ผลผลิตชีวมวลและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222

Biomass Production and Wastewater Treatment Efficiency of Spirulina TISTR 8222

ธีระพงษ์ บ้างบุญเรือง*
ประวิทย์ คงจันทร์**
นุชนาถ แช่มช้อย***

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยในการเพาะเลี้ยง ปริมาณผลผลิตชีวมวลที่ได้จากการเพาะเลี้ยง ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย และวิธีการเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา สายพันธุ์ TISTR 8222 โดยการศึกษาแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การเพาะเลี้ยงด้วยอาหารที่มีสารอินทรีย์ (ซีโอดี) เป็นส่วนประกอบในปริมาณ 120, 220 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) การทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้แบบจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบเปิดและแบบเปิดเติมอากาศ 4 ชุดทดลอง คือ ชุดทดลองแบบเปิดเติมอากาศที่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์ ชุดทดลองแบบเปิดที่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์ ชุดทดลองแบบเปิดเติมอากาศที่ใช้แสงธรรมชาติ และชุดทดลองแบบเปิดที่ใช้แสงธรรมชาติ 3) การศึกษาวิธีเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาด้วยวิธีจาร์เทส

จากผลการวิจัย พบว่า ปัจจัยหลักในการเพาะเลี้ยง ได้แก่ ปริมาณแสงสว่างในช่วง 3,620-3,980 ลักซ์ โดยไม่จำเป็นต้องมีแหล่งคาร์บอน และสามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ที่อุณหภูมิห้อง (26-30° องศาเซลเซียส) ซึ่งจากผลการทดลองเพิ่มแหล่งคาร์บอนในรูปของซีโอดี พบว่า ไม่สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาได้ โดยปริมาณผลผลิตชีวมวลเมื่อทำการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 27 วัน มีค่าเท่ากับ 1,731, 1,996 และ 1,637 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการเพิ่มผลผลิตชีวมวล

*มหาบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

**อาจารย์ประจำคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

***อาจารย์ประจำคณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

เท่ากับ 52.0, 61.5 และ 47.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน สำหรับชุดการทดลองที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง 120, 220 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสามารถประมาณการปริมาณผลผลิตชีวมวลได้โดยใช้สมการเส้นตรงหลังจากทำการเพาะเลี้ยงได้ 5 วัน นอกจากนี้ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้ระบบบำบัดแบบเปิดและแบบเปิดเติมอากาศ เมื่อทำการบำบัดเป็นระยะเวลา 19 วัน โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อ พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีได้ ร้อยละ 80, 82, 87 และ 83 บำบัดทีเคเอ็นได้ ร้อยละ 84, 91, 89 และ 40 และบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ ร้อยละ 32, 38, 25, และ 43 สำหรับชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ร้อยละ 79, 78, 83 และ 86 บำบัดทีเคเอ็น ร้อยละ 85, 89, 80 และ 51 และบำบัดฟอสฟอรัส ร้อยละ 31, 0, 0 และ 22 สำหรับชุดการทดลองที่ 1-4 ตามลำดับ ทั้งนี้ จากการใช้การตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์และสารส้ม ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา พบว่า ปริมาณที่เหมาะสม คือ 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

คำสำคัญ : สาหร่ายสไปรูลินา การเพาะเลี้ยง การบำบัดน้ำเสีย

Abstract

This research is an experimental research. The purpose of the research was to study the cultivation factors, the obtained biomass production, the wastewater treatment efficiency, and the harvest biomass of *Spirulina* TISTR 8222. The study consisted of three parts ; 1) the cultivation by using of medium contains organics (COD) in 120, 220, and 320 mg/L. 2) the testing of wastewater treatment by using of wastewater treatment model in open system and open-aerated system including four sub model types such as the model of open-aerated with the additional of artificial light, the model of open system with the additional of artificial light, the model of open-aerated with the natural light, and the model of open system with the natural light. The third part is the study of *Spirulina* biomass harvesting using Jar-test technique.

From the results, it was found that the main factor for cultivation consisted of the light intensity in the range of 3,620-3,980 lux without any requirement for carbon source, and it could be cultivated under room temperature (26-30 $^{\circ}$C). The result of carbon source addition in term of COD revealed that it did not help to increase *Spirulina* biomass production. After 27 days of cultivation, the biomass production was achieved at 1,731,

1,996, and 1,637 mg/L with the growth rate of 52.0, 61.5, and 47.7 mg/L/d for the treatment of organics containing in cultivated medium of 120, 220, and 320 mg/L, respectively. The amount of biomass production could be predicted after 5 days of cultivation by using linear equation. Moreover, the study of wastewater treatment efficiency of *Spirulina* with the open and aerated-open treatment system showed that after 19 days of treatment using autoclaved wastewater, the COD removal of 80, 82, 87, and 83 percent, the TKN removal of 84, 91, 89, and 40 percent and the total phosphorus removal of 32, 38, 25, and 43 percent were achieved. For the treatment using non autoclaved wastewater, the COD removal of 79, 78, 83, and 86 percent, the TKN removal of 85, 89, 80, and 51 percent and the total phosphorus removal of 31, 0, 0, and 22 percent were observed for the treatment 1-4, respectively. Nevertheless, the testing of precipitation by ferric chloride and alum for harvesting of biomass production of *Spirulina* indicated that the appropriated dose was 150 and 200 mg/L.

