

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดหมวนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดหมวนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AIRLIFT PHOTOBIOREACTOR FOR MICROALGAE CULTIVATION



THIS REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดหมุนวนสำหรับ  
การเพาะเลี้ยงสาหร่าย

โดย

นางสาวจตุพร ภัคดี

นายณัฐจักร วงศ์คำ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



นางนง พิณรัตน์

ประธานกรรมการ

(ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

ประธานกรรมการ

(ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ)

นสว.อศ อศว.แสงรัตน์

กรรมการ

(ดร.พรสวรรค์ อศว.แสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้แสงชนิดหมุนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย
โดย	นางสาวจตุพร ภักดี นายณัฐจักร วงศ์คำ
ปริญญญาสาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ญานีพร พัชรวรโชติ

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์แสงแบบลูกผสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วุลกาวิส (Chlorella Vulgaris)* การออกแบบอ้างอิงจากระบบการเพาะเลี้ยงแบบหมุนเวียนอากาศโดยใช้แสง วัสดุทำด้วยอะคริลิกใสรูปทรงกระบอกสองชั้นซ้อนกัน การหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับสองส่วน คือ บริเวณโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งบริเวณโรเตอร์เป็นบริเวณที่ของไหลเคลื่อนที่ตามทิศของแก๊สจากแหล่งกำเนิด ส่วนบริเวณดาวน์คัมเมอร์มีทิศทางตรงข้าม โดยที่อากาศถูกป้อนเข้าบริเวณด้านล่างของเครื่องผ่านหัวกระจายแก๊ส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร อัตราการไหลสามารถปรับให้เหมาะสมกับการไหลเวียนและการเจริญเติบโตของสาหร่าย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ 57 ลิตร อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของดาวน์คัมเมอร์ต่อโรเตอร์เท่ากับ 3 ซึ่งจากการสังเกตปรากฏการณ์การไหลเวียนพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ให้การไหลเวียนที่เหมาะสม บริเวณกลางทรงกระบอกภายในติดตั้งหลอดไฟชนิด LED สีแดงซึ่งมีช่วงคลื่นแสง 620 ถึง 630 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้สาหร่ายใช้สังเคราะห์สารอาหาร ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่อัตราการไหลของอากาศเข้าเท่ากับ 5, 7.5 และ 10 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 7 วัน และมีรอบการให้แสงสว่างต่อมืดเท่ากับ 16:8 สามารถวัดความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายได้จากการวัดความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์และค่าการดูดกลืนแสงของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความยาวคลื่น 430 และ 640 นาโนเมตรด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) พบว่าอัตราการไหลของแก๊สขาเข้ามีผลต่อการเจริญเติบโตเพียงเล็กน้อยแต่มีผลต่อการกระจายตัวของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยอัตราการไหลที่สูงส่งผลให้สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์กระจายตัวได้ดีและจากการศึกษาการถ่ายโอนมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 7.5 ลิตรต่อนาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $k_{La}$ ) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ 0.1022 ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Airlift Photobioreactor For Microalgae Cultivation	
By	Ms.Chatupond	Pakdee
	Mr.Nattajuk	Wongkam
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Chemical Engineering	
Year	2014	
Advisor	Dr.Tanawan Pinnarat	
Co-Advisor	Dr.Yaneeporn Patcharavorachot	

## Abstract

This project studied and designed photobioreactor for *Chlorella Vulgaris* cultivation. A two-layer cylinder made of acrylic was designed as an airlift photobioreactor for algae cultivation. The fluid circulation is composed of two parts, riser, where liquid flow upward to the top of reactor and downcomer where liquid flow downward to reactor's bottom. Air was provided through the gas sparger at the bottom, which had the diameter of 10 centimeters. The flow rate of inlet gas could be adjusted in accordance with the condition suitable for algae to grow. It's a 57 liters reactor of which the ratio of the cross sectional area of downcomer to riser is 3. The fluid circulation was monitored and the condition was adjusted according to the proper operating condition. Red LEDs were installed in the center of the cylinder to produce the light for algae's photosynthesis. To test the photobioreactor, microalgae, *Chlorella Vulgaris*, were cultivated for 7 day with aeration rate of 5, 7.5 and 10 liters per minute and light dark cycle is 16:8. Microalgae cell density was measured by light intensity outside the reactors and light absorption of algae solution at 430 and 640 nm wavelengths by UV-VIS spectroscopy. We found that aeration rate had small impact to microalgae growth rate but it affected to microalgae distribution in photobioreactor. High microalgae distribution occurred when aeration rate was high. Volumetric mass transfer coefficient ( $k_{La}$ ) of carbon dioxide was found to be  $0.1022 \text{ s}^{-1}$  by carbon dioxide mass transfer study at aeration rate of 7.5 liters per minute.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยความอนุเคราะห์ทุ่มเททั้งร่างกายและแรงใจของอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์และดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ ผู้ซึ่งคอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหา รวมทั้งให้ออกาสลูกศิษย์ได้เรียนรู้ประสบการณ์การทำงานใหม่ๆอยู่เสมอ ทั้งนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ประจำปี 2557 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและเงินสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อีกทั้งยังมีผู้มีพระคุณท่านอื่นๆดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างปริญญานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำพร้อมทั้งข้อชี้แนะต่างๆจนในที่สุดทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ รศ. ดร.สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรการประมง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์ในด้านกาเพาะเลี้ยงสาหร่าย ทั้งอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อทดสอบเครื่องปฏิกรณ์

ขอขอบคุณ คุณบุปผา จงพัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกการใช้เครื่องมือและเพาะพันธุ์หิวเชื้อสาหร่าย

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ คุณตรุณี ผลโพธิ์ และคุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการจัดทำเอกสาร การประกอบและติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ขอขอบคุณเพื่อนๆที่น้องๆวิศวกรรมเคมีที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สำคัญที่สุดที่ขาดไม่ได้ ขอขอบคุณ บิดา มารดาที่อบรมสั่งสอนให้มีความอดทนและมุ่งมั่นตั้งใจในการทำงาน สนับสนุนการศึกษา ทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งปริญญานิพนธ์เล่มนี้คณะผู้จัดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอนาคต

นางสาวจตุพร ภักดี

นายณัฐจักร วงศ์คำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป .....	VII
สัญลักษณ์ .....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 สาหร่ายน้ำมัน .....	3
2.2 รูปแบบการเพาะเลี้ยง .....	5
2.3 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์.....	10
2.4 การถ่ายเทมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน .....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง .....	15
3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ .....	16
3.2 การเตรียมสารอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย .....	18
3.3 การทำความสะอาด เครื่องปฏิกรณ์และวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการขยายพันธุ์สาหร่าย.....	19
3.4 การเตรียมหัวเชื้อ .....	20
3.5 การวิเคราะห์ผล .....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย .....	24
4.1 การปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ .....	24
4.2 การทดสอบพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ .....	25
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ปัญหาที่พบในการดำเนินงานและการแก้ไข.....	40
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	40
5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงานและการแก้ไข .....	40
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก .....	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าผลผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับสาหร่าย .....	4
2.2 ปริมาณน้ำมันสะสมในสาหร่ายแต่ละชนิด .....	4
2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิดแต่ละชนิด .....	9
2.4 เปรียบเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย .....	10
3.1 แสดงขนาดและมิติของเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสง .....	17
3.2 สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร .....	18
4.1 แสดงรายละเอียดการปรับปรุงแก้ไขเครื่องปฏิกรณ์ .....	24
4.2 สภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย คลอเรลล่า วูลกาวิส ครั้งที่ 1 .....	26
4.3 สภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย คลอเรลล่า วูลกาวิส ครั้งที่ 2 .....	28
4.4 สภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย คลอเรลล่า วูลกาวิส ครั้งที่ 3 .....	31
4.5 สภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย คลอเรลล่า วูลกาวิส ครั้งที่ 4 .....	33
ก.1 แสดงค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 14 วัน .....	49

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	3
2.2	5
2.3	6
2.4	7
2.5	7
2.6	8
2.7	8
2.8	11
2.9	11
3.1	15
3.2	17
3.3	18
3.4	19
3.5	20
3.6	21
4.1	25
4.2	26
4.3	27
4.4	27
4.5	29
4.6	29
4.7	30
4.8	31
4.9	32
4.10	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 4 ..... ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร .....	34
4.12 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 4 ..... ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร .....	34
4.13 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 4 .....	35
4.14 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้ง .....	36
4.15 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้ง ..... โดยเปรียบเทียบข้อมูลที่มีจุดเริ่มต้นเท่ากัน .....	37
4.16 เปรียบเทียบค่าความต่างเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนและด้านล่างของ ..... เครื่องปฏิกรณ์เมื่อทำการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้ง .....	37
4.17 แสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในน้ำ .....	38
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $t - t_0$ และ $\ln((C^* - C_0) / (C^* - C))$ .....	39
ค.1 สีของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ .....	51



# สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$A_d/A_r$	อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดดาวนัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดโรเซอร์	
$vvm$	ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่ออนาที	
$C$	ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำที่เวลาใดๆ	mg/liter
$C_0$	ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำที่เวลาเริ่มต้น	mg/liter
$C^*$	ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำเมื่อเข้าสู่สมดุล	mg/liter
$D_{O_2}/D_{CO_2}$	อัตราการแพร่ของออกซิเจนต่ออัตราการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ	
$D_D/D_R$	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์	
$k_G$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในแก๊ส	
$k_L$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว	
$k_L a_L$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยปริมาตร	$s^{-1}$
$k_L a_L (CO_2)$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์	$s^{-1}$
$k_L a_L (O_2)$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยปริมาตรของออกซิเจน	$s^{-1}$
PPF	ความเข้มแสง	$\mu mol m^{-2} s^{-2}$
$t_0$	เวลาเริ่มต้น	min
$t$	เวลาใดๆ	min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์ และมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มมากขึ้นในอนาคต แต่ปัจจุบันพลังงานนั้นลดน้อยลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพลังงานปิโตรเลียม ต้องอาศัยการสะสมสารประกอบอินทรีย์เป็นเวลานานก่อนเปลี่ยนสภาพเป็นปิโตรเลียม อีกทั้งการใช้งานพลังงานจากปิโตรเลียมยังส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีและแสวงหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากปิโตรเลียม นอกจากนี้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมและพลังงานน้ำ การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากสาหร่ายนับเป็นแหล่งพลังงานสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะสาหร่ายมีอัตราการขยายพันธุ์รวดเร็ว วงจรชีวิตสั้น ใช้พื้นที่และน้ำในการเพาะเลี้ยงน้อยกว่าพืชชนิดอื่นที่ให้น้ำมันทั่วไป [1,2]

สาหร่ายนั้นมีองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย สาหร่ายขนาดเล็กบางสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนมากกว่าในถั่วเหลืองและนม [3] ทำให้สาหร่ายเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้โปรตีนแล้วยังมีวิตามินและคอเลสเตอรอลส่งผลให้เกิดการวิจัยและพัฒนาสาหร่ายเพื่อใช้เป็นยารักษาโรค ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องสำอาง [4,5] น้ำมันก็เป็นส่วนประกอบสำคัญที่พบในสาหร่าย พบว่าในเซลล์สาหร่ายส่วนใหญ่มีปริมาณน้ำมันประมาณ 20-40 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้งและอาจสูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและสภาวะการเพาะเลี้ยง [6] สาหร่ายสามารถผลิตน้ำมันได้มากกว่าพืชชนิดอื่นเช่น มะพร้าว ปาล์ม ในขณะที่พืชชนิดอื่นใช้พื้นที่เพาะเลี้ยงมากกว่าเช่น ปาล์มน้ำมัน ใช้พื้นที่เพาะเลี้ยงมากกว่าสาหร่ายถึง 20 เท่าตัวเพื่อให้ผลิตน้ำมันในปริมาณที่เท่ากัน [7] นอกจากนี้ประโยชน์ดังกล่าวแล้วการปลูกสาหร่ายจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุอาหาร ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบริเวณโรงงานจะช่วยลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยบำบัดน้ำเสีย [2,4]

จากการศึกษาค้นคว้าการแปรรูปสาหร่ายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างจริงจังของหลากหลายองค์กรทั่วโลกพบว่าปัญหาที่สำคัญคือ การเพิ่มปริมาณการผลิตให้อยู่ในระดับอุตสาหกรรมนั้นยังขาดความชัดเจนของกระบวนการผลิตและการเพาะเลี้ยง สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดสามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและสิ่งปนเปื้อน เพื่อคุณภาพของผลผลิตและความคุ้มค่าแต่ยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มปริมาณการผลิตให้อยู่ในระดับอุตสาหกรรม [4] เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาศึกษา เนื่องจากใช้พื้นที่ในการผลิตน้อย มีประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงที่ดีและการขยายขนาดมีความเป็นไปได้มากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนทรงกระบอกแนวตั้ง เครื่องปฏิกรณ์จะถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนแสง ความเข้มข้นของแก๊สและอัตราการไหล ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องในการศึกษาครั้งนี้จะทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วูลกาวิส (Chlorella vulgaris)* และทำการวัดคุณสมบัติของของผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อตรวจสอบสภาวะต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์ว่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายหรือไม่

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงชนิดหมุนวนเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย
2. ศึกษาอิทธิพลของอัตราแก๊สเข้าซึ่งมีต่อการกระจายตัวของสาหร่าย
3. ศึกษาหลักการการถ่ายโอนมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วูลกาวิส* เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์
2. ศึกษาอิทธิพลของอัตราแก๊สเข้า โดยศึกษาในช่วง 5-10 ลิตรต่อนาที
3. ศึกษาหลักการการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเข้าสู่ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สาหร่ายน้ำมัน

สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำที่มีคลอโรฟิลล์ สามารถสังเคราะห์อาหารได้เอง เติบโตในบริเวณที่มีแสงแดดและมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ แต่ไม่มีส่วนที่เป็น ลำต้น ราก และใบที่แท้จริง สาหร่ายมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงมากเมื่อเทียบกับพืชทั่วไป จึงทำให้สาหร่ายเติบโตได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถจำแนกสาหร่ายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สาหร่ายขนาดใหญ่ และสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งพิจารณาจากขนาดของสาหร่าย ในปฏิญญาพนธ์นี้จะสนใจการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเท่านั้น

