

## การพัฒนาอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* สำหรับอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

ภาณุวัชร ยาดี, วรวิทย์ภัทร พิมพ์เลิศ, กันตพัฒน์ เสี่ยมศักดิ์, และ สมฤทัย หอมชื่น\*

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

\*Corresponding author: somruthai.kae@mwit.ac.th

### บทคัดย่อ

ในอนาคต แหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วนต่อความยั่งยืนของโลก งานวิจัยนี้จึงศึกษาแหล่งพลังงานทางเลือกสำหรับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมและจัดการพลังงาน สาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* มีความสามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและถ่ายโอนผ่านอิเล็กโทรดในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อีกทั้งยังพบได้ง่ายและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย คณะผู้วิจัยจึงพัฒนาเซลล์ไฟฟ้าชีวภาพโดยใช้สาหร่ายดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยहेลิกซ์เคลือบสาหร่ายในสารละลาย Alginate และแท่งแกรไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดภายในแอมเบออร์เดียวกัน จากการทดลองได้ดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าระหว่างการเลี้ยงใน TAP medium และการตรึงเซลล์ด้วย Sodium Alginate ภายใต้สภาวะแสงที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 42.37 ไมโครแอมแปร์ ภายใต้ความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม โดยการตรึงเซลล์ด้วย Sodium Alginate ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าการเลี้ยงใน TAP medium อย่างมีนัยสำคัญตลอดช่วงการทดลอง ทั้งในด้านค่ากระแสเฉลี่ยที่สูงกว่าประมาณ 2–2.5 เท่า เสถียรภาพของกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่า และความสามารถในการฟื้นตัวของกระแสไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วภายหลังช่วงงดแสง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการตรึงเซลล์เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและยกระดับสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสะท้อนถึงศักยภาพของ *Chlorella vulgaris* ในการพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกสำหรับอุปกรณ์ IoT และระบบพลังงานที่มุ่งสู่ความยั่งยืนในอนาคต

**คำสำคัญ:** สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก / พลังงานไฟฟ้าชีวภาพ / การถ่ายโอนอิเล็กตรอน / อุปกรณ์ IoT / เซลล์ชีวภาพผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานแสง

## Development of an electricity-generating device using photosynthesis of green algae *Chlorella vulgaris* for IoT applications toward environmental sustainability

Panuwatch Yadee, Warithphat Pimlert, Kantapat Sangiamsak, and Somruthai Homcheun\*

Mahidol Wittayanusorn School, Phutthamonthon, Nakhon Pathom, Thailand

\*Corresponding author: somruthai.kae@mwit.ac.th

### Abstract

This article presents the urgent need for environmentally friendly energy sources to ensure global sustainability in the future. Therefore, this research investigates an alternative energy source for Internet of Things (IoT) technology, which enhances the efficiency of energy control and management and plays a significant role in promoting sustainability in both energy and environmental aspects. The green microalgae *Chlorella vulgaris* has the ability to release excess electrons outside the cell and transfer them through electrodes during the photosystem process. Moreover, it is easily obtainable and highly tolerant to diverse environmental conditions. Consequently, a bioelectricity generation system based on *Chlorella vulgaris* was developed, and various factors affecting electrical energy production were investigated. The developed bio-photovoltaic cell consisted of steel fibers coated with green algae embedded in an alginate solution, with graphite rods serving as electrodes within a single chamber. The experimental work focused on comparing electrical current generation between algae cultivated in TAP medium and those immobilized with sodium alginate under varying light conditions. The results showed that the system achieved a maximum current output of 42.37  $\mu\text{A}$  under a resistance of 10 k $\Omega$ . The immobilized cell system exhibited significantly higher current production than the TAP medium system throughout the experiment, with an average increase of approximately 2–2.5 times. Furthermore, the immobilized system demonstrated superior current stability and a rapid recovery of current following dark conditions. These findings indicate that cell immobilization is a key factor in enhancing electron transfer efficiency and improving electrical performance in bio-photovoltaic systems. Moreover, the results highlight the potential of *Chlorella vulgaris* as a sustainable alternative energy source for IoT devices and future energy systems.

**Keywords:** Microalgae / Bioelectricity / Electron Transfer / IoT Devices / Bio-photovoltaic Cell

## 1. บทนำ

ปัจจุบันสาหร่ายสีเขียวได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะจุลชีพสังเคราะห์ด้วยแสงที่มีศักยภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถผลิตออกซิเจน ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และสร้างสารชีวโมเลกุลหลากหลายชนิดจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ไบโอดีเซลและไบโอเอทานอล [1] การผลิตพลาสติกชีวภาพประเภท PHA ตลอดจนการบำบัดน้ำเสีย และฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม สะท้อนบทบาทสำคัญทั้งในระบบนิเวศและการพัฒนาเทคโนโลยีสะอาดเพื่อความยั่งยืน [2], [3] หนึ่งในสายพันธุ์ที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางคือ *Chlorella vulgaris* ซึ่งเป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยวที่เจริญเติบโตเร็วและปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย จึงถูกใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษาการสังเคราะห์ด้วยแสงและการตรึงคาร์บอน อีกทั้งยังมีศักยภาพด้านชีววิศวกรรมสังเคราะห์ในการผลิตสารชีวโมเลกุลมูลค่าสูง และสามารถดูดซับสารอาหารรวมถึงโลหะหนักจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4], [5] นอกจากนี้ *Chlorella vulgaris* ยังสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงผ่านระบบ Photosystem II และ Photosystem I ออกสู่ภายนอกเซลล์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรด [6], [7] หลักการดังกล่าวเป็นพื้นฐานของเทคโนโลยี Bio-Photovoltaic (BPV) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่านสิ่งมีชีวิตสังเคราะห์ด้วยแสง [8], [9] แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสาหร่ายชนิดนี้ในการพัฒนาแหล่งพลังงานชีวภาพและอุปกรณ์พลังงานต่ำในอนาคต

## 2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella vulgaris*
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของ *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP (Tri-Acetate-Phosphate) medium และที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate
3. เพื่อสร้างต้นแบบ Prototype ของระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (Bio-Photovoltaic; BPV) สำหรับอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

## 3. ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* โดยเฉพาะเลี้ยงในอาหารสาหร่ายสูตร TAP medium

## 4. วิธีการศึกษา

### 4.1 การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

#### 4.1.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับปฏิบัติการในตู้ปลอดเชื้อ Laminar Air Flow

นำอุปกรณ์ที่ใช้ในตู้ปลอดเชื้อไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที และฉีดแอลกอฮอล์เพื่อฆ่าเชื้อก่อนนำอุปกรณ์เข้าตู้ปลอดเชื้อ

#### 4.1.2 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

เตรียมอาหารเพาะเลี้ยงสาหร่ายสูตร TAP (Tri-Acetate-Phosphate) medium คัดแยกสาหร่ายขนาดเล็กให้แยกเป็นโคโลนีเดี่ยว ด้วยวิธีการ Streak plate และนำโคโลนีเดี่ยวของสาหร่ายขนาดเล็กใส่ลงในอาหารเหลว เพื่อทำเป็นหัวเชื้อสาหร่าย

#### 4.1.3 การเตรียมขวดเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

1) ปิเปตหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็ก ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดเพาะเลี้ยงที่มีอาหารสาหร่ายแบบเหลวปริมาตร 150 มิลลิลิตร

2) นำขวดเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กวางบนเครื่องเขย่าแบบสริง (Shaker sling) โดยเพาะเลี้ยงในระบบปิด โดยควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมือนกัน ดังนี้

- แสง : ให้แสงสว่างตลอดเวลา ด้วยหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์
- อุณหภูมิ : รักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส ตลอดเวลา
- การเขย่า : รักษาอัตราการเขย่าให้คงที่ โดยเขย่าตลอดเวลาบนเครื่อง

#### 4.1.4 การติดตามและวัดผลอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

เก็บผลอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก ทุกวัน ในช่วง 15 วัน ดังนี้

- 1) จำนวนเซลล์ : นับจำนวนเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยใช้อุปกรณ์ Hemacytometer
- 2) ความหนาแน่นเชิงแสง : วัดค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายขนาดเล็กที่ค่าความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

#### 4.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

พล็อตค่าจำนวนเซลล์และค่าความหนาแน่นเชิงแสง (Optical density) เทียบกับเวลา (หน่วย : วัน) สำหรับทั้ง *Chlorella vulgaris* เปรียบเทียบความชันที่ได้จากกราฟ เพื่อวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก และเปรียบเทียบเวลาที่สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กแต่ละสายพันธุ์เข้าสู่ Mid-Log phase โดยวิเคราะห์จากกราฟการเจริญเติบโต

### 4.2 การศึกษาปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของ *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP (Tris-Acetate-Phosphate) medium

#### 4.2.1 การคัดเลือกและเตรียมสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella vulgaris*

- 1) คัดเลือกสาหร่ายขนาดเล็กที่อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตแบบ Mid-log phase จากการทดลอง ซึ่งเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium ปริมาตร 125 มิลลิลิตร จำนวน 4 ขวด
- 2) นำสาหร่ายที่ได้เข้าสู่กระบวนการโซนิเคชัน (Sonication) เป็นเวลา 2 นาที โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค เพื่อช่วยให้เซลล์สาหร่ายเกิดการกระจายตัว จากนั้นนำสาหร่ายที่ผ่านการโซนิเคชันบรรจุลงในขวดเพาะเลี้ยง ซึ่งใช้เป็นระบบปฏิบัติการ (Chamber) ของระบบ Bio-photovoltaic cell

#### 4.2.2 การเตรียม Bio-photovoltaic cell

การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด

- 1) แอนโอด : ตัดเส้นใยเหล็ก (Steel wool) ขนาด 3.5 × 5.0 เซนติเมตร และชั่ง ให้มีมวลรวมประมาณ 0.5 กรัม
- 2) แคโทด : ใช้แท่งคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และความยาว 7 เซนติเมตร

### 4.3 การศึกษาปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของ *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate

#### 4.3.1 การเตรียมสารละลายสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ในสารละลาย Sodium Alginate

- 1) ใช้สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ที่อยู่ในระยะการเจริญเติบโตแบบ Mid-Log phase ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 4.1 โดยเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium ปริมาตร 125 มิลลิลิตร จำนวน 1 ขวด
- 2) แบ่งสารแขวนลอยของสาหร่ายปริมาตร 125 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองจำนวน 5 หลอด จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 นาที เทสารละลายส่วนใสด้านบนออก และล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่อง Vortex mixer เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที ก่อนนำไปปั่นเหวี่ยงซ้ำ โดยทำขั้นตอน

ดังกล่าวจนครบ 3 รอบ จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนลงในแต่ละหลอดจนมีปริมาตรสุดท้าย 12.5 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่อง Vortex mixer จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3) เตรียมสารละลาย Sodium Alginate ความเข้มข้น 2% w/v ปริมาตร 125 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Magnetic stirrer และปล่อยให้สารละลายเย็นลง

4) นำสารละลายสาหร่ายที่เตรียมไว้ผสมกับสารละลาย Sodium Alginate โดยการคนด้วยแท่งแก้วจนได้สารละลายที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) ความเข้มข้น 2% w/v ปริมาตร 300 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในขั้นตอนการทำให้ Alginate เกิดการจับตัว

#### 4.3.2 การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยสาหร่ายสีเขียวใน Alginate

1) แอนโนด : ตัดเส้นใยเหล็ก (Steel wool) ให้มีขนาด 3.5 x 5.0 เซนติเมตร และชั่งให้มีมวลรวมประมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) แล้วเทสารละลายสาหร่ายใน Alginate ที่ได้จากปริมาตร 20 มิลลิลิตรลงบนเส้นใยเหล็ก เพื่อให้สารละลายหุ้มเส้นใยเหล็กทั้งหมด จากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ลงในพิมพ์ เพื่อให้ Alginate เกิดการจับตัว เป็นระยะเวลา 20 นาที หลังจากนั้นนำแอนโนดที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน

2) แคโทด : ใช้แท่งคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และมีความยาว 7 เซนติเมตร

#### 4.3.3 การติดตั้ง Bio-photovoltaic cell

1) เชื่อมต่ออิเล็กโทรดโดยใช้คลิปหนีบสายไฟปากจระเข้ จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดฝั่งแอนโนดลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium จนมีระดับบริเวณใกล้กับภาชนะ ส่วนอิเล็กโทรดฝั่งแคโทดจุ่มปลายแท่งคาร์บอนลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium ประมาณ 3 เซนติเมตร

2) นำสายไฟจากขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วต่อผ่านตัวต้านทานค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์มในลักษณะการต่อแบบอนุกรม โดยติดตั้งและเชื่อมต่อบนบอร์ดวงจร

#### 4.3.4 การติดตามและวัดผลกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

1) ทำการวัดค่าทางไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้การควบคุมสภาวะแสงแบบเป็นคาบ (light-dark cycle) โดยให้แสงความเข้ม 1,000 ลักซ์ เป็นเวลา 30 นาที ปิดแสงเป็นเวลา 30 นาที และเปิดแสงอีก 30 นาที เมื่อครบหนึ่งรอบการให้แสง ทำการพักระบบ (rest period) เป็นเวลา 10 นาที ก่อนทำการวัดซ้ำในลักษณะเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง

2) ค่ากระแสไฟฟ้า ( $\mu\text{A}$ ): วัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้มัลติมิเตอร์ต่อแบบอนุกรมร่วมกับตัวต้านทานค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์มซึ่งติดตั้งบนบอร์ดวงจร และบันทึกค่าที่ได้ตามช่วงเวลาที่กำหนด

3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V): วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้หัววัดศักย์ไฟฟ้า (potential probe) และบันทึกข้อมูลภายใต้สภาวะการให้แสงและการปิดแสงเดียวกันเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบต่อไป

4.3.5 การสร้างต้นแบบ Prototype ของระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (Bio-photovoltaic; BPV) สำหรับอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

ใช้ขั้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร เป็นภาชนะในการบรรจุ Bio-photovoltaic cell โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP (Tris-Acetate-Phosphate) medium เป็นตัวกลาง ติดตั้งขั้วแอนโนดและแคโทดที่ได้จากตอนที่ 4.3 และติดตั้งสายยางที่มีวาล์วกันสำหรับปล่อยออกซิเจนที่ได้รับจากการสังเคราะห์ด้วยแสง

## 5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

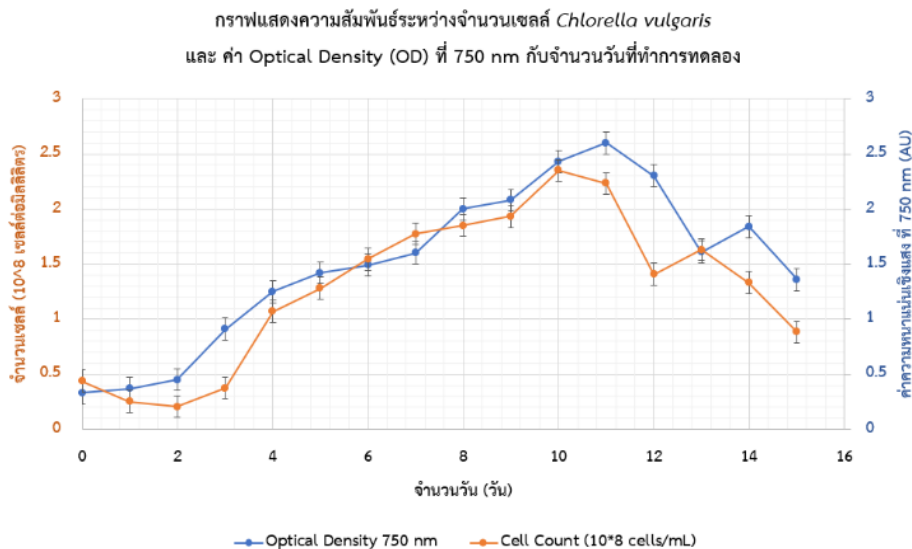
### 5.1 การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

#### 5.1.1 จำนวนเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella vulgaris* (รูปที่ 1) ตลอดระยะเวลา 15 วัน โดยเริ่มจากระยะปรับตัว (Lag phase) ในวันที่ 0 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย  $0.44 \times 10^8$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเข้าสู่ระยะการเจริญแบบทวีคูณ (Exponential phase) ในช่วงวันที่ 4 และมีช่วง Mid-log phase ประมาณวันที่ 6-7 จากนั้นจำนวนเซลล์เพิ่มสูงสุดในวันที่ 10 ที่  $2.35 \times 10^8$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร และเริ่มลดลงเหลือ  $2.23 \times 10^8$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในวันถัดไป บ่งชี้การเข้าสู่ระยะสมดุล (Stationary phase) อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของสารอาหารและปัจจัยแวดล้อมภายในระบบเพาะเลี้ยงส่งผลให้อัตราการเพิ่มจำนวนเซลล์ลดลงเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้านี้

### 5.1.2 ความหนาแน่นเชิงแสง (Optical Density) ของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงแสง (Optical Density; OD) ของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดความหนาแน่นของชีวมวลในระบบเพาะเลี้ยง (รูปที่ 1) แสดงให้เห็นรูปแบบการเจริญเติบโตที่สอดคล้องกับเส้นโค้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยในวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ย 0.33 สะท้อนระยะปรับตัว (Lag phase) และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.45 ในวันที่ 2 ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 0.91 ในวันที่ 3 แสดงถึงการเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตแบบทวีคูณ (Exponential phase) ซึ่งมีการแบ่งเซลล์อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า OD ดำเนินต่อเนื่องจนถึงค่าสูงสุดในวันที่ 11 ที่ 2.60 หลังจากนั้นในวันที่ 12 ค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 2.30 บ่งชี้ถึงการชะลอตัวของการสะสมชีวมวลและการเข้าสู่ระยะสมดุล (Stationary phase) อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของสารอาหารและปัจจัยแวดล้อมภายในระบบเพาะเลี้ยง



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ *Chlorella vulgaris* และค่า Optical Density (OD) ที่ 750 nm กับจำนวนวันที่ทดลอง

### 5.1.3 การเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตระหว่างการนับจำนวนเซลล์สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กกับการหาความหนาแน่นเชิงแสง (Optical Density; OD) ของ สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

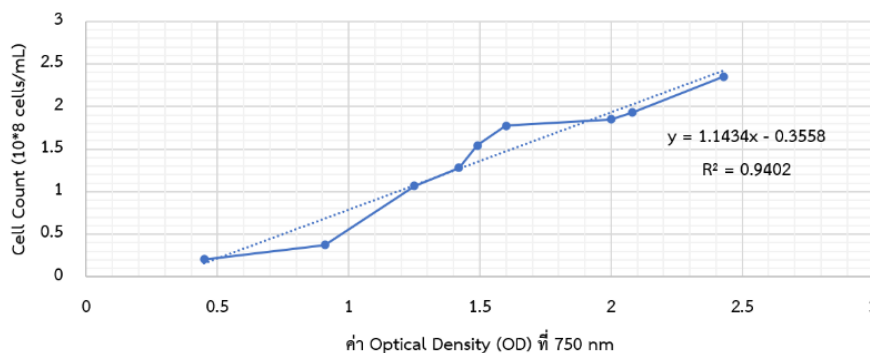
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย รูปที่ 1 โดยเปรียบเทียบการนับจำนวนเซลล์โดยตรง (Cell count) และการวัดความหนาแน่นเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 750 nm (Optical Density; OD) พบว่า ในช่วงต้นการทดลอง (วันที่ 0-3) ทั้งค่า OD และจำนวนเซลล์อยู่ในระดับต่ำและเพิ่มขึ้นช้า สอดคล้องกับระยะปรับตัว (Lag phase) อย่างไรก็ตาม ค่า OD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการนับเซลล์เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขนาดเซลล์หรือการสะสมสารภายในที่

ส่งผลต่อการดูดกลืนแสง แม้จำนวนเซลล์ยังไม่เพิ่มขึ้นมากในช่วงกลางการทดลอง (วันที่ 4-10) ทั้งสองวิธีแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและไปในทิศทางเดียวกัน สะท้อนการเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตแบบทวีคูณ (Exponential phase) และแสดงความสัมพันธ์เชิงบวกที่ตรงระหว่างค่า OD กับจำนวนเซลล์ จึงสามารถใช้ OD ที่ 750 nm เป็นตัวแทนประเมินการเพิ่มของชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงนี้ หลังจากวันที่ 11 เป็นต้นไป ค่า OD และจำนวนเซลล์เริ่มลดลงหรือผันผวน บ่งชี้การเข้าสู่ระยะคงตัวและระยะเสื่อม (Stationary และ Decline phase) โดยบางช่วงค่า OD ยังคงสูงกว่าการนับเซลล์ ซึ่งอาจเกิดจากเศษเซลล์เซลล์ที่ตายแล้ว หรือสารแขวนลอยที่ยังคงดูดกลืนแสง ทำให้ค่า OD สะท้อนจำนวนเซลล์ มีชีวิตอย่างแม่นยำ ดังนั้น แม้การวัด OD จะสะดวกและรวดเร็ว แต่การใช้ร่วมกับ การนับเซลล์โดยตรงจะให้ผลการประเมินการเจริญเติบโตที่ครบถ้วนและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

#### 5.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Optical Density (OD) ที่ 750 nm และจำนวนเซลล์สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella vulgaris*

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ของ *Chlorella vulgaris* กับค่า Optical Density (OD) ที่ความยาวคลื่น 750 nm ในช่วงวันที่ 3-11 (รูปที่ 2) พบความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยสมการถดถอยเชิงเส้นคือ  $y = 1.1434x - 0.3558$  และมีค่า  $R^2 = 0.9402$  แสดงว่าค่า OD สามารถอธิบายความแปรผันของจำนวนเซลล์ได้ประมาณ 94.02% บ่งชี้ถึงความแม่นยำในการใช้ OD เพื่อประมาณจำนวนเซลล์ในช่วงค่า OD 0.4-1.0 จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า สอดคล้องกับระยะปรับตัว (Lag phase) เมื่อค่า OD มากกว่า 1.0 จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงถึงระยะการเจริญเติบโตแบบทวีคูณ (Exponential phase) เนื่องจากการพัฒนาระบบ bio-photovoltaic cell ในระดับต้นแบบจำเป็นต้องใช้ชุดเซลล์จำนวนมาก การนับจำนวนเซลล์โดยตรงจึงไม่สะดวกและใช้เวลานาน อีกทั้งผลการอัตราการเจริญเติบโตจากทั้งสองวิธีให้แนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวัดค่า Optical Density เป็นวิธีหลักในการติดตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายในระบบดังกล่าว

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ *Chlorella vulgaris* กับค่า Optical Density ที่ 750 nm ในช่วงวันที่ 3 - 11 ของการทดลอง

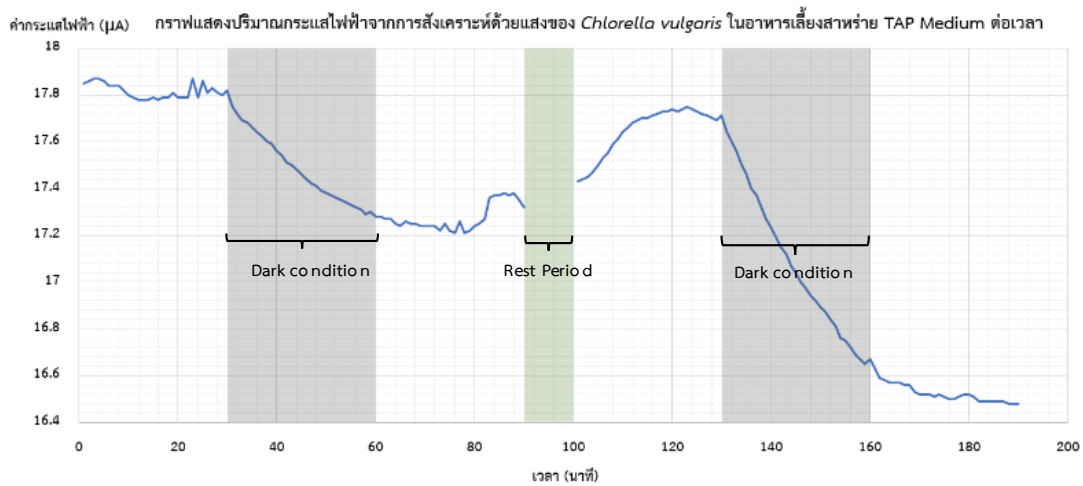


รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ *Chlorella vulgaris* กับ ค่า Optical Density (OD) ที่ 750 nm ในช่วงวันที่ 3-11 ของการทดลอง

## 5.2 การศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP (Tris-Acetate-Phosphate) medium และที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate

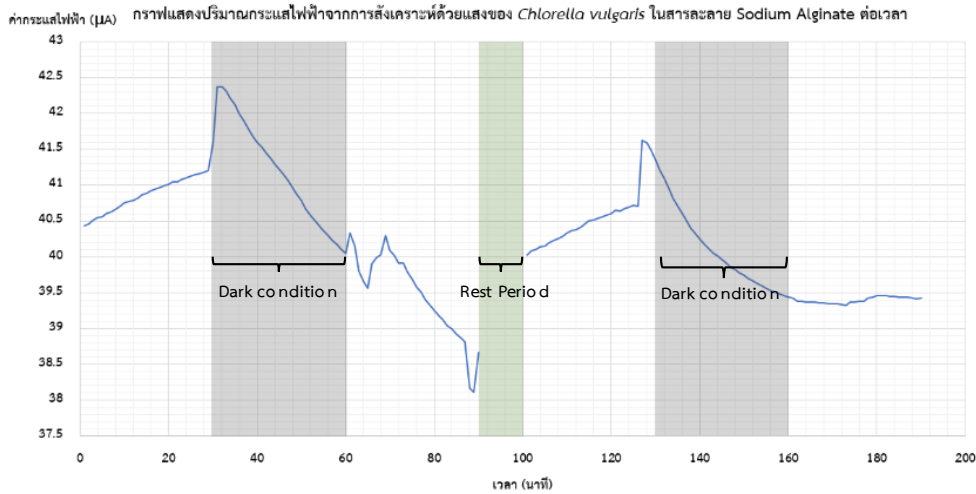
5.2.1 ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium จากกราฟปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ต่อเวลา (รูปที่ 3) ซึ่งทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium ภายใต้การควบคุมสภาวะแสงแบบสลับสว่าง-มืด พบว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีความไวต่อสภาวะ

แสงอย่างชัดเจน โดยในช่วงให้แสง (นาที่ที่ 0–30 และ 60–90) กระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับสูงประมาณ 17.78–17.87  $\mu\text{A}$  สะท้อนการเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเข้าสู่ช่วงงดแสง ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนถึงประมาณ 17.28  $\mu\text{A}$  แสดงถึงการลดลงของกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงและการถ่ายโอนอิเล็กตรอน แม้ไม่ลดลงฉับพลันเนื่องจากยังมีพลังงานหรือสารตั้งต้นสะสมภายในเซลล์ หลังจากกลับมาให้แสงอีกครั้ง กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสู่ระดับประมาณ 17.38  $\mu\text{A}$  แสดงถึงความสามารถในการฟื้นตัวของระบบสังเคราะห์ด้วยแสง ทั้งนี้ในรอบการทดลองที่สองหลังช่วงพัก 10 นาที แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงยังคงสอดคล้องกับรอบแรก โดยมีค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดใกล้เคียงกัน (16.48–17.75  $\mu\text{A}$ ) บ่งชี้ว่าช่วงพักช่วยให้เซลล์ปรับสมดุลและคงประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 กราฟแสดงปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium ต่อเวลา

5.2.2 ปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate จากกราฟปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium alginate ต่อเวลา (รูปที่ 4) พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับสถานะแสงอย่างชัดเจน โดยในช่วงให้แสง กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าสูงสุดราว 41.60  $\mu\text{A}$  สะท้อนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เมื่อเข้าสู่ช่วงงดแสง ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนถึงประมาณ 40.05  $\mu\text{A}$  แสดงถึงการลดลงของกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงและการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ทั้งนี้การลดลงไม่เกิดขึ้นฉับพลัน อาจเนื่องจากการใช้พลังงานสะสมภายในเซลล์และข้อจำกัดด้านการแพร่ของสารผ่านโครงข่าย Alginate หลังจากกลับมาให้แสงอีกครั้ง กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใหม่ แสดงถึงความสามารถในการฟื้นตัวของเซลล์ที่ถูกตรึง แม้ว่าค่าสูงสุดหลังจาก การงดแสงอาจต่ำกว่าก่อนหน้าเล็กน้อย ซึ่งอาจสะท้อนข้อจำกัดด้านการแลกเปลี่ยนสารอาหาร ก๊าซ และอิเล็กตรอนภายใต้สภาวะการตรึงเซลล์



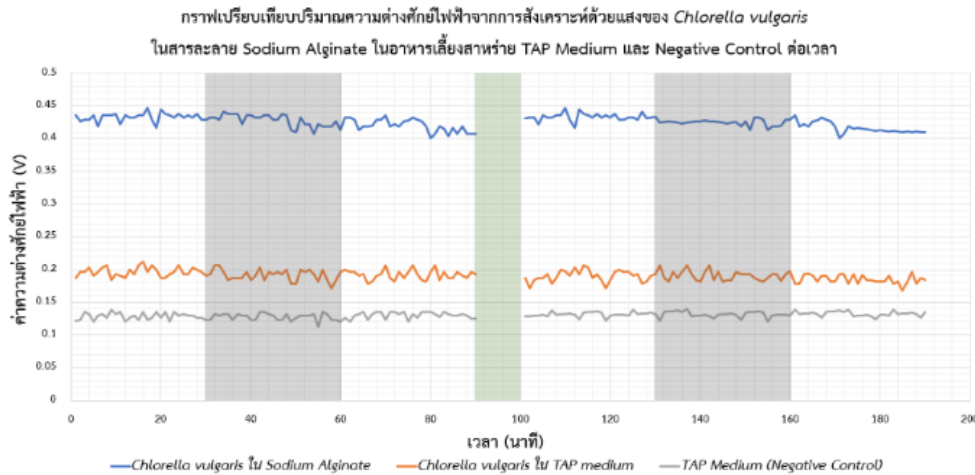
รูปที่ 4 กราฟแสดงปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate ต่อเวลา

5.2.3 การเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate และ เลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium

จากกราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ระหว่างกลุ่มที่เลี้ยงใน TAP medium กับกลุ่มที่ถูกตรึงด้วย Sodium alginate (รูปที่ 3 และ 4) พบว่ากลุ่มที่ถูกตรึงเซลล์ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าอย่างชัดเจน ตลอดการทดลอง โดยกลุ่ม TAP medium มีกระแสเริ่มต้นประมาณ 17.8 μA ลดลงเหลือราว 17.2 μA ในช่วงดแสง และเพิ่มกลับได้เพียงประมาณ 17.7-17.8 μA สะท้อนความเสถียรที่ค่อนข้างจำกัดในระบบของเหลว ขณะที่กลุ่มตรึงด้วย sodium alginate มีกระแสเริ่มต้นราว 40.5 μA เพิ่มสูงสุดประมาณ 42.3 μA และแม้จะลดลงในช่วงดแสง ก็สามารถฟื้นกลับสู่ระดับ 40-41 μA ได้รวดเร็ว แสดงถึงความเสถียรและประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่สูงกว่าโดยรวมประมาณ 2-2.5 เท่า ผลดังกล่าวชี้ว่าการตรึงเซลล์ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของสายห่ายบริเวณขั้วไฟฟ้า ลดการสูญเสียเซลล์ในระบบ และส่งเสริมการถ่ายโอนอิเล็กตรอน

5.2.4 ปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ในสารละลาย Sodium Alginate อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium และ Negative Control

จากกราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* (รูปที่ 5) พบว่ากลุ่มที่ถูกตรึงด้วย Sodium alginate (เส้นสีน้ำเงิน) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงและเสถียรกว่ากลุ่มอื่นอย่างชัดเจน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.41-0.45 V และคงระดับได้ต่อเนื่องตลอดการทดลอง สะท้อนประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าที่ดีภายใต้สภาวะตรึงเซลล์ ขณะที่ชุดควบคุม (เส้นสีเทา) ให้ค่าเพียง 0.12-0.14 V และแทบไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะแสง แสดงลักษณะของสัญญาณพื้นฐานของระบบวัด ยืนยันว่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในกลุ่มทดลองเกิดจากกิจกรรมทางชีวภาพจริง เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่เลี้ยงใน TAP medium (เส้นสีส้ม) ซึ่งให้ค่าเพียงประมาณ 0.18-0.20 V และมีความผันผวนมากกว่า จะเห็นว่าการตรึงเซลล์ช่วยเพิ่มค่าความต่างศักย์เกือบสองเท่าและเพิ่มเสถียรภาพของสัญญาณ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการตรึงทำให้เซลล์คงอยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ลดการสูญเสียการสัมผัสเชิงพื้นที่ และเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายโอนอิเล็กตรอน ส่งผลให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบผลิตพลังงานชีวภาพจากสาหร่าย



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของ *Chlorella vulgaris* ในสารละลาย Sodium Alginate ในอาหารเลี้ยงสาหร่าย TAP Medium และ Negative Control ต่อเวลา

### 5.3 การสร้างต้นแบบ Prototype ของระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (Bio-photovoltaic; BPV) สำหรับอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

จากการพัฒนาต้นแบบระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (Bio-photovoltaic; BPV) โดยใช้ *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วย Sodium alginate เป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่อเนื่องภายใต้แสงในช่วงประมาณ 38-42  $\mu\text{A}$  และให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.41-0.45 V ซึ่งเพียงพอสำหรับอุปกรณ์ IoT พลังงานต่ำ โครงสร้างระบบกำหนดให้แอโนดเป็นชีวมวลสาหร่ายที่ถูกตรึง ทำหน้าที่ปลดปล่อยและถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วนแคโทดใช้แท่งคาร์บอนแกรไฟต์เพื่อรับอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยาลด ช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดต้นทุน เมื่อเชื่อมต่อกับบอร์ดต้นแบบระบบสามารถจ่ายกระแสเฉลี่ยราว 40  $\mu\text{A}$  ที่แรงดันประมาณ 0.38 V ขณะต่อโหลด และยังคงให้สัญญาณไฟฟ้าบางส่วนในช่วงไร้แสงจากการสะสมประจุและเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ ผลลัพธ์ชี้ว่าระบบ BPV มีศักยภาพเป็นแหล่งพลังงานเสริม ลดการพึ่งพาแบตเตอรี่ลิเทียม และสามารถพัฒนาเพิ่มเติมโดยต่อเซลล์หลายหน่วยแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในลักษณะโมดูลคล้ายแผงโซลาร์เซลล์ รองรับการใช้งาน IoT อย่างยั่งยืนในอนาคต

## 6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella vulgaris* รวมถึงปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ทั้งในสภาวะเพาะเลี้ยงทั่วไปและในสภาวะที่สาหร่ายถูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate ตลอดจนการสร้างต้นแบบระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (Bio-photovoltaic; BPV) สำหรับการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ IoT เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

### 6.1 การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

จากผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella vulgaris* พบว่าสาหร่ายมีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยง โดยในระยะเริ่มต้นของการทดลอง สาหร่ายอยู่ในช่วงการปรับตัว (Lag phase) เมื่อเวลาผ่านไป สาหร่ายเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตแบบทวีคูณ (Exponential phase) ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเพิ่มจำนวนเซลล์สูงที่สุด

สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอาหารเลี้ยงเชื้อและสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและการแบ่งเซลล์ของสาหร่าย ต่อมาเมื่อสารอาหารเริ่มลดลง สาหร่ายเข้าสู่ระยะสมดุล (Stationary phase) ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตเริ่มชะลอลงด้วยผลดังกล่าว สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า Optical Density (OD) ที่วัดที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าค่า OD สามารถใช้เป็นตัวชี้แนวโน้มการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้อย่างเหมาะสม

## 6.2 การศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของ *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด TAP medium และที่ปลูกตรึงด้วยสารละลาย Sodium Alginate

การศึกษาปริมาณการเกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของ *Chlorella vulgaris* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ TAP medium ทั้งในสภาพแขวนลอยและสภาพที่ตรึงเซลล์ด้วย Sodium alginate แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแสงถูกถ่ายโอนไปยังขั้วไฟฟ้าในระบบชีวไฟฟ้าเคมี ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นเซลล์ และความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลอง ทั้งนี้ ระบบที่ตรึงเซลล์ด้วย Sodium Alginate มีเสถียรภาพมากกว่า ลดการสูญเสียชีวมวลจากการไหลเวียนของอาหารเลี้ยงเชื้อ และให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สม่ำเสมอกว่าระบบแขวนลอย อีกทั้งยังเอื้อต่อการควบคุมตำแหน่งเซลล์และการประยุกต์ใช้งานระยะยาว สะท้อนศักยภาพของสาหร่ายในฐานะแหล่งพลังงานชีวภาพที่สามารถพัฒนาเป็นระบบต้นแบบเชิงปฏิบัติได้

## 6.3 การสร้างต้นแบบ Prototype ของระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (Bio-Photovoltaic; BPV) สำหรับอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

จากการพัฒนาต้นแบบระบบชีวโฟโตโวลตาอิก (BPV) โดยใช้ *Chlorella vulgaris* ที่ถูกตรึงด้วย Sodium Alginate พบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่อเนื่องในช่วงประมาณ 38-42 ไมโครแอมแปร์ และให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.41-0.45 โวลต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับอุปกรณ์ IoT พลังงานต่ำ โดยโครงสร้างที่ใช้แอโนดเป็นชีวมวลสาหร่ายที่ถูกตรึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ขณะที่แคโทดแกรไฟต์ช่วยเสริมเสถียรภาพของระบบ เมื่อเชื่อมต่อกับบอร์ดต้นแบบ ระบบสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 40 ไมโครแอมแปร์ ที่แรงดันประมาณ 0.38 โวลต์ และยังคงให้สัญญาณไฟฟ้าในช่วงไรแสงสะท้อนถึงความต่อเนื่องของการทำงาน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของระบบ BPV ในการเป็นแหล่งพลังงานเสริมที่ยั่งยืนสำหรับอุปกรณ์ IoT และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาเชิงโมดูลโดยการเชื่อมต่อหลายเซลล์เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า รองรับการใช้งานจริงในอนาคตเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- [2] Al-Brahim, A., Al-Gami, S., & Al-Khalifa, A. (2025). Microalga-based electricity production: A comprehensive review. *Energies*, 18(3), 536. <https://doi.org/10.3390/en18030536>
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). *พลังงานชีวภาพจากสาหร่าย: ศักยภาพและทิศทางการพัฒนาในประเทศไทย*. กระทรวงพลังงาน.
- [4] Tay, Z. H. Y., Goh, K. Y., Ng, Y. H., & Ng, H. Y. (2022). The use of marine microalgae in microbial fuel cells, photosynthetic microbial fuel cells and biophotovoltaic platforms for bioelectricity generation. *Frontiers in Microbiology*, 13, 920696. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.920696>

- [5] Cereda, A., Hitchcock, A., Symes, M. D., Cronin, L., Bibby, T. S., & Jones, A. K. (2014). A bioelectrochemical approach to characterize extracellular electron transfer by photosynthetic organisms. *PLoS ONE*, *9*(3), e91484. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091484>
- [6] Bombelli, P., Müller, T., Herling, T. W., Howe, C. J., & Knowles, T. P. J. (2015). A high power-density, mediator-free, microfluidic biophotovoltaic device for cyanobacterial cells. *Advanced Energy Materials*, *5*(2), 1401299. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401299>
- [7] Gajda, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2018). Recent advancements in microbial fuel cells. *Energy*, *164*, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.127>
- [8] Bombelli, P., Bradley, R. W., Scott, A. M., Philips, A. J., McCormick, A. J., Cruz, S. M., Anderson, A., Yunus, K., Bendall, D. S., Cameron, P. J., Davies, J. M., Smith, A. G., & Howe, C. J. (2011). Powering a microprocessor by photosynthesis. *Energy & Environmental Science*, *4*, 4690–4698
- [9] McCormick, A. J., Bombelli, P., Bradley, R. W., Thome, R., Wenzel, T., & Howe, C. J. (2015). Biophotovoltaics: Oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science*, *8*, 1092–1109. <https://doi.org/10.1039/C4EE03875D>