การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่า ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี

พรอนันต์ วงศ์ใหญ่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2558

การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่า
ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี

พรอนันต์ วงศ์ใหญ่

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ)
วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2558

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร)
วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2558

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์)
วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2558

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ)
วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2558

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2558

ชื่อเรื่อง การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี

ชื่อผู้เขียน นายพรอนันต์ วงศ์ใหญ่

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาเทคนิคการสังเคราะห์แสงโดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด LED ที่มีความยาวคลื่นแสง และความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาหาผลกระทบต่อการเพาะเลี้ยงของสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ แผนการทดลองที่ 1 ศึกษาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า แผนการทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ คุณค่าทางโภชนาการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แผนการทดลองที่ 3 ศึกษาการออกแบบทางวิศวกรรมในเชิงแนวคิดเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร จากการทดลองพบว่า หลอดไฟ LED Daylight ที่ความเข้มแสง 260 lm/W และระยะความสูง 10 เซนติเมตร มีความเหมาะสมที่สุด โดยสามารถให้ค่าชีวมวล ค่าอัตราการเจริญเติบโต ค่าคลอโรฟิลล์ และ ค่าไฟโคไซยานินมากที่สุด คือ 0.569 g dry weight/L , 0.716 day^{-1}, 10.785 mg/L และ 0.147 g/L ตามลำดับ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการให้แสงจากหลอด LED คือ 12 ชั่วโมง โดยค่าใช้จ่ายของพลังงานที่เสียไปต่อการเพาะเลี้ยงด้วยหลอด LED มีค่าเท่ากับ 0.434 g dry weight/baht และการใช้หลอดไฟ Red ผสม Blue สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของปริมาณโปรตีน และคุณค่าทางโภชนาการของปริมาณไขมัน ได้มากกว่าการเพาะเลี้ยงแบบ Control ถึง 5.09 % และ 85.26 % ตามลำดับ การออกแบบทางวิศวกรรมในเชิงแนวคิดโดยวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้เหมาะสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยผลวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมสามารถหาระยะเวลาในการคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.62 ปี

Title	Enhanced Growth Rate and Nutrition of *Spirulina platensis* by LED Light Photosynthesis Technique
Author	Mr. Phornanan Wongyai
Degree of	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Somkiat Jaturonglumlert

ABSTRACT

Photosynthesis technique using light source by LED with different light wavelengths and illumination intensities, was employed to explore the effects of light source to the cultivation of *Spirulina platensis.* The study was divided into three experiments: first study on the type and intensity of LED lamp which might affect the growth of spirulina; second study on the effect of light source to the pigment, nutrition and mathematical model; and, third study on concept design as model of process design for cultivation of spirulina with LED in the food industry. According to the results, LED Daylight with light intensity of 260 lm/W and length of 10 cm resulted in maximum biomass, specific growth rate, chlorophyll and phycocyanin, at daylight of 0.569 g dry weight/L, 0.716 day^{-1}, 10.785 mg/L and 0.147 g/L, respectively. Optimal time use by LED light was 12 hours. Energy cost used for cultivation was equivalent to 0.434 g dry weight/baht. Alternating use of red and blue lamp colors was observed to increase more the nutritional value (protein and lipid) than control type of cultivation to 5.09 % and 85.26 %, respectively. Conceptual designing by data analysis based on the experimental data for suitability towards industrial production, resulted from the analysis of engineering economics for calculation of return to cost as within 1.62 years.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวางแผนการดำเนินงานทดลอง ตลอดจนช่วยสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้ในการดำเนินงาน ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร ที่กรุณารับเป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ คำปรึกษาในด้านต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ รองผู้อำนวยการฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณารับเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำดี ๆ เสมอ และที่ให้ความช่วยเหลือเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณพิรุฬห์รัชช์ ไทยสมัคร คุณสกาวเดือน แก้วดำ คุณจันจิรา จิตแสง คุณเบญญาภา เทพปินตา คุณวิษณุ ปินตาเชื้อ และเพื่อนๆ น้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท ห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อจันทร์ วงศ์ใหญ่ และคุณแม่สมฤทธิ์ วงศ์ใหญ่ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ให้คำปรึกษา จนทำให้ผู้จัดทำโครงงานประสบความสำเร็จในการเรียน

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

พรอนันต์ วงศ์ใหญ่

พฤศจิกายน 2558

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

สาหร่ายสไปรูลิน่า เป็นพืชที่อุดมไปด้วยแหล่งของสารอาหารนานาชนิดที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายของมนุษย์ เนื่องจากคุณประโยชน์ที่นำมาประยุกต์ใช้ได้มากมายในหลายๆด้าน เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสำหรับมนุษย์ อาหารสัตว์เลี้ยง ยาชีวเคมี ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว ทำให้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับสาหร่ายสไปรูลิน่า อย่างแพร่หลาย

ในปัจจุบันการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ในระดับอุตสาหกรรมยังคงใช้วิธีการเลี้ยงแบบดั้งเดิมด้วยการสังเคราะห์แสงจากแสงอาทิตย์ ถึงแม้ว่าวิธีการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าแบบเดิมจะดีอยู่แล้ว แต่คงยังพบข้อจำกัดของวิธีเหล่านี้อยู่ ได้แก่ ความไม่แน่นอนทางธรรมชาติ ภัยพิบัติทางธรรมชาติ ทำให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตไม่เป็นที่ต้องการ การปนเปื้อนของบ่อน้ำ เช่นแบคทีเรีย เป็นต้น ที่มีผลกระทบต่อการเติบโตของสาหร่าย หรือหากเป็นวันที่ไม่มีแสงแดดติดต่อกันหลายวันทำให้การเก็บเกี่ยวสาหร่ายล่าช้า อาจจะส่งผลเสียหายในการธุรกิจ เป็นต้น

ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของแนวคิดในการใช้ไอโอดเปล่งแสง (Light emitting diode: LED) หรือที่เรียกว่า หลอดไฟ LED มาใช้แทนแสงจากธรรมชาติในระหว่างการเพาะเลี้ยง ซึ่งหลอดไฟ LED เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงแสงจากธรรมชาติ และสาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถเจริญเติบโตด้วยการสังเคราะห์แสง และพืชแต่ละชนิดที่สังเคราะห์แสงได้ จะมีสารสีหรือรงควัตถุอยู่หลายประเภท ซึ่งพบว่าสาหร่ายสไปรูลิน่านอกจากมีคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ แล้วยังมีไฟโคบิลินโดยสีของรงควัตถุสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงที่ต่างกัน ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแสงอาทิตย์ต่างกัน โดยหากมีปริมาณแสงที่มากเกินไป หรือน้อยเกินไปจะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง

โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำแสงจากหลอดไฟ LED เข้ามาช่วยในกระบวนการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า รวมถึงการหาตัวแปรที่เหมาะสมในการใช้หลอดไฟ LED และคาดว่าจะทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่าเพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่าได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าแบบปกติและแบบใช้ร่วมกับหลอดไฟ LED
3. ศึกษาการออกแบบทางวิศวกรรมในเชิงแนวคิด เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED ในระดับอุตสาหกรรม

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ใช้สาหร่ายสไปรูลิน่า *(Spirulina platensis)* จากคณะประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ โดยหลอดไฟ LED ที่ใช้ในการวิจัยนี้จะใช้แบบ Surface Mounted Diode mouse (SMD) ชนิดหลอดไฟ RGB, หลอดไฟ Daylight และหลอดไฟ Warm White และใช้สูตรอาหาร ดังต่อไปนี้

โซเดียมไบคาร์บอเนต หรือ ผงฟู ($NaHCO_3$)	6.0 กรัมต่อน้ำสะอาด 1 ลิตร
โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)	1.5 กรัมต่อน้ำสะอาด 1 ลิตร
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)	1.0 กรัมต่อน้ำสะอาด 1 ลิตร
โซเดียมคลอไรด์ หรือ เกลือแกง (NaCl)	1.0 กรัมต่อน้ำสะอาด 1 ลิตร
ปุ๋ย N : P : K (16 : 16 : 16)	0.6 กรัมต่อน้ำสะอาด 1 ลิตร

ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัย คือศึกษาชนิดของแสง ความเข้มของแสงจากหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า และช่วงเวลาที่ได้รับแสงจากหลอดไฟ LED

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ในเรื่องของปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED
2. ได้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าระหว่างการเลี้ยงแบบควบคุมและการเลี้ยงแบบใช้ร่วมกับหลอดไฟ LED
3. ได้ต้นแบบในการพัฒนาการออกแบบกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร

บทที่ 2
ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

สาหร่ายสไปรูลิน่า

1. ความรู้ทั่วไป

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตในไฟลัมคลอโรไฟตา (Chorophyta) เป็นพืชชั้นต่ำซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว มีขนาดตั้งแต่เล็กมากไปจนถึงขนาดใหญ่ เป็นสาหร่ายที่พบทั่วไปในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม (Richmond, 1986) สาหร่ายสามารถแบ่งชนิดได้จากสีและขนาดของสาหร่าย หากจะแบ่งตามสีสันของสาหร่าย จะแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

1. สาหร่ายสีเขียว (Green algae) ส่วนใหญ่เป็นแพลงก์ตอนพืช มีสารสีที่ใช้สังเคราะห์แสงเป็นสีเขียว
2. สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue – green algae) มีโครงสร้างของเซลล์คล้ายแบคทีเรียมีสารสังเคราะห์แสงเป็นสีเขียว พบได้ในแหล่งน้ำทุกที่ทั่วโลก ตั้งแต่ขั้วโลกที่เป็นน้ำแข็งจนถึงน้ำพุร้อน ในดิน หรือแม้กระทั่งทะเลทราย
3. สาหร่ายสีน้ำตาล (Brown algae) เป็นสาหร่ายหลายเซลล์ลักษณะเป็นเส้นสายต่อกันออกเป็นกิ่งก้าน มีสารสีเป็นสีน้ำตาล
4. สาหร่ายสีแดง (Red algae) เป็นสาหร่ายหลายเซลล์ มีสารสีเป็นสีแดง

สาหร่ายสไปรูลิน่า หรือที่เรียกกันว่า สาหร่ายเกลียวทอง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Spirulina platensis* มีลักษณะโครงสร้างม้วนตัวเป็นเกลียวหรือเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 1

ภาพที่ 1 สาหร่ายสไปรูลิน่าภายใต้กล้องจุลทรรศน์

สามารถเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารในมนุษย์ หรือเป็นสารเสริมอาหารสัตว์ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ ในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำและอุตสาหกรรมสัตว์ปีกได้ พบได้ทั้งในรูปเม็ด แผ่นและผง สาหร่ายสไปรูลิน่าส่วนใหญ่ถูกเพาะเลี้ยงในระบบน้ำวนทางเปิด (Open-channel raceway pond) โดยมีใบจักรคอยกวนน้ำ และผู้ผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าเชิงพาณิชย์รายใหญ่ที่สุดอยู่ในสหรัฐอเมริกา ไทย อินเดีย ไต้หวัน จีน พม่าปากีสถาน และชิลี (Vonshak, 1997) ในปัจจุบันพบประมาณ 35 ชนิด แต่ชนิดที่มีเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเพื่อนำมาเป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์คือ *Spirulina platensis* (เจียมจิตต์, 2531)

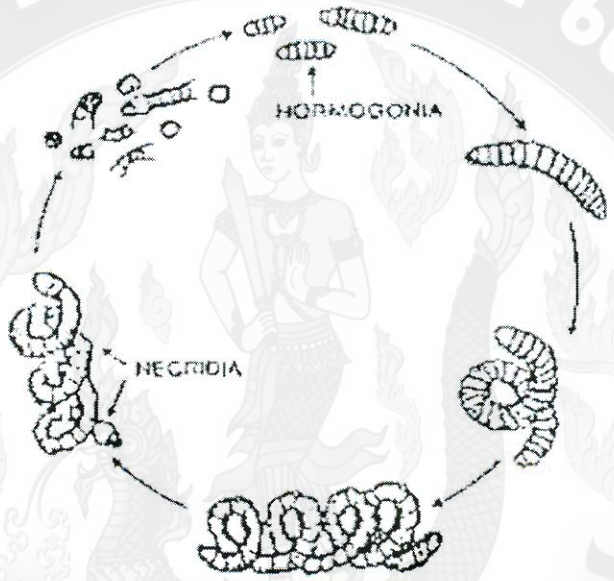
2. ลักษณะทางชีววิทยาของสาหร่ายสไปรูลิน่า

สาหร่ายสไปรูลิน่าหรือสาหร่ายเกลียวทอง เป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีขนาดเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ซึ่งลักษณะทั่วไปของสาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นเซลล์ทรงกระบอกหลายๆ เซลล์เรียงต่อกันเป็นเส้นสายตรง หรือขดเป็นเกลียว หรือ เป็นวง ไม่มีกิ่งก้าน เรียกว่า ไตรโคม (Trichome) โดยเซลล์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-12 ไมโครเมตร ขนาดความกว้าง ยาว ของไตรโคมขึ้นกับชนิด (Species) ของสาหร่าย และสภาวะแวดล้อมที่สาหร่ายเจริญเติบโตพบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย แต่ส่วนมากจะพบในน้ำจืด และสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในน้ำสะอาดและน้ำทิ้ง หรือน้ำเสีย จากแหล่งธรรมชาติ โดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ น้ำ อากาศ และคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง เพื่อผลิตสารอาหาร (Nutrient) สาหร่ายชนิดนี้มี จำพวก โปรตีน กรดอะมิโน วิตามิน และแป้ง ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อีกทั้งยังพบว่ามีปริมาณโปรตีนสูงว่าสาหร่ายชนิดอื่นๆ ถึง 64 - 72 % ของน้ำหนักแห้ง โดยสาหร่ายสไปรูลิน่ามักนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น อาหารเสริม ส่วนผสมเครื่องสำอาง ส่วนผสมอาหารมนุษย์ ส่วนผสมอาหารสัตว์ เป็นต้น (สมศักดิ์, 2547)

สาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่มีการเจริญเติบโตโดยการแบ่งเซลล์ (Binary fission) เท่านั้น เซลล์สาหร่ายสไปรูลิน่าไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส และคลอโรพลาสต์ แต่มีผนังเซลประกอบด้วยเยื่อหุ้มชั้นนอก (Outer membrane) และเยื่อพลาสมา (Plasma membrane) ที่มีชั้นของเปปติโดไกลแคน (Peptidoglycan) แทรกอยู่ระหว่างเยื่อทั้งสอง และมีเยื่อไทลาคอยด์ (Thylakoid mebrane) ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง และเป็นแหล่งที่พบรงควัตถุต่างๆ เช่น คาโรทีนอยด์ (Carotenoids) คลอโรฟิลล์-เอ (Chlorophyll-a) อัลโลไฟโคไซยานิน (Allophycocyanin) และไฟโคไซยานิน (Phycocyamin) นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูลิน่าบางสายพันธุ์อาจมีถุงอากาศเล็กๆ (Gas vacuoles) อยู่ภายในไซโตพลาสซึมทำให้สามารถลอยตัวได้ (มารศรี, 2546)

3. การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า

ในวงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลิน่า ไตรโคมที่เจริญเติบโตเต็มที่ มีการสร้างเซลล์ที่มีลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า เนคริเดีย (Necridia) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะถูกย่อยทำให้ไตรโคมแตกหักออกเป็นท่อนสั้นๆ ขนาดประมาณ 2 - 4 เซลล์ที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นส่วนใหญ่ เรียกว่า โฮโมโกเนีย (Homogonia) จากนั้นจึงมีการแบ่งตัวเพิ่มความยาวหรือจำนวนเซลล์ของแต่ละโฮโมโกเนียจนเป็นไตรโคมที่สมบรูณ์ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลิน่า

ที่มา: Richmond (1986)

4. คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่า

สาหร่ายชนิดนี้มี จำพวก แป้ง (หรือน้ำตาล) วิตามิน กรดอะมิโน เกลือแร่ต่างๆ ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับความต้องการของมนุษย์ อีกทั้งปริมาณโปรตีนสูงว่าสาหร่ายชนิดอื่นๆ ถึง 64 - 72 % ของน้ำหนักแห้ง และยังมีโปรตีนมากกว่าพืชบางชนิด อย่างเช่น พืชตระกูลถั่ว (Ciferri, 1983) เป็นต้น สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสงสร้างอาหารเองได้ เนื่องจากสาหร่ายมีสารสีหรือรงควัตถุที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงกระจายอยู่ภายในเซลล์ หรืออาจกระจายอยู่ในไซโตรพลาสซึม โดยรงควัตถุที่พบในสาหร่ายแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม

1. คลอโรฟิลล์ (Chlorophylls) มีทั้งหมด 4 ชนิด คือ Cholorophyll a, b, c และ d โดย Chlorophyll-a จะพบในสาหร่ายทุกชนิด ส่วน Chlorophyll ชนิดอื่นๆ จะพบในสาหร่ายแต่ละชนิด

2. แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) มีประมาณทั้งหมด 1.7 มิลลิกรัมของน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วย

2.1 แคโรทีน (Carotene) เป็นรงควัตถุที่ให้สีส้ม

2.2 แซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) เป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลือง

3. ไฟโคบิลิน (Phycobilin) เป็นรงควัตถุที่พบเฉพาะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีแดงเท่านั้นประกอบด้วย

3.1 ไฟโคเออริทนิน (Phycoerythrin) เป็นรงควัตถุที่ให้สีแดง

3.2 ไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) เป็นรงควัตถุที่ให้สีน้ำเงิน

3.3 อัลโลไฟโคไซยานิน (Allophycocyanin) เป็นรงควัตถุที่ให้สีน้ำเงิน

โดยคลอโรฟิลล์ จะเป็นรงควัตถุหลักในการสังเคราะห์แสง ส่วนแคโรทีนอยด์และไฟโคบิลินเป็นรงควัตถุเสริม (Accessory pigment) เป็นการสังเคราะห์แสง ปริมาณรงควัตถุในเซลล์ทำให้สาหร่ายมีสีที่แตกต่างกันไป ซึ่งสาหร่ายแต่ละชนิดมีรงควัตถุที่แตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ ซึ่งปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนในสาหร่ายสไปรูลิน่ามีมากกว่าแหล่งอาหารชนิดอื่น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนกับอาหารทั่วไป ที่ว่ามีโปรตีนสูง เช่น เนื้อวัว ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ถั่วเหลือง ไข่ เป็นต้น ส่วนกรดอะมิโนที่จำเป็นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแหล่งอาหารอื่น ก็มีลักษณะเหมือนกัน และที่สำคัญปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิดมีมากกว่าปริมาณมาตรฐานของ FAO อีกทั้งสาหร่ายสไปรูลิน่ายังมีเปอร์เซ็นต์ไขมันระหว่าง 2.0 - 7.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งในไขมันในสาหร่ายสไปรูลินาส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะกรดไอโนลิอิก (Linoleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดที่จำเป็นต่อปลา (Venkataraman, 1983) ซึ่งสภาวะแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายมีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์ไขมันและกรดไขมันของสาหร่ายสไปรูลิน่า ปัจจัยที่มีความสำคัญ ในการควบคุมการสังเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณสารอาหาร เช่น ไนโตรเจน เมื่อปริมาณไนโตรเจนในอาหารลดลงหรือหมดไป ปริมาณไขมันในเซลล์สาหร่ายก็จะลดลงภายในเวลา 2 - 3 วัน (ศิริพันธ์, 2540) และหากเปรียบเทียบสารอาหารที่นิยมนำมาทำอาหารเสริมและธัญพืช ได้ข้อมูลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบสารอาหารที่นิยมนำมาทำอาหารเสริมและธัญพืช

สารอาหาร	Spirulina algae	Chlorellab algae	Aphaniz algae	Barley grass	wheat grass
โปรตีน	63%	58%	58%	25%	25%
คาร์โบไฮเดรต	18%	23%	7%	54%	54%
ไขมัน	5%	9%	6%	4%	4%
เถ้า	9%	5%	23%	12%	12%
ความชื้น	5%	5%	6%	5%	5%
วิตามิน (ต่อ 10 กรัม)					
เบต้า แคโรทีน	23000 IU	5550 IU	13340 IU	5000 IU	5000 IU
วิตามิน C	0.5 mg	1 mg	5 mg	31 mg	31 mg
วิตามิน E	1 IU	0.1 IU	-	3 IU	3 IU
วิตามิน B1	0.31 mg	0.17 mg	0.03 mg	0.03 mg	0.03 mg
วิตามิน B2	0.35 mg	0.43 mg	0.25 mg	0.2 mg	0.2 mg
วิตามิน B5	1.46 mg	2.38 mg	0.65 mg	0.75 mg	0.75 mg
วิตามิน B6	80 mcg	140 mcg	67 mcg	128 mcg	128 mcg
วิตามิน B12	32 mcg	13 mcg	32 mcg	3 mcg	3 mcg
โฟลาซิน	1 mcg	2.7 mcg	-	108 mcg	108 mcg
ไบโอดีน	0.5 mcg	19 mcg	-	11 mcg	11 mcg
กรดเพนโทเธนิก	10 mcg	130 mcg	-	240 mcg	240 mcg
อิโนซิทอล	6 mcg	13 mcg	-	-	-
รงควัตถุ (ต่อ10 กรัม)					
ไฟโคไซยานิน	1500 mg	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ
คลอโรฟิลล์	115 mg	280 mg	300 mg	55 mg	55 mg
คาโรทีนอยด์	37 mg	-	-	-	-
กรดไขมัน (ต่อ 10 กรัม)					
กรดแกมมาไลโนแลนิก	135 mg	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ
ไกโคไลปิด	200 mg	-	-	-	-
ซัลโฟไลปิด	10 mg	-	-	-	-

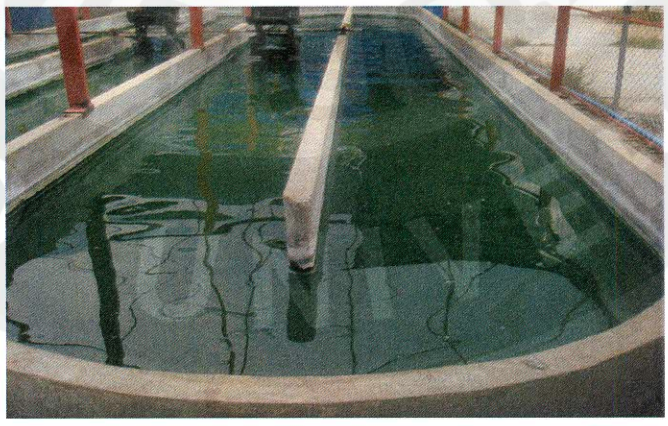
ตารางที่ 1 (ต่อ)