#### 2.1.1 สาหร่ายขนาดเล็ก

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นสาหร่ายที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.4 ไมโครเมตร ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แต่สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 2.1) สามารถพบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม ปัจจุบันนักวิจัยพบว่าในสาหร่ายนั้นมีองค์ประกอบที่มีคุณค่าทางอาหารมากมาย ทั้งโปรตีน แร่ธาตุ และวิตามิน นอกจากนี้ยังพบว่าในเซลล์ของสาหร่ายมีการสะสมน้ำมันอยู่สูงมากเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่นและใช้พื้นที่เพาะเลี้ยงที่น้อยกว่า เปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สาหร่ายขนาดเล็กผ่านกล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 2.1 ค่าผลผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับสาหร่าย [9]

ชนิดพืช	ร้อยละผลได้ของน้ำมัน (ลิตร/เฮกเตอร์)
สาหร่าย (Algae)	100,000
ละหุ่ง (Castor)	1,413
มะพร้าว (Coconut)	2,689
ปาล์ม (Palm)	5,950
ดอกคำฝอย (Safflower)	779
ถั่วเหลือง (Soy)	446
ดอกทานตะวัน (Sunflower)	952

นอกจากนั้นนักวิจัยยังพบว่า ปริมาณของสารอาหารที่มีในสาหร่ายจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสายพันธุ์ จึงต้องพิจารณาสายพันธุ์ที่ใช้อย่างให้เหมาะสมกับความต้องการ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สาหร่ายบางชนิดสามารถเก็บสะสมน้ำมันได้มากถึง 70-80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำมันสะสมในสาหร่ายแต่ละชนิด [10]

ชนิดสาหร่ายขนาดเล็ก	ปริมาณน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella</i> sp	28-32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nanochloris</i> sp	20-35
<i>Nannochloropsis</i> sp	31-68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำมันสะสมในสาหร่ายแต่ละชนิด(ต่อ) [10]

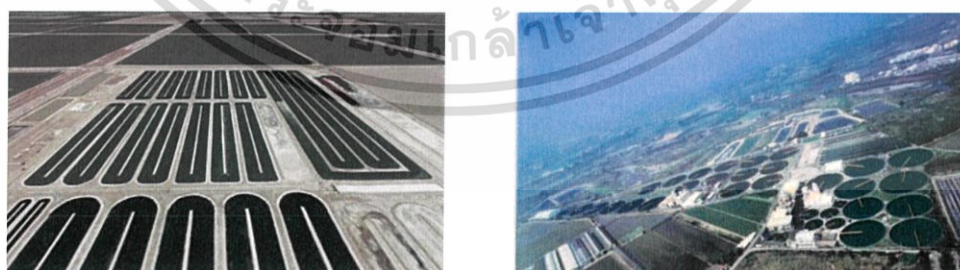
ชนิดสาหร่ายขนาดเล็ก	ปริมาณน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)
Neochloris oseoabundans	35-54
Nitzschia sp	45-47
Phaeodactylum tricornutum	20-30
Schizochytrium sp	50-77
Tetraselmis suecia	15-23

## 2.2 รูปแบบการเพาะเลี้ยง

วิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้มีประสิทธิภาพนั้นเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ โดยนักวิจัยได้มีการพัฒนาวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหลากหลายวิธีด้วยกัน โดยสามารถแบ่งระบบที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบเปิด และระบบปิด ซึ่งกลไกการทำงานและลักษณะของการเพาะเลี้ยงเป็นดังต่อไปนี้

### 2.2.1 ระบบเปิด (Open system)

เพาะเลี้ยงโดยใช้อุปกรณ์เชิงกลเพื่อช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโต เป็นบ่อเปิดขนาดใหญ่ กลางแจ้ง เพาะเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิด (Open pond) ทะเลสาบ (Lagoon) หรืออาจจะเป็นบ่อวน (Raceway pond) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ระบบหมุนวน ข้อดีของการเพาะเลี้ยงในระบบเปิดคือ การก่อสร้างและการดำเนินการที่ง่ายกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบปิด แต่มีข้อจำกัดคือ ปริมาณแสงที่ให้สาหร่ายไม่สม่ำเสมอ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่เพียงพอ และการใช้พื้นที่ติดตั้งบริเวณกว้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิด [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ระบบปิด (Close system)

การเพาะเลี้ยงในระบบปิดเป็นการเพาะเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์โดยสามารถควบคุมสภาวะให้เหมาะสมตามต้องการ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดนั้นมีลักษณะและข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป เพื่อปรับให้เหมาะสมกับความต้องการของการใช้งานในแต่ละประเภท ซึ่งเป็นข้อดีของการเพาะเลี้ยงในระบบปิดเมื่อเทียบกับระบบเปิด แม้ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ หรือการเพาะเลี้ยงอาจมีต้นทุนที่สูงกว่าในระบบเปิด แต่ในอุตสาหกรรมบางประเภทจำเป็นต้องควบคุมสภาวะ เช่น ควบคุมการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก หรือการควบคุมความเข้มข้นแสงและปริมาณแก๊ส เป็นต้น ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดสามารถแบ่งได้ดังนี้

### 2.2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อจะมีทั้งแบบแนวนอนและนอนตั้ง มีลักษณะเป็นท่อยาวขดไปมา มักใช้ท่อพลาสติกหรือท่อกระจกเป็นวัสดุให้แสงสามารถส่องผ่านไปยังสาหร่ายเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง ระบบไหลเวียนของของเหลวและแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์เกิดขึ้นโดยการใช้ปั๊มในการเพิ่มแรงดันของของเหลวให้เคลื่อนที่ นอกจากนี้อาจมีระบบเพิ่มเติมเพื่อเติมแก๊สที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายลงในสารอาหารก่อนที่จะปั๊มของเหลวเข้าไหลเวียนในระบบตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบท่อ [12]

### 2.2.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น (Flat plate reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่นมักจะมีลักษณะเป็นแนวตั้ง ทำด้วยวัสดุใสเป็นแผ่นสองข้างประกบกัน มีที่ว่างตรงกลางระหว่างแผ่นใสเพื่อบรรจุของเหลว ในส่วนบริเวณล่างสุดมีการปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบเกิดการไหลเวียนและแลกเปลี่ยนแก๊สให้สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสง ในบางครั้งอาจมีการเพิ่มหลอดไฟเข้าไปในบริเวณช่องว่างที่ใสของเหลว เพื่อใช้เป็นแสงเทียมทดแทนแสงอาทิตย์ที่อาจไม่เพียงพอในวันที่มีแสงน้อยหรือหากเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบแผ่น [13]

### 2.2.2.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stir tank reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนมีลักษณะเป็นทั้งรูปทรงกลมหรือทรงกระบอกขนาดใหญ่เช่นรูปที่ 2.5 มีการติดตั้งใบพัดให้การหมุนเวียนของของเหลวและแก๊สในระบบสามารถเกิดขึ้น อาจมีการเติมแก๊สบริเวณส่วนล่างของถัง และด้วยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นถึงขนาดใหญ่ อาจต้องมีการเพิ่มแสงเทียมเพื่อช่วยในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนจำเป็นต้องใช้พลังงานค่อนข้างมากเนื่องจากมีใบพัดที่เพิ่มเติมเข้ามาในระบบ



รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบถังกวน [14]

### 2.2.2.4 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดพ่นฟอง (Bubble column reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดพ่นฟองมีการใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรม ไม่เว้นแม้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูงในแนวตั้ง มีการป้อนแก๊สผ่านหัวกระจายแก๊สในบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ แก๊สจะเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และมีการแยกตัวออกของแก๊สออกจากของเหลวที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ตามรูปที่ 2.6 การแลกเปลี่ยนของแก๊สกับของเหลวในระบบขึ้นกับความเร็วของแก๊สและความสามารถในการละลายของแก๊สในน้ำที่ต้องมีความเหมาะสมและสัมพันธ์กัน



รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบฟอง [15]

#### 2.2.2.5 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวน (Airlift reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีลักษณะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟอง แต่มีการเพิ่มท่อกลวงที่เรียกว่า Draft tube เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลเวียนของของเหลวและแก๊สภายใน เครื่องปฏิกรณ์อีกทั้งความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้ง่ายขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนจะมีการปล่อยแก๊สในบริเวณด้านล่างของถังโดยแก๊สจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟอง แต่จะมีการแยกของแก๊สออกด้านบนเพียงบางส่วนและมีบางส่วนไหลวนกลับลงมาในส่วนล่างของระบบ เครื่องปฏิกรณ์รูปแบบนี้มีการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนที่ดี ตัวอย่างแสดงดังรูปที่

2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบหมุนวน [16]

เมื่อนำข้อดีข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ในระบบปิดมาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยง การควบคุมการปนเปื้อน ขนาดพื้นที่ที่ต้องการในการเพาะเลี้ยงและความเป็นไปได้ในการขยายขนาด เพื่อนำมาพิจารณาตัดสินใจเลือกชนิดเครื่องปฏิกรณ์ที่จะใช้ศึกษา ดังตารางที่ 2.3 พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงที่ต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาของแก๊สที่ใช้เดินทางในท่อนาน สาหร่ายจึงมีโอกาสสัมผัสกับแก๊สที่ปล่อยเข้าไปได้น้อยและไม่ทั่วถึง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการขยายขนาดที่ยาก สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น ให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงดีมาก ลดปัญหาระยะเวลาการเดินทางของแก๊สเพื่อให้แก๊สสัมผัสกับสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิดแต่ละชนิด

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยง	การควบคุมการปนเปื้อน	ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	การขยายขนาด	อ้างอิง
เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular reactor)	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	[17]
เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น (Flat plate reactor)	ดีมาก	ยาก	น้อย	ยาก	[18]
เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stir tank reactor)	ดี	ยาก	มาก	ง่าย	[19]
เครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟอง (Bubble column reactor)	พอใช้	ดี	ปานกลาง	ง่าย	[20]
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift reactor)	ดี	ดีมาก	ปานกลาง	ง่าย	[21]

แต่ยังมีปัญหาในการควบคุมการปนเปื้อนและการขยายขนาดเพราะลักษณะที่เป็นแผ่นของเครื่องปฏิกรณ์ที่บางทำให้เป็นข้อจำกัดในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์จะต้องใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ให้ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ดีและขยายขนาดได้ง่ายกว่าแบบท่อและแบบแผ่น แต่ยังมีปัญหาการปนเปื้อนของระบบและใช้ขนาดพื้นที่กว้าง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานจริงเพราะอาจมีผลกับต้นทุนและผลตอบแทนของการผลิต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟองอากาศและเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนมีการป้องกันการปนเปื้อนดีและการขยายขนาดที่ง่าย แต่ประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟองอากาศเนื่องจากการเพิ่มทอกลงภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุนวนแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงที่ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายมาใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดการหมุนวนนั้นมีความเป็นไปได้สูง เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ด้วยข้อดีดังนี้คือ การก่อสร้างง่าย มีส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ มีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี การผสมกันของของเหลวภายในเครื่องมีประสิทธิภาพ ต้องการพลังงานต่ำ และใช้ต้นทุนต่ำในการดำเนินการ โดยในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการถ่ายเทมวล (Mass transfer) รูปแบบการผสมที่เกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสม โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ความเร็วของของเหลวและแก๊ส ความเหมาะสมของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สายพันธุ์สาหร่าย	ปริมาตร เครื่อง (ลิตร)	$A_d/A_r$	อัตราการ ไหลแก๊ส (vvm)	ความเร็ว แก๊ส (cm/s)	ความ เข้มข้น CO <sub>2</sub> (%)	อัตราการ เจริญเติบโต (ต่อวัน)	อ้างอิง
<i>Hematococcus pluvialis</i>	3	3.2	N/A	0.4	1.0	0.31	[22]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	N/A	4.4	0.33	N/A	5.0	0.25	[23]
<i>Skeletonema costatum</i>	3	3.24	N/A	1.5	อากาศ บริสุทธิ์	1.68	[24]
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	17	2.63	N/A	3	อากาศ บริสุทธิ์	1.78	[25]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	1.4	N/A	0.33	N/A	4.4	N/A	[26]
<i>Anabaena</i>	1.4	1.6	0.25	N/A	1.0	N/A	[27]
<i>Spirulina platensis</i>	1.5	2.6	3.3	N/A	อากาศ บริสุทธิ์	0.16-0.28	[28]
<i>Spirulina platensis</i>	1.51	1.49	1	N/A	อากาศ บริสุทธิ์	0.47	[29]

หมายเหตุ : N/A คือ ไม่มีข้อมูล

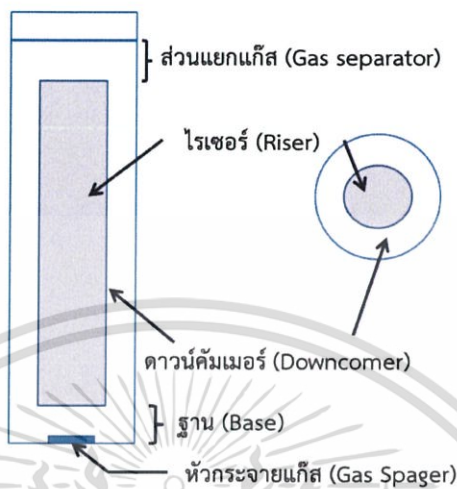
:  $A_d/A_r$  คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดดาวน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์

: vvm คือ ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่อนาที (Gas volume per liquid volume per minute)

