแบบกะที่ระยะเวลา 12 วัน หลังจากนั้นเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องโดยใช้ระยะเวลา 3 วันต่อรอบในการเก็บเกี่ยว พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 82.8% และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 89.1%

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตจากงานวิจัยครั้งนี้พบว่าสูงกว่างานวิจัยในอดีตซึ่งใช้น้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์ที่มีความเข้มข้นไนเตรทและฟอสเฟตใกล้เคียงกัน โดยมีรายงานวิจัยการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorella sorokiniana* แบบกะ 7 วัน ให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 84.51% ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 40.67 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 75.56% ที่ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 8.82 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร [159] นอกจากนี้ยังมีรายงานการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Scenedesmus*

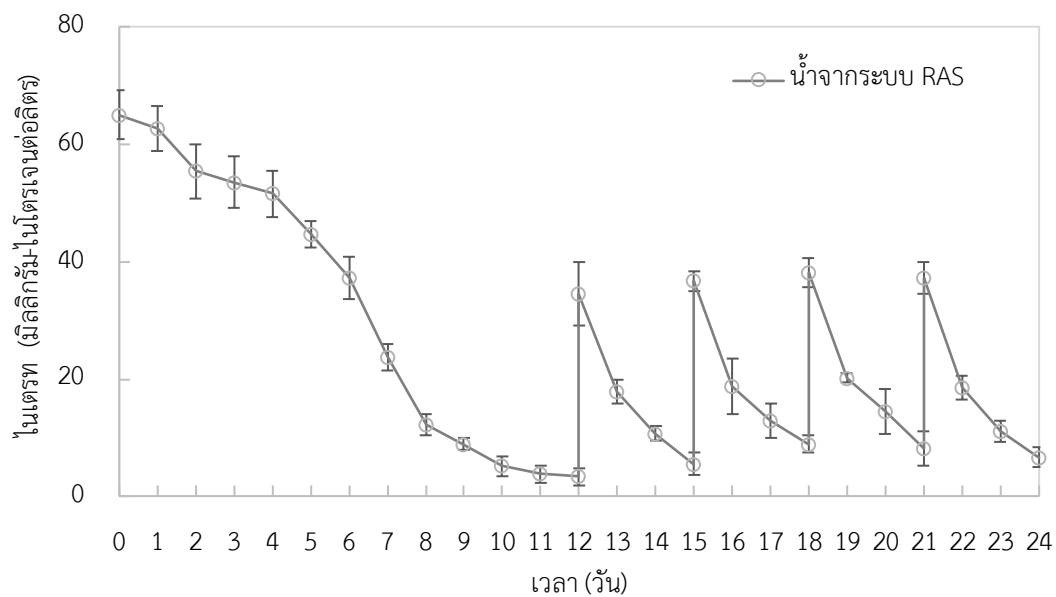
obliquus, *Chlorella sorokiniana* และ *Afrocarpus falcatus* เพาะเลี้ยงแบบกะ 14 วัน ให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยอยู่ที่ 77.7%, 75.8% และ 80.9% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 40.67 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร [98] นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคและเตรียมน้ำขึ้นต้นด้วยการกรอง โดยงานวิจัยของ Tejido-Nuñez (2022) ใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และ *Tetrademus obliquus* เพาะเลี้ยงแบบกะ 13 วัน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทโดยเฉลี่ยเท่ากับ 78.7% และ 80.6% ตามลำดับ และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตโดยเฉลี่ยเท่ากับ 97.0% และ 99.7% [95] โดยประสิทธิภาพของการใช้สารอาหารของจุลสาหร่ายแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดธาตุอาหารจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละแหล่งซึ่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน รวมทั้งขั้นตอนการเตรียมน้ำขึ้นต้นซึ่งอาจเป็นปัจจัยในการบำบัดธาตุอาหารของจุลสาหร่ายได้แตกต่างกัน [95]

แม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตสำหรับการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่องจะต่ำกว่าการเลี้ยงในระบบกะ แต่เมื่อคำนวณอัตราการบำบัดพบว่าการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องให้อัตราการบำบัดไนเตรทสูงถึง 8.80 ± 0.83 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยการเพาะเลี้ยงแบบกะให้อัตราการบำบัดไนเตรทเท่ากับ 4.88 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน (ตารางที่ 4-15) และอัตราการบำบัดฟอสเฟตสูงถึง 0.47 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน เมื่อเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบกะให้อัตราการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับ 0.26 ± 0.015 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน เนื่องจากการเพาะเลี้ยงแบบกะจะใช้เวลาการเพาะเลี้ยงตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจนกระทั่งเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตแบบทวีคูณ และเพาะเลี้ยงต่อไปจนถึงระยะคงตัวจึงเก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งหมดนับเป็น 1 กะ ซึ่งจะใช้เวลานาน จึงให้อัตราการบำบัดต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องซึ่งจะเพาะเลี้ยงสาหร่ายจนถึงระยะทวีคูณโดยเมื่อเข้าสู่ระยะคงตัวจะเก็บเกี่ยวจุลสาหร่ายเพียงครึ่งหนึ่งและเติมน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อให้เป็นแหล่งอาหารแก่จุลสาหร่ายทดแทน จากนั้นเพาะเลี้ยงต่อเป็นระยะเวลาเพียง 3 วัน จึงเก็บเกี่ยวรอบใหม่ ดังนั้นจุลสาหร่ายจึงเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะทวีคูณอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงต่อรอบสั้นและเลี้ยงได้หลายรอบโดยไม่ต้องเริ่มระบบใหม่ ส่งผลให้อัตราการบำบัดสูง อย่างไรก็ตามใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงต่อรอบสั้นส่งผลให้มีธาตุอาหารคงเหลือระบบสูงกว่าแบบกะซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายจนเข้าสู่ระยะคงตัวทำให้สาหร่ายใช้ธาตุอาหารได้สูงสุด ทั้งนี้การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องมีข้อได้เปรียบในเรื่องของผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายสูง ลดระยะเวลาที่จุลสาหร่ายใช้ระยะเริ่มต้นเนื่องจากไม่ต้องเริ่มระบบใหม่ และสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดธาตุอาหารในน้ำได้สูงขึ้นอีกด้วย

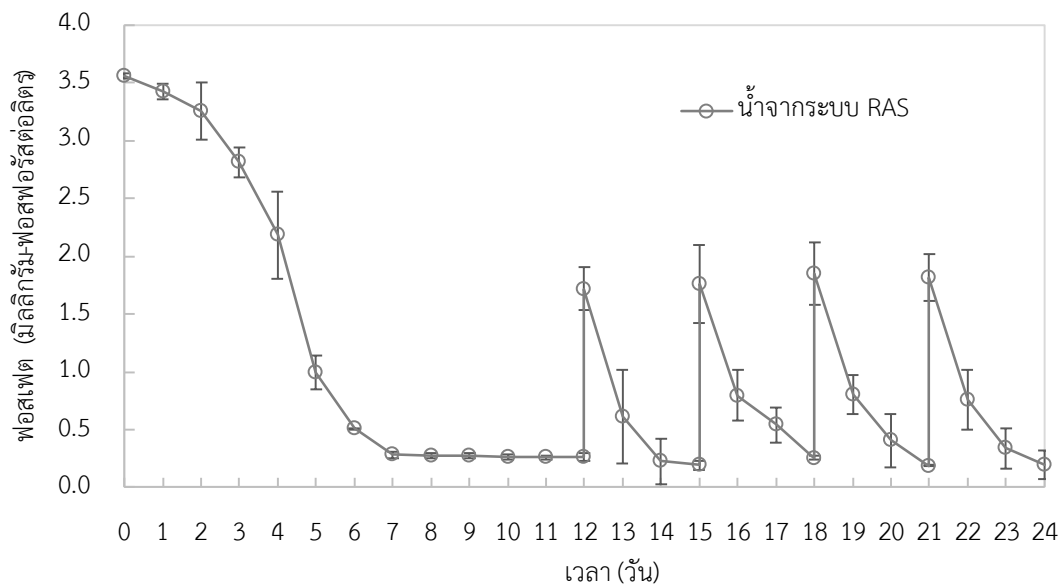
ดังนั้นจากผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของใช้จุลสาหร่าย *C. humicola* เพื่อบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรทได้สูงถึง 82.6% - 94.9% และประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตสูงถึง 89.1% - 92.6% และเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดไนเตรทได้เท่ากับ 8.80 ± 0.83 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และอัตราการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับ 0.47 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยการทดลองไม่ได้ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวม และไนโตรท์เนื่องจากมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ (<1.0 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร) ไม่ส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำ [160] ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการบำบัดไนเตรทในปัจจุบันที่มักใช้ตัวกรองชีวภาพดีไนตริฟิเคชัน (Denitrifying biofilter) [6, 7] ซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบและดำเนินงาน และจำเป็นต้องใช้บุคลากรควบคุมระบบที่มีความรู้และประสบการณ์ [4, 8] และการบำบัดฟอสเฟตในปัจจุบันมักเน้นวิธีการทางเคมีในการตกตะกอนซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง [161, 162] หรือการใช้วิธีการทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ซึ่งเป็นวิธีที่ยั่งยืนและซับซ้อนไม่เป็นที่นิยม [163-165] นอกจากนี้จุดเด่นของการใช้จุลสาหร่าย *C. humicola* คือมีน้ำหนักรวมและเซลล์มีขนาดใหญ่ ทำให้เก็บเกี่ยวเซลล์ได้ง่ายโดยวิธีการกรองหรือการตกตะกอน [16, 17] ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเนื่องจากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยทั่วไปมักมีข้อจำกัดในเรื่องของการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่าย และเติบโตได้ดีภายใต้สภาวะกลางแจ้ง [14, 15]



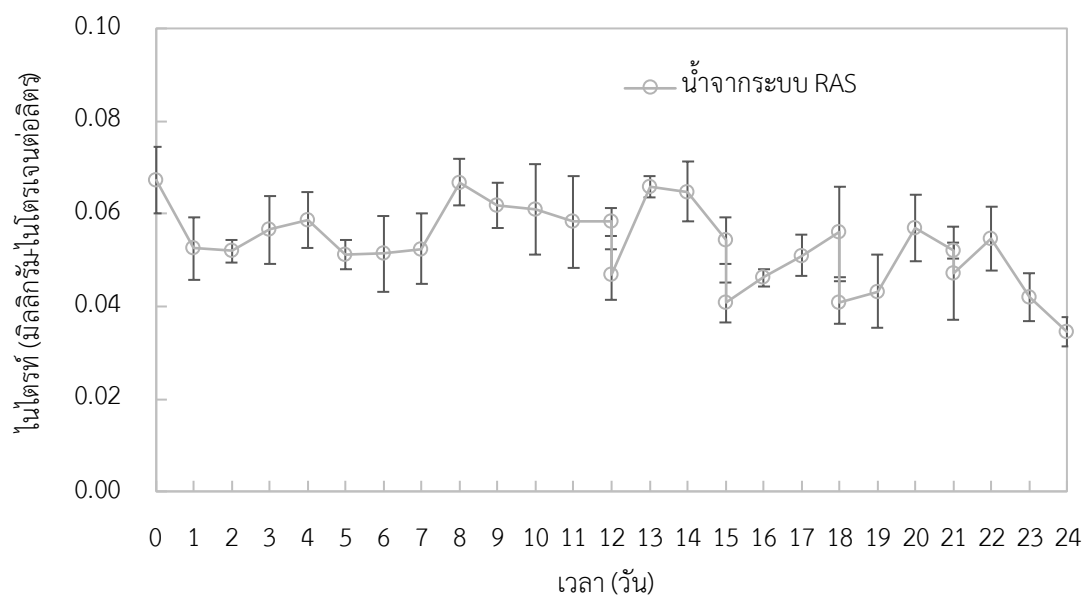
รูปที่ 4-25 ความเข้มข้นแอมโมเนียเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร ที่ใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เวลาเพาะเลี้ยง 24 วัน



รูปที่ 4-26 ความเข้มข้นไนเตรทเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระยะเวลา 24 วัน



รูปที่ 4-27 ความเข้มข้นฟอสเฟตเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระยะเวลา 24 วัน



รูปที่ 4-28 ความเข้มข้นไนเตรทเมื่อเพาะเลี้ยงจุลสำหรับ *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ขนาด 60 ลิตร โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระยะเวลา 24 วัน

ตารางที่ 4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้จุลสำหรับ *C.humicola*

การบำบัด	หน่วย	แบบกะ	แบบกึ่งต่อเนื่อง
อัตราการบำบัดไนเตรท (NO_3^-)	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน	4.88 ± 0.36	8.80 ± 0.83
อัตราการบำบัดฟอสเฟต (PO_4^{3-})	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน	0.26 ± 0.02	0.47 ± 0.01
ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรท	%	94.9 ± 2.16	82.8 ± 3.71
ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต	%	92.6 ± 1.53	89.1 ± 0.88

หมายเหตุ แบบกะประเมินวันที่ 12 ของการเลี้ยง แบบกึ่งต่อเนื่องประเมินโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการเลี้ยง 4 รอบ (รอบละ 3 วัน)

4.2.5 สมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

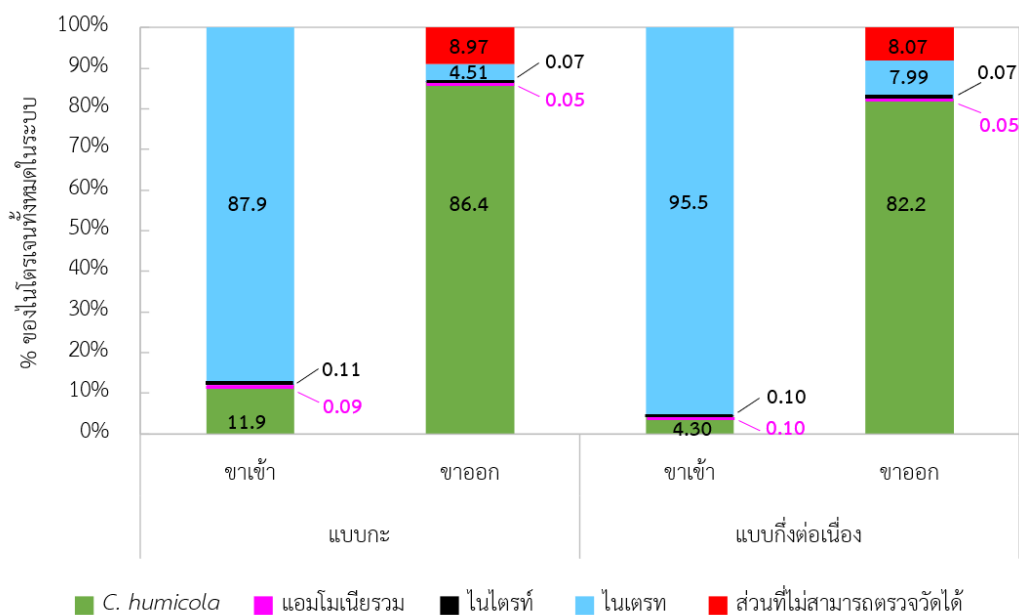
คำนวณสมดุลของมวลไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกะระยะเวลาเพาะเลี้ยง 12 วัน (ตารางที่ 4-16) เมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกะที่ระยะเวลาเพาะเลี้ยง 12 วัน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ $4,443 \pm 271$ มิลลิกรัม โดยไนโตรเจนที่เข้าส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไนเตรทจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้เป็นแหล่งอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเท่ากับ $3,905 \pm 252$ มิลลิกรัม (87.9% ของไนโตรเจนทั้งหมด) รองลงมาคือไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* เท่ากับ 530 ± 24.8 มิลลิกรัม (11.9% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และไนโตรเจนที่เหลือจะอยู่ในรูปของไนไตรท์เท่ากับ 4.03 ± 0.43 มิลลิกรัม (0.09% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และแอมโมเนียเท่ากับ 4.90 ± 0.19 มิลลิกรัม (0.11% ของไนโตรเจนทั้งหมด) สำหรับไนโตรเจนขาออกพบว่าไนโตรเจนในรูปไนเตรทซึ่งอยู่ในน้ำถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่เท่ากับ $3,838 \pm 49.6$ มิลลิกรัม (86.4% ของไนโตรเจนทั้งหมด) ในขณะที่ไนเตรทจะลดลงอย่างมากโดยส่วนที่เหลือจากการใช้ของจุลสาหร่ายเท่ากับ 201 ± 87.0 มิลลิกรัม (4.52% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และไนโตรเจนในรูปไนไตรท์เท่ากับ 3.49 ± 0.175 มิลลิกรัม (0.05% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และแอมโมเนียเท่ากับ 2.38 ± 0.18 มิลลิกรัม (0.05% ของไนโตรเจนทั้งหมด) ซึ่งพบว่ามีไนโตรเจนส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จากปริมาณไนโตรเจนขาเข้าเท่ากับ 399 ± 37.4 มิลลิกรัม (8.97% ของไนโตรเจนทั้งหมด) โดยสันนิษฐานว่าเป็นไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ โดยไม่เป็นก๊าซไนโตรเจนเนื่องจากการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

เมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องที่ระยะเวลาเพาะเลี้ยง 24 วัน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเข้าสู่ระบบเท่ากับ $12,281 \pm 266$ มิลลิกรัม ไนโตรเจนที่เข้าโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไนเตรทจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่นำมาใช้เป็นแหล่งสำหรับสาหร่ายเท่ากับ $11,724 \pm 244$ มิลลิกรัม (95.5% ของไนโตรเจนทั้งหมด) สูงกว่าปริมาณไนโตรเจนที่เพาะเลี้ยงรูปแบบกะเนื่องจากมีการเก็บเกี่ยวชีวมวลและเติมไนโตรเจนในรูปไนเตรทจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพิ่มเข้าสู่ระบบ 4 รอบ รองลงมาคือไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* เท่ากับ 530 ± 24.8 มิลลิกรัม (4.30% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และที่เหลือจะอยู่ในรูปไนไตรท์เท่ากับ 13.4 ± 0.70 มิลลิกรัม (0.10% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และแอมโมเนียเท่ากับ 13.7 ± 0.30 มิลลิกรัม (0.10% ของไนโตรเจนทั้งหมด) สำหรับไนโตรเจนขาออกพบว่าไนโตรเจนในรูปไนเตรทซึ่งอยู่ในน้ำจากระบบ

เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่เท่ากับ $10,096 \pm 372$ มิลลิกรัม (82.2% ของไนโตรเจนทั้งหมด) ในขณะที่ไนเตรทจะลดลงอย่างมากโดยส่วนที่เหลือจากการใช้เพื่อเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายเท่ากับ $1,180 \pm 178$ มิลลิกรัม (9.61% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และไนโตรเจนส่วนในรูปไนไตรท์เท่ากับ 8.68 ± 0.17 มิลลิกรัม (0.07% ของไนโตรเจนทั้งหมด) และแอมโมเนียเท่ากับ 6.40 ± 0.49 มิลลิกรัม (0.05% ของไนโตรเจนทั้งหมด) ซึ่งพบว่าไนโตรเจนบางส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จากปริมาณไนโตรเจนขาเข้าเท่ากับ 990 ± 198 มิลลิกรัม (8.07% ของไนโตรเจนทั้งหมด) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าไนโตรเจนส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ในการทดลองนี้คล้ายคลึงกับงานก่อนหน้านี้ ซึ่งรายงานไนโตรเจนที่ไม่ระบุเท่ากับ 7.98% - 11.43% [93] รูปที่ 4-29 แสดงสมมูลมวลไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเมื่อเพาะเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง

ตารางที่ 4-16 สมมูลมวลไนโตรเจนที่แสดงการกระจายของไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ไนโตรเจน	แบบกะ (12วัน)		แบบกึ่งต่อเนื่อง (24วัน)	
	มิลลิกรัม	ร้อยละ	มิลลิกรัม	ร้อยละ
ขาเข้า				
สาหร่าย <i>C. humicola</i>	530 ± 24.8	11.9	530 ± 24.8	4.30
ไนเตรท	$3,905 \pm 252$	87.9	$11,724 \pm 244$	95.5
ไนไตรท์	4.03 ± 0.43	0.09	13.4 ± 0.70	0.10
แอมโมเนียรวม	4.90 ± 0.19	0.11	13.7 ± 0.30	0.10
รวม	$4,444 \pm 271$	100	$12,281 \pm 266$	100
ขาออก				
สาหร่าย <i>C. humicola</i>	$3,838 \pm 49.6$	86.4	$10,096 \pm 372$	82.2
ไนเตรท	201 ± 87.0	4.51	$1,180 \pm 178$	9.61
ไนไตรท์	3.49 ± 0.175	0.07	8.68 ± 0.17	0.07
แอมโมเนียรวม	2.38 ± 0.18	0.05	6.40 ± 0.49	0.05
ส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้	399 ± 37.4	8.97	990 ± 198	8.07
รวม	$4,444 \pm 271$	100	$12,281 \pm 266$	100



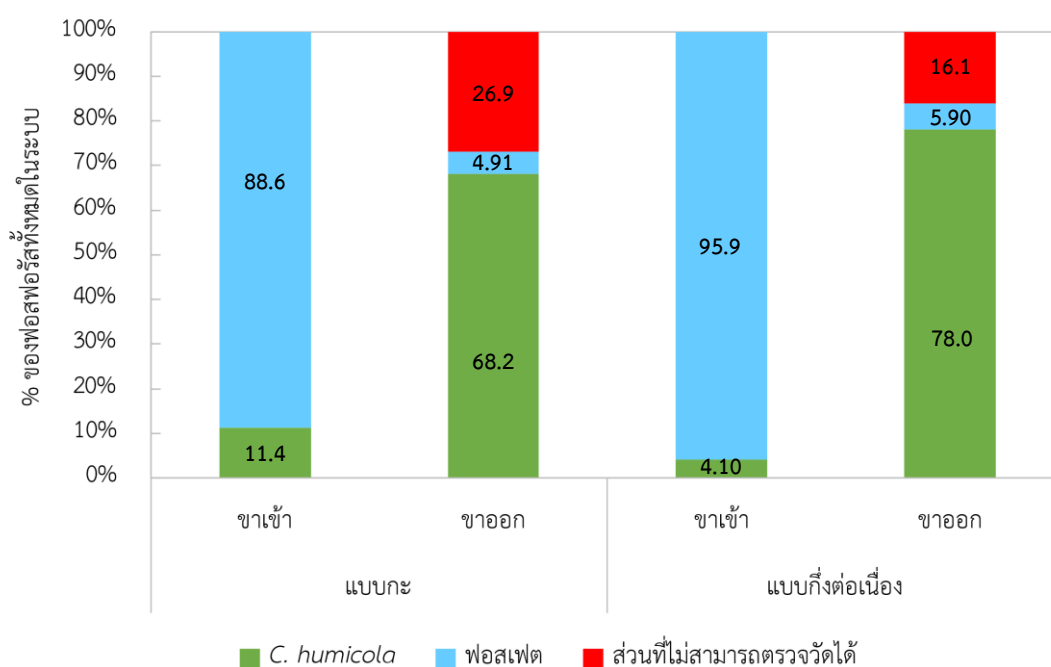
รูปที่ 4-29 สมดุลมวลไนโตรเจนระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อเพาะเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง

ตารางที่ 4-17 แสดงผลการคำนวณสมดุลของมวลฟอสฟอรัสที่ระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกะระยะเวลาเพาะเลี้ยง 12 วัน พบปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบเท่ากับ 241.10 ± 2.19 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสเข้าส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอสเฟตจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเท่ากับ 213.69 ± 3.37 มิลลิกรัม (88.63% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) รองลงมาคือฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* เท่ากับ 27.41 ± 1.28 มิลลิกรัม (11.37% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) สำหรับฟอสฟอรัสขาออกพบว่าฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตซึ่งอยู่ในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถูกเปลี่ยนเป็นฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่เท่ากับ 164.45 ± 5.88 มิลลิกรัม 68.21% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) ในขณะที่ฟอสเฟตจะลดลงอย่างมากโดยส่วนที่เหลือจากการใช้ของจุลสาหร่ายเท่ากับ 11.84 ± 3.41 มิลลิกรัม (4.91% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) ซึ่งพบว่ามีฟอสฟอรัสส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จากปริมาณฟอสฟอรัสเข้าเท่ากับ 64.81 ± 7.96 มิลลิกรัม (26.88 ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) โดยสันนิษฐานว่าเป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำซึ่งเกิดการจับตัวของสารประกอบฟอสเฟตกับไอออนอื่นในน้ำ เช่น แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) หรือ แมกนีเซียมฟอสเฟต ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$)

เมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องที่ระยะเวลาเพาะเลี้ยง 24 วัน พบปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 669.60 ± 4.80 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสที่เข้าโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปฟอสเฟตจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่นำมาใช้เป็นแหล่งสำหรับสาหร่ายเท่ากับ 642.19 ± 6.07 มิลลิกรัม (95.91% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) สูงกว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เพาะเลี้ยงรูปแบบกะเนื่องจากการเก็บเกี่ยวชีวมวลและเติมฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพิ่มเข้าสู่ระบบ 4 รอบ รองลงมาคือฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* เท่ากับ 27.41 ± 1.28 มิลลิกรัม (4.09% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) สำหรับฟอสฟอรัสที่พบว่าฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตซึ่งอยู่ในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถูกเปลี่ยนเป็นฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่เท่ากับ 522.25 ± 19.25 มิลลิกรัม (77.99% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) ในขณะที่ฟอสเฟตจะลดลงอย่างมากโดยส่วนที่เหลือจากการใช้เพื่อเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายเท่ากับ 38.88 ± 4.45 มิลลิกรัม (5.81% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) ซึ่งพบว่าฟอสฟอรัสส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จากปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าเท่ากับ 108.47 ± 22.15 มิลลิกรัม (16.21% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) ทั้งนี้ปริมาณฟอสฟอรัสส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงแบบกะอาจเนื่องจากการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องมีลักษณะการเก็บเกี่ยวและเติมอาหารเข้าสู่ระบบเป็นระยะ ความเข้มข้นของฟอสเฟตจึงไม่สูงมาก ส่งผลให้การจับตัวของสารประกอบฟอสเฟตกับไอออนอื่นในน้ำต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงแบบกะที่เติมอาหารเข้าระบบเพียงครั้งเดียวทำให้ปริมาณฟอสเฟตสูงส่งผลให้การจับตัวของสารประกอบฟอสเฟตกับไอออนอื่นในน้ำสูง รูปที่ 4-30 แสดงสมดุลมวลฟอสฟอรัสระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเมื่อเพาะเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง

ตารางที่ 4-17 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่แสดงการกระจายของฟอสฟอรัสระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ฟอสฟอรัส	แบบกะ (12วัน)		แบบกึ่งต่อเนื่อง (24วัน)	
	มิลลิกรัม	ร้อยละ	มิลลิกรัม	ร้อยละ
ขาเข้า				
สาหร่าย <i>C. humicola</i>	27.4 ± 1.28	11.4	27.4 ± 1.28	4.10
ฟอสเฟต	214 ± 3.37	88.6	642 ± 6.07	95.9
รวม	241 ± 2.19	100	669 ± 4.80	100
ขาออก				
สาหร่าย <i>C. humicola</i>	164.5 ± 5.88	68.2	522 ± 19.25	78.0
ฟอสเฟต	11.8 ± 3.41	4.91	38.9 ± 4.45	5.90
ส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้	64.8 ± 7.96	26.9	108 ± 22.15	16.1
รวม	241 ± 2.19	100	669 ± 4.80	100



รูปที่ 4-30 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่ระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้ น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อเพาะเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก โดยศึกษาลดการเกาะติดของจุลสาหร่าย *C. humicola* บนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง แบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่งการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกเพื่อเพิ่มการเสียดสีระหว่างวัสดุแขวนลอยและผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงและวิธีที่สองการใช้สารลดแรงผิวเติมลงในอาหารเหลวร่วมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* จากนั้นเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยใช้น้ำจากถังตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน (Nitrifying biofilter) ของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์ระบบหมุนเวียนแบบปิดและประเมินประสิทธิภาพการใช้จุลสาหร่าย *C. humicola* เพื่อบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1) การศึกษาการลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติกโดยเลือกใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ที่ปริมาตร 1% - 20% ของปริมาตรของเหลวในถัง และอัตราการให้อากาศ 0.6, 0.8 และ 1.0 วีวีเอ็ม พบว่าการเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead 5% และ 10% ของปริมาตรของเหลวในถัง และอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังที่ 0.6 และ 0.8 วีวีเอ็ม มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากนั้นเมื่อนำมาเติมร่วมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก ปริมาตร 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ จากผลการทดลองเมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead คือ 5% ของปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง และควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังที่ 0.8 วีวีเอ็ม ให้ความหนาแน่นแห้งของจุลสาหร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,350 \pm 25.6$ และ $1,302 \pm 29.5$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และ Bead ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าความเข้มข้นของชีวมวลจุลสาหร่ายจากการเพาะเลี้ยงที่ไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอย ประมาณ 21% ถึง 25% ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยเป็นทางเลือกที่ง่ายสำหรับลดการเกาะติดของไบโอฟิล์มจุลสาหร่าย *C. humicola*

2) การศึกษาการลดการเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวโดยเลือกทดสอบสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ 1) Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) 2) Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) 3) Triton X-100 โดยเลือกใช้ความเข้มข้นในช่วง 0.1% ถึง 50% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เติมอากาศขนาด 1 ลิตร ควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังที่ 0.8 วีวีเอ็ม จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS และ Triton X-100 ที่ความเข้มข้น 0.1% ถึง 5% ของความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ ส่งผลในเชิงบวกต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย *C. humicola* จากนั้นเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนและชนิดอากาศยกซึ่งทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ อะคริลิกและแก้ว เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งเติม SDS ความเข้มข้น 0.0082 มิลลิโมลาร์ ควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ และปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ถังที่ 0.8 วีวีเอ็ม พบว่าชุดทดลองที่เติม SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนจากอะคริลิก (T3) ให้น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,030 \pm 30.0$ มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดทดลองที่เติม SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดถังกวนจากแก้ว (T7) ให้น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,173 \pm 75.06$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชุดทดลองที่เติม SDS ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงจากอะคริลิกและแก้วให้ความเข้มข้นของชีวมวลจุลสาหร่ายมากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่เติม SDS ประมาณ 68 -158 % และ 28 - 43% ตามลำดับ

3) การศึกษาการควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 เปรียบเทียบกับการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ร่วมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร การทดลองประกอบด้วยชุดทดลองที่เติม MB5 5% ของปริมาตรของเหลวในถัง และชุดทดลองที่เติม SDS ความเข้มข้น 0.0082 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่ชุดควบคุมเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่เติมวัสดุพลาสติกแขวนลอยและสารลดแรงตึงผิว ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 และ 0.3 วีวีเอ็ม ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร และ 60 ลิตร ตามลำดับ ระหว่างทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติม MB5 5% ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 2 ลิตร ให้น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,353 \pm 25.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 32.2% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ในขณะที่การเติม SDS ให้น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,197 \pm 35.1$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 16.9% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้เมื่อเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงขนาด 60 ลิตร การเติม MB5 5% ให้น้ำหนักแห้งของ

จุลสาร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,290 \pm 52.9$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 41.8% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ในขณะที่การเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ให้น้ำหนักแห้งของจุลสาร่ายสูงสุดเท่ากับ $1,150 \pm 60.0$ มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเท่ากับ 26.4% เมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโต ผลผลิตจุลสาร่าย และผลผลิตแคโรทีนอยด์ พบว่าการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจาก 2 ลิตร เป็นขนาด 60 ลิตร มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 และการใช้สารลดแรงตึงผิว SDS ให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงที่สูงที่สุด และมีความเป็นไปได้ในการใช้ควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาร่ายเมื่อขยายขนาดการเพาะเลี้ยงจุลสาร่าย *C. humicola* ต่อไป

4) การศึกษาการเตรียมน้ำขึ้นต้นเพื่อใช้เพาะเลี้ยงจุลสาร่าย 3 วิธี คือ 1) กรองน้ำด้วยกระดาษกรอง GF/C 2) กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วนำไปผ่านเครื่องนึ่งแรงดันไอน้ำ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และ 3) กรองน้ำด้วยผ้ากรองไนลอนที่มีขนาดรูกรอง 20 ไมโครเมตร และชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการเตรียมน้ำขึ้นต้น นำน้ำตัวอย่างจากการเตรียมน้ำขึ้นต้นทั้ง 3 วิธี และชุดควบคุม ที่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรเพาะเลี้ยง ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศขนาด 2 ลิตร ควบคุมความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ และอัตราการไหลของอากาศที่ 0.8 วีวีเอ็ม อุณหภูมิในช่วง 25 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าน้ำหนักแห้งและความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาร่ายไม่พบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดการทดลอง

5) การศึกษาการเจริญเติบโตและการใช้ธาตุอาหารของจุลสาร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหมุนเวียนแบบปิดจากถังตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน (Nitrifying biofilter) จากการทดลองเพาะเลี้ยงจุลสาร่าย *C. humicola* ในอาหารที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ 1) อาหารสูตร BG-11 2) อาหารสูตร BG-11 ที่ปรับความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตให้เท่ากับความเข้มข้นของน้ำตัวอย่าง 3) น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองไนลอน น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองไนลอนเพิ่มความเข้มข้นไนเตรทและฟอสเฟตให้เทียบเท่าอาหารสูตร BG-11 ที่เติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรเพาะเลี้ยง ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 2 ลิตร เพาะเลี้ยงจุลสาร่ายแบบกะเป็นเวลา 14 วัน ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.8 วีวีเอ็ม เมื่อพิจารณาผลการเจริญเติบโตของจุลสาร่ายพบว่าการใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะให้ผลผลิตต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น แต่ในแง่ของการใช้ประโยชน์จากน้ำทิ้งที่เกิดจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนการผลิตชีวมวลจุลสาร่ายจัดเป็นการใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารอย่างคุ้มค่า ช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และลดการปล่อยธาตุอาหารส่วนเกินลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นข้อ

ได้เปรียบในการบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้การใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายยังช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการใช้อาหารสูตร BG-11 ได้ถึง 527.50 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตน้ำหนักแห้งจุลสาหร่าย

6) การศึกษาประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร ด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองไนลอน เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรของเหลวในถัง ระหว่างทดลองควบคุมความเข้มแสงที่ 5,000 ลักซ์ โดยให้แสงสองฝั่งของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.3 วีวีเอ็ม ผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงโดยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน มีค่าเท่ากับ 97.9 ± 3.61 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งต่ำกว่าการใช้อาหารสูตร BG-11 แต่ผลผลิตชีวมวลที่ได้สูงกว่าการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่เพาะเลี้ยงแบบกะ โดยองค์ประกอบของรงควัตถุภายในจุลสาหร่าย องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซิลเฟอร์ ในเซลล์จุลสาหร่ายแห้งที่เพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีองค์ประกอบที่ไม่แตกต่างจากการเพาะเลี้ยงโดยอาหาร BG-11 นอกจากนี้ปริมาณโปรตีน ไขมัน และชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายที่เลี้ยงโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสูงกว่าจุลสาหร่ายที่เลี้ยงอาหารสูตร BG-11 แต่ชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* ต่ำกว่าจุลสาหร่ายที่เลี้ยงอาหารสูตร BG-11 เล็กน้อย จากผลการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยใช้น้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้องค์ประกอบภายในเซลล์จุลสาหร่ายมีความคล้ายคลึงกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายด้วยอาหารสูตร BG-11 การขยายขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก 60 ลิตร รูปแบบกึ่งต่อเนื่องมีความเหมาะสมและเป็นไปได้ในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ต่อไปในอนาคต

7) ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองไนลอนที่เต็มวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 5% ของปริมาตรเพาะเลี้ยง ควบคุมความเข้มแสงด้านละ 5,000 ลักซ์ 2 ฝั่งตรงข้ามกันตลอด 24 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 0.3 วีวีเอ็ม เมื่อเพาะเลี้ยงแบบกะเป็นเวลา 12 วัน ให้อัตราการบำบัดไนเตรทเท่ากับ 4.88 ± 0.36 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเท่ากับ 94.9% และอัตราการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับ 0.26 ± 0.015 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับ 92.6% โดยเมื่อรูปแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นเวลา 24 วัน ให้อัตราการบำบัดไนเตรท 8.80 ± 0.83 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน

ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 82.8% และอัตราการบำบัดฟอสเฟต 0.47 ± 0.01 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต 89.1%

8) การประเมินสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเมื่อพิจารณาการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่องที่ระยะเวลาเพาะเลี้ยง 24 วัน ไนโตรเจนที่ขาเข้าโดยจะอยู่ในรูปไนเตรทจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์สูงที่สุดเท่ากับ 95.5 ของไนโตรเจนทั้งหมด รองลงมาคือไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* เท่ากับ 4.30% ของไนโตรเจนทั้งหมด และที่เหลือจะอยู่ในรูปไนไตรท์เท่ากับ และแอมโมเนีย เท่ากับ 0.10% และ 0.10% ของไนโตรเจนทั้งหมด ตามลำดับ สำหรับไนโตรเจนขาออกถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในจุลสาหร่ายเท่ากับ 82.2% ของไนโตรเจนทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนียคิดเป็น 9.61%, 0.07% และ 0.05% ของไนโตรเจนทั้งหมด ตามลำดับ โดยมีไนโตรเจนบางส่วนหายไปจากปริมาณไนโตรเจนขาเข้าเท่ากับ 8.07% ของไนโตรเจนทั้งหมด ในส่วนของสมดุลฟอสฟอรัสพบว่าฟอสฟอรัสขาเข้าจะอยู่ในรูปฟอสเฟตจากน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสูงที่สุดเท่ากับ 95.91 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมด รองลงมาคือฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่าย *C. humicola* เท่ากับ 4.09% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด สำหรับฟอสฟอรัสขาออกถูกเปลี่ยนเป็นฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลสาหร่ายสูงที่สุดเท่ากับ 77.99% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปฟอสเฟตในน้ำคิดเป็น 5.81 ของฟอสฟอรัสทั้งหมด ซึ่งมีฟอสฟอรัสบางส่วนที่หายไปจากปริมาณฟอสฟอรัสขาเข้าเท่ากับ 16.21 ของฟอสฟอรัสทั้งหมด

9) การปรับปรุงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เพื่อการบำบัดน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจากงานวิจัยครั้งนี้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหมุนเวียนแบบปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดธาตุอาหารส่วนเกินจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง อีกทั้งยังสามารถผลิตชีวมวลจุลสาหร่าย *C. humicola* เป็นผลพลอยได้ที่มีมูลค่าเนื่องจากธาตุอาหารส่วนเกินจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบดังกล่าวมีความเข้มข้นของธาตุอาหาร ได้แก่ ไนเตรท และฟอสเฟตสูง เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย ทั้งนี้สามารถประยุกต์ใช้ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* เข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยอาจติดตั้งระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายต่อจากหน่วยถังไนตริฟิเคชันเพื่อบำบัดน้ำส่วนเกินจากถังไนตริฟิเคชันที่มีธาตุอาหารสูงเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแทนการใช้ระบบดีไนตริฟิเคชัน โดยระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายก็สามารถเพาะเลี้ยงได้ในรูปแบบกึ่งต่อเนื่องซึ่งสามารถคำนวณระยะเวลาการเพาะเลี้ยงต่อรอบและการเก็บเกี่ยวให้สอดคล้องกับปริมาณธาตุอาหารส่วนเกินจากถังไนตริฟิเคชันโดยไม่จำเป็นต้อง

หยุดเดินระบบ ดังนั้นถือเป็นการนำของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของเกษตรกร นอกจากนี้ยังช่วยลดมลพิษจากการปล่อยน้ำเสียที่มีไนเตรทสูงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อีกทั้งส่งเสริมแนวคิดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความยั่งยืน ทำให้ภาพลักษณ์ของอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งเดิมถูกมองว่าก่อให้เกิดมลพิษที่หลากหลายและมีการใช้ทรัพยากรไม่คุ้มค่าดีขึ้นในกลุ่มประชากรที่เห็นความสำคัญด้านการอนุรักษ์ จุดเด่นของการใช้จุลสาหร่าย *C. humicola* คือมีน้ำหนักรวมและเซลล์มีขนาดใหญ่ ทำให้เก็บเกี่ยวเซลล์ได้ง่ายโดยวิธีการกรองหรือการตกตะกอน เป็นข้อได้เปรียบเนื่องจากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยทั่วไปมักมีข้อจำกัดในเรื่องของการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่าย นอกจากนี้การเติมวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 ไม่ส่งผลกระทบต่อในการเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายหลังจากสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยเมื่อหยุดการเป่าอากาศจะพบว่าวัสดุแขวนลอยพลาสติก MB5 จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ขณะที่เซลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* เริ่มจมตัวลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ส่งผลให้เกิดการแยกระหว่างวัสดุแขวนลอยพลาสติกและผลผลิตชีวมวลจุลสาหร่ายอย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการเก็บเกี่ยวเซลล์จุลสาหร่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การควบคุมไบโอฟิล์มของจุลสาหร่าย *C. humicola* โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ร่วมกับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสง ควรเติม SDS ร่วมกับการเติมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร BG-11 ในระหว่างการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นระยะเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวให้สามารถควบคุมการเกิดไบโอฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

2) การการเพาะเลี้ยง *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร อาจเพิ่มความเข้มข้นที่มากขึ้นจาก 5,000 ลักซ์ และปรับปรุงตำแหน่งการให้แสงเพื่อให้เซลล์ในส่วนด้านในของถังปฏิกรณ์ได้รับแสงที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สามารถปรับปรุงอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้นกว่า 0.3 วีวีเอ็ม เนื่องจากเป็นข้อจำกัดในเรื่องอัตราการไหลของอากาศจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

3) การเพาะเลี้ยงที่ต้องการผลผลิตจุลสาหร่ายสูงมีข้อเสนอแนะให้เพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ในแต่ละรอบการเพาะเลี้ยง โดยความเข้มข้นฟอสเฟตที่แนะนำเท่ากับ 6.35 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นเท่ากับในอาหารสูตร BG-11 และ

ความเข้มข้น ไนเตรทที่แนะนำเท่ากับ 105 มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ จุลสาหร่ายใช้ได้อย่างเพียงพอโดยอ้างอิงจากผลการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารสูตร BG-11 โดยไม่จำเป็นต้อง เพิ่มความเข้มข้นให้สูงเทียบเคียงอาหารสูตร BG-11 เนื่องจากความเข้มข้นไนเตรทในอาหารสูตร BG-11 มีปริมาณมากเกินไปพอสำหรับการใช้ของจุลสาหร่าย การเพิ่มความเข้มข้นไนเตรทที่สูงเกินไป อาจนำไปสู่การสูญเสียสารอาหารที่มีราคาสูงโดยไม่จำเป็น

4) การบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตด้วยการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* แบบกึ่ง ต่อเนื่องนั้นจะใช้ระยะเวลาเลี้ยงต่อรอบที่สั้นความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัปดาห์ที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายอาจยังมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่องควรวัดความเข้มข้นสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม หากค่าที่ได้เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งควรเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นสารอาหารที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนด





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง (Dry weight)

(APHA, 1992)

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร
3. ตู้อบ
4. Vacuum dessicator

วิธีการวิเคราะห์น้ำหนักแห้ง

1. นำกระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 103 - 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่และนำไปเก็บไว้ที่ Vacuum desiccator
2. เก็บตัวอย่างน้ำประมาณ 5 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างน้ำกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบแห้งจากข้อ 1
4. ล้างเซลล์บนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น
5. นำกระดาษกรองมาอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
6. หาน้ำหนักเซลล์แห้งที่ได้โดยจากผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองที่มีเซลล์กับน้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์

(Strickland and Parsons et al., 1972)

อุปกรณ์และสารเคมี

1. UV-Vis Spectrophotometer
2. เครื่อง Centrifuge
3. เครื่อง Vortex
4. ชุดเครื่องแก้วทดลอง
5. แท่งแก้วบดสาร
6. สารละลายเมทานอลความเข้มข้น 98% โดยปริมาตร

วิธีการสกัดคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์

1. เก็บตัวอย่างน้ำประมาณ 1.5 มิลลิลิตร
2. นำตัวอย่างน้ำประมาณ 1.5 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเซลล์ออกจากของเหลวใส
3. บดเซลล์ให้แตกด้วยแท่งแก้ว
4. เติมสารละลายเมทานอลเข้มข้น 98% โดยปริมาตร ในปริมาณเท่ากับตัวอย่างน้ำเริ่มต้น
5. นำไป vortex ที่ 5,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที และเก็บไว้ในที่เย็น 24 ชั่วโมง
6. นำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที (สังเกตเห็นเซลล์สีขาวตกตะกอน)
7. นำตัวอย่างของเหลวที่สกัดได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-VIS Spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นแสง 480 630 645 และ 665 นาโนเมตร

ช่วงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสง

1. คลอโรฟิลล์ (Chlorophylls) ช่วงความยาวคลื่น 630 645 และ 665 นาโนเมตร
2. แคโรทีนอยด์ (Total carotenoids) ช่วงความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร

วิธีการคำนวณ

$$\text{Total carotenoids } (\mu\text{g/mL}) = (4 \times E_{480}) \times V_a/V_b$$

$$\text{Chlorophyll A } (\mu\text{g/mL}) = (11.6E_{665} - 1.31E_{645} - E_{630}) \times V_a/V_b$$

สำหรับ cuvette ความกว้าง 1 เซนติเมตร

เมื่อ V_a คือ ปริมาตรสารละลาย (mL)

V_b คือ ปริมาตรของเหลวตัวอย่าง (mL)



ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ HPLC

(Chaoruangrit, L et al., 2017)

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่อง HPLC (Shimadzu Model Photodiode array detector SPD-M20A)
2. เครื่อง Centrifuge
3. เครื่อง Vortex
4. กระดาษกรอง Nylon membrane ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
5. ชุดเครื่องแก้วทดลอง
6. แท่งแก้วบดสาร
7. สารละลายเมทานอลความเข้มข้น 98% โดยปริมาตร
8. ขวดบรรจุสารสำหรับ HPLC (Shimadzu)

วิธีการสกัดตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างน้ำ 1.5 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเซลล์ออกจากของเหลวใส
2. บดเซลล์ให้แตกด้วยแท่งแก้ว
3. เติมสารละลายเมทานอลเข้มข้น 98% โดยปริมาตร ในปริมาณเท่ากับตัวอย่างน้ำเริ่มต้น
4. นำไป vortex ที่ 5,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที และเก็บไว้ในที่เย็น 24 ชั่วโมง
5. นำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที (สังเกตเห็นเซลล์สีขาวตกตะกอน)
6. นำตัวอย่างของเหลวที่สกัดได้มากรองด้วยตัวกรอง Nylon membrane บรรจุใส่ขวดตัวอย่างเฉพาะของเครื่อง HPLC และนำเข้าเครื่องพร้อมทำการวิเคราะห์ที่ base line 452 นาโนเมตร

วิธีการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ด้วย HPLC

1. นำตัวอย่างที่สกัดมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ซึ่งประกอบด้วย C-18 คอลัมน์และ Photo Diode Array Detector รุ่น SPD-M20A
2. เฟสเคลื่อนที่เป็นสารละลายผสมระหว่างน้ำกลั่น เมทานอล อะซิโตน ไนโตรเจน และไดคลอโรมีเทน อัตราส่วน 1:10:79:10 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตร/นาที

3. ทำการฉีดตัวอย่างปริมาณ 20 ไมโครลิตร ความยาวคลื่น 452 นาโนเมตร ระยะเวลาในการวิเคราะห์ 30 นาที

4. จำแนกชนิดสารกลุ่มแคโรทีนอยด์การเปรียบเทียบสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ HPLC กับข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้สำหรับจำแนกชนิดของรงควัตถุจากหนังสือ Phytoplankton pigments in oceanography: Guidelines to modern methods (R.F.C. Mantoura and S.W. Wright, 1997)

5. คำนวณความเข้มข้นของลูทีนและเบต้าแคโรทีนจากกราฟสอบเทียบจากมาตรฐาน Relative response factor ซึ่งใช้ canthaxanthin เป็น internal standard (R.F.C. Mantoura and S.W. Wright, 1997: หน้า 424)



ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ง.1 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำ ดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm-Hansen (1980) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคตะลิสต์ (Salicylate-catalyst solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate; $C_6H_4(OH)COONa$) จำนวน 440 กรัม และโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside dehydrate; $Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$) จำนวน 0.28 กรัม ลงในน้ำ D.I. (De-ionized water) และปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร (เก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชา อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุก 3 เดือน)

2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเตรท (Alkaline-citrate solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; $NaOH$) จำนวน 18.5 กรัม และโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate dehydrate; $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$) จำนวน 100 กรัม ลงในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรทให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส

3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) สามารถใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (Alkaline-hypochlorite solution) เตรียมได้โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ และสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรทในอัตราส่วน 1:9 (ควรใช้สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ในกระบวนการวิเคราะห์ภายใน 1 ชั่วโมง หลังผสมสารทั้งสองเข้าด้วยกัน)

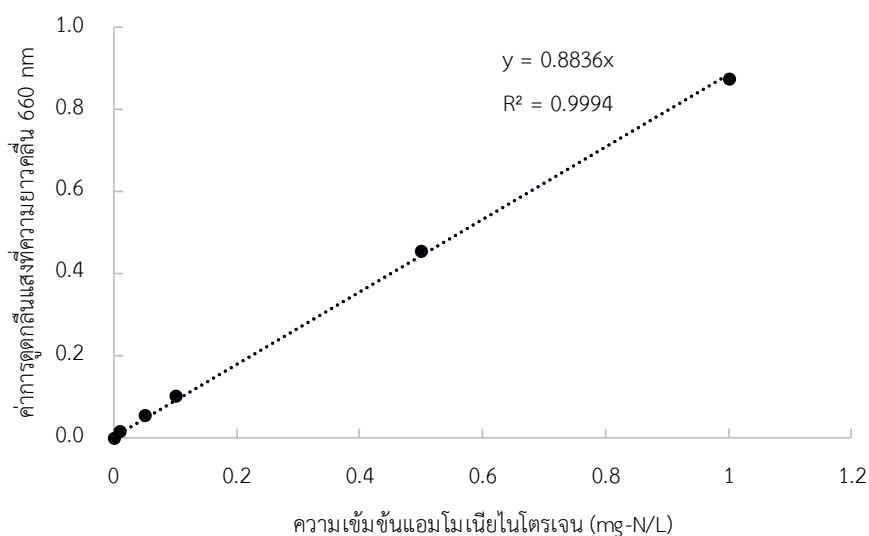
กระบวนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15 องศาเซลเซียส

1. ปิเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ เขย่าสารให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แต่ไม่ควรเกิน 3 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์แบลงค์ (Blank) ทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม

3. นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1 มิลลิกรัมแอมโมเนีย-ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม แอมโมเนีย-ไนโตรเจนต่อลิตร ดังกราฟมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์แอมโมเนียในรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

ง.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนในไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland and Parsons (1972) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide; $C_6H_8N_2O_2S$) ปริมาณ 5 กรัม ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric acid; HCl) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรสารละลายซัลฟานิลาไมด์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส

2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายเอ็นเอ็นอีดี (NED; N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) ปริมาณ 0.5 กรัม ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายเอ็นเอ็นอีดีให้มีปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส และควรเตรียมสารใหม่ทุกเดือน

กระบวนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15 องศาเซลเซียส

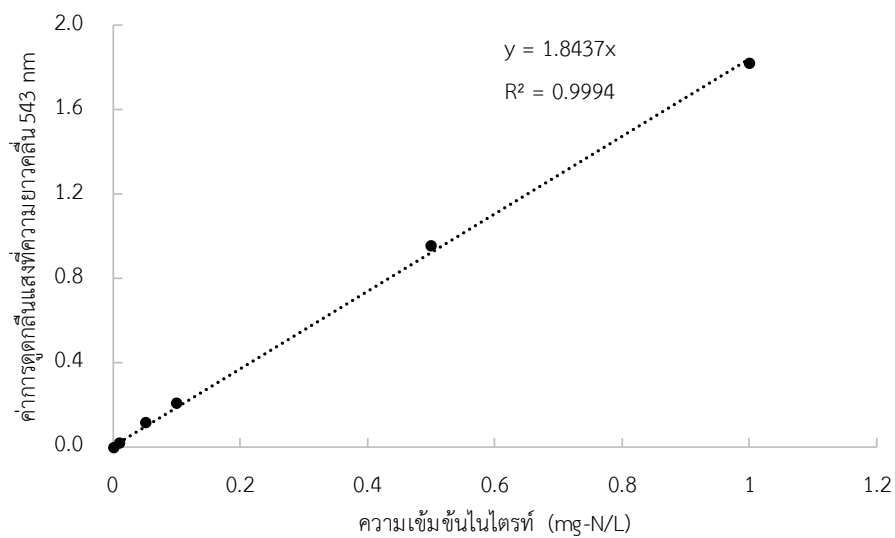
1. ปิบน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่ควรเกิน 10 นาที

2. เติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง (สามารถปรับเพิ่มลด ปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม)

3. การวิเคราะห์แบบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม

4. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 543 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1 มิลลิกรัม ไนโตรเจน-

ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนไตรท์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม ไนไตรท์-ไนโตรเจนต่อลิตร ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรท์ในรูปที่ ค-2



รูปที่ ง-2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนไตรท์



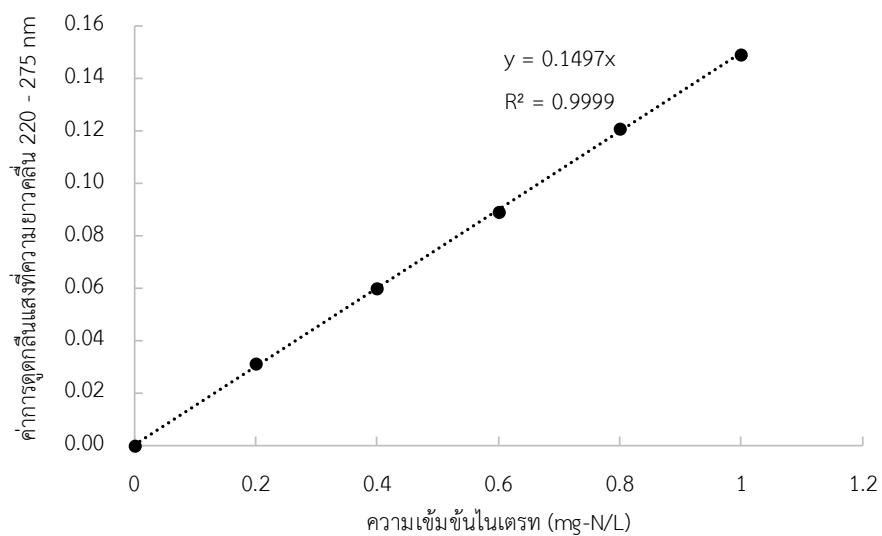
ง.3 วิเคราะห์ปริมาณไนเตรท

วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทไนโตรเจนในน้ำ ดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่ อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยมีกระบวนการวิเคราะห์ ดังนี้

กระบวนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการกรองด้วย กระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำ ตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส

1. ปิเปิดตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไป
2. การวิเคราะห์แบบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ DI ที่ไม่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำ ตัวอย่าง
3. จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสอง มาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจนในน้ำโดยค่าที่คำนวณได้จะต้องทำการหักลบกับ ปริมาณไนเตรทที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกันเนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทตาม Standard Method (2005) จะมีปริมาณไนเตรทรวมอยู่ด้วย เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ไนเตรทมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ เตรียมจากสารละลายสต็อกไนเตรท (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตร ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรทในรูป



รูปที่ ง-3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท



ง.4 วิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland and Parsons (1972) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

การเตรียมสารเคมี

1. Ammonium molybdate: $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ เตรียมได้จากละลาย Ammonium molybdate 15 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร (เก็บไว้ในขวดทึบแสง)

2. Sulfuric Acid: H_2SO_4 เตรียมโดยการเติม Sulfuric Acid ปริมาตร 140 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นปริมาตร 900 มิลลิลิตร (เก็บไว้ในขวดแก้วและเก็บไว้ในที่เย็น)

3. Ascorbic Acid เตรียมโดยการละลาย Ascorbic Acid (AR grade) 27 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร (เก็บไว้ในขวดพลาสติกและเก็บไว้ในที่เย็น)

4. Potassium antimony tartrate: $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ เตรียมโดยการละลาย Potassium antimony tartrate 0.34 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร (เก็บไว้ในขวดพลาสติกหรือขวดแก้ว)

5. Mixed Reagent เตรียมโดยการนำ Ammonium molybdate ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผสมกับ Sulfuric Acid ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Ascorbic Acid ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ Potassium antimony tartrate ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

หมายเหตุ: Mixed Reagent ปริมาตรดังกล่าวใช้ได้กับตัวอย่างน้ำจำนวน 50 ตัวอย่าง ไม่ควรเก็บไว้เกิน 6 ชั่วโมงและควรเตรียมสำหรับการวิเคราะห์ใหม่ทุกครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการวิเคราะห์ CHULALONGKORN UNIVERSITY

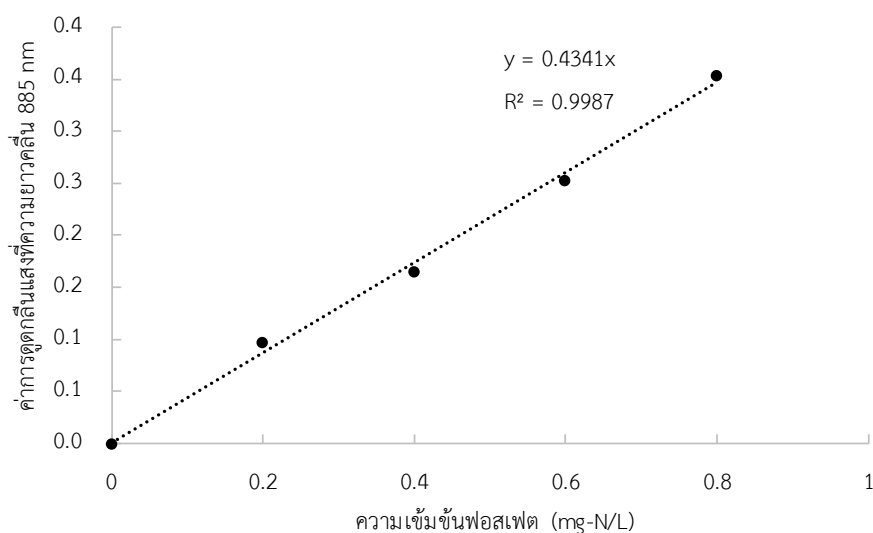
สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส

1. ปิบน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลาย Mixed Reagent 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์แบบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม

3. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 885 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟอสเฟตมาตรฐาน (Standard phosphate solution) ที่ ความเข้มข้น 0.2 0.4 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัม ฟอสเฟต-

ฟอสฟอรัสต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกฟอสเฟต (Stock phosphate solution) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสต่อลิตร ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนโตรเจนในรูปที่ ค-4



