

แบบจำลองการทำนายอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา โดยผลของแสงส่องสว่างจากหลอดแอลอีดีและการประยุกต์ Modeling of *Spirulina* Growth Rate with LED Illumination and Applications

สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ^{1,*}, จงกล พรมยะ² และ จตุรภัทร วาฤทธิ¹
Somkiat Jaturongloumlart^{1,*}, Jongkol Promya², Jaturapatr Varith¹

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

¹ Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

² Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University

* Corresponding author: yaidragon@mju.ac.th

บทคัดย่อ

ในวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของแสงส่องสว่างจากหลอดแอลอีดีที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาวะที่เพาะเลี้ยงด้วยระบบโรงเรือนปิด อีกทั้งยังศึกษาทางด้านการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น โดยมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาเป็น 2 การทดลอง การทดลองแรกเป็นการศึกษาชนิดและระยะเวลาในการให้แสงส่องสว่างจากหลอดแอลอีดีที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา การทดลองที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยของความเข้มแสงที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาและหาแบบจำลองการทำนายอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา จากการศึกษาพบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในระบบโรงเรือนปิดที่มีการควบคุมจะมีอัตราอัตราการเติบโตดีกว่าการเพาะเลี้ยงระบบธรรมชาติ โดยผลของชนิดสีของหลอดแอลอีดีเป็นแบบผสมสีแดงและน้ำเงินในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ระยะเวลาในการให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน และค่าความเข้มของฟลักซ์เท่ากับ 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการพัฒนาระบบฟาร์มสาหร่ายอัจฉริยะ โดยใช้แสงจากหลอดแอลอีดีในระบบเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า มีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 2.03 ปี

คำสำคัญ: สาหร่ายสไปรูลินา, แสงส่องสว่างจากหลอดแอลอีดี, แบบจำลองการทำนายอัตราการเติบโต

ABSTRACT

This research aimed to study factors suitable for cultivation of *Spirulina platensis* in a greenhouse including its preliminary economic analysis. The growth rate of algae was divided into 2 experiments. The first experiment studied effects of type and duration of light emitted diode (LED) illumination on cultivation of algae. The second experiment studied the photo flux density (PFD) affecting the cultured algae and its specific growth rate models. It was found that the controlled cultivation of algae in a greenhouse yielded better growth rate than that of algae cultivated in natural system. The LED illumination with the ratio of red and blue as 3:1 with lighting period of 16 hours per day at 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ yielded the best growth of *Spirulina platensis*. From economic analysis, the development of smart algae farming by LED electric solar cell was found to have breakeven point of 2.03 years.

Keywords: *Spirulina platensis*, LED illumination, specific growth rate model

1. บทนำ

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina*) ที่พบทั่วไปมีสองชนิด คือ *Arthrospira (Spirulina) maxima* และ *Arthrospira (Spirulina) platensis* เป็นสาหร่ายขนาดเล็ก [1] ที่ไม่สามารถมองเห็นเพื่อจำแนกชนิดด้วยตาเปล่า ต้องตรวจดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยสาหร่ายสไปรูลินาสามารถนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่องค์การอนามัยโลก [1-2] แนะนำว่า สาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารที่ปลอดภัยจากสารพิษ และมีคุณค่าทางอาหารสูง ไม่มีสารตกค้าง สามารถบริโภคได้อย่างดี ซึ่งมีงานศึกษาวิจัยมากมายที่ทำการศึกษเกี่ยวกับประโยชน์ของสาหร่ายสไปรูลินาหรือสาหร่ายเกลียวทองที่สามารถช่วยบำรุง และเสริมการรักษาโรคต่าง ๆ [2] เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินามีองค์ประกอบหลายอย่างที่เป็ประโยชน์ต่อร่างกายที่น่าสนใจ คือ มีปริมาณโปรตีนสูงกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดี อีกทั้งยังเป็นแหล่งของวิตามิน โดยเฉพาะวิตามินบี 12 นอกจากนี้ยังมี เบตา-แคโรทีน (Beta-carotene) ธาตุเหล็ก และกรดไขมันที่จำเป็นที่หายาก เช่น กรดแกมมาลิโนลิค (Gamma linolenic) ที่พบในพืชบางชนิดเท่านั้น [3-5] สำหรับสารสำคัญที่ผลิตได้จากสาหร่ายสไปรูลินาที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมคือสารไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) ซึ่งเป็นสารสีฟ้า (Blue colorant) ที่สำคัญทางการแพทย์เภสัชกรรม และอุตสาหกรรมอาหาร โดยในงานวิจัยที่ผ่านมา [4,5] พบว่าปัจจัยสำคัญในการผลิตสารไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลินาประกอบด้วยสารอาหารที่ใช้เร่งการผลิตสารสี ระบบการสังเคราะห์แสงที่เหมาะสม และการควบคุมระดับความเป็นด่างที่เหมาะสมและคงที่ในระบบฟาร์มที่ใช้เพาะเลี้ยง นอกจากนี้การผลิตสารไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อความปลอดภัยทางอาหาร (Food safety) ในระดับมาตรฐานอาหารและยา หรือมาตรฐานเกษตรอินทรีย์มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาต่อไป

