การศึกษากระบวนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

THE STUDY OF MICROALGAE CULTIVATION FOR BIOFUEL OIL PRODUCTION

ฐิติพงศ์ คงเจริญ

ณัฐวัชร์ จันทรสถาพร

ธนกฤต เรืองสุนทร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษากระบวนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

THE STUDY OF MICROALGAE CULTIVATION FOR BIOFUEL OIL PRODUCTION

ฐิติพงศ์ คงเจริญ

ณัฐวัชร์ จันทรสถาพร

ธนกฤต เรืองสุนทร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF MICROALGAE CULTIVATION FOR BIOFUEL OIL PRODUCTION

Titipong Kongjarean

Nattawat Chantarasataporn

Thanakrit Ruangsunthorn

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษากระบวนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

THE STUDY OF MICROALGAE CULTIVATION FOR BIOFUEL OIL PRODUCTION

นักศึกษาผู้จัดทำ นายฐิติพงศ์ คงเจริญ รหัสนักศึกษา 53010410

นายณัฐวัชร์ จันทรสถาพร รหัสนักศึกษา 53010507

นายธนกฤต เรืองสุนทร รหัสนักศึกษา 53010616

ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
อาจารย์ภัทรชัย วิชัยยะ	ภัทรชัย วิชัยยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษากระบวนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายฐิติพงศ์	คงเจริญ	53010410
	นายณัฐวัชร์	จันทรสถาพร	53010507
	นายธนกฤต	เรืองสุนทร	53010616
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ภัทรชัย วิชัยยะ		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งสามารถเป็นพลังงานทางเลือกในการนำมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งกำลังจะหมดไป เป็นพลังงานที่ยั่งยืน สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง จุลสาหร่ายมีกรดไขมันประมาณ 20% ต่อน้ำหนักแห้ง บางชนิดอาจมีถึง 60-70% งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบและจัดสร้างเครื่องเพาะเลี้ยงสาหร่ายระบบปิดแบบ Bioreactor โดยใช้จุลสาหร่ายสายพันธุ์ Chlorella vulgaris เป็นวัตถุดิบ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตได้แก่ อัตราการไหลในท่อ (Flow rate) อัตราการป้อนก๊าซ CO_2 (CO_2Feed rate) การแสดงผลการเติบโตโดยพิจารณาจากการวัดสีด้วยค่า CIELAB ได้มาจากเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometers) ซึ่งแสดงถึงการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย (Growth rate) จากการทดลองที่อัตราการไหล 0.001348 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการป้อน CO_2 มาก (เปิด 1 ชั่วโมง / ปิด 2 ชั่วโมง, 1/2) มีค่า Re No. เท่ากับ 1907.45037 มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนในระบบเพาะเลี้ยง มีแนวโน้มของการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายมากที่สุด

คำหลัก: พลังงานทางเลือก, เชื้อเพลิงฟอสซิล, จุลสาหร่าย, กรดไขมัน, การดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	THE STUDY OF MICROALGAE CULTIVATION FOR BIOFUEL OIL PRODUCTION		
Authors	Mr. Titipong	Kongjarean	53010410
	Mr. Nattawat	Chantarasataporn	53010507
	Mr. Thanakrit	Ruangsunthorn	53010616
Thesis Advisor	Mr. Pattarachai	Vichaiya	
Year	2013		

Abstract

This research studies the process of culturing microalgae to produce biofuels. This can be in bringing alternative energy to replace fossil fuels. Which is leaving A sustainable energy Can be produced continuously microalgae fatty acids about 20 % of dry weight. Some are up to 60-70 % of this research is to study the design and construction of a closed system Bioreactor cultivation of algae species Chlorella vulgaris using algae as a feedstock factors affecting growth include . Flow rates in pipes (Flow rate) flow rate of gas, CO_2 (CO_2 Feed rate) display growth as measured by the CIELAB color derived from the measured absorbance (Spectrophotometers) which represents the growth of microscopic algae (Growth rate) of the experimental flow rate 0.001348 cubic meters per second feed rate much CO_2 (open 1 hour / off, 2 hour, 1/2) is Re No. equals 1907.45037 turbulent flow characteristics in culture. The trend of the growth of the microalgae.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ อาจารย์ ภัทรชัย วิชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือ ตลอดช่วงเวลาในการศึกษา คณะทำงานขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง บุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ทั้งคณาอาจารย์ เพื่อน ทุกคนที่มีส่วนร่วมในการให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การประมง ที่สนับสนุนเรื่องพันธ์สาหร่าย บุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

นาย ฐิติพงศ์ คงเจริญ

นาย ณัฐวัชร์ จันทรสถาพร

นาย ธนกฤต เรืองสุนทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญภาพ IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 วิธีการดำเนินงาน 3

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 4

2.1 สาหร่าย 4

2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสาหร่าย 4

2.1.2 สาหร่ายที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ 5

2.1.3 การใช้ประโยชน์จากสาหร่าย 9

2.1.4 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย 11

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย 14

2.2 ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล 15

2.2.1 การไหลภายในท่อ 15

2.2.2 การสูญเสียจากการไหลในท่อ 16

2.2.3 ประเภทของการไหล 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน 19

3.1 การเตรียมวัสดุ 19

3.1.1 การดำเนินการขอจุลสาหร่าย 19

3.1.2 การดำเนินการขออาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 19

3.2 การออกแบบ และสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 21

3.2.1 การออกแบบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 21

3.2.2 การสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 24

3.3 การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 32

3.3.1 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำในระบบ 32

3.3.2 ทดสอบและวัดอุณหภูมิน้ำภายในระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 33

3.3.3 การทดสอบระบบการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 33

3.4 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 34

3.4.1 การเติมน้ำเข้าระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 34

3.4.2 การเตรียมปรับอัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ 34

3.4.3 การเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 34

3.5 การเก็บผลการทดลอง 36

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างจุลสาหร่าย 36

3.5.2 การวัดค่าสีโดยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 39

4.1 การทดสอบหาอัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ 39

4.1.1 จุดประสงค์การทดสอบ 39

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 47

5.1 สรุปผลการทดลอง 47

5.2 ข้อเสนอแนะ 47

ภาคผนวก ก เรย์โนลด์นัมเบอร์ 49

ภาคผนวก ข ตารางค่าสี CIELAB 54

ภาคผนวก ค กราฟค่าสี CIELAB 60

เอกสารอ้างอิง 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก 6

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตชีวมวล ปริมาณน้ำมันสะสม
และพลังงานเชื้อเพลิงระหว่างพืชน้ำมันชนิดต่างๆ และสาหร่ายขนาดเล็ก 8

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบผลผลิตน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ
และพื้นที่ที่ต้องใช้ในการเพาะปลูก 8

ตารางที่ 4.1 ค่า θ ที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อน
คาร์บอนไดออกไซด์มาก 40

ตารางที่ 4.2 ค่า θ ที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อน
คาร์บอนไดออกไซด์น้อย 41

ตารางที่ 4.3 ค่า θ ที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อน
คาร์บอนไดออกไซด์มาก 42

ตารางที่ 4.4 ค่า θ ที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อน
คาร์บอนไดออกไซด์น้อย 43

ตารางที่ 4.5 ค่า θ ที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อน
คาร์บอนไดออกไซด์มาก 44

ตารางที่ 4.6 ค่า θ ที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อน
คาร์บอนไดออกไซด์น้อย 45

ตารางที่ ก.1 ตาราง แสดงค่าอัตราการไหล,เส้นผ่านศูนย์กลางนอก,เส้นผ่านศูนย์
กลางใน,พื้นที่หน้าตัด,ความเร็วของน้ำในท่อ,ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 51

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงค่าอัตราการไหลเฉลี่ย 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้าที่

ตารางที่ ข.1 ตารางการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 54

ตารางที่ ข.2 ตารางการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 55

ตารางที่ ข.3 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 56

ตารางที่ ข.4 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 57

ตารางที่ ข.5 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 58

ตารางที่ ข.6 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 เซลล์สาหร่าย Chlorella sp. 5

รูปที่ 2.2 เซลล์สาหร่ายจากกล้องจุลทรรศน์ 7

รูปที่ 2.3 แสดงการเพาะเลี้ยงสาหร่ายระบบเปิด 12

รูปที่ 2.4 รูปแสดงการเพาะเลี้ยงสาหร่ายระบบปิด 13

รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลง velocity profile 15

รูปที่ 2.6 การต่อท่อแบบอนุกรม 17

รูปที่ 2.7 การต่อแบบขนาน 18

รูปที่ 3.1 ถังพักระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 21

รูปที่ 3.2 ระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 22

รูปที่ 3.3 โครงระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 23

รูปที่ 3.4 ปั๊มน้ำ 24

รูปที่ 3.5 หัวทรายสำหรับป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ 25

รูปที่ 3.6 ท่ออะคลิลิกใส 26

รูปที่ 3.7 ท่อพีวีซี 26

รูปที่ 3.8 ข้อต่อพีวีซีแบบต่างๆ 26

รูปที่ 3.9 วาล์วพีวีซี 27

รูปที่ 3.10 ทางเดินน้ำหลักขาเข้า 27

รูปที่ 3.11 ทางเดินน้ำหลักขาออก 28

รูปที่ 3.12 ฐานล่างโครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 28

รูปที่ 3.13 ฐานบนโครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 29

รูปที่ 3.14 โครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 29

รูปที่ 3.15 ถังพักอากาศและสายออกซิเจน 30

รูปที่ 3.16 โซนินอยวาล์ว 31

รูปที่ 3.17 ระบบการให้คาร์บอนไดออกไซด์ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 3.18 การเก็บค่าอัตราการไหลทั้ง 3 ค่า คือ Q_{max} , Q_{mid} และ Q_{min} ตามลำดับ 32

รูปที่ 3.19 เทอโมมิเตอร์ใช้วัดค่าอุณหภูมิน้ำในระบบเพาะเลี้ยง 33

รูปที่ 3.20 การวัดค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถังพักอากาศ 34

รูปที่ 3.21 การเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย 35

รูปที่ 3.22 ขวดเก็บตัวอย่างจุลสาหร่าย 36

รูปที่ 3.23 เครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ 37

รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่าสีจากเครื่อง 38

รูปที่ 4.1 กราฟค่า θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 40

รูปที่ 4.2 กราฟค่า θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 41

รูปที่ 4.3 กราฟค่า θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 42

รูปที่ 4.4 กราฟค่า θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 43

รูปที่ 4.5 กราฟค่า θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 44

รูปที่ 4.6 กราฟค่า θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 45

รูปที่ ค.1 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 60

รูปที่ ค.2 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ ค.3 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 61

รูปที่ ค.4 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 61

รูปที่ ค.5 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก 62

รูปที่ ค.6 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย 62

รูปที่ ค.7 กราฟเปรียบเทียบค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 ,0.001045 และ0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก-น้อย 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นพืชชั้นต่ำชนิดหนึ่ง มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะเซลล์หรือสารอาหารที่ได้จากสาหร่ายสามารถนามาใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน เช่น เป็นอาหารและยา ใช้ในด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม และเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน เป็นต้น Chisti (2007) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการนำกรดไขมันที่สกัดได้จากสาหร่ายขนาดเล็กมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลแทนน้ำมันที่สกัดจากพืช เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กแม้ว่าจะมีกลไกการสังเคราะห์แสงเช่นเดียวกับพืชชั้นสูงก็ตามแต่มีโครงสร้างเซลล์และความต้องการปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและสารอาหารต่างๆที่ไม่ซับซ้อน (Benemann และ Oswald, 1996) รายงานว่าสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้เร็วและผลิตกรดไขมันได้ในปริมาณสูง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหรือกรดไขมันที่ได้จากพืชอื่น เช่น ข้าวโพด ถั่วเหลือง ปาล์ม และมะพร้าว นอกจากนั้นยังใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยกว่าพืชอื่นเมื่อเทียบระหว่างผลที่ได้น้ำมันต่อพื้นที่การเพาะปลูก อย่างไรก็ตามการผลิตกรดไขมันของสาหร่ายยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ สายพันธุ์ สภาวะในการเพาะเลี้ยงที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย (Chisti, 2007) ดังรายงานวิจัยของ Kojima และ Zhang (1999) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตกับการผลิตสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของสาหร่ายขนาดเล็ก Botryococ cusbraunii และปริมาณแสงที่มีอิทธิพลต่อการผลิตสารประกอบไฮโดรคาร์บอน Cohen และคณะ (1988) ได้ศึกษาถึงผลของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อองค์ประกอบของกรดไขมันในสาหร่ายน้ำเค็ม Porphyridium cruentum พบว่า กรดไขมันและองค์ประกอบของกรดไขมันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการเจริญเติบโต อาทิ ความเข้มแสง อุณหภูมิ pH และความเค็ม โดยการปรับให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียสและมีความเข้มแสงไม่จากัด จึงเห็นได้ว่าปัจจัยสภาพแวดล้อมทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีมีความสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาสภาพที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อผลิตชีวมวลและกรดไขมันของเซลล์สาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผลที่สาหร่ายไดรับความสนใจเพื่อนำมาทำเป็นพลังงาน มีหลายประการด้วยกัน สาหร่ายมีเซลล์ที่มีกรดไขมันค่อนข้างสูงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่บางชนิด อาจมีถึง 60-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นและอีกประการ คือ สาหร่ายขนาดเล็กสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย ใช้สารอาหารที่ไม่ซับซ้อนมาก สามารถเก็บเกี่ยวได้ใน 1-2 อาทิตย์ และยังใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเพาะปลูกพืชน้ำมันชนิดอื่นโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการแย่งพื้นที่เพาะปลูกพืชอาหารอีกด้วยแต่ในปัจจุบันการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายยังมีต้นทุนสูงเนื่องจากอยู่ในขั้นตอนการวิจัยแต่เชื่อว่าหากสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ราคาจะถูกลง หลายประเทศที่ได้ให้ความสนใจในการทำการวิจัยเรื่องการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายเพื่อเป็นพลังงานทดแทนมากขึ้น

จุลสาหร่ายเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่มนุษย์พยายามจะนำมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด เพราะจุลสาหร่ายให้ประโยชน์ทั้งทางด้านการนำมาเป็นพลังงานและอาหาร เนื่องด้วยจุลสาหร่าย บางชนิดมีปริมาณสารอาหารที่สำคัญมากกว่าเมื่อเทียบกับแหล่งอาหารชนิดอื่นเมื่อเทียบต่อน้ำหนัก สารสำคัญสามารถนำไปทำประโยชน์ในการเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอาง ปุ๋ยชีวภาพและในอุตสาหกรรมยา ปัจจุบันมีการผลิตจุลสาหร่ายสายพันธุ์ Chlorella vulgaris เพื่อใช้ในการผลิตไขมัน เนื่องจากสาหร่ายสายพันธุ์นี้สามารถเลี้ยงดูได้ไม่ยาก มีส่วนในการกักเก็บน้ำมันได้มาก จึงได้รับความสนใจในการนำจุลสาหร่ายชนิดนี้มาสกัดน้ำมันเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย ได้แก่ อัตราการไหล, ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเพิ่มลงในระบบเพาะเลี้ยง

1.2.2 เพื่อออกแบบระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อขยายการปริมาณในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดเท่านั้น

1.2.2 ศึกษาปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย คือ อัตราการไหล และปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ เท่านั้น

1.4 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยในโครงงานนี้เริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งก็มีเรื่องหลัก ๆ อยู่ 3 เรื่องด้วยกัน คือ ข้อมูลเบื้องต้นของจุลสาหร่าย วิธีการเพาะเลี้ยงพันธ์จุลสาหร่าย และทฤษฎีเรื่องกลศาสตร์ของไหล ซึ่งมีรายละเอียดดังในบทที่ 2 จากนั้นก็จะนำเอาความรู้ที่ได้ศึกษาทั้งหมดมาออกแบบและสร้างระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันเชื่อเพลิงชีวภาพดังในบทที่ 3 จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาค่า อัตราการไหล และ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไปดังบทที่ 4 จากนั้นจึงนำผลการทดลองมาสังเคราะห์เพื่อสรุปผลการทดลองดังบทที่ 5