สารอาหาร	Spirulina algae	Chlorellab algae	Aphaniz algae	Barley grass	wheat grass
แร่ธาตุ (ต่อ 10 กรัม)					
แคลเซียม	100 mg	22 mg	140 mg	52 mg	52 mg
เหล็ก	15 mg	13 mg	6 mg	6 mg	6 mg
แมกนีเซียม	40 mg	32 mg	16 mg	10 mg	10 mg
โซเดียม	60 mg	0 mg	0 mg	3 mg	3 mg
โปตัสเซียม	120 mg	90 mg	100 mg	320 mg	320 mg
ฟอสฟอรัส	90 mg	90 mg	-	52 mg	52 mg
สังกะสี	0.3 mg	7 mg	0.3 mg	-	-
แมงกานีสี	0.5 mg	-	0.3 mg	0.5 mg	0.5 mg
ทองแดง	120 mcg	10 mcg	60 mcg	1.0 mcg	1.0 mcg
โครเมียม	28 mcg	-	60 mcg	200 mcg	200 mcg

ที่มา: ดัดแปลงจาก Robert Henrikson (1989)

5. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

บ่อเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ. เชียงใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 3 ผลผลิตส่วนมากเน้นไปใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 3 บ่อเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

1. เตรียมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดในบ่อซีเมนต์ที่ระดับความสูง 7.5 เซนติเมตร

2. เตรียมสูตรอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง ทำการละลายสารอาหาร/ปุ๋ยที่ชั่งเตรียมไว้ทีละตัวให้ละลายแล้วจึงค่อยใส่ลงไปในบ่อ

3. วัดค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ด้วย pH meter หรือ pH paper (กระดาษลิตมัส) ถ้าค่า pH ไม่ได้อยู่ในช่วง 10 ± 0.5 ให้ทำการปรับค่า pH ด้วยโซดาไฟ (NaOH) 6 N (240 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร) โดยค่อยๆ เท NaOH ลงไปในน้ำ พร้อมวัดค่า pH ให้มีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าวทิ้งไว้

4. เติมหัวเชื้อสาหร่ายสไปรูลินา (จากการเพาะขยายในระดับห้องปฏิบัติการ) ที่เตรียมไว้ซึ่งควรมีค่า Optical density (OD) เท่ากับ 1 ลงในน้ำที่ละลายสารอาหารและปรับค่า pH เรียบร้อยแล้ว โดยเติมหัวเชื้อสาหร่ายในอัตราส่วน 30 % ของน้ำในบ่อ หรือในอัตราส่วน 1 : 4 ถึง 1 : 5 หรือเติมหัวเชื้อสาหร่ายลงไปแล้วให้มีค่า OD เริ่มต้นเท่ากับ 0.5 เป็นต้นไป

5. เติมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดลงไปให้ได้ระดับความสูง 15 เซนติเมตร

6. เพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 7-14 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ระหว่างนี้มีการเติมระบบลมหรือเครื่องตีน้ำลงไปในบ่อเพื่อป้องกันการตกตะกอน ซึ่งน้ำมีการหมุนวนทั่วทั้งบ่อแต่ต้องไม่แรงเกินไป

7. ตรวจวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่าโดยวัดค่า OD ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ดังแสดงในภาพที่ 4 ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร หรือเทียบกับแถบสีเทียบค่า OD ทุกวัน จนเพาะเลี้ยงได้ครบ 7 - 14 วัน หรือมีค่า OD เท่ากับ 1.0 ± 0.05เป็นต้นไป จึงทำการเก็บเกี่ยวสาหร่าย

ภาพที่ 4 เครื่อง Spectrophotometer

8. การเก็บเกี่ยวสาหร่ายแบบต่อเนื่อง การเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาทำได้โดยการดูดน้ำหรือตักน้ำสาหร่ายจากบ่อ เทลงบนผ้าไหมสกรีนดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) กรองเอาเซลล์เนื้อสาหร่าย

(สาหร่ายสด) ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) ขนาดตา 120 ไมโครเมตร ทั้งนี้จะกรองสาหร่ายเพียง 80 % เหลือปริมาตรน้ำสาหร่ายในบ่อเพาะประมาณ 20 %

(ก) (ข)

ภาพที่ 5 การกรองเพื่อการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายและสาหร่ายสไปรูลิน่าสด
(ก) การกรองเพื่อการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่าย
(ข) สาหร่ายสไปรูลิน่าสด

9. นำน้ำสาหร่ายที่เหลือจากการกรองผ่านผ้ากรองหรือผ้าไหมสกรีน ขนาด 30 ไมโครเมตร แล้วเวียนกลับนำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบต่อเนื่อง โดยเติมลงไปในบ่อเดิมที่มีปริมาตรน้ำสาหร่ายเหลือ 20 % แล้วเติมสารอาหารตามสูตรอาหารตั้งต้น แต่ให้คำนวณปริมาณเพียง 50 % ของปริมาตรน้ำทั้งหมด แล้วเพิ่มระดับน้ำให้ได้ระดับเดิม คือ 15 เซนติเมตร

10. วัดและปรับค่าความเป็นกรด - ด่าง ให้อยู่ในช่วง 10 ± 0.5 แล้วเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าต่อไปอีก 7 วัน ก็สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายครั้งต่อไปได้

6. การวัดการเจริญเติบโต

ตรวจวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยวัดค่า OD จากเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 nm ทุกวันจนเพาะเลี้ยงได้ครบ 7-14 วัน หรือมีค่า OD เท่ากับ 1.0 ± 0.05 และคำนวณอัตราการเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ดังสมการที่ 1

อัตราการเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate: μ)

$$\mu = \frac{\ln x_2 - \ln x_1}{t_2 - t_1} \qquad (1)$$

เมื่อ x คือ จำนวนเซลล์

t คือ หน่วยเวลา

7. การหาคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่า

คุณค่าทางโภชนาการหรือองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูลิน่านั้น ถือได้ว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะนำสาหร่ายสไปรูลิน่าไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ หรืออาหารมนุษย์ เป็นต้น ในบทนี้จะยกตัวอย่างวิธีวิเคราะห์ค่าโปรตีน และไขมัน ซึ่งคุณค่าทางโภชนาการเป็นคุณค่าหลักที่มีอยู่ในตัวของสาหร่ายสไปรูลิน่า

8. การวิเคราะห์หาโปรตีน

วิธีการทดลองตามวิธีของ Kjeldahl method (AOAC, 2000)

สารเคมี

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา ของ Kjeldahl: ใช้โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 9 ส่วนผสมกับคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) 1 ส่วน
2. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
3. สารละลาย 40% โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. สารละลาย 0.2 N กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
5. 4% กรดบอริก (H_3BO_3)
6. สารละลายตัวบ่งชี้: ผสมสาร methyl red (ใน 95% เอทานอล) 100 ml กับสาร Bromocresol green 0.2% (ใน 95% เอทานอล) 200 ml

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5-1.0 กรัมใส่ลงใน Digestion flask
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาของ Kjedahl 5 กรัม และเติม H_2SO_4 เข้มข้น 200 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. เตรียมหลอดทดลองที่มีสารเคมีดังกล่าวข้างต้นยกเว้นสารตัวอย่าง แล้วนำมาวางให้อยู่ในตำแหน่งที่เอียงและให้ความร้อนอ่อนๆ จนไม่เกิดฟอง
4. นำตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 60 มิลลิลิตรอย่างระมัดระวัง
5. นำหลอดที่เตรียมไว้แช่ในกรด แล้วหมุนหลอดทดลองเพื่อทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นให้ความร้อนจน NH_3 ถูกกลั่นออกมา
6. นำสารละลายมาไตเตรตกับสารละลาย NaOH

คำนวณเปอร์เซ็นต์โปรตีนได้จากสมการที่ 2

$$\% \text{ โปรตีน} = \frac{(A - B) \times N \times 14.007 \times 6.25}{W} \qquad (2)$$

เมื่อ

A คือ ปริมาตร (ml) ของ HCl 0.2 N ที่ใช้ไตเตรตสารละลายตัวอย่าง

B คือ ปริมาตร (ml) ของ HCl 0.2 N ที่ใช้ไตเตรตสารละลายจาก Blank

N คือ ภาวะปกติของ HCl

W คือ น้ำหนัก (g) ตัวอย่างอาหารที่ใช้วิเคราะห์

9. การวิเคราะห์หาไขมัน

วิธีการทดลองตามวิธีของ Soxhlet extraction (AOAC, 2000)

สารเคมี

1. Petroleum ether

วิธีการวิเคราะห์

1. นำขวดก้นแบนไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

2. ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3-5 กรัม บนกระดาษกรอง ทำการชั่งห่อตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง แล้วใส่ลงใน Thimble แล้วปิดด้วยสำลีบางๆ นำ Thimble ไปใส่ใน Soxhlet เข้ากับเครื่องควบแน่น

3. เติม Petroleum ether 250 ml เติมลงในขวดก้นแบน นำมาต่อกับ Soxhlet และเครื่องให้ความร้อน

4. เปิดระบบน้ำให้ผ่านเครื่องควบแน่น และเปิดเครื่องให้ความร้อน ให้ความร้อนตัวอย่างประมาณ 14 ชั่วโมง

5. ระเหยตัวทำละลายโดยใช้คอนเดนเซอร์สุญญากาศ

6. นำขวดก้นแบนมาอบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตัวทำละลายระเหยสมบูรณ์และขวดแห้งสนิท

7. หลังจากการอบแห้งนำขวดก้นแบนที่อบเรียบร้อยแล้วมาวางไว้ให้เย็นในโถอบแห้ง ทำการชั่งน้ำหนักและจดบันทึก

คำนวณเปอร์เซ็นต์ไขมันจากสมการที่ 3

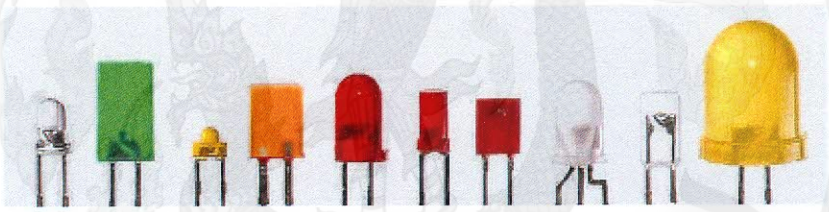
$$\text{เปอร์เซ็นต์ไขมัน} = \frac{\text{Weight of fat}}{\text{Weight of sample}} \times 100 \qquad (3)$$

ไอโอดเปล่งแสง

1. ความรู้ทั่วไป

ไอโอดเปล่งแสง (Light-emitting diode) หรือเรียกว่าหลอดไฟ LED เป็นชิ้นส่วนอิเลคทรอนิคส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปล่งแสงสว่างเมื่อให้กระแสไฟผ่านตัว แสงที่เกิดขึ้นเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำภายในตัวหลอด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Electroluminescence ซึ่งแตกต่างจากหลอดทั่วไปซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าในการจุดไส้หลอด เพื่อให้เกิดแสงสว่าง ผลคือตัวหลอดจะเกิดความร้อนเมื่อใช้งาน ในปัจจุบันยังสามารถผลิตแสงชนิดพิเศษอินฟราเรด (Infrared) ได้ โดยประเภทนี้มีข้อดี คือมีอายุการใช้งานที่ยาวนานถึง 50,000 – 100,000 ชั่วโมง ประหยัดไฟฟ้า ใช้ไฟฟ้าเพียง 0.5 - 1 วัตต์

2. ประเภทของหลอดไฟ LED



ภาพที่ 6 รูปร่างของหลอดไฟ LED ที่มีขนาด สี และรูปทรงต่างกัน
ที่มา: Volar al amanecer (2008)

จากภาพที่ 6 แสดงถึงรูปร่างของหลอดไฟ LED ที่มีขนาด สี และรูปทรงต่างกัน โดยหลอด LED สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังนี้

1. หลอดไฟ LED แบบหลอดไฟกลมเคลือบสี มีขนาดเล็ก การทำงานของหลอดไฟ LED นั้นจะต่างกับหลอดมีไส้ทั่วไป เนื่องจากหลอดไฟ LED มีตัวหลอดที่ทำมาจากไดโอด ไม่มีการเผาไส้หลอด จึงไม่เกิดความร้อนในการทำงาน แสงสว่างที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนภายในสารกึ่งตัวนำ

2. หลอดไฟ LED แบบหลอดกลมแบบหลอดใส หรือหลอดไฟ LED แบบซุปเปอร์ไบท์ ลักษณะของตัวหลอดจะเหมือนกับหลอดไฟ LED แบบสีทั่วไป แต่ความแตกต่างของหลอดแบบซุปเปอร์ไบท์นี้ คือเป็นแบบใส ซึ่งจะไม่สามารถรู้สีได้จนกว่าจะป้อนไฟเข้าสู่ตัวหลอด เมื่อมีการทำงานของไดโอดตัวหลอดจะเปล่งแสงสีที่ถูกป้อนออกมา

3. หลอดไฟ LED แบบหลอดเหลี่ยม หลอดประเภทนี้จะมีหลักการทำงานและชนิดของสีเหมือนกับหลอดทั้ง 2 ที่กล่าวมาข้างต้น แต่ส่วนที่แตกต่างออกไปคือส่วนแสดงผล ส่วนตัวหลอดที่จะมีลักษณะเป็นตัวถังรูปสี่เหลี่ยม มีขา 4 ขา

4. หลอดไฟ LED แบบ Surface mounted diode mouse (SMD) ประกอบด้วยสามชิปเปล่งแสง ขนาดของชิป 50 x 50 มม. กำลังไฟ 0.24 วัตต์ต่อชิป มีขนาดเล็กและบางจึงเหมาะในพื้นแคบ พื้นที่จำกัด และเป็นหลอดที่มีอัตราส่วนการประหยัดไฟและให้ความสว่างมากกว่าหลอดไฟ LED 2 ขา หรือ LED 4 ขา

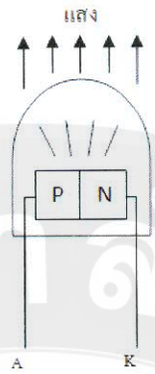
5. หลอดไฟ LED แบบ High-power (HPLEDs) เป็นนวัตกรรมใหม่ล่าสุดที่มาหลังหลอดไฟ LED Surface mounted มีขนาดตั้งแต่ 1 W – 100 W ใช้กระแสไฟ 320 mA, 350 mA, 700 mA, 900 mA แล้วแต่ขนาดของหลอด

3. ส่วนประกอบของหลอดไฟ LED

หลอดไฟ LED มีส่วนประกอบคือสารกึ่งตัวนำตัวฐาน และขาสำหรับใช้ต่อกับวงจรทั้งหมดถูกเคลือบด้วยวัสดุอีพ๊อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin) เพื่อป้องกันชิ้นส่วนภายในตัวหลอดไฟ LED ตัวสารกึ่งตัวนำในหลอดไฟ LED ประกอบด้วยสารชนิด P และ N และนำสารทั้งสองชนิดประกอบติดกัน เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้ายังชิ้นส่วนทั้งสองจะเกิดปฏิกิริยาที่รอยต่อ ทำให้เกิดแสงขึ้น วัสดุอีพ๊อกซี่ที่หุ้มตัวสารกึ่งตัวนำมีลักษณะโปร่งใสมีลักษณะเหมือนเลนส์ในการกำหนดทิศทางการส่องสว่างให้เป็นลำแสง ชิ้นส่วนทั้งหมดภายในถูกยึดอย่างถาวร แสงสว่างที่ได้จากหลอดไฟ LED มีความแตกต่างจากแสงที่ได้จากหลอดแบบไส้หรือหลอดนีออน โดยหลอดไฟ LED กำเนิดแสงได้โดยไม่เกิดความร้อนเหมือนหลอดไส้แบบสุญญากาศอีกทั้งตัวหลอดไฟ LED ยังสามารถป้องกันการกระทบกระแทกได้ดีกว่า เพราะเป็นวัสดุแข็ง อายุการใช้งานจึงยาวนานกว่า

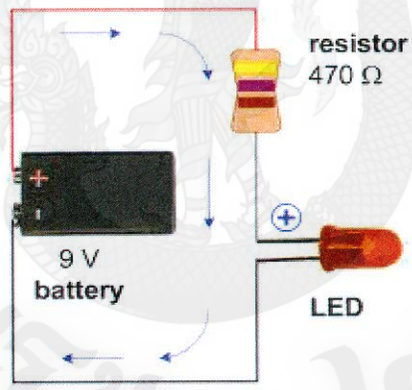
4. หลักการทำงานของหลอดไฟ LED

หลอดไฟ LED มีโครงสร้างประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด (สารกึ่งตัวนำชนิด N และสารกึ่งตัวนำชนิด P) ประกบเข้าด้วยกัน มีผิวข้างหนึ่งเรียบคล้ายกระจกเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวหลอดไฟ LED โดยจ่ายไฟบวกให้ขาแอโนต (A) จ่ายไฟลบให้ขาแคโทด (K) ทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงขึ้น จนสามารถข้ามรอยต่อจากสารชนิด N ไปรวมกับสารชนิด P การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ PN ทำให้เกิดกระแสไหล และทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป และคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแสง



ภาพที่ 7 โครงสร้างของหลอดไฟ LED

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในหลอด จะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อ ได้รับแรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสตรง ดังนั้นการนำหลอดไฟ LED มาใช้งานต้องมีการต่อวงจรที่สามารถทำงานได้นั้น ดังแสดงในภาพที่ 8



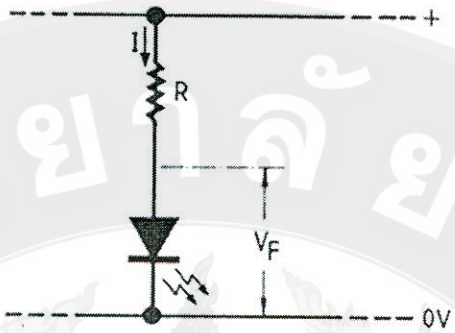
ภาพที่ 8 ลักษณะการต่อวงจรหลอดไฟ LED
ที่มา: อนุโรจน์ (2556)

แรงดันและกระแสไฟฟ้าใช้งานของหลอดไฟ LED ในการนำมาใช้งานจะต้องทราบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หลอดไฟ LED สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยปกติแล้วหลอดไฟ LED จะมีค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้าดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าใช้งาน 2 – 5 โวลต์ (V)
2. กระแสไฟฟ้าใช้งาน 5 – 20 มิลลิแอมแปร์ (mA)

ดังนั้นจึงต้องต่อตัวต้านทานอนุกรมกับหลอดไฟ LED และคำนวณหาค่าความต้านทาน เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง 5 – 20 มิลลิแอมป์แปร์ แรงดันตกคร่อมหลอดไฟ LED ประมาณ 1.2

ถึง 5 โวลต์ (V_F) การแสดงวงจรคำนวณหาค่าแรงดันและกระแสในใช้งานหลอดไฟ LED แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 วงจรคำนวณหาค่าแรงดันและกระแสในใช้งานหลอดไฟ LED
ที่มา: อนุโรจน์ (2556)

สำหรับการหาค่าความต้านทานของตัวต้านทาน จะใช้กฎของโอห์มในการคำนวณตามสมการที่ 5

$$R = \frac{E}{I} \tag{5}$$

โดย E = V_F = แรงดันตกคร่อมหลอดไฟ LED (V)

I = กระแสไฟฟ้าใช้งานของหลอดไฟ LED (mA)

ซึ่งความสว่าง (Illuminance) ของผิวใดๆ คือค่าความสว่างที่ตกบนพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และค่ากำลังส่องสว่างจะสามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$I = \frac{P}{A} \tag{6}$$

โดย I = กำลังส่องสว่าง (แคนเดลลา, cd)

P = กำลังของหลอดไฟ (Watt)

A = พื้นที่ผิวที่แสงตกกระทบ (m^2) = $4\pi r^2$

ถ้าพื้นผิวที่อยู่ห่างจากหลอดไฟที่มีกำลังส่องสว่าง 1 แคลเดลลา เป็นระยะทาง 1 เมตร ความเข้มแห่งการส่องสว่างจะมีค่า 1 ลักซ์ (lux) โดยความเข้มแห่งการส่องสว่างจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสองตามสมการที่ 7

$$E = \frac{I}{R^2} \tag{7}$$

โดย E = ความสว่าง (lux)

I = กำลังส่องสว่าง (แคนเดลลา, cd)

R = ระยะห่างจากหลอดไฟถึงผิวที่พิจารณา (m)

5. ช่วงความยาวคลื่นของสี

จากแคตตาล็อกของ Lumiled ในปี 2012 แสดงถึงช่วงความยาวคลื่นและประสิทธิภาพการรับรู้ของแต่ละสีดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ช่วงความยาวคลื่นของแต่ละสี

สี	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (lm/W)
แดง	$620 < \lambda < 645$	72
แดงส้ม	$610 < \lambda < 620$	98
เขียว	$520 < \lambda < 550$	93
ฟ้า	$490 < \lambda < 520$	75
น้ำเงิน	$460 < \lambda < 490$	37

ที่มา: ดัดแปลงจาก Philipslumileds (2012)

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิริพร และคณะ (2553) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในสูตรอาหารน้ำหมักต้นทุนต่ำ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด Completely randomized design: CRD แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 7 ทรีตเมนต์ แต่ละทรีตเมนต์ แบ่งออกเป็น 3 ซ้ำ คือ ทรีตเมนต์ที่ 1 สูตรอาหารซาร์รุคปรับปรุง (ชุดควบคุม) ทรีตเมนต์ ที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 คือ น้ำหมักมูลสุกร 20%, น้ำหมักมูลไก่ 20%, น้ำหมักมูลวัว 20%, น้ำหมักฟางข้าว 20%, น้ำหมักมูลม้า 20% และน้ำหมักมูลแกะ 20% ตามลำดับ โดยทำการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 10 วัน ให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง และตรวจวัดประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและนับจำนวนเซลล์สาหร่ายสไปรูลิน่าทุกวัน ผลการศึกษาพบว่าจำนวน

เซลล์เฉลี่ยและความหนาแน่น OD เฉลี่ย ของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่เพาะเลี้ยงใน สูตรอาหารน้ำหมักแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนอัตราการเติบโตจำเพาะเฉลี่ยของสาหร่ายสไปรูลินาในสูตรอาหารน้ำหมักแต่ละทรีตเมนต์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

Chen et al. (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับไดโอดเปล่งแสง (LED) ที่มีความยาวคลื่นแสงต่างๆ (สีแดง, สีเหลือง, สีเขียว, สีฟ้าและสีขาว) และระดับต่างๆ ของความเข้มของแสง 750, 1500 และ 3000 μmol $m^{-2}s^{-1}$ เพื่อที่นำไปศึกษาผลกระทบของแสง ที่เกี่ยวของกับการผลิตคลอโรฟิลล์เอ (Chl) และไฟโคไซยานิน (Phy) ของสาหร่ายเกลียวทอง โดยแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเคลื่อนไหวของการเจริญเติบโตของสาหร่ายและการสร้างเม็ดสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่หลากหลาย และได้ข้อสรุปว่าหลอดไฟ LED สีแดงทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายดีที่สุด และสำหรับแสงสีเหลืองจะช่วยให้อัตราการผลิตของ Chl เพิ่มขึ้น ที่ความเข้มของแสง 750 ถึง 1500 μmol $m^{-2}s^{-1}$ และสีฟ้าอ่อนให้ค่า Chl และ Phy มากที่สุด ที่ความเข้มของแสง 3000 μmol $m^{-2}s^{-1}$

Danesi et al. (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการลดความเข้มของแสงกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าโดยใช้ปุ๋ยยูเรีย และ KNO_3 เป็นแหล่งไนโตรเจน และได้ใช้การลดของความเข้มของแสงเท่ากับ 2-5 คูคลักซ์ เป็นเวลา 9 และ 13 วันของการเพาะเลี้ยง ซึ่งการวิจัยพบว่าคลอโรฟิลล์สามารถเพิ่มขึ้นถึง 29%

Das et al. (2011) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตชีวมวลและกรดไขมันเมทิลเอสเตอร์ (FAME) ที่ได้มาจากไขมันภายในเซลล์ของสาหร่าย Nannochloropsis sp. ภายใต้เงื่อนไขที่มีความเข้มแสงที่แตกต่างกัน และ Nannochloropsis sp. ถูกปลูกในสังเคราะห์แสงและ mixotrophic (กลีเซอรอลเป็นแหล่งคาร์บอน) โดยใช้หลอดไฟ LED ทั้งหมด 4 สี คือสีแดง สีเขียวและ สีฟ้าและหลอดไฟ LED สีขาว ซึ่งได้สรุปได้ว่าอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด สำหรับหลอดไฟ LED แต่ละสี คือ สีฟ้า > สีขาว > สีเขียว > สีแดง โดย Nannochloropsis sp. มีการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.64 และ 0.66 d^{-1} และองค์ประกอบของกรดไขมันภายในเซลล์ Nannochloropsis sp. ที่ระหว่างความยาวคลื่นแตกต่างกันมีปริมาณกรดไขมันไม่แน่นอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับหลอดไฟ LED สีเขียวที่ความยาวคลื่น 550 nm มีอัตราปริมาตร FAME สูงสุดถึง 20.45% และ 15.11% ของน้ำหนักมวลแห้ง สำหรับหลอดไฟ LED สีฟ้าที่ความยาวคลื่น 470 nm มีสามารถผลิตมวลได้สูงสุด และสามารถคำนวณได้ว่าการหากมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มของแสงในช่วงวงจรการเจริญเติบโตของเซลล์ สามารถช่วยประหยัดพลังงานที่ส่องสว่างอย่างต่อเนื่องเกือบ 20% สำหรับความเข้มของแสงที่ได้รับ

Seyedeh and Nik (2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่ายสองสายพันธุ์ระหว่างพันธุ์ Chlorella vulgaris และ Gloeothece membranacea โดยถูกเพาะเลี้ยงในระบบปิด (Photobioreactors) ขนาดเล็กภายใต้เงื่อนไขการเลี้ยงที่แตกต่างกัน แสงที่ได้รับมีความ

หนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งในระบบ Photobioreactors ใช้แสงสีฟ้า, สีเขียว, สีเหลืองสีส้มและสีแดง จากการทดลองพบว่าแสงสีแดงมีการผลิตมวลที่เพิ่มขึ้นทั้งสองสายพันธุ์ และแสงสีเขียวสามารถช่วยในการเพิ่มการผลิตคลอโรฟิลล์ใน C. vulgaris แต่ใน G. membranaceaได้รับผลน้อยลง

Wang et al. (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับไดโอดเปล่งแสงชนิดต่างๆ ที่มีความยาวคลื่นแสงและความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน เพื่อดูผลกระทบของแสงในสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยได้ศึกษาหลอดไฟ LED 5 สี ได้แก่ สีขาว สีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีฟ้า และได้ข้อสรุปของการวิจัยในการเพาะเลี้ยงของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยแสง พบว่าหลอดไฟ LED สีแดงแสดงให้เห็นอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.40 วัน$^{-1}$ ภายใต้เงื่อนไข 3000 μmol m^{-2} s^{-1} และหลอดไฟ LED สีฟ้าแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพน้อยที่สุด ดังนั้นจึงแก้ไขแบบโมเดล Monod ให้พอดีกับอัตราการเติบโตที่เฉพาะเจาะจงของสาหร่ายสไปรูลิน่าจากแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน

Oliveira et al. (1999) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบชีวมวลของสาหร่ายเกลียวทอง ระหว่างสายพันธุ์ Spirulina maxima และ Spirulina platensis มีการควบคุมอุณหภูมิและการกวนในการเลี้ยง โดยให้แสงอย่างต่อเนื่องที่มีการผลิตเซลล์สูงสุด 2.4 g l^{-1} และให้อุณหภูมิสูงกว่า 25 °C และได้ข้อสรุปของการวิจัยในครั้งนี้ว่า หากอุณหภูมิของสาหร่ายต่ำที่อุณหภูมิ 15 -20 °C จะทำให้ปริมาณของโปรตีนลดลง ในขณะที่การสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตจะเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของกรดไลโนเลนิ-γ มีความแตกต่างถึง 11-16% สำหรับ S. maxima และ 12-14% สำหรับ S. platensis ในอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต

Xue et al. (2011) ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน เพื่อนำข้อมูลใช้สำหรับการออกแบบและการดำเนินงานในระบบ Photobioreactor โดยได้ออกแบบชั้นที่มีความหนา 10 mm เป็นอุปกรณ์สำหรับระบบ Photobioreactor กับระบบการสลับแสง/มืด (L/D) ซึ่งในการตรวจสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายเกลียวทองมีเงื่อนไข คือ (1) ให้แสงอย่างต่อเนื่องในช่วงความเข้มของแสง 1.00 - 77.16 $mWcm^{-2}$ (2) ให้แสงอย่างต่อเนื่องในความถี่ในช่วงกลาง 0.01 - 20 Hz และได้ข้อสรุปของการวิจัยครั้งนี้ว่าช่วงความเข้มของแสง 0 – 3.5 $mWcm^{-2}$ มีประสิทธิภาพการเจริญเติบโตสูงสุด

สรุปกรอบแนวคิด

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ได้กล่าวไปเบื้องต้น ทำให้ทราบแนวทางในการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งสามารถทำการสรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นตารางเปรียบเทียบการศึกษาต่างๆ ของผู้วิจัยเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการออกแบบการทดลองต่อไปโดยสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่องานวิจัย	ผู้ทำวิจัย	สายพันธุ์สาหร่าย	ตัวแปรที่ศึกษา	ชนิดหลอด
การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า (Spirulina platensis) ในสูตรอาหารน้ำหมักต้นทุนต่ำ	ศิริพร และคณะ	- Spirulina platensis	- ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต - จำนวนเซลล์สาหร่าย	ไม่มี
Modeling on chlorophyll a and phycocyanin production by Spirulina platensis under various light-emitting diodes	Hua-Bing Chen et al.	- Spirulina platensis	- ความยาวคลื่นแสง - ความเข้มของแสง - คลอโรฟิลล์เอ - ไฟโคไซยานิน	LED
Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by Spirulina platensis	E.D.G. Danesi et al.	- Spirulina platensis	- ความเข้มของแสง - คลอโรฟิลล์	Fluorescent
Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light	Probir Das et al.	- Nannochloropsis sp.	- กรดไขมันเมทิลเอสเตอร์ (FAME) - การสังเคราะห์แสง - ผลผลิตมวลชีวภาพ	LED

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	ผู้ทำวิจัย	สายพันธุ์สาหร่าย	ตัวแปรที่ศึกษา	ชนิดหลอด
Luminescent photobioreactor design for improved algal growth and photosynthetic pigment production through spectral conversion of light	Seyedeh Fatemeh Mohsenpour and Nik Willoughby	- Chlorella vulgaris - Gloeothece membranacea	- การเจริญเติบโต - คลอโรฟิลล์	LED
Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*	Chih-Yu Wang et al.	- Spirulina platensis	- ความยาวคลื่นแสง - ความเข้มแสง - อัตราการเจริญเติบโต	LED
Growth and chemical composition of Spirulina maxima and Spirulina platensis Biomass at different temperatures	M.A.C.L. de Oliveira et al.	- Spirulina platensis - Spirulina maxima	- อุณหภูมิ - การเจริญเติบโต - ความเข้มข้นของกรดไลโนเลนิ - γ	Fluorescent
Growth of Spirulina platensis enhanced under intermittent illumination	Shengzhang Xue et al.	- Spirulina platensis	- การเจริญเติบโต - ความเข้มของแสง	LED

ดังนั้นองค์ความรู้ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัย ทำให้ทราบถึงแนวทางในการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ คือ การคำนวณหารประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโต การคำนวณหาจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ความเข้มของแสงและความยาวคลื่นแสงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า รวมถึงวิธีการหาค่าของรงควัตถุ เช่น คลอโรฟิลล์และไฟโคไซยานิน เป็นต้น

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยโดยขั้นตอนแรกคือ ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED ซึ่งข้อมูลจากการทดลองจะถูกใช้ในการดำเนินงานขั้นตอนที่สอง คือ การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าแบบปกติและแบบใช้ร่วมกับหลอดไฟ LED เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า ด้วยอิทธิพลของหลอดไฟ LED

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. สาหร่ายสไปรูลิน่า จากคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
2. เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น CP3202S (Sartorius AG, Germany) 1 เครื่อง
3. เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Labomed รุ่น Spectro SC 1 เครื่อง
4. เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Milwaukee รุ่น pH-52 1 เครื่อง
5. กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX51 1 เครื่อง
6. กระบะพลาสติกแบบเปิดด้านเดียว ปริมาตร 250 ลิตร 2 กระบะ
7. ตู้กระจก ขนาด 15 x 25 x 15 เซนติเมตร 6 ตู้
8. ปั๊มลมทางเดียว 6 เครื่อง
9. ปั๊มน้ำขนาด 900 ลิตรต่อชั่วโมง 4 เครื่อง
10. LED RGB strip ribbon 5050 12v 14.4W 1 เส้น
11. LED Daylight strip ribbon 5050 12v 14.4W 1 เส้น
12. LED Warm White strip ribbon 5050 12v 14.4W 1 เส้น
13. LED Remote controller 6A IR 24Key 1 เครื่อง
14. หม้อแปลง 12V Adapter 5A 5 เครื่อง
15. ขวดแก้วขนาดเล็กมีฝาปิด 6 ขวด

การทดลองและการวิเคราะห์

การทำวิจัยการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่าย สไปรูลิน่า ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การจัดเตรียมสาหร่ายสไปรูลิน่า

สาหร่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นสาหร่ายสไปรูลิน่า จาก คณะประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ จากฐานเรียนรู้สาหร่ายสไปรูลิน่า มาเพาะเลี้ยงเพื่อทำการทดลอง เพื่อให้สาหร่ายที่ใช้ในการทดลองมีสภาวะใกล้เคียงกับสาหร่ายของฐานเรียนรู้ จึงได้ศึกษาและทำการเก็บข้อมูลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าจากผู้เชี่ยวชาญของฐานเรียนรู้ และนำมาประยุกต์ใช้ ในกระบะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่มีขนาดกระบะเลี้ยงปริมาตร 250 ลิตร จำนวน 2 กระบะ

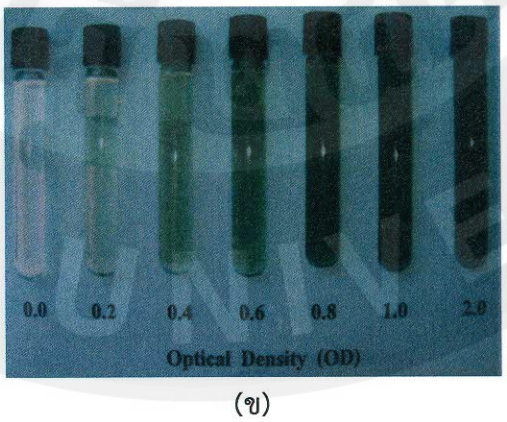
ภาพที่ 10 ลักษณะของกระบะพลาสติกเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

วิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ใช้ในการทดลอง เตรียมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดลงในบ่อเพาะเลี้ยงที่ระดับความสูง 7.5 เซนติเมตร (ได้น้ำปริมาณ 50 ลิตร) เตรียมสูตรอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง โดยทำการละลายกับน้ำสะอาดที่เตรียมไว้ ซึ่งสูตรอาหารประกอบด้วยสารละลายดังต่อไปนี้

โซเดียมไบคาร์บอเนต หรือ ผงฟู ($NaHCO_3$)	6.0 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร = 600 กรัม
โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)	1.5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร = 150 กรัม
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)	1.0 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร = 100 กรัม
โซเดียมคลอไรด์ หรือ เกลือแกง ($NaCl$)	1.0 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร = 100 กรัม
ปุ๋ย N : P : K (16 : 16 : 16)	0.6 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร = 60 กรัม

วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter โดย จะต้องให้ค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 9.5-10.5 หากค่า pH หากค่า pH ยังไม่ได้ให้ทำการปรับค่าโดยการเพิ่มโซดาไฟ (NaOH) 6 N (240 กรัมต่อน้ำสะอาด 1 ลิตร)โดยค่อยๆเทลงในน้ำพร้อมกับวัดค่าความทึบแสง จากนั้นเติมหัวเชื้อสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ได้จากห้องปฏิบัติการ นำหัวเชื้อสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่วัดค่าความหนาแน่นของเซลล์ (Optical density: OD) เท่ากับ 1 ลงในน้ำที่ละลายสูตรอาหารและปรับค่า pH เติมหัวเชื้อสาหร่ายในอัตราส่วนร้อยละ 30 ของน้ำในบ่อเลี้ยง หรือเติมหัวเชื้อสาหร่ายสไปรูลิน่า ลงไปในบ่อพลาสติกโดยควบคุมให้ค่า OD เริ่มต้นเท่ากับ 0.3 หลังจากนั้น 4-5 วันเติมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดลงไปในบ่อให้ได้อยู่ในระดับความสูง 15 เซนติเมตร (จะได้น้ำปริมาณ 100 ลิตร) ทำการเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกลางแจ้งโดยใช้เวลาเพาะเลี้ยงประมาณ 2 สัปดาห์ โดยมีเติมระบบหมุนวนและระบบออกซิเจนในบ่อเพื่อให้อากาศ และป้องกันการตกตะกอนของสาหร่าย ตรวจวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยทำการวัดค่า OD ทุกวันจนถึงช่วงการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลิน่า ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร หรือเทียบกับแถบสีเทียบค่า OD ดังแสดงในภาพที่ 11

(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 เครื่อง Spectrophotometer และแถบสีเปรียบเทียบค่า OD

(ก) เครื่อง Spectrophotometer

(ข) แถบสีเปรียบเทียบค่า OD

2. การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการให้แสงจากหลอดไฟ LED ในการทดลอง มีขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างหลอดเท่ากับ 3 เซนติเมตร

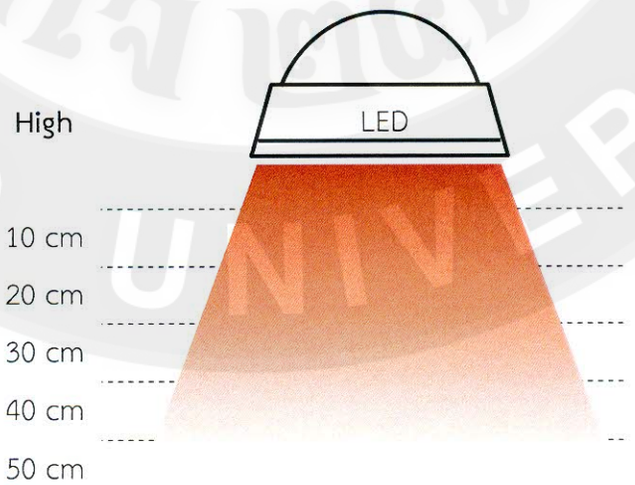
3. การวางแผนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ แผนการทดลองที่ 1 ศึกษาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า แผนการทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ คุณค่าทางโภชนาการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แผนการทดลองที่ 3 ศึกษาการออกแบบทางวิศวกรรมในเชิงแนวคิด เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีรายละเอียดของแผนการทดลองดังต่อไปนี้

1. แผนการทดลองที่ 1 ศึกษาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เพื่อศึกษาหาข้อแตกต่างของชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่ใช้ในการทดลอง โดยกำหนดสภาวะต่าง ๆ ดังนี้

1.1 ตัวแปรควบคุม ได้แก่ หลอดไฟ LED strip ribbon 5050 ขนาด 12v 14.4W

1.2 ตัวแปรต้น ได้แก่ ชนิดของหลอดไฟ มีทั้งหมด 5 ชนิด คือ หลอดไฟ LED ชนิด Warm White หลอดไฟ LED ชนิด Daylight หลอดไฟ LED ชนิด RGB สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน สามารถแบ่งความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ได้ 3 ความเข้มแสง คือ 52, 156 และ 260 lm/W และระยะห่างของหลอดไฟ LED โดยจะศึกษาระยะทั้งหมด 5 ความสูง คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 เซนติเมตร



ภาพที่ 12 ภาพหลอดไฟ LED และระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED

1.3 ตัวแปรตาม ได้แก่ ชนิดและความเข้มแสงของหลอด LED ที่แปรผันกับความสูง

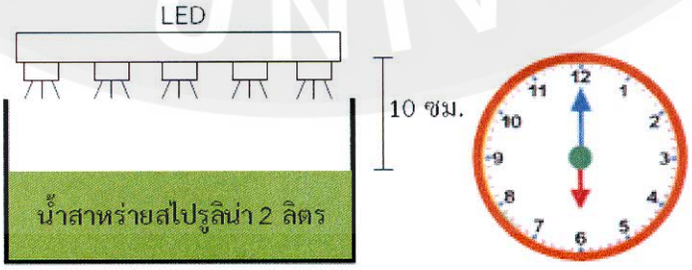
ตารางที่ 4 การวางแผนทดลองสำหรับศึกษาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า

high (cm)	Light intensity (μmol m^{-2} s^{-1})				
	LED Warm white	LED Daylight	LED Red	LED Green	LED Blue
10					
20					
30					
40					
50					

2. แผนการทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ คุณค่าทางโภชนาการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากแผนการศึกษาที่ 1 สามารถหาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในการทดลอง เพื่อนำไปเป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษาต่อ โดยตัวแปรที่จะศึกษามีการกำหนดสภาวะต่างๆ ดังนี้

2.1 ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาตรน้ำสาหร่ายสไปรูลิน่าที่ใช้เลี้ยงคือ 2 ลิตรต่อหนึ่งการทดลอง ระยะห่างของหลอดไฟ LED จากพื้นผิวน้ำ 10 เซนติเมตร ซึ่งชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ได้จากการทดลองที่ดีที่สุดในแผนการทดลองที่ 1 ค่า pH เท่ากับ 10 ± 0.5 และสูตรปริมาณอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

2.2 ตัวแปรต้น ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่เปิดหลอดไฟ LED มีทั้งหมด 4 ช่วงเวลา คือ 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง โดยจะเริ่มเปิดหลอดไฟ LED ตั้งแต่ 18.00 น. เป็นต้นไปดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การวางหลอดไฟ LED กับตู้การทดลองและการเริ่มเปิดหลอดไฟ LED

2.3 ตัวแปรตาม ได้แก่ ค่า OD ค่าชีวมวล ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ ดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยง และคุณค่าทางโภชนาการ

ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 6 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 14 วัน

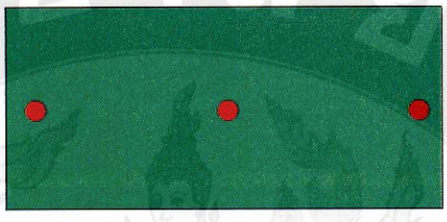
Day	OD_{560}					
	Control	Warm White	Daylight	Red	Green	Blue
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						

โดยทำการเก็บค่า OD ทุกวัน และหากครบระยะเวลาเก็บเกี่ยวประมาณ 14 วัน หรือค่า OD มีค่าประมาณ 1.2 $\pm$ 0.5 จะทำการหามวลแห้งเปรียบเทียบปริมาณของสาหร่าย แล้วนำการทดลองที่ดีที่สุดวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ ค่าไฟโคไซยานิน ค่าปริมาณโปรตีน และค่าปริมาณไขมัน

3. แผนการทดลองที่ 3 ศึกษาการออกแบบทางวิศวกรรมในเชิงแนวคิด เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดไฟ LED ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร โดยจะทำการปรับปรุงโรงเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายเดิม ซึ่งจากแผนการศึกษาที่ 1 และแผนการทดลองที่ 2 จะได้ชนิดของหลอดไฟ LED ความเข้มแสงของหลอดไฟ LED และช่วงระยะเวลาของการเปิดหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตในการทดลองในการปรับปรุงในครั้งนี้

4. การเก็บข้อมูล

วิธีการเก็บข้อมูล และค่าที่ต้องการในการทดลอง จะทำการเก็บตัวอย่างโดยการสุ่ม ซึ่งมีตำแหน่งในการเก็บ 3 จุด ดังแสดงในภาพที่ 14 แล้วสำหรับเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้งนั้น จะเก็บน้ำสาหร่ายสไปรูลิน่าลงในขวดแก้วขนาดเล็กที่มีฝาปิดมิดชิด โดยวิธีการเก็บข้อมูล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5



ภาพที่ 14 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลิน่า (มองจากด้านบน)

ตารางที่ 6 วิธีการเก็บข้อมูล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

สิ่งที่ต้องการ	วิธีการเก็บข้อมูล	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด
ค่าความหนาแน่นของเซลล์	เก็บตัวอย่างตามตำแหน่งทุกวัน	เครื่อง Spectrophotometer
การการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย	เก็บตัวอย่างหลังการเก็บเกี่ยว	กล้องจุลทรรศน์
มวลแห้ง	เก็บตัวอย่างหลังการเก็บเกี่ยว	ตาชั่งดิจิตอล
ค่าความเป็นกรด – ด่าง	วัดค่าความเป็นกรด – ด่าง ก่อนเริ่มเพาะเลี้ยง	เครื่อง pH meter

5. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การตรวจวัดประสิทธิการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยการวัดค่า OD ด้วยเครื่อง UV/vis spectrophotometer (Biochrom รุ่น S1200 ประเทศอังกฤษ) ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (nm) จากนั้นนำมาคำนวณหาชีวมวล (Biomass: B, g dry weight/L) ของสาหร่าย จะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (OD_{560}) ซึ่งสามารถใช้สมการเชิงเส้นในการทำนายดังสมการที่ 8

$$B = 0.42OD_{560} - 6.94 \times 10^{-4} \quad (8)$$

ค่าความเป็นกรด – ด่าง จะใช้เครื่อง pH meter ไปวัดตรงบริเวณเลี้ยงโดยการสุ่มตรวจ 3 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Milwaukee รุ่น pH-52

6. การคำนวณอัตราการเติบโตจำเพาะ

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายใช้ระยะเวลา 14 วัน หรือค่า OD มีค่าประมาณ 1.00 ± 0.05 และสามารถคำนวณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate: μ) ที่เพิ่มขึ้นของสาหร่ายสไปรูลิน่า ในสมการที่ 9

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{t_2 - t_1} \qquad (9)$$

เมื่อ N คือจำนวนเซลล์ (cells/mL) และ t คือหน่วยเวลา (days)

7. การหาคุณค่าของรงควัตถุ

การหาค่าคลอโรฟิลล์ (Chl) ทำตามวิธีของ Lee และ Shen และใช้สมการที่ 10 ในการหาค่าของมวลคลอโรฟิลล์

$$\text{Chl (mg/L)} = 16.5OD_{665} - 8.3OD_{650} \qquad (10)$$

เมื่อ OD_{665} และ OD_{650} คือค่าความหนาแน่นเซลล์ ของแสงที่ความยาวคลื่น 665 และ 650 nm ตามลำดับ

การหาค่าไฟโคไซยานิน (Phy) ได้ทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ Bennett และ Bogorad แล้วใช้สมการที่ 11 ในการหาค่าของมวลไฟโคไซยานิน

$$\text{Phy (g/L)} = \frac{OD_{615} - 0.474OD_{652}}{5.34} \qquad (11)$$

เมื่อ OD_{615} และ OD_{652} คือค่าความหนาแน่นเซลล์ ของแสงที่ความยาวคลื่น 615 และ 652 nm ตามลำดับ

8. แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของการเจริญเติบโต

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเจริญเติบโตของสาหร่าย สไปรูลิน่า เมื่อใช้แสงจากหลอด LED ซึ่งสามารถใช้แสดงเห็นถึงการเจริญเติบโตของสาหร่าย ดังสมการที่ 12

$$\frac{dB}{dt}=aB\left(1.0-\frac{B}{b}\right) \tag{12}$$

โดยสามารถจัดรูปสมการแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของการเจริญเติบโต ได้ดังสมการที่ 13

$$B(t)=\frac{B_0e^{at}}{1-(B_0/b)(1-e^{at})} \tag{13}$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่จากสมการทำนายการเจริญเติบโต และ B_0 คือชีวมวลเริ่มต้น (g dry weight/L)

9. ดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี

หลังจากการเก็บเกี่ยวชีวมวล ต้องมีการคำนวณค่าใช้จ่ายของพลังงานที่เสียไป ซึ่งสิ่งจำเป็นที่จะประเมินดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี (Indicators culture of LED light: I_{LED}, g dry weight/baht) สามารถหาได้จากสมการที่ 14

$$I_{LED}=\frac{B_n-B_0}{kT_nP} \tag{14}$$

โดยที่ k คือหน่วยการใช้ไฟฟ้า (baht/kWhr), T_n คือเวลาที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง (days), P คือพลังงานที่ให้หลอด LED (J), B_n คือชีวมวล (g dry weight/L) ของสาหร่ายวันที่ n และ B_0 คือชีวมวลเริ่มต้น (g dry weight/L)

10. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่า OD และ μ ที่ได้แต่ละการทดลอง มาวิเคราะห์ความแตกต่าง โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เมื่อพบความแตกต่างจะทำการ

วิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ

สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า และวิเคราะห์ข้อมูล ณ อาคารเรียนรวม คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ และทำการตรวจวัดคุณภาพหลังการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ณ คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

จากงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองออกเป็น 7 ส่วน คือ การวิเคราะห์ชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED, การวิเคราะห์ค่าชีวมวล, การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโต, การวิเคราะห์ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ, การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี การวิเคราะห์ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ซึ่งได้ผลดังนี้

การวิเคราะห์ชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED

จากการศึกษาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เพื่อหาข้อแตกต่างของชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีค่าแปรผันตามความสูง โดยการนำไปใช้ในการทดลองด้วยแสงทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ หลอดไฟ LED Warm White หลอดไฟ LED Daylight หลอดไฟ LED Red หลอดไฟ LED Green และหลอดไฟ LED Blue แสดงดังตารางที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่าของความเข้มแสงและชนิดของหลอดไฟ LED ที่มีค่าแปรผันตามความสูง โดยความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่ 52 lm/W

h (cm)	Light intensity ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)				
	LED Warm White	LED Daylight	LED Red	LED Green	LED Blue
10	78	124	12	15	17
20	38	60	5	7	7
30	21	36	4	4	6
40	17	24	3	3	4
50	13	18	3	2	3

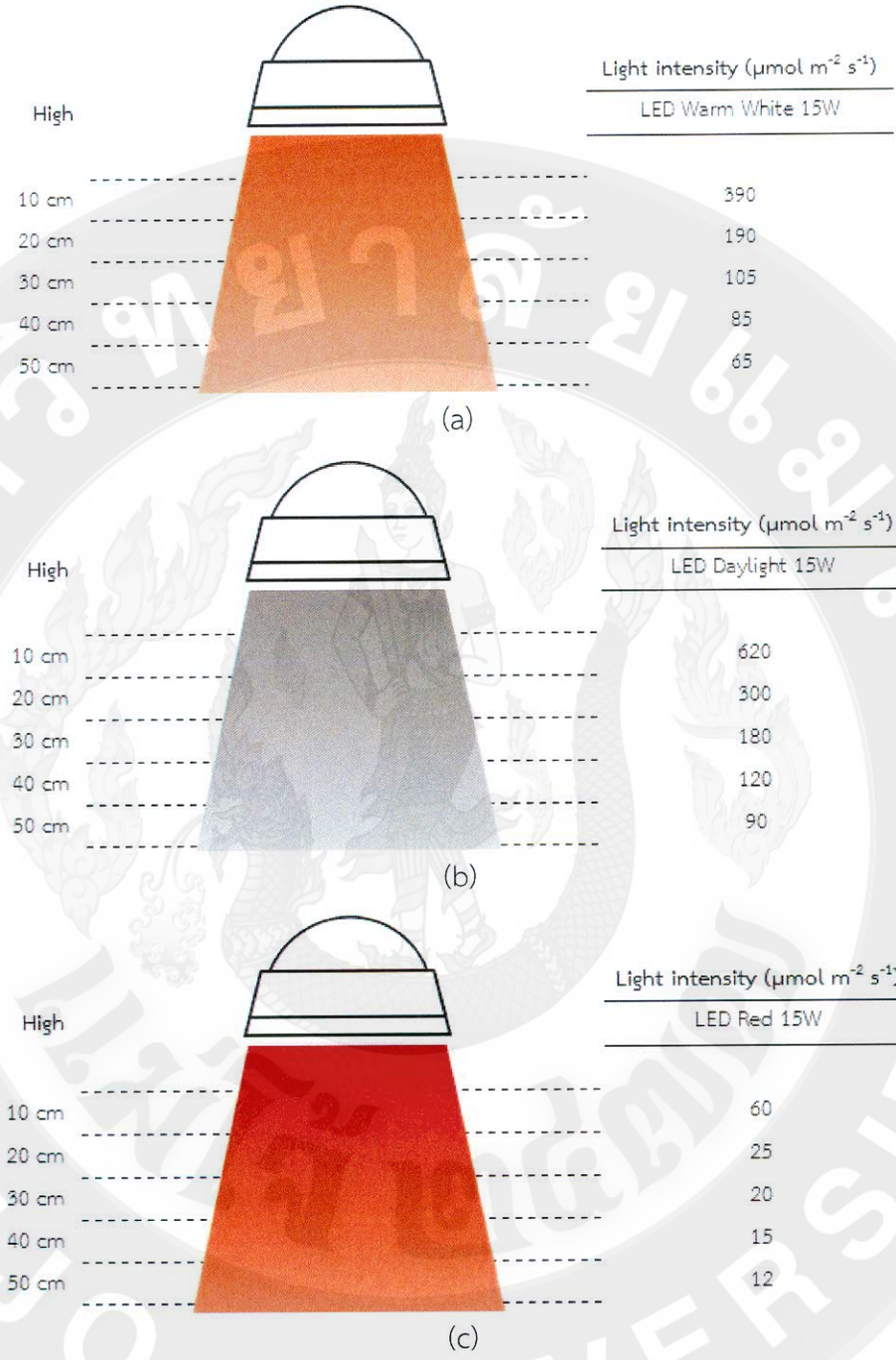
ตารางที่ 8 ค่าของความเข้มแสง และชนิดของหลอดไฟ LED ที่มีค่าแปรผันตามระยะห่าง โดยความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่ 156 lm/W

h (cm)	Light intensity (μmol m^{-2} s^{-1})				
	LED Warm White	LED Daylight	LED Red	LED Green	LED Blue
10	234	372	36	45	51
20	114	180	15	21	21
30	63	108	12	12	18
40	51	72	9	9	12
50	39	54	9	6	9

ตารางที่ 9 ค่าของความเข้มแสง และชนิดของหลอดไฟ LED ที่มีค่าแปรผันตามระยะห่าง โดยความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่ 260 lm/W

h (cm)	Light intensity (μmol m^{-2} s^{-1})				
	LED Warm White	LED Daylight	LED Red	LED Green	LED Blue
10	390	620	60	75	85
20	190	300	25	35	45
30	105	180	20	20	30
40	85	120	15	15	20
50	65	90	12	13	15

ซึ่งจากการศึกษาชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เพื่อหาข้อแตกต่างของชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีค่าแปรผันตามความสูง สามารถสร้างแผนภาพโดยการนำไปใช้ในการทดลองด้วยแสงทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ หลอดไฟ LED Warm White หลอดไฟ LED Daylight หลอดไฟ LED Red หลอดไฟ LED Green และหลอดไฟ LED Blue แสดงดังภาพที่ 15

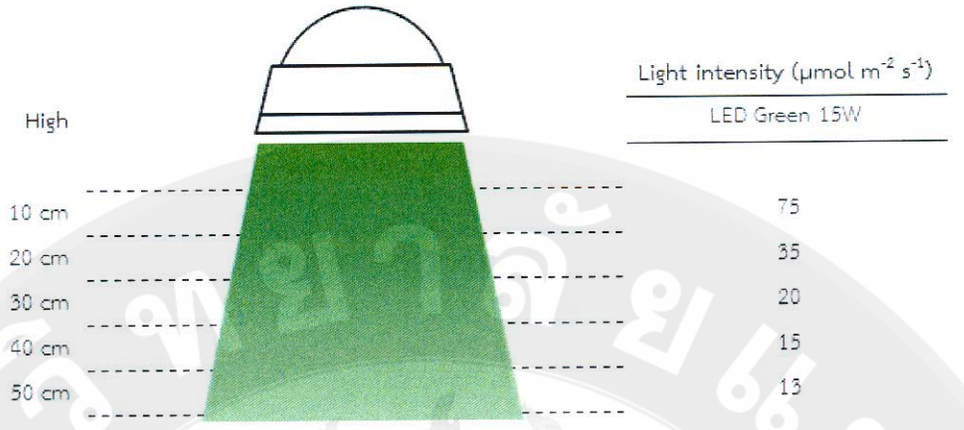


ภาพที่ 15 ชนิดและความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่มีค่าแปรผันตามความสูง

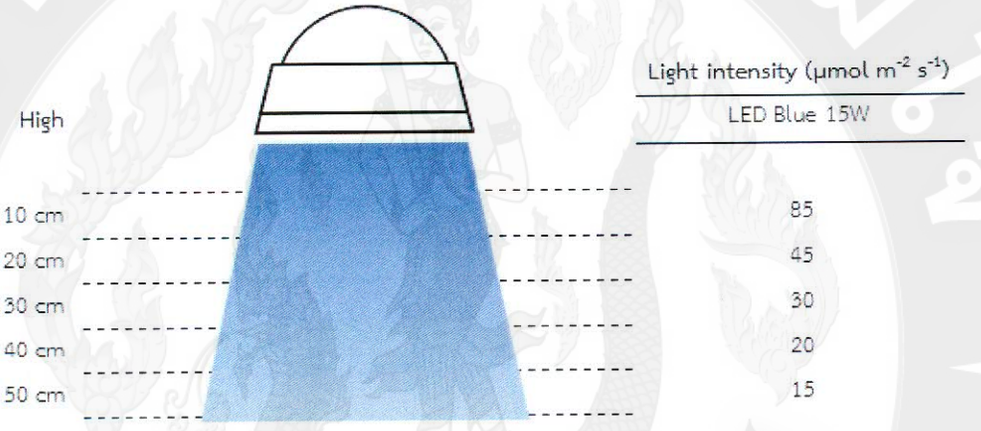
(a) LED Warm White

(b) LED Daylight

(c) LED Red



(d)



(e)

ภาพที่ 15 (ต่อ)

(d) LED Green

(e) LED Blue

การวิเคราะห์ค่าชีวมวล

จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยแสงทั้ง 5 ชนิด โดยใช้ร่วมกับแสงธรรมชาติ สามารถช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการเพาะเลี้ยงด้วยแสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่า OD ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ตลอดระยะเวลา 14 วัน ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED ที่ 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 6 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 14 วัน

Day	OD_{560}					
	Control	Warm White	Daylight	Red	Green	Blue
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.533	0.571	0.595	0.568	0.556	0.563
3	0.584	0.645	0.679	0.640	0.621	0.633
4	0.683	0.792	0.826	0.725	0.711	0.720
5	0.795	0.913	0.935	0.851	0.817	0.824
6	0.825	0.986	1.053	0.892	0.852	0.858
7	0.849	1.010	1.108	0.937	0.908	0.892
8	0.872	1.074	1.173	0.978	0.943	0.959
9	0.891	1.140	1.202	1.025	0.986	1.006
10	0.913	1.215	1.260	1.088	1.023	1.051
11	0.937	1.221	1.275	1.125	1.058	1.073
12	0.954	1.229	1.286	1.168	1.071	1.095
13	0.983	1.235	1.292	1.187	1.082	1.110
14	1.002	1.248	1.301	1.203	1.104	1.128

จากข้อมูลตารางที่ 10 สามารถทำให้การเจริญเติบโตมากยิ่งขึ้น และลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงจากเดิมประมาณ 14 วัน เหลือเพียง 6 - 10 วัน มีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลิน่าเจริญเติบโตได้เร็วมากยิ่งขึ้นสังเกตได้จากค่า OD ของการทดลองที่ใช้แสงจากหลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติเทียบกับการใช้แสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว โดยทำให้ค่า OD มีค่ามากที่สุด คือ 1.301

ตารางที่ 11 ค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 12 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 14 วัน

Day	OD_{560}					
	Control	Warm White	Daylight	Red	Green	Blue
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.517	0.592	0.624	0.565	0.523	0.548
3	0.538	0.689	0.735	0.631	0.554	0.592
4	0.585	0.775	0.891	0.674	0.598	0.634
5	0.628	0.825	1.015	0.724	0.664	0.688
6	0.706	0.886	1.082	0.805	0.730	0.744
7	0.751	1.029	1.124	0.872	0.773	0.815
8	0.793	1.097	1.167	0.948	0.851	0.885
9	0.846	1.108	1.195	0.982	0.891	0.903
10	0.904	1.151	1.202	1.004	0.936	0.937
11	0.955	1.182	1.224	1.053	0.972	0.977
12	1.008	1.203	1.238	1.104	1.013	1.018
13	1.006	1.216	1.254	1.115	1.042	1.052
14	1.015	1.231	1.282	1.167	1.084	1.093

จากข้อมูลตารางที่ 11 สามารถลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงจากเดิมประมาณ 14 วัน เหลือเพียง 5 - 12 วัน มีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลิน่าเจริญเติบโตได้เร็วมากยิ่งขึ้นสังเกตได้จากค่า OD ของการทดลองที่ใช้แสงจากหลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ เทียบกับการใช้แสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว โดยทำให้ค่า OD มีค่ามากที่สุด คือ 1.282

ตารางที่ 12 ค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 18 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 14 วัน

Day	OD_{560}					
	Control	Warm White	Daylight	Red	Green	Blue
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.517	0.572	0.593	0.544	0.531	0.545
3	0.525	0.648	0.707	0.602	0.563	0.584
4	0.538	0.726	0.822	0.658	0.594	0.622
5	0.546	0.806	0.901	0.724	0.628	0.655
6	0.558	0.852	0.967	0.775	0.653	0.682
7	0.561	0.907	1.012	0.821	0.690	0.701
8	0.572	0.951	1.077	0.875	0.738	0.729
9	0.585	1.008	1.128	0.933	0.761	0.774
10	0.617	1.052	1.174	0.982	0.797	0.791
11	0.644	1.096	1.225	1.047	0.822	0.828
12	0.679	1.141	1.276	1.101	0.847	0.880
13	0.706	1.172	1.293	1.137	0.861	0.910
14	0.754	1.196	1.315	1.166	0.885	0.941

จากข้อมูลตารางที่ 12 สามารถลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงจากเดิมประมาณ 14 วัน เหลือเพียง 4 - 9 วัน มีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลิน่าเจริญเติบโตได้เร็วมากยิ่งขึ้นสังเกตได้จากค่า OD ของการทดลองที่ใช้แสงจากหลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ เทียบกับการใช้แสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว โดยทำให้ค่า OD มีค่ามากที่สุด คือ 1.315

ตารางที่ 13 ค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 24 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 14 วัน

Day	OD_{560}					
	Control	Warm White	Daylight	Red	Green	Blue
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.526	0.593	0.617	0.572	0.535	0.541
3	0.558	0.676	0.709	0.639	0.577	0.584
4	0.584	0.742	0.771	0.683	0.592	0.602
5	0.619	0.807	0.826	0.754	0.623	0.639
6	0.647	0.856	0.915	0.791	0.669	0.681
7	0.698	0.902	1.073	0.838	0.701	0.732
8	0.731	1.106	1.164	0.881	0.742	0.785
9	0.775	1.193	1.251	0.945	0.782	0.831
10	0.802	1.268	1.344	1.088	0.817	0.886
11	0.836	1.327	1.419	1.157	0.866	0.936
12	0.858	1.392	1.491	1.213	0.906	0.993
13	0.872	1.472	1.576	1.285	0.953	1.078
14	0.892	1.526	1.657	1.324	1.032	1.122

จากข้อมูลตารางที่ 13 สามารถลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงจากเดิมประมาณ 14 วัน เหลือเพียง 6 - 12 วัน มีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลิน่าเจริญเติบโตได้เร็วมากยิ่งขึ้นสังเกตได้จากค่า OD ของการทดลองที่ใช้แสงจากหลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ เทียบกับการใช้แสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว โดยทำให้ค่า OD มีค่ามากที่สุด คือ 1.657

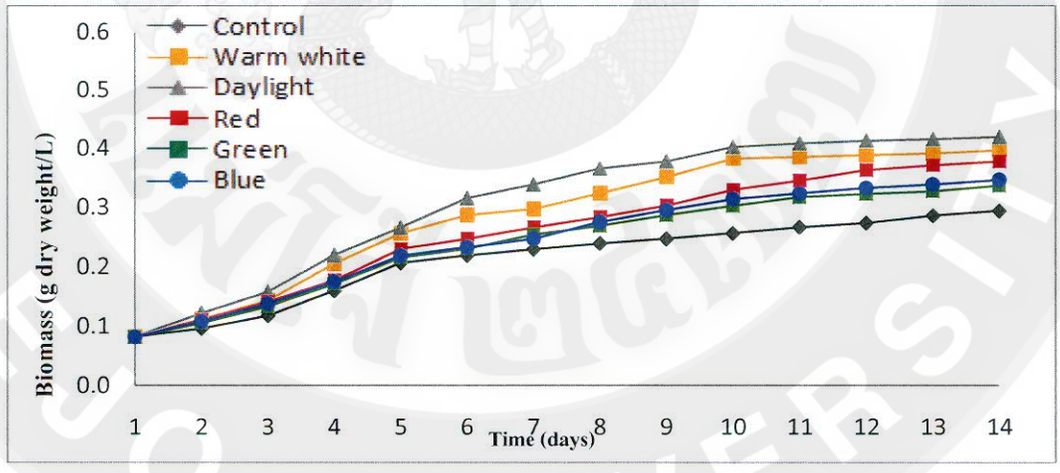
จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากข้อมูลตารางที่ 10, 11, 12 และ 13 จึงสรุปได้ว่าแม้แสงธรรมชาติจะประกอบด้วยแสงสีแดง แสงสีน้ำเงินและแสงอื่นๆ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ผสมกันและเหมาะสมกับการใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์แสง แต่การให้แสงไฟร่วมด้วย ต่อจากการใช้แสงธรรมชาติ สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่าได้มากยิ่งขึ้น และสามารถลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงจากเดิมประมาณ 14 วัน เหลือเพียง 4- 12 วัน

จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยแสงทั้ง 6 ชนิด โดยให้แสงธรรมชาติร่วมกับแสงจากหลอด LED เพิ่มระยะเวลาของการให้แสงของหลอด LED เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยจากการเพาะเลี้ยงเสร็จสิ้น สามารถคำนวณหาค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระยะเวลาที่แตกต่างกันได้ ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 14 ค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ในวันที่ 14

Time LED (hours)	Biomass (g dry weight /L)					
	Control	Warm white	Daylight	Red	Green	Blue
6	0.294	0.397	0.419	0.378	0.337	0.347
12	0.299	0.390	0.411	0.363	0.328	0.332
18	0.190	0.375	0.425	0.363	0.245	0.268
24	0.248	0.514	0.569	0.429	0.306	0.344

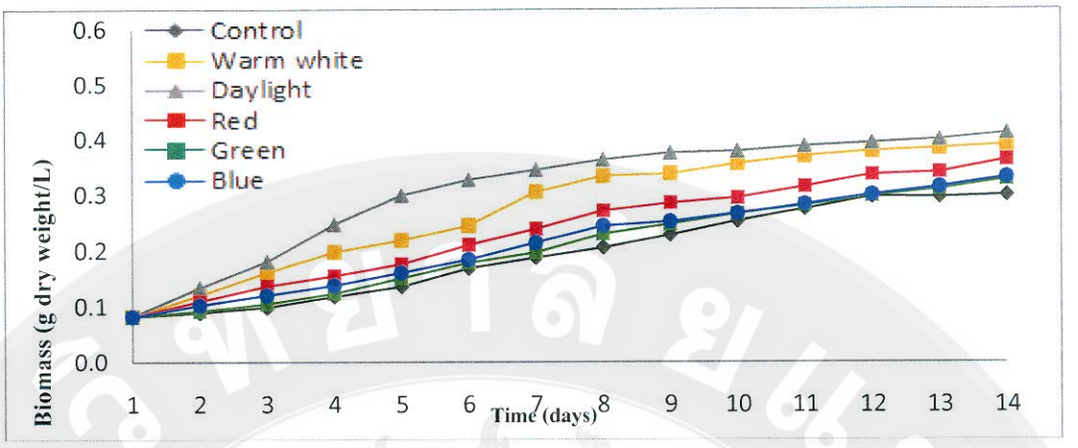
จากตารางที่ 14 เมื่อพิจารณาค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระดับการให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน พบว่าหลอด LED ที่ให้ค่าชีวมวลมากที่สุด คือ หลอด Daylight, Warm white, Red, Green และ Blue ตามลำดับ ซึ่งหลอด Daylight ภายใต้ระยะเวลาการให้แสง 24 ชั่วโมง มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.569 g dry weight/L จากการทดลองทั้งหมด สามารถหาค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าของแต่ละวัน แสดงดังภาพที่ 16



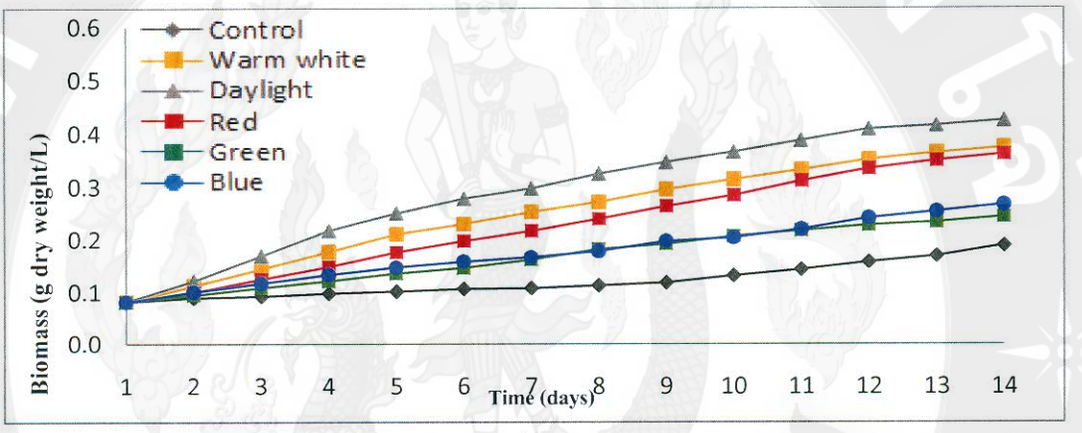
(a)

ภาพที่ 16 ค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ตลอดระยะเวลา 14 วัน

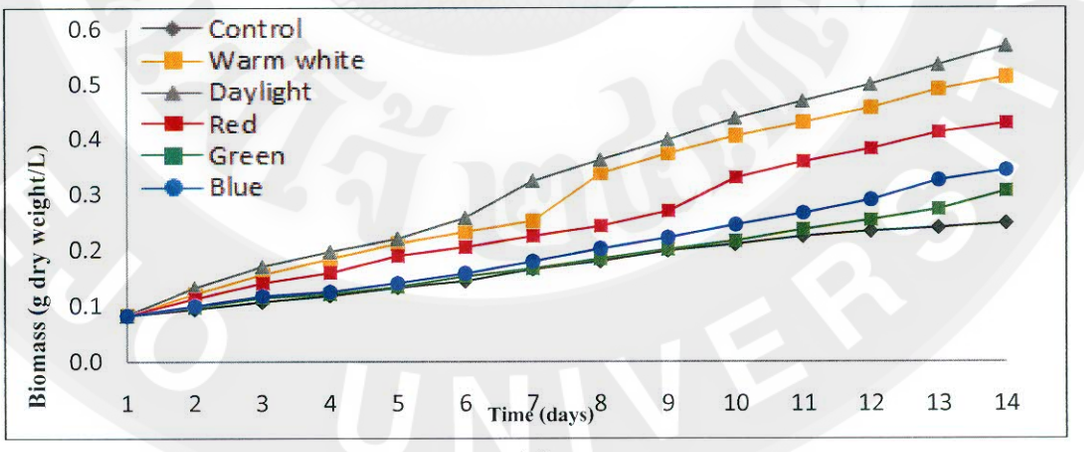
(a) 6 ชั่วโมง



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 16 (ต่อ)

(b) 12 ชั่วโมง

(c) 18 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

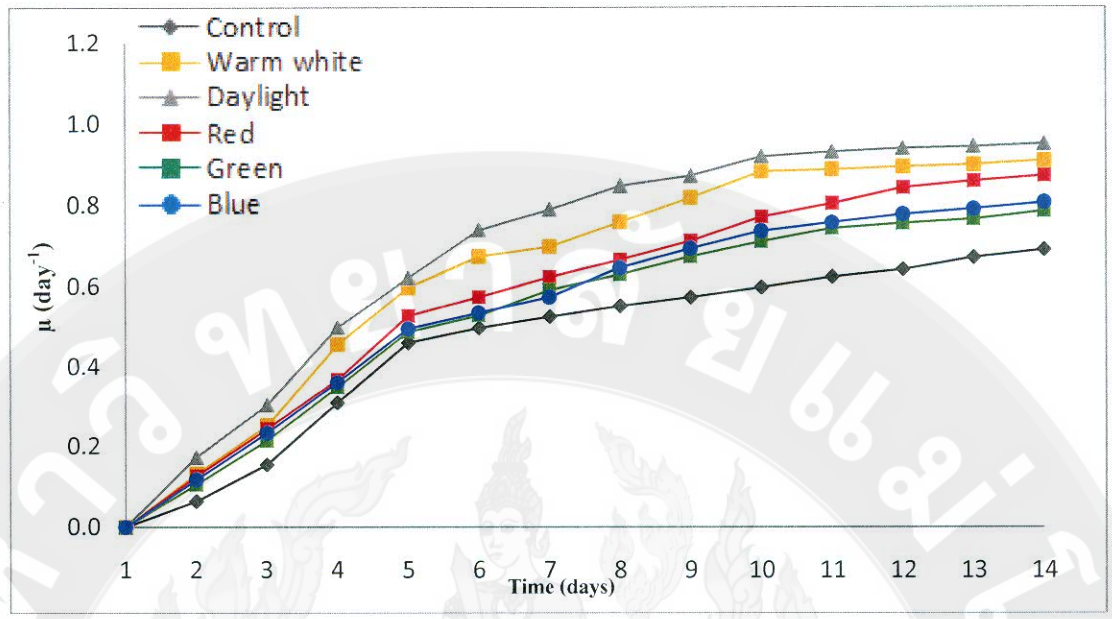
จากการเปรียบเทียบค่าชีวมวลของสาหร่ายที่ได้ และระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกันสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ทั้งระยะเวลา 14 วัน แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ระยะเวลา14 วัน

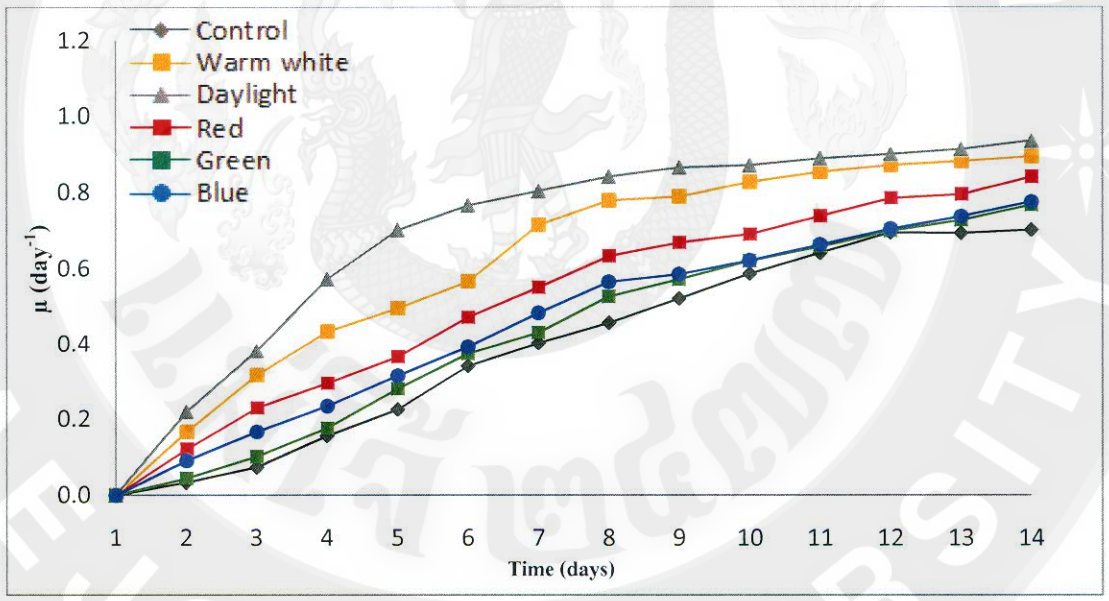
Light source	Time LED (hours)			
	6	12	18	24
Control	0.454±0.230[a]	0.395±0.259[a]	0.162±0.123[a]	0.326±0.196[a]
Warm white	0.632±0.307[a]	0.614±0.291[ab]	0.552±0.274[b]	0.657±0.357[b]
Daylight	0.680±0.317[a]	0.690±0.291[b]	0.649±0.300[b]	0.716±0.374[b]
Red	0.571±0.284[a]	0.514±0.271[ab]	0.489±0.276[bc]	0.546±0.307[ab]
Green	0.524±0.260[a]	0.428±0.267[a]	0.324±0.188[ac]	0.359±0.223[a]
Blue	0.538±0.265[a]	0.453±0.255[a]	0.350±0.192[c]	0.409±0.258[a]

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

จากตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย สไปรูลิน่า จากระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน และนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ในช่วงเวลาเปิดหลอด LED 12, 18 และ 24 ชั่วโมง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนช่วงเวลาการเปิดหลอด LED ที่ 6 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระดับการให้แสงแตกต่างกันของแต่ละวัน แสดงดังภาพที่ 17



(a)

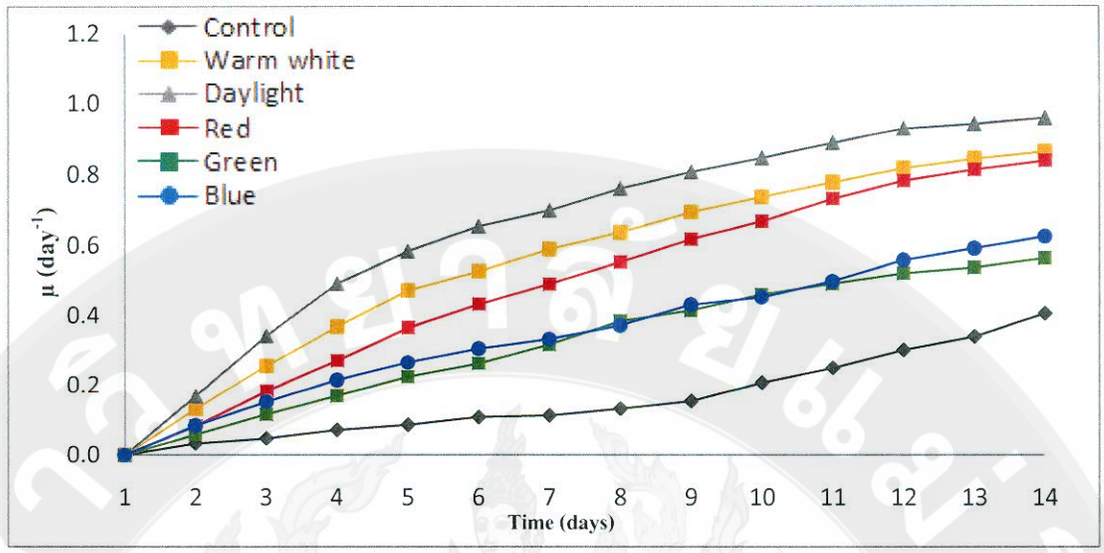


(b)

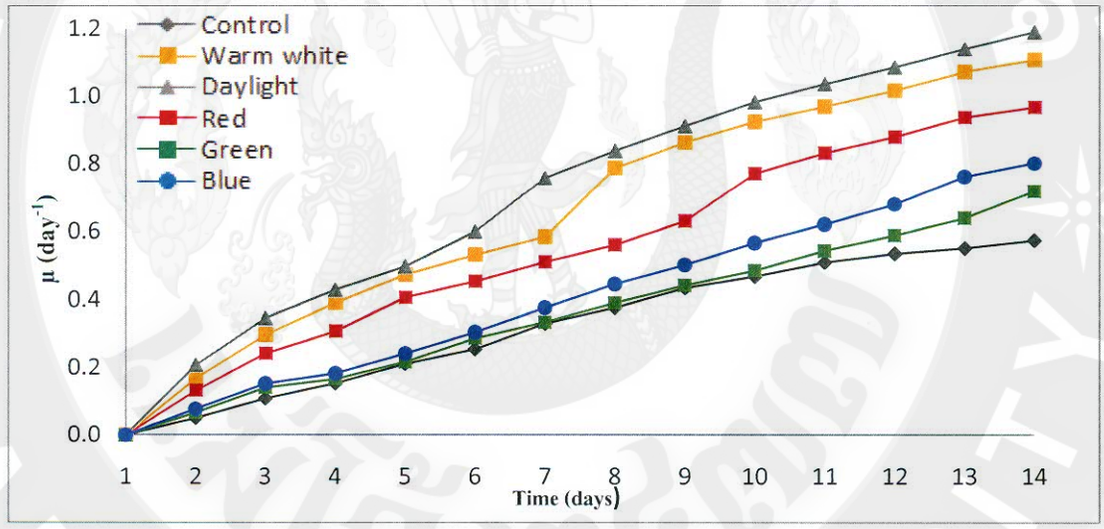
ภาพที่ 17 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED

(a) 6 ชั่วโมง

(b) 12 ชั่วโมง



(c)



(d)

ภาพที่ 17 (ต่อ)

(c) 18 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง

ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ให้แสงธรรมชาติร่วมกับการให้แสงจากหลอด LED ในระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน พบว่า การให้แสงจากหลอด LED ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด

การวิเคราะห์ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ

หากศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ และเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของค่าคลอโรฟิลล์ และค่าไฟโคไซยานิน ภายใต้ระดับการให้แสง และระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน สามารถแสดงตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ

Light sources	Pigment							
	6 hr		12 hr		18 hr		24 hr	
	Chl (mg/L)	Phy (g/L)	Chl (mg/L)	Phy (g/L)	Chl (mg/L)	Phy (g/L)	Chl (mg/L)	Phy (g/L)
Control	6.522	0.089	6.607	0.090	4.908	0.067	5.806	0.079
Warm white	8.123	0.111	8.013	0.110	7.785	0.106	9.933	0.136
Daylight	8.468	0.116	8.345	0.114	8.559	0.117	10.785	0.147
Red	7.830	0.107	7.596	0.104	7.589	0.104	8.618	0.118
Green	7.186	0.098	7.056	0.096	5.760	0.079	6.717	0.092
Blue	7.342	0.100	7.114	0.097	6.125	0.084	7.303	0.100

จากผลการศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ พบว่าการใช้หลอด Daylight ภายใต้ระยะเวลาให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มรงควัตถุของ Chl และ Phy สูงที่สุดได้ถึง 10.785 mg/L และ 0.147 g/L และหากเปรียบเทียบกับการเลี้ยงแบบ Control สามารถเพิ่มรงควัตถุของ Chl และ Phy เพิ่มขึ้น 46.17% และ 46.26% ตามลำดับ

การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี

จากการศึกษาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อใช้แสงจากหลอด LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง สามารถแสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า และอัตราที่เพิ่มขึ้นของค่าชีวมวล ภายใต้ระยะเวลาการให้แสงมากขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่าจากสมการแบบจำลองทางจลน์ศาสตร์ของการเจริญเติบโต ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน

Light time (hours)		Light sources					
		Control	Warm white	Daylight	Red	Green	Blue
6	a	-0.003	0.131	-0.007	0.001	0.116	0.039
	b	-0.014	31.362	-0.019	-0.003	31.209	0.191
	R^2	0.905	0.515	0.891	0.963	0.641	0.891
12	a	0.040	-0.001	-0.045	0.119	0.031	0.006
	b	0.331	-0.004	-0.091	-4.135×10^{7}	0.201	0.029
	R^2	0.967	0.931	0.880	0.812	0.978	0.985
18	a	0.055	0.123	-0.003	0.021	0.087	0.092
	b	1.994×10^{7}	-6.383×10^{7}	-0.100	0.102	-7.95×10^{7}	0.929
	R^2	0.942	0.743	0.955	0.991	0.929	0.940
24	a	0.088	0.144	0.152	0.049	0.064	0.108
	b	-1.271×10^{7}	-8.288×10^{7}	-5.132×10^{7}	0.279	1.119	-1.187×10^{8}
	R^2	0.938	0.864	0.833	0.991	0.997	0.989

จากตารางที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เห็นได้ว่า หลอด Daylight ที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.833 ถึง 0.955 ซึ่งถือว่ามีค่าระดับการตัดสินใจที่ยอมรับได้ในทางสถิติ

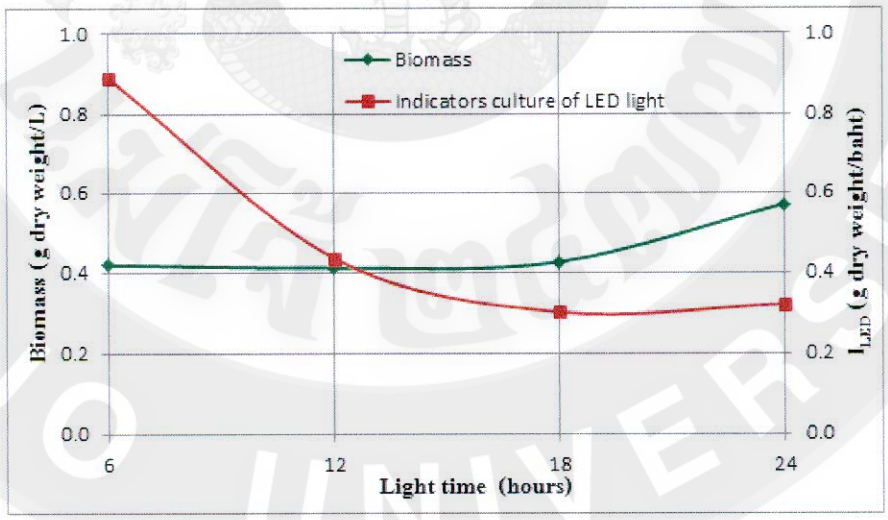
หากเปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยหลอด LED ของแต่ละชนิด และระยะเวลาการให้แสงจากหลอด LED ทั้งหมด ซึ่งการหาค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยหลอด LED สามารถหาได้จาก หน่วยการใช้ไฟฟ้า (baht/kWhr) คูณชั่วโมงที่ใช้ไฟฟ้าต่อวัน คูณระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง คูณกำลังไฟฟ้า (W) และเมื่อหาค่าพลังงานที่ใช้ไฟฟ้าต่อวันได้แล้วนำมาหารผลต่างของชีวมวลวันสุดท้ายลบกับชีวมวลเริ่มต้น ดังนั้นดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอด LED ภายใต้ระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน สามารถแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอด LED ภายใต้ระยะเวลาที่ใช้แสงต่างกัน

Light sources	I_{LED} (g dry weight/baht)			
	6 h	12 h	18 h	24 h
Warm white	0.831	0.406	0.258	0.285
Daylight	0.890	0.434	0.302	0.321
Red	0.781	0.371	0.247	0.229
Green	0.671	0.324	0.143	0.148
Blue	0.698	0.329	0.163	0.173

จากตารางที่ 18 ค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอด LED สามารถเปรียบเทียบกับค่าชีวมวลแห้งที่ได้ต่อพลังงานที่เสียไปหลังจากการทดลองเสร็จสิ้น เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่า หลอด Daylight สามารถให้ค่าชีวมวลแห้งมากที่สุดต่อพลังงานที่เสียไปในแต่ละการทดลอง

หากนำข้อมูลของหลอด Daylight จากค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยง และระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED มาเปรียบเทียบกัน พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้แสงจากหลอด LED ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า และระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED

จากภาพที่ 18 เมื่อพิจารณาจากการการเปรียบเทียบค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงและระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED พบว่า ระยะเวลาการให้แสงที่ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

การวิเคราะห์ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ

หากศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ และเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมัน ภายใต้ระดับการให้แสง และระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน สามารถแสดงตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ

Light sources	Nutrition	
	Protein content (g/100 g)	lipid content (g/100 g)
Control	7.66	0.95
Warm white	NA	NA
Daylight	NA	NA
Red	7.14	1.20
Green	NA	NA
Blue	NA	NA
Red & Blue	8.05	1.76

หมายเหตุ: NA คือไม่ได้นำมาวิเคราะห์ผล เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานการหาปริมาณโปรตีนและไขมัน ค่อนข้างสูง

จากผลการศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าการใช้หลอด LED ชนิดต่างๆ ภายใต้ระยะเวลาให้แสงตลอด 12 ชั่วโมง จึงเลือกหลอดเพียงสองชนิดมาตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ คือหลอด Red และ Red ผสม Blue ซึ่งจากการตรวจวิเคราะห์ผล จะเห็นได้ว่าการใช้หลอดไฟ Red ผสม Blue สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของปริมาณโปรตีน และคุณค่าทางโภชนาการของปริมาณไขมัน ได้มากกว่าการเพาะเลี้ยงแบบ Control ถึง 5.09 % และ 85.26 % ตามลำดับ

การออกแบบทางวิศวกรรมในเชิงแนวคิด

1. สุขลักษณะในการออกแบบด้านวิศวกรรมอาหาร

ในการออกแบบทางวิศวกรรมอาหารนั้นต้องมีเกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ตามหลักสุขลักษณะ ซึ่งมุ่งเน้นสำหรับการใช้งานในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของอาหารจากจุลินทรีย์ ซึ่งหากมีการปนเปื้อนเหล่านี้อาจมีจุดเริ่มต้นจากการเริ่มเพาะเลี้ยงวัตถุดิบ หรือได้รับการปนเปื้อนกับจุลินทรีย์ในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการบวนการบรรจุ ในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบให้มีการลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์เหล่านี้ได้จากการเริ่มเพาะเลี้ยงวัตถุดิบ โดยสามารถวิเคราะห์และออกแบบโรงเรือนที่มีระบบปิด ให้มีการลดการปนเปื้อนให้น้อยที่สุด

2 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

หลังจากการวิเคราะห์กระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าโดยการใช้หลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติที่เหมาะสมแล้ว งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบ และประเมินราคาองค์ประกอบหลักของการใช้หลอด LED เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการลงทุนเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในระดับอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 20

การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่าย

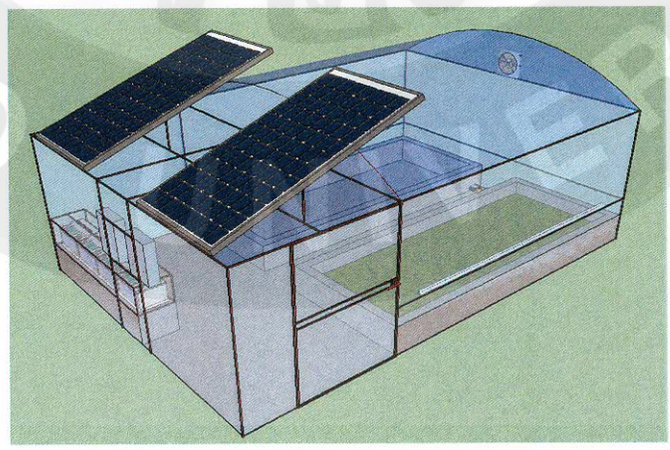
กำหนดให้

ราคาอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าจากแผง Solar Cell และวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าในการให้แสง	100,000	บาท
อายุการใช้งาน	5	ปี
มูลค่าซาก 1% ของราคาเครื่อง	1,000	บาท
อัตราดอกเบี้ยเงินกู้	8	เปอร์เซ็นต์/ปี
ค่าไฟฟ้า	3	บาท/หน่วย
จำนวนวันทำงาน	365	วัน

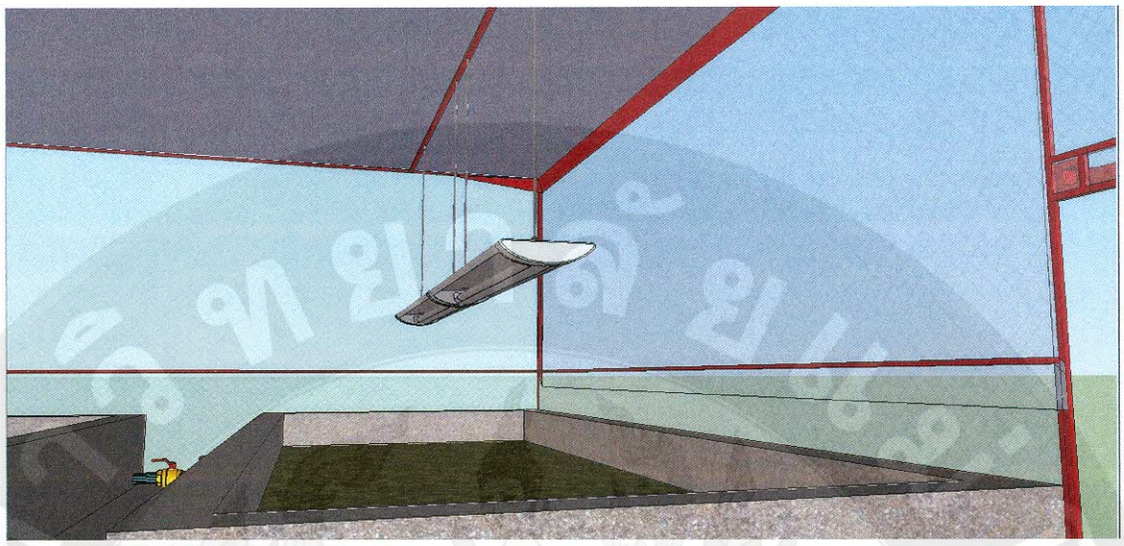
ตารางที่ 20 รายการประเมินราคาเบื้องต้น

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด	ราคา (บาท)
1	อุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าจากแผง Solar Cell	- แผง Solar Cell 300W 2 ชุด	30,000
		- Solar Charger Controller 20A 12/24V	2,000
		- แบตเตอรี่ Deep Cycle 100Ah 12V 6 ตัว	30,000
		- Pure Sine Wave Inverter 1500W	13,000
2	ค่าวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าในการให้แสง	- หลอด LED RGB Strip Ribbon 5050 12v 14.4W	25,000
		- Remote controller LED 6A IR 24Key	
		- หม้อแปลง 12V	
		- Power supply switching 5A 60W	
		- Connector LED Strip RGB, Timer	
		รวมทั้งหมด	**100,000**

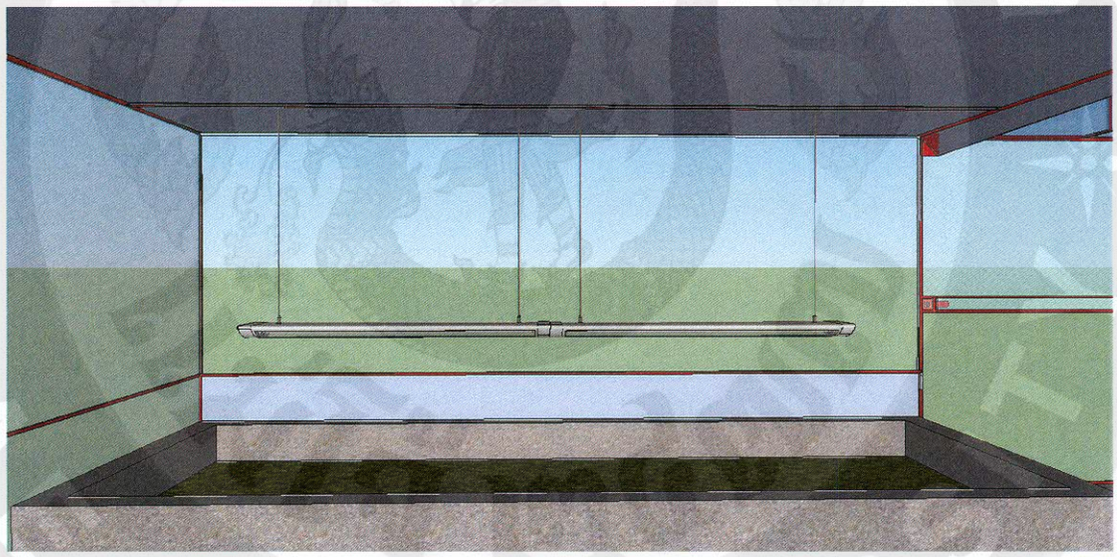
ตารางที่ 20 แสดงรายการประเมินราคาเบื้องต้นในส่วนของอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าจากแผง Solar Cell อุปกรณ์การก่อสร้างโรงเรือนเลี้ยงสาหร่าย ค่าวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าในการให้แสง ค่าวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าในการใช้เลี้ยงสาหร่าย ค่าอุปกรณ์เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ ในระดับอุตสาหกรรม SME และระบบการเพาะเลี้ยงแบบใช้หลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาตินี้ซึ่งมีบ่อขนาด 2 x 10 x 0.5 เมตร จำนวน 2 บ่อ มีขนาดปริมาตรประมาณ 10 ลูกบาศก์เมตร (Q) ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 โรงเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าโดยการใช้หลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ



ภาพที่ 20 การวางหลอด LED ภายในโรงเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า



ภาพที่ 21 การวางหลอด LED ด้านข้างภายในโรงเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

จากการเลี้ยงแบบปกติสามารถเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าให้เจริญเติบโตได้ต้องใช้ระยะเวลาการเลี้ยงประมาณ 14 วัน ถึงจะสามารถเก็บผลผลิตได้ โดยในระยะเวลา 1 เดือนสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้เพียงเดือนละ 2 ครั้ง ซึ่งจากการทดลองสามารถช่วยลดระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลิน่าเหลือเพียงประมาณ 10 วัน ดังนั้นจึงสามารถเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลิน่าได้ เดือนละ 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 30 กิโลกรัมแห้งต่อเดือน และจากการสำรวจราคาผลิตภัณฑ์ที่วางขายในท้องตลาดปัจจุบัน พบว่าราคาอยู่ที่ประมาณ 1,000 บาทต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งคิดเป็นมูลค่า

30,000 บาทต่อเดือน หรือ 360,000 บาทต่อปี และในระบบโรงเรือนแบบปิดนี้ใช้หลอด LED ให้ทำงาน 12 ชั่วโมงต่อวัน

ต้นทุนคงที่

1. ค่าเสื่อมราคาเครื่อง $= \frac{P-L}{N}$ (40)

โดย P = ราคาเครื่องจักร (บาท)

L = ราคาซากเครื่องจักร (บาท)

N = อายุการใช้งาน (ปี)

ค่าเสื่อมราคาเครื่อง $= \frac{100,000-1,000}{5}$

= 19,800 บาทต่อปี

2. ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน $= \frac{(P+L)}{2} \times \frac{i}{100}$ (41)

โดย i = อัตราดอกเบี้ยเงินกู้, เปอร์เซ็นต์/ปี

ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน $= \frac{100,000+1,000}{2} \times \frac{8}{100}$

= 4,040 บาท/ปี

ดังนั้น ต้นทุนคงที่รวม = 19,800 + 4,040

= 23,840 บาท/ปี

ต้นทุนแปรผัน

1.ค่าสารอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

ประมาณ = 10,000 บาท/เดือน

= 10,000 x 12

= 120,000 บาท/ปี

2. ค่าพลังงานไฟฟ้า

จำนวน kw โดยประมาณ 5 kw

ชั่วโมงทำงานต่อวัน 24 ชม

จำนวนหน่วย = 5 x 24 x365

= 43,800 หน่วย/ปี

รวมค่าพลังงานไฟฟ้า = 43,800x3

= 131,400 บาท/ปี

3. ค่าน้ำประปา

ประมาณ 1,500 บาทต่อเดือน

รวมค่าน้ำประปา = 1,500 × 12

= 18,000 บาท/ปี

4. ค่าซ่อมบำรุง = 5,000 บาท/ปี

ดังนั้น ต้นทุนผันแปรรวม = 120,000 + 131,400 + 18,000+5,000

= 274,400 บาท/ปี

ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถวิเคราะห์หาต้นทุนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า สามารถสรุปดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ต้นทุนต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าโดยการใช้หลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ

ลำดับ	รายการ	คิดเป็นเงิน (บาท/ปี)
ต้นทุนคงที่		
1	ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าจากแผง Solar Cell และวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าในการให้แสง	23,840
ต้นทุนผันแปร		
1	ค่าสารอาหาร	120,000
2	ค่าไฟฟ้า	131,400
3	ค่าน้ำประปา	18,000
4	ค่าซ่อมบำรุง	5,000
	รวมเป็นเงินทั้งหมด	298,240

จากข้อมูลรายได้จากผลผลิต และต้นทุนที่ใช้ สามารถนำไปคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอบแห้งได้ดังนั้น

ระยะเวลาคืนทุน = ราคาวัสดุอุปกรณ์/ กำไรสุทธิ

= (100,000) / (360,000 - 298,240)

= 1.62 ปี

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดีสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า ด้วยการให้แสงจากหลอด LED ร่วมกับการเลี้ยงแบบปกติ ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง สามารถลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงลงสูงสุด 8, 9, 10 และ 8 วัน ตามลำดับ

2. ค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระดับการให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน พบว่าหลอด LED ที่ให้ค่าชีวมวลมากที่สุด คือ หลอด Daylight, Warm white, Red, Green และ Blue ตามลำดับ ซึ่งหลอด Daylight ภายใต้ระยะเวลาการให้แสง 24 ชั่วโมง มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.569 g dry weight/L เมื่อเทียบ Control มีค่าสูงสุด 2.48 g dry weight/L ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 56.41%

3. ค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า นำมาวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ในช่วงเวลาเปิดหลอด LED 12, 18 และ 24 ชั่วโมง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนช่วงเวลาการเปิดหลอด LED ที่ 6 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 0.716 day^{-1}

4. จากการเปรียบเทียบผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อรงควัตถุ พบว่าการใช้หลอด Daylight ภายใต้ระยะเวลาให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มรงควัตถุของ Chl และ Phy สูงที่สุดได้ถึง 10.785 mg/L และ 0.147 g/L และหากเปรียบเทียบกับการเลี้ยงแบบ Control สามารถเพิ่มรงควัตถุของ Chl และ Phy เพิ่มขึ้น 46.17% และ 46.26% ตามลำดับ

5. จากการศึกษาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เห็นได้ว่า หลอด Daylight ที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.833 – 0.955 ซึ่งถือว่ามีค่าระดับการตัดสินใจที่ยอมรับได้ในทางสถิติ

6. เมื่อพิจารณาจากการการเปรียบเทียบค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงและระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED พบว่า ระยะเวลาการให้แสงที่ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

7. เมื่อพิจารณาจากการศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ และเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมัน ภายใต้ระดับการให้แสง และระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน พบว่าหลอด LED สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของปริมาณโปรตีน และคุณค่าทางโภชนาการของปริมาณไขมัน ได้มากกว่าการเพาะเลี้ยงแบบ Control ถึง 5.09 % และ 85.26 % ตามลำดับ

8. จากการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยวิเคราะห์ถึงต้นทุนในการสร้างโรงเรือน และต้นทุนในกระบวนการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าโดยการใช้หลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ สามารถคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุนของการสร้างโรงเรือนที่สามารถใช้หลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ ได้ในระยะเวลา 1.62 ปี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการทดลองให้อยู่ในช่วงฤดูกาลเดียวกัน เพื่อที่สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบร่วมกันได้ทั้งหมด

2. ควรศึกษาการทดลองในโรงเรือนที่มีการปิดมิดชิด เนื่องจากการใช้หลอด LED ทำให้มีสัตว์หรือแมลงมาก่อกวน รวมถึงการปนเปื้อนจากสัตว์หรือแมลงได้

บรรณานุกรม

กาญจนา พงษ์พิษณุ. 2539. **การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) ในน้ำทิ้งโรงงาน ขนมจีนในสภาพกลางแจ้ง.** วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

จงกล พรมยะ และขจรเกียรติ แซ่ตัน. 2548. **การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อสุขภาพ.** เชียงใหม่: ภาคเทคโนโลยีการประมง คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

จงกล พรมยะ และนิวุฒิ หวังชัย. 2546. **การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อเป็นอาหารปลาสำเร็จรูป.** เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

จงกล พรมยะ. 2549. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายสไปรูลินา. น. 46 - 60. ใน **พัฒนาศักยภาพของสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสีย** 7 - 9 สิงหาคม. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

การวิจัย และพัฒนาการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* (Nordstedt) Geiteler. 2553. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.fishtech.mju.ac.th/FishNew1/OSS/index.php?action=main&os_c_id=4 (29 สิงหาคม 2556).

เจียมจิตต์ บุญสม. 2531. **ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง: ผลทางการรักษาโรคที่นายแพทย์ชาวญี่ปุ่นค้นพบ.** กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

เจียมจิตต์ บุญสม. 2544. **ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง.** พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ชื่นจิตร ชื่นกระมล. 2530. **การเปรียบเทียบผลผลิตของสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ในอาหารสูตรต่างๆ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสนชลบุรี

ธนสิทธ์ เหล่าประเสริฐ. 2542. สาหร่ายเกลียวทองที่บุญสมฟาร์ม ความสำเร็จในภูมิปัญญา. **เทคโนโลยีชาวบ้าน.** 12 (224): 77.

ผกาวดี แก้วกันเนตร และแพรพิลาศ ดุจจานุทัศน์. 2553. การใช้ประโยชน์จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเกษตรเป็นแหล่งอาหารให้สาหร่ายเพื่อผลิตไบโอดีเซล. **วารสารศูนย์บริการวิชาการ** 18 (2): 4-9.

มารศรี เรืองจิตชัชวาล. 2549. **สาหร่ายสไปรูลินา.** กรุงเทพฯ: คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ยุวดี พีรพรพิศาล. 2540. **การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*). ในระดับอุตสาหกรรม ขนาดย่อม.** เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศิริพร ชูเชิด และคณะ. 2553. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ในสูตรอาหารน้ำหมักต้นทุนต่ำ. **วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 4** (2): 26-33.

ศิริพันธุ์ เพชรบำนาญ. 2540. **การวิเคราะห์คุณค่าทางโปรตีนของ *Scenedesmus dimorphu* เทียบกับ *Scenedesmus incrassatulus*.** เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีการประมง. คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์. 2555. การศึกษาสภาวะการเลี้ยงจุลสาหร่ายที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนและไขมัน. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ** 7 (2): 61-70

สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้. 2555. **องค์ประกอบของการสังเคราะห์แสง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/photosynthesis/cloroplast/cloroplast5.htm (12 กันยายน 2556).

สมศักดิ์ วรคามิน. 2547. **สาหร่ายอาหารของอนาคต**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ดี ฟอร์ ไลฟ์ เอลทีดี พาต.

แสงกับพืช. 2554. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.ces.kmutt.ac.th/classroom/solarenergy/Assignment/SolEn54/SolEn54_Doc/10_Plant%20and%20Solar.pdf (10 กันยายน 2556).

อนุโรจน์ นันทิวัตถพงศ์. 2547. **อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://202.143.156.146/~bse/4_2electronic_device/4_2_3diode_LED.html (21 สิงหาคม 2556).

A. Bennett and L. Bogorad. 1973. Complementary chromatic adaptation in filamentous blue-green alga, **J. Cell Biol**. 58: 419 - 435.

Association Of Analytical Communities [AOAC]. 2000. **Official Methods of Analysis**, 16th ed. Washington, D.C.: Association of Official Analytical chemists.

Chih-Yu Wang, Chun-Chong Fu and Yung-Chuan Liu. 2007. Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. **Biochemical Engineering Journal** 37: 21-25.

Chih-Yu Wang, Chun-Chong Fu, Yung-Chuan Liu. 2007. Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. **Biochemical Engineering Journal** 37: 21-25.

Chun-Yen Chen, Kuei-Ling Yeh, Rifka Aisyah, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang. 2011. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresource Technology** 102: 71-81.

Ciferri, O., 1983. Spirulina the edible microorganism. **Microbiol** 47(4): 51-78.

E.D.G. Danesi, C.O. Rangel-Yagui, J.C.M. Carvalho, S. Sato. 2004. Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*, **Biomass and Bioenergy** 26: 329-335.

Hua-Bing Chen, Jiun-Yan Wu, Chin-Feng Wang, Chun-Chong Fu, Chwen-Jen Shieh, Chih-I Chen, Chih-Yu Wang and Yung-Chuan Liu. 2010. Modeling on chlorophyll a and phycocyanin production by Spirulina platensis under various light-emitting diodes. **Biochemical Engineering Journal** 53: 52–56.

Hua-Bing Chen, Jiun-Yan Wu, Chin-Feng Wang, Chun-Chong Fu, Chwen-Jen Shieh, Chih-I Chen, Chih-Yu Wang, Yung-Chuan Liu. 2010. Modeling on chlorophyll a and phycocyanin production by Spirulina platensis under various light-emitting diodes. **Biochemical Engineering Journal** 53: 52–56.

Intergovernmental Institution for the Use of Micro - Algae Spirulina Against Malnutrition (IIMSAM). 2006. **Worldwide Studies Involving Spirulina**. (Online). Available http://www.iimsam.org/benefits.php (19 July 2013).

M.A.C.L. de Oliveira, M.P.C. Monteiro, P.G. Robbs, S.G.F. Leite. 1999. Growth and chemical composition of *Spirulina maxima* and *Spirulina platensis* biomass at different temperatures. **Aquaculture International** 7: 261-275.

Probir Das, Wang Lei, Siti Sarah Aziz and Jeffrey Philip Obbard. 2001. Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light. **Bioresource Technology** 102: 3883-3887.

R.M. Weiss and D.F. Ollis. 1980. Extracellular microbial polysaccharides. I. Substrate, biomass and product kinetic equations for batch xanthan gum fermentation, **Biotechnol. Bioeng.** 22: 859 –873.

Richmond, A. 1986. **In CRC Handbook of Microalgal Culture**, Boca Raton, Florida: CRC press, Inc.

Seyedeh Fatemeh Mohsenpour and Nik Willoughby. 2013. Luminescent photobioreactor design for improved algal growth and photosynthetic

pigment production through spectral conversion of light. **Bioresource Technology** 142: 147–153.

Shengzhang Xue, Zhenfeng Sua, Wei Cong. 2011. Growth of Spirulina platensis enhanced under intermittent illumination. **Journal of Biotechnology** 151: 271–277.

Sommer T. R., D Souza F. M. L., Morry N. M. 1992. Pigmentation of adult rainbow trout, *Oncorthnchus mykiss*, using the green alga *Haematococcus pluvialis*. **Aquacult.** 106: 63-74.

V. Gadhamshetty, A. Sukumaran, N. Nirmalakhandan and M.T. Myint. 2008. Photofermentation of malate for biohydrogen production-a modeling approach. **Int. J. Hydrogen Energy** 33: 2138 – 2146.

Venkataraman L.V. 1983. **A Monograph on *Spirulina platensis***. Karnataka, Mysore: Central Food Technological Research Institute.

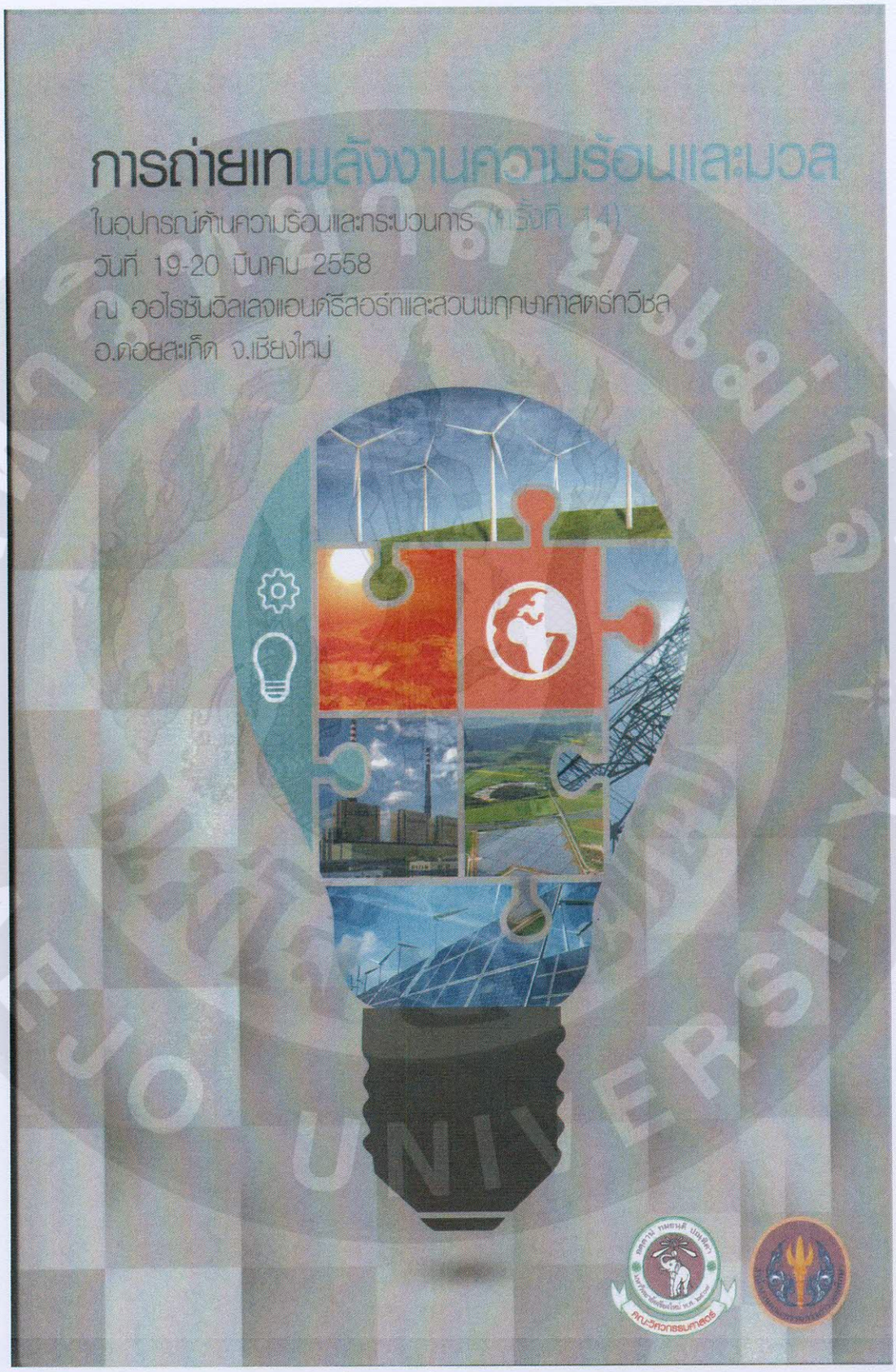
Vonshak et al. 1997. **Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology Cell-biology and Biotechnology**. London: Taylor & Francis.

Yean-Chang Chen and Meng-Chou Lee. 2012. Double-power double-heterostructure light-emitting diodes in microalgae, *Spirulina platensis* and *Nannochloropsis oculata*, cultures. **Journal of Marine Science and Technology** 20 (2): 233-236.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

เอกสารเผยแพร่ผลงานวิจัย


การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล
ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 14)
วันที่ 19-20 มีนาคม 2558
ณ ออไรซันวิลเลจแอนด์รีสอร์ทและสวนพฤกษาศาสตร์ทวีชล
อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

คณะกรรมการการจัดการประชุมวิชาการ
เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ
(ครั้งที่ 14)
ระหว่างวันที่ 19-20 มีนาคม 2558
ณ ฮอไรซันวิลเลจแอนด์รีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล จังหวัดเชียงใหม่

ที่ปรึกษาคณะกรรมการจัดการประชุม
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการจัดการประชุม

1.	ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	ประธานคณะกรรมการ
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.นคร	ทิพยาวงศ์	กรรมการ
3.	รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์	สัมภัตตะกุล	กรรมการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายพิจารณาบทความ

1.	ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	ประธานคณะอนุกรรมการ
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.นคร	ทิพยาวงศ์	กรรมการ
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวะ	อัจฉริยวิริยะ	กรรมการ
4.	รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์	สัมภัตตะกุล	กรรมการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายติดต่อประสานงาน/ต้อนรับ

1.	อาจารย์ ดร.ณัฐนี	วรยศ	ประธานคณะอนุกรรมการ
2.	อาจารย์ ดร.ชาย	รังสิยากูล	อนุกรรมการ
3.	นายวันรบ	กิติน่าน	อนุกรรมการ
4.	นางสาววาสนา	คำโอภาส	อนุกรรมการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายลงทะเบียน/การเงิน

1.	อาจารย์ ดร.ณัฐนี	วรยศ	ประธานคณะอนุกรรมการ
2.	นายวันรบ	กิติน่าน	อนุกรรมการ
3.	นางสาววาสนา	คำโอภาส	อนุกรรมการ
4.	นางสาวเจนทิรา	อุ่นแสง	อนุกรรมการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายเอกสาร

1.	ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	ประธานคณะอนุกรรมการ
2.	อาจารย์ ดร.ณัฐนี	วรยศ	อนุกรรมการ
3.	นายวันรบ	กิติน่าน	อนุกรรมการ
4.	นายนเรศ	ใหญ่วงศ์	อนุกรรมการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ
(ครั้งที่ 14)
ระหว่างวันที่ 19-20 มีนาคม 2558
ณ ฮอไรซันวิลเลจแอนด์รีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล จังหวัดเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา
ผศ.ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.สันติ หวังนิพพานโต

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.อดิพงศ์ นันทพันธุ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.จิรวรรณ เตียรถ์สุวรรณ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
พันเอก ดร.อโณทัย สุขแสงพบมรุ้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร.สมิทธ์ เอี่ยมสะอาด

มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. ธีบดินทร์ แสงสว่าง

มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์

เรื่อง	หน้า
การศึกษาอิทธิพลของแผ่นกั้นเอียงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส STUDY OF EFFECT OF INCLINED BAFFLES IN A SQUARE DUCT HEAT EXCHANGER	306
การศึกษาสภาพการติดไฟจากแก๊สที่ได้จากกิ่งไม้ธรรมชาติ Study on Burning of Gas Produced from Natural Tree Branches	312
การศึกษาศักยภาพในการใช้น้ำกลั่นตัวที่คอยล์เย็นมาเสริมกับน้ำระบายความร้อนในหอระบายความร้อน The Potential Use Study of Condensate Water from Cooling Coils for Makeup Water of Cooling Towers	316
เทคนิคการตรวจสอบการไหลสม่ำเสมอของสารทำงานในชุดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาดใหญ่ ในการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ TECHNICAL INSPECTION OF UNIFORM FLOW WORKING FLUID IN LARGE-SCALE SOLAR COLLECTOR OF SOLAR ETHANOL DISTILLATION	322
ผลของความสูงถังไซโคลนต่อการอบแห้งข้าวเปลือก EFFECT OF THE HEIGHT OF A CYCLONE TANK ON DRYING OF PADDY	327
การพัฒนาเครื่องผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงและระบบทำความสะอาดก๊าซชีวมวลสำหรับรถยนต์ DEVELOPMENT OF A DOWNDRAFT GASIFIER AND A PRODUCER GAS CLEANER SYSTEM FOR AUTOMOBILE	332
สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมโรงเรือนกระจก PERFORMANCE OF SOLAR COLLECTOR ASSISTED GREENHOUSE	339
การออกแบบระบบเพาะข้าวกล้องงอกอัตโนมัติโดยใช้น้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ An Automatic Process to Produce the Germinated Brown Rice by using Hot Water from Solar Collector System	345
การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมียด้วยรังสีไมโครเวฟ ACTIVATED CARBON PRODUCTION FROM MACADAMIA SHELL BY USING MICROWAVE	351
ระบบทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กตริกที่มีสารทำงานร่วมกับอนุภาคนาโน THERMOELECTRIC COOLING SYSTEM WITH NANOFLUIDS	357
การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนแบบดึงความร้อนจากอากาศ แต่ละฤดูกาลในเขตภาคกลางของประเทศไทย A STUDY OF SEASONAL COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF AIR SOURCE HEAT PUMP IN THAILAND	361
ผลกระทบต่อสมรรถนะและมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลคอมมอนเรล เมื่อใช้น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงภายใต้ภาระงานที่แตกต่างกัน Effect of Performance and Emission of Diesel Common Rail Engine Fuelled by Diesel - Biodiesel Blends at Different Engine Loads	366
โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ในประเทศไทย Renewable Energy Power Plant from Organic Rankine Cycle in Thailand	373
การพัฒนากระบวนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยเทคนิคโซนิเคชั่น DEVELOPMENT OF THE HARVESTING PROCESS FOR SPIRULINA PLATENSIS BY SONICATION TECHNIQUES	382
การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยเทคนิค การสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี ENHANCEDGROWTH RATE AND NUTRITION OF *SPIRULINAPLATENSIS* BYLED LIGHT PHOTOSYNTHESIS TECHNIQUE	391

การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่า ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี

ENHANCEDGROWTH RATE AND NUTRITION OF*SPIRULINAPLATENSIS* BYLED LIGHT PHOTOSYNTHESIS TECHNIQUE

พรอนันต์ วงศ์ใหญ่
สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ
จาตุพงศ์ วาฤทธิ์
ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร
วิษณุ ปินตาเชื้อ
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

Phornanan Wongyai*,
Somkiat Jaturonglumlert,
Jatuphong Varith,
Chanawat Nitatwichit
Witsanu Pintachuea
Faculty of Engineering and Agro-Industry,
Maejo University, Chiang Mai, 50290
*Corresponding author:
phornanan.wongyai@gmail.com

บทคัดย่อ

เทคนิคการสังเคราะห์แสงโดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด LEDที่มีความยาวคลื่นแสงและความเข้มของแสงที่แตกต่างกันถูกนำมาศึกษาหาผลกระทบจากการเพาะเลี้ยงของสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างการเจริญเติบโตชีวมวลค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ค่าคลอโรฟิลล์และ ค่าไฟโคไซยานินในการทดลองพบว่า แสงไฟสีขาวสามารถให้ค่าชีวมวล ค่าอัตราการเจริญเติบโตค่าคลอโรฟิลล์และ ค่าไฟโคไซยานินมากที่สุด คือ 0.569 g dry weight/L , 0.716day^{-1},10.785 mg/L และ0.147 g/Lตามลำดับซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการให้แสงจากหลอด LED คือ 12 ชั่วโมง โดยค่าใช้จ่ายของพลังงานที่เสียไปต่อการเพาะเลี้ยงด้วยหลอด LEDมีค่าเท่ากับ 0.434g dry weight/baht

คำสำคัญ:แอลอีดี, สาหร่ายสไปรูลิน่า, การสังเคราะห์แสง

Abstract

Photosynthesis techniqueusing light source byLED with different light wavelengths and illumination intensities were employed to explore the effects of light source cultivation of *Spirulinaplatensis,* were tested under variouslight sources, with difference found in the growth of biomass, specific growth rate, chlorophylland phycocyanin.According to the results, the maximum biomass and specific growth ratechlorophyll and phycocyaninfor LEDs was daylight of 0.569 gdry weight/L,0.716day^{-1},10.785 mg/L and 0.147 g/Lrespectively.The optimaltime use by LED light was 12 hours. In comparing the cost of energy is lostto the culture of LED was 0.434g dry weight/baht

Keywords: LED, Spirulinaplatensis, Photosynthesis

1. บทนำ

สาหร่ายสไปรูลิน่า *(Spirulinaplatensis)*อุดมไปด้วยแหล่งของสารอาหารนานาชนิดที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายของมนุษย์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้มากมายในหลายๆด้าน เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสำหรับมนุษย์ อาหารสัตว์เลี้ยง ยาชีวเคมี และ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เป็นต้น ในปัจจุบันการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในระดับอุตสาหกรรมยังคงใช้วิธีการเพาะเลี้ยงแบบออโตโทรฟิค (autotrophiccultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้แสงและคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากธรรมชาติเป็นหลักในการเจริญเติบโต และสังเคราะห์สารชีวมวลต่างๆ[1]แต่ยังพบข้อจำกัดของวิธีเหล่านี้อยู่ ได้แก่ ความไม่แน่นอนทางธรรมชาติ และ ภัยพิบัติทางธรรมชาติ ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการเจริญเติบโตไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของน้ำ หรือวันที่ไม่มีแสงแดดติดต่อกันหลายวันทำให้การเก็บเกี่ยวสาหร่ายล่าช้า อาจจะส่งผลเสียหายในการธุรกิจ เป็นต้น

ดังนั้นทำให้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับสาหร่ายสไปรูลิน่าอย่างแพร่หลายซึ่งจากการศึกษาของศิริวรรณเป็นงานวิจัยการศึกษาสภาวะการเลี้ยงจุลสาหร่ายที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนและไขมัน โดยทำการเลี้ยงใช้แสง 4 ชนิด คือแสงธรรมชาติ(Sunlight) แสงไฟไม้น้ำ(Blue light) แสงไฟสีขาว(Daylight) และแสงไฟสีส้ม(Warm white light) โดยให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง พบว่าสาหร่ายที่ให้แสงธรรมชาติจะมีการเจริญเติบโตเร็วสูงสุด ตามด้วยแสงไฟไม้น้ำ แสงสีส้ม และแสงสีขาว และในสภาวะที่ใช้แสงไฟสีส้มพร้อมป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณกรดไขมันไลโนเลอิก ประมาณ 26 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำมัน ซึ่งมากกว่าสภาวะอื่นๆ ส่วนกรดไขมันชนิดแกมมาไลโนเลนิก หรือโอเมก้า6 พบเฉพาะในเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงด้วยแสงไฟสีขาวมีปริมาณ 1.53 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำมัน[2]และจากการศึกษาของสมเกียรติ และจาตุพงศ์ เป็นการศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยวิธีการอบแห้งแบบการแผ่รังสี

อินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อน โดยการใช้สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงด้วยหลอด LED แล้วนำสาหร่ายที่ได้นำไปอบแห้งรวมไปถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายสไปรูลิน่า เพื่อให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในเชิงอุตสาหกรรม[3]

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของแนวคิดในการใช้ไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode: LED) หรือที่เรียกว่า หลอดLED ซึ่งมีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับแสงจากธรรมชาติ มาใช้ระหว่างการเพาะเลี้ยง เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถเจริญเติบโตด้วยการสังเคราะห์แสง และมีสารสีหรือรงควัตถุอยู่หลายประเภทโดยพบว่านอกจากจะมีคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์แล้วยังมีไฟโคบิลินอีกด้วย โดยรงควัตถุดังกล่าวสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงที่ต่างกัน งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำแสงจากหลอดLED เข้ามาช่วยในกระบวนการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า รวมถึงการหาตัวแปรที่เหมาะสมในการใช้หลอดLED และคาดว่าจะทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่าเพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่าได้

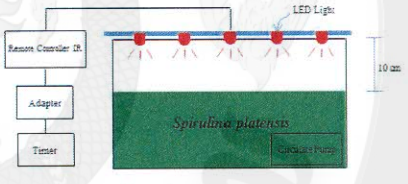
2. อุปกรณ์และการทดลอง

2.1 การจัดเตรียมสาหร่ายสไปรูลิน่า

สาหร่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นสาหร่ายสไปรูลิน่าจากคณะประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้และใช้สูตรอาหารซึ่งประกอบด้วยสารละลายในหน่วยกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร(g/L)ดังต่อไปนี้ โซเดียมไบคาร์บอเนต หรือ ผงฟู ($NaHCO_3$)6.0,โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)1.5,แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)1.0,โซเดียมคลอไรด์ หรือเกลือแกง (NaCl)1.0และปุ๋ย N:P:K (16:16:16) 0.6[4]วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ยี่ห้อ Milwaukee รุ่น pH-52 โดยให้ค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 9.5-10.5 ในกรณีที่ค่า pH ไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ สามารถทำการปรับค่าโดยการเพิ่มโซดาไฟ (NaOH)240 g/Lโดยค่อยๆเทลงในน้ำพร้อมกับวัดค่าความหนาแน่นของเซลล์ (Optical density: OD)จากนั้นเติมหัวเชื้อสาหร่ายสไปรูลิน่าที่ค่าODเท่ากับ 1.00±0.05ลงในน้ำที่ละลายสูตรอาหารลงไปในบ่อเพาะเลี้ยงโดยควบคุมให้ค่า OD เริ่มต้นเท่ากับ 0.5 ± 0.05หลังจากนั้น 4-5 วันเติมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดลงไป ทำการเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกลางแจ้งประมาณ 14 วัน

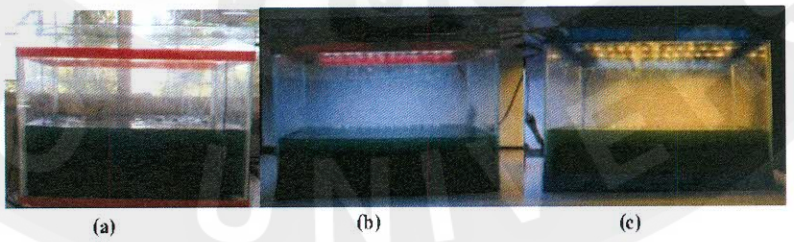
2.2 ชนิดของแสง

ในการทดลองทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยแสงทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ แสงธรรมชาติ(Control)แสงไฟสีขาว(Daylight) แสงไฟสีส้ม(Warm white) แสงไฟสีแดง(Red) แสงไฟสีเขียว(Green) แสงไฟสีน้ำเงิน(Blue) โดยใช้หลอดLEDยี่ห้อTaiwan Epistaรุ่น SMD5050ขนาด 3วัตต์ (W)ค่าความเข้มแสงประมาณ 780 ลูเมนส์ (lm)โดยมีเครื่องตั้งเวลาเปิด-ปิด (Timer) ต่อกับเครื่องแปลงกระแสไฟ (Adapter) ก่อนไปถึงตัวควบคุมการทำงาน (Remote controller IR) เพื่อใช้ในปรับชนิดของสี และระดับความเข้มแสงของหลอดLED และจากการศึกษาความเข้มแสงและระยะห่างกับผิวน้ำได้ข้อสรุปว่าระยะห่างที่ 10 เซนติเมตร (cm)มีค่าความเข้มแสงมากที่สุด และน้ำไม่สามารถกระเด็นถึงตัวหลอด LED ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Probir ที่กำหนดระยะห่างระหว่างหลอด LED กับผิวน้ำที่ระยะ10cm[5]และเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในตู้ขนาด 2 ลิตร (L)โดยมีปั๊มหมุนวน (Circulate pump) ภายในบ่อเพื่อให้อากาศ และป้องกันการแขวนลอยของสาหร่ายดังแสดงในรูปที่1

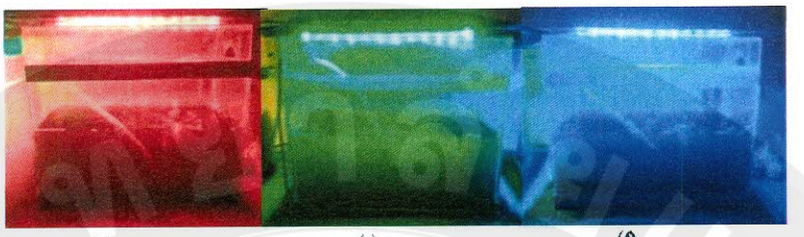


รูปที่ 1การให้แสงจากหลอดLED

ซึ่งในการทดลองจะใช้แสงธรรมชาติเป็นเปรียบเทียบทุกการทดลอง โดยระยะเวลาในการรับแสงธรรมชาติทุกการทดลองคือ 6 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 09.00 - 15.00 นาฬิกาจากนั้นให้แสงจากหลอด LED เพิ่มเติมต่อจากแสงธรรมชาติ ที่ 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง (hr)ดังแสดงในรูปที่ 2



