



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้สาหร่าย *Spirulina platensis* ในการบำบัดน้ำเสีย  
จากฟาร์มสุกรและการนำกลับมาใช้ประโยชน์

โดย ศิริภรณ์ ชื่นบาล

มิถุนายน 2550

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้สาหร่าย *Spirulina platensis* ในการบำบัด  
น้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการนำกลับมาใช้ประโยชน์

คณะผู้วิจัย  
ศิริภรณ์ ชื่นบาล

สังกัด  
ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

### บทคัดย่อ

จากการศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) โดยใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 0, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย สไปรูลินาคือ ความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร 10 เปอร์เซ็นต์ โดยในสภาวะกลางแจ้ง นั้นสาหร่ายเจริญได้ดีกว่าในสภาวะห้องปฏิบัติการ สารอาหารที่เหมาะสมคือ  $\text{NaHCO}_3$  และ  $\text{NaNO}_3$  ที่ 8 กรัม/ลิตร และ 1.5 กรัม/ลิตร ตามลำดับ จากการเพาะเลี้ยงแบบกะ แบบกึ่งกะ และแบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร 10 เปอร์เซ็นต์และเติมสารอาหาร มีผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำฟาร์มสุกร 10 เปอร์เซ็นต์และไม่เติมสารอาหาร แต่พบว่าสาหร่ายมีผลผลิตที่สูงกว่าเนื่องจากอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ มีความเหมาะสมมากกว่าแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำทิ้งที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่า COD, BOD,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  และ SRP เท่ากับ 36.3, 54.3, 44.15, 92.3 และ 70.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสาหร่ายสไปรูลินามีการเจริญเติบโตสูงสุด มีจำนวนเซลล์ 325,500 เซลล์/มิลลิลิตร OD 1.0 และน้ำหนักแห้ง 0.965 มิลลิกรัม/ลิตร มีปริมาณโปรตีน 55.88 เปอร์เซ็นต์

### Abstract

From the study, *Spirulina platensis* was cultivated by using swine waste at the concentrations of 0, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 percent. The suitable swine waste concentration for maximum growth of *Spirulina platensis* was 10 percent. The growth in outdoor condition was better than laboratory condition. The suitable nutrients for algae growth were  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{NaNO}_3$  with 8.0 g/l and 1.5 g/l respectively. From batch, semi-batch and semi-continuous culture with 10 percent swine waste concentration and nutrient added, the waste water treatment efficiency was lower than 10 percent swine waste concentration without nutrient added but algae productivity was higher because of enrich organic matter. Semi-batch culture was most suitable than batch and semi-continuous culture. From semi-batch culture, the highest waste water treatment efficiency was 12 days retention time, where the maximum removal efficiency was measured as COD, BOD,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and SRP values of 36.3, 54.3, 44.15, 92.3 and 70.1 percent, respectively. The maximum growth of *Spirulina platensis* was 325,000 cells/ml, OD 1 and biomass of 0.965 mg/l. Protein content was 55.88 percent.

## Executive Summary

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร โดยได้ทำการศึกษาถึงสภาพแวดล้อม ชนิดของสารอาหาร ระยะเวลาในการเก็บกักที่เหมาะสม ที่ทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีและสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระดับ lab scale ทั้งในสภาพกลางแจ้งและห้องปฏิบัติการ ด้วยน้ำทิ้งที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันดังนี้ 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และปริมาณสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต ด้วยการเติมสารอาหารพื้นฐาน ซึ่งได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) โซเดียมไนเตรท ( $\text{NaNO}_3$ ) ไดโปตัสเซียมฟอสเฟต ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) และปุ๋ย N:P:K สูตร 16:16:16 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของสาหร่าย พบว่า สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีในสภาพกลางแจ้ง ที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดีที่สุดคือสามารถลดค่า BOD,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N, SRP ได้ 66.3, 46.7, 97.2 และ 50.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตคือ  $\text{NaHCO}_3$  ที่ปริมาณ 8 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  ที่ปริมาณ 1.5 กรัม/ลิตร

เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาทำการศึกษาต่อแบบกะ (batch) โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อซีเมนต์กลางแจ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ใช้น้ำตัวอย่าง 100 ลิตร ทำการทดลองเป็นเวลา 16 วัน พบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายมีการเจริญเติบโตมากกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารและชุดควบคุม โดยพบว่าในวันที่ 12 ของการทดลองนั้นเป็นช่วงที่สาหร่ายมีปริมาณสูงที่สุด และมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งได้ดีที่สุดในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่า สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลองและมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งได้ดีกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร แต่เมื่อระยะเวลาของการเพาะเลี้ยงเริ่มนานขึ้นพบว่าสาหร่ายจะตายลงและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งก็จะลดลงด้วย

เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาทำการศึกษาต่อแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียน ขนาดพื้นที่ทำการ 2,000 ลิตร ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน พบว่าชุดการทดลองทั้งสองชุดการทดลองคือเติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารนั้น ระบบไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากสาหร่ายส่วนใหญ่ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบในแต่ละวัน อีกทั้งสาหร่ายที่เหลืออยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมี OD 0.266 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตอนเริ่มต้น ในขณะที่ชุดการ

ทดลองที่ไม่เติมสารอาหารมี OD เพียง 0.024 เท่านั้น อีกทั้ง 2 ชุดการทดลองพบว่าในระยะเวลาที่นานขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งของระบบจะยิ่งลดลง

ในการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch) พบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้น สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งสูงสุด 1.0, 325,500 เซลล์/มิลลิลิตร และ 0.965 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ พบว่าหลังจากระบบปรับตัวแล้วระบบค่อนข้างจะคงที่ และเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบก็สามารถปรับตัวได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่า COD, BOD,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  และ SRP เท่ากับ 36.3, 54.3, 44.15, 92.3 และ 70.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดีกว่าเนื่องจากไม่มีสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปในระบบ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่า COD, BOD,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  และ SRP เท่ากับ 58.8, 66.2, 74.8, 91.9 และ 64.48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีกระบวนการปรับตัวค่อนข้างช้า และระบบไม่ค่อยคงที่ เนื่องจากสาหร่ายมีความอ่อนแอ ทำให้พบการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่น และเมื่อเติมน้ำทิ้งลงไปในระบบ ระบบจะปรับตัวค่อนข้างน้อย และจะตายในที่สุด

เมื่อนำสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงได้มาหาปริมาณสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีปริมาณคุณค่าทางโภชนาการที่สูงโดยเฉพาะ โปรตีนที่มีถึง 55.88 เปอร์เซ็นต์เมื่อมีการเติมสารอาหารที่จำเป็น และมีค่า 50.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ใส่สารอาหาร

จากการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรโดยใช้สาหร่ายสไปรูลินา พบว่า ระบบการเพาะเลี้ยงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือแบบกึ่งกะ (semi-batch) น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 10% ระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน และควรมีการเติมสารอาหารคือ  $\text{NaHCO}_3$  ที่ปริมาณ 8 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  ที่ปริมาณ 1.5 กรัม/ลิตร เพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับระบบของการบำบัดน้ำเสียอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีผลพลอยได้คือสาหร่ายสไปรูลินาซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับสุกรภายในฟาร์ม

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ยวดี พิรพรพิศาล นักวิจัยที่ปรึกษา ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา ซึ่งมักพบอยู่บ่อยครั้ง และต้องมีการแก้ไขขั้นตอนในการทำวิจัยอยู่หลายหน พร้อมทั้งการตรวจสอบแก้ไขงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ในห้องปฏิบัติการ ในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และนักศึกษาทุกคนในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ และแรงงานในการขนน้ำตัวอย่าง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฟาร์มเลี้ยงสุกร คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการอนุเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้ให้ทุนวิจัย และสนับสนุนการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้

ศิราภรณ์ ชื่นชาติ

พฤษภาคม 2550

## สารบัญ

|                                                                                                     | หน้า   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| บทคัดย่อ                                                                                            | (I)    |
| Abstract                                                                                            | (II)   |
| Executive Summary                                                                                   | (III)  |
| กิตติกรรมประกาศ                                                                                     | (V)    |
| สารบัญ                                                                                              | (VI)   |
| สารบัญตาราง                                                                                         | (IX)   |
| สารบัญภาพ                                                                                           | (X)    |
| สารบัญภาคผนวก                                                                                       | (XIII) |
| บทที่ 1 บทนำ                                                                                        |        |
| ความสำคัญและที่มาของปัญหา                                                                           | 1      |
| วัตถุประสงค์ของโครงการ                                                                              | 2      |
| ขอบเขตของการวิจัย                                                                                   | 2      |
| บทที่ 2 การตรวจเอกสาร                                                                               |        |
| ประวัติความเป็นมาของสาหร่ายสไปรูลินา                                                                | 3      |
| ลักษณะทางสัณฐานวิทยา                                                                                | 4      |
| นิเวศวิทยาของสาหร่ายสไปรูลินา ( <i>Spirulina platensis</i> )                                        | 5      |
| วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินา ( <i>Spirulina platensis</i> )                                         | 5      |
| ปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ( <i>Spirulina platensis</i> )                        | 6      |
| คุณสมบัติของสาหร่าย                                                                                 | 7      |
| สาหร่ายสไปรูลินาและการบำบัดน้ำทิ้ง                                                                  | 12     |
| สถานการณ์การเลี้ยงสุกรในประเทศไทย                                                                   | 13     |
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย                                                                            |        |
| 1. การเตรียมเชื้อสาหร่ายตั้งต้น                                                                     | 16     |
| 2. ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย                | 16     |
| 3. ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร     | 18     |
| 4. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาคับด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับ pilot scale แบบกะ (batch culture) | 19     |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                                   | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับนำร่อง                              | 20   |
| 6. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลีนาที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร            | 21   |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>                                                     |      |
| 1. ศึกษาหาความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่าย     |      |
| 1.1 ผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่างๆ                                      | 23   |
| 1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง                                                                  | 24   |
| 2. ศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายจากน้ำทิ้งฟาร์มเลี้ยงสุกร  |      |
| 2.1 ผลของ $\text{NaNO}_3$ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลีนา                                    | 32   |
| 2.2 ผลของ $\text{NaHCO}_3$ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลีนา                                   | 33   |
| 2.3 ผลของ $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลีนา                           | 34   |
| 2.4 ผลของ N.P.K. สูตร 16:16:16 ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลีนา                               | 34   |
| 3. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับ pilot scales แบบกะ (batch culture) |      |
| 3.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย                                                                      | 42   |
| 3.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง                                                                  | 43   |
| 4. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับนำร่อง                              |      |
| 4.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous)                                        |      |
| 4.1.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย                                                                    | 52   |
| 4.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง                                                                | 53   |
| 4.2 การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)                                                   |      |
| 4.2.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย                                                                    | 61   |
| 4.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง                                                                | 62   |
| 5. การปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นในการทดลอง                                                        | 71   |
| 6. องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ                                                                 | 73   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                | หน้า |
|----------------|------|
| สรุปผลการทดลอง | 75   |
| บรรณานุกรม     | 76   |
| ภาคผนวก        | 81   |

## สารบัญตาราง

|                                                                                                                                          | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในสาหร่ายสไปรูลินากับอาหารชนิดอื่นๆ                                                               | 10   |
| ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบของกรดอะมิโนของสาหร่าย <i>Spirulina</i> spp. และอาหาร โปรตีนอื่นๆ กับค่ามาตรฐาน FAO (กรัม/100 กรัมโปรตีน) | 10   |
| ตารางที่ 2.3 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของสาหร่ายสไปรูลินา ( <i>Spirulina</i> spp.) แห่ง 1 กิโลกรัม                                         | 11   |
| ตารางที่ 2.4 สถิติจำนวนสุกรในประเทศไทยแสดงตามรายภาค ตั้งแต่ปี 2536-2545                                                                  | 14   |
| ตารางที่ 2.5 ปริมาณอุจจาระและปัสสาวะที่สุกรขับถ่ายต่อวัน                                                                                 | 14   |
| ตารางที่ 2.6 ปริมาณและลักษณะสมบัติโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม                                                       | 15   |
| ตารางที่ 2.7 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร                                                                                    | 15   |
| ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร คณะผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้                                                  | 22   |
| ตารางที่ 4.2 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยวัดด้วยการดูคลอโรฟิลล์และจำนวนเซลล์                               | 37   |
| ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของสาหร่ายสไปรูลินาที่ได้จากการเพาะเลี้ยงแบบ batch culture ด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ความเข้มข้น 20%          | 73   |
| ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลินา จากการเพาะเลี้ยงในอาหารที่ต่างชนิดกัน                                       | 74   |

## สารบัญภาพ

|                                                                                                                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 สาหร่ายสไปรูลินา ( <i>Spirulina platensis</i> ) กำลังขยาย 400 เท่า                                                                      | 3    |
| รูปที่ 2.2 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินา ( <i>Spirulina</i> sp.)                                                                                    | 5    |
| รูปที่ 3.1 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในห้องปฏิบัติการ                               | 17   |
| รูปที่ 3.2 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาพกลางแจ้ง                                 | 17   |
| รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์สารอาหารที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา                                                                           | 18   |
| รูปที่ 3.4 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture) ในระดับ pilot scale                                                                  | 19   |
| รูปที่ 3.5 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) ในบ่อแบบวนเวียน                                                 | 20   |
| รูปที่ 3.6 การเก็บผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินา                                                                                                        | 21   |
| รูปที่ 4.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ในการเพาะเลี้ยงในสภาพกลางแจ้ง                  | 27   |
| รูปที่ 4.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ                | 28   |
| รูปที่ 4.3 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง                            | 29   |
| รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD และสารอาหาร ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาพกลางแจ้ง               | 30   |
| รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD และสารอาหาร ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาพห้องปฏิบัติการ         | 31   |
| รูปที่ 4.6 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร $\text{NaNO}_3$ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง         | 38   |
| รูปที่ 4.7 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร $\text{NaNO}_3$ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ | 38   |
| รูปที่ 4.8 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร $\text{NaHCO}_3$ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง        | 39   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

|                                                                                                                                                              | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร $\text{NaHCO}_3$ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ          | 39   |
| รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง         | 40   |
| รูปที่ 4.11 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ | 40   |
| รูปที่ 4.12 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร NPK ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง                              | 41   |
| รูปที่ 4.13 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในอาหาร NPK ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ                      | 41   |
| รูปที่ 4.14 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในการเพาะเลี้ยงแบบกะ (batch culture)                                                         | 48   |
| รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                                | 49   |
| รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                                | 49   |
| รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                    | 50   |
| รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                                | 51   |
| รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                                 | 51   |
| รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                                 | 51   |
| รูปที่ 4.21 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)                                    | 57   |
| รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)               | 58   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

|                                                                                                                                        | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) | 58   |
| รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) | 59   |
| รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) | 60   |
| รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)  | 60   |
| รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)  | 60   |
| รูปที่ 4.28 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในการเพาะเลี้ยง<br>แบบกึ่งกะ (semi-batch culture)                      | 67   |
| รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)             | 68   |
| รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)             | 68   |
| รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วย<br>การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture) | 69   |
| รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)             | 70   |
| รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)              | 70   |
| รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยง<br>สาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)              | 70   |
| รูปที่ 4.35 สาหร่ายที่ปนเปื้อนที่พบเป็นจำนวนมากจากการทดลอง                                                                             | 72   |

## สารบัญภาคผนวก

## หน้า

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ที่เพาะเลี้ยง<br>ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสภาพกลางแจ้ง                              | 82 |
| ตารางที่ 2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ที่เพาะเลี้ยง<br>ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสภาพห้องปฏิบัติการ                        | 82 |
| ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย BOD (มิลลิกรัม/ลิตร) ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ใน<br>การเพาะเลี้ยงสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน              | 83 |
| ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย Ammonia nitrogen (มิลลิกรัม/ลิตร) ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่<br>ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน | 83 |
| ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย Nitrate nitrogen (มิลลิกรัม/ลิตร) ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้<br>ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน | 84 |
| ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย Phosphate (มิลลิกรัม/ลิตร) ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการ<br>เพาะเลี้ยงสาหร่าย <i>Spirulina platensis</i> ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน        | 84 |
| ตารางที่ 7 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย<br><i>Spirulina platensis</i> ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วันแสดงด้วยค่า OD                               | 85 |
| ตารางที่ 8 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย<br><i>Spirulina platensis</i> ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วันแสดงด้วยจำนวนเซลล์                           | 87 |
| ตารางที่ 9 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)                                                                                                          | 88 |
| ตารางที่ 10 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง<br>(semi- continuous culture)                                                                                | 90 |
| ตารางที่ 11 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)                                                                                                | 92 |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สภาพแวดล้อมที่เสื่อมโทรมของแหล่งน้ำนั้นถือได้ว่าเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากการเน่าเสียของน้ำในแม่น้ำ ลำคลอง ซึ่งการเน่าเสียนี้เกิดจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ได้รับจากเกษตรกรรม อุตสาหกรรมและชุมชน สำหรับประเทศไทยซึ่งถือได้ว่าเป็นประเทศกสิกรรม นั้น น้ำเสียซึ่งเกิดจากแหล่งเกษตรกรรมถือได้ว่าเป็นสาเหตุที่สำคัญ โดยเฉพาะน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร โดยน้ำทิ้งเหล่านี้จะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเกษตรกรรม สุขอนามัยของชุมชน และเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรเหล่านี้จะมีสารอินทรีย์ แอมโมเนีย และของแข็งแขวนลอยค่อนข้างสูง (Pagilla, 2000) ในการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง การควบคุมดูแลเป็นไปด้วยความยากลำบากเพราะนอกจากฟาร์มขนาดใหญ่เท่านั้นจึงจะมีระบบบำบัดน้ำเสียของตัวเอง แต่โดยทั่วไปลักษณะของการเลี้ยงสุกรจะเป็นฟาร์มขนาดกลางและขนาดเล็ก รวมไปถึงการเลี้ยงภายในครัวเรือน ซึ่งพบว่ามีกระจายอยู่ทั่วไปแทบทุกภาคของประเทศไทย ดังนั้นเพื่อลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นนี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งด้วยวิธีที่เหมาะสมทั้งประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น และขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก เพื่อให้ประชาชนที่เลี้ยงสุกรโดยทั่วไปสามารถนำไปปฏิบัติได้

การกำจัดสารต่างๆ ในน้ำเสียนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งขบวนการทางเคมีและทางชีววิทยา ซึ่งในปัจจุบันพบว่าการใช้สิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ เช่น แบคทีเรีย สาหร่าย ยีสต์ โปรโตซัว เห็ด รา และพืชน้ำบางชนิด เช่น ผักตบชวา เป็นต้น ในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นเป็นอีกทางหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจนอกเหนือไปจากการใช้กระบวนการทางเคมี เนื่องจากระบบนี้จะมีราคาถูก อีกทั้งยังมีความปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อมมากกว่า โดยเฉพาะสารอินทรีย์นั้นสามารถถูกกำจัดจากระบบบำบัดน้ำเสียได้โดยการใช้สิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาหร่าย ผลการศึกษาพบว่าสาหร่ายน้ำจืดมากกว่า 60 สกุล 80 ชนิด และสาหร่ายทะเลอย่างน้อย 15 ชนิดที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ สาหร่ายที่พบทั่วไปตามแหล่งน้ำที่รับน้ำทิ้ง มักเป็นพวก *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp., *Ossillatoria* sp., *Clostridium* sp., *Schlothrix* sp. (ทศพร, 2529) ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดนี้ขึ้นกับความเหมาะสมในการที่จะเลือกใช้สาหร่ายในแต่ละชนิดนั่นเอง

ในการศึกษครั้งนี้ได้เลือกใช้สาหร่ายสไปรูลินาเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้ ทำให้ง่ายต่อการเพาะเลี้ยง (ยวดี, 2544) และสาหร่ายชนิดนี้มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 62-68 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมากกว่าปริมาณโปรตีนในไข่และวัวถึง 3.5 เท่า (สุนทวิทย์, 2529) จึงทำให้สาหร่ายชนิดนี้เป็นที่นิยมเลี้ยงกันมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะในการเพิ่มผลผลิตของสาหร่ายและการลดต้นทุนการผลิตเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์นั้น

พบว่านิยมใช้น้ำทิ้งจากแหล่งต่างๆ เช่น จากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (นฤมล และคณะ, 2529) โรงงานอุตสาหกรรมยางพารา (พิมพ์พรณ และ อารักษ์, 2531) โรงงานขนมจีน (จิระพรณและคณะ, 2540) และ โรงงานผลิตกระดาสา (สมเกียรติ, 2542) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่ายังมิได้มีการศึกษาอย่างจริงจังในการใช้สาหร่ายชนิดนี้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีค่าสารอินทรีย์และความสกปรกเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในฟาร์มเลี้ยงสุกร ซึ่งนับได้ว่าเป็นแหล่งสารอาหารที่ดี การศึกษาครั้งนี้จึงได้ประยุกต์ใช้สาหร่ายสไปรูลีนาในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ซึ่งสาหร่ายชนิดนี้ง่ายต่อการเพาะเลี้ยง ทำให้เป็นการง่ายต่อการเกษตรกรในการประยุกต์ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดเล็กของตนเอง อีกทั้งยังได้ผลพลอยได้เป็นอาหารสัตว์ที่มีโปรตีนสูงซึ่งสามารถนำกลับไปใช้เลี้ยงสุกรได้หรือจะขายให้กับผู้รับซื้อโดยทั่วไปเพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ ซึ่งนับได้ว่าเป็นแรงจูงใจอย่างหนึ่งที่จะทำให้การบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำตามธรรมชาติอย่างในปัจจุบัน

#### วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สาหร่ายสไปรูลีนาในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรทั้งในห้องปฏิบัติการและในพื้นที่จริง
2. ศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรจากสาหร่ายสไปรูลีนาในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมโดยศึกษาถึงชนิดของอาหาร และระยะเวลาการกักเก็บที่เหมาะสม
3. ศึกษาผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ซึ่งได้แก่ผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลีนาเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนสำหรับนำกลับไปใช้ในฟาร์มเลี้ยงสุกรต่อไป

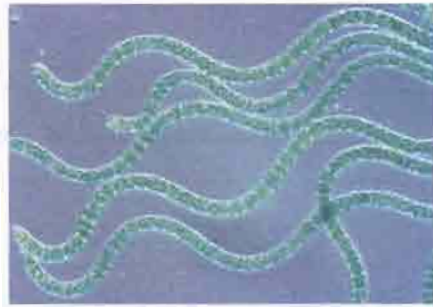
#### ขอบเขตของการวิจัย

1. สาหร่ายสไปรูลีนาที่ใช้ในการทดลองนั้นนำเชื้อบริสุทธิ์มาจากภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยแม่โจ้
2. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานำมาจากฟาร์มเลี้ยงสุกรของคณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
3. สถานที่ที่ใช้ในการวิจัยเพื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้นใช้ห้องปฏิบัติการของภาควิชาชีววิทยา บ่อสาหร่ายของภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### ประวัติความเป็นมาของสาหร่ายสไปรูลินา



รูปที่ 2.1 สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) กำลังขยาย 400 เท่า

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina*) มาจากภาษาอังกฤษว่า สไปรอล (spiral) ซึ่งมาจากภาษาละตินที่แปลว่า “เกลียว” โดยนักวิทยาศาสตร์ ได้ทำการค้นพบและทำการตั้งชื่อวิทยาศาสตร์เมื่อปี พ.ศ. 2370 โดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านสาหร่ายชาวเยอรมันชื่อ เดอเบน (Deurben) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายสไปรูลินานั้นเป็นพืชชนิดแรกๆ ที่เกิดขึ้นในโลก นักวิทยาศาสตร์ได้พบฟอสซิลและ ได้ประเมินว่าฟอสซิลที่พบนั้นน่าจะมีอายุไม่ต่ำกว่า 3.6 พันล้านปี (สุพรีเดิร์ม, 2549) โดยสาหร่ายสไปรูลินา เป็นกลุ่มสาหร่ายที่เรียกว่าแพลงก์ตอนพืช ซึ่งนิยมใช้เป็นอาหารมาแต่โบราณ ปรากฏตามข้อมูลอ้างอิงจากแหล่งต่างๆ พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารประจำวันของชาวซาดมาตั้งแต่อดีต โดยซาดเป็นสาธารณรัฐหนึ่งอยู่ในใจกลางทะเลทรายสะฮารา ณ ที่นี้มีทะเลสาบขนาดใหญ่ที่เรียกว่าทะเลสาบซาด (Lake Chad) ซึ่งมีสาหร่ายสไปรูลินาขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น โดยการใช้ตะกร้าช้อนสาหร่าย สไปรูลินาขึ้นมา แล้วนำไปตากแห้ง บดเป็นผง นำไปผสมในขนมปัง ขนมหวาน หรือชุบเป็นอาหารพื้นเมืองที่มีมานานนับพันปี (เจียมจิตต์, 2532) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าชนเผ่าแอซเท็ค (Aztecs) ในประเทศเม็กซิโกนิยมบริโภคสาหร่ายชนิดหนึ่งเช่นกัน โดยมีชื่อพื้นเมืองว่า เทคุทเลท (Tecuitlate) ซึ่งเก็บเกี่ยวมาจากทะเลสาบโตลาลซิงโก (Lake Tlalcingo) และทะเลสาบเท็กซ์โกโก (Texcoco Lake) (บุวดี, 2545)

หลังจากนั้นประเทศซาดถูกปกครองเป็นอาณานิคมของประเทศฝรั่งเศส นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส จึงได้นำเอาสาหร่ายสไปรูลินานำไปศึกษาค้นคว้าและใช้เป็นอาหารเสริมในเวลาต่อมา และถือเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาถึงประโยชน์ของสไปรูลินาที่มีต่อมนุษย์ ซึ่งพบว่าสาหร่ายชนิดนี้มีประโยชน์มากมายต่อมนุษย์ ในลักษณะของการใช้เป็นอาหารสุขภาพเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับร่างกาย เพราะในสาหร่ายสไปรูลินามีสารประกอบทางชีวเคมีที่มีผลต่อร่างกายของมนุษย์ ทำให้เกิดความสมดุลและช่วยให้อวัยวะต่างๆ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (สุพรีเดิร์ม, 2549)

การผลิตและงานวิจัยทางด้านสาหร่ายสไปรูลินาได้แพร่ขยายออกไปเรื่อยๆ โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่น และประสบความสำเร็จในการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาในระดับอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

ในปัจจุบันมีการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาเป็นอุตสาหกรรมในหลายแห่งทั่วโลก บริเวณที่มีมากได้แก่ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ของอเมริกา ฮาวาย เม็กซิโก ญี่ปุ่น จีน และประเทศไทย โดยมีผลผลิตที่ได้มีทั้งการใช้เป็นอาหารเสริมซึ่งมีโปรตีน สังกะสี เหล็กและกรดไขมัน GLA หรือกรดแกมมาลิโนเลอิก ในขณะที่เดียวกันก็มีการสกัดรงควัตถุ เช่น ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) มาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางและยา นอกจากนี้ยังมีการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาในเกรตที่ใช้เลี้ยงสัตว์ โดยนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ปศุสัตว์ เช่น อาหารปลาแซลมอน กุ้งกุลาดำ สุนัขและไก่ เป็นต้น (ยวดี, 2544)

### ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

สาหร่ายสไปรูลินาจัดเป็นพืชหรือสาหร่ายเซลล์เดียวกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) รูปร่างของสาหร่ายสไปรูลินาจะมีลักษณะเป็นเกลียวขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการค่อกันของเซลล์ ๆ เดียวหลายๆเซลล์มาเรียงต่อกัน ขนาดของสาหร่ายสไปรูลินาจะมีความยาวประมาณ 50-500 ไมครอนและกว้างประมาณ 3-80 ไมครอน มีการขยายพันธุ์โดยการหักของเกลียวแล้วจะเกิดเป็นเกลียวใหม่ และด้วยลักษณะพิเศษของสาหร่ายสไปรูลินาทำให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับแบคทีเรีย แต่มีรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงหรือคลอโรฟิลล์ -เอ (chlorophyll-a) คาโรทีนอยด์ (carotenoids) ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) ซึ่งมีสีน้ำเงินในปริมาณที่สูง ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส เยื่อหุ้มเซลล์เป็นโพลีแซคคาไรด์เหมือนกับแบคทีเรียทำให้เราสามารถจัดสไปรูลินาไว้ในกลุ่มของ ไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) ได้ด้วย

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina* spp.) เท่าที่พบในปัจจุบันมีอยู่มากกว่า 35 ชนิด เช่น *S. platensis*, *S. princep*, *S. laxissima*, *S. subtilissima* และ *S. subsalsosled* เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งขนาด ความยาว และลักษณะของเกลียวและชนิดที่ได้รับการคัดสรรแล้วว่ามีคุณสมบัติเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเพื่อนำมาเป็นอาหารมนุษย์หรือสัตว์ก็คือ *Spirulina platensis* นั่นเอง (เจียมจิตต์, 2532)

ลักษณะที่สำคัญของสาหร่ายสไปรูลินาชนิดนี้คือ เป็นสายประกอบ ได้ด้วยเซลล์ทรงกระบอกเรียงต่อกันเป็นเส้นสายตรงหรือเป็นเกลียวหรือเป็นวงไม่มีกิ่งก้าน เรียกว่า ไตรโคม (trichome) ซึ่งขดเป็นเกลียวห่างๆ ความสูงของเกลียว (helix) 30-50 ไมครอน ความยาวของไตรโคม 300-500 ไมครอนและมีความกว้างประมาณ 8 ไมโครเมตร (ลัดดา, 2544) การสืบพันธุ์ของสาหร่ายชนิดนี้มีเฉพาะแบบไม่อาศัยเพศ มีการเจริญเติบโตโดยการแบ่งเซลล์ (binary fission) เท่านั้น โดยการขาดเป็นท่อน (fragmentation) และท่อนที่ขาดไปนี้สามารถแบ่งเซลล์ใหม่ทำให้ไตรโคมยืดยาวออกได้ (กาญจนภรณ์, 2527) เส้นสายของสาหร่ายชนิดนี้อาจสั้นบ้างยาวบ้าง ขึ้นอยู่กับอายุและความสมบูรณ์ แม้แต่ความเป็นเกลียวบางครั้งก็ไม่คงที่ อาจเป็นเกลียวบางครั้งอาจเป็นเกลียวบิดซัดเจน สวยงาม หรือบางครั้งเกลียวจะคลายออกมีลักษณะคล้ายเส้นตรง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยในการเพาะเลี้ยง อาจเป็นความอุดมสมบูรณ์ของอาหาร แสง อุณหภูมิ หรือ pH ซึ่งยังไม่มีคำตอบที่ชัดเจน (สมชาย, 2531)

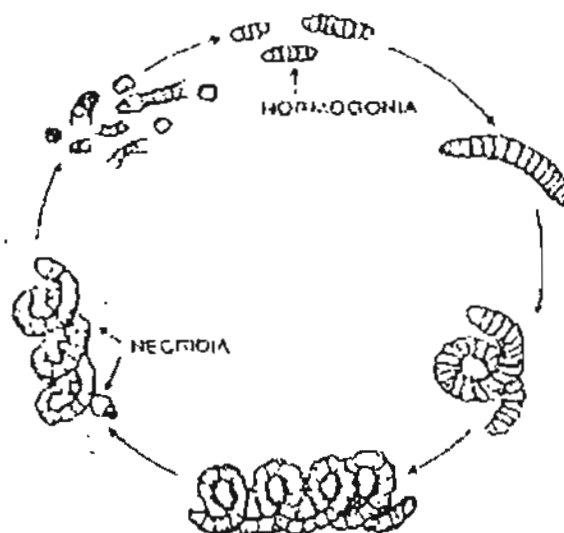
### นิเวศวิทยาของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

สาหร่ายสไปรูลินาสามารถพบได้ทั้งในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม แต่ส่วนใหญ่จะพบในน้ำจืด อาจพบปะปนกับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิดอื่นๆ เช่น *Oscillatoria* spp. หรือ *Microcystis* spp. นอกจากนี้ยังพบว่านอกจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติแล้ว ยังสามารถพบได้ในน้ำที่ค่อนข้างเสียและมีความเป็นด่างค่อนข้างสูง หรือแม้แต่ในระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น บ่อบำบัดน้ำเสียของนิคมอุตสาหกรรมลำพูน บ่อบำบัดน้ำเสียของเทศบาลเมืองสกลนคร และนครราชสีมา (ยุวดี, 2542)

สาหร่ายจะเจริญเติบโตได้ดีในบ่อตื้นๆ ที่มีความเข้มแสงประมาณ 30-35 กิโลลักซ์ สภาพของแหล่งน้ำที่มีความเค็มและสภาพค่อนข้างเป็นด่าง มีความเป็นกรด-เบสประมาณ 9-11 และพบว่าสาหร่ายจะเจริญได้ดีในแถบประเทศที่มีอุณหภูมิร้อนหรือกึ่งร้อน โดยมีอุณหภูมิปกติเฉลี่ยตลอดปี 28-34 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 37 องศาเซลเซียส จะไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

### วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

ในวงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินา ไตรโครมที่เจริญเติบโตเต็มที่ มีการสร้างเซลล์ที่มีลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า เนครีเดีย (necridia) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ถูกย่อยทำให้ไตรโครมแตกหักออกเป็นท่อนสั้นๆ ขนาดประมาณ 2-4 เซลล์ ที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นส่วนใหญ่ เรียกว่าโฮโมโกเนีย (homogonia) (มารศรี, 2546) นอกจากนี้ปลายทั้งสองด้านของโฮโมโกเนียจะค่อยๆ ม้วนเป็นเกลียว เซลล์ของโฮโมโกเนียเพิ่มจำนวนโดยวิธี cell fusion และเจริญต่อไปเป็นไตรโครม (ลักษณะและคณะ, 2540)



รูปที่ 2.2 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina* sp.) Richmond, (1986)

### ปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา มีปัจจัยบางประการที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตของสาหร่ายดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาอยู่ระหว่าง 20-37 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 40 องศาเซลเซียส จะทำให้สาหร่ายไม่เจริญเติบโต สาหร่ายจะเจริญได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส (สุนนวรรณ, 2542)

2. ปริมาณแสง (light) สาหร่ายมีการเจริญเติบโตด้วยการสังเคราะห์แสง ดังนั้นแสงจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการเจริญเติบโต แสงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบอุตสาหกรรมคือ แสงแดด โดยพบว่าปริมาณแสงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่ายคือ 35-40 กิโลลักซ์ ถ้าปริมาณแสงที่มากเกินไปก็มีส่วนที่จะทำให้ปริมาณการสังเคราะห์แสงลดลง

3. ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 9-11 และควรอยู่ในระดับ 9.5 จึงจะมีความเหมาะสมที่สุด ถ้า pH มีค่าน้อยกว่านี้ควรมีการปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าของ pH จะมีผลต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์และเกลือแร่อื่นๆ มีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์สาหร่ายโดยตรง (สุนนทิพย์, 2529) และเมื่อ pH เท่ากับ 11 สาหร่ายสามารถดูดคาร์บอนเนตและไบคาร์บอเนตมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด

4. แหล่งคาร์บอน (carbon source) แหล่งคาร์บอนจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในอากาศนั้นมีเพียง 0.4 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งจะเพียงพอต่อความต้องการของสาหร่ายในสภาพที่มีการเจริญเติบโตที่ปกติเท่านั้น แต่ในสภาพที่ต้องการผลิตเป็นปริมาณมากจะต้องมีการเพิ่มก๊าซนี้ลงไปในการเลี้ยง โดยทั่วไปคือการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสาหร่ายสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยตรง ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายควรอยู่ในช่วง 4.5-8.5 กรัมต่อลิตร บางโรงงานใช้วิธีเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในบ่อเพาะเลี้ยงโดยตรง แต่ก็เสียค่าใช้จ่ายสูง อีกวิธีหนึ่งคือ ใช้การกวนซึ่งจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศจะละลายลงสู่อาหารและสาหร่ายนำไปใช้ได้เช่นกัน (ยุวดี, 2545)

5. ปริมาณสารอาหาร (nutrients) สารอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาดังต่อไปนี้