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบบระบบปิดเพื่อใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

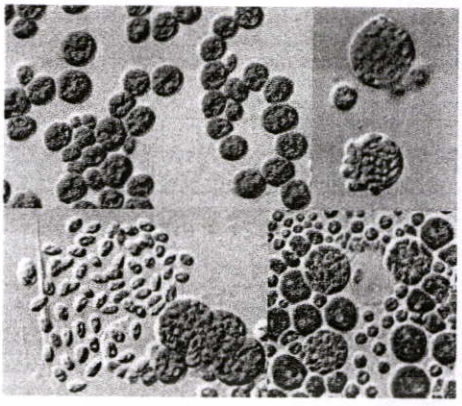
2.1 สาหร่าย

2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสาหร่าย

สาหร่ายเป็นพืชชั้นต่ำที่ไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้นและใบที่แท้จริง โดยจะมีขนาดตั้งแต่เล็กมาก มีตั้งแต่ขนาดเซลล์เดียว ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก อาจเป็นเส้นสายหรือมีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง การแบ่งพวกสาหร่ายจะแบ่งตามรูปร่างลักษณะภายนอกหรือดูตามสี จึงมีสาหร่ายสีเขียว เขียวแกมน้ำเงิน น้ำตาล และสีแดง สาหร่ายสามารถสืบพันธุ์ได้โดยอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ สาหร่ายส่วนใหญ่เจริญเติบโตในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายสำหรับมนุษย์ พบว่ามีคาร์โบไฮเดรตที่เป็นพวกที่ย่อยยากและมีโปรตีนมีน้อย

สาหร่ายสีเขียว (Green algae) เป็นสิ่งมีชีวิตในไฟลัมคลอโรไฟตา มีทั้งที่อยู่ในน้ำจืดและน้ำเค็ม สาหร่ายสีเขียวนี้มีโคโรพลาสต์ที่มีคลอโรฟิลล์เอและบีเป็นส่วนประกอบหลัก มีแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์เป็นส่วนประกอบรองจึงเห็นสีเขียวเด่นชัด พบได้ตามบึง คูน้ำ บ่อน้ำ บางชนิดให้โปรตีนสูงสามารถสกัดมาใช้ประโยชน์ประกอบอาหารได้ ตัวอย่างของสาหร่ายสีเขียวน้ำจืด ที่พบทั่วไปได้แก่ สาหร่ายสีเขียวเซลล์เดียวขนาดเล็ก เช่น Chlorella sp. สาหร่ายสีเขียวเซลล์รวมกันเป็นกลุ่ม เช่น Scenedesmus sp., Pedistrum sp., Volvox sp. และ Oesogonium sp. สาหร่ายสีเขียวที่เซลล์ต่อกันเป็นสาย เช่น Spirogyra sp. เป็นต้น สำหรับสาหร่ายสีเขียวที่เป็นสาหร่ายทะเล เช่น สาหร่าย Asetabularia sp. และ Ulva Codium sp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เซลล์สาหร่าย Chlorella sp.

2.1.2 สาหร่ายที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

สาหร่ายโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มได้แก่ สาหร่ายขนาดใหญ่ (Microalgae) และสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) สาเหตุที่สาหร่ายขนาดเล็กได้รับความสนใจในการนำมาผลิตน้ำมันชีวภาพ เนื่องมาจากภายในเซลล์สาหร่ายบางพันธ์ มีการสะสมน้ำมันไว้สูงเกือบร้อยละ 80 ของน้ำหนักแห้ง เช่น สายพันธุ์ Botryococcus braunni (25-75%) สายพันธุ์ Chlorella sp. (28-32%) สายพันธุ์ Naanochloropsis sp. (31-68%) สายพันธุ์ Neochloris oleoabundans (35-54%) และสายพันธุ์ Schizochytrium sp. (50-77%) เป็นต้น สาหร่ายขนาดเล็กส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีเขียว มีลักษณะเซลล์เดียว (unicellular) มักอยู่รวมกันเป็นกลุ่มโคโลนี และสามารถอยู่รวมกันกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นได้

โดยทั่วไปมักจะพบสาหร่ายตามแหล่งน้ำธรรมชาติ และมีคุณสมบัติเด่น ที่ทำให้สาหร่ายแตกต่างจากพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ คือ สามารถสะสมพลังงานภายในเซลล์ในรูปของสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายทำได้ไม่ยาก เมื่อเทียบกับการปลูกพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ เพราะสาหร่ายสามารถเติบโตได้เร็วและสามารถใช้แก๊สของเสียเป็นสารอาหาร เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนี้มีความพิเศษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

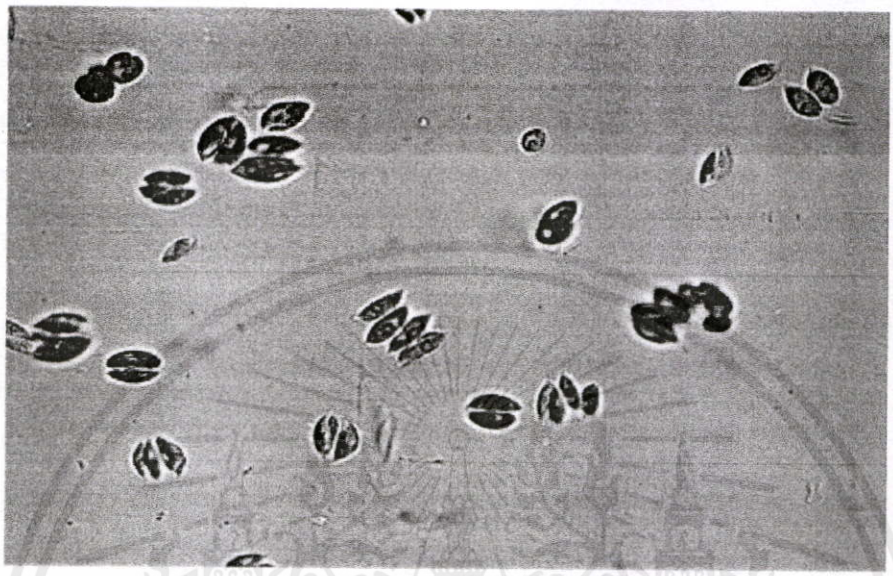
ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

ชนิดสายพันธุ์สาหร่าย	ปริมาณน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)
Botryococcus braunii	25-80
Chlorella sp.	28-32
Chlorella protothecoides	23-30
Chlorells vulgaris	14-40
Crypthecodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16-37
Dunaliella salina	14-20
Neochloris oleoabundans	35-65
Nitzschia sp.	45-47
Phaeodactylum tricornutum	20-30
Schizochytrium sp.	50-77
Spirulina maxima	4-9
Tetraselmis suecia	15-23

สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) เป็นพืชชั้นต่ำเซลล์เดียวมีขนาดเล็ก (ประมาณ 2 ไมโครเมตร) สามารถมองเห็นโครงสร้างของเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ มีคลอโรฟิลล์จึงสามารถสร้างอาหารเองได้ เช่นเดียวกับพืชทั่วไป และพบตามแหล่งน้ำธรรมชาติต่างๆ เช่น แหล่งน้ำจืด น้ำกร่อยและน้ำเค็ม ตลอดจนในบ่อน้ำเสีย เป็นต้น นอกจากนี้สาหร่ายต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง เช่นเดียวกับพืชทั่วไป จึงเป็นแนวทางช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ จากคุณสมบัติดังกล่าว สาหร่ายขนาดเล็กจึงกลายเป็นพืชที่กำลังได้รับความสนใจจากทั่วโลก ในการนำมาค้นคว้าวิจัยเพื่อสร้างสรรค์พลังงานทางเลือกใหม่ที่มีประสิทธิภาพในอนาคต เมื่อเปรียบเทียบการเพาะเลี้ยงในแง่ของพื้นที่และระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพาะปลูกเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ พบว่า สาหร่ายให้น้ำมันได้ในปริมาณสูง ดังนั้นหากสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้จะสามารถลดปัญหาในการแย่งส่วนแบ่งทางอาหารจากพืชน้ำมันได้



รูปที่ 2.2 เซลล์สาหร่ายจากกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตชีวมวล ปริมาณน้ำมันสะสม และพลังงานเชื้อเพลิงระหว่างพืชน้ำมันชนิดต่างๆ และสาหร่ายขนาดเล็ก

ชนิดของพืชน้ำมัน	ชีวมวล (เมตตริกตัน/เฮกตาร์/ปี)	ปริมาณน้ำมัน (% น้ำหนักแห้ง)	ไบโอดีเซล (เมตตริกตัน/เฮกตาร์/ปี)
ถั่วเหลือง	1-2.5	20%	0.2-0.5
เมล็ดเรพ	3	40%	1.2
ปาล์มน้ำมัน	19	20%	3.7
สบู่ดำ	7.5-10	30-50%	2.2-5.3
สาหร่ายขนาดเล็ก	140-255	35-65%	50-100

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบผลผลิตน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ และพื้นที่ที่ต้องใช้ในการเพาะปลูก

แหล่งน้ำมัน	ผลผลิตน้ำมัน (ลิตร/เฮกตาร์)	พื้นที่ที่ต้องการ (ล้านเฮกตาร์)	ร้อยละของพื้นที่การเพาะปลูกในสหรัฐอเมริกา
ข้าวโพด	172	1540	846
ถั่วเหลือง	446	594	326
คาโนลา	1190	223	122
สบู่ดำ	1892	140	77
มะพร้าว	2689	99	54
ปาล์มน้ำมัน	5950	45	24
สาหร่ายขนาดเล็ก	136900	2	1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การใช้ประโยชน์จากสาหร่าย

จากลักษณะและองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์สาหร่ายดังกล่าวไปแล้วนั้น จะพบว่าภายในเซลล์สาหร่ายมีการสะสมสารอาหารในรูปแบบต่างๆ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรตโดยเฉพาะในรูปของแป้ง หรือแม้กระทั่ง ไขมัน ซึ่งอยู่ในรูปของของไตรกลีเซอร์ไรด์ (Triacylglycerides, TAGs) ซึ่งพบว่าสาหร่ายมีการสะสมไขมันไว้ภายในเซลล์ในปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสายพันธุ์ต่างๆ จากองค์ประกอบดังกล่าวจะเป็นส่วนสำคัญในการจำแนกหรือการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆจากเซลล์สาหร่ายอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ตั้งแต่การนำมาใช้เพื่อผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ยา ตลอดจนเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมดังต่อไปนี้

(1) ประโยชน์ต่อระบบนิเวศน์

สาหร่ายดำรงชีวิตแบบออโตโทรฟิค (Autotrophic organism) เป็นสิ่งมีชีวิตที่ผลิตออกซิเจนให้แก่สิ่งแวดล้อมอย่างมาก ประมาณว่า 50 % ของออกซิเจนในน้ำเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยสาหร่าย นอกจากนี้สาหร่ายยังเป็นผู้ผลิต (Producer) และเป็นส่วนหนึ่งของห่วงโซ่อาหารขั้นต้นของสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยเป็นอาหารของตัวอ่อนแมลง กุ้ง หรือปลา เป็นต้น ซึ่งเห็นได้ว่าสิ่งมีชีวิตในท้องทะเล แม่น้ำ ลำคลอง และทะเลสาบทั่วไป จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณจุลสาหร่ายที่อยู่ในแหล่งน้ำนั้นๆ

(2) ประโยชน์ด้านการเกษตร

สาหร่ายสามารถนำมาใช้ในด้านการเกษตรได้หลายด้านด้วยกัน ที่เห็นได้อย่างชัดเจนก็คือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลายชนิดช่วยเพิ่มไนโตรเจนให้กับข้าวในนา โดยได้มาจากสาหร่ายตามธรรมชาติหรือจากแหน ซึ่งเป็นสาหร่ายอีกประเภทหนึ่ง ดินที่มีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพวก Nostoc ปกคลุมอยู่มากๆ จะพบว่าบริเวณนั้นมีปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนสูง สาหร่ายสีแดงและสาหร่ายสีน้ำตาลที่มีขนาดใหญ่ เป็นกลุ่มสาหร่ายที่มีประมาณโพแทสเซียมสูง สามารถอุ้มน้ำได้ดี ทำให้ดินชุ่มชื่นอยู่เสมอโดยการไถกลบ ในขณะเดียวกันสาหร่ายพวกคลอรัลไลน์ สามารถนำมาบดใช้แทนหินปูนในการลดค่าความเป็นกรดในดินได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ประโยชน์ด้านเภสัชกรรม

ปัจจุบันมีการนำเอาสาหร่ายมาใช้เป็นยาหลายประเภท เช่นสาหร่ายสีแดง Digenia simplex นำมาใช้เป็นยาถ่ายพยาธิ และโรคตาลขโมย สารสกัดจากสาหร่ายสีน้ำตาลที่เรียกว่าโซเดียมลามินาริน ซัลเฟต และ ฟิวคอยดิน นำมาใช้เป็นยาช่วยให้เม็ดเลือดแข็งตัว สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน Spirulina ใช้เป็นอาหารเสริมและยารักษาเบาหวาน สาหร่ายสีเขียว Cladophora และ Microspora หรือที่เรียกว่า สาหร่ายไกมีผลในการบำบัดแผลในกระเพาะอาหาร สารสกัดที่เรียกว่า คลอเรลลิน (Chlorellin) จากสาหร่ายสีเขียว Chlorella มีผลต่อการยับยังแบคทีเรีย สามารถนำมาใช้ทำเป็นยาปฏิชีวนะได้ แต่ยังไม่แพร่หลายมากนักเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง

(4) ใช้เป็นผลิตภัณฑ์อาหาร

สาหร่ายที่นำมาใช้เพื่อการบริโภคนั้น ส่วนใหญ่พบว่าเซลล์จะมีการสะสมหรือผลิตสารต่างๆ เช่น เหล็ก โพแทสเซียม แคลเซียม และ วิตามินบางชนิดสูง เช่น วิตามิน 6 และ บี 12 สาหร่าย Haematococcus pluvialis สามารถสังเคราะห์ เบต้าแคโรทีน และแอสตาแซนทิน ในปริมาณที่สูง สารดังกล่าวเป็นสารในกลุ่มของแคโรทีนอยส์ ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ในขณะเดียวกันสาหร่ายหลายๆ กลุ่มมีการสร้างและสะสมสารอาหารไว้ในรูปของไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น Docosahexaenoic acid (DHA) และ Eicosapentaenoic acid (EPA) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ปัจจุบันมีการนำสาหร่ายหลายชนิดมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย

(5) การจัดการด้านสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันได้มีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง เช่น น้ำเสียจะถูกนำมาผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซเพื่อใช้เป็นพลังงาน ในขณะเดียวกันนั้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะนำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกสู่ชันบรรยากาศได้อีกทางหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) เชื้อเพลิงชีวภาพ

สาหร่ายขนาดเล็กสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานได้หลายแนวทาง เช่น การผลิตไฮโดรเจน เอทานอล และที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันคือ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่าย ซึ่งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสาหร่ายที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงและกรรมวิธีในการเพาะเลี้ยง น้ำมันที่ได้จากสาหร่ายมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไตรกลีเซอไรด์เช่นเดียวกันกับน้ำมันพืชทั่วไป

2.1.4 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายประกอบไปด้วย2ระบบ คือ ระบบเปิด(Open Ponds) และระบบปิด (Closed Photobioreactors)

(1) ระบบเปิด (Open Ponds)

คือ ระบบที่มีการใช้กันมานานแล้ว ไม่ซับซ้อนเป็นระบบที่สาหร่ายขนาดเล็กสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรงสามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภทคือ

- ระบบเปิดแบบร่องน้ำ (raceway ponds)