(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

รูปที่ 2ตู้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าขนาด 2 ลิตร จากแสงทั้งหมด 6 ชนิด (a)Control, (b) Daylight, (c) Warm white, (d) Red, (e) Green และ (f) Blue ตามลำดับ

2.3 การวิเคราะห์ชีวมวล

ตรวจวัดประสิทธิการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยทำการวัดค่า ODด้วยเครื่อง UV/vis spectrophotometer (Biochromรุ่น S1200 ประเทศอังกฤษ) ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (nm)การคำนวณหาชีวมวล (Biomass: B, g dry weight/L) ของสาหร่าย จะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (OD_{560})[6] ซึ่งสามารถใช้สมการเชิงเส้นในการทำนายดังสมการ (1)

$$B = 0.42OD_{560} - 6.94\times10^{-4} \quad (1)$$

2.4อัตราการเติบโตจำเพาะ

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายใช้ระยะเวลา14 วัน หรือค่าODมีค่าประมาณ 1.00 ± 0.05[7] และสามารถคำนวณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ(Specific growth rate: μ)ที่เพิ่มขึ้นของสาหร่ายสไปรูลิน่า[5] ในสมการ (2)

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

เมื่อ N คือจำนวนเซลล์(cells/mL) และ tคือหน่วยเวลา (days)

2.5 การหาคุณค่าทางโภชนาการ

การหาค่าคลอโรฟิลล์ (Chl)ทำตามวิธีของ Lee และShen [8] และใช้สมการ (3) ในการหาค่าของมวลคลอโรฟิลล์[9]

$$\text{Chl (mg/L)} = 16.5OD_{665} - 8.3OD_{650} \quad (3)$$

เมื่อ OD_{665} และ OD_{650} คือค่าความหนาแน่นเซลล์ ของแสงที่ความยาวคลื่น 665 และ 650 nmตามลำดับ

การหาค่าไฟโคไซยานิน(Phy)ได้ทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ Bennett และBogorad [10]แล้วใช้สมการ (4) ในการหาค่าของมวลไฟโคไซยานิน[9]

$$\text{Phy (g/L)} = \frac{OD_{615} - 0.474OD_{652}}{5.34} \quad (4)$$

เมื่อ OD_{615} และ OD_{652} คือค่าความหนาแน่นเซลล์ ของแสงที่ความยาวคลื่น 615 และ 652nmตามลำดับ

2.6 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของการเจริญเติบโต

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อใช้แสงจากหลอด LEDซึ่งสามารถใช้แสดงเห็นถึงการเจริญเติบโตของสาหร่าย[11,12] ดังสมการ (5)

$$\frac{dB}{dt} = aB\left(1.0 - \frac{B}{b}\right) \quad (5)$$

โดยสามารถจัดรูปสมการแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของการเจริญเติบโตได้ดังสมการ (6)

$$B(t) = \frac{B_0 e^{at}}{1-(B_0/b)(1-e^{at})} \quad (6)$$

เมื่อ aและ b คือค่าคงที่จากสมการทำนายการเจริญเติบโตและ B_0คือชีวมวลเริ่มต้น(g dry weight/L)

2.7 ดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี

หลังจากการเก็บเกี่ยวชีวมวลต้องมีการคำนวณค่าใช้จ่ายของพลังงานที่เสียไป ซึ่งสิ่งจำเป็นที่จะประเมินดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดแอลอีดี(Indicators culture of LED light: I_{LED}, g dry weight/baht)สามารถหาได้จากสมการ (7)

$$I_{LED} = \frac{B_n - B_0}{kT_n P} \quad (7)$$

โดยที่k คือหน่วยการใช้ไฟฟ้า (baht/kWhr), T_nคือเวลาที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง (days),P คือพลังงานที่ให้หลอด LED(J), B_nคือชีวมวล (g dry weight/L) ของสาหร่ายวันที่ nและB_0คือชีวมวลเริ่มต้น (g dry weight/L)

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าODและμที่ได้แต่ละการทดลอง มาวิเคราะห์ความแตกต่าง โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เมื่อพบความแตกต่างจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น95%ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยแสงทั้ง 6ชนิด พบว่าการเลี้ยงด้วยแสงธรรมชาติ ร่วมกับแสงจากหลอด LEDเพียง 6 ชั่วโมงต่อวัน สามารถให้ค่าการเจริญเติบโตที่สูงกว่าการเพาะเลี้ยงด้วยแสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว และค่าOD ของสาหร่ายสไปรูลิน่าภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอด LED 6 ชั่วโมงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร(OD_{560}) ภายใต้ระยะเวลาเปิดหลอดLED 6 ชั่วโมงตลอดระยะเวลา14 วัน

Day	OD_{560}					
	Control	Warm White	Daylight	Red	Green	Blue
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.533	0.571	0.595	0.568	0.556	0.563
3	0.584	0.645	0.679	0.640	0.621	0.633
4	0.683	0.792	0.826	0.725	0.711	0.720
5	0.795	0.913	0.935	0.851	0.817	0.824
6	0.825	0.986	1.053	0.892	0.852	0.858
7	0.849	1.010	1.108	0.937	0.908	0.892
8	0.872	1.074	1.173	0.978	0.943	0.959
9	0.891	1.140	1.202	1.025	0.986	1.006
10	0.913	1.215	1.260	1.088	1.023	1.051
11	0.937	1.221	1.275	1.125	1.058	1.073
12	0.954	1.229	1.286	1.168	1.071	1.095
13	0.983	1.235	1.292	1.187	1.082	1.110
14	1.002	1.248	1.301	1.203	1.104	1.128

จากข้อมูลตารางที่ 1 จึงกล่าวได้ว่าแม้แสงธรรมชาติจะประกอบด้วยแสงสีแดง แสงสีน้ำเงินและแสงอื่นๆ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ผสมกันและเหมาะสมกับการใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์แสงแต่การให้แสงไฟร่วมด้วยต่อจากการใช้แสงธรรมชาติ จะสามารถทำให้การเจริญเติบโตมากยิ่งขึ้นลดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงจากเดิมประมาณ 14วัน เหลือเพียง6 - 10 วันมีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลิน่าเจริญเติบโตได้เร็วมากยิ่งขึ้นสังเกตได้จากค่า ODของการทดลองที่ใช้แสงจากหลอด LED ร่วมกับแสงธรรมชาติ เทียบกับการใช้แสงธรรมชาติเพียงอย่างเดียว โดยหลอด Daylight ทำให้ค่า ODมีค่ามากที่สุด คือ 1.301

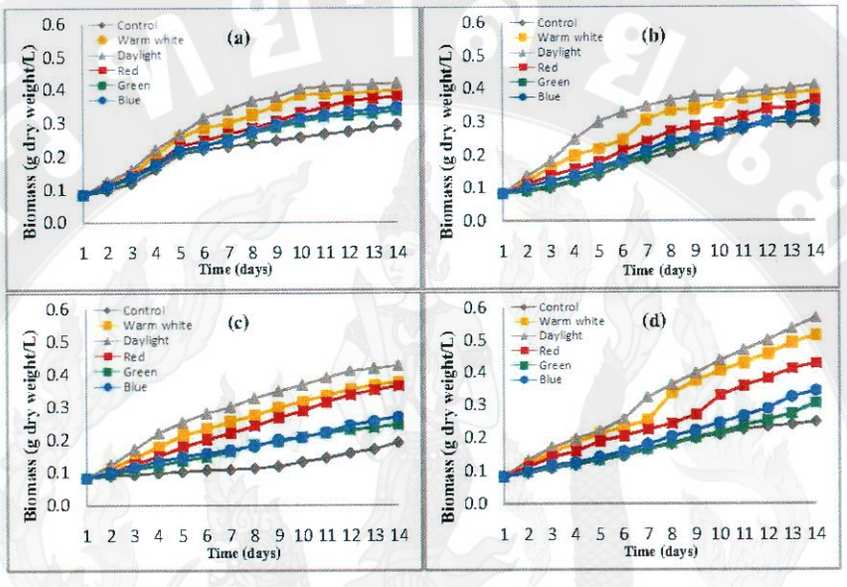
จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยแสงทั้ง 6ชนิด โดยให้แสงธรรมชาติร่วมกับแสงจากหลอด LED แต่เพิ่มระยะเวลาของการให้แสงของหลอด LED เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 6, 12, 18และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ โดยจากการเพาะเลี้ยงเสร็จสิ้น สามารถคำนวณหาค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระยะเวลาที่แตกต่างกันได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2ค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า(gdry weight/L)ในวันที่14

Time LED	**Biomass (gdry weight/L)**					
(hours)	Control	Warm white	Daylight	Red	Green	Blue
6	0.294	0.397	0.419	0.378	0.337	0.347
12	0.299	0.390	0.411	0.363	0.328	0.332
18	0.190	0.375	0.425	0.363	0.245	0.268
24	0.248	0.514	0.569	0.429	0.306	0.344

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระดับการให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน พบว่าหลอดLED ที่ให้ค่าชีวมวลมากที่สุดคือหลอด Daylight, Warm white, Red, Green และ Blueตามลำดับ ซึ่งหลอด Daylight ภายใต้ระยะเวลาการให้แสง 24 ชั่วโมงมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.569g dry weight/L

จากการทดลองทั้งหมดสามารถหาค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าของแต่ละวันแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3ค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระยะเวลาให้แสงจากหลอดLED (a) 6,(b) 12, (c) 18,(d) 24 ชั่วโมงตลอดระยะเวลา 14 วัน

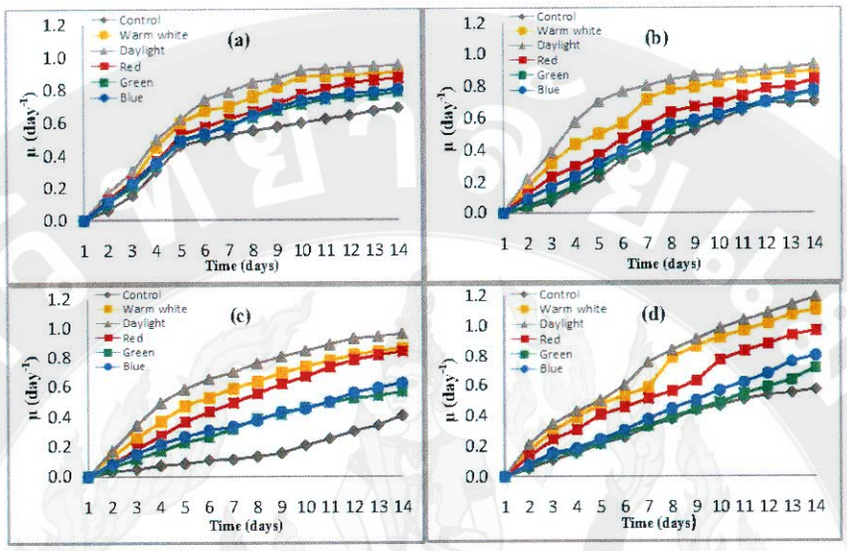
จากการเปรียบเทียบค่าชีวมวลของสาหร่ายที่ได้ และระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกันสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ทั้งระยะเวลา 14 วัน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่3ค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า(day^{-1}) ตลอดระยะเวลา 14วัน

Light source	Time LED (hours)			
	6	12	18	24
Control	0.454 ± 0.230^{a}	0.395 ± 0.259^{a}	0.162 ± 0.123^{a}	0.326 ± 0.196^{a}
Warm white	0.632 ± 0.307^{a}	0.614 ± 0.291^{ab}	0.552 ± 0.274^{b}	0.657 ± 0.357^{b}
Daylight	0.680 ± 0.317^{a}	0.690 ± 0.291^{b}	0.649 ± 0.300^{b}	0.716 ± 0.374^{b}
Red	0.571 ± 0.284^{a}	0.514 ± 0.271^{ab}	0.489 ± 0.276^{bc}	0.546 ± 0.307^{ab}
Green	0.524 ± 0.260^{a}	0.428 ± 0.267^{a}	0.324 ± 0.188^{ac}	0.359 ± 0.223^{a}
Blue	0.538 ± 0.265^{a}	0.453 ± 0.255^{a}	0.350 ± 0.192^{c}	0.409 ± 0.258^{a}

หมายเหตุ:ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน(mean±SD) และตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น95% โดยวิธี Duncan' s Multiple Range Test (DMRT)

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า จากระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน และนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ในช่วงเวลาเปิดหลอด LED 12, 18 และ 24 ชั่วโมง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนช่วงเวลาการเปิดหลอด LED ที่ 6 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระดับการให้แสงแตกต่างกันของแต่ละวัน แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ภายใต้ระยะเวลาให้แสงจากหลอดLED (a) 6,(b) 12, (c) 18,(d) 24ชั่วโมง

ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ให้แสงธรรมชาติร่วมกับการให้แสงจากหลอดLED ในระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน พบว่าการให้แสงจากหลอดLED ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด

ดังนั้นหากศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ และเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการที่เพิ่มขึ้นของค่าคลอโรฟิลล์ และค่าไฟโคไซยานินภายใต้ระดับการให้แสงและระยะเวลาให้แสงจากหลอด LED ที่แตกต่างกัน สามารถแสดงตารางที่ 4

ตารางที่ 4ผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ

Light sources	Nutrition							
	6hr		12hr		18hr		24hr	
	Chl (mg/L)	Phy (g/L)	Chl (mg/L)	Phy (g/L)	Chl (mg/L)	Phy (g/L)	Chl (mg/L)	Phy (g/L)
Control	6.522	0.089	6.607	0.090	4.908	0.067	5.806	0.079
Warm white	8.123	0.111	8.013	0.110	7.785	0.106	9.933	0.136
Daylight	8.468	0.116	8.345	0.114	8.559	0.117	10.785	0.147
Red	7.830	0.107	7.596	0.104	7.589	0.104	8.618	0.118
Green	7.186	0.098	7.056	0.096	5.760	0.079	6.717	0.092
Blue	7.342	0.100	7.114	0.097	6.125	0.084	7.303	0.100

จากผลการศึกษาผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าการใช้หลอด Daylight ภายใต้ระยะเวลาให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของ Chlและ Phyสูงที่สุดได้ถึง 10.785 mg/L และ 0.147 g/L และหากเปรียบเทียบกับการเลี้ยงแบบ Control สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของChlและPhy เพิ่มขึ้น 46.17% และ46.26% ตามลำดับ

จากการศึกษาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อใช้แสงจากหลอด LEDเป็นแหล่งกำเนิดแสง สามารถแสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลิน่า และอัตราที่เพิ่มขึ้นของค่าชีวมวลภายใต้ระยะเวลาการให้แสงมากขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่5ค่าจากสมการแบบจำลองทางจลน์ศาสตร์ของการเจริญเติบโตภายใต้แหล่งกำเนิดแสง และระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน

Light time (hours)		Light sources					
		Control	Warm white	Daylight	Red	Green	Blue
6	a	-0.003	0.131	-0.007	0.001	0.116	0.039
	b	-0.014	31.362	-0.019	-0.003	31.209	0.191
	R^2	0.905	0.515	0.891	0.963	0.641	0.891
12	a	0.040	-0.001	-0.045	0.119	0.031	0.006
	b	0.331	-0.004	-0.091	-4.135×10^{7}	0.201	0.029
	R^2	0.967	0.931	0.880	0.812	0.978	0.985
18	a	0.055	0.123	-0.003	0.021	0.087	0.092
	b	1.994×10^{7}	-6.383×10^{7}	-0.100	0.102	-7.95×10^{7}	0.929
	R^2	0.942	0.743	0.955	0.991	0.929	0.940
24	a	0.088	0.144	0.152	0.049	0.064	0.108
	b	-1.271×10^{7}	-8.288×10^{7}	-5.132×10^{7}	0.279	1.119	-1.187×10^{8}
	R^2	0.938	0.864	0.833	0.991	0.997	0.989

จากตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)เห็นได้ว่า หลอด Daylight ที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกันค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.833 –0.955 ซึ่งถือว่ามีค่าระดับการตัดสินใจที่ยอมรับได้ในทางสถิติ

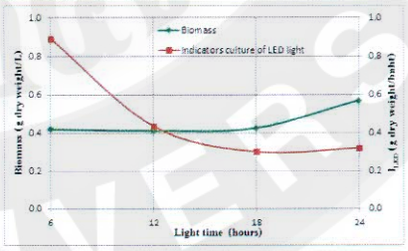
หากเปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยหลอดLED ของแต่ละชนิด และระยะเวลาการให้แสงจากหลอด LED ทั้งหมด ซึ่งการหาค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยหลอดLED สามารถหาได้จาก หน่วยการใช้ไฟฟ้า (baht/kWhr) คูณชั่วโมงที่ใช้ไฟฟ้าต่อวัน คูณระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง คูณกำลังไฟฟ้า (W) และเมื่อหาค่าพลังงานที่ใช้ไฟฟ้าต่อวันได้แล้วนำมาหารผลต่างของชีวมวลวันสุดท้ายลบกับชีวมวลเริ่มต้น ดังนั้นดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยหลอดLEDภายใต้ระยะเวลาการให้แสงที่แตกต่างกัน สามารถแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6ค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดLED(gdry weight/baht)ภายใต้ระยะเวลาที่ใช้แสงต่างกัน

Light sources	I_{LED} (gdry weight/baht)			
	6 h	12 h	18 h	24 h
Warm white	0.831	0.406	0.258	0.285
Daylight	0.890	0.434	0.302	0.321
Red	0.781	0.371	0.247	0.229
Green	0.671	0.324	0.143	0.148
Blue	0.698	0.329	0.163	0.173

จากตารางที่ 6ค่าดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงด้วยหลอดLED สามารถเปรียบเทียบกับค่าชีวมวลแห้งที่ได้ต่อพลังงานที่เสียไปหลังจากการทดลองเสร็จสิ้น เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่า หลอด Daylight สามารถให้ค่าชีวมวลแห้งมาที่สุดต่อพลังงานที่เสียไปในแต่ละการทดลอง

หากนำข้อมูลของหลอด Daylight จากค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยง และระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED มาเปรียบเทียบกัน พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้แสงจากหลอด LED ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5การเปรียบเทียบค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงและระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED

จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาจากการการเปรียบเทียบค่าชีวมวลกับดัชนีชี้วัดการเพาะเลี้ยงและระยะเวลาที่ใช้แสงจากหลอด LED พบว่า ระยะเวลาการให้แสงที่ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แสงจากหลอดแอลอีดี โดยชนิดแสงที่แตกต่างกัน พบว่าสภาวะที่ระยะเวลาการให้แสง 24 ชั่วโมงของหลอด Daylight จะทำให้มีค่าชีวมวลสูงที่สุดเท่ากับ 0.569g dry weight/L และค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 0.716 day^{-1}สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของ Chl และPhyสูงที่สุดได้ถึง 10.785 mg/L และ 0.147 g/L ตามลำดับ และหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชีวมวลเทียบกับแสงธรรมชาติและระยะเวลาการให้แสงจากหลอด LED พบว่า การให้แสงที่ระยะเวลา12 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า

5. เอกกสารอ้างอิง

[1]. ผกาวดี แก้วกันเนตร และแพรพิลาศ ดุจจานุทัศน์. 2553. การใช้ประโยชน์จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเกษตรเป็นแหล่งอาหารให้สาหร่ายเพื่อผลิตไบโอดีเซล. วารสารศูนย์บริการวิชาการปีที่ 18 ฉบับที่ 2, วันที่ 2 เมษายน – มิถุนายน.

[2]. ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์.2555. การศึกษาสภาวะการเลี้ยงจุลสาหร่ายที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนและไขมัน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม.

[3]. สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศและจาตุพงศ์ วาฤทธิ์. 2556. จลนศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยวิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อน. การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ. โรงแรมอิมพิเรียลโกลเด้นไทรแองเกิ้ล รีสอร์ท. 12: 55-67.

[4]. จงกล พรมยะ. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายสไปรูลินา. 2549. การพัฒนาศักยภาพของสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสีย วันที่ 7 - 9 สิงหาคมณ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 46 - 60.

[5]. ProbirDas, Wang Lei, Siti Sarah Aziz and Jeffrey Philip Obbard. 2001. Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light. Bioresource Technology 102: 3883-3887.

[6]. Chih-Yu Wang, Chun-Chong Fu and Yung-Chuan Liu. 2007. Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulinaplauensis*. Biochemical Engineering Journal 37: 21-25.

[7]. จงกลพรมยะและขจรเกียรติแซ่ตัน. 2548. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อสุขภาพ. ภาคเทคโนโลยีการประมง คณะผลิตกรรมการเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้เชียงใหม่.

[8]. Y.K. Lee and H. Shen. 2004. Basic culturing techniques, in: A. Richmind (Ed.), Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, Blackwell Science Ltd., Ames, IA, pp. 40 - 56.

[9]. Hua-Bing Chen, Jian-Yan Wu, Chin-Feng Wang, Chun-Chong Fu, Chwen-Jen Shieh,Chih-I Chen, Chih-Yu Wang and Yung-Chuan Liu. 2010. Modeling on chlorophyll a and phycocyanin production by Spirulinaplatensis under various light-emitting diodes. Biochemical Engineering Journal 53: 52–56.

[10]. A. Bennett and L. Bogorad.1973.Complementary chromatic adaptation in filamentous blue-green alga, J. Cell Biol. 58:419 – 435.

[11]. R.M. Weiss and D.F. Ollis. 1980. Extracellular microbial polysaccharides. I. Substrate, biomass and product kinetic equations for batch xanthan gum fermentation,Biotechnol. Bioeng.22: 859–873.

[12]. V. Gadhamshetty, A. Sukumaran, N. Nirmalakhandan and M.T. Myint. 2008.Photofermentation of malate for biohydrogen production-a modeling approach.Int. J. Hydrogen Energy 33: 2138–2146.

ภาคผนวก ข

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายพรอนันต์ วงศ์ใหญ่	
เกิดเมื่อ	29 สิงหาคม พ.ศ. 2532	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเชียงคำวิทยาคม จังหวัดพะเยา
	พ.ศ. 2554	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่