### 2.3 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์

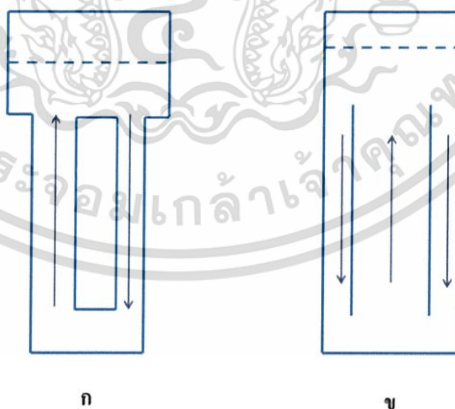
ลักษณะเด่นของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศคือ ของเหลวจะไหลขึ้นจากใจกลางคอลัมน์ไปตามความสูงเครื่องปฏิกรณ์โดยการใส่ท่อกลวงและวกกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องทำให้เกิดการผสมที่ดี เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ตามรูปที่ 2.8 คือส่วนไรเซอร์ (Riser) ส่วนดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ส่วนฐาน (Base) และส่วนแยกแก๊ส (Gas separator) ซึ่งการออกแบบตามทฤษฎีของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนจะต้องมีความสูงของส่วนแยกแก๊สและส่วนฐานที่เท่ากัน อากาศจะถูกป้อนผ่านหัวกระจายแก๊สจากด้านล่างถึงเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่มีการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนถูกเรียกว่า ไรเซอร์ และส่วนที่มีทิศการไหลตรงข้ามถูกเรียกว่า ดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งการไหลวนของของเหลวเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของผสม 2 สถานะในไรเซอร์ และการไหลวนของแก๊สจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมากพอที่จะทำให้ความเร็วของ

ของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถพาแก๊สที่เคลื่อนที่ขึ้นจากส่วนของไรเซอร์ไหลผ่านส่วนของดาวนคัมเมอร์สวนทางกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ [8]



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน

เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหมุนวนภายในและชนิดหมุนวนภายนอก ซึ่งความแตกต่างของทั้งสองชนิด อยู่ที่เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอกประกอบด้วยสองคอลัมน์ที่แยกออกจากกัน มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุดอยู่ที่ส่วนบนและส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความต่างนี้ส่งผลให้เกิดการแยกแก๊สในส่วนของด้านบนบนถัง [31] ตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ก ) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอก ข ) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายใน [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 2.4 พบว่าการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ทุกขนาดจะต้องคำนึงถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดโรเซอร์ ( $A_d/A_r$ ) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลต่อลักษณะการไหลและความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดโรเซอร์ที่ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะอยู่ในช่วง 1-5 [22,24-25,27-29]

### 2.3.1 ความเร็วของของเหลวและแก๊ส

อัตราการไหลและความเร็วของแก๊สขาเข้าส่งผลต่อความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน หากแก๊สขาเข้ามีความเร็วที่น้อยเกินไปของเหลวจะไม่สามารถพาฟองแก๊สกลับมาในส่วนของดาวนัมเมอร์ทำให้ไม่เกิดการไหลวนของแก๊ส เวลาในการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สกับของเหลวจึงลดลง แต่ถ้าความเร็วของแก๊สขาเข้ามากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันของฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว อัตราการบ่อนแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์นั้นจะต้องคำนึงถึงปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก อัตราการไหลของแก๊สจึงมักนิยมเขียนในหน่วยของ ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่ออนาที (vvm) โดยส่วนใหญ่อัตราการไหลของแก๊สที่ทำให้สาหร่ายเติบโตได้ดีจะอยู่ในช่วง 0.25 – 3.3 vvm [23,26-29] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้

### 2.3.2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าโดยตรงถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีอัตราการไหลสูงจะส่งผลให้สารอาหารภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเป็นกรดและมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มากเกินความจำเป็น หากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำในแก๊สขาเข้าที่มีอัตราเร็วต่ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของสาหร่าย สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออากาศมักอยู่ในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม [22-23,26-27]

ดังนั้นการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้นและทำการปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมกับการเลี้ยงสาหร่ายในแต่ละสายพันธุ์อีกด้วย

## 2.4 การถ่ายเทมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน

การถ่ายโอนมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์มักศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว ( $k_L$ ) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในแก๊ส ( $k_G$ ) มีค่าน้อยกว่ามาก จากสมการการถ่ายโอนมวลเบื้องต้น

$$\frac{dC}{dt} = k_L a_L (C^* - C) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $C^*$  คือค่าการละลายของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเข้าสู่สมดุลและ  $C$  คือค่าการละลายของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆ ( $t$ ) จากการศึกษาของ A. Sánchez Mirón [30] ได้วัดค่าการละลายของออกซิเจน (Dissolved oxygen) ในน้ำโดยใช้อิเล็กโทรด (Electrode) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยปริมาตร (Volumetric mass transfer coefficient,  $k_L a_L$ ) บนสมมติฐานว่าของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ผสมกันได้ดี เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $t - t_0$  และ  $\ln\left(\frac{C^* - C_0}{C^* - C}\right)$  จะได้ความชันของกราฟที่มีค่าเท่ากับ  $k_L a_L$  เมื่อ  $C_0$  คือค่าการละลายของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาเริ่มต้น ( $t_0$ )

$$\ln\left(\frac{C^* - C_0}{C^* - C}\right) = k_L a_L (t - t_0) \quad (2.2)$$

การศึกษากการถ่ายโอนมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์มักจะศึกษาการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากมีวิธีการที่หลากหลายในการวัด เช่น การใช้สารเคมี วิธีวัดเชิงปริมาตร (Volumetric method) การวัดโดยใช้ท่อ (Tubing method) และการใช้ความต่างศักย์ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถหาผ่านสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลโดยปริมาตรของออกซิเจนได้ดังสมการ

$$k_L a_L (CO_2) = \sqrt{\frac{D_{O_2}}{D_{CO_2}}} k_L a_L (O_2) \quad (2.3)$$

ซึ่ง  $\frac{D_{O_2}}{D_{CO_2}}$  หมายถึงอัตราส่วนการแพร่ของออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ [23]

#### 2.4.1 วิธีการวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ

ในการวัดค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำสามารถทำได้หลายวิธี โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 วิธี คือ วิธีการทางเคมี (Chemical method) วิธีวัดเชิงปริมาตร (Volumetric method) การวัดโดยใช้ท่อ (Tubing Method) การวัดโดยการใช้ออปโทด (Optode method) และการวัดโดยใช้อิเล็กโทรด (Electrochemical electrode method) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อจำกัดและวิธีการใช้งานแตกต่างกันออกไป แต่วิธีที่เป็นที่นิยมใช้วัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำมีดังต่อไปนี้

##### 2.4.1.1 วิธีการวัดโดยใช้อิเล็กโทรด (Electrochemical electrode method)

การวัดโดยใช้อิเล็กโทรดเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เป็นการวัดโดยใช้หลักการตรวจจับวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจากเซนเซอร์ (Sensor) ซึ่งภายในเซนเซอร์จะมีขั้วแคโทด (Cathode) และแอโนด (Anode) จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยออกซิเจนจะทำปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ที่ขั้วแอโนด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนกับปริมาณออกซิเจนที่ผ่านเข้ามาในเซนเซอร์ ซึ่งปัจจุบันวิธีการวัดโดยใช้อิเล็กโทรดมีบริษัทที่ผลิตจำหน่ายหลากหลายบริษัท มีชื่อเรียกว่า ดีโอมิเตอร์ (DO meter)

##### 2.4.1.2 วิธีการทางเคมี (Chemical method)

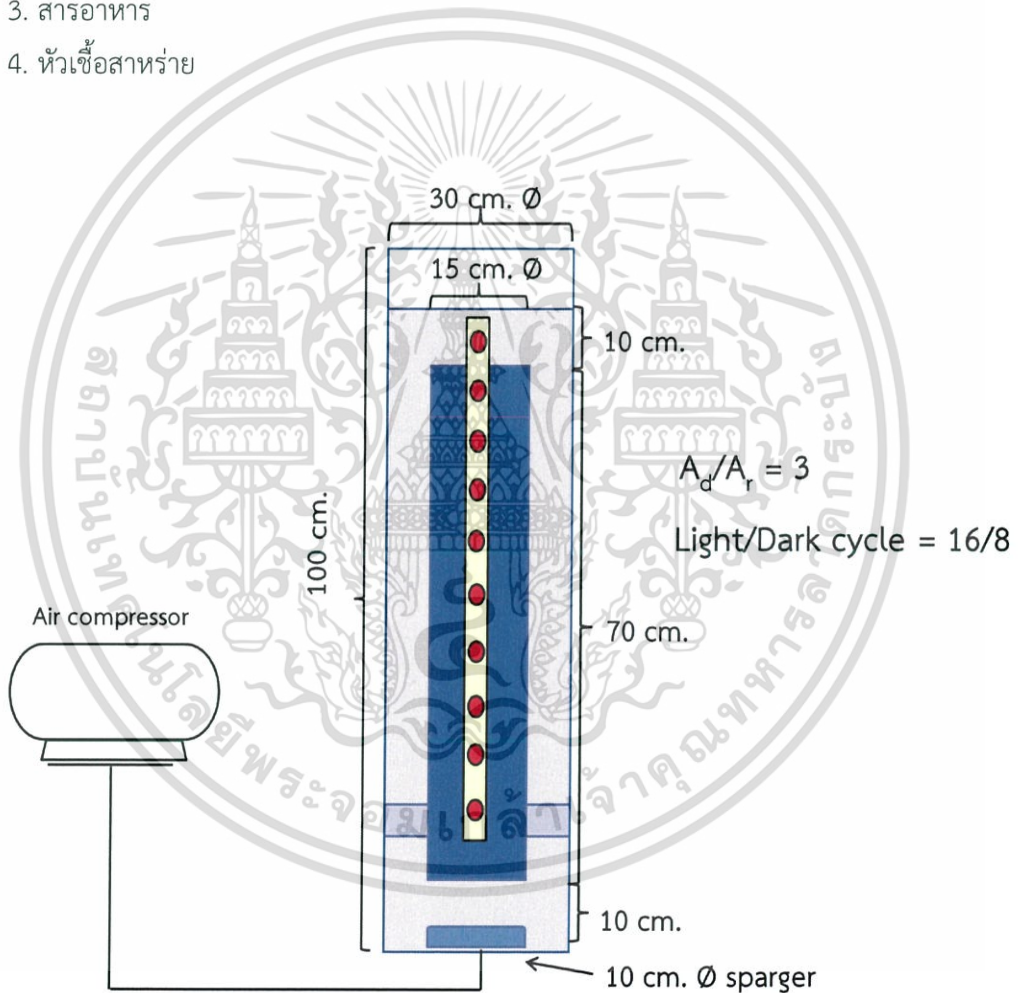
วิธีการวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำโดยใช้สารเคมีเป็นวิธีที่ใช้งานได้ง่าย สามารถทำได้ด้วยการใส่สารเคมีลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ เช่น การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมงกานีส (II) โดยออกซิเจนที่ละลายได้เป็นแมงกานีส (IV) ในสารละลายที่เป็นด่าง ซึ่งแมงกานีส (IV) จะออกซิไดส์ต่อไปเป็นไอโอดีนอิสระซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้ด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟต เมื่อทราบปริมาณไอโอดีนอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาแล้ว จะสามารถคำนวณกลับไปเป็นปริมาณของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำได้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายมีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยอุปกรณ์หลักในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายประกอบด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกออกแบบ
2. บั้มอากาศ
3. สารอาหาร
4. หัวเชื้อสาหร่าย



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์หลักในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

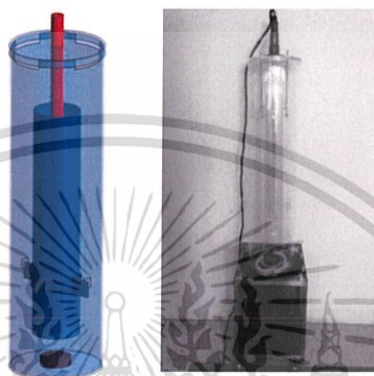
ปฏิญานิพนธ์ครั้งนี้เลือกศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift reactor) ทรงกระบอก แนวตั้ง ภายในมีท่อกลวง (Draft tube) สวมกันอยู่ เครื่องปฏิกรณ์ถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือ ดาวนคัมเมอร์และโรเซอร์ โดยมีการเติมอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จากทางด้านล่างของโรเซอร์ทำให้ของผสมภายในโรเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นในส่วนโรเซอร์และเคลื่อนที่ลงในส่วนของดาวนคัมเมอร์ ก่อให้เกิดการหมุนวนในแนวแกนตั้งภายในเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนแสง ความเข้มข้นของแก๊ส และอัตราการไหลแก๊สได้ การออกแบบคำนึงถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนคัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดของโรเซอร์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์และการเจริญเติบโตของสาหร่าย เมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนคัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดของโรเซอร์ลดลงจะทำให้ความเร็วในการไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ใช้เวลาในการไหลวนครบรอบนานขึ้น ทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและแก๊สดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า  $A_d/A_r$  ที่น้อยมากๆ ความเร็วของของไหลในโรเซอร์จะลดลงจนไม่สามารถพาแก๊สกลับสู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางดาวนคัมเมอร์ทำให้ถ่ายโอนมวลได้ไม่ดี ถ้าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลวงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ ( $D_D/D_R$ ) เท่ากับ 0.5-0.6 หรือ  $A_d/A_r$  เท่ากับ 1.77-3 นั้นของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะใช้เวลาหมุนวนน้อยที่สุด [32] ทำให้มีปริมาณแก๊สสะสมในเครื่องปฏิกรณ์ (Gas holdup) มากขึ้นเกิดการถ่ายโอนมวลได้ดี เครื่องปฏิกรณ์สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ดีนั้นต้องมี ระยะเวลาการหมุนวนและการถ่ายโอนมวลที่เหมาะสมจากการออกแบบตามหลักของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบสำหรับปฏิญานิพนธ์นี้แสดงดังตารางที่ 3.1 และแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดและมิติของเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสง [33]

องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์	ขนาด(เซนติเมตร)
ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์	100
เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์	30
ความสูงของท่อกลวง	70
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลวง	15
ความสูงหลอดไฟ	80
ระยะห่างระหว่างท่อกลวงกับระดับน้ำ	10
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกระจายแก๊ส	10
ระยะห่างระหว่างท่อกลวงกับกันถัง	10
เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดไฟ	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเครื่องปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใส ซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งใส แข็งแรง สามารถป้องกันคราบสกปรก ทนทานต่อน้ำ และทนทานต่อการล้างทำความสะอาดด้วยกรด [34] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกกำหนดด้วยขนาดของวัสดุที่หาได้ทั่วไปในท้องตลาดคือ 30 เซนติเมตรและ 15 เซนติเมตร อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดควมคมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดโรเตอร์เท่ากับ 3 เพื่อให้ของเหลวใช้เวลาในการไหลน้อยที่สุด