- ไนโตรเจน (nitrogen) มีความสำคัญรองจากคาร์บอนในแง่ของปริมาณ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีความสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ ไนโตรเจนในรูปสารอนินทรีย์ ได้แก่ เกลือ 3 ชนิดคือ ไนโตรเจนไนเตรตและแอมโมเนีย ถ้าแหล่งไนโตรเจนอยู่ในรูปเกลือแอมโมเนียเพียงอย่างเดียวจะทำให้ระดับ pH ของอาหารลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมากต่อสาหร่าย ถ้าสาหร่ายขาดไนโตรเจนจะมีผลต่อการสังเคราะห์แสงและปริมาณรงควัตถุหรือสารสีของเซลล์รวมทั้งทำให้กิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดลดลงด้วย

- ฟอสฟอรัส (phosphorus) จะพบในรูปของออร์โธฟอสเฟตและในรูปสารอินทรีย์ส่วนสารละลาย ฟอสฟอรัสจะปรากฏเป็นปริมาณที่น้อยมากในธรรมชาติ ยกเว้นในน้ำที่มีมลพิษสูงๆ ซึ่งมีสารอินทรีย์มาก สาหร่ายบางชนิดสามารถดูดซึมฟอสฟอรัสเข้าไปในเซลล์ในปริมาณมากเกินพอและเซลล์ดังกล่าวสามารถดำรงชีวิตในน้ำที่มีไนโตรเจนต่ำๆ ได้ สำหรับสาหร่ายสีเขียวต้องการฟอสฟอรัสเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ประมาณ 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง

- โพแทสเซียม (potassium) เป็นธาตุที่สาหร่ายต้องการ ถ้าปริมาณโพแทสเซียมลดลง จะทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายต่ำลงแต่การหายใจจะเพิ่มขึ้น

6. ปริมาณฝนและการระเหยของน้ำ (rain and evaporation) ฤดูฝนเป็นฤดูที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสาปฏูลินา ทำให้ผลผลิตของสาหร่ายต่ำสุด (นฤมลและคณะ, 2532) เนื่องจากปริมาณแสงแดดลดลงและในบางครั้งถ้าปริมาณฝนมากเกินไปจะทำให้สารอาหารในบ่อเพาะเลี้ยงจืดจาง ซึ่งนอกจากสาหร่ายจะไม่เจริญเติบโตแล้วอาจจะทำให้มีสาหร่ายชนิดอื่นๆ เจริญขึ้นเบียดอยู่ด้วยก็ได้ ส่วนในการผลิตสาหร่ายสาปฏูลินาในสภาพกลางแจ้งนั้นการระเหยของน้ำมักจะเกิดขึ้นในฤดูร้อนโดยจะทำให้ปริมาณสารอาหารลดลง ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น และอุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสาปฏูลินา (จิระพรรณและคณะ, 2539)

7. การกวนหรือการหมุนเวียนของน้ำ (agitation) มีผลทำให้เซลล์สาหร่ายที่อยู่ด้านล่างได้ขึ้นมารับแสง หรือทำให้สารอาหารซึ่งอาจมีการเดิมลงไปในบ่อในระหว่างการเพาะเลี้ยงได้ละลายไปทั่วบ่อหรือภาชนะที่ใช้เพาะเลี้ยงและทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศละลายลงในสารอาหารได้ดี

8. ความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้น (initial concentration) ควรอยู่ในช่วง 225 ถึง 250 มิลลิกรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร หรือทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 560 นาโนเมตร เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสง (Optical density; OD) เป็น 1.0 แล้วจะมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการเพาะเลี้ยง และจะใช้เพียง 2 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ของสารอาหารที่เตรียมไว้ ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเกินไปจะทำให้เซลล์สาหร่ายได้รับแสงมากเกินไป ซึ่งอาจจะทำให้เซลล์ของสาหร่ายแตกได้

9. น้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง โดยปกติการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสาปฏูลินาจะใช้น้ำจืด แต่ถ้าใช้น้ำทะเลมาใช้ในการเพาะเลี้ยงพบว่าการเจริญเติบโตไม่ดี เนื่องจากน้ำทะเลมีคาร์บอเนต ฟอสเฟต ไนโตรเจนต่ำ และมีแคลเซียม แมกนีเซียมสูง ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย

10. การปนเปื้อน อาจพบพวกสาหร่ายสีเขียว จำนวนไม่มากนัก แบคทีเรีย (บาซิลลัส) นอกจากนี้ยังพบว่ามีความผิดปกติของแมลงบางชนิดเช่น Ephydra และ Anopheles

### คุณสมบัติของสาหร่ายสาปฏูลินา

#### 1. ทางการแพทย์

เนื่องจากสาหร่ายสาปฏูลินามีปริมาณของสารอาหารครบถ้วนและมีคุณภาพสูง จึงทำให้มีประสิทธิภาพทั้งเป็นอาหารและยาที่ให้ผลในทางป้องกัน ควบคุม และรักษาโรคต่างๆ ได้แก่ โรคเบาหวาน

โรคกระเพาะอาหาร โรคตับ โรคกรดไหลย้อน โรคความดันโลหิตสูง โรคคอหอยอักเสบ ผอมว่อง หรือแม้แต่โรคมะเร็ง ช่วยลดความเครียด และยังช่วยลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ โดยสามารถลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือดและใช้เป็นอาหารสำหรับลดความอ้วนได้อีกด้วย (จิระพรรณ (2537), เจียมจิตต์ (2532) ในประเทศเม็กซิโก มีการนำสาหร่ายชนิดนี้ให้นักกีฬารับประทาน 25-40 กรัมต่อวัน เป็นเวลา 30-40 วัน พบว่าจะสามารถช่วยให้กล้ามเนื้อยืดหยุ่นได้ดี และมีการทดลองในทารกที่ขาดสารอาหารโดยใช้ *Spirulina maxima* ที่มีโปรตีน 50% ทำให้ทารกมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สาหร่าย *Spirulina platensis* ยังมีผนังเซลล์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส ทำให้ย่อยง่ายจึงเหมาะสมสำหรับผู้ป่วยที่เพิ่งฟื้นไข้ และคนชรา

## 2. ใช้เป็นอาหารของมนุษย์

มนุษย์เราสามารถบริโภคสาหร่ายได้โดยตรงหรือนำไปผสมกับอาหารชนิดอื่นๆ ก็ได้เช่น โยเกิร์ต ไอศกรีม ซุป ขนมปัง เค้ก ซ็อกโกแลต ลูกเกด ชาเขียวหรือแปรรูปเป็นสาหร่ายอัดเม็ดใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพ ประเทศฝรั่งเศสเป็นประเทศแรกที่ยอมรับถึงคุณค่าทางอาหารและเริ่มผลิตเป็นอาหารสำเร็จรูปในระดับอุตสาหกรรมและยังมีชาวญี่ปุ่นนิยมนำมาบริโภคเป็นอาหารบำรุงสุขภาพโดยทำเป็นอุตสาหกรรมใช้กรรมวิธีทำแห้งและอัดเม็ดซึ่งมีราคาแพง

## 3. ใช้เป็นอาหารสัตว์

จากการศึกษาพบว่าการใช้สาหร่ายแห้งเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์จะทำให้สัตว์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นในสัตว์ปีกพวกเป็ด ไก่ โดยจะทำให้ไข่แดงและไข่แดงมีสีที่น่านำรับประทานเนื่องจากแคโรทีนจะถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ มีการนำสาหร่ายไปทดลองเลี้ยงลูกไก่พบว่า อัตราการตายมีน้อยลง (สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ, 2530) เมื่อทำการผสมลงในอาหารสำหรับเลี้ยงนกกระทาที่มีอายุตั้งแต่ 1 วันจนถึง 11 สัปดาห์ พบว่าสีของไข่แดงจะมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของสาหร่ายที่ใช้ผสมในอาหาร (โอภาส, 2533) เมื่อทำการเสริมสาหร่ายสไปรูลินาในอาหารสุกรเล็ก (น้ำหนัก 20-30 กิโลกรัม) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (กก.) ของการเสริมที่ 0, 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 0.61, 0.63, 0.66 และ 0.60 ตามลำดับ ในระยะการทดลอง 7 วัน (วิชากรณ, 2543) และเมื่อมีการเสริมสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำเสียหรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ผสมลงในอาหารสำเร็จรูปสำหรับเลี้ยงสัตว์ จะเป็นการช่วยเพิ่มสารอาหารและเป็นการลดต้นทุนการผลิตในเรื่องของอาหารเสริมอีกด้วย สุวีรรณ (2536) ใช้สาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำเสียมารับใช้ในอาหารแกะ พบว่าสามารถใช้ทดแทนการถั่วเหลืองได้เป็นอย่างดี นอกจากสัตว์บกแล้วในด้านสัตว์น้ำพบว่าสามารถนำไปเพาะเลี้ยงปลาและกุ้งได้เป็นอย่างดี เมื่อนำไปเป็นส่วนประกอบของอาหารปลาในการเพาะเลี้ยงปลา Bigmouth buffalo (*Ictiobus cyprinellus*) และปลา Blue tilapia (*Tilapia aurea*) พบว่าปลาทั้งสองชนิดเจริญเติบโตได้ดีมาก แต่เมื่อลดปริมาณของสาหร่ายลงอัตราการเจริญเติบโตของปลาทั้งสองชนิดจะลดลงด้วย (Stanly and Jones, 1976) ในขณะที่ Nakamura (1982) พบว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* ในรูปแห้งและปั่นผง มีคุณสมบัติเหมาะสมในการอนุบาลลูกปลามาก เนื่องจากมีขนาดเล็กและย่อยง่าย ทำให้อัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น ปลาเจริญถึงระยะเจริญพันธุ์เร็วขึ้น ทำให้ปลามีน้ำหนักตัวที่ดีและยังมีสารบางตัวที่ทำให้ปลามีสีสดขึ้นอีกด้วย (สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ, 2530) เมื่อผสมอาหารเลี้ยงปลาคุณพบว่า หาก

ผสมสาหร่ายสดในอาหารมากกว่า 5% ขึ้นไป จะทำให้เนื้อปลามีสีเข้มขึ้นตามปริมาณสาหร่ายที่ใส่และระยะเวลาที่เลี้ยง (บานชื่น, 2532) และเมื่อนำสาหร่ายไปเลี้ยงปลาทองโดยใช้สูตรอาหารต่างกันพบว่าอาหารปลาที่ผสมสาหร่ายสไปรูลินา และสาหร่ายสไปรูลินาล้วนๆนั้นทำให้ปลามีอัตราการรอดตาย น้ำหนัก และมีสีสันคึกกว่าในสูตรอาหารปลาเพียงอย่างเดียว (เพ็ญรัตน์, 2545) เมื่อทำการทดลองในปลาแฟนซีคาร์พบว่าอาหารที่ผสมสาหร่ายสไปรูลินาทำให้ปลามีสีสวยงาม เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดเช่นเดียวกันและเมื่อนำไปใช้เป็นอาหารโปรตีนสำหรับกุ้งจะช่วยให้ปลามีอัตราการรอดตายสูงของระบบภูมิคุ้มกันในตัวกุ้ง ทำให้อวัยวะสร้างเม็ดเลือดมีความอุดมสมบูรณ์ ผลผลิตเม็ดเลือดออกมาสู่ระบบหมุนเวียนโลหิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยในการทำงานของระบบทางเดินอาหารให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ช่วยในการกำจัดสารพิษและยาปฏิชีวนะต่างๆออกจากร่างกายกุ้งได้ดี และยังพบว่าสาหร่ายสไปรูลินามีกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อการเสริมสร้างเซลล์ตับและตับอ่อนของกุ้งและช่วยลดความเครียดของกุ้งได้เนื่องจากมีสารต้านอนุมูลอิสระประสิทธิภาพสูงอยู่

#### 4. คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายสไปรูลินา

คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายเป็นปัจจัยสำคัญในการนำสาหร่ายไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ อาหารมนุษย์ องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายจะแตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง และสารอาหารที่ได้รับ เป็นต้น

##### โปรตีน

สาหร่ายสไปรูลินามีโปรตีนสูงกว่าเนื้อวัวถึง 3 เท่าครึ่ง (สุมลวรรณ, 2542) ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับโปรตีนในเนื้อสัตว์และพืช เช่น ถั่วเหลืองก็ยังมีโปรตีนสูงกว่ามาก การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในสาหร่ายสไปรูลินากับอาหารทั่วไปที่มีโปรตีนสูงแสดงในตารางที่ 2.1

นอกจากนี้ยังพบว่าอุดมไปด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด ถึงได้มีการนำคุณค่าด้านโภชนาการในส่วนองกรดอะมิโนของสาหร่ายสไปรูลินา เปรียบเทียบกับอาหารชนิดอื่นๆและค่ามาตรฐาน FAO ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในสาหร่ายสไปรูลินากับอาหารชนิดอื่นๆ

| ชนิดของอาหาร                  | ปริมาณโปรตีน(กรัม/100 กรัมน้ำหนักแห้ง) |
|-------------------------------|----------------------------------------|
| สาหร่าย <i>Spirulina</i> spp. | 69.5-71.0                              |
| สาหร่าย <i>Chlorella</i> spp. | 40.0-56.0                              |
| เนื้อวัว                      | 18.0-20.1                              |
| ไข่                           | 10.0-25.0                              |
| ข้าวเจ้า                      | 7.0                                    |
| ถั่วเหลือง                    | 33.0-35.0                              |
| ปลาทู ปลาอินทรี               | 20.0                                   |
| ข้าวสาลี                      | 6.0-10.0                               |

ที่มา: เจียมจิตต์, 2532

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบของกรดอะมิโนของสาหร่าย *Spirulina* spp. และอาหารโปรตีนอื่นๆ กับค่ามาตรฐาน FAO (กรัม/100 กรัมโปรตีน)

| กรดอะมิโน     | <i>Spirulina</i> spp | ไข่ | ถั่วเหลือง | ปลาทู | ค่ามาตรฐาน FAO |
|---------------|----------------------|-----|------------|-------|----------------|
| Lsoleucine    | 6                    | 6.6 | 4.5        | 0.4   | 4.2            |
| Leucine       | 8.5                  | 8.8 | 7.3        | 7.3   | 4.8            |
| Phenylalanine | 5                    | 5.8 | 4          | 4     | 2.8            |
| Tyrosine      | 4                    | -   | 2.9        | 2.9   | -              |
| Threonine     | 4.6                  | 5   | 4.2        | 4.2   | 3.3            |
| Tryptophan    | 1.4                  | 1.7 | 1.2        | 1.2   | 1.1            |
| Valine        | 6.5                  | 1.7 | 5.2        | 5     | 2.8            |
| Arginine      | 6.5                  | 7.4 | 5          | 7.7   | 2.0            |
| Lysine        | 1.8                  | 6.6 | 2          | 2.4   | 2.4            |
| Cystine       | 4.6                  | 2.4 | 7          | 6.5   | 4.0            |
| Methionine    | 1.4                  | 3.1 | 2.6        | 1.4   | 1.7            |

ที่มา: สุชาติ, 2529

### ไขมัน (lipid)

สาหร่ายสไปรูลินามีเปอร์เซ็นต์ไขมันระหว่าง 2-7.3 % ของน้ำหนักแห้ง โดยไขมันส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids) ซึ่ง 80% จะเป็นกรดแกมมาไลโนลินิก (GLA) โดยเป็นกรดไขมันที่เป็นประโยชน์ต่อการเกิดไขมัน คือช่วยลดปัญหาเรื่องโคเลสเตอรอล ซึ่งสามารถลดปริมาณโคเลสเตอรอลได้มากกว่าไขมันที่พบในน้ำมันพืช สาหร่ายสไปรูลินาสามารถผลิต GLA ได้สูงถึง 8-32% ของกรดไขมันทั้งหมด

### รงควัตถุ (pigment)

สาหร่ายสไปรูลินาประกอบด้วยรงควัตถุหลายชนิด ได้แก่ คารอโรทีนอยด์-เอ แคลโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน ที่สำคัญคือ แคลโรทีนอยด์ซึ่งประกอบด้วยแซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) และแคโรทีน (Carotene) (กาญจนาภาชนี, 2527) โดยมีแคโรทีนอยด์ทั้งหมด 1.7 มิลลิกรัม ต่อกรัมของน้ำหนักแห้ง ซึ่งแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ เบต้าแคโรทีน (B-carotene) 26% เบต้าแคโรทีน-5,6-อีพอกไซด์ (B-carotene-5,6 epoxide) 5% , เอ็ค-โคนิโนน (echinenone) 7%, คริปโตแซนทีน (cryptoxanthin) 23%, ไมโครแซนโทฟิลล์ (myxoxanthophyll) 24% และ ซีแรนทีน 9% (Choubert, 1979)

### วิตามินและเกลือแร่ (vitamins and minerals)

เป็นแหล่งของแร่ธาตุและวิตามินที่จำเป็นต่อร่างกาย มีวิตามินที่มีคุณค่าต่อร่างกายและสามารถซึมเข้าสู่ร่างกายได้เร็วเป็น 4-5 เท่าของแหล่งที่ได้จากสัตว์ เช่น เนื้อ ไข่ และเนยแข็ง (สุเมศวรธรรม, 2542) โดยพบว่าสาหร่ายสไปรูลินาแห้งประกอบด้วยวิตามิน 10 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina* spp.) แห้ง 1 กิโลกรัม

| วิตามิน        | มิลลิกรัม | แร่ธาตุ | มิลลิกรัม |
|----------------|-----------|---------|-----------|
| Biotin         | 0.4       | Ca      | 1,315     |
| Vitamin-B      | 2.0       | P       | 8,924     |
| Ca-panthotenat | 11.0      | Fe      | 580       |
| Folic acid     | 0.5       | Na      | 412       |
| Inositol       | 350       | Cl      | 4,400     |
| Nicotinin      | 118       | Mg      | 1,915     |
| Pyridoxine     | 3         | Mn      | 25        |
| Riboflavine    | 40        | Zn      | 39        |
| Thiamine       | 55        | K       | 15,400    |
| Vitamin        | 190       | อื่นๆ   | 57,000    |

ที่มา: Hill, 1980

### สาหร่ายสไปรูลินาและการบำบัดน้ำทิ้ง

สาหร่ายสไปรูลินาเป็นสาหร่ายที่ง่ายต่อการเพาะเลี้ยงแต่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเนื่องจากสารอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงมีราคาแพง จึงได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งประเภทต่างๆ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงและยังสามารถได้ผลผลิตคือสาหร่ายเป็นผลพลอยได้ เนื่องจากน้ำเสียต่างๆ เหล่านั้นจะมีธาตุอาหารที่จำเป็น ได้แก่ ไนโตรเจนที่มาจากไนเตรทหรือแอมโมเนีย ซึ่งเป็นทั้งปัสสาวะและอุจจาระจากคน สัตว์ ปุ๋ย เศษอาหาร และมีฟอสเฟตจากผงซักฟอก ปุ๋ย หรือเศษอาหาร แต่ปริมาณสารเหล่านี้จะไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาจึงมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปซึ่งมีราคาไม่แพง เพื่อให้สารอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ยวดี, 2544) และสามารถนำผลผลิตที่ได้ไปใช้เป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงสัตว์ได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยได้มีการศึกษาจากน้ำเสียหลายแหล่งด้วยกันดังต่อไปนี้

จรรยา (2531) ได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำกากส่าเหล้า พบว่าน้ำกากส่าเหล้ามีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่าย และมีผลพลอยได้คือสาหร่ายสามารถฟอกสีของน้ำกากส่าเหล้าโดยลดความเข้มข้นของสีลงได้ 65.90 ถึง 79.27 เปอร์เซ็นต์ ยวดีและคณะ (2535) ยังพบว่า สาหร่ายที่ได้จากการเลี้ยงจากน้ำกากส่าเหล้าผสมกับสารเคมีบางชนิดจะมีคุณค่าทางโภชนาการโดยคิดเป็นกรัมใน 100 กรัมของน้ำหนักแห้งดังนี้ โปรตีน 68.63 คาร์โบไฮเดรต 12.99 ไขมัน 6.57 เส้นใย 7.38 และยังมีเกลือแร่ กรดอะมิโน และวิตามินอีกด้วย

จกกล (2543) ทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำทิ้งจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพมูลสุกร ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์ คุณภาพของน้ำทิ้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าค่า COD และค่า  $\text{NH}_3\text{-N}$  ในน้ำเสียลดลงถึงเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งและมีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะโปรตีนและไขมันมีค่าสูงสุดร้อยละ 51 และ 1.62 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ

นฤมลและคณะ (2529) ศึกษาการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปมันสำปะหลัง โดยเติมสารประกอบของ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและคาร์บอนลงไป พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด เมื่อเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นของ  $\text{NaNO}_3$  เท่ากับ 8.5 กรัมต่อลิตร และปุ๋ย N:P:K สูตร 16:16:16 เท่ากับ 0.6 กรัมต่อลิตร

Chiu (1980) ศึกษาสภาวะการเจริญของ สาหร่ายสไปรูลินาในน้ำเสียจากฟาร์ม โดยเลี้ยงในบ่อกลางแจ้ง มีค่า pH เริ่มต้น 7.9 OD มีค่า 0.46 และไนโตรเจน ทีเคเอ็น ซีไอดี เท่ากับ 95, 120, 220 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าค่า pH เป็น 10.2 OD มีค่า 0.90 ไนโตรเจน ทีเคเอ็น ซีไอดี เท่ากับ 5, 16, 145 ตามลำดับ และเมื่อนำสาหร่ายไปวิเคราะห์ค่าโปรตีนได้ร้อยละ 75.40 ของน้ำหนักแห้ง ในขณะที่กลุ่มที่ควบคุมที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยเคมี พบว่ามีปริมาณโปรตีนร้อยละ 70.8

ปฏิพันธ์ (2543) ได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* แบบ semicontinuous ด้วยน้ำทิ้งจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพมูลสุกรของฟาร์ม BM ในระดับบ่อจำลอง สภาพกลางแจ้งเป็นเวลา 54 วัน พบว่า

สามารถเก็บเกี่ยวสาหร่ายได้ 3 ครั้ง ได้สาหร่ายแห้ง 107.32 กรัม ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำหมักก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 37.31 % และปริมาณของ BOD ลดลง 61.38%

สุวิมล (2536) ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตขนมจีน พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่เพาะเลี้ยงในอาหารต่างชนิดกันมีการเจริญเติบโตต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าสูตรอาหาร zarrouk ผสมกับน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตขนมจีนในอัตราส่วน 1:1 สาหร่ายมีปริมาณโปรตีนสูงสุดคือ ร้อยละ 67.15 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง เสกสรร (2536) ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีนกับสูตรอาหาร zarrouk คัดแปลง พบว่า สาหร่ายมีปริมาณโปรตีนสูงสุดคือ ร้อยละ 61.53 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง

พฤษ (2546) ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำทิ้งจากฟาร์มโคนม พบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียที่ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดค่า COD จาก 320 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 64 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดถึง 80 เปอร์เซ็นต์

### สถานการณ์การเลี้ยงสุกรในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีการเลี้ยงสุกรมาเป็นเวลานานแล้ว ในระยะเริ่มแรกการเลี้ยงมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ได้เป็นผลผลิตเพียงพอสำหรับการบริโภคในครัวเรือน แต่ในปัจจุบันนี้การเลี้ยงสุกรเข้ามามีบทบาทสำคัญ มีการเลี้ยงกันเป็นจำนวนมากขึ้นโดยรู้ได้จากสถิติจำนวนสุกรของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 ถึง พ.ศ. 2545 (ตารางที่ 2.4) นั้น จะเห็นว่าจำนวนสุกรที่เลี้ยงเพิ่มขึ้นทุกปีในทุกภาคของประเทศ และมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ ทั้งด้านการพัฒนาสายพันธุ์และด้านอาหารของสุกร รวมทั้งเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทันสมัย แต่พบว่าในการจัดการเรื่องของฟาร์มสุกรนั้นยังมีปัญหาเรื่องของมลพิษและการจัดการปัญหาการกำจัดของเสียของฟาร์ม ที่ผ่านมามีจำนวนของฟาร์มไม่มากนักที่ตระหนักถึงปัญหานี้ ทำให้เกิดเป็นปัญหาที่สะสมมานาน เนื่องจากในขบวนการเลี้ยงสุกรนั้นจะทำให้เกิดของเสียขึ้นเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน ทั้งอุจจาระ ปัสสาวะ และน้ำล้างคอก ซึ่งมีน้ำเสียเกิดขึ้นมากกว่าการเลี้ยงปศุสัตว์อื่นทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงโคนม โคเนื้อ ไก่กระพง ไก่ไข่ หรือเป็ด ซึ่งจะทำให้เกิดกลิ่นเหม็นที่รุนแรง โดยเฉพาะจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซแอมโมเนีย นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพอนามัยต่อชุมชนที่อยู่โดยรอบด้วย ถ้าการจัดการระบบของฟาร์มไม่ดีพอ ซึ่งปริมาณสิ่งขับถ่ายในแต่ละวันตามน้ำหนักของสุกรแสดงในตารางที่ 2.5

จากการแบ่งขนาดฟาร์มเลี้ยงสุกรเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็กที่เลี้ยงสุกรน้อยกว่า 500 ตัว ขนาดกลางที่เลี้ยงตั้งแต่ 500-5,000 ตัว และฟาร์มขนาดใหญ่ที่เลี้ยงเกินกว่า 5,000 ขึ้นไป มีรายงานถึงปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นและลักษณะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 โดยเฉพาะค่า BOD และ COD ซึ่งสูงถึง 3,000 และ 7,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในฟาร์มขนาดใหญ่ถือว่าเป็นน้ำที่สกปรกมาก ซึ่งเกษตรกรควรมีระบบบำบัดน้ำเสียภายในฟาร์มที่มีประสิทธิภาพ สามารถกำจัดของเสียภายในฟาร์มและน้ำทิ้งปล่อยออกสู่สาธารณะเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (ตารางที่ 2.7) อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำเสียเหล่านี้มีธาตุอาหารต่างๆ อยู่มาก ซึ่งสามารถนำไป

ประยุกต์ใช้ในระบบการเกษตรที่เหมาะสม เช่น ใช้เป็นปุ๋ยบำรุงดิน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตพืชเป็นอย่างมากและยังไม่สร้างปัญหาให้เกิดกับชุมชนรอบๆฟาร์มอีกด้วย

ตารางที่ 2.4 สถิติจำนวนสุกรในประเทศไทยแสดงตามรายภาค ตั้งแต่ปี 2536-2545

| หน่วย: ตัว |           |           |           |           |               |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| ปี พ.ศ.    | ภาคกลาง   | ภาคอีสาน  | ภาคเหนือ  | ภาคใต้    | รวมทั้งประเทศ |
| 2536       | 4,307,256 | 1,830,633 | 1,650,352 | 780,885   | 8,569,126     |
| 2537       | 4,636,895 | 1,523,744 | 1,545,303 | 773,458   | 8,479,400     |
| 2538       | 4,656,843 | 1,414,974 | 1,717,817 | 772,287   | 8,561,921     |
| 2539       | 5,332,550 | 1,360,637 | 1,194,921 | 819,779   | 8,707,887     |
| 2540       | 5,763,198 | 1,890,084 | 1,455,986 | 1,029,772 | 10,139,040    |
| 2541       | 4,846,228 | 1,688,647 | 1,257,636 | 979,764   | 8,772,275     |
| 2542       | 4,145,954 | 1,463,789 | 1,040,555 | 772,803   | 7,423,101     |
| 2543       | 4,393,218 | 1,391,184 | 1,195,630 | 781,024   | 7,761,056     |
| 2544       | 4,720,146 | 1,382,109 | 1,274,065 | 826,950   | 8,203,270     |
| 2545       | 3,978,667 | 1,142,126 | 1,105,955 | 762,394   | 6,989,152     |

ที่มา: สำนักงานปศุสัตว์จังหวัด, 2550

ตารางที่ 2.5 ปริมาณอุจจาระและปัสสาวะที่สุกรขับถ่ายต่อวัน

| น้ำหนักสุกร<br>(กก) | อุจจาระ<br>(กก) | ปัสสาวะ<br>(กก) | อุจจาระ+<br>ปัสสาวะ (กก) | น้ำหนักตัว<br>อุจจาระ ปัสสาวะ รวม |     |     |
|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----|-----|
| 40                  | 1.02            | 2.6             | 3.12                     | 2.4                               | 6.2 | 8.6 |
| 60                  | 1.51            | 2.57            | 4.08                     | 2.5                               | 4.3 | 6.8 |
| 90                  | 1.90            | 2.55            | 4.45                     | 2.1                               | 2.8 | 4.9 |
| 130                 | 2.15            | 2.74            | 4.89                     | 1.7                               | 2.1 | 3.8 |

ที่มา: วิวัฒน์, 2543

ตารางที่ 2.6 ปริมาณและลักษณะสมบัติโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม

| ขนาดฟาร์ม | การเกิดน้ำเสีย<br>(ลิตร/ตัว/วัน) | ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร) |                 |                    |                      |          |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|----------|
|           |                                  | บีโอดี<br>(BOD)                         | ซีโอดี<br>(COD) | สารแขวนลอย<br>(SS) | ไนโตรเจนรวม<br>(TKN) | ฟอสฟอรัส |
| ขนาดใหญ่  | 10                               | 3,000                                   | 7,000           | 4,800              | 540                  | 8.0      |
| ขนาดกลาง  | 15                               | 2,500                                   | 6,800           | 3,000              | 540                  | 9.5      |
| ขนาดเล็ก  | 20                               | 1,500                                   | 4,000           | 2,000              | 400                  | 17.0     |

ที่มา: กลุ่มงานควบคุมมลภาวะฟาร์มปศุสัตว์ กองสัตว์รักษ์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2545

ตารางที่ 2. 7 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

| พารามิเตอร์            | หน่วย          | เกณฑ์มาตรฐานสูงสุด |          |
|------------------------|----------------|--------------------|----------|
|                        |                | ประเภท ก           | ประเภท ข |
| ความเป็นกรดและด่าง(pH) | -              | 5.5-9              | 5.5-9    |
| บีโอดี (BOD)           | มิลลิกรัม/ลิตร | 60                 | 100      |
| ซีโอดี(COD)            | มิลลิกรัม/ลิตร | 300                | 400      |
| สารแขวนลอย(SS)         | มิลลิกรัม/ลิตร | 150                | 200      |
| ทีเคเอ็น (TKN)         | มิลลิกรัม/ลิตร | 120                | 200      |



ประเภท ก หมายถึง ฟาร์มสุกรขนาดใหญ่

ประเภท ข หมายถึงฟาร์มสุกรขนาดเล็ก

ที่มา: กลุ่มงานควบคุมมลภาวะฟาร์มปศุสัตว์ กองสัตว์รักษ์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2545

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

##### 1. การเตรียมเชื้อสาหร่ายคั่งคั้น

ในการเตรียมสาหร่ายที่จะใช้เพื่อเป็นเชื้อคั่งคั้นสำหรับการเพาะเลี้ยงนั้น ได้นำเชื้อสาหร่ายที่บริสุทธิ์จากภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ มาขยายโดยทำการถ่ายเชื้อจากอาหารแข็งลงสู่อาหารเหลว โดยใช้สูตรอาหาร Zarrouk ภายใต้แสงไฟ 24 ชั่วโมง และมีการเติมอากาศตลอดเวลา ปลอ่ยให้สาหร่ายเจริญเติบโตจนกระทั่งสามารถวัดค่าดูดกลืนคลื่นแสง (optical density : OD) จากเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 1

##### 2. ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำเลี้ยงจากฟาร์มเลี้ยงสุกรต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

###### 2.1 การเพาะเลี้ยงในสภาพห้องปฏิบัติการ

นำสาหร่ายจากข้อ 1 ทำการทดลองแบบ Completely randomized design เพื่อหาความเข้มข้นของน้ำเลี้ยงจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมที่สาหร่ายสามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ คือ 10% (น้ำเลี้ยงจากฟาร์มเลี้ยงสุกร 10 ส่วน น้ำสะอาด 90 ส่วน) 20%, 40%, 60%, 80%, 100% และชุดควบคุมคือ 0% โดยใช้น้ำตัวอย่างปริมาตร 3.6 ลิตรใส่ลงในโหลแก้วขนาด 5 ลิตรที่มีการเติมอากาศ นำสาหร่ายที่เป็นเชื้อคั่งคั้นจากข้อ 1 ใส่ลงไปในแต่ละขวด โดยใช้ปริมาตรของสาหร่ายคั่งคั้น 400 มิลลิลิตรต่อขวด นำไปวางในห้องปฏิบัติการที่มีความเข้มแสง 5,500 ลักซ์ โดยในแต่ละโหลจะทำการตรวจวัดคุณภาพของน้ำก่อนทำการทดลองและภายหลังจากการทดลองในทุก 2 วันเป็นเวลา 14 วัน โดยทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำดังต่อไปนี้ pH โดยใช้ pH meter, อุณหภูมิ โดยใช้ เทอร์โมมิเตอร์, TDS, Nitrate-N, Ammonia-N และ Orthophosphate- Phosphorus โดยใช้ spectrophotometer, SS ด้วยการระเหยที่อุณหภูมิ 103-105 °C, alkalinity ด้วยวิธี phenolphthalein methyl orange indicator, DO ด้วยวิธี azide modification method, BOD<sub>5</sub> ด้วยวิธี azide modification method



รูปที่ 3.1 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สไปรูลินาในห้องปฏิบัติการ

ก. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้นต่างๆ กัน

ข. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเมื่อเติมสาหร่ายเริ่มต้น 10 %

## 2.2 การเพาะเลี้ยงในสภาพกลางแจ้ง

ทำการทดลองเหมือนข้อ 2.1 แต่เปลี่ยนสถานที่ทำการทดลองเป็นสภาพกลางแจ้ง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายเช่นเดียวกับสภาพห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.2 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สไปรูลินาในสภาพกลางแจ้ง

ก. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้นต่างๆ กัน

ข. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเมื่อเติมสาหร่ายเริ่มต้น 10 %

### 3. ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำเลี้ยงจากฟาร์มเลี้ยงสุกร

#### 3.1 การเพาะเลี้ยงในสภาพห้องปฏิบัติการ

โดยในแต่ละชนิดของสารอาหารได้ทำการทดลองแบบ Completely randomized design โดยศึกษาการเจริญของสาหร่ายที่ระดับความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

- การศึกษาอิทธิพลของสารในกลุ่มโซเดียมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยการเติม  $\text{NaHCO}_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 4, 6, 8 และ 10 กรัมต่อลิตร และ ด้วยการเติม  $\text{NaNO}_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัมต่อลิตร
- การศึกษาอิทธิพลของสารในกลุ่มโปแตสเซียมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยการเติม  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 กรัมต่อลิตร
- การศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยเคมีต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยการเติมปุ๋ย N:P:K สูตร 16:16 :16 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 กรัมต่อลิตร

โดยใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่ระดับความเข้มข้นที่เลือกได้จากข้อ 2 ปริมาตร 4 ลิตรและใช้สาหร่ายตั้งต้นขนาด 400 มิลลิลิตรในโหลแก้วขนาด 5 ลิตรที่มีเครื่องเติมอากาศ ติดตามดูความเจริญเติบโตของสาหร่ายในทุกความเข้มข้นของสารอาหารในแต่ละชนิดโดยทำการวัดค่า OD จากเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ทุกๆ วันและการนับเซลล์ (cell counts) ทุกๆ 2 วัน โดยใช้ การนับจำนวนเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

#### 3.2 การเพาะเลี้ยงในสภาพกลางแจ้ง

- ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.1 แต่เปลี่ยนสถานที่ทำการทดลองเป็นสภาพกลางแจ้ง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายเช่นเดียวกับสภาพห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์สารอาหารที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

#### 4. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับ pilot scale แบบกะ (batch culture)

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรและปริมาณสารอาหารแต่ละชนิดที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยใช้บ่อซีเมนต์กลางแจ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ปริมาตรทำการ 100 ลิตรทำการศึกษาเป็นเวลา 15 วัน โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น

ชุดควบคุม โดยใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 %

ชุดการทดลองที่ 1 ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 % สาหร่ายและ สารอาหารที่เหมาะสม

ชุดการทดลองที่ 2 ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 % และสาหร่าย โดยในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

- ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ทำการตรวจวัดคุณภาพของน้ำทั้งก่อนและหลังจากออกจากบ่อสาหร่าย คุณภาพน้ำที่ตรวจวัด ได้แก่ pH, อุณหภูมิ, conductivity และ total dissolved solid ใช้ conductivity meter, TDS, DO และ BOD<sub>5</sub>, alkalinity, Nitrate-N, Ammonia-N, Orthophosphate-phosphorus และ SS
- ปริมาณของสาหร่ายสไปรูลินาที่เก็บได้เป็นน้ำหนักแห้งของสาหร่ายต่อปริมาตร โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-65 C° เป็นเวลา 5 ชั่วโมง, OD และ จำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 3.4 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture) ในระดับ pilot scale