รูปที่ ง-4 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต



ภาคผนวก จ

ค่าความเข้มแสงส่องผ่านและอัตราการไหลวนของวัสดุแขวนลอยพลาสติก

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.6 วิวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3153	2798	2498	1940	1729	44.7	94.4	63.8	93.4	46.4
30	3134	2796	2429	1960	1772	10.2	66.8	83.4	96.4	124.3
60	3138	2780	2480	1953	1685	35.3	94.0	94.0	49.9	45.4
90	3120	2723	2457	1916	1689	111.8	105.7	164.7	65.0	136.0
120	3157	2722	2422	1932	1752	97.5	77.3	47.7	143.9	123.8
150	3119	2849	2449	2009	1648	16.1	80.6	19.8	134.8	100.4
180	3104	2839	2406	1850	1648	41.7	107.6	69.8	37.5	100.4
210	3070	2714	2447	1937	1757	51.6	144.8	119.2	47.0	106.5
240	3076	2694	2494	2007	1769	82.8	109.5	128.3	108.1	132.0
270	3067	2744	2510	1897	1758	61.6	92.9	117.9	46.1	122.2
300	3048	2775	2408	1924	1702	51.3	96.4	41.7	55.0	66.0

ตารางที่ จ-2 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 2 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.6 วิวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3478	3362	2710	2434	2102	119.4	158.4	77.6	100.8	116.1
30	3520	3453	2776	2451	2122	83.4	172.9	66.4	98.6	66.6
60	3541	3415	2594	2402	2128	131.5	60.6	29.5	120.8	25.7
90	3583	3308	2748	2476	2115	57.7	288.1	133.1	156.3	64.9
120	3541	3219	2725	2560	2112	131.5	154.1	132.4	106.8	79.0
150	3594	3395	2713	2442	2146	46.1	200.1	51.1	111.4	106.3
180	3422	3453	2700	2493	2170	33.4	159.9	139.6	183.8	78.9
210	3573	3102	2734	2425	2108	102.2	334.8	84.5	133.6	67.3
240	3437	3290	2746	2433	2066	51.1	118.5	99.2	132.6	57.9
270	3517	3247	2739	2430	2079	114.5	120.0	87.2	51.0	79.8
300	3447	3214	2730	2408	2126	24.0	193.2	79.1	82.2	174.1

ตารางที่ จ-3 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 3 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.6 วิวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3537	3183	2611	2538	2148	119.4	158.4	77.6	100.8	116.1
30	3474	3249	2619	2561	2143	83.4	172.9	66.4	98.6	66.6
60	3496	3354	2723	2469	2210	131.5	60.6	29.5	120.8	25.7
90	3594	3230	2617	2512	2151	57.7	288.1	133.1	156.3	64.9
120	3555	3273	2630	2515	2126	131.5	154.1	132.4	106.8	79.0
150	3557	3315	2775	2400	2256	46.1	200.1	51.1	111.4	106.3
180	3566	3205	2652	2396	2189	33.4	159.9	139.6	183.8	78.9
210	3526	3242	2618	2456	2189	102.2	334.8	84.5	133.6	67.3
240	3559	3337	2566	2377	2112	51.1	118.5	99.2	132.6	57.9
270	3621	3237	2703	2414	2074	114.5	120.0	87.2	51.0	79.8
300	3623	3262	2714	2418	2138	24.0	193.2	79.1	82.2	174.1

ตารางที่ จ-4 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.6 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3190	2870	2383	1924	1966	164.4	51.9	102.8	89.9	59.5
30	3169	2846	2321	1864	1925	155.0	173.1	50.1	16.9	102.8
60	3212	2916	2426	1890	1824	124.0	70.2	61.5	136.3	83.9
90	3173	2850	2408	1942	1858	134.8	94.9	85.1	160.9	73.2
120	3154	2907	2331	1883	1867	166.6	71.4	77.9	115.3	37.3
150	3208	2837	2397	1924	1861	142.7	118.0	162.5	108.7	69.2
180	3197	2719	2407	1851	1889	104.8	95.9	95.7	55.0	100.7
210	3175	2758	2415	1946	1860	148.9	76.9	145.6	158.9	117.1
240	3171	2901	2349	1882	1873	157.2	138.2	91.7	129.0	26.7
270	3140	2826	2486	1912	1889	103.8	163.6	54.2	123.8	88.5
300	3148	2848	2459	1884	1880	132.3	119.0	20.7	67.3	136.6

ตารางที่ จ-5 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 2 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.6 วิวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3447	3277	2850	2321	2257	114.6	59.6	97.2	108.3	74.9
30	3461	3332	2818	2304	2156	110.2	71.7	35.4	80.8	87.5
60	3467	3318	2846	2305	2220	127.4	126.5	80.2	84.7	104.4
90	3555	3445	2838	2325	2220	179.0	132.3	80.4	147.3	77.1
120	3481	3264	2828	2322	2181	177.3	144.8	60.9	41.1	148.1
150	3502	3335	2797	2326	2226	76.4	137.5	62.7	109.3	101.5
180	3468	3259	2883	2283	2198	115.2	119.0	178.1	40.8	132.3
210	3459	3398	2825	2375	2235	100.5	44.3	98.5	74.1	105.8
240	3561	3417	2781	2392	2223	108.0	78.0	65.2	126.1	99.2
270	3553	3445	2824	2333	2181	123.5	177.4	68.1	49.6	13.1
300	3462	3292	2824	2361	2195	120.1	138.0	126.2	120.5	93.5

ตารางที่ จ-6 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 3 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.6 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3471	3296	2854	2446	2097	140.1	85.5	137.2	53.5	43.1
30	3555	3445	2839	2389	2209	127.8	20.4	78.1	115.1	52.8
60	3515	3344	2844	2375	2175	156.1	86.4	124.6	81.6	30.6
90	3554	3362	2890	2349	2148	132.9	124.2	82.6	99.9	54.5
120	3507	3326	2813	2410	2196	114.2	82.9	83.5	69.8	97.4
150	3461	3252	2879	2313	2248	148.5	2.5	80.7	67.8	98.1
180	3491	3264	2793	2369	2133	109.6	74.5	121.4	101.5	7.6
210	3550	3348	2839	2334	2195	160.7	124.0	100.9	131.9	132.5
240	3522	3358	2807	2390	2256	131.2	54.7	90.1	97.0	36.1
270	3537	3313	2803	2348	2160	131.7	158.5	92.5	123.1	87.7
300	3465	3354	2770	2391	2132	131.8	113.7	58.6	55.8	32.2

ตารางที่ จ-7 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3079	2424	2361	1702	1566	56.9	20.2	108.0	74.2	46.0
30	2885	2319	2305	1626	1773	73.8	139.5	53.0	162.0	87.9
60	2968	2319	2295	1680	1544	161.0	139.5	147.5	205.9	185.8
90	2985	2515	2266	1672	1571	99.4	239.0	121.8	26.7	238.1
120	2989	2538	2233	1557	1558	106.4	99.4	104.4	127.2	196.5
150	3115	2595	2251	1710	1657	26.3	99.4	122.9	154.6	175.4
180	3085	2386	2333	1702	1601	161.4	129.2	29.9	74.5	258.4
210	3030	2182	2307	1593	1505	161.6	49.7	86.9	132.5	125.3
240	2897	2512	2239	1473	1485	56.7	128.2	89.9	51.4	167.0
270	2970	2354	2250	1620	1515	160.5	121.2	66.9	171.4	142.3
300	3000	2520	2329	1717	1581	62.7	243.9	83.5	137.6	116.5

ตารางที่ จ-8 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 2 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3391	3315	2797	2210	2173	142.7	10.9	103.1	96.2	168.8
30	3397	3301	2705	2255	2068	143.0	108.4	59.3	100.6	174.9
60	3560	3423	2838	2282	2136	112.7	2.4	170.2	110.4	105.3
90	3460	3248	2718	2356	2112	35.2	25.9	82.0	72.8	132.2
120	3486	3303	2743	2253	1942	40.7	106.9	108.1	23.3	112.4
150	3413	3271	2642	2403	1947	48.8	13.1	114.3	145.2	97.7
180	3459	3384	2721	2476	1973	63.4	119.0	74.9	78.4	113.7
210	3477	3255	2742	2420	2124	11.6	23.3	109.1	231.4	117.8
240	3449	3383	2719	2396	2119	25.8	118.3	67.1	150.0	245.7
270	3436	3241	2731	2332	2108	55.7	12.8	101.5	34.2	181.0
300	3442	3344	2778	2346	1966	89.3	114.2	45.0	105.3	113.3

ตารางที่ จ-9 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 3 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3432	3387	2796	2352	2130	73.6	99.5	56.2	193.9	131.8
30	3383	3529	2720	2320	2106	57.7	86.2	141.8	96.6	123.1
60	3493	3387	2863	2210	2104	275.1	263.1	129.2	186.3	103.5
90	3332	3505	2798	2279	2011	73.6	96.5	68.9	68.5	145.3
120	3407	3299	2684	2263	1973	86.5	213.8	112.2	141.4	140.0
150	3341	3471	2771	2258	2029	41.7	46.5	105.8	125.8	157.0
180	3498	3444	2745	2292	2016	113.8	172.3	18.2	38.0	143.8
210	3574	3387	2765	2183	2114	73.8	263.1	42.4	158.4	114.5
240	3484	3333	2717	2279	2138	140.6	202.0	79.2	68.5	121.3
270	3432	3414	2765	2237	1977	141.1	129.2	90.4	205.5	115.3
300	3465	3387	2829	2286	2041	131.3	99.5	64.1	66.6	226.5

ตารางที่ จ-10 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	2328	2037	1907	1720	2328	11.7	1.8	27.2	4.8	77.6
30	2469	2210	1736	1724	2469	116.8	74.4	49.7	92.9	109.1
60	2579	2065	1958	1777	2579	112.8	90.6	75.8	97.6	212.6
90	2487	1937	1981	1735	2487	102.0	131.5	187.3	90.4	204.9
120	2515	1894	1947	1726	2515	128.6	174.0	149.2	138.7	31.6
150	2469	2038	2024	1681	2469	139.5	99.5	131.5	28.1	134.0
180	2354	2009	1984	1670	2354	99.4	49.7	198.8	119.4	132.6
210	2557	2210	1850	1699	2557	75.4	107.0	49.7	196.0	196.9
240	2403	2138	1843	1788	2403	104.6	67.8	109.5	213.5	96.6
270	2375	1972	1838	1712	2375	117.7	192.1	126.6	45.2	29.7
300	2540	1897	1913	1694	2540	91.9	98.3	137.2	89.6	94.3

ตารางที่ จ-11 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 2 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3210	2987	2753	2371	1920	27.2	2.2	11.6	20.8	78.7
30	3406	3026	2619	2340	1946	152.7	85.3	61.5	163.5	27.4
60	3300	2999	2756	2369	2006	27.8	156.7	149.1	114.4	91.5
90	3329	2940	2702	2426	1923	98.6	127.4	80.7	25.7	206.1
120	3391	3033	2813	2455	1870	157.2	92.5	198.8	43.1	57.3
150	3291	2985	2660	2426	1979	32.1	99.4	28.9	25.7	206.6
180	3315	3013	2846	2435	1832	51.7	86.1	141.1	74.3	44.3
210	3367	2976	2634	2314	1907	140.2	83.4	53.5	140.7	330.4
240	3291	2978	2842	2322	1857	32.1	87.0	149.1	151.4	147.4
270	3288	2942	2822	2343	1969	69.4	130.5	151.6	175.0	65.8
300	3308	2977	2833	2294	1911	121.6	144.0	218.1	101.7	9.6

ตารางที่ จ-12 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 3 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3284	3100	2811	2428	2228	10.0	100.0	48.1	157.0	238.2
30	3439	3157	2880	2555	2117	164.0	99.7	187.6	99.5	190.2
60	3330	2985	2973	2390	2102	198.9	99.4	105.1	242.4	200.4
90	3372	3060	2866	2409	2256	89.4	185.7	181.7	175.5	101.5
120	3397	3043	2801	2590	2048	176.3	99.4	193.3	137.6	267.0
150	3372	2945	2833	2421	2074	89.4	29.8	198.3	157.2	59.7
180	3448	3060	2807	2583	2044	150.0	69.6	136.2	86.2	141.8
210	3430	2985	2734	2507	2023	25.7	98.9	103.0	210.5	130.2
240	3422	3002	2762	2469	1956	189.8	88.4	228.8	49.7	71.2
270	3319	3060	2752	2378	1964	113.9	69.4	256.3	252.4	110.9
300	3284	3100	2811	2428	2056	10.0	200.0	48.1	157.0	241.6

ตารางที่ จ-13 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 1.0 วิวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3323	3042	2343	2122	1594	218.3	90.7	72.8	96.4	105.9
30	3301	2995	2455	2146	1575	215.5	58.7	82.3	28.7	94.8
60	3239	2944	2472	1853	1610	209.5	77.1	74.8	114.1	138.8
90	3458	3134	2422	1791	1581	215.8	126.3	58.9	101.4	148.5
120	3226	3112	2433	1761	1620	191.7	93.2	76.1	58.1	154.7
150	3276	2978	2397	1778	1617	160.5	197.2	12.1	109.0	250.9
180	3242	3153	2390	1834	1548	12.7	115.1	83.4	129.4	102.9
210	3235	3036	2513	1770	1501	181.9	64.6	104.3	109.1	97.2
240	3247	3030	2438	1805	1462	132.0	89.2	43.7	89.9	54.5
270	3231	3017	2443	1792	1578	120.5	108.1	59.4	97.5	113.6
300	3265	3049	2418	1920	1567	144.5	116.0	49.5	109.9	133.6

ตารางที่ จ-14 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 2 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 1.0 วิวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3591	3422	2733	2289	2027	117.8	165.5	50.0	91.3	124.0
30	3595	3412	2717	2266	2056	150.3	75.6	266.1	123.4	205.5
60	3592	3422	2611	2300	2015	127.9	138.4	117.9	109.4	129.4
90	3493	3426	2699	2281	1892	107.1	135.5	121.0	101.3	44.4
120	3759	3358	2641	2253	2018	110.1	127.4	97.9	109.4	149.2
150	3578	3377	2587	2354	1916	153.2	134.7	56.4	98.8	92.8
180	3642	3469	2641	2304	1986	113.9	21.5	108.0	18.5	94.1
210	3545	3398	2602	2268	1902	191.1	71.5	123.9	129.4	75.5
240	3634	3418	2748	2275	1949	164.3	29.0	98.4	95.3	100.8
270	3622	3386	2658	2286	1932	152.5	82.2	74.5	97.1	104.5
300	3638	3375	2636	2266	1988	167.9	86.7	66.0	103.8	147.2

ตารางที่ จ-15 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 3 เมื่อใช้ MB5 ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 1.0 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3459	3362	2670	2328	2093	24.0	95.6	118.6	66.0	102.7
30	3611	3411	2566	2338	1974	104.2	50.6	81.3	73.1	91.0
60	3598	3424	2690	2328	2026	140.2	67.5	91.8	85.3	85.3
90	3615	3361	2600	2286	2032	155.8	101.5	135.5	147.6	119.9
120	3548	3390	2555	2303	2001	173.4	58.4	92.1	75.5	136.2
150	3556	3397	2519	2285	2115	183.4	68.1	26.0	180.3	141.3
180	3528	3470	2577	2333	2089	105.1	68.0	144.6	85.8	105.1
210	3502	3470	2694	2363	2017	116.0	56.3	53.2	107.7	100.0
240	3541	3496	2672	2291	1984	178.5	76.1	162.5	166.1	26.3
270	3551	3471	2585	2284	1955	72.6	80.4	57.7	146.1	26.5
300	3654	3432	2689	2325	1995	207.4	43.0	60.2	143.9	8.9

ตารางที่ จ-16 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 1.0 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3114	2884.8	2370	1832	1703	96.9	59.7	64.6	99.6	40.3
30	3082	2861.1	2378	1868	1740	75.7	74.5	114.8	20.1	83.8
60	3098	2911.7	2380	1890	1760	91.0	72.2	151.4	98.6	75.0
90	3124	2857.3	2377	1914	1745	145.8	36.7	55.0	32.2	97.0
120	3377	2877.8	2348	1858	1744	102.5	59.5	28.7	109.9	68.0
150	3142	2833.5	2359	1974	1761	189.9	68.9	167.2	116.8	21.6
180	3118	2853.1	2470	1942	1784	174.6	125.5	21.4	45.1	3.9
210	3136	2837.0	2428	1940	1749	87.5	85.9	66.1	133.9	122.0
240	3165	2853.5	2334	1944	1718	125.5	112.2	18.8	121.8	81.3
270	3143	2849.7	2319	1872	1702	157.8	88.5	30.8	25.9	58.1
300	3105	2827.8	2392	1857	1715	134.9	115.2	128.8	56.6	10.6

ตารางที่ จ-17 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 2 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 1.0 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3480	3210.5	2796	2336	2015	110.5	103.5	62.3	70.8	19.5
30	3477	3331.5	2819	2256	2030	87.8	31.2	35.6	30.2	39.9
60	3454	3258.2	2945	2310	2067	106.9	119.0	70.3	93.5	69.0
90	3476	3160.4	2866	2329	2005	167.0	142.2	133.8	29.0	35.0
120	3541	3249.8	2831	2284	1993	151.9	229.7	70.3	108.2	13.9
150	3427	3324.5	2831	2258	2101	162.0	64.2	45.5	78.2	95.6
180	3461	3199.5	2823	2391	2034	152.5	166.1	98.8	49.9	56.2
210	3471	3137.1	2852	2294	2036	113.2	126.5	121.0	83.9	76.0
240	3492	3207.1	2866	2323	2060	115.2	29.2	95.0	70.6	83.4
270	3456	3176.1	2916	2223	2026	116.5	33.9	79.4	67.3	55.3
300	3522	3221.5	2891	2218	2028	193.9	117.5	89.2	48.0	64.0

ตารางที่ จ-18 แสดงค่าความเข้มแสงที่บริเวณตำแหน่งที่ 3 เมื่อใช้ Bead ที่ปริมาตร 1-20 % ของ ปริมาตรของเหลวในถัง ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 1.0 วีวีเอ็ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มแสง (Lux)					ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)				
	1%	5%	10%	15%	20%	1%	5%	10%	15%	20%
0	3452	3053.5	2840	2296	1976	75.5	79.8	56.4	63.7	191.4
30	3468	2822.5	2833	2269	2046	78.6	367.2	33.5	71.7	97.4
60	3471	3270.1	2936	2275	2092	108.8	32.1	99.0	50.7	99.4
90	3497	3264.5	2790	2271	2058	154.9	83.0	57.9	112.9	58.7
120	3487	3287.9	2892	2206	2081	153.5	22.6	42.7	67.3	15.3
150	3477	3294.5	2843	2251	2002	87.9	121.4	114.3	89.8	30.0
180	3505	3173.1	2779	2248	2008	108.2	147.1	70.2	114.3	39.9
210	3515	3217.5	2835	2269	2076	122.2	152.8	135.0	76.1	104.8
240	3514	3149.9	2896	2277	2044	93.1	125.0	105.1	35.4	58.5
270	3464	3275.9	2914	2252	2031	80.1	166.6	157.7	17.3	55.4
300	3541	3112.6	2812	2200	2095	135.7	87.6	100.7	126.6	132.2

ตารางที่ จ-19 แสดงเวลาที่ MB5 ปริมาตร 1-20 % และอัตราการให้อากาศ 0.8 - 1.25 vvm เคลื่อนที่ผ่านส่วนของเหลวไหลขึ้น (Riser) และส่วนของเหลวไหลลง (Downcomer) กลับมาที่จุดเริ่มต้น

อัตรา การให้ อากาศ (vvm)	ปริมาตร MB5 % v/v	นาทีต่อรอบ						SD
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
0.6	1%	0.233	0.333	0.297	0.290	0.288	0.288	0.036
	5%	0.227	0.197	0.153	0.227	0.202	0.201	0.030
	10%	0.197	0.207	0.170	0.213	0.196	0.197	0.017
	15%	0.173	0.180	0.230	0.207	0.198	0.198	0.023
	20%	0.253	0.300	0.290	0.270	0.282	0.279	0.018
0.8	1%	0.227	0.233	0.240	0.247	0.220	0.233	0.011
	5%	0.200	0.173	0.187	0.160	0.203	0.185	0.018
	10%	0.207	0.140	0.197	0.190	0.210	0.189	0.028
	15%	0.193	0.213	0.150	0.213	0.190	0.192	0.026
	20%	0.208	0.227	0.204	0.208	0.217	0.213	0.009
1.0	1%	0.113	0.120	0.130	0.133	0.123	0.124	0.008
	5%	0.114	0.104	0.123	0.140	0.120	0.120	0.013
	10%	0.114	0.105	0.132	0.137	0.108	0.119	0.014
	15%	0.169	0.130	0.172	0.132	0.128	0.146	0.023
	20%	0.143	0.132	0.161	0.145	0.152	0.146	0.011

ตารางที่ จ-20 แสดงเวลาที่ Bead ปริมาตร 1-20 % และอัตราการให้อากาศ 0.8 - 1.25 wvm เคลื่อนที่ผ่านส่วนของเหลวไหลขึ้น (Riser) และส่วนของเหลวไหลลง (Downcomer) กลับมาที่จุดเริ่มต้น

อัตรา การให้อากาศ (wvm)	ปริมาตร พลาสติก % v/v	เวลาที่ต่อรอบ						SD
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
0.6	1%	0.196	0.161	0.156	0.185	0.175	0.175	0.016
	5%	0.185	0.145	0.179	0.164	0.172	0.169	0.016
	10%	0.175	0.185	0.179	0.204	0.164	0.181	0.015
	15%	0.200	0.217	0.196	0.179	0.217	0.202	0.016
	20%	0.208	0.213	0.200	0.217	0.200	0.208	0.008
0.8	1%	0.169	0.179	0.185	0.164	0.164	0.172	0.009
	5%	0.189	0.169	0.154	0.152	0.164	0.165	0.015
	10%	0.161	0.185	0.175	0.179	0.161	0.172	0.011
	15%	0.185	0.185	0.196	0.192	0.200	0.192	0.007
	20%	0.208	0.192	0.196	0.179	0.196	0.194	0.011
1.0	1%	0.127	0.112	0.118	0.156	0.112	0.125	0.018
	5%	0.112	0.102	0.106	0.133	0.102	0.111	0.013
	10%	0.104	0.137	0.102	0.120	0.102	0.113	0.015
	15%	0.169	0.152	0.152	0.175	0.182	0.166	0.014
	20%	0.192	0.147	0.172	0.189	0.154	0.171	0.020

ภาคผนวก ฉ

ผลการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในรูปแบบน้ำหมักเซลล์แห้ง

ตารางที่ ฉ-1 น้ำหมักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เติมอากาศขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux โดยใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก 10% ของปริมาตรของเหลวในถังควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.6 วีวีเอ็ม

วัน	น้ำหมักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	Bead	ชุดควบคุม	MB5	Bead
0	116	110	112	11.45	11.45	3.88
1	119	132	145	14.25	14.25	2.97
2	220	220	236	15.18	15.18	6.59
3	257	346	376	7.27	7.27	8.73
4	300	430	487	14.49	14.49	13.40
5	421	680	630	9.47	9.47	10.76
6	611	800	845	10.53	10.53	12.50
7	707	931	880	7.49	7.49	8.51
8	753	936	894	18.11	18.11	9.36
9	773	940	901	12.25	12.25	7.37
10	793	950	913	6.23	6.23	9.95
11	801	953	929	10.89	10.89	12.49
12	815	957	931	10.52	10.52	9.82
13	826	960	934	8.33	8.33	13.24
14	833	963	936	11.44	11.44	15.41

ตารางที่ ฉ-2 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เติมอากาศขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux โดยใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก 5% ของปริมาตรของเหลวในถังควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.6 วีวีเอ็ม

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	Bead	ชุดควบคุม	MB5	Bead
0	116	116	105	11.45	0.38	4.21
1	119	151	168	14.25	4.68	4.06
2	220	281	288	15.18	9.84	12.77
3	257	423	403	7.27	14.87	6.86
4	300	520	520	14.49	10.01	10.81
5	421	776	732	9.47	20.28	17.70
6	611	934	879	10.53	16.27	10.23
7	707	1020	917	7.49	7.18	11.44
8	753	1032	951	18.11	8.00	15.37
9	773	1044	968	12.25	12.87	21.71
10	793	1066	970	6.23	4.80	17.02
11	801	1070	981	10.89	9.05	8.62
12	815	1071	992	10.52	8.34	3.84
13	826	1072	996	8.33	8.35	5.25
14	833	1075	1005	11.44	7.93	9.27

ตารางที่ ๓-3 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เติมอากาศขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux โดยใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก 10% ของปริมาตรของเหลวในถังควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.8 วีวีเอ็ม

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	Bead	ชุดควบคุม	MB5	Bead
0	107	114	113	13.00	2.08	5.20
1	186	247	233	15.72	8.54	18.50
2	354	303	309	20.84	7.94	10.15
3	437	445	396	31.61	17.35	21.93
4	619	582	543	17.35	9.45	22.01
5	743	829	815	21.07	5.86	16.04
6	917	1045	1020	31.47	19.05	9.07
7	1008	1155	1051	16.20	12.66	17.79
8	1012	1178	1095	23.86	10.15	15.50
9	1027	1201	1098	18.90	9.71	14.57
10	1029	1215	1122	14.29	8.39	22.03
11	1031	1231	1156	15.87	14.53	11.55
12	1040	1237	1190	19.09	12.49	10.07
13	1047	1242	1200	24.17	9.29	13.61
14	1052	1250	1212	21.20	10.50	16.07

ตารางที่ ฉ-4 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดคอลัมน์เติมอากาศขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux โดยใช้วัสดุแขวนลอยพลาสติก 5% ของปริมาตรของเหลวในถังควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.8 วีวีเอ็ม

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	Bead	ชุดควบคุม	MB5	Bead
0	107	114	115	13.00	5.29	0.58
1	186	167	242	15.72	18.52	10.69
2	354	335	404	20.84	25.00	17.00
3	437	445	484	31.61	14.11	40.28
4	619	642	608	17.35	11.68	32.53
5	743	916	890	21.07	21.22	35.70
6	917	1194	1113	31.47	19.47	9.45
7	1008	1267	1231	16.20	40.65	21.70
8	1012	1301	1267	23.86	27.23	6.24
9	1027	1327	1280	18.90	7.00	2.89
10	1029	1343	1283	14.29	11.59	9.64
11	1031	1349	1284	15.87	17.06	10.39
12	1040	1358	1287	19.09	10.97	6.35
13	1047	1363	1302	24.17	14.11	7.55
14	1052	1369	1305	21.20	17.01	5.51

ตารางที่ ๑-5 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดกวน จากอะคริลิก ขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux ภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม เมื่อเติม SDS

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
0	123	120	0.89	10.00
1	153	147	10.97	30.55
2	323	294	11.09	39.34
3	457	447	7.17	30.55
4	643	623	9.46	25.17
5	723	670	10.48	10.00
6	843	743	25.83	66.58
7	967	833	10.43	30.55
8	987	860	12.95	20.00
9	1007	873	8.11	30.55
10	1057	920	18.35	34.64
10	523	493	17.48	30.55
11	823	793	17.53	30.55
12	953	897	44.56	40.41
12	523	517	6.72	35.12
13	813	723	13.63	37.86
14	957	753	25.28	46.19
14	487	380	12.65	40.00
15	733	660	26.96	60.00
16	843	747	17.84	64.29
16	467	373	9.16	41.63
17	740	533	0.21	46.19
18	893	600	20.18	80.00
18	470	300	24.99	60.00

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
19	673	400	6.99	20.00
20	743	420	41.69	40.00
20	347	227	11.22	46.19
21	507	313	15.91	41.63
22	613	393	11.85	23.09



ตารางที่ ฉ-6 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิด
 อากาศยกจากอะคริลิก ขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux ภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.8
 วีวีเอ็ม เมื่อเติม SDS

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
0	117	117	5.77	5.77
1	153	153	11.55	20.82
2	353	367	15.28	15.28
3	487	503	20.82	20.82
4	723	767	25.17	32.15
5	927	983	46.19	25.17
6	1080	1203	17.32	45.09
7	1233	1273	30.55	30.55
8	1253	1290	41.63	30.00
9	1257	1310	40.41	26.46
10	1267	1317	30.55	25.17
10	643	710	30.55	70.00
11	1107	1187	11.55	80.83
12	1320	1360	20.00	69.28
12	673	667	15.28	40.41
13	1113	1070	11.55	36.06
14	1343	1313	40.41	55.08
14	683	627	30.55	30.55
15	1073	1110	15.28	17.32
16	1253	1313	11.55	11.55
16	637	687	35.12	35.12
17	983	1003	15.28	20.82
18	1140	1203	34.64	25.17
18	583	593	15.28	5.77

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
19	993	957	11.55	20.82
20	1117	1093	15.28	11.55
20	677	573	11.55	25.17
21	937	897	35.12	25.17
22	1030	993	30.00	20.82



ตารางที่ ฉ-7 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดกวน จากแก้ว ขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux ภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม เมื่อเติมสารลดแรงผิว SDS

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
0	127	127	11.55	11.55
1	173	177	11.55	11.55
2	323	327	20.82	30.55
3	437	420	15.28	26.46
4	570	527	17.32	40.41
5	673	673	20.82	28.87
6	800	887	20.00	15.28
7	970	973	17.32	50.33
8	993	1050	30.55	45.83
9	1027	1080	50.33	34.64
10	1060	1097	52.92	15.28
10	547	633	15.28	30.55
11	850	950	30.00	55.68
12	1117	1253	35.12	61.10
12	640	637	40.00	47.26
13	857	937	49.33	56.86
14	1073	1260	30.55	95.39
14	547	623	25.17	25.17
15	863	987	25.17	15.28
16	1047	1147	30.55	50.33
16	537	623	47.26	56.86
17	870	930	36.06	45.83
18	1067	1060	61.10	52.92
18	563	543	92.92	25.17

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
19	840	847	40.00	30.55
20	980	990	20.00	10.00
20	520	523	34.64	25.17
21	847	853	30.55	47.26
22	940	920	17.32	30.00



ตารางที่ ฉ-8 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสารห่วย *C. humicola* ในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจากแก้ว ขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มแสง 5,000 lux ภายใต้อัตราการไหลของอากาศ 0.8 วีวีเอ็ม เมื่อเติม SDS