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำการเลี้ยงสาหร่าย ซึ่งสาหร่ายแต่ละชนิดมีวิธีการเพาะเลี้ยง อาหาร และการดูแล ที่แตกต่างกัน สาหร่ายที่ถูกเลือกนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ในครั้งนี้คือ สายพันธุ์ *คลอเรลล่า วูลกาวิส* เนื่องจากเป็นสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตน้ำมันและโปรตีนสูงโดยเทียบกับน้ำหนัก และหาได้ง่าย จึงเหมาะที่จะนำมาศึกษา

การเลือกองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คลอเรลล่า วูลกาวิส* จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ในสภาวะต่างๆดังนี้

1. แสง จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายสายพันธุ์ *คลอเรลล่า วูลกาวิส* สามารถเจริญเติบโตได้ในแสงทุกความยาวคลื่น แต่จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อให้แสงที่มีความยาวคลื่น 620-660 นาโนเมตร ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 1600-2000 PPF ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-2}$ ) [35] การศึกษานี้จึงเลือกใช้แสงไฟจากหลอด LED สีแดงที่มีความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปกติทั่วไปแผงไฟ LED จะมีการส่องสว่างด้านเดียว และกระจายแสงแค่ 120 องศาเท่านั้น จึงนำแผงของหลอดไฟ LED มาดัดแปลง โดยใช้ LED สามชุดประกอบกันเพื่อให้การกระจายของแสงครบ 360 องศา ตามรูปที่ 3.3 ครอบด้วยหลอดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ภายในท่อกลางบริเวณศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



360 °

รูปที่ 3.3 การประกอบแผงหลอด LED เพื่อให้ได้การกระจายแสง 360 องศา

2. อัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ อากาศถูกอัดความดันด้วยปั๊มอากาศขนาดเล็กและเก็บในถังอัดความดันปริมาตร 24 ลิตร ก่อนถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศจะถูกกรองด้วยแผ่นกรองอากาศขนาด 0.2 ไมครอนและถูกปรับอัตราการไหลให้เหมาะสมด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ซึ่งปริมาตรที่ป้อนนี้ได้กำหนดอัตราการไหลของอากาศเข้าเท่ากับ 5 7.5 และ 10 ลิตรต่อ นาที

### 3.2 การเตรียมสารอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนอกจากแสงและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตแล้ว สาหร่ายยังจำเป็นต้องมีอาหารที่ใช้สำหรับการเติบโต ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด ซึ่งปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร ตามสูตรของภาควิชาภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วูลกาวิส (Chlorella Vulgaris)* แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร

ลำดับ	ชื่อสาร	สูตร	น้ำหนักที่ใช้/ลิตร (กรัม)
1	โพแทสเซียมไนเตรท	$\text{KNO}_3$	1.25
2	โมโนโพแทสเซียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	1.25
3	แมกนีเซียมซัลเฟต 7-ไฮเดรต	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1
4	แคลเซียมคลอไรด์	$\text{CaCl}_2$	0.084
5	กรดบอริก	$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.114
6	เฟอร์รัสซัลเฟต 7-ไฮเดรต	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร

ลำดับ	ชื่อสาร	สูตร	น้ำหนักที่ใช้/ลิตร (กรัม)
7	ซิงค์ซัลเฟต 7-ไฮเดรต	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0.088
8	แมงกานีสคลอไรด์ 4-ไฮเดรต	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	0.014
9	โมลิบดีนัมออกไซด์	$MoO_3$	0.007
10	คอปเปอร์ซัลเฟต 5-ไฮเดรต	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.016
11	โคบอลท์ไนเตรท 6-ไฮเดรต	$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	0.005
12	กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตราอะซิติก (EDTA)	$C_{10}N_2Na_2O_8$	0.5

### 3.3 การทำความสะอาด เครื่องปฏิกรณ์และวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการขยายพันธุ์สาหร่าย

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายจำเป็นต้องมีการดูแลการปนเปื้อนของแบคทีเรียเป็นพิเศษ เพราะแบคทีเรียส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยง โดยทั่วไปการกำจัดแบคทีเรียใช้วิธีการอบด้วยอุณหภูมิสูงอย่างน้อย 105 องศา ประมาณ 1-2 ชั่วโมง แต่สามารถใช้วิธีการอบฆ่าเชื้อได้เฉพาะการเพาะเลี้ยงที่ใช้ภาชนะขนาดเล็กคือขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ที่ใช้สำหรับขยายพันธุ์สาหร่ายก่อนที่นำไปเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์ แต่ด้วยเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่เกินกว่าจะทำการอบด้วยเครื่องอบจึงต้องทำความสะอาดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การทำความสะอาดเครื่องด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรด์

การทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) ในการทดลองใช้น้ำยาซักผ้าขาวยี่ห้อไฮเตอร์ขวดสีฟ้าซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อราและแบคทีเรียและไม่มีส่วนผสมของสารให้ความหอม แช่ทิ้งไว้ 10 นาที ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การล้างทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การทำความสะอาดเครื่องด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อโรค

จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อโรค เลือกใช้น้ำยาฆ่าเชื้อโรคเดททอล ผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่ระบุไว้ข้างขวด ใช้ฟองน้ำชุบเดททอลแล้วขัดทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ ก่อนแช่ทิ้งไว้ฆ่าเชื้อโรคเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นจึงเทออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดที่ปราศจากเชื้อโรค

### 3.3.3 การทำความสะอาดขั้นสุดท้าย

ในขั้นตอนสุดท้ายของการทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ เป็นการแช่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยน้ำสะอาดทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสารเคมีตกค้างในเครื่องปฏิกรณ์ ก่อนจะเทน้ำทิ้งและสามารถนำไปใช้งานในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

## 3.4 การเตรียมหัวเชื้อ

สำหรับพันธุ์สาหร่ายที่ได้รับความอนุเคราะห์มาจากภาควิชาภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีปริมาณไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องทำการขยายพันธุ์เพื่อเพิ่มปริมาณเองก่อนนำไปเพาะเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์มีทั้งหมด 2 ขั้นตอนดังนี้

### 3.4.1 เตรียมเชื้อในขวด 250 มิลลิลิตร

การเตรียมเชื้อสาหร่าย จำเป็นต้องควบคุมการปนเปื้อน ซึ่งควบคุมได้ง่ายในขวดขนาดเล็ก โดยเตรียมเชื้อสาหร่ายปริมาตร 150 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่จำนวน 5 ขวด ดังรูปที่ 3.5 ก่อนนำสาหร่ายและอาหารเลี้ยงสาหร่ายมาผสมกันในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของสาหร่ายที่โตเต็มที่ต่อปริมาตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย ปิดจุกด้วยสำลีพันผ้าก๊อชเพื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแสงเทียมในการช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีขึ้น เขย่าเข้าเย็น ให้สาหร่ายไม่ตกตะกอนลงก้นขวดแก้ว วัดการเจริญเติบโตทุกวัน โดยใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงประมาณ 4-7 วันในขั้นตอนนี้

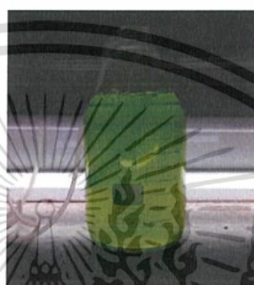


รูปที่ 3.5 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในขวด 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 เตรียมในขวด 2 ลิตร

หลังจากที่ได้เตรียมหัวเชื้อขั้นต้นแล้ว จำเป็นต้องขยายพันธุ์อีกรอบในขวดขนาด 2 ลิตรตามรูปที่ 3.6 โดยใช้อัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกับการเตรียมขั้นแรก จึงใช้หัวเชื้อทั้งหมด 600 มิลลิลิตรจาก 750 มิลลิลิตร (ขวดรูปชมพู่ 5 ขวด ขวดละ 150 มิลลิลิตร) ในส่วนที่เหลือ อีก 150 ลิตร นำกลับไปขยายพันธุ์ในขวดรูปชมพู่เพื่อใช้ในการเลี้ยงครั้งต่อไป การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในขวดขนาด 2 ลิตร จำเป็นต้องป้อนอากาศเพื่อให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่ดี ใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงประมาณ 7-10 วันให้สาหร่ายเติบโตเต็มที่ ก่อนนำไปเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 57 ลิตร



รูปที่ 3.6 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในขวด 2 ลิตร

## 3.5 การวิเคราะห์ผล

หลังจากเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ต้องมีการวัดและตรวจสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างต่อเนื่องและนำผลมาวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งวิธีการวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

### 3.5.1 การวัดค่าการดูดกลืนแสง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สามารถทำได้โดยการวัดความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ (Optical density) ผ่านค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectroscopy โดยที่สาหร่าย *คลอเรลล่า วูลกาวิส* เป็นสาหร่ายสีเขียว สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงแสงสีแดงและน้ำเงิน มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 420-460 นาโนเมตรสำหรับแสงสีแดง และ 630-660 นาโนเมตรในแสงสีน้ำเงินพบว่า ในช่วงความยาวคลื่นที่ 420-460 นาโนเมตรมีค่าดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ 430 นาโนเมตร และในช่วงความยาวคลื่นที่ 630-660 นาโนเมตรมีค่าดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ 640 นาโนเมตร สำหรับการวัดค่าการดูดกลืนแสงจะทำการสุ่มตัวอย่างทุกวัน ทั้งในบริเวณด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตจะทำให้มีค่าดูดกลืนแสงที่เพิ่มมากขึ้นและสามารถนำมาวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายได้

นอกจากนี้ด้วยการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใส่หลอดไฟ LED กลางเครื่องปฏิกรณ์เมื่อสำหรับฉายเจริญเติบโตและมีความหนาแน่นมากขึ้น จะทำให้แสงจากด้านในสามารถส่องสว่างออกมาบริเวณนอกถังเครื่องปฏิกรณ์ได้น้อยลง จึงมีการวัดค่าความเข้มแสงเพื่อตรวจสอบและหาแนวโน้มการลดลงของความเข้มแสงโดยใช้เครื่องวัดความเข้มแสง (Lux meter) เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบในอนาคตที่สามารถปรับแสงไฟให้มีความเหมาะสมและเป็นการประหยัดไฟได้

### 3.5.2 การหาปริมาณออกซิเจนละลายน้ำด้วยวิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน (Azidemodification)

หลักการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำนั้นด้วยวิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน (Azidemodification) คือ ออกซิเจนในน้ำจะทำปฏิกิริยากับแมงกานีส (II) ไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแมงกานีส (II) ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งแมงกานีส (II) ออกไซด์ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอโอดีนอิสระ (Free iodine) ซึ่งปริมาณไอโอดีนอิสระที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ การหาปริมาณออกซิเจนทำได้โดยวิธีการต่อไปนี้

- 1.) เติมแมงกานีสแมงกานีส (II) ซัลเฟตเข้มข้น 2.14 โมลลาร์ จำนวน 1 มิลลิลิตรและอัลคาไลน์-ไอโอดีน-เอไซด์รีเอเจนต์เข้มข้น 12.5 โมลลาร์ จำนวน 1 มิลลิลิตรลงในน้ำตัวอย่างที่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร ปิดฝาอย่างให้มีฟองอากาศ เขย่าให้เข้ากันจะเกิดตะกอนสีขาวของแมงกานีสไดออกไซด์ดังสมการ (3.1)



ตะกอนของแมงกานีสไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำเกิดเป็นแมงกานีส (IV) ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ดังสมการ (3.2)

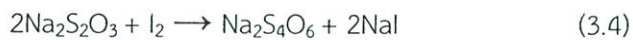


- 2.) ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายให้ตกตะกอนจนได้น้ำใสประมาณครึ่งหนึ่งของขวด เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์จำนวน 1 มิลลิลิตร ปิดจุกผสมให้เข้าจะได้สารละลายใสเป็นไอโอดีนอิสระดังสมการ (3.3)



- 3.) ไทเทรตด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.0021 โมล/ลิตรจนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่งสุก 2-3 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป เพื่อ

หาจุดยุติ ดังสมการ (3.4) และอ่านปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต สามารถ  
คำนวณหาความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำได้ดังตัวอย่างในภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองและอภิปราย

### 4.1 การปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์

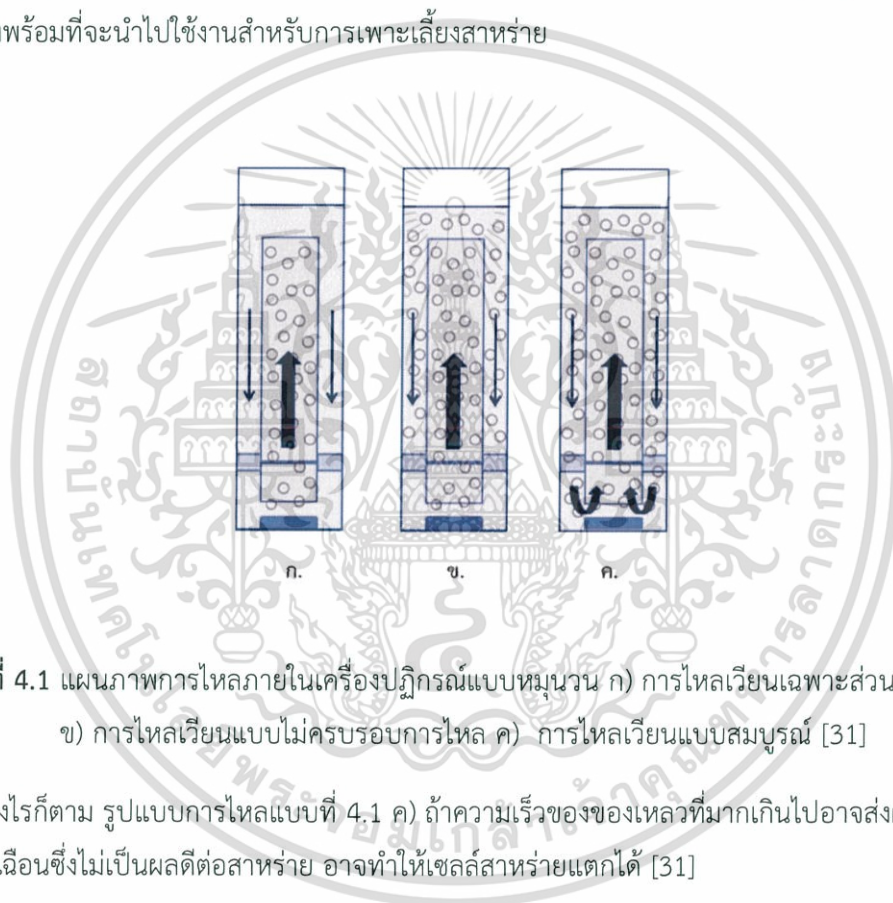
เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์นี้ถูกสร้างและออกแบบโดย นางสาวขวัญชนก บั่นบำรุงสุข และ นางสาวน้ำฝน นิมวงศ์ [33] แต่เครื่องปฏิกรณ์ยังพบข้อบกพร่องจากการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้น้ำ ซึ่งได้มีการแก้ไขดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่พบจากปัญญานิพนธ์เดิม [33] คือ เครื่องปฏิกรณ์เกิดการปนเปื้อนจากแมลง ไซ้ยึดจับอุปกรณ์เกิดสนิม และมีการรั่วไหลของน้ำรวมทั้งอุปกรณ์ภายใน เช่น หลอดไฟ ยังไม่มีการยึดจับที่มั่นคงและไม่มียระบบการให้แก๊สและเครื่องมือวัดที่แม่นยำ