## 5. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับน้ำร่อง

### 5.1 การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายใช้ระยะเวลาเก็บกัก ที่ได้จาก 4.1 ในบ่อเลี้ยงสาหร่ายขนาด  $1.4 \times 3.8 \times 0.6$  เมตร มีปริมาตรทำการ 2,000 ลิตร เป็นเวลา 30 วัน ของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เป็นเวลา 1 เดือน โดยหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย, ปริมาณของสาหร่ายสไปรูลินาที่เก็บได้ และ ปริมาณของโปรตีนในสาหร่าย โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น

ชุดการทดลองที่ 1 ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 % สาหร่ายและ สารอาหารที่เหมาะสม

ชุดการทดลองที่ 2 ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 % และสาหร่าย โดยในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ทำการตรวจวัดคุณภาพของน้ำทั้งก่อนและหลังจากออกจากบ่อสาหร่าย คุณภาพน้ำที่ตรวจวัด ได้แก่ pH, อุณหภูมิ, conductivity และ total dissolved solid ใช้ conductivity meter, Turbidity, DO และ BOD<sub>5</sub>, Alkalinity, Nitrate-N, Ammonia-N, Orthophosphate-phosphorus และ SS

- ปริมาณของสาหร่ายสไปรูลินาที่เก็บได้เป็นน้ำหนักแห้งของสาหร่ายต่อปริมาตร โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $50-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง, OD และ จำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 3.5 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) ในบ่อแบบวนเวียน

## 5.2 การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ในบ่อเลี้ยงสาหร่ายขนาด 1.4x3.8x0.6 เมตร มีปริมาตรทำการ 2,000 ลิตร ของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เป็นเวลา 1 เดือน โดยหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย, ปริมาณของสาหร่ายสไปรูลินาที่เก็บได้ และ ปริมาณของโปรตีนในสาหร่าย โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น

ชุดการทดลองที่ 1 ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 % สาหร่ายและ สารอาหารที่เหมาะสม

ชุดการทดลองที่ 2 ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ความเข้มข้น 10 % และสาหร่าย โดยในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ทำการตรวจวัดคุณภาพของน้ำทั้งก่อนและหลังจากออกจากบ่อสาหร่าย คุณภาพน้ำที่ตรวจวัด ได้แก่ pH, อุณหภูมิ, conductivity และ total dissolved solid ใช้ conductivity meter, DO และ BOD<sub>5</sub>, alkalinity, Nitrate-N, Ammonia-N, Orthophosphate-phosphorus และ SS

ปริมาณของสาหร่ายสไปรูลินาที่เก็บได้เป็นน้ำหนักแห้งของสาหร่ายต่อปริมาตร โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-65 C° เป็นเวลา 5 ชั่วโมง, OD และ จำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 3.6 การเก็บผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินา

## 6. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลินาที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร



#### บทที่ 4

##### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำทิ้งด้วยสาหร่าย โดยใช้น้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรของคณะผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนปล่อยลงสู่สาธารณะแสดงในตารางที่ 1 โดยสาหร่ายที่นำมาทำการศึกษาในครั้งนี้คือสาหร่าย *Spirulina platensis* ซึ่งได้รับหัวเชื้อบริสุทธิ์ (stock culture) มาจากภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และทำการเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Zarrouk's medium จนได้ปริมาณที่มากเพียงพอ และนำมาทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร คณะผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

| ตัวแปร                          | ลักษณะของน้ำทิ้ง           |
|---------------------------------|----------------------------|
| pH                              | 7.5-8.9                    |
| อุณหภูมิ                        | 27-32 องศาเซลเซียส         |
| DO                              | 1.0-2.3 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
| COD                             | 1200-1800 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| BOD                             | 760-1600 มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | 40-90 มิลลิกรัมต่อลิตร     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | 73-210 มิลลิกรัมต่อลิตร    |
| SRP                             | 260-675 มิลลิกรัมต่อลิตร   |

1. ศึกษาหาความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่าย

นำน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมาทำการเจือจางด้วยน้ำประปาให้มีความเข้มข้น 7 ระดับ คือ 0,10,20,40,60,80 และ 100 % นำมาใส่โหลแก้ว ที่มีน้ำตัวอย่างเริ่มต้น 4 ลิตร เพื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ทำการศึกษาทั้งในห้องทดลองและกลางแจ้ง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 2 วัน เป็นเวลา 14 วัน โดยได้ทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และการเจริญเติบโตของสาหร่ายควบคู่กันไป เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

#### 1.1 ผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่างๆ

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรที่มีความเข้มข้นของน้ำทิ้งต่างๆ กัน ใช้สาหร่ายเริ่มต้น 10 % โดยได้ทำการศึกษาดังการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ด้วยการนับจำนวนเซลล์ของสาหร่ายโดยวิธี total count ด้วย Haemocytometer และค่า OD พบว่าในการทดลองในสภาพกลางแจ้งเมื่อทำการศึกษาโดยการวัดค่า OD พบว่า ค่า OD จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตะกอนแขวนลอยที่ปะปนมากับน้ำเสียและสีของน้ำเสีย ดังนั้นที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำก็จะมีค่า OD ต่ำกว่าน้ำเสียที่มีค่า OD สูง แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 และ 20% ค่า OD มีแนวโน้มจะคงที่ใน 2-4 วันแรกของการทดลอง และจะมีค่าสูงขึ้นทีละน้อยเมื่อเวลาผ่านไป โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 10%มี OD สูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลองคือ 0.45 ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 40,60,80 และ 100 %ค่า OD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า OD น้อยกว่าตอนเริ่มต้นการทดลอง ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่า OD ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อพิจารณาถึงจำนวนเซลล์พบว่าที่ความเข้มข้น 10, 20% และชุดควบคุมที่สาหร่ายสามารถมีชีวิตอยู่ได้ตลอดการทดลอง โดยที่ความเข้มข้น 10% จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นมากที่สุดและมีจำนวนเซลล์มากที่สุดในวันที่ 8 ของการทดลอง คือ 116800 เซลล์ต่อมล. รองลงมาคือ ที่ความเข้มข้น 20% มีจำนวนเซลล์มากที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลอง คือ 61200 เซลล์ต่อมล. ที่ความเข้มข้น 40-60% สาหร่ายจะลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เหลือสาหร่ายเลยในวันที่ 6-8 ของการทดลอง ที่ความเข้มข้น 80-100% สาหร่ายจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ .ในขณะที่ชุดควบคุมสาหร่ายค่อยๆ ลดจำนวนลงอย่างช้าๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีสาหร่ายอยู่บ้างแต่เป็นจำนวนน้อย (รูปที่ 4.1 และ 4.3 (ก))

เมื่อทำการทดลองในสภาพห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไฟตลอด 24 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาค่า OD พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้งมากๆ ค่า OD จะมีค่ามากขึ้น และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่า OD มีแนวโน้มลดลงในทุกชุดการทดลอง เมื่อพิจารณาถึงจำนวนเซลล์พบว่ามีเพียงความเข้มข้น 10% เท่านั้นที่สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้และมีชีวิตอยู่ตลอดจนจบการทดลองในขณะที่ความเข้มข้นอื่นๆ สาหร่ายไม่สามารถอยู่ได้ตลอดการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น คือที่ความเข้มข้น 80 และ 100% พบว่าสาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้และตายตั้งแต่วันแรกของการทดลอง (รูปที่ 4.2 และ 4.3(ข))

สาหร่ายแต่ละชนิดเจริญได้เร็วหรือช้าต่างกัน และแม้แต่นิเวศเดียวกันหรือสายพันธุ์เดียวกันแต่ต่างสภาวะแวดล้อมก็จะเจริญแตกต่างกันไปด้วย ดังจะเห็นได้ว่าสาหร่ายที่ทดลองเลี้ยงในห้องทดลอง ที่ต้องให้แสงไฟตลอด 24 ชั่วโมงและในสภาพกลางแจ้ง จึงมีลักษณะการเจริญที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยพบว่าในสภาพห้องทดลองนั้นสาหร่ายไม่ค่อยจะเจริญเติบโตในทุกความเข้มข้น ส่วนในสภาพกลางแจ้ง เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นน้อยๆ สาหร่ายจะสามารถเจริญเติบโตได้ แต่ถ้าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมากๆ สาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ในระยะแรกๆที่มีการใส่สาหร่าย สาหร่ายไม่ค่อยเจริญเติบโต เนื่องจากสาหร่ายกำลังปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม จึงยังไม่เพิ่มจำนวน แต่เมื่อปรับตัวได้แล้วไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้มากนัก เนื่องจากอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการใส่สารอาหารที่จำเป็นบางชนิดลงไปเพื่อช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้

ค่า OD ที่ได้ไม่ได้แสดงถึงปริมาณหรือการเจริญเติบโตของสาหร่ายแต่เพียงอย่างเดียวเนื่องจากน้ำทิ้งที่เป็นค่าเริ่มต้นมีค่าแตกต่างกัน น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสูงจะมีตะกอนแขวนลอย และสีคล้ำมากกว่าน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่า OD มาก เนื่องจากการใช้ spectrophotometer นั้นเป็นการวัดค่าความขุ่นของเซลล์ (cell density) ซึ่งวิธีนี้อาศัยหลักการหักเหของแสงเมื่อส่องผ่านไปยังเซลล์ของสาหร่าย เมื่อมีตะกอนหรือสีของสารละลายที่รบกวน ก็จะถูก absorb เข้าไปด้วย ทำให้ไม่ได้วัดความหนาแน่นที่แท้จริงของสาหร่ายได้ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการศึกษาที่ความเข้มข้น 80-100 % นั้น OD ไม่ได้ลดลง แม้ว่าสาหร่ายจะตายไปแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายลงและกลายเป็นตะกอนแขวนลอยอยู่ในน้ำนั่นเอง

สาหร่ายสไปรูลินาสามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ช่วงระยะเวลาหนึ่งเพียงสั้นๆ หลังจากนั้นจะลดจำนวนลงเนื่องจากการขาดสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต และไม่สามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียจากฟาร์มที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ เนื่องจากสาหร่ายไม่สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตต่อไปได้ เพราะน้ำตัวอย่างมีความเข้มข้นมาก มีสีคล้ำและมีความขุ่นมาก ซึ่งจะไปกระทบต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย (รูปที่ 4.3)

## 1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

ผลการศึกษาอุณหภูมิของน้ำเสียที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากฟาร์มสุกรที่ต่างกัน พบว่าชุดการทดลองในสภาพกลางแจ้งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28-32 องศาเซลเซียส และในห้องปฏิบัติการมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายสไปรูลินา โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญควรไม่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียสและไม่สูงกว่า 37 องศาเซลเซียส (ยวดี, 2544)

BOD จากผลการศึกษาค่า BOD ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาพกลางแจ้งพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดีกว่าในห้องปฏิบัติการ โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% และ 20% นั้น ค่า BOD จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 8 จนถึงสิ้นสุดของ

การทดลอง โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% นั้น BOD ของน้ำทิ้งในวันที่ 8 มีค่าประมาณ 33 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 66.3% ส่วนที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 20% นั้นพบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดสูงสุดในวันที่ 12 ของการทดลอง โดยมีค่า BOD ของน้ำทิ้ง 91 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 42.7 % ในขณะที่การทดลองในสภาพห้องปฏิบัติการนั้นพบว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง ต่ำๆคือที่ 10%, 20% ,40% และชุดควบคุม ค่า BOD ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตามพบว่าที่ความเข้มข้น 10% มีประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ได้มากที่สุดคือมี BOD ต่ำที่สุดในวันที่ 10 ของการทดลองคือ 54 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 43.75 % ในขณะที่ความเข้มข้นสูงขึ้น BOD มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อเวลาการทดลองนานขึ้น (รูปที่ 4.4)

ธาตุอาหาร เมื่อพิจารณาถึงธาตุอาหารในกลุ่มต่างๆพบว่า ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีปริมาณธาตุอาหารค่อนข้างสูง ทำให้เกิดเป็นปัญหาคอสภาพแวดล้อมได้ถ้าไม่ได้รับการบำบัดและมีการปล่อยลงแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมอย่างมากต่อการนำมาเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดโดยมีค่าไนโตรเจนในโตรเจน ในวันเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตรและลดลงต่ำสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง คือ 13.35 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 46.7% แอมโมเนียไนโตรเจนในวันเริ่มต้น 11.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงต่ำสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง คือ 0.32 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 97.2% SRP ในวันเริ่มต้น 43.0 มิลลิกรัมต่อลิตรและลดลงต่ำสุดในวันที่ 8 ของการทดลอง คือ 21.0 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 50.0% ในขณะที่การทดลองในสภาพห้องปฏิบัติการนั้นพบว่า ธาตุอาหารค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในช่วงท้ายของการทดลองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซากของสาหร่ายที่ตาย (รูปที่ 4.5)

pH ของน้ำทิ้งในการทดลองทั้งในสภาพกลางแจ้งและในห้องปฏิบัติการพบว่า พบว่ามีการเปลี่ยนแปลง pH อยู่ในช่วง 9.5-11 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามีบางชุดการทดลองที่มีค่า pH สูงกว่าการทดลองในชุดอื่นๆ เช่น ชุดการทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10%,20% เพราะเป็นช่วงที่ปริมาณแอมโมเนียพอเหมาะต่อการเจริญเติบโต ทำให้สาหร่ายใช้แอมโมเนียจนเหลือน้อยลง และสาหร่ายจะมีการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียโดยขบวนการ nitrate reductase จึงทำให้ค่า pH ในชุดการทดลองดังกล่าวมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น และในขบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง เมื่อสาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเสียหมด ก็จะไปดึงเอาคาร์บอนไดออกไซด์จากขบวนการ buffer system ทำให้การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความเป็นด่างจากไบคาร์บอเนต มาเป็นคาร์บอเนตและ ไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ และการนำไนเตรทและไนไตรท์เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายโดยขบวนการสังเคราะห์แสง ก็จะทำให้ค่า pH สูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* นั้นจะไม่ปล่อยให้ pH มีค่าต่ำกว่า 9.5 ถ้าต่ำกว่าจะต้องมีการปรับค่า pH ด้วย NaOH อยู่เสมอ

DO ผลจากการทดลองพบว่าในสภาพกลางแจ้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง 0,10,20,40,60,80 และ 100 % มีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 3.1-4.2,2.6-3.9, 2.4-3.2, 2.4-3.4

2.1-2.9, 1.6-2.8 และ 1.1-2.6 มีลิกกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในห้องปฏิบัติการ มีค่าออกซิเจนละลายน้ำ อยู่ในช่วง 3.1-4.1, 2.4-3.5, 2.2-3.0, 2.2-3.1 2.0-2.7, 1.2-2.6 และ 1.1-2.5 มีลิกกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปริมาณความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกันจะมีผลถึงสีของน้ำทิ้ง ทำให้ชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นของน้ำเสียจะทำให้สีค่อนข้างเจือจางลงด้วย ทำให้สาหร่ายในแต่ละชุดการทดลองได้รับแสงที่แตกต่างกันมีผลต่อการสังเคราะห์แสง และปริมาณของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำด้วย

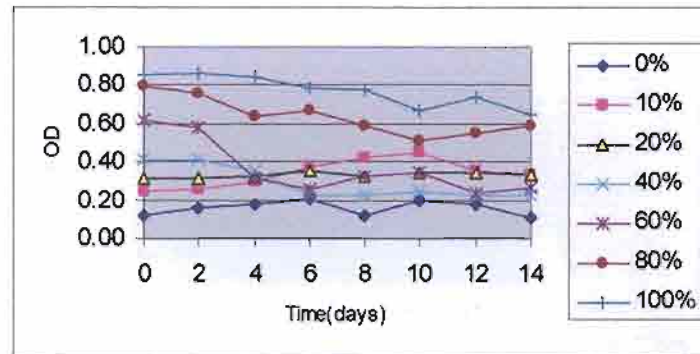
**ของแข็ง TDS** จากผลการทดลองพบว่าในแต่ละชุดการทดลองค่าเริ่มต้นจะแตกต่างกันตามความเข้มข้นของน้ำทิ้ง โดยแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าลดลงจากวันเริ่มต้นทุกชุดการทดลอง แต่จะลดลงในปริมาณที่ต่างกัน โดยเฉพาะการทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% และ 20% รวมทั้งชุดควบคุม เนื่องจากการเจริญของสาหร่ายจนถึงชุดการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่เพิ่มมากขึ้นนั้น TDS จะลดลงเฉพาะในช่วงแรกเท่านั้น เมื่อสาหร่ายตายลงจะทำให้ TDS เพิ่มขึ้น โดยพบว่าสาหร่ายชุดการทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 10% มีค่า TDS เริ่มต้นเท่ากับ 640 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 310 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถลดค่า TDS ได้สูงที่สุดในระยะเวลา 12 วัน ในขณะที่การทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าค่อนข้างคงที่ในระยะเริ่มต้นแต่เมื่อระยะเวลาที่นานขึ้นในทุกชุดการทดลองจะมีค่า TDS เพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ มีค่าแตกต่างกันไปตามความเข้มข้นของน้ำทิ้ง การทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% และ 20% รวมทั้งชุดควบคุมจะมีปริมาณ SS ลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ SS จะเพิ่มมากขึ้นในชุดการทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้งสูงขึ้น คือ 40, 60, 80, และ 100% ทั้งนี้เนื่องจากการตายลงของสาหร่าย ทำให้ซากของสาหร่ายไหลออกมาปะปนกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ

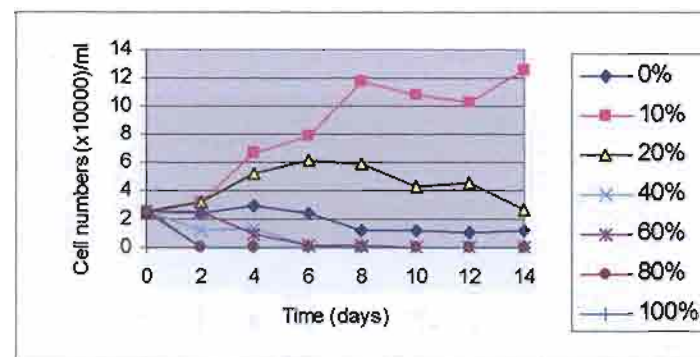
**alkalinity** ผลจากการทดลองทั้งในสภาพกลางแจ้งและในห้องปฏิบัติการพบว่า alkalinity จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำทิ้งเพิ่มมากขึ้น และมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% มีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา และเมื่อความเข้มข้นของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้นนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจะมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากในน้ำทิ้งมีปริมาณของสารอินทรีย์ที่มากเกินไปจนกว่าจะสามารถออกซิไดซ์ได้หมดและสีที่มีความเข้มข้นเกินไปในความเข้มข้นที่สูงขึ้นนั้น จะทำให้บดบังแสง ทำให้แสงส่องได้ไม่ทั่วถึงสาหร่ายที่อยู่ด้านล่างไม่สามารถที่จะสังเคราะห์แสงได้อย่างเพียงพอ ทำให้สาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนจากน้ำทิ้งนั้นมีประสิทธิภาพที่ลดลง ประสิทธิภาพของระบบในสภาพกลางแจ้งจะดีกว่าในห้องปฏิบัติการ จากสภาพของสาหร่ายพบว่าในสภาพห้องปฏิบัติการ สาหร่ายไม่ค่อยเจริญเติบโต

(ก)



(ข)

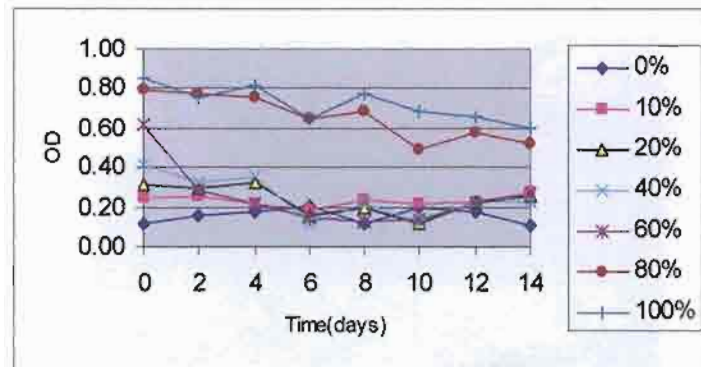


รูปที่ 4.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน  
✓ ในการเพาะเลี้ยงในสภาพกลางแจ้ง

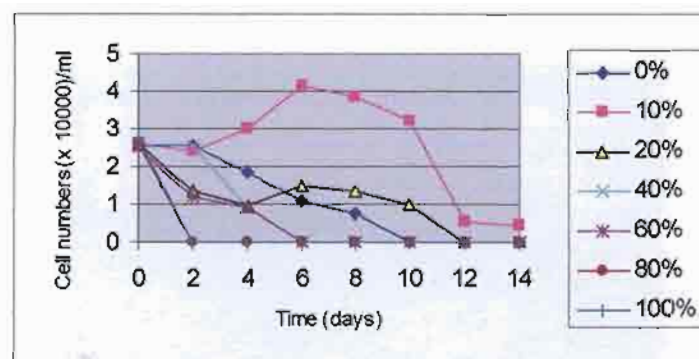
ก. แสดงด้วยค่า OD

ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

(n)



(ข)



รูปที่ 4.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก. แสดงด้วยค่า OD

ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

(ก)



(ข)

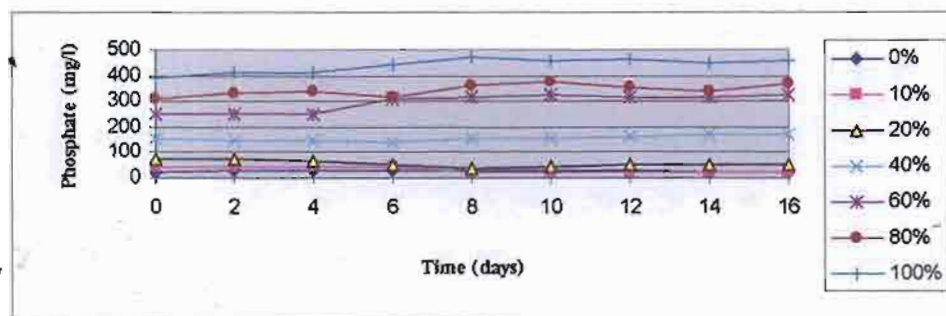
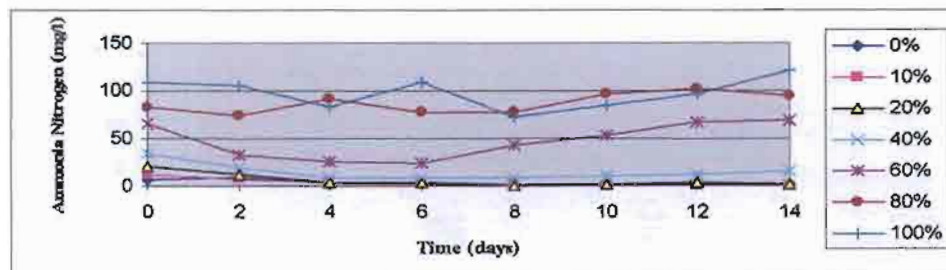
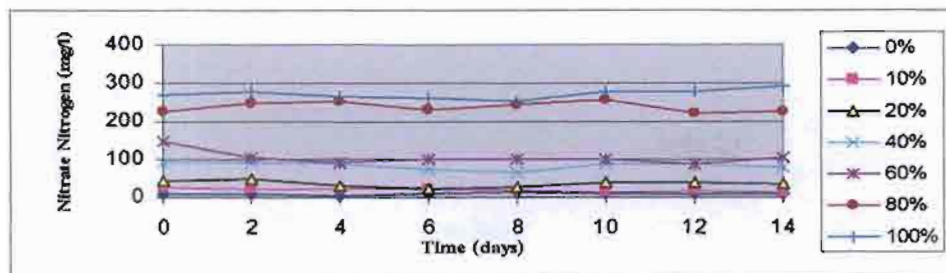
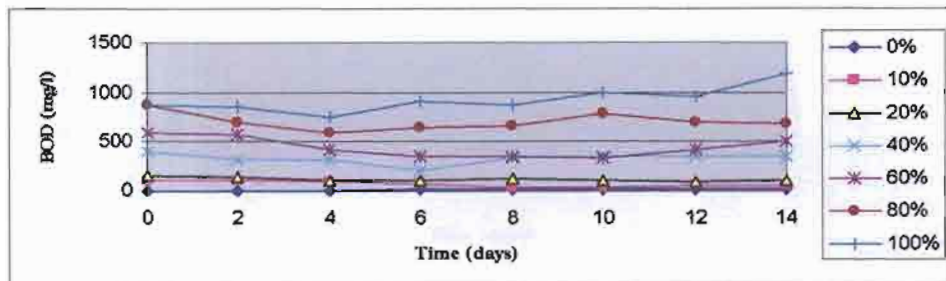


รูปที่ 4.3 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน  
เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ก. สภาพกลางแจ้ง

ข. ห้องปฏิบัติการ





รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD และสารอาหาร ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาพกลางแจ้ง

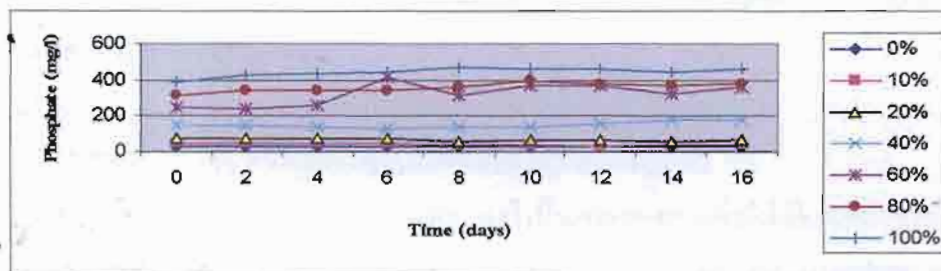
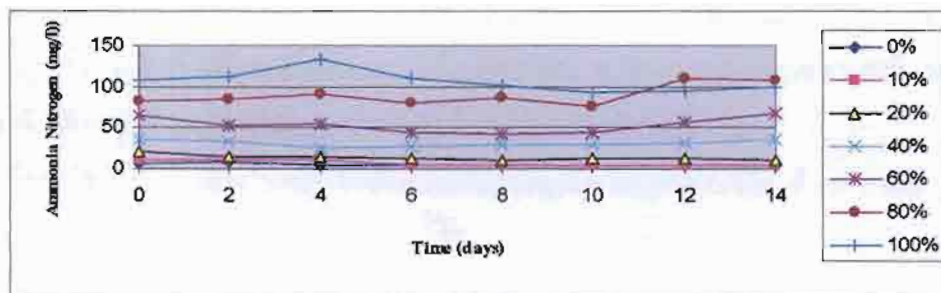
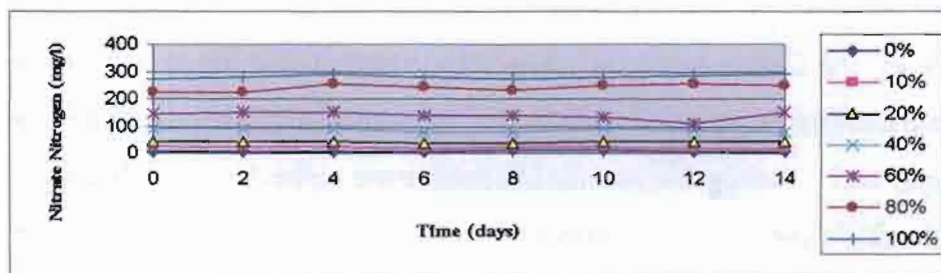
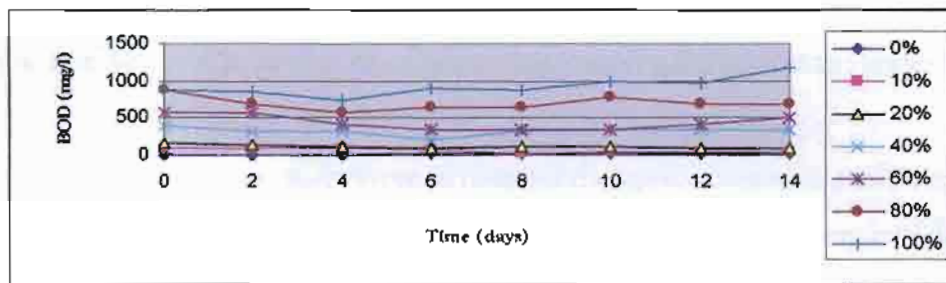
ก. การเปลี่ยนแปลงค่า BOD

ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในไนโตรเจน

ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ในไนโตรเจน

ง. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus





รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD และสารอาหาร ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในสภาพห้องปฏิบัติการ

ก. การเปลี่ยนแปลงค่า BOD

ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในไนโตรเจน

ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ในไนโตรเจน

ง. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus

## 2. ศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายจากน้ำทิ้งฟาร์มเลี้ยงสุกร

จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่มีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา คือที่ความเข้มข้นของทั้ง 10 % เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินาสามารถมีชีวิตอยู่ได้ตลอดการทดลอง และเจริญเติบโตได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆ แม้ว่าจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้มากนัก เนื่องจากในน้ำทิ้งที่มาจากฟาร์มสุกรนั้นแม้จะมีธาตุอาหารอยู่ แต่ก็มีจำนวนไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย และเพื่อให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตและมีผลผลิตที่ดียิ่งขึ้น จึงได้ทำการศึกษาถึงธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยได้ยึดหลักของสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา สำหรับการเพาะเลี้ยงที่ใช้น้ำเสียจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท รวมไปถึง ทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมการเกษตรบางชนิดนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้สูตรอาหารซึ่งได้รับการปรับปรุงโดยคณะผู้วิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและคณะผู้วิจัยจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยสูตรที่ได้รับการปรับปรุงและเป็นที่นิยมใช้คือ  $\text{NaHCO}_3$  8.5 กรัม/ลิตร, N.P.K. สูตร 16:16:16 0.6 กรัม/ลิตร,  $\text{NaNO}_3$  1.5 กรัม/ลิตร และ  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.5 กรัม/ลิตร(ยวดี, 2544) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาหาปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

- การศึกษาอิทธิพลของสารในกลุ่มโซเดียมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยการเติม  $\text{NaHCO}_3$  และ  $\text{NaNO}_3$
- การศึกษาอิทธิพลของสารในกลุ่มโปแตสเซียมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยการเติม  $\text{K}_2\text{HPO}_4$
- การศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยเคมีต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยการเติมปุ๋ย N:P:K สูตร 16:16:16 ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

### 2.1 ผลของ $\text{NaNO}_3$ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

จากผลการศึกษา เมื่อมีการเติม  $\text{NaNO}_3$  ลงไปในการทดลองเพื่อให้เป็นแหล่งอาหารของสาหร่ายพบว่า ในสภาพกลางแจ้งนั้น ชุดการทดลองที่เติม  $\text{NaNO}_3$  นั้นสาหร่ายสไปรูลินาสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าชุดควบคุม และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2) จากรูป 4.6 จะเห็นได้ว่าค่า OD ของการทดลองของชุดที่เติมสารอาหารในระยะ 0-4 วันแรกของการทดลองนั้นค่า OD มีค่าคงที่หลังจากนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตลอดการทดลอง ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติม  $\text{NaNO}_3$  นั้น สาหร่ายเจริญได้น้อยกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหาร และมีแนวโน้มที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของเซลล์สาหร่ายอย่างรวดเร็วในวันแรกๆนั้นเมื่อเทียบกับค่า OD ที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากในวันแรกๆของการทดลองสาหร่ายจะไม่ได้เพิ่มที่ขนาดแต่เพิ่มที่จำนวนของเซลล์ ทำให้สาหร่ายมีจำนวนเซลล์มาก โดยสาหร่ายจะมีการแตกตัวลักษณะเป็นท่อนสั้นๆ ขนาด 2-4 เซลล์ ที่เรียกว่า โฮโมโกเนีย (homogonia) (มารศรี, 2546) ในระยะเริ่มต้นและเมื่อเวลาผ่านไป โฮโมโกเนียที่เป็นท่อนสั้นๆ เหล่านี้จึงจะค่อยๆเพิ่มจำนวนโดยวิธี cell fusion

และจะค่อยๆเจริญเป็นเส้นสายต่อไป (ลักษณะและคณะ, 2540) จึงทำให้ในระยะแรกๆ ค่า OD คงที่ในขณะที่จำนวนเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าสาหร่ายมีค่า OD ไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละชุดการทดลองที่ได้  $\text{NaNO}_3$  แต่พบว่าสาหร่ายมีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละชุดการทดลองที่ได้สารอาหาร แต่ในชุดควบคุมสาหร่ายไม่ค่อยเจริญเติบโตมากนัก และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของ  $\text{NaNO}_3$  1.5 กรัม/ลิตร สาหร่ายมีจำนวน เซลล์เพิ่มขึ้นมากกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ และสาหร่ายมีการเจริญเติบโตค่อนข้างคงที่และสม่ำเสมอตลอดการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าจำนวนสาหร่าย 218,300 เซลล์/ตารางเมตร มีค่า OD 1.042

สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงในห้องทดลอง โดยให้ความสว่างตลอด 24 ชั่วโมงด้วยแสงไฟ พบว่าสาหร่ายที่ได้  $\text{NaNO}_3$  ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 กรัม/ลิตร นั้น ค่า OD ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง โดยที่ความเข้มข้น 1.5 กรัม/ลิตร นั้นสาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้น 2 กรัม/ลิตร และชุดที่ไม่ได้สารอาหาร นั้นพบว่าค่า OD ลดลงเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4.7 เมื่อดูจากจำนวนเซลล์ของสาหร่ายพบว่าจำนวนเซลล์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในชุดการทดลองที่ได้  $\text{NaNO}_3$  1.5 กรัม/ลิตรนั้น จะมีจำนวนเซลล์ของสาหร่ายเพิ่มจำนวนขึ้นมากที่สุด แต่เป็นสาหร่ายที่แตกตัวเป็นท่อนสั้นๆ ที่เรียกว่า *homogonia* ซึ่งพร้อมที่จะเจริญเติบโตต่อไปเมื่อได้รับสภาวะที่และสารอาหารที่เหมาะสมนัก และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2)

## \* 2.2 ผลของ $\text{NaHCO}_3$ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

จากผลการศึกษา เมื่อมีการเติมสารอาหาร  $\text{NaHCO}_3$  ลงไปในการทดลองเพื่อให้เป็นแหล่งอาหารในสภาพกลางแจ้งนั้น เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติทั้งค่า OD และจำนวนเซลล์พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2) โดยสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่คึกคักขึ้นเรื่อยๆ ดังรูป 4.8 โดยในช่วงแรกของการทดลองตั้งแต่วันที่ 0-5 พบว่าสาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตไม่มากนักคือมีค่า OD ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สาหร่ายใช้ในการปรับตัวเพื่อให้เข้ากับสภาพแวดล้อม (lag phase) และหลังจากวันที่ 5 พบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยจะเห็นได้จากค่า OD ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า OD นี้จะสอดคล้องกับจำนวนเซลล์ของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  8.0 กรัม/ลิตร สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองในชุดการทดลองอื่นๆ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า OD 1.027 และมีจำนวนเซลล์สาหร่าย 292,700 เซลล์/ตารางเมตร

สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงในห้องทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  แตกต่างกัน แต่จะมีความแตกต่างจากชุดที่ไม่ได้ใส่สารอาหารอย่างชัดเจน โดยพบว่าทุกชุดการทดลองที่ได้สารอาหาร  $\text{NaHCO}_3$  นั้นสาหร่ายค่อยๆ เจริญเติบโตขึ้นอย่างช้าๆ โดยพบว่ามีจำนวนเซลล์

ของสาหร่ายและ OD เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงชุดควบคุมพบว่าสาหร่ายไม่เจริญเติบโต โดยค่า OD จะค่อยๆลดลงและจำนวนเซลล์ ดังรูป 4.9 และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2)

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า  $\text{NaHCO}_3$  มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยสาหร่ายใช้  $\text{NaHCO}_3$  เป็นแหล่งของคาร์บอนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง โดยที่  $\text{NaHCO}_3$  เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง โดยปริมาณ  $\text{NaHCO}_3$  ที่เหมาะสมของสาหร่ายสไปรูลินาควรอยู่ในช่วง 4.5-8.5 กรัม/ลิตร (ยวดี, 2544) และปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขบวนการ นั้นช่วยในการเพิ่มค่า pH เพื่อให้ค่าอยู่ประมาณ 9 (Venkataraman, 1983) อีกด้วย

### 2.3 ผลของ $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

จากผลการศึกษา เมื่อมีการเติมสารอาหาร  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ลงไปในการทดลองเพื่อให้เป็นแหล่งอาหารในสภาพกลางแจ้งจากรูป 4.10 นั้นพบว่าสาหร่ายเจริญได้ดีเมื่อมีการเติม  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ที่ความเข้มข้นต่ำๆ คือ 0.1 กรัม/ลิตร และชุดควบคุม ซึ่งการเจริญเติบโต โดยดูจากค่า OD และจำนวนเซลล์พบว่าค่า OD และจำนวนเซลล์ที่ได้ไม่แตกต่างกัน โดยพบว่าในช่วง 0-5 วันแรกของการทดลองสาหร่ายจะยังมีการปรับตัวและจะเริ่มเจริญขึ้นเรื่อยๆ ในวันที่ 6 ของการทดลอง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  มากขึ้นพบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่น้อยลงกว่าที่ความเข้มข้นน้อยๆ เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของค่า OD และจำนวนเซลล์พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2) จาก การวิเคราะห์ LSD มีความเหมือนกันระหว่างชุดควบคุมและชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นของ  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

จากรูป 4.11 สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงในห้องทดลองนั้นพบว่า สาหร่ายไม่ค่อยเจริญเติบโตโดยพบว่าค่า OD และจำนวนเซลล์ของสาหร่ายมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่า  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

### 2.4 ผลของ N.P.K. สูตร 16:16:16 ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

จากผลการศึกษา เมื่อมีการเติมสารอาหาร N.P.K. สูตร 16:16:16 ลงไปในการทดลองเพื่อให้เป็นแหล่งอาหาร ในสภาพกลางแจ้งนั้นพบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่ดีขึ้นเรื่อยๆ รูป 4.12 โดยเฉพาะชุดควบคุมนั้นพบว่ามีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าชุดการทดลองอื่นๆ รองไปคือ ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.6 กรัม/ลิตร ในขณะที่ความเข้มข้น 0.8 กรัม/ลิตรนั้นสาหร่ายไม่เจริญเติบโต โดยในช่วงแรกของการทดลองตั้งแต่วันที่ 0-6 พบว่าสาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตไม่มากนักคือมีค่า OD ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายมีการพักตัว หลังจากนั้นจะค่อยๆ เจริญเติบโตขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า OD จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จำนวน เซลล์ของสาหร่ายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่เริ่มการทดลอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเซลล์

สาหร่ายนั้นในวันแรกๆจะไม่ทำให้ค่า OD เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด เนื่องจากสาหร่ายนั้นจะไม่ได้เพิ่มที่ขนาดแค่เพิ่มที่จำนวนเท่านั้น และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2) โดยเมื่อพิจารณาจากค่า LSD พบว่าชุดควบคุมมีความแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆ และมีการเจริญเติบโตที่มากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ

สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงในห้องทดลอง ไม่มีความแตกต่างในการเจริญเติบโตของสาหร่ายระหว่างชุดควบคุมและที่ความเข้มข้นของสาหร่ายที่เดิม N.P.K ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 กรัม/ลิตร แต่ที่ความเข้มข้น 0.8 กรัม/ลิตร สาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้และตายลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่า OD และจากจำนวนเซลล์ของสาหร่ายที่มีค่าลดลงตลอดการทดลอง อย่างไรก็ตามพบว่าในชุดการทดลองอื่นๆ นั้นสาหร่ายก็ไม่ได้เจริญเติบโตแต่ยังคงอยู่ในระยะชะลอตัวเท่านั้น จากรูป 4.13 ที่ได้พบว่า ค่า OD และเซลล์ของสาหร่ายที่ได้จะมีค่าคงที่ตลอดการทดลองและเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 4.2) โดยเมื่อพิจารณาจากค่า LSD พบว่าชุดควบคุมและชุดการทดลองที่มีความเข้มข้น N.P.K 0.2, 0.4, 0.6 กรัม/ลิตร มีความเหมือนกันในขณะที่ความเข้มข้น 0.8 กรัม/ลิตร มีความแตกต่าง โดยมีค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตน้อยกว่าชุดการทดลองชุดอื่นๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณของ N.P.K สูตร 16:16:16 นั้นไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา ทั้งนี้เนื่องมาจากในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเริ่มต้นมีปริมาณของไนโตรเจนในรูปของไนเตรทอยู่อย่างเพียงพอ และยังมีปริมาณของไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียอยู่สูงเนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านกระบวนการหมัก ปริมาณของไนโตรเจนในรูปของไนเตรทอย่างช้าๆ และแอมโมเนียยังถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทด้วยกระบวนการ Nitrification ด้วยแบคทีเรีย จึงทำให้ปริมาณของไนเตรทมีเพียงพอต่อความต้องการ ปุ๋ย N.P.K. นั้นจะเป็นไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ทำให้สาหร่ายสไปรูลินานำไนโตรเจนไปใช้ได้ยากกว่าไนโตรเจนในรูปของไนเตรทที่มีอยู่อย่างเพียงพอแล้วในน้ำเสียเริ่มต้น นอกจากนี้ถ้า pH ของน้ำสูงกว่า 7 แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นพิษต่อสาหร่าย ทำให้สาหร่ายไม่เจริญ (จันทร์พร, 2545)

จากผลที่ได้พบว่าสาหร่ายที่พบในห้องทดลองกับในสภาพกลางแจ้งนั้น มีอัตราการเจริญที่แตกต่างกันในสภาพกลางแจ้งนั้น สาหร่ายจะเจริญเติบโตได้ดี โดยค่า OD และจำนวนเซลล์ที่สูงขึ้น ในขณะที่ในห้องทดลองที่ไม่ได้แสงจากธรรมชาติคือใช้แสงไฟนั้นสาหร่ายเจริญเติบโตได้ไม่ดีเนื่องจากสาหร่ายอาจได้รับความเข้มแสงต่ำกว่าในระดับที่เหมาะสม ทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่ช้ามากหรือไม่ค่อยเจริญเติบโต (สรวิศ, 2543) โดยเฉพาะสาหร่ายสไปรูลินานั้นจะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ได้แสงแดดจากธรรมชาติมากกว่าที่ทำการเพาะเลี้ยงด้วยแสงไฟ

อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่ไม่ค่อยจะมากนักทั้งในสภาพกลางแจ้งและในร่ม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่แปลกไปจากสภาพแวดล้อมเดิม ทำให้สาหร่ายต้องมีการปรับตัวค่อนข้างมากและจะตายในระยะเริ่มแรกเป็นจำนวนมาก ทำให้สาหร่ายที่เป็นสาหร่ายเริ่มต้นคือที่ 10% นั้น ที่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้มีค่อนข้างน้อย ซึ่งอาจทำให้เซลล์แตก เนื่องจากการเกิดโพโตออกซิ

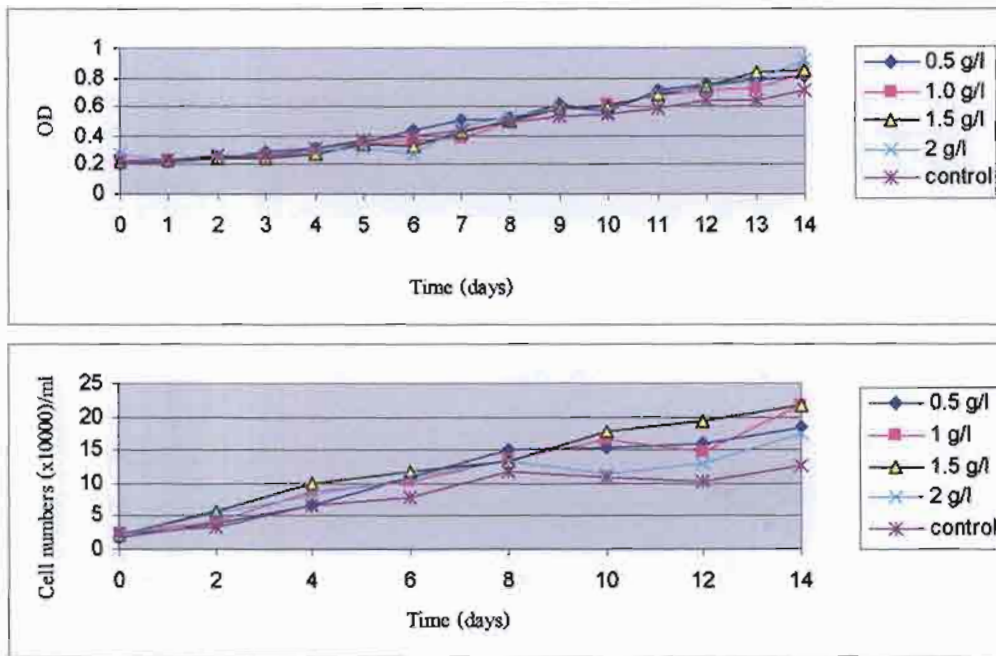
เดชัน (photooxidation) ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้น ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา แต่ถ้าสาหร่ายเริ่มต้นมีมากเกินไป จะทำให้ผลผลิตไม่ดีเนื่องจากจะเกิดการบดบังแสงกัน ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตอีกด้วย

จากการทดลองในเรื่องของสารอาหารพบว่าปริมาณและสารอาหารที่มีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลินาเจริญเติบโตได้ดี ได้แก่  $\text{NaHCO}_3$  8.0 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  1.5 กรัม/ลิตร ซึ่งสาหร่ายจะสามารถเจริญได้ดีในสภาพกลางแจ้ง สาหร่ายแต่ละชนิดจะเจริญเติบโตได้เร็วหรือช้าต่างกัน หรือแม้แต่ในการทดลองก็พบว่าถึงแม้จะเป็นสาหร่ายสไปรูลินาเหมือนกัน มาจากการเพาะเลี้ยงแบบเดียวกันในตอนเริ่มต้น แต่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันก็ทำให้การเจริญเติบโตที่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงในสภาพแวดล้อมและในพื้นที่ต่าง ๆ กัน ควรได้มีการตรวจสอบและวางแผนการผลิตที่เหมาะสมในแต่ละสภาพแวดล้อม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.2 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยวัดด้วยการดูดกลืนคลื่นแสงและจำนวนเซลล์

| ระดับสารอาหาร<br>(กรัม/ลิตร)    | กลางแจ้ง                                |                                    | ห้องปฏิบัติการ                          |                                    |
|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|
|                                 | การดูดกลืนคลื่นแสง (OD <sub>560</sub> ) | จำนวนเซลล์ (x10 <sup>4</sup> )/มล. | การดูดกลืนคลื่นแสง (OD <sub>560</sub> ) | จำนวนเซลล์ (x10 <sup>4</sup> )/มล. |
| NaNO <sub>3</sub>               |                                         |                                    |                                         |                                    |
| 0                               | 0.4235 <sup>a</sup>                     | 9.1386 <sup>a</sup>                | 0.2044 <sup>b</sup>                     | 5.24 <sup>a</sup>                  |
| 0.5                             | 0.4879 <sup>b</sup>                     | 10.9571 <sup>abc</sup>             | 0.2086 <sup>b</sup>                     | 5.53 <sup>ab</sup>                 |
| 1                               | 0.4645 <sup>b</sup>                     | 11.5292 <sup>bc</sup>              | 0.2294 <sup>bc</sup>                    | 5.3195 <sup>b</sup>                |
| 1.5                             | 0.5298 <sup>c</sup>                     | 12.7158 <sup>c</sup>               | 0.2424 <sup>c</sup>                     | 6.6725 <sup>a</sup>                |
| 2                               | 0.483 <sup>b</sup>                      | 10.1883 <sup>ab</sup>              | 0.1492 <sup>a</sup>                     | 3.7667 <sup>a</sup>                |
| NaHCO <sub>3</sub>              |                                         |                                    |                                         |                                    |
| 0                               | 0.4830 <sup>b</sup>                     | 13.7441 <sup>ab</sup>              | 0.2580 <sup>b</sup>                     | 5.7572 <sup>a</sup>                |
| 4                               | 0.4318 <sup>a</sup>                     | 13.1437 <sup>a</sup>               | 0.2482 <sup>b</sup>                     | 7.0483 <sup>b</sup>                |
| 6                               | 0.4926 <sup>b</sup>                     | 12.0075 <sup>a</sup>               | 0.2484 <sup>b</sup>                     | 6.8591 <sup>ab</sup>               |
| 8                               | 0.5713 <sup>c</sup>                     | 16.0900 <sup>b</sup>               | 0.2443 <sup>b</sup>                     | 7.1625 <sup>b</sup>                |
| 10                              | 0.4606 <sup>ab</sup>                    | 14.3142 <sup>ab</sup>              | 0.2250 <sup>a</sup>                     | 6.4658 <sup>ab</sup>               |
| NPK <sup>a</sup>                |                                         |                                    |                                         |                                    |
| 0                               | 0.4393 <sup>c</sup>                     | 9.8850 <sup>c</sup>                | 0.2037 <sup>b</sup>                     | 5.1150 <sup>b</sup>                |
| 0.2                             | 0.3663 <sup>a</sup>                     | 9.7758 <sup>b</sup>                | 0.2070 <sup>b</sup>                     | 4.9508 <sup>b</sup>                |
| 0.4                             | 0.3426 <sup>b</sup>                     | 8.3033 <sup>b</sup>                | 0.2124 <sup>b</sup>                     | 5.6546 <sup>b</sup>                |
| 0.6                             | 0.3638 <sup>b</sup>                     | 9.0600 <sup>b</sup>                | 0.1911 <sup>b</sup>                     | 5.05667 <sup>b</sup>               |
| 0.8                             | 0.2592 <sup>b</sup>                     | 5.2908 <sup>a</sup>                | 0.1537 <sup>a</sup>                     | 2.5741 <sup>a</sup>                |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> |                                         |                                    |                                         |                                    |
| 0                               | 0.4393 <sup>c</sup>                     | 9.8850 <sup>c</sup>                | 0.2037 <sup>a</sup>                     | 5.1150 <sup>a</sup>                |
| 1                               | 0.4608 <sup>c</sup>                     | 10.3242 <sup>c</sup>               | 0.2443 <sup>b</sup>                     | 6.4658 <sup>b</sup>                |
| 3                               | 0.3147 <sup>ab</sup>                    | 8.3440 <sup>a</sup>                | 0.2484 <sup>b</sup>                     | 7.1625 <sup>b</sup>                |
| 5                               | 0.3529 <sup>b</sup>                     | 10.0175 <sup>c</sup>               | 0.2484 <sup>b</sup>                     | 6.8592 <sup>b</sup>                |
| 7                               | 0.2828 <sup>a</sup>                     | 8.14 <sup>a</sup>                  | 0.2482 <sup>b</sup>                     | 7.0483 <sup>b</sup>                |

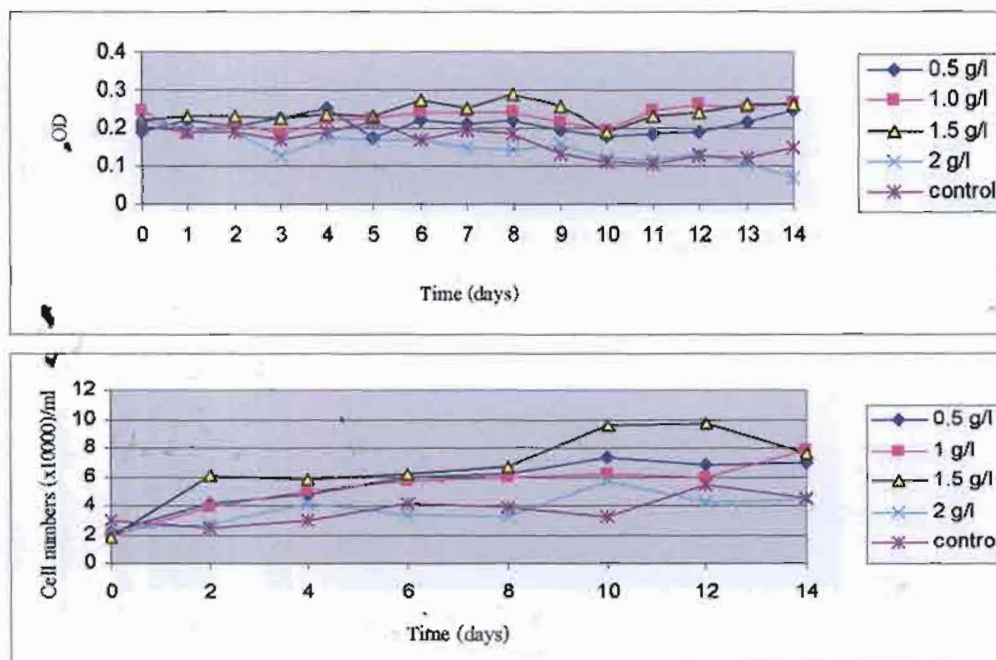
หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงข้อมูลมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 4.6 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร  $\text{NaNO}_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก. แสดงด้วยค่า OD

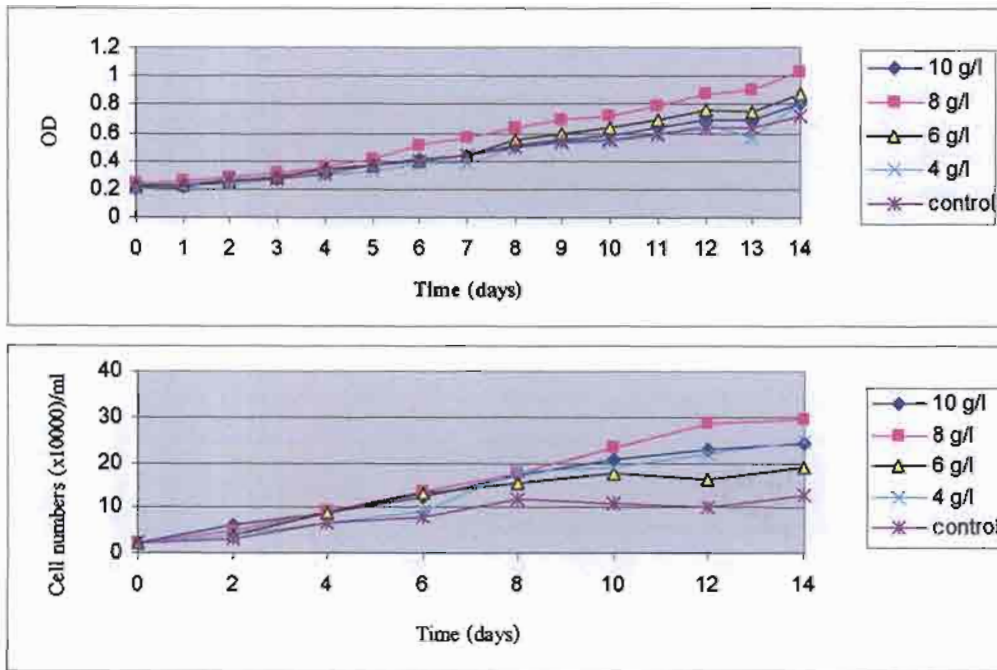
ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.7 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร  $\text{NaNO}_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก. แสดงด้วยค่า OD

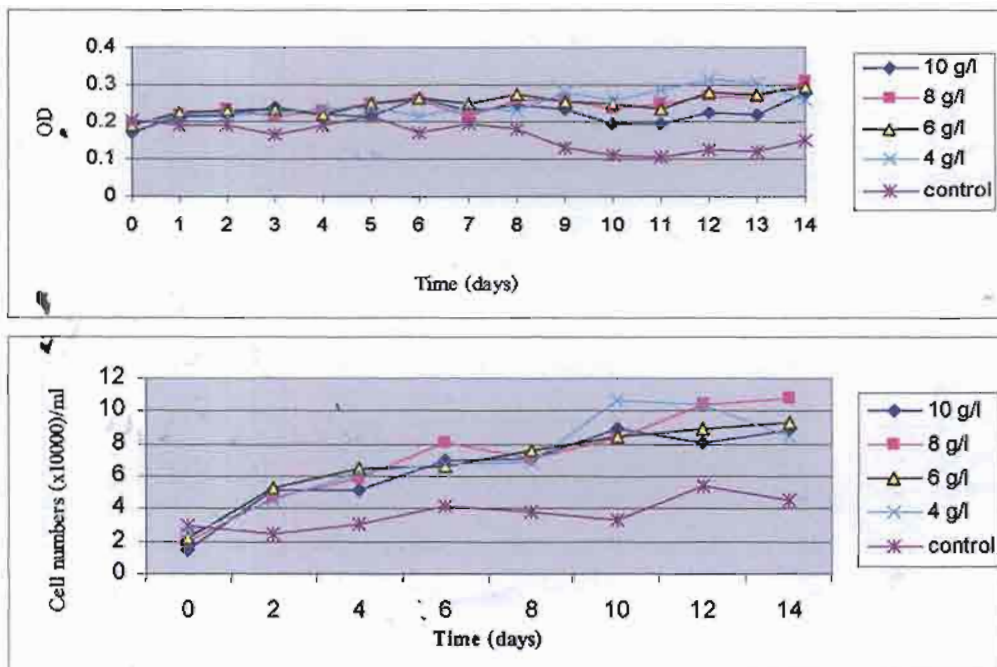
ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.8 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร  $\text{NaHCO}_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก.แสดงด้วยค่า OD

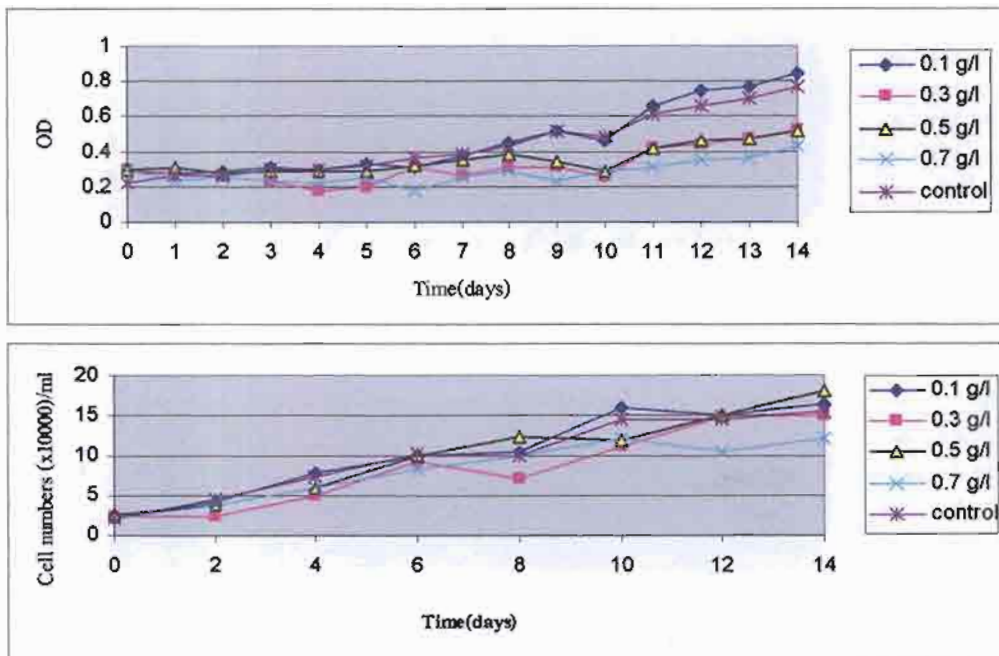
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร  $\text{NaHCO}_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก.แสดงด้วยค่า OD

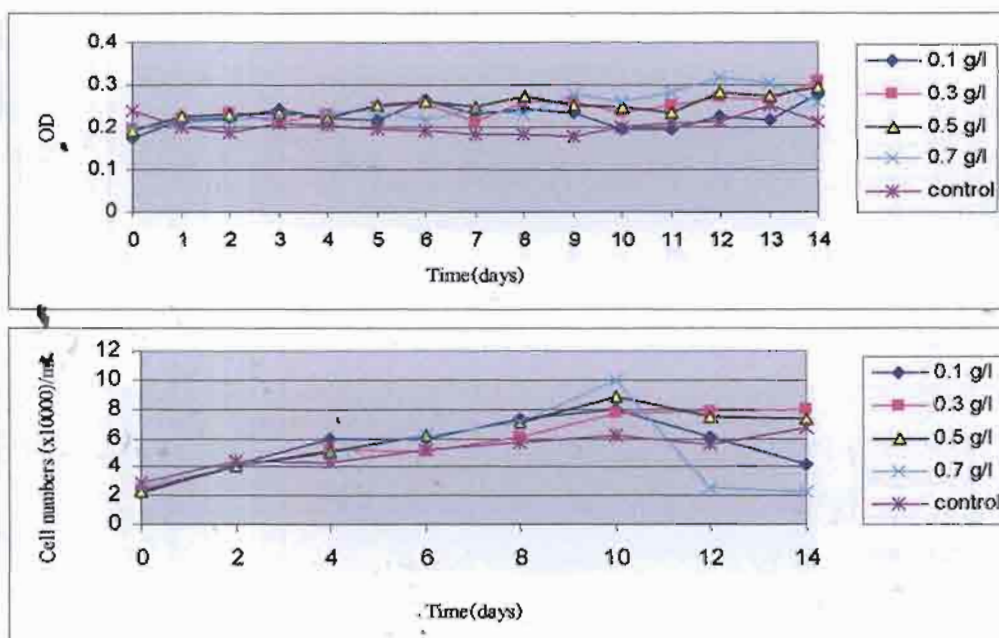
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร  $K_2HPO_4$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก.แสดงด้วยค่า OD

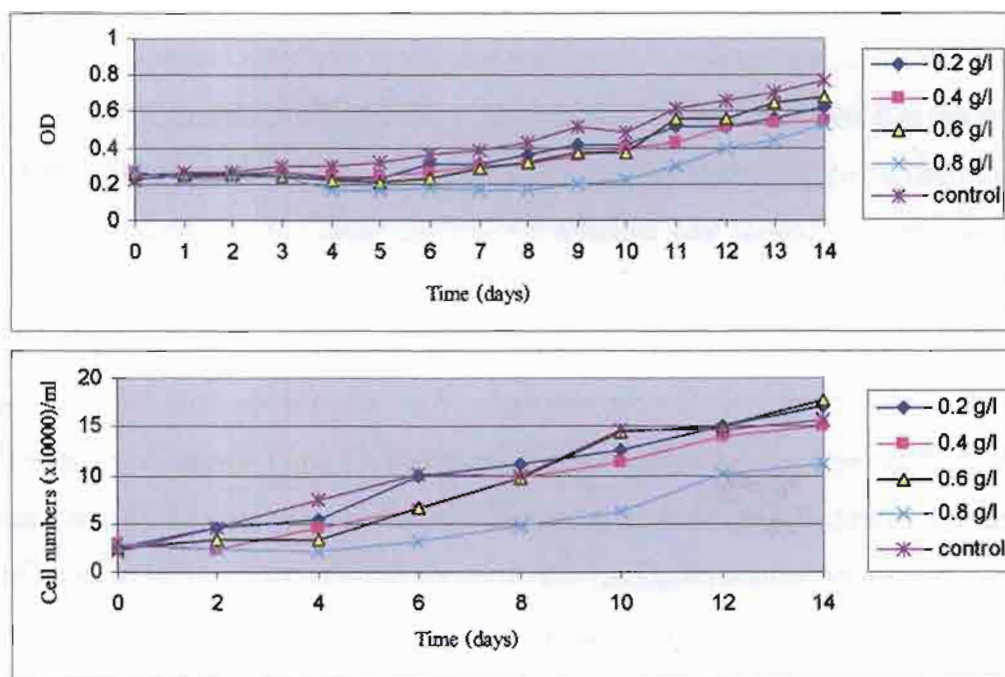
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.11 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร  $K_2HPO_4$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก.แสดงด้วยค่า OD

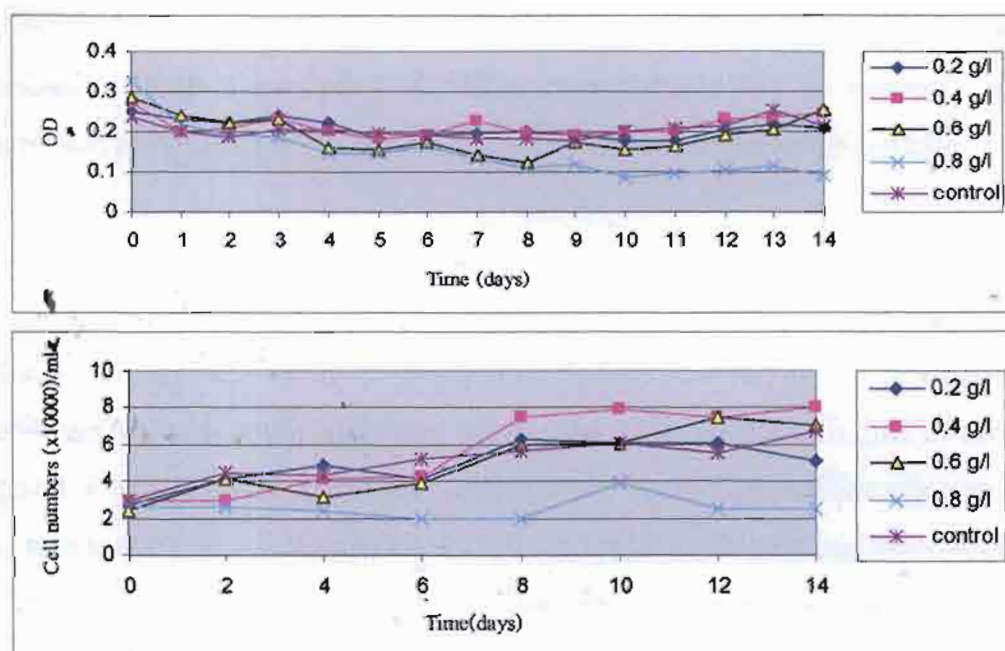
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.12 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NPK ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก.แสดงด้วยค่า OD

ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.13 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NPK ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก.แสดงด้วยค่า OD

ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

### 3. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับ pilot scales แบบกะ (batch culture)

จากผลการทดลองที่ได้ในขั้นที่ 1 และ 2 พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่มีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา คือที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 % และสารอาหารที่ผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้แก่  $\text{NaHCO}_3$  8.0 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  1.5 กรัม/ลิตร ซึ่งสาหร่ายจะสามารถเจริญได้ดีในสภาพกลางแจ้ง จึงได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อซีเมนต์กลางแจ้ง เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร พื้นที่ทำการ 100 ลิตร ใช้ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% และใส่  $\text{NaHCO}_3$  8.0 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  1.5 ทำการทดลองเป็นเวลา 16 วัน เก็บตัวอย่างทุก 2 วัน โดยใช้สาหร่ายตั้งต้นเป็น 20% เนื่องจากการทดลองในตอนที่ 1 และ 2 นั้นพบว่า สาหร่ายเริ่มต้นเพียง 10% นั้น สาหร่ายปรับตัวได้ค่อนข้างน้อย และตายไปเป็นจำนวนมากเมื่อเริ่มเลี้ยง ทำให้มีสาหร่ายเหลือรอดอยู่เป็นจำนวนน้อย เซลล์ของสาหร่ายจึงได้รับแสงมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เซลล์แตก ทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เหลือรอดไม่ดีพอ นอกจากนี้ได้มีการเพิ่มพารามิเตอร์ของน้ำหนักแห้ง (biomass) ของสาหร่ายเพิ่มขึ้นเนื่องจากพบว่าค่า OD และจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ไม่สัมพันธ์กันเนื่องจากการแตกตัวเป็นท่อนสั้นๆ ของสาหร่าย ทำให้ค่า OD ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่จำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้น

น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำทิ้งที่ได้มาจากฟาร์มเลี้ยงสุกรจริงๆ ดังนั้นน้ำทิ้งในแต่ละครั้งจะมีค่าความสกปรกของน้ำทิ้งที่ไม่เท่ากัน มีความแปรผันตลอดเวลา ขึ้นกับจำนวนของสุกรที่เลี้ยงในช่วงเวลานั้นๆ ในการนำน้ำทิ้งมาใช้ในการบำบัดและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้นพบว่าน้ำทิ้งเริ่มต้นที่ใช้ต้องทำการเจือจางโดยต้องมีการปรับค่าเริ่มต้นของน้ำเสียที่จะเข้าระบบด้วยค่า COD เพื่อให้ได้ค่าเริ่มต้นใกล้เคียงกับน้ำเริ่มต้นเดิมที่ 10 % ของน้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองในตอนที่ 1 เพราะค่า COD เป็นค่าที่สะดวกและรวดเร็วกว่าค่า BOD จะใช้การวิเคราะห์นานถึง 5 วัน ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

#### 3.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้สาหร่ายเริ่มต้น 20% นั้นจะให้ค่า OD ประมาณ 0.31-0.45 ซึ่งค่อนข้างมีความเหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับ *S. maxima* ซึ่งเป็นสาหร่ายสไปรูลินาชนิดหนึ่งนั้นเมื่อวัดค่า OD ที่ความยาวคลื่นแสง 560 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 0.35 (ยวดี, 2544) จากผลการทดลอง (รูป 4.14) พบว่าสาหร่าย ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปนั้นสาหร่ายจะค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างช้าๆ ในวันที่ 0-2 วันซึ่งถือว่าเป็นระยะ lag phase หลังจากการปรับตัวในช่วงแรก มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 2-4 ซึ่งถือว่าเป็นระยะ log phase หลังจากนั้นสาหร่ายจะเจริญเติบโตค่อนข้างช้าๆ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟจำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งของสาหร่ายจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 4-8 วัน ซึ่งเป็นช่วง declining phase และจะเริ่มค่อนข้างคงที่ในวันที่ 10-14 ซึ่งเป็นช่วง stationary phase และหลังจากวันที่ 14 เป็นต้นไปพบว่า การเจริญจะลดลง เป็นช่วงของ death phase โดยพบว่าในวันที่ 12 เป็นช่วงที่มีจำนวนเซลล์มากที่สุดคือ  $17.8 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร มีค่า OD 1.09 และมีน้ำหนักแห้ง 0.69 มิลลิกรัม/ ลิตร

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่าสาหร่ายมีการปรับตัวได้ช้ากว่าในตอนเริ่มต้นการทดลองคือวันที่ 0-4 ซึ่งถือว่าเป็นระยะ lag phase แต่หลังจากที่มีการปรับตัวได้ก็ค่อยๆเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีระยะ log phase อยู่ในช่วงวันที่ 4-6 และช่วง stationary phase ในวันที่ 6-12 และสาหร่ายจะเริ่มตายหลังจากวันที่ 12 ของการทดลอง โดยมีจำนวนเซลล์สูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง คือ  $10.8 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร มีค่า OD 0.59 และมีน้ำหนักแห้ง 0.29 มิลลิกรัม/ลิตร และจำนวนเซลล์ของสาหร่ายจะลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากวันที่ 12 และในวันที่ 16 ของการทดลองพบว่า สาหร่ายตายหมดซึ่งจะไม่พบจำนวนเซลล์ของสาหร่ายเลย เป็นช่วงของ death phase ในขณะที่ค่า OD และ น้ำหนักแห้งนั้นมียาลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากพบว่าสาหร่ายที่ตายลงยังคงอยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอย ซึ่งมีผลกระทบต่อค่า OD และน้ำหนักแห้ง และพบว่ามีสาหร่ายชนิดอื่นขึ้นปะปนเมื่อสาหร่ายสไปรูลินาตายลง

### 3.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

COD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นจะทำให้มีอินทรีย์สารเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าน้ำทิ้งเริ่มต้นหลังจากที่ใส่สารอาหารนั้นจะทำให้ค่า COD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารและชุดควบคุมคือที่ 166 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 460 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตามพบว่าค่า COD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 0-10 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายกำลังเจริญเติบโต และหลังจากนั้นพบว่าค่า COD จะมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลองคือในวันที่ 16 โดยพบว่าค่า COD มีค่า 115 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดลงของค่า COD 30.7% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นที่ไม่มีการเติมสารอาหาร ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.15