Keywords : *Spirulina*, cultivation, wastewater treatment

บทนำ

จากปัญหามลภาวะในสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงขึ้นตามลำดับในปัจจุบัน ทำให้ทั้งภาครัฐและเอกชนเร่งค้นคว้า วิจัย และพัฒนาวิธีการต่าง ๆ เพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะการนำชีวมวล (biomass) มาใช้ประโยชน์ในการลดปัญหามลภาวะในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งสาหร่ายขนาดเล็กเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ด้วยตนเองคล้ายพืช และสามารถเพิ่มชีวมวลได้อย่างรวดเร็ว จึงได้รับความสนใจและถูกนำมาทดสอบหาศักยภาพในการใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม เช่น การวิจัยเพื่อนำสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (สาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Chlorella*) (วีระยุทธ รักษาศักดิ์และคณะ. 2555 : 25) การนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน เช่น สกัดน้ำมัน (สาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Dunaliella tertiolecta*) (Kishimoto. et al. 1994 : 479-482) ไบโอดีเซล (สาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Chlorella vulgaris*) (พนิดา รัตนพลที. 2552 : 71-72) และใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (สาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Spirulina* sp.) (สุจยา ฤทธิศร. 2551 : 52-53) เนื่องจากพบว่า สาหร่ายขนาดเล็ก *Spirulina* sp. มีศักยภาพในการลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียได้ดี โดยสาหร่ายขนาดเล็กที่มีการนำมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus quadricauda* และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina platensis* (Gantar, Obreht and Dalmacija. 1991 : 167-171) เป็นต้น นอกจากนี้

ยังพบว่าสาหร่ายขนาดเล็ก *Spirulina* sp. มีศักยภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียได้สูงถึงร้อยละ 52.74 และ 52.55 ตามลำดับ (สุจยา ฤทธิศร. 2551 : 52)

ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นในการศึกษาการเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มผลผลิตชีวมวลและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ในการลดมลพิษทางน้ำอย่างเป็นรูปธรรมต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา
2. เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาเมื่อทำการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา โดยใช้ระบบบำบัดแบบเปิดและแบบเปิดเติมอากาศ
4. เพื่อศึกษาวิธีเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขอบเขตของการวิจัย

1.1 การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา สายพันธุ์ TISTR 8222 ด้วยอาหารที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในปริมาณต่ำ ปานกลาง และปริมาณสูง แล้วทำการวัดปริมาณผลผลิตชีวมวลที่เพิ่มขึ้น และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินาด้วยระบบบำบัดแบบเปิดและแบบเปิดเติมอากาศ โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 ของโรงงานผลิตอาหารสัตว์ (ปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 376 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยไม่ได้ทำการเจือจางและเติมสารอาหารลงในน้ำเสียดังกล่าว รวมทั้งศึกษาวิธีการเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กดังกล่าว

1.2 แบ่งการทดลองเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ศึกษาปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา เมื่อทำการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในปริมาณต่าง ๆ ช่วงที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา และช่วงที่ 3 ศึกษาวิธีเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาด้วยวิธีจาร์เทส (jar test)

1.3 สถานที่ทำการศึกษา ห้องปฏิบัติการอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ วิทยาเขตบางพลี

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการศึกษา ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2556 – มีนาคม พ.ศ. 2558

2. ขั้นตอนและวิธีการศึกษา

2.1 การศึกษาแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่าย

สไปรูลินา 2) การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา และ 3) การศึกษาวิธีเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ใช้อาหารสูตรซาร์รุค (Zarrouk's medium) ที่มีการเติมสารอินทรีย์ (กลูโคส) ในรูปของซีโอดี (COD; chemical oxygen demand) 120 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับชุดทดลองที่ 1 และเพิ่มสูงขึ้นเป็น 220 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทำการเพาะเลี้ยงในขวดรูปชมพู่ขนาด 1 ลิตร โดยทำการเติมอากาศเป็นเวลา 30 นาที จำนวน 3 รอบ/วัน ให้แสงสว่างด้วยแสงประดิษฐ์ ในช่วง 3,650-3,980 ลักซ์ (lux) และเก็บตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณผลผลิตชีวมวลที่เพิ่มขึ้น 2-3 ครั้ง/สัปดาห์

ส่วนที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา ใช้แบบจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบเปิดและแบบเปิดเติมอากาศ 4 ชุดทดลอง คือ 1) ชุดทดลองแบบเปิดเติมอากาศที่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์ (T1: light + aeration) 2) ชุดทดลองแบบเปิดที่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์ (T2: light + no aeration) 3) ชุดทดลองแบบเปิดเติมอากาศที่ใช้แสงธรรมชาติ (T3: no light + aeration) และ 4) ชุดทดลองแบบเปิดที่ใช้แสงธรรมชาติ (T4: no light + no aeration)

โดยในแต่ละชุดทดลองมีชุดควบคุม เพื่อใช้เปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติกับการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่ายสไปรูลินา ดำเนินการจำลองระบบบำบัดโดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 1 ลิตร และทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง 28± 2 องศาเซลเซียส

ส่วนที่ 3 การเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาจากการเพาะเลี้ยงด้วยวิธีจาร์เทส

2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง ใช้วิธีวิเคราะห์ตาม APHA; American Public Health Association (APHA. 1998) โดยทำการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย ดังนี้

2.2.1 ตัวอย่างจากการเพาะเลี้ยง ได้แก่ ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS; total suspended solid) ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (VSS; volatile suspended solid) ค่าทีเคเอ็น (TKN; total kjeldahl nitrogen) ค่าซีโอดี ค่าพีเอช (pH) และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP; total phosphorus)

2.2.2 ตัวอย่างจากชุดทดลองบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ค่าทีเคเอ็น ค่าซีโอดี ค่าพีเอช และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด

2.2.3 ตัวอย่างจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวล ได้แก่ ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย และค่าพีเอช

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 วิเคราะห์ข้อมูลผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา โดยใช้ค่าปริมาณการเพิ่มขึ้นในรูปของค่า TSS

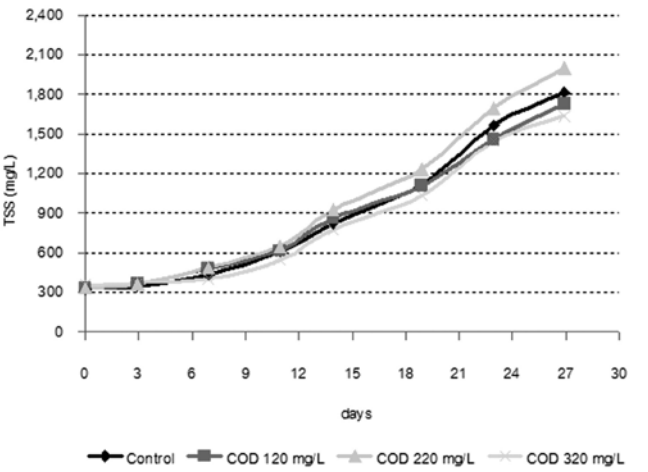
3.2 วิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา โดยใช้ค่าร้อยละของการบำบัดซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมด

4. สถิติที่ใช้ในการวิจัย คือ สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าร้อยละ

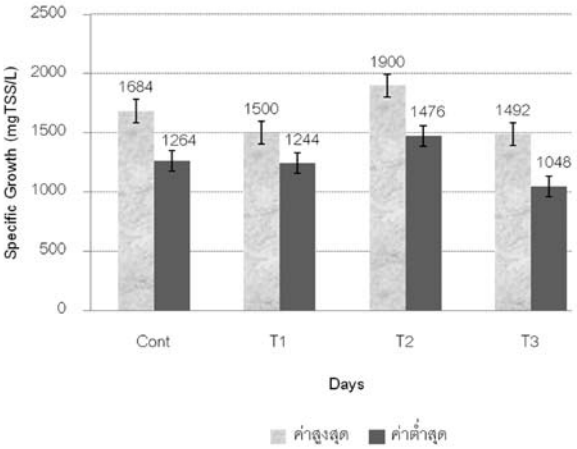
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. การศึกษาปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย สไปรูลินา TISTR 8222 โดยใช้อาหารสูตรซาร์รุคที่มีการเติมสารอินทรีย์ (กลูโคส) โดยให้มีค่าซีโอดีเป็น 120, 220, และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดการทดลองที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กดังกล่าวในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 27 วัน ภายใต้อุณหภูมิห้อง (26-30 องศาเซลเซียส) ความเข้มของแสง (แสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์) ที่ช่วงความเข้ม 3,620-3,980 ลักซ์ และการเติมอากาศเป็นช่วง ๆ ละ 30 นาที จำนวน 3 รอบต่อวัน พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของทั้งสามชุดการทดลอง มีค่า 1,731, 1,996 และ 1,637 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของชุดควบคุมที่ใช้อาหารสูตรซาร์รุคโดยไม่มีการเติมสารอินทรีย์ในการเพาะเลี้ยง มีค่าเท่ากับ 1,814 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 1) อย่างไรก็ตาม หลังจากทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเป็นระยะเวลา 27 วัน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินาที่ทำการเพาะเลี้ยงในทุกชุดการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (รูปที่ 2)