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
0	133	133	15.28	11.55
1	163	183	20.82	11.55
2	357	380	30.55	17.32
3	467	547	11.55	40.41
4	807	777	30.55	23.09
5	1030	1093	36.06	11.55
6	1220	1253	34.64	46.19
7	1280	1313	40.00	46.19
8	1340	1320	34.64	34.64
9	1363	1333	15.28	46.19
10	1370	1340	17.32	51.96
10	727	710	50.33	60.83
11	1237	1207	32.15	64.29
12	1437	1473	15.28	125.83
12	770	743	78.10	46.19
13	1253	1227	40.41	64.29
14	1450	1383	45.83	80.83
14	747	667	11.55	50.33
15	1203	1143	55.08	11.55
16	1447	1353	11.55	28.87
16	757	767	20.82	40.41
17	1177	1073	68.07	46.19
18	1367	1337	46.19	92.38
18	690	647	43.59	11.55

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ชุดควบคุม	เติม SDS	ชุดควบคุม	เติม SDS
19	1117	1000	15.28	17.32
20	1243	1173	25.17	92.38
20	650	653	30.00	28.87
21	1003	980	40.41	17.32
22	1173	1153	75.06	46.19



ตารางที่ ๑-9 น้ำหนักเซลล์แห้งของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ
ใช้แสงอากาศขนาด 60 ลิตร

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	SDS	ชุดควบคุม	MB5	SDS
0	137	140	123	37.86	20.00	15.28
1	187	187	163	30.55	11.55	15.28
2	227	247	207	20.82	11.55	11.55
3	273	280	273	25.17	20.00	11.55
4	323	347	323	15.28	30.55	15.28
5	383	513	420	15.28	25.17	20.00
6	537	753	667	15.28	30.55	20.82
7	653	977	873	23.09	15.28	35.12
8	840	1130	1050	35.12	51.96	43.59
9	867	1193	1083	41.63	64.29	45.09
10	877	1217	1090	52.92	50.33	80.00
11	893	1263	1117	64.29	61.10	70.24
12	903	1277	1130	52.92	64.29	60.00
13	910	1283	1143	50.33	61.10	70.24
14	910	1290	1150	50.33	52.92	60.00

ตารางที่ ฉ-10 น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ยของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอากาศยก เมื่อใช้วิธีการเตรียมน้ำชั้นต้นที่แตกต่างกัน

วัน	น้ำหนักแห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาศ กรองโย แก้ว	กระดาศกรอง โยแก้วและนึ่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาศ กรองโย แก้ว	กระดาศกรอง โยแก้วและนึ่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	126.67	135.00	126.67	128.33	11.55	13.23	11.55	7.64
1	141.67	166.67	150.00	148.67	7.64	7.64	10.00	5.77
2	173.33	206.67	183.33	188.33	5.77	7.64	5.77	7.64
3	233.33	270.00	268.33	268.33	12.58	13.23	10.41	2.89
4	295.00	360.00	333.33	316.67	13.23	13.23	15.28	7.64
5	418.33	473.33	471.67	428.33	10.41	11.55	7.64	18.93
6	520.00	545.00	596.67	555.33	18.03	13.23	15.28	9.50
7	626.67	698.33	733.33	688.33	16.07	17.56	10.00	23.63
8	728.33	748.33	756.33	730.00	24.66	15.28	20.82	13.23
9	746.67	766.67	763.33	755.00	17.56	11.55	15.28	13.23
10	751.67	770.00	776.67	756.67	12.58	10.00	5.77	10.41
11	751.67	773.33	788.33	765.00	12.58	11.55	2.89	5.00
12	755.00	778.33	791.67	766.67	15.00	12.58	7.64	7.64
13	756.67	778.33	793.33	770.00	12.58	12.58	7.64	8.66
14	756.67	778.33	793.33	770.00	12.58	17.56	7.64	8.66

ตารางที่ ฉ-11 น้ำหนักแห้งของจุลสาหร่าย *C.humicola* ที่เลี้ยงในอาหารแต่ละประเภทในถัง
ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60ลิตร

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	116.67	136.67	123.33	136.67	5.77	5.77	5.77	5.77
1	166.67	173.33	153.33	166.67	11.55	11.55	5.77	15.28
2	336.67	226.67	206.67	216.67	15.28	11.55	5.77	20.82
3	446.67	326.67	263.33	276.67	35.12	15.28	11.55	15.28
4	643.33	430.00	356.67	393.33	25.17	26.46	15.28	5.77
5	910.00	626.67	466.67	523.33	34.64	28.87	15.28	15.28
6	1076.67	743.33	546.67	683.33	20.82	20.82	23.09	11.55
7	1186.67	986.67	673.33	846.67	35.12	32.15	11.55	5.77
8	1240.00	1013.33	713.33	873.33	45.83	23.09	15.28	15.28
9	1273.33	1076.67	746.67	933.33	25.17	25.17	15.28	30.55
10	1290.00	1083.33	763.33	946.67	30.00	23.09	25.17	35.12
11	1293.33	1086.67	770.00	963.33	25.17	20.82	26.46	30.55
12	1296.67	1090.00	773.33	966.67	25.17	23.09	25.17	35.12
13	1323.33	1096.67	776.67	970.00	41.63	20.82	30.55	36.06
14	1326.67	1103.33	780.00	973.33	37.86	25.17	26.46	30.55

ตารางที่ ฉ-12 น้ำหนักแห้งของจุลสารห่วย *C. humicola* ที่เลี้ยงในอาหารแต่ละประเภทในถัง ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง

วัน	น้ำหนักเซลล์แห้ง (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	133.33	123.33	20.00	5.77
1	176.67	156.67	11.55	5.77
2	246.67	210.00	11.55	10.00
3	376.67	263.33	20.00	11.55
4	543.33	333.33	23.09	11.55
5	680.00	426.67	15.28	30.55
6	750.00	620.00	30.55	52.92
7	973.33	746.67	15.28	61.10
8	1153.33	820.00	51.96	17.32
9	1296.67	856.67	64.29	15.28
10	1363.33	876.67	50.33	20.82
11	1376.67	886.67	61.10	11.55
12	1396.67	893.33	64.29	11.55
12	746.67	433.33	30.55	15.28
13	1046.67	553.33	49.33	15.28
14	1243.33	706.67	35.12	11.55
15	1326.67	826.67	30.55	11.55
15	683.33	446.67	41.63	30.55
16	1113.33	533.33	23.09	15.28
17	1263.33	670.00	41.63	17.32
18	1333.33	773.33	30.55	30.55
18	706.67	396.67	30.55	20.00
19	1100.00	503.33	40.00	23.09
20	1226.67	636.67	20.00	30.55
21	1303.33	726.67	11.55	5.77
21	760.00	396.67	34.64	25.17
22	1046.67	543.33	58.59	20.82
23	1176.67	623.33	15.28	10.00
24	1280.00	740.00	20.00	15.28

ภาคผนวก ข

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

ตารางที่ ข-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ของจุลสาหร่าย *C. humicola*

เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS ที่ความเข้มข้น 0.0082 - 4.1 mM

วัน	OD							ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)						
	ชุด ควบคุม	4.1 mM	0.82 mM	0.41 mM	0.082 mM	0.041 mM	0.0082 mM	ชุด ควบคุม	4.1 mM	0.82 mM	0.41 mM	0.082 mM	0.041 mM	0.0082 mM
0	0.223	0.219	0.209	0.222	0.230	0.229	0.227	0.020	0.019	0.018	0.018	0.022	0.018	0.022
1	0.267	0.084	0.197	0.085	0.301	0.293	0.269	0.013	0.009	0.008	0.008	0.012	0.027	0.009
2	0.301	0.064	0.156	0.079	0.344	0.346	0.342	0.014	0.026	0.020	0.006	0.021	0.028	0.015
3	0.427	0.043	0.074	0.073	0.501	0.451	0.433	0.006	0.011	0.026	0.016	0.011	0.017	0.011
4	0.553	0.038	0.075	0.057	0.678	0.625	0.599	0.008	0.014	0.019	0.013	0.017	0.030	0.024
5	0.798	0.043	0.063	0.046	0.762	0.717	0.678	0.023	0.036	0.009	0.013	0.024	0.004	0.008
6	0.803	0.043	0.060	0.019	0.858	0.824	0.721	0.019	0.042	0.005	0.004	0.022	0.012	0.009
7	0.805	0.015	0.049	0.018	0.913	0.876	0.725	0.038	0.005	0.010	0.005	0.046	0.009	0.010
8	0.805	0.011	0.051	0.011	0.960	0.892	0.725	0.037	0.008	0.006	0.001	0.040	0.005	0.019
9	0.810	0.013	0.039	0.013	0.964	0.896	0.726	0.007	0.008	0.017	0.003	0.042	0.005	0.032

ตารางที่ ข-2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ของจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB ที่ความเข้มข้น 0.0011 - 0.55 mM

วัน	OD							ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)						
	จุด ควบคุม	0.55 mM	0.11 mM	0.055 mM	0.011 mM	0.0055 mM	0.0011 mM	จุด ควบคุม	0.55 mM	0.11 mM	0.055 mM	0.011 mM	0.0055 mM	0.0011 mM
0	0.223	0.200	0.212	0.211	0.204	0.203	0.209	0.020	0.015	0.035	0.023	0.009	0.028	0.018
1	0.267	0.050	0.058	0.056	0.043	0.177	0.197	0.013	0.016	0.011	0.025	0.028	0.032	0.008
2	0.301	0.035	0.022	0.028	0.028	0.082	0.156	0.014	0.009	0.006	0.006	0.015	0.015	0.020
3	0.427	0.020	0.019	0.018	0.024	0.063	0.074	0.006	0.006	0.008	0.003	0.014	0.028	0.026
4	0.553	0.020	0.019	0.019	0.048	0.043	0.075	0.008	0.006	0.008	0.006	0.031	0.019	0.019
5	0.798	0.020	0.019	0.019	0.023	0.023	0.063	0.023	0.006	0.008	0.006	0.016	0.012	0.009
6	0.803	0.020	0.019	0.019	0.023	0.023	0.060	0.019	0.006	0.008	0.006	0.016	0.012	0.005
7	0.805	0.020	0.019	0.019	0.023	0.023	0.049	0.038	0.006	0.008	0.006	0.016	0.012	0.010
8	0.805	0.020	0.020	0.019	0.023	0.023	0.051	0.037	0.006	0.008	0.006	0.016	0.012	0.006
9	0.810	0.020	0.019	0.019	0.023	0.023	0.039	0.007	0.006	0.008	0.006	0.016	0.012	0.017



ตารางที่ ข-3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ของจุลสาหร่าย *C. humicola* เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่ความเข้มข้น 0.00022 - 0.11 mM

วัน	OD							ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)						
	จุด ควบคุม	0.11 mM	0.022 mM	0.011 mM	0.0022 mM	0.0011 mM	0.00022 mM	จุด ควบคุม	0.11 mM	0.022 mM	0.011 mM	0.0022 mM	0.0011 mM	0.00022 mM
0	0.223	0.219	0.222	0.215	0.236	0.208	0.217	0.020	0.219	0.018	0.017	0.024	0.004	0.013
1	0.267	0.084	0.085	0.256	0.289	0.244	0.259	0.013	0.084	0.008	0.011	0.003	0.012	0.025
2	0.301	0.064	0.079	0.285	0.309	0.289	0.283	0.014	0.064	0.006	0.032	0.014	0.010	0.027
3	0.427	0.043	0.073	0.387	0.410	0.374	0.354	0.006	0.043	0.016	0.043	0.034	0.006	0.012
4	0.553	0.038	0.057	0.549	0.606	0.691	0.625	0.008	0.038	0.013	0.045	0.106	0.018	0.043
5	0.798	0.043	0.046	0.826	0.805	0.913	0.857	0.023	0.043	0.013	0.131	0.123	0.011	0.044
6	0.803	0.043	0.019	1.033	0.987	1.099	0.942	0.019	0.043	0.004	0.242	0.266	0.079	0.041
7	0.805	0.015	0.018	1.076	1.005	1.130	1.002	0.038	0.015	0.005	0.258	0.218	0.078	0.010
8	0.805	0.011	0.011	1.092	1.033	1.147	1.005	0.037	0.011	0.001	0.258	0.217	0.081	0.005
9	0.810	0.013	0.013	1.059	1.040	1.149	1.007	0.007	0.013	0.003	0.235	0.219	0.044	0.003

ภาคผนวก ข

ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร

วัน	ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	SDS	ชุดควบคุม	MB5	SDS
0	0.21	0.21	0.21	0.06	0.03	0.06
1	0.39	0.57	0.43	0.08	0.12	0.12
2	0.52	0.75	0.79	0.10	0.18	0.06
3	0.72	1.38	1.34	0.15	0.45	0.29
4	1.12	1.82	1.70	0.20	0.35	0.30
5	2.24	2.85	2.67	0.21	0.42	0.19
6	2.55	4.12	3.50	0.32	0.30	0.07
7	3.48	4.67	4.22	0.31	0.57	0.23
8	4.66	6.46	6.03	0.23	0.33	0.21
9	6.25	7.59	6.91	0.48	0.35	0.26
10	6.60	7.99	7.49	0.66	0.24	0.24
11	6.69	8.22	7.79	0.66	0.21	0.51
12	6.79	8.41	7.86	0.76	0.23	0.45
13	6.91	8.49	7.92	0.78	0.21	0.47
14	6.96	8.51	7.92	0.81	0.23	0.47

ตารางที่ ซ-2 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจากวิธีการเตรียมน้ำ 3 รูปแบบ

วัน	ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่านการกรอง	กระดาศกรองใยแก้ว	กระดาศกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่านการกรอง	กระดาศกรองใยแก้ว	กระดาศกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	0.466	0.451	0.440	0.471	0.027	0.036	0.041	0.009
1	0.523	0.525	0.496	0.499	0.026	0.021	0.017	0.047
2	0.664	0.645	0.640	0.620	0.027	0.015	0.017	0.030
3	1.049	1.078	0.876	1.001	0.056	0.002	0.048	0.105
4	1.543	1.724	1.396	1.874	0.188	0.247	0.260	0.077
5	2.273	2.269	2.288	2.427	0.284	0.069	0.164	0.066
6	2.666	2.701	2.848	2.738	0.307	0.144	0.071	0.141
7	3.810	3.508	3.520	3.609	0.154	0.122	0.059	0.085
8	4.326	4.234	4.225	4.171	0.167	0.230	0.280	0.215
9	4.789	4.927	4.920	5.065	0.164	0.281	0.153	0.052
10	4.888	5.065	5.058	5.096	0.075	0.171	0.043	0.061
11	5.052	5.071	5.087	5.136	0.040	0.129	0.059	0.050
12	5.065	5.101	5.091	5.145	0.040	0.110	0.061	0.048
13	5.085	5.145	5.127	5.153	0.032	0.127	0.024	0.039
14	5.087	5.110	5.144	5.172	0.031	0.048	0.035	0.023

ตารางที่ ซ-3 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงในอาหารแต่ละประเภท
ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	0.35	0.45	0.45	0.45	0.003	0.001	0.002	0.001
1	0.62	0.65	0.61	0.61	0.064	0.011	0.063	0.016
2	1.49	0.83	0.77	0.74	0.081	0.079	0.001	0.048
3	2.05	1.23	1.06	1.06	0.080	0.114	0.370	0.048
4	2.74	2.04	1.58	1.33	0.466	0.044	0.394	0.087
5	4.07	3.05	2.27	2.25	0.116	0.019	0.185	0.074
6	5.40	3.82	2.60	3.00	0.222	0.090	0.138	0.414
7	6.19	4.95	3.81	4.16	0.345	0.093	0.238	0.257
8	6.43	6.07	4.33	4.86	0.257	0.085	0.440	0.262
9	6.88	6.54	4.86	5.20	0.218	0.182	0.172	0.135
10	7.03	6.54	4.94	5.21	0.170	0.337	0.094	0.114
11	7.14	6.65	4.97	5.32	0.088	0.240	0.128	0.136
12	7.15	6.65	5.02	5.33	0.085	0.221	0.119	0.140
13	7.25	6.70	5.05	5.42	0.079	0.192	0.087	0.133
14	7.29	6.74	5.08	5.43	0.056	0.156	0.047	0.127

ตารางที่ ซ-4 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงในอาหารแต่ละประเภท ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน

วัน	ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	0.285	0.333	0.008	0.051
1	0.587	0.478	0.140	0.190
2	0.753	0.648	0.133	0.181
3	1.383	0.879	0.159	0.215
4	1.820	1.086	0.125	0.210
5	2.853	1.473	0.142	0.222
6	4.124	1.824	0.182	0.137
7	4.675	2.525	0.154	0.217
8	6.464	2.838	0.222	0.147
9	7.588	3.021	0.177	0.176
10	7.987	3.045	0.007	0.164
11	8.217	3.069	0.128	0.162
12	8.410	3.066	0.123	0.151
12	3.931	1.370	0.161	0.130
13	4.996	2.569	0.216	0.209
14	6.104	3.345	0.257	0.220
15	6.490	3.521	0.178	0.218
15	3.774	1.884	0.211	0.210
16	5.092	2.297	0.173	0.192
17	5.810	3.527	0.114	0.164
18	6.637	4.131	0.243	0.154
18	3.932	1.803	0.112	0.166
19	5.288	2.788	0.183	0.093

วัน	ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
20	6.026	3.700	0.022	0.159
21	6.291	4.243	0.190	0.240
21	3.211	2.066	0.151	0.155
22	4.358	3.169	0.142	0.228
23	4.829	3.426	0.174	0.224
24	5.631	4.037	0.181	0.237



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ฅ
ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์

ตารางที่ ฅ-1 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงอากาศยกขนาด 60 ลิตร

วัน	ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)		
	ชุดควบคุม	MB5	SDS	ชุดควบคุม	MB5	SDS
0	2.27	2.41	2.20	0.33	0.18	0.22
1	2.79	2.81	2.64	0.24	0.16	0.20
2	3.02	3.07	3.04	0.10	0.07	0.10
3	3.28	3.35	3.39	0.17	0.12	0.12
4	4.04	4.72	4.50	0.20	0.16	0.22
5	4.54	5.66	5.43	0.33	0.14	0.19
6	5.04	8.15	7.52	0.13	0.23	0.34
7	7.29	9.96	9.16	0.22	0.67	0.54
8	9.88	13.23	12.11	0.39	1.04	0.46
9	10.91	13.96	12.38	0.71	1.30	0.82
10	11.44	14.66	13.33	0.52	1.11	0.40
11	11.83	14.79	13.36	0.57	0.80	0.27
12	11.79	15.04	13.94	0.23	0.76	0.80
13	11.99	15.10	14.12	0.18	0.64	0.65
14	12.07	15.23	14.18	0.13	0.67	0.48

ตารางที่ ๓-2 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงด้วยน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก เมื่อใช้วิธีการเตรียมน้ำชั้นต้นที่แตกต่างกัน

วัน	ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่านการกรอง	กระตาดกรองใยแก้ว	กระตาดกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่านการกรอง	กระตาดกรองใยแก้ว	กระตาดกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	2.716	2.518	2.543	2.622	0.010	0.013	0.020	0.022
1	2.827	2.538	2.598	2.770	0.069	0.013	0.024	0.033
2	2.955	2.775	2.830	2.954	0.029	0.065	0.133	0.046
3	3.385	3.155	3.194	3.083	0.121	0.119	0.130	0.047
4	3.450	3.339	3.672	3.839	0.075	0.103	0.055	0.050
5	4.406	4.155	4.563	4.620	0.149	0.118	0.052	0.142
6	5.142	4.934	5.147	5.068	0.297	0.117	0.066	0.177
7	5.971	6.014	5.953	5.717	0.213	0.147	0.162	0.224
8	6.175	6.723	6.145	6.108	0.088	0.099	0.144	0.113
9	6.750	6.867	6.379	6.279	0.131	0.075	0.150	0.077
10	6.741	6.901	6.451	6.354	0.071	0.043	0.150	0.045
11	6.755	6.951	6.476	6.373	0.081	0.085	0.166	0.055
12	6.771	6.974	6.499	6.381	0.078	0.150	0.184	0.066
13	6.784	6.977	6.540	6.427	0.087	0.154	0.138	0.020
14	6.789	6.980	6.567	6.474	0.056	0.161	0.139	0.044

ตารางที่ ฅ-3 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงในอาหารแต่ละประเภท
ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	2.17	2.37	2.29	2.39	0.09	0.09	0.11	0.08
1	2.62	2.56	2.59	2.55	0.08	0.06	0.10	0.22
2	2.94	2.88	2.87	2.68	0.08	0.08	0.19	0.17
3	3.88	3.43	3.23	3.13	0.10	0.19	0.13	0.16
4	5.50	5.26	4.08	4.02	0.07	0.15	0.08	0.06
5	7.21	6.28	5.14	5.87	0.07	0.14	0.06	0.07
6	8.34	6.96	5.80	6.54	0.27	0.08	0.09	0.14
7	10.05	8.66	6.79	7.87	0.03	0.15	0.09	0.08
8	10.79	9.26	7.54	8.74	0.16	0.15	0.10	0.07
9	11.68	9.83	7.94	9.24	0.16	0.08	0.35	0.09
10	11.69	9.85	8.19	9.26	0.18	0.10	0.20	0.23
11	11.87	9.89	8.18	9.33	0.08	0.12	0.11	0.06
12	11.81	9.90	8.31	9.35	0.07	0.39	0.11	0.01
13	11.95	9.92	8.34	9.39	0.50	0.06	0.15	0.06
14	12.07	9.98	8.38	9.41	0.41	0.24	0.24	0.05

ตารางที่ ฅ-4 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ของจุลสาหร่าย *C. humicola* ที่เลี้ยงในอาหารแต่ละประเภท ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกขนาด 60ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน

วัน	ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	2.650	2.192	0.634	0.605
1	2.917	2.647	0.385	0.629
2	3.194	3.038	0.451	0.648
3	4.214	3.813	0.613	0.600
4	4.932	4.209	0.399	0.607
5	5.221	4.866	0.342	0.632
6	7.710	5.750	0.311	0.566
7	10.412	7.036	0.240	0.631
8	12.188	9.566	0.412	0.610
9	14.069	9.775	0.415	0.712
10	14.435	10.563	0.300	0.630
11	15.202	10.568	0.402	0.658
12	16.469	10.577	0.335	0.645
12	9.575	4.624	0.334	0.699
13	10.667	6.345	0.281	0.625
14	14.192	7.625	0.349	0.683
15	15.215	9.844	0.288	0.630
15	9.319	5.379	0.398	0.678
16	12.611	7.558	0.396	0.732
17	14.151	9.308	0.419	0.648
18	14.752	10.584	0.363	0.673
18	9.345	4.730	0.413	0.650
19	11.330	7.630	0.381	0.574

วัน	ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
20	12.695	8.956	0.303	0.640
21	13.585	10.530	0.339	0.604
21	9.134	5.095	0.391	0.552
22	11.055	5.926	0.438	0.556
23	12.548	7.697	0.374	0.651
24	12.822	8.426	0.418	0.704



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ญ
ผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก

ตารางที่ ญ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมในน้ำจากวิธีการเตรียมน้ำ 3 รูปแบบ โดยใช้ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่เลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่านการกรอง	กระต่ายกรองใยแก้ว	กระต่ายกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่านการกรอง	กระต่ายกรองใยแก้ว	กระต่ายกรองใยแก้วและนั่งฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	0.066	0.067	0.048	0.056	0.036	0.023	0.020	0.025
1	0.076	0.063	0.049	0.060	0.038	0.030	0.025	0.026
2	0.060	0.065	0.040	0.046	0.023	0.032	0.026	0.030
3	0.045	0.044	0.038	0.034	0.006	0.009	0.013	0.020
4	0.064	0.057	0.043	0.045	0.032	0.045	0.021	0.034
5	0.047	0.050	0.045	0.056	0.010	0.015	0.015	0.011
6	0.064	0.046	0.048	0.053	0.028	0.018	0.010	0.002
7	0.074	0.047	0.056	0.050	0.026	0.017	0.015	0.026
8	0.065	0.040	0.048	0.060	0.014	0.007	0.036	0.041
9	0.054	0.032	0.057	0.036	0.030	0.009	0.028	0.007
10	0.051	0.044	0.065	0.069	0.016	0.024	0.046	0.062
11	0.061	0.055	0.067	0.055	0.026	0.030	0.055	0.008
12	0.054	0.066	0.044	0.045	0.029	0.044	0.030	0.020
13	0.057	0.059	0.048	0.036	0.025	0.033	0.037	0.021
14	0.054	0.047	0.043	0.052	0.026	0.028	0.034	0.032

ตารางที่ ๒-2 ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นแอมโมเนียเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	0.049	0.036	0.068	0.067	0.015	0.012	0.007	0.008
1	0.039	0.043	0.073	0.066	0.009	0.007	0.007	0.004
2	0.034	0.049	0.069	0.062	0.012	0.006	0.011	0.005
3	0.038	0.041	0.064	0.063	0.004	0.016	0.007	0.004
4	0.045	0.037	0.063	0.065	0.010	0.015	0.009	0.007
5	0.053	0.047	0.065	0.068	0.012	0.010	0.007	0.012
6	0.053	0.044	0.070	0.068	0.017	0.002	0.015	0.011
7	0.064	0.053	0.070	0.071	0.018	0.002	0.010	0.010
8	0.059	0.057	0.072	0.084	0.004	0.004	0.007	0.009
9	0.061	0.056	0.082	0.087	0.016	0.010	0.002	0.008
10	0.059	0.054	0.084	0.093	0.016	0.008	0.012	0.005
11	0.061	0.059	0.085	0.090	0.007	0.008	0.008	0.009
12	0.058	0.066	0.088	0.092	0.012	0.006	0.006	0.007
13	0.067	0.082	0.089	0.093	0.006	0.009	0.005	0.007
14	0.068	0.084	0.089	0.094	0.005	0.002	0.006	0.006

ตารางที่ ๓-3 ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยง กิ่งต่อเนื่อง 24 วัน

วัน	ความเข้มข้นแอมโมเนียรวม (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	0.049	0.073	0.010	0.009
1	0.045	0.077	0.007	0.017
2	0.044	0.078	0.012	0.023
3	0.050	0.077	0.006	0.011
4	0.051	0.078	0.005	0.012
5	0.056	0.076	0.017	0.020
6	0.050	0.091	0.007	0.014
7	0.053	0.101	0.018	0.018
8	0.049	0.112	0.003	0.013
9	0.055	0.127	0.013	0.018
10	0.056	0.078	0.011	0.015
11	0.044	0.097	0.008	0.011
12	0.047	0.114	0.006	0.021
12	0.036	0.076	0.012	0.007
13	0.057	0.103	0.025	0.018
14	0.059	0.093	0.003	0.011
15	0.052	0.095	0.011	0.008
15	0.048	0.073	0.021	0.015
16	0.053	0.068	0.009	0.010
17	0.061	0.062	0.007	0.026
18	0.063	0.062	0.004	0.024
18	0.047	0.082	0.017	0.016
19	0.051	0.098	0.013	0.003

วัน	ความเข้มข้นแอมโมเนียรวม (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
20	0.060	0.093	0.003	0.026
21	0.060	0.071	0.013	0.036
21	0.056	0.075	0.008	0.025
22	0.061	0.101	0.013	0.007
23	0.066	0.102	0.002	0.011
24	0.065	0.098	0.003	0.022



ตารางที่ ๓-4 ความเข้มข้นไนโตรเจนในน้ำจากวิธีการเตรียมน้ำ 3 รูปแบบ โดยใช้ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่เลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกปิดเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจากวิธีการเตรียมน้ำรูปแบบ

วัน	ความเข้มข้นไนโตรเจนเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาษ กรองใย แก้ว	กระดาษ กรองใย แก้วและ หนึ่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาษ กรองใย แก้ว	กระดาษ กรองใย แก้วและ หนึ่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	0.051	0.043	0.040	0.032	0.006	0.010	0.012	0.003
1	0.043	0.041	0.045	0.032	0.008	0.012	0.020	0.003
2	0.041	0.050	0.045	0.041	0.014	0.005	0.010	0.009
3	0.039	0.050	0.043	0.046	0.011	0.008	0.008	0.012
4	0.044	0.054	0.043	0.045	0.003	0.003	0.007	0.013
5	0.035	0.051	0.044	0.040	0.010	0.003	0.017	0.006
6	0.037	0.049	0.045	0.034	0.005	0.003	0.012	0.002
7	0.036	0.048	0.044	0.032	0.008	0.007	0.008	0.003
8	0.035	0.045	0.042	0.040	0.006	0.011	0.010	0.009
9	0.036	0.043	0.037	0.039	0.005	0.008	0.006	0.011
10	0.036	0.044	0.040	0.042	0.007	0.012	0.002	0.010
11	0.031	0.049	0.037	0.029	0.007	0.011	0.006	0.004
12	0.044	0.048	0.041	0.032	0.008	0.012	0.009	0.006
13	0.038	0.053	0.041	0.026	0.011	0.003	0.008	0.002
14	0.030	0.042	0.043	0.035	0.005	0.010	0.006	0.005

ตารางที่ ๕-5 ความเข้มข้นไนโตรเจนในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นไนโตรเจนเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	0.013	0.015	0.032	0.035	0.002	0.001	0.001	0.001
1	0.012	0.016	0.032	0.035	0.001	0.001	0.001	0.001
2	0.015	0.016	0.032	0.037	0.002	0.001	0.002	0.001
3	0.013	0.014	0.030	0.038	0.002	0.001	0.002	0.002
4	0.014	0.014	0.031	0.037	0.001	0.001	0.002	0.002
5	0.015	0.015	0.031	0.036	0.001	0.002	0.002	0.002
6	0.012	0.014	0.033	0.034	0.001	0.001	0.001	0.001
7	0.014	0.012	0.031	0.037	0.001	0.001	0.002	0.002
8	0.013	0.013	0.030	0.038	0.002	0.002	0.001	0.001
9	0.013	0.014	0.030	0.037	0.002	0.001	0.002	0.002
10	0.012	0.014	0.030	0.036	0.001	0.001	0.002	0.001
11	0.015	0.013	0.031	0.035	0.001	0.002	0.002	0.001
12	0.012	0.014	0.031	0.038	0.001	0.001	0.002	0.001
13	0.015	0.014	0.032	0.036	0.001	0.001	0.001	0.002
14	0.014	0.013	0.032	0.038	0.001	0.002	0.001	0.002

ตารางที่ ๖-6 ความเข้มข้นไนโตรเจนในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน

วัน	ความเข้มข้นไนโตรเจน (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	0.049	0.073	0.010	0.009
1	0.045	0.077	0.007	0.017
2	0.044	0.078	0.012	0.023
3	0.050	0.077	0.006	0.011
4	0.051	0.078	0.005	0.012
5	0.056	0.076	0.017	0.020
6	0.050	0.091	0.007	0.014
7	0.053	0.101	0.018	0.018
8	0.049	0.112	0.003	0.013
9	0.055	0.127	0.013	0.018
10	0.056	0.078	0.011	0.015
11	0.044	0.097	0.008	0.011
12	0.047	0.114	0.006	0.021
12	0.036	0.076	0.012	0.007
13	0.057	0.103	0.025	0.018
14	0.059	0.093	0.003	0.011
15	0.052	0.095	0.011	0.008
15	0.048	0.073	0.021	0.015
16	0.053	0.068	0.009	0.010
17	0.061	0.062	0.007	0.026
18	0.063	0.062	0.004	0.024
18	0.047	0.082	0.017	0.016
19	0.051	0.098	0.013	0.003
20	0.060	0.093	0.003	0.026

วัน	ความเข้มข้นไนไตรท์ (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
21	0.060	0.071	0.013	0.036
21	0.056	0.075	0.008	0.025
22	0.061	0.101	0.013	0.007
23	0.066	0.102	0.002	0.011
24	0.065	0.098	0.003	0.022



ตารางที่ ๗-7 ความเข้มข้นไนเตรทในน้ำจากวิธีการเตรียมน้ำ 3 รูปแบบ โดยใช้ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่เลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกปิดเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกจากวิธีการเตรียมน้ำ 3 รูปแบบ

วัน	ความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาษ กรองใย แก้ว	กระดาษ กรองใย แก้วและนั่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาษ กรองใย แก้ว	กระดาษ กรองใย แก้วและนั่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	73.54	73.48	72.16	71.37	4.06	2.13	2.73	1.82
1	72.30	70.79	69.09	69.13	5.10	1.63	2.13	1.15
2	67.16	67.66	64.79	64.58	4.09	2.57	3.69	1.42
3	58.35	62.47	60.73	58.84	6.04	1.79	4.61	1.47
4	52.64	57.35	51.50	52.45	3.58	0.76	2.50	2.37
5	43.28	44.78	44.85	46.74	5.80	1.66	3.87	3.98
6	33.06	33.94	36.04	36.69	5.77	3.23	1.77	2.27
7	21.73	23.32	25.50	21.53	2.00	0.94	4.82	0.33
8	12.82	17.17	18.11	17.80	0.91	3.19	6.18	5.88
9	10.77	13.70	14.71	15.24	1.28	2.51	3.81	4.76
10	9.19	12.28	12.64	13.76	1.94	2.35	2.32	4.21
11	8.45	10.90	12.02	11.64	1.64	1.40	2.53	2.99
12	6.82	10.30	10.56	10.68	1.74	1.61	1.33	3.19
13	6.73	9.81	10.45	9.40	1.52	1.39	2.02	2.27
14	6.33	8.87	10.08	8.01	1.23	1.52	1.82	2.64

ตารางที่ ๘-8 ความเข้มข้นไนโตรเจนในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	257.33	68.42	65.08	252.54	3.06	6.56	4.20	2.24
1	248.35	66.86	62.70	241.98	6.63	7.47	3.79	1.72
2	238.04	51.36	45.46	234.55	0.94	5.43	4.58	5.68
3	217.03	47.92	43.54	223.26	4.63	2.25	4.44	2.21
4	208.01	42.36	41.61	218.55	4.60	3.09	3.90	5.98
5	206.82	37.29	34.73	213.36	11.28	3.81	2.33	6.98
6	192.13	29.58	17.36	199.69	16.72	6.89	3.61	8.34
7	180.94	15.57	8.74	197.90	16.75	2.56	2.21	8.36
8	175.52	5.81	6.29	191.03	13.55	3.63	1.89	5.53
9	173.46	3.07	4.27	184.14	12.59	0.96	1.79	5.22
10	168.94	2.85	3.20	177.48	10.40	1.16	1.70	2.75
11	163.19	2.19	1.83	172.48	10.10	0.81	1.50	5.87
12	158.52	1.96	1.35	170.48	8.40	1.40	1.45	5.87
13	156.52	1.89	0.84	163.81	7.69	1.19	1.11	3.70
14	154.52	1.07	0.75	160.81	8.40	1.32	0.98	2.44

ตารางที่ ๙-9 ความเข้มข้นไนเตรทในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน

วัน	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	262.67	65.08	8.08	4.20
1	259.33	62.70	9.02	3.79
2	251.67	55.46	11.85	4.58
3	247.00	53.54	13.08	4.44
4	238.33	51.61	12.50	3.90
5	221.00	44.73	3.61	2.33
6	199.00	37.36	10.82	3.61
7	175.33	23.74	7.57	2.21
8	170.00	12.27	3.00	1.79
9	159.67	8.96	10.02	1.09
10	156.33	5.20	11.02	1.70
11	154.33	3.83	5.51	1.50
12	152.67	3.35	4.73	1.45
12	201.00	34.56	8.54	5.36
13	175.00	17.92	3.61	2.08
14	167.33	10.72	3.06	1.20
15	160.33	5.57	1.53	1.85
15	207.00	36.70	8.19	1.69
16	180.00	18.71	6.00	4.71
17	171.33	12.90	5.77	2.98
18	161.67	8.89	6.51	1.44
18	205.00	38.20	4.58	2.40
19	178.00	20.24	4.58	0.75
20	170.33	14.55	5.03	3.82

วัน	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
21	163.33	8.13	4.16	2.89
21	208.67	37.20	11.02	2.70
22	179.33	18.57	10.02	2.07
23	175.00	11.10	5.57	1.77
24	168.00	6.70	5.29	1.69



ตารางที่ ๑๐-10 ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำจากวิธีการเตรียมน้ำ 3 รูปแบบ โดยใช้ระบบเพาะเลี้ยง สัตว์น้ำแบบปิดที่เลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นฟอสเฟตเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาษ กรองใย แก้ว	กระดาษ กรองใย แก้วและนั่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน	ไม่ผ่าน การ กรอง	กระดาษ กรองใย แก้ว	กระดาษ กรองใย แก้วและนั่ง ฆ่าเชื้อ	ไนลอน
0	3.52	3.56	3.50	3.58	0.10	0.12	0.04	0.05
1	3.23	3.33	3.39	3.53	0.02	0.15	0.07	0.08
2	2.88	2.99	3.13	3.38	0.11	0.17	0.28	0.15
3	2.62	2.50	2.58	2.82	0.21	0.14	0.10	0.10
4	1.79	2.30	2.10	2.24	0.07	0.03	0.23	0.03
5	1.03	1.35	1.33	1.28	0.20	0.19	0.02	0.09
6	0.76	0.88	0.86	0.90	0.05	0.06	0.25	0.08
7	0.50	0.65	0.64	0.77	0.04	0.11	0.36	0.04
8	0.42	0.61	0.62	0.71	0.02	0.06	0.22	0.06
9	0.31	0.59	0.52	0.67	0.01	0.04	0.15	0.06
10	0.32	0.57	0.47	0.60	0.05	0.04	0.12	0.09
11	0.32	0.53	0.43	0.49	0.03	0.02	0.14	0.08
12	0.32	0.47	0.41	0.50	0.04	0.03	0.08	0.11
13	0.30	0.46	0.37	0.48	0.03	0.05	0.09	0.09
14	0.27	0.44	0.40	0.51	0.03	0.07	0.11	0.02

ตารางที่ ๑๑-11 ความเข้มข้นฟอสเฟตในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดอากาศยก

วัน	ความเข้มข้นฟอสเฟตเฉลี่ย (มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)			
	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P	BG11	BG11 ลด N P	น้ำจาก ระบบ RAS	น้ำจาก ระบบ RAS เพิ่ม N P
0	6.58	3.60	3.57	6.54	0.08	0.06	0.06	0.17
1	6.37	3.38	3.43	6.14	0.19	0.18	0.20	0.50
2	5.61	3.22	3.27	5.50	0.37	0.20	0.09	0.16
3	4.92	2.58	2.81	4.45	0.38	0.17	0.07	0.19
4	3.23	2.04	2.19	2.67	0.38	0.23	0.50	0.24
5	1.56	1.09	0.99	1.34	0.34	0.41	0.11	0.21
6	0.24	0.53	0.59	0.42	0.04	0.22	0.26	0.06
7	0.22	0.33	0.46	0.38	0.03	0.11	0.01	0.07
8	0.22	0.33	0.42	0.34	0.03	0.12	0.01	0.05
9	0.21	0.31	0.42	0.33	0.02	0.15	0.01	0.05
10	0.20	0.33	0.41	0.32	0.01	0.17	0.05	0.07
11	0.20	0.28	0.39	0.30	0.01	0.15	0.03	0.07
12	0.19	0.30	0.36	0.30	0.01	0.05	0.04	0.07
13	0.18	0.28	0.31	0.31	0.01	0.01	0.06	0.04
14	0.17	0.34	0.31	0.27	0.00	0.00	0.03	0.01

ตารางที่ ๑๒-12 ความเข้มข้นไนเตรทในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง 24 วัน

วัน	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	262.67	65.08	8.08	4.20
1	259.33	62.70	9.02	3.79
2	251.67	55.46	11.85	4.58
3	247.00	53.54	13.08	4.44
4	238.33	51.61	12.50	3.90
5	221.00	44.73	3.61	2.33
6	199.00	37.36	10.82	3.61
7	175.33	23.74	7.57	2.21
8	170.00	12.27	3.00	1.79
9	159.67	8.96	10.02	1.09
10	156.33	5.20	11.02	1.70
11	154.33	3.83	5.51	1.50
12	152.67	3.35	4.73	1.45
12	201.00	34.56	8.54	5.36
13	175.00	17.92	3.61	2.08
14	167.33	10.72	3.06	1.20
15	160.33	5.57	1.53	1.85
15	207.00	36.70	8.19	1.69
16	180.00	18.71	6.00	4.71
17	171.33	12.90	5.77	2.98
18	161.67	8.89	6.51	1.44
18	205.00	38.20	4.58	2.40
19	178.00	20.24	4.58	0.75

วัน	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
20	170.33	14.55	5.03	3.82
21	163.33	8.13	4.16	2.89
21	208.67	37.20	11.02	2.70
22	179.33	18.57	10.02	2.07
23	175.00	11.10	5.57	1.77
24	168.00	6.70	5.29	1.69



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ๑๓-13 ความเข้มข้นฟอสเฟตในอาหารแต่ละประเภทที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. humicola* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงแบบอากาศยกขนาด 60 ลิตร รูปแบบการเพาะเลี้ยงกึ่งต่อเนื่อง

วัน	ความเข้มข้นฟอสเฟต (มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
0	6.552	3.561	0.026	0.056
1	6.301	3.428	0.067	0.226
2	5.492	3.257	0.246	0.075
3	4.771	2.813	0.129	0.084
4	3.206	2.186	0.375	0.275
5	1.688	0.994	0.147	0.119
6	0.733	0.510	0.003	0.065
7	0.331	0.286	0.028	0.092
8	0.334	0.277	0.024	0.075
9	0.332	0.278	0.022	0.078
10	0.330	0.263	0.019	0.052
11	0.329	0.260	0.017	0.047
12	0.338	0.266	0.033	0.058
12	3.704	1.720	0.189	0.159
13	1.425	0.609	0.406	0.095
14	0.649	0.227	0.199	0.031
15	0.303	0.194	0.041	0.032
15	3.681	1.760	0.335	0.055
16	1.931	0.795	0.219	0.047
17	0.806	0.544	0.152	0.122
18	0.368	0.255	0.017	0.078
18	3.655	1.850	0.272	0.156
19	1.787	0.806	0.171	0.137
20	0.632	0.407	0.233	0.123
21	0.271	0.187	0.005	0.029
21	3.660	1.817	0.203	0.063
22	1.756	0.761	0.257	0.189
23	0.546	0.341	0.175	0.080

วัน	ความเข้มข้นฟอสเฟต (มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	BG11	น้ำจากระบบ RAS	BG11	น้ำจากระบบ RAS
24	0.335	0.197	0.123	0.057



ภาคผนวก ก

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี


www.sigmaaldrich.com

เอกสารข้อมูลความปลอดภัย

ตามข้อกำหนด(EU) ที่ 1907/2006

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีทั่วไปของสหภาพยุโรป - ไม่มีข้อมูลเฉพาะของประเทศ - ไม่มีข้อมูล คำจำกัดสารเคมีที่ยอมให้สัมผัสได้ในสถานที่ทำงาน

ฉบับที่ 8.4

วันที่แก้ไข 22.11.2023

วันที่พิมพ์ 02.12.2023

ส่วน 1: ข้อมูลเกี่ยวกับสารเคมี/ผลิตภัณฑ์ และบริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่าย

1.1 การระบุผลิตภัณฑ์

ชื่อผลิตภัณฑ์ : Sodium dodecyl sulfate

หมายเลขผลิตภัณฑ์ : 436143
 ยี่ห้อ : Sigma-Aldrich
 เลข REACH : 01-2119489461-32-XXXX
 หมายเลข CAS : 151-21-3

1.2 การใช้ที่แนะนำและการใช้ที่ไม่แนะนำสำหรับสารหรือของผสม ซึ่งได้รับการระบุทราบและเกี่ยวข้อง

การระบุการใช้งาน : สารเคมีในห้องปฏิบัติการ, ผู้ผลิตสาร

1.3 รายละเอียดของผู้ส่งมอบแผ่นข้อมูลความปลอดภัย

บริษัท : Sigma-Aldrich Pte Ltd
 (Co. Registration No. 199403788W)
 2 Science Park Drive
 #05-01/12 Ascent Building
 SINGAPORE 118222
 SINGAPORE

โทรศัพท์ : +65 6890 6633
 แฟกซ์ : +65 6890 6639
 อีเมล : TechnicalService@merckgroup.com

1.4 หมายเลขโทรศัพท์ฉุกเฉิน

หมายเลขโทรศัพท์ฉุกเฉิน : 1-800-262-8200

ส่วน 2: ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย

2.1 การจำแนกประเภทสารเดี่ยวหรือสารผสม

การจัดกลุ่มตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป (EC) หมายเลข 1272/2008
 ของเชิงไวไฟ (ประเภทย่อย 2), H228
 ความเป็นพิษเฉียบพลัน, ทางปาก (ประเภทย่อย 4), H302

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 1 ของ 14





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข้อมูลเพิ่มเติม : ไม่มีข้อมูล

ส่วน 15: ข้อมูลด้านกฎข้อบังคับ

15.1 ข้อบังคับ/กฎหมายเกี่ยวกับความปลอดภัย/สุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่เฉพาะเจาะจงสำหรับสารเดี่ยวและสารผสม เอกสารข้อมูลความปลอดภัยนี้สอดคล้องกับข้อกำหนด 1907/2006.

ข้อบังคับอื่นๆ

ตรวจสอบข้อจำกัดในการทำงานเกี่ยวกับการคุ้มครองมารดาโดยเป็นไปตามข้อกำหนด Dirar บังคับใช้

ให้พิจารณาข้อกำหนด 94/33/EC ว่าด้วยความคุ้มครองต่อผู้ที่มีอายุน้อยในสถานที่ทำงาน

15.2 การประเมินความปลอดภัยทางเคมี
สารนี้ได้รับการประเมินความปลอดภัยทางเคมีแล้ว

ส่วน 16: ข้อมูลอื่นๆ รวมทั้งข้อมูลการจัดทำและการปรับปรุงแก้ไขเอกสารข้อมูลความปลอดภัย

ข้อความเต็มของข้อความ H อยู่ใน ส่วนที่ 2 และ 3

H228	ของแข็งไวไฟ
H302	เป็นอันตรายเมื่อกลืนกิน
H302 + H332	เป็นอันตรายเมื่อกลืนกินหรือหายใจเข้าไป
H315	ระคายเคืองต่อผิวหนังมาก
H318	ของแข็งไวไฟ
H319	เป็นอันตรายเมื่อกลืนกินหรือหายใจเข้าไป
H332	ระคายเคืองต่อผิวหนังมาก
H335	ทำลายดวงตาอย่างรุนแรง
H412	อาจระคายเคืองต่อทางการหายใจ



- 12.4** การเคลื่อนย้ายในดิน
ไม่มีข้อมูล
- 12.5** ผลจากการประเมิน PBT และ vPvB
สารและส่วนผสมไม่มีส่วนประกอบที่พิจารณาว่าเป็นสารตกค้างยาวนาน สะสมได้ในสิ่งมีชีวิต และเป็นพิษ (PBT) เป็นสารตกค้างยาวนานมาก สะสมได้มากในสิ่งมีชีวิต (vPvB) ที่ระดับ 0.1% หรือสูงกว่า
- 12.6** คุณสมบัติรวมกันต่อมไร้ท่อ
ผลิตภัณฑ์:
การประเมิน : สารเดี่ยวหรือสารผสม ไม่มีส่วนประกอบที่ถือว่ามีคุณสมบัติในการรวมกันการทำงานของต่อมไร้ท่อตาม REACH Article 57(f) หรือ Commission Delegated Regulation (EU) 2017/2100 หรือ Commission Regulation (EU) 2018/605 ในปริมาณที่ระดับ 0.1% หรือสูงกว่า
- 12.7** ผลกระทบในทางเสียหายอื่นๆ
ไม่มีข้อมูล

ส่วน 13: ข้อพิจารณาในการกำจัด

- 13.1** วิธีการบำบัดของเสีย
ไม่มีข้อมูล

ส่วน 14: ข้อมูลการขนส่ง

- 14.1** หมายเลขสหประชาชาติ
ADR/RID: 1325 IMDG: 1325 IATA: 1325
- 14.2** ชื่อที่ถูกต้องในการขนส่งของสหประชาชาติ
ADR/RID: FLAMMABLE SOLID, ORGANIC, N.O.S. (Sodium 1-dodecanol sulfate)
IMDG: FLAMMABLE SOLID, ORGANIC, N.O.S. (dodecyl sulphate sodium salt)
IATA: Flammable solid, organic, n.o.s. (dodecyl sulphate sodium salt)
- 14.3** ประเภทของอันตรายในการประกาศความเป็นอันตรายสำหรับการขนส่ง
ADR/RID: 4.1 IMDG: 4.1 IATA: 4.1
- 14.4** กลุ่มบรรจุภัณฑ์
ADR/RID: III IMDG: III IATA: III
- 14.5** อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
ADR/RID: ไม่ใช่ IMDG มลภาวะทางทะเล: ไม่ใช่ IATA: ไม่ใช่
- 14.6** ข้อควรระวังพิเศษสำหรับผู้ใช้

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 12 ของ 14



เมื่อดูดซึมจนถึงระดับที่ก่อให้เกิดพิษ:

ความเหน็ดเหนื่อย
การขยายตัวของหลอดเลือด

สมบัติที่อันตรายอื่นๆไม่สามารถมองข้ามได้

ใช้งานตามมาตรฐานด้านสุขอนามัยที่ดีของโรงงานอุตสาหกรรมและตามแนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย

ส่วน 12: ข้อมูลด้านนิเวศวิทยา

12.1 ความเป็นพิษ

ความเป็นพิษต่อปลา	การทดสอบการไหลผ่าน LC50 - Pimephales promelas (ปลาซิวหัวโต) - 29 mg/l - 96 h (แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 203)
ความเป็นพิษต่อไรน้ำและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอื่นที่อาศัยในน้ำ	การทดสอบการไหลผ่าน EC50 - Ceriodaphnia dubia (ไรน้ำ) - 5.55 mg/l - 48 h (แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 202)
ความเป็นพิษต่อสาหร่าย	การทดสอบทางสถิติ ErC50 - Desmodesmus subspicatus (สาหร่ายสีเขียว) - > 120 mg/l - 72 h (DIN 38412)
ความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย	การทดสอบทางสถิติ EC50 - กากตะกอนกัมมันต์ - 135 mg/l - 3 h หมายเหตุ: (ECHA)
ความเป็นพิษต่อปลา(ความเป็นพิษเรื้อรัง)	การทดสอบการไหลผ่าน NOEC - Pimephales promelas (ปลาซิวหัวโต) - >= 1.36 mg/l - 42 d หมายเหตุ: (ECHA)
ความเป็นพิษต่อไรน้ำและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอื่นที่อาศัยในน้ำ(ความเป็นพิษเรื้อรัง)	การทดสอบการไหลผ่าน NOEC - Ceriodaphnia dubia (ไรน้ำ) - 0.88 mg/l - 7 d (US-EPA)
12.2 การตกค้างยาวนานและความสามารถในการย่อยสลาย	
ความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพ	โซ่ออกซิเจน - ระยะเวลาสัมพัทธ์ 28 d ผล: 95 % - ย่อยสลายทางชีวภาพได้โดยง่าย (แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 301B)
12.3 ศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพ	
การสะสมทางชีวภาพ	Cyprinus carpio (ปลาคาร์พ) - 72 h (Sodium dodecyl sulphate) ปัจจัยของความเข้มข้นทางชีวภาพ (BCF): 3.9 - 5.3

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 11 ของ 14



ผล: ลบ

ชนิดการทดสอบ: การทดสอบมิวเทชันในยีนของเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในหลอดทดลอง

ระบบทดสอบ: Mouse lymphoma test

การกระตุ้นแทมอลิซิม: มี และไม่มีการกระตุ้นแทมอลิซิม

วิธีการ: แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 476

ผล: ลบ

ชนิดการทดสอบ: การทดสอบยีนเด่นที่ทำให้เกิดการตาย

ชนิดของสัตว์ทดลอง: หนูถีบจักร

ช่องทางการให้สาร: ทางปาก

วิธีการ: แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 478

ผล: ลบ

การก่อกวนเชิง

ไม่มีข้อมูล

ความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์

ไม่มีข้อมูล

ความเป็นพิษต่ออวัยวะเป้าหมายอย่างเฉพาะเจาะจง จากการรับสัมผัสครั้งเดียว

ถ้าหายใจเข้าไป - อาจระคายเคืองต่อทางการหายใจ - ทางเดินหายใจ

ความเป็นพิษต่ออวัยวะเป้าหมายอย่างเฉพาะเจาะจง จากการรับสัมผัสซ้ำ

ไม่มีข้อมูล

ความเป็นอันตรายจากการสำลัก

ไม่มีข้อมูล

11.2 ข้อมูลเพิ่มเติม

คุณสมบัติการควบคุม

ผลิตภัณฑ์:

การประเมิน

สารเดี่ยวหรือสารผสม ไม่มีส่วนประกอบที่ถือว่าเป็น
คุณสมบัติในการควบคุมการทำงานของต่อมไร้ท่อ
ตาม REACH Article 57(f) หรือ Commission
Delegated Regulation (EU) 2017/2100
หรือ Commission Regulation (EU)
2018/605 ในปริมาณที่ระดับ 0.1% หรือสูงกว่า

RTECS: WT1050000

จาม, มีรายงานว่าเกลือโซเดียมของโดดีซิลซัลเฟตก่อให้เกิดการกระตุ้นปอด ทำให้เกิดการกำบังของทางเดิน
หายใจตีบง่าย และโรคภูมิแพ้ในปอดร่วมกับความเหนื่อยล้า วิงเวียนและการปวด อาการที่สำคัญของการได้รับสาร
สามารถคงอยู่ได้นานกว่าสองปี และสามารถกระตุ้นได้ด้วยสิ่งเร้าทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่เฉพาะเจาะจง เช่น ไอเสียรถยนต์
น้ำหอม และควันบุหรี่มือสอง เป็นต้น

จาม, มีรายงานว่าเกลือโซเดียมของโดดีซิลซัลเฟตก่อให้เกิดการกระตุ้นปอด ทำให้เกิดการกำบังของทางเดิน
หายใจตีบง่าย และโรคภูมิแพ้ในปอดร่วมกับความเหนื่อยล้า วิงเวียนและการปวด อาการที่สำคัญของการได้รับสาร
สามารถคงอยู่ได้นานกว่าสองปี และสามารถกระตุ้นได้ด้วยสิ่งเร้าทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่เฉพาะเจาะจง เช่น ไอเสียรถยนต์
น้ำหอม และควันบุหรี่มือสอง เป็นต้น

เท่าที่ทราบ ยังไม่มีการตรวจสอบสมบัติทางเคมี ทางร่างกาย และทางพิษวิทยา อย่างละเอียดถี่ถ้วนแต่อย่างใด



- 10.2** ความเสถียรทางเคมี
ผลิตภัณฑ์นี้มีความเสถียรทางเคมีภายใต้สภาพแวดล้อมมาตรฐาน (อุณหภูมิห้อง)
- 10.3** ความเป็นไปได้ในเกิดปฏิกิริยาอันตราย
สามารถเกิดปฏิกิริยารุนแรงกับ
สารออกซิไดส์ที่แรง
- 10.4** สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง
การให้ความร้อนสูง
- 10.5** วัสดุที่เข้ากันไม่ได้
ไม่มีข้อมูล
- 10.6** อันตรายของสารที่เกิดจากการสลายตัว
ดูมาตรา 5

ส่วน 11: ข้อมูลด้านพิษวิทยา

11.1 ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบทางพิษวิทยา

ความเป็นพิษเฉียบพลัน

LD50 ทางปาก - หนูแรท - ตัวเมีย - 977 mg/kg

(แนวปฏิบัติการทดสอบ **OECD 401**)

อาการ: การระคายเคืองของเยื่อเมือกในปาก, หลอดลม, หลอดอาหาร และระบบทางเดินอาหาร
การประมาณความเป็นพิษเฉียบพลัน ถ้าหายใจเข้าไป - 4 h - 1.51 mg/l - ฝุ่น/หมอก

(การตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ)

LD50 ผิวหนัง - หนูแรท - ตัวผู้และตัวเมีย - > 2,000 mg/kg

(แนวปฏิบัติการทดสอบ **OECD 402**)

หมายเหตุ: ค่านี้กำหนดโดยเทียบเคียงกับสารต่อไปนี้: Sodium octyl sulphate

การกัดกร่อน และการระคายเคืองต่อผิวหนัง

ผิวหนัง - กระต่าย

ผล: ระคายเคืองต่อผิวหนัง - 24 h

(แนวปฏิบัติการทดสอบ **OECD 404**)

การทำลายดวงตารุนแรงและการระคายเคืองต่อดวงตา

ตา - กระต่าย

ผล: ผลที่ทำให้ดวงตาไม่สามารถกลับสู่สภาพปกติได้

(แนวปฏิบัติการทดสอบ **OECD 405**)

การกระตุ้นให้ไวต่อการแพ้ ในระบบทางเดินหายใจ หรือบนผิวหนัง

ไม่มีข้อมูล

การก่อกลายพันธุ์ของเซลล์สืบพันธุ์

ชนิดการทดสอบ: การทดสอบแบบแอมส์

ระบบทดสอบ: เชื้อ *Escherichia coli*/เชื้อ *Salmonella typhimurium*

การกระตุ้นเมทาบอลิซึม: มี และไม่มีการกระตุ้นเมทาบอลิซึม

วิธีการ: แนวปฏิบัติการทดสอบ **OECD 471**

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 9 ของ 14



เอง	
j) อุณหภูมิของการสลายตัว	ไม่มีข้อมูล
k) ค่าความเป็นกรด-ด่าง	9.1 ที่ 10 g/l
l) ความหนืด	ความหนืดโคเนแมติก: ไม่มีข้อมูล ความหนืดไดนามิก: ไม่มีข้อมูล
m) ความสามารถในการละลายในน้ำ	130 g/l ที่ 20 °C - แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 105
n) ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารในชั้นของเอ็น-ออกทานอล/น้ำ	ไม่มีข้อมูล
o) ความดันไอ	≤ 0.18 Pa ที่ 20 °C - แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 104
p) ความหนาแน่น	1.03 g/cm ³ ที่ 20 °C
ความหนาแน่นสัมพัทธ์	ไม่มีข้อมูล
q) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของไอ	ไม่มีข้อมูล
r) ลักษณะของอนุภาค	ไม่มีข้อมูล
s) สมบัติทางการระเบิด	ไม่มีข้อมูล
t) คุณสมบัติในการออกซิไดซ์	ไม่มี

9.2 ข้อมูลความปลอดภัยอื่น ๆ

ความหนาแน่นรวม	0.496 g/cm ³
ค่าความตึงผิว	25.2 mN/m ที่ 1 กรัม/ลิตร ที่ 23 °C - แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 115
ค่าคงที่การแตกตัว	1.31 ที่ 20 °C - แนวปฏิบัติการทดสอบ OECD 112

ส่วน 10: ความเสถียรและการเกิดปฏิกิริยา

10.1 การเกิดปฏิกิริยา

เมื่อผสมกับอากาศ ก่อให้เกิดของผสมที่ระเบิดได้ เมื่อได้รับความร้อนสูง ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดวาบไฟตั้งแต่ประมาณ 15 เคลวิน ลงมาถือว่าเป็นช่วงวิกฤต ข้อกำหนดต่อไปนี้จะใช้โดยทั่วไปกับสารและสารผสมอินทรีย์ที่ติดไฟง่าย: ปรับการกรมนวนอย่างเร็วจน ก่อให้เกิดฝุ่นระเบิด

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 8 ของ 14



วัสดุซึ่งผ่านการทดสอบ KCL 741 Dermatril® L

ติดต่อโดยสาย

วัสดุ: ถุงมือยางไนไตรล์

ความหนาของชั้นชั้นต่ำ 0.11 mm

เวลาที่สารใช้ในการทะลุผ่าน: 480 min

วัสดุซึ่งผ่านการทดสอบ KCL 741 Dermatril® L

การป้องกันร่างกาย

เสื้อผ้าปกป้องที่ต้านไฟฟ้าสถิตและทวนวงไฟ

การป้องกันระบบทางเดินหายใจ

จำเป็น เมื่อมีฝุ่น

คำแนะนำของเราเกี่ยวกับการกรองอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจเป็นไปตามมาตรฐาน

ดังต่อไปนี้: **DIN EN 143, DIN 14387** และมาตรฐานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกัน

ทางเดินหายใจที่ใช้

ประเภทของไส้กรองที่แนะนำ ไส้กรองชนิด **P2**

ผู้ประกอบการจำเป็นต้องดำเนินการเพื่อให้มั่นใจว่ามีการดูแลรักษา การทำความสะอาด และการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันทางการหายใจ ตามคำแนะนำของผู้ผลิต มาตรการเหล่านี้ได้มีการจัดทำอย่างเป็นลายลักษณ์อักษร

การควบคุมการแพร่กระจายไปยังสิ่งแวดล้อม

ห้ามให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่ท่อระบายน้ำ ความเสี่ยงที่จะระเบิด

ส่วน 9: คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

9.1 ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

- | | |
|--|--|
| a) สถานะทางกายภาพ | แห้งตัน |
| b) สี | ขาว |
| c) กลิ่น | ไม่มีกลิ่น |
| d) จุดหลอมเหลว/ช่วงของจุดเยือกแข็ง | จุดหลอมเหลว/ช่วงของจุดหลอมเหลว: 204 - 207 °C - lit. |
| e) จุดเดือดเริ่มต้น/ช่วงของจุดเดือด | ไม่มีข้อมูล |
| f) ความสามารถในการลุกติดไฟได้ (ของแข็งก้ำช) | สารหรือสารผสมเป็นของแข็งไวไฟประเภท 2 - ความสามารถในการลุกติดไฟ (ของแข็งก้ำช) |
| g) สูงกว่า/ต่ำกว่า ขีดจำกัดการติดไฟ หรือระเบิด | ไม่มีข้อมูล |
| h) จุดวาบไฟ | 170 °C - ข้อบังคับ (EC) หมายเลข 440/2008 ภาคผนวก A.9 |
| i) อุณหภูมิที่ลุกติดไฟได้ | 310.5 °C |

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 7 ของ 14



ส่วน 8: การควบคุมการสัมผัสและการป้องกันส่วนบุคคล

8.1 ค่าต่างๆ ที่ใช้ควบคุม

ส่วนประกอบที่มีค่าควบคุมในสถานที่ทำงาน

ระดับอนุพันธ์ที่ไม่มีผลกระทบ (DNEL)

ขอบข่ายการใช้งาน	ช่องทางการรับสัมผัส	ผลกระทบต่อสุขภาพ	ค่า
DNEL ของผู้ปฏิบัติงาน, ระยะยาว	ทางผิวหนัง	ระบบประสาท	
DNEL ของผู้ปฏิบัติงาน, ระยะยาว	ทางการหายใจ	ระบบประสาท	285 mg/m ³
DNEL ของผู้บริโภคระยะยาว	ทางผิวหนัง	ระบบประสาท	
DNEL ของผู้บริโภคระยะยาว	ทางการหายใจ	ระบบประสาท	85 mg/m ³
DNEL ของผู้บริโภคระยะยาว	ทางปาก	ระบบประสาท	

ความเข้มข้นที่คาดการณ์ว่าไม่มีผลกระทบ (PNEC)

ส่วนกันแยก	ค่า
น้ำจืด	0.137 mg/l
น้ำทะเล	0.0137 mg/l
การปล่อยน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง	0.055 mg/l
โรงบำบัดสิ่งปฏิกูล	1084 mg/l
ตะกอนน้ำจืด	4.82 mg/kg
ตะกอนทะเล	0.482 mg/kg
ดิน	0.882 mg/kg

8.2 การควบคุมการสัมผัสสาร

อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล

การป้องกันตา/ใบหน้า

ใช้อุปกรณ์ป้องกันการตา ที่ผ่านการทดสอบและรับรอง ภายใต้มาตรฐานของรัฐบาลที่เหมาะสม เช่น **NIOSH (US)** หรือ **EN 166 (EU)** เป็นต้น ใส่แว่นครอบตาที่แน่นกระชับ

การป้องกันผิวหนัง

คำแนะนำนี้ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ของเมอร์คเท่านั้นตามที่ระบุในเอกสารข้อมูลความปลอดภัย รวมถึงวัตถุประสงค์ในการใช้งานตามที่เมอร์คกำหนด เมื่อนำผลิตภัณฑ์นี้ไปละลายหรือผสมกับสารอื่นภายใต้สภาวะที่เบี่ยงเบนไปจากที่กำหนดใน **EN 16523-1** กรุณาติดต่อผู้จำหน่ายถุงมือที่ได้รับการรับรองจาก **CE** (เช่น **KCL GmbH, D-36124 Eichenzell**, อินเทอร์เน็ต: www.kcl.de)

ติดต่อแบบเต็ม

วัสดุ: ถุงมือยางไนไตรล์

ความหนาของชั้นชั้นต่ำ 0.11 mm

เวลาที่สารใช้ในการทะลุผ่าน: 480 min



ส่วน 6: มาตรการจัดการเมื่อมีการหกหรือไหลของสาร

- 6.1** ค่าเตือนสำหรับบุคคล อุปกรณ์ป้องกัน และวิธีรับมือเหตุการณ์ฉุกเฉิน
แนะนำสำหรับบุคลากรที่ไม่ได้อยู่ในสถานการณ์ฉุกเฉิน ไม่ควรสูดดมฝุ่น ไม่ควรสัมผัสกับสาร ทำให้แน่ใจว่ามีกร
ระบายอากาศที่ดีพอ หลีกเลี่ยงความร้อนและแหล่งกำเนิดการจุดติดไฟ ออกจากพื้นที่อันตราย อ่านขั้นตอนปฏิบัติ
เมื่อเกิดเหตุการณ์ ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ
สำหรับการป้องกันภัยส่วนบุคคลให้ดูหัวข้อที่ **8**
- 6.2** ข้อควรระวังด้านสิ่งแวดล้อม
ห้ามให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่ท่อระบายน้ำ ความเสี่ยงที่จะระเบิด
- 6.3** วิธีการและวัสดุสำหรับกักเก็บและทำความสะอาด
ปิดท่อระบายน้ำ รวบรวม มัด และสูบของเหลวที่หกออก อ่านข้อกำหนดวัสดุที่เป็นไปได้ (ดูหัวข้อ **7** และ **10**) กวาด
ขณะแห้ง ส่งไปกำจัด ทำความสะอาดบริเวณที่ปนเปื้อน หลีกเลี่ยงการก่อให้เกิดฝุ่น
- 6.4** อ้างอิงกับส่วนอื่น ๆ
สำหรับการกำจัดดูหัวข้อ **13**

ส่วน 7: การขนถ่าย เคลื่อนย้าย ใช้งาน และเก็บรักษา

- 7.1** ข้อควรระวังเพื่อความปลอดภัยในการขนถ่าย เคลื่อนย้าย ใช้งาน และเก็บรักษา
ข้อแนะนำในการจัดการอย่างปลอดภัย
ทำงานใต้เครื่องดูดควัน ห้ามสูดดมสาร/สารผสม
ข้อแนะนำในการป้องกันไฟไหม้และการระเบิด
ห้ามเข้าใกล้เปลวไฟ พื้นผิวร้อน และแหล่งกำเนิดประกายไฟใช้มาตรการป้องกันประจําไฟฟ้าสถิต
มาตรฐานด้านสุขอนามัย
เปลี่ยนเสื้อผ้าที่เป็นสารเคมีทันที ทาครีมป้องกันผิวหนัง ล้างมือและหน้าหลังจากการใช้สาร
สำหรับข้อควรระวังดูหัวข้อ **2.2**
- 7.2** สภาพการเก็บรักษาอย่างปลอดภัย รวมทั้งข้อห้ามในการเก็บรักษาสารที่เข้ากันไม่ได้
สภาวะในการจัดเก็บ
ปิดให้แน่น หลีกเลี่ยงความร้อนและแหล่งกำเนิดการจุดติดไฟ
ดูความชื้น
ประเภทการจัดเก็บ
มาตรฐานประเทศเยอรมันในการจัดเก็บสารเคมี (TRGS 510): 4.1B: วัสดุอันตรายของแข็งที่ติดไฟได้
- 7.3** การใช้ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับผู้ใช้
นอกเหนือจากการใช้งานที่กล่าวถึงในส่วนที่ **1.2** ไม่มีการระบุการใช้งานเฉพาะอื่น ๆ



ส่วน 4: มาตรการปรุพยามบาล
4.1 คำอธิบายของมาตรการการปรุพยามบาล

คำแนะนำทั่วไป

แสดงเอกสารข้อมูลความปลอดภัยฉบับนี้ให้แพทย์

หากหายใจเข้าไป

เมื่อสูดดม: ให้รีบอากาศบริสุทธิ์

ในกรณีสัมผัสกับผิวหนัง

ในกรณีสัมผัสกับผิวหนัง: ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนทั้งหมดออกทันที ล้างผิวหนังด้วยน้ำไหลริน / ฝักบัว

ในกรณีที่เข้าตา

เมื่อเข้าตา: ล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก โปรดปรึกษาจักษุแพทย์ทันที ถอดคอนแทคเลนส์

หากกลืนกิน

หลังจากดื่มแล้ว ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำตามทันทีอย่างน้อยสองแก้ว ปรึกษาแพทย์

4.2 อาการและผลกระทบที่สำคัญที่สุดที่แบบเฉียบพลัน และเกิดในภายหลัง
อาการและผลกระทบที่เกิดตามมาที่สำคัญที่สุดที่รู้จักได้ถูกอธิบายในฉลาก (ตาม หัวข้อที่ 2.2) และ/หรือ ในหัวข้อที่ 11**4.3** ข้อควรพิจารณาทางการแพทย์ที่ต้องทำทันที และการดูแลรักษาเฉพาะที่สำคัญที่ควรดำเนินการ
ไม่มีข้อมูล

ส่วน 5: มาตรการผจญเพลิง
5.1 สารดับเพลิง

สารดับเพลิงที่เหมาะสม

น้ำ โฟม คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สารดับเพลิงชนิดผง

สารดับเพลิงที่ไม่เหมาะสม

สำหรับสาร/สารผสมชนิดนี้ ไม่มีข้อจำกัดของสารดับไฟ

5.2 ความเป็นอันตรายเฉพาะที่เกิดจากสารหรือสารผสม

คาร์บอน ออกไซด์

ซิลเฟอร์ ออกไซด์

โซเดียม ออกไซด์

ลูกไฟติดไฟได้

ไอหนักกว่าอากาศและอาจกระจายไปตามพื้น

เมื่อผสมกับอากาศ ก่อให้เกิดของผสมที่ระเบิดได้ เมื่อได้รับความร้อนสูง

เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะก่อให้เกิดแก๊สหรือไอระเหยที่เป็นอันตราย

5.3 คำแนะนำสำหรับผจญเพลิง

อย่าอยู่ในพื้นที่อันตรายโดยปราศจากอุปกรณ์ช่วยหายใจ ควรอยู่ในระยะห่างที่ปลอดภัยและสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันตามความเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับผิวหนัง

5.4 ข้อมูลเพิ่มเติม

ยับยั้ง (สกัดกั้น) ก๊าซ/ไอ/หมอกด้วยพวยละอองน้ำ ป้อนกันไม่ให้ให้น้ำจากอุปกรณ์ดับเพลิงปนเปื้อนระบบน้ำผิวดินหรือระบบน้ำใต้ดิน

Sigma-Aldrich- 436143

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

หน้า 4 ของ 14



2.3 อันตรายอื่นๆ

สารและส่วนผสมไม่มีส่วนประกอบที่พิจารณาว่าเป็นสารตกค้างยาวนาน สะสมได้ในสิ่งมีชีวิต และเป็นพิษ (PBT) เป็นสารตกค้างยาวนานมาก สะสมได้มากในสิ่งมีชีวิต (vPvB) ที่ระดับ 0.1% หรือสูงกว่า

ข้อมูลด้านนิเวศวิทยา:

สารเดี่ยวหรือสารผสม ไม่มีส่วนประกอบที่ถือว่ามีคุณสมบัติในการรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อตาม REACH Article 57(f) หรือ Commission Delegated Regulation (EU) 2017/2100 หรือ Commission Regulation (EU) 2018/605 ในปริมาณที่ระดับ 0.1% หรือสูงกว่า

ข้อมูลด้านพิษวิทยา:

สารเดี่ยวหรือสารผสม ไม่มีส่วนประกอบที่ถือว่ามีคุณสมบัติในการรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อตาม REACH Article 57(f) หรือ Commission Delegated Regulation (EU) 2017/2100 หรือ Commission Regulation (EU) 2018/605 ในปริมาณที่ระดับ 0.1% หรือสูงกว่า

ส่วน 3: องค์ประกอบและข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสม**3.1** สารเดี่ยว

ชื่อพ้อง : Lauryl sulfate sodium salt
Sodium dodecyl sulphate
Sodium dodecyl sulfate
Sodium lauryl sulfate
Dodecyl sodium sulfate
Dodecyl sulfate sodium salt
SDS

สูตร : C₁₂H₂₅O₄S.Na
น้ำหนักโมเลกุล : 288.38 g/mol
หมายเลข CAS : 151-21-3
หมายเลข EC : 205-788-1

ส่วนประกอบ	การจำแนกประเภท	ความเข้มข้น
Sodium dodecyl sulphate		
หมายเลข CAS 151-21-3 หมายเลข EC 205-788-1	Flam. Sol. 2; Acute Tox. 4; Skin Irrit. 2; Eye Dam. 1; STOT SE 3; Aquatic Chronic 3; H228, H302, H332, H315, H318, H335, H412 ขีดจำกัดความเข้มข้น: 10 - < 20 %: Eye Irrit. 2, H319; >= 20 %: Eye Dam. 1, H318;	<= 100 %

สำหรับข้อความเต็มของข้อความ H ที่อ้างในส่วนนี้ ดูส่วนที่ 16



ความเป็นพิษเฉียบพลัน, ถ้าหายใจเข้าไป (ประเภทย่อย 4), H332
 การระคายเคืองต่อผิวหนัง (ประเภทย่อย 2), H315
 การทำลายดวงตาอย่างรุนแรง (ประเภทย่อย 1), H318
 ความเป็นพิษต่อวัยระเป้าหมายอย่างเฉพาะเจาะจง จากการรับสัมผัสครั้งเดียว (ประเภทย่อย 3), ระบบหายใจ,
 H335
 ความเป็นอันตรายระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อมในน้ำ (ประเภทย่อย 3), H412

สำหรับข้อความเต็มของข้อความ H ที่อ้างในส่วนนี้ ดูส่วนที่ 16

2.2 องค์ประกอบของฉลาก

การตัดสินใจตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป (EC) หมายเลข 1272/2008
 รูปสัญลักษณ์



คำสัญญาณ	อันตราย
ข้อความแสดงความเป็นอันตราย	
H228	ของแข็งไวไฟ
H302 + H332	เป็นอันตรายเมื่อกินหรือหายใจเข้าไป
H315	ระคายเคืองต่อผิวหนังมาก
H318	ทำลายดวงตาอย่างรุนแรง
H335	อาจระคายเคืองต่อทางการหายใจ
H412	เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและมีผลกระทบต่อระยะยาว
ข้อความที่แสดงข้อควรระวัง	
P210	เก็บให้ห่างจากความร้อน / ประกายไฟ / เปลวไฟ / พื้นผิวที่ร้อน -ห้ามสูบบุหรี่
P273	หลีกเลี่ยงการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม
P280	สวมถุงมือป้องกัน/เสื้อผ้าป้องกัน/อุปกรณ์ป้องกันดวงตา/อุปกรณ์ป้องกันใบหน้า.
P301 + P312	หากกลืนกิน : โทรหาศูนย์พิษวิทยาหรือแพทย์ / โรงพยาบาลหรือถ้ารู้สึกไม่สบาย
P304 + P340 + P312	ถ้าสูดดมเข้าไป : ย้ายผู้ประสบเหตุไปยังที่อากาศสดชื่น และให้พักในที่หายใจ
P305 + P351 + P338	สะดวก โทรหาศูนย์พิษวิทยาหรือแพทย์ / โรงพยาบาลหรือถ้ารู้สึกไม่สบาย
	หากเข้าตาให้ล้างด้วยน้ำเป็นเวลาหลาย ๆ นาที ถอดคอนแทคเลนส์ออก ถ้าถอดได้
	ง่าย แล้วทำการล้างตาต่อไป
ข้อความอันตรายเพิ่มเติม	ไม่มี

ฉลากแบบย่อ (<= 125 มล.)

รูปสัญลักษณ์



คำสัญญาณ	อันตราย
ข้อความแสดงความเป็นอันตราย	
H318	ทำลายดวงตาอย่างรุนแรง
H412	เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและมีผลกระทบต่อระยะยาว
ข้อความที่แสดงข้อควรระวัง	
P305 + P351 + P338	หากเข้าตาให้ล้างด้วยน้ำเป็นเวลาหลาย ๆ นาที ถอดคอนแทคเลนส์ออก ถ้าถอดได้
	ง่าย แล้วทำการล้างตาต่อไป
ข้อความอันตรายเพิ่มเติม	ไม่มี

Sigma-Aldrich- 436143

หน้า 2 ของ 14

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



ข้อความเต็มของตัวย่ออื่นๆ

ADN - ข้อตกลงร่วมของกลุ่มประชาคมยุโรปว่าด้วยการขนส่งสินค้าอันตรายข้ามแดนทางน้ำ; ADR - ข้อตกลงร่วมของกลุ่มประชาคมว่าด้วยการขนส่งสินค้าอันตรายข้ามแดนทางบก; AIIC - บัญชีสารเคมีอุตสาหกรรมออสเตรเลีย; ASTM - สมาคมอเมริกันเพื่อการทดสอบวัสดุ; bw - น้ำหนักตัว; CMR - สารถ้อมะเร็ง สารก่อการกลายพันธุ์ หรือสารที่เป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์; DIN - มาตรฐานของสถาบันเพื่อการกำหนดมาตรฐานแห่งเยอรมนี; DSL - รายการสินค้าที่ได้รับอนุญาตในประเทศ (แคนาดา); ECx - ความเข้มข้นที่เกี่ยวข้องกับร้อยละของการตอบสนอง; ELx - อัตราการบรรจุที่เกี่ยวข้องกับร้อยละของการตอบสนอง; EmS - ตารางเวลาฉุกเฉิน; ENCS - สารเคมีที่ได้รับอนุญาตและสารเคมีชนิดใหม่ (ญี่ปุ่น); ErCx - ความเข้มข้นที่เกี่ยวข้องกับร้อยละการตอบสนองของอัตราการเจริญ; GHS - ระบบการจำแนกและสื่อสารความเป็นอันตรายที่เป็นระบบเดียวกันทั่วโลก; GLP - แนวปฏิบัติในห้องปฏิบัติการที่ดี; IARC - องค์การวิจัยโรคมะเร็งนานาชาติ; IATA - สมาคมการขนส่งทางอากาศระหว่างประเทศ; IBC - กฎหมายนานาชาติว่าด้วยการต่อเรือและอุปกรณ์ของเรือที่ใช้บรรทุกสารเคมีอันตรายในระหว่างเป็นปริมาตรรวม; IC50 - ความเข้มข้นที่ต้องใช้เพื่อลดปฏิกิริยาเหลือ 50%; ICAO - องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ; IECS - รายการสารเคมีที่ได้รับอนุญาตของประเทศจีน; IMDG - การขนส่งสินค้าอันตรายข้ามแดนทางน้ำ; IMO - องค์การทางทะเลระหว่างประเทศ; ISHL - กฎหมายอุตสาหกรรมว่าด้วยความปลอดภัยและสุขภาพ (ญี่ปุ่น); ISO - องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน; KECI - รายการสารเคมีที่ได้รับอนุญาตของประเทศเกาหลี; LC50 - ความเข้มข้นของสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไปครึ่งหนึ่ง; LD50 - ปริมาณสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไปครึ่งหนึ่ง (ปริมาณถึงขนาดมีรายงาน); MARPOL - อนุสัญญาว่าด้วยการป้องกันมลภาวะจากเรือ; n.o.s. - ไม่ได้ระบุเป็นอย่างอื่น; NO(A)EC - ความเข้มข้นที่ไม่พบผล (อันไม่พึงประสงค์); NO(A)EL - ระดับที่ไม่พบผล (อันไม่พึงประสงค์); NOELR - อัตราการบรรจุที่ไม่พบผล; NZIOc - รายการสารเคมีของประเทศนิวซีแลนด์; OECD - องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา; OPPTS - สำนักงานความปลอดภัยสารเคมีและการป้องกันมลพิษ; PBT - สารตกค้าง สะสมในสิ่งมีชีวิต และเป็นพิษ; PICCS - รายการสารเคมีของประเทศฟิลิปปินส์; (Q)SAR - ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาและโครงสร้างสามมิติ (เชิงปริมาณ); REACH - ข้อบังคับ (คณะกรรมการยุโรป) เลขที่ 1907/2006 ข้อบังคับว่าด้วยการขึ้นทะเบียน การประเมิน การอนุญาต และการจำกัดการใช้สารเคมี; RID - กฎหมายว่าด้วยการขนส่งสินค้าอันตรายข้ามแดนทางราง; SADT - อุณหภูมิที่สารละลายตัวได้เอง; SDS - เอกสารข้อมูลความปลอดภัย; TCSI - รายการสารเคมีของประเทศไต้หวัน; TECl - ทำเนียบสารเคมีที่มีอยู่แล้วของประเทศไทย; TSCA - กฎหมายควบคุมสารพิษ (สหรัฐอเมริกา); UN - สหประชาชาติ; UNRTDG - คู่มือการขนส่งสินค้าอันตรายของสหประชาชาติ; vPvB - ตกค้างได้มากและสะสมในสิ่งมีชีวิตได้มาก

ข้อมูลเพิ่มเติม

ข้อมูลข้างต้นนี้เชื่อว่าถูกต้อง แต่ไม่ได้หมายความว่าเราจะครอบคลุมทุกอย่าง และควรใช้เป็นแนวทางเท่านั้น ข้อมูลในเอกสารนี้ ขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบันของความรู้ของเรา และสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึงข้อควรระวังระดับความปลอดภัยที่เหมาะสม ทั้งนี้ข้อมูลไม่ได้แสดงถึงการรับประกันคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ Sigma-Aldrich Corporation และบริษัทในเครือจะไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่เกิดจากการใช้งานหรือจากการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ข้างต้น โปรดดูที่ www.sigma-aldrich.com และ/หรือด้านหลังใบแจ้งหนี้หรือใบส่งสินค้าสำหรับข้อกำหนด และเงื่อนไขการขายเพิ่มเติม

ลิขสิทธิ์ © 2020 Sigma-Aldrich Co. LLC. ใบอนุญาตให้ทำสำเนากระดาษไม่จำกัด เพื่อใช้ภายในเท่านั้น

แบรนด์ที่อยู่ส่วนหัวและ/หรือส่วนท้ายของเอกสารนี้ อาจไม่ตรงกับผลิตภัณฑ์ที่ซื้อไป เมื่อเราเปลี่ยนแบรนด์ของเรา อย่างไรก็ตามข้อมูลทั้งหมดในเอกสารนี้เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ยังคงเหมือนเดิมและตรงกับผลิตภัณฑ์ที่สั่งซื้อ สำหรับข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อ milsbranding@sial.com



Sigma-Aldrich- X100

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Page 13 of 13



Full text of other abbreviations

ADN - European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways; ADR - Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road; AIIC - Australian Inventory of Industrial Chemicals; ASTM - American Society for the Testing of Materials; bw - Body weight; CMR - Carcinogen, Mutagen or Reproductive Toxicant; DIN - Standard of the German Institute for Standardisation; DSL - Domestic Substances List (Canada); ECx - Concentration associated with x% response; ELx - Loading rate associated with x% response; EmS - Emergency Schedule; ENCS - Existing and New Chemical Substances (Japan); ErCx - Concentration associated with x% growth rate response; GHS - Globally Harmonized System; GLP - Good Laboratory Practice; IARC - International Agency for Research on Cancer; IATA - International Air Transport Association; IBC - International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk; IC50 - Half maximal inhibitory concentration; ICAO - International Civil Aviation Organization; IECSC - Inventory of Existing Chemical Substances in China; IMDG - International Maritime Dangerous Goods; IMO - International Maritime Organization; ISHL - Industrial Safety and Health Law (Japan); ISO - International Organisation for Standardization; KECI - Korea Existing Chemicals Inventory; LC50 - Lethal Concentration to 50 % of a test population; LD50 - Lethal Dose to 50% of a test population (Median Lethal Dose); MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; n.o.s. - Not Otherwise Specified; NO(A)EC - No Observed (Adverse) Effect Concentration; NO(A)EL - No Observed (Adverse) Effect Level; NOELR - No Observable Effect Loading Rate; NZIoC - New Zealand Inventory of Chemicals; OECD - Organization for Economic Co-operation and Development; OPPTS - Office of Chemical Safety and Pollution Prevention; PBT - Persistent, Bioaccumulative and Toxic substance; PICCS - Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances; (Q)SAR - (Quantitative) Structure Activity Relationship; REACH - Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals; RID - Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail; SADT - Self-Accelerating Decomposition Temperature; SDS - Safety Data Sheet; TCSI - Taiwan Chemical Substance Inventory; TECI - Thailand Existing Chemicals Inventory; TSCA - Toxic Substances Control Act (United States); UN - United Nations; UNRTDG - United Nations Recommendations on the Transport of Dangerous Goods; vPvB - Very Persistent and Very Bioaccumulative

Further information

The above information is believed to be correct but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. The information in this document is based on the present state of our knowledge and is applicable to the product with regard to appropriate safety precautions. It does not represent any guarantee of the properties of the product. Sigma-Aldrich Corporation and its Affiliates shall not be held liable for any damage resulting from handling or from contact with the above product. See www.sigma-aldrich.com and/or the reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

Copyright 2020 Sigma-Aldrich Co. LLC. License granted to make unlimited paper copies for internal use only.

The branding on the header and/or footer of this document may temporarily not visually match the product purchased as we transition our branding. However, all of the information in the document regarding the product remains unchanged and matches the product ordered. For further information please contact mlsbranding@sial.com.



SECTION 15: Regulatory information
15.1 Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

This material safety data sheet complies with the requirements of Regulation (EC) No. 1907/2006.

Authorisations and/or restrictions on use

REACH - Candidate List of Substances of Very High Concern for Authorisation (Article 59) : Octylphenol polyethoxyethanol

This product contains a substance listed on Annex XIV of the REACH Regulation (EC) Nr. 1907/2006.

Listed substance / Sunset Date : Octylphenol polyethoxyethanol / 04.01.2021

After the sunset date the use of this substance requires either an authorization or can only be used for exempted uses, e.g. use in scientific research and development which includes routine analytics or use as intermediate.

National legislation

Seveso III: Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. E1 ENVIRONMENTAL HAZARDS

E1 ENVIRONMENTAL HAZARDS

Other regulations

Observe work restrictions regarding maternity protection in accordance to Dir 92/85/EEC or stricter national regulations where applicable.

Take note of Dir 94/33/EC on the protection of young people at work.

15.2 Chemical Safety Assessment

For this product a chemical safety assessment was not carried out

SECTION 16: Other information
Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3.

H302	Harmful if swallowed.
H315	Causes skin irritation.
H318	Causes serious eye damage.
H400	Very toxic to aquatic life.
H410	Harmful if swallowed.



Delegated Regulation (EU) 2017/2100.

Components:

Octylphenol polyethoxyethanol:

Assessment : The substance is considered to have endocrine disrupting properties according to REACH Article 57(f) for the environment.

12.7 Other adverse effects

Causes endocrine disruption.
Discharge into the environment must be avoided.

SECTION 13: Disposal considerations

13.1 Waste treatment methods

No data available

SECTION 14: Transport information

14.1 UN number

ADR/RID: 3082 IMDG: 3082 IATA: 3082

14.2 UN proper shipping name

ADR/RID: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, LIQUID, N.O.S. (p-tertiary-Octylphenoxy polyethyl alcohol)
IMDG: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, LIQUID, N.O.S. (p-tertiary-Octylphenoxy polyethyl alcohol)
IATA: Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (p-tertiary-Octylphenoxy polyethyl alcohol)

14.3 Transport hazard class(es)

ADR/RID: 9 IMDG: 9 IATA: 9

14.4 Packaging group

ADR/RID: III IMDG: III IATA: III

14.5 Environmental hazards

ADR/RID: yes IMDG Marine pollutant: yes IATA: yes

14.6 Special precautions for user

Further information

Packages smaller than or equal to 5 kg / L , not dangerous goods of Class 9



(OECD Test Guideline 203)

Remarks: The value is given in analogy to the following substances:
4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol

Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates	LC50 - Daphnia magna (Water flea) - 18 - 26 mg/l - 48 h
Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates	static test EC50 - Daphnia magna (Water flea) - 0.011 mg/l - 48 h Remarks: (ECOTOX Database) The value is given in analogy to the following substances: 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol
Toxicity to algae	static test EC50 - Pseudokirchneriella subcapitata (green algae) - 1.9 mg/l - 96 h Remarks: (ECHA) The value is given in analogy to the following substances: 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol
Toxicity to fish(Chronic toxicity)	flow-through test - Danio rerio (zebra fish) - 0.012 mg/l (OECD Test Guideline 210) Remarks: The value is given in analogy to the following substances: 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol
Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates(Chronic toxicity)	semi-static test NOEC - Daphnia magna (Water flea) - 0.03 mg/l - 21 d (OECD Test Guideline 202) Remarks: The value is given in analogy to the following substances: 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol

12.2 Persistence and degradability

Biodegradability aerobic - Exposure time 28 d
Result: 22 % - Not readily biodegradable.
(OECD Test Guideline 301C)

12.3 Bioaccumulative potential

No data available

12.4 Mobility in soil

No data available

12.5 Results of PBT and vPvB assessment

This substance/mixture contains no components considered to be either persistent, bioaccumulative and toxic (PBT), or very persistent and very bioaccumulative (vPvB) at levels of 0.1% or higher.

12.6 Endocrine disrupting properties

Product:

Assessment : This substance/mixture contains components considered to have endocrine disrupting properties for environment , according to REACH Article 57(f), Commission Regulation (EU) 2018/605 or Commission



Serious eye damage/eye irritation

Eyes - Rabbit

Result: Risk of serious damage to eyes.