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่าค่า COD มีค่าค่อนข้างคงที่ใน 0-4 วันแรกของการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายใช้เวลาในการปรับตัวค่อนข้างนานกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร หลังจากสาหร่ายปรับตัวแล้วพบว่าในวันที่ 6 ของการทดลองค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่า COD มีค่า 76 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 54.21% และค่า COD เริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 8 ของการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายเริ่มชะลอการเจริญเติบโตและพบว่าเริ่มมีสาหร่ายตายลงไปยังและหลังจากนั้นค่า COD จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการตายของสาหร่ายจากการขาดแคลนอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่าในระยะแรกๆ นั้นค่า COD ต่ำกว่าชุดควบคุมแต่เมื่อมีการตายของสาหร่ายเกิดขึ้นทำให้ค่า COD เพิ่มขึ้น โดยในวันที่ 10-12 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ได้มีการเติมสารอาหาร

BOD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นจะทำให้มีอินทรีย์สารเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าน้ำทิ้งเริ่มต้นหลังจากที่ใส่สารอาหารนั้นจะทำให้ค่า BOD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารและชุดควบคุมคือที่ 82 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 236.5 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตามพบว่าค่า BOD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 0-8 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายกำลังเจริญเติบโต และหลังจากนั้นพบว่าค่า BOD จะมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลองคือในวันที่ 16ของการทดลอง โดยพบว่ามียาล

BOD ค่าสุดในวันที่ 12 ของการทดลอง คือ 45 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่า BOD 37.0% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่าค่า BOD เริ่มต้น 82 มิลลิกรัม/ลิตร จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าต่ำสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง โดยมีค่า 32 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่า BOD 61.0% หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการตายของสาหร่ายเนื่องจากการขาดแคลนอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่าในระยะแรกๆ นั้นค่า BOD ในระยะ 0-2 วันแรกของการทดลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่ในวันที่ 2-6 จะมีค่าที่ต่ำกว่าชุดควบคุมและหลังจากวันที่ 8 พบว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารเริ่มที่จะมีการตายของสาหร่ายเกิดขึ้นทำให้ค่า BOD เพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.16

**สารอาหาร** สารอาหารที่เพิ่มลงไปคือ โซเดียมไบคาร์บอเนตและ โซเดียมไนเตรทนั้นเป็นแหล่งของไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะโซเดียมไบคาร์บอเนตนั้นนอกจากจะแหล่งของไนโตรเจนแล้วพบว่าเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งนำไปใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนและโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นยังช่วยในการเพิ่มค่า pH ได้อีกทางหนึ่งด้วย ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.17

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) พบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารลงไป แม้ว่าในวันเริ่มต้นจะมีค่ามากกว่าการทดลองในชุดการทดลองอื่นๆ ก็ตามโดยมีค่าเริ่มต้น 12.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 8.9 และ 8.67 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากสารอาหารที่เพิ่มลงไปคือ โซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมไนเตรทนั้นเป็นแหล่งของไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี โดยแอมโมเนียไนโตรเจนจะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 2 วันแรกของการทดลองในชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร และค่อยๆ ลดลงในระยะ 4 วันแรกของชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดควบคุมนั้นปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างคงที่หลังจากวันที่ 6 ของการทดลอง จากผลการศึกษาพบว่าในทุกชุดการทดลอง ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่ลดลงอย่างรวดเร็ว นั้นเนื่องมาจากในระยะแรกนั้นเป็นช่วงการปรับตัว (lag phase) และเจริญเติบโต (log phase) นั้นสาหร่ายใช้แอมโมเนีย-ไนโตรเจนเป็นแหล่งไนโตรเจนก่อน นอกจากนี้แอมโมเนียส่วนหนึ่งจะระเหยขึ้นสู่บรรยากาศและอีกส่วนหนึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนนั้นจะถูกออกซิไดส์เป็นไนเตรท เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าต่ำสุดในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารคือ 0.71 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่าแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 91.9 ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1.59 และ 0.83 มิลลิกรัม/ลิตร ในวันที่ 14 และ 6 ของการทดลอง คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่าแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 70.1 และ 75.0 ตามลำดับ

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงไนเตรทไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-O}$ ) พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ คือมีค่าเริ่มต้น 106.23 มิลลิกรัม/ลิตร ใน

ขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 22.31 และ 22.58 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารที่เพิ่มลงไปนั้นจะเป็นสารอาหารในโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรทมากกว่าในรูปของแอมโมเนียจึงทำให้ค่าเริ่มต้นมีค่ามากกว่าชุดควบคุมค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของแอมโมเนียที่มีค่าไม่แตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆมากนัก จากการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารนั้น ไนเตรทมีค่าสูงมากและค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากจากแอมโมเนียได้ถูกออกซิไดมาเป็นไนเตรท จนกระทั่งแอมโมเนียในน้ำทิ้งเริ่มหมดลง และสาหร่ายเริ่มที่จะนำค่าของไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไปใช้ โดยค่าของไนเตรทจะลดลงอย่างมากในวันที่ 8 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า 11.36 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดไนเตรทในโตรเจนได้ร้อยละ 49.1 ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารมีค่าลดลงเล็กน้อย และมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลอง มีค่า 10.11 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดไนเตรทในโตรเจนได้ร้อยละ 54.1 ซึ่งค่าไนเตรทนี้ลดลงเนื่องจากสาหร่ายนำไปใช้อย่างช้าๆ และไม่มีพิษต่อเซลล์ของสาหร่าย ถึงแม้ว่าจะมีอยู่เป็นจำนวนมากก็ตาม (จันทพร, 2545) ในขณะที่ชุดควบคุม ปริมาณของไนเตรทในโตรเจนมีค่าสูงขึ้นกว่าเริ่มแรกของการทดลองและค่อยลดลงในระยะสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งปริมาณไนเตรทในโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในตอนแรกเนื่องจากเนื่องจากการออกซิไดของแอมโมเนีย แต่การลดลงในการลดลงของไนเตรทเหล่านี้เกิดขึ้นโดยขบวนการ denitrification ภายใต้ออกซิเจน

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึง soluble reactive phosphorus (SRP) หรือ orthophosphate พบว่าในตอนเริ่มต้นการทดลองนั้นปริมาณของ SRP นั้นจะไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการทดลองในตอนที่ 2 พบว่าสารอาหารจำพวก ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเริ่มต้นนั้นมีเพียงพอต่อความต้องการของสาหร่าย ดังนั้นสารอาหารที่เติมลงไปจึงไม่มีสารประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ โดยชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้น 34.29 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 33.81 และ 33.72 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าในระยะ 0-4 วันแรกของการทดลอง นั้น SRP ไม่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลองคือค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากนั้นพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นปริมาณของ SRP จะลดลงเรื่อยๆตลอดเวลา ในขณะที่ในชุดการทดลองอื่นๆจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารฟอสฟอรัสในรูปของ SRP มีค่าต่ำสุดในวันสุดท้ายของการทดลองคือ 11.28 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลด SRP ได้ร้อยละ 66.8 ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าไม่แตกต่างจากตอนเริ่มต้นมากนัก และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าต่ำสุด 19.45 ในวันที่ 6 ของการทดลองคิดเป็นประสิทธิภาพในการลด SRP ได้ร้อยละ 42.3

ของแข็ง TDS มีค่าสูงมากในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารลงไปโดยมีค่าเริ่มต้น 7925 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1550 และ 1085 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารนั้นจะมีสารอนินทรีย์ละลายอยู่เป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป จะมีค่าลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและการ

เพิ่มจำนวนเซลล์ของสาหร่าย โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่า 7925 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1550 และ 1085 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.18

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่าเริ่มต้น 193.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 72 และ 89 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่า SS ลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า 130.0 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารเกิดการตายของสาหร่ายขึ้น ทำให้ค่าของ SS เพิ่มขึ้นในการทดลองในช่วงสุดท้ายของการทดลอง เนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายลง ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.19

DO เมื่อพิจารณาถึงค่า DO พบว่าระบบมีประสิทธิภาพมาก และมีออกซิเจนที่เพียงพอ เนื่องจากอากาศที่เติมและจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่ปล่อยออกซิเจนอิสระออกมาละลายละลายอยู่ในน้ำ โดยพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 4.47-2.9 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดควบคุมมีค่า DO อยู่ในช่วง 3.4-2.4 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 4.1-1.4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่า DO จะเริ่มลดลงเมื่อสาหร่ายเริ่มตาย ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.20

อุณหภูมิ ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 27.5-28.4 °C ชุดควบคุมอยู่ในช่วง 28.0-29.1 °C และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าในช่วง 27.6-29.1 °C

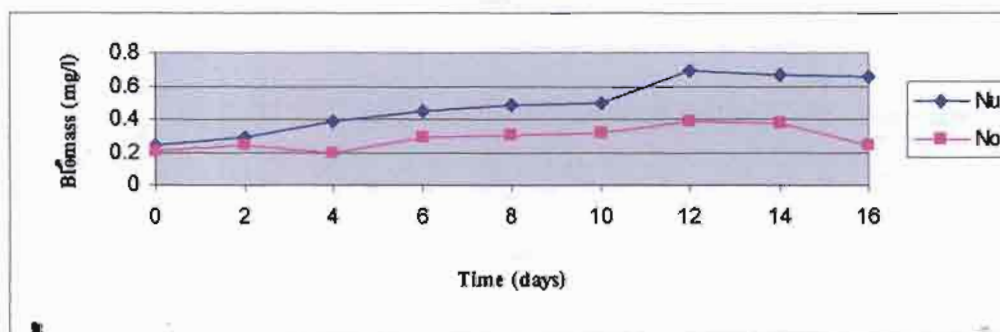
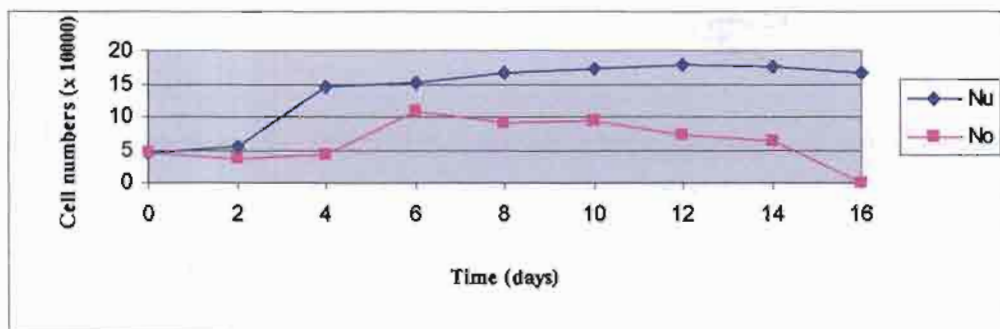
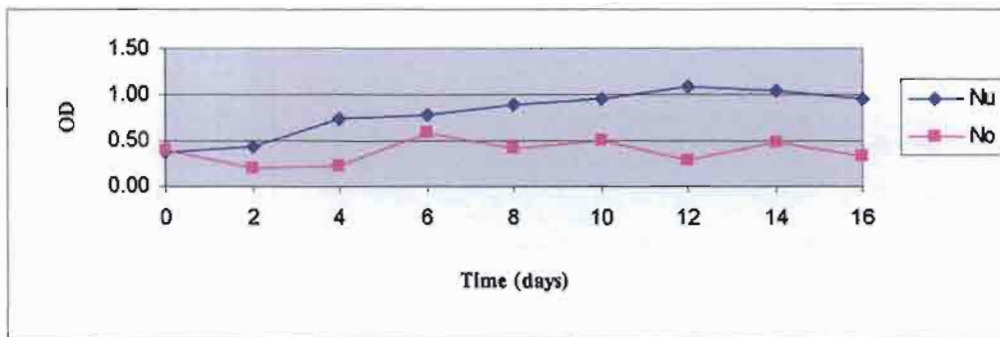
ค่าการนำไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไป โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4118-8365  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1080-1700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  และ 1465-1560  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ

pH ผลจากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยจะอยู่ที่  $10 \pm 0.5$  ซึ่งเป็น pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา ในขณะที่ชุดควบคุมจะมีค่า pH อยู่ที่ 8.3-7.1

alkalinity ผลจากการทดลองพบว่า alkalinity ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไปและ NaOH ที่ใช้ในการปรับค่า pH เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1700-2500 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 600-1100 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมจะมีค่าอยู่ในช่วง 400-700 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายมีการเจริญเติบโตมากกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารและชุดควบคุม โดยพบว่าในวันที่ 12 ของการทดลองนั้นเป็นช่วงที่สาหร่ายมีปริมาณสูงที่สุด และมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำ

ทั้งได้ดีที่สุด ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่า สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลองและมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งได้ดีกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร แต่เมื่อระยะเวลาของการเพาะเลี้ยงเริ่มนานขึ้นพบว่าสาหร่ายจะตายลง



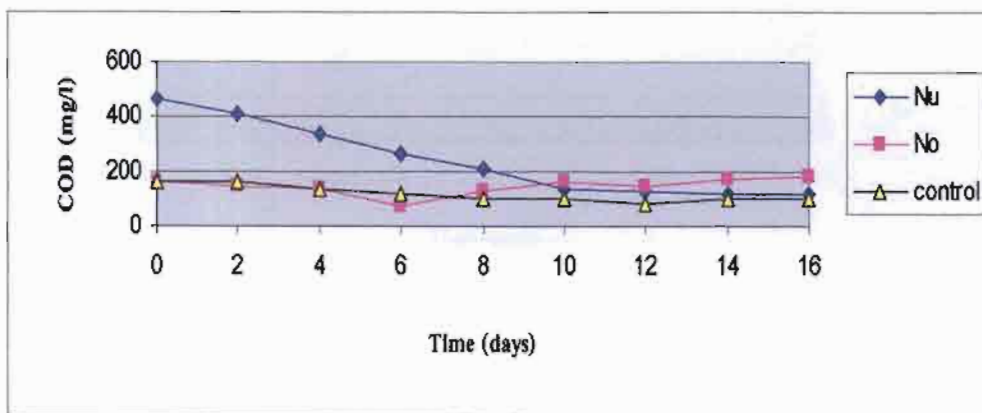
รูปที่ 4.14 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในการเพาะเลี้ยงแบบกะ(bath culture)

ก.แสดงด้วยค่า OD

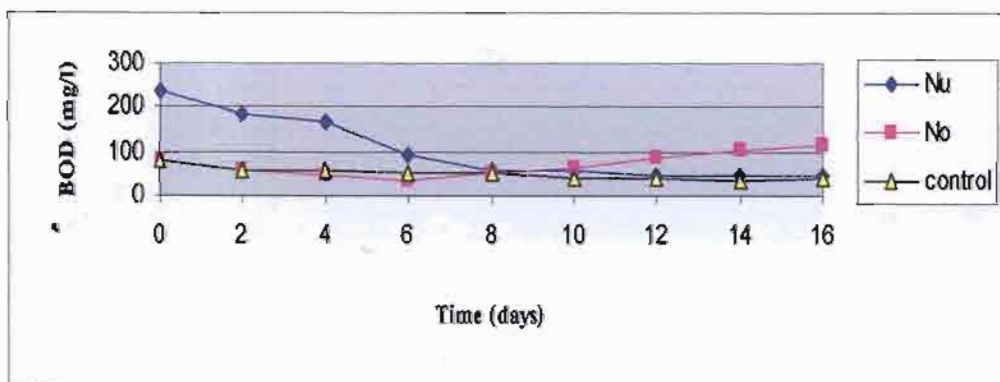
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

ค. แสดงด้วยน้ำหนักแห้ง

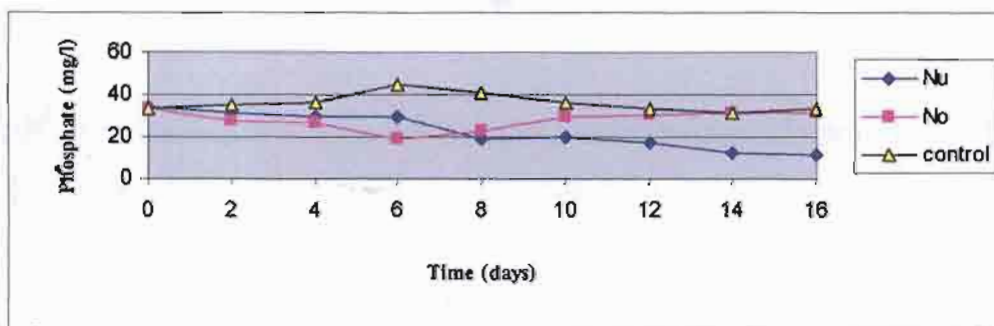
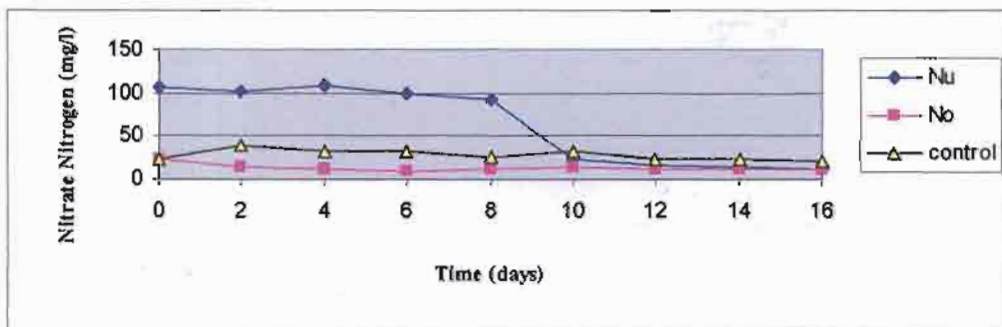
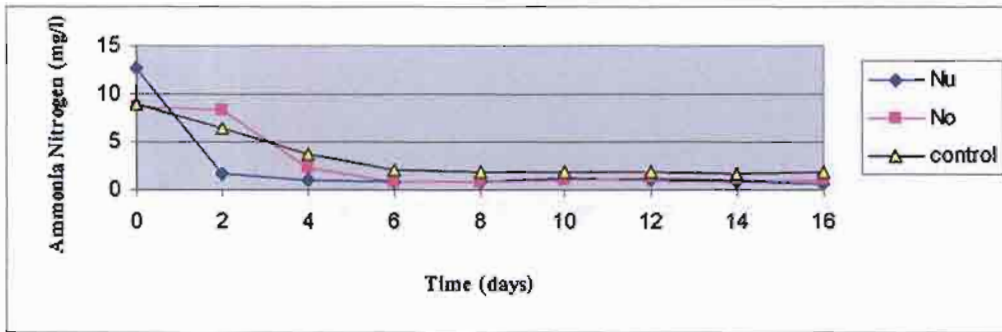




รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

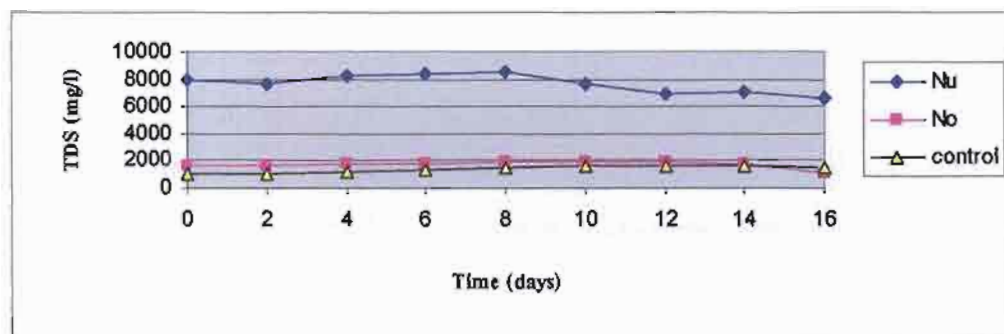


รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

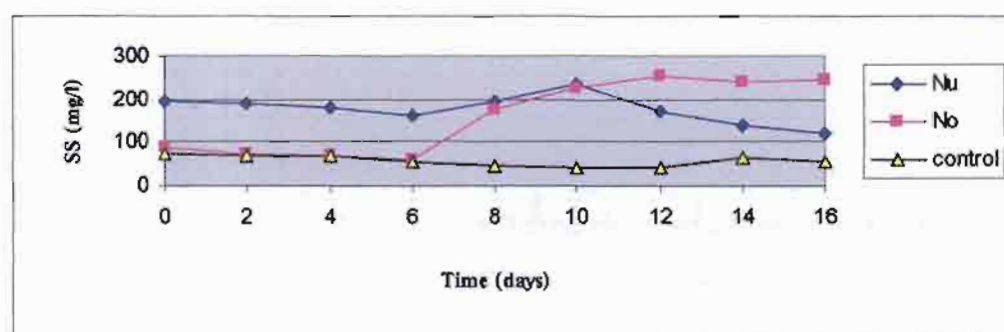


รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

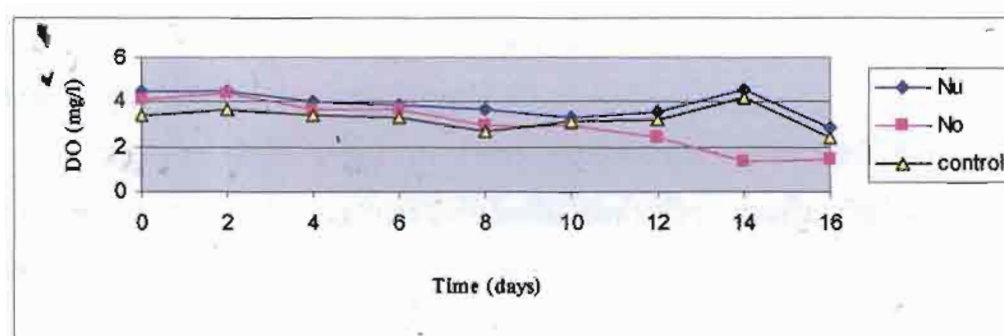
- ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในโตรเจน
- ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ในโตรเจน
- ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

#### 4. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับนำร่อง

##### 4.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous)

จากการทดลองในหัวข้อที่ 3 ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงแบบกะ batch culture พบว่า ระยะเวลาในการเก็บกักที่เหมาะสมของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารคือ 12 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่สาหร่ายสามารถปรับตัวได้ดีและมีจำนวนเซลล์สูงที่สุด ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระยะเวลาในการเก็บกักที่ดีที่สุดคือ 6 วัน หลังจากนั้นได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียน ขนาด 1.4x3.8x0.6 เมตรใช้น้ำตัวอย่าง 2,000 ลิตร แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้สาหร่ายเริ่มต้น 20% โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดการทดลองที่ 1 เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน มีอัตราการไหลเข้าของน้ำ 13.8 ลิตร/วัน และชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 6 วัน มีอัตราการไหลเข้าของน้ำ 55.5 ลิตร/วัน ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ในชุดการทดลองที่ 1 ที่เติมสารอาหารนั้นพบว่า สาหร่ายค่อยๆเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในวันที่ 2-8 ของการทดลอง ซึ่งดูได้จากค่า OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในวันที่ 12 ของการทดลอง ซึ่งมีโดยมีค่า OD ประมาณ 0.85 มีน้ำหนักแห้ง 0.6251 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 150,000 เซลล์ เมื่อมีการเริ่มถ่ายน้ำออกทุกวันและเติมน้ำเสียเข้าพบว่าสาหร่ายมีจำนวนลดลงตลอดเวลาย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ในวันที่ 18 ของการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า OD ประมาณ 0.266 มีน้ำหนักแห้ง 0.3474 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 18,500 เซลล์/ มิลลิลิตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสาหร่ายส่วนใหญ่ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ และสาหร่ายที่เหลืออยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดการทดลอง

ในชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหารนั้นพบว่า สาหร่ายต้องมีการปรับตัวค่อนข้างนานกว่าในชุดการทดลองที่ 1 และการเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้าๆ และเริ่มเจริญได้เร็วในวันที่ 6 ของการทดลอง ซึ่งดูได้จากค่า OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีการเจริญมากที่สุดในช่วงวันที่ 6-8 ของการทดลองโดยมีค่า OD ประมาณ 0.55 มีน้ำหนักแห้ง 0.38 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 109,000 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อมีการถ่ายน้ำเข้าออกทุกวัน พบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่มีแนวโน้มลดลงตลอดเวลาแบบค่อยเป็นค่อยไปอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า OD ประมาณ 0.024 มีน้ำหนักแห้ง 0.0451 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 3,000 เซลล์/ มิลลิลิตร (รูปที่ 4.21)

#### 4.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

COD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นทำให้มีค่า COD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 155 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 440 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ COD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงวันที่ 12 ของการทดลอง และหลังจากมีการเติมน้ำและสารอาหารเข้าไปในระบบพบว่าค่า COD มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและคงที่ในระยะสุดท้าย โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 คือ 80 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 48.38 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ซึ่งพบว่าระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ประมาณร้อยละ 22.6-31.2 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารซึ่งค่อนข้างต่ำ และในระยะสุดท้ายของการทดลองพบว่าระบบค่อนข้างคงที่ โดยพบว่ามี COD อยู่ระหว่าง 148-172 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า COD มีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่า COD จะมีค่าค่อนข้างคงที่เกือบตลอดการทดลอง โดยวันที่ 12 และ 22 ของการทดลอง COD มีค่าต่ำสุดคือ 40 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 74.2 % แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อระยะเวลาที่นานขึ้นค่า COD จะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสาหร่ายได้มีการสูญหายไปจากระบบ และไม่สามารถเจริญเติบโตได้ทัน ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า COD 98 มิลลิกรัม/ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากมีสาหร่ายอยู่เป็นจำนวนน้อย เนื่องจากสาหร่ายส่วนมากได้สูญหายไปจากระบบ (รูปที่ 4.22)

BOD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นทำให้มีค่า BOD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 93 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 230 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ BOD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงวันที่ 12 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโตทั้งการเพิ่มขนาดและจำนวนเซลล์ของสาหร่าย โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 คือ 61 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 30.0 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มและสารอาหาร เพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองพบว่าค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และจะเริ่มคงที่ตลอดการทดลอง จากการทดลองพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ได้ประมาณร้อยละ 22.6-31.2 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารซึ่งค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียและสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปจะไปทำให้ค่า BOD เพิ่มมากขึ้นและสาหร่ายส่วนมากได้สูญหายจากระบบ

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า BOD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวของสาหร่ายที่ยังไม่สามารถปรับตัวได้ โดยพบว่าในวันที่ 6 ของการทดลอง BOD ค่อยๆ ลดลงถึงแม้ว่าจะมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวัน เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกนำมาใช้ในการเจริญของสาหร่ายเป็นส่วนมาก จนกระทั่งในวันที่ 12 ของการทดลอง BOD มีค่าต่ำสุดคือ 36 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 63.2 % ค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าต่ำลงและจะค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า BOD 49 มิลลิกรัม/ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากมีสาหร่ายอยู่เป็นจำนวนน้อย เนื่องจากสาหร่ายส่วนมากได้สูญหายไปจากระบบ (รูปที่ 4.23)

สารอาหาร จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนีย ในโครเจน พบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารเริ่มต้นมีค่า 13.7 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองพบว่า แอมโมเนียในโครเจน เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและปรับตัวลดลงเรื่อยๆจะคงที่ในช่วงวันท้ายๆของการทดลองคือวันที่ 22-30 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.5-2.8 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโครเจนประมาณร้อยละ 70.2-66.7 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร แอมโมเนีย ในโครเจนมีค่าเริ่มต้น 8.4 มิลลิกรัม/ลิตร จากการทดลองพบว่าสาหร่ายจะใช้แอมโมเนียในโครเจนในการช่วยให้เซลล์เจริญเติบโตในช่วงแรกทำให้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองพบว่า แอมโมเนียในโครเจน มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่หลังจากวันที่ 10 ของการทดลองจะเริ่มเพิ่มขึ้นและในระยะสุดท้ายของการทดลองจะค่อนข้างคงที่ โดยพบว่าในช่วงวันที่ 24-30 มีค่าอยู่ในช่วง 1.6-1.9 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโครเจนประมาณร้อยละ 77.4-85.7 (รูปที่ 4.24 ก.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงไนเตรท ในโครเจน พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้นที่สูงมาก คือมีค่าเริ่มต้น 112.6 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 22.5 โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มการทดลอง เมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองพบว่าค่าไนเตรทในโครเจน เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มคงที่ในวันที่ 22 ถึงสิ้นสุดของการทดลอง โดยมีค่าประมาณ 24.8-28.4 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากกว่าค่าเริ่มต้นที่ไม่ได้เติมสารอาหารและชุดควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารที่เพิ่มเข้าไป และจำนวนสาหร่ายที่มีเป็นปริมาณน้อยในระบบเมื่อเริ่มมีการเอาน้ำออกจากระบบทุกวัน ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารไนเตรท ในโครเจนมีค่าเริ่มต้น 22.5 มิลลิกรัม/ลิตรจากการทดลองพบว่าไนเตรทในโครเจนจะค่อยๆลดลงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณน้ำทิ้งหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองพบว่าค่าไนเตรท ในโครเจนจะค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง โดยหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 8.2-15.4 มิลลิกรัม/ลิตร (รูปที่ 4.24 ข.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึง soluble reactive phosphorus (SRP) หรือ orthophosphate พบว่า ในตอนเริ่มต้นการทดลองนั้นปริมาณของ SRP นั้นจะไม่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้น 42.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 50.1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า SRP ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะลดลงอย่างต่อเนื่องทีละน้อย ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณน้ำทิ้งหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองก็ไม่มีผลกระทบต่อ SRP มากนักแต่อย่างไรก็ตามแต่ในช่วงหลังของการทดลองจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่ามีค่าไม่คงที่ โดยเฉพาะหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองที่นำน้ำทิ้งเข้าในระบบทุกวัน พบว่า SRP มี

ค่าผันผวนขึ้นลงเกือบตลอดการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากจำนวนสาหร่ายที่ค่อนข้างมีเป็นจำนวนน้อย และความผันผวนของน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่นำเข้าไปในระบบ (รูปที่ 4.24 ค.)

**ของแข็ง TDS** มีค่าสูงมากในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารลงไปโดยมีค่าเริ่มต้น 5000 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 3140 มิลลิกรัม/ลิตร จากการศึกษาพบว่า ค่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารลง TDS จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากวันที่ 12 ที่มีการนำน้ำทิ้งเข้าไปในระบบทุกวันพบว่า TDS มีความผันผวนค่อนข้างมากเนื่องจากคุณภาพของน้ำทิ้งไม่คงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงสุดท้ายของการทดลองตั้งแต่วันที่ 22-30 พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าประมาณ 1240-1760 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารนั้น TDS มีแนวโน้มที่จะลดลง และในระยะสุดท้ายของการทดลอง ตั้งแต่วันที่ 24-30 พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าประมาณ 620-580 มิลลิกรัม/ลิตร (รูปที่ 4.25)

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่าเริ่มต้น 218 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 250 มิลลิกรัม / ลิตร โดยในแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยในชุดที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าต่ำกว่าชุดที่ใส่สารอาหาร (รูปที่ 4.26)

**DO** เมื่อพิจารณาถึงค่า DO พบว่าทั้งชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารมีค่า DO ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองโดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.6-4.86 ซึ่งเป็นปริมาณ ออกซิเจนที่เพียงพอ (รูปที่ 4.27)

**อุณหภูมิ** ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 25.2-29.4 °C และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าในช่วง 25.2-29.2 °C

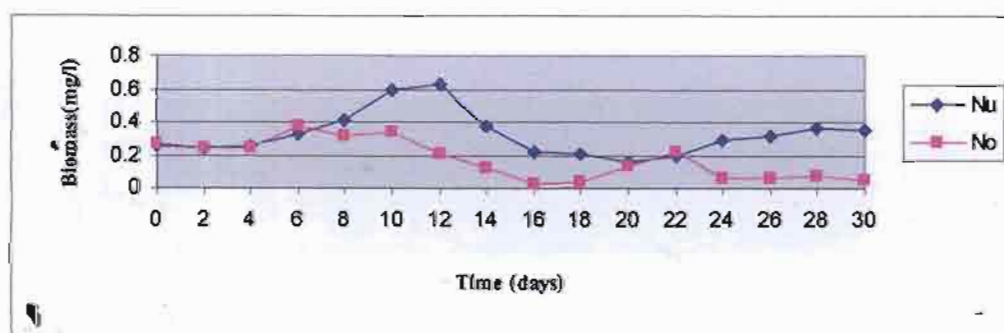
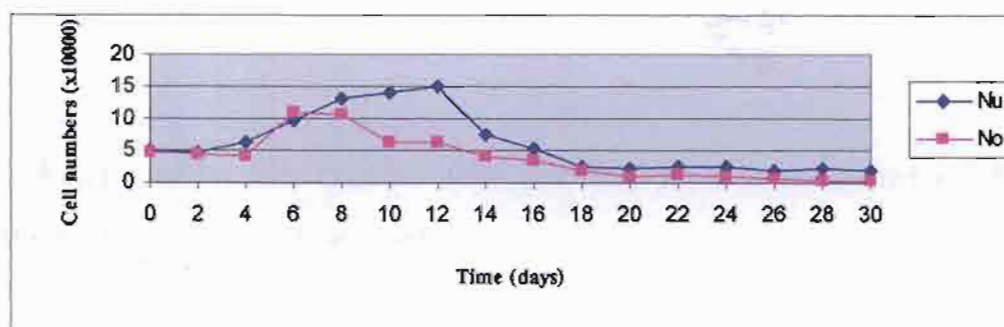
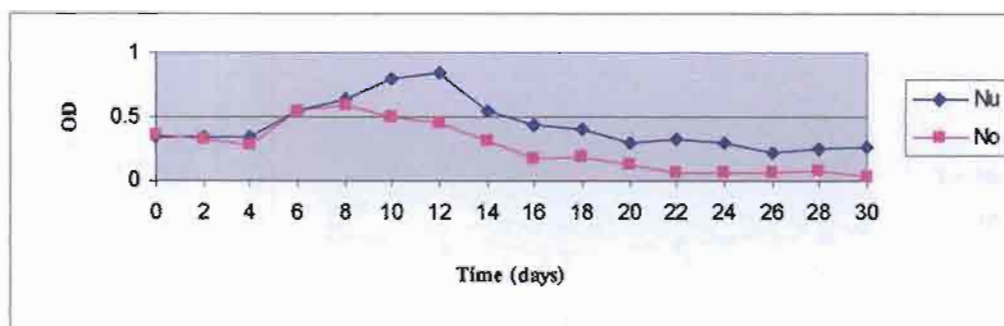
**ค่าการนำไฟฟ้า** ผลจากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไป โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4900-8300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 1200-3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$

**pH** ผลจากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยจะอยู่ที่  $10 \pm 0.5$  ซึ่งเป็น pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

**alkalinity** ผลจากการทดลองพบว่า alkalinity ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไปและ NaOH ที่ใช้ในการปรับค่า pH เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1200-2500 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 700-1000 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง ชุดการทดลองทั้งสองชุดการทดลองคือเติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารนั้น ระบบไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากสาหร่ายส่วนใหญ่

ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบในแต่ละวัน อีกทั้งสาหร่ายที่เหลือยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมี OD 0.266 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตอนเริ่มต้น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารมี OD เพียง 0.024 เท่านั้น อีกทั้ง 2 ชุดการทดลองพบว่าในระยะเวลาที่นานขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งของระบบจะยิ่งลดลง



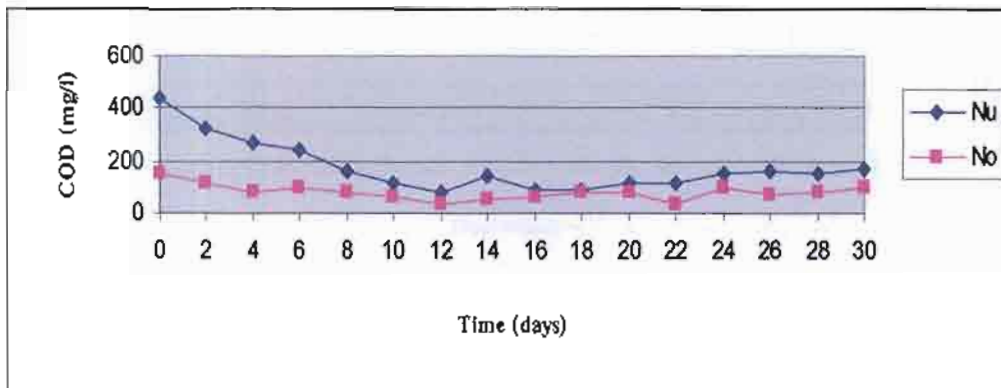
รูปที่ 4.21 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง(semi-continuous culture)

ก.แสดงด้วยค่า OD

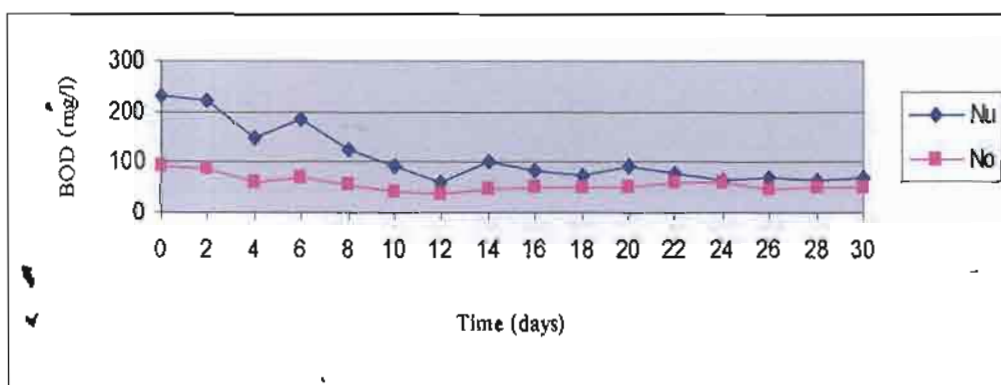
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

ค. แสดงด้วยน้ำหนักแห้ง



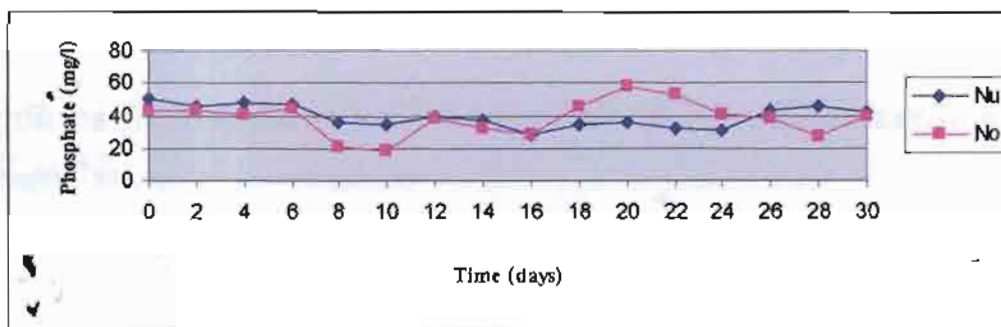
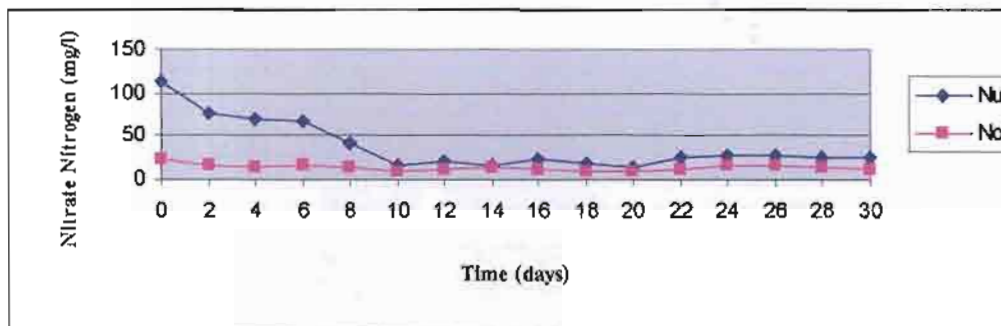
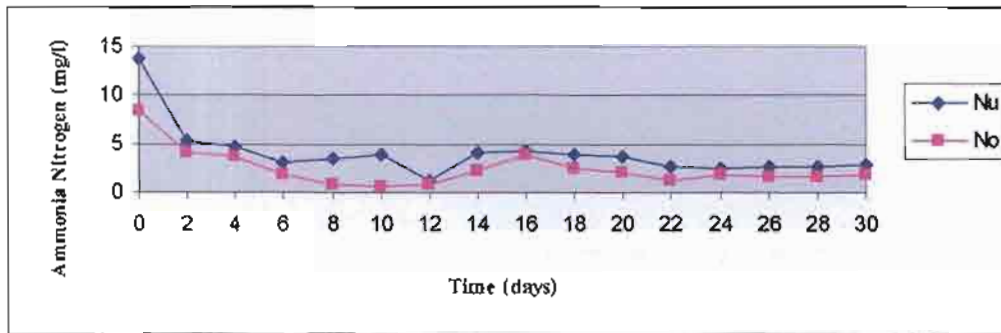


รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



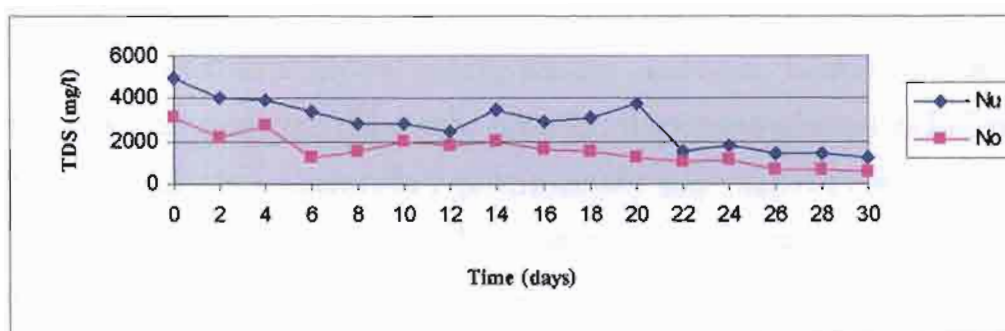
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



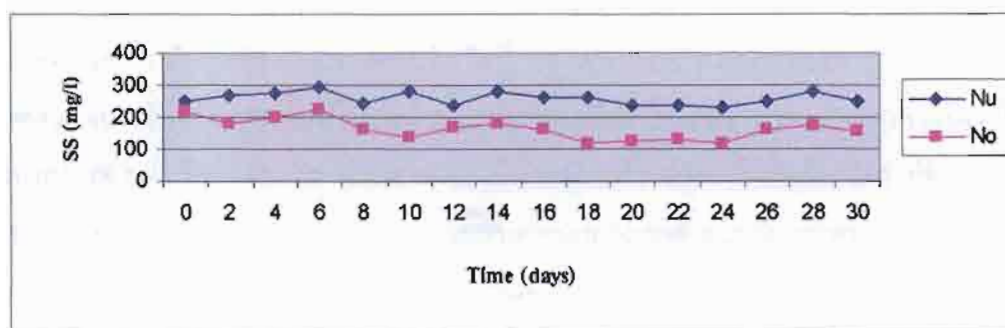


รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)

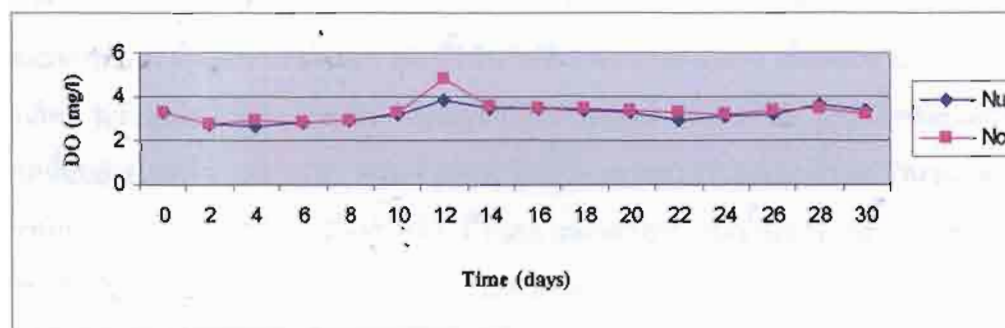
- ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในโตรเจน
- ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ในโตรเจน
- ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus



รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)

#### 4.2 การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาทำการศึกษาต่อแบบ semi-batch โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียน ขนาด 1.4x3.8x0.6 เมตร ใช้น้ำตัวอย่าง 2,000 ลิตร ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้สาหร่ายเริ่มต้น 20% โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดการทดลองที่ 1 เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน และชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 6 วัน ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ในชุดการทดลองที่ 1 เติมสารอาหารลงไปนั้นสาหร่ายจะค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างช้าๆ ในวันที่ 0-2 และจะค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในวันที่ 4-12 และจะเริ่มคงที่ เมื่อเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและใส่น้ำเสียและสารอาหารที่เหมาะสมได้แก่  $\text{NaHCO}_3$  8.0 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  1.5 กรัม/ลิตร ในวันที่ 12 ของการทดลอง พบว่าสาหร่ายมีจำนวนค่อนข้างคงที่ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในวันที่ 18 และเริ่มคงที่ในวันที่ 22 ของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารเริ่มมีจำนวนลดลง และเมื่อทำการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและใส่น้ำเสียและสารอาหารที่เหมาะสมลงไปในวันที่ 24 พบว่าจำนวนเซลล์ของสาหร่ายยังคงลดลง จากการทดลองพบว่าในรอบการเพิ่มปริมาณน้ำทิ้งเพาะเลี้ยงครั้งที่ 2 จะมีจำนวนเซลล์สาหร่ายสูงที่สุดในวันที่ 22 ของการทดลอง โดยมีค่า OD ประมาณ 1.0 มีน้ำหนักแห้ง 0.965 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 325,500 เซลล์/มิลลิลิตร (รูปที่ 4.28) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียนแบบกึ่งกะนั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าในบ่อกลมที่เพาะเลี้ยงแบบกะ โดยดูจากจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ค่า OD และน้ำหนักแห้งที่มีปริมาณมากขึ้นกว่าในการทดลองในบ่อกลมแบบกะ ทั้งนี้เนื่องมาจากการได้รับแสงและการกวนที่ต่อเนื่องและอย่างทั่วถึงกันทั้งบ่อ ทำให้สาหร่ายมีอัตราสังเคราะห์แสงได้มากกว่า และมีความต่อเนื่องที่ยาวนานทำให้สาหร่ายปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้มากกว่าการทดลองแบบกะในการทดลอง pilot scale

ในชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหารพบว่าสาหร่ายมีจำนวนเซลล์ลดลงในตอนแรกและเมื่อปรับตัวได้ก็ค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างช้าๆ ในวันที่ 6 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำเสียลงไปเพิ่ม พบว่าจำนวนเซลล์ของสาหร่ายลดลง และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในวันที่ 8 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำเสียลงไปในวันที่ 12 พบว่าเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยดูจากจำนวนเซลล์ของสาหร่าย และน้ำหนักแห้งที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ค่า OD ค่อนข้างคงที่ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นแต่จำนวนโดยมีเส้นสายที่ไม่ยาวนาน แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนานกว่าที่มีสารอาหาร อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายที่เจริญเติบโตขึ้นนี้จะเป็นเซลล์สาหร่ายที่ไม่บิดเป็นเกลียวคือจะมีสายตรงและมีสีเขียวอมเหลือง เมื่อทำการเติมน้ำเสียเพิ่มในวันที่ 18 ของการทดลองพบว่าสาหร่ายลดปริมาณลงอย่างรวดเร็วจนในวันที่ 28 ไม่พบเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินาเลย แต่เมื่อพิจารณาค่าของ OD และน้ำหนักแห้งกลับพบว่ายังมีค่าที่สูงอยู่ทั้งนี้เนื่องมาจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายลงปะปนและแขวนลอยอยู่เป็นตะกอน ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นตะกอนสีน้ำตาลลอยอยู่เป็นจำนวนมาก

ในน้ำนั้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีสาหร่ายชนิดอื่นๆ ขึ้นปะปนในบ่อเพาะเลี้ยงด้วย ซึ่งมีผลต่อค่า OD และน้ำหนักแห้งเป็นอย่างมาก จากการศึกษพบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียแต่เพียงอย่างเดียววันนั้นมีระยะเวลาในการปรับตัวที่ยาวนานและค่อนข้างจำกัด เนื่องจากขาดแคลนสารอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต โดยเฉพาะการแสดงอาการของโรค chlorosis ซึ่งพืชจะมีอาการซีด เหลือง และตายในที่สุด ซึ่งอาการ chlorosis นี้มักเกิดในพืชหรือสาหร่ายที่ขาดคาร์บอนไดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (De Loura, et.al., 1987 อ้างโดยจันทร์พร, 2545) เป็นที่น่าสังเกตว่า อาการซีดเหลืองเหล่านี้ไม่ได้เกิดกับชุดการทดลองที่ใส่สารอาหาร ถึงแม้ว่าในการทดลองจะไม่ได้ใส่สารอาหารจำพวกไนโตรเจนเข้าไปก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาหร่ายสไปรูลินาในชุดที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายได้รับสารอาหารจำเป็นอื่นๆ จึงไม่ได้แสดงอาการของการซีดเหลืองออกมา ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีความอ่อนแอมาก จึงเปิดโอกาสให้สาหร่ายชนิดอื่นๆ เจริญเติบโตขึ้นปะปนได้ง่าย ซึ่งจะได้นำกล่าวต่อไปในเรื่องของการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในการเพาะเลี้ยง

#### 4.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

COD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นทำให้มีค่า COD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 160 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 440 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ COD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องโดยเฉพาะในวันที่ 2-12 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโตทั้งการเพิ่มขนาด โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 โดยพบว่าค่า COD มีค่า 103.5 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 35.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียและสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปจะไปทำให้ค่า COD เพิ่มมากขึ้นและเมื่อสาหร่ายซึ่งกำลังขาดแคลนอาหารได้รับสารอาหารเข้าไปจึงใช้สารอาหารในการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆ คงที่เมื่อสารอินทรีย์ถูกใช้หมดลงโดยมีค่าคงที่ในวันที่ 20 และมีค่าต่ำสุดในวันที่ 24 คือ 102 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 36.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า COD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวของสาหร่ายที่ยังไม่สามารถปรับตัวได้ โดยพบว่าในวันที่ 6 COD มีค่า 98 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 38.8 % และเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อมีการเติมน้ำเสียและสารอาหารเพิ่มในวันที่ 12 ซึ่งสาหร่ายจะเจริญอย่างรวดเร็วพบว่าในวันที่ 16 COD มีค่า 66 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 58.8 % และในวันที่ 18 เมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องแต่ไม่มากนัก แม้ว่าสาหร่ายสไปรูลินาจะเริ่มตายทั้งนี้เนื่องจาก

พบว่ามิสสาร่ายชนิดอื่นขึ้นมาทดแทนและในวันที่ 28 ของการทดลองไม่พบสาหร่ายสไปรูลินาเลย (รูปที่ 4.29)

**BOD** ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปนั้นทำให้มีค่า BOD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 92 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 229 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ BOD ลดลงอย่างรวดเร็วจากวันเริ่มต้นการทดลองจนถึงวันที่ 10 ของการทดลองและจะเริ่มคงที่ โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 ของการทดลองโดยมีค่า 42 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 54.3% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร และเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่อนข้างคงที่ในวันที่ 20 ของการทดลอง BOD มีค่าต่ำสุดในวันที่ 22 โดยพบว่าค่า 48 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 47.8 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า BOD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวของสาหร่ายที่ยังไม่สามารถปรับตัวได้ และเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารในวันที่ 6, 12 และ 18 พบในวันต่อมาค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 16 ของการทดลองโดยมีค่า BOD 31.1 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 66.2 % แต่อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเนื่องจากสาหร่ายเริ่มตาย (รูปที่ 4.30)

สารอาหาร จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนีย ในโตรเจน พบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารเริ่มต้นมีค่า 13.2 มิลลิกรัม/ลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 0-6 และหลังจากนั้นจะคงที่ และเมื่อเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและเติมน้ำเสียและสารอาหารเพิ่มในวันที่ 12 พบว่ามีค่าแอมโมเนียในโตรเจน เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และระบบจะเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็วกว่าตอนเริ่มแรกเนื่องจากระบบค่อนข้างที่จะสมดุลโดยมีค่าต่ำคือ 0.7 คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนร้อยละ 92.3 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าสาหร่ายจะใช้แอมโมเนียในโตรเจนในการช่วยให้เซลล์เจริญเติบโตในช่วงแรกก็จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าเริ่มต้น 9.12 มิลลิกรัม/ลิตร แต่เมื่อมีการเติมน้ำเสียเพิ่มในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่าทำให้ค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนและระบบต้องใช้เวลาเพื่อจะให้เข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้ง เนื่องจากในช่วงนี้พบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงยังเติบโตได้น้อย เนื่องจากต้องการระยะเวลาในการปรับตัวที่ยาวนานกว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากเติมน้ำเสียในวันที่ 12 และ 18 ของการทดลองพบว่าค่า แอมโมเนียในโตรเจนลดลงอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าต่ำสุด 0.75 คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนร้อยละ 91.9 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากวันที่ 22 ของการทดลองนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการตายของสาหร่าย (รูปที่ 4.32 ก.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงไนเตรท ไนโตรเจน พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้นที่สูงมาก คือมีค่าเริ่มต้น 118.85 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 22.6 โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มการทดลองและลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 4-10 ของการทดลอง และจะเริ่มคงที่ในวันที่ 10 ของการทดลอง ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดคือ 12.55 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการลดค่าไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 44.15 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร แต่เมื่อเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและเติมน้ำทิ้งและสารอาหารเข้าไปใหม่ทำให้ ไนเตรท ไนโตรเจน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่ก็จะกลับเข้าสู่สมดุลได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าลดลงเล็กน้อยและไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักตลอดการทดลอง เนื่องจากการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่มีไม่มากนักแต่ละจะลดลงอย่างมากในช่วงที่สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วคือหลังจากได้รับน้ำเสียครั้งที่ 2 คือในวันที่ 12 และ 18 เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 20 ของการทดลองหลังจากมีการเติมน้ำเสียครั้งที่ 3 คือมีค่า ไนเตรทไนโตรเจน 5.75 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่าไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 74.8 อย่างไรก็ตามพบว่าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลองเนื่องจากการตายของสาหร่าย (รูปที่ 4.31 ข.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึง soluble reactive phosphorus (SRP) หรือ orthophosphate พบว่า ในตอนเริ่มต้นการทดลองนั้นปริมาณของ SRP นั้นจะไม่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้น 43.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 43.5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า SRP ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะลดลงและจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ในวันที่ 12 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำเสียและสารอาหารลงไปในวันที่ 12 และ 24 ของการทดลองพบว่าจะมีค่า SRP เพิ่มขึ้นและจะลดลงโดยใช้เวลาน้อยกว่าในระยะเริ่มแรก โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 20 ของการทดลองโดยมีค่า 13 มิลลิกรัม/ลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการลด SRP ร้อยละ 70.1 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร SRP ลดลงอย่างสม่ำเสมอในช่วงแรกของการทดลองแต่ละจะลดลงมากในช่วงที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตได้ดีคือหลังจากได้รับน้ำเสียครั้งที่ 2 คือในวันที่ 12 ของการทดลอง และจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อได้รับน้ำเสียเพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 20 ของการทดลองโดยมีค่า 15.48 มิลลิกรัม/ลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการลด SRP ร้อยละ 64.48 (รูปที่ 4.31 ค.)

**ของแข็ง TDS** มีค่าสูงมากในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารลงไปโดยมีค่าเริ่มต้น 6800 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1210 มิลลิกรัม/ลิตร จากการศึกษาพบว่าค่า TDS จะมีค่าลดลงเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณน้ำเสียและสารอาหารในวันที่ 12 ของการทดลองก็ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ในระยะสุดท้ายของการทดลอง ชุดที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่า TDS สูงขึ้นเนื่องจากการตายของสาหร่าย (รูปที่ 4.32)

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่าเริ่มต้น 193 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 120 และ 170 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยในแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบ โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีการขึ้นลงของ SS ตลอดเวลาเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบ (รูปที่ 4.33)

DO เมื่อพิจารณาถึงค่า DO พบว่าระบบมีประสิทธิภาพมาก และมีออกซิเจนที่เพียงพอ เนื่องจากอากาศที่เติมและจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่ปล่อยออกซิเจนอิสระออกมาละลายละลายอยู่ในน้ำ โดยพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 3.9-6.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 3.1-6.4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่า DO จะเริ่มลดลงเมื่อสาหร่ายเริ่มตาย (รูปที่ 4.34)

อุณหภูมิ ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 25.3-29.0 °C และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าในช่วง 25.2-28.9 °C

ค่าการนำไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารค่อนข้างมาก เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไป โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,000-6,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 1,000-2,100  $\mu\text{S}/\text{cm}$

pH ผลจากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยจะอยู่ที่  $10 \pm 0.5$  ซึ่งเป็น pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

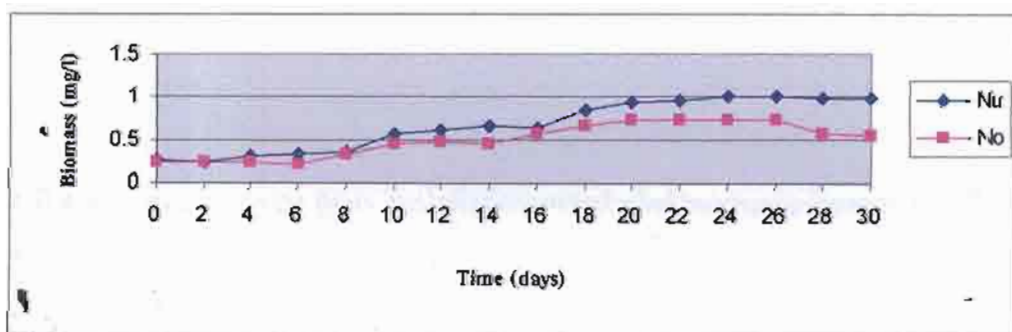
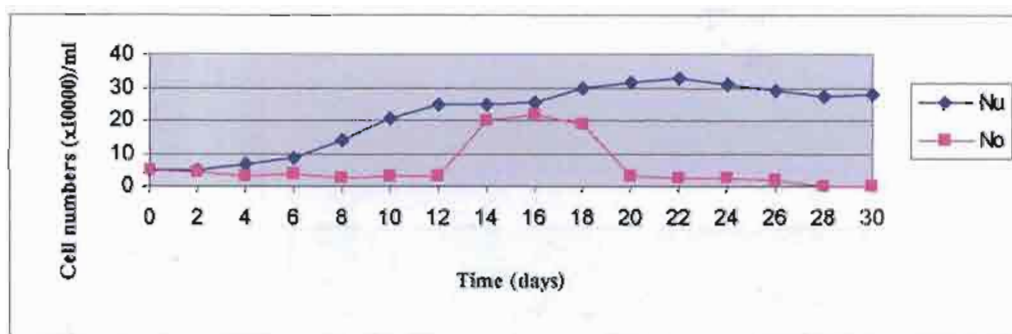
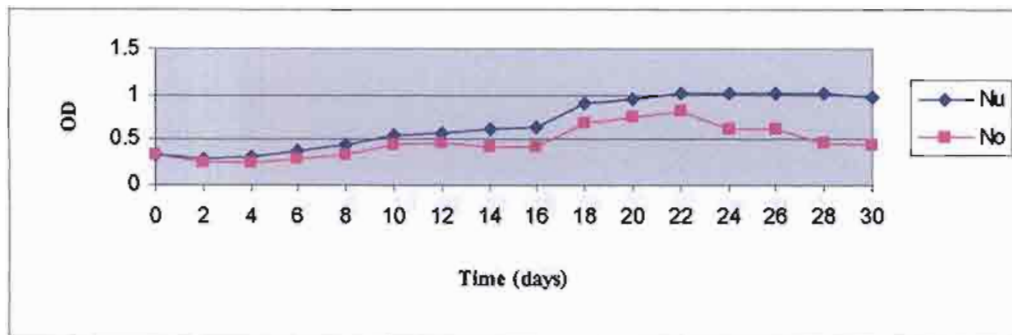
alkalinity ผลจากการทดลองพบว่า alkalinity ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไปและ NaOH ที่ใช้ในการปรับค่า pH เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,200-2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 500-900 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งดูได้จากค่า OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้ง พบว่าหลังจากระบบเริ่มปรับตัวแล้วระบบจะค่อนข้างคงที่ และเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบ ระบบสามารถที่จะปรับตัวได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล ในขณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งมีขึ้นลงบ้างเล็กน้อยเมื่อมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ได้เติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระบบมีการปรับตัวค่อนข้างช้า และเมื่อมีการเติมน้ำเสียเข้าไปในครั้งที่ 3 ของการทดลอง สาหร่ายตายลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสาหร่ายที่ได้มีความอ่อนแอ โดยมีสีเหลืองซีด และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าไม่มีสาหร่ายสไปรูลินาเหลืออยู่เลย แต่พบสาหร่ายชนิดอื่นขึ้นปะปน.

จากการทดลองในทุกระบบพบว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้น้อยกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร เนื่องจากน้ำเสียเมื่อได้รับสารอาหารที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในส่วนที่เป็นธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าสาหร่ายจะนำสารอาหารเหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งจะทำให้สารอาหารเหล่านี้ลดลงไปบ้างก็ตาม แต่ก็ยังคงหลงเหลืออยู่ในระบบ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ไม่ด้นัก เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร อย่างไรก็ตามพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยสาหร่ายสไปรูลินานั้นมีคุณภาพน้ำทิ้งไม่เกินค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (กลุ่มงานควบคุมมลภาวะฟาร์มปศุสัตว์, 2545) ไม่ว่าจะเพาะเลี้ยงด้วยระบบแบบใดก็ตาม

จากการทดลองในทุกระบบพบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงโดยส่วนมากจะเป็นเส้นตรง ไม่ค่อยเป็นเกลียว และในบางครั้งก็แตกหักเป็นท่อนสั้นๆ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารนั้นพบว่าสาหร่ายค่อนข้างมีความอ่อนแอกว่าชุดที่เติมสารอาหาร โดยพบว่า มีระยะในการปรับตัวค่อนข้างนานกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร พบการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ และมีสีค่อนข้างเหลืองเนื่องจากขาดสารอาหาร

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อนำมาเป็นอาหารเสริมในสัตว์ เนื่องจากมีการคัดสรรอาหารที่มีความจำเป็นน้อยและไม่มีความสำคัญออก แล้วเสริมด้วยสารอาหารที่มาจากธรรมชาติลงไปแทน ซึ่งพบว่าในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเหล่านี้มีสารอาหารที่มีคุณค่าต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายอยู่มาก ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารสังเคราะห์ที่มีราคาแพงได้ และยังถือได้ว่าเป็นการช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งอีกครั้งก่อนปล่อยออกสู่ลำน้ำตามธรรมชาติ แม้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดอาจจะไม่มากนักก็ตามที่



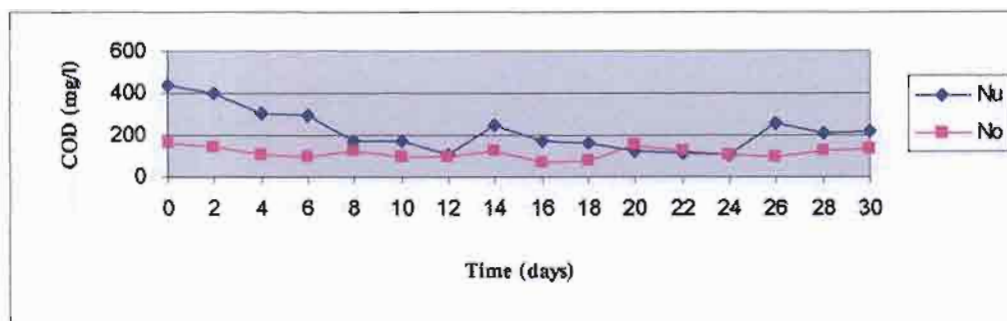
รูปที่ 4.28 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

ก. แสดงด้วยค่า OD

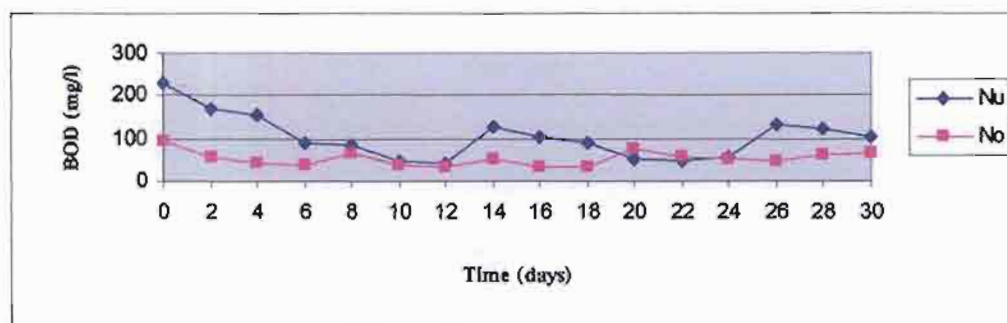
ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

ค. แสดงด้วยน้ำหนักแห้ง



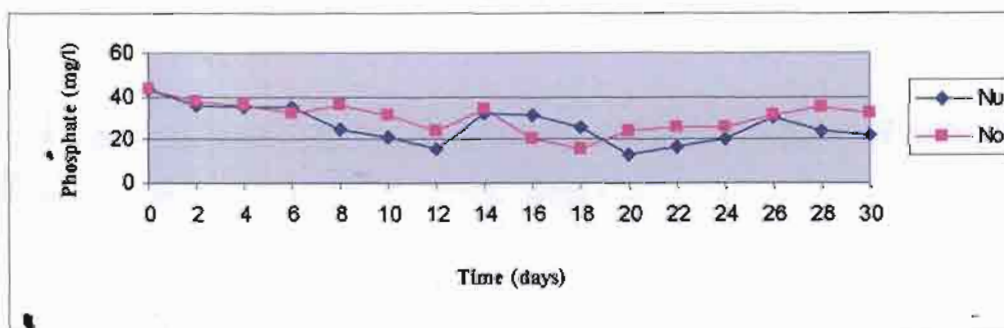
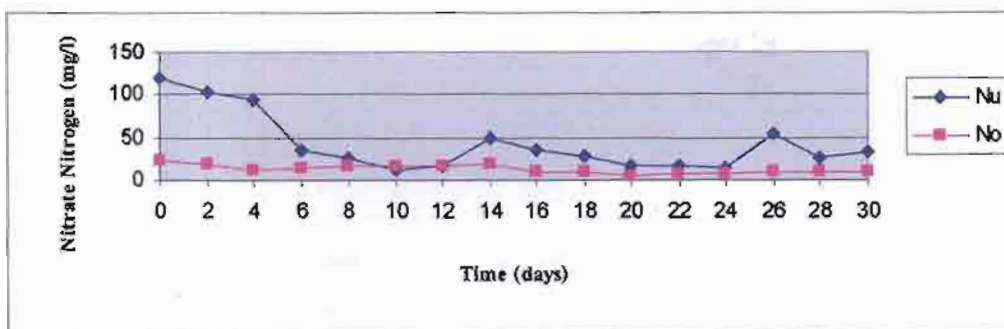
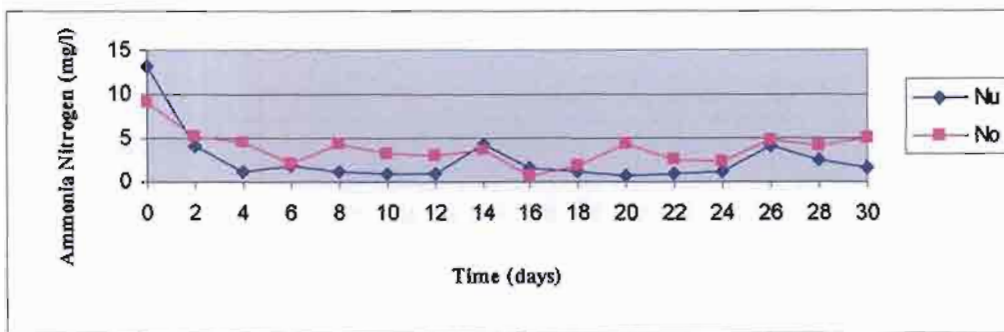


รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)



รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

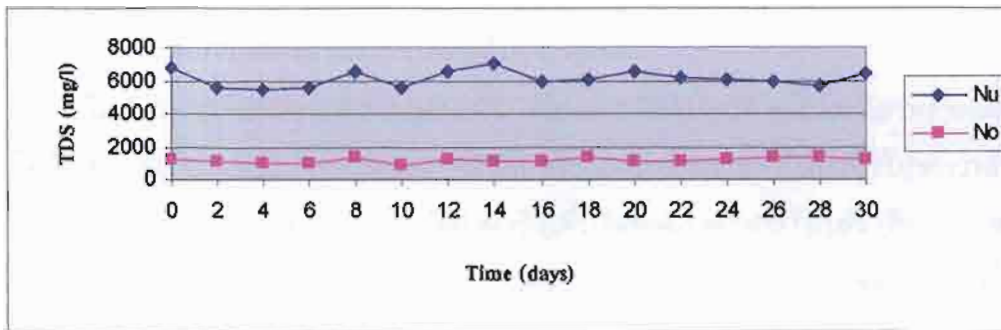




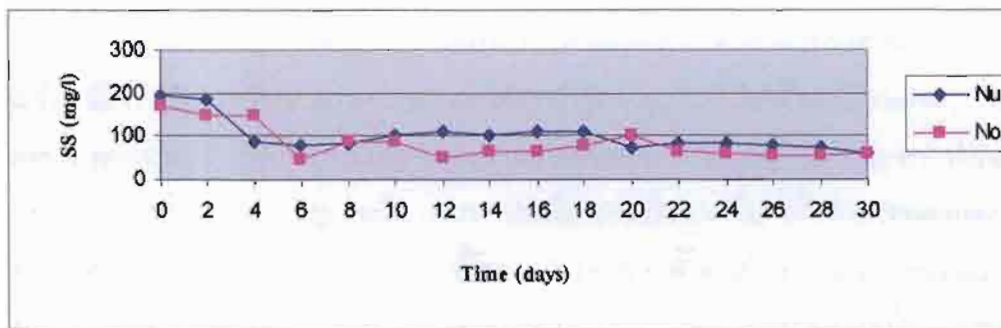
รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

- ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนโตรเจน
- ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ไนโตรเจน
- ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus

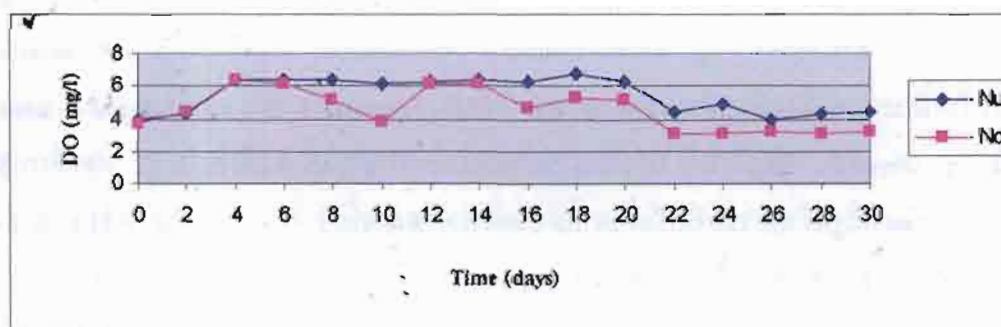




รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)



รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)



รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

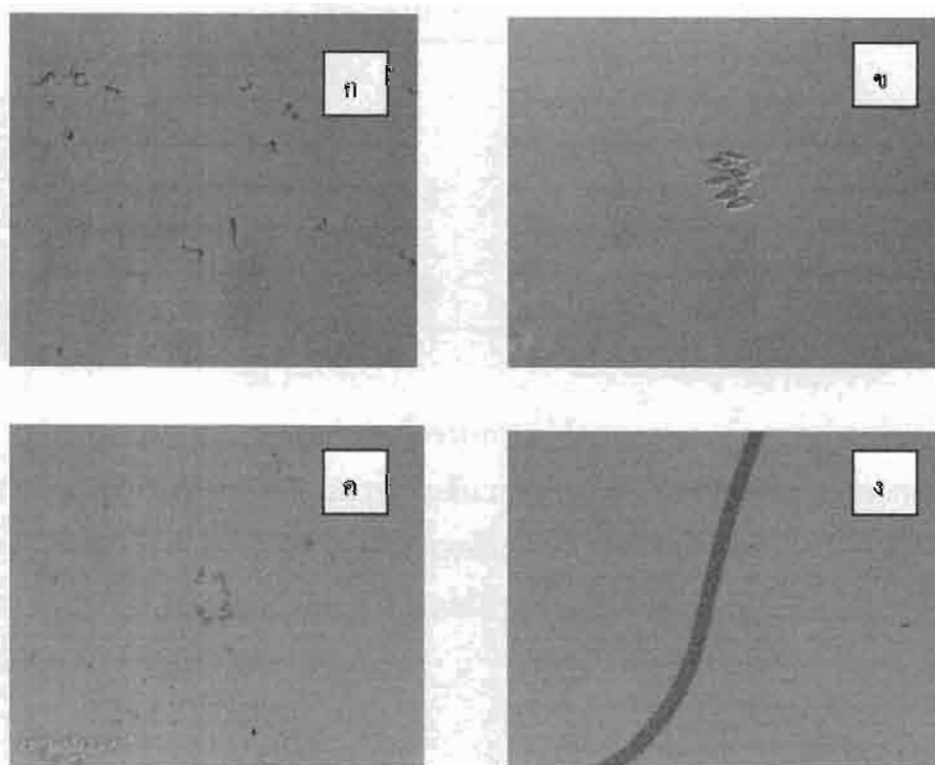
### 5. การปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นในการทดลอง