รูปที่ 1 ปริมาณผลผลิตชีวมวลจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222



รูปที่ 2 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222



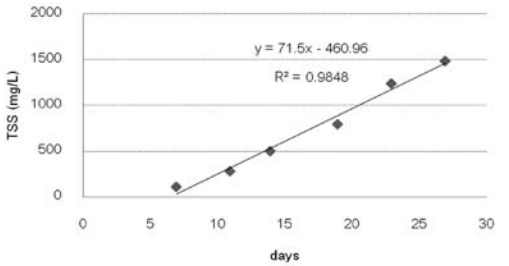
จากการคำนวณอัตราการเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาสายพันธุ์ที่ใช้ในการทดลอง พบว่า มีค่า 52.0, 61.5 และ 47.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน สำหรับชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุม มีค่า 55.4 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน (ตารางที่ 1) โดยมีสมการที่ใช้ประมาณการปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ ในกรณีที่ใช้อาหารเพาะเลี้ยงสูตรชาร์รุคแบบปกติ (รูปที่ 3ก; $y = 71.5x - 460.96$; $R^2 = 0.9848$) และในกรณีที่มีสารอินทรีย์ (กลูโคส) เป็นส่วนประกอบในอาหารเพาะเลี้ยงสูตรชาร์รุคในปริมาณต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 3ข; $y = 63.996x - 362.61$; $R^2 = 0.9863$) 220 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 3ค; $y = 78.029x - 482.81$; $R^2 = 0.9854$) และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 3ง; $y = 64.82x - 463.9$; $R^2 = 0.9849$) โดยสมการดังกล่าวนี้สามารถใช้ประมาณการปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาได้ภายหลังจากทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งเป็นช่วง lag phase ที่สาหร่ายมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยง โดยในระยะนี้สาหร่ายไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์

ตารางที่ 1 อัตราการเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กสไปรูลินา TISTR 8222

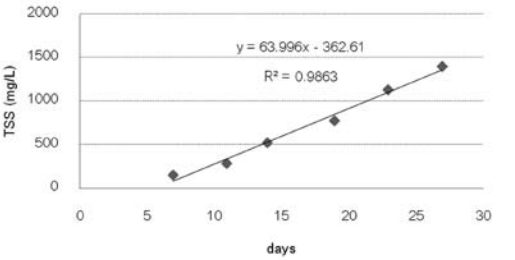
	อาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง			
	ชุดควบคุม (ชาร์รุค)	**ชาร์รุค + COD 120 mg/L**	**ชาร์รุค + COD 220 mg/L**	**ชาร์รุค + COD 320 mg/L**
อัตราการเพิ่มผลผลิต* (growth rate, mg/L/d)	55.4	52.0	61.5	47.7

**เพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 27 วัน*

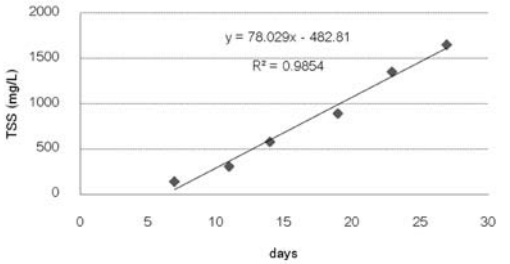
รูปที่ 3 สมการแสดงอัตราการเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222



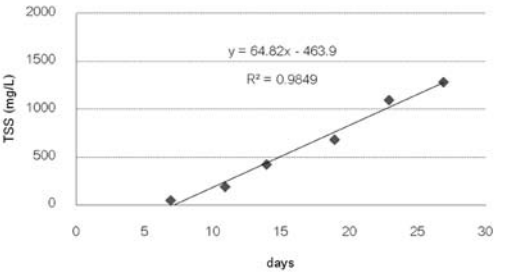
(ก) Control



(ข) COD 120 mg/L



(ค) COD 220 mg/L

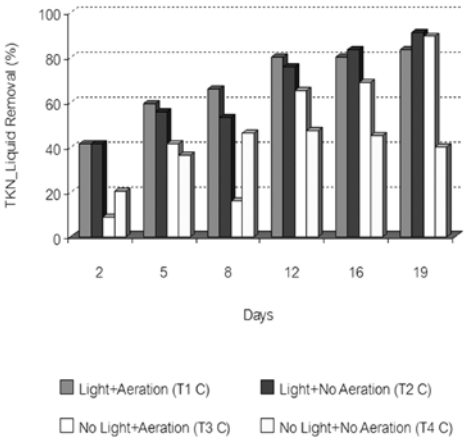


(ง) COD 320 mg/L

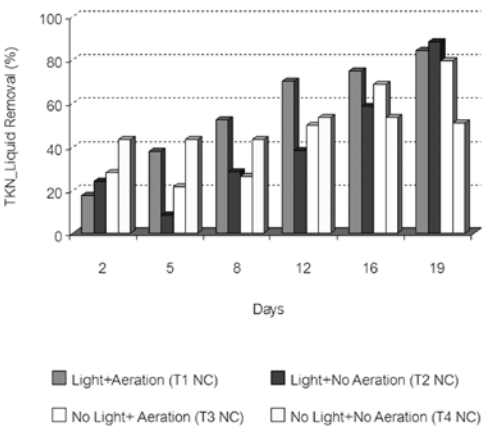
2. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222