(Draize Test)

Remarks: Risk of corneal clouding.

Respiratory or skin sensitization

Sensitisation test: - Human

Result: negative

Remarks: (External MSDS)

Patch test on human volunteers did not demonstrate sensitization properties.

Germ cell mutagenicity

No data available

Carcinogenicity

No data available

Reproductive toxicity

Ingestion of excessive amounts by pregnant animals resulted in maternal and fetal toxicity.

Did not show teratogenic effects in animal experiments.

Specific target organ toxicity - single exposure

No data available

Specific target organ toxicity - repeated exposure

No data available

Aspiration hazard

No data available

11.2 Additional Information**Endocrine disrupting properties****Product:**

Assessment

The substance/mixture does not contain components considered to have endocrine disrupting properties according to REACH Article 57(f) or Commission Delegated regulation (EU) 2017/2100 or Commission Regulation (EU) 2018/605 at levels of 0.1% or higher.

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.

Ingestion of large amounts may cause: Nausea, Diarrhea

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.

SECTION 12: Ecological information**12.1 Toxicity**

Toxicity to fish	LC50 - Pimephales promelas (fathead minnow) - 4 - 8.9 mg/l - 96 h
Toxicity to fish	semi-static test LC50 - Leuciscus idus (Golden orfe) - 0.26 mg/l - 96 h

Sigma-Aldrich- X100

Page 8 of 13

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



s) Explosive properties No data available

t) Oxidizing properties none

9.2 Other safety information

No data available

SECTION 10: Stability and reactivity

10.1 Reactivity

Forms explosive mixtures with air on intense heating.
A range from approx. 15 Kelvin below the flash point is to be rated as critical.

10.2 Chemical stability

The product is chemically stable under standard ambient conditions (room temperature) .

10.3 Possibility of hazardous reactions

Violent reactions possible with:
Strong oxidizing agents
Strong acids

10.4 Conditions to avoid

Strong heating.

10.5 Incompatible materials

Strong oxidizing agents

10.6 Hazardous decomposition products

In the event of fire: see section 5

SECTION 11: Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects

Acute toxicity

LD50 Oral - Rat - 1,900 - 5,000 mg/kg

Remarks: (External MSDS)

Symptoms: Vomiting, Irritations of mucous membranes in the mouth, pharynx, oesophagus and gastrointestinal tract., Risk of aspiration upon vomiting., Aspiration may cause pulmonary edema and pneumonitis.

Acute toxicity estimate Oral - 1,900 mg/kg
(ATE value derived from LD50/LC50 value)

Inhalation: No data available

LD50 Dermal - Rabbit - > 3,000 mg/kg

LD50 Dermal - Rabbit - > 3,000 mg/kg

Remarks: (External MSDS)

Skin corrosion/irritation

Skin - Rabbit

Result: irritating - 4 h

(OECD Test Guideline 404)

Remarks: The value is given in analogy to the following substances: 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol



The entrepreneur has to ensure that maintenance, cleaning and testing of respiratory protective devices are carried out according to the instructions of the producer. These measures have to be properly documented.

Control of environmental exposure

Do not let product enter drains.

SECTION 9: Physical and chemical properties

9.1 Information on basic physical and chemical properties

a) Physical state	viscous liquid
b) Color	colorless
c) Odor	weak
d) Melting point/freezing point	Solidification point: 6 °C
e) Initial boiling point and boiling range	> 200 °C at 1,013 hPa
f) Flammability (solid, gas)	No data available
g) Upper/lower flammability or explosive limits	No data available
h) Flash point	251 °C - c.c.
i) Autoignition temperature	No data available
j) Decomposition temperature	No data available
k) pH	5.0 - 8.0 at 10 g/l at 20 °C
l) Viscosity	Viscosity, kinematic: No data available Viscosity, dynamic: No data available
m) Water solubility	at 20 °C soluble
n) Partition coefficient: n-octanol/water	No data available
o) Vapor pressure	< 0.01 hPa at 20 °C
p) Density	1.07 g/cm ³ at 20 °C
Relative density	No data available
q) Relative vapor density	No data available
r) Particle characteristics	No data available



7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Storage conditions

Tightly closed.

Packaged under inert gas.

Storage class

Storage class (TRGS 510): 10: Combustible liquids

7.3 Specific end use(s)

Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

8.1 Control parameters

Ingredients with workplace control parameters

8.2 Exposure controls

Personal protective equipment

Eye/face protection

Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU). Tightly fitting safety goggles

Skin protection

This recommendation applies only to the product stated in the safety data sheet, supplied by us and for the designated use. When dissolving in or mixing with other substances and under conditions deviating from those stated in EN 16523-1 please contact the supplier of CE-approved gloves (e.g. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de).

Full contact

Material: butyl-rubber

Minimum layer thickness: 0.7 mm

Break through time: 480 min

Material tested: Butoject® (KCL 898)

This recommendation applies only to the product stated in the safety data sheet, supplied by us and for the designated use. When dissolving in or mixing with other substances and under conditions deviating from those stated in EN 16523-1 please contact the supplier of CE-approved gloves (e.g. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de).

Splash contact

Material: butyl-rubber

Minimum layer thickness: 0.7 mm

Break through time: 480 min

Material tested: Butoject® (KCL 898)

Body Protection

protective clothing

Respiratory protection

Recommended Filter type: Filter A-(P2)



4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

SECTION 5: Firefighting measures**5.1 Extinguishing media****Suitable extinguishing media**

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Carbon oxides

Combustible.

Vapors are heavier than air and may spread along floors.

Forms explosive mixtures with air on intense heating.

Development of hazardous combustion gases or vapours possible in the event of fire.

5.3 Advice for firefighters

Stay in danger area only with self-contained breathing apparatus. Prevent skin contact by keeping a safe distance or by wearing suitable protective clothing.

5.4 Further information

Prevent fire extinguishing water from contaminating surface water or the ground water system.

SECTION 6: Accidental release measures**6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

Advice for non-emergency personnel: Do not breathe vapors, aerosols. Avoid substance contact. Ensure adequate ventilation. Evacuate the danger area, observe emergency procedures, consult an expert.

For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

Do not let product enter drains.

6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

Cover drains. Collect, bind, and pump off spills. Observe possible material restrictions (see sections 7 and 10). Take up with liquid-absorbent material (e.g. Chemizorb®). Dispose of properly. Clean up affected area.

6.4 Reference to other sections

For disposal see section 13.

SECTION 7: Handling and storage**7.1 Precautions for safe handling**

For precautions see section 2.2.



Toxicological information:

The substance/mixture does not contain components considered to have endocrine disrupting properties according to REACH Article 57(f) or Commission Delegated regulation (EU) 2017/2100 or Commission Regulation (EU) 2018/605 at levels of 0.1% or higher.

SECTION 3: Composition/information on ingredients**3.1 Substances**

Synonyms : t-Octylphenoxyethoxyethanol
4-(1,1,3,3-Tetramethylbutyl)phenyl-polyethylene glycol
Polyethylene glycol tert-octylphenyl ether

Formula : (C₂H₄O)_nC₁₄H₂₂O
CAS-No. : 9036-19-5

Component	Classification	Concentration
Octylphenol polyethoxyethanol Included in the Candidate List of Substances of Very High Concern (SVHC) according to Regulation (EC) No. 1907/2006 (REACH)		
CAS-No. 9036-19-5	Acute Tox. 4; Skin Irrit. 2; Eye Dam. 1; Aquatic Acute 1; Aquatic Chronic 1; H302, H315, H318, H400, H410 M-Factor - Aquatic Acute: 10 - Aquatic Chronic: 1	<= 100 %

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

SECTION 4: First aid measures**4.1 Description of first-aid measures****General advice**

Show this material safety data sheet to the doctor in attendance.

If inhaled

After inhalation: fresh air.

In case of skin contact

In case of skin contact: Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/ shower.

In case of eye contact

After eye contact: rinse out with plenty of water. Immediately call in ophthalmologist. Remove contact lenses.

If swallowed

After swallowing: immediately make victim drink water (two glasses at most). Consult a physician.



For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

2.2 Label elements

Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008

Pictogram



Signal Word

Danger

Hazard statement(s)

H302

Harmful if swallowed.

H315

Causes skin irritation.

H318

Causes serious eye damage.

H410

Very toxic to aquatic life with long lasting effects.

Precautionary statement(s)

P264

Wash skin thoroughly after handling.

P273

Avoid release to the environment.

P280

Wear protective gloves/ eye protection/ face protection.

P301 + P312

IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER/ doctor if you feel unwell.

P302 + P352

IF ON SKIN: Wash with plenty of water.

P305 + P351 + P338

IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.

Supplemental Hazard Statements

none

Reduced Labeling (<= 125 ml)

Pictogram



Signal Word

Danger

Hazard statement(s)

H318

Causes serious eye damage.

Precautionary statement(s)

P305 + P351 + P338

IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.

Supplemental Hazard Statements

none

2.3 Other hazards

This substance/mixture contains no components considered to be either persistent, bioaccumulative and toxic (PBT), or very persistent and very bioaccumulative (vPvB) at levels of 0.1% or higher.

Ecological information:

This substance/mixture contains components considered to have endocrine disrupting properties for environment, according to REACH Article 57(f), Commission Regulation (EU) 2018/605 or Commission Delegated Regulation (EU) 2017/2100.



SAFETY DATA SHEET

according to Regulation (EC) No. 1907/2006

Version 8.5
Revision Date 28.09.2023
Print Date 02.12.2023

GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking**1.1 Product identifiers**

Product name : Triton™ X-100

Product Number : X100

Brand : Sigma-Aldrich

REACH No. : A registration number is not available for this substance as the substance or its uses are exempted from registration, the annual tonnage does not require a registration or the registration is envisaged for a later registration deadline.

CAS-No. : 9036-19-5

1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses : Scientific research and development

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Company : Sigma-Aldrich Pte Ltd
(Co. Registration No. 199403788W)
2 Science Park Drive
#05-01/12 Ascent Building
SINGAPORE 118222
SINGAPORE

Telephone : +65 6890 6633

Fax : +65 6890 6639

E-mail address : TechnicalService@merckgroup.com

1.4 Emergency telephone

Emergency Phone # : 1-800-262-8200

SECTION 2: Hazards identification**2.1 Classification of the substance or mixture****Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008**

Acute toxicity, Oral (Category 4), H302

Skin irritation (Category 2), H315

Serious eye damage (Category 1), H318

Short-term (acute) aquatic hazard (Category 1), H400

Long-term (chronic) aquatic hazard (Category 1), H410

Sigma-Aldrich- X100

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Page 1 of 13



Sigma- H9151

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Page 13 of 13



Full text of other abbreviations

ADN - European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways; ADR - Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road; AIIC - Australian Inventory of Industrial Chemicals; ASTM - American Society for the Testing of Materials; bw - Body weight; CMR - Carcinogen, Mutagen or Reproductive Toxicant; DIN - Standard of the German Institute for Standardisation; DSL - Domestic Substances List (Canada); ECx - Concentration associated with x% response; ELx - Loading rate associated with x% response; EmS - Emergency Schedule; ENCS - Existing and New Chemical Substances (Japan); ErCx - Concentration associated with x% growth rate response; GHS - Globally Harmonized System; GLP - Good Laboratory Practice; IARC - International Agency for Research on Cancer; IATA - International Air Transport Association; IBC - International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk; IC50 - Half maximal inhibitory concentration; ICAO - International Civil Aviation Organization; IECSC - Inventory of Existing Chemical Substances in China; IMDG - International Maritime Dangerous Goods; IMO - International Maritime Organization; ISHL - Industrial Safety and Health Law (Japan); ISO - International Organisation for Standardization; KECI - Korea Existing Chemicals Inventory; LC50 - Lethal Concentration to 50 % of a test population; LD50 - Lethal Dose to 50% of a test population (Median Lethal Dose); MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; n.o.s. - Not Otherwise Specified; NO(A)EC - No Observed (Adverse) Effect Concentration; NO(A)EL - No Observed (Adverse) Effect Level; NOELR - No Observable Effect Loading Rate; NZIoC - New Zealand Inventory of Chemicals; OECD - Organization for Economic Co-operation and Development; OPPTS - Office of Chemical Safety and Pollution Prevention; PBT - Persistent, Bioaccumulative and Toxic substance; PICCS - Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances; (Q)SAR - (Quantitative) Structure Activity Relationship; REACH - Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals; RID - Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail; SADT - Self-Accelerating Decomposition Temperature; SDS - Safety Data Sheet; TCSI - Taiwan Chemical Substance Inventory; TECI - Thailand Existing Chemicals Inventory; TSCA - Toxic Substances Control Act (United States); UN - United Nations; UNRTDG - United Nations Recommendations on the Transport of Dangerous Goods; vPvB - Very Persistent and Very Bioaccumulative

Further information

The above information is believed to be correct but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. The information in this document is based on the present state of our knowledge and is applicable to the product with regard to appropriate safety precautions. It does not represent any guarantee of the properties of the product. Sigma-Aldrich Corporation and its Affiliates shall not be held liable for any damage resulting from handling or from contact with the above product. See www.sigma-aldrich.com and/or the reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

Copyright 2020 Sigma-Aldrich Co. LLC. License granted to make unlimited paper copies for internal use only.

The branding on the header and/or footer of this document may temporarily not visually match the product purchased as we transition our branding. However, all of the information in the document regarding the product remains unchanged and matches the product ordered. For further information please contact mlsbranding@sial.com.



Other regulations

Observe work restrictions regarding maternity protection in accordance to Dir 92/85/EEC or stricter national regulations where applicable.

Take note of Dir 94/33/EC on the protection of young people at work.

15.2 Chemical Safety Assessment

For this product a chemical safety assessment was not carried out

SECTION 16: Other information**Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3.**

H302	Harmful if swallowed.
H315	Causes skin irritation.
H318	Causes serious eye damage.
H335	May cause respiratory irritation.
H373	May cause damage to organs through prolonged or repeated exposure if swallowed.
H400	Harmful if swallowed.
H410	Causes skin irritation.



12.7 Other adverse effects

Very toxic to aquatic life.

SECTION 13: Disposal considerations**13.1 Waste treatment methods**

No data available

SECTION 14: Transport information**14.1 UN number**

ADR/RID: 3077 IMDG: 3077 IATA: 3077

14.2 UN proper shipping name

ADR/RID: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, SOLID, N.O.S. (N-Cetyl-N'N'N'-trimethylammonium bromide)

IMDG: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, SOLID, N.O.S. (N-Cetyl-N'N'N'-trimethylammonium bromide)

IATA: Environmentally hazardous substance, solid, n.o.s. (N-Cetyl-N'N'N'-trimethylammonium bromide)

14.3 Transport hazard class(es)

ADR/RID: 9 IMDG: 9 IATA: 9

14.4 Packaging group

ADR/RID: III IMDG: III IATA: III

14.5 Environmental hazards

ADR/RID: yes IMDG Marine pollutant: yes IATA: yes

14.6 Special precautions for user**Further information**

EHS-Mark required (ADR 2.2.9.1.10, IMDG code 2.10.3) for single packagings and combination packagings containing inner packagings with Dangerous Goods > 5L for liquids or > 5kg for solids. Packages smaller than or equal to 5 kg / L , not dangerous goods of Class 9

SECTION 15: Regulatory information**15.1 Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture**

This material safety data sheet complies with the requirements of Regulation (EC) No. 1907/2006.

National legislation

Seveso III: Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. E1 ENVIRONMENTAL HAZARDS

Sigma- H9151

Page 10 of 13

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



SECTION 12: Ecological information
12.1 Toxicity

Toxicity to fish	semi-static test LC50 - Danio rerio (zebra fish) - 0.2 mg/l - 96 h (OECD Test Guideline 203)
Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates	semi-static test EC50 - Daphnia magna (Water flea) - 0.037 mg/l - 48 h (OECD Test Guideline 202)
Toxicity to algae	static test ErC50 - Pseudokirchneriella subcapitata (green algae) - 0.00411 mg/l - 72 h (OECD Test Guideline 201)
	static test NOEC - Desmodesmus subspicatus (green algae) - 0.001 mg/l - 72 h (OECD Test Guideline 201)
Toxicity to bacteria	EC50 - activated sludge - 19 mg/l Remarks: (ECHA)
Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates(Chronic toxicity)	NOEC - Daphnia magna (Water flea) - 0.023 mg/l - 21 d (OECD Test Guideline 211)

12.2 Persistence and degradability

Biodegradability	aerobic Chemical oxygen demand - Exposure time 11 d Result: 100 % - Readily biodegradable. (OECD Test Guideline 301E)
------------------	---

12.3 Bioaccumulative potential

Bioaccumulation	Cyprinus carpio (Carp) - 8 Weeks - 0.05 mg/l(N-Cetyl-N'N'N-trimethylammonium bromide)
	Bioconcentration factor (BCF): 407 - 741

Due to the distribution coefficient n-octanol/water, accumulation in organisms is not expected.

12.4 Mobility in soil

No data available

12.5 Results of PBT and vPvB assessment

This substance/mixture contains no components considered to be either persistent, bioaccumulative and toxic (PBT), or very persistent and very bioaccumulative (vPvB) at levels of 0.1% or higher.

12.6 Endocrine disrupting properties**Product:**

Assessment : The substance/mixture does not contain components considered to have endocrine disrupting properties according to REACH Article 57(f) or Commission Delegated regulation (EU) 2017/2100 or Commission Regulation (EU) 2018/605 at levels of 0.1% or higher.



Serious eye damage/eye irritation

Eyes - Rabbit

Result: Causes serious eye damage.

(OECD Test Guideline 405)

Remarks: (in analogy to similar products)

Respiratory or skin sensitization

Maximization Test - Guinea pig

Result: negative

(OECD Test Guideline 406)

Remarks: Aqueous solution

Germ cell mutagenicity

No data available

Carcinogenicity

No data available

Reproductive toxicity

No data available

Specific target organ toxicity - single exposure

Inhalation - May cause respiratory irritation. - Respiratory system

Specific target organ toxicity - repeated exposure

Oral - May cause damage to organs through prolonged or repeated exposure.

- Gastrointestinal tract

Aspiration hazard

No data available

11.2 Additional Information**Endocrine disrupting properties****Product:**

Assessment

The substance/mixture does not contain components considered to have endocrine disrupting properties according to REACH Article 57(f) or Commission Delegated regulation (EU) 2017/2100 or Commission Regulation (EU) 2018/605 at levels of 0.1% or higher.

Repeated dose toxicity - Rabbit - male and female - Dermal - 28 d - LOAEL (Lowest observed adverse effect level) - 10 mg/kg

Remarks: (in analogy to similar products)

Repeated dose toxicity - Rat - male and female - Oral - 28 d - NOAEL (No observed adverse effect level) - 100 mg/kg

Remarks: (as aqueous solution)

(ECHA)

RTECS: BQ7875000

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.



9.2 Other safety information

Surface tension 39 mN/m at 25 °C

SECTION 10: Stability and reactivity**10.1 Reactivity**

Forms explosive mixtures with air on intense heating.
A range from approx. 15 Kelvin below the flash point is to be rated as critical.
The following applies in general to flammable organic substances and mixtures: in correspondingly fine distribution, when whirled up a dust explosion potential may generally be assumed.

10.2 Chemical stability

The product is chemically stable under standard ambient conditions (room temperature) .

10.3 Possibility of hazardous reactions

Violent reactions possible with:
Strong oxidizing agents
Caution! In contact with nitrites, nitrates, nitrous acid possible liberation of nitrosamines!

10.4 Conditions to avoid

Strong heating.

10.5 Incompatible materials

No data available

10.6 Hazardous decomposition products

In the event of fire: see section 5

SECTION 11: Toxicological information**11.1 Information on toxicological effects****Acute toxicity**

LD50 Oral - Rat - female - 1,550 mg/kg
(OECD Test Guideline 401)

Remarks: (in analogy to similar products)

The value is given in analogy to the following substances: Hexadecyltrimethylammonium chloride

Inhalation: No data available

LD50 Dermal - Rabbit - male and female - 2,150 mg/kg

Remarks: (in analogy to similar products)
(ECHA)

The value is given in analogy to the following substances: Hexadecyltrimethylammonium chloride

Skin corrosion/irritation

Skin - Rabbit

Result: Irritating to skin. - 24 h

Remarks: (ECHA)



Control of environmental exposure

Do not let product enter drains.

SECTION 9: Physical and chemical properties**9.1 Information on basic physical and chemical properties**

a) Physical state	solid
b) Color	white
c) Odor	weak
d) Melting point/freezing point	Melting point/range: 248 - 251 °C
e) Initial boiling point and boiling range	No data available
f) Flammability (solid, gas)	No data available
g) Upper/lower flammability or explosive limits	No data available
h) Flash point	244 °C - closed cup
i) Autoignition temperature	210 °C at 0.3 hPa
j) Decomposition temperature	No data available
k) pH	5.0 - 7 at 36.4 g/l at 25 °C
l) Viscosity	Viscosity, kinematic: No data available Viscosity, dynamic: No data available
m) Water solubility	36.4 g/l at 20 °C - completely soluble
n) Partition coefficient: n-octanol/water	log Pow: 2.26 - (Lit.), Bioaccumulation is not expected.
o) Vapor pressure	No data available
p) Density	2.30 g/cm ³
Relative density	No data available
q) Relative vapor density	No data available
r) Particle characteristics	No data available
s) Explosive properties	No data available
t) Oxidizing properties	none

Sigma- H9151

Page 6 of 13

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



Storage class (TRGS 510): 11: Combustible Solids

7.3 Specific end use(s)

Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

8.1 Control parameters

Ingredients with workplace control parameters

8.2 Exposure controls

Personal protective equipment

Eye/face protection

Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU). Tightly fitting safety goggles

Skin protection

This recommendation applies only to the product stated in the safety data sheet, supplied by us and for the designated use. When dissolving in or mixing with other substances and under conditions deviating from those stated in EN374 please contact the supplier of CE-approved gloves (e.g. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de).

Full contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

Material tested: KCL 741 Dermatril® L

This recommendation applies only to the product stated in the safety data sheet, supplied by us and for the designated use. When dissolving in or mixing with other substances and under conditions deviating from those stated in EN374 please contact the supplier of CE-approved gloves (e.g. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de).

Splash contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

Material tested: KCL 741 Dermatril® L

Body Protection

protective clothing

Respiratory protection

Where risk assessment shows air-purifying respirators are appropriate use a full-face particle respirator type N100 (US) or type P3 (EN 143) respirator cartridges as a backup to engineering controls. If the respirator is the sole means of protection, use a full-face supplied air respirator. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).



SECTION 5: Firefighting measures**5.1 Extinguishing media****Suitable extinguishing media**

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Carbon oxides

Nitrogen oxides (NO_x)

Hydrogen bromide gas

Combustible.

Vapors are heavier than air and may spread along floors.

Forms explosive mixtures with air on intense heating.

Development of hazardous combustion gases or vapours possible in the event of fire.

5.3 Advice for firefighters

Stay in danger area only with self-contained breathing apparatus. Prevent skin contact by keeping a safe distance or by wearing suitable protective clothing.

5.4 Further information

Suppress (knock down) gases/vapors/mists with a water spray jet. Prevent fire extinguishing water from contaminating surface water or the ground water system.

SECTION 6: Accidental release measures**6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

Advice for non-emergency personnel: Avoid inhalation of dusts. Avoid substance contact. Ensure adequate ventilation. Evacuate the danger area, observe emergency procedures, consult an expert.

For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

Do not let product enter drains.

6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

Cover drains. Collect, bind, and pump off spills. Observe possible material restrictions (see sections 7 and 10). Take up dry. Dispose of properly. Clean up affected area. Avoid generation of dusts.

6.4 Reference to other sections

For disposal see section 13.

SECTION 7: Handling and storage**7.1 Precautions for safe handling**

For precautions see section 2.2.

7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities**Storage conditions**

Tightly closed. Dry.

Storage class

Sigma- H9151

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Page 4 of 13



SECTION 3: Composition/information on ingredients
3.1 Substances

Synonyms	: Cetrimonium bromide Palmityltrimethylammonium bromide CTAB Cetyltrimethylammonium bromide
Formula	: C ₁₉ H ₄₂ N.Br
Molecular weight	: 364.45 g/mol
CAS-No.	: 57-09-0
EC-No.	: 200-311-3

Component	Classification	Concentration
N-Cetyl-N'N'N-trimethylammonium bromide		
CAS-No.	57-09-0	<= 100 %
EC-No.	200-311-3	
Acute Tox. 4; Skin Irrit. 2; Eye Dam. 1; STOT SE 3; STOT RE 2; Aquatic Acute 1; Aquatic Chronic 1; H302, H315, H318, H335, H373, H400, H410 M-Factor - Aquatic Acute: 100 - Aquatic Chronic: 10		

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

SECTION 4: First aid measures
4.1 Description of first-aid measures**General advice**

Show this material safety data sheet to the doctor in attendance.

If inhaled

After inhalation: fresh air. Call in physician.

In case of skin contact

In case of skin contact: Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/ shower.

In case of eye contact

After eye contact: rinse out with plenty of water. Immediately call in ophthalmologist. Remove contact lenses.

If swallowed

After swallowing: immediately make victim drink water (two glasses at most). Consult a physician.

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed


No data available



For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

2.2 Label elements

Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008

Pictogram	
Signal Word	Danger
Hazard statement(s)	
H302	Harmful if swallowed.
H315	Causes skin irritation.
H318	Causes serious eye damage.
H335	May cause respiratory irritation.
H373	May cause damage to organs (Gastrointestinal tract) through prolonged or repeated exposure if swallowed.
H410	Very toxic to aquatic life with long lasting effects.
Precautionary statement(s)	
P273	Avoid release to the environment.
P280	Wear protective gloves/ eye protection/ face protection.
P301 + P312	IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER/ doctor if you feel unwell.
P302 + P352	IF ON SKIN: Wash with plenty of water.
P305 + P351 + P338	IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
P314	Get medical advice/ attention if you feel unwell.
Supplemental Hazard Statements	none

Reduced Labeling (<= 125 ml)

Pictogram	
Signal Word	Danger
Hazard statement(s)	
H318	Causes serious eye damage.
Precautionary statement(s)	
P305 + P351 + P338	IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
Supplemental Hazard Statements	none

2.3 Other hazards

This substance/mixture contains no components considered to be either persistent, bioaccumulative and toxic (PBT), or very persistent and very bioaccumulative (vPvB) at levels of 0.1% or higher.





www.sigmaaldrich.com

SAFETY DATA SHEET

according to Regulation (EC) No. 1907/2006

Version 8.1
Revision Date 06.06.2023
Print Date 05.12.2023

GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

1.1 Product identifiers

Product name : Hexadecyltrimethylammonium bromide

Product Number : H9151
Brand : Sigma
REACH No. : 01-2119989160-35-XXXX
CAS-No. : 57-09-0

1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses : Laboratory chemicals, Manufacture of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Company : Sigma-Aldrich Pte Ltd
(Co. Registration No. 199403788W)
2 Science Park Drive
#05-01/12 Ascent Building
SINGAPORE 118222
SINGAPORETelephone : +65 6890 6633
Fax : +65 6890 6639
E-mail address : TechnicalService@merckgroup.com

1.4 Emergency telephone

Emergency Phone # : 1-800-262-8200

SECTION 2: Hazards identification

2.1 Classification of the substance or mixture

Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008

Acute toxicity, Oral (Category 4), H302
Skin irritation (Category 2), H315
Serious eye damage (Category 1), H318
Specific target organ toxicity - single exposure (Category 3), Respiratory system, H335
Specific target organ toxicity - repeated exposure, Oral (Category 2), Gastrointestinal tract, H373
Short-term (acute) aquatic hazard (Category 1), H400
Long-term (chronic) aquatic hazard (Category 1), H410

Sigma- H9151

Page 1 of 13

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



บรรณานุกรม

1. Crab, R., et al., *Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production*. Aquaculture, 2007. 270(1): p. 1-14.
2. Nootong, K., P. Pavasant, and S. Powtongsook, *Effects of Organic Carbon Addition in Controlling Inorganic Nitrogen Concentrations in a Biofloc System*. Journal of the World Aquaculture Society, 2011. 42.
3. Nootong, K., S. Nurit, and S. Powtongsook, *Control of Inorganic Nitrogen and Suspended Solids Concentrations in a Land-Based Recirculating Aquaculture System*. Engineering Journal, 2013. 17: p. 49-59.
4. Rijn, J., Y. Tal, and H. Schreier, *Denitrification in Recirculating Systems: Theory and Applications*. Aquacultural Engineering, 2006. 34: p. 364-376.
5. Kutako, M., et al., *Inorganic Nitrogen Conversion and Changes of Bacterial Community in Sediment from Shrimp Pond after Methanol Addition*. Journal of Applied Sciences, 2009. 9.
6. Menasveta, P., et al., *Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock*. Aquacultural Engineering, 2001. 25: p. 35-49.
7. Lee, P.G., et al., *Denitrification in aquaculture systems: An example of a fuzzy logic control problem*. Aquacultural Engineering, 2000. 23: p. 37-59.
8. Tchobanoglous, G., et al., *Wastewater engineering : treatment and reuse*. Fourth edition / Tata McGraw-Hill edition ed. McGraw-Hill series in civil and environmental engineering. 2003, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
9. Davis, M.L. and D.A. Cornwell, *Introduction to environmental engineering*. 3 rd ed. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. 1998, Boston, Mass.: WCB McGraw-Hill Boston, Mass.
10. Kawai, H., V.M. Grieco, and P. Jureidini, *A study of the treatability of pollutants in high rate photosynthetic ponds and the utilization of the proteic potential of algae which proliferate in the ponds*. Environmental Technology Letters, 1984. 5(1-11): p. 505-515.
11. Gao, F., et al., *Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal*. Ecological Engineering, 2016. 92: p. 55-61.
12. Nasir, N.M., et al., *Treatment of African catfish, *Clarias gariepinus* wastewater utilizing phytoremediation of microalgae, *Chlorella* sp. with *Aspergillus niger* bio-harvesting*. Bioresource Technology, 2015. 190: p. 492-498.
13. ยุวดี พิรพรพิศาล, สาขาวิชา. 2549, ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่.
14. Hu, Q., et al., *Ultrahigh-cell-density culture of a marine green alga *Chlorococcum littorale* in a flat-plate photobioreactor*. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998. 49: p. 655-662.
15. Yuan, J.-P., et al., *Carotenoid composition in the green microalga *Chlorococcum**. Food Chemistry - FOOD CHEM, 2002. 76: p. 319-325.
16. Lv, J., et al., *Effect of sulfate ions on growth and pollutants removal of self-flocculating microalga *Chlorococcum* sp. GD in synthetic municipal wastewater*. Bioresour Technol, 2017. 234: p. 289-296.
17. Wannachod, T., et al., *Photoautotrophic cultivating options of freshwater green microalgal *Chlorococcum humicola* for biomass and carotenoid production*. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2018. 48(4): p. 335-342.
18. Zhang, D.H. and Y.K. Lee, *Enhanced accumulation of secondary carotenoids in a mutant of the green alga, *Chlorococcum* sp.* Journal of Applied Phycology, 1997. 9(5): p. 459-463.
19. Zhang, D.-H. and Y.-K. Lee, *Ketocarotenoid production by a mutant of *Chlorococcum* sp. in an outdoor tubular photobioreactor*. Biotechnology Letters, 1999. 21(1): p. 7-10.
20. Bhagavathy, S., P. Sumathi, and I.J.S. Bell, *Green algae *Chlorococcum humicola*- a new source of bioactive compounds with antimicrobial activity*. Asian pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2011. 1.