สามารถสร้างเป็นบ่อเดียวหรือหลายๆบ่อต่อกันได้ โดยการต่อร่องน้ำของแต่ละบ่อเข้าด้วยกัน บ่ออาจสร้างจากคอนกรีตหรือพลาสติกก็ได้ ความลึกของร่องน้ำอยู่ที่ประมาณ 15 ถึง 30 เซนติเมตรและมีใบกวน ในการขับเคลื่อนน้ำหมุนวนน้ำในบางระบบอาจใช้ ปั๊มน้ำหรือปั๊มลมก็ได้ แต่ต้องคำนึงถึงเซลล์ของสาหร่ายที่จะได้รับแสงแดดและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสำคัญและการทำงานของระบบควรมีความเร็วในการไหลของน้ำอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 20 เซนติเมตรต่อวินาที แต่อุปสรรคของระบบเปิดแบบร่องน้ำคือสภาพอากาศและการปนเปื้อนของระบบ

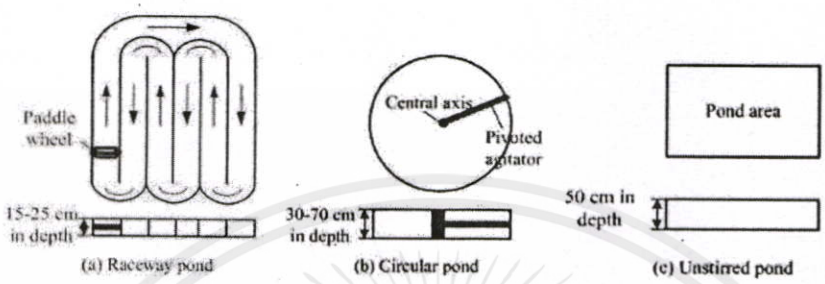
- ระบบเปิดแบบบ่อกลม (circular ponds)

มีลักษณะการออกแบบเหมือนกันกับระบบเปิดแบบร่องน้ำแต่ลักษณะเป็นบ่อเปิดแบบบ่อกลม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางบ่อเท่ากับ 30, 45 และ 75 เมตร ขึ้นอยู่กับความลึกของบ่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบเปิดแบบไม่กวน (unstirred ponds)

เป็นอีกระบบหนึ่งของระบบเปิด เป็นระบบที่ไม่มีการกวนน้ำ มีความประหยัดและใช้เทคโนโลยีน้อยที่สุด



รูปที่ 2.3 แสดงการเพาะเลี้ยงสาหร่ายระบบเปิด

(2) ระบบปิด (Closed Photobioreactors)

เป็นระบบที่สาหร่ายไม่สัมผัสกับบรรยากาศโดยมีวัสดุโปร่งใสหรือท่อใส่คลุม โดยท่อมีรูปแบบลักษณะหลากหลายแบบหลากหลายขนาดวัสดุที่ใช้ทำท่ออาจเป็นพลาสติกหรือแก้ว สามารถแบ่งออกไปได้อีก 2 ประเภทคือ

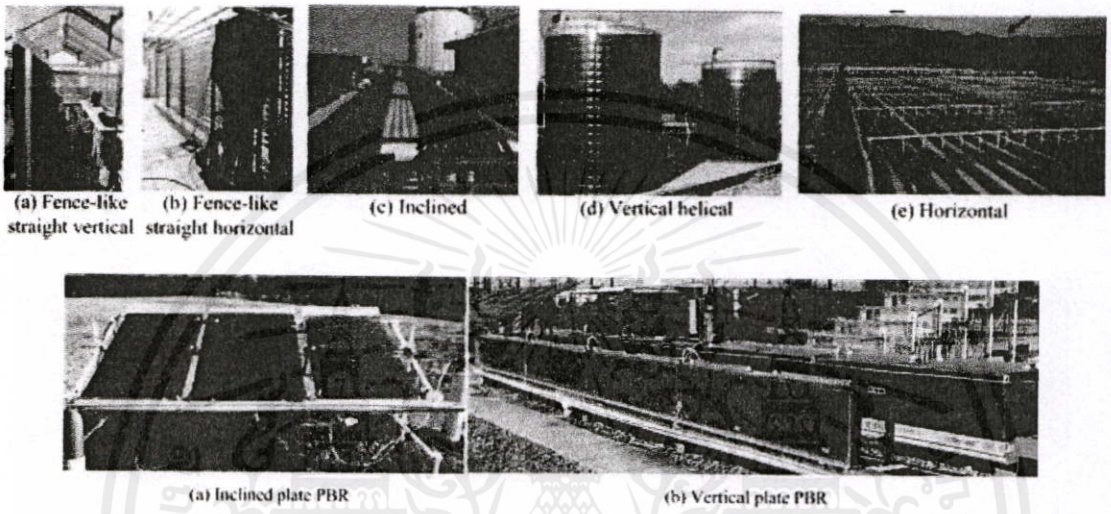
- ระบบปิดแบบท่อ (tubular PBRs)

เป็นระบบที่มีการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์เพราะง่ายต่อการสร้าง การปรับปรุงและการควบคุม และมีปริมาณพื้นที่ต่อปริมาตรมาก ให้ผลผลิตในจำนวนมาก ท่อสามารถสร้างได้หลายลักษณะ เช่น ท่อแนวตรง ท่อแนวนอน ท่อแนวราบ หรือท่อแนวเอียง มีการรายงานว่า การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบปิดแบบท่อ ที่ใหญ่ที่สุดในโลกมีลักษณะการสร้างท่อในแนวตั้งเป็นแนวยาวคล้ายรั้ว และอยู่ในกรีนเฮาส์ ในเมืองโครสประเทศเยอรมัน ใช้พื้นที่ในการสร้างถึง 10,000 ตารางเมตร มีปริมาตร 700 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตสาหร่ายได้ถึงปีละ 130 ถึง 150 ตัน (น้ำหลักแห้ง) หรือสามารถเก็บเกี่ยวสาหร่ายได้ 35 ถึง 41 กรัมต่อตารางเมตรใน 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบปิดแบบแผ่น (plate PBRs)

เป็นระบบที่สร้างขึ้นจากแผ่นโปร่งใส่ลักษณะสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 30 เซนติเมตร การสร้างแผ่นใสสามารถสร้างได้ทั้งแนวตั้งและแนวเอียง ระบบการเลี้ยงสาหร่ายระบบนี้สามารถให้ผลผลิตมากกว่า30กรัมต่อตารางเมตรใน1วัน



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการเพาะเลี้ยงสาหร่ายระบบปิด

นอกจากนี้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายยังมีการแบ่งสภาวะในการเพาะเลี้ยงออกเป็น3สภาวะ ได้แก่

(1) การเพาะเลี้ยงแบบออโตโทรฟิค (autotrophic cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยต้องการใช้แสง และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากธรรมชาติเป็นหลัก ในการเจริญเติบโตและสังเคราะห์สารชีวมวลต่างๆ

(2) การเพาะเลี้ยงแบบเฮทเทอโรโทรฟิค (heterotrophic cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงโดยใช้สารประกอบอินทรีย์ เช่น กลูโคส ซูโครส หรือกากน้ำตาล เป็นแหล่งคาร์บอน โดยไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้แสงในปริมาณมาก

(3) การเพาะเลี้ยงแบบมิกโซโทรฟิค (mixotrophic cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งสารอาหารคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้แสง โดยที่แสงที่ใช้อาจเป็นแสงจากธรรมชาติ (แสงอาทิตย์) หรือแสงจากหลอดไฟ ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อให้ได้เซลล์ในปริมาณมากและมีการสะสมน้ำมันไว้ในเซลล์ในปริมาณสูงนั้น มีปัจจัยสำคัญดังนี้

(1) แหล่งคาร์บอน

แหล่งคาร์บอนมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งสาหร่ายสามารถใช้ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายได้ในน้ำซึ่งอยู่ในรูปของคาร์บอนเนต และไบคาร์บอนเนต นอกจากแหล่งคาร์บอนแล้ว ไนโตรเจนก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยจำเป็นต้องมีการควบคุมแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะมีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์น้ำมันของสาหร่ายมีค่าสูงสุด นอกจากนั้นไนโตรเจนยังมีความสำคัญต่อกระบวนเมตาบอลิซึมในเซลล์สาหร่าย อีกทั้งยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในกรดอะมิโน โปรตีน และเอนไซม์ภายในเซลล์

(2) แสง (light)

แสงมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงเช่นเดียวกับพืชทั่วไป หากมีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยหลอดไฟควรใช้หลอดฟลูออเรสเซนส์เป็นแหล่งแสง เพราะแสงที่ได้มีอุณหภูมิต่ำกว่าหลอดไฟชนิดอื่น นอกจากนี้การควบคุมช่วงเวลาการให้แสงสลับกับการหยุดให้แสงจะส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีกว่าการให้แสงตลอดเวลา โดยช่วงแสงสว่างที่นิยมใช้ คือ 16 ชั่วโมงสว่าง / 8 ชั่วโมงมืด เป็นต้น โดยถ้าเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ช่วงที่เหมาะสมของคลื่นแสง คือ 600-700 นาโนเมตร

(3) อุณหภูมิ (temperature)

มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์สาหร่ายและการทำงานของเอนไซม์ รวมถึงโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ในเซลล์สาหร่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณน้ำมันในเซลล์สาหร่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายแต่ละชนิด อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 28-32 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

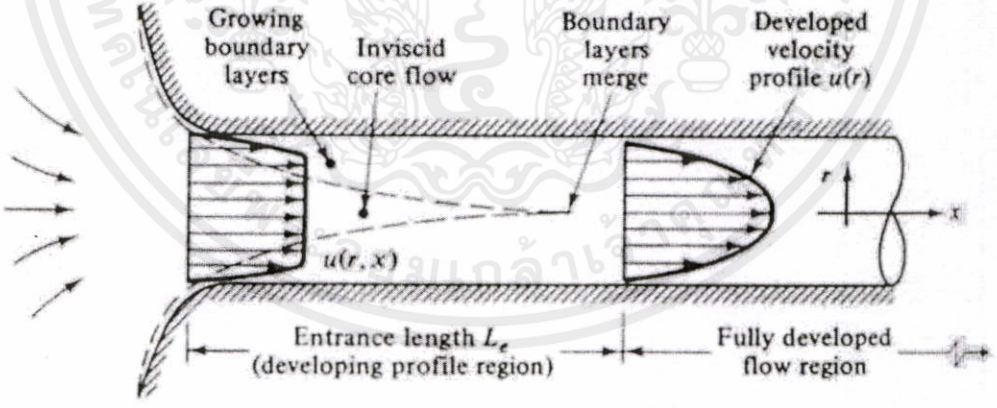
(4) ความเป็นกรด เป็นด่าง (pH)

สาหร่ายเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH ระหว่าง 8.2-8.7 ในระดับค่าความเป็นกรดที่สูง อาจทำให้การเจริญเติบโตและการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายไม่ดี การเพิ่ม CO_2 อาจมีผลทำให้น้ำเป็นกรดอ่อนๆ

2.2 ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

2.2.1 การไหลภายในท่อ

จากการทดลองของ Reynolds พบว่า การไหลในท่อ จะมีลักษณะการไหลขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ที่เรียกว่า Reynolds number (Re No.) หากค่าของ Re No. ต่ำ Streamline จะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกการไหลแบบนี้ว่า Laminar flow เมื่อค่า Re No. มีค่าสูงมากขึ้น ทำให้ลักษณะของ Stream line มีลักษณะที่ปั่นป่วน ซึ่งเรียกการไหลในช่วงนี้ว่า Turbulent flow



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลง velocity profile

บริเวณปากทางเข้าความเร็วของของไหลจะมีลักษณะ uniform มีความเร็ว u_0 เนื่องจากของไหลมีความหนืดทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ผนังท่อ ดังนั้นของเหลวที่ติดกับผนังท่อจะมีความเร็วเป็นศูนย์ และผลของแรงเสียดทานทำให้การกระจายของความเร็วตามแนวหน้าตัดของท่อเปลี่ยนรูปไปจากที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอยู่ ที่ปากทางเข้าแนวเส้นที่แสดงรอยต่อระหว่าง velocity profile ที่เป็นเส้นตรงและเส้นโค้ง เรียกว่า boundary layer จากรูปจะเห็นว่าความหนาของ boundary layer จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงระยะหนึ่ง ความหนาของ boundary layer มีค่า $= \frac{D}{2}$ จุดนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นการเกิด fully developed velocity profile (การกระจายความเร็ว เกิดการเปลี่ยนแปลงเต็มรูปแบบ) เลยจากจุดนี้ไปแล้ว การกระจายของความเร็ว (velocity profile) จะเหมือนกันตลอด

ความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดใดๆ ของท่อ มีค่าคงที่ และ คำนวณได้จาก

$$\overline{V} = \frac{1}{A}\int_{arca} udA = U_0$$

ความยาวของ entrance length ขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลในกรณี Laminar flow ความยาว entrance length หาได้จาก

$$\frac{L}{D} = 0.06\frac{\rho\overline{V}D}{\mu}$$

ในกรณีการเกิด Turbulent flow ความยาว entrance length จะอยู่ในช่วงประมาณ 25 – 40 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

2.2.2 การสูญเสียจากการไหลในท่อ

การเปลี่ยนแปลงความดันมีอิทธิพลต่อการไหลในท่อมาก การเปลี่ยนแปลงความดันอาจเกิดจากเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ความเร็วของของไหลในท่อและแรงเสียดทาน

การสูญเสียความดัน (Pressure Losses) เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ความดันในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลง การสูญเสียความดันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท

1. Major Losses (h_l) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ การสูญเสียเนื่องจากความดันเขียนได้ดังสมการ

$$h_l = (\frac{64}{Re})(\frac{L}{D})(\frac{V^2}{2g})$$

- การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน การสูญเสียเนื่องจากความดันเขียนได้ดังสมการ

$$h_l = (f)\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

ค่า f หาได้จาก Moody Chart

2. Minor Losses (h_m) เกิดจากการที่ของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น Gate Valve ,Elbow ท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่และทางแยกต่าง ๆ Minor Losses คำนวณได้จากสมการ

$$h_m = \frac{\sum kV^2}{2g} = (f)\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

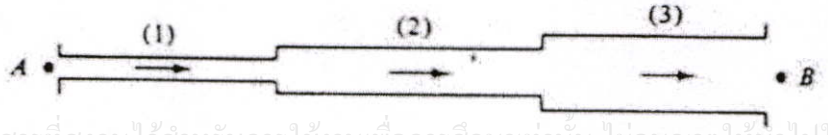
โดยที่ k คือ loss coefficient

L_e คือ ความยาวเทียบเท่าของท่อที่ทำให้เกิดการศูนย์เสียความดัน เท่าสิ่งกีดขวางนั้น (equivalent length)

2.2.3 ประเภทของการไหล

ระบบท่อสำหรับขนถ่ายของเหลว สำหรับงานวิศวกรรม จะมีการต่อท่อ 2 แบบ คือ

(1) การต่อแบบอนุกรม (Pipe in Series)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 การต่อท่อแบบอนุกรม

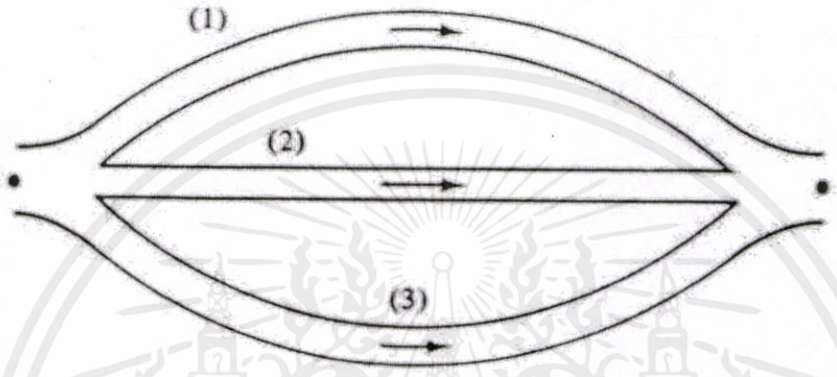
กฎการคำนวณสำหรับท่อที่ต่อแบบอนุกรม

1) $Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n = Q$

2) $V_1 d_1^2 = V_2 d_2^2 = V_3 d_3^2 = \cdots = V_n d_n^2$

3) $h_{1T} = \sum h_1 + h_m$

(2) การต่อแบบขนาน (Pipe in Parallel)