2.1 การลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสีย จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222 เป็นระยะเวลา 19 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่สามารถบำบัดไนโตรเจนโดยพิจารณาจากค่าทีเคเอ็นได้มากที่สุด คือ ชุดการทดลองที่ 2 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด ร้อยละ 91 ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 4 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 40 และสำหรับชุดการทดลองที่ 3 และชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัด ร้อยละ 89 และ 83 ตามลำดับ (รูปที่ 4ก) นอกจากนี้ ในชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ พบว่า เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบำบัด (19 วัน) ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนมีลักษณะเช่นเดียวกัน (รูปที่ 4ข)

รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของสาหร่ายสไปรูลินาในแต่ละชุดทดลอง



(ก) น้ำเสียผ่านการ autoclave



(ข) น้ำเสียไม่ผ่านการ autoclave

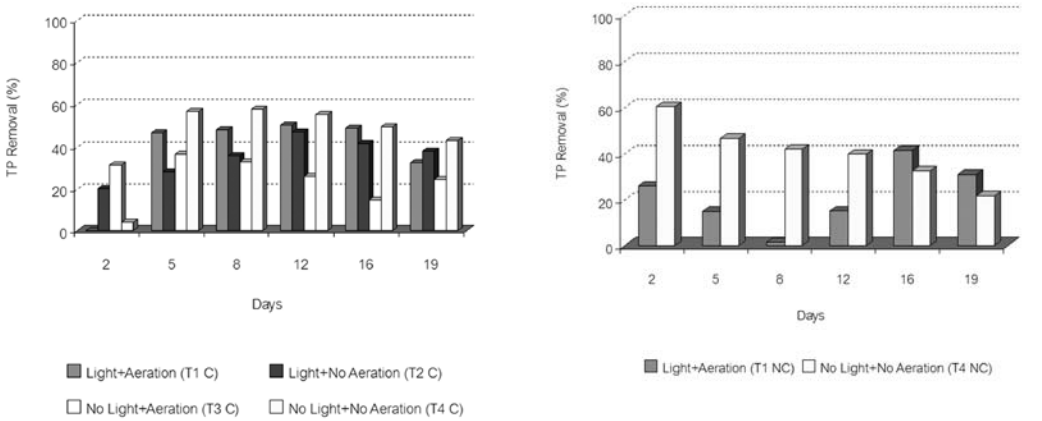
โดยทั่วไป การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยสาหร่ายขนาดเล็กส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ (assimilation) ของสาหร่ายขนาดเล็ก สังเกตได้จากการลดลงของปริมาณไนโตรเจนในทุกชุดการทดลอง ทั้งนี้ การเพิ่มแสงประดิษฐ์ในชุดการทดลองที่ 2 ส่งผลให้สาหร่ายสไปรูลินาสามารถสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น โดยการใช้สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหาร และทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียของชุดการทดลองดังกล่าวมีค่าสูง และเนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กสามารถใช้ไนเตรท (nitrate) ที่เกิดจากกระบวนการ ไนตริฟิเคชั่น (nitrification process) เป็นอาหารได้โดยตรง จึงเป็นเหตุให้ชุดทดลองที่มีการเติมอากาศและใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ (รูปที่ 4ข) มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนสูงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสียในรูปของแอมโมเนีย ยังสามารถเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียอิสระ และถูกขับออกจากน้ำเสียไปสู่บรรยากาศได้โดยกระบวนการเปลื้องแอมโมเนีย (ammonia stripping) สอดคล้องกับค่าพีเอชในทุกชุดการทดลองที่มีค่าสูงตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าระหว่าง 9.82-9.84 (SD = 0.06-0.08), 9.83-9.85 (SD = 0.04), 9.84 (SD = 0.02-0.04), และ 9.80-9.84 (SD = 0.03-0.07) ในชุดการทดลองที่ 1-4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม กระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) ที่จัดเป็นกระบวนการหลักในการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสีย ไม่จัดเป็นกระบวนการบำบัดไนโตรเจนสำหรับการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ของสาหร่ายสไปรูลินาในทุกชุดการทดลอง เป็นปัจจัยที่ยับยั้งไม่ให้เกิดกระบวนการดังกล่าวขึ้น