21. Kaewpintong, K., et al., *Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of Haematococcus pluvialis in airlift bioreactor*. Bioresource Technology, 2007. 98(2): p. 288-295.
22. Viriyayingiri, T., et al., *Continuous production of diatom Entomoneis sp. in mechanically stirred tank and flat-panel airlift photobioreactors*. Prep Biochem Biotechnol, 2016. 46(7): p. 740-6.
23. ภูไพรวรา ภูไพบุลย์, ผลของอัตราการใช้ของอากาศและความยาวคลื่นแสงต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตแคโรทีนอยด์ในจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* ในโรงปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง. 2559, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
24. ศุทธิณี วรรณสุทธิวัฒน์, การเติบโตและการเพิ่มผลผลิตแคโรทีนอยด์ในจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola* ในการเลี้ยงแบบต่อเนื่อง, in คณิตวิศวกรรมศาสตร์. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
25. สิริแสง พงษ์สวัสดิ์, ส.ส., การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอัลตราโซนิกในการกำจัดสาหร่ายพิษบริเวณสวนสาธารณะท่าดินแดงกองทัพอากาศ. รายงานการวิจัย. 2553.
26. Taghavijeloudar, M., et al., *The effects of surfactants (sodium dodecyl sulfate, triton X-100 and cetyl trimethyl ammonium bromide) on the dewaterability of microalgae biomass using pressure filtration*. Bioresource Technology, 2019. 273: p. 565-572.
27. ณัฐสิทธิ์ จำรัสผาย, ผลของอุณหภูมิสีของหลอดแอลอีดีขาวและการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยกต่อการเติบโตและการผลิตแคโรทีนอยด์ในจุลสาหร่าย *Chlorococcum humicola*. 2560, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
28. Leya, T., et al., *Response of arctic snow and permafrost algae to high light and nitrogen stress by changes in pigment composition and applied aspects for biotechnology*. FEMS Microbiol Ecol, 2009. 67(3): p. 432-43.
29. Masojidek, J., et al., *Changes in chlorophyll fluorescence quenching and pigment composition in the green alga Chlorococcum sp. grown under nitrogen deficiency and salinity stress*. Journal of Applied Phycology, 2000. 12: p. 417-426.
30. Lee, E., R.-L. Heng, and L. Pilon, *Spectral optical properties of selected photosynthetic microalgae producing biofuels*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013. 114: p. 122-135.
31. Westphal, A.N.a.B., V., *Carotenoids: Properties, distribution, bioavailability, metabolism and health effects*. Ernährungs Umschau, 2015. 11(1) p. 196-207.
32. Ambati, R.R., et al., *Astaxanthin: sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications--a review*. Mar Drugs, 2014. 12(1): p. 128-52.
33. Garcia-Chavarria, M. and M. lara-flores, *The use of carotenoid in aquaculture*. Research Journal of Fisheries and Hydrobiology, 2013. 8: p. 38-49.
34. Karadas, F., et al., *Effects of carotenoids from lucerne, marigold and tomato on egg yolk pigmentation and carotenoid composition*. Br Poult Sci, 2006. 47(5): p. 561-6.
35. Sivathanu, B. and S. Palaniswamy, *Purification and characterization of carotenoids from green algae Chlorococcum humicola by HPLC-NMR and LC-MS-APCI*. Biomedicine & Preventive Nutrition, 2012. 2(4): p. 276-282.
36. Zhang, D.H., et al., *Composition and accumulation of secondary carotenoids in Chlorococcum sp.* 1997.
37. Borowitzka M.A. and Borowitzka, L.J., *Microalgal Biotechnology*. 1988, Cambridge University Press: Cambridge.
38. Rayati, M., H. Rajabi Islami, and M. Shamsaie Mehrgan, *Light Intensity Improves Growth, Lipid Productivity, and Fatty Acid Profile of Chlorococcum oleofaciens (Chlorophyceae) for Biodiesel Production*. BioEnergy Research, 2020. 13(4): p. 1235-1245.
39. Liu, B.-H. and Y.-K. Lee, *Secondary carotenoids formation by the green alga Chlorococcum sp.* Journal of Applied Phycology, 2000. 12(3): p. 301-307.
40. Venkataraman, L.V., *A monograph on spirulina platensis - biotechnology and application*. 1983, Printed by offset at CFTRI Press: Mysore.
41. Ahmad, I., et al., *Evolution of Photobioreactors: A Review based on Microalgal Perspective Evolution of*

- Photobioreactors: A Review based on Microalgal Perspective*. Vol. 1142. 2021.
42. กษิตติศ หนูทอง, การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2551. 16(1): p. 11-12.
 43. Sanz-Luque, E., et al., *Understanding nitrate assimilation and its regulation in microalgae*. *Front Plant Sci*, 2015. 6: p. 899.
 44. Azuara, M.a.P. and P.J. Aparicio, *In Vivo Blue-Light Activation of Chlamydomonas reinhardtii Nitrate Reductase 1*. *Plant Physiology*, 1983. 71(2): p. 286-290.
 45. Bekheet, I.A. and P.J. Syrett, *Urea-degrading enzymes in algae*. *British Phycological Journal*, 1977. 12(2): p. 137-143.
 46. Leftley, J.W. and P.J. Syrett, *Urease and ATP: Urea Amidolyase Activity in Unicellular Algae*. *Microbiology*, 1973. 77(1): p. 109-115.
 47. Miyachi, S. and H. Tamiya, *DISTRIBUTION AND TURNOVER OF PHOSPHATE COMPOUNDS IN GROWING CHLORELLA CELLS*. *Plant and Cell Physiology*, 1961. 2(4): p. 405-414.
 48. Xie, L. and U. Jakob, *Inorganic polyphosphate, a multifunctional polyanionic protein scaffold*. *Journal of Biological Chemistry*, 2019. 294(6): p. 2180-2190.
 49. Miyachi, S., et al., *Metabolic roles of inorganic polyphosphates in chlorella cells*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1964. 93(3): p. 625-634.
 50. Whitton, R., et al., *Microalgae for municipal wastewater nutrient remediation: mechanisms, reactors and outlook for tertiary treatment*. *Environmental Technology Reviews*, 2015. 4(1): p. 133-148.
 51. Powell, N., et al., *Towards a luxury uptake process via microalgae – Defining the polyphosphate dynamics*. *Water Research*, 2009. 43(17): p. 4207-4213.
 52. Manisali, A.Y., A.K. Sunol, and G.P. Philippidis, *Effect of macronutrients on phospholipid production by the microalga Nannochloropsis oculata in a photobioreactor*. *Algal Research*, 2019. 41: p. 101514.
 53. Patyna, A., M. Placzek, and S. Witczak, *Study of Chlorella vulgaris sedimentation process*. *MATEC Web Conf.*, 2018. 240: p. 05023.
 54. Gudin, C. and D. Chaumont, *Cell fragility — The key problem of microalgae mass production in closed photobioreactors*. *Bioresource Technology*, 1991. 38(2): p. 145-151.
 55. Suh, I.S. and C.-G. Lee, *Photobioreactor engineering: Design and performance*. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2003. 8(6): p. 313-321.
 56. Ación Fernández, F.G., J.M. Fernández Sevilla, and E. Molina Grima, *Photobioreactors for the production of microalgae*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2013. 12(2): p. 131-151.
 57. Molina, E., et al., *Scale-up of tubular photobioreactors*. *Journal of Applied Phycology*, 2000. 12(3): p. 355-368.
 58. Scragg, A.H., *Bioreactors in biotechnology : a practical approach*. 1991, E. Horwood New York: New York.
 59. McCabe, W.L., J.C. Smith, and P. Harriott, *Unit operations of chemical engineering*. 1993: McGraw-hill.
 60. Kirnev, P., et al., *Mixing and agitation in photobioreactors*. 2022. p. 13-35.
 61. Flint, I., Canadian, and M. Burstein, *Froth Processes and the Design of Column Flotation Cells*. *Encyclopedia of Separation Science*, 2000.
 62. Anastasiou, A.D., A.D. Passos, and A.A. Mouza, *Bubble columns with fine pore sparger and non-Newtonian liquid phase: Prediction of gas holdup*. *Chemical Engineering Science*, 2013. 98: p. 331-338.
 63. Besagni, G., F. Inzoli, and T. Ziegenhein, *Two-Phase Bubble Columns: A Comprehensive Review*. *ChemEngineering*, 2018. 2(2): p. 13.
 64. Mudde, R.F., W.K. Harteveld, and H.E.A. van den Akker, *Uniform Flow in Bubble Columns*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009. 48(1): p. 148-158.
 65. Passos, A.D., et al., *The effect of surfactant addition on the performance of a bubble column containing a non-Newtonian liquid*. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015. 95: p. 93-104.
 66. Ruzicka, M.C., et al., *Homogeneous–heterogeneous regime transition in bubble columns*. *Chemical Engineering Science*, 2001. 56(15): p. 4609-4626.

67. Rahman, A., et al., *Cultivation of Synechococcus HS-9 in a novel rectangular bubble column photobioreactor with horizontal baffle*. Case Studies in Thermal Engineering, 2021. 27: p. 101264.
68. Roychoudhury, A. and R. Bhowmik, *State-of-the-Art Technologies for Improving the Quality of Medicinal and Aromatic Plants*. 2021. p. 593-627.
69. Hernández-Calderón, O., et al., *Hydrodynamics and Mass Transfer Simulation in Airlift Bioreactor with Settler using Computational Fluid Dynamics*. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2017. 15.
70. Richmond, A. and Z. Cheng-Wu, *Optimization of a flat plate glass reactor for mass production of Nannochloropsis sp. outdoors*. Journal of Biotechnology, 2001. 85(3): p. 259-269.
71. Marsullo, M., et al., *Dynamic Modeling of the Microalgae Cultivation Phase for Energy Production in Open Raceway Ponds and Flat Panel Photobioreactors*. Frontiers in Energy Research, 2015. 3.
72. Hossain, N., T. Meurah, and T.M.I. Mahlia, *Progress in physicochemical parameters of microalgae cultivation for biofuel production*. Critical Reviews in Biotechnology, 2019: p. 1-26.
73. Catawatcharakul, M.N., *Development of a Tubular Photobioreactor for Mass Cultivation of Spirulina platensis, in Biotechnology*. 1994, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.
74. Molina, E., et al., *Tubular photobioreactor design for algal cultures*. J Biotechnol, 2001. 92(2): p. 113-31.
75. Richmond, A.E., et al., *A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors*. Journal of Applied Phycology, 1993. 5: p. 327-332.
76. Molina, E., et al., *Tubular photobioreactor design for algal cultures*. Journal of Biotechnology, 2001. 92(2): p. 113-131.
77. ฉัตรชัย กันยารุจ, *Effects of nitrogen to phosphorus molar ratios on the growth and fatty acid accumulation of a freshwater microalga Chlorococcum humicola*. Journal of Engineering and Innovation, 2021. 1: p. 174-187.
78. Stanbury, P.F., A. Whitaker, and S.J. Hall, *Principles of Fermentation Technology*. 1995: Butterworth-Heinemann.
79. Mantzorou, A. and F. Ververidis, *Microalgal biofilms: A further step over current microalgal cultivation techniques*. Sci Total Environ, 2019. 651(Pt 2): p. 3187-3201.
80. Naveed, S., et al., *Microalgal extracellular polymeric substances and their interactions with metal(loid)s: A review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019. 49(19): p. 1769-1802.
81. Barros, A.C., A.L. Gonçalves, and M. Simões, *Microalgal/cyanobacterial biofilm formation on selected surfaces: the effects of surface physicochemical properties and culture media composition*. Journal of Applied Phycology, 2019. 31(1): p. 375-387.
82. Belohlav, V., et al., *Effect of hydrodynamics on the formation and removal of microalgal biofilm in photobioreactors*. Biosystems Engineering, 2020. 200: p. 315-327.
83. Silva, A., et al., *Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors*. GCB Bioenergy, 2013. 7.
84. Grobbelaar, J.U., *Microalgal biomass production: challenges and realities*. Photosynthesis Research, 2010. 106(1): p. 135-144.
85. Mason, T.J., et al., *Potential uses of ultrasound in the biological decontamination of water*. Ultrasonics Sonochemistry, 2003. 10(6): p. 319-323.
86. วิสาชา ภู่อินดา, W.P., *การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย The Use of Surfactant in Wastewater Treatment*. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 2012. 1(1).
87. Nawar, A., et al., *Physical abrasion method using submerged spike balls to remove algal biofilm from photobioreactors*. BMC Research Notes, 2017. 10(1): p. 666.
88. Meade, J.W., *Allowable Ammonia for Fish Culture*. The Progressive Fish-Culturist, 1985. 47(3): p. 135-145.
89. Simões, M., M.O. Pereira, and M.J. Vieira, *Effect of mechanical stress on biofilms challenged by different chemicals*. Water Research, 2005. 39(20): p. 5142-5152.
90. Deng, L., et al., *New functional biocarriers for enhancing the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor-*

- membrane bioreactor system. *Bioresource Technology*, 2016. 208: p. 87-93.
91. Terezia Zakova, et al., *Hydrodynamics as a Tool to Remove Biofilm in Tubular Photobioreactor*. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, 2019. 76: p. 451.
92. Puchong Sri-uam, *Integrated Aquaculture System of Fish, Microalga, Zooplankton and Aquatic plants*, in *Faculty of Engineering*. 2014, Chulalongkorn University: Chulalongkorn University.
93. Sucunthowong, K., et al., *Simultaneous utilization of CO₂ and nitrate wastes from compact recirculating aquaculture system for improving algal biomass (Scenedesmus armatus) production*. *Algal Research*, 2023. 74: p. 103224.
94. Karlsson, S., *USING MICROALGAE FOR*

REMOVING NUTRIENTS FROM RAS

AQUACULTURE EFFLUENTS – in *Environmental Science*. 2022, University of Gothenburg: University of Gothenburg.

95. Tejido-Núñez, Y., et al., *Treatment of aquaculture effluent with Chlorella vulgaris and Tetrademus obliquus: The effect of pretreatment on microalgae growth and nutrient removal efficiency*. *Ecological Engineering*, 2019. 136: p. 1-9.
96. Marinho-Soriano, E., et al., *Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae Gracilaria birdiae*. *Biomass and Bioenergy*, 2009. 33(2): p. 327-331.
97. Guo, Z., et al., *Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production*. *Journal of Environmental Sciences*, 2013. 25: p. S85-S88.
98. Ansari, F.A., et al., *Microalgal cultivation using aquaculture wastewater: Integrated biomass generation and nutrient remediation*. *Algal Research*, 2017. 21: p. 169-177.
99. Kuo, C.-M., et al., *Simultaneous microalgal biomass production and CO₂ fixation by cultivating Chlorella sp. GD with aquaculture wastewater and boiler flue gas*. *Bioresource Technology*, 2016. 221: p. 241-250.
100. Cardoso, L.G., et al., *Spirulina sp. LEB 18 cultivation in outdoor pilot scale using aquaculture wastewater: High biomass, carotenoid, lipid and carbohydrate production*. *Aquaculture*, 2020. 525: p. 735272.
101. Rippka, R., et al., *Generic Assignments, Strain Histories and Properties of Pure Cultures of Cyanobacteria*. *Microbiology*, 1979. 111(1): p. 1-61.
102. Bower, C.E. and T. Holm-Hansen, *A Salicylate-Hypochlorite Method for Determining Ammonia in Seawater*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980. 37: p. 794-798.
103. Strickland, J.D.H.a.T.R.P., *A practical Handbook of Seawater Analysis*. 2nd ed. 1972, Ottawa: Supply and Services Canada: Ottawa: Supply and Services Canada.
104. American Public Health, A., A. American Water Works, and F. Water Environment, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. 1998, Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF Washington, D.C.
105. Viriyayingsiri, T., et al., *Continuous production of diatom Entomoneis sp. in mechanically stirred-tank and flat-panel airlift photobioreactors*. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 2016. 46.
106. Chiu, S.-Y., et al., *The air-lift photobioreactors with flow patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal*. *Engineering in Life Sciences*, 2009. 9(3): p. 254-260.
107. Münkel, R., et al., *Optimization of outdoor cultivation in flat panel airlift reactors for lipid production by Chlorella vulgaris*. *Biotechnol Bioeng*, 2013. 110(11): p. 2882-93.
108. Jones, S.M.J. and S.T.L. Harrison, *Aeration energy requirements for lipid production by Scenedesmus sp. in airlift bioreactors*. *Algal Research*, 2014. 5: p. 249-257.
109. Liu, T., et al., *Scale-up of L-lactic acid production by mutant strain Rhizopus sp. MK-96-1196 from 0.003 m³ to 5 m³ in airlift bioreactors*. *J Biosci Bioeng*, 2006. 101(1): p. 9-12.
110. Liu, R., et al., *Hydrodynamic effect on sludge accumulation over membrane surfaces in a submerged membrane*

- bioreactor. *Process Biochemistry*, 2003. 39(2): p. 157-163.
111. Krichnavaruk, S., et al., *Optimal growth conditions and the cultivation of Chaetoceros calcitrans in airlift photobioreactor*. *Chemical Engineering Journal - CHEM ENG J*, 2005. 105: p. 91-98.
 112. Tung, H.L., et al., *Bubble characteristics and mass transfer in an airlift reactor with multiple net draft tubes*. *Bioprocess Engineering*, 1998. 18(5): p. 323-328.
 113. Kurita, T., T. Mogi, and K. Kimura, *Influence of different biofilm carriers on the operation and membrane fouling of submerged membrane bioreactors*. *Separation and Purification Technology*, 2016. 169: p. 43-49.
 114. Nathanon, T., *Biofilm removal technique using sands as a research tool for accessing microbial attachment on surface*. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2004. 26.
 115. Gilbert, P., D. Allison, and A. McBain, *Biofilms in vitro and in vivo: Do singular mechanisms imply cross-resistance?* *Journal of Applied Microbiology*, 2002. 92: p. 98S-110S.
 116. McDonnell, G. and A.D. Russell, *Antiseptics and disinfectants: activity, action, and resistance*. *Clin Microbiol Rev*, 1999. 12(1): p. 147-79.
 117. Cloete, T.E., L. Jacobs, and V.S. Brözel, *The chemical control of biofouling in industrial water systems*. *Biodegradation*, 1998. 9(1): p. 23-37.
 118. Liang, Z., et al., *Influence of cetyltrimethyl ammonium bromide on nutrient uptake and cell responses of Chlorella vulgaris*. *Aquatic Toxicology*, 2013. 138-139: p. 81-87.
 119. Farcet, J.-B., et al., *Development of a Triton X-100 replacement for effective virus inactivation in biotechnology processes*. *Engineering Reports*, 2019. 1(5): p. e12078.
 120. Wang, D., et al., *Improved antifouling properties of photobioreactors by surface grafted sulfobetaine polymers*. *Biofouling*, 2017. 33(10): p. 970-979.
 121. Sekar, R., et al., *Laboratory studies on adhesion of microalgae to hard substrates*. *Hydrobiologia*, 2004. 512(1): p. 109-116.
 122. Shen, Y., et al., *Influence of algae species, substrata and culture conditions on attached microalgal culture*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2014. 37(3): p. 441-450.
 123. Ding, N., et al., *Evaluation of an enclosed air-lift photobioreactor (ALPBR) for biomass and lipid biosynthesis of microalgal cells grown under fluid-induced shear stress*. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2021. 35: p. 139-149.
 124. Krichnavaruk, S., et al., *Optimal growth conditions and the cultivation of Chaetoceros calcitrans in airlift photobioreactor*. *Chemical Engineering Journal*, 2005. 105(3): p. 91-98.
 125. Kaewpintong, K., et al., *Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of Haematococcus pluvialis in airlift bioreactor*. *Bioresour Technol*, 2007. 98(2): p. 288-95.
 126. Guieysse, B., G. Quijano, and R. Muñoz, *Airlift Bioreactors*. 2011. p. 199-212.
 127. Powtongsook, S. and K. Nootong, *Photoautotrophic Cultivation of Chlorococcum humicola in Stirred Tank and Airlift Photobioreactors under Different Light Settings and Light Supplying Strategies for Biomass and Carotenoids Production*. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2019. 94.
 128. Eghbali Babadi, F., et al., *Identification of carotenoids and chlorophylls from green algae Chlorococcum humicola and extraction by liquefied dimethyl ether*. *Food and Bioproducts Processing*, 2020. 123.
 129. Ma, R. and F. Chen, *Enhanced production of free trans-astaxanthin by oxidative stress in the cultures of the green microalga Chlorococcum sp.* *Process Biochemistry*, 2001. 36: p. 1175-1179.
 130. Liu, B., D.H. Zhang, and Y.K. Lee, *Effects of nutrient levels on cell growth and secondary carotenoids formation in the freshwater green alga, Chlorococcum sp.* *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2000. 10: p. 201-207.
 131. Halfhide, T., et al., *Production of algal biomass, chlorophyll, starch and lipids using aquaculture wastewater under axenic and non-axenic conditions*. *Algal Research*, 2014. 6.
 132. Michels, M.H., et al., *Growth of Tetraselmis suecica in a tubular photobioreactor on wastewater from a fish farm*.

- Water Res, 2014. 65: p. 290-6.
133. Day, J.G., Y. Gong, and Q. Hu, *Microzooplanktonic grazers – A potentially devastating threat to the commercial success of microalgal mass culture*. Algal Research, 2017. 27: p. 356-365.
 134. Han, S.F., et al., *Optimization of aeration for biodiesel production by Scenedesmus obliquus grown in municipal wastewater*. Bioprocess Biosyst Eng, 2016. 39(7): p. 1073-9.
 135. Muñoz, R. and B. Guieysse, *Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review*. Water Research, 2006. 40(15): p. 2799-2815.
 136. Cho, S., et al., *Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production*. Bioresource Technology, 2011. 102(18): p. 8639-8645.
 137. Kelly, L.A., *Release rates and biological availability of phosphorus released from sediments receiving aquaculture wastes*. Hydrobiologia, 1993. 253(1): p. 367-372.
 138. WARBURG, *Schwermetalle als Wirkungsgruppen von Fermenten*. Verlag Dr. Werner Saenger, 1948.
 139. WIESSNER, W., *Inorganic macronutrients*. In. 1962, New York: New York.
 140. Arbib, Z., et al., *PHOTOBIOREMEDIATION: INFLUENCE OF NITROGEN AND PHOSPHORUS RATIO IN WASTEWATER ON GROWTH KINETICS OF SCENEDESMUS OBLIQUUS*. International Journal of Phytoremediation, 2013. 15(8): p. 774-788.
 141. Grobbelaar, J.U. and C.H. Bornman, *Algal biotechnology: Real opportunities for Africa*. South African Journal of Botany, 2004. 70: p. 140-144.
 142. Kozłowska-Szerenos, B., I. Białuk, and S. Maleszewski, *Enhancement of photosynthetic O₂ evolution in Chlorella vulgaris under high light and increased CO₂ concentration as a sign of acclimation to phosphate deficiency*. Plant Physiol Biochem, 2004. 42(5): p. 403-9.
 143. ณกรณ์ เทียงภักดี, การกำจัดน้ำเสียชุมชนด้วยจุลสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์คลอโรคอคคัส ฮิวมิโคลา, in สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2562, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
 144. Donkin, P., *Ketocarotenoid biosynthesis by Haematococcus lacustris*. Phytochemistry, 1976. 15(5): p. 711-715.
 145. Ben-Amotz, A., A. Katz, and M. Avron, *Accumulation of beta-carotene in halotolerant algae: Purification and characterization of beta-carotene-rich globules from Dunaliella bardawil (Chlorophyceae)*. J. Phycol. 18: 529-537. Journal of Phycology, 2004. 18: p. 529-537.
 146. Malis, S.A., E. Cohen, and A. Ben Amotz, *Accumulation of canthaxanthin in Chlorella emersonii*. Physiologia Plantarum, 1993. 87(2): p. 232-236.
 147. Ben-Amotz, A. and M. Avron, *THE WAVELENGTH DEPENDENCE OF MASSIVE CAROTENE SYNTHESIS IN DUNALIELLA BARDAWIL (CHLOROPHYCEAE)*. Journal of Phycology, 1989. 25(1): p. 175-178.
 148. Lichtenthaler, H., *Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes*. Methods in enzymology, 1987. 148C: p. 350-382.
 149. Siefermann-Harms, D., *The light-harvesting and protective functions of carotenoids in photosynthetic membranes*. Physiologia Plantarum, 1987. 69(3): p. 561-568.
 150. Rise, M., et al., *Accumulation of Secondary Carotenoids in Chlorella zofingiensis*. Journal of Plant Physiology, 1994. 144(3): p. 287-292.
 151. Vechtel, B., E.K. Pistorius, and H.G. Ruppel, *Occurrence of Secondary Carotenoids in PS I Complexes Isolated from Eremosphaera viridis De Bary (Chlorophyceae)*. Zeitschrift für Naturforschung C, 1992. 47: p. 51 - 56.
 152. Sarat Chandra, T., et al., *Evaluation of indigenous fresh water microalga Scenedesmus obtusus for feed and fuel applications: Effect of carbon dioxide, light and nutrient sources on growth and biochemical characteristics*. Bioresource Technology, 2016. 207: p. 430-439.
 153. Singh, P., et al., *Trends and novel strategies for enhancing lipid accumulation and quality in microalgae*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 55.
 154. Kunyawut, C.P., | *Effects of nitrogen to phosphorus molar ratios on the growth and fatty acid*

- accumulation of a freshwater microalga *Chlorococcum humicola*. *Journal of Engineering and Innovation*, 2021. 1: p. 174-187.
155. Illman, A.M., A.H. Scragg, and S.W. Shales, *Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium*. *Enzyme and Microbial Technology*, 2000. 27(8): p. 631-635.
 156. Sukenik, A. and A. Livne, *Variations in Lipid and Fatty Acid Content in Relation to Acetyl CoA Carboxylase in the Marine Prymnesiophyte Isochrysis galbana*. *Plant and Cell Physiology*, 1991. 32(3): p. 371-378.
 157. Morales-Sánchez, D., et al., *Toward an understanding of lipid and starch accumulation in microalgae: A proteomic study of Neochloris oleoabundans cultivated under N-limited heterotrophic conditions*. *Algal Research*, 2016. 20: p. 22-34.
 158. Cai, T., S. Park, and Y. Li, *Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 19: p. 360-369.
 159. Guldhe, A., et al., *Heterotrophic cultivation of microalgae using aquaculture wastewater: A biorefinery concept for biomass production and nutrient remediation*. *Ecological Engineering*, 2017. 99: p. 47-53.
 160. Máchová, J., et al., *Nitrite poisoning of fish in aquaculture facilities with water-recirculating systems: Three case studies*. *Acta Vet. Brno.*, 2005. 74: p. 12-137.
 161. Bacelo, H., et al., *Performance and prospects of different adsorbents for phosphorus uptake and recovery from water*. *Chemical Engineering Journal*, 2020. 381: p. 122566.
 162. Pap, S., et al., *Enhanced phosphate removal and potential recovery from wastewater by thermo-chemically calcinated shell adsorbents*. *Sci Total Environ*, 2022. 814: p. 152794.
 163. Rout, P.R., P. Bhunia, and R.R. Dash, *Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from domestic wastewater using Bacillus cereus GS-5 strain exhibiting heterotrophic nitrification, aerobic denitrification and denitrifying phosphorus removal*. *Bioresour Technol*, 2017. 244(Pt 1): p. 484-495.
 164. Wang, H., et al., *Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: Effects of carbon to nitrogen ratios*. *Sci Total Environ*, 2018. 642: p. 1145-1152.
 165. Jin, P., et al., *Efficient nitrogen removal by simultaneous heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium in a purification tank bioreactor amended with two-stage dissolved oxygen control*. *Bioresour Technol*, 2019. 281: p. 392-400.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จรีลักษ์ เปล่งสกุล
วัน เดือน ปี เกิด	30 ธันวาคม 2531
สถานที่เกิด	สมุทรสงคราม
วุฒิการศึกษา	มหาวิทยาลัยมหิดล ปริญญาโท คณะสาธารณสุขศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล มหาวิทยาลัยศิลปากร ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ที่อยู่ปัจจุบัน	42 ซอยบางประจันต์ ต.แม่กลอง อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000 E-mail jareeluk.pleng@gmail.com
ผลงานตีพิมพ์	Plengsakul, J., Powtongsook, S., & Nootong, K. (2021). Plastic media reduced algal wall-growth of <i>Chlorococcum humicola</i> for the cultivation in internal-loop airlift photobioreactor. <i>Algal Research</i> , 53, 102131. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102131 Plengsakul, J., Powtongsook, S., & Nootong, K. (2022). Reduction of algal wall-growth biofilm for the cultivation of <i>Chlorococcum</i> in photobioreactors using commercial surfactants and floating plastic media. <i>Biochemical Engineering Journal</i> , 189, 108744. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108744



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY