

การพัฒนาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ
ภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

การพัฒนาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ
ภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ
ภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี

ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรพรรณ นิรัฐศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ ภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี
ชื่อผู้เขียน	นายธัญวัฒน์ กลั่นควัฒน์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และประเมินศักยภาพของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงแอลอีดี ที่มีความจุ 200 L ใช้ระบบหมุนวนน้ำสาหร่ายโดย ป้อนน้ำขนาด 1 นิ้ว กำลัง 1 แรงม้า 3 เฟส ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ใช้ระบบเติมก๊าซใช้เวเนจูรีขนาด 1 นิ้ว ทดสอบที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเข้าระบบที่ 0.1 L/min เป็นเวลา 12 hr สลับการเติมอากาศ 6 L/min เป็นเวลา 12 hr ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่ายในระบบ 3 ระดับ ได้แก่ 20 29 และ 37 L/min ให้แสงสว่างด้วย LED COB สีแดง (646 nm) สีน้ำเงิน (451 nm) และสีแดงผสมน้ำเงิน (453, 648 nm) ติดตั้งบนท่อกล่องอะลูมิเนียมสูง 0.8 m กระจายแสงให้กับท่อ PVC ในขนาด 1.5 inch ยาว 36 m พันรอบโครงสร้างเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 m จำนวน 20 รอบ เพื่อเป็นพื้นที่ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ใช้เวลาเลี้ยง 6 วัน พบว่า แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 L/min มีความเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* มากกว่า แสงสีแดงและแสงน้ำเงิน โดยให้อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1.876 day^{-1} ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด $35.78 \times 10^6 \text{ cell/mL}$ น้ำหนักแห้งของสาหร่ายวันสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.44 g/L สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ โดยมีสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเหลือ 16.2-19.7 % คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 58.9 % ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 55.3-61.7 % เป็น 67.1-71.7 % คิดเป็นประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.4 % มีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของระบบต่อรอบการเลี้ยง 6 วัน จะมีค่าใช้จ่าย 557.77 Baht สามารถผลิตสาหร่าย 88 g และกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 71 g ต่อการผลิต 1 ครั้ง คิดเป็นต้นทุนในการผลิตสาหร่ายเท่ากับ 6.34 Baht/g

คำสำคัญ : กำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, โฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด, แสงแอลอีดี, คลอเรลล่า

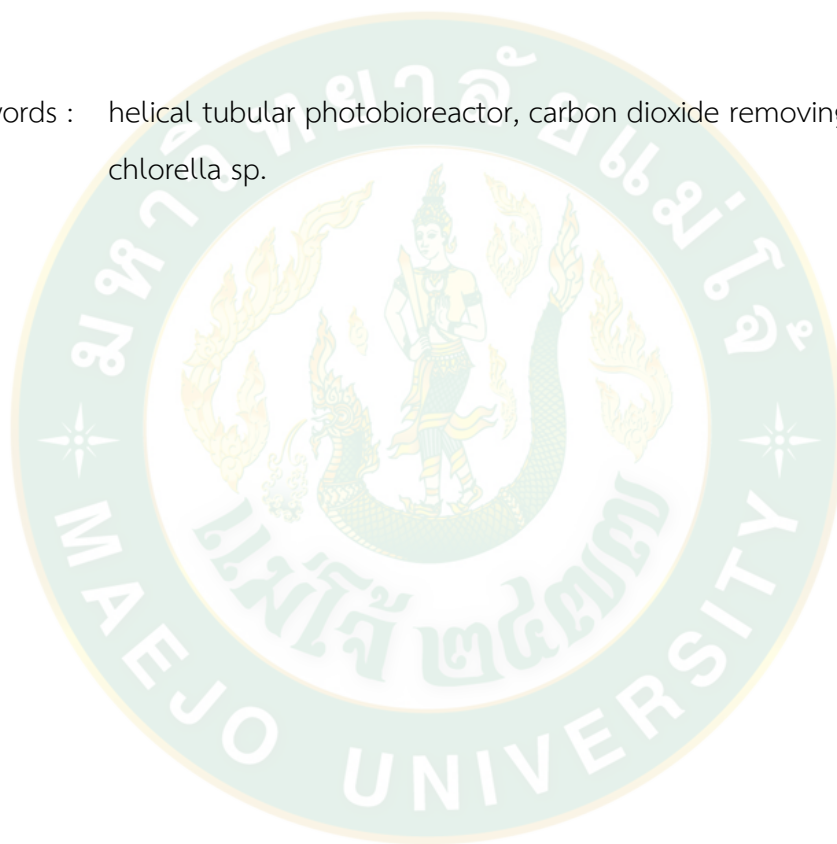
Title	DEVELOPMENT OF A CARBON DIOXIDE REMOVING SYSTEM FROM BIOGAS UNDER MICROALGAE CULTIVATION IN LED LIGHTING CONDITION
Author	Mr. tanyawat klancoowat
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Chawaroj Jaisin

ABSTRACT

The objectives of this research are to design, build and evaluate the potential of the carbon dioxide removal system from biogas under *Chlorella sp.* cultivation in the LED helical tubular photobioreactor that has a capacity of 200 liters of water. The water flow system of this system is dependent on the water pump (1 inch 1 HP 3 Phase) and controlled by speed inverter to control flow rate of water. Bio gas is filled via 1 inch venturi. The flow rate testing of bio gas is evaluated under 0.1 L/min of biogas flow rate for 12 hr, 6 L/min of air flow rate for 12 hr and the flow rates of water are 20, 29 and 37 L/min. The red LED COB (646 nm), blue LED COB (451 nm) and red mixing blue (453, 648 nm) are installed on aluminum heat sink that has 0.8 m of height to radiate the LED lighting to the PVC helical tubular (1.5 inch) wrapped around cylinder frame (0.6 m of diameter) for 20 rounds. The PVC helical tubular is algae cultivation area. The algae is cultivated in the helical tubular photobioreactor for 6 days under 3 color of LED and 3 flow rate of water. During the operation, the potentiality of the system, CO₂ Removal from Biogas and increasing methane are evaluated. The experimental results show that, the cultivation under red mixing blue LED and 20 L/min of flow rate has a better CO₂ removal data than other conditions and has the highest of algae growth rate at 1.876 day⁻¹. Density of algae cells is 35.78×10⁶ cell/mL and dry weight of bio mass at last day is 0.44 g/L. Regarding the potential of carbon dioxide elimination from biogas the proportion of

carbon dioxide tends to decrease after passing through the system around 16.2-19.7%, The highest carbon dioxide removal efficiency at 58.9%. Henceforth causing the proportion of methane to increase from 55.3-61.7% to 67.1-71.7%. The highest efficiency percentage of increased methane yield is 22.4%. The electrical energy consumption for 6 days cavitation is 557.77 Baht. This system could produce the dry algae at 88 g and could remove the carbon dioxide equivalent at 71 g during one cultivation cycle. Economically, the cost of algae production is 6.34 Baht/g.

Keywords : helical tubular photobioreactor, carbon dioxide removing, LED light, chlorella sp.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวโรจันน์ ใจสิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้กรุณามอบความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในการศึกษาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รจพรรณ นิรัญศิลป์ ที่กรุณาให้คำแนะนำความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์นี้อย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิรินุช จินดารักษ์ ที่สละเวลาอันมีค่าให้เกียรติมาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาภายใต้โครงการ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” เป็นอย่างสูง สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
สารบัญตารางผนวก.....	ต
สารบัญภาพผนวก.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	4
ก๊าซชีวภาพ.....	4
กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	4
ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	6
ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบแบบกวนสมบูรณ์.....	8
การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ.....	9
เทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพทางกายภาพและเคมี.....	9
เทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพทางชีวภาพ.....	12

สาหร่ายคลอเรลล่า (<i>Chlorella sp.</i>)	13
ข้อมูลทั่วไปของก๊าซชีวภาพสาหร่าย <i>Chlorella sp</i>	13
กลไกในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก.....	15
ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก	16
ระยะของการเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	19
ระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเล็ก	21
ระบบบ่อเปิด	21
ระบบปิดหรือระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์.....	22
แสงเทียมที่ใช้กับการผลิตสาหร่ายขนาดเล็ก.....	26
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
ออกแบบและสร้างระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยง	
สาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED.....	33
ระบบถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่าย	34
ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	34
ระบบให้แสงสว่างและพื้นที่ในการสังเคราะห์แสง	36
ระบบการหมุนวนน้ำและก๊าซชีวภาพ.....	41
การเตรียมสาหร่าย	43
การเตรียมก๊าซชีวภาพ	45
ทดสอบและวิเคราะห์ระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยง	
สาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED.....	45
การวิเคราะห์การเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย	47
การวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลของสาหร่าย.....	48
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย	49

การวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ.....	50
การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์.....	51
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผล.....	53
ผลการออกแบบและระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด.....	53
ผลและวิเคราะห์ผลช่วงคลื่นแสงและอัตราการไหลน้ำสาหร่ายต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย และปริมาณชีวมวลของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	55
ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 20 L/min.....	55
ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 29 L/min.....	57
ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 37 L/min.....	59
วิเคราะห์ช่วงคลื่นแสงและอัตราการไหลน้ำสาหร่ายต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	61
ผลและวิเคราะห์ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพ.....	70
ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราการไหล 20 L/min.....	70
ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราการไหล 29 L/min.....	74
ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบที่อัตราการไหล 39 L/min.....	78
วิเคราะห์ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพ.....	82
ผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์.....	86
ผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด.....	87
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	92
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	92
ข้อเสนอแนะ.....	93
บรรณานุกรม.....	94

ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก ผลการของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยง สาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	99
ผลการทดสอบที่อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 20 L/min	100
ผลการทดสอบอัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 29 L/min.....	106
ผลการทดสอบอัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 37 L/min.....	112
ภาคผนวก ข แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด	118
ภาคผนวก ค การเผยแพร่งานวิจัย	120
บทความทางวิชาการฉบับที่ 1	121
บทความทางวิชาการฉบับที่ 2	131
บทความทางวิชาการฉบับที่ 3	140
ประวัติผู้วิจัย.....	143



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ความสามารถการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก	12
ตารางที่ 2 ระบบให้แสงสว่างที่ใช้ในสังเคราะห์แสงของแสงทั้ง 3 สี	40
ตารางที่ 3 รายละเอียดจุดวัด ของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงLED	46
ตารางที่ 4 กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด ที่สภาวะต่างๆ.....	54
ตารางที่ 5 ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดที่สภาวะต่างๆ.....	55
ตารางที่ 6 รายละเอียดค่าใช้จ่ายต่อการผลิตสาหร่าย	86
ตารางที่ 7 ข้อมูลในสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด	88



สารบัญภาพ

ภาพที่ 1	กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ	5
ภาพที่ 2	ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์.....	9
ภาพที่ 3	เทคโนโลยีการดักจับด้วยน้ำ (Water scrubbing).....	10
ภาพที่ 4	เทคโนโลยีการดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (Pressure swing absorption)	11
ภาพที่ 5	ระบบเลี้ยงสาหร่ายแบบ high rate algal ponds	13
ภาพที่ 6	ลักษณะของ <i>Chlorella sp.</i>	14
ภาพที่ 7	การขนส่งสารอนินทรีย์และการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเซลล์ของสาหร่าย....	16
ภาพที่ 8	อัตราการเติบโตต่อความเข้มแสงแสง	17
ภาพที่ 9	อนินทรีย์คาร์บอนที่ค่า pH ที่แตกต่าง.....	19
ภาพที่ 10	ระยะของการเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	20
ภาพที่ 11	ระบบเลี้ยงแบบบ่อเปิด	21
ภาพที่ 12	ระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบ Bubble column.....	22
ภาพที่ 13	ระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบ Airlift.....	23
ภาพที่ 14	ระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบ Flat panel.....	24
ภาพที่ 15	ระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบ Horizontal tubular.....	25
ภาพที่ 16	ระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อนขด Helical tubular photobioreactor.....	25
ภาพที่ 17	ระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบ Stirred tank	26
ภาพที่ 18	การทำงานของLED.....	27
ภาพที่ 19	ช่วงคลื่นแสง LED.....	28
ภาพที่ 20	ช่วงคลื่นแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดต่างๆ	28
ภาพที่ 21	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
ภาพที่ 22	การทำงานของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED.....	33

ภาพที่ 23 ระบบถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่าย	35
ภาพที่ 24 ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์	35
ภาพที่ 25 การติดตั้ง LED สีน้ำเงินผสมแดง LED COB และ LED SMD 5050	37
ภาพที่ 26 ชุดทดสอบความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงของ LED COB และ LED SMD	37
ภาพที่ 27 การติดตั้งหลอด LED และท่อขจัดรับแสง	38
ภาพที่ 28 LED COB บนท่ออะลูมิเนียมและการวัดช่วงความยาวคลื่นแสง	39
ภาพที่ 29 แสงจากหลอด LED COB ทั้ง 3 สี ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขจัด	39
ภาพที่ 30 ความยาวคลื่นแสงสีแดง สีน้ำเงิน และสีแดงผสมน้ำเงิน	39
ภาพที่ 31 วัสดุที่บดแสงครอบชุดท่อขจัดรับแสง	40
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำสาหร่ายกับอัตราการไหลก๊าซของเวนจูรี่	42
ภาพที่ 33 ระบบการหมุนวนน้ำและก๊าซชีวภาพ	42
ภาพที่ 34 ภาพขยายเซลล์ <i>Chlorella sp.</i> ที่ใช้ในการทดลอง	43
ภาพที่ 35 การขยายพันธ์สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> และสารอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง	44
ภาพที่ 36 สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้น	44
ภาพที่ 37 ระบบก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ระบบหมักแบบต่อเนื่อง	45
ภาพที่ 38 จุดตรวจวัดของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยง สาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงLED	46
ภาพที่ 39 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่าย	47
ภาพที่ 40 การนับจำนวนเซลล์สาหร่ายโดยใช้แผ่นนับเซลล์ Hemocytometer	48
ภาพที่ 41 การวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลของสาหร่าย	49
ภาพที่ 42 วัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างและอุณหภูมิของน้ำสาหร่าย	50
ภาพที่ 43 การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	51
ภาพที่ 44 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขจัด	53
ภาพที่ 45 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขจัดขณะเปิดแสง LED	54

ภาพที่ 46 ความหนาแน่นของสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min.....	56
ภาพที่ 47 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min.....	56
ภาพที่ 48 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min.....	57
ภาพที่ 49 ความหนาแน่นของสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min.....	58
ภาพที่ 50 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min.....	58
ภาพที่ 51 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min.....	59
ภาพที่ 52 การเจริญเติบโตของสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min	60
ภาพที่ 53 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min.....	60
ภาพที่ 54 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min.....	61
ภาพที่ 55 ช่วงคลื่นแสงสีแดงผสมน้ำเงินจากหลอด LED ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด. 62	
ภาพที่ 56 ช่วงคลื่นแสงสีแดงจากหลอด LED ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด.....	62
ภาพที่ 57 ช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงินจากหลอด LED ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด	63
ภาพที่ 58 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่เงื่อนไขต่างๆ	63
ภาพที่ 59 น้ำหนักชีวมวลแห้งของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่เพาะเลี้ยงในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในวันสุดท้ายของการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ.....	64
ภาพที่ 60 ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด	66
ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่แสงสีต่างๆ	67
ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับน้ำหนักชีวมวลแห้งที่แสงสีต่างๆ	68
ภาพที่ 63 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 L/min.....	68
ภาพที่ 64 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 29 L/min.....	69
ภาพที่ 65 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 37 L/min.....	69
ภาพที่ 66 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดง ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min	70

ภาพที่ 80 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ ชุดแสงสีน้ำเงินที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min.....	79
ภาพที่ 81 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุดแสง สีน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min.....	80
ภาพที่ 82 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ ชุดแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min	81
ภาพที่ 83 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุดแสงสีแดง ผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min.....	81
ภาพที่ 84 เปร้เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดที่คลื่นแสงและอัตราการไหลต่างๆ.....	82
ภาพที่ 85 ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่คลื่นแสงและอัตราการไหล ต่างๆ.....	83
ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อชุดกับประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่แสงสีต่างๆ	84
ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อชุดกับประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม ก๊าซมีเทนสูงสุดที่แสงสีต่างๆ.....	85
ภาพที่ 88 กราฟความสัมพันธ์ของผลของสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลต่างๆ ในโปรแกรม Microsoft Excel	88
ภาพที่ 89 กราฟความสัมพันธ์ของผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการไหล ต่างๆ ในโปรแกรม Microsoft Excel.....	89
ภาพที่ 90 กราฟความสัมพันธ์ของผลของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายที่อัตราการไหลต่างๆ ใน โปรแกรม Microsoft Excel.....	90
ภาพที่ 91 กราฟความสัมพันธ์ของผลของผลน้ำหนักรวมของสาหร่ายสูงสุดที่อัตราการไหลต่างๆ ในโปรแกรม Microsoft Excel.....	91

สารบัญตารางผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่ 20 L/min	100
ตารางภาคผนวกที่ 2 ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min.....	101
ตารางภาคผนวกที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 L/min	102
ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลของอุณหภูมิน้ำสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min.....	103
ตารางภาคผนวกที่ 5 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหล 20 L/min.....	104
ตารางภาคผนวกที่ 6 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่ 29 L/min	106
ตารางภาคผนวกที่ 7 ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสาหร่าย 29 L/min.....	107
ตารางภาคผนวกที่ 8 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 29 L/min	108
ตารางภาคผนวกที่ 9 ผลของอุณหภูมิน้ำสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min.....	109
ตารางภาคผนวกที่ 10 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 29 L/min.....	110
ตารางภาคผนวกที่ 11 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่ 37 L/min	112
ตารางภาคผนวกที่ 12 ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min	113
ตารางภาคผนวกที่ 13 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 37 L/min.....	114
ตารางภาคผนวกที่ 14 ผลของอุณหภูมิน้ำสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min.....	115
ตารางภาคผนวกที่ 15 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 37 L/min.....	116

สารบัญภาพผนวก

ภาพภาคผนวกที่ 1 การสร้างสมการการใน Microsoft Excel 2013..... 119



บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ก๊าซชีวภาพจัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion, AD) ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ร้อยละ 50-70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30-50 และก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) การที่จะนำก๊าซชีวภาพมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับยานพาหนะนั้น ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์เครื่องยนต์ธรรมดา ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2561 ก๊าซมีเทนไม่ต่ำกว่า 65 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกิน 15% เพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนก๊าซมีเทนสูงขึ้น จึงต้องมีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออก เนื่องจากเป็นก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในการเผาไหม้ลดลง โดยเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพจะแบ่งออกเป็น 2 เทคโนโลยี คือ 1. เทคโนโลยีทางกายภาพเคมี 2. เทคโนโลยีทางชีวภาพ เทคโนโลยีการปรับปรุงก๊าซชีวภาพทางชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีที่ว่าด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สามารถจะเปลี่ยนเป็นพลังงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ในสภาวะการทำงานที่ไม่รุนแรง เช่น ทำงานที่ความดันบรรยากาศ ระดับอุณหภูมิปานกลาง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยสาหร่ายขนาดเล็กมีความสามารถในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และออกซิเจน จากกระบวนการสังเคราะห์แสง (Angelidaki และคณะ, 2018) โดยสาหร่ายขนาดเล็กมีหลากหลายสายพันธุ์ แต่สายพันธุ์ที่มีความน่าสนใจในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ สาหร่าย *Chlorella sp.*

สาหร่าย *Chlorella sp.* เป็นสาหร่ายสีเขียวเซลล์เดียวมีความสามารถสูงในการบำบัดน้ำเสีย พบได้ตามแหล่งน้ำจืดและน้ำเค็มทั่วไป (Jing และคณะ, 2007) สามารถเติบโตได้ภายใต้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 40% (Sakai และคณะ, 1995) สามารถเพิ่มค่าออกซิเจน (DO) ในน้ำได้ (Vo และคณะ, 2018) สาหร่าย *Chlorella sp.* มีปริมาณไขมันที่สามารถเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกได้ในการผลิตไบโอดีเซล (Pandian และRavindran, 2012) จากงานวิจัยของ (Yan และ

Zheng, 2013) สามารถเพิ่มสัดส่วนของ CH_4 หลังการปรับปรุงด้วยสาหร่าย *Chlorella sp.* คือ 92% มีประสิทธิภาพในการลดคาร์บอนไดออกไซด์ 86% และ (Esther. Posadas และคณะ, 2017) สามารถเพิ่มสัดส่วนของ CH_4 ได้ถึง 94% มีประสิทธิภาพการลดคาร์บอนไดออกไซด์ 95% เป็นต้น

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถเลี้ยงได้ทั้งระบบเปิด (Open pond) และระบบปิดระบบบ่อปิดโฟโตไบโอรีแอคเตอร์ (Closed photobioreactor) แต่ละระบบจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น ระบบเปิดแบบบ่อร่องน้ำ (Raceway pond) เป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำ ทำความสะอาดและซ่อมบำรุงง่ายแต่ให้ผลผลิตที่ต่ำต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ปนเปื้อนได้ง่าย ระบบปิดโฟโตไบโอรีแอคเตอร์จะเป็นระบบที่ให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูง ไม่มีการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมให้แสงได้ทั่วถึง ชนิดระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างและรูปทรงของระบบที่ทำขึ้น เช่น แบบแผ่นแบบทรงกระบอก และแบบท่อ (ซิฆนุงค์ ประทุม, 2558) รูปแบบของระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อขด (Helical tubular photobioreactor) เป็นระบบที่ความน่าสนใจในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพราะเป็นระบบที่มีท่อที่ยาว จึงกระจายอากาศหรือคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับสาหร่ายขนาดเล็กในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ มีพื้นที่รับแสงมากให้ปริมาณชีวมวลที่ดี แต่จะมีการเกาะของสาหร่ายที่ผนังท่อ (Briassoulis และคณะ, 2010) การเพาะเลี้ยงในระบบปิดยังสามารถประยุกต์ใช้แสงเทียมจากหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือหลอด LED (Light emitting diode) การใช้หลอด LED สามารถปรับช่วงแสงและความเข้มแสงที่สาหร่ายขนาดเล็กต้องการได้ดีกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Pawar, 2016) โดยมีงานวิจัยที่ทดลองสัดส่วน LED สีแดงต่อสีน้ำเงินที่ทำให้สาหร่าย *Chlorella sp.* เพิ่มอัตราส่วนก๊าซมีเทนมากกว่า 90% คือ 3:7 5:5 และ 7:3 เลี้ยงในหลอดโฟโตไบโอรีแอคเตอร์ (Yan และ Zheng, 2014)

จากข้อมูลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซชีวภาพโดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* เลี้ยงในระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED เพื่อหาความสามารถของระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อขดในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซชีวภาพ รวมถึงปริมาณการผลิตชีวมวล โดยเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสงจากหลอด LED ที่ความเข้มและช่วงคลื่นแสงสีต่างๆ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED
2. เพื่อหาค่าศักยภาพของระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED ในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณการผลิตชีวมวลของระบบ

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED
2. ทาศักยภาพของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED ในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณการผลิตชีวมวลของระบบ
3. ใช้ก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ระบบหมักแบบต่อเนื่อง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
4. ในการเพาะเลี้ยงภายใต้ช่วงคลื่นแสง 3 สี และอัตราการไหลของสาหร่ายในระบบ 3 ระดับ
5. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ในการทำนายศักยภาพของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED ใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.*
2. ได้ทราบศักยภาพของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED ในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณการผลิตชีวมวลของระบบ
3. ได้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้สาหร่ายขนาดเล็กในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

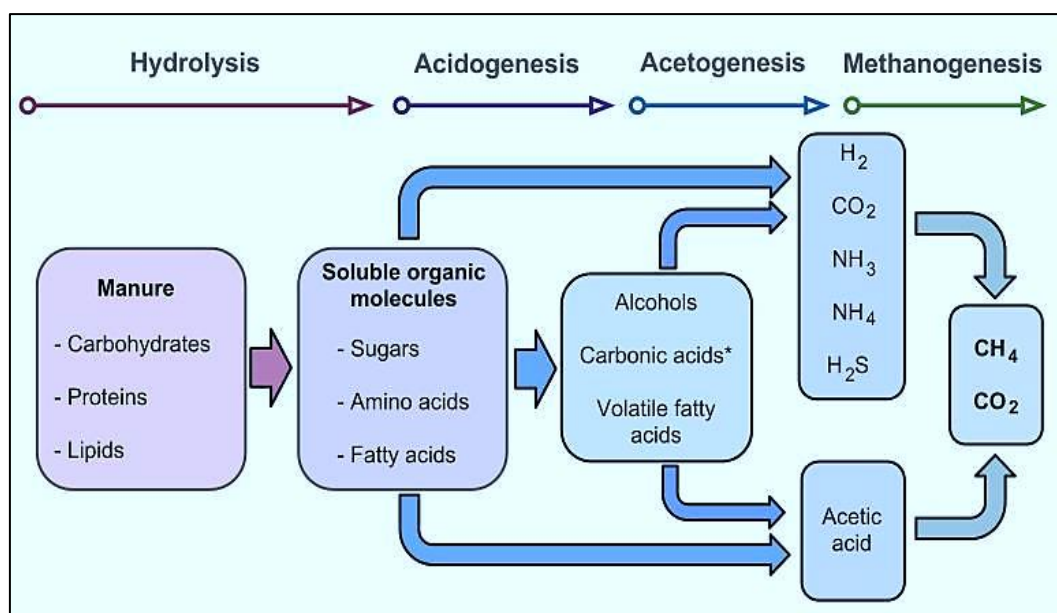
ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสารใช้ประกอบการทำงานวิจัย ประกอบด้วย ก๊าซชีวภาพ การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ สาหร่าย *Chlorella sp.* ระบบการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก LED ที่ใช้กับการผลิตสาหร่ายขนาดเล็ก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน โดยแบคทีเรียไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) จะได้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพในรูปของก๊าซสารประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50 - 70 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30 - 50 % และก๊าซอื่นๆแล้วแต่ว่าวัตถุดิบตั้งต้นคืออะไร เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการนี้แล้วให้ก๊าซชีวภาพ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ขยะมูลฝอยและเศษอาหารจากภาคชุมชน และพืชพลังงาน ซึ่งก๊าซมีเทนประมาณ 60% ได้ค่าความร้อน 20.93 MJ/m^3 สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.55 L ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.46 L ดีเซล 0.60 L และเบนซิน 0.67 L ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 1.2-2.2 kWh (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยมีจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย เช่น จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methane producing bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid producing bacteria) มาช่วยย่อยในสภาวะไร้อากาศ ในกระบวนการย่อยในสภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ต่างๆ ทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ ลงจากสิ่งมีชีวิตซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลงเป็นขั้นๆ ไป ขั้นตอนและปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา: Jonathan, (2014)

การย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis)

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ความเร็วของกระบวนการย่อยสลายขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย รวมถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัส ระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น (Jonathan, 2014)

การสร้างกรด (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้ สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ของการย่อยในขั้นแรก จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยแบคทีเรียสร้างกรดโดยกรดที่เกิดขึ้นจะมีกรดอะซิติกสูงสุดในปริมาณที่มากที่สุด และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างกรดจะสูงและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากกระบวนการสร้างมีเทนส่วนใหญ่ต้องการใช้กรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้น (Jonathan, 2014)

การสร้างกรดกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มีหลายชนิด ซึ่งบางชนิดแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ โดยเป็นกรดไขมันระเหยง่ายขนาดใหญ่ เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ประเภทนี้ในระบบ ธรรมชาติจึงได้สร้างกระบวนการในการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายที่มีขนาดใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis) ซึ่งช่วยทำให้ไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ (Jonathan, 2014)

การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ก๊าซมีเทนจะสร้างจากกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ได้จากกระบวนการสร้างกรด โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane former bacteria) การสร้างก๊าซมีเทน มี 2 แบบ แบบแรกเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน คิดเป็น 70% ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้ในระบบ อีกแบบหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน แบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทน เจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ช่วงค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียแคบ โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH ประมาณ 6.8 - 7.2 นอกจากนี้อุณหภูมิก็มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตเช่นกัน อีกทั้งแบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องการสารอาหารที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนในการดำรงชีพ ดังนั้นการเติบโตของแบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนจึงขึ้นอยู่กับการทำงานของแบคทีเรียในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด โดยแบคทีเรียทุกกลุ่มต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน (Jonathan, 2014)

ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตก๊าซจากบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับความสามารถของแบคทีเรียในการเจริญเติบโตภายในบ่อหมัก ความอยู่รอดของแบคทีเรียโดยปัจจัยและสภาพแวดล้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ดังนี้

อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง $20\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า

45 °C การย่อยสลายสารอินทรีย์มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดีคือ ช่วง 30–38 °C และช่วง 48–57 °C (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอช เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ค่าพีเอช ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6–7.4 ซึ่งเป็นค่าพีเอชของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน พบว่าในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ โดยสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชภายในระบบ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยถ้ามีการป้อนสารอินทรีย์เข้าไปในปริมาณมากเกินไป ก็จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก จนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ ส่งผลทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่ดี เพื่อป้องกันกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ หากระบบมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มากพอก็จะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่างในระบบได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ความเป็นความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างและยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือ ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความเป็นกรด-ด่างได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยพบว่าค่าความเป็นด่างภายในระบบควรมีอยู่ในช่วง 1,000–3,000 mgCaCO₃/L ค่าความเป็นด่างที่มีในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนควรจะต่ำกว่า 1,000 mgCaCO₃/L ที่จะช่วยต้านทานกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติ จำเป็นต้องรักษาค่าความเป็นด่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไป เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริก และ

กรดโพธิอิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่า ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก ($> 2,000$ mg acetic acid / L) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นต่างของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง ต่อมาค่าความเป็นกรด-ต่างของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ต่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากค่าความเป็นกรด-ต่างลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียดุลเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 mg acetic acid / L และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นต่างไม่ควรเกิน 0.3-0.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

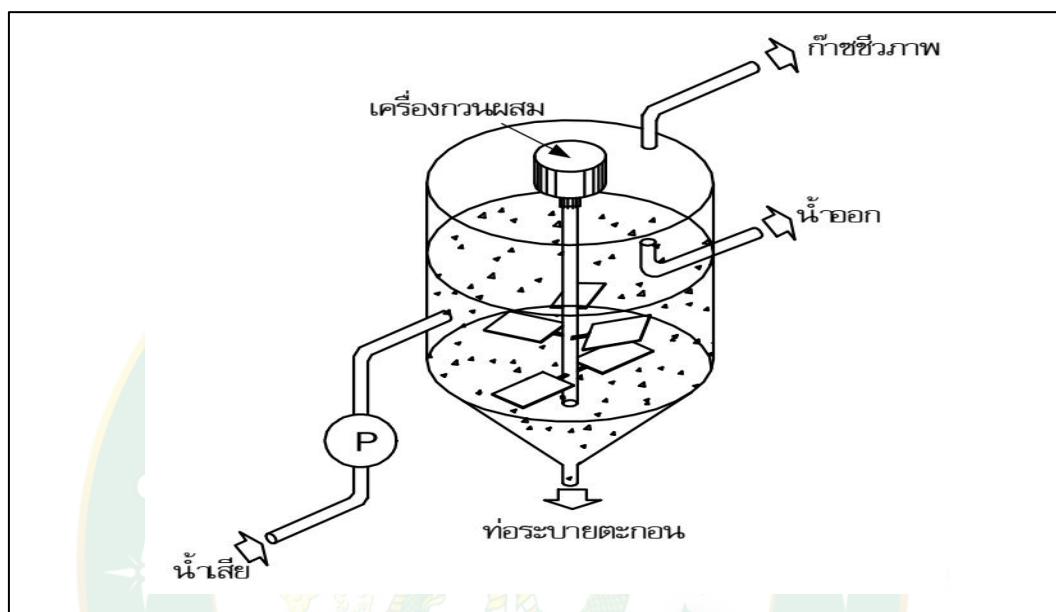
สารพิษและสารยับยั้งปฏิกิริยา (Toxic)

ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) กาเจริญเติบโต จนถึงทำให้แบคทีเรียตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลง การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่างๆ พิษของแอมโมเนียออน (NH_4^+) เป็นต้นสำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (Trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนผสม

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนผสม (Continuously Stirred Tank Reactor ; CSTR) เป็นระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ที่มีการเลี้ยงตะกอนในรูปของสารแขวนลอยโดยมีเครื่องกวนผสมเพื่อทำให้แบคทีเรียและน้ำเสียผสมกันได้อย่างทั่วถึงไม่เกิดการไหลลัดทางหรือมีบริเวณที่ไม่ได้รับสารอินทรีย์ ระบบบำบัดน้ำเสียลักษณะนี้เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง นอกจากนี้การที่ระบบมีการกวนผสมกันอย่างทั่วถึงทั้งถังสามารถช่วยลดความรุนแรงของสารพิษที่อาจหลุดเข้ามาในระบบได้ เนื่องจากเกิดการเจือจางโดยน้ำเสียที่อยู่ในถังแต่อย่างไรก็ตามการที่ระบบมีเวลากักเก็บตะกอนเท่ากับเวลากักเก็บน้ำ ทำให้มีความสามารถในการรับสารอินทรีย์ได้ต่ำเมื่อ

เปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในแบบอื่นๆ ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจำเป็นต้องขยายถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) ซึ่งรายละเอียดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2554)

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน 50-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30-50% และไฮโดรเจนซัลไฟด์ การที่จะนำก๊าซชีวภาพมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับยานพาหนะนั้น ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับก๊าซธรรมชาติ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพจะแบ่งออกเป็น 2 เทคโนโลยี (Angelidaki และคณะ, 2018)

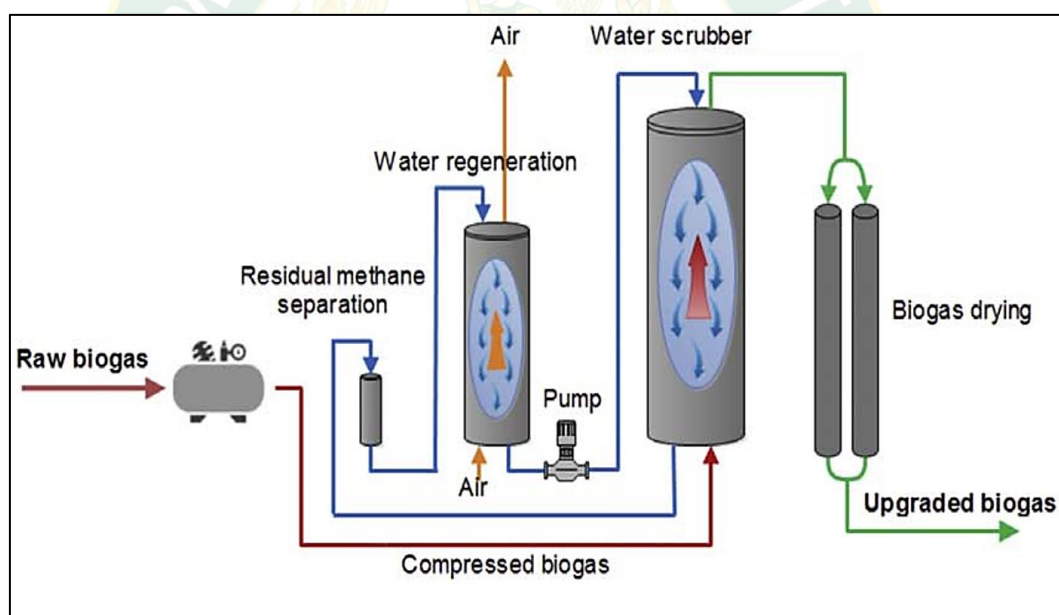
เทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพทางกายภาพและเคมี

ปัจจุบันสำหรับการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพให้ได้

ก๊าซมีเทนในระดับความเชิงพาณิชย์ โดยแต่ละกระบวนการทางเคมีกายภาพของแต่ละเทคโนโลยีสามารถเพิ่มก๊าซมีเทนได้มากกว่า 96% เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมีในปัจจุบัน (Angelidaki และคณะ, 2018) แบ่งออก

เทคโนโลยีการดักจับด้วยน้ำ (Water scrubbing)

เทคโนโลยีการดักจับด้วยน้ำ ใช้คุณสมบัติการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าก๊าซมีเทน ซึ่งเมื่อก๊าซชีวภาพผ่านระบบดักจับด้วยน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายในน้ำในขณะที่ความเข้มข้นของมีเทนจะเพิ่มขึ้น 96-98 % (Angelidaki และคณะ, 2018) น้ำที่ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อิ่มตัวแล้ว จะถูกนำมากำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำด้วยอากาศและวนน้ำนำกลับไปใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพอีกครั้ง ดังภาพที่ 3



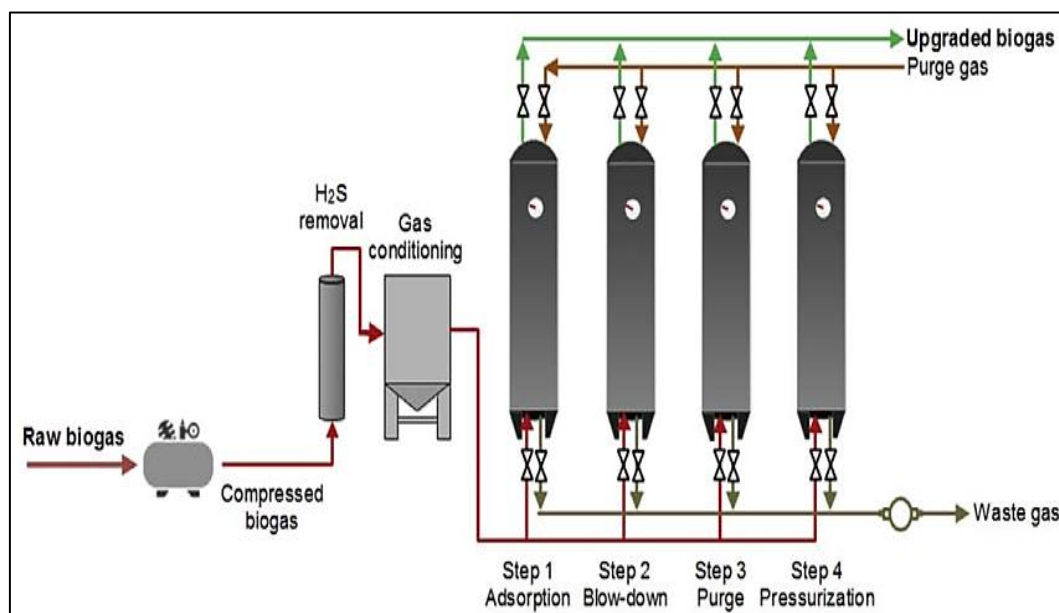
ภาพที่ 3 เทคโนโลยีการดักจับด้วยน้ำ (Water scrubbing)

ที่มา: Angelidaki และคณะ, (2018)

เทคโนโลยีการดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (Pressure swing absorption)

เทคโนโลยีนี้แยกก๊าซตามลักษณะโมเลกุล โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ (Zeolites) และวัสดุอื่น ๆ ที่มีรูพรุนพื้นที่ผิวสูง เทคโนโลยีการดูดซับโดยการเปลี่ยนความดันจะมี

แรงดันก๊าซชีวภาพระหว่างทำงานอยู่ที่ 3-10 bar เมื่อผ่านถึงดักจับก๊าซทั้ง 4 ถึง สามารถเพิ่มสัดส่วนมีเทนได้ถึง 96-98 % (Angelidaki และคณะ, 2018)



ภาพที่ 4 เทคโนโลยีการดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (Pressure swing absorption)

ที่มา: Angelidaki และคณะ, (2018)

เทคโนโลยีการดูดซับด้วยสารละลายเอมีน (Chemical absorption)

การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารเคมี สารละลายเอมีน เพื่อจับโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ ข้อดีของเทคโนโลยีนี้ คือ H_2S สามารถดูดซับได้อย่างสมบูรณ์ในระบบ ที่ความดัน 1-2 bar สามารถเพิ่มสัดส่วนมีเทนได้ถึง 96-99 % ซึ่งสามารถนำสารละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120-160 °C (Angelidaki และคณะ, 2018)

เทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation)

ก๊าซชีวภาพจะไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านโดยตรงที่มีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 1 nm ซึ่งอัตราการแพร่ของมีเทนที่ไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านจะต่ำกว่าอัตราการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้มีเทนและก๊าซอื่นๆ ถูกแยกออกจากกัน ได้โดยมักจะต่อผ่านเยื่อเลือกผ่านแบบอนุกรมเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแยกก๊าซมีเทนสูงถึง 96 % (Angelidaki และคณะ, 2018)

เทคโนโลยีการแยกโดยใช้อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic)

การแยกโดยใช้อุณหภูมิต่ำเริ่มจากการบีบอัดก๊าซชีวภาพดิบสูงถึง 80 bar ตามด้วยอุณหภูมิต่ำลงถึง $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะกลายเป็นของเหลวและแยกก๊าซมีเทนบริสุทธิ์มากกว่า 97% แม้จะมีผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจ แต่กระบวนการแย่งชิงยังคงอยู่ระหว่างการพัฒนา เพราะมีค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนและการดำเนินงานที่สูง (Angelidaki และคณะ, 2018)

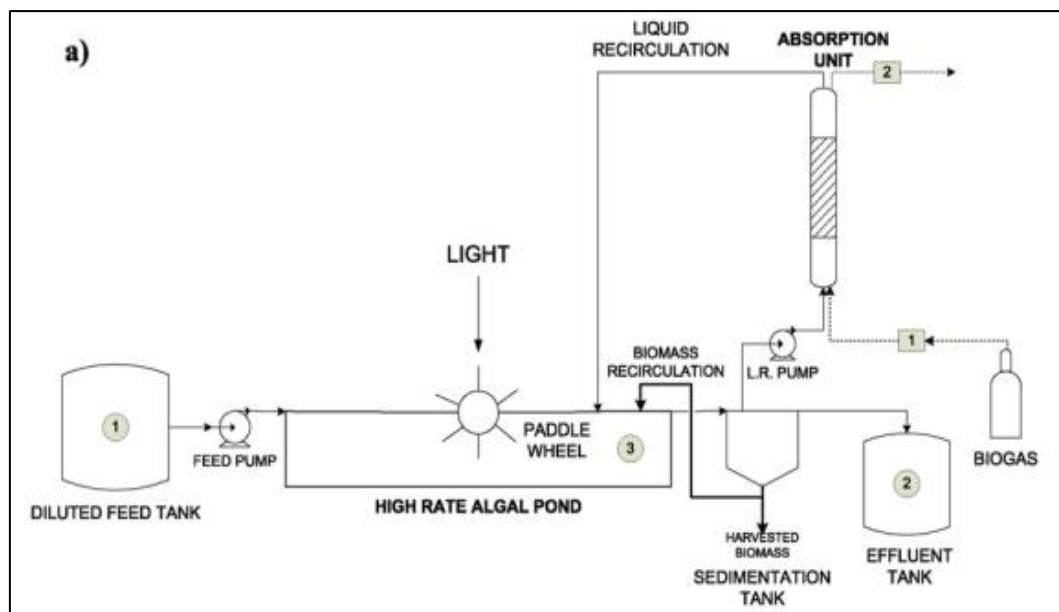
เทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพทางชีวภาพ

เทคโนโลยีการปรับปรุงก๊าซชีวภาพทางชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีที่ว่าด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สามารถจะเปลี่ยนเป็นพลังงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ในสภาวะการทำงานที่ไม่รุนแรง เช่น ทำงานที่ความดันบรรยากาศ ระดับอุณหภูมิต่ำปานกลาง โดยกระบวนการปรับปรุงนี้จะใช้การสังเคราะห์ของพืช ซึ่งสำหรับขนาดเล็กเป็นพืชที่มีความน่าสนใจในการวิจัยและพัฒนา (Angelidaki และคณะ, 2018) โดยสาหร่ายจะตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งสำหรับขนาดเล็กหลายสายพันธุ์พบได้ตามทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะต่างกันด้วย (Liam และ Philip, 2010) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสามารถการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก

Microalga	CO ₂ %	P _{CO2} gl ⁻¹ per day
<i>Chlorella kessleri</i>	18	0.163
<i>Chlorella vulgaris</i>	15	0.624
<i>Chlorella sp.</i>	40	1.0
<i>Haematococcuspluvialis</i>	16–34	0.143
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Air	0.016
<i>Spirulina sp.</i>	12	0.413
<i>Scenedesmus obliquus</i>	18	0.26

ซึ่งการทำงานของแบบบ่อเปิดที่ใช้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงดังภาพที่ 5 จะเป็นระบบการเลี้ยงแบบ High rate algal ponds (HRAP) เป็นระบบเลี้ยงสาหร่ายกลางแจ้งซึ่งมีความสามารถในการเพิ่มสัดส่วนมีเทนอยู่ที่ประมาณ 80 % (E. Posadas และคณะ, 2015)



ภาพที่ 5 ระบบเลี้ยงสาหร่ายแบบ high rate algal ponds

ที่มา: E. Posadas และคณะ, (2015)

สาหร่ายคลอเรลล่า (*Chlorella sp.*)

ข้อมูลทั่วไปของก๊าซชีวภาพสาหร่าย *Chlorella sp*

สาหร่าย *Chlorella sp.* ค้นพบโดย เอ็มดับพลิวไบเจอร์นิก นักจุลชีววิทยาชาวดัตช์ และได้ตั้งชื่อว่าคลอเรลล่า (*Chlorella*) ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า คลอโรส (*Chloros*) แปลว่า สีเขียว กับภาษาลาตินว่า เอลล่า (*Ella*) แปลว่า เล็ก *Chlorella* (ธีรยุทธ บุญคง, 2552) คลอเรลล่าจัดอยู่ในลำดับอนุกรมวิธาน ดังนี้