2.2 การลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสีย หลังจากทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222 เป็นระยะเวลา 19 วัน พบว่า ทุกชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อสามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ระหว่างร้อยละ 37-58 โดยชุดการทดลองที่ 4 เป็นชุดการทดลองที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้สูงที่สุด (รูปที่ 5ก) ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ มีเพียงบางชุดการทดลองที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ คือ ชุดการทดลองที่ 4 และชุดการทดลองที่ 1 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ร้อยละ 60 และ 43.86 ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ไม่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดออกจากน้ำเสียได้ (รูปที่ 5ข)

การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยทั่วไปเกิดขึ้นได้จากกลไกการตกตะกอน (precipitation) การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึมและนำไปใช้ (uptake) (Zuthi. et al. 2013: 367-368) โดยในการศึกษาครั้งนี้ สาหร่ายสไปรูลินาสามารถดูดซึมและนำฟอสฟอรัสไปใช้ได้เพียงบางส่วน เนื่องจากยังคงเหลือฟอสฟอรัสปริมาณหนึ่งในน้ำทิ้งจากระบบ อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเพียง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่สาหร่ายขนาดเล็กจะนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต ซึ่งผลการศึกษาการบำบัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อ (รูปที่ 5ก) ชี้ให้เห็นว่า สาหร่ายขนาดเล็กมีการนำฟอสฟอรัสบางส่วนไปใช้ โดยที่การเพิ่มแสงประดิษฐ์และการเติมอากาศเพิ่มเข้าไปในระบบ ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณการนำฟอสฟอรัสไปใช้ของสาหร่ายสไปรูลินา ดังจะเห็นได้จากชุดการทดลองที่มีการนำฟอสฟอรัสทั้งหมดไปใช้ในปริมาณสูงที่สุด คือ ชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการบำบัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มแสงประดิษฐ์ไม่ได้ช่วยให้การนำฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ของสาหร่ายสไปรูลินาเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากชุดการทดลองที่ 2 ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 4 สามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ (รูปที่ 5ข) และจากการที่ชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่ใช้แสงสว่างตามธรรมชาติและมีการเติมอากาศเพิ่มเข้าไปในระบบ ไม่สามารถบำบัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ แต่ชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด ทำให้ได้ข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า การบำบัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อดังกล่าวนี้ อาจมาจากการบำบัดร่วมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากการเติมอากาศเพิ่มเข้าไปในระบบในชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งใช้แสงสว่างจากธรรมชาติโดยไม่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์ อาจส่งผลให้เกิดการขัดขวางกลไกการตกตะกอน ของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย และยับยั้งการทำงานร่วมของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่กำจัดฟอสฟอรัส (anaerobic bacteria) ในขณะที่การบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อในชุดการทดลองที่ 1 (รูปที่ 5ข) อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่ม

แสงประดิษฐ์เข้าไปในระบบที่มีการเติมอากาศ เป็นการช่วยปรับสภาพแวดล้อมให้มีความเหมาะสมมากขึ้นสำหรับการทำงานของสาหร่ายสไปรูลินา (3,610-3,880 ลักซ์, อุณหภูมิ 28-30 องศาเซลเซียส) จึงส่งผลให้เกิดการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้บางส่วนในชุดการทดลองดังกล่าว

รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดของสาหร่ายสไปรูลินาในแต่ละชุดทดลอง



(ก) น้ำเสียผ่านการ autoclave (ข) น้ำเสียไม่ผ่านการ autoclave

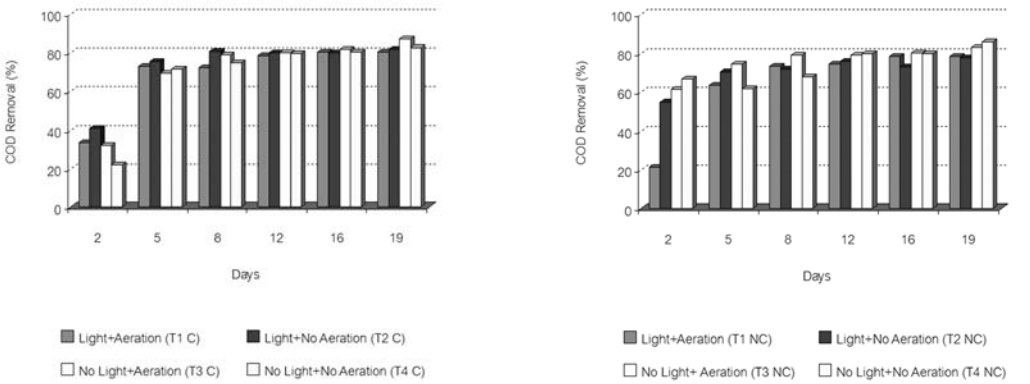
2.3 การลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ผ่านการ autoclave สูงที่สุด คือ ชุดการทดลองที่ 3 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 87 (รูปที่ 6ก) ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการ autoclave พบว่า ชุดการทดลองที่สามารถบำบัดได้สูงที่สุด คือ ชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 86 โดยในชุดการทดลองที่ 2 ที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการ autoclave มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 78 (รูปที่ 6ข)

ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกบำบัดต่อผลผลิตชีวมวลจากการบำบัดร่วมของสาหร่ายสไปรูลินาและแบคทีเรียในระบบตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งผลจากการนำสารอินทรีย์ไปใช้ของสาหร่ายสไปรูลินาและการบำบัดสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย แสดงในรูปของผลผลิตชีวมวลร่วม (integrated biomass) ที่วัดในรูปของแข็งแขวนลอยทั้งหมด โดยพบว่า ในชุดทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีค่าดังกล่าวสูงกว่า (มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูงกว่า) ในชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยมีสัดส่วนสูงสุดเท่ากับ 1.52 และ 0.96, 1.79 และ 0.71, 1.9 และ 1.75, 1.39 และ 1.1 mgCOD/mgTSS/L.d สำหรับชุดทดลองที่ 1-4 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินาดังกล่าวข้างต้น ชี้ให้เห็นว่า การบำบัดที่เกิดขึ้นใน

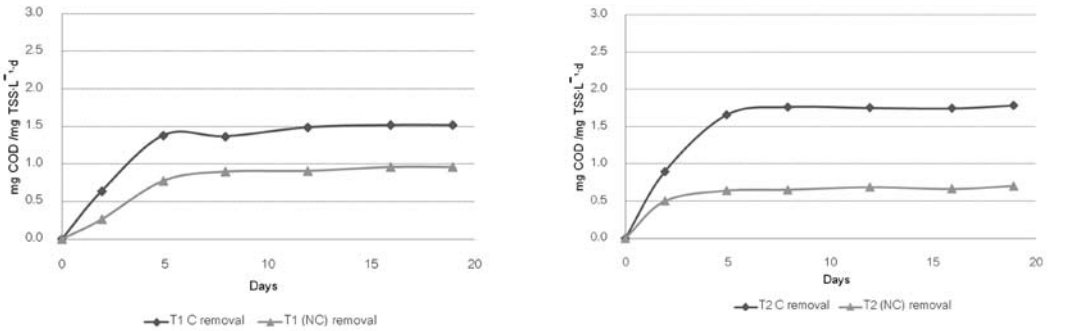
ระบบเป็นการบำบัดร่วมระหว่างสาหร่ายสไปรูลินาและแบคทีเรียในระบบ โดยแบคทีเรียในระบบมาจากแบคทีเรียที่ปนมากับน้ำเสียที่ใช้ทดลอง แบคทีเรียในอากาศที่ปนเปื้อนเข้ามาในระบบระหว่างการทดลองเนื่องจากระบบบำบัดเป็นระบบเปิด และอาจเกิดการปนเปื้อนเข้ามาในระบบในระหว่างการเติมอากาศได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มการเติมอากาศเข้าไปในระบบ ไม่ช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสไปรูลินา น่าจะเพียงพอสำหรับแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน ทั้งนี้ การบำบัดสารอินทรีย์ของสาหร่ายขนาดเล็กมาจากการใช้สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น กลูโคส และอะซิเตต (acetate) ตามความสมดุลของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของสาหร่ายสไปรูลินาในแต่ละชุดทดลอง

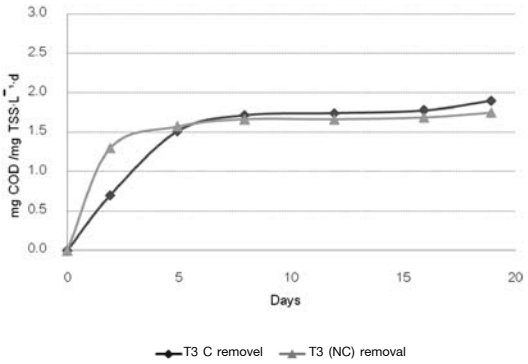


(ก) น้ำเสียผ่านการ autoclave (ข) น้ำเสียไม่ผ่านการ autoclave

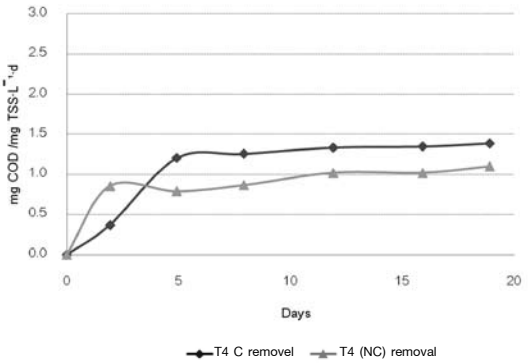
รูปที่ 7 ปริมาณซีโอดีต่อผลผลิตชีวมวลในระบบบำบัดตลอดระยะเวลาการทดลอง



(ก) T1; ชุดทดลองแบบเปิดเติมอากาศที่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์ (ข) T2; ชุดทดลองแบบเปิดที่มีการเพิ่มแสงประดิษฐ์