สาหร่ายสไปรูลินาเริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้นในปัจจุบัน ในประเทศไทยมีผู้จัดจำหน่ายสาหร่ายสไปรูลินารายใหญ่ ในประเทศราว 5-6 ราย มีมูลค่าตลาดประมาณ 10 ล้านบาท โดยในปี 2538 มีการส่งออก 1,510 ตัน ในปี 2540 มีการส่งออก 100 ตัน ในปี 2542 มีการส่งออก 160 ตัน เป็นต้น [3] สำหรับแนวโน้มตลาดของสาหร่ายสไปรูลินาในประเทศไทย มีแนวโน้มขยายตัวได้ดีในปัจจุบัน เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารเสริมที่ให้ประโยชน์ต่อสุขภาพเป็นอย่างมาก ช่องทางการจัดจำหน่ายสำหรับสู่ทางการส่งออกของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูลินา โดยเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาจำเป็นต้องมีระบบจัดการคุณภาพด้านความปลอดภัย หรือ HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) ของโครงการมาตรฐานอาหาร FAO/WHO หรือ มาตรฐานอาหารอินทรีย์ Organic Food Standard จากสหพันธ์เกษตรอินทรีย์นานาชาติ (IFOAM) หรือ มาตรฐานเกษตรอินทรีย์ไทย (ACT) เป็นต้น สำหรับการบริหารจัดการฟาร์มสาหร่ายสไปรูลินาโดยทั่วไปเพื่อควบคุมอัตราการเติบโตจากแสงที่ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งมักพบปัญหาในช่วงฤดูฝนที่มีแสงแดดไม่เพียงพอ และฤดูหนาวที่ทำให้น้ำมีความเย็นเกินไป ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวการนำระบบแสงจากหลอดแอลอีดี (Light Emitted Diode, LED) มาส่องสว่าง (Illumination) เสริมหรือทดแทนแสงแดดจากธรรมชาติเมื่อจำเป็น โดยมีผลการศึกษาในเรื่องการนำแสงจากหลอดแอลอีดีมาประยุกต์ใช้กับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ว่าสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพได้ [7-12] ซึ่งแสงจากหลอดแอลอีดีที่นำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาสามารถนำพลังงานมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานในระยะยาวและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่สูงห่างไกลได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

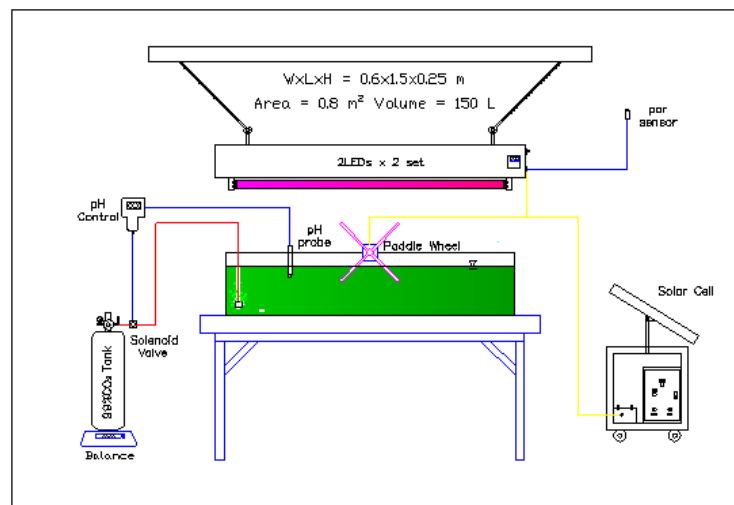
สไปรูลินาด้วยระบบแสงจากหลอดแอลอีดี โดยนำผลการศึกษาที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการทำนายการเจริญโตของสาหร่ายสไปรูลินาจากผลของแสงแอลอีดี เพื่อหาระดับของค่าความเข้มข้นของฟลักซ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบสร้างต้นแบบของระบบฟาร์มเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาต่อไป นอกจากนี้จะทำการประยุกต์ใช้งานระบบโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์และประเมินผลวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

2. อุปกรณ์และการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบในการทดลองและการเก็บตัวอย่าง

สำหรับขั้นตอนการศึกษาจะทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาจากหัวเชื้อที่เตรียมมาด้วยวิธี Monoculture จากคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ระดับความหนาแน่นเซลล์ (Optical Density, OD) ของสาหร่ายสไปรูลินาเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 ซึ่งตรวจวัดด้วยเครื่อง UV/vis spectrophotometer (Biochrom S1200 England) ที่ความยาวคลื่น 680

nm ซึ่งเป็นช่วงที่ 2 ของคลื่นที่ดูดกลืนสูงสุดสำหรับคลอโรฟิลล์ [6,11] จากนั้นทำการเพาะเลี้ยงขยายใบบ่อต้นแบบ โดยเติมสารอาหารตามสูตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้ [4] ซึ่งประกอบด้วย แหล่งอาหารหลักคาร์บอน (Carbon source) มาจากโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ในปริมาณ 8.4 g/L แหล่งอาหารหลักไนโตรเจน (Nitrogen source) มาจากโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ในปริมาณ 2.5 g/L แหล่งอาหารหลักโปแตสเซียมและฟอสฟอรัส (Phosphorus and Potassium source) มาจากไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) ในปริมาณ 0.5 g/L และแหล่งอาหารรองมาจากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในปริมาณ 1.0 g/L และ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ในปริมาณ 0.2 g/L โดยทำการเลี้ยงในบ่อจำลอง (Raceway pond) คล้ายโรงเรือนปิดที่ควบคุมสภาวะได้ [11] ประมาณ 14 วัน หรือจะทำการเก็บเกี่ยวเมื่อมีค่าระดับความหนาแน่นเซลล์ OD_{680} มากกว่า 1.2 ขึ้นไป



รูปที่ 1 ชุดทดสอบผลของความเข้มแสงต่ออัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

สำหรับรูปที่ 1 เป็นแผนภาพแสดงชุดทดสอบในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วยบ่อเลี้ยงสาหร่ายทำจากแผ่นอะคริลิกใส (Clear acrylic) หนา 10 mm ขนาดกว้าง 0.6 m ยาว 1.5 m และสูง 0.25 m ซึ่งมีปริมาตร 150 ลิตร

ต่อการทดลอง ใช้ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยใบพัด (Paddle wheel) จากมอเตอร์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งมีแบตเตอรี่สามารถใช้งานได้เพียงพอลดทั้งวัน ระบบแสงจากหลอดแอลอีดีเสริมด้านบน

ขนาดหลอดละ 33 วัตต์ จำนวน 2 หลอดต่อชุด ที่สามารถควบคุมค่าความเข้มของฟลักซ์ได้ในช่วง 50-500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ จากเซนเซอร์วัดค่าพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Active Radiation, PAR) ในรูปของค่าความเข้มของ ฟลักซ์ (Photon Flux Density, PFD) ในหน่วย $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (par sensor) โดยใช้เครื่องวัด Quantum sensor SQ-214 (Apogee, Utah, USA) ระบบควบคุมความเป็นต่างของบ่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาจากชุดควบคุม (pH control) ในช่วงค่า pH ประมาณ 9-10 จากเครื่องวัดความเป็นกรดค่า pH meter PH-221 (Lutron, Shanghai, China) และปรับค่าระดับด้วยหัวโพรบวัด (pH probe) ผ่าน โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) ซึ่งมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Tank) และบันทึกการใช้งานด้วยตาชั่ง (Balance)

2.2 การคำนวณค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาและอัตราการเติบโตจำเพาะ

ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินา (OD_{680}) กับค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (Biomass dry weight, B) ในหน่วยกรัมต่อลิตร (g/L) ซึ่งจากการศึกษาและเก็บข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา [11] สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ 1 ได้เป็น

$$B \text{ (g/L)} = (0.6734 \text{ OD}_{680}) + 0.0274, \quad R^2 = 0.9995 \quad (1)$$

การคำนวณอัตราการเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate: μ) ในหน่วย (day^{-1}) ที่เพิ่มขึ้นของสาหร่ายสไปรูลินา ตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยง (Time, t) คือหน่วยเวลา (days) สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{B_2}{B_1}\right)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

โดยค่าอัตราการเติบโตจำเพาะสามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการเติบโตของสาหร่ายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น แบบจำลองของ Monod เป็นต้น [7]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