Kingdom: Plantae

Division: Chlorophyta

Class: Trebouxiophyceae

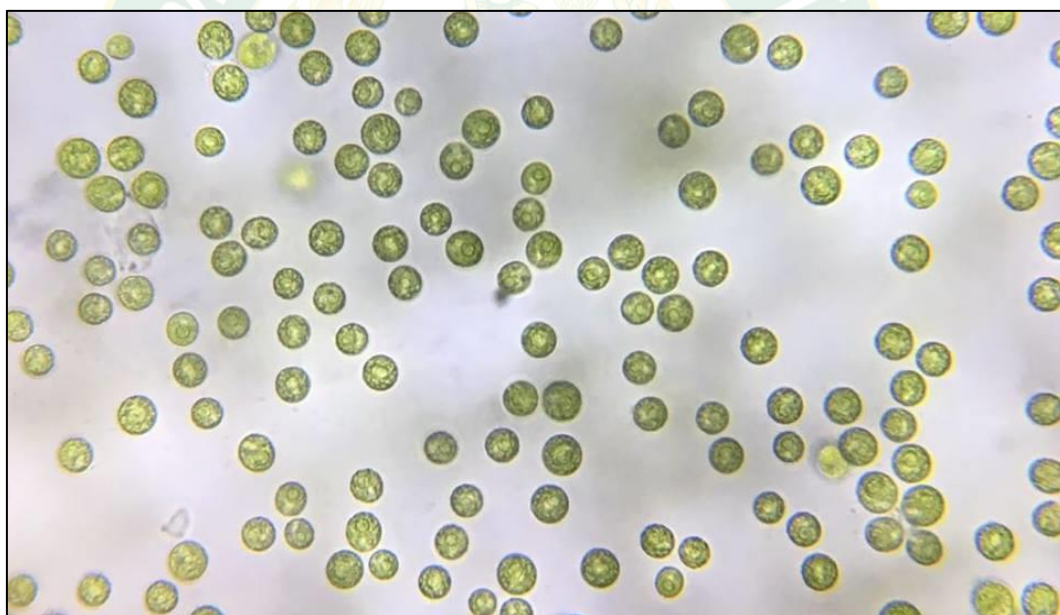
Order: Chlorellales

Family: Chlorellaceae

Genus: *Chlorella*

Species: *Chlorella sp.*

สาหร่าย *Chlorella sp.* เป็นสาหร่ายสีเขียวจัดอยู่ในดิวิชัน Chlorophyta ชั้น Chlorophyceae อันดับ Chlorellales วงศ์ Chlorellaceae สกุล Chlorella ซึ่งมีลักษณะสำคัญคือ เป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยวที่มีลักษณะกลมหรือกรมนรี มีขนาด 4-9 μm คลอโรพลาสต์เป็นรูปถ้วย ดังแสดงในภาพที่ 6 สาหร่าย *Chlorella sp.* มีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแบ่งเซลล์ การสร้างกลุ่มเซลล์ใหม่เกิดจากการฉีกขาดของเซลล์เดิม ลักษณะเซลล์ของ *Chlorella sp.* อาจอยู่เดี่ยวๆ หรืออาจรวมกันเป็นกระจุก คลอโรพลาสต์รูปถ้วย สืบพันธุ์จนได้จำนวนเซลล์ 4 หรือ 8 เซลล์ ซึ่งรวมอยู่ในผนังเซลล์ของเซลล์พ่อแม่ เป็นสาหร่ายสีเขียวเซลล์เดี่ยวมีความสามารถสูงในการบำบัดน้ำเสีย (Jing และคณะ, 2007) สามารถเติบโตได้ภายใต้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 40% ที่อุณหภูมิ 40 $^{\circ}\text{C}$ (Sakai และคณะ, 1995) สามารถเพิ่มค่าออกซิเจนในน้ำได้ (DO) ในน้ำได้ (Vo และคณะ, 2018) สาหร่าย *Chlorella sp.* มีปริมาณไขมันที่สามารถเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกได้ในการผลิตไบโอดีเซล (Pandian และ Ravindran, 2012)



ภาพที่ 6 ลักษณะของ *Chlorella sp.*

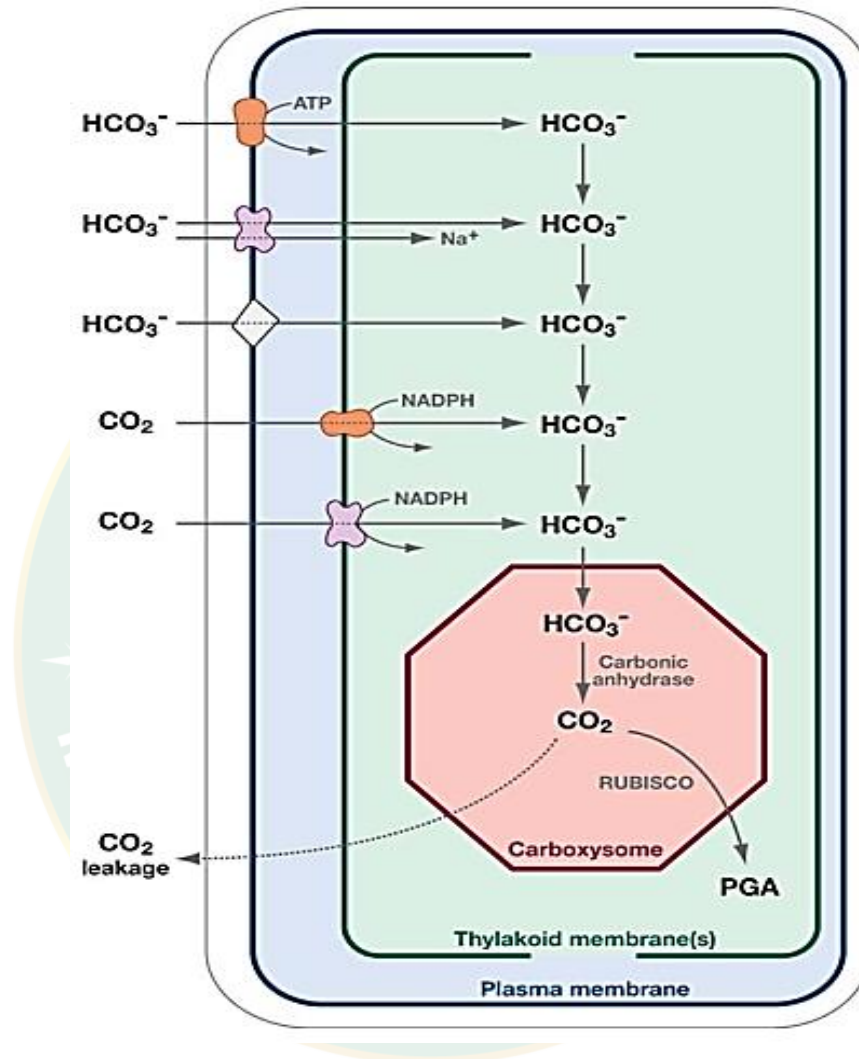
มีงานวิจัยจำนวนมากใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* ในการวิจัยเพราะมีการเจริญเติบโตได้ดี พบได้ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำจืดและน้ำเค็ม มีความสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และให้ผลผลิตเป็นน้ำมัน เช่น ในงานวิจัยของ Pandian และ Ravindran, (2012) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ และน้ำมันที่สกัดได้ของสาหร่าย 3 ชนิด ได้แก่ สาหร่าย *Chlorella sp.* *Ulothrix sp.* และ *Chlorococcum sp.* ผลที่ได้คือสาหร่าย *Chlorella sp.* ได้

ปริมาณคาร์บอน 0.486 g/dw อัตราการกำจัดคาร์บอน 0.68 g/ml day ให้ปริมาณของเหลว $24.3 \pm 0.81\%$ ประกอบด้วยกรดโอเลอิก 16.43 mg /g dw งานวิจัยของ Chiu และคณะ, (2008) ได้ทำศึกษาความสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2% 5% 10% และ 15% สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.261 0.316 0.466 และ 0.573 g/h ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็น 58% 27% 20% และ 16% ตามลำดับ งานวิจัยของ Yun และคณะ, (1997) ได้ทำศึกษาสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 15% สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.624 g/h ซึ่งจะเห็นได้ว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

กลไกในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก

กลไกในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก (ซิซญุงค์ ประทุม, 2558) เกิดขึ้นที่คลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ซึ่งอยู่ภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กและเอนไซม์ที่มีชื่อว่า เอนไซม์ไรบูลอส-1, 5-บิสฟอสเฟตคาร์บอกซิเลส/ออกซิเจเนส (Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) เป็นกลไกสำคัญในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วเปลี่ยนเป็น 2 โมเลกุลของ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต (3-Phosphoglycerate; 3-PGA) จากนั้นจะทำปฏิกิริยาให้กลายเป็น 2 โมเลกุลของ 3-คาร์บอนออร์แกนิกแอซิด (3-carbon organic acid) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตแป้งและการผลิตน้ำมันภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายขนาดเล็กสามารถพัฒนารูปแบบการทำงานของเอนไซม์รูบิสโก เพื่อให้ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งกลไกการพัฒนาตัวเองของสาหร่ายขนาดเล็กนี้ เรียกว่า กลไก Carbon - Concentrating Mechanisms (CCMs) โดยกลไก CCMs จะเคลื่อนย้ายอนินทรีย์คาร์บอน (Inorganic carbon) ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์พลาสมาและกลไก CCMs ยังช่วยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านช่อง Aquaporins (ช่องอยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้าออกได้อย่างเดียว) ตลอดจนช่วยให้ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ผ่านเข้าอย่างสะดวกนอกจากนี้ สาหร่ายขนาดเล็กยังมีการสร้างเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรส (Carbonic Anhydrase: CA) ซึ่งสามารถพบได้ที่ด้านนอกของเยื่อหุ้มพลาสมา (Plasma membrane) ในไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) และภายในคลอโรพลาสต์ โดยเอนไซม์ CA ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดความสมดุลระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไบคาร์บอเนตในสภาวะที่เป็นต่าง เพื่อให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพียงพอต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก นอกจากนี้เอนไซม์ CA ยังเป็นตัวช่วยดึงดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นการลดอัตราการไหลออกนอกเซลล์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รอบ ๆ

เซลล์ลดลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่สาหร่ายขนาดเล็กดูดซับไบคาร์บอเนตเข้าสู่เซลล์ เอนไซม์ CA ที่อยู่ในคาร์บอกซีโซม (Carboxysomes) จะเปลี่ยนไบคาร์บอเนตให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การขนส่งสารอนินทรีย์และการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเซลล์ของสาหร่าย

ที่มา: Giordano และคณะ, (2005)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

การเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กมีปัจจัยที่มีอิทธิพล ทั้งปัจจัยทางกายภาพและชีวภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กมากที่สุด คือ แสงและธาตุอาหาร (Kativu, 2011)

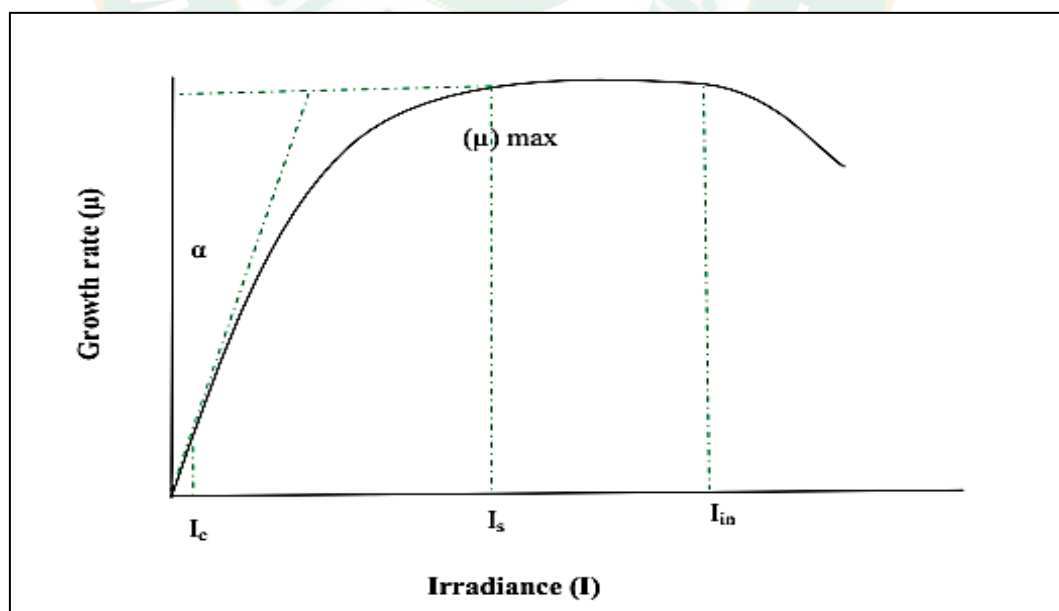
แสง

แสงมีผลต่อกลไกการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายเป็นพืชที่มีความสามารถในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำเป็นก๊าซออกซิเจนและสารประกอบคาร์โบไฮเดรตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง กระบวนการนี้จะแปลงสารประกอบอนินทรีย์จำพวกคาร์บอนและพลังงานแสงเป็นสารประกอบอินทรีย์



การสังเคราะห์แสงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Light reaction) และปฏิกิริยาไม่ใช้แสง (Dark reaction) ภายในเยื่อหุ้มของคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ปฏิกิริยาที่ใช้แสง จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมีให้ผลิตภัณฑ์ NADPH และ ATP ซึ่ง NADPH เป็นสารลดการสลายทางชีวเคมีและ ATP เป็นสารประกอบที่มีพลังงานสูง ปฏิกิริยาไม่ใช้แสงเกิดขึ้นใน Stroma ในปฏิกิริยานี้ ใช้ NADPH และ ATP ในการลดคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์โบไฮเดรต

สาหร่ายจะสังเคราะห์แสงที่สเปกตรัมช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm ตามแต่ละชนิดของสาหร่าย และการเจริญเติบโตที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับความเข้มแสงดังภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอัตราการเติบโตจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงไปถึงพื้นที่อิ่มตัวของแสงซึ่งอัตราการเจริญเติบโตจะคงที่ และความเข้มแสงมากเกินไปอัตราการเติบโตจะลดลง



ภาพที่ 8 อัตราการเติบโตต่อความเข้มแสงแสง

สารอาหาร

สารอาหารหลักที่มีความจำเป็นและมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

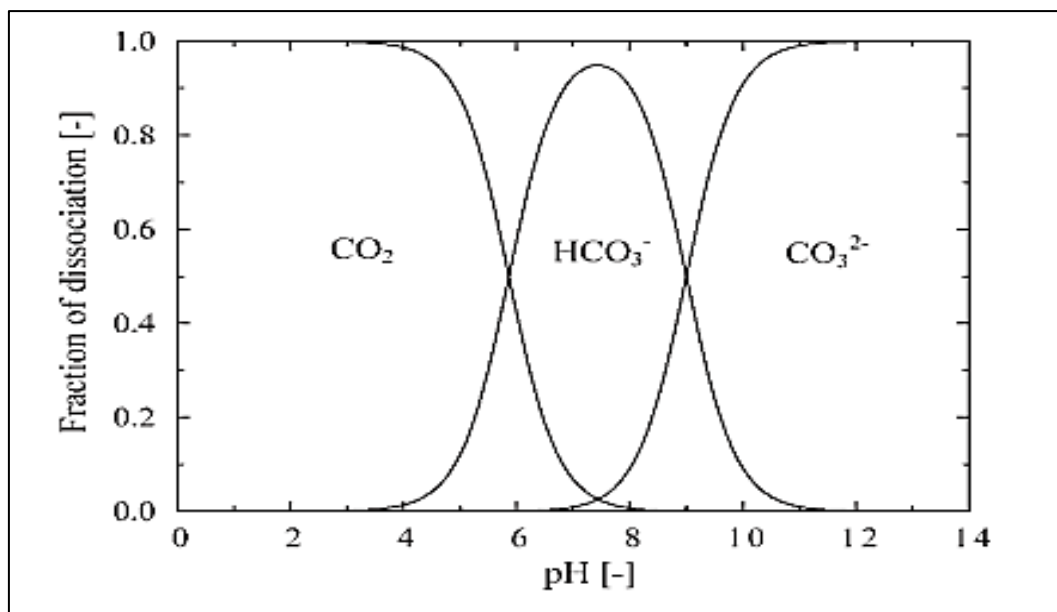
-ไนโตรเจน สาหร่ายขนาดเล็กต้องการไนโตรเจนในการเจริญเติบโตและสร้างมวลชีวภาพ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าไนโตรเจนมีผลต่อผลผลิตของพีชน้ำจืด ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในแหล่งน้ำ สามารถอยู่ในช่วง 100-200 $\mu\text{g/L}$ หรือสูงได้ถึง 10,000 $\mu\text{g/L}$ ในแม่น้ำที่ปนเปื้อนอย่างหนัก การขาดธาตุไนโตรเจนในสาหร่ายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตการตอบสนองทางสรีรวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี

-ฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างและเปลี่ยนแปลงพลังงานการเผาผลาญ ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่จำเป็น ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์นิวคลีโอไทด์และกรดนิวคลีอิก ในแหล่งน้ำธรรมชาติความเข้มข้นของฟอสเฟตจะเจือจางมากและการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กจึงอยู่ในระดับที่จำกัด ฟอสฟอรัส มักพบในรูปแบบของสารอนินทรีย์ฟอสเฟต (Inorganic phosphates) อยู่ในรูปเกลือของกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) และสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่สารประกอบออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates) และสารประกอบคอนเดนซ์ฟอสเฟต (Condensed phosphate)

การศึกษาอัตราส่วนของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (N:P) ที่ใช้เป็นสารอาหารเลี้ยง *Chlorella sp.* โดย (Vo และคณะ, 2018) ได้อัตราส่วน N:P ที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยง *Chlorella sp.* คือ 15:1 ให้ผลความเข้มข้นสูงสุดของชีวมวลที่เกิดขึ้น คือ 3,568 mg/L อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด คือ 0.064 h^{-1} และประสิทธิภาพและอัตราการเผาผลาญคาร์บอนเท่ากับ 28% และ 68.9 mg/L-h

-คาร์บอน โดยทั่วไปสาหร่ายจะใช้ก๊าซคาร์บอนในรูปแบบของสารละลายที่ละลายในน้ำ เรียกว่า อนินทรีย์คาร์บอน (Inorganic carbon, Ci) ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ คาร์บอนอิสระ (Free carbon) ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate, HCO_3^-) และคาร์บอเนต (Carbonate, CO_3^{2-}) จะเป็นได้ว่าคาร์บอนอินทรีย์จะอยู่ในรูปแบบใดมากหรือน้อยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำ ดังภาพที่ 9





ภาพที่ 9 อนินทรีย์คาร์บอนที่ค่า pH ที่แตกต่างกัน

ที่มา: Kativu, (2011)

ระยะของการเจริญเติบโตของสาหร่าย

การเจริญเติบโตของสาหร่ายมีลักษณะกราฟโค้งรูปตัว “S” (Sigmoid curve) ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการเติบโต (growth curve) โดยเส้นกราฟหรือเส้นโค้งการเจริญเติบโตแบ่งออกได้ 5 ระยะ ดังภาพที่ 10 โดยมีรายละเอียดระยะการเจริญเติบโตของสาหร่ายดังนี้

ระยะปรับตัว (Lag phase or inductional phase)

เป็นระยะเวลาในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ของเซลล์ได้แก่ ธาตุอาหาร แสง อุณหภูมิ โดยสาหร่ายที่ไม่สามารถปรับตัวได้จะตายลงเนื่องจากในระยะนี้จะไม่มีการแบ่งเซลล์ ระยะเวลาในการปรับตัวจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเซลล์

ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential phase)

เป็นระยะที่การเจริญเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วโดยสาหร่ายจะอยู่ในระยะนี้นานเท่าใดขึ้นอยู่กับ สารอาหาร ความเข้มข้นแสง อุณหภูมิ

ระยะเฉื่อย (Retardation phase or phase of declining relative growth)

ในช่วงนี้สาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตช้าลง เนื่องจากปริมาณของเซลล์ มีความหนาแน่นเกินไป ความเข้มข้นที่แต่ละเซลล์จะได้รับมีค่าลดลงจากการที่เซลล์บังแสงซึ่งกันและกันของเซลล์สาหร่าย อีกทั้งมี

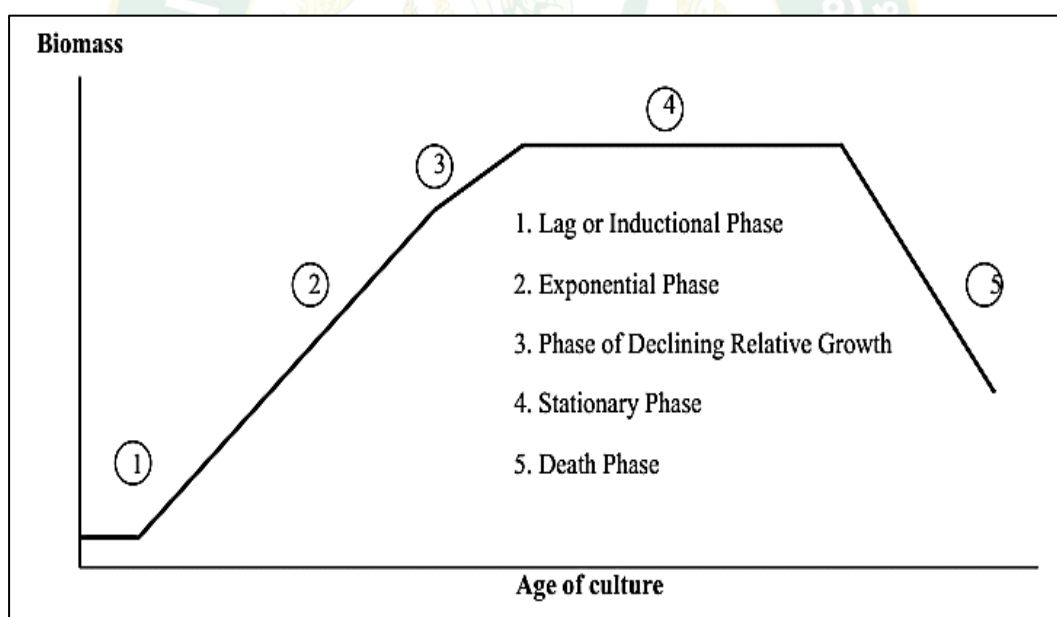
การเสียสมดุลค่าพีเอช เพราะแอมโมเนียเกิดมาก ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนสารอาหาร เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน เหล็ก หรือออกซิเจน สามารถแก้ไขโดยเติมธาตุอาหารที่ขาดแคลน เติมเกลือไดโซเดียมอีดีทีเอ ละลายตะกอนเหล็ก เพื่อแก้การตกตะกอนของเฟอร์ริกฟอสเฟต การเป่าอากาศหรือการเขย่าภาชนะ ช่วยป้องกันการขาดคาร์บอนและออกซิเจนนอกจากนี้ยังช่วยให้น้ำมีการเคลื่อนตัวตลอดเวลา ทำให้สาหร่ายไม่ตกตะกอน ได้รับแสงสว่างทั่วถึง

ระยะคงที่ (Stationary phase)

เป็นระยะที่สาหร่ายมีอัตราการเติบโตเท่ากับอัตราการตาย เนื่องจากปริมาณของธาตุอาหารลดลงและสาหร่ายมีการผลิตสารพิษจากกระบวนการเมตาบอลิซึม มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง

ระยะตาย (Death phase)

เซลล์จะเริ่มตายอัตราการตายจะสูงขึ้น เนื่องจากธาตุอาหารหมด สารพิษที่ปล่อยออกมาออกเซลล์มีความเข้มข้นมากขึ้นเรื่อยๆ



ภาพที่ 10 ระยะของการเจริญเติบโตของสาหร่าย

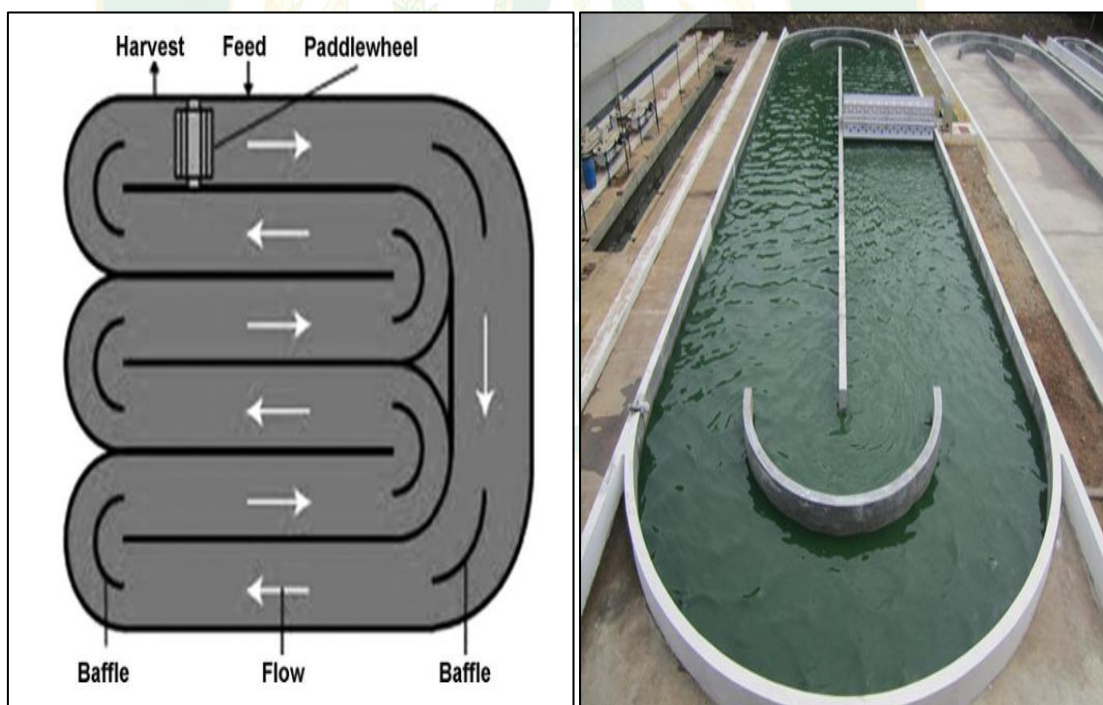
ที่มา: ขจรเกียรติ, (2550)

ระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเล็ก

ระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเล็กสามารถแบ่งออกได้ 2 ระบบ ดังต่อไปนี้

ระบบบ่อเปิด

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบบ่อเป็นการเพาะเลี้ยงกลางแจ้งบ่อน้ำ ลักษณะของบ่อจะแบ่งออกเป็นตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยแต่ละสี่เหลี่ยมผืนผ้าลักษณะเหมือนเขาวงกต ตรงบริเวณขอบบ่อจะทำเป็นรูปของวงรีเพื่อไม่ให้สาหร่ายเกิดการสะสมตัวที่มุมบ่อ และมีล้อพายเพื่อให้น้ำไหลอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการไหลเวียนน้ำภายในบ่อ ข้อดีของระบบนี้ คือ มีความเรียบง่ายและต้นทุนการดำเนินงานต่ำ ทำความสะอาดได้ง่าย แต่ให้ผลผลิตต่อพื้นที่ต่ำ ไม่สามารถควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมได้ เช่น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบ่อมากเกินไปจนทำให้สาหร่ายไหลออกจากบ่อ และการกระจายตัวของอากาศกับสาหร่ายไม่ดี ซึ่งการทำงานของระบบเลี้ยงแบบบ่อเปิดดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ระบบเลี้ยงแบบบ่อเปิด

ที่มา: Singh และSharma, (2012)

ระบบปิดหรือระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์

ระบบปิดหรือระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์เป็นระบบที่พัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เช่น รอบกลางวันกลางคืน สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล สถานที่ตั้งที่ทำให้เกิดความผันผวนของระดับรังสีที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง รวมถึงความบริสุทธิ์ของสาหร่ายที่ปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม ข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้มีการออกแบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดหรือระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Bubble column

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Bubble column เป็นระบบที่มีลักษณะภาชนะทรงกระบอก ป้อนอากาศเข้าทางด้านล่างของระบบ ซึ่งอากาศที่เข้าระบบระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Bubble column จะมีลักษณะเป็นฟองเล็กๆ เนื่องจากผ่านหัวพ่นอากาศ (Gas sparger) ที่มีรูพรุนสูงดังภาพที่ 12 สามารถรับแสงได้ทั้งทางด้านบนและด้านล่างของระบบ

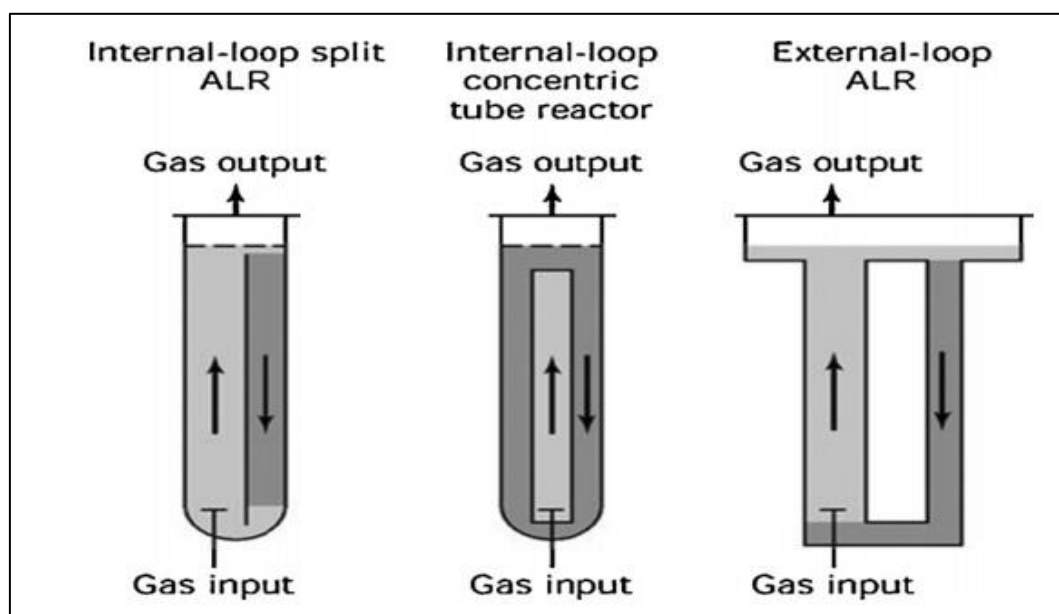


ภาพที่ 12 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Bubble column

ที่มา: Singh และ Sharma, (2012)

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Airlift

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Airlift เป็นระบบมี 2 ส่วนเชื่อมต่อกัน คือ ส่วนที่ผสมก๊าซ และส่วนที่ไม่ผสมก๊าซ ดังภาพที่ 13 หลักการทำงานของระบบก๊าซจะถูกส่งผ่านด้านล่างของระบบ ก๊าซจะยกตัวขึ้นที่สูงสู่น้ำ ทำให้ของเหลวในระบบเกิดการหมุนเวียนภายในระบบ ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Airlift มีข้อดีคือ เกิดการไหลเวียนของระบบได้ดีไม่ทำให้สาหร่ายเกิดการตกตะกอน จึงทำให้สาหร่ายรับแสงอย่างเพียงพอ แต่การขยายระบบให้มีขนาดใหญ่จะมีต้นทุนการสร้างสูง

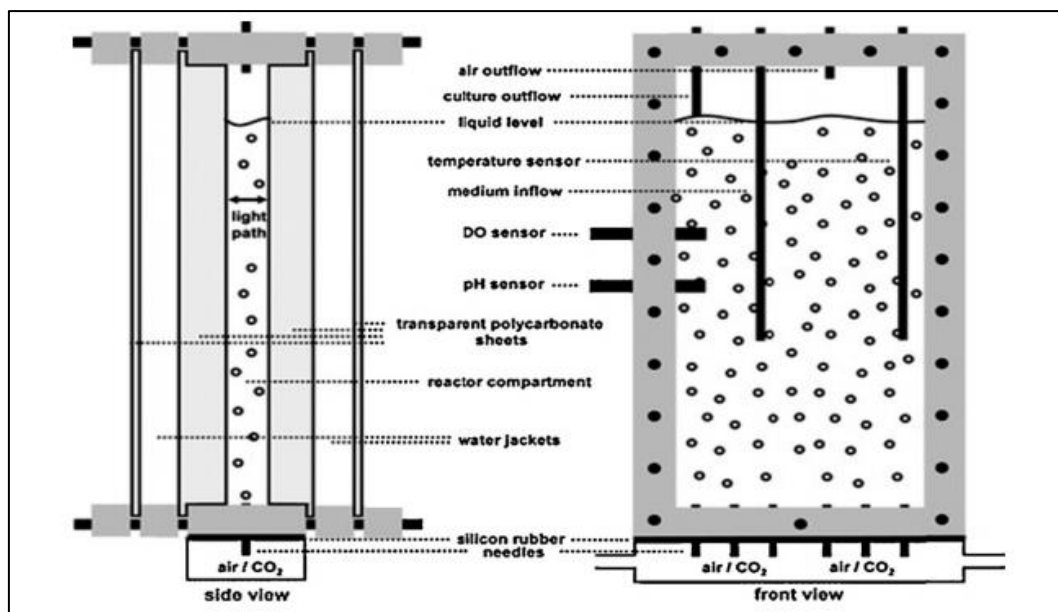


ภาพที่ 13 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Airlift

ที่มา: Singh และ Sharma, (2012)

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Flat panel

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Flat panel เป็นระบบที่มีลักษณะกล่องแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความหนาไม่มากดังภาพที่ 14 แสงจะเข้าทางด้านข้างของระบบที่มีบริเวณรับแสงที่กว้างจึงทำให้สาหร่ายได้รับแสงอย่างเพียงพอ ก๊าซจะเข้าสู่ระบบด้านล่างและยกตัวขึ้นไหลออกด้านบนพร้อมกับทำให้สาหร่ายเกิดการไหลเวียนในระบบ แต่การเพิ่มขนาดของระบบมีต้นทุนที่สูง การควบคุมอุณหภูมิเป็นไปได้ยาก มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ผนังรับแสงของระบบ (Giuliano และคณะ, 2010)



ภาพที่ 14 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Flat panel

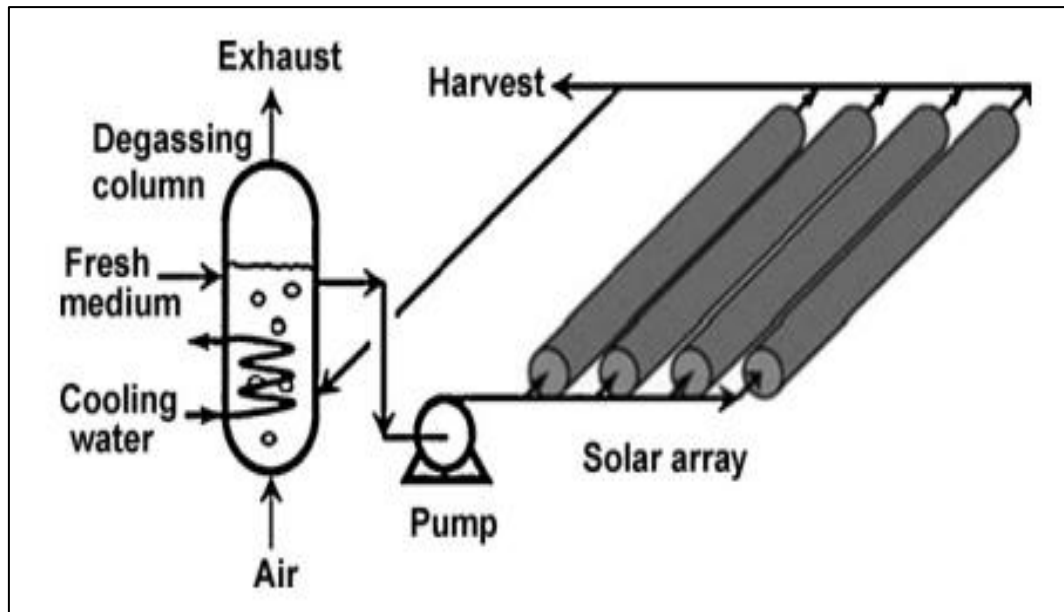
ที่มา: Singh และ Sharma, (2012)

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Horizontal tubular

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Horizontal tubular เป็นระบบที่มีลักษณะเป็นท่อโปร่งแสง ติดตั้งในลักษณะเป็นแนวนอน สามารถเพิ่มจำนวนท่อเลี้ยงเพื่อเพิ่มปริมาณการเลี้ยง ใช้ในการเลี้ยงกลางแจ้ง ระบบนี้มีความร้อนในระบบจึงต้องมีระบบระบายความร้อนที่ถังพักน้ำ ก๊าซจะถูกให้ที่พักน้ำ จากนั้นปั๊มจะสูบน้ำสำหรับนำไปที่ท่อรับแสงกลางแจ้ง ดังภาพที่ 15 ระบบนี้จะต้องใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงมาก สำหรับเจริญเติบโตที่ผนังท่อ มีค่าใช้จ่ายในการทำมาสะอาดสูง (Giuliano และคณะ, 2010)

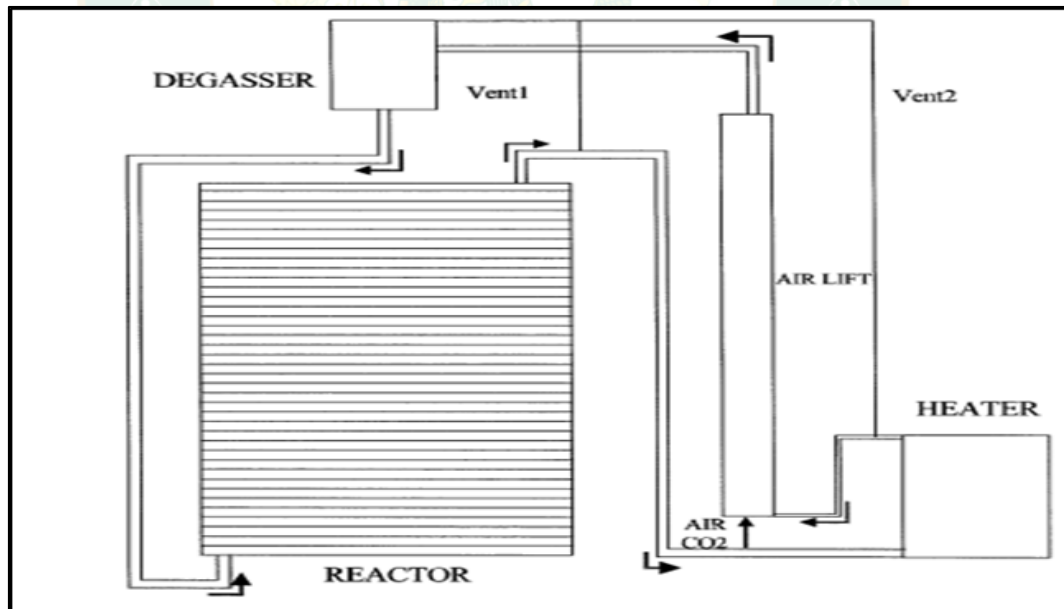
ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Helicaltype

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Helicaltype การทำงานของระบบนี้จะคล้ายกับระบบ Horizontal tubular แต่ ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Helical type เป็นการลดข้อจำกัดของระบบ Horizontal tubular ในเรื่องของพื้นที่ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสำหรับให้มีผลผลิตต่อพื้นที่สูงขึ้น โดยทำการออกแบบให้ระบบมีความยาวของท่อมากขึ้น เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนก๊าซให้กับสายน้ำได้นานขึ้น อีกทั้งยังได้มีการประยุกต์ระบบให้เลี้ยงในที่ร่มได้ คือการออกแบบระบบให้มีลักษณะเป็นท่อขดในแนวตั้ง เพื่อให้ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยลงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Horizontal tubular

ที่มา: Singh และSharma, (2012)

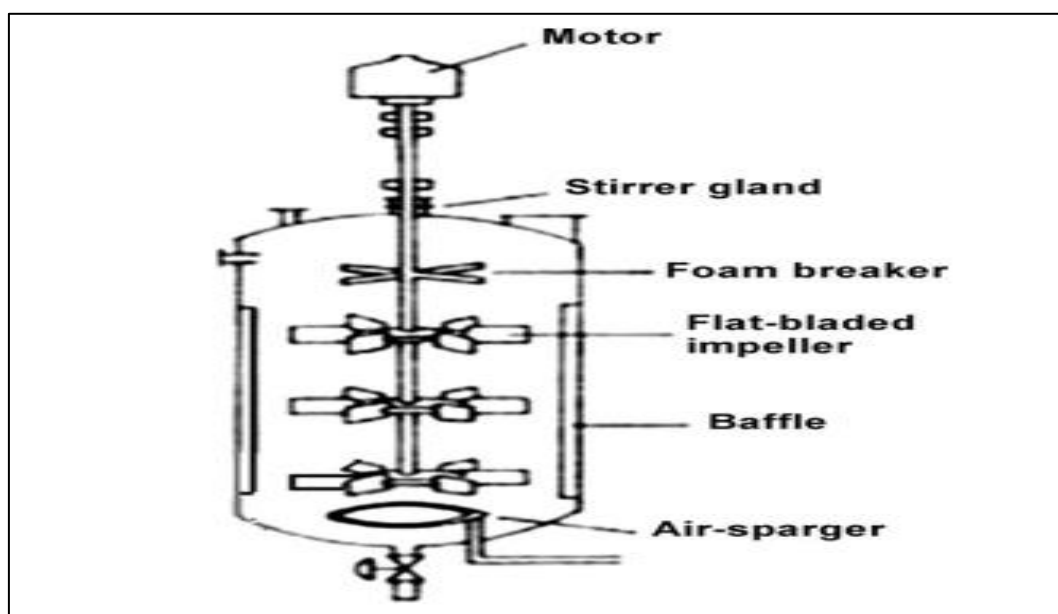


ภาพที่ 16 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด Helical tubular photobioreactor

ที่มา: Travieso และคณะ, (2001)

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Stirred tank

ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Stirred tank เป็นระบบที่ทำการเพาะเลี้ยงในถัง ระบบนี้จะใช้ใบพัดในการหมุนวนของเหลวภายในระบบ และให้ก๊าซเข้าสู่ระบบโดยผ่าน Air sparger ด้านล่างของระบบ Stirred tank ในส่วนของแสงให้แสงทางด้านข้างของระบบ ดังภาพที่ 17 ข้อดีของระบบคือ สามารถทำเป็นระบบเลี้ยงสาหร่ายแบบต่อเนื่องได้ง่าย ใช้พื้นที่น้อย มีการกวนสาหร่ายเป็นอย่างดี ทำให้เซลล์ไม่เกิดการตกตะกอน



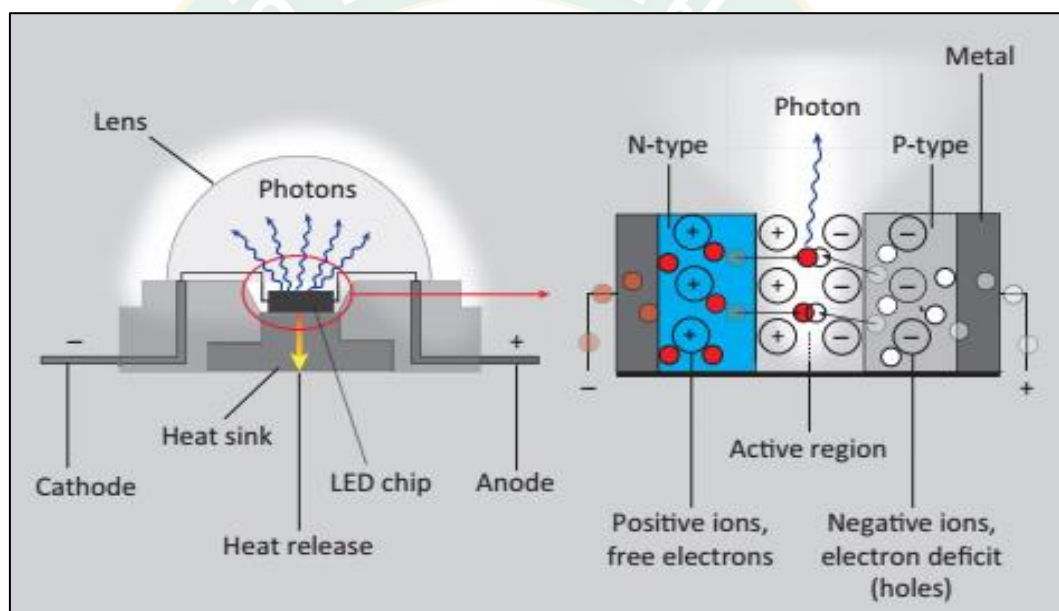
ภาพที่ 17 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Stirred tank

ที่มา: Singh และ Sharma, (2012)

แสงเทียมที่ใช้กับการผลิตสาหร่ายขนาดเล็ก

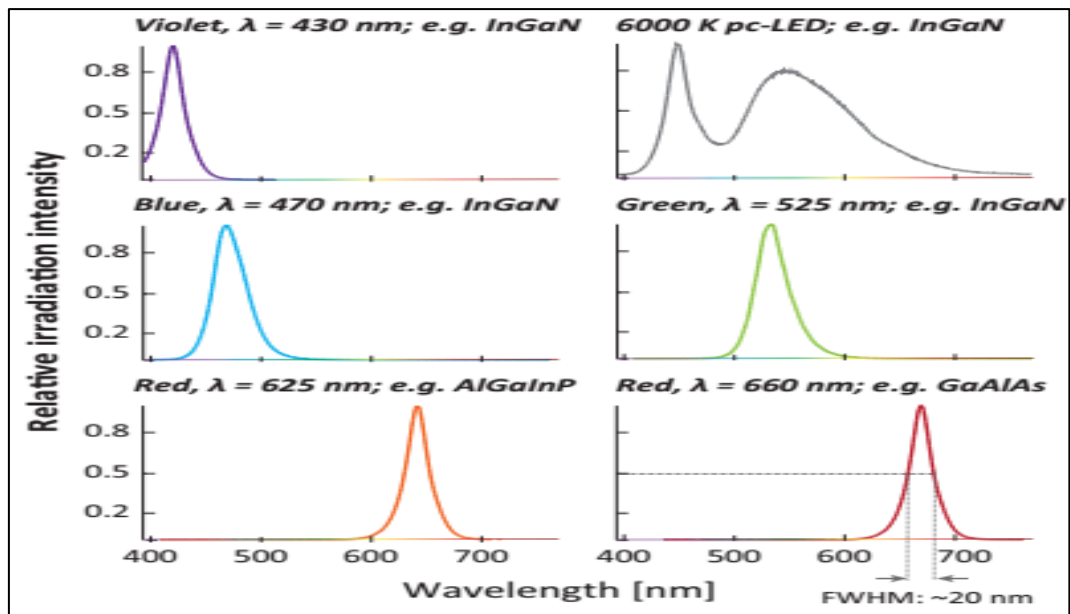
LED เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำประกอบด้วยชั้นบวก (P doped) และชั้นลบ (N doped) ดังภาพที่ 18 เมื่อทำการให้แสงโดยจ่ายไฟบวกให้ N อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีมีพลังงานสูงขึ้น จนสามารถข้ามรอยต่อจากสารชนิด N ไปรวมกับโฮลในสารชนิด P การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ PN ทำให้เกิดกระแสไหล เป็นผลให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปและคายโฟตอนออกมาในรูปของแสง สีและช่วงคลื่นแสง LED นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดสารที่ใช้ในการผลิต ดังภาพที่ 19

การเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ สารอาหารและแหล่งกำเนิดแสง ในการเพาะเลี้ยงในระบบปิดยังสามารถประยุกต์ใช้แสงเทียมจากหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือ LED แทนแสงอาทิตย์ ในการเพาะเลี้ยงในร่มเพื่อควบคุมการผลิตให้คงที่ การใช้หลอดLED สามารถปรับช่วงคลื่นแสงและความเข้มแสงที่สาหร่ายขนาดเล็กต้องการได้ดีกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีช่วงคลื่นแสงไม่เจาะจงในช่วงการสังเคราะห์แสง ดังภาพที่ 20 ซึ่งสาหร่ายของประกอบสารสีที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง คลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี เป็นส่วนใหญ่ ช่วงคลื่นที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงอยู่ระหว่างแสงสีน้ำเงิน 450–475 nm และแสงสีแดง 630–675 nm (Masojidek Jiri และคณะ, 2013) โดยที่ LED แสงสีน้ำเงินมีช่วงคลื่นประมาณ 430–470 nm และ LED แสงสีแดงมีช่วงคลื่นประมาณ 625–680 nm (Schulze และคณะ, 2014)



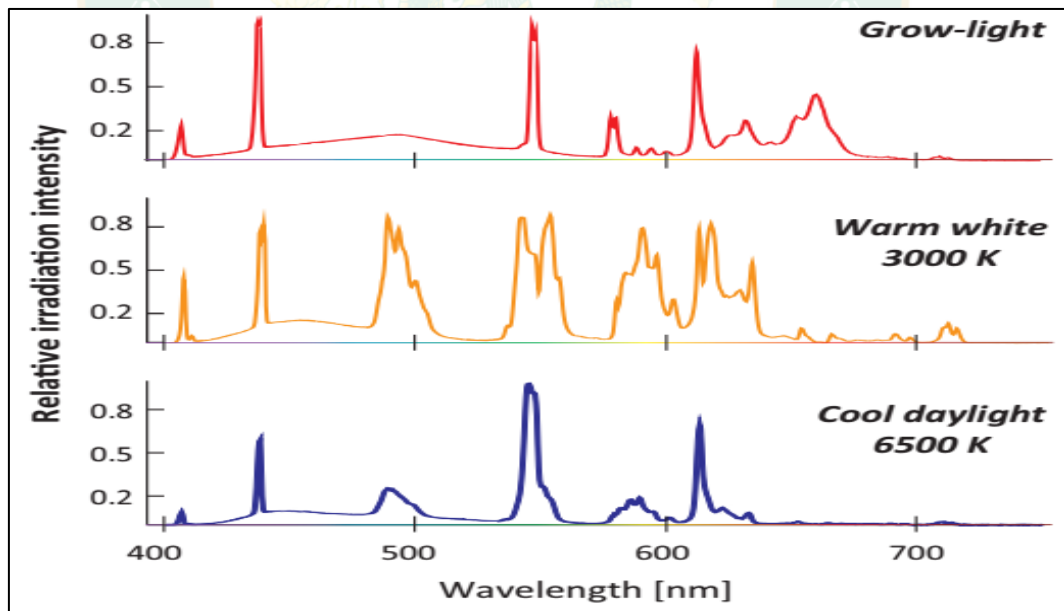
ภาพที่ 18 การทำงานของLED

ที่มา: Schulze และคณะ, (2014)



ภาพที่ 19 ช่วงคลื่นแสง LED

ที่มา: Schulze และคณะ, (2014)



ภาพที่ 20 ช่วงคลื่นแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดต่างๆ

ที่มา: Schulze และคณะ, (2014)

ได้มีงานวิจัยที่ใช้ LED ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก โดยงานวิจัยของ (Teo และคณะ, 2014) ได้ทำการศึกษาการใช้หลอด LED สีน้ำเงิน (456 nm) สีแดง (660 nm) และสีแดงน้ำเงิน เลี้ยงสาหร่าย *Tetraselmis sp.* และ *Nannochloropsis sp.* ที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ได้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Tetraselmis sp.* และ *Nannochloropsis sp.* แสงสีน้ำเงินดีที่สุด คือ 1.47 และ 1.64 day^{-1}

งานวิจัยของ (Das และคณะ, 2011) ได้ทำการผลิตชีวมวลและการผลิตไบโอดีเซล (FAME) ที่ได้จากไขมันในเซลล์ของ *Nannochloropsis sp.* ที่แยกได้จากน่านน้ำชายฝั่งของสิงคโปร์ การศึกษาภายใต้ความยาวคลื่นและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน คือ LED สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาว อัตราการเติบโตเฉพาะ (μ) สำหรับ LED สีน้ำเงินมากกว่าที่สุดเท่ากับ 0.66 day^{-1} และได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 111.96 mg/L

งานวิจัยของ (Duarte และCosta, 2018) ได้ทำการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella fusca* กับ *Synechococcus nidulans* ภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้แสง LED สีน้ำเงิน ที่ความเข้มแสง 50 100 และ $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ จากการทดลองพบว่า *Synechococcus nidulans* มีค่าการเจริญเติบโตสูงสุด เท่ากับ 0.20 day^{-1} ที่ความเข้มแสง $150 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ แต่ *Chlorella fusca* ให้ปริมาณของเหลวจากการสกัดมากกว่า 23.00% w/w ที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

จากผลของตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการศึกษา จะเห็นได้ว่า LED สามารถนำมาใช้เป็นแสงเทียมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อทดแทนแสงจากดวงอาทิตย์ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ (กฤษณ์ สิริกุลรัตน์, 2557) การทำวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ผ่านการกรองไฮโดรเจนซัลไฟด์จนมีค่าต่ำกว่า 100 ส่วนต่อล้านส่วน โดยใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella sp.* ในถังโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบ Airlift ขนาด 8 L กำหนดระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง 8 วัน ซึ่งความเข้มแสงที่ให้แก่ระบบเท่ากับ $3,207 \text{ Lux}$ และแปรผันอัตราการถ่ายก๊าซชีวภาพ 4 ค่า ได้แก่ 0.05 0.035 0.02 และ 0.005 vvm และเดินระบบวันละ 3 รอบ โดยแต่ละรอบให้ก๊าซชีวภาพ 1 ชั่วโมง สลับด้วย การเติมอากาศที่อัตราการไหล 30 L/min เป็นเวลา 30 นาที คิดเป็นเวลาเดินระบบ 4 ชั่วโมง 30 นาทีต่อวัน พบว่า ความสามารถในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นกับอัตราการถ่ายก๊าซ ยิ่งอัตราการถ่ายก๊าซชีวภาพยิ่งต่ำ ความสามารถในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยิ่งสูง ณ ช่วงเวลา การถ่ายก๊าซชีวภาพที่ 15 นาที อัตราการถ่ายก๊าซ

0.05 vvm สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 39.36 % อัตราการจ่ายก๊าซ 0.035 vvm สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 50.23 % อัตราการจ่ายก๊าซ 0.02 vvm สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 55.72 % และอัตราการจ่ายก๊าซ 0.005 vvm สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 72.27 % และการวัดองค์ประกอบก๊าซที่ ช่วงเวลา 30, 45 และ 60 นาที ต่อมาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต่ำลงซึ่งการเติมอากาศจะพ่นระบบให้มีความเสถียรและสามารถเดินระบบต่อไปในรอบถัดไปได้ ส่วนอัตราการเจริญเติบโตที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพน้อยอัตราการเจริญเติบโตจะยิ่งสูง ที่ 0.05 vvm อัตราการเจริญเติบโตมีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.19 g/L day ที่ 0.035 vvm อัตราการเจริญเติบโตมีค่า 0.200 0.260 g/L day ที่ 0.02 vvm อัตราการเจริญเติบโตมีค่า 0.229 0.260 g/L day และที่ 0.005 vvm อัตราการเจริญเติบโตมีค่าสูงที่สุด 0.260 g/L day

งานวิจัยของ (ครรชิต เงินค่าคง และคณะ, 2559) ได้ทำการหาประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในถังไบโอรีแอกเตอร์ ปริมาตร 5 L ด้วยอาหารสูตร JM ที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ การทำงานของระบบ หลังจากการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 16 วัน ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm การเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.589 ± 0.11 ต่อวัน และมวลสาหร่ายสูงสุด $2,800 \pm 100.00$ mg/L ประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ $97.48 \pm 0.31\%$ สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบมีปริมาณมีเทนสูงชันเป็น $73.57 \pm 0.81\%$ และสัดส่วน%การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงชันเท่ากับ $21.60 \pm 1.35\%$

งานวิจัยของ (ฤทัยรัตน์ วิศาลสุวรรณกร, 2548) ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* โดยศึกษาผลของความเข้มแสง 60 240 และ 540 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสม (10% และ 20%) เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนต่อการเจริญเติบโต โดยเพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 20 L ใส่อาหารเลี้ยงสาหร่าย 15 L กวนด้วยใบพัดความเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซผสม 0.013 vvm ระยะเวลาการให้แสงสลับมืด 12:12 ชั่วโมง การทำงานดัง พบว่า ภาวะที่สาหร่ายมีอัตราการเติบโตสูงสุด คือ การได้รับความเข้มแสง $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 2.48 ต่อวัน

งานวิจัยของ (Briassoulis และคณะ, 2010) ออกแบบระบบระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด มาทดลองสำหรับการควบคุมการผลิต *Nannochloropsis sp* อย่างต่อเนื่อง ข้อดีหลัก ๆ คือ (1) การผสมผสานระหว่างปริมาณของพื้นที่เพาะเลี้ยงกับพื้นที่ผิวที่เหมาะสมกับความลึกของการซึมผ่านของแสง (2) การควบคุมอุณหภูมิและสารปนเปื้อนได้ง่าย (3) การกระจายอากาศและ CO₂ ที่มีประสิทธิภาพ (4) การถ่ายเทก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีขึ้นผ่านผิวสัมผัสที่กว้างขวางระหว่างอากาศบริสุทธิ์และของเหลวที่เป็นสื่อกลางในการเพาะเลี้ยงและ (5) เซ็นเซอร์การไหลผ่านอัตโนมัติแบบใหม่ที่ทำให้การตรวจสอบความเข้มข้นของเซลล์อย่างต่อเนื่อง *Nannochloropsis sp*. ความหนาแน่นของประชากรถึงค่าสูงสุดภายใต้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง สภาพแสงจากธรรมชาติและเทียมรวมกัน เพิ่มขึ้นเฉลี่ยรายวันของเซลล์ขนาด 30×10^6 cell/mL ได้ที่ความหนาแน่นของประชากรสูงกว่า 350×10^6 cell/mL day อัตราการเก็บเกี่ยวรายวันอย่างน้อย 10% ของปริมาตรรวม ข้อมูลการผลิตความหนาแน่นของเซลล์ที่วัดได้และช่วงการผลิตปริมาตรโดยประมาณที่ 1.10-3.03 g/L day เป็น *Nannochloropsis sp* ที่สูงที่สุด

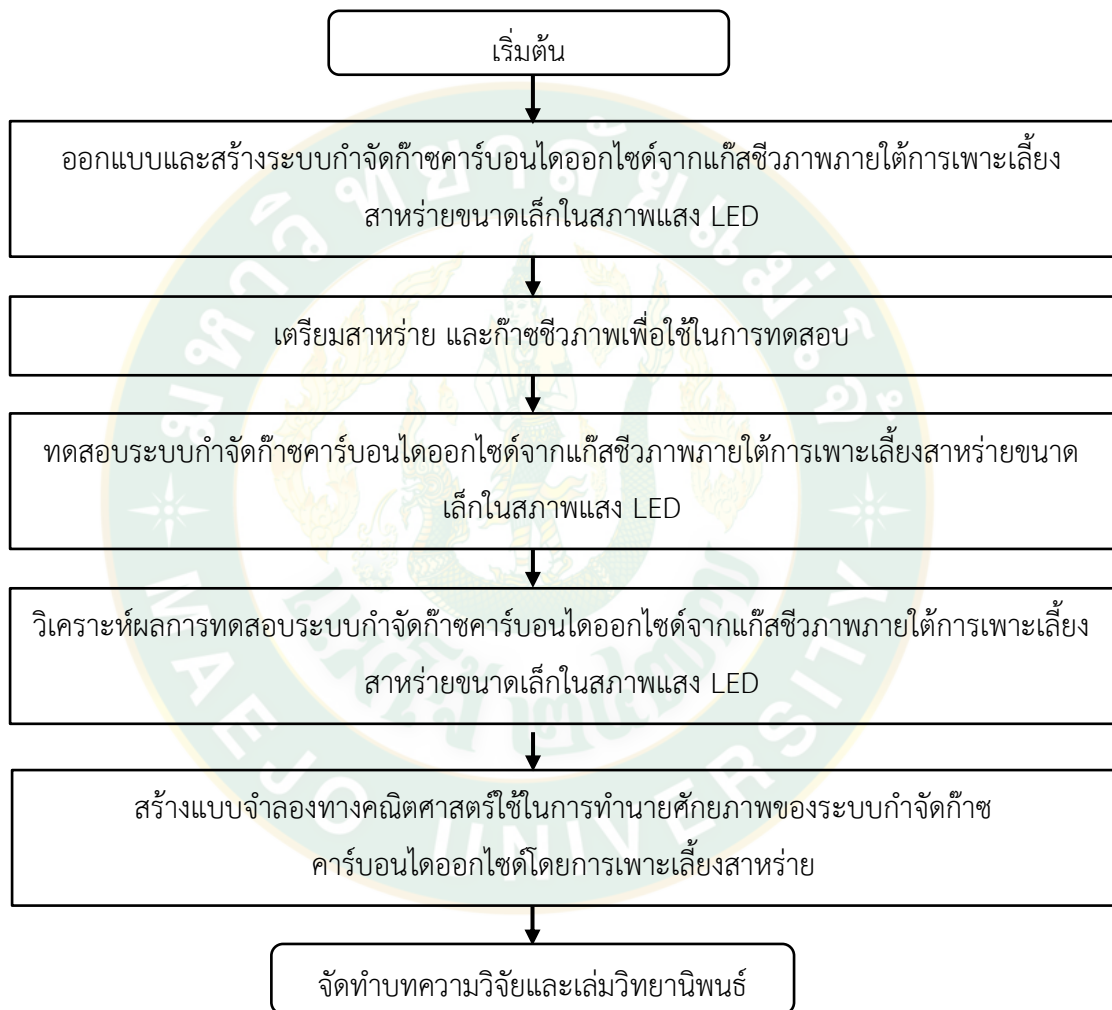
งานวิจัยของ (Yan และ Zheng, 2014) ทดลองสัดส่วน LED สีแดงต่อสีน้ำเงินที่ทำให้สาหร่าย *Chlorella sp.* ในการปรับปรุงก๊าซชีวภาพ ที่อัตราส่วนสีแดงต่อน้ำเงิน อยู่ที่ 1:9 3:7 5:5 7:3 และ 9:1 เพาะเลี้ยงในถังโฟโตไบโอรีแอกเตอร์ โดยการให้แสงสลับมืด 12:12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการเพาะเลี้ยง 144 ชั่วโมง หรือ 6 วัน จากการทดลองโดยอัตราส่วนส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มอัตราส่วนก๊าซมีเทนมากกว่า 90% คือ 3:7 5:5 และ 7:3 แต่อัตราส่วนส่วนผสมที่ 5:5 ให้อัตราส่วนก๊าซมีเทนดีที่สุด $93.68 \pm 3.25\%$

(Travieso และคณะ, 2001) ได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina* ในระบบระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด ในสภาวะกึ่งต่อเนื่องขนาด 21 L ดำเนินการภายใต้สภาวะคงที่สำหรับการดำเนินงานกึ่งต่อเนื่องมีการเพิ่มและลบทุกวัน อัตราการเจือจาง (D) คือ 0.0019 0.0039 0.0078 และ 0.0117 h^{-1} อุณหภูมิในการทำงานอยู่ระหว่าง 28-30 องศาเซลเซียสพบว่าอัตราการเจือจาง 0.0078 h^{-1} ได้ค่าของน้ำหนักแห้งสูงสุด 5.82 gL^{-1}

สรุปจากทฤษฎีและงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* มีความสามารถในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ อีกทั้งแสง LED สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กได้และยังไม่มีงานวิจัยที่นำระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดมาทำการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและพัฒนาระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดมาทำการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

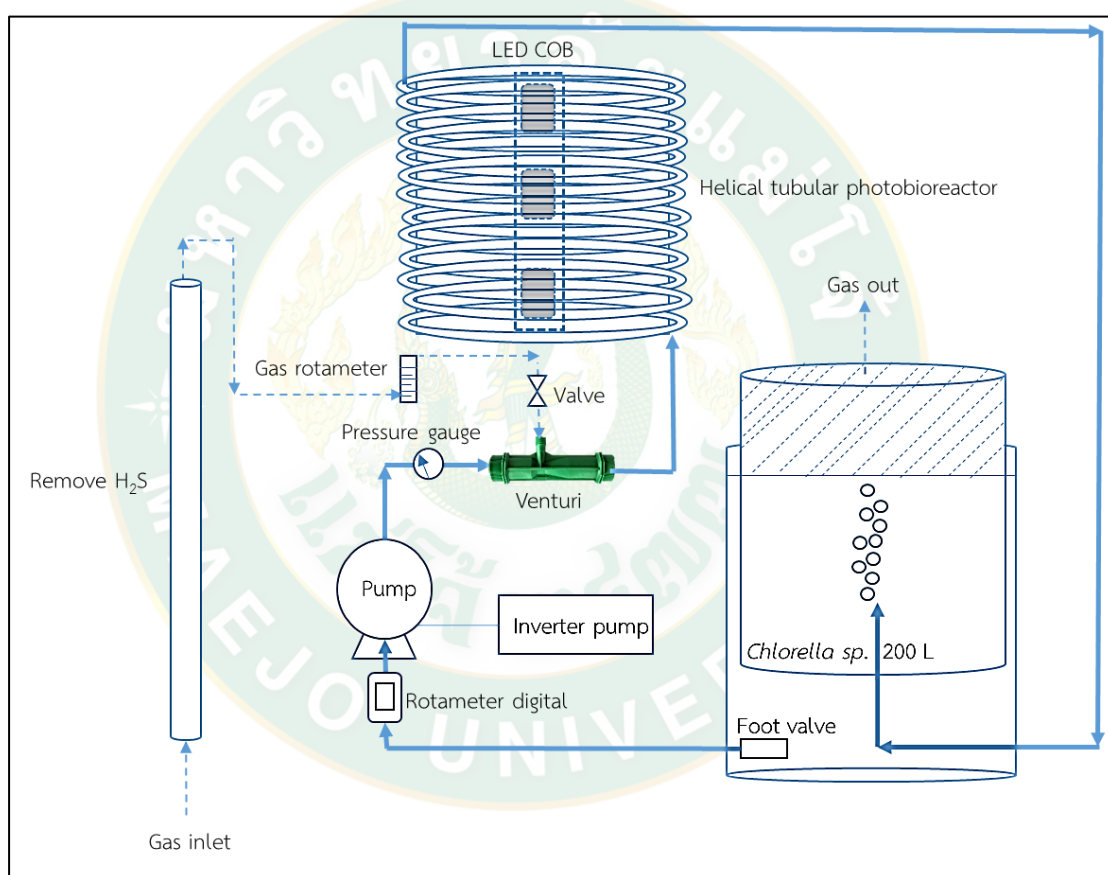
วิธีการดำเนินการวิจัยการพัฒนาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ออกแบบและสร้างระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED

งานวิจัยนี้ได้สร้างระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด (Helical tubular photobioreactor) สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED โดยมีหลักการทำงานดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การทำงานของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED

จากแผนภาพที่ 22 เมื่อปั้มน้ำ (Pump) ทำงาน น้ำสาหร่ายจะถูกดูดผ่านฟุตวาล์ว (Foot valve) ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำสาหร่ายก่อนเข้าปั้มน้ำด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบดิจิทัล (Rotameter digital) น้ำสาหร่ายที่ออกจากปั้มน้ำจะไหลเข้าสู่ท่อเวนจูรี (Venturi) ที่มีรูปร่างเป็นคอขวดเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำจนกระทั่งเกิดแรงดูดก๊าซ ก๊าซชีวภาพจากระบบหมักจะผ่านระบบกำจัด

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Remove H₂S) ผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลก๊าซ (Gas rotameter) ผ่านวาล์ว (Valve) ลงมาผสมกับน้ำสาหร่าย ทำให้เกิดการถ่ายเทก๊าซลงไปใต้น้ำไหลเข้าสู่ท่อชุดซึ่งเป็นพื้นรับแสงจากหลอด LED COB เพื่อให้สาหร่ายเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง จากนั้นน้ำสาหร่ายกับก๊าซชีวภาพ จะไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำสาหร่าย 200 L ก๊าซชีวภาพจะยกตัวลอยขึ้นเหนือผิวน้ำแยกออกจากน้ำสาหร่าย น้ำสาหร่ายจะถูกดึงกลับไปปรับปรุงก๊าซชีวภาพในระบบอีกครั้ง

ในการสร้างระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุด แบ่งออกเป็น 4 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่าย 2) ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 3) ระบบให้แสงสว่างและพื้นที่ในการสังเคราะห์แสง 4) ระบบการหมุนวนน้ำและก๊าซชีวภาพเข้าระบบเลี้ยง โดยมีรายละเอียดการออกแบบและติดตั้งดังนี้

ระบบถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่าย

จากสมมติฐานเบื้องต้นในการออกแบบปริมาณระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุดจากผลของงานวิจัยของ (Yan และ Zheng, 2014) ได้ทำการเลี้ยงสาหร่ายปริมาณ 8 L ใช้ระยะเวลา 6 วัน ได้ปริมาณสาหร่ายน้อยที่สุดที่ผลิตได้ คือ 287.63 mg/L จากข้อมูลเบื้องต้นถ้าต้องการปริมาณสาหร่าย 60,000 mg จะต้องเลี้ยงสาหร่ายปริมาณ น้อยที่สุด 200 L ระบบถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่าย เป็นถังที่ใช้ในการกักเก็บก๊าซชีวภาพที่ต้องปรับปรุงคุณภาพและใช้เก็บสาหร่ายที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุด ลักษณะของถังจะเป็นถังพลาสติกทึบแสงขนาด 200 L บรรจุน้ำสาหร่าย และมีถังพลาสติกทึบแสงขนาด 120 L สำหรับใช้เป็นถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่ายโดยจะคว่ำลงบนปากถังขนาด 200 L เพื่อใช้ในการเก็บก๊าซชีวภาพดังภาพที่ 23 และใช้ท่อน้ำ PVC เข้าและออกถัง ขนาด 1 นิ้ว

ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์

ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพก่อนเข้าระบบเลี้ยงสาหร่าย เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์มีผลทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กลดลง ไม่ให้เกิน 50 ppm (Yan และ Zheng, 2014) งานวิจัยนี้จึงใช้ฟอยเหล็กสนิม น้ำหนัก 2 kg ที่อยู่ในท่อ PVC ขนาด 2 inch ความยาว 1 m ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 23 ระบบถังเก็บก๊าซชีวภาพและสาหร่าย

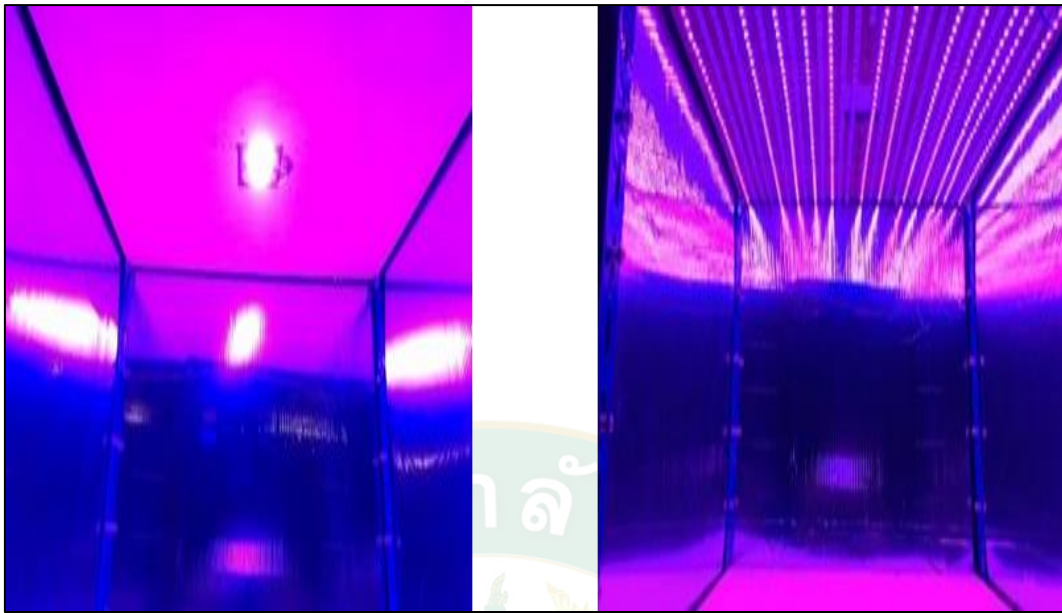


ภาพที่ 24 ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์

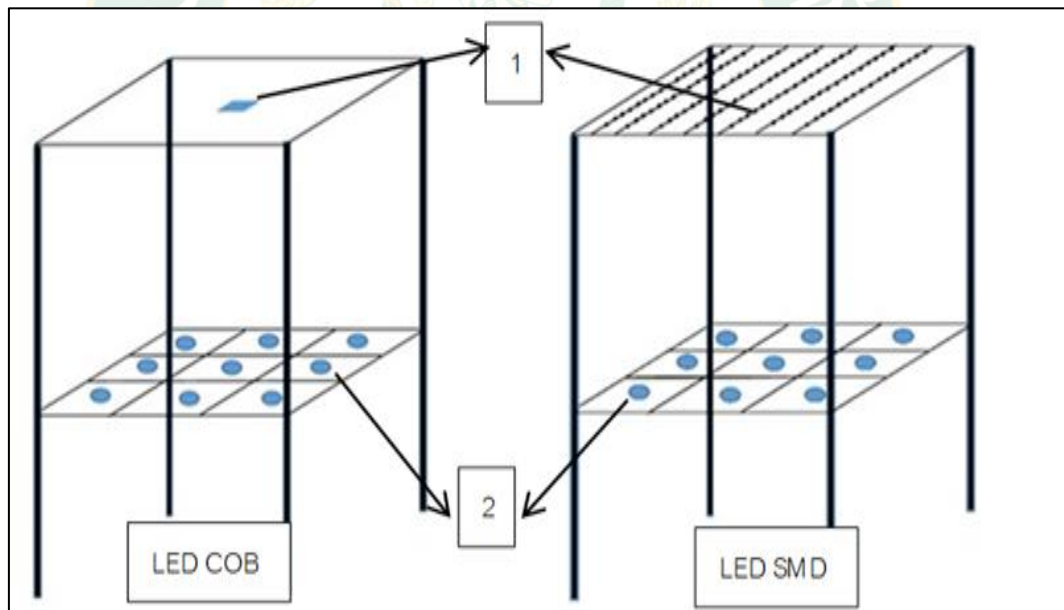
ระบบให้แสงสว่างและพื้นที่ในการสังเคราะห์แสง

งานวิจัยได้ใช้หลอด LED อยู่ 2 ประเภท คือ Chips on Board (COB LED) และ Surface Mount Device (SMD LED) สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย แต่การเลือกใช้ LED ให้คุ้มค่าที่สุดต้องมีการคำนึงถึง ประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงหรือประสิทธิภาพของฟอตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงซึ่งส่งผลต่อการผลิตชีวมวลและต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญ (Ward และคณะ, 2013) จึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบความหนาแน่นของฟอตอนสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Photon Flux Density, PPF) และประสิทธิภาพของฟอตอนที่ใช้ในงานสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน (Photosynthetically active radiation Efficiency, PAR Efficiency) ของหลอดชนิด LED COB และ LED SMD 5050 ที่กำลังไฟฟารวม 40-50 W สีของ LED ที่ใช้ในการทดสอบคือ น้ำเงิน สีแดง และ น้ำเงินผสมแดง ในชุดทดสอบแสง ได้มีการแบ่งพื้นที่ออกเป็น เพดานกระจายแสง พื้นที่รับแสงและผนังกันแสง โดยในส่วนพื้นที่รับแสงมีขนาดกว้าง 60 cm ยาว 60 cm ผนังและเพดานมีความสูง 60 cm ภายในติดตั้งชุดสะท้อนแสง โครงสร้างรับน้ำหนักเลือกใช้เหล็กฉากขนาด 2.5 cm ซึ่งสามารถขยับเพดานกระจายแสงขึ้น-ลงได้ ถูกสอบเป็นระยะ 10 20 30 40 และ 50 cm ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 25 การติดตั้ง LED ทั้งสองประเภท ดังแสดงในภาพที่ 26 โดยมีการแบ่งจุดวัดความหนาแน่นแสงบนพื้นที่รับแสงออกเป็น 9 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 26 โดยใช้เครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ UPRtek รุ่น PG100N ในการวัดความหนาแน่นของฟอตอนและช่วงคลื่นแสง ขณะที่กำลังไฟฟ้าใช้ Clamp Multimeter ยี่ห้อ UNI-T UT203 เป็นเครื่องมือสำหรับวัดกำลังไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ

ผลการทดสอบของฟอตอนสังเคราะห์แสงของหลอด LED ทั้ง 2 ชนิดพบว่า LED COB ให้ความหนาแน่นฟอตอนทั้งแสงสีน้ำเงิน แดง และน้ำเงินผสมแดง มากที่สุด โดยที่ระยะห่าง 10 cm ได้ระดับความเข้มแสงเป็น 214.14, 102.03 และ 124.26 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่ LED SMD ให้ความหนาแน่นฟอตอน ที่ระยะห่าง 10 cm คือ 84.66, 43.40 และ 53.14 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ในส่วนของประสิทธิภาพของฟอตอนที่ใช้ในงานสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน (PAR efficiency) ของ LED ทั้งสองชนิดพบว่า LED COB แสงสีน้ำเงิน แดง และน้ำเงินผสมแดง มีค่า 1.54, 0.73 และ 1.12 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ ขณะที่ LED SMD มีค่าเป็น 0.61, 0.31 และ 0.38 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ ดังนั้น LED แบบ COB จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหรือพืชที่ต้องการแสงน้อยและพืชกระถาง เนื่องจากให้ความหนาแน่นฟอตอนและประสิทธิภาพ PAR ที่ดีกว่าแบบ LED SMD 5050



ภาพที่ 25 การติดตั้ง LED สีน้ำเงินผสมแดง LED COB และ LED SMD 5050



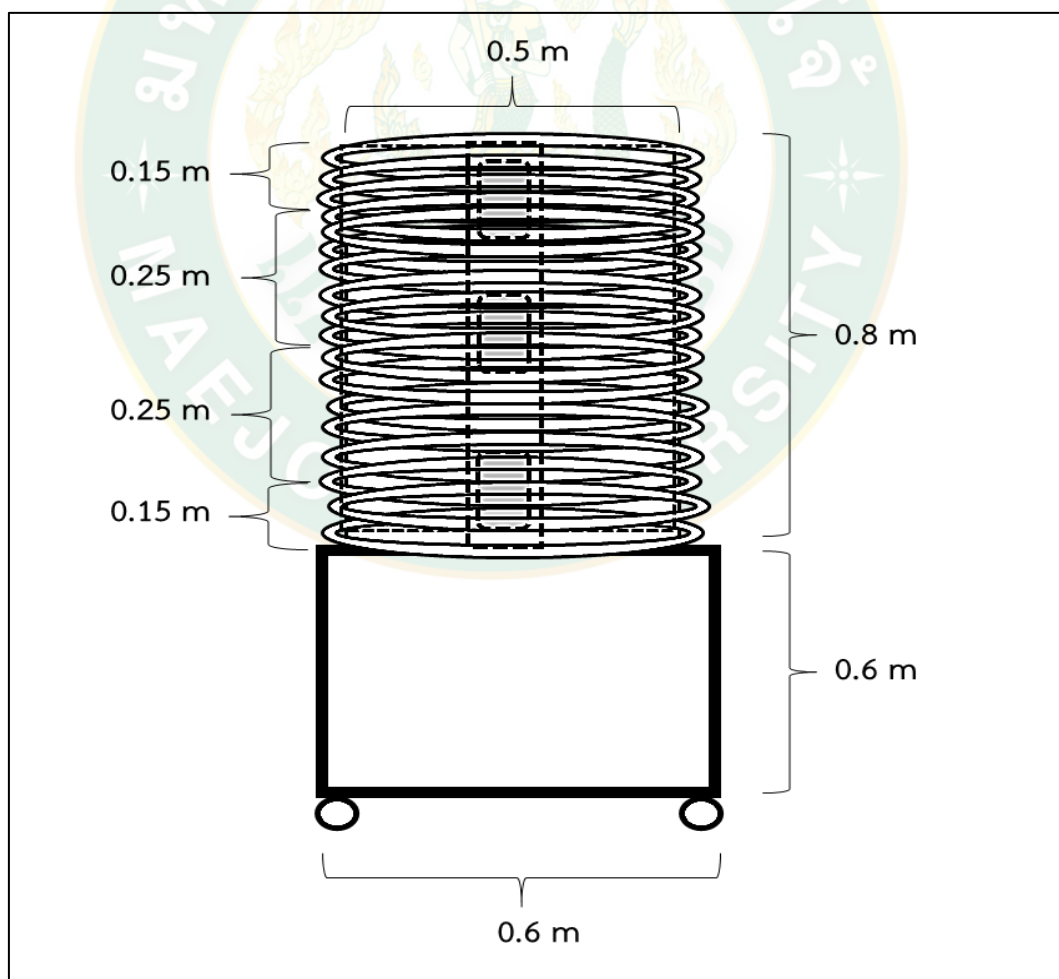
ภาพที่ 26 ชุดทดสอบความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงของ LED COB และ LED SMD

จากการทดสอบ LED ทั้ง 2 ประเภทข้างนี้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ LED COB ในการเลี้ยงสาหร่ายในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด การติดตั้งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน สีแดง และสีผสมน้ำเงิน การออกแบบและติดตั้งหลอด LED COB โดยมีรายละเอียดการติดตั้งดังภาพที่ 27 หลอด LED COB จะติดตั้งบนท่ออะลูมิเนียมสูง 0.8 m ทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 3 ดวง

โดยมีระยะห่างระหว่างหลอด LED 0.25 m เพื่อให้ความเข้มแสงของ LED ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุด ทั้ง 3 สี เพื่อให้สามารถกระจายแสงให้กับท่อ PVC ไสขนาด 1.5 นิ้ว หนา 0.2 mm ยาว 36 m พันรอบโครงสร้างเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 m สูง 0.8 m จำนวน 20 รอบ โดยจำนวนหลอดที่ติดตั้งในระบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ชุดการทดลองที่ 1 ติดตั้งหลอด LED COB สีแดง จำนวน 12 ดวง
- ชุดการทดลองที่ 2 ติดตั้งหลอด LED COB สีน้ำเงิน จำนวน 12 ดวง
- ชุดการทดลองที่ 3 ติดตั้งหลอด LED COB สีแดง จำนวน 6 ดวง สีน้ำเงิน จำนวน 6 ดวง

หลังการติดตั้งหลอด LED แต่ละชุดการทดลองเสร็จสิ้น จึงทำการทดสอบความเข้มแสงของหลอด LED แต่ละชุดดังภาพที่ 28 จากนั้นทำการบันทึกผลการทดสอบระบบให้แสงสว่างที่ใช้ในสังเคราะห์แสงได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2 และช่วงคลื่นแสงของหลอด LED แต่ละสีจากเครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังภาพที่ 30



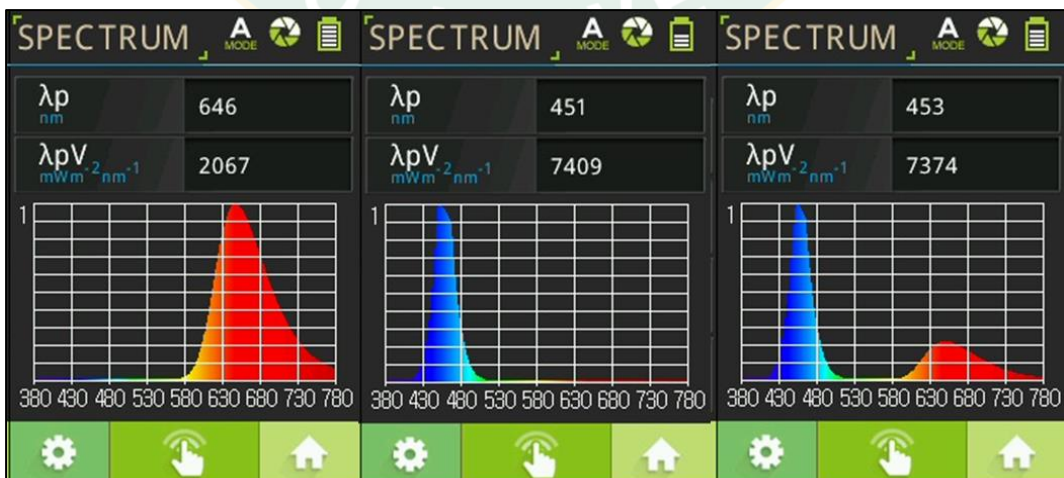
ภาพที่ 27 การติดตั้งหลอด LED และท่อชุดรับแสง



ภาพที่ 28 LED COB บนท่ออะลูมิเนียมและการวัดช่วงความยาวคลื่นแสง



ภาพที่ 29 แสงจากหลอด LED COB ทั้ง 3 สี ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด



ภาพที่ 30 ความยาวคลื่นแสงสีแดง สีน้ำเงิน และสีแดงผสมน้ำเงิน

ตารางที่ 2 ระบบให้แสงสว่างที่ใช้ในสังเคราะห์แสงของแสงทั้ง 3 สี

รายการ	แดง	น้ำเงิน	แดงผสมน้ำเงิน
ช่วงความยาวคลื่นแสง (nm)	600-700	400-500	400-500, 600-700
ช่วงความยาวคลื่นแสงสูงสุด (nm)	646	451	453, 648
ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสง ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	810.5	1,072	1,722
กำลังไฟฟ้าของ LED (W)	600	600	600

ใช้วัสดุทึบแสงสีดำ มีความยาว 0.6 m กว้าง 0.6 m สูง 0.9 m เพื่อครอบคลุมท่อขอรับแสง เพื่อควบคุมปัจจัยของสิ่งแวดล้อมแสงจากดวงอาทิตย์ไม่ให้รบกวนกับแสงจาก LED ที่ใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 30 ให้แสงสว่าง 24 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 6 วัน



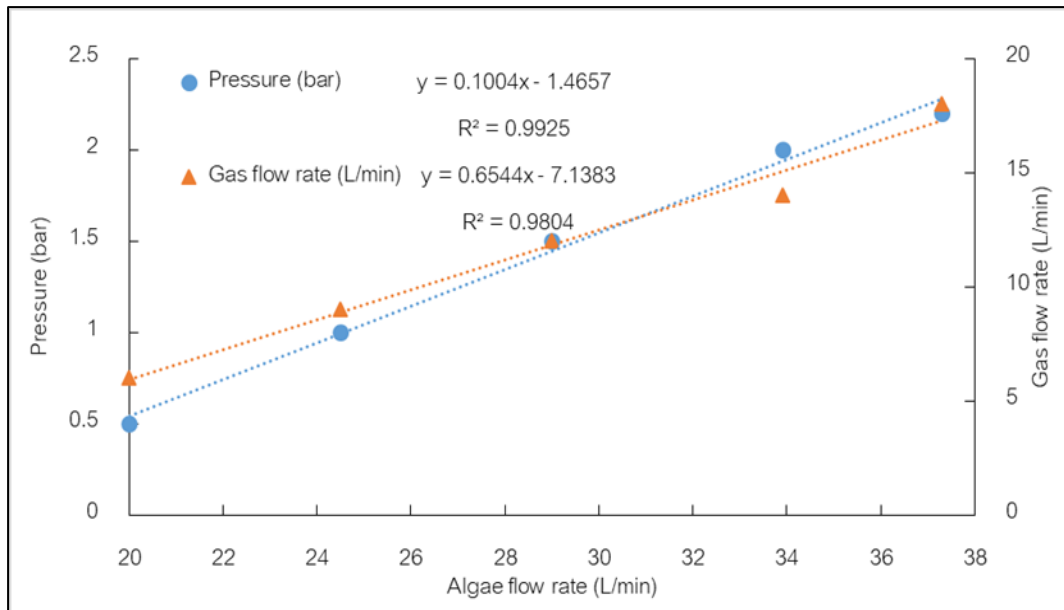
ภาพที่ 31 วัสดุทึบแสงครอบคลุมท่อขอรับแสง

ระบบการหมุนวนน้ำและก๊าซชีวภาพ

ระบบการหมุนวนน้ำ ใช้ปั๊มน้ำ 3 เฟส ยี่ห้อ VENZ รุ่น VM 100 ขนาด 1 HP 0.75 kW ใช้ อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ NFLiXin รุ่น 9000-1T-00040GB ขนาด 4 kW ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ และมีระบบป้องกันก๊าซชีวภาพเข้าระบบเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งระบบเติมก๊าซที่ใช้ในงานวิจัยของสาหร่ายขนาดเล็กมีหลายชนิด เช่น งานวิจัยของ กฤษณ์ (2557) ใช้เครื่องสูบน้ำชนิดสูญญากาศ ยี่ห้อ VENZ Model ปริมาตรการไหลสูงสุด 50 L/min งานวิจัยของ Briassoulis et al., (2010) ใช้ปั๊มลมที่มีอัตราการไหล 120 L/min งานวิจัยของ Li-Hai et al., (2008) ได้ใช้คอมเพรสเซอร์ให้การจ่ายก๊าซ งานวิจัยของ ครรชิต และคณะ (2559) ใช้ peristaltic pump ในการดูดจ่ายปริมาณก๊าซชีวภาพ หรืองานวิจัยของ ฤทัยรัตน์ (2548) ใช้แรงดันในถังก๊าซผสมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศจ่ายเข้าในระบบเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา ยังไม่มีการนำระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีมาใช้ในระบบการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งจากเอกสารเผยแพร่ของ “โครงการส่งเสริมและเผยแพร่เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน Display Center และบ้านประหยัดพลังงาน” ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้กล่าวว่า ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีเป็นระบบเติมอากาศประสิทธิภาพสูงที่สามารถใช้ได้กับกระบวนการเติมอากาศและการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม การทำงานของระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีทำงานโดยอาศัยเครื่องสูบน้ำฉีดน้ำผ่านหัวพ่นเวนจูรีที่มีรูปร่างเป็นคอคอดเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำจนกระทั่งเกิดแรงดูดอากาศลงมาผสมกับน้ำทำให้เกิดการถ่ายเทก๊าซลงไปใต้น้ำ

งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของเวนจูรีในระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก โดยการวัดจำนวนเซลล์สาหร่ายก่อนเข้าและหลังเข้าระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวนจูรี ที่อัตราการไหลต่างๆ และความสัมพันธ์อัตราการไหลของก๊าซกับอัตราการไหลน้ำสาหร่าย โดยงานวิจัยนี้ท่อเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว ยี่ห้อ Superproduct ดังภาพที่ 33 มีการทดสอบระบบการหมุนวนน้ำและก๊าซชีวภาพ ผลการทดสอบได้อัตราการไหลน้ำในระบบ 20, 24.5, 29, 33.9 และ 37 L/min และได้อัตราการไหลของก๊าซเป็น 6, 9, 12, 14 และ 18 L/min ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำสาหร่ายกับอัตราการไหลก๊าซและแรงดันน้ำสาหร่ายก่อนเข้าระบบเวนจูรีจะแสดงดังภาพที่ 32 พบว่าจำนวนเซลล์สาหร่ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวนจูรี ดังนั้นระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวนจูรีสามารถใช้ในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ โดยไม่มีผลทำให้จำนวนเซลล์สาหร่ายลดลงหรือหายไป อีกทั้งระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์สามารถปรับลดอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยที่สุด 0.1 L/min โดยที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่ายยังคงที่ การลดอัตราการไหลของก๊าซของระบบเวนจูรีได้จะเป็นผลดีต่อการนำไปใช้ประยุกต์ในการเลี้ยงสาหร่าย



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำสาหร่ายกับอัตราการไหลก๊าซของเวนจูรี



ภาพที่ 33 ระบบการหมุนวนน้ำและก๊าซชีวภาพ

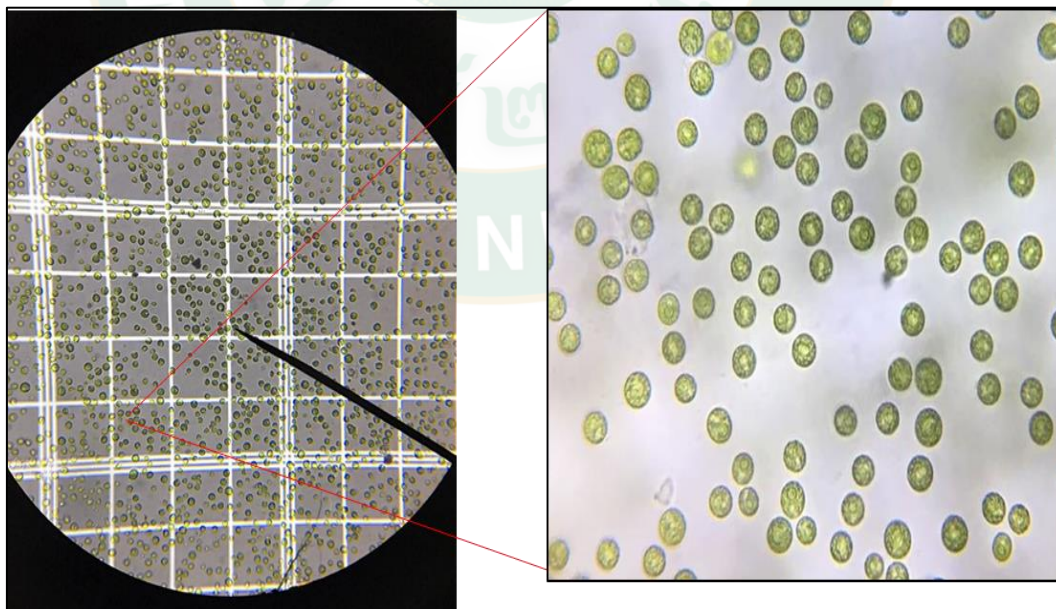
เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซมีผลต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย ซึ่งมีงานวิจัยของ ครรชิต และคณะ 2559 ได้รายงานถึงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพในการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp. TISTR 8432* ที่ 0.05 0.1 และ 0.15 L/min มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบก๊าซชีวภาพได้ถึง $97.48 \pm 0.31\%$ $95.68 \pm$

1.43% และ $93.96 \pm 0.95\%$ ตามลำดับ เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของก๊าซชีวภาพลดลง

โดยงานวิจัยนี้ทำการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหลก๊าซที่ต่ำที่สุดที่ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด คือ 0.1 L/min เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (8.00 น.- 20.00 น.) สลับการเติมอากาศ 6 L/min เวลา 12 ชั่วโมง (20.00 น.- 8.00 น.) ตลอด 6 วัน และทดลองที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำในระบบ 3 ระดับ คือ 20 29 และ 37 L/min

การเตรียมสาหร่าย

นำสาหร่าย *Chlorella sp.* จากสาขาวิชาการประมง คณะมหาวิทยาลัยแม่โจ้ – ชุมพร ดังภาพที่ 34 มาเพาะเลี้ยงในขวดปริมาตร 5 L จำนวน 20 ขวด โดยให้สารอาหาร ดังนี้ ยูเรีย (46-0-0) 0.2 g/L ปุ๋ยนา (16-20-0) 0.1 g/L รำ 0.33 g/L ปูนขาว 0.06 g/L เติมน้ำ 24 ชั่วโมง ใช้แสงอาทิตย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังภาพที่ 35 จนสาหร่ายมีความเข้มข้นที่ $14-15 \times 10^6$ cell/mL จากนั้นนำสาหร่ายปริมาณ 100 L ใส่ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด เติมน้ำสะอาดเพิ่มอีก 100 L และสารอาหาร ซึ่งจะทำให้มีจำนวนเซลล์สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้นที่ระดับความเข้มข้น $7-7.5 \times 10^6$ cell/mL ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 34 ภาพขยายเซลล์ *Chlorella sp.* ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 35 การขยายพันธุ์สาหร่าย *Chlorella sp.* และสารอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง



ภาพที่ 36 สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้น

การเตรียมก๊าซชีวภาพ

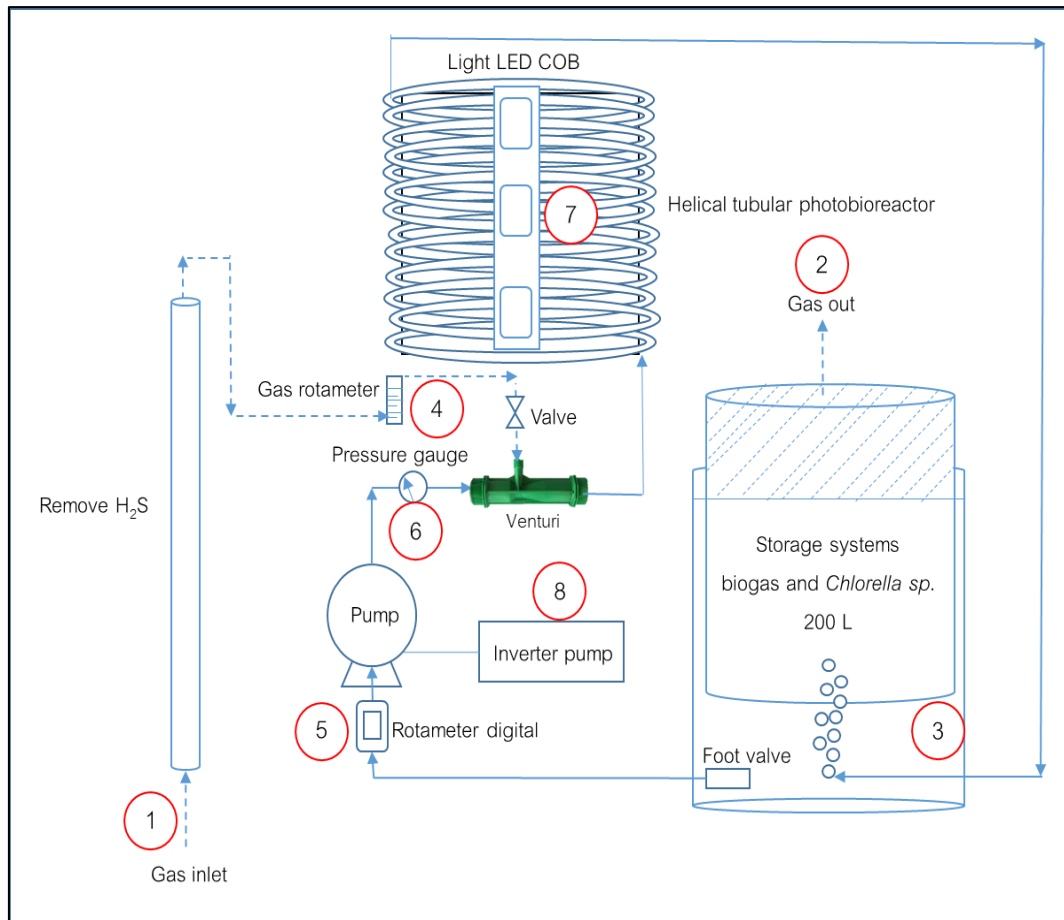
ได้ทำการเติมเศษอาหารขยะอินทรีย์ให้ ระบบหมักแบบต่อเนื่อง ยี่ห้อ COWTEC รุ่น CT 30 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพในการทดลอง ดังภาพที่ 37 การเติมเศษอาหารใช้ ข้าวที่เหลือจากการบริโภค 4 kg/day ตลอดการทดลอง 6 วัน ทำการกวนระบบวันละ 2 ครั้ง เข้าเย็น ครั้งละ 10 นาที



ภาพที่ 37 ระบบก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ระบบหมักแบบต่อเนื่อง

ทดสอบและวิเคราะห์ระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED

ทำการทดสอบและวิเคราะห์ระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED โดยทำการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่าย การวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลของสาหร่าย วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย และการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ ในการเพาะเลี้ยงภายใต้ช่วงคลื่นแสง 3 สี และอัตราการไหลของสาหร่ายในระบบ 3 ระดับ โดยทำการกำหนดจุดวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ดังภาพที่ 38 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 38 จุดตรวจวัดของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงLED

ตารางที่ 3 รายละเอียดจุดวัด ของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสงLED

จุดวัด	ตัวแปรที่ทำการวัด	อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด
1	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ก่อนเข้าระบบ	- เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ ยี่ห้อ Geotech Biogas 5000
2	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ หลังผ่านระบบ	- เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ ยี่ห้อ Geotech Biogas 5000
3	จำนวนเซลล์สาหร่าย อุณหภูมิ ค่า pH	- กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nuvotech E306 และแผ่นนับเซลล์ Hemocytometer ยี่ห้อ HBG - pH meter

ตารางที่ 4 (ต่อ)

จุดวัด	ตัวแปรที่ทำการวัด	อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด
4	อัตราการไหลของก๊าซ	- Rotameter ยี่ห้อ Cheng xin LZM ความละเอียดในการวัด 0.1-1 L/min
5	อัตราการไหลน้ำสาหร่าย	- เครื่องวัดอัตราการไหลของเหลวแบบดิจิตอล ยี่ห้อ DN25 BSPT1
6	แรงดันน้ำสาหร่ายก่อนเข้าระบบเวนจูรี	- เกจวัดแรงดันแบบน้ำมัน ยี่ห้อ Super products
7	ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสง	- เครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ UPRtek รุ่น PG100N
8	กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งระบบ	- Clamp Multimeter ยี่ห้อ UNI-T UT203

การวิเคราะห์การเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย

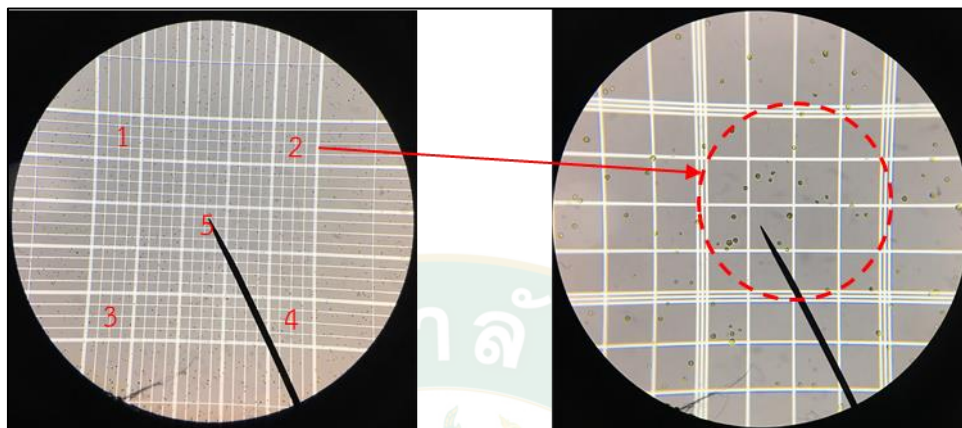
นำตัวอย่างสาหร่าย *Chlorella sp* 10 ml จากถังพักน้ำสาหร่าย เวลา 8.00 น ตลอด 6 วัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nuvotech E306 ใช้กำลังขยาย 400 เท่า และแผ่นนับเซลล์ Hemocytometer ยี่ห้อ HBG ในการนับจำนวนเซลล์สาหร่ายดังภาพที่ 39 โดยช่องที่ 1 2 3 4 และ 5 มีความกว้าง ยาวเท่ากับ 0.2 mm ความลึก 0.1 mm ดังภาพที่ 40 จะสามารถหาความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายได้จากสมการที่ 1



ภาพที่ 39 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (cell/mL) = ค่าเฉลี่ยของเซลล์สาหร่ายทั้ง 5 ช่อง × 10⁶ สมการที่ 1

4



ภาพที่ 40 การนับจำนวนเซลล์สาหร่ายโดยใช้แผ่นนับเซลล์ Hemocytometer

จากการศึกษางานวิจัยของ (Madiha และคณะ, 2013) เพื่อคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ , day⁻¹) โดยที่ N_2 และ N_1 เป็นความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย ($\times 10^6$ cell/mL) ที่เวลา t_2 และ t_1 (day) ดังสมการที่ 2

$$\mu = \ln(N_2 - N_1) / t_2 - t_1$$

สมการที่ 2

การวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลของสาหร่าย

ปริมาณการผลิตชีวมวลของระบบทั้งหมด (g) (Yan และ Zheng, 2014) จากสมการที่ 3 เมื่อสิ้นสุดการทำงานในวันที่ 6 โดยทำตัวอย่างสาหร่าย 50 ml มาหาความเข้มข้นของชีวมวล (g / L) ดังสมการที่ 4 ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 5 (Filter paper grade 5) ยี่ห้อ WHATMAN จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ตู้อบ ยี่ห้อ Binder รุ่น FED115 ที่อุณหภูมิ 105 °C และทำการชั่งน้ำหนักกระดาษกรองก่อนกรองและหลังอบ ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น FG503-s ดังภาพที่ 41

ชีวมวลของระบบทั้งหมด (g) = ความเข้มข้นของชีวมวล (g / L) × ปริมาตรทั้งหมดในระบบ (L)

สมการที่ 3

ความเข้มข้นของชีวมวล (g / L) = $\frac{\text{น้ำหนักกระดาศกรองหลังอบ(g)} - \text{น้ำหนักกระดาศกรองก่อนอบ(g)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างสาหร่าย (L)}}$

สมการที่ 4



ภาพที่ 41 การวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลของสาหร่าย

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง(pH) และอุณหภูมิของน้ำสาหร่าย โดยใช้ pH meter ดังภาพที่ 42 โดยทำการตรวจวัดหลังก๊าซชีวภาพผ่านระบบแล้ว 12 ชั่วโมง เวลา 20.00 น ตลอด 6 วัน วัดความหนาแน่นโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของระบบของแสงทั้ง 3 สี โดยเครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ UPRtek รุ่น PG100N



ภาพที่ 42 วัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างและอุณหภูมิของน้ำสำหรับ

การวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ

การเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ตำแหน่ง Gas inlet ที่เวลา 8.00 น. และ Gas out หลังก๊าซชีวภาพผ่านระบบ 12 ชั่วโมง (8.00-20.00น) เวลา 20.00 น ตลอด 6 วัน ดังภาพที่ 38 เพื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซโดยใช้ถุงเก็บก๊าซ ขนาด 500 mL ยี่ห้อ RESTEK จากนั้นนำถุงตัวอย่างก๊าซเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ ยี่ห้อ Geotech Biogas 5000 ดังภาพที่ 43 และนำค่าที่ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน (R_{CH_4} , %) ดังสมการที่ 5 โดยที่ $CH_{4, out}$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนหลังออกระบบ (% v/v) และ $CH_{4, in}$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบ (% v/v)

$$R_{CH_4} = \left[1 - \left(\frac{CH_{4, in}}{CH_{4, out}} \right) \right] \times 100 \quad \text{สมการที่ 5}$$

การหาประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (R_{CO_2} , %) ได้จากสมการที่ 6 โดยที่ $CO_{2, out}$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังออกระบบ (% v/v) และ $CO_{2, in}$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบ (% v/v) (Yan และZheng, 2014)

$$R_{CO_2} = \left[1 - \left(\frac{CO_{2,Out}}{CO_{2,In}} \right) \right] \times 100$$

สมการที่ 6



ภาพที่ 43 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ในการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์นี้เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายการผลิตสาหร่าย ค่าใช้จ่ายในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าใช้จ่ายประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED โดยมีการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตสาหร่าย (Baht/g) หาได้จาก ค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าทั้งหมด (Baht) ต่อ น้ำหนักสาหร่ายที่ผลิตได้ (g)

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (Baht/g) หาได้จาก ค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าทั้งหมด (Baht) ต่อ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัด (g)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ในการทำนายศักยภาพของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED โดยนำผลอัตราการไหลระดับต่างๆเป็นตัวแปรต้น ซึ่งผลของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (Cell density ; $\times 10^6$ cell/mL) ผลความเข้มข้นของชีวมวล (Weight biomass ; g/L) ผลต่างของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนและหลังออกระบบหรือสัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ถูกกำจัดลง ($\text{CO}_{2, \text{in}} - \text{CO}_{2, \text{out}}$; % v/v) และ ผลของสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น ($\text{CH}_{4, \text{out}} - \text{CH}_{4, \text{in}}$; % v/v) เป็นตัวแปรตาม โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เวอร์ชัน 2013 เพื่อสร้างสมการทำนายศักยภาพของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.*



บทที่ 4

ผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ ภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED เพื่อหาค่าศักยภาพในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ปริมาณการผลิตชีวมวลของระบบ โดยมีเงื่อนไขในการเพาะเลี้ยงภายใต้ช่วงคลื่นแสง 3 สี ได้แก่ สีแดง สีน้ำเงิน และสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลของสาหร่ายในระบบ 3 ระดับ คือ 20 29 และ 37 L/min ใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่มีความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นอยู่ระหว่าง 7-7.6 celU/mL โดยให้ก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล เท่ากับ 0.1 L/min เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (8.00 น.- 20.00 น.) สลับการเติมอากาศ 6 L/min เวลา 12 ชั่วโมง (20.00 น.- 8.00 น.) ตลอด 6 วัน โดยผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการออกแบบและระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด

จากออกแบบและสร้างระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด เพื่อใช้ในการทดสอบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ โดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* แสงภายใต้แสง LED ดังภาพที่ 44 และภาพที่ 45 มีการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละวัน โดยมีภาระโหลด คือ ระบบให้แสงสว่าง LED ระบบปั๊มหมุนเวียนน้ำ ได้ผลดังตารางที่ 4



ภาพที่ 44 ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด



ภาพที่ 45 ระบบโฟโตโวลเทอิกแอกเตอร์แบบท่อขดขณะเปิดแสง LED

ตารางที่ 4 กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบระบบโฟโตโวลเทอิกแอกเตอร์แบบท่อขด ที่สภาวะต่างๆ

อัตราการไหล น้ำสาหร่าย (L/min)	กำลังไฟฟ้า ปั้มน้ำ (W)	ความถี่ของ มอเตอร์ (Hz)	กำลังไฟฟ้า LED (W)	กำลังไฟฟ้ารวม (kW)
20	276	24.65	600	0.876
29	368	33.28	600	0.968
37	621	50.00	600	1.221

จากตารางที่ 5 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลน้ำสาหร่ายตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้ารวมมีค่าเพิ่มขึ้น ตามกำลังไฟฟ้าของปั้มน้ำ ซึ่งเงื่อนไขการทดลองที่อัตราการไหลที่ 20 L/min กำลังไฟฟ้ารวมของระบบที่ทำงาน 24 ชั่วโมง มีค่าน้อยที่สุด คือ 21.02 kWh/day และระบบใช้กำลังไฟฟ้ารวมมากที่สุด เมื่อเพิ่มกำลังการทำงานของปั้มสูงสุด ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 37 L/min คิดเป็นกำลังไฟฟ้ารวม เท่ากับ 29.304 kWh/day

ผลและวิเคราะห์ผลช่วงคลื่นแสงและอัตราการไหลน้ำสำหรับต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย และปริมาณชีวมวลของสาหร่าย *Chlorella sp.*

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED ที่ช่วงคลื่นแสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน โดยมีเงื่อนไขในการเพาะเลี้ยงภายใต้ช่วงคลื่นแสง 3 สี ได้แก่ แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และสีน้ำเงินผสมแดง สามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ อัตราการไหลสาหร่าย 20 29 และ 37 L/min โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5

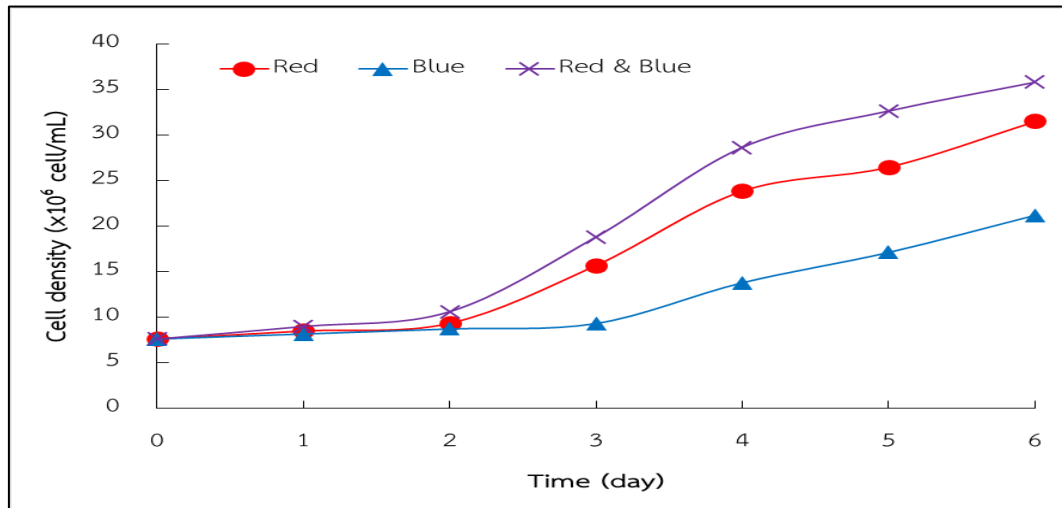
ตารางที่ 5 ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดที่สภาวะต่างๆ

แสง	อัตราการไหล (L/min)	ความหนาแน่น	อัตราการเจริญเติบโต	น้ำหนักชีวมวล
		สูงสุด ($\times 10^6$ cell/mL)	จำเพาะสูงสุด (day^{-1})	แห้ง (g/L)
สีแดง	20	31.45	2.098	0.38
	29	21.33	1.841	0.26
	37	16.20	1.393	0.20
สีน้ำเงิน	20	21.18	1.499	0.26
	29	15.08	0.822	0.18
	37	10.90	0.389	0.14
สีแดง	20	35.78	2.285	0.44
ผสม	29	24.05	1.879	0.30
น้ำเงิน	37	18.15	1.542	0.22

ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 20 L/min

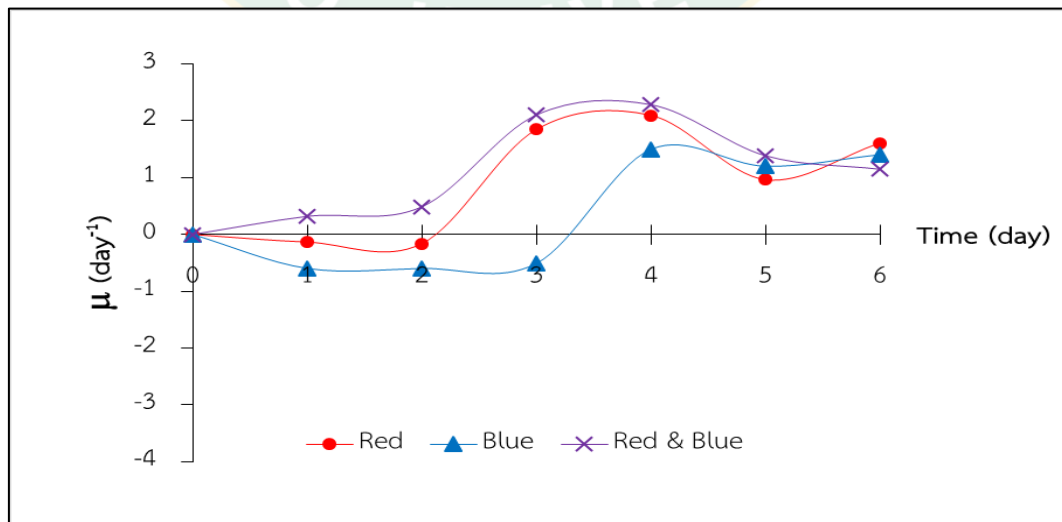
สาหร่าย *Chlorella sp.* มีการเจริญเติบโตตลอดการทดลองดังภาพที่ 46 เห็นได้ว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ใช้แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และ แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ในกระบวนการสังเคราะห์แสงมีการเจริญเติบโตจากความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 7.6×10^6 cell/mL จนถึงวันที่ 6

เท่ากับ 31.45×10^6 21.18×10^6 และ 35.78×10^6 cell/mL ตามลำดับ มีน้ำหนักแห้งของสาหร่ายวันสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.38 0.26 และ 0.44 g/L ตามลำดับ



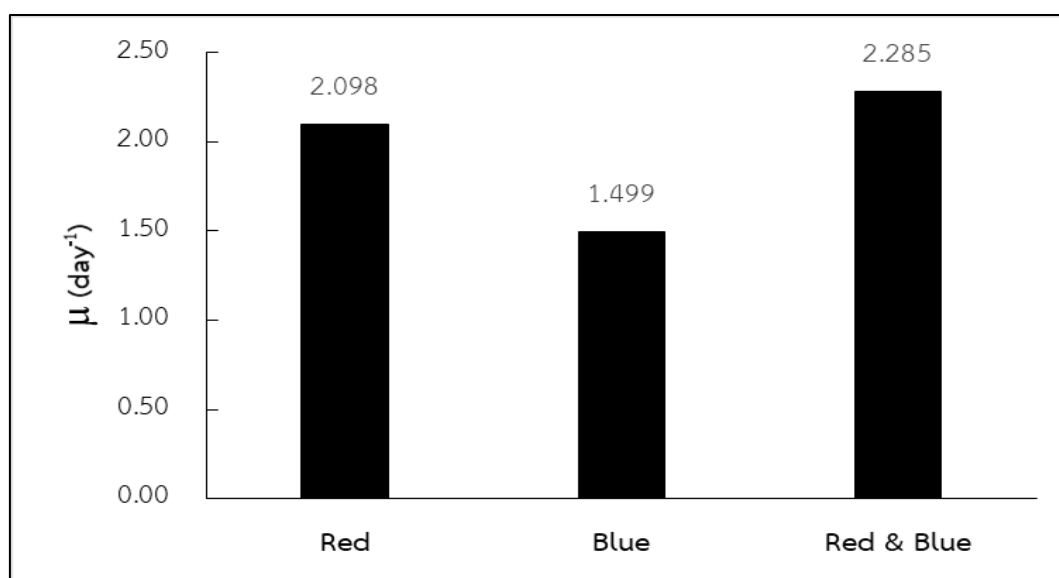
ภาพที่ 46 ความหนาแน่นของสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะตลอดการทดลอง พบว่า อัตราการเจริญเติบโตช่วงวันที่ 1-2 เป็นระยะการปรับตัว ช่วงนี้สาหร่ายจะอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือเป็นลบ ช่วงวันที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าแสงสีผสมและแสงสีแดงจะให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่สีน้ำเงินมีอัตราการเจริญเติบโตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแสงสีอื่น ช่วงวันที่ 4-6 เห็นได้ว่าเป็นช่วงที่อัตราการเติบโตลดลง ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min

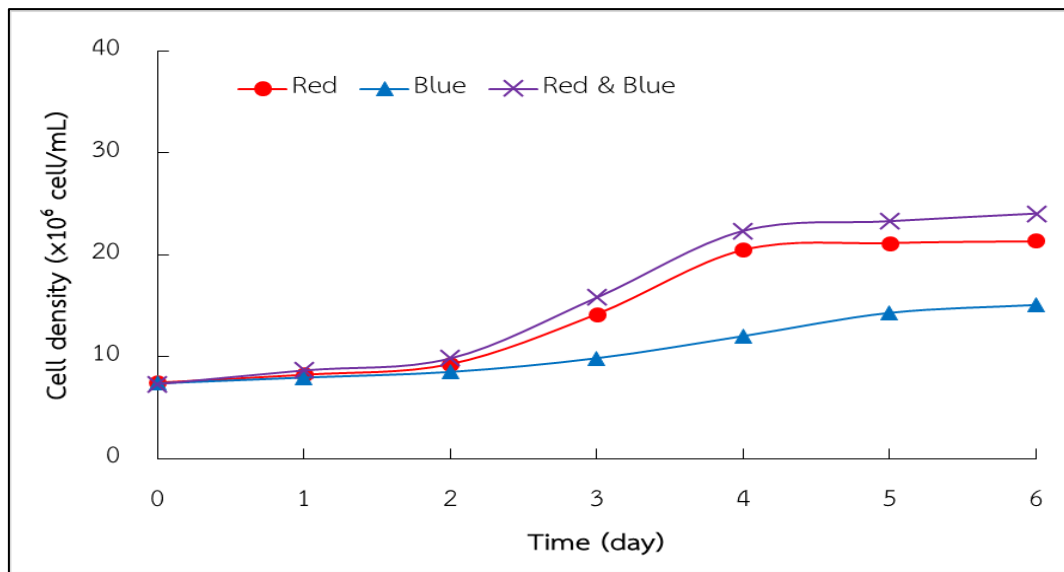
จากผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้มีการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแสงทั้ง 3 สี ดังภาพที่ 48 พบว่า แสงสีแดงผสมน้ำเงินให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงวันที่ 3-4 เท่ากับ 2.285 day^{-1} แสงสีแดงให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงวันที่ 3-4 เท่ากับ 2.098 day^{-1} และแสงสีน้ำเงินให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงของวันที่ 4-5 เท่ากับ 1.499 day^{-1} ตามลำดับ



ภาพที่ 48 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 20 L/min

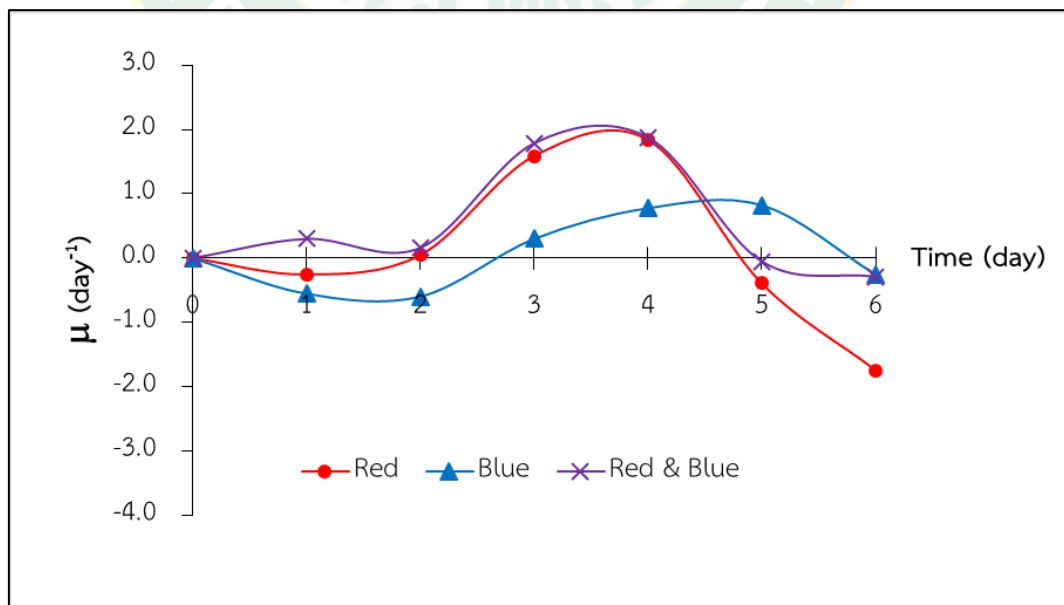
ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp* อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 29 L/min

สาหร่าย *Chlorella sp.* มีการเจริญเติบโตตลอดการทดลองดังภาพที่ 49 เห็นได้ว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ใช้แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และ สีแดงผสมน้ำเงิน มีการเจริญเติบโตที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายจาก $7.3-7.45 \times 10^6 \text{ cell/mL}$ ถึงวันที่ 6 เท่ากับ 21.33×10^6 15.08×10^6 และ $24.05 \times 10^6 \text{ cell/mL}$ ตามลำดับ มีน้ำหนักแห้งของสาหร่ายวันสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.26 0.18 และ 0.30 g/L ตามลำดับ



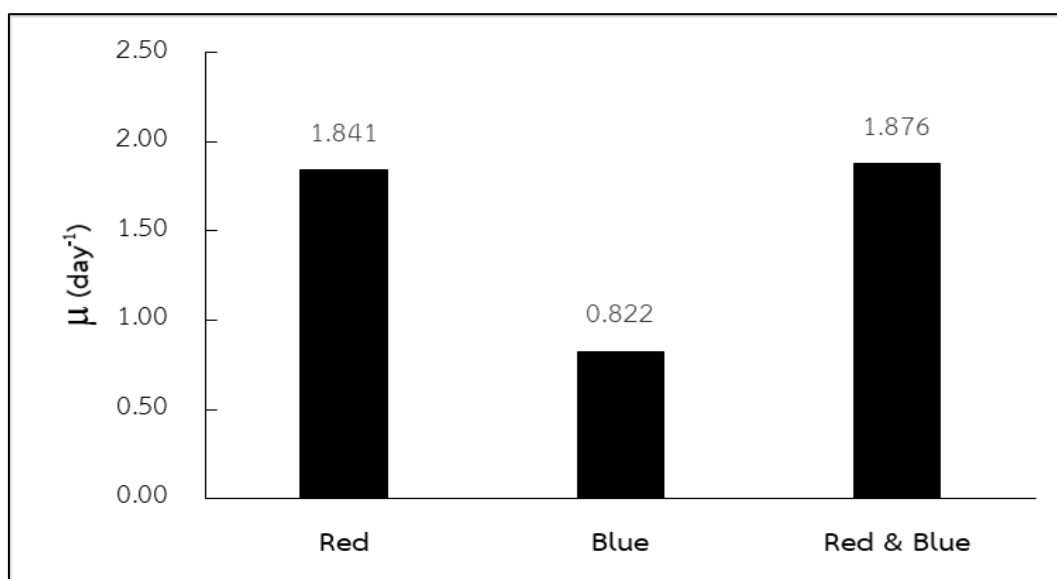
ภาพที่ 49 ความหนาแน่นของสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min

เมื่อนำข้อมูลความหนาแน่นของสาหร่ายตลอดการทดลองที่อัตราการไหล 29 L/min คำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะตลอดการทดลอง พบว่า อัตราการเจริญเติบโตช่วงวันที่ 1-2 เป็นระยะการปรับตัว ช่วงนี้สาหร่ายจะอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือเป็นลบ ช่วงวันที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าแสงสีผสมและแสงสีแดงจะให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงวันที่ 4-6 เห็นได้ว่าเป็นช่วงที่อัตราการเติบโตลดลง ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min

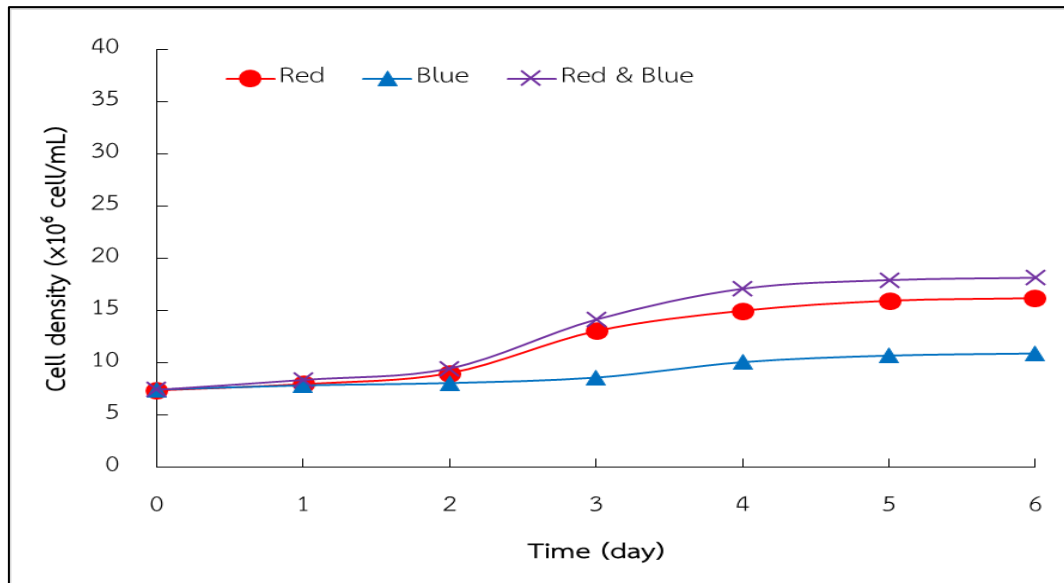
จากผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้มีการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแสงทั้ง 3 สี ที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่าย 29 L/min พบว่า แสงสีแดงผสมน้ำเงินให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงวันที่ 3-4 เท่ากับ 1.876 day^{-1} แสงสีแดงให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงวันที่ 3-4 เท่ากับ 1.841 day^{-1} และแสงสีน้ำเงินให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงของวันที่ 4-5 เท่ากับ 0.822 day^{-1} ดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 29 L/min

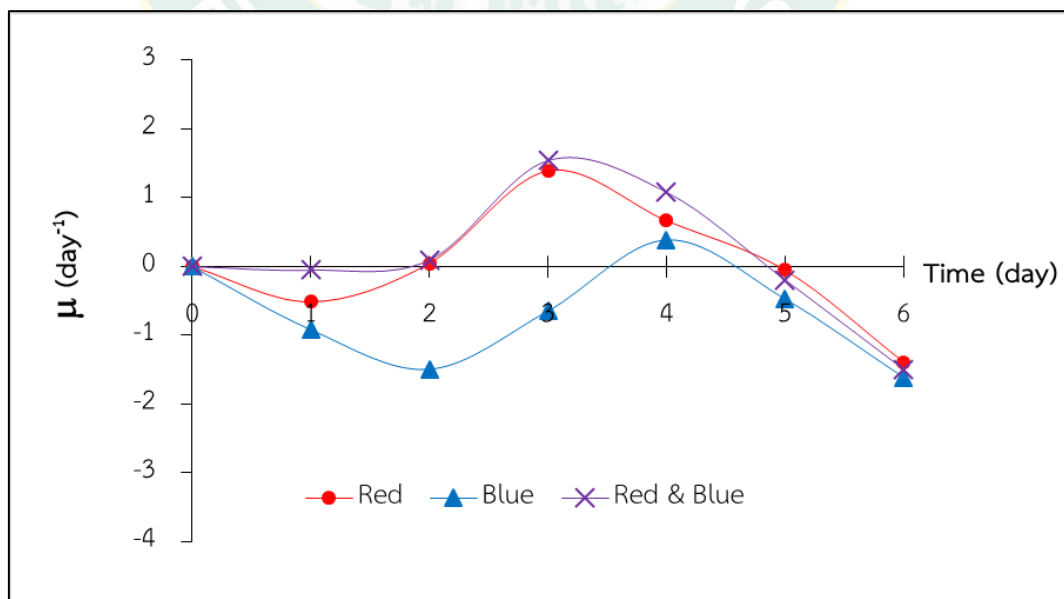
ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp* อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 37 L/min

สาหร่าย *Chlorella sp*. มีการเจริญเติบโตตลอดการทดลองดังภาพที่ 52 เห็นได้ว่าสาหร่าย *Chlorella sp*. ที่ใช้แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และ แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ในกระบวนการสังเคราะห์แสงมีการเจริญเติบโตที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายจากวันเริ่มต้น $7.3-7.45 \text{ cell/mL}$ จนถึงวันที่ 6 เท่ากับ 16.20×10^6 10.90×10^6 และ $18.15 \times 10^6 \text{ cell/mL}$ ตามลำดับ มีน้ำหนักแห้งของสาหร่ายวันสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.20 0.14 และ 0.22 g/L ตามลำดับ



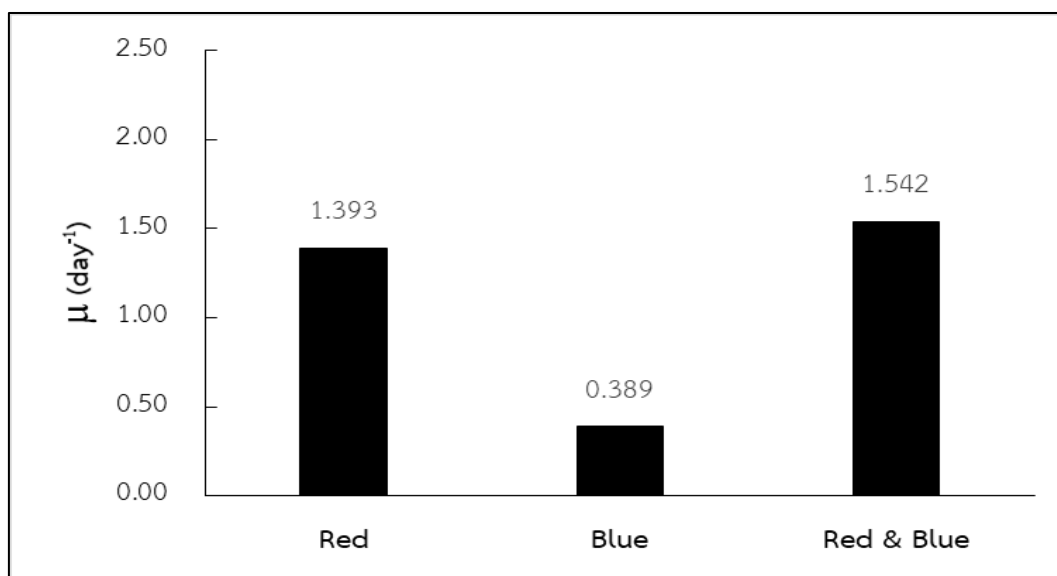
ภาพที่ 52 การเจริญเติบโตของสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min

เมื่อนำข้อมูลความหนาแน่นของสาหร่ายตลอดการทดลองที่อัตราการไหล 37 L/min คำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะตลอดการทดลอง พบว่า อัตราการเจริญเติบโตช่วงวันที่ 1-2 เป็นระยะการปรับตัว ช่วงนี้สาหร่ายจะอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือเป็นลบ ช่วงวันที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าแสงสีผสมและแสงสีแดงจะให้อัตราการเจริญโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงวันที่ 4-6 เห็นได้ว่าเป็นช่วงที่อัตราการเติบโตลดลง ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min

จากผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้มีการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแสงทั้ง 3 สี ที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่าย 37 L/min พบว่า แสงสีแดงผสมน้ำเงินให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงวันที่ 3-4 เท่ากับ 1.542 day^{-1} แสงสีแดงให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงวันที่ 3-4 เท่ากับ 1.393 day^{-1} และแสงสีน้ำเงินให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดช่วงของวันที่ 4-5 เท่ากับ 0.389 day^{-1} ดังภาพที่ 54

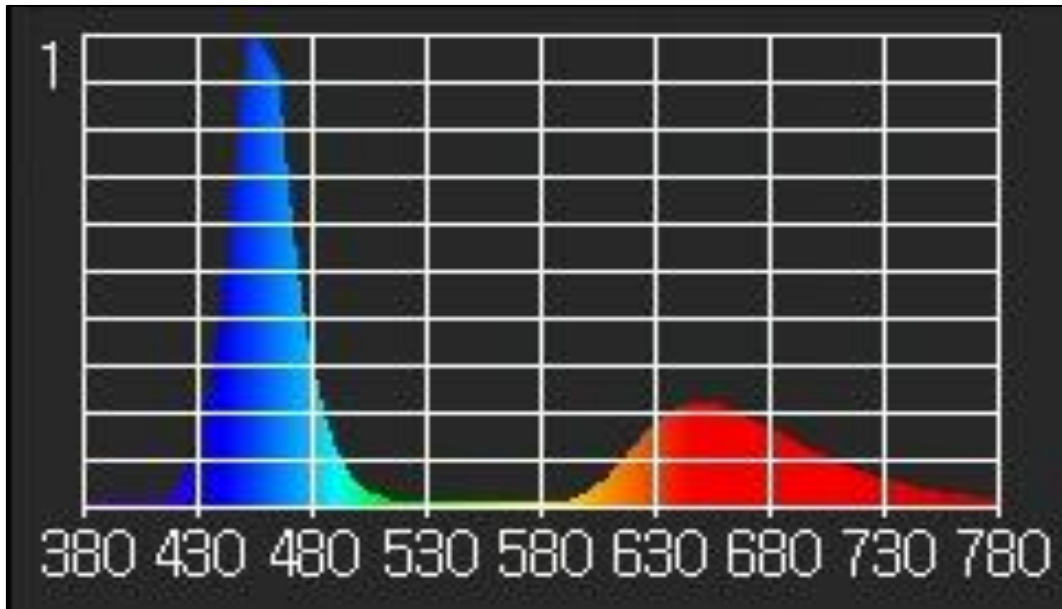


ภาพที่ 54 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 37 L/min

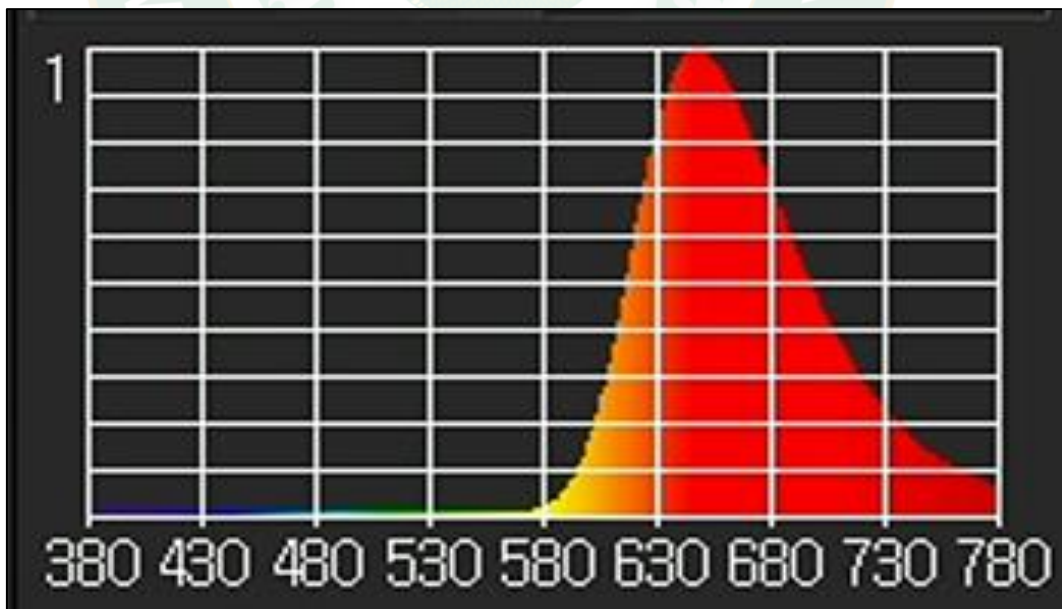
วิเคราะห์ช่วงคลื่นแสงและอัตราการไหลน้ำสาหร่ายต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

จากผลของการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อขดภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED จะพบว่าการใช้แสงสีแดงผสมน้ำเงินในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* มีการเจริญเติบโต อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมากกว่าแสงสีแดง และแสงสีน้ำเงิน ทุกอัตราการไหลของน้ำสาหร่ายที่เปลี่ยนไป สาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถใช้พลังงานแสงสำหรับการสังเคราะห์ด้วย คลอโรฟิลล์ a และคลอโรฟิลล์ b ที่ดูดซับแสงความยาวคลื่น 450 - 475 nm และ 630 - 675 nm ตามลำดับ จากการติดตั้ง LED COB สีแดงผสมน้ำเงินของงานวิจัยนี้ พบว่าผลการทดสอบแสงในช่วงคลื่นอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงิน 430-480 nm มีคลื่นแสงมากที่สุดอยู่ที่ 453 nm แสงสีแดงให้คลื่นแสงช่วง 630-680 nm มีคลื่นแสงมากที่สุดอยู่ที่ 648 nm ภาพที่ 55 แต่ LED สีแดงจะให้ช่วงคลื่นแสงแดงเพียงช่วงแสงเดียว 630-680 nm ดังภาพที่ 56 และ LED สีน้ำเงินจะให้ช่วงคลื่นแสงน้ำเงินเพียงช่วงแสงเดียว 430-480 nm ดังภาพที่ 57 จึงเป็นผลทำให้

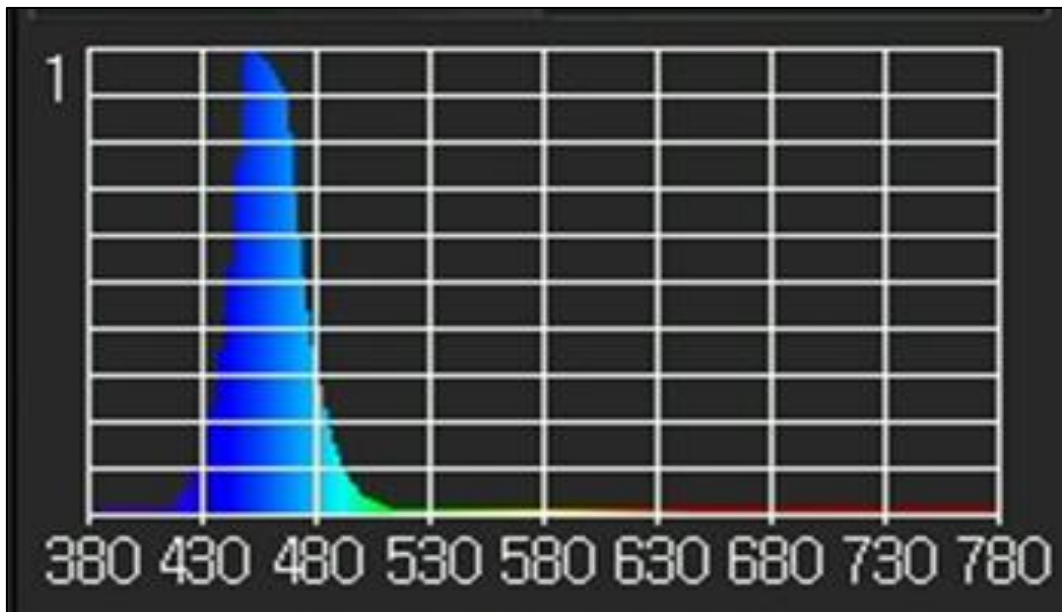
การใช้แสงสีเดียว มีการเจริญเติบโตน้อยกว่าแสงสีผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yan และ Zheng, 2014) ที่พบว่าแสงที่สาหร่าย *Chlorella sp.* มีการเจริญเติบโตมากที่สุด คือ แสงจากหลอด LED แสงสีแดงผสมน้ำเงิน



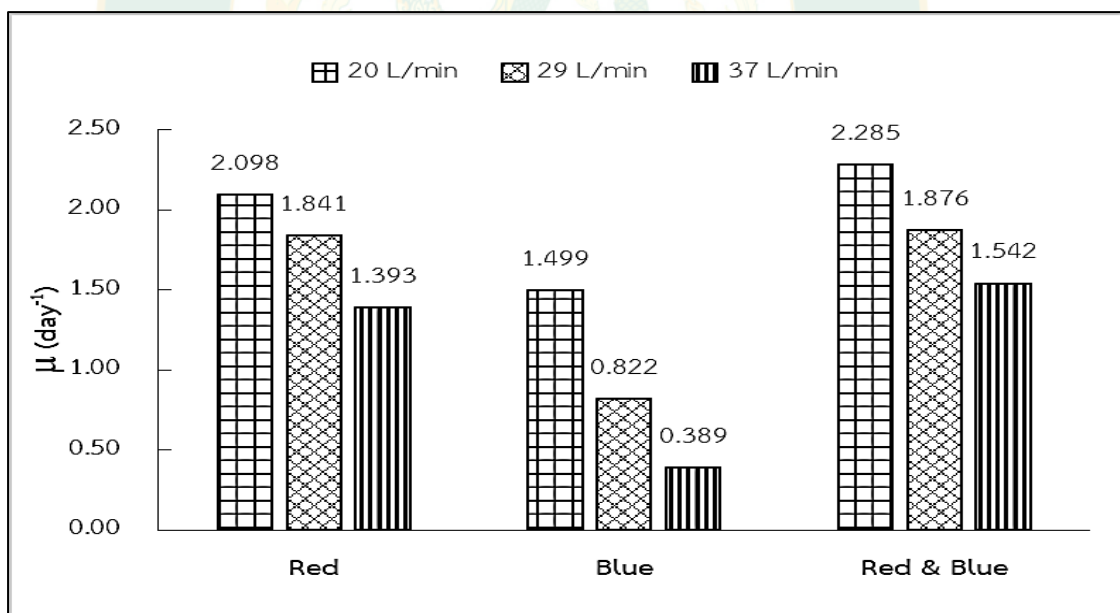
ภาพที่ 55 ช่วงคลื่นแสงสีแดงผสมน้ำเงินจากหลอด LED ในระบบไฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด



ภาพที่ 56 ช่วงคลื่นแสงสีแดงจากหลอด LED ในระบบไฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด



ภาพที่ 57 ช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงินจากหลอด LED ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด

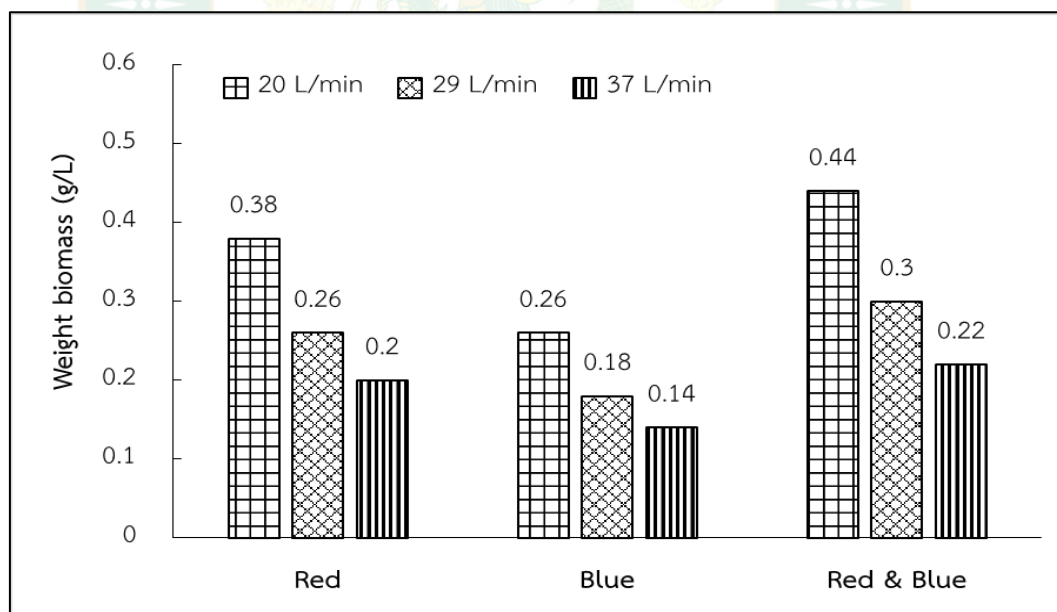


ภาพที่ 58 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่เงื่อนไขต่างๆ

เมื่อพิจารณาระหว่าง LED แสงสีแดง และ LED แสงสีน้ำเงิน จะเห็นได้ว่าระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดง ให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด มากกว่าแสงสีน้ำเงิน ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่ายเท่ากัน จึงสรุปได้ว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* มีสารสีที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงช่วงคลื่น

แสงสีแดงได้ดีกว่าช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน จึงส่งผลให้สาหร่าย *Chlorella sp.* เจริญเติบโตได้ดีในแสงสีแดงมากกว่าแสงสีน้ำเงิน ดังภาพที่ 58 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ (Yongjun. Zhao และคณะ, 2013) ได้กล่าวว่า สาหร่าย *Chlorella sp.* มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับความยาวคลื่นแสงสีแดง ผ่านคลอโรฟิลล์ในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสง ในขณะที่ความยาวคลื่นแสงอื่น ๆ สามารถดูดซับได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

จากข้อมูลตารางที่ 5 พบว่า น้ำหนักชีวมวลแห้ง (Weight biomass) ของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่เพาะเลี้ยงในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในวันสุดท้ายของการทดลอง 6 วัน พบว่าแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ให้น้ำหนักชีวมวลแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.44 g/L ที่อัตราการไหล 20 L/min แสงสีแดงได้น้ำหนักชีวมวลแห้งสูงสุด เท่ากับ 0.38 g/L ที่อัตราการไหล 20 L/min และแสงสีน้ำเงินได้น้ำหนักชีวมวลแห้งสูงสุด. เท่ากับ 0.26 g/L ที่อัตราการไหล 20 L/min พบว่า LED แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ให้น้ำหนักชีวมวลแห้งมากที่สุด ที่อัตราการไหล ที่ 20 L/min ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการเจริญเติบโต และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่เพาะเลี้ยงด้วย LED แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ให้ผลการเจริญเติบโต และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Chlorella sp.* ได้ดีกว่าแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 59 น้ำหนักชีวมวลแห้งของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่เพาะเลี้ยงในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในวันสุดท้ายของการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำสาหร่ายที่ระดับต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราการไหลน้ำสาหร่ายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตและน้ำหนักสาหร่าย *Chlorella sp.* จะลดลง ดังภาพที่ 58 และภาพที่ 59 เพราะเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นสาหร่ายจะอยู่ในท่อขอรับแสง และเวลาในการสังเคราะห์แสงน้อยลง ซึ่งจากการทดสอบหาระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขอรับแสงมีรายละเอียดการคำนวณหาระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขอรับแสง ดังนี้

จากสมการสมการพื้นฐานของการไหล สมการของการอนุรักษ์มวล (สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน, 2558)

$$Q = A V$$

โดยที่	Q	คือ อัตราการไหล (m^3/s)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)
	V	คือ ความเร็วในการไหลผ่านพื้นที่ตัดท่อ (m/s)

เมื่อท่อ PVC สี มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว = 0.0381 m คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดท่อมีค่าเท่ากับ $0.00114 m^2$ มีความยาวท่อขอรับแสง 36 m

-หาความเร็วในการไหลผ่านพื้นที่ตัดท่อ ที่อัตราการไหล 20 L/min หรือ $0.00033 m^3/s$

$$V_{20 \text{ L/min}} = Q / A = 0.00033 / 0.00114 = 0.259 \text{ m/s}$$

$$\text{จะได้ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขอรับแสง} = 36 / 0.259 = 139 \text{ s}$$

-หาความเร็วในการไหลผ่านพื้นที่ตัดท่อ ที่อัตราการไหล 29 L/min หรือ $0.00048 m^3/s$

$$V_{29 \text{ L/min}} = 0.00048 / 0.00114 = 0.421 \text{ m/s}$$

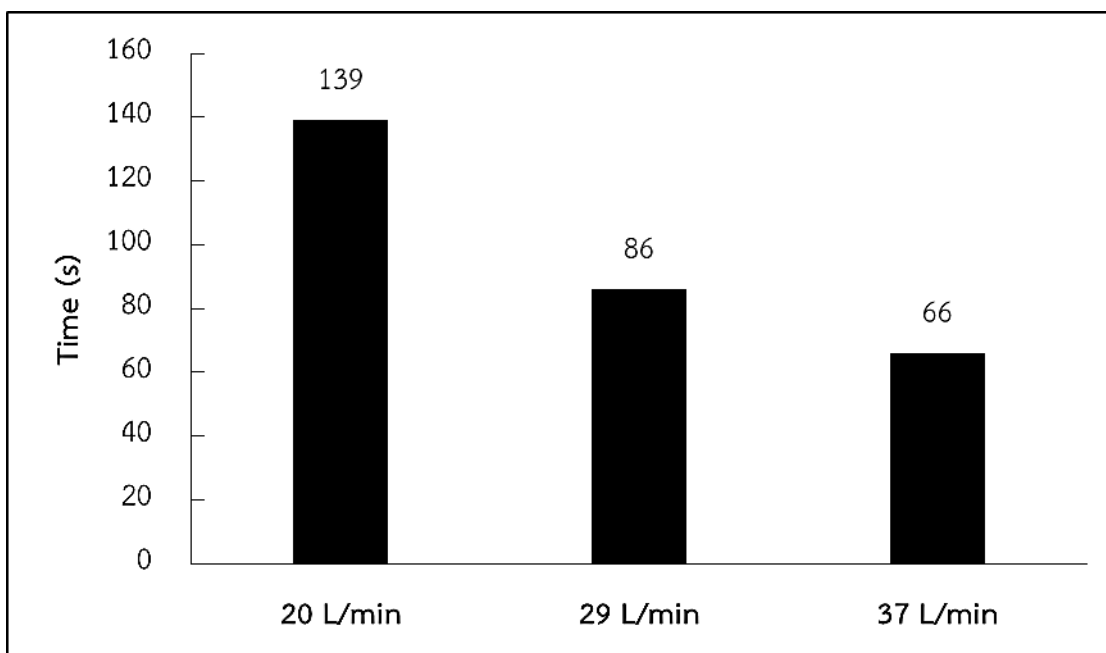
$$\text{จะได้ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขอรับแสง} = 36 / 0.421 = 86 \text{ s}$$

-หาความเร็วในการไหลผ่านพื้นที่ตัดท่อ ที่อัตราการไหล 37 L/min หรือ $0.00062 m^3/s$

$$V_{37 \text{ L/min}} = 0.00062 / 0.00114 = 0.544 \text{ m/s}$$

$$\text{จะได้ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขอรับแสง} = 36 / 0.544 = 66 \text{ s}$$

สามารถสรุปผลของระยะเวลาที่สาหร่าย *Chlorella sp.* อยู่ในท่อขอรับแสง ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์ ที่อัตราการไหลสาหร่าย 3 ระดับ โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด

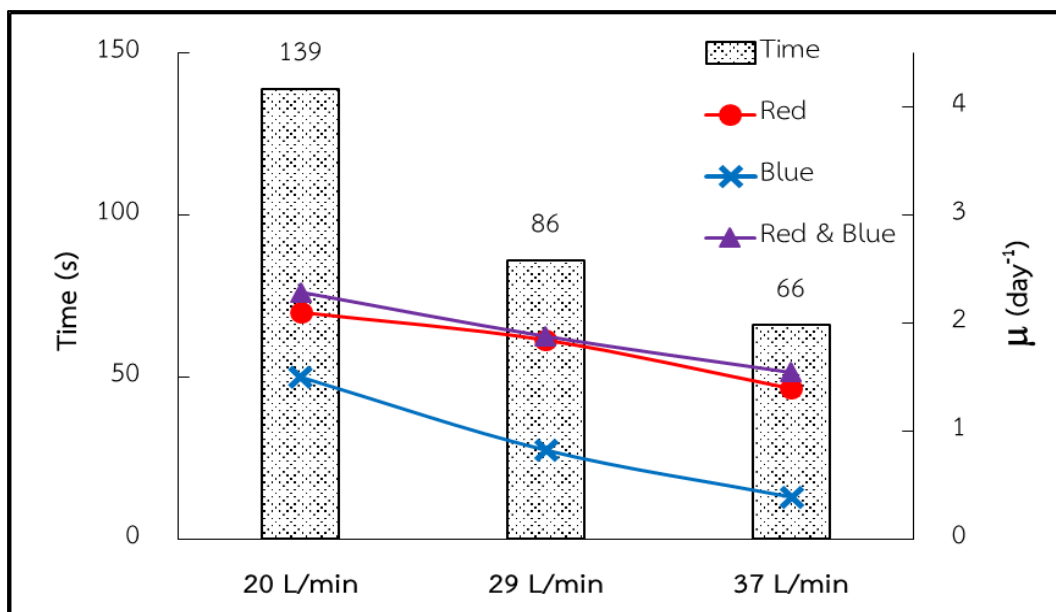
จากภาพที่ 60 ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดรับแสงนั้น พบว่า ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่ายที่ 20 L/min มีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนก๊าซให้กับสาหร่าย เท่ากับ 139 s คิดเป็น 2 min 19 s มีระยะเวลานาน กว่าอัตราการไหลน้ำสาหร่ายที่ 29 และ 37 L/min ที่มีเวลา 86 และ 66 s ตามลำดับ

จากระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่แสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ดังภาพที่ 61 พบว่า เมื่อระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดลดลงอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด ที่อัตราการไหล 20 L/min ให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่าย *Chlorella sp.* มากที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

แสงสีแดงผสมน้ำเงิน มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.285 day^{-1} ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 1.542 day^{-1} ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีแดง มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.098 day^{-1} ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 1.393 day^{-1} ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีน้ำเงิน มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.499 day^{-1} ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.389 day^{-1} ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s



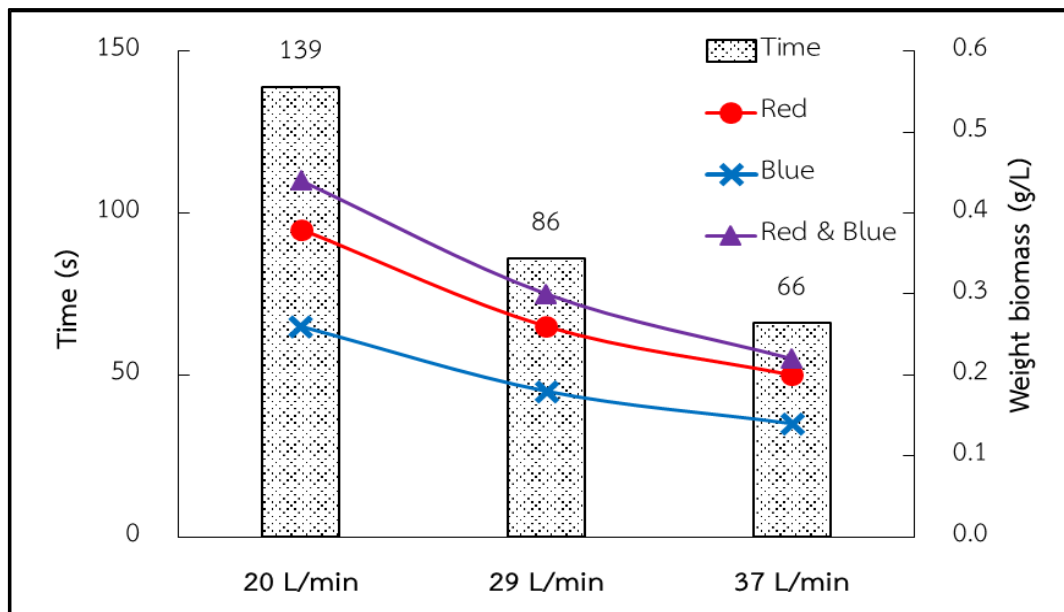
ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่แสงสีต่างๆ

จากระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดจากภาพที่ 60 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับน้ำหนักรวมของเซลล์ที่แสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ดังภาพที่ 62 พบว่า เมื่อระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดลดลงน้ำหนักรวมของเซลล์โดยมีรายละเอียดดังนี้

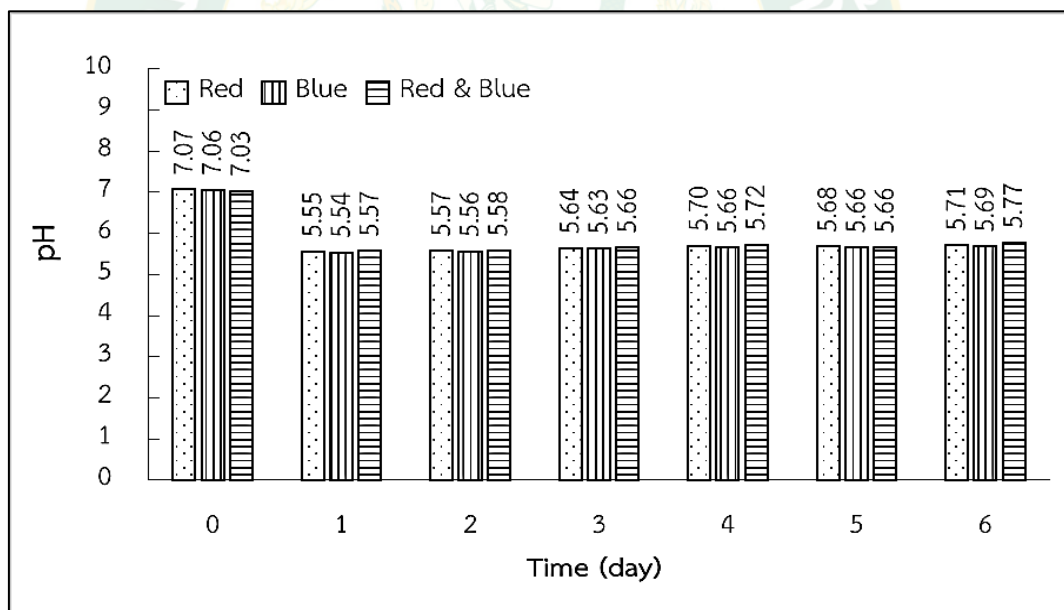
แสงสีแดงผสมน้ำเงิน มีน้ำหนักรวมของเซลล์เท่ากับ 0.44 g/L ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.22 g/L ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีแดง มีน้ำหนักรวมของเซลล์เท่ากับ 0.38 g/L ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.2 g/L ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีน้ำเงิน มีน้ำหนักรวมของเซลล์เท่ากับ 0.26 g/L ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.14 g/L ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s



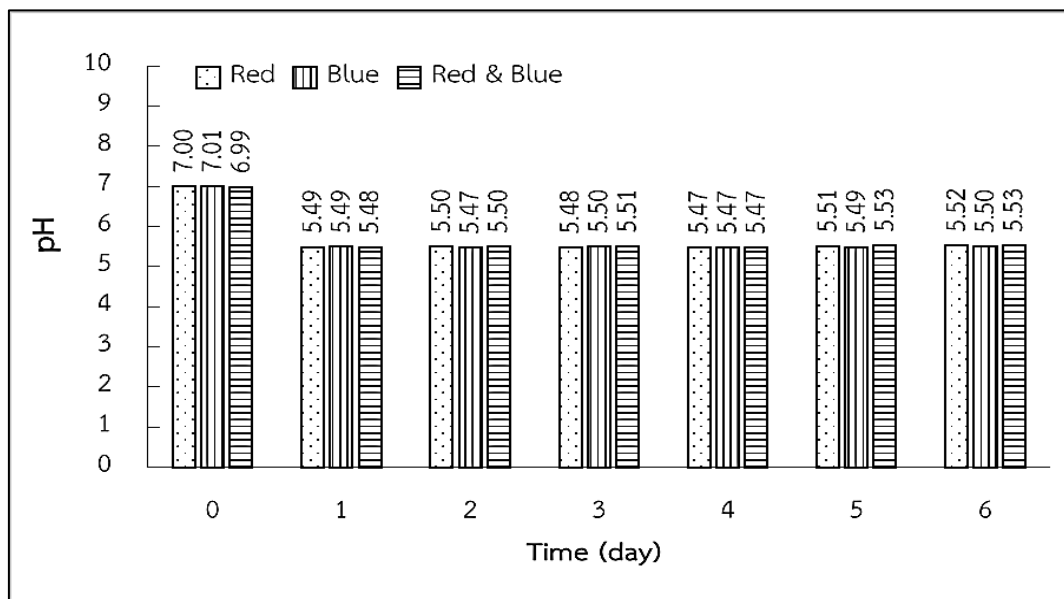
ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขุดกับน้ำหนักชีวมวลแห้งที่แสงสีต่างๆ



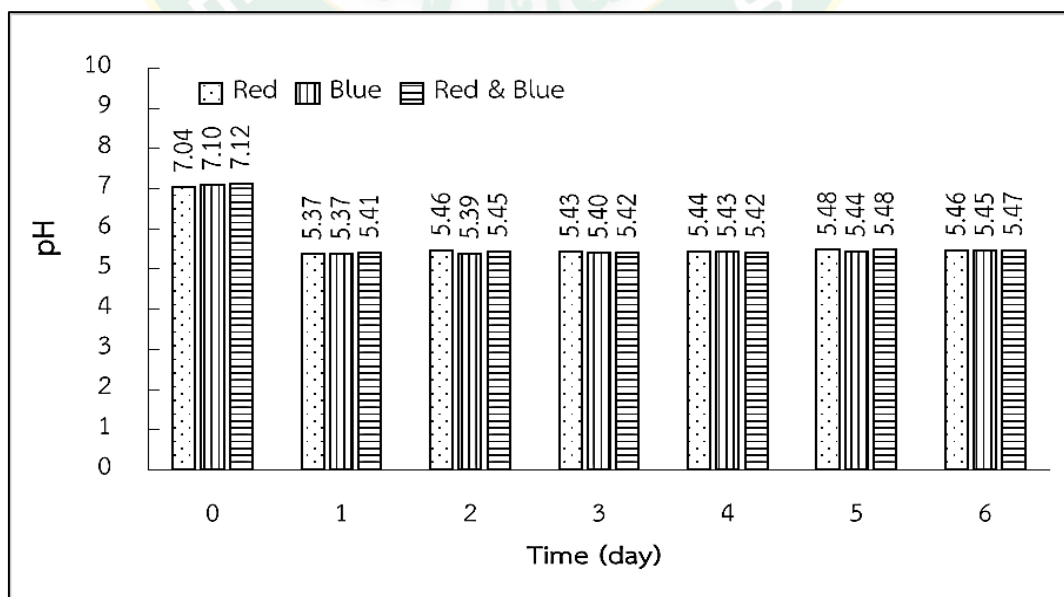
ภาพที่ 63 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 L/min

อีกทั้งจากงานวิจัยของ Li Hai และคณะ (2008) ได้กล่าวว่า เมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในน้ำมากขึ้น ไวนามากขึ้น ทำให้ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็ว ผลของค่า pH ของงานของวิจัยที่อัตราการไหล 20 L/min มีค่า pH เริ่มต้น 7.03-7.07 ระหว่างการทดลองมีค่า 5.5-5.77 ดังภาพที่ 63 อัตราการไหล 29 L/min มีค่า pH เริ่มต้น

6.99-7.01 ระหว่างการทดลองมีค่า 5.47-5.52 ดังภาพที่ 64 และอัตราการไหล 37 L/min มีค่า pH เริ่มต้น 7.04-7.12 ระหว่างการทดลองมีค่า 5.37-5.48 ดังภาพที่ 65 ซึ่งในงานวิจัย ฤทัยรัตน์ (2548) ได้กล่าวว่า ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของอยู่ที่ 5.5-6 แต่จากงานวิจัยนี้ที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 29 และ 37 L/min มีค่า pH น้อยกว่า 5.5 จึงอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลง ส่วนอัตราการไหลน้ำสำหรับ 20 L/min มีค่า pH อยู่ที่ 5.5-5.7 จึงมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าอัตราการไหลที่ เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 64 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 29 L/min



ภาพที่ 65 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 37 L/min

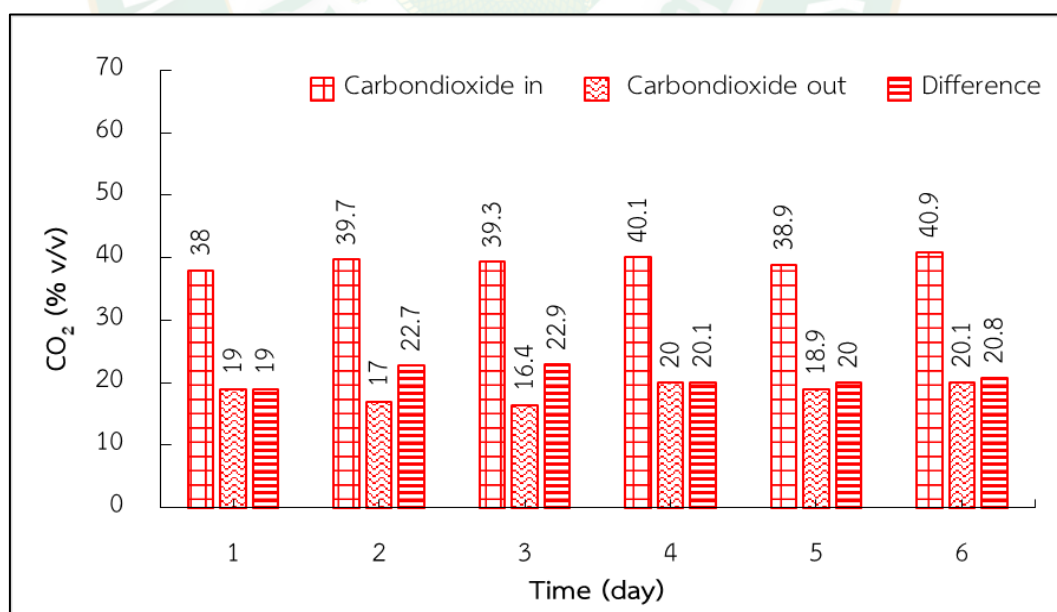
ผลและวิเคราะห์ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพ

จากการศึกษาก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด โดยมีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED ที่ช่วงคลื่นแสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 29 และ 37 L/min โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราการไหล 20 L/min

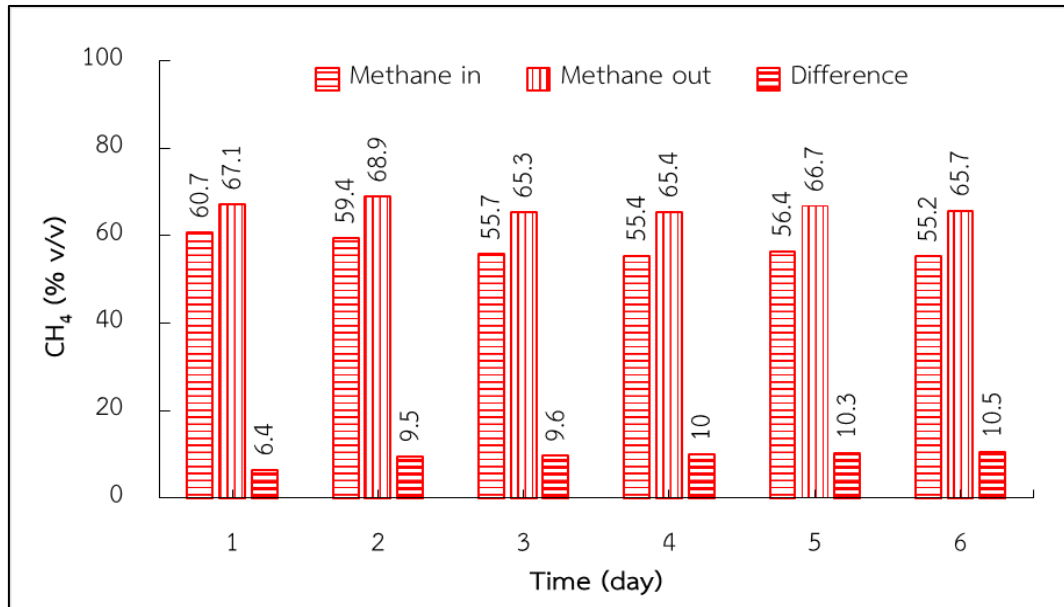
ก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด โดยมีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED ที่ช่วงคลื่นแสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min ตลอดการทดลอง 6 วัน แบ่งผลการทดสอบตามแสงที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดงผสมน้ำเงิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แสงสีแดง ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีแดง ดังภาพที่ 66 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 38-40.9 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 19-22.9% ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 16.4-20.1 %

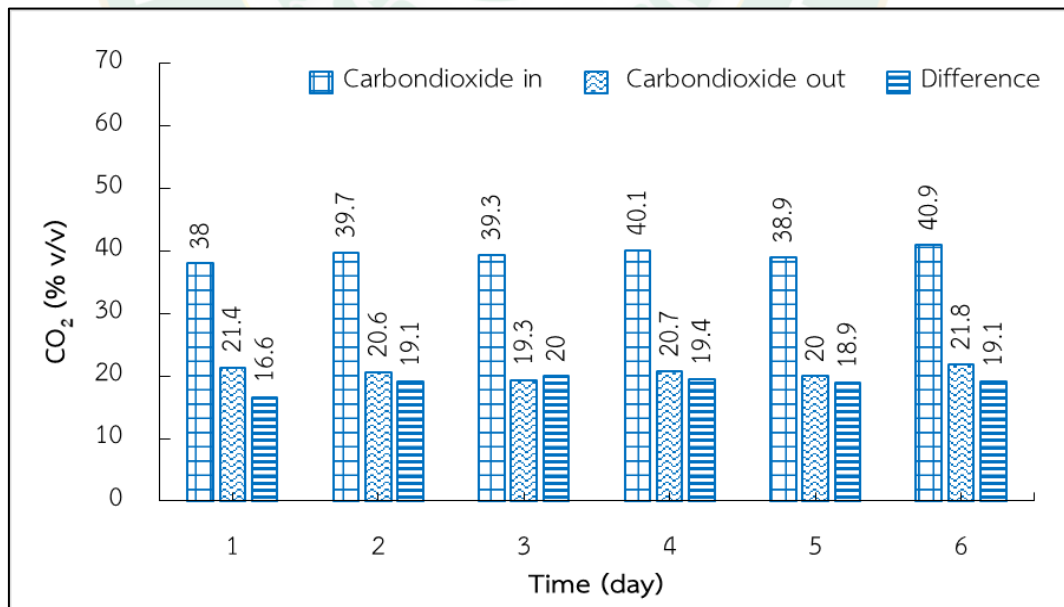


ภาพที่ 66 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดง ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min

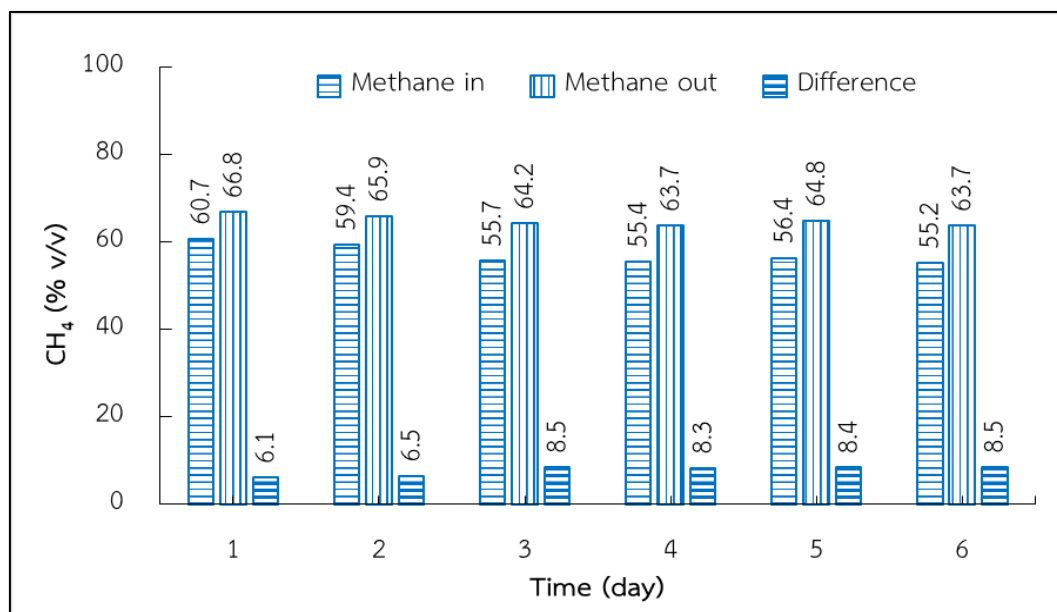
ผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 6.4-10.5 % ดังภาพที่ 67 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 55.2-60.7 % และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนหลังผ่านระบบเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 65.3-68.9 %



ภาพที่ 67 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดง ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min



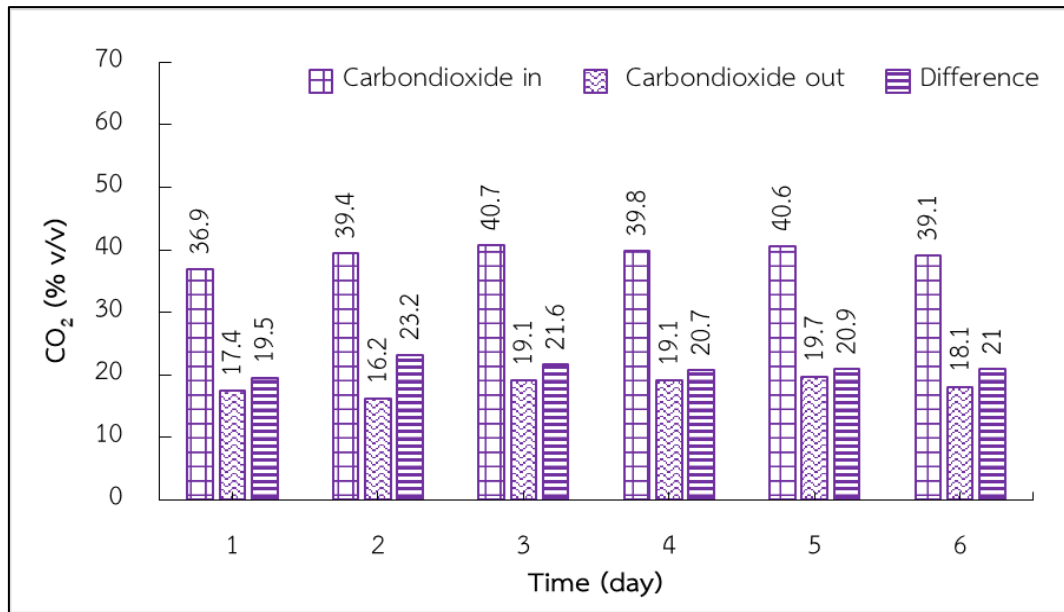
ภาพที่ 68 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีน้ำเงินที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min



ภาพที่ 69 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสง
สีน้ำเงินที่อัตราการไหลสำหรับ 20 L/min

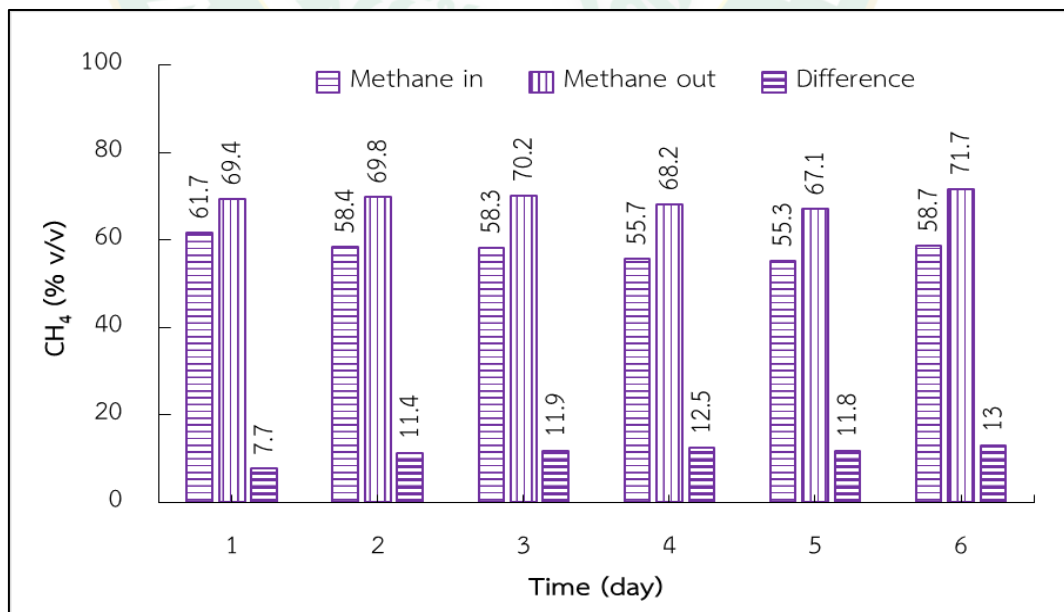
2. แสงสีน้ำเงิน ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีน้ำเงิน จากภาพที่ 68 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 38-40.9 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 16.6-20.0 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 18.9-21.8 % จากผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 6.1-8.5 % ดังภาพที่ 69 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 55.2-60.7 % และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 63.7-66.8 %

3. แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีแดงผสมน้ำเงิน ดังภาพที่ 70 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 36.9-40.7 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 19.5-23.2 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 16.2-19.7 %



ภาพที่ 70 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ
 ขดแสงสีแดงผสมน้ำเงินที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min

จากผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 7.7-
 13.0 % ดังภาพที่ 71 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 55.3-61.7 % และมีสัดส่วน
 ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 67.1-71.7 %

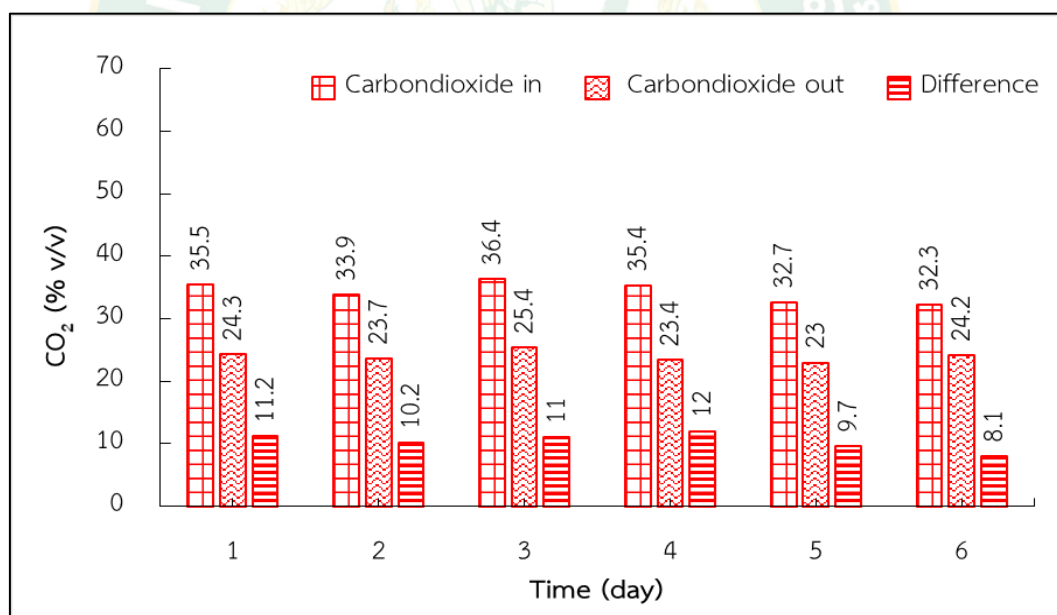


ภาพที่ 71 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดง
 ผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min

ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราการไหล 29 L/min

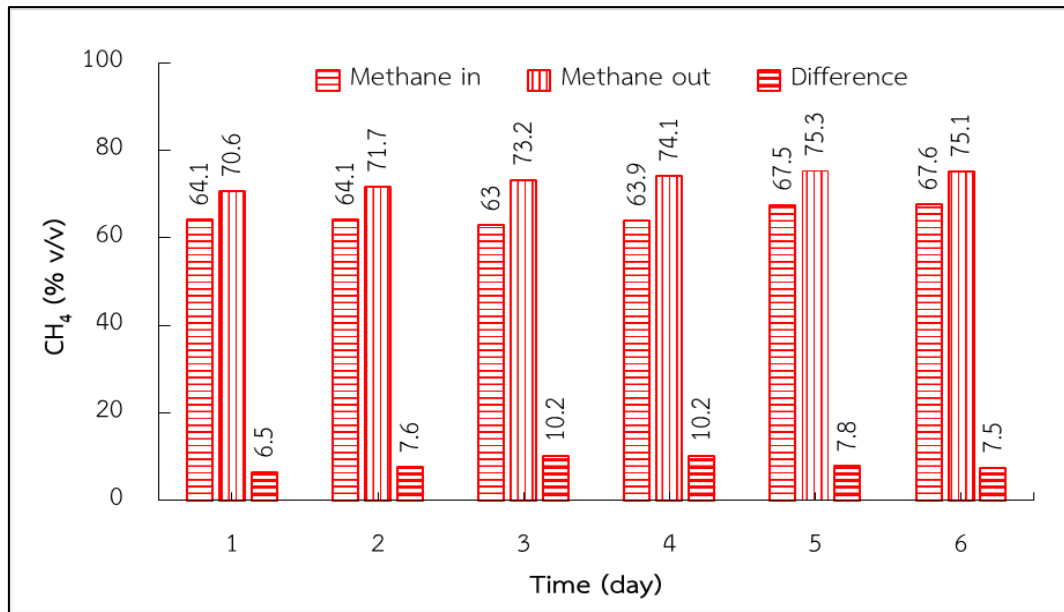
ก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด โดยมีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED ที่ช่วงคลื่นแสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 29 L/min ตลอดการทดลอง 6 วัน แบ่งผลการทดสอบตามแสงที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดงผสมน้ำเงิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แสงสีแดง ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีแดง ดังภาพที่ 72 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 32.3-36.4 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 8.1-12 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 23.0-25.4 %

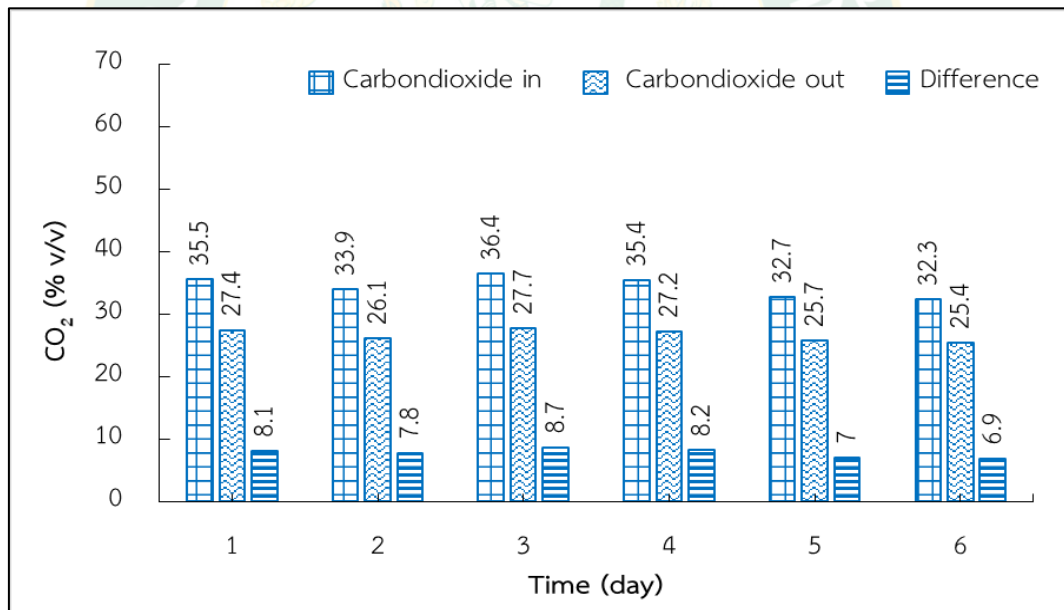


ภาพที่ 72 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดงที่อัตราการไหลสาหร่าย 29 L/min

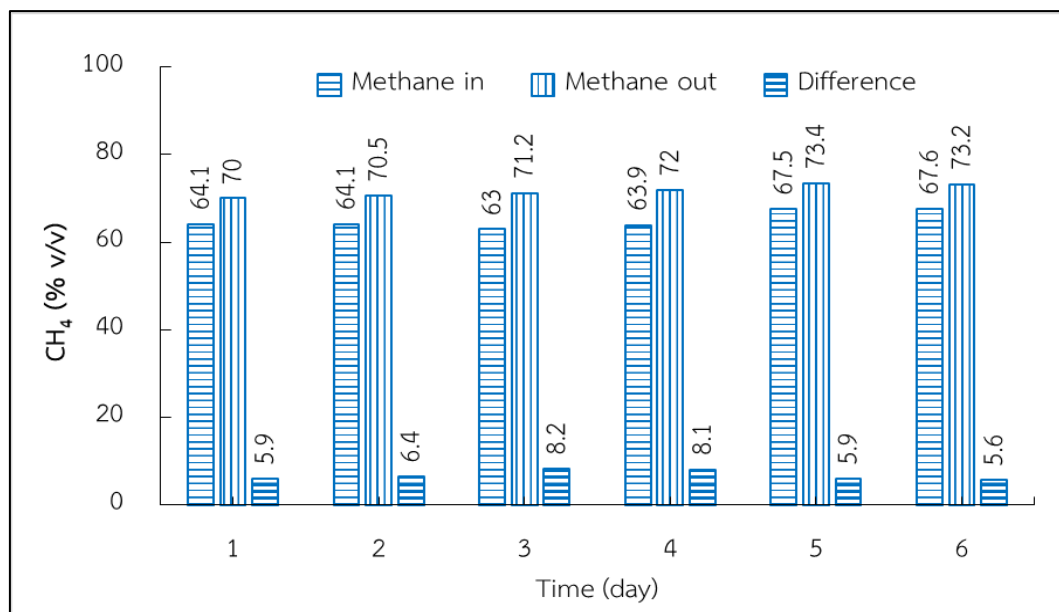
ผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 6.5-10.2 % ดังภาพที่ 73 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 63.0-67.6 % และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 70.6-75.3 %



ภาพที่ 73 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุดแสงสีแดง ที่อัตราการไหลสาหร่าย 29 L/min



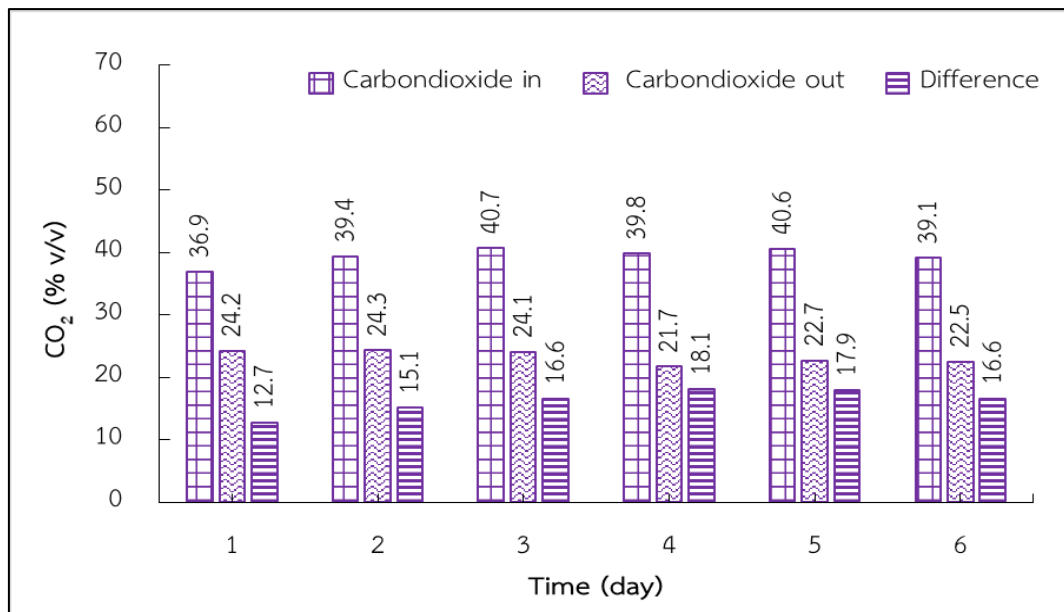
ภาพที่ 74 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อชุดแสงสีน้ำเงินที่อัตราการไหลสาหร่าย 29 L/min



ภาพที่ 75 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสง
สีน้ำเงินที่อัตราการไหลสำหรับ 29 L/min

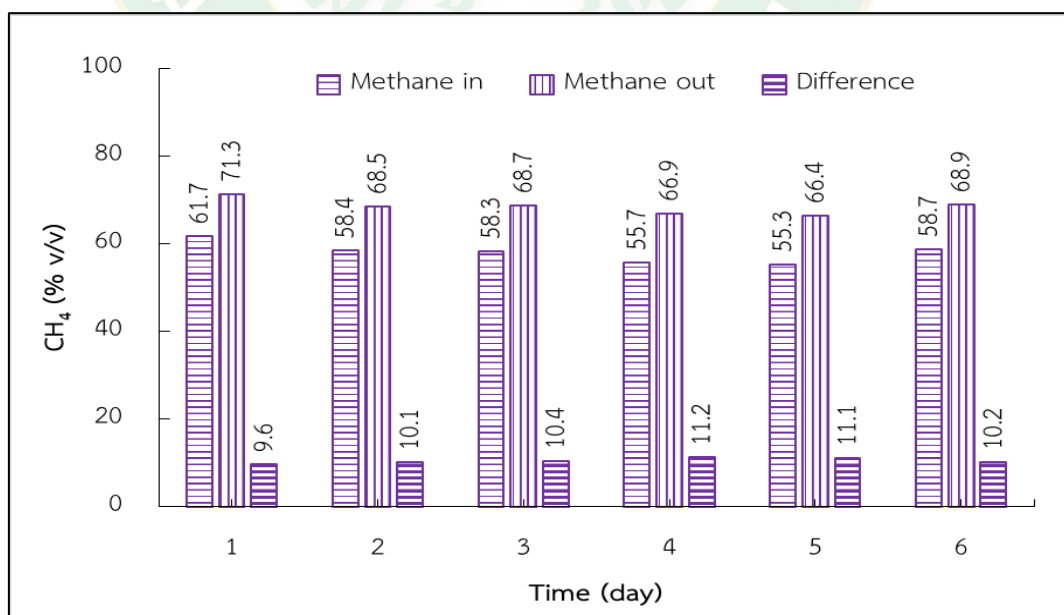
2. แสงสีน้ำเงิน ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีน้ำเงิน จากภาพที่ 74 จะเห็นว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 32.3-36.4 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 7.0-8.7 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 25.4-27.7 % จากผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 5.6-8.2 % ดังภาพที่ 75 ซึ่งสัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 63.0-67.6% และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 70.0-73.4 %

3. แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีแดงผสมน้ำเงิน ดังภาพที่ 76 จะเห็นว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 36.9-40.7 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 12.7-18.1 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 21.7-24.3 %



ภาพที่ 76 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ
 ขดแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสำหรับ 29 L/min

จากผลการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 9.6-
 11.2 % ดังภาพที่ 77 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 55.3-61.7 % และมีสัดส่วนก๊าซ
 มีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 66.4-71.3 %

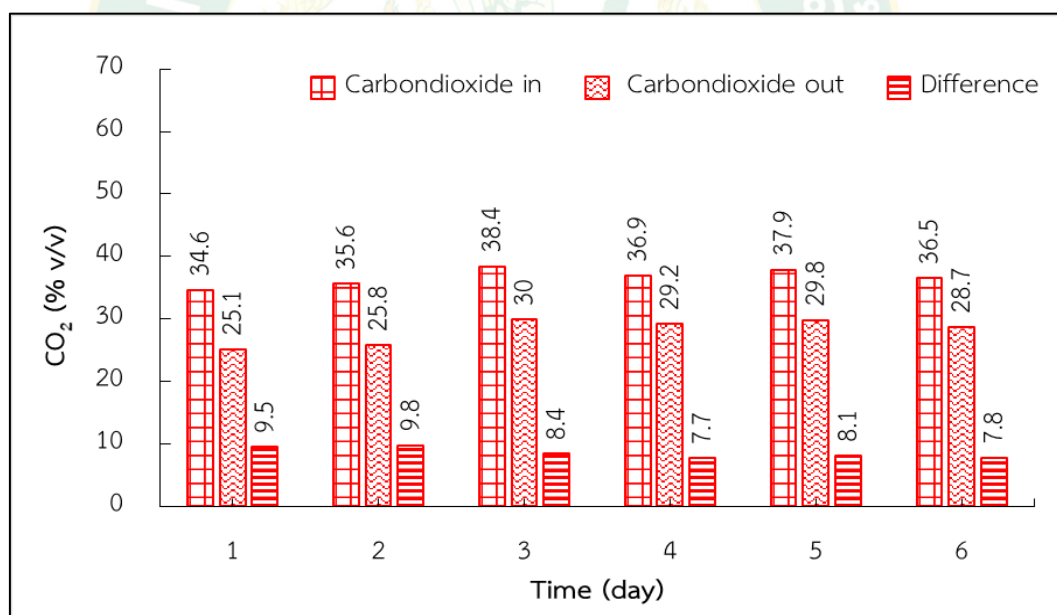


ภาพที่ 77 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ
 ขดแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสำหรับ 29 L/min

ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบที่อัตราการไหล 39 L/min

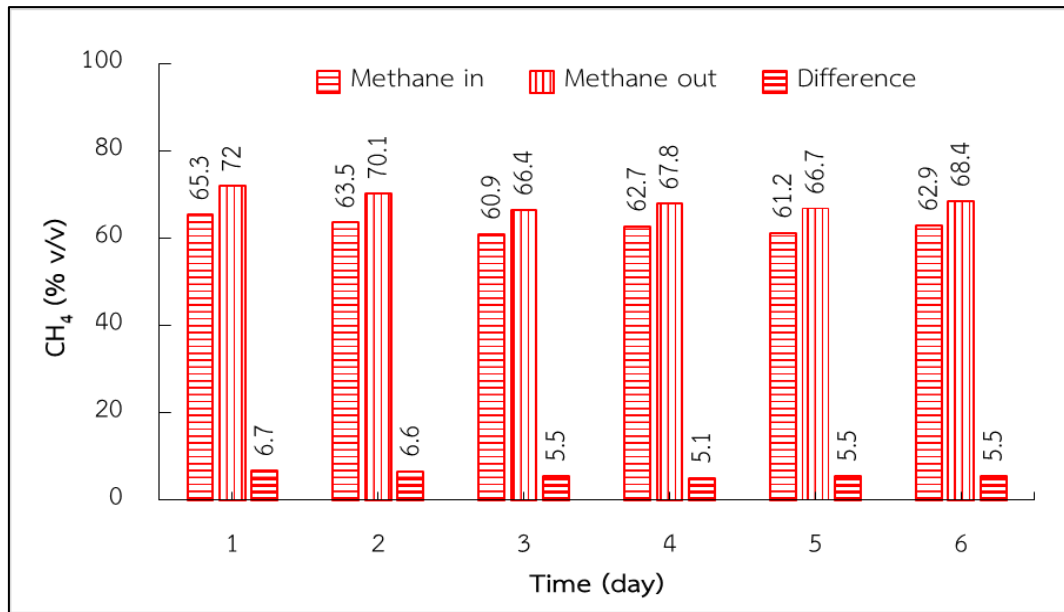
ก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด โดยมีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED ที่ช่วงคลื่นแสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min ตลอดการทดลอง 6 วัน แบ่งผลการทดสอบตามแสงที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดงผสมน้ำเงิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แสงสีแดง ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีแดง ดังภาพที่ 78 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 34.6-38.4 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 7.7-9.8 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 25.1-30.0 %

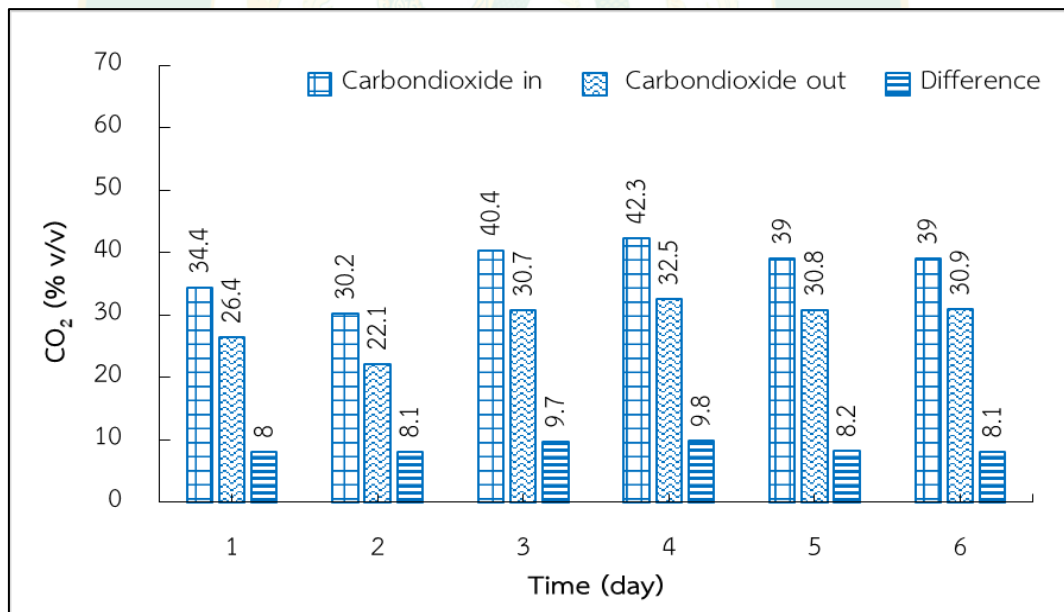


ภาพที่ 78 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสงสีแดงที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min

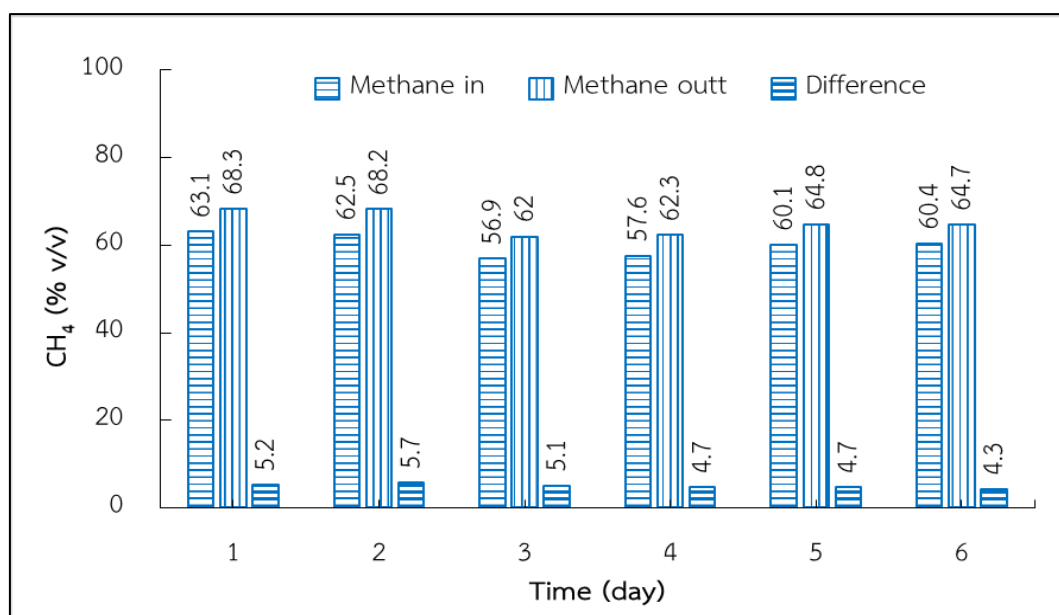
ผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 5.1-6.7 % ดังภาพที่ 79 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 60.9-65.3 % และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 66.4-72.0 %



ภาพที่ 79 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อจุดแสงสีแดง ที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min



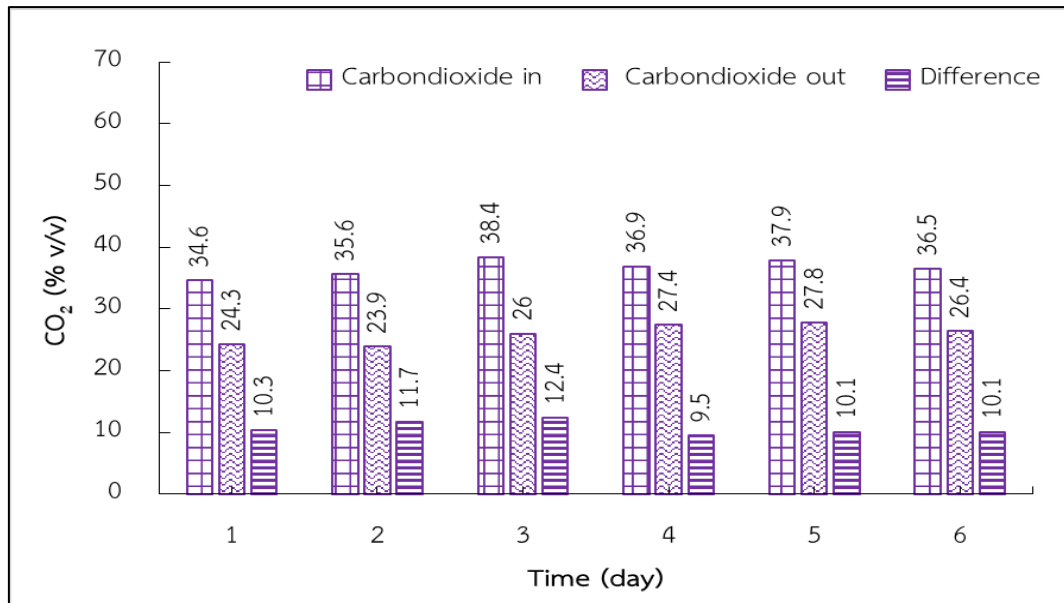
ภาพที่ 80 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อจุดแสงสีน้ำเงินที่อัตราการไหลสาหร่าย 37 L/min



ภาพที่ 81 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดแสง
สีน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสำหรับ 37 L/min

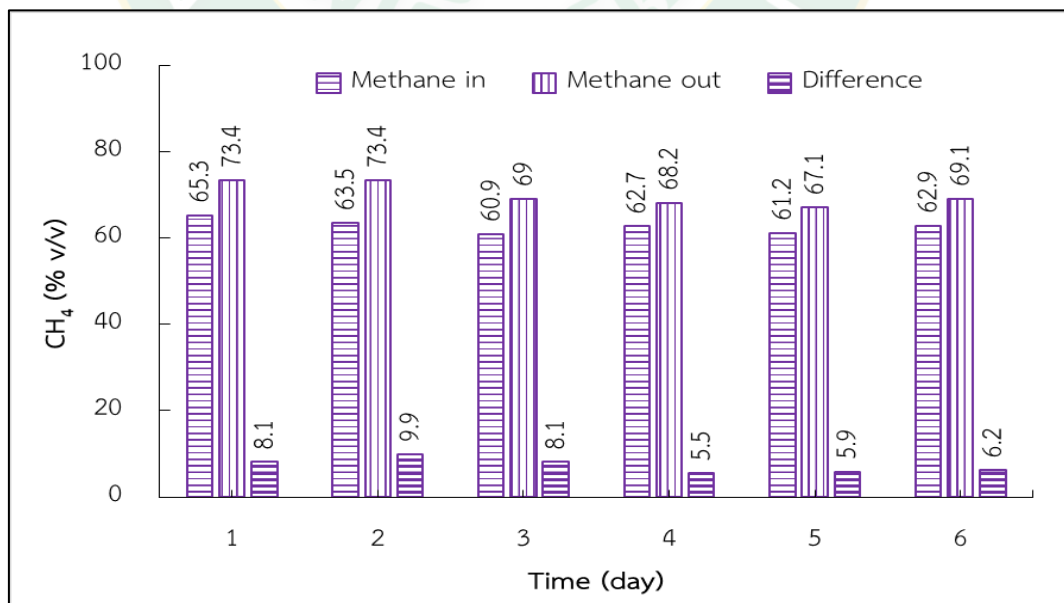
2. แสงสีน้ำเงิน ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีน้ำเงิน จากภาพที่ 80 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 34.4-42.3 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 8.0-9.8 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 22.1-32.5 % จากผลการลดลงสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 4.3-5.7 % ดังภาพที่ 81 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 56.9-63.1% และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นหลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 62-68.3 %

3. แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED สีแดงผสมน้ำเงิน ดังภาพที่ 82 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง 6 วัน สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 34.6-38.4 % และสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 9.5-12.4 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 23.9-27.8 %



ภาพที่ 82 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ
 ขดแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสำหรับ 37 L/min

จากผลการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ดังภาพ
 ที่ 83 ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนก่อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 60.9-73.4 % และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น
 5.5-9.9 % หลังผ่านระบบมีค่าเท่ากับ 69.0-73.4 %

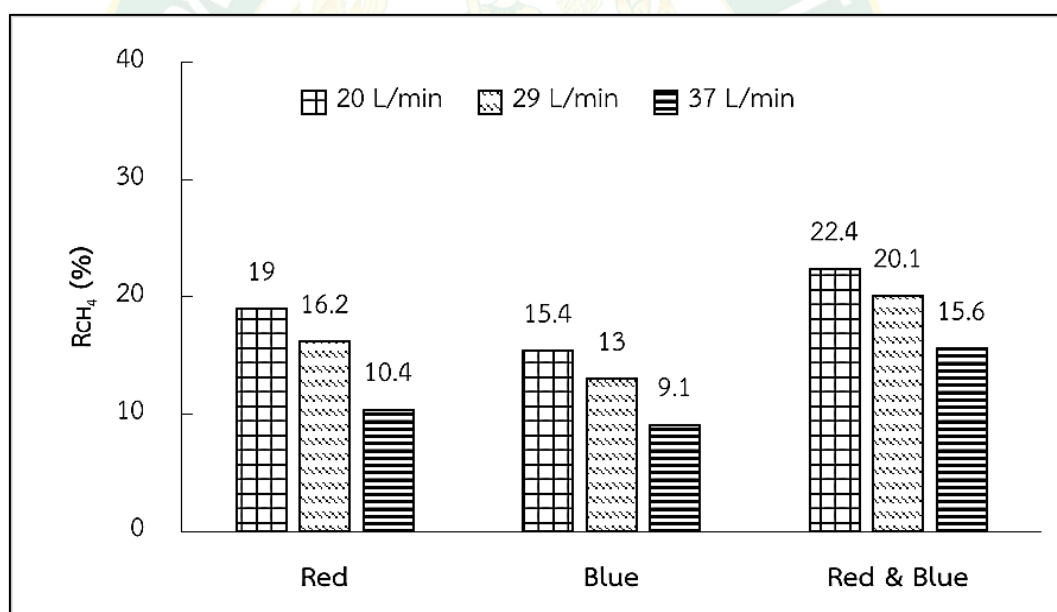


ภาพที่ 83 สัดส่วนของก๊าซมีเทนก่อนเข้าและหลังผ่านระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อ
 ขดแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสำหรับ 37 L/min

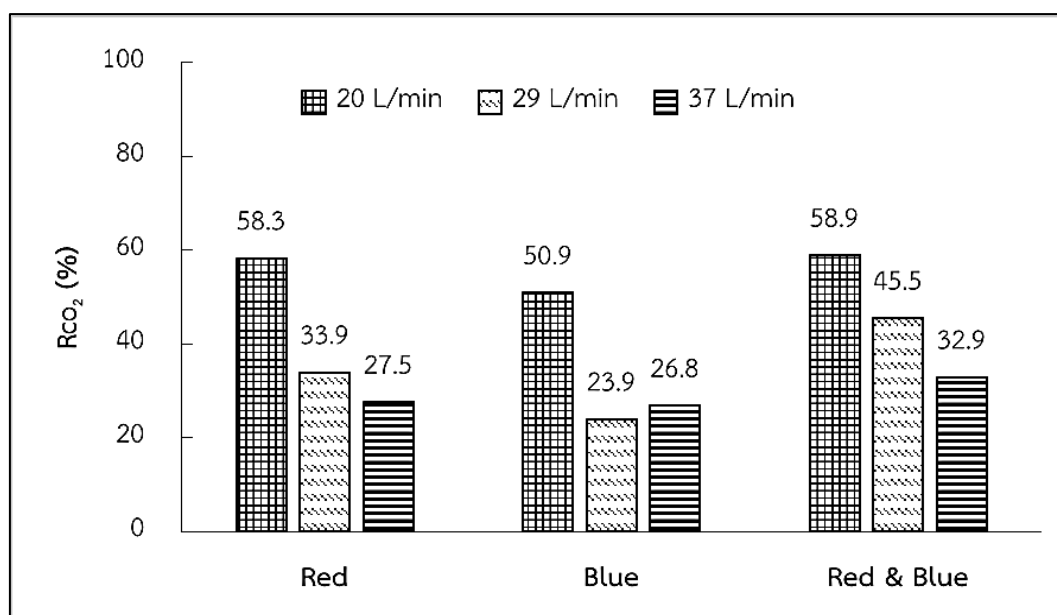
วิเคราะห์ผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพ

จากผลของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพ นำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด โดยมีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ภายใต้แสง LED ที่ช่วงคลื่นแสงสีแดง น้ำเงิน และแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 29 และ 37 L/min เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด และผลของประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีรายละเอียดดังนี้

ผลของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดที่คลื่นแสงและอัตราการไหลต่างๆ ดังภาพที่ 84 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลที่ 20 L/min เปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดกว่าอัตราการไหล 29 และ 37 L/min แสงสีแดงผสมน้ำเงินจะให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด มีค่าเท่ากับ 22.4 %



ภาพที่ 84 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดที่คลื่นแสงและอัตราการไหลต่างๆ

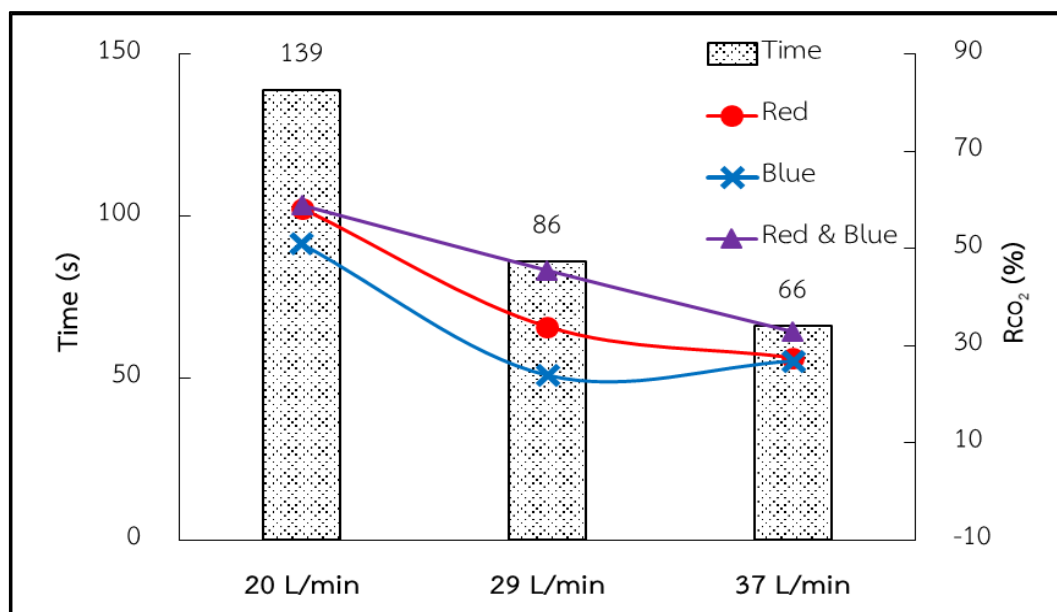


ภาพที่ 85 ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่คลื่นแสงและอัตราการไหลต่างๆ

ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนก๊าซมีเทนเป็นผลมาจากการลดลงของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลของประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่คลื่นแสงและอัตราการไหลต่างๆ แสดงดังภาพที่ 85 พบว่า ระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อชุดแสงสีแดง มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่อัตราการไหล 20 L/min มีค่าเท่ากับ 58.3 % แสงสีน้ำเงิน มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่อัตราการไหล 20 L/min มีค่าเท่ากับ 50.9 % และแสงสีแดงผสมน้ำเงิน มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่อัตราการไหล 20 L/min มีค่าเท่ากับ 58.9 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yan และ Zheng, 2014) พบว่า แสงสีแดงผสมน้ำเงินที่ใช้เลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ มีความเหมาะสมกว่าแสงสีแดงและน้ำเงิน ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเพียงแสงเดียว

ซึ่งการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเป็นผลมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงจะเกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์ เมื่ออัตราการเจริญของสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าแสงสีแดงผสมน้ำเงิน ของงานวิจัยนี้ให้การเจริญเติบโตสูงสุด มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย เท่ากับ 35.78×10^6 cell/mL มากกว่า แสงสีแดง และ สีน้ำเงิน ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย 31.45 และ 21.8×10^6 cell/mL ตามลำดับ อีกทั้งการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากสะสมอยู่ในน้ำสาหร่าย ด้วยคุณสมบัติการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอน

ไดออกไซด์ โดยทั่วไปสาหร่ายจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของสารละลายที่ละลายในน้ำ เรียกว่า อนินทรีย์คาร์บอน ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ คาร์บอนอิสระ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH จากค่าเริ่มต้นที่ 6.99-7.12 จนกระทั่งมีค่า pH ระหว่างการทดลองที่ 5.37-5.77



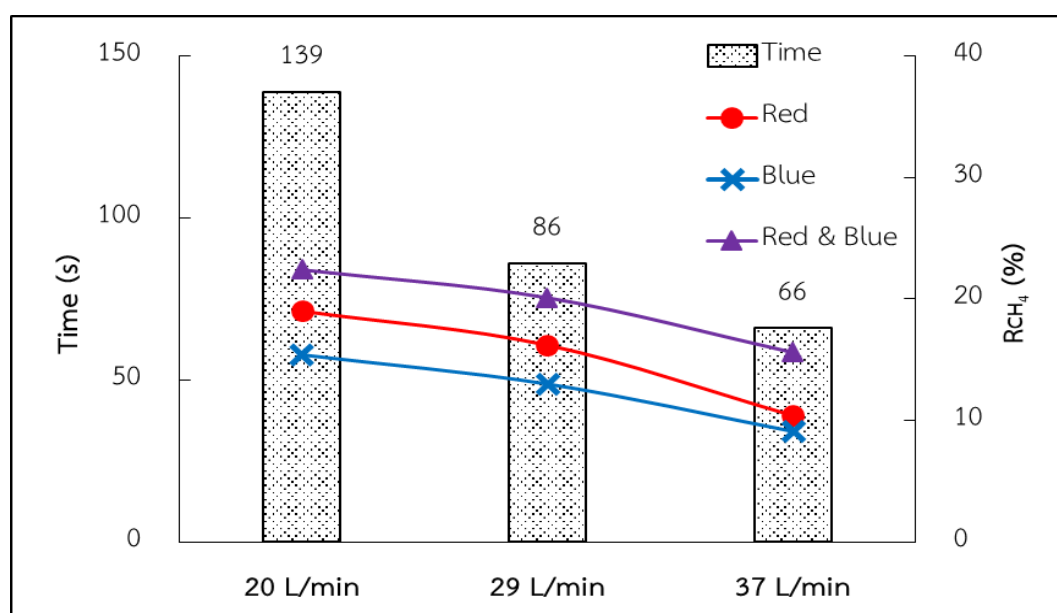
ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่แสงสีต่างๆ

อีกทั้งระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดมีผลต่อประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่แสงสีแดงผสมน้ำเงิน สีแดง และสีน้ำเงิน ดังภาพที่ 86 จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลน้ำสาหร่ายที่ 20 L/min สาหร่ายมีระยะเวลาที่อยู่ในท่อขด 136 s ให้ประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า อัตราการไหลน้ำสาหร่ายที่ 29 และ 37 L/min สาหร่ายมีระยะเวลาที่อยู่ในท่อขด 86 และ 66 s ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

แสงสีแดงผสมน้ำเงิน มีประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 58.9 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้ประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 32.9 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีแดง มีประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 58.3 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้ประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 27.5 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีน้ำเงิน มีประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 50.9 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้ประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 26.8 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s



ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดกับประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดที่แสงสีต่างๆ

จากภาพที่ 87 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขดมีประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุด ที่แสงสีแดงผสมน้ำเงิน สีแดง และสีน้ำเงิน พบว่า ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 136 s ให้ประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดมากกว่า ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 86 และ 66 s ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

แสงสีแดงผสมน้ำเงิน มีประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.4 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้ประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 15.6 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีแดง มีประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 19.0 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้ประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 10.4 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

แสงสีน้ำเงิน มีประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 15.4 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 139 s และให้ประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มก๊าซมีเทนสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 9.1 % ที่ระยะเวลาที่สาหร่ายอยู่ในท่อขด 66 s

ผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายการผลิตสาหร่าย ค่าใช้จ่ายในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ และ ค่าใช้จ่ายประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของระบบโฟโตไบโอรี แอ็กเตอร์แบบท่อขดภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED จากผลการทดลองที่ดีที่สุดคือ LED สีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 L/min และอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 0.1 L/min นำข้อมูลจากตารางที่ 4 หาอัตราสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของระบบต่อรอบการเลี้ยง 6 วัน จะมีค่าใช้จ่าย 557.77 Baht สามารถผลิตสาหร่าย 88 g และกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 71 g ต่อการผลิต 1 ครั้ง คิดเป็นต้นทุนในการผลิตสาหร่ายเท่ากับ 6.34 Baht/g ค่าใช้จ่ายในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 7.85 Baht /g ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายละเอียดค่าใช้จ่ายต่อการผลิตสาหร่าย

รายละเอียด	ข้อมูล
ระบบโฟโตไบโอรีแอ็กเตอร์แบบท่อขด	
-กำลังไฟฟ้าของระบบโฟโตไบโอรีแอ็กเตอร์แบบท่อขด (kW)	0.876
-ชั่วโมงการทำงาน 24 h/day ตลอด 6 day (h)	144
-อัตราสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของระบบ (kWh)	126.144
-อัตราค่าไฟฟ้า (Baht/kWh) ; การไฟฟ้านครหลวง เกินกว่า 4.00 หน่วย/เดือน	4.4217
-ค่าไฟฟ้ารวม (Baht)	557.77
สาหร่าย	
-น้ำหนักชีวมวลแห้งสาหร่าย (g/L) ; ตารางที่ 6	0.44
-ปริมาณน้ำสาหร่ายทั้งหมด (L)	200
-ปริมาณชีวมวลสาหร่ายทั้งหมด (g)	88
- ต้นทุนในการผลิตสาหร่าย (Baht/g)	6.34

ตารางที่ 6 (ต่อ) รายละเอียดค่าใช้จ่ายต่อการผลิตสาหร่าย

รายละเอียด	ข้อมูล
คาร์บอนไดออกไซด์	
-อัตราการไหล (m^3/min)	0.0001
-ระยะเวลากำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ (h) ; วันละ 12 h 6 day	72
-ปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมด (m^3)	0.432
-สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ (% v/v) ; 36.9-40.7 %	38.8
-ปริมาตรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (m^3)	0.168
-สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง (% v/v) ; 19.5-23.2 %	21.35
-ปริมาตรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัด (m^3)	0.036
-ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/m^3)	1.98
-ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัด (g)	71
-ค่าใช้จ่ายในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Baht / g)	7.85

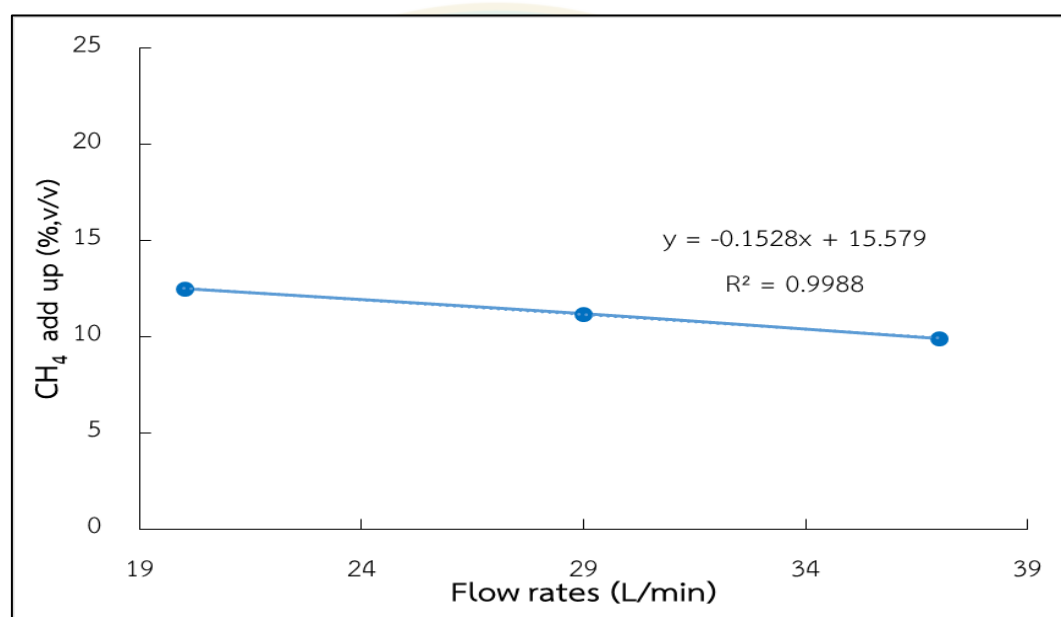
ผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด

จากการศึกษาระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแสง LED ผลของจากการศึกษาพบว่า การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ใช้แสง LED สีแดงผสมน้ำเงิน มีความเหมาะสมในการใช้เป็นแสงในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่าย 20 29 และ 37 L/min จึงได้มีการสร้างสมการเพื่อทำนายศักยภาพของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงจากหลอด LED

โดยนำผลของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด (Cell density ; $\times 10^6$ cell/mL) ผลน้ำหนักชีวมวลแห้งสาหร่ายสูงสุด (Weight biomass ; g) ผลต่างของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนและหลังออกระบบหรือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดลง ($\text{CO}_{2, \text{in}} - \text{CO}_{2, \text{out}}$; % v/v) และ ผลของสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น ($\text{CH}_{4, \text{out}} - \text{CH}_{4, \text{in}}$; % v/v) ของสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 29 และ 37 L/min ดังตารางที่ 7 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายกับผลต่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสมการ จากโปรแกรม Microsoft Excel ผลของการสร้างสมการดังภาพที่ 81 82 83 และ 84

ตารางที่ 7 ข้อมูลในสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด

Flow rates (L/min)	CH ₄ add up (%,v/v)	CO ₂ removal (%,v/v)	Weight biomass (g/L)	Cell density (×10 ⁶ cell/mL)
20	12.5	23.2	0.44	35.775
29	11.2	18.1	0.3	24.05
37	9.9	12.4	0.22	18.15



ภาพที่ 88 กราฟความสัมพันธ์ของผลของสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลต่างๆ ในโปรแกรม

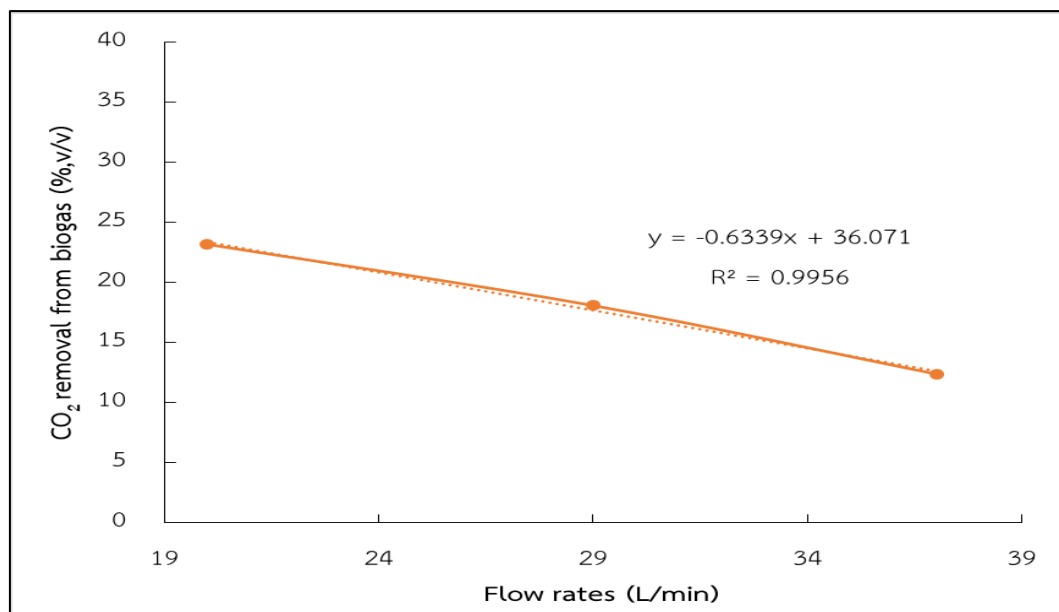
Microsoft Excel

จากภาพที่ 88 จะได้สมการความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของผลของสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลต่างๆ โดยที่ $R^2 = 0.998$ ดังสมการที่ 6

$$Y = -0.1528X + 15.579 \quad \text{สมการที่ 6}$$

หรือ $CH_{4, out} - CH_{4, in} = -0.1528Q + 15.579 \quad \text{สมการที่ 7}$

โดย $CH_{4, out} - CH_{4, in}$ คือ ปริมาณสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น (% v/v)
 Q คือ อัตราการไหล (L/min)



ภาพที่ 89 กราฟความสัมพันธ์ของผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการไหลต่างๆ ในโปรแกรม Microsoft Excel

จากภาพที่ 89 จะได้สมการความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการไหลต่างๆ โดยที่ $R^2 = 0.9956$ ดังสมการที่ 8

$$Y = -0.6339X + 36.071$$

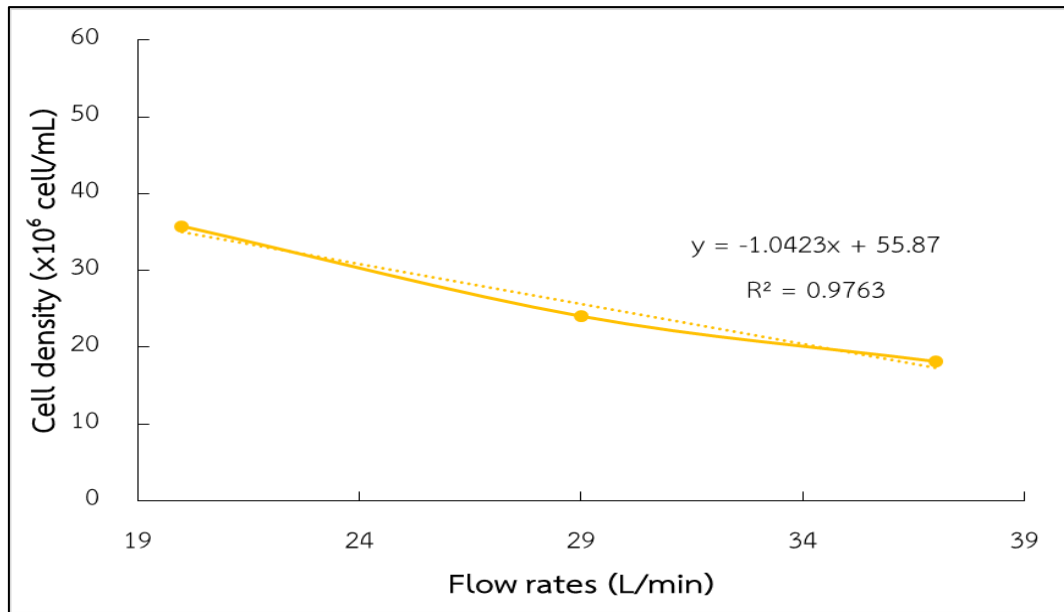
สมการที่ 8

หรือ

$$CO_{2, in} - CO_{2, out} = -0.6339Q + 36.071$$

สมการที่ 9

โดย $CO_{2, in} - CO_{2, out}$ คือ ปริมาณสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดลง (% v/v)
 Q คือ อัตราการไหล (L/min)



ภาพที่ 90 กราฟความสัมพันธ์ของผลของความหนาแน่นของเซลล์สำหรับที่อัตราการไหลต่างๆ ในโปรแกรม Microsoft Excel

จากภาพที่ 90 จะได้สมการความสัมพันธ์ของผลของความหนาแน่นของเซลล์สำหรับอัตราการไหลต่างๆ โดยที่ $R^2 = 0.9763$ ดังสมการที่ 10

$$Y = -1.0423X + 55.87$$

สมการที่ 10

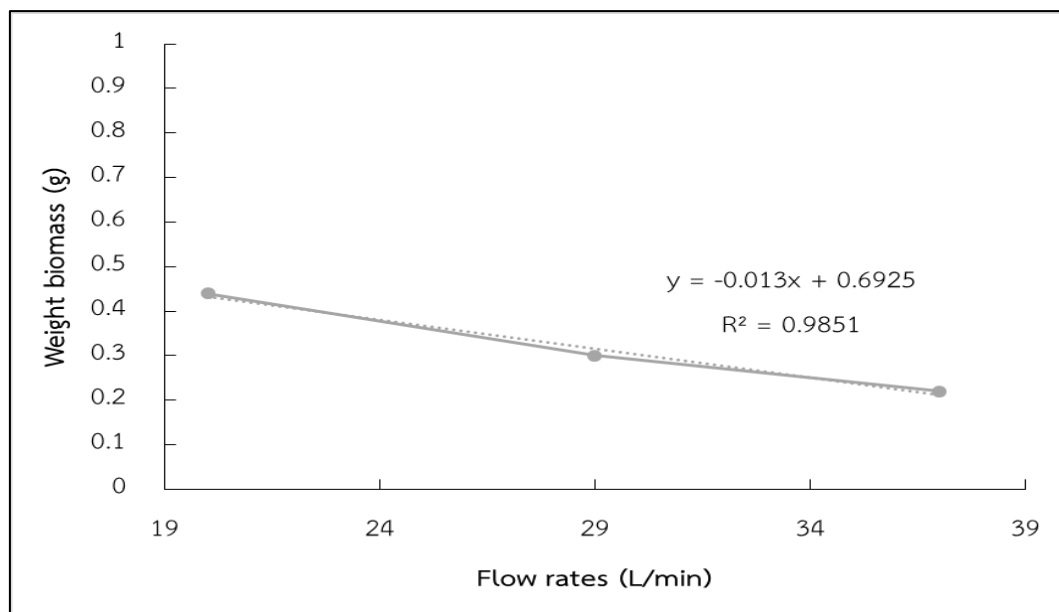
หรือ

$$D_{\text{cell}} = -1.0423Q + 55.87$$

สมการที่ 11

โดย D_{cell} คือ ความหนาแน่นของเซลล์สำหรับสูงสุด ($\times 10^6$ cell/mL)
 Q คือ อัตราการไหล (L/min)

หมายเหตุ ความหนาแน่นของเซลล์สำหรับสูงสุดที่ได้จากสมการที่ 11 เป็นความหนาแน่นของเซลล์สำหรับวันที่ 6



ภาพที่ 91 กราฟความสัมพันธ์ของผลของผลน้ำหนักชีวมวลแห้งสาหร่ายสูงสุดที่อัตราการไหลต่างๆ
ในโปรแกรม Microsoft Excel

จากภาพที่ 91 จะได้สมการความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของผลของน้ำหนักชีวมวลแห้ง
สาหร่ายสูงสุด อัตราการไหลต่างๆ โดยที่ $R^2 = 0.9851$ ดังสมการที่ 12

$$Y = -0.013X + 0.6925 \quad \text{สมการที่ 12}$$

หรือ

$$W_{\text{biomass}} = -0.013Q + 0.6925 \quad \text{สมการที่ 13}$$

โดย W_{biomass} คือ น้ำหนักชีวมวลแห้งสาหร่ายสูงสุด (g/L)
 Q คือ อัตราการไหล (L/min)

หมายเหตุ น้ำหนักชีวมวลแห้งสาหร่ายสูงสุดที่ได้จากสมการที่ 13 เป็นน้ำหนักชีวมวลแห้ง
สาหร่ายสูงสุดวันที่ 6

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในสภาพแสง LED ได้ทำการหาค่าศักยภาพของระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อขด ในการการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน และปริมาณการผลิตชีวมวลของระบบ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ในการทำนายศักยภาพของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สามารถสรุปหัวข้อผลการศึกษาดังนี้ต่อไป

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1. ผลการออกแบบระบบเติมก๊าซแบบเวนจูรี ของระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อขด เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถใช้ในระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อขดในเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กได้ ผลการทดสอบได้อัตราการไหลน้ำในระบบ 20, 24.5, 29, 33.9 และ 37 L/min และได้อัตราการไหลของก๊าซเป็น 6, 9, 12, 14 และ 18 L/min ตามลำดับ โดยไม่มีผลทำให้จำนวนเซลล์สาหร่ายลดลงหรือหายไป อีกทั้งระบบเติมก๊าซ สามารถปรับลดอัตราการไหลก๊าซได้น้อยที่สุด 0.1 L/min โดยที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่ายยังคงที่

2. ผลการออกแบบระบบให้แสงสว่าง งานวิจัยได้มีความสนใจหลอด LED อยู่ 2 ประเภท คือ Chips on Board (COB LED) และ Surface Mount Device (SMD LED) ในการใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย แต่การเลือกใช้ LED ให้คุ้มค่าที่สุดต้องมีการคำนึงถึง ประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงหรือประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง พบว่า หลอด LEC COB ให้ความหนาแน่นโฟตอนและประสิทธิภาพ PAR ที่ดีกว่าแบบ LED SMD 5050 โดยในระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อขดที่ติดตั้ง หลอด LEC COB สีแดง (646 nm) สีน้ำเงิน (451 nm) และสีแดงผสมน้ำเงิน (453, 648) ให้ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสง เท่ากับ 810.5 1,072 และ 1,722 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

3. การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบโฟโตไบโอรีแอक्टरแบบท่อขดภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในสภาพแสง LED มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อัตราการไหลน้ำสาหร่ายที่ 20 29 และ 37 L/min มีค่าเท่ากับ 0.876 0.968 และ 1.221 kW ตามลำดับ

4. ศักยภาพของระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในสภาพแสง LED แสงสีแดงผสมน้ำเงิน ที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 20 L/min มีความเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ มากกว่าแสงสีแดงและแสงน้ำเงิน โดยให้อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1.876 day^{-1} ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด $35.78 \times 10^6 \text{ cell/mL}$ น้ำหนักแห้งของสาหร่ายวันสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.44 g/L สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ โดยสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านระบบมีค่าลดลง 19.5-23.2 % ทำให้เหลือสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 16.2-19.7 % คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 58.9 % ทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 55.3-61.7 % เป็น 67.1-71.7 % คิดเป็นประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด มีค่าเท่ากับ 22.4 %

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสง LED ของงานนี้สามารถนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้โดยการเพิ่มระยะท่อรับแสงให้มีความยาวมากขึ้น เพิ่มระบบการตรวจวัดในการตรวจวัด pH อุณหภูมิ ในการตรวจวัดปัจจัยสิ่งแวดล้อมแบบต่อเนื่อง เพิ่มระบบควบคุมระยะไกลในการเปิดปิดระบบจ่ายก๊าซ และแสงสว่าง ให้เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

บรรณานุกรม

- Angelidaki Irimi, Treu Laura, Tsapekos Panagiotis, Luo Gang, Campanaro Stefano, Wenzel Henrik. and Kougias Panagiotis. 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**,36(2), 452-466.
- Briassoulis D., Panagakis, P., Chionidis, M., Tzenos, D., Lalos, A., Tsinos, C., Berberidis, K. and Jacobsen A. 2010. An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of *Nannochloropsis* sp. **Bioresource Technology**, 101(17), 6768-6777.
- Chiu Sheng-Yi, Kao Chien-Ya, Chen Chiun-Hsun, Kuan, Tang-Ching, Ong, Seow-Chin and Lin Chih-Sheng. 2008. Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. **Bioresource Technology**, 99(9), 3389-3396.
- Das Probir, Lei Wang, Aziz Siti Sarah and Obbard Jeffrey Philip. 2011. Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light. **Bioresource Technology**, 102(4), 3883-3887.
- Duarte Jessica Hartwig and Costa Jorge Alberto Vieira. 2018. Blue light emitting diodes (LEDs) as an energy source in *Chlorella fusca* and *Synechococcus nidulans* cultures. **Bioresource Technology**, 247, 1242-1245.
- Giordano Mario, Beardall John and Raven John A. 2005.CO₂ Concentrating Mechanisms in Algae: Mechanisms, Environmental Modulation, and Evolution. **Annual Review of Plant Biology**, 56(1), 99-131.
- Giuliano Dragone, Bruno Fernandes, António A Vicente and José A Teixeira. 2010. Third generation biofuels from microalgae. **Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology**,1 ,1355-1366.
- Jing Shi, Björn Podola and Michael Melkonian. 2007. Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae immobilized on twin layers: an experimental study. **Journal of Applied Phycology**, 19(5), 417-423.
- Jonathan Rea. 2014.**Kinetic Modeling and Experimentation of Anaerobic Digestion**. Massachusetts Institute of Technology.

- Kativu, Edmore. 2011. Carbon Dioxide Absorption Using Fresh Water Algae And Identifying Potential Uses Of Algal Biomass. University of the Witwatersrand.
- Li Hai Fan, Ya Tao Zhang, Lin Zhang and Huan Lin Chen. 2008. Evaluation of a membrane-sparged helical tubular photobioreactor for carbondioxide biofixation by *Chlorella vulgaris*. **Journal of Membrane Science**, 325, 336-345.
- Liam Brennan and Philip Owende. 2010. Biofuels from microalgae A review of technologies for production processing and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14(2), 557-577.
- Madiha Atta, Ani Idris, Ataullah Bukhari and Suzana Wahidin. 2013. Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. **Bioresource Technology**, 148, 373-378.
- Masojidek Jiri, Koblizek Michal and Giuseppe, Torzillo. 2013. **Photosynthesis in Microalgae**. [Online]. from https://www.researchgate.net/publication/284079683_Photosynthesis_in_Microalgae (1 June 2018).
- Pandian Prabakaran and Ravindran David. 2012. Lipid extraction and CO₂ mitigation by microalgae and its conversion into biodiesel. **Journal of Biochemical Technology**, 4(1), 469-472.
- Pawar Sanjay. 2016. Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 62, 640-653.
- Posadas E., Serejo M. L., Blanco S., Pérez R., García-Encina P. A. and Muñoz R. 2015. Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal–bacterial photobioreactors. **Algal Research**, 12, 221-229.
- Posadas Esther., Marín David., Blanco Saúl., Lebrero Raquel. and Muñoz Raúl. 2017. Simultaneous biogas upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond. **Bioresource Technology**, 232, 133-141.
- Sakai N., Sakamoto Y., Kishimoto N., Chihara M. and Karube I. 1995. *Chlorella* strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO₂. **Energy Conversion and Management**, 36(6), 693-696.
- Schulze Peter S. C., Barreira Luísa A., Pereira Hugo G. C., Perales José A. and Varela João


- C. S. 2014. Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. **Trends in Biotechnology**, 32(8), 422-430.
- Singh R. N. and Sharma Shaishav. 2012. Development of suitable photobioreactor for algae production A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16(4), 2347-2353.
- Teo Chee Loong, Atta Madiha, Bukhari Attaullah, Taisir Mohamad, Yusuf Afendi M. and Idris Ani. 2014. Enhancing growth and lipid production of marine microalgae for biodiesel production via the use of different LED wavelengths. **Bioresource Technology**, 162, 38-44.
- Travieso L., Hall D. O., Rao K. K., Benitez F., Sánchez E. and Borja R. 2001. A helical tubular photobioreactor producing *Spirulina* in a semicontinuous mode. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 47(3), 151-155.
- Vo Hoang-Nhat-Phong, Bui Xuan-Thanh, Nguyen Thanh-Tin, Nguyen Dinh Duc, Dao Thanh-Son, Cao Ngoc-Dan-Thanh. and Vo Thi-Kim-Quyen. 2018. Effects of nutrient ratios and carbon dioxide bio-sequestration on biomass growth of *Chlorella* sp. in bubble column photobioreactor. **Journal of Environmental Management**, 219, 1-8.
- Ward Blanken, Maria Cuaresma, René H. Wijffels. and Marcel Janssen. 2013. Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. **Algal Research**, 2(4), 333-340.
- Yan Cheng and Zheng Zheng. 2013. Performance of photoperiod and light intensity on biogas upgrade and biogas effluent nutrient reduction by the microalgae *Chlorella* sp. **Bioresource Technology**, 139, 292-299.
- . 2014. Performance of mixed LED light wavelengths on biogas upgrade and biogas fluid removal by microalga *Chlorella* sp. **Applied Energy**, 113, 1008-1014.
- Yongjun Zhao, Juan Wang, Hui Zhang, Cheng Yan and Yuejin Zhang. 2013. Effects of various LED light wavelengths and intensities on microalgae-based simultaneous biogas upgrading and digestate nutrient reduction process. **Bioresource Technology**, 136, 461-468.
- Yun Yeoung-Sang, Lee Sun Bok, Park Jong Moon, Lee Choong-Il. and Yang Ji-Won. 1997. Carbon Dioxide Fixation by Algal Cultivation Using Wastewater Nutrients.

Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 69(4), 451-455.

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานก๊าซชีวภาพ). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/article_attach/h_biogas.pdf (1 มิถุนายน 2561).
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม [ระบบออนไลน์].
- กฤษณ์ สิริกุลรัตน์. 2557. การจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ *Chlorella sp.* ในถังโฟโตไบโอบีโอดีแอกเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ขจรเกียรติ ศรีนวลสม. 2550. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.fishtech.mju.ac.th/FishNew1/OSS/files/TmBcVklThu30003.pdf> (1 มิถุนายน 2561).
- ครรชิต เงินค่าคง, นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์, สิทธิศักดิ์ แก้วหนัก, กฤษณฉัตร เมืองใจ, นิตยา ต้นติวา, นันทน์ภัส มโนนนท์ และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์. 2559. ประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 1(1), 51-58.
- ชิษณุพงศ์ ประทุม. 2558. ความเป็นไปได้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรม. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม, 11(2), 108-133.
- ธีรยุทธ บุญคง. 2552. การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากโรงงานปลาปนเพาะเลี้ยงคลอเรลลาเป็นอาหารในการเพาะเลี้ยงไรแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- ฤทัยรัตน์ วิศาลสุวรรณกร. 2548. ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อเพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. 2558. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ) ด้านความร้อน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Heat/pre_heat_2.pdf (21 ตุลาคม 2562).



ภาคผนวก

The logo of Maejo University is a circular emblem. It features a central figure of a deity or guardian spirit standing on a lotus, flanked by two golden flames. The figure is set against a green background. The outer ring of the logo contains the text 'มหาวิทยาลัยแม่โจ้' at the top and 'MAEJO UNIVERSITY' at the bottom, separated by two small star-like symbols.

ภาคผนวก ก
ผลการของระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพภายใต้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย
ขนาดเล็กในสภาพแสงแอลอีดี ที่อัตราการไหลต่างๆ

ผลการทดสอบที่อัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 20 L/min

ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 20 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 1 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 20 L/min

วันที่	แสง	เซลล์นับจากสไลด์ 5 ช่อง					ค่าเฉลี่ยสไลด์	×10 ⁶ cell/mL	เฉลี่ยเซลล์สาหร่าย
		1	2	3	4	5			
0	แดง	30	34	25	27	32	29.6	7.4	7.6
		33	32	33	28	30	31.2	7.8	
	น้ำเงิน	30	34	25	27	32	29.6	7.4	7.6
		33	32	33	28	30	31.2	7.8	
	แดงน้ำเงิน	29	34	26	28	31	29.6	7.4	7.6
		30	33	34	29	30	31.2	7.8	
1	แดง	32	35	38	19	37	32.2	8.05	8.475
		28	43	36	36	35	35.6	8.9	
	น้ำเงิน	30	34	39	34	32	33.8	8.45	8.15
		33	32	33	29	30	31.4	7.85	
	แดงน้ำเงิน	35	36	38	37	34	36	9	8.975
		30	41	35	36	37	35.8	8.95	
2	แดง	40	41	39	33	43	39.2	9.8	9.325
		42	40	30	29	36	35.4	8.85	
	น้ำเงิน	38	39	33	30	37	35.4	8.85	8.7
		38	34	37	32	30	34.2	8.55	
	แดงน้ำเงิน	42	41	45	47	43	43.6	10.9	10.6
		43	39	38	41	45	41.2	10.3	
3	แดง	59	57	65	69	70	64	16	15.675
		60	50	63	70	64	61.4	15.35	
	น้ำเงิน	40	30	33	40	30	34.6	8.65	9.3
		40	39	41	49	30	39.8	9.95	
	แดงน้ำเงิน	73	79	75	74	75	75.2	18.8	18.8
		74	70	75	78	79	75.2	18.8	

ตารางภาคผนวกที่ 1 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 20 L/min (ต่อ)

วันที่	แสง	เซลล์นับจากสไลด์ 5 ช่อง					ค่าเฉลี่ย สไลด์	×10 ⁶ cell/mL	เฉลี่ยความ หนาแน่นสาหร่าย
		1	2	3	4	5			
4	แดง	97	90	99	87	97	94	23.5	23.825
		94	100	94	98	97	96.6	24.15	
	น้ำเงิน	53	61	50	60	49	54.6	13.65	13.775
		59	61	53	55	50	55.6	13.9	
	แดงน้ำเงิน	111	119	112	114	117	114.6	28.65	28.625
		113	119	120	109	111	114.4	28.6	
5	แดง	97	107	127	85	109	105	26.25	26.45
		109	112	102	104	106	106.6	26.65	
	น้ำเงิน	71	68	65	70	67	68.2	17.05	17.1
		70	66	73	63	71	68.6	17.15	
	แดงน้ำเงิน	127	128	134	130	134	130.6	32.65	32.625
		127	131	128	134	132	130.4	32.6	
6	แดง	122	130	127	119	131	125.8	31.45	31.45
		130	122	130	127	120	125.8	31.45	
	น้ำเงิน	85	83	95	84	83	86	21.5	21.175
		80	91	87	80	79	83.4	20.85	
	แดงน้ำเงิน	145	146	140	143	144	143.6	35.9	35.775
		141	150	144	140	138	142.6	35.65	

ตารางภาคผนวกที่ 2 ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min

ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสาหร่าย 20 L/min	สีแดง	สีน้ำเงิน	สีแดงน้ำเงิน
น้ำสาหร่ายตัวอย่าง 50 mL (L)	0.05	0.05	0.05
น้ำหนักกระตาศกรองก่อนกรอง (g)	0.503	0.498	0.501
น้ำหนักกระตาศกรองหลังกรอง (g)	0.522	0.511	0.523
น้ำหนักสาหร่าย [หลังกรอง-ก่อนกรอง] (g)	0.019	0.013	0.022
ความเข้มข้น g/L (วันสุดท้าย)	0.380	0.260	0.440

ผลของค่าความเป็นกรดต่าง ที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 20 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 20 L/min

วันที่	แสง	ชุดข้อมูล pH			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
0	แดง	7.04	7.07	7.1	7.07
	น้ำเงิน	7.06	7.03	7.1	7.06
	แดงน้ำเงิน	7	7.08	7.02	7.03
1	แดง	5.55	5.54	5.57	5.55
	น้ำเงิน	5.54	5.53	5.55	5.54
	แดงน้ำเงิน	5.57	5.59	5.56	5.57
2	แดง	5.57	5.6	5.55	5.57
	น้ำเงิน	5.56	5.58	5.54	5.56
	แดงน้ำเงิน	5.55	5.57	5.61	5.58
3	แดง	5.64	5.63	5.64	5.64
	น้ำเงิน	5.6	5.62	5.66	5.63
	แดงน้ำเงิน	5.65	5.63	5.69	5.66
4	แดง	5.74	5.7	5.66	5.70
	น้ำเงิน	5.64	5.68	5.65	5.66
	แดงน้ำเงิน	5.65	5.76	5.74	5.72
5	แดง	5.66	5.68	5.7	5.68
	น้ำเงิน	5.65	5.67	5.66	5.66
	แดงน้ำเงิน	5.73	5.74	5.5	5.66
6	แดง	5.71	5.69	5.73	5.71
	น้ำเงิน	5.69	5.7	5.67	5.69
	แดงน้ำเงิน	5.74	5.77	5.8	5.77

ผลของอุณหภูมิน้ำสำหรับที่อัตราการไหล 20 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลของอุณหภูมิน้ำสำหรับที่อัตราการไหล 20 L/min

วันที่	แสง	ข้อมูลอุณหภูมิ (C°)			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
0	แดง	34.2	35.1	34.7	34.7
	น้ำเงิน	35	35.2	34.6	34.9
	แดงน้ำเงิน	34.5	34.8	35.1	34.8
1	แดง	34.8	35.3	34.7	34.9
	น้ำเงิน	34.8	34.7	35.4	35.0
	แดงน้ำเงิน	35.1	35	35.7	35.3
2	แดง	35	35.2	35.1	35.1
	น้ำเงิน	35.2	34.5	34.7	34.8
	แดงน้ำเงิน	34.8	34.9	35.1	34.9
3	แดง	34.8	34.6	34.9	34.8
	น้ำเงิน	34.9	34.5	34.9	34.8
	แดงน้ำเงิน	35.1	35.7	35.1	35.3
4	แดง	35.4	34.8	34.9	35.0
	น้ำเงิน	35.1	35.2	34.8	35.0
	แดงน้ำเงิน	34.7	34.7	35.2	34.9
5	แดง	35.7	35.1	35.4	35.4
	น้ำเงิน	34.5	34.7	35.4	34.9
	แดงน้ำเงิน	35	35.1	34.8	35.0
6	แดง	34.8	34.5	35.1	34.8
	น้ำเงิน	35.4	35.1	34.5	35.0
	แดงน้ำเงิน	35.7	35.3	34.9	35.3

ผลองค์ประกอบองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหล 20 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 5 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหล 20 L/min

วันที่	แสง		เข้า	ออก		วันที่	แสง		เข้า	ออก
1	แดง	CH ₄	60.7	67.1		3	แดง	CH ₄	55.7	65.3
		CO ₂	38	19				CO ₂	39.3	16.4
		O ₂	0.1	5.4				O ₂	0.4	4.7
		H ₂ S	70	0				H ₂ S	112	70
		Bal	1.2	8.5				Bal	4.6	13.6
	น้ำเงิน	CH ₄	60.7	66.8		น้ำเงิน	CH ₄	55.7	64.2	
		CO ₂	38	21.4			CO ₂	39.3	19.3	
		O ₂	0.1	0.5			O ₂	0.4	0.8	
		H ₂ S	70	31			H ₂ S	112	9	
		Bal	1.2	11.3			Bal	4.6	16.2	
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	61.7	69.4		แดงน้ำเงิน	CH ₄	58.3	70.2	
		CO ₂	36.9	17.4			CO ₂	40.7	19.1	
		O ₂	0.4	0.5			O ₂	0.5	0.3	
		H ₂ S	112	23			H ₂ S	321	53	
		Bal	5.2	12.7			Bal	3.1	10.4	
2	แดง	CH ₄	59.4	68.9		4	แดง	CH ₄	55.4	65.4
		CO ₂	39.7	17				CO ₂	40.1	20
		O ₂	0	5.9				O ₂	0.6	2.6
		H ₂ S	9	0				H ₂ S	56	31
		Bal	0.9	8.2				Bal	3.9	12.1
	น้ำเงิน	CH ₄	59.4	65.9		น้ำเงิน	CH ₄	55.4	63.7	
		CO ₂	39.7	20.6			CO ₂	40.1	20.7	
		O ₂	0	0.9			O ₂	0.6	1.4	
		H ₂ S	9	0			H ₂ S	56	4	
		Bal	0.9	12.6			Bal	3.9	14.2	
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	58.4	69.8		แดงน้ำเงิน	CH ₄	55.7	68.2	
		CO ₂	39.4	16.2			CO ₂	39.8	19.1	
		O ₂	0.5	4.5			O ₂	0.1	0.8	
		H ₂ S	160	34			H ₂ S	50	14	
		Bal	1.8	9.5			Bal	4.4	11.9	

ตารางภาคผนวกที่ 5 (ต่อ)

วันที่	แสง		เข้า	ออก
5	แดง	CH ₄	56.4	66.7
		CO ₂	38.9	18.9
		O ₂	0.1	0.9
		H ₂ S	11	31
		Bal	4.6	13.4
	น้ำเงิน	CH ₄	56.4	64.8
		CO ₂	38.9	20
		O ₂	0.1	0.9
		H ₂ S	11	0
		Bal	4.6	14.3
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	55.3	67.1
		CO ₂	40.6	19.7
		O ₂	0	0.8
		H ₂ S	25	12
		Bal	4.2	12.4
6	แดง	CH ₄	55.2	65.7
		CO ₂	40.9	20.1
		O ₂	0.3	1.3
		H ₂ S	31	17
		Bal	3.8	13.2
	น้ำเงิน	CH ₄	55.2	63.7
		CO ₂	40.9	21.8
		O ₂	0.3	2.9
		H ₂ S	31	0
		Bal	3.8	11.5
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	58.7	71.7
		CO ₂	39.1	18.1
		O ₂	0.3	3.9
		H ₂ S	113	51
		Bal	1.9	6.3

ผลการทดสอบอัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 29 L/min

ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 29 L/minตารางภาคผนวกที่ 6 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 29 L/min

วันที่	แสง	นับจากสไลด์ 5 ช่อง					ค่าเฉลี่ยสไลด์	จำนวนเซลล์ 10 ⁶	เฉลี่ยเซลล์สาหร่าย
		1	2	3	4	5			
0	แดง	25	30	30	32	27	28.8	7.2	7.45
		28	33	32	31	30	30.8	7.7	
	น้ำเงิน	34	25	27	30	32	29.6	7.4	7.38
		28	31	30	28	30	29.4	7.35	
	แดงน้ำเงิน	27	25	30	30	32	28.8	7.2	7.30
		28	31	30	29	30	29.6	7.4	
1	แดง	28	32	34	35	35	32.8	8.2	8.23
		37	29	30	35	34	33	8.25	
	น้ำเงิน	32	33	32	30	30	31.4	7.85	7.95
		30	32	32	33	34	32.2	8.05	
	แดงน้ำเงิน	35	34	36	33	37	35	8.75	8.65
		37	33	33	34	34	34.2	8.55	
2	แดง	36	37	39	34	39	37	9.25	9.28
		38	37	37	40	34	37.2	9.3	
	น้ำเงิน	34	36	34	33	33	34	8.5	8.50
		33	36	32	35	34	34	8.5	
	แดงน้ำเงิน	40	38	41	37	39	39	9.75	9.83
		39	38	40	41	40	39.6	9.9	
3	แดง	59	58	58	53	55	56.6	14.15	14.18
		55	57	59	52	61	56.8	14.2	
	น้ำเงิน	40	39	40	42	38	39.8	9.95	9.85
		37	40	38	40	40	39	9.75	
	แดงน้ำเงิน	62	61	65	64	63	63	15.75	15.80
		64	65	60	63	65	63.4	15.85	

ตารางภาคผนวกที่ 6 (ต่อ)

วันที่	แสง	นับจากสไลด์ 5 ช่อง					ค่าเฉลี่ยสไลด์	จำนวนเซลล์ 10^6	เฉลี่ยเซลล์สำหรับ
		1	2	3	4	5			
4	แดง	79	84	84	81	83	82.2	20.55	20.48
		86	81	78	79	84	81.6	20.4	
	น้ำเงิน	48	48	50	45	49	48	12	12.03
		47	49	48	46	51	48.2	12.05	
	แดงน้ำเงิน	87	90	86	94	93	90	22.5	22.35
		90	89	88	90	87	88.8	22.2	
5	แดง	85	83	86	82	85	84.2	21.05	21.15
		86	83	85	84	87	85	21.25	
	น้ำเงิน	58	57	59	56	57	57.4	14.35	14.30
		59	55	56	57	58	57	14.25	
	แดงน้ำเงิน	93	91	92	95	95	93.2	23.3	23.30
		95	92	92	94	93	93.2	23.3	
6	แดง	84	85	85	86	87	85.4	21.35	21.33
		87	84	85	84	86	85.2	21.3	
	น้ำเงิน	61	60	59	60	61	60.2	15.05	15.08
		59	62	60	61	60	60.4	15.1	
	แดงน้ำเงิน	96	95	96	95	98	96	24	24.05
		95	96	97	98	96	96.4	24.1	

ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสำหรับ 29 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 7 ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสำหรับ 29 L/min

ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสำหรับ 29L/min	สีแดง	สีน้ำเงิน	สีแดงน้ำเงิน
น้ำสาสำหรับตัวอย่าง 50 mL (L)	0.05	0.05	0.05
น้ำหนักกระดาศกรองก่อนกรอง (g)	0.512	0.508	0.509
น้ำหนักกระดาศกรองหลังกรอง (g)	0.525	0.517	0.524
น้ำหนักสาสำหรับ [หลังกรอง-ก่อนกรอง] (g)	0.013	0.009	0.015
ความเข้มข้น g/L (วันสุดท้าย)	0.260	0.180	0.300

ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 29 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 8 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสาหร่าย 29 L/min

วันที่	แสง	ชุดข้อมูลpH			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
0	แดง	7.01	7	7	7.00
	น้ำเงิน	7.03	6.95	7.04	7.01
	แดงน้ำเงิน	7	6.95	7.01	6.99
1	แดง	5.48	5.5	5.49	5.49
	น้ำเงิน	5.51	5.48	5.49	5.49
	แดงน้ำเงิน	5.46	5.48	5.5	5.48
2	แดง	5.5	5.51	5.5	5.50
	น้ำเงิน	5.47	5.47	5.48	5.47
	แดงน้ำเงิน	5.49	5.51	5.49	5.50
3	แดง	5.48	5.49	5.47	5.48
	น้ำเงิน	5.5	5.49	5.51	5.50
	แดงน้ำเงิน	5.51	5.5	5.52	5.51
4	แดง	5.47	5.46	5.49	5.47
	น้ำเงิน	5.46	5.48	5.48	5.47
	แดงน้ำเงิน	5.49	5.47	5.46	5.47
5	แดง	5.52	5.51	5.51	5.51
	น้ำเงิน	5.5	5.49	5.48	5.49
	แดงน้ำเงิน	5.52	5.53	5.54	5.53
6	แดง	5.53	5.53	5.51	5.52
	น้ำเงิน	5.51	5.5	5.49	5.50
	แดงน้ำเงิน	5.52	5.53	5.53	5.53

ผลของอุณหภูมิน้ำสำหรับที่อัตราการไหล 29 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 9 ผลของอุณหภูมิน้ำสำหรับที่อัตราการไหล 29 L/min

วันที่	แสง	ชุดข้อมูลอุณหภูมิ			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
0	แดง	35.4	35	35.1	35.2
	น้ำเงิน	35.1	35	35.2	35.1
	แดงน้ำเงิน	35.2	35.2	35.1	35.2
1	แดง	35.4	35.1	35.2	35.2
	น้ำเงิน	35.1	35.4	35.4	35.3
	แดงน้ำเงิน	35.1	35.2	35	35.1
2	แดง	35.1	35.1	35	35.1
	น้ำเงิน	35.4	35.6	35.4	35.5
	แดงน้ำเงิน	34.4	34.5	34.6	34.5
3	แดง	34.7	34.2	34.9	34.6
	น้ำเงิน	34.5	34.4	34.6	34.5
	แดงน้ำเงิน	34.1	34	34.2	34.1
4	แดง	35.8	35.4	35.7	35.6
	น้ำเงิน	35.6	35.9	35.4	35.6
	แดงน้ำเงิน	34.8	34.9	34.9	34.9
5	แดง	35.3	35.5	35.4	35.4
	น้ำเงิน	35.1	34.7	35.4	35.1
	แดงน้ำเงิน	35	35.1	35	35.0
6	แดง	35.8	35.7	35.8	35.8
	น้ำเงิน	35.8	35.9	39.7	37.1
	แดงน้ำเงิน	35.1	35.2	35.3	35.2

ผลองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหล 29 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 10 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 29 L/min

วันที่	แสง		เข้า	ออก		วันที่	แสง		เข้า	ออก	
1	แดง	CH ₄	64.1	70.6		แดง		CH ₄	63	73.2	
		CO ₂	35.5	24.3				CO ₂	36.4	25.4	
		O ₂	0.4	0.9				O ₂	0	4.3	
		H ₂ S	9	4				H ₂ S	34	12	
		Bal	1.4	4.2				Bal	0.6	2	
	น้ำเงิน	CH ₄	64.1	70		3	น้ำเงิน	CH ₄	63	71.2	
		CO ₂	35.5	27.4					CO ₂	36.4	27.7
		O ₂	0.4	4.1					O ₂	0	5.6
		H ₂ S	9	4					H ₂ S	34	30
		Bal	1.4	2.5					Bal	0.6	1.1
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	61.7	71.3		แดงน้ำเงิน	CH ₄	58.3	68.7		
		CO ₂	36.9	24.2				CO ₂	40.7	24.1	
		O ₂	0.1	0.2				O ₂	0.1	4.1	
		H ₂ S	9	4				H ₂ S	113	50	
		Bal	1.3	4.3				Bal	0.9	3.1	
2	แดง	CH ₄	64.1	71.7	4	แดง	CH ₄	63.9	74.1		
		CO ₂	33.9	23.7				CO ₂	35.4	23.4	
		O ₂	0.6	3.2				O ₂	0.2	2.1	
		H ₂ S	25	13				H ₂ S	165	46	
		Bal	1.4	1.4				Bal	4.2	0.4	
	น้ำเงิน	CH ₄	64.1	70.5		น้ำเงิน	CH ₄	63.9	72		
		CO ₂	33.9	26.1				CO ₂	35.4	27.2	
		O ₂	0.6	2.3				O ₂	0.2	3.2	
		H ₂ S	25	17				H ₂ S	165	73	
		Bal	1.4	1.1				Bal	4.2	0.8	
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	58.4	68.5		แดงน้ำเงิน	CH ₄	55.7	66.9		
		CO ₂	39.4	24.3				CO ₂	39.8	21.7	
		O ₂	0.4	5.4				O ₂	0.3	5.4	
		H ₂ S	112	32				H ₂ S	128	37	
		Bal	1.8	1.8				Bal	4.2	5.7	

ตารางภาคผนวกที่ 10 (ต่อ)

วันที่	แสง	องค์ประกอบ	Gas in	Gas out
5	แดง	CH ₄	67.5	75.3
		CO ₂	32.7	23
		O ₂	0.6	2.4
		H ₂ S	321	116
		Bal	2.7	1.2
	น้ำเงิน	CH ₄	67.5	73.4
		CO ₂	32.7	25.7
		O ₂	0.6	5.4
		H ₂ S	321	181
		Bal	2.7	4.2
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	55.3	66.4
		CO ₂	40.6	22.7
		O ₂	0.7	6.1
		H ₂ S	181	53
		Bal	3.3	4.8
6	แดง	CH ₄	67.6	75.1
		CO ₂	32.3	24.2
		O ₂	0.1	5
		H ₂ S	98	31
		Bal	0.5	0.1
	น้ำเงิน	CH ₄	67.6	73.2
		CO ₂	32.3	25.4
		O ₂	0.1	1.2
		H ₂ S	98	45
		Bal	0.5	20.1
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	58.7	68.9
		CO ₂	39.1	22.5
		O ₂	0.3	2.5
		H ₂ S	46	17
		Bal	1.9	6.1

ผลการทดสอบอัตราการไหลของสาหร่ายเท่ากับ 37 L/min

ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 37 L/minตารางภาคผนวกที่ 11 ผลของความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ 37 L/min

วันที่	แสง	นับจากสไลด์ 5 ช่อง					ค่าเฉลี่ยสไลด์	จำนวนเซลล์ 10 ⁶	เฉลี่ยเซลล์สาหร่าย
		1	2	3	4	5			
0	แดง	30	34	25	27	30	29.2	7.3	7.375
		29	32	30	28	30	29.8	7.45	
	น้ำเงิน	30	34	25	27	32	29.6	7.4	7.45
		32	32	28	28	30	30	7.5	
	แดงน้ำเงิน	30	34	25	27	32	29.6	7.4	7.425
		30	32	29	28	30	29.8	7.45	
1	แดง	31	32	34	30	32	31.8	7.95	7.975
		32	31	33	33	31	32	8	
	น้ำเงิน	33	31	33	30	30	31.4	7.85	7.85
		31	30	32	33	31	31.4	7.85	
	แดงน้ำเงิน	33	34	32	35	33	33.4	8.35	8.375
		36	33	31	34	34	33.6	8.4	
2	แดง	37	36	36	38	34	36.2	9.05	9.025
		35	37	35	36	37	36	9	
	น้ำเงิน	34	32	31	32	31	32	8	8.075
		33	31	32	35	32	32.6	8.15	
	แดงน้ำเงิน	38	40	37	39	36	38	9.5	9.475
		40	36	38	36	39	37.8	9.45	
3	แดง	51	55	48	51	55	52	13	13.05
		52	50	51	53	56	52.4	13.1	
	น้ำเงิน	35	34	37	34	34	34.8	8.7	8.6
		34	33	34	36	33	34	8.5	
	แดงน้ำเงิน	58	54	56	55	57	56	14	14.15
		58	55	57	57	59	57.2	14.3	

ตารางภาคผนวกที่ 11 (ต่อ)

วันที่	แสง	นับจากสไลด์ 5 ช่อง					ค่าเฉลี่ยสไลด์	จำนวนเซลล์ 10 ⁶	เฉลี่ยเซลล์สำหรับ
		1	2	3	4	5			
4	แดง	60	59	62	63	57	60.2	15.05	15
		61	60	61	59	58	59.8	14.95	
	น้ำเงิน	42	40	39	37	42	40	10	10.075
		43	40	41	39	40	40.6	10.15	
	แดงน้ำเงิน	69	65	68	70	71	68.6	17.15	17.1
		70	67	69	66	69	68.2	17.05	
5	แดง	66	64	63	63	64	64	16	15.95
		63	66	62	64	63	63.6	15.9	
	น้ำเงิน	40	43	45	43	42	42.6	10.65	10.7
		44	40	46	43	42	43	10.75	
	แดงน้ำเงิน	71	70	73	71	74	71.8	17.95	17.925
		70	73	71	73	71	71.6	17.9	
6	แดง	64	67	65	65	65	65.2	16.3	16.2
		63	64	66	65	64	64.4	16.1	
	น้ำเงิน	45	41	44	43	47	44	11	10.9
		42	43	46	43	42	43.2	10.8	
	แดงน้ำเงิน	70	73	75	74	71	72.6	18.15	18.15
		72	71	71	75	74	72.6	18.15	

ผลปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสำหรับ 37 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 12 ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสำหรับ 37 L/min

ปริมาณชีวมวลที่อัตราการไหลสำหรับ 37L/min	สีแดง	สีน้ำเงิน	สีแดงน้ำเงิน
น้ำสาสำหรับตัวอย่าง 50 mL (L)	0.05	0.05	0.05
น้ำหนักกระดาศกรองก่อนกรอง (g)	0.509	0.507	0.51
น้ำหนักกระดาศกรองหลังกรอง (g)	0.519	0.514	0.521
น้ำหนักสาสำหรับ [หลังกรอง-ก่อนกรอง] (g)	0.010	0.007	0.011
ความเข้มข้น g/L (วันสุดท้าย)	0.2	0.14	0.22

ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 37 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 13 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการไหลน้ำสำหรับ 37 L/min

วันที่	แสง	ชุดข้อมูลpH			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
0	แดง	7.02	7.09	7.01	7.04
	น้ำเงิน	7.1	7.12	7.09	7.10
	แดงน้ำเงิน	7.12	7.13	7.12	7.12
1	แดง	5.36	5.34	5.41	5.37
	น้ำเงิน	5.34	5.33	5.44	5.37
	แดงน้ำเงิน	5.43	5.44	5.37	5.41
2	แดง	5.43	5.5	5.46	5.46
	น้ำเงิน	5.41	5.39	5.37	5.39
	แดงน้ำเงิน	5.48	5.41	5.45	5.45
3	แดง	5.39	5.48	5.42	5.43
	น้ำเงิน	5.37	5.44	5.4	5.40
	แดงน้ำเงิน	5.42	5.43	5.41	5.42
4	แดง	5.44	5.47	5.4	5.44
	น้ำเงิน	5.43	5.46	5.41	5.43
	แดงน้ำเงิน	5.42	5.4	5.43	5.42
5	แดง	5.48	5.49	5.46	5.48
	น้ำเงิน	5.44	5.46	5.43	5.44
	แดงน้ำเงิน	5.49	5.49	5.45	5.48
6	แดง	5.49	5.47	5.43	5.46
	น้ำเงิน	5.46	5.45	5.45	5.45
	แดงน้ำเงิน	5.47	5.48	5.47	5.47

ผลของอุณหภูมิน้ำสำหรับที่อัตราการไหล 37 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 14 ผลของอุณหภูมิน้ำสำหรับที่อัตราการไหล 37 L/min

วันที่	แสง	ข้อมูลอุณหภูมิ			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
0	แดง	35	35.1	35.2	35.1
	น้ำเงิน	35.2	35.2	35.4	35.3
	แดงน้ำเงิน	34.8	34.7	35	34.8
1	แดง	35.9	35.8	35.7	35.8
	น้ำเงิน	35.8	35.7	35.8	35.8
	แดงน้ำเงิน	35	35.1	35.5	35.2
2	แดง	36.1	35.8	36.4	36.1
	น้ำเงิน	36.2	36.1	36	36.1
	แดงน้ำเงิน	34.9	35.1	34.8	34.9
3	แดง	36.5	36.4	36.5	36.5
	น้ำเงิน	36	36.1	36.3	36.1
	แดงน้ำเงิน	35.7	35.6	35.5	35.6
4	แดง	35.8	35.7	35.7	35.7
	น้ำเงิน	35.5	35.8	35.7	35.7
	แดงน้ำเงิน	35.1	35	35.4	35.2
5	แดง	35.8	35.7	35.4	35.6
	น้ำเงิน	35.8	35.7	35.9	35.8
	แดงน้ำเงิน	36.4	36.7	36.2	36.4
6	แดง	36	35.8	35.7	35.8
	น้ำเงิน	35.7	35.8	35.7	35.7
	แดงน้ำเงิน	36.5	36.4	36.8	36.6

องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 37 L/min

ตารางภาคผนวกที่ 15 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 37 L/min

วันที่	แสง	องค์ประกอบ	เข้า	ออก	วันที่	แสง	องค์ประกอบ	เข้า	ออก
1	แดง	CH ₄	65.3	72	3	แดง	CH ₄	60.9	66.4
		CO ₂	34.6	25.1			CO ₂	38.4	30
		O ₂	0.1	2.5			O ₂	0.4	1.4
		H ₂ S	211	70			H ₂ S	221	51
		Bal	2.1	6.1			Bal	0.3	3.6
	น้ำเงิน	CH ₄	63.1	68.3		น้ำเงิน	CH ₄	56.9	62
		CO ₂	34.4	26.4			CO ₂	40.4	30.7
		O ₂	0.5	1.2			O ₂	0.4	5.2
		H ₂ S	112	53			H ₂ S	130	142
		Bal	1.4	4.1			Bal	2.7	2.1
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	65.3	73.4		แดงน้ำเงิน	CH ₄	60.9	69
		CO ₂	34.6	24.3			CO ₂	38.4	26
		O ₂	0.1	2.1			O ₂	0.4	0.8
		H ₂ S	211	54			H ₂ S	221	113
		Bal	2.1	5.2			Bal	0.3	4.2
2	แดง	CH ₄	63.5	70.1	4	แดง	CH ₄	62.7	67.8
		CO ₂	35.6	25.8			CO ₂	36.9	29.2
		O ₂	0.2	1.8			O ₂	0.1	0.6
		H ₂ S	121	84			H ₂ S	158	48
		Bal	0.7	2.4			Bal	1	2.4
	น้ำเงิน	CH ₄	62.5	68.2		น้ำเงิน	CH ₄	57.6	62.3
		CO ₂	30.2	22.1			CO ₂	42.3	32.5
		O ₂	0.5	3.4			O ₂	0.4	1.6
		H ₂ S	365	131			H ₂ S	20	15
		Bal	6.8	6.3			Bal	1.3	4.7
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	63.5	73.4		แดงน้ำเงิน	CH ₄	62.7	68.2
		CO ₂	35.6	23.9			CO ₂	36.9	27.4
		O ₂	0.2	3.2			O ₂	0.1	0.9
		H ₂ S	121	56			H ₂ S	158	56
		Bal	0.7	23			Bal	1	3.4

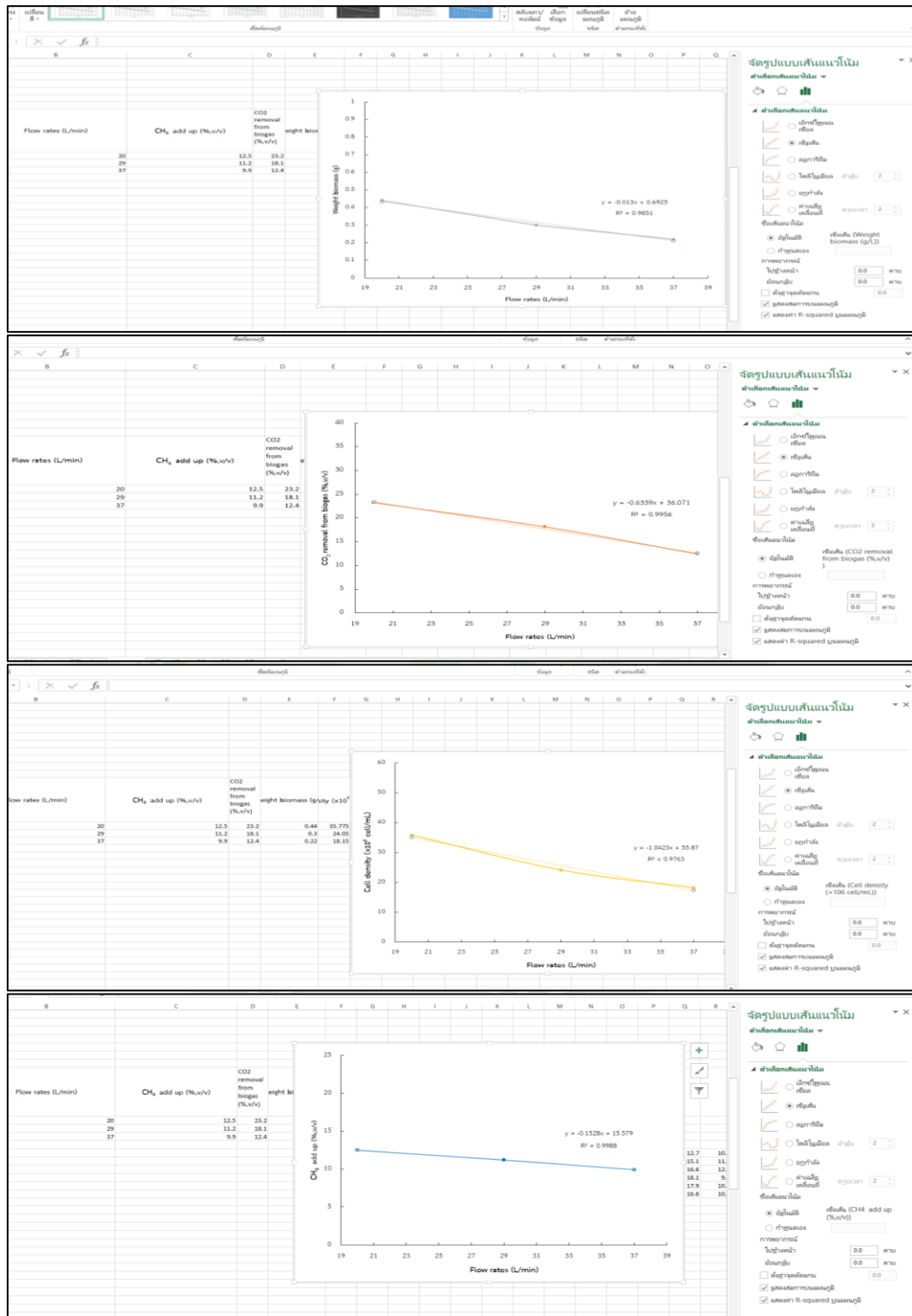
ตารางภาคผนวกที่ 15 (ต่อ)

วันที่	แสง	องค์ประกอบ	เข้า	ออก
5	แดง	CH ₄	61.2	66.7
		CO ₂	37.9	29.8
		O ₂	0.5	1.7
		H ₂ S	110	64
		Bal	2.3	2.4
	น้ำเงิน	CH ₄	60.1	64.8
		CO ₂	39	30.8
		O ₂	0.3	1.3
		H ₂ S	45	21
		Bal	0.6	3.1
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	61.2	67.1
		CO ₂	37.9	27.8
		O ₂	0.5	1
		H ₂ S	110	53
		Bal	2.3	4.1
6	แดง	CH ₄	62.9	68.4
		CO ₂	36.5	28.7
		O ₂	0.6	0.5
		H ₂ S	275	136
		Bal	12.1	2.4
	น้ำเงิน	CH ₄	60.4	64.7
		CO ₂	39	30.9
		O ₂	0.4	1.8
		H ₂ S	49	20
		Bal	1.3	2.6
	แดงน้ำเงิน	CH ₄	62.9	69.1
		CO ₂	36.5	26.4
		O ₂	0.6	2.6
		H ₂ S	275	97
		Bal	12.1	3.5



ภาคผนวก ข

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโฟโตโบริแอกเตอร์แบบท่อขด



ภาพภาคผนวกที่ 1 การสร้างสมการการใน Microsoft Excel 2013



ภาคผนวก ค
การเผยแพร่งานวิจัย

บทความทางวิชาการฉบับที่ 1

- ชื่อผู้แต่ง: ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์
ชวโรจน์ ใจสิน
บุญยสิริ บุญเป็ง
- ชื่อบทความ: การเปรียบเทียบความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพ PAR
ระหว่าง LED COB กับ LED SMD
Comparison of the Photosynthetic Photon Flux Density and PAR
Efficiency between COB and SMD LED Type
- ชื่อวารสาร: การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4 ด้านสารสนเทศ การเกษตร การ
จัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี
The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,
Business administration, Engineering, Science and Technology
- เล่มที่: หน้าที่ 583-590, ระหว่างวันที่ 30 – 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมทินิดี@
ระนอง อำเภอเมือง จังหวัดระนอง



การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ ๔

ด้านสารสนเทศ การจัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration,
Engineering, Sciences and Technology: IAMBEST 2019

เกียรติบัตรฉบับนี้ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

ธัญวัฒน์ กลั่นคุ้มณ์ ชาวโรจน์ ใจสิน และ ปุณยสิริ บุญเป็ง

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความวิจัย ภาคบรรยาย

เรื่อง “การเปรียบเทียบความหนาแน่นไฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพ PAR ระหว่าง LED COB กับ LED SMD”

วันที่ ๓๐ - ๓๑ พฤษภาคม ๒๕๖๒

ณ โรงแรมทีนิตี้ ระนอง อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

อธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



การเปรียบเทียบความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพ PAR
ระหว่าง LED COB กับ LED SMD

Comparison of the Photosynthetic Photon Flux Density and PAR Efficiency
between COB and SMD LED Type

ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์¹ ชวโรจน์ ใจสิน¹ และ ปุณยสิริ บุญเป็ง²

Tanyawat Klancoowat¹, Chawaroj Jaisin¹ and Poonyasiri Boonpeng²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่, ²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, ²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

*Corresponding author: chawaroj@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพ PAR ของหลอดชนิด LED COB และ LED SMD 5050 ที่กำลังไฟฟ้รวม 40-50 W สีของ LED ที่ใช้ในการทดสอบคือ น้ำเงิน สีแดง และ น้ำเงินผสมแดง ซึ่งจะถูกติดตั้งเหนือพื้นที่ทดสอบเป็นระยะ 10 20 30 40 และ 50 cm ตามลำดับครอบคลุมพื้นที่รับแสงขนาด 0.36 m² ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสงถูกวัดด้วยเครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการทดสอบของโฟตอนสังเคราะห์แสงของหลอด LED ทั้ง 2 ชนิดพบว่า LED COB ให้ความหนาแน่นโฟตอน ทั้งแสงสีน้ำเงิน แดง และน้ำเงินผสมแดง มากที่สุด โดยที่ระยะห่าง 10 cm ได้ระดับความเข้มแสงเป็น 214.14, 102.03 และ 124.26 μmol m⁻²s⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ LED SMD ให้ความหนาแน่นโฟตอน ที่ระยะห่าง 10 cm คือ 84.66, 43.40 และ 53.14 μmol m⁻²s⁻¹ ตามลำดับ ในส่วนของประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้งานสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน (PAR efficiency) ของ LED ทั้งสองชนิดพบว่า LED COB แสงสีน้ำเงิน แดง และน้ำเงินผสมแดง มีค่า 1.54, 0.73 และ 1.12 μmol s⁻¹W⁻¹ ขณะที่ LED SMD มีค่าเป็น 0.61, 0.31 และ 0.38 μmol s⁻¹W⁻¹ ดังนั้น LED แบบ COB จึงมีความเหมาะสมในการนำใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหรือพืชที่ต้องการแสงน้อยและพืชกระถาง เนื่องจากให้ความหนาแน่นโฟตอนและประสิทธิภาพ PAR ที่ดีกว่าแบบ LED SMD 5050

คำสำคัญ: ความหนาแน่นของโฟตอนในการสังเคราะห์แสง, ประสิทธิภาพ PAR, ความยาวคลื่นแสงของ LED

Abstract

This research aims to study the photosynthetic photon flux density (PPFD) and the PAR efficiency on two types of LED consisting of COB LEDs and SMD 5050 LEDs. The investigated conditions of LEDs are the power on 40-50 W and the colors of blue, red, and a combination between blue and red. According to the investigated conditions, the LEDs module distance, installing above the detector and covering the lighting area of 0.36 m², is varied with 10, 20, 30, 40, and 50 cm. The PPFD is measured by spectrophotometer (PG100N). On the one hand, the PAR efficiency is calculated from PPFD and lighting area per power. The experimental results with two types of LED show the highest PPFD on blue, red, and the combination colors at 10 cm. Therefore, the highest PPFD of COB LEDs: SMD LEDs is 214.14:84.66, 102.03:43.40, and 124.26:53.14 μmol m⁻²s⁻¹ respectively. Moreover, the PAR efficiency of COB LEDs: SMD LEDs is 1.54:0.61, 0.73:0.31, and 1.12:0.38 μmol s⁻¹W⁻¹ respectively. In conclusion, the PPFD and PAR efficiency results of COB LEDs is better than SMD LEDs. Therefore, COB LEDs are appropriate as an artificial light source in algae cultivation system or low-light plants as well as houseplants.