รูปที่ 2.7 การต่อแบบขนาน

กฎการคำนวณสำหรับท่อที่ต่อแบบขนาน

1) $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n$

2) $h_{1T} = h_{11} + h_{m1}$

$= h_{12} + h_{m2}$

|

|

|

$= h_{1n} + h_{mn}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

- การเตรียมวัสดุ
- การออกแบบและสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย
- การทดสอบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย
- การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย
- การเก็บผลการทดลอง

3.1 การเตรียมวัสดุ

3.1.1 การดำเนินการขอจุลสาหร่าย

ดำเนินการส่งหนังสือขอจุลสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่า วี(chlorella V.)จากคณะเทคโนโลยีการเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณหารลาดกระบัง โดยขอจุลสาหร่ายในปริมาตร 10 ลิตรโดยการคำนวณสูตรปริมาตรจุลสาหร่ายเริ่มต้น

$$\text{ปริมาณจุลสาหร่ายเริ่มต้น} = \frac{10}{100}\left(\text{ปริมาตรของระบบ}\right) \text{ลิตร}$$

3.1.2 การดำเนินการขออาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ดำเนินการส่งหนังสือขออาหารสำหรับเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสายพันธุ์ คลอเรลล่า วี. จากคณะเทคโนโลยีการเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณหารลาดกระบัง โดยอาหารที่นำมาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายคืออาหารสูตร คลอเรลล่ามีเดียม (Chlorella

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Medium) สูตรดังกล่าวเป็นสูตรอาหารที่เลี้ยงจุลสาหร่ายคลอเรลล่าได้ผลการเจริญเติบโตดี โดยมีส่วนประกอบของอาหารดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงปริมาณสารที่ใช้เป็นอาหารของจุลสาหร่าย

สาร	ปริมาณ
โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)	1.250 กรัม
โมโนโพแทสเซียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (KH_2PO_4)	1.250 กรัม
แมกนีเซียมซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($MgSO_4 .7H_2O$)	1.000 กรัม
แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)	0.084 กรัม
กรดบอริค (H_3BO_3)	0.014 กรัม
เฟอร์รัสซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($FeSO_4.7H_2O$)	0.050 กรัม
ซิงคีซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($ZnSO_4.7H_2O$)	0.088 กรัม
แมงกานีสคลอไรด์ 4-ไฮเดรต ($MnCl_2.4H_2O$)	0.014 กรัม
โมลิบดินัมออกไซด์ (MoO_3)	0.007 กรัม
คอปเปอร์ซัลเฟต 5-ไฮเดรต ($CuSO_4.5H_2O$)	0.016 กรัม
โคบอลท์ไนเตรท 6-ไฮเดรต [$Co(NO_3)_2.6H_2O$]	0.005 กรัม
อีดีทีเอ (EDTA)	0.500 กรัม

สูตรอาหารดังกล่าวคือสูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายปริมาตร 1 ลิตร จึงจำเป็นต้องคำนวณปริมาณสารอาหารโดยสูตรคำนวณต่อไปนี้

$$An = A1 \times Vn$$

เมื่อ An คือ ปริมาณอาหารสำหรับระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย (กรัม)

$A1$ คือ ปริมาณอาหารสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่าย (กรัมต่อลิตร)

Vn คือ ปริมาตรของระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายใดๆ (ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบ และสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

3.2.1 การออกแบบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ทำการออกแบบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยใช้โปรแกรม AUTO Desk แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก

(1) ถังพักระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

(2) ระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

(3) ระบบการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์

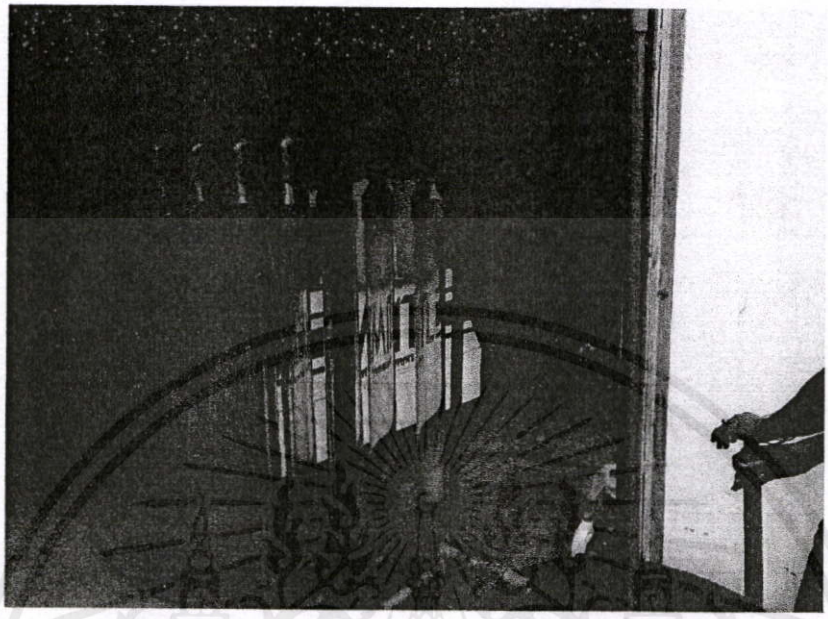
(4) โครงสร้างเพื่อรองรับถังระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ถังพักระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ขนาด 50 ลิตร

รูปที่ 3.1 ถังพักระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

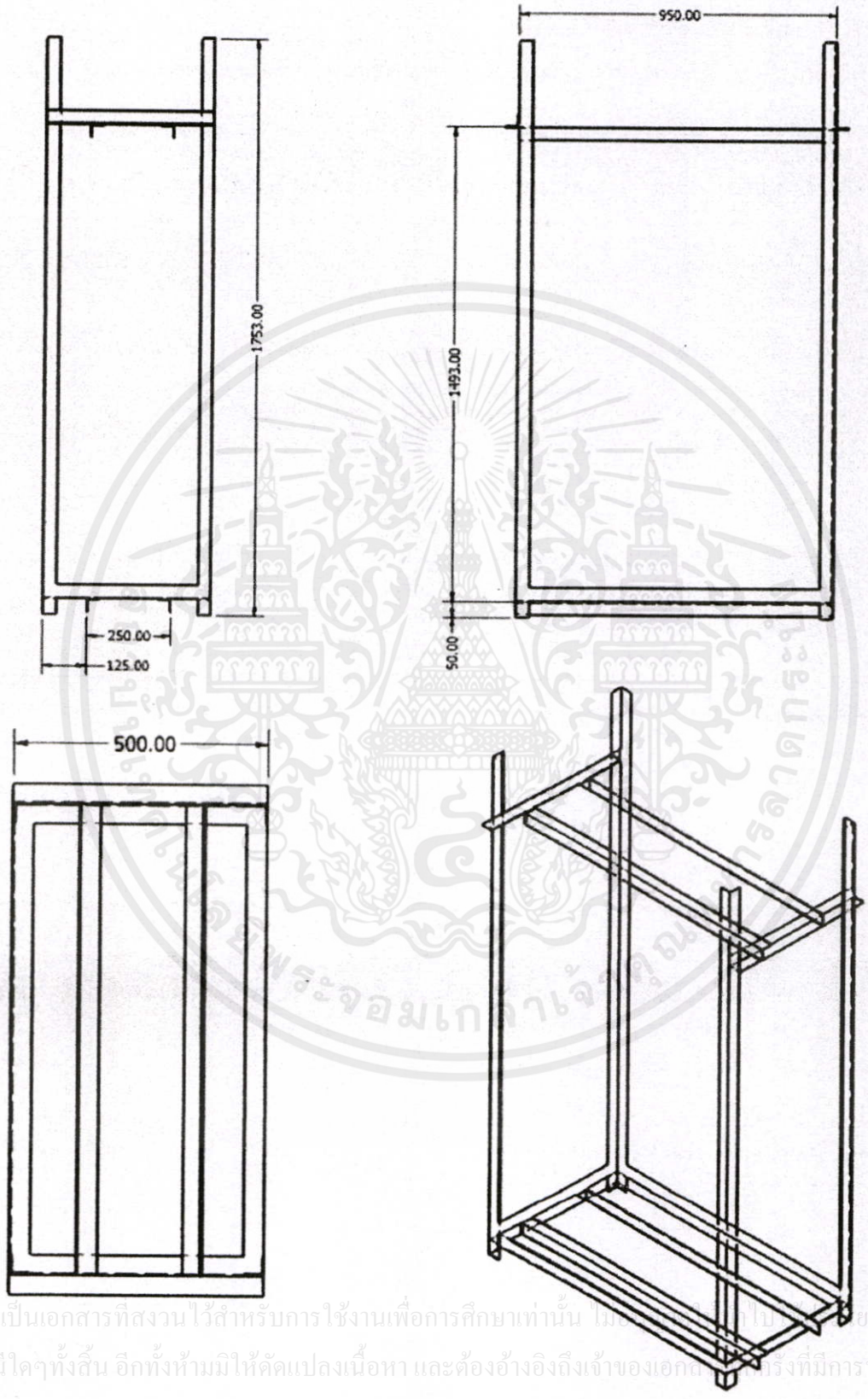
ระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ขนาด Ø 9 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร



รูปที่ 3.2 ระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 โครงระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

3.2.2 การสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามการออกแบบในข้างต้น คือ

(1) ถังพัก

(2) ท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

(3) โครงสร้างเพื่อรองรับถังระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

(4) ระบบการให้คาร์บอนไดออกไซด์

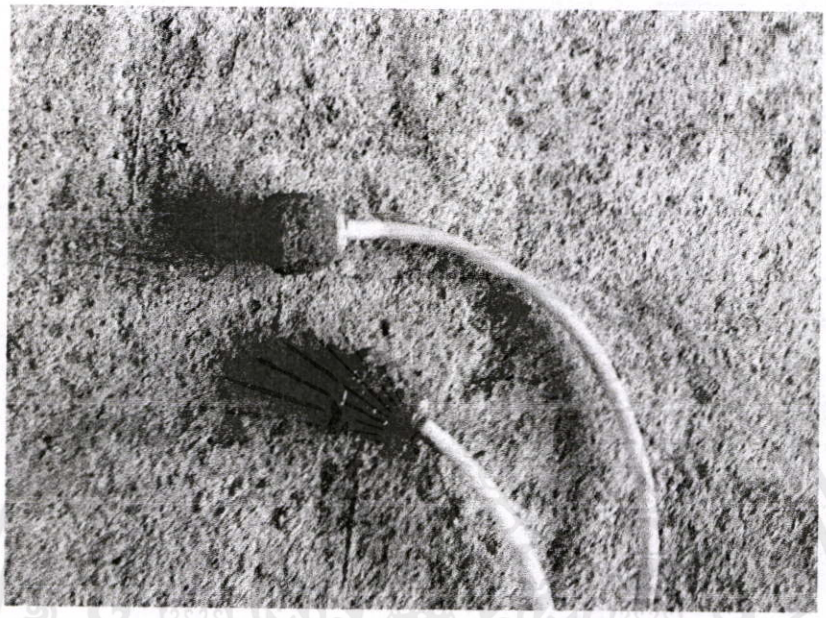
(1) ถังพัก

ภายในถังพักเป็นที่อยู่ของปั๊มน้ำ โดยเลือกใช้ปั๊มซับเมิส ขนาดกำลัง 150 วัตต์ อัตราการไหล 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เฮดน้ำ 12 เมตร ต่อเข้ากับท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว ส่งน้ำเข้าสู่ระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ที่ปั๊มน้ำจะมีวาล์วสำหรับบายพาสน้ำที่ออกจากปั๊มเพื่อการปรับอัตราการไหลของน้ำที่เข้าระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยอัตราการไหลที่เลือกใช้มี 3 ค่า คือ 0.001348 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, 0.001045 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และ 0.000214 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 ปั๊มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน[illegible]ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้[illegible]สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในถังพักยังเป็นส่วนของการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนที่มาจากระบบการให้คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมทั้งยังเป็นส่วนสำหรับเติมอาหารและวัดอุณหภูมิของน้ำภายในระบบ ดังรูปที่ 3.5



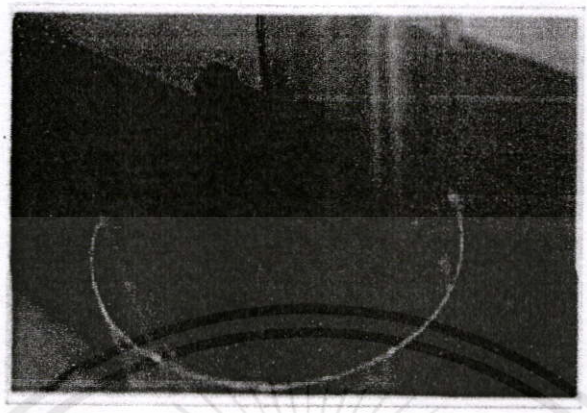
รูปที่ 3.5 หัวทรายสำหรับป้อนคาร์บอนไดออกไซด์

(2) ท่อเลี้ยงระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

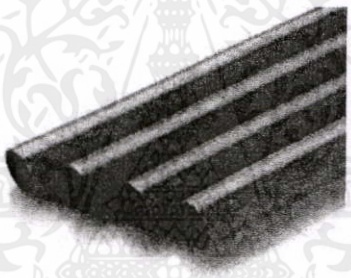
ท่อเลี้ยงระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็นส่วนที่จุลสาหร่ายได้รับแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ท่อทางเดินน้ำหลักทางเข้า-ออก ท่อทางเดินน้ำหลักทางเข้าเป็นส่วนที่น้ำจากถังพักถูกส่งเข้าระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยปั๊มน้ำ ตามอัตราการการไหลที่ได้กำหนดไว้ และ ยังมีส่วนท่อพรีมมิ้ง Priming (เติมน้ำ) สำหรับเติมเข้าสู้ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายให้เต็มก่อนการเดินระบบการเพาะเลี้ยง ที่ด้านบนสุดของท่อทางเดินน้ำหลักทางเข้ายังมีวาล์วลมสำหรับระบายลมออกขณะเติมน้ำขณะเติมน้ำเข้าระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ท่อทางเดินน้ำหลักทางออกเป็นส่วนที่วนน้ำกลับสู้ถังพักอีกรอบหนึ่งที่ปลายทางน้ำออกจะมีวาล์วน้ำสำหรับกันน้ำออกขณะเติมน้ำเข้าระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายขณะเติมน้ำเข้าระบบ และเปิดวาล์วเมื่อเดินระบบเพาะเลี้ยง ท่อทางเดินน้ำหลักเข้า-ออกทำมาจากท่อพีวีซี ข้อต่อสามทางพีวีซี ข้องอ90องศาพีวีซี วาล์วเปิด-ปิดน้ำพีวีซี ทั้งหมดขนาด 1 นิ้ว ที่ส่วนปลายของท่อทางเดินน้ำหลักเข้า - ออกเป็นข้อลดพีวีซี 3 – 1 นิ้ว ต่อเข้ากับท่ออะคลิลิกใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

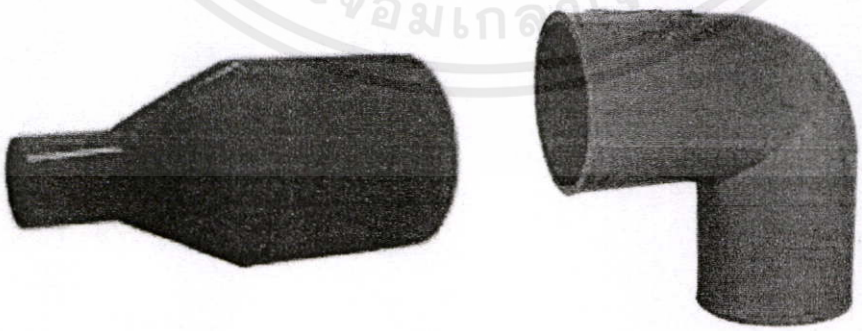
ท่ออะคลิลิกใส คือส่วนที่จุลสาหร่ายมารับแสง ทั้งหมดมี 10 ท่อ เรียงตัวขนานกัน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ท่ออะคลิลิกใส

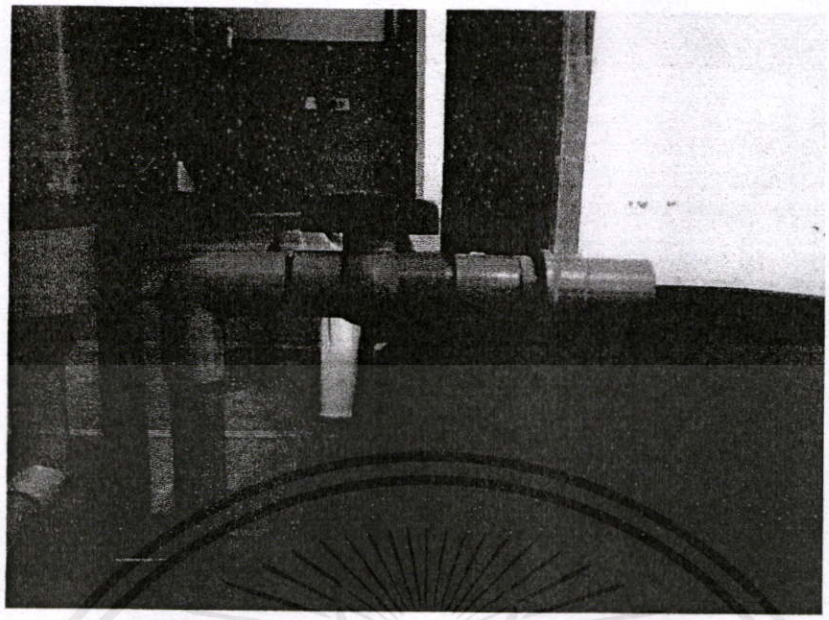


รูปที่ 3.7 ท่อพีวีซี



รูปที่ 3.8 ข้อต่อพีวีซีแบบต่างๆ

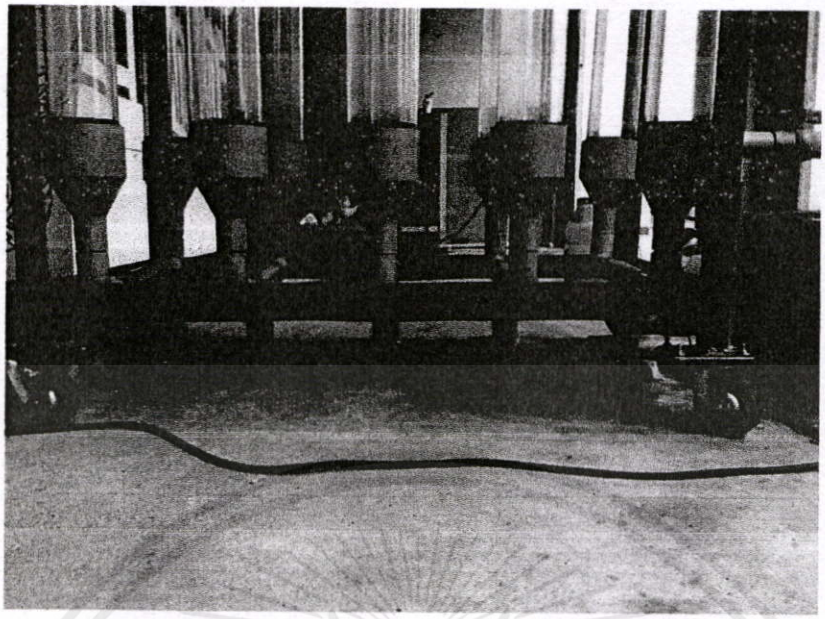
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วาล์วพีวีซี

รูปที่ 3.10 ทางเดินน้ำหลักขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

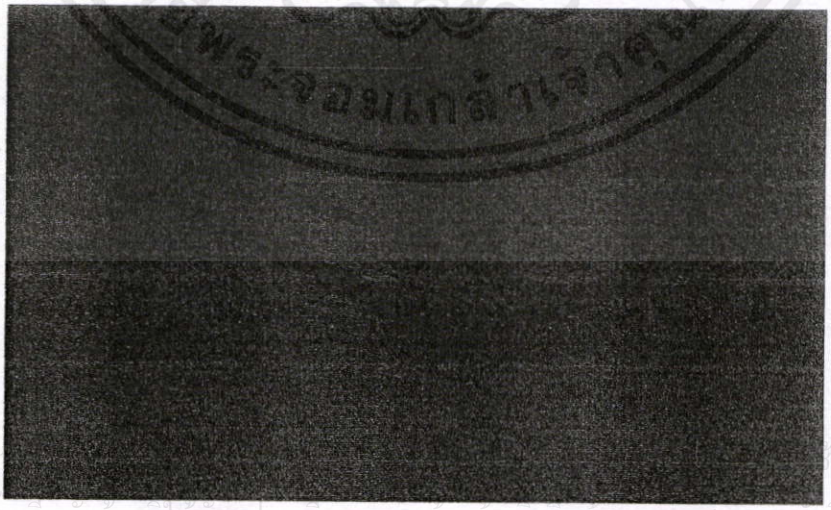


รูปที่ 3.11 ทางเดินน้ำหลักขาออก

(3) โครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

เป็นส่วนที่อยู่ร่วมกับระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยทำหน้าที่รองรับ น้ำหนักและยึดระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายทำมาจากเหล็กฉาก 1 นิ้ว ความหนา 3 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมต่อกันเป็นลักษณะโครงสี่เหลี่ยม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

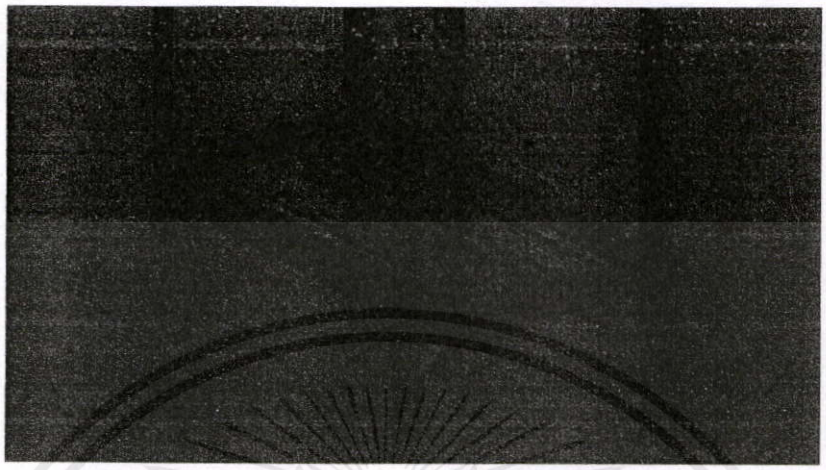
ส่วนฐานด้านล่างทำหน้าที่รองรับท่อทางเดินน้ำหลักทางออกกลับออกสู่ถังพัก



เอกสารนี้เป็นเอกสาร ... ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 ฐานล่างโครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ส่วนฐานด้านบนทำหน้าที่รองรับท่อทางเดินน้ำหลักทางเข้า



รูปที่ 3.13 ฐานบนโครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

โครงระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายที่ฐานของโครงทั้ง 4 ด้านติดตั้งล้อสำหรับความสะดวกหากต้องการเคลื่อนย้ายระบบท่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

รูปที่ 3.14 โครงสร้างระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

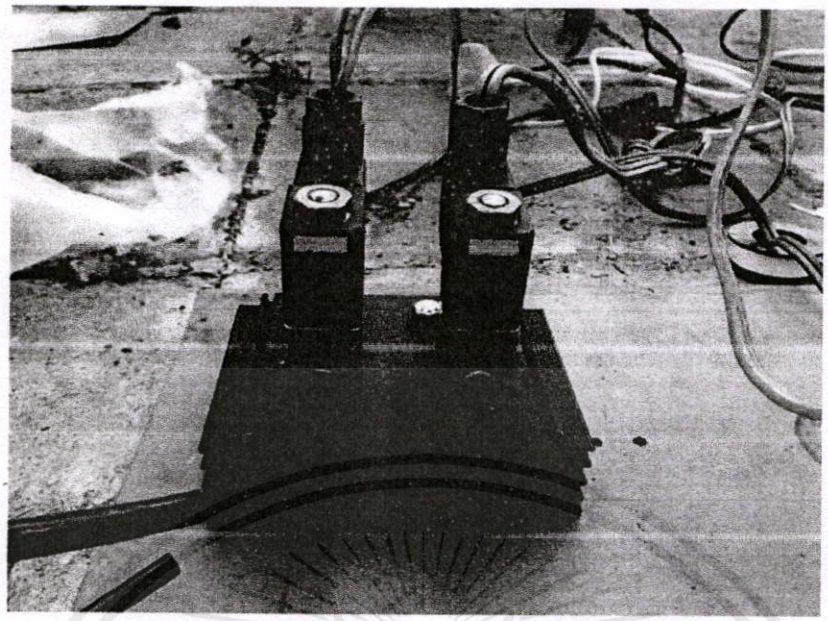
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ระบบการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์แก่จุลสาหร่าย

ระบบการให้คาร์บอนไดออกไซด์แก่จุลสาหร่าย คือ ส่วนของการเติมออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบ ประกอบไปด้วย คอมเพรสเซอร์ สายออกซิเจน และหัวทราย โดยที่สายออกซิเจนจะต่อเข้ากับถังพักอากาศ ซึ่งทำหน้าที่ผสมอากาศภายนอกและกับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าด้วยกัน ถังพักอากาศจะเชื่อมต่อไปยังโซลินอยวาล์วที่ซึ่งทำหน้าที่ในการเปิดและปิดให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากถังคาร์บอนไดออกไซด์ การเปิดและปิดของโซลินอยวาล์วจะทำงานจากการตั้งเวลาการเปิดและปิดของไทม์เมอร์ (Timer) ซึ่งระยะเวลาการเปิด-ปิดของโซลินอยวาล์วจะแปรผันตามแหล่งคาร์บอนไดออกไซด์ ระยะเวลาการเปิด-ปิด ที่เลือกใช้สำหรับป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับจุลสาหร่ายคือ เปิด 1 ชั่วโมง ปิด 2 ชั่วโมง (1/2) และ เปิดทุก 1 ชั่วโมง ปิด 4 ชั่วโมง (1/4) ภายในระยะเวลา 12 ชั่วโมงตั้งแต่เวลา 06.00 นาฬิกา ถึง 18.00 นาฬิกา แต่ระหว่างที่โซลินอยปิดยังคงให้อากาศภายนอกกับจุลสาหร่าย ทั้งนี้ เพื่อทดสอบว่าอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลต่อการเจริญเติบโตหรือไม่

รูปที่ 3.15 ถังพักอากาศและสายออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 โซลินอยวาล์ว

รูปที่ 3.17 ระบบการให้คาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

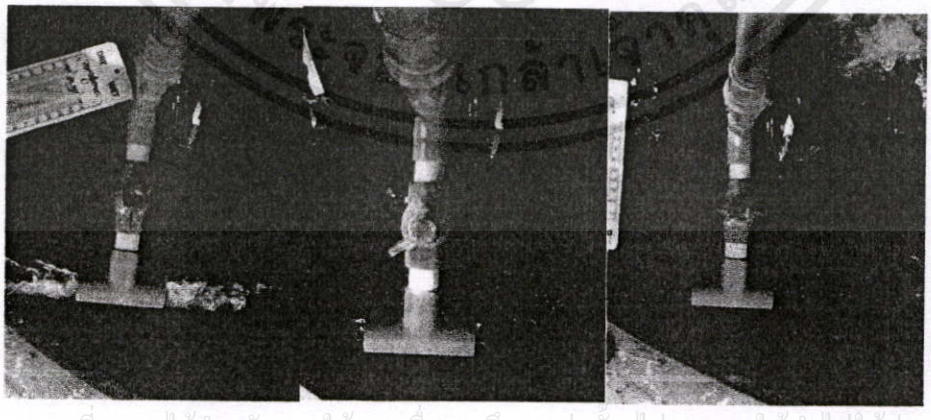
3.3 การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก

- การทดสอบอัตราการไหลของน้ำในระบบ
- การทดสอบ และวัดอุณหภูมิน้ำภายในระบบเพาะเลี้ยง
- การทดสอบระบบการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.1 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำในระบบ

ทดสอบอัตราการไหลได้โดยการวัดปริมาตรน้ำที่ออกจากปลายท่อทางเดินน้ำหลักทางออก และทำการจับเวลานำ ปริมาตรน้ำที่ได้มาคำนวณจากสูตร ปริมาตรทรงกระบอก $(V) = \pi r^2 h(\text{เมตร}^3)$ นำค่าปริมาณน้ำที่คำนวณแล้วแทนเข้าสูตรอัตราการไหลของน้ำจากสูตรอัตราการไหล $(Q) = AV\ (\text{เมตร}^3/\text{วินาที})$ ซึ่งจากหน่วยของปริมาตร คือ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จึงสามารถใช้ปริมาตรน้ำต่อเวลามา คำนวณแทนการใช้พื้นที่หน้าตัดคูณกับปริมาตร เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่เหมาะสำหรับการวัดอัตราการไหลในท่อ อัตราการไหลที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายมีทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 1348.42 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ปิดวาล์ว) 1045.37 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที(เปิดวาล์วครึ่งหนึ่ง) และ 214.27ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (เปิดวาล์ว) ทำการมาร์คจุดที่วาล์วบายพาสเพื่อความสะดวกเมื่อจะทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย



รูปที่ 3.18 การเก็บค่าอัตราการไหลทั้ง 3 ค่า คือ Q_{max} , Q_{mid} และ Q_{min} ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ทดสอบและวัดอุณหภูมิน้ำภายในระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

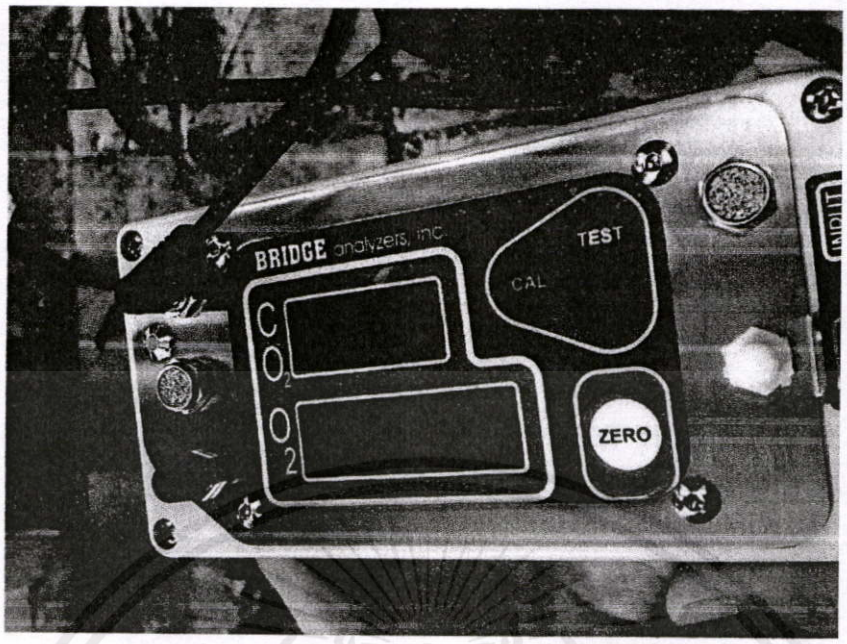
ทดสอบและวัดอุณหภูมิน้ำภายในระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยการใช้เทอร์โมคอปเปอร์ วัดอุณหภูมิของน้ำภายในถังพักขณะระบบทำงานโดยจะทำการทดสอบ 3 ช่วงเวลา คือ 09.00 น. 12.00 น. และ 17.00 น. นำมาหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิน้ำในระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

รูปที่ 3.19 เทอโมมิเตอร์ใช้วัดค่าอุณหภูมิน้ำในระบบเพาะเลี้ยง

3.3.3 การทดสอบระบบการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ทดสอบระบบการให้คาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้เครื่องวัดปริมาณ ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ในแพ็คเก็จ เลือกวัดเฉพาะค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การวัดค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถังพักอากาศ

3.4 การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก

3.4.1 การเติมน้ำเข้าระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

ทำโดยการเปิดวาล์วสำหรับเติมน้ำ ปิดวาล์วที่ท่อทางเดินน้ำหลักทางออก และเปิดวาล์วระบายอากาศออก เติมน้ำให้เต็มระบบ หลังจากนั้นจึงทำการปิดวาล์วระบายอากาศ ปิด วาล์วเติมน้ำ และทำการปั๊มให้ทำงานพร้อมกับทำการเปิดวาล์วที่ท่อทางน้ำหลักทางออก น้ำจะวนอยู่ภายในระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

3.4.2 การเตรียมปรับอัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์

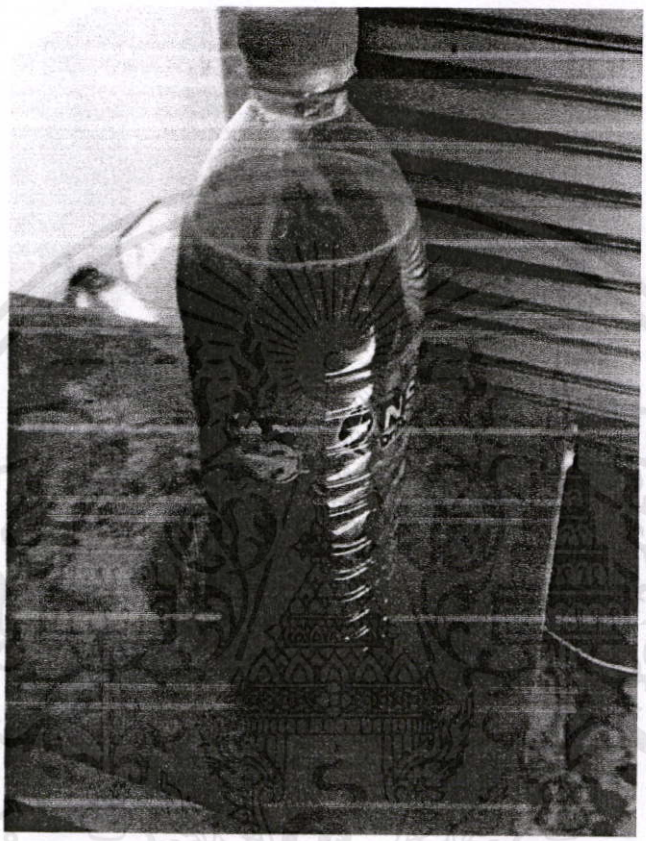
หลังจากการเติมน้ำเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายแล้ว จึงทำการปรับวาล์วบายพาส และ ตั้งค่าไทม์เมอร์ให้กับระบบการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

หลังจากการปรับค่าอัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามที่กำหนดแล้ว จึงเข้าสู่การนำจุลสาหร่ายและอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยการนำ อาหารสูตรคลอเรลล่ามีเดียมสำหรับ

เพลาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบที่มีปริมาตร 10 ลิตรดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 มาทำการละลายกับน้ำก่อน หลังจากนั้นจึงทำการเทอาหารลงสู่ทักพักในขณะที่ระบบทำงานอยู่ เพื่อให้อาหารผสมกับน้ำภายในระบบ หลังจากนั้นจึงทำการเทจุลสาหร่ายเข้าสู่ถังพัก ปล่อยให้ทำงานต่อไปเป็นระยะเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.21 การเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

หมายเหตุ การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในแต่ละรอบการเพาะเลี้ยงจะทำการจับคู่อัตราการไหลทั้ง 3 ค่ากับอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเก็บผลการทดลอง

ขั้นตอนการเก็บผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ

3.5.1 การวัดค่าตัวอย่างจุลสาหร่าย

โดยใช้ภาชนะเก็บตัวอย่างเป็นขวดใสที่มีปริมาตร 200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่ทำการพ่นสีดำรอบขวด แต่เว้นพื้นที่พอบางส่วนสำหรับใช้วัดค่าสีจากเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ ทำการลากเส้นเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับส่วนหัววัดของเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์เพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการวัดในครั้งต่อๆไป

รูปที่ 3.22 ขวดเก็บตัวอย่างจุลสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวัดค่าสีโดยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างจุลสาหร่ายจากระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเข้าใส่ขวดเก็บตัวอย่างแล้ว จึงทำการ ตังค่าสีเริ่มต้นหรือการคารีเบรต โดยเริ่มทำการคารีเบรตจากแผ่นสีดำ เมื่อเครื่องทำการอ่านค่าสีดำแล้วจึงทำการคารีเบรตแผ่นสีขาวต่อ เมื่อเครื่องทำการคารีเบรตแผ่นสีขาวจึงจะเข้าสู่โหมดการวัดค่าสี

ค่าสีที่เลือกวัดคือค่า L* a* b* ชนิดแหล่งแสงชนิดแสงเดย์ไลท์ ซึ่งทำการวัดค่าสีโดยการนำภาชนะมาแนบกับส่วนหัววัดสีของเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ กดปุ่มวัดสี เครื่องจะอ่านค่าสีออกมาทำการจดค่าสีที่ได้ ซึ่งจะทำซ้ำ 3 ครั้งสำหรับจุลสาหร่าย 1 ตัวอย่าง เก็บค่าสีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 วันในช่วงระยะเวลาการเพาะเลี้ยงทั้งหมด 7 วัน ที่อัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2

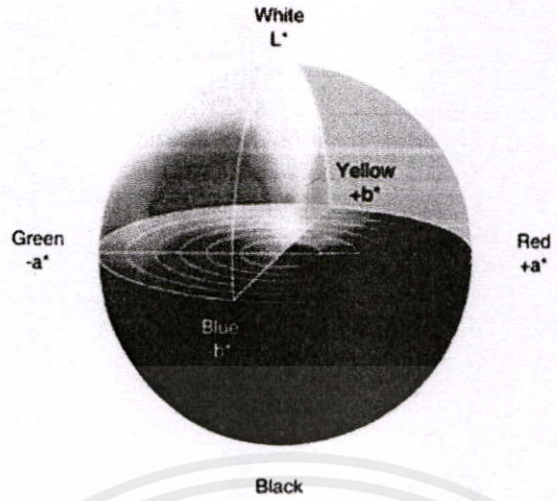
รูปที่ 3.23 เครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์

L* คือ ค่าสี ขาว – ดำ สีขาวอยู่บนแกน +Z สีดำอยู่บนแกน –Z

a* คือ ค่าสี แดง – เขียว สีแดงอยู่บนแกน +X สีเขียวอยู่บนแกน –X

b* คือ ค่าสี เหลือง – น้ำเงิน สีเหลืองอยู่บนแกน +Y สีน้ำเงินอยู่บนแกน –Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่าสีจากเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย

4.1 การทดสอบหาอัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.1 จุดประสงค์การทดสอบ

เพื่อหาช่วงค่าอัตราการไหลและอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายภายในระบบเพาะเลี้ยงแบบปิด

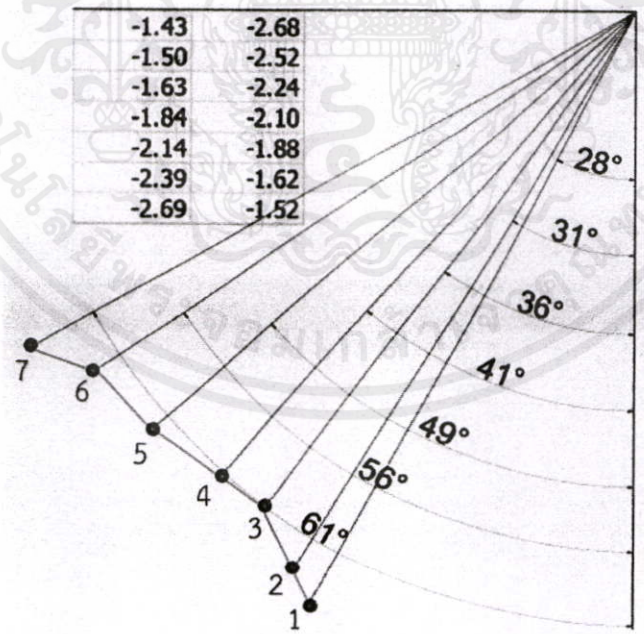
ผลการทดลอง

การทดสอบค่าสีจากเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์เป็นการทดสอบที่สามารถบ่องบอกการเจริญเติบโตได้แต่เป็นเพื่อความง่ายจึงเลือกการนำเสนอค่ามุม θ แทนการเสนอค่าสีโดยค่ามุม θ ได้มาจากการวัดค่ามุมโดยเอียงมุมจากแกนค่าสีน้ำเงิน (-b*) สามารถเก็บค่าได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่ามุม θ ที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

วันที่	L*	a*	b*	θ
1	2.29	-1.43	-2.68	28
2	2.19	-1.50	-2.52	31
3	2.15	-1.63	-2.24	36
4	2.14	-1.84	-2.10	41
5	2.05	-2.14	-1.88	49
6	2.02	-2.39	-1.62	56
7	1.98	-2.69	-1.52	61

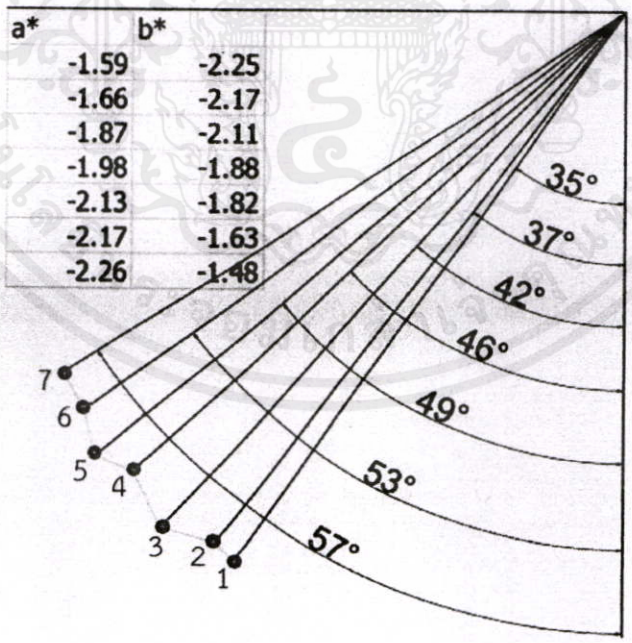


รูปที่ 4.1 กราฟค่ามุม θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่ามุม θ ที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

วันที่	L*	a*	b*	θ
1	2.36	-1.59	-2.25	35
2	2.31	-1.66	-2.17	37
3	2.28	-1.87	-2.11	42
4	2.20	-1.98	-1.88	46
5	2.12	-2.13	-1.82	49
6	2.06	-2.17	-1.63	53
7	1.99	-2.26	-1.48	57

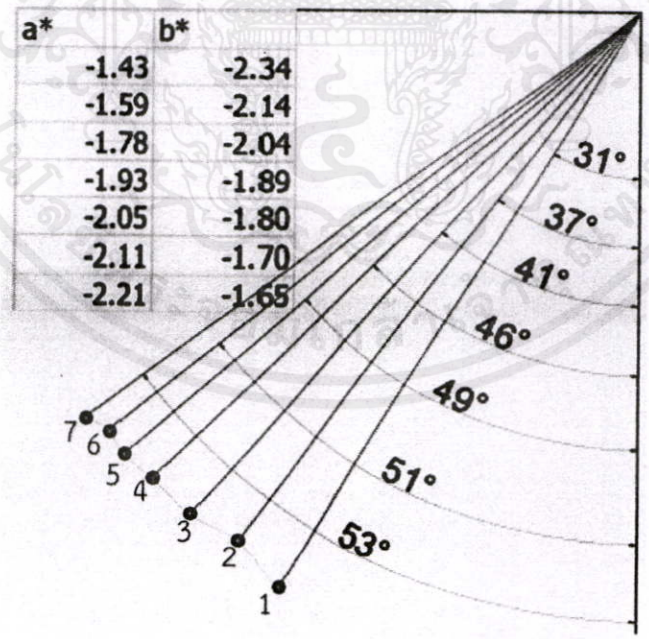


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 กราฟค่ามุม θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

ตารางที่ 4.3 ค่ามุม θ ที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

วันที่	L*	a*	b*	θ
1	2.37	-1.43	-2.34	31
2	2.25	-1.59	-2.14	37
3	2.22	-1.78	-2.04	41
4	2.19	-1.93	-1.89	46
5	2.14	-2.05	-1.80	49
6	2.04	-2.11	-1.70	51
7	1.96	-2.21	-1.65	53

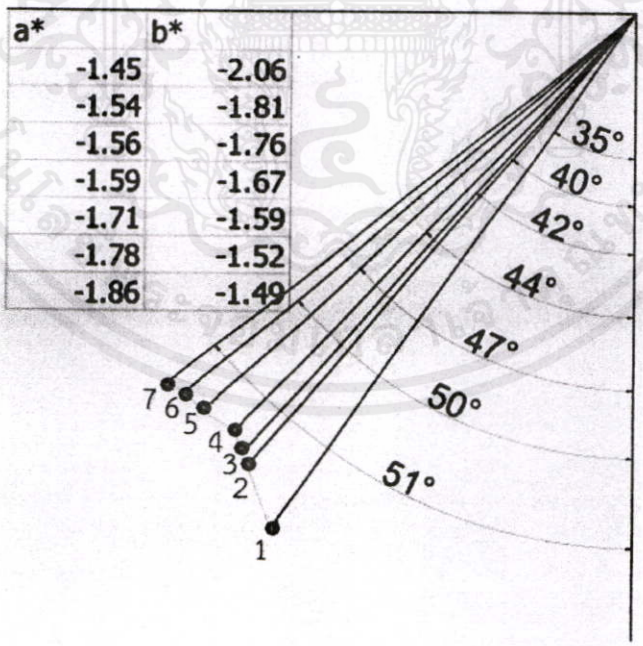


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 กราฟค่ามุม θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

ตารางที่ 4.4 ค่ามุม θ ที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

วันที่	L*	a*	b*	θ
1	2.33	-1.45	-2.06	35
2	2.29	-1.54	-1.81	40
3	2.26	-1.56	-1.76	42
4	2.20	-1.59	-1.67	44
5	2.13	-1.71	-1.59	47
6	1.95	-1.78	-1.52	50
7	1.93	-1.86	-1.49	51

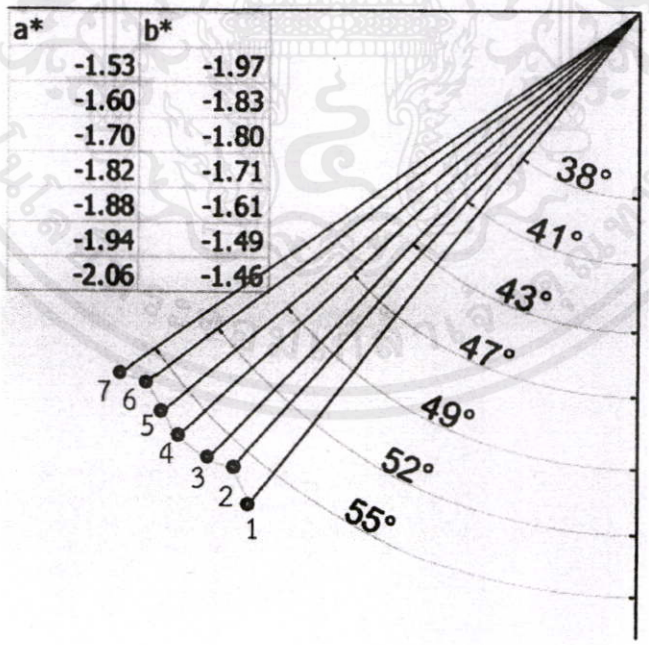


รูปที่ 4.4 กราฟค่ามุม θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่ามุม θ ที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

วันที่	L*	a*	b*	θ
1	2.30	-1.53	-1.97	38
2	2.25	-1.60	-1.83	41
3	2.19	-1.70	-1.80	43
4	2.12	-1.82	-1.71	47
5	2.04	-1.88	-1.61	49
6	2.00	-1.94	-1.49	52
7	1.95	-2.06	-1.46	55

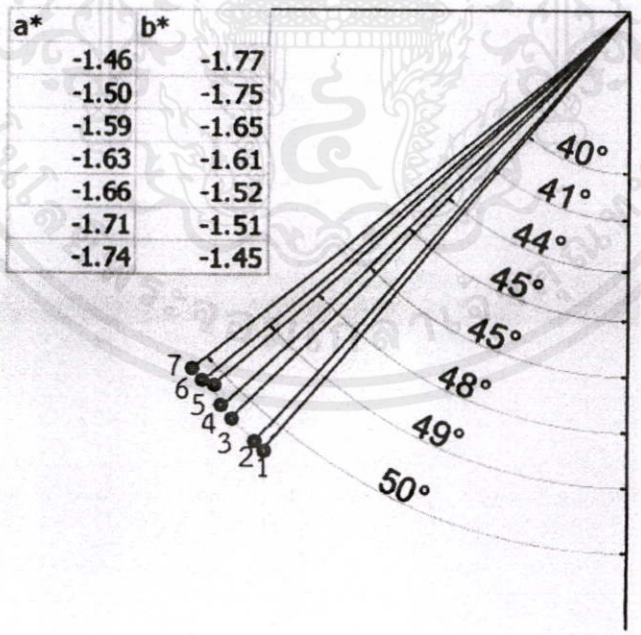


รูปที่ 4.5 กราฟค่ามุม θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่ามุม θ ที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

วันที่	L*	a*	b*	θ
1	2.35	-1.46	-1.77	40
2	2.25	-1.50	-1.75	41
3	2.19	-1.59	-1.65	44
4	2.13	-1.63	-1.61	45
5	2.03	-1.66	-1.52	48
6	2.00	-1.71	-1.51	49
7	1.97	-1.74	-1.45	50



รูปที่ 4.6 กราฟค่ามุม θ จากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง และกราฟทั้งหมดที่ได้นำเสนอมาทำให้ทราบว่าค่ามุม θ ที่มากที่สุดคือค่ามุม θ จากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย โดยการใช้ค่าสีเทียบเป็นค่ามุม θ เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 , 0.001045 และ 0.000214 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่อัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2) และน้อย (1/4)

จากการทดลองที่อัตราการไหล 0.001348 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2) ที่ค่า Re No. เท่ากับ 1907.45037 มีลักษณะการไหลแบบ turbulence มีแนวโน้มการเพิ่มของมวลจุลสาหร่ายมากที่สุด และเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลเท่ากันแต่อัตราการป้อนคาร์บอนแตกต่างกันมีแนวโน้มการเพิ่มของมวลจุลสาหร่ายที่แตกต่างกัน ดังนั้นการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการเจริญเติบโต โดยที่อัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก (1/2) มีแนวโน้นการเพิ่มมวลของจุลสาหร่ายมากว่าการอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย (1/4)

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายให้ลดลงหรือคงที่ให้เหมาะสมกับจุลสาหร่ายอาจจะทำให้มีแนวโน้มการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายมากยิ่งขึ้น

หากสามารถเพิ่มอัตราการไหลในระบบให้สูงขึ้นจนทำให้ค่า Re No. อยู่ในช่วงการไหลแบบ turbulence มากขึ้น อาจทำให้แนวโน้มการเพิ่มมวลของจุลสาหร่ายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เรย์โนลด์นัมเบอร์

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

หาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการ

$$\text{Re No.} = \frac{vd}{\upsilon}$$

โดย Re No. คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

v คือ ความเร็วการไหลของน้ำ (เมตร/วินาที)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

υ คือ ค่าความหนืดของน้ำ

(น้ำที่อุณหภูมิ 20°C ค่าความหนืดเท่ากับ 1.007×10^{-6})

หาความเร็วที่ท่ออะคลิลิก

ท่อขนาด 1 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางนอก = 2.54 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางใน = $2.54 - (0.2\times2) = 2.14$ เซนติเมตร

หาค่าความเร็วที่ทางเข้าจากสมการ $v = \frac{Q}{A}$

โดย Q คือ อัตราการไหล $(\text{เมตร}^3/\text{วินาที})$

อัตราการไหลของปั๊มที่ประสิทธิภาพ 85% เท่ากับ 2.4 m^3/h

A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ (เมตร^2)

หาพื้นที่หน้าตัดท่อจาก

$$A = \pi r^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $A = \pi \times \left(\frac{2.14\times10^{-2}}{2}\right)^2$

$A = 3.59 \times 10^{-4}$ เมตร^2

แทนค่า A ในสมการ $v = \frac{Q}{A}$

$v = \frac{2.4}{3.59\times10^{-4}}$

$v = 6685.24$ เมตร/ชั่วโมง

$v = 1.85$ เมตร/วินาที

แทนค่า v ในสมการ $\text{Re No.} = \frac{vd}{U}$

$\text{Re No.} = \frac{1.85\times(2.14\times10^{-2})}{1.007\times10^{-6}}$

$\text{Re No.} = 4.7 \times 10^4$

หาความเร็วที่ท่ออะคลิลิก

เส้นผ่านศูนย์กลางนอก $= 9$ เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางใน $= 9 - (0.3 \times 2) = 8.94$ เซนติเมตร

หาค่าความเร็วที่ทางเข้าจากสมการ $v = \frac{Q}{A}$

เนื่องจากเป็นการต่อท่อแบบขนาน ดังนั้น $Q = Q_1 + Q_2$

สมมติว่า $Q_1 = Q_2 = \frac{Q}{2} = 1.2$ เมตร^3/ชั่วโมง

หาพื้นที่หน้าตัดท่อจาก

$A = \pi r^2$

แทนค่า $A = \pi \times \left(\frac{8.94\times10^{-2}}{2}\right)^2$

$A = 6.27 \times 10^{-3}$ เมตร^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า A ในสมการ $v = \frac{Q}{A}$

$$v = \frac{1.2}{6.27\times10^{-3}}$$

$$v = 191.38 \quad \text{เมตร/ชั่วโมง}$$

$$v = 0.053 \quad \text{เมตร/วินาที}$$

แทนค่า v ในสมการ $\text{Re No.} = \frac{vd}{U}$

$$\text{Re No.} = \frac{0.053\times(8.94\times10^{-2})}{1.007\times10^{-6}}$$

$$\text{Re No.} = 4.7 \times 10^{3}$$

จากการคำนวณพบว่าค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ มีค่ามากกว่า 4000 ซึ่งสามารถทราบได้ว่ามีการไหลในท่อแบบปั่นป่วน

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงค่าอัตราการไหลเฉลี่ย

ซ้ำที่	อัตราการไหล cm^3/s		
	Qmax	Qmid	Qmin
1	1337.88	1078.63	220.42
2	1320.51	1047.47	207.36
3	1386.87	1010.00	215.02
เฉลี่ย	1348.42	1045.37	214.27
เมตร^3/วินาที	0.001348	0.001045	0.000214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ตาราง แสดงค่าอัตราการไหล,เส้นผ่านศูนย์กลางนอก,เส้นผ่านศูนย์กลางใน,พื้นที่หน้าตัด,ความเร็วของน้ำในท่อ,ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

	อัตราการไหล (เมตร3/วินาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (เมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางใน (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (เมตร)	ความเร็วของน้ำในท่อ (เมตร3/วินาที)	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ต่อ 1 ท่อ	ลักษณะการไหล
ที่ทางเข้า, ท่อขนาด 1 นิ้ว, ประสิทธิภาพปั๊ม 100%	0.000833	0.0254	0.0214	0.000359	2.318043	49261.3	-	laminar
ที่ทางเข้า, ท่อขนาด 1 นิ้ว, ประสิทธิภาพปั๊ม 85%	0.000667	0.0254	0.0214	0.000359	1.854435	39409.0386	-	laminar
ที่ทางเข้า, ท่ออะคลิลิกขนาด 9เซนติเมตร, ต่อท่อแบบขนาน Q = Q1 +Q2 สมมติให้ Q1 = Q2 = Q/2	0.001333	0.09	0.0894	0.006274	0.212517	18866.967	-	laminar

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ตาราง แสดงค่าอัตราการไหล,เส้นผ่านศูนย์กลางนอก,เส้นผ่านศูนย์กลางใน,พื้นที่หน้าตัด,ความเร็วของน้ำในท่อ,ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

	อัตราการไหล (เมตร3/วินาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (เมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางใน (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (เมตร)	ความเร็วของน้ำในท่อ (เมตร3/วินาที)	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ต่อ 1 ท่อ	ลักษณะการไหล
ท่อขนาด 1 นิ้ว, Qmin	0.000214	0.0254	0.0214	0.000359	0.596015	12666.065	-	laminar
ท่อขนาด 9 เซนติเมตร, Qmax	0.001348	0.09	0.0894	0.006274	0.214855	19074.5037	1907.4504	laminar
ท่อขนาด 9 เซนติเมตร, Qmid	0.001045	0.09	0.0894	0.006274	0.16656	14786.9854	1478.6985	laminar
ท่อขนาด 9 เซนติเมตร, Qmin	0.000214	0.09	0.0894	0.006274	0.034152	3031.92	303.192	laminar

ภาคผนวก ข

ตารางค่าสี CIELAB

ตารางที่ ข.1 ตารางการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก

อัตราการไหล = 0.001348 เมตร^3/วินาที					การป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก					
วันที่	อุณหภูมิ	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	30.5	2.33	-1.41	-2.57	2.17	-1.43	-2.72	2.37	-1.44	-2.74
2	29.2	2.24	-1.54	-2.26	2.10	-1.50	-2.64	2.22	-1.47	-2.66
3	30.9	2.19	-1.61	-2.21	2.06	-1.52	-2.13	2.22	-1.75	-2.36
4	29.0	2.19	-1.64	-2.18	2.05	-2.04	-1.95	2.17	-1.84	-2.15
5	29.5	2.08	-1.91	-2.13	2.04	-2.62	-1.62	2.03	-1.89	-1.91
6	31.0	2.02	-2.07	-1.73	2.02	-2.68	-1.49	2.02	-2.41	-1.65
7	30.1	2.00	-2.69	-1.71	1.93	-2.79	-1.45	2.00	-2.59	-1.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ตารางการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

อัตราการไหล = 0.001348 เมตร^3/วินาที					การป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก					
วันที่	อุณหภูมิ	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	29.4	2.37	-1.69	-2.29	2.32	-1.51	-2.18	2.39	-1.57	-2.29
2	30.1	2.31	-1.75	-2.10	2.28	-1.51	-2.13	2.35	-1.71	-2.29
3	30.1	2.30	-1.96	-2.08	2.27	-1.64	-2.01	2.27	-2.00	-2.24
4	30.4	2.21	-2.03	-1.73	2.23	-1.86	-2.00	2.16	-2.05	-1.92
5	30.6	2.20	-2.21	-1.63	2.07	-2.04	-1.96	2.08	-2.14	-1.88
6	29.2	2.17	-2.22	-1.56	2.04	-2.13	-1.69	1.97	-2.15	-1.63
7	29.6	2.05	-2.27	-1.47	1.95	-2.24	-1.41	1.96	-2.27	-1.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก

อัตราการไหล = 0.001045 เมตร^3/วินาที					การป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก					
วันที่	อุณหภูมิ	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	29.7	2.33	-1.40	-2.35	2.38	-1.42	-2.30	2.38	-1.46	-2.36
2	30.1	2.16	-1.66	-2.12	2.37	-1.62	-2.24	2.21	-1.47	-2.06
3	30.5	2.14	-1.90	-2.06	2.34	-1.68	-2.06	2.20	-1.75	-1.99
4	30.5	2.05	-1.99	-1.78	2.34	-1.77	-1.91	2.18	-2.04	-1.97
5	29.2	2.00	-2.00	-1.70	2.28	-2.06	-1.79	2.13	-2.08	-1.92
6	30.1	1.95	-2.04	-1.57	2.06	-2.14	-1.70	2.11	-2.14	-1.84
7	30.2	1.90	-2.12	-1.54	1.92	-2.16	-1.68	2.05	-2.35	-1.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

อัตราการไหล = 0.001045 เมตร^3/วินาที					การป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย					
วันที่	อุณหภูมิ	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	30.6	2.37	-1.46	-2.06	2.27	-1.49	-2.05	2.35	-1.41	-2.07
2	29.6	2.36	-1.55	-1.81	2.21	-1.53	-1.81	2.31	-1.54	-1.81
3	29.2	2.35	-1.56	-1.76	2.14	-1.57	-1.75	2.29	-1.55	-1.76
4	29.1	2.28	-1.59	-1.75	2.04	-1.58	-1.66	2.26	-1.61	-1.59
5	30.8	2.12	-1.63	-1.60	2.01	-1.71	-1.60	2.25	-1.78	-1.57
6	31.0	1.93	-1.66	-1.51	1.92	-1.87	-1.58	1.98	-1.82	-1.46
7	30.8	1.92	-1.89	-1.50	1.92	-1.88	-1.57	1.96	-1.82	-1.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก

อัตราการไหล = 0.001045 เมตร^3/วินาที					การป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก					
วันที่	อุณหภูมิ	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	29.1	2.27	-1.64	-1.90	2.36	-1.54	-2.09	2.26	-1.42	-1.91
2	29.6	2.26	-1.65	-1.85	2.24	-1.55	-1.82	2.25	-1.61	-1.82
3	30.0	2.24	-1.75	-1.82	2.21	-1.72	-1.79	2.11	-1.63	-1.78
4	29.8	2.21	-1.78	-1.64	2.12	-1.90	-1.77	2.05	-1.78	-1.73
5	29.8	2.07	-1.89	-1.59	2.08	-1.97	-1.76	1.98	-1.79	-1.48
6	30.2	2.02	-1.90	-1.51	2.03	-2.02	-1.54	1.95	-1.91	-1.44
7	29.8	1.99	-2.05	-1.50	1.94	-2.09	-1.45	1.91	-2.04	-1.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