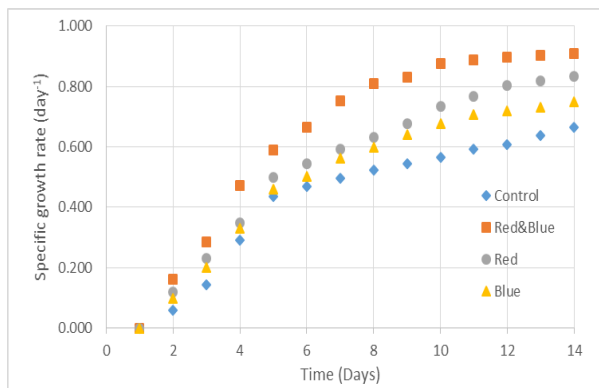
3.1 ผลการศึกษาหาสภาวะของแสงแอลอีดีในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาที่เหมาะสม

จากรูปแบบปกติของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินานิยมใช้ระบบบ่อเปิด (Open raceway pond system) ซึ่งได้รับแสงแดด (Solar radiation) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย โดยในการศึกษาส่วนแรกจะทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในระบบผสมร่วมระหว่างการให้แสงแดดปกติประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน (9.00-17.00 น.) ซึ่งเป็นสภาวะควบคุม (Control) โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงจากดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงประมาณ 700-1,100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ และค่าพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงภายในโรงเรือนพลาสติกอยู่ในช่วงประมาณ 50-400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ [11] ซึ่งการให้แสงเสริมจากหลอดแอลอีดี (LED) ต่อจากช่วงเวลาแบบปกติ (หลัง 17.00 น. เป็นต้นไป) เพื่อดูผลอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาในช่วงเวลาศึกษาเดียวกัน (ทดสอบเป็นคู่ระหว่างสภาวะควบคุมกับกรณีทดสอบแต่ละแบบ) โดยแสงเสริมจากหลอดแอลอีดีจะกำหนดให้มีค่าพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงอยู่ในช่วงประมาณ 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ซึ่งเป็นระดับแสงเริ่มต้นที่เพียงพอต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาจากการศึกษาทั่วไป [9,12] สำหรับระยะเวลาในการให้แสงจากหลอดแอลอีดีเสริมหลังช่วงเวลา 17.00 น. จะทำการศึกษาดังแสดงผลในตารางที่ 1 โดยทำการศึกษาระยะเวลาให้แสงจากหลอดแอลอีดีเสริมเพิ่มขึ้นเป็น 6 8 10 12 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยดูผลของค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีต่อชนิดและระยะเวลาในการให้แสงจากหลอดแอลอีดีเสริม

ตารางที่ 1 ผลของค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่สภาวะทดสอบของชนิดและระยะเวลาในการให้แสงแอลอีดี

Experiment	Specific growth rate (day ⁻¹)			
	Add 6 hr	Add 8 hr	Add 10 hr	Add 12 hr
NO LED (Control)	0.405 ±0.230 ^a	0.464 ±0.259 ^a	0.410 ±0.123 ^a	0.352 ±0.196 ^a
LED: Red&Blue3:1	0.654 ±0.307 ^c	0.695 ±0.291 ^d	0.481 ±0.274 ^c	0.561 ±0.357 ^b
LED: Red	0.526 ±0.284 ^b	0.584 ±0.271 ^c	0.489 ±0.276 ^c	0.475 ±0.307 ^c
LED: Blue	0.463 ±0.265 ^a	0.536 ±0.255 ^b	0.431 ±0.192 ^b	0.348 ±0.258 ^a

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (mean ± SD) และตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)



รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาที่แหล่งแสงจากหลอดแอลอีดีเสริมต่าง ๆ

จากตารางที่ 1 แสดงค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (day⁻¹) ตลอดระยะเวลา 14 วัน โดยพบว่าหลอดแอลอีดีแบบผสมสีแดงกับน้ำเงินที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 เมื่อให้แสงเพิ่มเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง (เมื่อรวมกับระยะเวลาให้แสงปกติจากแสงแดด 8 ชั่วโมง รวมเป็น 16 ชั่วโมง) โดยกำหนดระดับค่าพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ คงที่สามารถช่วยเพิ่มค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของ

สาหร่ายสไปรูลินาแห้งได้สูงสุดในทุกกรณี โดยเฉพาะสภาวะควบคุมซึ่งมีเฉพาะการสังเคราะห์แสงจากแสงแดด จะสามารถเพิ่มค่าจาก 0.464 day⁻¹ เป็น 0.695 day⁻¹ หรือคิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นประมาณ 49.78% นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติยังพบว่า การให้แสงเพิ่มเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงมีผลทำให้ค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาที่เสริมแสงจากหลอดแอลอีดีแบบต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นแนวโน้มการเพิ่มค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาจากหลอดแอลอีดีแบบผสมสีแดงกับน้ำเงินที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 มีค่าสูงสุด รองลงมาคือแสงจากหลอดแอลอีดีสีแดง และสีน้ำเงินตามลำดับ