Keywords: photosynthetic photon flux density, PAR efficiency, LED spectrum

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



บทนำ

สาหร่ายขนาดเล็ก เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นคาร์โบไฮเดรต ไชมัน และออกซิเจน จากกระบวนการสังเคราะห์แสง (Angelidaki *et al.*, 2013) วัตถุประสงค์สำคัญ 4 ประการสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส คาร์บอนไดออกไซด์ และแสง ซึ่งสามารถได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์หรือแสงประดิษฐ์ อย่างไรก็ตามแสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น รอบกลางวันกลางคืน สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล สถานที่ตั้งที่ทำให้เกิดความผันผวนของระดับรังสีที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง ข้อจำกัดเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้แสงประดิษฐ์ที่มีการส่องสว่างอย่างต่อเนื่องและควบคุมความเข้มได้ ซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น แสงประดิษฐ์สามารถรวมเข้ากับการออกแบบระบบ Photobioreactor ทำให้ผลผลิตเชิงปริมาตรสามารถเพิ่มขึ้นได้ แสงประดิษฐ์ที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์, หลอดความเข้มสูง (HID) และไดโอดเปล่งแสง (LED) ซึ่งจากงานวิจัยของ Chae *et al.*, 2016 และ Masojidek *et al.*, 2013 ได้ศึกษาแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (450–475 nm) หรือช่วงความยาวคลื่นสีแดง (630–675 nm) จากงานวิจัยของ Schulze *et al.*, 2014 พบว่า LED มีความสามารถในการผลิตช่วงคลื่นแสงที่เฉพาะเจาะจง คือ แสงสีน้ำเงินมีช่วงคลื่นประมาณ 430–470 nm และแสงสีแดงมีช่วงคลื่นประมาณ 625–680 nm แสงจากหลอด LED จึงเป็นตัวเลือกในนำมาใช้เป็นแสงประดิษฐ์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ได้มีงานวิจัยที่ใช้แสง LED ในการเลี้ยงสาหร่าย ได้แก่ งานวิจัยของ Weiqi *et al.*, 2012 ได้ใช้ Super Red LED Arrays ความหนาแน่นของโฟตอน 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ งานวิจัยของ Kula *et al.*, 2014 ได้ใช้ 256 LEDs ความหนาแน่นของโฟตอน 400 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ งานวิจัยของ Chen and Lee ได้ใช้ DDH GaAlAs LEDs ความหนาแน่นของโฟตอน 660 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีการใช้ LED แตกต่างกันไปแต่การเลือกใช้ LED ให้คุ้มค่าที่สุดต้องมีการคำนึงถึง ประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงหรือประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงซึ่งส่งผลต่อการผลิตชีวมวลและต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญ (Ward *et al.*, 2013)

งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาผลการเปรียบเทียบหลอด LED 2 ชนิด คือ LED COB และ LED SMD 5050 ในเรื่องของความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

วิธีการศึกษา

ขั้นตอนและวิธีการศึกษาความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพ PAR ระหว่าง LED COB กับ LED SMD มีลำดับและขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมชุดทดสอบแสงและอุปกรณ์วัดความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสง

การออกแบบชุดทดสอบแสง ได้มีการแบ่งพื้นที่ออกเป็น เพดานกระจายแสง พื้นที่รับแสงและผนังกันแสง โดยในส่วนพื้นที่รับแสงมีขนาดกว้าง 60 cm ยาว 60 cm ผนังและเพดานมีความสูง 60 cm ภายในติดตั้งชุดสะท้อนแสง โครงสร้างรับน้ำหนักเลือกใช้เหล็กฉากขนาด 2.5 cm ซึ่งสามารถขยับเพดานกระจายแสงขึ้น-ลงได้ ขณะที่ประเภทหลอด LED ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ Chips on Board (COB LED) เปรียบเทียบกับ Surface Mount Device (SMD LED) ความยาวคลื่นแสงหรือสีและกำลังไฟฟ้าของ COB LED แบ่งเป็น ชิปเดี่ยวสีแดงกำลังไฟฟ้า 50 W ชิปเดี่ยวสีน้ำเงินขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W ชิปคู่สีแดงและน้ำเงินขนาดกำลังไฟฟ้า 40 W ส่วน SMD LED ใช้ชิปแบบ RGB (เลือกใช้เฉพาะส่วนของสีแดงและน้ำเงิน) มีกำลังไฟฟ้าต่อชิปที่ 0.5 W (สีแดงรวมน้ำเงิน) ดังแสดงใน Figure 1

การติดตั้ง LED ทั้งสองประเภท ดังแสดงใน Figure 2 หมายเลข 1 โดยมีการแบ่งจุดวัดความหนาแน่นแสงบนพื้นที่รับแสงออกเป็น 9 ส่วนดังแสดงใน Figure 2 หมายเลข 2 ขณะที่กำลังไฟฟ้าใช้ Clamp Multimeter ยี่ห้อ UNI-T UT203 เป็นเครื่องมือสำหรับวัดกำลังไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



2. การหาความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสง

ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสงถูกตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ UPRTek รุ่น PG100N โดยแบ่งระยะการวัดห่างจากแหล่งกำเนิดแสงออกเป็น 10 20 30 40 และ 50 cm ทำการวัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสงถูกแสดงผลในรูปของ Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) มีหน่วยเป็น $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ จากนั้นนำค่าความหนาแน่นของโฟตอน มาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละระยะความสูงและบันทึกรูปร่างของความยาวคลื่น ขณะที่การหาประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้งานสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน (Photosynthetically active radiation Efficiency, PAR Efficiency) (Ward *et al.*, 2013) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{PAR Efficiency } (\mu\text{mol s}^{-1}\text{W}^{-1}) = [\text{PPFD } (\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}) \times \text{Lighting area } (\text{m}^2)] / \text{Power (W)} \quad (1)$$



Figure 1 การติดตั้ง LED สีน้ำเงินผสมแดง a) LED COB และ b) LED SMD 5050

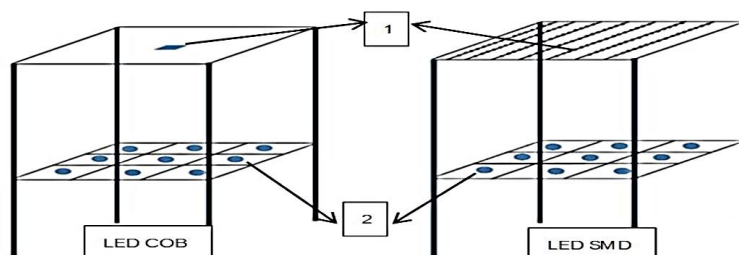


Figure 2 ชุดทดสอบความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงของ LED COB และ LED SMD 5050

ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการศึกษาความหนาแน่นของโฟตอนการสังเคราะห์แสง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย การวัดความหนาแน่นของโฟตอนการสังเคราะห์แสง การประเมินประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ความหนาแน่นของโฟตอนสังเคราะห์แสง

จากการศึกษาความหนาแน่นของโฟตอนในการสังเคราะห์ (PPFD) แสงสีน้ำเงิน แสงสีแดง และแสงสีน้ำเงินผสมแดงของ LED ทั้ง 2 ชนิด ได้ผลการศึกษาดังนี้

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



1) แสงสีน้ำเงิน

ที่ระยะห่างจากหลอดที่ 10 20 30 40 และ 50 cm ของ LED COB ได้ความหนาแน่นของฟิโตนสังเคราะห์เฉลี่ย คือ 214.14 199.27 160.36 126.09 และ 117.66 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ และในส่วนของ LED SMD 5050 ได้ความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์เฉลี่ย คือ 84.66 70.47 64.71 61.41 และ 57.06 ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของฟิโตนของ LED COB มีค่ามากกว่า LED SMD 5050 ทุกระยะดังแสดงใน Figure 3 โดยความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินของ LED COB อยู่ที่ 456 nm และ LED SMD 5050 ที่ 460 nm ดังแสดงใน Figure 4

2) แสงสีแดง

ที่ระยะห่างจากหลอดที่ 10 20 30 40 และ 50 cm ของ LED COB ได้ความหนาแน่นของฟิโตนสังเคราะห์เฉลี่ย คือ 102.00 67.37 53.76 47.93 และ 41.08 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ และในส่วนของ LED SMD 5050 ได้ความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์เฉลี่ย คือ 43.90 36.07 33.08 28.50 และ 26.62 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของฟิโตนของ LED COB มีค่ามากกว่า LED SMD 5050 ทุกระยะดังแสดงใน Figure 5 โดยความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินของ LED COB อยู่ที่ 646 nm และ LED SMD 5050 ที่ 631 nm ดังแสดงใน Figure 6

3) แสงสีน้ำเงินผสมแดง

ที่ระยะห่างจากหลอดที่ 10 20 30 40 และ 50 cm ของ LED COB ได้ความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์เฉลี่ย คือ 124.26 115.06 99.69 84.46 และ 72.03 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ และในส่วนของ LED SMD 5050 ได้ความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์เฉลี่ย คือ 53.14 48.31 43.86 40.29 และ 37.56 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของฟิโตนของ LED COB มีค่ามากกว่า LED SMD 5050 ทุกระยะดังแสดงใน Figure 7 โดยความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินของ LED COB อยู่ที่ 451, 641 nm และ LED SMD 5050 ที่ 461, 632 nm ดังแสดงใน Figure 8

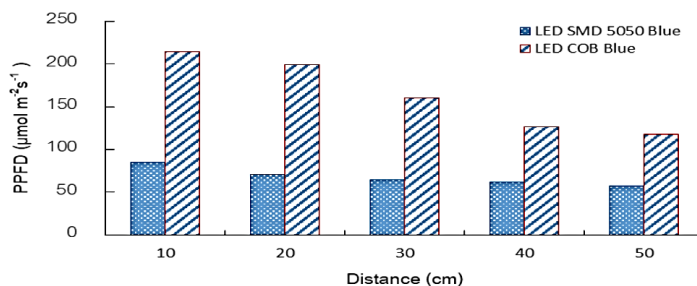


Figure 3 ความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์แสงสีน้ำเงินของ LED COB และ LED SMD 5050

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology

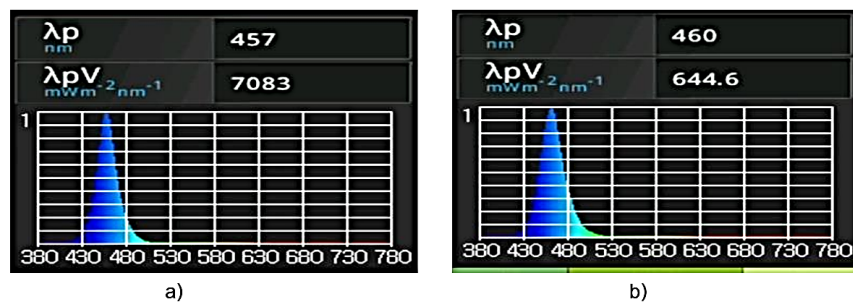


Figure 4 ความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน a) LED COB และ b) LED SMD 5050

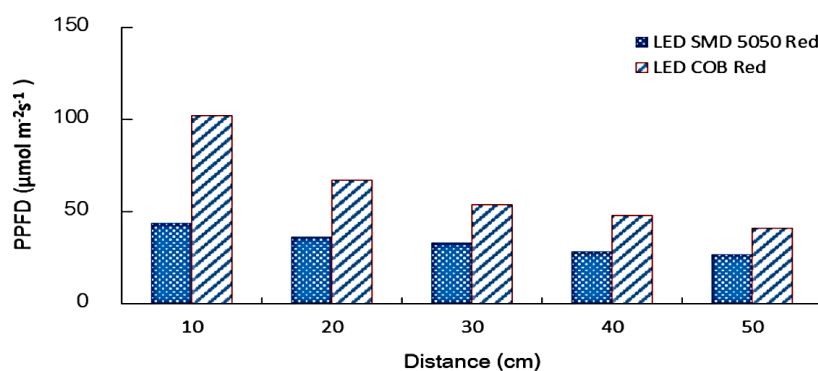


Figure 5 ความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์แสงสีแดงของ LED COB และ LED SMD 5050

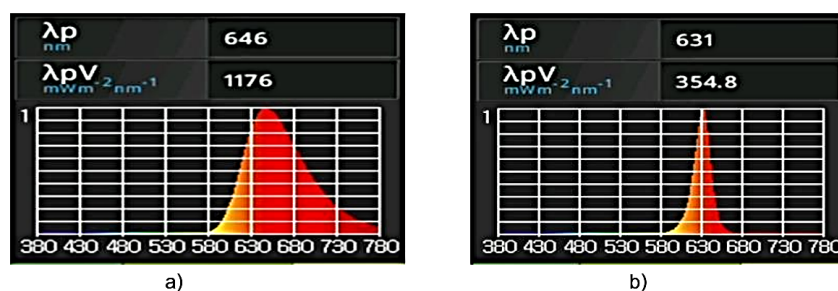


Figure 6 ความยาวคลื่นแสงสีแดง a) LED COB และ b) LED SMD 5050

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology

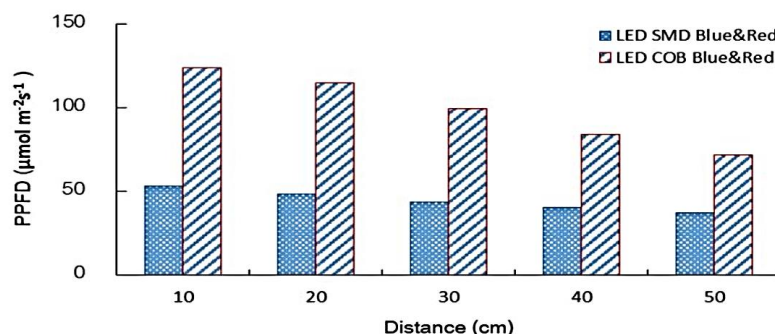


Figure 7 ผลของความหนาแน่นของฟิโตนในการสังเคราะห์แสงสีน้ำเงินผสมแดงของ LED COB และ LED SMD 5050

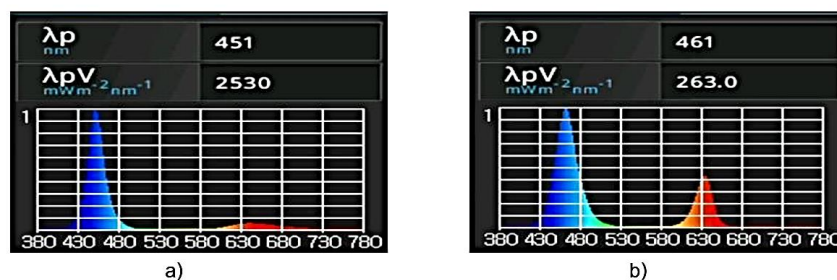


Figure 8 ผลของความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินผสมแดง a) LED COB และ b) LED SMD 5050

2. วิเคราะห์ความหนาแน่นของฟิโตนและประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสง ในการนำมาเป็นแหล่งกำเนิดแสงในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

1) วิเคราะห์ความหนาแน่นของฟิโตนสังเคราะห์แสงของหลอด LED

จากผลการศึกษาความหนาแน่นของฟิโตนสังเคราะห์แสงของ LED 2 ชนิด พบว่าระยะห่างที่มีความหนาแน่นฟิโตนมากที่สุดคือ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 10 cm ซึ่ง LED COB ให้ความหนาแน่นฟิโตนที่มากกว่า 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ แต่ LED SMD 5050 ให้ความหนาแน่นฟิโตนที่แสงสีและแสงผสมมีความเข้มแสงที่น้อยกว่า 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ซึ่งจากงานวิจัยของ ฤทัยรัตน์ 2548 พบว่า ค่าความเข้มแสงที่ 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ เป็นค่าความหนาแน่นฟิโตนที่ต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่าย ดังนั้น LED COB จึงเหมาะสมที่จะให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กมากกว่า LED SMD 5050

2) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของฟิโตนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง

จากข้อมูลความหนาแน่นของฟิโตนการสังเคราะห์แสงและการใช้พลังงานของ LED 2 ชนิด ได้มีการหาประสิทธิภาพของฟิโตนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน ดังแสดงใน Table 1 ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 10-50 cm พบว่าประสิทธิภาพของฟิโตนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงต่อพลังงานของ

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



LED COB มีค่ามากกว่า LED SMD 5050 ทุกช่วงแสง ซึ่งหมายความว่า LED COB สามารถผลิตโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานที่เท่ากัน Zongyuan *et al.*, 2009 ได้รายงานถึงประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงต่อพลังงานของ LED Philips LUXEON rebel color จะอยู่ที่ 2-2.25 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ เป็นปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาเนื่องจาก ประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงหรือประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงซึ่งส่งผลต่อการผลิตชีวมวลและต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญ (Ward *et al.*, 2013)

Table 1 ประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน (PAR Efficiency)

Type	Power (W)	Lighting area (m ²)	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	PAR Efficiency ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$)
LED SMD 5050 Blue	50	0.36	57.06-84.66	0.41-0.61
LED SMD 5050 Red	50	0.36	26.65-43.90	0.19-0.31
LED SMD 5050 Blue&red	50	0.36	37.56-53.14	0.27-0.38
LED COB Blue	50	0.36	117.66-214.14	0.85-1.54
LED COB Red	50	0.36	41.08 -102.00	0.30-0.73
LED COB Blue&red	40	0.36	72.03-124.26	0.52-1.12

สรุป

จากการเปรียบเทียบความหนาแน่นโฟตอนสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของหลอด LED ทั้ง 2 ชนิดพบว่า LED COB ให้ความหนาแน่นโฟตอนทั้งแสงสีน้ำเงิน แดง และน้ำเงินผสมแดง มากที่สุด โดยที่ระยะห่าง 10 cm ได้ระดับความเข้มแสงเป็น 214.14, 102.03 และ 124.26 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ขณะที่ LED SMD ให้ความหนาแน่นโฟตอน ที่ระยะห่าง 10 cm คือ 84.66, 43.40 และ 53.14 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ในส่วนของประสิทธิภาพของโฟตอนที่ใช้ในงานสังเคราะห์แสงต่อพลังงาน (PAR efficiency) ของ LED ทั้งสองชนิดพบว่า LED COB แสงสีน้ำเงิน แดง และน้ำเงินผสมแดง มีค่า 1.54, 0.73 และ 1.12 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ ขณะที่ LED SMD มีค่าเป็น 0.61, 0.31 และ 0.38 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ ดังนั้น LED แบบ COB จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้แหล่งกำเนิดแสงในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เนื่องจากให้ความหนาแน่นโฟตอนและประสิทธิภาพ ที่ดีกว่าแบบ LED SMD 5050

คำขอขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ ในชุมชนสีเขียว ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนทุนวิจัยโครงการชุมชนต้นแบบเลี้ยงปลาอัจฉริยะสีเขียวเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล กรณีศึกษาชุมชนบ้านทุ่งยาว อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ภายใต้โครงการ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงาน

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



เอกสารอ้างอิง

- ฤทัยรัตน์ วิศาลสุวรรณกร. 2548. ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* โดย ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อเพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเทคโนโลยีชีวภาพมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P., Luo G., Campanaro S., Wenzel H. and Kougias P. 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*. 36(2): 452-466.
- Chae H. R., Chang H. K., Jang H. J., Gwi T. J. and Sung K. K. 2016. Effects of light-emitting diodes (LEDs) on the accumulation of lipid content using a two-phase culture process with three microalgae. *Bioresource Technology*. 212: 254–261.
- Chen Y. and Lee M. 2012. Double-power double-heterostructure lightemitting diodes in microalgae *Spirulina platensis* and *Nannochloropsis oculata*. *Journal of Marine Science and Technology*. 20(2): 233-236.
- Emeka G. N., David A. P., Damian W. L., Kamal A. and Navid R. M. 2019. Light management technologies for increasing algal photobioreactor efficiency. *Algal Research*. 39: 101433.
- Kula M., Rys M., Mozdzen K. and Skoczowski A. 2014. Metabolic activity the chemical composition of biomass and photosynthetic activity of *Chlorella vulgaris* under different light spectra in photobioreactors. *Eng Life Sci* 14(1):57–67.
- Masojidek J., Koblizek M. and Giuseppe T. 2013. Photosynthesis in Microalgae. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*, Second Edition. Edited by Amos Richmond and Qiang Hu.
- Schulze P. S. C., Barreira L. A., Pereira H. G. C., Perales J. A. and Varela J. C. S. 2014. Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. *Trends in Biotechnology*. 32 (8): 422-430.
- Ward B., Maria C., René H. W., Marcel J. 2013. Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Research*. 2: 333–340.
- Weiqi F., Olafur G., Adam M. F., Gisli H., Sigurdur B. and Bernhard Ø. P. 2012. Maximizing biomass productivity and cell density of *Chlorella vulgaris* by using light-emitting diode-based photobioreactor. *Journal of Biotechnology*. 161: 242–249.
- Zongyuan L., Sheng L., Kai W. and Xiaobing L., 2009. Status and prospects for phosphor-based white LED packaging. *Front. Optoelectron. China*. 2: 119–140.

บทความทางวิชาการฉบับที่ 2

- ชื่อผู้แต่ง: ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์
 ชวโรจน์ ใจสิน
 จุฑาภรณ์ ชนะถาวร
 ปุณยสิริ บุญเป็ง
 รจพรรณ นิรัฐศิลป์
- ชื่อบทความ: การศึกษาความเป็นไปได้ของเวนจูรีในระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับ
 ระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบวงปิด
 The feasibility study of a venturi in carbon dioxide feed system for a
 closed loop algae cultivation system
- ชื่อวารสาร: การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4 ด้านสารสนเทศ การเกษตร การ
 จัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี
 The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,
 Business administration, Engineering, Science and Technology
- เล่มที่: หน้าที่ 606-612, ระหว่างวันที่ 30 - 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมทินิติ@
 ระนอง อำเภอเมือง จังหวัดระนอง



การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ ๔

ด้านสารสนเทศ การเกษตร การจัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration,
Engineering, Sciences and Technology: IAMBEST 2019

เกียรติบัตรฉบับนี้ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

**ธัญวัฒน์ กลั่นควัฒน์ ชาวโรจน์ ใจสิน จุฑาภรณ์ ชนะถาวร
ปณยสิริ บุญเป็ง และ รจพรณ นีร์ญศิลป์**

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความวิจัย ภาคบรรยาย

เรื่อง “การศึกษความเป็นไปได้ของวงจรรวมในระบบเดิมที่ขาดการบอนด์เอาท์สำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบวงปิด”

วันที่ ๓๐ - ๓๑ พฤษภาคม ๒๕๖๒

ณ โรงแรมทีนิตี้ ระนอง อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

อธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



การศึกษาความเป็นไปได้ของเวนจูรีในระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
สำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบวงปิด

The Feasibility Study of a Venturi in Carbon Dioxide Feed System
for a Closed Loop Algae Cultivation System

ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์¹ ชาวโรจน์ ใจสิน¹ จุฑาภรณ์ ชนะถาวร¹ ปุณยสิริ บุญเป็ง² และจพรพรรณ นิรัญศิริ¹
Tanyawat Klancowat¹, Chawaroj Jaisin¹, Jutapom Chanathaworn¹, Poonyasiri Boonpeng² and Rotjapun Nirunsin¹

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่, ²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, ²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai
*Corresponding author: chawaroj@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว สำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. แบบท่อปฏิกรณ์แสง โดยมีภาควิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่ายที่ไหลผ่านเวนจูรีเป็นเวลา 1 hr ด้วยกล้องจุลทรรศน์และ Hemocytometer ขณะที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการไหลของน้ำถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสขนาด 1 HP ได้อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 6, 9, 12 และ 14 L/min และได้อัตราการไหลน้ำในระบบ 20, 24.5, 29 และ 33.9 L/min ตามลำดับ มีการใช้ปริมาณสาหร่าย 20 L จำนวนเซลล์เริ่มต้น $7.7 \times 10^6 \pm 0.1$ cell/mL พบว่าจำนวนเซลล์สาหร่ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวนจูรี ดังนั้นระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวนจูรีสามารถใช้ในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ โดยไม่มีผลทำให้จำนวนเซลล์สาหร่ายลดลงหรือหายไป อีกทั้งระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์สามารถปรับลดอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยที่สุด 0.1 L/min โดยที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่ายยังคงที่
คำสำคัญ: ระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวนจูรี, ระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบท่อปฏิกรณ์แสง, คลอเรลล่า เอสที

Abstract

This research aims to study a feasibility of a 1 inch venturi carbon dioxide feed system combined with an algae (*Chlorella* sp.) cultivation system on helical tubular photobioreactor. The algae cell density, flowed in the venturi carbon dioxide feed system is systematically investigated for one hour. The algae cells are inspected and counted by using a microscope and hemocytometer. The carbon dioxide flow rate and water flow rate are controlled by 1 HP three phase inverter for water pump. In addition, the carbon dioxide flow rate is changed to 6, 9, 12 and 14 L/min. leading to vary the water flow rate with 20, 24.5, 29 and 33.9 L/min respectively. In an experiment, the algae cell density is initially determined with $7.7 \times 10^6 \pm 0.1$ cells/mL. The experimental results found that the venturi system could feed the carbon dioxide gas into the algae cultivation without loss the algae cell density. Moreover, the venturi system could reduce the flow rate of carbon dioxide gas into minimum flow rate of 0.1 L/min through the cultivation system.

Keywords: venturi carbon dioxide feed system, helical tubular photobioreactor, *Chlorella* sp.

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



บทนำ

สาหร่าย *Chlorella sp.* เป็นสาหร่ายสีเขียวเซลล์เดียวมีความสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังสามารถเติบโตภายใต้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง 40% (Sakai et al., 1995) อีกทั้งได้มีการประยุกต์นำสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ โดยงานวิจัยของ Esther et al., 2017 สามารถเพิ่มสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพได้ถึง 94% มีประสิทธิภาพการลดคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้ 95% การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถเลี้ยงได้ทั้งระบบเปิด (Open system) และระบบปิดแบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์ (Closed photobioreactor) การเลี้ยงในระบบปิดแบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์นั้น จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบแสงเทียม และระบบเติมก๊าซหรืออากาศ ซึ่งระบบเติมก๊าซที่ใช้ในงานวิจัยของสาหร่ายขนาดเล็ก เช่น งานวิจัยของ กฤษณ์, 2557 ใช้เครื่องสูบลมชนิดสูญญากาศ ยี่ห้อ VENZ Model ปริมาตรการไหลสูงสุด 50 L/min งานวิจัยของ Briassoulis et al., 2010 ใช้ปั๊มลมที่มีอัตราการไหล 120 L/min งานวิจัยของ Li-Hai et al., 2008 ได้ใช้คอมเพรสเซอร์ให้การจ่ายก๊าซ งานวิจัยของ ครรชิต และคณะ 2559 ใช้ Peristaltic pump ในการดูดจ่ายปริมาณก๊าซชีวภาพ หรืองานวิจัยของ ฤทัยรัตน์, 2548 ใช้แรงดันในถังก๊าซผสมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศจ่ายเข้าในระบบเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาฯ ยังไม่มีการนำระบบเติมอากาศแบบเวนจูร์มาใช้ในระบบการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งจากเอกสารเผยแพร่ของ “โครงการส่งเสริมและเผยแพร่เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน Display Center และบ้านประหยัดพลังงาน” ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้กล่าวว่า ระบบเติมอากาศแบบเวนจูร์เป็นระบบเติมอากาศประสิทธิภาพสูงที่สามารถใช้ได้กับกระบวนการเติมอากาศและการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม การทำงานของระบบเติมอากาศแบบเวนจูร์ทำงานโดยอาศัยเครื่องสูบน้ำชนิดน้ำผ่านหัวพ่นเวนจูร์ที่มีรูปร่างเป็นคอขวดเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำจนกระทั่งเกิดแรงดูดอากาศลงมาผสมกับน้ำทำให้เกิดการถ่ายเทก๊าซลงไปใต้น้ำ

งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของเวนจูร์ในระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นทางเลือกของระบบเติมก๊าซหรืออากาศสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก โดยการวัดจำนวนเซลล์สาหร่ายก่อนเข้าและหลังเข้าระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวนจูร์ ที่อัตราการไหลต่างๆ และความสัมพันธ์อัตราการไหลของก๊าซกับอัตราการไหลน้ำสาหร่าย

วิธีการศึกษา

1. การเตรียมและการเพิ่มปริมาณสาหร่าย *Chlorella sp.*

นำสาหร่าย *Chlorella sp.* จากสาขาวิชาการประมง คณะมหาวิทยาลัยแม่โจ้ – ชุมพร ดังแสดงใน Figure 1 มาเพาะเลี้ยงในขวดปริมาตร 5 L จำนวน 20 ขวด โดยให้สารอาหาร ดังนี้ ยูเรีย (46-0-0) 0.2 g/L ปุ๋ยนา (16-20-0) 0.1 g/L ไร่ 0.33 g/L ปุ๋ยขาว 0.06 g/L เติบโตอากาศ 24 hr ใช้แสงอาทิตย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังแสดงใน Figure 2

2. การเตรียมอุปกรณ์และการทดลอง

การเตรียมอุปกรณ์ชุดการทดลอง ดังแสดงใน Figure 3 ใช้ระบบหมุนวนน้ำสาหร่ายโดยใช้ ปั๊มน้ำขนาด 1 นิ้ว กำลัง 1 แรงม้า 3 เฟส ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ มีระบบเติมก๊าซใช้เวนจูร์ขนาด 1 นิ้ว ยี่ห้อ Superproduct เข้ากับระบบท่อปฏิกรณ์แสง (Helical tubular photobioreactor) ที่ใช้สายยางใส PVC ขนาด 2 inches ยาว 38 m ขดพันรอบโครงสร้างเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 m 20 รอบ ให้เป็นเกลียวขึ้นเป็นรูปทรงระบอก สูง 0.8 m ในการทดลองจะใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงปริมาณ 20 L ทำการกรองสิ่งปนเปื้อนโดยใช้ผ้ากรองไนลอน ขนาดความละเอียด 20 µm ให้มีความเข้มข้นของสาหร่าย

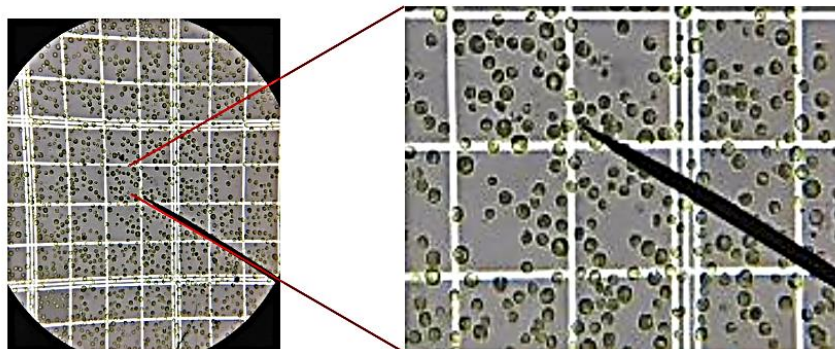
การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



ก่อนการทดลองอยู่ที่ $7.7 \times 10^6 \pm 0.1$ cells/mL โดยการแต่ละการทดลองจะใช้เวลา 1 hr ที่แรงดันแกจ 0.5 1 1.5 และ 2 บาร์

Figure 1 ลักษณะสาหร่าย *Chlorella* sp.Figure 2 การเตรียมสาหร่าย *Chlorella* sp.

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่าย อัตราการไหลก๊าซ อัตราการไหลน้ำสาหร่าย และแรงดันน้ำสาหร่าย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

-วิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่าย *Chlorella* sp. ก่อนและหลังจากเดินระบบทดลอง 1 hr โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nuvotech E306 และ Hemocytometer ยี่ห้อ HBG ในการนับจำนวนเซลล์สาหร่าย

-วิเคราะห์อัตราการไหลก๊าซของระบบเวเนจัวร์ โดยใช้ Rotameter ยี่ห้อ Cheng xin LZM ความละเอียดในการวัด 0.1-1 L/min และ 2-20 L/min

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



-วิเคราะห์อัตราการไหลน้ำสาหร่ายโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของเหลวแบบดิจิตอล ยี่ห้อ DN25 BSPT1

-วิเคราะห์แรงดันน้ำสาหร่ายก่อนเข้าระบบเวนจูรี โดยใช้ เกจวัดแรงดันแบบน้ำมัน ยี่ห้อ Super products

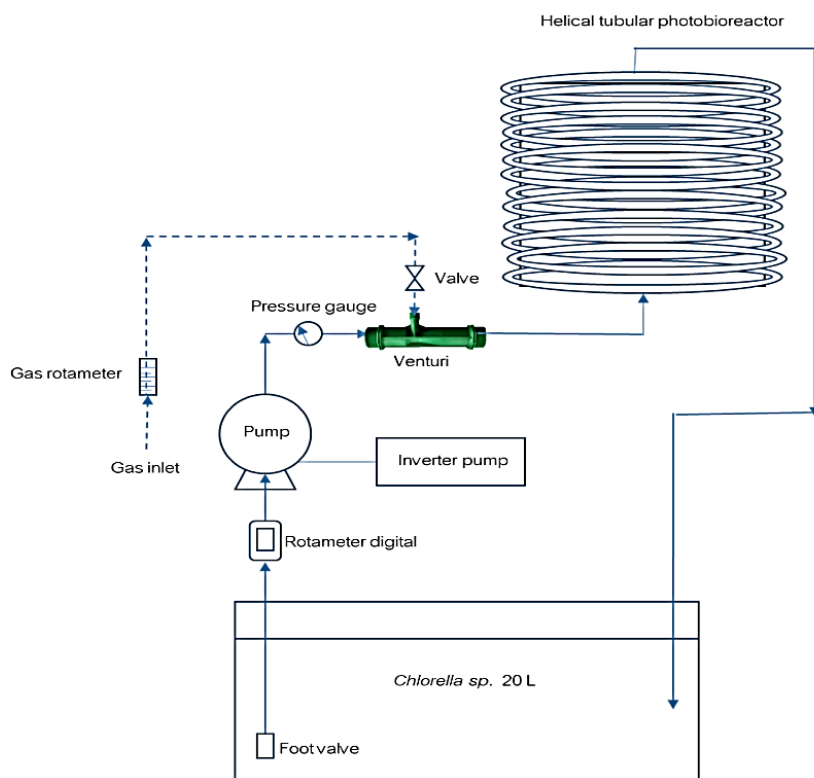


Figure 3 ชุดการทดลองระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวนจูรี

ผลการศึกษาและการวิจารณ์

1. ผลการศึกษาจำนวนเซลล์สาหร่าย *Chlorella sp.* ก่อนและหลังจากเดินระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวนจูรีได้ อัตราการไหลก๊าซของระบบเวนจูรี อัตราการไหลน้ำสาหร่ายและแรงดันน้ำสาหร่ายก่อนเข้าระบบเวนจูรี มีรายละเอียดดังแสดงใน Table 1

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



Table 1 ผลการศึกษากระบวนการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวเนจรี

Gas flow rate (L/min)	Algae flow rate (L/min)	Pressure (bar)	Initial cell density ($\times 10^6$ cells/mL)	After cell density ($\times 10^6$ cells/mL)
6	20	0.5	7.6-7.8	7.5-7.7
9	24.5	1	7.6-7.8	7.65-7.75
12	29	1.5	7.6-7.8	7.7-7.8
14	33.9	2	7.6-7.8	7.65-7.8

2. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ของเวเนจรีในระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่าย

1) วิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่าย *Chlorella sp.* หลังผ่านระบบเติมก๊าซด้วยเวเนจรี

จาก Table 1 เซลล์สาหร่ายก่อนการทดลองที่ทำการเตรียมไว้มีจำนวน $7.6-7.8 \times 10^6$ cells/mL ซึ่งหลังจากนำมาผ่านระบบเติมก๊าซด้วยเวเนจรีจะเห็นได้ว่าทั้ง 4 การทดลองจำนวนเซลล์สาหร่ายที่ทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ ร่วมกับ Hemocytometer ผลที่ได้จากการนับจะอยู่ที่ช่วงระหว่าง $7.5-7.8 \times 10^6$ cells/mL ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันกับจำนวนเซลล์สาหร่ายก่อนการทดลอง ดังนั้นระบบเติมก๊าซด้วยเวเนจรีไม่มีผลต่อเซลล์สาหร่าย เนื่องจากไม่ทำให้เกิดการแตกของผนังเซลล์จึงทำให้จำนวนสาหร่ายไม่ลดลงหรือหายไป ซึ่งมีงานวิจัยของ Maria *et al.*, 2014 พบว่าผนังเซลล์สาหร่ายแตกในช่วงแรงดัน 500-1,700 bar แต่งานวิจัยนี้ใช้แรงดันในระบบเพียง 0.5-2 bar จึงไม่ทำให้เกิดการลดลงของจำนวนเซลล์สาหร่าย

2) วิเคราะห์อัตราการไหลน้ำสาหร่าย อัตราการไหลก๊าซของระบบเวเนจรี และแรงดันน้ำสาหร่ายก่อนเข้าระบบเวเนจรี

จากการทดสอบระบบเติมก๊าซด้วยเวเนจรี พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลน้ำสาหร่าย จะทำให้อัตราการไหลก๊าซและแรงดันของระบบเวเนจรีเพิ่มขึ้น เป็นไปตามหลักการทำงานของท่อเวเนจรี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) โดยอัตราการไหลก่อนถึงคอคอดของท่อเวเนจรีจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลที่คอคอด แต่จะมีแรงดันที่มากกว่าในส่วนคอคอด ซึ่งส่วนบริเวณคอคอดจะมีแรงดันที่ต่ำกว่าจะเกิดแรงดูดก๊าซลงมาผสมกับน้ำซึ่งความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำสาหร่ายกับอัตราการไหลก๊าซและแรงดันน้ำสาหร่ายก่อนเข้าระบบเวเนจรีจะดังแสดง Figure 4 และเมื่อทำการปรับลดวาล์วของทางฝั่งท่อดูดก๊าซของเวเนจรี ทำให้พบว่า สามารถลดอัตราการไหลของก๊าซได้น้อยสุดที่ 0.1 L/min และอัตราการไหลของน้ำสาหร่ายไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงใน Table 2 การอัตราการไหลของก๊าซของระบบเวเนจรีได้จะเป็นผลดีต่อการนำไปใช้ประยุกต์ในการเลี้ยงสาหร่าย เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซมีผลต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย ซึ่งมีงานวิจัยของ ครรชิต และคณะ 2559 ได้รายงานถึงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพในการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ที่ 0.05 0.1 และ 0.15 L/min มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบก๊าซชีวภาพได้ถึง $97.48 \pm 0.31\%$ $95.68 \pm 1.43\%$ และ $93.96 \pm 0.95\%$ ตามลำดับ

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology

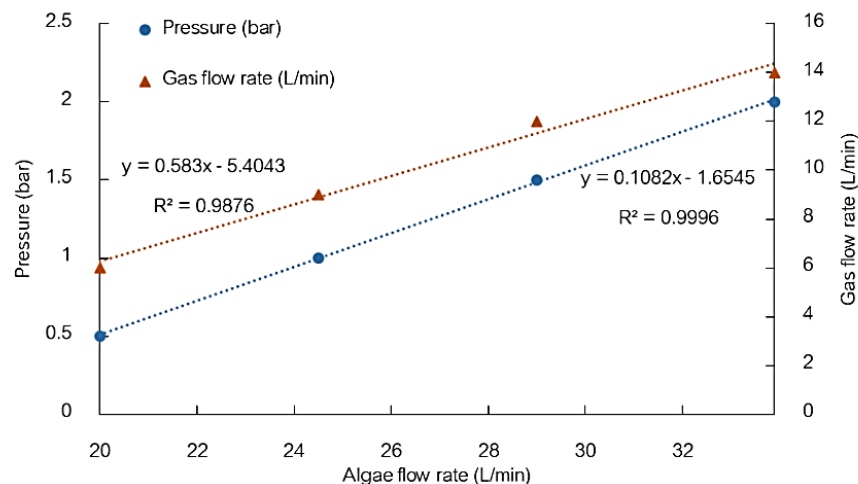


Figure 4 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำสาหร่ายกับอัตราการไหลก๊าซของเวโนจรี

Table 2 อัตราการไหลของก๊าซทางฝั่งท่อดูดก๊าซของเวโนจรี

Algae flow rate (L/min)	Gas flow rate (L/min)
20	0.1-6
24.5	0.1-9
29	0.1-12
33.9	0.1-14

สรุป

การใช้ระบบเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวโนจรี ขนาด 1 นิ้ว สำหรับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* แบบทอปฏิกรณ์แสง พบว่าจำนวนเซลล์สาหร่ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเวโนจรี ได้อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 6 9 12 และ 14 L/min และได้อัตราการไหลน้ำในระบบ 20 24.5 29 และ 33.9 L/min ดังนั้นระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวโนจรีสามารถใช้ในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ โดยไม่มีผลทำให้จำนวนเซลล์สาหร่ายลดลงหรือหายไป อีกทั้งระบบเติมคาร์บอนไดออกไซด์สามารถปรับลดอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อย 0.1 L/min โดยที่อัตราการไหลของน้ำสาหร่ายยังคงที่

คำขอขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ ในชุมชนสีเขียว ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนทุนวิจัยโครงการชุมชนต้นแบบเลี้ยงปลาอัจฉริยะสีเขียวเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล กรณีศึกษาชุมชนบ้านทุ่งยาว

การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4

The 4th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,

Business administration, Engineering, Science and Technology



อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การสนับสนุน
ทุนการศึกษาภายใต้โครงการ"โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่ม
ประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา" ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารเผยแพร่ "โครงการส่งเสริมและเผยแพร่
เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน Display Center และบ้านประหยัดพลังงาน" ภาคอุตสาหกรรม
หมวดที่ 11 : ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี (Venturi Aeration). กระทรวงพลังงาน.
[http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay%2037%20Venturi%20Aeration.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay%2037%20Venturi%20Aeration.pdf) (1 มกราคม 2562).
- กฤษณ์ สิริกุลรัตน์. 2557. การจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ *Chlorella sp.* ในถังโฟ
โตไบโอรีแอคเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ครรชิต เงินคำคง, นิธิวัฒน์ จารุญรัตน์, สิทธิศักดิ์ แก้วหนัก, กฤษณฉัตร เมืองใจ และนิตยา ตันติวา. 2559.
ประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2559. หน้า 51-58.
- ฤทัยรัตน์ วิศาลสุวรรณกร. 2548. กวาะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.*
โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อเพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพแสง.
วิทยานิพนธ์ปริญญาเทคโนโลยีชีวภาพมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
กรุงเทพมหานคร.
- Briassoulis D., Panagakis P., Chionidis M., Tzenos D., Lalos A., Tsinos C., Berberidis K. and
Jacobsen A. 2010. An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous
production of *Nannochloropsis sp.* *Bioresource Technology*, 101(17): 6768-6777.
- Li-Hai F., Ya-Tao Z., Lin Z. and Huan-Lin C. 2008. Evaluation of a membrane-sparged helical
tubular photobioreactor for carbon dioxide biofixation by *Chlorella vulgaris*. *Journal of
Membrane Science* 325: 336-345.
- María J. J. C., Alfonso R. M., María D. M. S., Estrella H. P., Luis E. C., Pedro A. G. M. and Emilio
M. G. 2014. Extraction of saponifiable lipids from wet microalgal biomass for biodiesel
production. *Bioresource Technology* 169:198-205
- Posadas E., Marín D., Blanco S., Lebrero R. and Muñoz R. 2017. Simultaneous biogas
upgrading and centrate treatment in an outdoors pilot scale high rate algal pond.
Bioresource Technology, 232: (133-141).
- Sakai N., Sakamoto Y., Kishimoto N., Chihara M. and Karube I. 1995. *Chlorella* strains from hot
springs tolerant to high temperature and high CO₂. *Energy Conversion and
Management*, 36(6): 693-696.

บทความทางวิชาการฉบับที่ 3

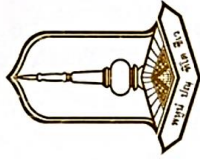
ชื่อผู้แต่ง: ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์
ชวโรจน์ ใจสิน
จุฑาภรณ์ ชนะถาวร
บุญยสิริ บุญเป็ง
รจพรรณ นิรัฐศิลป์

ชื่อบทความ: การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงแอลอีดี

Biogas Quality Improvement with *Chlorella sp.* in Helical Tubular Photobioreactor in LED Light

ชื่อวารสาร: การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 15 ภายใต้ชื่อ ก้าวสู่การพัฒนาชุมชนที่ยั่งยืนโดยบูรณาการงานวิจัยพื้นฐานและงานวิจัยประยุกต์ "Toward Sustainable Community Development by Integrating Basic and Applied Researches"

เล่มที่: หน้าที่ 153 ระหว่างวันที่ 5-6 กันยายน พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมสยามธารา พาเลซ จังหวัดมหาสารคาม



มหาวิทยาลัยมหาดไทย

ประธานคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ
มอบเกียรติบัตรฉบับนี้ เพื่อแสดงว่า

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่าย *Chlorella* sp.
ในระบบไบโไฟโตโอะรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงแอลอีดี

โดย

ธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์

เป็นผลงานที่ได้รับการคัดเลือกให้นำเสนอ ภาคบรรยาย สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ในการประชุมทางวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาดไทย ๑๕๖ ปี” ครั้งที่ ๑๕
วันที่ ๕ - ๖ เดือน กันยายน พุทธศักราช ๒๕๖๒ ณ โรงแรมสยามราพาลาเลซ จังหวัดมหาสารคาม

(รองศาสตราจารย์ประยุทธ์ ศรีวิไล)

ผู้รักษาราชการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงแอลอีดี

Biogas Quality Improvement with *Chlorella sp.* in Helical Tubular Photobioreactor in LED Light

ธัญวัฒน์ กลั่นสุวรรณ,² ชวโรจน์ ใจสิน,^{1*} จุฑาภรณ์ ชนะถาวร,¹ ปุณยสิริ บุญเป็ง³, รจพรรณ นีรัญศิลป์¹
Tanyawat Klancoowat,² Chawaroj Jaisin,^{1*} Jutaporn Chanathaworn,¹ Poonyasiri Boonpeng³
Rotjapun Nirunsin¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่าย *Chlorella sp.* 200 L ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงแอลอีดี 2 สี ได้แก่ สีแดง และสีน้ำเงิน ทำการเปิด 24 hr ที่อัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 20 L/min และอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพเข้าระบบที่ 0.1 L/min เป็นเวลา 12 hr สลับการเติมอากาศ 6 L/min เป็นเวลา 12 hr ตลอดระยะเวลา 7 วัน พบว่าแสงที่มีความเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่าย *Chlorella sp.* ในระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขดภายใต้แสงแอลอีดี คือ แสงสีแดง ซึ่งให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 0.519 day⁻¹ ประสิทธิภาพการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 19.02 % และประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 58.27%

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ, คลอเวลล่า เอสพี, ระบบโฟโตไบโอรีแอกเตอร์แบบท่อขด, แสงแอลอีดี

Abstract

The aim of the research is to improve the biogas quality with *Chlorella sp.* 200 L cultivated in a helical tubular photobioreactor under the two LED light types (red and blue colors) supporting 24 hours. The water flow rate with 20 L/min and the biogas rate with 0.1 L/min, provided 12 hours and alternated 12 hours with filling air of 6 L/min, are determined as the experimental conditions. The experimental results using 7 days for experimental procedure show that the red LED light used for *Chlorella sp.* cultivation is appropriate for biogas quality improvement leading to the highest specific growth rate of 0.519 day⁻¹. Moreover, the results display the efficiency of increased methane content with 19.02 % and the efficiency of removed carbon dioxide with 58.27%.

Keywords: biogas quality improvement, *chlorella sp.*, helical tubular photobioreactor, LED light

¹ อาจารย์ ² นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹ Lecturer, ² Graduate students, School of Renewable Energy, Maejo University

³ Lecturer Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding author: Chawaroj Jaisin, School of Renewable Energy, Maejo University. Email: chawaroj@mju.ac.th

ผลงานนี้จะถูกตีพิมพ์เรื่องเต็มในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายธัญวัฒน์ กลั่นคูวัฒน์
เกิดเมื่อ 28 กันยายน 2537
ประวัติการศึกษา 2560 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน -