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินานั้น เนื่องจากน้ำทิ้งโดยทั่วไปจะมีสาหร่ายและ จุลินทรีย์ ชนิดอื่นๆ ปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจุลินทรีย์และสาหร่ายเหล่านี้โดยทั่วไปพบว่าถ้าสามารถเจริญเติบโตได้ดี จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาที่จะทำการเพาะเลี้ยงรวม ทั้งมีผลกระทบต่อการทดลอง ดังนั้นในตอนเริ่มต้นการทดลองจึงได้ทำการกำจัดจุลินทรีย์อื่นๆ ก่อน โดย ในตอนที่ 1 ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำทิ้งต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้น ได้ทำการฆ่าเชื้อโดยการต้มน้ำให้เดือดประมาณ 10 นาทีแล้วทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำมาทำการทดลอง และเมื่อทำการทดลองในระดับ pilot scale และระบบนําร่อง ซึ่งต้องใช้น้ำตัวอย่างจำนวนมาก จึงทำการฆ่าเชื้อโดยใช้ sodium metabisulfite ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) 0.2 กรัม/ลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ก๊าซซัลเฟอร์ระเหยแล้ว นำมากรองด้วยก๊อลิ่งจุลทรรศน์เพื่อให้แน่ใจว่าไม่พบสาหร่ายชนิดอื่นๆ แล้วจึงนำน้ำตัวอย่างมาใช้ในการทดลอง

จากการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มทำการทดลอง ไม่พบการปนเปื้อนของสาหร่ายในทุกความเข้มข้น เนื่องจากจุลินทรีย์และสาหร่ายต่างๆ ได้ถูกกำจัดด้วยการต้มให้เดือดแล้ว แต่พบว่าในระยะ 6-7 วันของการทดลองพบว่าเริ่มมีการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ เกิดขึ้น แต่ไม่มากนักในทุกความเข้มข้นของน้ำทิ้ง แต่เมื่อเวลาผ่านไป ชนิดและการปนเปื้อนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการทดลองแบบ pilot scale คือการทดลองแบบกะ (batch culture) และแบบนําร่องคือ กึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) และ กึ่งกะ (semi-batch culture) ก็จะพบปัญหาของการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ เช่นเดียวกัน โดยสาหร่ายที่พบเป็นจำนวนมากได้แก่ *Monoraphidium* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp., และ *Oscillatoria* sp. ดังรูป 4.35 และพบว่ายังมีอีกหลายชนิดที่ขึ้นปะปน เช่น *Micractinium* sp., *Nitzschia* sp., *Ankistrodesmus* sp. และ *Kirchneriella* sp. ซึ่งในการทดลองของอัญชลี (2546) พบว่ามีการปนเปื้อนขึ้นในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำเสียจากบ่อปรับเสถียรภาพจากระบบก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร ในตัวอย่างน้ำที่ไม่มีการเติมสารอาหารเช่นกัน โดยสาหร่ายที่ปนเปื้อนได้แก่ *Chlorella* sp., *Scenedesmus* spp., *Ankistrodesmus* sp., *Chlamydomonas* sp., *Fragilaria* sp., *Navicula* sp. และ *Autacoseira* sp. นอกจากนี้ Gantar et al., (1991) พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ถูกเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเจือจาง 50 เปอร์เซ็นต์นั้นจะถูกจำกัดโดยสาหร่ายคั้งเดิม ที่สำคัญคือ *Chlorella* sp. เมื่อเลี้ยงได้เพียง 11 วัน ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการใส่สารอาหารที่เหมาะสมเพื่อให้สาหร่ายสไปรูลินาเติบโตได้

จากการศึกษาพบว่าการปนเปื้อนของสาหร่ายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาของการเพาะเลี้ยงนานขึ้น ซึ่งการปนเปื้อนเหล่านี้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อ OD น้ำหนักแห้งของสาหร่าย รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายที่พบส่วนมากนั้นเป็นตัวช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งและพบได้ทั่วไปในระบบบำบัดน้ำเสียอยู่แล้ว (สมทิพย์, 2541) ได้ทำการรวบรวมสาหร่ายชนิดต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสียหลายชนิดด้วยกัน (Gantar et al., 1991) และไม่เป็นอันตรายต่อการนำมาเป็นอาหารสัตว์อีกด้วย จากการทดลองพบว่าการปนเปื้อนนี้นั้นจะพบมาก โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่ได้ใส่สารอาหาร ทั้งนี้เนื่องจาก

สาหร่ายสไปรูลินาที่ไม่ได้รับสารอาหารจะมีความอ่อนแอ ทำให้สาหร่ายชนิดอื่นๆเจริญเติบโตขึ้นมาแทนที่ได้โดยง่าย ซึ่งสาหร่ายที่ปนเปื้อนเหล่านี้มักจะเป็นสาหร่ายคั้งเค็มที่มีอยู่ในน้ำทิ้งในบริเวณนั้นอยู่แล้ว ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาที่เพาะเลี้ยงอ่อนแอลง หรือสารอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการ สาหร่ายคั้งเค็มเหล่านี้ก็จะเจริญเติบโตขึ้นมาได้ (Gantar et al., 1991) เนื่องจากในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติพบว่าสาหร่ายสไปรูลินา มักจะอยู่ปะปนกับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินอื่นๆ อยู่เสมอ (ยวดี, 2542) จากการทดลองพบว่ามีการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ อยู่เสมอ โดยเฉพาะเมื่อเวลาผ่านไปในวันท้ายๆ ของการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในบางครั้งในชุดควบคุม ที่มีเพียงน้ำทิ้งเพียงอย่างเดียวเมื่อเวลาผ่านไปก็จะพบว่ามีสาหร่ายชนิดต่างๆ เจริญเติบโตขึ้น จนในบางครั้งสาหร่ายที่ปนเปื้อนเหล่านี้จะมีผลต่อการทดลองด้วยเช่นกัน ดังนั้นการตรวจสอบการปนเปื้อนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากในการเพาะเลี้ยง ถ้าต้องการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป.



รูปที่ 4.35 สาหร่ายที่ปนเปื้อนที่พบเป็นจำนวนมากจากการทดลอง

ก. *Monoraphidium* sp.

ข. *Scenedesmus* sp.

ค. *Chlorella* sp.

ง. *Oscillatoria* sp.

## 6. องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบกะ (batch culture) แล้ว เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้นำสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงได้ไปทำการอบแห้งและนำสาหร่ายแห้งที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ ณ ภาควิชาเทคโนโลยีทางสัตว์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จากการตรวจวัดพบว่ามีคุณค่าทางโภชนาการได้ผลการตรวจวัดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของสาหร่ายสไปรูลินาที่ได้จากการเพาะเลี้ยงแบบ batch culture คัดย่น้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ความเข้มข้น 20%

| องค์ประกอบ | ร้อยละของน้ำหนักแห้ง |                |
|------------|----------------------|----------------|
|            | ใส่สารอาหาร          | ไม่ใส่สารอาหาร |
| สิ่งแห้ง   | 90.36                | 92.06          |
| โปรตีน     | 55.88                | 50.25          |
| เส้นใย     | 0.85                 | 0.73           |
| เถ้า       | 14.17                | 19.70          |
| ไขมัน      | 6.75                 | 2.17           |

ปริมาณสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 10% พบว่ามีปริมาณคุณค่าทางโภชนาการที่สูง โดยเฉพาะ โปรตีนที่มีถึง 55.88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเติมสารอาหารที่จำเป็นและมีค่า 50.25เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ใส่สารอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอาหารและการเพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำทิ้งอื่น หรือสูตรอาหารมาตรฐาน เช่น Zarrouk (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลีนา จากการเพาะเลี้ยงในอาหารที่ต่างชนิดกัน

| องค์ประกอบ<br>อาหาร                                              | ความชื้น      | เถ้า          | เยื่อใย       | โปรตีน         | ไขมัน         | คาร์โบไฮเดรต   | อ้างอิง                   |
|------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------------------|
| Zarrouk                                                          | 4.95          | 6.44          | 1.92          | 63.35          | 0.12          | 22.97          | บริษัท กรีนไคมอนด์ ,2541  |
| น้ำกากส่าหลัก<br>ความเข้มข้น 5%                                  | 5.76          | 6.05          | 7.38          | 68.63          | 6.57          | 12.99          | Peerapompisal et al.,1999 |
| น้ำทิ้งโรงงาน<br>แปรงมัน<br>สำหรับหลัง                           | 8.17          | 8.93          |               | 52.5           |               |                | นฤมล และคณะ , 2532        |
| น้ำทิ้งจากบ่อ<br>หมักก๊าซชีวภาพ<br>มูลสุกร<br>ความเข้มข้น<br>50% | 6.01          | 32            | 0.05          | 48.9           | 1.38          | 11.47          | จงกล,2543                 |
| น้ำทิ้งจากบ่อ<br>บำบัดหอพัก<br>ความเข้มข้น 100<br>%              | 8.52±<br>1.37 | 9.13±<br>0.65 | 0.22±<br>0.06 | 45.11±<br>2.33 | 3.72±<br>0.48 | 33.29±<br>2.41 | จงกล,2545                 |

### สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรคือ ในสภาพกลางแจ้ง ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 เปอร์เซ็นต์ สารอาหารที่เหมาะสมคือ  $\text{NaHCO}_3$  8 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  ที่ปริมาณ 1.5 กรัม/ลิตร

การเพาะเลี้ยงแบบกะ (batch) พบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายมีการเจริญเติบโตมากกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารและชุดควบคุม โดยมีระยะเก็บกักที่เหมาะสม 12 วัน ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่า มีระยะเวลาในการเก็บกัก 6 วัน โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งได้ดีกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร

การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) พบว่าระบบไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากสาหร่ายส่วนใหญ่ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบในแต่ละวัน อีกทั้งสาหร่ายที่เหลืออยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าสาหร่ายเหลืออยู่น้อยกว่าตอนเริ่มต้น

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch) พบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้น สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี ระบบค่อนข้างมีความคงที่ ปรับตัวได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดีกว่าเนื่องจากไม่มีสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปในระบบ

เมื่อนำสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงได้มาหาปริมาณสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีปริมาณคุณค่าทางโภชนาการที่สูงโดยเฉพาะโปรตีนที่มีถึง 55.88 เปอร์เซ็นต์เมื่อมีการเติมสารอาหารที่จำเป็น และมีค่า 50.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่เติมสารอาหาร

จากการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรโดยใช้สาหร่ายสไปรูลินา พบว่า ระบบการเพาะเลี้ยงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือแบบกึ่งกะ (semi-batch) น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน และควรมีการเติมสารอาหารคือ  $\text{NaHCO}_3$  ที่ปริมาณ 8 กรัม/ลิตร และ  $\text{NaNO}_3$  ที่ปริมาณ 1.5 กรัม/ลิตร เพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบของการบำบัดน้ำเสียอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีผลพลอยได้คือสาหร่ายสไปรูลินาซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับสุกรภายในฟาร์ม

### บรรณานุกรม

- กาญจนาภรณ์ ถ้วนโนมนต์. 2527. สาหร่าย. กรุงเทพฯ: คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 343 น.
- กลุ่มงานควบคุมมลภาวะฟาร์มปศุสัตว์ กองสัตว์รักษ์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2545. โครงการพัฒนาระบบการจัดการฟาร์มสุกรที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหามลภาวะจากฟาร์มสุกร. สุกรสาส์น. ปีที่ 28, 112 (เมย.-มิย.).
- จกกล พรหมยะ. 2543. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในน้ำทิ้งจากหม้อหมักก๊าซ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์. เชียงใหม่.
- \_\_\_\_\_. 2545. รายงานผลการวิจัย การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis*(Nordsted) Geiteler เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำจากบ่อบำบัดน้ำเสียจากหอพักนักศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่.
- จิระพรรณ สุขศรีงาม, 2537. โปรตีนธรรมชาติจากสาหร่ายเกลียวทอง. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒมหาสารคาม. 13(2):43-47.
- จิระพรรณ สุขศรีงาม, สนอง จอมเกาะ, กาญจนา พงษ์พิณณ, เสาวลักษณ์ พิมพ์ภูลาด และ สนองภัทร จันทรเพ็ญ. 2539. การวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์และกำจัดของเสียจากโรงงานขนมจีน: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 72 น.
- จรูญ ติไตรงค์. 2531. การนำ Chlorella sp. (K3) ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงน้ำกากส่าเหลือเพื่อเป็นอาหารของ *Moina macrocopa* Straus เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาชีววิทยามหาวิทยาลัย เชียงใหม่.
- จันทพร ทองเอกแก้ว. 2545. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง(*Spirulina* sp.) ในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเนื้อสัตว์. วารสารวิชาการ ม.อบ. 4 (2):1-9.
- ✓ เขียมจิตร บุญสม. 2532. ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง: ผลทางการรักษาโรคที่นายแพทย์ชาวญี่ปุ่นค้นพบ. งานแปลลำดับที่ 105. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ทศพร ชงทอง. 2529. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนโดยใช้สาหร่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 150 น.
- นฤมล จิยโชค, บุญยา บุญนาค และมรกต ดันติเจริญ. 2532. การผลิตสาหร่ายเกลียวทองจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังในระดับโรงงานต้นแบบ. คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- นฤมล ศุภจรรยา, บุญยา มุนนาค และพิสมัย ภูวสินทิษฐ์. 2529. การผลิตสาหร่ายเกลียวทองจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 34-37. ในรายงานการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีศูนย์พันธุกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. กรุงเทพฯ: ศูนย์พันธุกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. สาหร่ายเกลียวทอง. กรุงเทพฯ: บริษัท.
- บานชื่น ชลสวัสดิ์. 2532. การใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นส่วนประกอบของอาหารผสมสำหรับเลี้ยงวิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการประมง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บริษัทกรีนไดมอนด์ จำกัด. 2541. คุณค่าทางโภชนาการของ จีดี-1 สาหร่ายเกลียวทอง. เอกสาร เผยแพร่ปฏิพันธ์ นันทขว้าง. 2543. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในบ่อเพาะเลี้ยงจำลองด้วยน้ำเชียงใหม่. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 60 หน้า
- พฤหัส จันตาเดช. 2546. การใช้สาหร่าย *spirulina platensis* ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มโคนม. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่
- พิมพ์พรณ ตันสกุล แลอรักษ์ จันทศิลป์. 2531. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในบ่อน้ำทิ้งจากโรงงานยางพารา. วารสารสงขลานครินทร์. 10 (2): 149-155; เมษายน-มิถุนายน.
- เพ็ญรัตน์ หงษ์วิทยากร. 2545. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารโปรตีนสำหรับปลา. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.matichon.co.th/techno> (20 สิงหาคม 2548).
- มารศรี เรืองจิตต์ชาวลย์. 2546. สาหร่ายสไปรูลินา. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.digital.lib.kmutt.ac.th> (20 สิงหาคม 2548).
- ยวดี พิรพรพิศาล. 2542. สาหร่าย. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 216 น.
- ยวดี พิรพรพิศาล. 2544. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา. โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สาหร่ายสไปรูลินาในเขตจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน. มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- ยวดี พิรพรพิศาล. วิทยาลัยเทคโนโลยีพณิชยการ, เสกสรร ศาสตร์รักษา, สาครพรมบัติแก้ว และมานพ 2535. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (*spirulina platensis*) ในน้ำกากส่าเหล้าในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 73 หน้า.
- ลักขณา เหล่าไพบูรณ์, พัฒนา เหล่าไพบูรณ์, สามารถ มูลอามาตย์ และวิไลศนา โพธิ์ศรี. 2540. ผลของการทำแห้งต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในสาหร่ายเกลียวทอง. รายงานวิจัยภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- ลักดา วงศ์รัตน์. 2544. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 127 น.

- วิวัฒน์ ชวนะนิกุล. 2543. สถานการณ์การเลี้ยงสัตว์และปัญหาสิ่งแวดล้อมของฟาร์มสุกร. สุกรสาส์น ปีที่ 27 ฉบับที่ 105 (กค-กย)
- วิชากรณ์ พรหมณะ. 2543. การศึกษาสำหรับ *spirulina platensis* ในอาหารสุกรเล็ก (น้ำหนัก 20-30 กิโลกรัม) ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ. 2530. สาหร่ายเกลียวทอง. กรมประมง. กรุงเทพฯ.
- สมชาย กิจสุวรรณกุล. 2531. การเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการระหว่างสาหร่าย *spirulina platensis* 2 ลักษณะ. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมทิพย์ คำนัรวันดิษฐ์. 2541. น้ำเสีย: การควบคุมและการบำบัด. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 325 หน้า
- สมเกียรติ สุวรรณศิริ. 2542. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง *spirulina platensis* ในระดับอุตสาหกรรม ขนาดย่อมด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- สรวิศ เผ่าทองสุข. 2543. ศักยภาพการวิจัยและการพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในประเทศ ไทย: เอกสารเผยแพร่ชุดโครงการ "อุตสาหกรรมสัตว์น้ำ" สกว. ชุดที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- สุชาติ อิงธรรมจิตร. 2529. สาหร่ายเกลียวทอง (สไปรูลินา). วารสารการประมง. 32,2(พฤศจิกายน):615-621.
- สุวีรธรรม เบญจรงค์. 2536. การใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นอาหารแกะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาสัตวบาล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุวิมล จิระอำไพรัตน์. 2536. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองในน้ำทิ้งจากโรงงานขนมนมจืด. ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. มหาสารคาม.
- สุชาติ อิงธรรมจิตร, เข็มจิตต์ บุญสม, เฉลิมวรรณ คงสงวนชัย, บรรจง โคกกระเทียม และ ชัยประดิษฐ์ แก้วประคำ. 2531. การทดลองเบื้องต้นในการใช้น้ำจากกองปลาสดเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina* sp.). กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยประมงน้ำจืด. 9 น.
- สุพรีดรีม. 2549. การใช้สาหร่ายสไปรูลินาในการเพาะเลี้ยงกุ้ง. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://seed.net/suprederm/spirulina> (20 สิงหาคม 2549).
- สมถรรณ ชุ่มเชื้อ. 2542. สาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina* spp.). วารสารมหาสารคาม. 18(1-2): 47-53.
- สมณทิพย์ บุญนาค. 2529. สาหร่ายเกลียวทอง. วิทยาศาสตร์ มข. 14(3): 153-159

- เสกสรร ถารัตน์. 2536. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองในน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีนผสมกับสูตรอาหาร Zarrouk. มหาสารคาม. วิทยานิพนธ์เกษตรศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาสารคาม
- สำนักงานปศุสัตว์จังหวัด. 2550. สถิติจำนวนสุกรในประเทศไทยแสดงรายภาค ปี 2536-2545. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.dld.go.th> (1 มีนาคม 2550).
- อัญชลี เชื้อนเพชร. 2546. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในระดับนำร่องด้วยน้ำเสียในบ่อปรับเสถียรภาพจากระบบก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสุกร วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 105 น.
- โอภาส วิชชุไศรภพ. 2533. ผลของสาหร่าย *spirulina* spp. ที่มีต่อการเจริญเติบโตและสีของไข่นก. การค้นคว้าเชิงอิสระเชิงวิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาการสอนชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- Choubert, G.C. 1979. Tentative utilization of Spirulina algae as a source of carotenoid pigments for rainbow trout. Aquaculture. 18: 135-143.
- Chiu, R.J., H.I. Liu, C.C. Chen, Y.C. Chi, P. Soong and P.L. Hao. The cultivation of *Spirulina platensis* on fermented swine manure. Cited by P. Chung. 1980. Animal wastewater Treatment and Utilization. 1980: 435-450.
- Gantar, M., Z. Obrecht and B. Dalmacija. 1991. Nutrient removal and algal succession during the growth of *Spirulina platensis* and *Scenedesmus quadricauda* on swine wastewater. Bioresource Technology. 36(2): 167-171.
- Hill, C. 1980. The Secrets of *Spirulina*. University of the Trees Press, Boulder Creek California. 218 p.
- Nakamura, H. 1982 *Spirulina* Food for Hunger World a Pioneer's Story in Aquaculture. University of the Trees Press. Boulder Creek, California. 215 P.
- PaGilla, K.R. Kim, H. and Cheunbarn, T. 2000 Aerobic Thermophilic and anaerobic mesophilic Treatment of swine waste. Wat. Res. 34(10): 2747-2753.
- Peerapompisal, Y, S. Chansiriphotha and S. Prreongkarn. 1999. Nutritional Value of *spirulina platensis* Cultivated in Sugar Cane Molasses Distillery Slops. Proceeding on the 5 th Asia-Pacific Biochemical Engineering Conference, 15-18 November 1999. Phuket Arcadia Hotel, Phuket, Thailand. P.254.
- Richmond, A. (1986) In CRC Handbook of Microalgal Culture (edited by Richmond, A.), CRC press, Inc., Boca Raton, Florida, p. 216.

Stanley, J.G. and J.B. Jones 1976. Feeding algae of fish, Aquaculture. 7(March):219-228.

Venkataraman, L.V. 1983. Bluegreen Alga: *spirulina* . Central Food Technological Research Institute, Mysore, India.

## ภาคผนวก

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่เพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสภาพกลางแจ้ง

| ความเข้มข้น | OD       |          |          |          |          |           |           |           | จำนวนเซลล์ (x10000)/มิลลิลิตร |          |          |          |          |           |           |           |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|             | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 | วันที่ 0                      | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 |
| 0%          | 0.12     | 0.16     | 0.18     | 0.21     | 0.12     | 0.20      | 0.18      | 0.11      | 2.5                           | 2.43     | 2.89     | 2.35     | 1.236    | 1.2       | 1.13      | 1.25      |
| 10%         | 0.25     | 0.26     | 0.29     | 0.37     | 0.42     | 0.45      | 0.35      | 0.34      | 2.39                          | 3.18     | 6.72     | 7.83     | 11.68    | 10.83     | 10.229    | 12.56     |
| 20%         | 0.31     | 0.31     | 0.32     | 0.36     | 0.33     | 0.34      | 0.35      | 0.33      | 2.6                           | 3.24     | 5.23     | 6.12     | 5.87     | 4.22      | 4.52      | 2.7       |
| 40%         | 0.41     | 0.42     | 0.36     | 0.23     | 0.23     | 0.25      | 0.22      | 0.22      | 2.5                           | 1.25     | 1.33     | 0.07     | 0        | 0         | 0         | 0         |
| 60%         | 0.62     | 0.58     | 0.31     | 0.25     | 0.32     | 0.34      | 0.24      | 0.27      | 2.55                          | 2.58     | 0.9      | 0.12     | 0.07     | 0         | 0         | 0         |
| 80%         | 0.79     | 0.75     | 0.63     | 0.67     | 0.59     | 0.51      | 0.55      | 0.59      | 2.5                           | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         |
| 100%        | 0.86     | 0.86     | 0.84     | 0.79     | 0.78     | 0.67      | 0.74      | 0.64      | 2.65                          | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         |

ตารางที่ 2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่เพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสภาพห้องปฏิบัติการ

| ความเข้มข้น | OD       |          |          |          |          |           |           |           | จำนวนเซลล์ (x10000)/มิลลิลิตร |          |          |          |          |           |           |           |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|             | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 | วันที่ 0                      | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 |
| 0%          | 0.12     | 0.16     | 0.18     | 0.21     | 0.12     | 0.20      | 0.18      | 0.11      | 2.55                          | 2.54     | 1.83     | 1.12     | 0.75     | 0         | 0         | 0         |
| 10%         | 0.25     | 0.26     | 0.22     | 0.19     | 0.24     | 0.21      | 0.23      | 0.27      | 2.6                           | 2.41     | 3.01     | 4.16     | 3.83     | 3.2       | 0.54      | 0.45      |
| 20%         | 0.31     | 0.29     | 0.32     | 0.16     | 0.20     | 0.12      | 0.23      | 0.25      | 2.6                           | 1.35     | 0.95     | 1.5      | 1.35     | 1         | 0         | 0         |
| 40%         | 0.41     | 0.32     | 0.35     | 0.12     | 0.22     | 0.12      | 0.22      | 0.22      | 2.5                           | 2.55     | 0.9      | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         |
| 60%         | 0.62     | 0.28     | 0.22     | 0.15     | 0.12     | 0.14      | 0.22      | 0.26      | 2.5                           | 1.2      | 0.9      | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         |
| 80%         | 0.79     | 0.78     | 0.75     | 0.65     | 0.69     | 0.49      | 0.58      | 0.52      | 2.6                           | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         |
| 100%        | 0.86     | 0.76     | 0.81     | 0.65     | 0.78     | 0.69      | 0.66      | 0.60      | 2.75                          | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         |

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

| ความเข้มข้น | กลางแจ้ง |          |          |          |          |           |           |           | ห้องปฏิบัติการ |          |          |          |          |           |           |           |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|             | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 | วันที่ 0       | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 |
| 0%          | 8.1      | 5.5      | 4.2      | 13.2     | 22.1     | 19.2      | 17        | 20.3      | 8.1            | 5.1      | 4.4      | 13.2     | 7.5      | 19.6      | 17.4      | 20        |
| 10%         | 98       | 97.1     | 86.2     | 67.1     | 33       | 40.3      | 53        | 55.3      | 98             | 86.3     | 71.1     | 75.2     | 81.5     | 54        | 61        | 65.1      |
| 20%         | 159.2    | 148.2    | 109.3    | 98       | 119      | 112.4     | 91        | 99.1      | 159.2          | 161.1    | 129.1    | 128.5    | 112      | 136       | 115.2     | 112.9     |
| 40%         | 398.4    | 318      | 320.1    | 205.7    | 332      | 355.1     | 349.5     | 352.6     | 398.4          | 387.2    | 358      | 312.4    | 335.6    | 345.1     | 395.2     | 402.1     |
| 60%         | 588.1    | 578.2    | 412      | 356.3    | 357.4    | 339       | 418.3     | 502.4     | 588.1          | 601.2    | 587      | 565      | 458      | 432       | 578       | 598.6     |
| 80%         | 870.2    | 701.4    | 586.8    | 637.65   | 655.2    | 780.5     | 691.6     | 683.2     | 870.2          | 774.4    | 642      | 638.5    | 744.6    | 732.2     | 749       | 769.5     |
| 100%        | 870      | 852      | 743.4    | 910.8    | 870      | 1002      | 958.8     | 1182.3    | 870            | 882.5    | 882.2    | 890.2    | 912.4    | 887       | 932.1     | 1118      |

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย Ammonia nitrogen (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

| ความเข้มข้น | กลางแจ้ง |          |          |          |          |           |           |           | ห้องปฏิบัติการ |          |          |          |          |           |           |           |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|             | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 | วันที่ 0       | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 |
| 0%          | 7.3      | 8.3      | 3.4      | 3.9      | 1.4      | 1.3       | 1.5       | 2         | 7.3            | 7.4      | 4.4      | 4.9      | 3.5      | 3.3       | 4.6       | 4.5       |
| 10%         | 11.5     | 7.3      | 3.7      | 2.1      | 1.73     | 0.32      | 0.52      | 0.75      | 11.5           | 11.3     | 10.2     | 5.1      | 3.2      | 3.2       | 4.2       | 4.6       |
| 20%         | 20.8     | 12.8     | 4.1      | 2.7      | 0.4      | 1.8       | 2.7       | 1.4       | 20.8           | 15.2     | 14.5     | 12.7     | 10.4     | 11.8      | 12.7      | 11.4      |
| 40%         | 35       | 19.6     | 8.7      | 8.2      | 8.9      | 10.2      | 12.8      | 15.8      | 35             | 33.6     | 25.2     | 27.8     | 28.9     | 30.2      | 32.2      | 35.8      |
| 60%         | 65       | 32.1     | 25.7     | 24.3     | 42.3     | 52.6      | 66.5      | 68.2      | 65             | 52.1     | 55.7     | 44.3     | 42.5     | 45.3      | 56.2      | 66.7      |
| 80%         | 82.2     | 74.1     | 92       | 78       | 76.8     | 96.3      | 101.2     | 94.2      | 82.2           | 85.2     | 90.2     | 81.3     | 87.6     | 75.2      | 110.3     | 107.6     |
| 100%        | 108.1    | 105      | 82.1     | 108.6    | 72.1     | 85.3      | 97.4      | 120       | 108.1          | 111      | 132.4    | 109.6    | 102.3    | 92.6      | 95.8      | 99.6      |

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย Nitrate nitrogen (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

| ความเข้มข้น | กลางแจ้ง |          |          |          |          |           |           |           |          |          |          |          |          |           | ห้องปฏิบัติการ |           |  |  |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------------|-----------|--|--|
|             | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12      | วันที่ 14 |  |  |
| 0%          | 7        | 7        | 5        | 9        | 15       | 10        | 9         | 8         | 7        | 7        | 5        | 9        | 15       | 10        | 9              | 8         |  |  |
| 10%         | 25       | 22.5     | 22.5     | 20.1     | 17.4     | 13.35     | 15.6      | 14.5      | 25       | 22.5     | 22.5     | 20.1     | 22.5     | 23.2      | 20.6           | 18.9      |  |  |
| 20%         | 44       | 46.8     | 32.1     | 20.7     | 25.4     | 38.6      | 39.2      | 34.5      | 44       | 45.2     | 44.2     | 35.9     | 36.5     | 39.8      | 40.3           | 44.5      |  |  |
| 40%         | 90       | 92.1     | 85.4     | 75.4     | 66.3     | 89        | 85.4      | 79.5      | 90       | 91.2     | 89.5     | 78.6     | 81.3     | 92        | 85.4           | 79.5      |  |  |
| 60%         | 147      | 104.5    | 92.8     | 98.5     | 101.2    | 98.3      | 86.4      | 102.2     | 147      | 150      | 148.9    | 139.8    | 142      | 135.4     | 106.3          | 153.2     |  |  |
| 80%         | 225      | 246.1    | 250.3    | 232      | 245.2    | 256.1     | 223.3     | 228.1     | 224.5    | 223.6    | 256      | 239.4    | 230.8    | 248.9     | 252.3          | 250.6     |  |  |
| 100%        | 270      | 278.3    | 266.3    | 263      | 250.4    | 279.6     | 280.1     | 290.3     | 270.1    | 280.2    | 288.1    | 275.9    | 271      | 278.1     | 285.5          | 291.7     |  |  |

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย Phosphate (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

| ความเข้มข้น | กลางแจ้ง |           |          |          |          |           |           |           |          |          |          |          |          |           | ห้องปฏิบัติการ |           |  |  |
|-------------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------------|-----------|--|--|
|             | วันที่ 0 | วันที่ 10 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12      | วันที่ 14 |  |  |
| 0%          | 25       | 27        | 31.7     | 26.3     | 27.1     | 26.9      | 28.2      | 24        | 25       | 26       | 31       | 26       | 27       | 26        | 28             | 24        |  |  |
| 10%         | 43.0     | 42.0      | 41.0     | 44.0     | 21.0     | 24.0      | 25.3      | 21.0      | 43.0     | 42.3     | 42.0     | 43.5     | 39.2     | 35.1      | 25.6           | 34.8      |  |  |
| 20%         | 75       | 70        | 65.1     | 52.6     | 36       | 46.1      | 52        | 49.4      | 75       | 74       | 71.3     | 69.4     | 61.5     | 66.2      | 65.4           | 64.2      |  |  |
| 40%         | 152      | 150       | 144.3    | 138      | 152      | 158       | 159.2     | 168       | 152      | 148      | 140      | 134      | 137      | 140       | 158            | 171       |  |  |
| 60%         | 250      | 250       | 251.7    | 307      | 315      | 320       | 314.2     | 318       | 250      | 236      | 258      | 417      | 316      | 366       | 371            | 326.4     |  |  |
| 80%         | 312      | 329       | 335.1    | 318.4    | 363      | 374       | 356.1     | 339       | 312      | 342      | 346      | 349      | 359      | 376       | 378            | 365.3     |  |  |
| 100%        | 390      | 410       | 415.3    | 439.6    | 472      | 458.6     | 460.9     | 446       | 390      | 427      | 433      | 439      | 473      | 458       | 460            | 446.2     |  |  |

ตารางที่ 7 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วันแสดงด้วยค่า OD

| ระดับสารอาหาร            | วันที่ 0 | วันที่ 1 | วันที่ 2 | วันที่ 3 | วันที่ 4 | วันที่ 5 | วันที่ 6 | วันที่ 7 | วันที่ 8 | วันที่ 9 | วันที่ 10 | วันที่ 11 | วันที่ 12 | วันที่ 13 | วันที่ 14 |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>NaNO<sub>3</sub></b>  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| กลางแจ้ง                 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                  | 0.21     | 0.23     | 0.27     | 0.26     | 0.32     | 0.36     | 0.40     | 0.43     | 0.49     | 0.54     | 0.55      | 0.59      | 0.64      | 0.64      | 0.72      |
| 0.5 g/l                  | 0.21     | 0.22     | 0.25     | 0.29     | 0.32     | 0.36     | 0.43     | 0.51     | 0.51     | 0.62     | 0.56      | 0.71      | 0.75      | 0.78      | 0.81      |
| 1.0 g/l                  | 0.23     | 0.23     | 0.24     | 0.26     | 0.28     | 0.35     | 0.37     | 0.39     | 0.49     | 0.59     | 0.61      | 0.67      | 0.71      | 0.72      | 0.82      |
| 1.5 g/l                  | 0.22     | 0.25     | 0.25     | 0.25     | 0.28     | 0.38     | 0.45     | 0.5      | 0.5      | 0.63     | 0.66      | 0.81      | 0.8       | 0.93      | 1.04      |
| 2 g/l                    | 0.28     | 0.22     | 0.28     | 0.27     | 0.3      | 0.32     | 0.28     | 0.47     | 0.53     | 0.6      | 0.57      | 0.7       | 0.73      | 0.79      | 0.92      |
| <b>ห้องปฏิบัติการ</b>    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                  | 0.2      | 0.19     | 0.19     | 0.17     | 0.19     | 0.22     | 0.17     | 0.2      | 0.18     | 0.13     | 0.11      | 0.11      | 0.13      | 0.12      | 0.15      |
| 0.5 g/l                  | 0.19     | 0.20     | 0.21     | 0.23     | 0.25     | 0.18     | 0.22     | 0.21     | 0.22     | 0.19     | 0.18      | 0.19      | 0.19      | 0.22      | 0.25      |
| 1.0 g/l                  | 0.25     | 0.22     | 0.22     | 0.19     | 0.22     | 0.23     | 0.24     | 0.24     | 0.24     | 0.21     | 0.19      | 0.25      | 0.26      | 0.25      | 0.27      |
| 1.5 g/l                  | 0.22     | 0.21     | 0.23     | 0.23     | 0.24     | 0.23     | 0.28     | 0.25     | 0.29     | 0.26     | 0.19      | 0.23      | 0.24      | 0.26      | 0.26      |
| 2 g/l                    | 0.22     | 0.21     | 0.19     | 0.13     | 0.18     | 0.17     | 0.17     | 0.15     | 0.14     | 0.16     | 0.12      | 0.12      | 0.13      | 0.11      | 0.07      |
| <b>NaHCO<sub>3</sub></b> |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| กลางแจ้ง                 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                  | 0.21     | 0.23     | 0.27     | 0.26     | 0.32     | 0.36     | 0.40     | 0.43     | 0.49     | 0.54     | 0.55      | 0.59      | 0.64      | 0.64      | 0.72      |
| 4 g/l                    | 0.2      | 0.22     | 0.23     | 0.27     | 0.3      | 0.32     | 0.38     | 0.39     | 0.49     | 0.52     | 0.54      | 0.58      | 0.67      | 0.57      | 0.82      |
| 6 g/l                    | 0.22     | 0.23     | 0.26     | 0.28     | 0.33     | 0.37     | 0.40     | 0.44     | 0.55     | 0.6      | 0.64      | 0.69      | 0.76      | 0.75      | 0.87      |
| 8 g/l                    | 0.24     | 0.25     | 0.28     | 0.32     | 0.36     | 0.41     | 0.51     | 0.57     | 0.64     | 0.69     | 0.71      | 0.8       | 0.87      | 0.91      | 1.03      |
| 10 g/l                   | 0.2      | 0.22     | 0.25     | 0.27     | 0.32     | 0.37     | 0.41     | 0.44     | 0.5      | 0.55     | 0.58      | 0.63      | 0.7       | 0.69      | 0.8       |
| <b>ห้องปฏิบัติการ</b>    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                  | 0.2      | 0.19     | 0.19     | 0.17     | 0.19     | 0.22     | 0.17     | 0.2      | 0.18     | 0.13     | 0.11      | 0.11      | 0.13      | 0.12      | 0.15      |
| 4 g/l                    | 0.2      | 0.21     | 0.22     | 0.23     | 0.23     | 0.24     | 0.22     | 0.24     | 0.23     | 0.28     | 0.26      | 0.28      | 0.32      | 0.31      | 0.26      |
| 6 g/l                    | 0.19     | 0.23     | 0.23     | 0.23     | 0.22     | 0.25     | 0.26     | 0.25     | 0.27     | 0.25     | 0.25      | 0.24      | 0.28      | 0.27      | 0.3       |
| 8 g/l                    | 0.2      | 0.22     | 0.23     | 0.21     | 0.23     | 0.25     | 0.26     | 0.21     | 0.26     | 0.26     | 0.24      | 0.25      | 0.27      | 0.27      | 0.31      |
| 10 g/l                   | 0.17     | 0.22     | 0.22     | 0.241    | 0.22     | 0.216    | 0.264    | 0.23     | 0.24     | 0.23     | 0.19      | 0.2       | 0.23      | 0.22      | 0.28      |

ตาราง (ต่อ)

| ระดับการอาหาร                       | วันที่ 0 | วันที่ 1 | วันที่ 3 | วันที่ 4 | วันที่ 5 | วันที่ 6 | วันที่ 7 | วันที่ 8 | วันที่ 8 | วันที่ 9 | วันที่ 10 | วันที่ 11 | วันที่ 12 | วันที่ 13 | วันที่ 14 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>NPK</b>                          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| กลายรัง                             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                             | 0.22     | 0.26     | 0.27     | 0.30     | 0.30     | 0.31     | 0.37     | 0.39     | 0.43     | 0.52     | 0.49      | 0.62      | 0.66      | 0.70      | 0.77      |
| 0.2 g/l                             | 0.23     | 0.24     | 0.25     | 0.26     | 0.23     | 0.23     | 0.31     | 0.31     | 0.37     | 0.42     | 0.42      | 0.52      | 0.52      | 0.56      | 0.63      |
| 0.4 g/l                             | 0.26     | 0.23     | 0.24     | 0.26     | 0.24     | 0.24     | 0.26     | 0.30     | 0.31     | 0.35     | 0.40      | 0.43      | 0.52      | 0.54      | 0.55      |
| 0.6 g/l                             | 0.26     | 0.25     | 0.25     | 0.24     | 0.22     | 0.21     | 0.24     | 0.29     | 0.31     | 0.37     | 0.38      | 0.56      | 0.56      | 0.64      | 0.68      |
| 0.8 g/l                             | 0.28     | 0.22     | 0.23     | 0.24     | 0.17     | 0.16     | 0.18     | 0.16     | 0.17     | 0.20     | 0.22      | 0.30      | 0.39      | 0.44      | 0.53      |
| <b>หึ่งปฏิบัติการ</b>               |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                             | 0.24     | 0.21     | 0.19     | 0.21     | 0.20     | 0.20     | 0.19     | 0.18     | 0.18     | 0.18     | 0.20      | 0.21      | 0.21      | 0.25      | 0.21      |
| 0.2 g/l                             | 0.25     | 0.23     | 0.22     | 0.24     | 0.22     | 0.18     | 0.19     | 0.19     | 0.20     | 0.19     | 0.18      | 0.18      | 0.20      | 0.22      | 0.21      |
| 0.4 g/l                             | 0.27     | 0.20     | 0.21     | 0.23     | 0.20     | 0.18     | 0.19     | 0.23     | 0.19     | 0.19     | 0.20      | 0.20      | 0.23      | 0.24      | 0.24      |
| 0.6 g/l                             | 0.28     | 0.24     | 0.23     | 0.23     | 0.16     | 0.15     | 0.17     | 0.14     | 0.12     | 0.17     | 0.16      | 0.17      | 0.19      | 0.21      | 0.25      |
| 0.8 g/l                             | 0.33     | 0.22     | 0.19     | 0.19     | 0.15     | 0.14     | 0.16     | 0.13     | 0.11     | 0.12     | 0.09      | 0.10      | 0.18      | 0.11      | 0.09      |
| <b>K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b> |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| กลายรัง                             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                             | 0.22     | 0.26     | 0.27     | 0.30     | 0.3      | 0.32     | 0.37     | 0.39     | 0.43     | 0.52     | 0.49      | 0.62      | 0.66      | 0.7       | 0.77      |
| 0.1 g/l                             | 0.29     | 0.28     | 0.29     | 0.30     | 0.3      | 0.33     | 0.31     | 0.37     | 0.45     | 0.51     | 0.46      | 0.65      | 0.75      | 0.77      | 0.84      |
| 0.3 g/l                             | 0.29     | 0.28     | 0.26     | 0.23     | 0.17     | 0.20     | 0.30     | 0.27     | 0.31     | 0.31     | 0.26      | 0.42      | 0.44      | 0.48      | 0.52      |
| 0.5 g/l                             | 0.3      | 0.3      | 0.28     | 0.29     | 0.28     | 0.28     | 0.32     | 0.35     | 0.39     | 0.34     | 0.29      | 0.42      | 0.46      | 0.48      | 0.52      |
| 0.7 g/l                             | 0.3      | 0.23     | 0.25     | 0.23     | 0.22     | 0.25     | 0.18     | 0.26     | 0.29     | 0.23     | 0.29      | 0.31      | 0.35      | 0.37      | 0.43      |
| <b>หึ่งปฏิบัติการ</b>               |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |
| control                             | 0.24     | 0.21     | 0.19     | 0.21     | 0.2      | 0.20     | 0.19     | 0.18     | 0.18     | 0.18     | 0.2       | 0.21      | 0.21      | 0.25      | 0.21      |
| 0.1 g/l                             | 0.17     | 0.22     | 0.22     | 0.24     | 0.22     | 0.22     | 0.25     | 0.23     | 0.24     | 0.23     | 0.19      | 0.2       | 0.23      | 0.22      | 0.28      |
| 0.3 g/l                             | 0.2      | 0.22     | 0.23     | 0.21     | 0.23     | 0.25     | 0.26     | 0.21     | 0.26     | 0.26     | 0.24      | 0.25      | 0.27      | 0.27      | 0.31      |
| 0.5 g/l                             | 0.19     | 0.23     | 0.23     | 0.23     | 0.22     | 0.25     | 0.26     | 0.25     | 0.27     | 0.25     | 0.25      | 0.24      | 0.28      | 0.27      | 0.3       |
| 0.7 g/l                             | 0.2      | 0.21     | 0.22     | 0.23     | 0.23     | 0.24     | 0.22     | 0.24     | 0.23     | 0.28     | 0.26      | 0.28      | 0.32      | 0.31      | 0.26      |

ตารางที่ 8 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วันแสดงด้วยจำนวนเซลล์

| ระดับสารอาหาร                   | กลางแจ้ง |          |          |          |          |           |           | ห้องปฏิบัติการ |          |          |          |          |          |           |           |           |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                                 | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14      | วันที่ 0 | วันที่ 2 | วันที่ 4 | วันที่ 6 | วันที่ 8 | วันที่ 10 | วันที่ 12 | วันที่ 14 |
| NaNO <sub>3</sub>               |          |          |          |          |          |           |           |                |          |          |          |          |          |           |           |           |
| control                         | 2.39     | 3.2      | 6.725    | 7.839    | 11.7     | 10.83     | 10.23     | 12.6           | 2.91     | 2.41     | 3.01     | 4.16     | 3.83     | 3.25      | 5.44      | 4.575     |
| 0.5 g/l                         | 1.83     | 3.9      | 6.48     | 10.72    | 15       | 15.36     | 15.88     | 18.5           | 2.17     | 4.14     | 4.8      | 5.88     | 6.14     | 7.42      | 6.78      | 6.917     |
| 1.0 g/l                         | 2.36     | 4.1      | 8.753    | 10.31    | 13.7     | 16.7      | 14.61     | 21.8           | 1.92     | 3.83     | 5.05     | 5.67     | 5.99     | 6.19      | 5.97      | 7.933     |
| 1.5 g/l                         | 1.97     | 5.8      | 9.973    | 11.88    | 13.1     | 17.69     | 19.42     | 21.8           | 1.75     | 6.08     | 5.75     | 6.22     | 6.67     | 9.6       | 9.7       | 7.607     |
| 2 g/l                           | 2.03     | 5.5      | 8.278    | 10.72    | 13.2     | 11.42     | 12.9      | 17.4           | 2.33     | 2.77     | 4.08     | 3.36     | 3.28     | 5.67      | 4.31      | 4.333     |
| NaHCO <sub>3</sub>              |          |          |          |          |          |           |           |                |          |          |          |          |          |           |           |           |
| control                         | 2.39     | 3.2      | 6.725    | 7.839    | 11.7     | 10.83     | 10.23     | 12.6           | 2.91     | 2.41     | 3.01     | 4.16     | 3.83     | 3.25      | 5.44      | 4.575     |
| 4 g/l                           | 2.25     | 3.9      | 6.477    | 9.057    | 17.9     | 18.92     | 22        | 24.6           | 2.42     | 4.59     | 6.22     | 6.79     | 6.88     | 10.7      | 10.4      | 8.417     |
| 6 g/l                           | 2.08     | 4.1      | 9        | 13.2     | 15.2     | 17.5      | 16.11     | 18.9           | 2.25     | 5.22     | 6.5      | 6.64     | 7.54     | 8.44      | 8.94      | 9.35      |
| 8 g/l                           | 2        | 4.9      | 9.25     | 13.83    | 17.7     | 23.42     | 28.36     | 29.3           | 2        | 4.67     | 5.86     | 8.11     | 7.14     | 8.33      | 10.4      | 10.83     |
| 10 g/l                          | 2.05     | 6.3      | 8.833    | 12.27    | 17.2     | 20.75     | 22.96     | 24.2           | 1.5      | 5.11     | 5.13     | 7.03     | 7.08     | 9         | 8.09      | 8.777     |
| NPK                             |          |          |          |          |          |           |           |                |          |          |          |          |          |           |           |           |
| control                         | 2.1      | 4.6      | 7.46     | 10.14    | 10       | 14.61     | 14.58     | 15.6           | 2.9      | 4.43     | 4.33     | 5.2      | 5.64     | 6.13      | 5.57      | 6.72      |
| 0.2 g/l                         | 2.41     | 4.5      | 5.353    | 10.07    | 11.1     | 12.53     | 15        | 17.2           | 2.68     | 4.11     | 4.9      | 4.15     | 6.32     | 6.15      | 6.12      | 5.177     |
| 0.4 g/l                         | 2.89     | 2.4      | 4.507    | 6.453    | 9.74     | 11.34     | 14.08     | 15.1           | 2.94     | 2.91     | 4.16     | 4.2      | 7.57     | 7.89      | 7.53      | 8.033     |
| 0.6 g/l                         | 2.47     | 3.2      | 3.227    | 6.523    | 9.7      | 14.37     | 15.1      | 17.9           | 2.48     | 4.11     | 3.18     | 3.89     | 6.05     | 6.13      | 7.52      | 7.09      |
| 0.8 g/l                         | 2.57     | 2.3      | 2.093    | 3.107    | 4.65     | 6.197     | 10.29     | 11.1           | 2.56     | 2.6      | 2.4      | 2.02     | 2.1      | 2.33      | 1.44      | 1.463     |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> |          |          |          |          |          |           |           |                |          |          |          |          |          |           |           |           |
| control                         | 2.1      | 4.6      | 7.46     | 10.14    | 10       | 14.61     | 14.58     | 15.6           | 2.9      | 4.43     | 4.33     | 5.2      | 5.64     | 6.13      | 5.57      | 6.72      |
| 0.1 g/l                         | 2.26     | 4.2      | 7.8      | 10.15    | 10.4     | 16.2      | 15.13     | 16.4           | 1.5      | 5.11     | 5.13     | 7.03     | 7.08     | 9         | 8.09      | 8.777     |
| 0.3 g/l                         | 2.44     | 2.3      | 4.503    | 9.33     | 7.22     | 11.24     | 14.69     | 15             | 2        | 4.67     | 5.86     | 8.11     | 7.14     | 8.33      | 10.4      | 10.83     |
| 0.5 g/l                         | 2.63     | 3.9      | 6.04     | 10.02    | 12.5     | 12.01     | 14.9      | 18.1           | 2.25     | 5.22     | 6.5      | 6.64     | 7.54     | 8.44      | 8.94      | 9.35      |
| 0.7 g/l                         | 2.19     | 3.8      | 5.977    | 8.37     | 10.1     | 12.17     | 10.41     | 12.2           | 2.42     | 4.59     | 6.22     | 6.79     | 6.88     | 10.7      | 10.4      | 8.417     |

ตารางที่ 9 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

| น้ำทิ้งความเข้มข้น 10%+ สารอาหาร          |              |                                      |                   |               |               |                   |                               |               |               |              |              |              |                                |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------------|
| วันที่                                    | OD<br>(mg/l) | cell<br>( $\times 10^6$<br>cells/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>nitrogen<br>(mg/l) | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>( $\mu S/cm$ ) |
| 0                                         | 0.38         | 4.5                                  | 0.2025            | 166           | 82            | 8.67              | 22.58                         | 33.73         | 1550          | 89           | 4.1          | 28.2         | 1560                           |
| 2                                         | 0.20         | 3.5                                  | 0.245             | 145           | 57            | 8.43              | 13.59                         | 27.81         | 1655          | 75           | 4.4          | 28.5         | 1595                           |
| 4                                         | 0.21         | 4.25                                 | 0.2               | 135           | 46.5          | 2.24              | 10.49                         | 26.45         | 1788          | 67           | 3.7          | 28.4         | 1895                           |
| 6                                         | 0.59         | 10.8                                 | 0.2925            | 76            | 32            | 0.83              | 10.11                         | 19.45         | 1760          | 61           | 3.7          | 27.6         | 2210                           |
| 8                                         | 0.42         | 9                                    | 0.3075            | 125           | 49.5          | 0.86              | 12.52                         | 22.94         | 1883          | 176          | 2.9          | 28.4         | 2305                           |
| 10                                        | 0.29         | 9.5                                  | 0.315             | 160           | 61.5          | 1.00              | 14.87                         | 29.78         | 1960          | 227          | 2.9          | 29.1         | 2460                           |
| 12                                        | 0.59         | 7.25                                 | 0.39              | 148           | 84.5          | 1.33              | 11.98                         | 30.29         | 1880          | 255          | 2.4          | 28.6         | 2390                           |
| 14                                        | 0.49         | 6.25                                 | 0.37              | 172           | 105           | 1.04              | 12.20                         | 31.51         | 1808          | 238          | 1.4          | 28.1         | 1465                           |
| 16                                        | 0.32         | 0                                    | 0.24              | 185           | 115           | 1.04              | 12.05                         | 31            | 1778          | 246          | 1.4          | 28.5         | 1570                           |
| น้ำทิ้งความเข้มข้น 10%+ สารอาหาร + สารฟอส |              |                                      |                   |               |               |                   |                               |               |               |              |              |              |                                |
| วันที่                                    | OD<br>(mg/l) | cell<br>( $\times 10^6$<br>cells/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>nitrogen<br>(mg/l) | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>( $\mu S/cm$ ) |
| 0                                         | 0.37         | 4.65                                 | 0.2375            | 460           | 236.5         | 12.80             | 106.23                        | 34.29         | 7925          | 194          | 4.5          | 28.2         | 4118                           |
| 2                                         | 0.44         | 5.55                                 | 0.285             | 410           | 182           | 1.59              | 101.72                        | 31.78         | 7583          | 191          | 4.5          | 28.0         | 6490                           |
| 4                                         | 0.74         | 14.5                                 | 0.3825            | 340           | 166           | 0.95              | 107.54                        | 29.34         | 8258          | 182          | 4.0          | 28.1         | 7645                           |
| 6                                         | 0.79         | 15.25                                | 0.445             | 260           | 91            | 0.81              | 98.38                         | 29.17         | 8438          | 162          | 3.9          | 27.5         | 8035                           |
| 8                                         | 0.89         | 16.75                                | 0.485             | 206           | 58.5          | 0.85              | 92.15                         | 18.82         | 8583          | 195          | 3.7          | 28.0         | 8315                           |
| 10                                        | 0.96         | 17.25                                | 0.495             | 140           | 55.5          | 1.22              | 23.54                         | 19.58         | 7680          | 236          | 3.4          | 28.1         | 8365                           |
| 12                                        | 1.09         | 17.8                                 | 0.69              | 128           | 45            | 1.11              | 16.80                         | 16.73         | 6980          | 171          | 3.6          | 28.3         | 7915                           |
| 14                                        | 1.05         | 17.5                                 | 0.6625            | 122           | 48            | 0.84              | 13.74                         | 12.67         | 7025          | 139          | 4.6          | 28.0         | 7575                           |
| 16                                        | 0.95         | 16.8                                 | 0.65              | 115           | 49            | 0.72              | 11.36                         | 11.28         | 6552          | 122          | 2.9          | 28.1         | 8020                           |

ตารางที่ 9 (ต่อ)

| วันที่ | วันที่ | OD<br>(mg/l) | cell<br>(x 10 <sup>6</sup><br>cells/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>nitrogen<br>(mg/l) | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>(µS/cm) | alkalinity<br>(mg/l) | pH  |
|--------|--------|--------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|-----|
| 0      | -      | -            | -                                       | -                 | 166           | 82            | 8.90              | 22.04                         | 33.80         | 1085          | 72           | 3.4          | 28.3         | 1410                    | 700                  | 8.4 |
| 2      | -      | -            | -                                       | -                 | 160           | 60            | 6.44              | 39.38                         | 34.85         | 995           | 70           | 3.7          | 29.0         | 1080                    | 700                  | 8.3 |
| 4      | -      | -            | -                                       | -                 | 140           | 60            | 3.80              | 31.67                         | 36.52         | 1155          | 68           | 3.4          | 28.1         | 1410                    | 500                  | 7.8 |
| 6      | -      | -            | -                                       | -                 | 120           | 52            | 2.06              | 32.96                         | 44.89         | 1385          | 56           | 3.3          | 28.0         | 1700                    | 500                  | 7.1 |
| 8      | -      | -            | -                                       | -                 | 100           | 51            | 1.92              | 24.82                         | 41.26         | 1495          | 46           | 2.7          | 28.1         | 1660                    | 400                  | 7.1 |
| 10     | -      | -            | -                                       | -                 | 100           | 40            | 1.88              | 32.53                         | 36.52         | 1670          | 40           | 3.1          | 29.0         | 1670                    | 500                  | 7.1 |
| 12     | -      | -            | -                                       | -                 | 80            | 38            | 1.84              | 23.97                         | 33.46         | 1685          | 41           | 3.2          | 29.0         | 1460                    | 500                  | 7.1 |
| 14     | -      | -            | -                                       | -                 | 100           | 37            | 1.59              | 22.68                         | 31.78         | 1660          | 63           | 4.2          | 29.1         | 1385                    | 500                  | 7.2 |
| 16     | -      | -            | -                                       | -                 | 100           | 39            | 1.89              | 19.69                         | 32.91         | 1505          | 57           | 2.4          | 29.0         | 1505                    | 500                  | 7.7 |

ตารางที่ 10 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi- continuous culture)

| น้ำที่ความเข้มข้น 10%-+ สาหร่าย |              |                                        |                   |               |               |                   |                 |               |               |              |              |              |                         |                      |      |
|---------------------------------|--------------|----------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|------|
| วันที่                          | OD<br>(mg/l) | cell<br>(x10 <sup>6</sup><br>cells/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>mg/l | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>(µS/cm) | alkalinity<br>(mg/l) | pH   |
| 0                               | 0.36         | 4.7                                    | 0.27              | 155           | 93            | 8.4               | 22.5            | 42.5          | 3140          | 218          | 3.26         | 25.40        | 2100                    | 900                  | 10.1 |
| 2                               | 0.33         | 4.4                                    | 0.2465            | 120           | 90            | 4.2               | 17              | 42.5          | 2170          | 182          | 2.76         | 26.10        | 2200                    | 700                  | 10   |
| 4                               | 0.28         | 4.2                                    | 0.2431            | 80            | 62            | 3.7               | 15              | 41            | 2760          | 200.5        | 2.94         | 26.50        | 2500                    | 800                  | 9.8  |
| 6                               | 0.55         | 10.9                                   | 0.2103            | 96            | 70            | 1.9               | 15.4            | 44            | 1230          | 223.8        | 2.86         | 28.4         | 1900                    | 700                  | 9.9  |
| 8                               | 0.59         | 10.5                                   | 0.312             | 80            | 54            | 0.8               | 14.9            | 21            | 1460          | 164.5        | 2.94         | 27.2         | 1500                    | 700                  | 9.6  |
| 10                              | 0.5          | 6.3                                    | 0.3451            | 60            | 42            | 0.7               | 10              | 18.2          | 1970          | 139          | 3.3          | 26.1         | 1400                    | 800                  | 9.7  |
| 12                              | 0.46         | 6.2                                    | 0.38              | 40            | 36            | 0.8               | 12.1            | 37.8          | 1800          | 168.5        | 4.86         | 26.2         | 1600                    | 900                  | 10.1 |
| 14                              | 0.32         | 4.2                                    | 0.1231            | 56            | 48            | 2.2               | 14.2            | 32.5          | 1960          | 183.5        | 3.59         | 26.7         | 1200                    | 1000                 | 10.4 |
| 16                              | 0.169        | 3.4                                    | 0.03              | 64            | 53            | 3.9               | 11.3            | 28            | 1630          | 165.6        | 3.46         | 27.3         | 1500                    | 700                  | 10.2 |
| 18                              | 0.18         | 1.8                                    | 0.0412            | 80            | 52            | 2.4               | 8.2             | 46            | 1530          | 118          | 3.45         | 28.1         | 2500                    | 900                  | 9.8  |
| 20                              | 0.129        | 1                                      | 0.132             | 80            | 49            | 2.1               | 9.1             | 58            | 1240          | 122          | 3.4          | 29.2         | 3000                    | 800                  | 9.6  |
| 22                              | 0.07         | 1.2                                    | 0.213             | 40            | 62            | 1.2               | 12              | 52.4          | 1040          | 129.3        | 3.24         | 28.4         | 2600                    | 800                  | 9.4  |
| 24                              | 0.064        | 0.8                                    | 0.064             | 96            | 58            | 1.8               | 15.4            | 40.1          | 1120          | 121.6        | 3.14         | 28.6         | 2200                    | 700                  | 10.2 |
| 26                              | 0.058        | 0.7                                    | 0.0551            | 74            | 48            | 1.6               | 17              | 38            | 620           | 163.5        | 3.33         | 26.4         | 2400                    | 700                  | 10.1 |
| 28                              | 0.076        | 0.4                                    | 0.0678            | 80            | 50            | 1.7               | 13.2            | 26.7          | 680           | 174.2        | 3.48         | 25.2         | 2100                    | 700                  | 10.1 |
| 30                              | 0.024        | 0.3                                    | 0.0451            | 98            | 52            | 1.9               | 12              | 39            | 580           | 155.2        | 3.21         | 27.1         | 2200                    | 900                  | 10   |

ตารางที่ 10 (ต่อ)

| น้ำที่ความเข้มข้น 10%-สารวัด+สารอาหาร |              |                                        |                   |               |               |                   |                               |               |               |              |              |              |                         |                      |      |
|---------------------------------------|--------------|----------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|------|
| วันที่                                | OD<br>(mg/l) | cell<br>(x10 <sup>6</sup><br>cells/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>nitrogen<br>(mg/l) | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>(μS/cm) | alkalinity<br>(mg/l) | pH   |
| 0                                     | 0.35         | 4.9                                    | 0.2516            | 440           | 230           | 13.7              | 112.6                         | 50.1          | 5000          | 250          | 3.31         | 25.2         | 7200                    | 2400                 | 10.4 |
| 2                                     | 0.34         | 4.8                                    | 0.2422            | 320           | 222           | 5.3               | 75.2                          | 45.2          | 4040          | 270          | 2.7          | 26.2         | 8300                    | 2500                 | 10.1 |
| 4                                     | 0.345        | 6.2                                    | 0.2508            | 270           | 150           | 4.7               | 70.1                          | 48.3          | 3960          | 276          | 2.6          | 26.9         | 8000                    | 2500                 | 10.2 |
| 6                                     | 0.54         | 9.6                                    | 0.3217            | 240           | 186           | 3                 | 66.1                          | 46.4          | 3370          | 294.3        | 2.78         | 28.2         | 7000                    | 2500                 | 10.1 |
| 8                                     | 0.64         | 13                                     | 0.4115            | 160           | 125           | 3.4               | 42.5                          | 36.1          | 2830          | 243.8        | 2.94         | 28.1         | 7000                    | 2100                 | 10   |
| 10                                    | 0.79         | 14.2                                   | 0.5963            | 120           | 92            | 4                 | 16.8                          | 34.1          | 2800          | 278.5        | 3.19         | 26           | 4900                    | 2000                 | 9.9  |
| 12                                    | 0.85         | 15                                     | 0.6251            | 80            | 61            | 1.3               | 20.4                          | 39.6          | 2460          | 239.5        | 3.83         | 26.5         | 5700                    | 1500                 | 9.9  |
| 14                                    | 0.55         | 7.6                                    | 0.3791            | 146           | 102           | 4.1               | 15.6                          | 36.5          | 3460          | 278.5        | 3.48         | 26.9         | 7500                    | 1600                 | 10.1 |
| 16                                    | 0.43         | 5.2                                    | 0.214             | 86            | 85            | 4.4               | 22.3                          | 28.3          | 2890          | 263          | 3.42         | 26.7         | 6300                    | 1800                 | 10.4 |
| 18                                    | 0.399        | 2.4                                    | 0.211             | 94            | 76            | 3.9               | 19                            | 34.2          | 3120          | 260.2        | 3.38         | 28.4         | 6500                    | 1500                 | 10   |
| 20                                    | 0.295        | 2.2                                    | 0.1632            | 112           | 91            | 3.8               | 13                            | 36.2          | 3740          | 239.5        | 3.31         | 29.4         | 6500                    | 1700                 | 9.5  |
| 22                                    | 0.322        | 2.6                                    | 0.2               | 120           | 78            | 2.6               | 26.5                          | 32.1          | 1480          | 239.5        | 2.91         | 29.1         | 7000                    | 2100                 | 9.8  |
| 24                                    | 0.29         | 2.5                                    | 0.2941            | 148           | 64            | 2.5               | 28.4                          | 30.5          | 1760          | 230.2        | 3.07         | 28.4         | 7500                    | 2100                 | 9.8  |
| 26                                    | 0.226        | 1.9                                    | 0.3141            | 162           | 70            | 2.7               | 28                            | 42.5          | 1400          | 252.3        | 3.21         | 25.8         | 7000                    | 2500                 | 9.7  |
| 28                                    | 0.248        | 2.2                                    | 0.3678            | 148           | 65            | 2.7               | 26.3                          | 46.1          | 1380          | 280          | 3.62         | 25.4         | 7000                    | 2100                 | 10   |
| 30                                    | 0.266        | 1.8                                    | 0.3474            | 172           | 71            | 2.8               | 24.8                          | 42.2          | 1240          | 248          | 3.38         | 28.2         | 7000                    | 1900                 | 10.1 |

ตารางที่ 11 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

| น้ำที่ความเข้มข้น 10%+ สาหร่าย |              |                                        |                   |               |               |                   |                               |               |               |              |              |              |                         |                      |      |
|--------------------------------|--------------|----------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|------|
| วันที่                         | OD<br>(mg/l) | cell<br>(x10 <sup>6</sup><br>cells/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>nitrogen<br>(mg/l) | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>(µS/cm) | alkalinity<br>(mg/l) | pH   |
| 0                              | 0.341        | 4.75                                   | 0.23              | 160           | 92            | 9.12              | 22.6                          | 43.5          | 1210          | 170          | 3.7          | 28.9         | 1000                    | 800                  | 10.2 |
| 2                              | 0.252        | 4.25                                   | 0.23              | 142           | 56            | 5.25              | 18.75                         | 37.75         | 1077.5        | 150          | 4.4          | 25.6         | 1500                    | 700                  | 9.6  |
| 4                              | 0.252        | 3.25                                   | 0.24              | 104           | 41            | 4.5               | 12.5                          | 36.42         | 982.5         | 149          | 6.4          | 25.2         | 1500                    | 800                  | 9.7  |
| 6                              | 0.281        | 3.75                                   | 0.22              | 98            | 37.4          | 2.02              | 13.2                          | 32.25         | 995           | 45           | 6.2          | 26.6         | 2100                    | 900                  | 9.8  |
| 8                              | 0.339        | 2.25                                   | 0.325             | 128           | 64.8          | 4.25              | 15.25                         | 35.6          | 1300          | 89           | 5.2          | 26.4         | 1500                    | 700                  | 9.6  |
| 10                             | 0.439        | 3                                      | 0.4425            | 94            | 38.8          | 3.1               | 15.35                         | 31.52         | 895           | 87           | 3.8          | 27.7         | 1000                    | 800                  | 9.9  |
| 12                             | 0.466        | 3.25                                   | 0.4725            | 95            | 32.8          | 2.9               | 16.3                          | 23.7          | 1195          | 51           | 6.1          | 28.1         | 1000                    | 700                  | 9.6  |
| 14                             | 0.412        | 20                                     | 0.45              | 121           | 50.2          | 3.58              | 17.8                          | 33.8          | 1130          | 64           | 6.1          | 27.3         | 1000                    | 500                  | 9.5  |
| 16                             | 0.42         | 21.7                                   | 0.5725            | 66            | 31.1          | 0.75              | 9.32                          | 20.19         | 1105          | 66           | 4.6          | 27.3         | 900                     | 700                  | 10.1 |
| 18                             | 0.674        | 19                                     | 0.6625            | 79            | 32.5          | 1.8               | 8.85                          | 15.48         | 1295          | 79           | 5.3          | 26.7         | 1000                    | 700                  | 10.3 |
| 20                             | 0.739        | 3                                      | 0.73              | 148           | 73.8          | 4.32              | 5.75                          | 23.7          | 1130          | 100          | 5.1          | 27.6         | 1000                    | 700                  | 9.8  |
| 22                             | 0.818        | 2.5                                    | 0.715             | 128           | 58.5          | 2.5               | 7.45                          | 25.8          | 1090          | 65           | 3.1          | 27.3         | 1500                    | 800                  | 9.5  |
| 24                             | 0.623        | 2.25                                   | 0.7225            | 105           | 52.2          | 2.3               | 6.05                          | 26.29         | 1253          | 60           | 3.1          | 27.9         | 1000                    | 600                  | 9.6  |
| 26                             | 0.621        | 1.75                                   | 0.7165            | 98            | 46.8          | 4.7               | 9.5                           | 31.2          | 1329          | 56           | 3.2          | 27.6         | 1000                    | 700                  | 10.1 |
| 28                             | 0.461        | 0                                      | 0.556             | 120           | 61            | 4.1               | 9.8                           | 35.2          | 1320          | 55           | 3.1          | 27.2         | 1100                    | 700                  | 10   |
| 30                             | 0.446        | 0                                      | 0.535             | 132           | 65            | 5.1               | 8.5                           | 32.1          | 1218          | 62           | 3.2          | 28.1         | 1200                    | 600                  | 10   |

ตารางที่ 11 (ต่อ)

| น้ำเลี้ยงความเข้มข้น 10%+ สารโปรตีน+ สารอาหาร |              |                                       |                   |               |               |                   |                             |               |               |              |              |              |                         |                      |      |
|-----------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|------|
| วันที่                                        | OD<br>(mg/l) | cell<br>(x10 <sup>6</sup><br>cell/ml) | Biomass<br>(mg/l) | COD<br>(mg/l) | BOD<br>(mg/l) | Ammonia<br>(mg/l) | Nitrate<br>anogeo<br>(mg/l) | SRP<br>(mg/l) | TDS<br>(mg/l) | SS<br>(mg/l) | DO<br>(mg/l) | temp<br>(°C) | conductivity<br>(µS/cm) | alkalinity<br>(mg/l) | pH   |
| 0                                             | 0.34         | 4.60                                  | 0.2525            | 440           | 229           | 13.2              | 118.85                      | 43.8          | 6800          | 193          | 3.9          | 29.0         | 6500                    | 2000                 | 10.4 |
| 2                                             | 0.29         | 4.75                                  | 0.2375            | 400           | 170           | 4.125             | 103.75                      | 35.6          | 5620          | 186          | 4.3          | 25.6         | 6000                    | 2500                 | 10   |
| 4                                             | 0.32         | 6.50                                  | 0.305             | 308           | 154           | 1.25              | 93.8                        | 35.12         | 5418          | 89           | 6.4          | 25.3         | 6000                    | 2300                 | 9.9  |
| 6                                             | 0.37         | 8.25                                  | 0.335             | 292           | 90            | 1.75              | 34.2                        | 35.25         | 5535          | 79           | 6.4          | 26.7         | 6000                    | 2000                 | 9.7  |
| 8                                             | 0.43         | 14.00                                 | 0.355             | 176           | 85            | 1.05              | 26.05                       | 25.35         | 6520          | 81           | 6.4          | 26.3         | 6500                    | 2400                 | 9.5  |
| 10                                            | 0.54         | 20.75                                 | 0.565             | 174           | 45            | 0.81              | 12.55                       | 21.5          | 5635          | 103          | 6.1          | 28.0         | 6500                    | 2300                 | 9.5  |
| 12                                            | 0.57         | 24.75                                 | 0.615             | 103.5         | 42            | 0.82              | 15.7                        | 15.24         | 6335          | 109          | 6.3          | 28.2         | 6500                    | 2300                 | 10.1 |
| 14                                            | 0.61         | 25.00                                 | 0.646             | 250           | 125           | 4.25              | 48.9                        | 32.55         | 7010          | 103          | 6.4          | 27.5         | 6000                    | 2500                 | 10   |
| 16                                            | 0.64         | 25.75                                 | 0.635             | 175           | 105           | 1.7               | 35.2                        | 31.21         | 5929          | 109          | 6.2          | 27.5         | 5000                    | 1600                 | 9.9  |
| 18                                            | 0.89         | 30.00                                 | 0.85              | 161           | 88            | 1.05              | 28.9                        | 25.5          | 6075          | 110          | 6.8          | 26.9         | 5000                    | 1700                 | 9.7  |
| 20                                            | 0.96         | 31.50                                 | 0.935             | 125           | 52            | 0.7               | 15.9                        | 13            | 6500          | 72           | 6.3          | 27.7         | 5500                    | 1500                 | 9.5  |
| 22                                            | 1.00         | 32.50                                 | 0.965             | 118           | 48            | 0.8               | 16.89                       | 16.3          | 6200          | 83           | 4.4          | 27.5         | 6000                    | 1300                 | 9.5  |
| 24                                            | 1.01         | 31.00                                 | 1.005             | 102           | 54            | 1.2               | 13.4                        | 20.4          | 6065          | 82           | 4.9          | 27.9         | 6000                    | 1300                 | 9.6  |
| 26                                            | 1.02         | 29.00                                 | 1.0175            | 259           | 132           | 4.01              | 52.8                        | 30.2          | 5920          | 79           | 4.0          | 27.9         | 6000                    | 1300                 | 10   |
| 28                                            | 1.01         | 27.50                                 | 0.991             | 205           | 122           | 2.4               | 25.4                        | 23.7          | 5660          | 72           | 4.4          | 28.1         | 6000                    | 1200                 | 10.1 |
| 30                                            | 0.97         | 28.00                                 | 0.98              | 215           | 102           | 1.5               | 32.5                        | 22.5          | 6425          | 62           | 4.4          | 28.2         | 5000                    | 1400                 | 9.8  |