3.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงจากหลอดแอลอีดี

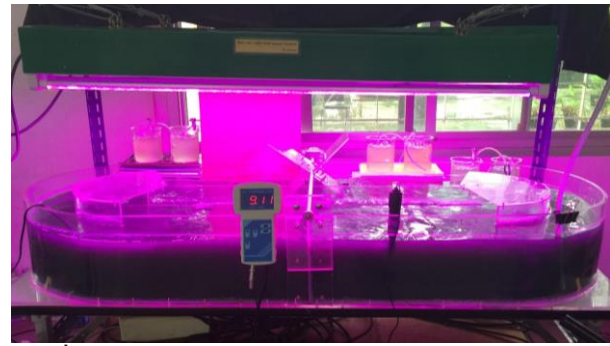
จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบผลของการเสริมแสงจากหลอดแอลอีดี ในลำดับถัดไปจะศึกษาผลของความเข้มแสงจากหลอดแอลอีดี ซึ่งจะนำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแทนแสงแดดตลอดเวลา โดยจากรายงานการศึกษาต่าง ๆ พบว่าระดับความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการเติบโตของสาหร่าย เช่น Zarrouk, 1966 รายงานว่าระดับความเข้มไม่ควรเกิน 25-30 kLux (ประมาณ 300-360 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) [9] Ehecattl, 2015 รายงานว่าช่วงที่เหมาะสมประมาณ 100-200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ [8] และ Soletto et al., 2008 รายงานว่าแสงที่มีค่าเกิน 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ จะทำให้สาหร่ายหยุดอัตราการเติบโต เป็นต้น [10] ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกชนิดของการศึกษาจากแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp, FL) ซึ่งใช้เป็นสภาวะควบคุม (Control) ซึ่งใช้เป็นหลอดแบบทั่วไปที่มีขนาด 36 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ส่วนแสงจากหลอดแอลอีดีสีแดง แสงสีน้ำเงิน แสงสีแดงผสมน้ำเงิน (Red&Blue) ในอัตราส่วน Red&Blue เป็น 3:1 เลือกใช้หลอดในรุ่น Civilight DPT 2RB120T33-M2, Japan ซึ่งแสงสีแดงมีค่าความยาวคลื่น 450 nm และแสงสีน้ำเงินมีค่าความยาวคลื่น

660 nm โดยสามารถปรับระดับความเข้มและสัดส่วนของแสงได้ [11] และเลือกศึกษาที่ระดับความเข้มในช่วง 50-450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สไปรูลินาด้วยสูตรอาหารแบบเดิมเป็นระยะเวลา 14 วัน โดยใช้แสงจากหลอดเป็นเวลารวม 16 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินา

ตารางที่ 2 ผลของระดับความเข้มแสงต่อค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินา (day^{-1}) ในวันที่ 14

PFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)	FL (Control)	Red	Blue	Red&Blue 3:1
50	0.656	0.832	0.749	0.908
150	1.022	1.326	1.203	1.462
250	1.137	1.419	1.344	1.649
350	1.320	1.651	1.426	1.866
450	1.241	1.559	1.322	1.547

ตารางที่ 2 พบว่าแสงจากหลอดแอลอีดีทุกแบบให้ผลของค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาที่สูงกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยที่ระดับความเข้มแสงจากหลอดแอลอีดีสูงขึ้นค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาก็จะมีค่าสูงขึ้นตามกันไปและจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีค่าเกิน 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ โดยจากการศึกษาผลของหลอดแอลอีดีแสงสีแดงผสมสีน้ำเงินที่อัตราส่วน Red&Blue เป็น 3:1 ให้ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาที่ดีที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sang-Hyo et al., 2016. [12] ซึ่งแนะนำว่าหลอดแอลอีดีแสงสีแดงผสมสีน้ำเงินเหมาะที่จะใช้เร่งอัตราการเติบโตในช่วงแรก และหลอดแอลอีดีแสงสีน้ำเงินเหมาะที่จะใช้ผลิตสารไฟโคไซยานิน



รูปที่ 3 การศึกษาและทดสอบผลของความเข้มแสงต่อค่าอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินา

3.3 แบบจำลองอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาด้วยปัจจัยจากแสงแอลอีดี