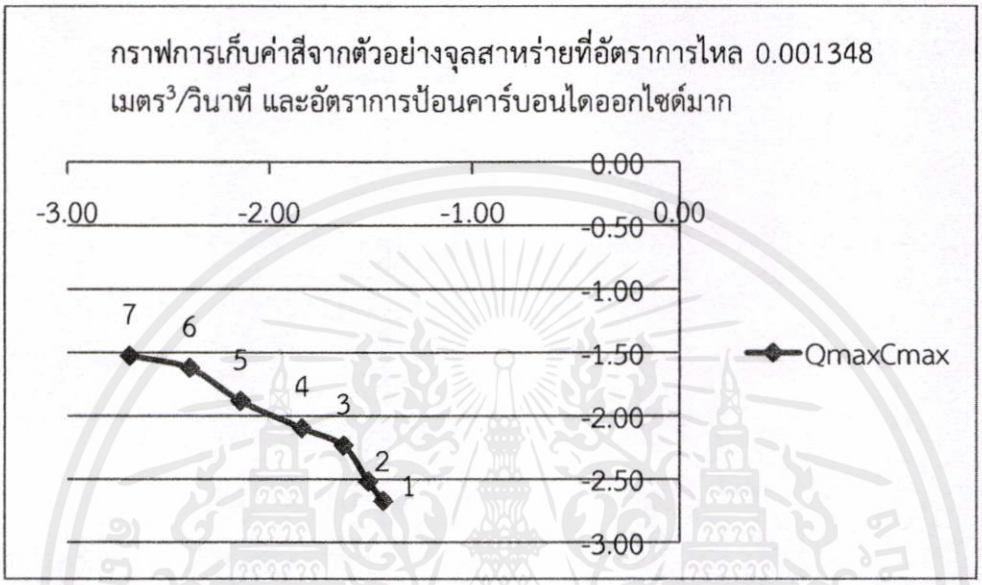
ตารางที่ ข.6 ตารางแสดงค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

อัตราการไหล = 0.001045 เมตร^3/วินาที		การป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย								
วันที่	อุณหภูมิ	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	30.5	2.40	-1.44	-1.79	2.25	-1.47	-1.74	2.39	-1.45	-1.79
2	29.3	2.31	-1.45	-1.79	2.08	-1.53	-1.71	2.36	-1.54	-1.75
3	30.0	2.23	-1.52	-1.65	2.03	-1.61	-1.66	2.30	-1.64	-1.66
4	29.6	2.23	-1.56	-1.63	2.01	-1.63	-1.62	2.16	-1.71	-1.59
5	31.0	2.15	-1.57	-1.54	2.00	-1.68	-1.45	1.93	-1.72	-1.58
6	29.2	2.12	-1.61	-1.52	1.96	-1.74	-1.44	1.92	-1.77	-1.58
7	29.9	2.08	-1.69	-1.45	1.92	-1.75	-1.43	1.90	-1.78	-1.46

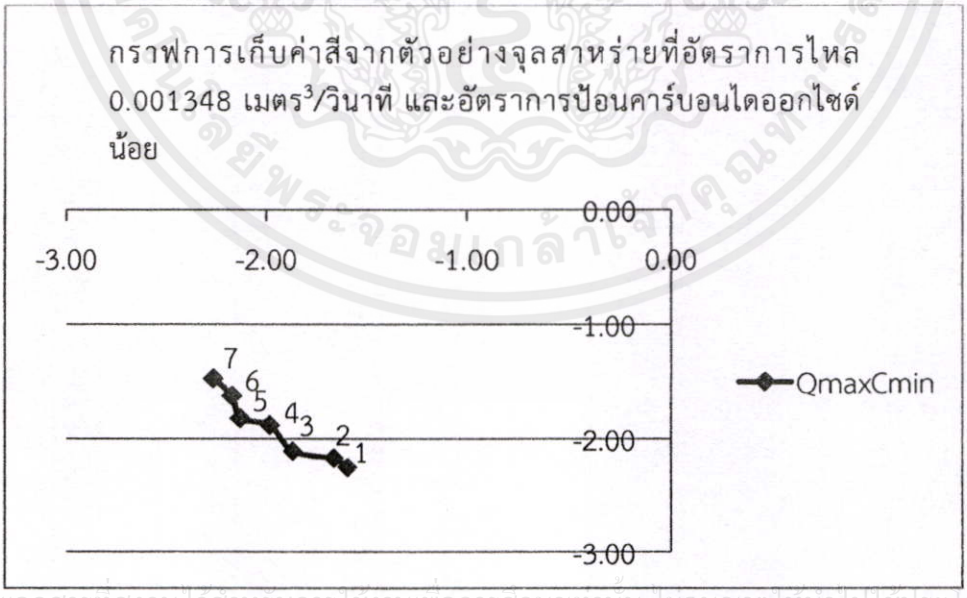
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

กราฟค่าสี CIELAB

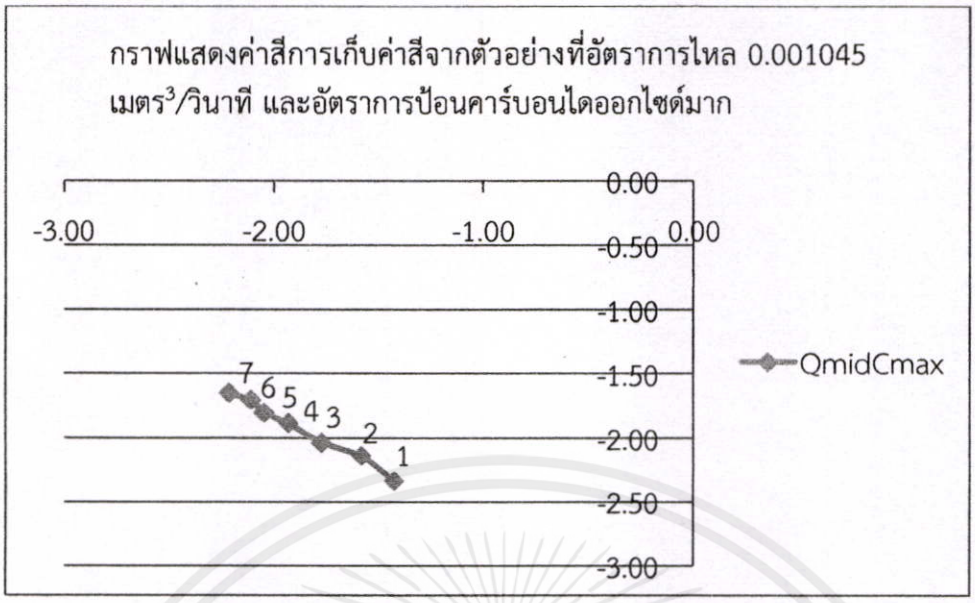


รูปที่ ค.1 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก

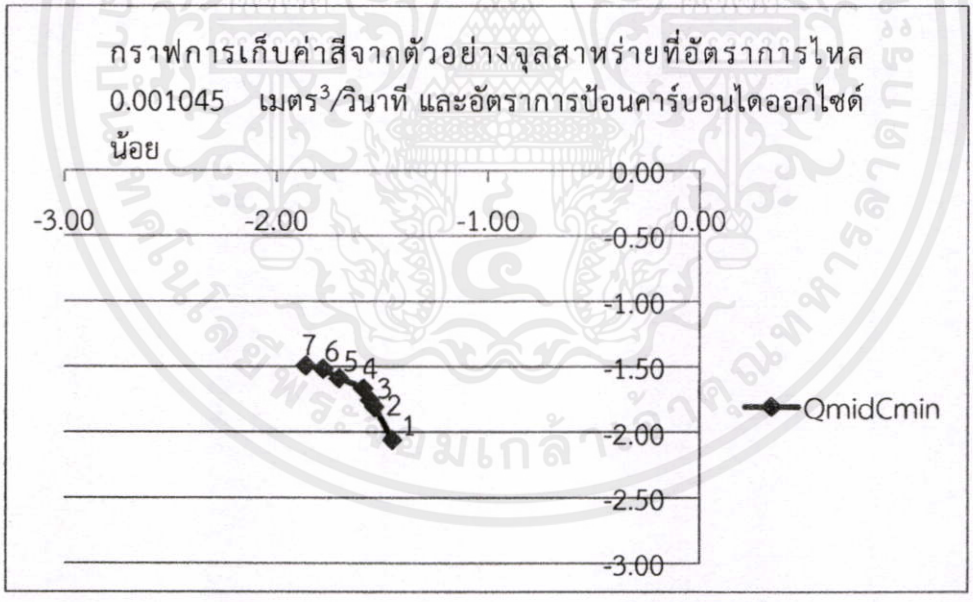


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.2 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล0.001348 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

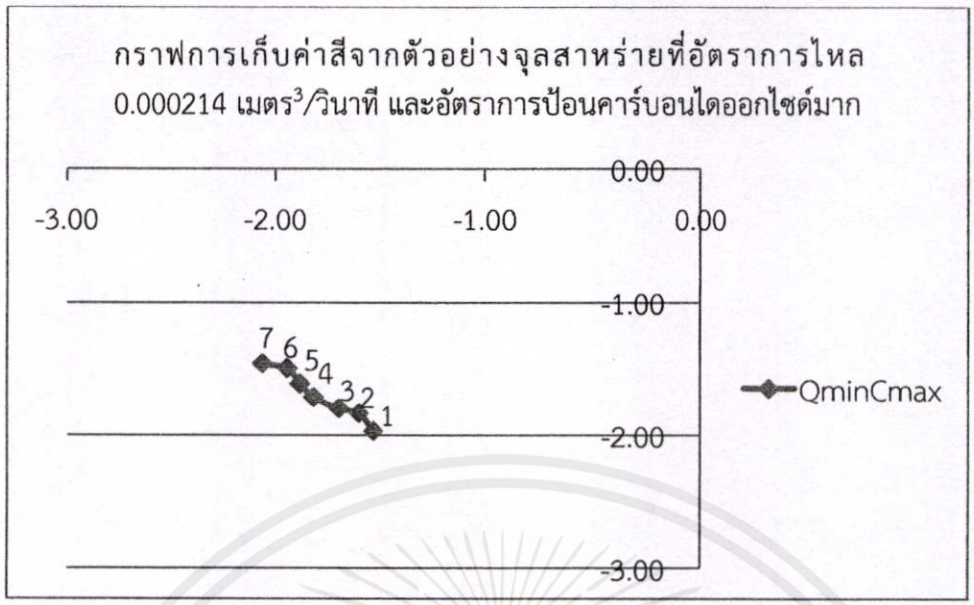


รูปที่ ค.3 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก

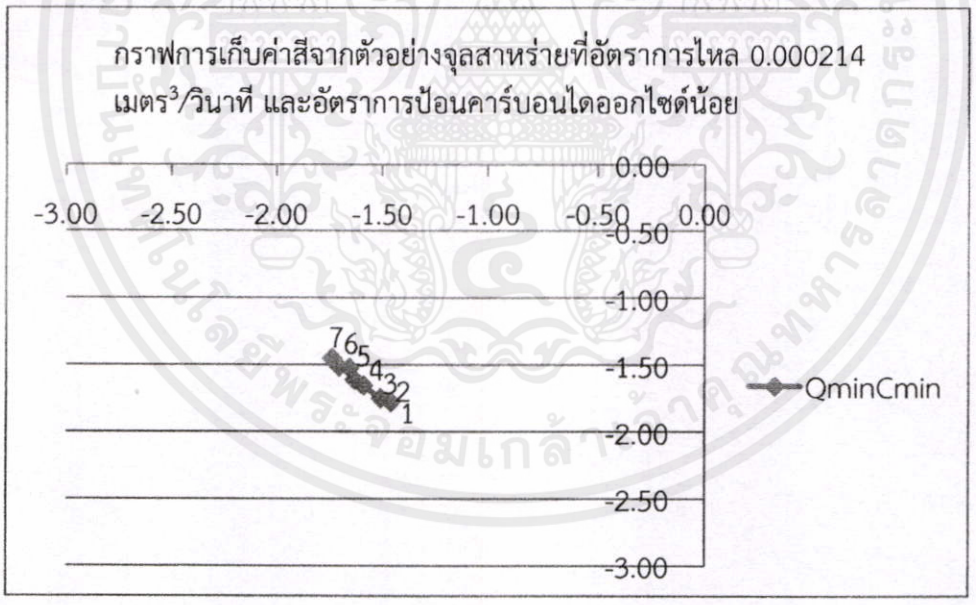


รูปที่ ค.4 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001045 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

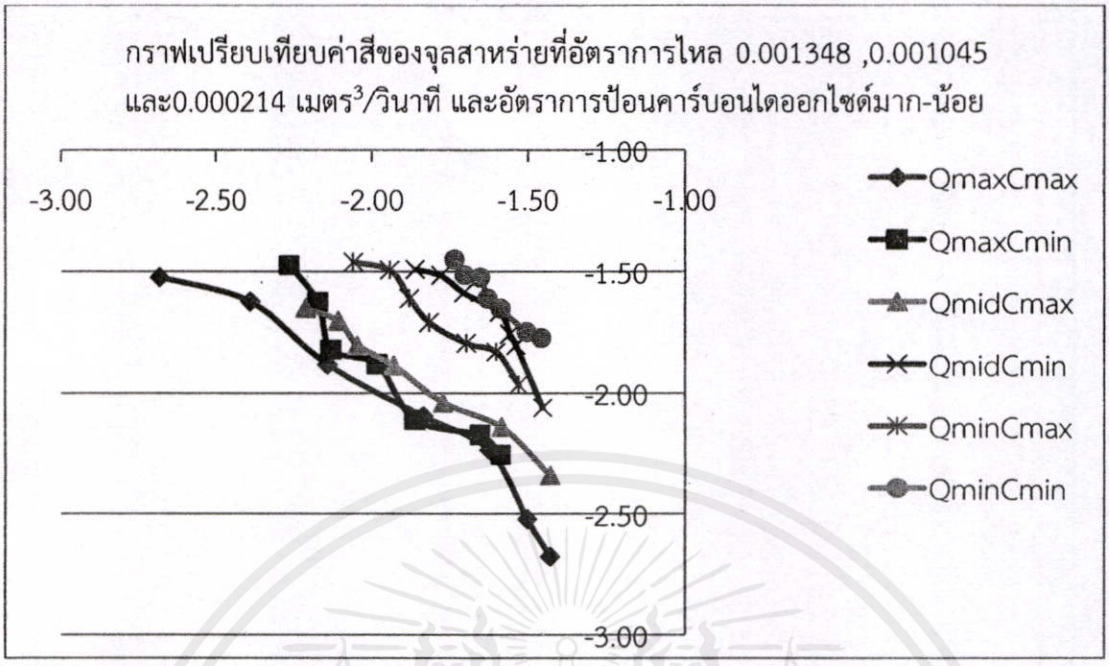


รูปที่ ค.5 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก



รูปที่ ค.6 กราฟการเก็บค่าสีจากตัวอย่างจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.7 กราฟเปรียบเทียบค่าสีของจุลสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.001348 ,0.001045 และ0.000214 เมตร^3/วินาที และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์มาก-น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Y Shen, W Yuan, Z J Pei, Q Wu, E Mao. 2009. Microalgae Mass Production Methods. The Food & Process Engineering Institute Division of ASABE.

[2] J.P. Bito, I.-B. Lee, C.-G. Lee, K.-S. Kimd, H.-S. Hwang, S.-W. Hon, I.-H. Seo, K.-S. Kwon, E. Mostafa. 2010-2011. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production. Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 599, Gwanakno, Gwanakgu, 151-921 Seoul, Republic of Korea.

[3] Benemann, J. R. 1996. The future of microalgae biofuels. Presented at the 2008 Microalgae Biomass Summit. Seattle, Wash.: Algal Biomass Organization.

[4] Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotech. Advances* 25(2): 294-306.

[5] Zhang, K., S. Miyachi, and N. Kurano. 2001. Evaluation of a vertical flat-plate photobioreactor for outdoor biomass production and carbon dioxide bio-fixation: Effects of reactor dimensions, irradiation, and cell concentration on the biomass productivity and irradiation utilization efficiency. *Appl. Microbiol. Biotech.* 55(4): 428-433.

[6] ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์. 2555. "การศึกษาสภาวะการเลี้ยงจุลสาหร่ายที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนและไขมัน".วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 7(2). 62-71.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

7] ภัทระ ทรวงสุรัตนกุล,ณัฐภาส ผู้พัฒน์,สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล, วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา,ประมุข ภระกูล สุขสถิตย์. 2555. การคัดเลือกสาหร่าย Chlorella spp สายพันธุ์ที่มีปริมาณลิพิดสูงเพื่อผลิตไบโอดีเซล. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[8] รศ.ดร.วินัย กล้าจริง. หนังสือกลศาสตร์ของไหล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้