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการปรับปรุงแก้ไขเครื่องปฏิกรณ์

ข้อบกพร่อง	เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงแบบหมุนวน	
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
1. การปนเปื้อนของแมลง	บริเวณช่องระบายแก๊สด้านบนเปิดโล่ง	คลุมด้วยถุงดำบริเวณส่วนบน
2. อุปกรณ์ยึดจับเกิดสนิม	ไซ้เหล็กที่ไซ้ยึดที่กกลางกับเครื่องปฏิกรณ์เกิดสนิม	ใช้น็อตและอุปกรณ์เคลือบสแตนเลสในการยึดที่กกลาง
3. น้ำรั่ว	ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์มีน้ำรั่วซึม	เพิ่มปะเก็นยางเพื่อลดการรั่วของน้ำบริเวณการต่อของหัวทรายกระจายแก๊ส
4. หลอดไฟเอียง	ไม่มีวัสดุยึดหลอดไฟให้ตั้งตรงและมั่นคง	เพิ่มวัสดุจับยึดหลอดไฟ
5. ระบบแก๊ส	ไม่มีระบบแก๊ส	ติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลและระบบแก๊ส

## 4.2 การทดสอบพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์

จากการทดสอบพฤติกรรมการไหลเบื้องต้นด้วยเม็ดยาลิเธียมโพลิโพรพิลีนซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำพบว่าที่อัตราการไหลที่กำหนดคือ 5 ลิตรต่ออนาที (0.087 vvm) ขณะที่แก๊สถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ฟองแก๊สขนาดเล็กจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ในส่วนของโรเตอร์แล้วตกกลับลงมาทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางดาวนคัมเมอร์ ให้ลักษณะการไหลที่สมบูรณ์ (ตามรูป 4.1 ค) ซึ่งฟองแก๊สมีเวลาในการสัมผัสกับของเหลวมากที่สุดทำให้มีการแลกเปลี่ยนมวลสารดีที่สุดเมื่อเทียบกับการไหลรูปแบบอื่นภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเท่ากัน รูปแบบการไหลดังกล่าวจึงเหมาะสมเพื่อให้มีการถ่ายเทมวลสารอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงพร้อมที่จะนำไปใช้งานสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย



รูปที่ 4.1 แผนภาพการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ก) การไหลเวียนเฉพาะส่วนโรเตอร์  
ข) การไหลเวียนแบบไม่ครบรอบการไหล ค) การไหลเวียนแบบสมบูรณ์ [31]

อย่างไรก็ตาม รูปแบบการไหลแบบที่ 4.1 ค) ถ้าความเร็วของของเหลวที่มากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดแรงเฉือนซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสาหร่าย อาจทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้ [31]

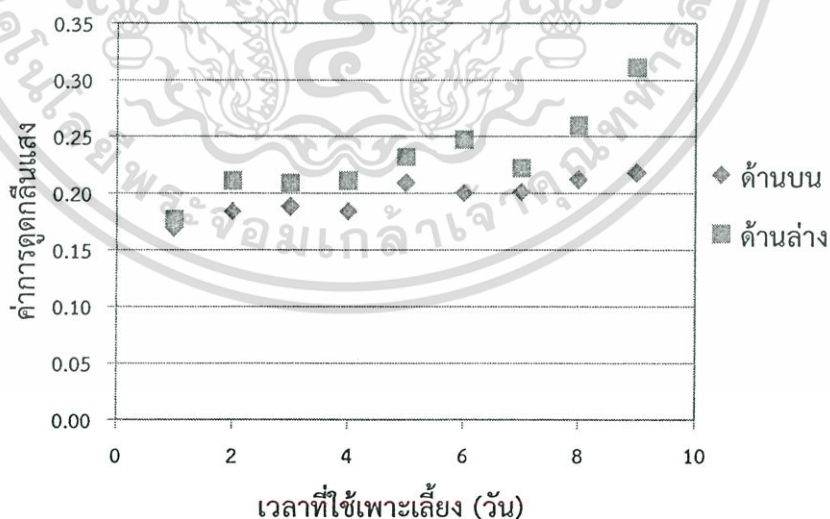
#### 4.2.1 การศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กโดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สเข้าที่ต่างกัน

##### ครั้งที่ 1

ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 57 ลิตรโดยมีการกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงดังตารางที่ 4.2 ใช้เวลาเพาะเลี้ยงรวม 9 วัน

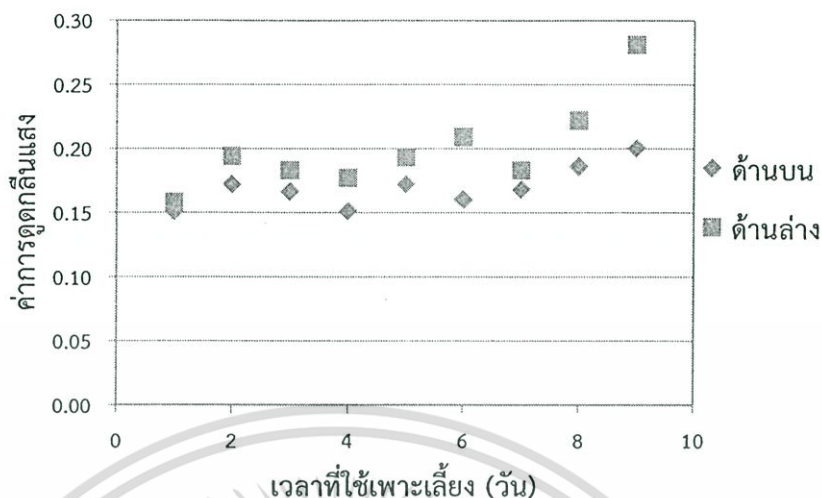
ตารางที่ 4.2 สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *คลอเรลล่า วูลกาวิส* ครั้งที่ 1

ตัวแปร	สภาวะใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	5 ลิตร/นาที (0.087 vvm)
บิ๊มที่ใช้	บิ๊มอากาศขนาดเล็กสำหรับเลี้ยงปลา
น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง	น้ำที่ผ่านระบบออสโมซิสผันกลับ (RO)
ตัวกรองอากาศ	ไม่มี
สารอาหาร	สารเคมีที่มีความบริสุทธิ์สูง (AR grade)
การล้างเครื่อง	แซไฮเตอร์ แช่เดทตอล แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
ระยะเวลาเพาะเลี้ยง	9 วัน
สาเหตุที่หยุดการเพาะเลี้ยง	น้ำรั่ว, อัตราการไหลไม่เสถียร



รูปที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 1 ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 1 ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 1

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในครั้งที่ 1 ได้กำหนดอัตราการไหลของอากาศเข้า 5 ลิตรต่อนาทีซึ่งเท่ากับ 0.087 vvm โดยใช้ปริมาณอากาศขนาดเล็กแต่เนื่องจากการประกอบเครื่องทำโดยการติดกาวที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ไม่หนาแน่นพอทำให้น้ำรั่วออกทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ในขณะที่เพาะเลี้ยง ส่งผลให้เมื่อเลี้ยงไปถึงวันที่ 9 ปริมาณน้ำลดลงจนถึงขอบด้านบนของท่อกลวง น้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงไม่เกิดการไหลวนทำให้ต้องหยุดการเพาะเลี้ยง จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพาะเลี้ยงกับค่าการดูดกลืนแสงซึ่งมีการเก็บตัวอย่างจากด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในวันที่ 2 และมีค่าเกือบคงที่จนถึงวันที่ 6 หมายถึงปริมาณเซลล์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อสังเกตความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงระหว่างตัวอย่างที่เก็บจากทางด้านบนและตัวอย่างที่เก็บจากทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์พบว่าค่าการดูดกลืนแสงทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าค่าการดูดกลืนแสงทางด้านบนเล็กน้อยนั่นคือ เซลล์สาหร่ายทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์หนาแน่นกว่าเซลล์สาหร่ายด้านบนเครื่องปฏิกรณ์ และยิ่งเวลาผ่านไปมากขึ้นความต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งสองจะยิ่งเพิ่มขึ้น จนถึงวันที่ 9 จะมีความแตกต่างมากเนื่องจากเกิดการรั่วไหลของเครื่องปฏิกรณ์ทำให้สาหร่ายเริ่มตกตะกอนเพราะมีการไหลเวียนที่ไม่สมบูรณ์

จากรูป 4.4 ค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนนั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 2 ของการเพาะเลี้ยง จากนั้นมีค่าคงที่จนถึงวันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยงเนื่องจากความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ ค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์มีค่าต่ำและไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากบริเวณที่วัดความเข้มแสงนั้นระดับต่ำเกินไปสามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนบริเวณวัดความเข้มแสง

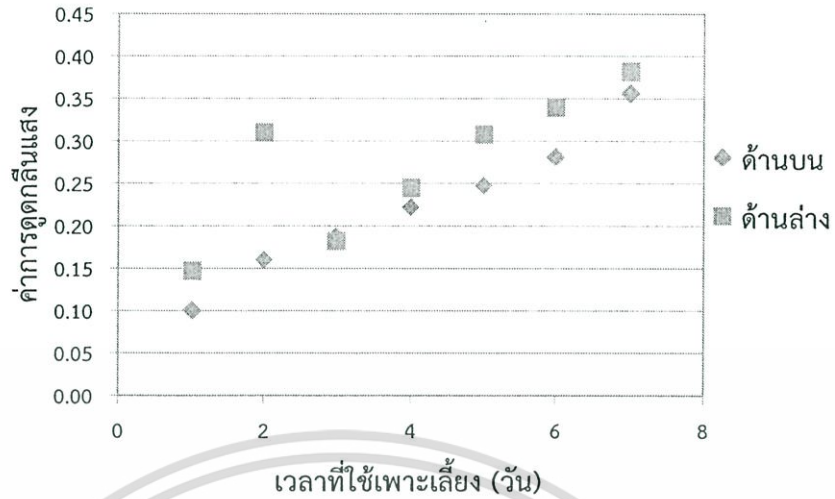
## ครั้งที่ 2

ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 57 ลิตรโดยมีการกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงดังตารางที่ 4.3 ใช้เวลาเพาะเลี้ยงรวม 7 วัน

ตารางที่ 4.3 สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *คลอโรลลล่า วูลการิส* ครั้งที่ 2

ตัวแปร	สภาวะใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	5 ลิตร/นาที่ (0.09 vvm)
ปั๊มที่ใช้	ปั๊มอากาศขนาด 24 ลิตร 580 วัตต์
น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง	น้ำที่ผ่านระบบออสโมซิสผันกลับ (RO)
ตัวกรองอากาศ	ไม่มี
สารอาหาร	สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Commercial grade)
การล้างเครื่อง	แซไฮเตอร์ แช่เดททอล แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
ระยะเวลาการเพาะเลี้ยง	7 วัน
สาเหตุที่หยุดการเพาะเลี้ยง	สาหร่ายตาย วันที่ 8 ของการเพาะเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

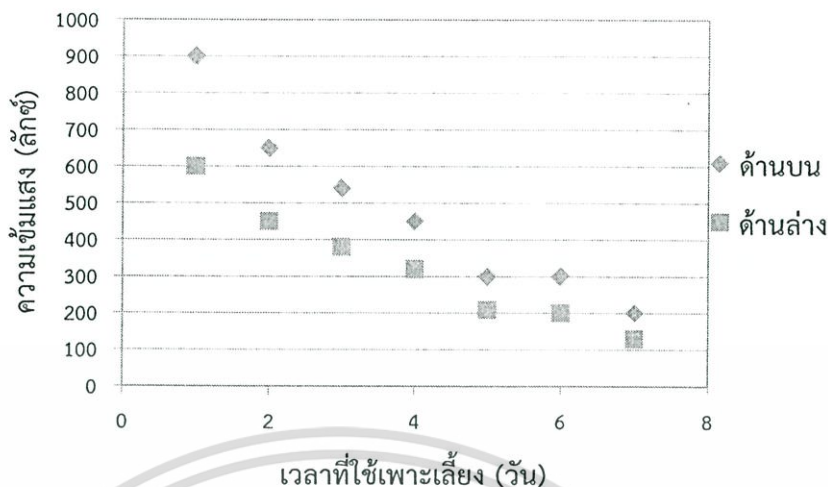


รูปที่ 4.5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สำหรับใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 2 ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร



รูปที่ 4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สำหรับใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 2 ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 2

การเพาะเลี้ยงในครั้งที่ 2 ได้ทำการแก้ไขการรั่วซึมของเครื่องปฏิกรณ์และเปลี่ยนจากป้อนอากาศขนาดเล็กที่ใช้เลี้ยงปลาเป็นป้อนอากาศขนาดกลางที่มีความจุของถังอากาศ 24 ลิตร 580 วัตต์ โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในครั้งที่ 2 นั้นกำหนดให้มีสภาวะการเพาะเลี้ยงเช่นเดียวกับการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 1 พบว่าที่สภาวะเดียวกัน หากเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเสถียรมากกว่าสาหร่ายจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อสังเกตค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ถูกเก็บจากทางด้านล่างและด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าระบบที่ไม่เสถียร (การเพาะเลี้ยงครั้งที่ 1) เป็นการบ่งชี้ว่าระบบมีการไหลเวียนแบบสมบูรณ์

ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทางด้านล่างในวันที่ 2 ของการเพาะเลี้ยงนั้นมีค่าสูงกว่าปกติ อาจเกิดจากตัวอย่างที่เก็บมีตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากเซลล์สาหร่ายเกาะกลุ่มกันหรือเกิดการรบกวนกันของเซลล์สาหร่ายบริเวณบอลลวลท์ที่ใช้เก็บตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างที่เก็บได้เข้มข้นกว่าความเป็นจริง

หลังจากการปรับบริเวณการวัดค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างให้สูงขึ้น ทำให้ได้ค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ดังรูป 4.7 พบว่าค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงเริ่มต้นค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนและด้านล่างมีค่าต่างกันมากและมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเซลล์สาหร่ายมีเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายทั้งหมดภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเริ่มต้นเพาะเลี้ยง แรงระหว่างอนุภาคมีน้อยสาหร่ายจึงตกลงสู่ด้านล่างได้ง่าย แต่เมื่อเวลาผ่านไปสาหร่ายมีการเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้น ความหนาแน่นของเซลล์

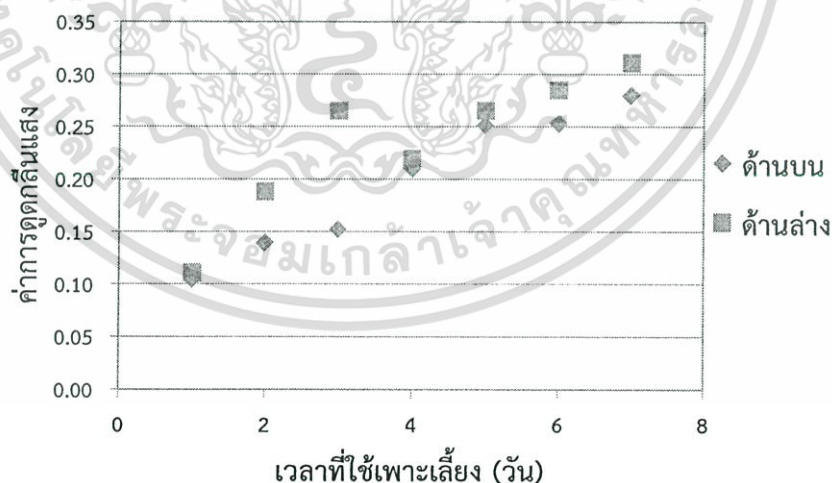
สาหร่ายทางด้านบนจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์

### ครั้งที่ 3

ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 57 ลิตรโดยมีการกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงดังตารางที่ 4.4 ใช้เวลาเพาะเลี้ยงรวม 7 วัน

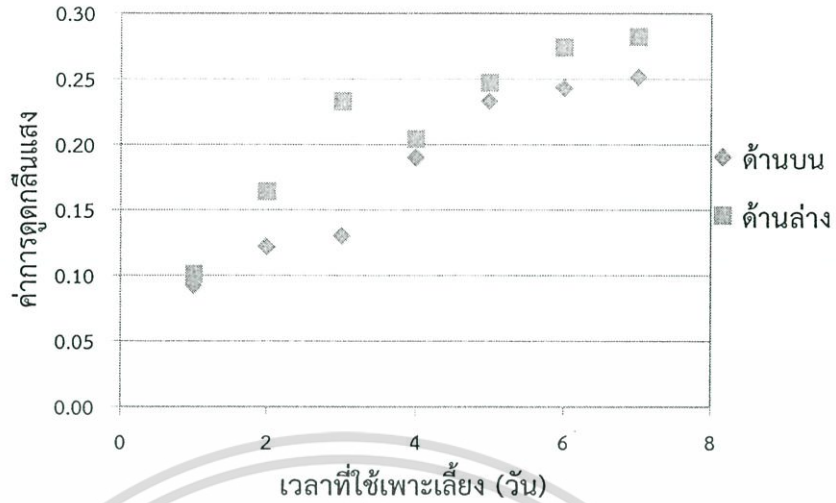
ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *คลอเรลล่า วูลกาวิส* ครั้งที่ 3

ตัวแปร	สภาวะที่ใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	10 ลิตร/นาที่ (0.175 vvm)
ป้อนที่ใช้	ป้อนอากาศ
น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง	น้ำที่ผ่านระบบบออสโมซิสผันกลับ (RO)
ตัวกรองอากาศ	ไม่มี
สารเคมี	สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Commercial Grade)
การล้างเครื่อง	แช่ไฮเตอร์ แช่เดทตอล แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
ระยะเวลาการเพาะเลี้ยง	8 วัน
สาเหตุที่เลิกเลี้ยง	สาหร่ายตาย วันที่ 8



รูปที่ 4.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 3 ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 3 ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 3

เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าเป็น 10 ลิตรต่อนาทีหรือเท่ากับ 0.75 vvm พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยงที่เพิ่มขึ้น และความต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ถูกเก็บจากตำแหน่งที่ต่างกันนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าการเพาะเลี้ยงที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาทีดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 แต่ยังมีค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในวันที่ 3 ที่สูงกว่าค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในวันที่ 4 ซึ่งอาจเกิดจากการเกิดฟองอากาศในตัวอย่างหรือในสารเทียบเมื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงหรือการเกาะกลุ่มกันของเซลล์สาหร่าย แต่อย่างไรก็ตามค่าการดูดกลืนแสงยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

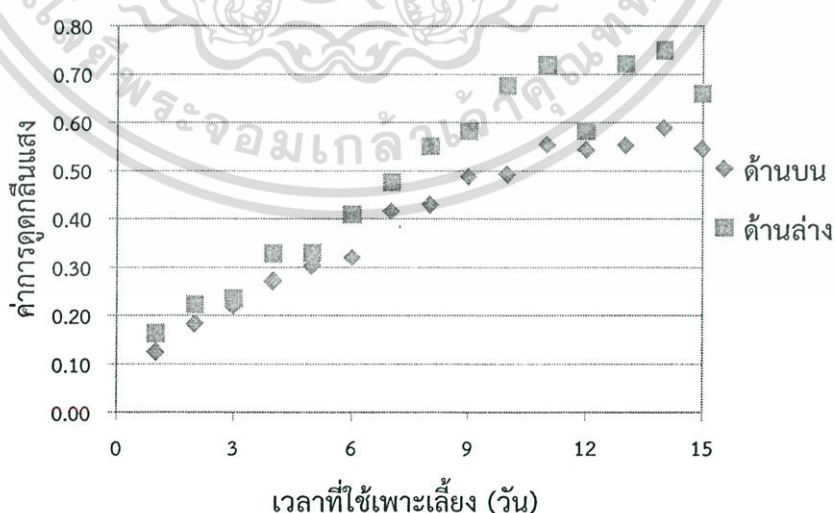
จากรูปที่ 4.10 พบว่าค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเริ่มต้นน้อยกว่าการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 1 อาจเป็นผลมาจากความผิดปกติของอุปกรณ์แปลงกำลังและแรงดันไฟฟ้า อีกทั้งยังมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่สองของการเพาะเลี้ยง จากนั้นลดลงอย่างคงที่และมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป หมายถึงความหนาแน่นของเซลล์ภายในบริเวณต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อปริมาณเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้น

#### ครั้งที่ 4

ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 57 ลิตรโดยมีการกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงดังตารางที่ 4.5 ใช้เวลาเพาะเลี้ยงรวม 15 วัน

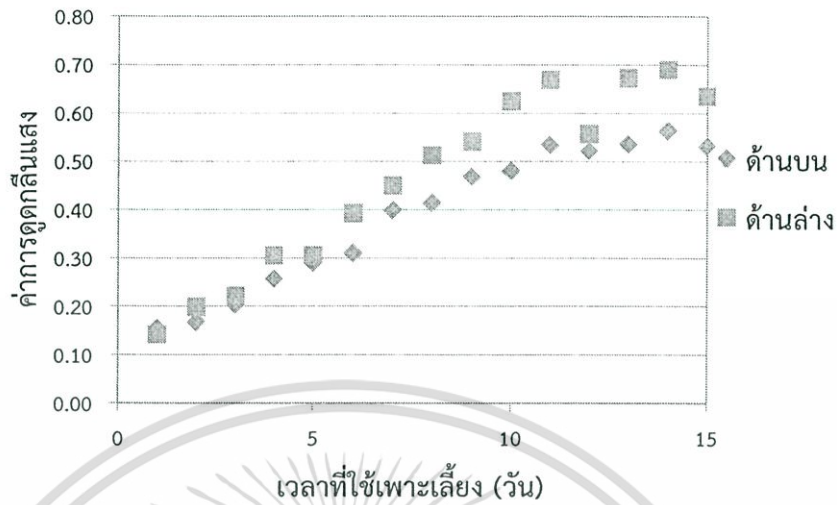
ตารางที่ 4.5 สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *คลอเรลล่า วุลกาวิส* ครั้งที่ 4

ตัวแปร	สภาวะที่ใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	7.5 ลิตร/นาที่ (0.131 vvm)
ปั๊มที่ใช้	ปั๊มอากาศขนาด 24 ลิตร 580 วัตต์
น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง	น้ำดื่ม
ตัวกรองอากาศ	มี
สารอาหาร	สารเคมีที่มีความบริสุทธิ์สูง (AR grade)
การล้างเครื่อง	แช่ไฮเตอร์ 3 ครั้ง แช่เตทตอล 1 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
ระยะเวลาการเพาะเลี้ยง	15 วัน
สาเหตุที่หยุดการเพาะเลี้ยง	ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าคงที่



รูปที่ 4.11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 4 ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สำหรับในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 4 ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะเลี้ยงครั้งที่ 4

การทดลองที่ครั้งที่ 4 กำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สขาเข้าเป็น 7.5 ลิตรต่อนาทีหรือเท่ากับ 0.131 vvm นอกจากนั้นยังได้มีการเปลี่ยนน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจากเดิมที่เคยใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (RO) เป็นน้ำที่ใช้ดื่มซึ่งได้ผ่านกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (RO) และการฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) นอกจากนั้นยังมีการเพิ่มแผ่นกรองอากาศก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทำให้สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้นานขึ้นจนถึงช่วงที่อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีค่าเท่ากับ 0 คือค่าการดูดกลืนแสงมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งในช่วงแรกสาหร่าย

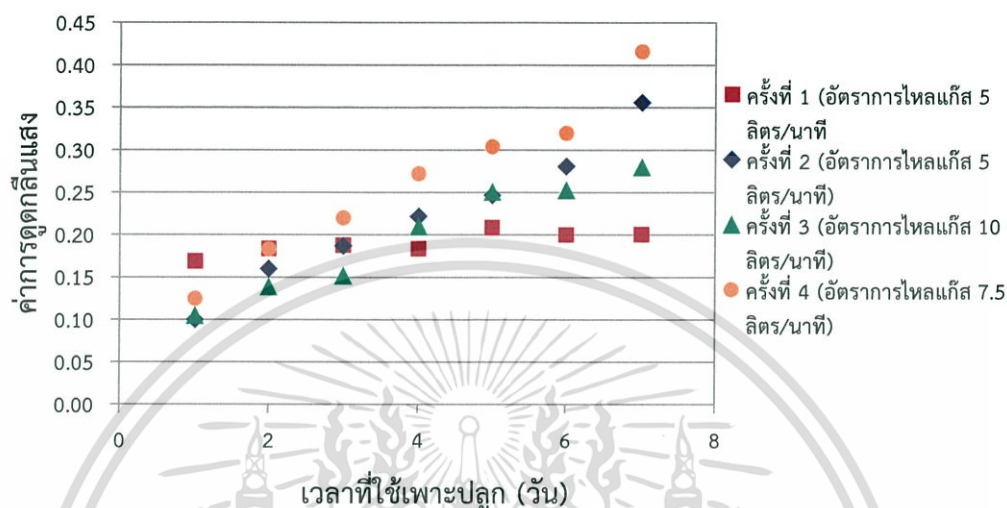
มีการเจริญเติบโตที่วัดได้จากค่าการดูดกลืนแสงอย่างรวดเร็วจนถึงวันที่ 11 ของการเพาะเลี้ยงและมีค่าการเจริญเติบโตค่อนข้างคงที่หลังจากนั้น ดังนั้นการเก็บเกี่ยวผลผลิตควรทำในช่วงวันที่ 10 ถึง 12 ของการเพาะเลี้ยงเพื่อลดการใช้พลังงานในการเพาะเลี้ยงและได้ปริมาณของเซลล์สาหร่ายมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและอัตราการไหลของแก๊สขาเข้า

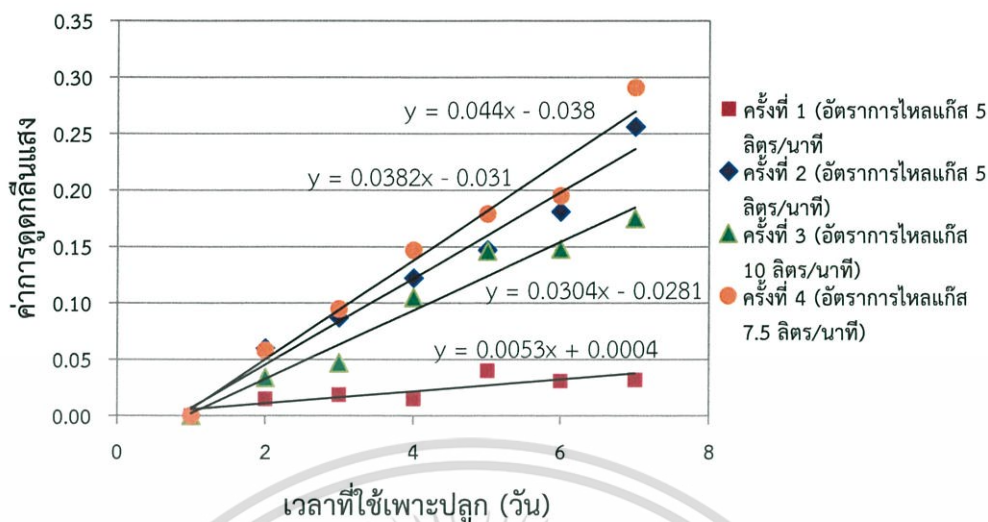
จากการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงโดยการเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คลอโรเซลลา วูลการิส* 4 ครั้ง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแสดงดัง รูปที่ 4.14