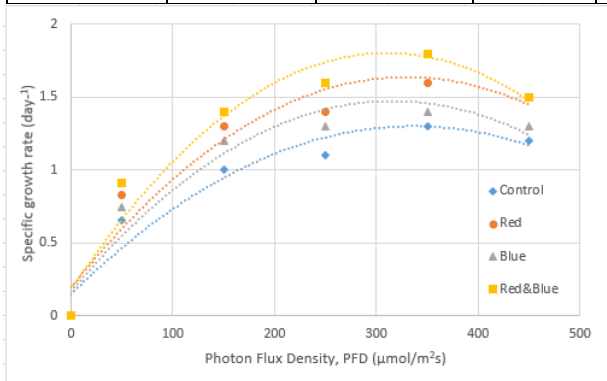
จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อนำมาทำการศึกษาวิเคราะห์โดยใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics model) ของอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา โดยจากการศึกษารายงานที่ผ่านมาพบว่ามีแบบจำลองต่าง ๆ ที่นิยมใช้กับการทำนายอัตราการเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae or Cyanobacteria) เช่น แบบจำลองของ Monod แบบจำลองของ Modify Monod แบบจำลองของ Aiba แบบจำลองของ Haldane แบบจำลองของ Geider แบบจำลองของ Bernard เป็นต้น [6,7,10,11] ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยค่า μ_m ค่าอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด ค่า I_{par} คือระดับความเข้มแสง ค่า k_s คือค่าคงที่ของจุดอิ่มตัว ค่า k_l คือค่าคงที่ของจุดยับยั้งอัตราการเติบโต ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกแบบจำลองทั้ง 6 นี้มาทำการทดลองศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาความเหมาะสม จากผลการศึกษาที่ได้เมื่อนำค่าอัตราอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่าย สไปรูลินาไปสร้างเส้นแนวโน้มเพื่อใช้ในการทำนายเบื้องต้นพบว่าเพียงแบบจำลองของ Monod และแบบจำลองของ Haldane ที่สามารถนำไปสร้างเส้นแนวโน้มได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจึงเลือกเพียงแบบจำลองทั้งสองเพื่อนำไปศึกษาวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้แสดงอัตราการเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

Model	Equations
Monod	$\mu = \mu_m \frac{I_{par}}{k_S + I_{par}}$
Modify Monod	$\mu = \mu_m \frac{I_{par}}{k_S + \frac{I_{par}}{k_I}}$
Aiba	$\mu = \mu_m \frac{I_{par}}{k_S + I_{par} + k_I I_{par}^2}$
Haldane	$\mu = \mu_m \frac{I_{par}}{k_S + I_{par} + \frac{I_{par}^2}{k_I}}$
Geider	$\mu = \mu_m \left[1 - \exp\left(\frac{-k_S I_{par}}{\mu_m}\right) \right]$
Bernard	$\mu = \mu_m \left[\frac{I_{par}}{\frac{\mu_m}{k_S} + I_{par} + \left(\frac{I_{par}}{k_I} - 1\right)^2} \right]$

ตารางที่ 4 ค่าคงที่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

Conditions	Monod			Haldane			
	μ_m	k_S	R ²	μ_m	k_S	k_I	R ²
Control	1.620	67.440	0.934	3.017	174.212	334.617	0.957
Red	1.978	60.736	0.933	4.235	192.954	358.306	0.970
Blue	1.858	64.627	0.952	3.922	197.931	256.671	0.984
Red&Blue	2.206	70.592	0.940	4.140	181.666	328.232	0.962



รูปที่ 4 แสดงเส้นแนวโน้มของแบบจำลอง Haldane กับผลของค่าอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

จากตารางที่ 4 เป็นผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา และหาค่าคงที่ของสมการ โดยใช้เทคนิคการหาเส้นกราฟของการแทนค่าข้อมูล (Curve fitting) สำหรับ

แบบจำลองของ Monod และ จะมีเพียงค่าอัตราการเติบโตสูงสุด (μ_m) ค่าคงที่ของจุดอิ่มตัว (k_S) ส่วนแบบจำลองของ Haldane จะประกอบด้วยค่าอัตราการเติบโตสูงสุด (μ_m) ค่าคงที่ของจุดอิ่มตัว (k_S) และค่าคงที่ของจุดยับยั้งอัตราการเติบโต (k_I) ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลองของ Haldane สามารถระบุค่าคงที่ของจุดยับยั้งอัตราการเติบโตได้เท่ากับ 328.232 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าค่าคงที่ของจุดยับยั้งอัตราการเติบโตอยู่ในช่วง 366-475 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ [7] และค่าคงที่ของจุดยับยั้งอัตราการเติบโตอยู่ในช่วง 291-447 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ [10] โดยผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นตัวระดับแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสไปรูลินาในระบบโรงเรือนแบบปิดที่เหมาะสมต่อไป จากผลที่ได้พบว่าแบบจำลองของ Haldane สามารถใช้ทำนายอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

ได้ดีกว่าแบบจำลองของ Monod โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) สูงกว่าในทุกกรณีของการศึกษาทดลอง

3.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้แสงจากหลอดแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

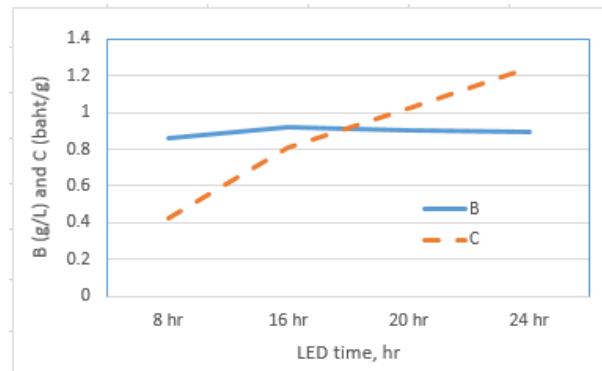
ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้แสงจากหลอดแอลอีดีเพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา จะใช้ค่าในการประเมินในรูปแบบของดัชนีชี้วัดราคาการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี (Cost of LED light: C, baht/g) [7] ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3

$$C = \frac{kT_n P}{(B_n - B_0) V} \quad (3)$$

โดยที่ค่า k คือค่าราคาหน่วยค่าไฟฟ้า (baht/kWh), T_n คือค่าเวลาที่ใช้แสงจากหลอดแอลอีดีในแต่ละวันตลอดช่วงการเพาะเลี้ยง (hour, h), P คือค่าพลังงานที่ใช้จากหลอดแอลอีดี (kW) B_n คือค่าชีวมวล (Biomass dry weight, g/L) ของสาหร่ายวันที่ n และ B₀ คือค่าชีวมวลเริ่มต้น (g/L) และ V คือค่าปริมาตรที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายในหน่วยลิตร (L) แล้วจึงนำมาคำนวณหาระยะเวลาของการคืนทุนเมื่อใช้ระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Electric solar cell) ซึ่งมีส่วนประกอบของระบบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 วัตต์ ชุดชาร์จไฟฟ้า 10 แอมป์ แบตเตอรี่ขนาด 45 แอมป์ ชั่วโมง ผู้ควบคุมการทำงาน ชุดหลอดแอลอีดีแสงผสมสีแดงและน้ำเงิน อัตราส่วน 3 ต่อ 1 จำนวน 2 หลอด ๆ ละ 33 วัตต์ โดยมีค่าความเข้มของฟลักซ์เท่ากับ 350 μmol/m²s ซึ่งสามารถปรับระดับแสงได้ด้วยชุดเซนเซอร์เมื่อแสงแดดลดลง

จากรูปที่ 5 จะพบว่าต้นทุนสำหรับการใช้แสงแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาต่อรอบการผลิต 14 วันที่จำนวนระยะเวลาให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวันมีค่าเท่ากับ 0.807 บาทต่อกรัมสาหร่ายแห้ง (baht/g) โดยใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณที่ราคาหน่วยค่าไฟฟ้าเท่ากับ 8 บาทต่อหน่วยค่าไฟฟ้า (baht/kWh) โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีชี้วัดราคาการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดีกับค่าชี

วมวลของสาหร่าย สไปรูลินาแห้งจะพบว่ามีจุดตัดอยู่ที่ช่วงระยะเวลาให้แสง 16-18 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเป็นช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับลงทุนใช้แสงแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าผลคูณของค่าดัชนีชี้วัดราคาการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดีกับค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งมีค่าเท่ากับ 0.739 baht/L ซึ่งเป็นค่าสำหรับใช้ในการขยายสเกลขนาด (Scale-up) ของระบบที่ใหญ่ขึ้นไป [11]



รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสำหรับการใช้แสงแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้แสงแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ในบ่อต้นแบบซึ่งใช้ระบบจำลองโรงเรือนปิดที่สภาวะควบคุม โดยรายได้ต่อเดือนคือผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งต่อเดือนซึ่งสามารถผลิตได้ 2 รอบ กับราคาจำหน่ายสาหร่ายเกรดอาหารเสริมสุขภาพ [11] ส่วนรายจ่ายต่อเดือนประกอบด้วยต้นทุนการผลิตในส่วนสารอาหาร ต้นทุนหัวเชื้อสาหร่าย ค่าดำเนินการ และต้นทุนค่าไฟฟ้าจากระบบแสงแอลอีดี [11] เมื่อทำการวิเคราะห์การลงทุนทางเศรษฐศาสตร์จะได้กำไรต่อเดือนเท่ากับ 819.2 บาท และคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Simple payback period) ได้เท่ากับ 2.03 ปี

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ข้อมูลการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับการให้แสงแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

ข้อมูลการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์	ค่าการคำนวณ
1. รายได้ต่อเดือน	
1.1 ปริมาณสาหร่ายแห้งต่อหน่วย 0.916 กรัมต่อลิตร จากหน่วยทดลองการศึกษา 150 ลิตร ต่อรอบการผลิต 14 วัน	137.4 กรัมสาหร่ายแห้ง
1.2 ราคาสาหร่ายเกรดอาหารเสริมสุขภาพ กิโลกรัมแห้งละ 5,000 บาท [12] ดังนั้นรายได้จากการผลิตต่อเดือนจากการผลิต 2 รอบ ประมาณ 28 วัน	1,374 บาทต่อเดือน
2. รายจ่ายต่อเดือน	
2.1 ต้นทุนการผลิตในส่วนสารอาหารจากปุ๋ย 0.860 บาทต่อลิตร [12] ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อเดือนเท่ากับ	258 บาทต่อเดือน
2.2 ต้นทุนหัวเชื้อสาหร่ายและค่าดำเนินการ 0.500 บาทต่อลิตร [12] ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อเดือนเท่ากับ	75 บาทต่อเดือน
2.3 ต้นทุนค่าไฟฟ้าจากระบบแสงแอลอีดีเท่ากับ 0.807 บาทต่อกรัมสาหร่ายแห้ง ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อเดือนเท่ากับ	221.8 บาทต่อเดือน
3. การวิเคราะห์การลงทุนทางเศรษฐศาสตร์	
3.1 ราคาต้นทุนระบบแสงแอลอีดีจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยชุดเซลล์แสงอาทิตย์ 12,000 บาท และชุดหลอดแอลอีดี 8,000 บาท [12]	20,000 บาท
3.2 กำไรต่อเดือนเท่ากับผลต่างของรายได้และรายจ่ายต่อเดือน	819.2 บาทต่อเดือน
3.3 จำนวนระยะเวลาคืนทุน (Simple payback period)	2.03 ปี

4. สรุป

จากผลการศึกษารูปได้ว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยระบบแสงส่องสว่างจากหลอดแอลอีดีคือแสงผสมสีแดงและน้ำเงินในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ระยะเวลาในการให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน และค่าความเข้มของ ฟลักซ์เท่ากับ $350 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

โดยแบบจำลองของ Haldane มีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา สำหรับการวิเคราะห์การลงทุนทางเศรษฐศาสตร์พบว่ามีความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการให้แสงส่องสว่างจากหลอดแอลอีดีกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยูวดี พีรพรพิศาล. (2546). การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 72.
- [2] เจียมจิตต์ บุญสม. (2544). ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- [3] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2543). รายงานโครงการศึกษาวิจัยแบบอย่างการลงทุนอุตสาหกรรมเฉพาะอย่างฉบับสมบูรณ์. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [4] จงกล พรหมยะ และขจรเกียรติ แซ่ตัน. (2548). การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อสุขภาพ. คณะเทคโนโลยีการประมง และ ทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่.
- [5] Henrikson, R. *Earth Food Spirulina*. (2009). Ronore Enterprises Inc., Hawaii, USA.
- [6] Bennett, A. and L. Bogorad. (1973). Complementary chromatic adaptation in filamentous blue-green alga, *J. Cell Biol.* 58, 419 - 435.
- [7] Wang, C. U., Fu, C. C. and Liu, Y. C. (2007). Effect of using Light-Emitting Diodes on the Cultivation of *Spirulina Platensis*. *Bio Chemical Engineering Journal* 37, 21-25.
- [8] Soletto, D., Binaghi, L., Ferrari, L. Lodi, A., Carvalho, M., Zilli, M. and Converti, A. (2008). Effect of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina plantensis* in helical photobioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 39, 369-375.
- [9] Zarrouk, C., (1966). Contribution to the study of cyanophyceae. Influence of various physical and chemical factors on growth and photosynthesis of *Spirulina maxima*. Ph.D. Thesis, Paris.
- [10] Ehecatl Antonio, R., Dongda, Z., Youping, X., Emmanuel, M. and Kej, J. (2015). Dynamic simulation and optimization of *Arthrospira plantensis* growth and C-phycoyanin production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 10606–10614.
- [11] สมเกียรติ จตุรงค์ดีเลิศ จงกล พรหมยะ และจตุรภัทร วาฤทธิ. (2559). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง การพัฒนามาตรฐานฟาร์มสาหร่ายสไปรูลินาสำหรับกลุ่มเครือข่ายเกษตรกรในเขตภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน).
- [12] Sang-Hyo, L., Ju, L., Yoori, K. and Seung-Yop, L. (2016). The production of high purity phycocyanin by *Spirulina plantensis* using light-emitting diodes based two-stage cultivation. *Appl Biochem Biotechnol*, 54, 382–395.