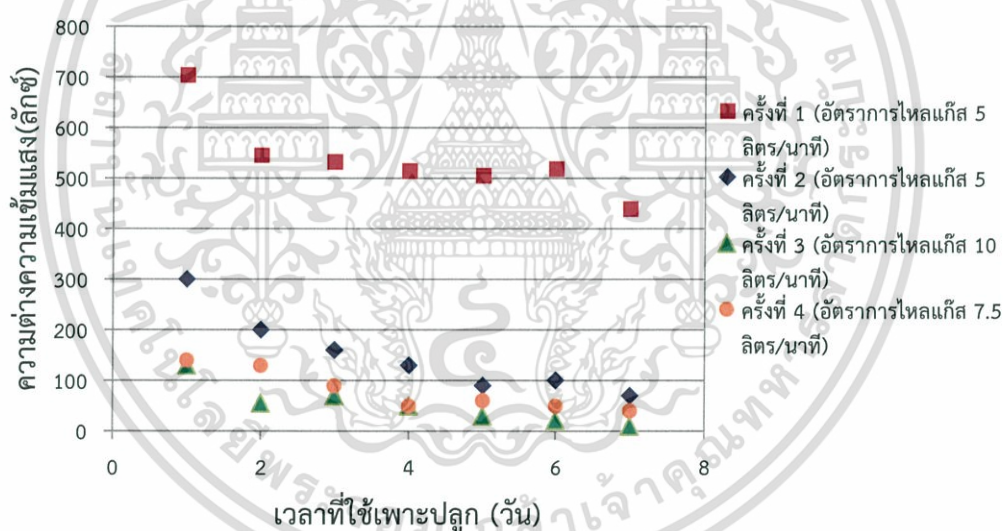
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้ง

จากรูปที่ 4.14 พบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในครั้งที่ 1 ที่มีอัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 5 ลิตรต่อนาทีมีความหนาแน่นเริ่มต้นของเซลล์สาหร่ายมากที่สุดแต่มีการเพิ่มขึ้นของเซลล์สาหร่ายน้อย เนื่องจากมีสภาวะการเพาะเลี้ยงที่ไม่สม่ำเสมอ ปริมาณของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงอย่างต่อเนื่องทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ไม่ดีและทำให้ผลกระทดลองคลาดเคลื่อน เมื่อทดลองในสภาวะเดิมซ้ำอีกครั้งหลังจากการแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าแม้ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นน้อยกว่าในครั้งที่ 1 แต่สาหร่ายก็มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทำให้สารอาหารและเซลล์สาหร่ายมีค่าการดูดกลืนแสงในวันที่ 7 เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์สาหร่ายภายในการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้งไม่เท่ากันจึงปรับให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากันดังรูปที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะการเพาะเลี้ยงที่มีสภาวะการทดลองคงที่พบว่า การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในครั้งที่ 2 ครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4 นั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสงต่อวันใกล้เคียงกัน คือ 0.0304 0.0382 และ 0.044 ต่อวันตามลำดับ กล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในอากาศมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่น้อยมาก การเพาะเลี้ยงสาหร่ายครั้งที่ 4 สาหร่ายมีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดเนื่องจากการเจริญเติบโตไม่ถูกรบกวนโดยสิ่งปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้ง โดยเปรียบเทียบข้อมูลที่มีจุดเริ่มต้นเท่ากัน



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่าความต่างเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เมื่อทำการเพาะเลี้ยงแต่ละครั้ง

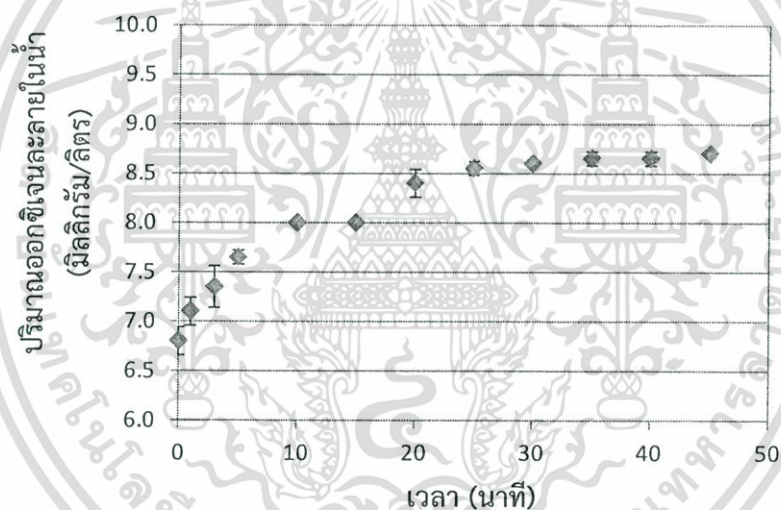
การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศเข้าจะมีผลในเรื่องการกระจายตัวของสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์สังเกตได้จากค่าความต่างความเข้มแสงภายนอกทางด้านบนและด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.16 ซึ่งการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแต่ละครั้งจำเป็นต้องควบคุมสภาวะการเพาะเลี้ยงให้คงที่อยู่เสมอหากสภาวะในการเพาะเลี้ยงมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นสาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ เช่นการทดลองในครั้งที่ 1 และปัจจัยสำคัญของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายคือความสะอาดของน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง การทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ก่อนการเพาะเลี้ยงเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นซึ่งมีผลทำให้สาหร่ายตายได้

#### 4.2.3 ผลการทดลองการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์

การหาค่าการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยตรงนั้นค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจึงทำการหาค่าการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำผ่านการหาค่าการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนในน้ำซึ่งจำเป็นต้องวัดปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำโดยวิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน (Azidemodification) ดังหัวข้อที่ 3.5.2 จากการทดลองหาปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาต่างกัน โดยมีการวัดค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำค่าเฉลี่ยมาพล็อตกราฟ ใส่ค่าความคลาดเคลื่อน (Error bar) จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในน้ำ

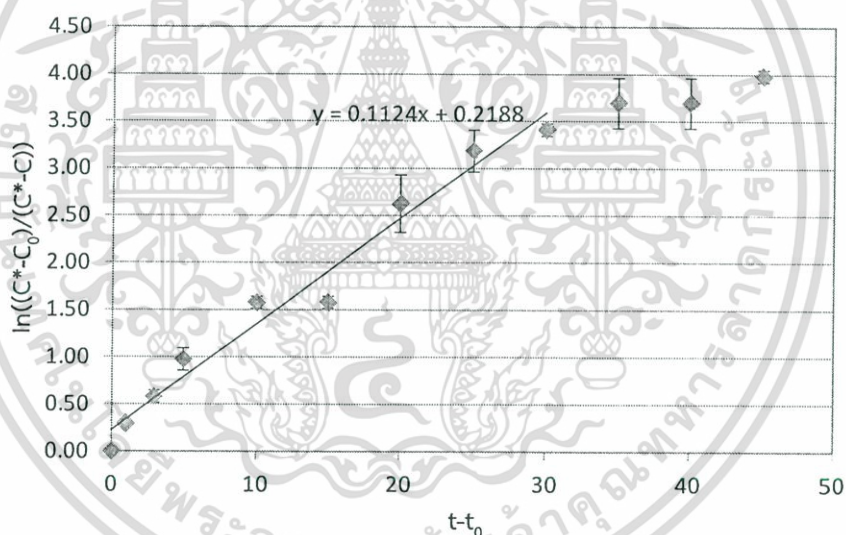
จากสมการ

$$\ln\left(\frac{C^* - C_0}{C^* - C}\right) = k_L a_L (t - t_0) \quad (2.2)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $t - t_0$  และ  $\ln((C^* - C_0)/(C^* - C))$  ดังรูปที่ 4.18 จะได้ความชันของกราฟที่มีค่าเท่ากับ  $k_L a_L (O_2)$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1124 จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.3

$$k_L a_L (CO_2) = \sqrt{\frac{D_{O_2}}{D_{CO_2}}} k_L a_L (O_2) \quad (2.3)$$

รากที่สองของอัตราส่วนการแพร่ของออกซิเจนในน้ำต่อการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์  $\left(\sqrt{\frac{D_{O_2}}{D_{CO_2}}}\right)$  นี้มีค่าเท่ากับ 0.9 [23] ดังนั้น  $k_L a_L (CO_2)$  มีค่าเท่ากับ 0.1022



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $t - t_0$  และ  $\ln((C^* - C_0)/(C^* - C))$

อัตราการไหลที่ทำการทดสอบคือ 7.5 ลิตรต่อนาที คิดเป็นความเร็วของของเหลวเบื้องต้นได้จากพื้นที่หน้าตัดของหัวกระจายแก๊ส กำหนดให้พื้นที่รูพรุนเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด จะได้ว่าความเร็วแก๊สเท่ากับ 0.019 เมตรต่อนาทีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลโดยปริมาตรของออกซิเจนเท่ากับ 0.1124 ต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองของ C.O. Vandu [36] ที่ความเร็วของแก๊สเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลโดยปริมาตรของออกซิเจนประมาณ 0.04 ต่อวินาที เนื่องจากความเร็วแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้มาจากการประมาณค่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลโดยปริมาตรของออกซิเจนจึงมีค่ามากกว่าการทดลองของ C.O. Vandu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง ปัญหาที่พบในการดำเนินงานและการแก้ไข

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงเพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำการปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของสายพันธุ์สาหร่ายที่นำมาเพาะเลี้ยง คือ ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง สารอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการออกแบบอ้างอิงจากหลักการของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนโดยมีความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 100 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร ความสูงของท่อกลวง 70 เซนติเมตร อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนคัมเมอร์ต่อโรเตอร์ ( $A_d/A_r$ ) เท่ากับ 3 ระยะห่างระหว่างท่อกลวงกับกันถึง 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างท่อกลวงกับระดับของเหลว 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกระจายแก๊ส 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลอดไฟ 3 เซนติเมตร ความสูงท่อหลอดไฟ 80 เซนติเมตร สำหรับกรณีศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลเรลล่า วูลการิส* นั้น สภาวะที่ใช้คือแสงที่มีความยาวคลื่น 620-630 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสงจากหลอด LED เท่ากับ 2,000 ลักซ์ ป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างด้วยอัตราการไหล 5 7.5 และ 10 ลิตรต่อนาที ผลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 430 และ 640 นาโนเมตร พบว่าเซลล์สาหร่ายผสมสารอาหารในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลแก๊สส่งผลต่อการกระจายตัวของสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์สังเกตได้จากความต่างความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนและด้านล่าง พบว่าความต่างความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนและด้านล่างมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลแก๊สเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.75 ลิตรต่อนาทีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ 0.1022 ต่อวินาที

### 5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงานและการแก้ไข

5.2.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายแต่ละครั้งต้องใช้เวลามากกว่า 10 วัน ทำให้สิ้นเปลืองหากใช้อากาศและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังอัดความดันซึ่งมีราคาแพง มีแนวทางการแก้ไขปัญหาโดยใช้อากาศจากปั๊มอากาศ

5.2.2 จากการศึกษาและคำนวณจากทฤษฎีพบว่าสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อัตราการไหลแก๊สประมาณ 22 ลิตรต่อนาที (0.38 wvm) ซึ่งเมื่อทำการทดลองจริงพบว่าอัตราการไหล 22 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อนาทีนั้นสูงเกินไปของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลวนอย่างรวดเร็วอาจทำให้เซลล์สาหร่ายเสียหาย ดังนั้นจึงทำการปรับลดอัตราการไหลลงเหลือ 5 ลิตรต่อนาทีคิดเป็น 0.087 vvm

5.2.3 เกิดการตายของสาหร่าย โดยการตายของเซลล์สาหร่ายเกิดจาก 2 ปัจจัยคือ ปัจจัยทางกายภาพและปัจจัยทางชีวภาพ

5.2.3.1 ปัจจัยทางกายภาพ เนื่องจากเซลล์สาหร่ายต้องเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการไหลของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ หากของเหลวมีความเร็วในการไหลที่มากเกินไปอาจเกิดแรงกระทำต่อเซลล์สาหร่ายทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้ ซึ่งการตรวจสอบสภาพเซลล์นั้นสามารถทำได้โดยการนำเซลล์สาหร่ายไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ อย่างไรก็ตามเซลล์สาหร่ายที่ยังไม่แตกสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ ป้องกันได้ด้วยการปรับความเร็วของของแก๊สเข้าให้เหมาะสม

5.2.3.2 ปัจจัยทางชีวภาพ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถจำแนกได้เป็นสองวิธีคือ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายสายพันธุ์เดียวแบบปลอดเชื้อและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหลากหลายสายพันธุ์พร้อมกัน แต่ทั้งสองวิธีอาจเกิดการเจือปนของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นได้เช่นกันซึ่งสิ่งมีชีวิตดังกล่าวสามารถส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของสาหร่ายหรืออาจก่อให้เกิดโรคและทำให้สาหร่ายตายทั้งหมดได้ สิ่งมีชีวิตที่ลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีดังนี้ [37]

1. วัชพืช คือพืชชนิดอื่นที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะเดียวกับสาหร่ายที่ต้องการศึกษาเรียกพืชดังกล่าวว่า วัชพืช ซึ่งจะไม่ทำลายเซลล์สาหร่ายแต่จะใช้สารอาหารที่จำเป็นต่อสาหร่ายในการเจริญเติบโต ทำให้สารอาหารภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่เพียงพอสำหรับการเติบโตของสาหร่าย
2. ผู้บริโภคร คือ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเซลล์เดียวหรือหลายเซลล์ที่กินพืช สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นจะกินสาหร่ายเป็นอาหารและขยายพันธุ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้ปริมาณเซลล์สาหร่ายลดลง
3. พาหะนำโรค เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัสและโปรโตซัว ซึ่งสิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะนำโรคมายังผู้อาศัย จะทำให้สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงตายลงทั้งหมด

จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพบว่าลักษณะของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์และเซลล์สาหร่ายมีการเปลี่ยนแปลงไปในการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 คือ บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์เกิดฟองจำนวนมากติดปกตบบนผิวของเหลว สีของสาหร่ายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล จากการนำตัวอย่างของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบสิ่งมีชีวิตทรงกลมที่เคลื่อนไหวได้ ลำตัวใสภายในมีสีเขียว สันนิษฐานว่าเป็นโปรโตซัว เนื่องจากโปรโตซัวเป็นได้ทั้งผู้บริโภครและพาหะนำโรค ซึ่งการเพิ่มของโปรโตซัวนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ตายลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเจือปนของโปรโตซัวในเครื่องปฏิกรณ์อาจเกิดจากโปรโตซัวที่มากับอากาศ น้ำ หัวเชื้อสาหร่ายและโปรโตซัวที่ตกค้างอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ น้ำที่ปราศจากเชื้อโรคหรือน้ำต้ม มีการตรวจสอบน้ำก่อนนำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่าย ใส่กรองอากาศ ใช้หัวเชื้อที่ปราศจากเชื้อโรคการขยายหัวเชื้อแต่ละครั้งต้องสะอาดปราศจากเชื้อโรคและต้องล้างเครื่องปฏิกรณ์ให้สะอาด หากมีการเจือปนของโปรโตซัวแล้วควรล้างเครื่องปฏิกรณ์หลายๆครั้งด้วย สารละลายโซเดียม-

ไฮโปคลอไรต์หรือคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค แบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งการทดลองที่ 4 สามารถแก้ไขปัญห  
การปนเปื้อนของโปรโตซัวได้สำเร็จ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

การใช้พลังงานในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถลดลงได้ด้วยการใช้พลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานทางเลือกและสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์จากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมดังนี้

#### แสง

สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้รับแสงจากหลอด LED ที่ติดตั้งบริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์ การใช้หลอด LED จะใช้พลังงานน้อยกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์และการให้แสงสว่างจากภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นการลดจำนวนหลอดไฟเพราะการให้แสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์จำเป็นต้องใช้หลอดไฟมากกว่าเพื่อให้ได้ปริมาณแสงที่เท่ากัน

แหล่งพลังงานปัจจุบัน : ไฟฟ้า

แหล่งพลังงานทางเลือก : พลังงานลม

พลังงานแสงอาทิตย์ เปียโซ (Piezolectric)



#### สารอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมากที่สุด สารอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายต้องเหมาะสมกับสายพันธุ์ของสาหร่าย

สารอาหารปัจจุบัน : สารเคมี

สารอาหารทางเลือก : น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม



#### แก๊ส

แก๊สที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดการหมักในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีควรปรับแก๊สขาเข้าให้มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อสายพันธุ์ของสาหร่าย

แก๊สที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ : อากาศ

แก๊สทางเลือก : แก๊ส CO<sub>2</sub> เสียจากโรงงานอุตสาหกรรม



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae beats bioethanol," *Trends Biotechnol.*, vol. 26, no. 3, pp. 126–131, Mar. 2008.
- [2] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C. Q. Lan, and N. Dubois-Calero, "Biofuels from microalgae," *Biotechnol. Prog.*, vol. 24, no. 4, pp. 815–820, Aug. 2008.
- [3] P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Commercial applications of microalgae," *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 101, no. 2, pp. 87–96, Feb. 2006.
- [4] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 217–232, Jan. 2010.
- [5] M. R. Brown, M. Mular, I. Miller, C. Farmer, and C. Trener, "The vitamin content of microalgae used in aquaculture," *J. Appl. Phycol.*, vol. 11, no. 3, pp. 247–255, Jun. 1999.
- [6] C.-Y. Chen, K.-L. Yeh, R. Aisyah, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 71–81, Jan. 2011.
- [7] A. Salis, M. Nicolò, S. Guglielmino, and V. Solinas, "Biodiesel from Microalgae," in *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, K. N. Timmis, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 2827–2839.
- [8] L. E. Erickson, "Airlift bioreactors, by M.Y. Chisti. First edition, 1989, 345 pages. Elsevier applied science, London, England and New York, USA \$74.00 (U.S.)," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 349–349, Apr. 1990.
- [9] Demirbas, A. and Demirbas, M. F. (2011) "Importance of algae oil as a source of biodiesel" *Energy Conversion and Management*. 52 P 163–170.
- [10] L. Gouveia, *Microalgae as a Feedstock for Biofuels*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [11] "Open system," <http://news.thomasnet.com/> . [Online]. Available: <http://news.thomasnet.com/imt/2013/02/19/biofuel-from-algae-part-one-the-pros-and-cons-of-pond-scum>. [Accessed: 5-April-2015].
- [12] "Tubular reactor," <http://www.variconacqua.com/> . [Online]. Available: <http://www.variconacqua.com/>. [Accessed: 5-April-2015].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] “Flat plate reactor,” <http://asulightworks.com/> . [Online]. Available: <http://asulightworks.com/blog/azcati-update-plastic-film-vs-acrylic-photobioreactors/>. [Accessed: 5-April-2015].
- [14] “Stir tank reactor,” <http://www.answers.com/> . [Online]. Available: <http://www.answers.com/topic/bioreactor-1/>. [Accessed: 5-April-2015].
- [15] “Bubble column reactor,” <http://www.uct.ac.za/> . [Online]. Available: <http://www.uct.ac.za/dailynews/archives/?id=8815>. [Accessed: 5-April-2015].
- [16] “Airlift reactor,” <http://www.diachrom-biotech.com/> . [Online]. Available: <http://www.diachrom-biotech.com/products/photo-airlift.html>. [Accessed: 5-April-2015].
- [17] C. U. Ugwu, H. Aoyagi, and H. Uchiyama, “Photobioreactors for mass cultivation of algae,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4021–4028, Jul. 2008.
- [18] A. Massart, A. Mirisola, D. Lupant, D. Thomas, and A.-L. Hantson, “Experimental characterization and numerical simulation of the hydrodynamics in an airlift photobioreactor for microalgae cultures,” *Algal Res.*
- [19] M. Hernández, G. Quijano, R. Muñoz, and S. Bordel, “Modeling of VOC mass transfer in two-liquid phase stirred tank, biotrickling filter and airlift reactors,” *Chem. Eng. J.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 961–969, Aug. 2011.
- [20] S. Yadala and S. Cremaschi, “Design and optimization of artificial cultivation units for algae production,” *Energy*, Jun. 2014.
- [21] M. H. Abdel-Aziz, I. Nirdosh, and G. H. Sedahmed, “Liquid–solid mass and heat transfer behavior of a concentric tube airlift reactor,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 58, no. 1–2, pp. 735–739, Mar. 2013.
- [22] K. Kaewpintong, A. Shotipruk, S. Powtongsook, and P. Pavasant, “Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 2, pp. 288–295, Jan. 2007.
- [23] K. Kumar and D. Das, “Growth characteristics of *Chlorella sorokiniana* in airlift and bubble column photobioreactors,” *Bioresour. Technol.*, vol. 116, pp. 307–313, Jul. 2012.
- [24] S. Monkonsit, S. Powtongsook, and P. Pavasant, “Comparison between Airlift Photobioreactor and Bubble Column for *Skeletonema Costatum* Cultivation,” *Eng. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 53–64, Mar. 2011.

- [25] S. Krichnavaruk, W. Loataweesup, S. Powtongsook, and P. Pavasant, "Optimal growth conditions and the cultivation of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactor," *Chem. Eng. J.*, vol. 105, no. 3, pp. 91–98, Jan. 2005.
- [26] K. Kumar, D. Banerjee, and D. Das, "Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by *Chlorella sorokiniana*," *Bioresour. Technol.*, vol. 152, pp. 225–233, Jan. 2014.
- [27] B. K. Nayak, S. Roy, and D. Das, "Biohydrogen production from algal biomass (*Anabaena* sp. PCC 7120) cultivated in airlift photobioreactor," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, no. 14, pp. 7553–7560, May 2014.
- [28] X. Yuan, A. Kumar, A. K. Sahu, and S. J. Ergas, "Impact of ammonia concentration on *Spirulina platensis* growth in an airlift photobioreactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 3234–3239, Feb. 2011.
- [29] S. Oncel and F. V. Sukan, "Comparison of two different pneumatically mixed column photobioreactors for the cultivation of *Arthrospira platensis* (*Spirulina platensis*)," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 4755–4760, Jul. 2008.
- [30] A. Sánchez Mirón, F. García Camacho, A. Contreras Gómez, E. M. Grima, and Y. Chisti, "Bubble-column and airlift photobioreactors for algal culture," *AIChE J.*, vol. 46, no. 9, pp. 1872–1887, Sep. 2000.
- [31] E. Kadic and T. J. Heindel, *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*, 1 edition. Wiley, 2014
- [32] P. WEILAND, "Influence of Draft Tube Diameter on Operation Behavior of Airlift Loop Reactors," *Ger Chem Eng*, vol. 7, pp. 374–385, 1984.
- [33] ขวัญชนกขึ้นบำรุง และน้ำพนนิมวงศ์. "เครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์แสงแบบลูกผสมสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [34] Available online at [http://dunDean.com/tips\\_what\\_is\\_latex\\_paint.shtml](http://dunDean.com/tips_what_is_latex_paint.shtml)
- [35] C. Yan, X. Luo, and Z. Zheng, "Effects of various LED light qualities and light intensity supply
- [36] C. O. Vandu and R. Krishna, "Influence of scale on the volumetric mass transfer coefficients in bubble columns," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 43, no. 4, pp. 575–579, Apr. 2004.

- [37] V. H. Smith and T. Crews, "Applying ecological principles of crop cultivation in large-scale algal biomass production," *Algal Res.*, vol. 4, pp. 23–34, Apr. 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ก.1 ค่าไฟที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายจากหลายส่วน เช่น ค่าสารเคมีที่ใช้เพาะเลี้ยง ค่าน้ำ และค่าสารเคมีที่ใช้ฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น แต่ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากค่าไฟฟ้าของหลอดไฟที่ใช้เป็นแสงเทียม และปั๊มเป่าอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนวนของน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งค่าไฟฟ้าที่ใช้ มีรายละเอียดดังข้างล่างนี้

ตาราง ก.1 แสดงค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 14 วัน

ชื่อเครื่องใช้ไฟฟ้า	กำลัง (วัตต์)	เวลาการใช้ งาน (ชั่วโมง)	หน่วยใช้งาน (หน่วย/วัน)	ค่าไฟ (บาท/วัน)	ค่าไฟในการ เลี้ยง 14 วัน (บาท)
แสงเทียม (LED)	34.56	16.00	0.55	0.38	5.34
ปั๊มลมใหญ่	580.00	10	5.80	4.00	56.03
ค่าไฟราคารวม					61.47

หมายเหตุ : ค่าไฟฟ้า 1 หน่วย ราคา 0.69 บาท

### ก.2 การเปลี่ยน ลิตรต่อนาที เป็น vvm

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 57 ลิตร

อัตราการไหลแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที = 5 ลิตรแก๊สต่อนาที/57 ลิตรของเหลว  
= 0.087 vvm (ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่อนาที)

## ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำด้วยวิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน

- 4.) แมงกานีส (II) ซัลเฟตและอัลคาไลน์-ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เจือจางลงในน้ำตัวอย่างซึ่งจะเกิดตะกอนสีขาวของแมงกานีสไดออกไซด์ดังสมการ (1)



- 5.) ตะกอนของแมงกานีสไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำเกิดเป็นแมงกานีส (IV) ออกไซด์ตรอกไซด์ดังสมการ (2)



- 6.) เติมกรดซัลฟิวริกจะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนซัลเฟต ดังสมการ (3)



- 7.) ไทเทรตด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟตเพื่อหาจุดยุติ ดังสมการ (4)



สามารถใช้ปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟตหาปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์แมงกานีส (II) ได้ดังนี้

1. จากสมการ (4)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จำนวน 2 โมล, ทำปฏิกิริยากับ  $\text{I}_2$  จำนวน 1 โมล
2. จากสมการ (3)  $\text{I}_2$  จำนวน 1 โมล เกิดจาก  $\text{MnO}(\text{OH})_2$  จำนวน 2 โมล
3. จากสมการ (2)  $\text{MnO}(\text{OH})_2$  จำนวน 1 โมล เกิดจาก  $\text{O}_2$  จำนวน 0.5 โมล

ดังนั้น ถ้าใช้  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จำนวน 2 โมลในการไทเทรต จะเทียบเท่ากับ  $\text{O}_2$  จำนวน 0.5 โมล ถ้าใช้  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จำนวน 1 โมลในการไทเทรต จะเทียบเท่ากับ  $\text{O}_2$  จำนวน 0.25 โมลหรือ 800 มิลลิกรัมถ้าใช้  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ความเข้มข้น 1 โมลาร์ 1 มิลลิตร = 8 มิลลิกรัม  $\text{O}_2$

## ภาคผนวก ค

### การเปลี่ยนแปลงจากการสังเกตภายนอกของเครื่องปฏิกรณ์

การเจริญเติบโตของสาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถสังเกตเบื้องต้นได้จากสีของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ ข.1 ซึ่งแสดงถึงความเข้มของสีเขียวภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากการสังเกตพบว่าวันที่ 1 ของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายของเหลวจะมีสีเขียวอ่อนโปร่งแสง จากนั้นสีเขียวจะเข้มขึ้นจนถึงวันที่ 14 ของการเพาะเลี้ยงของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีสีเขียวเข้มทึบแสง



ก.

ข.

ค.

ง.

รูปที่ ค.1 สีของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ ก.) วันที่ 1 ของการเพาะเลี้ยง ข.) วันที่ 3 ของการเพาะเลี้ยง ค.) วันที่ 9 ของการเพาะเลี้ยง ง.) วันที่ 14 ของการเพาะเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้