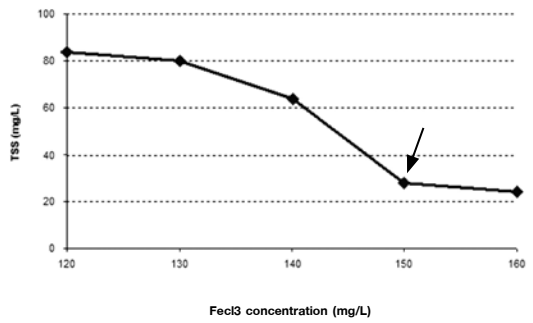
(ค) T3; ชุดทดลองแบบเปิดเติมอากาศที่ใช้แสงธรรมชาติ

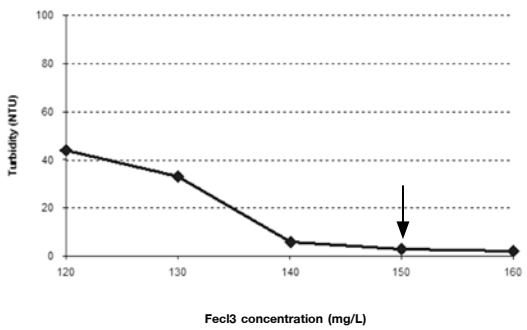


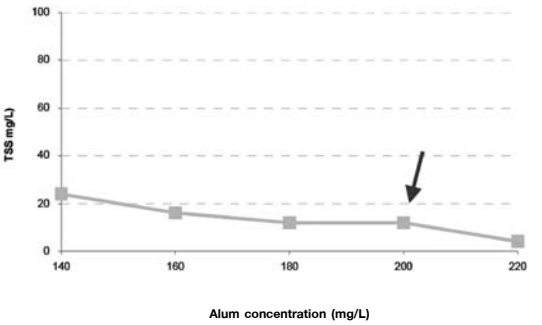
(ง) T4; ชุดทดลองแบบเปิดที่ใช้แสงธรรมชาติ

3. การเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222 หลังจากทำการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กดังกล่าวด้วยวิธีจาร์เทส โดยเลือกใช้ $FeCl_3$ และ alum ซึ่งพบว่า ปริมาณ $FeCl_3$ และ alum ที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาที่วัดในรูปของปริมาณการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและค่าความขุ่น มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 8ก) ในขณะที่ต้องใช้ปริมาณ alum สำหรับการตกตะกอนมากกว่า คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 8ข)

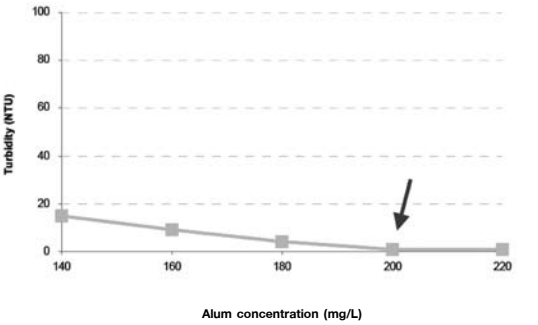
รูปที่ 8 การเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222 ด้วยวิธีจาร์เทส







(ก) โดย $FeCl_3$



(ข) โดย alum

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา TISTR 8222 ในครั้งนี้ พบว่า ปัจจัยหลักในการเพาะเลี้ยง ได้แก่ ปริมาณแสงสว่าง (3,620-3,980 ลักซ์) ซึ่งมีความจำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อการผลิตผลผลิตชีวมวล โดยไม่จำเป็นต้องมีแหล่งคาร์บอน ซึ่งจากการทดลองเพิ่มแหล่งคาร์บอนในรูปของสารอินทรีย์ พบว่า ไม่สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาได้ นอกจากนี้ ธาตุอาหารรองก็มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ เกลือแร่ต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง (อาหารสูตรชาร์รุค) และสามารถทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาได้ที่อุณหภูมิห้อง (26-30 องศาเซลเซียส)

ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 27 วัน มีค่าเท่ากับ 1,731, 1,996 และ 1,637 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีอัตราการเพิ่มผลผลิตชีวมวล เท่ากับ 52.0, 61.5 และ 47.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน สำหรับชุดการทดลองที่มีสารอินทรีย์ (ซีโอดี) เป็นส่วนประกอบในอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง 120, 220 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มสารอินทรีย์ในอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินาที่ใช้ในการทดลอง

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายสไปรูลินาร่วมกับแบคทีเรีย โดยใช้ระบบบำบัดแบบเปิดและแบบเปิดเติมอากาศ เมื่อทำการบำบัดเป็นระยะเวลา 19 วัน โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ได้แก่ การลดปริมาณสารอินทรีย์ มีค่าร้อยละ 80, 82, 87 และ 83 การลดปริมาณไนโตรเจน มีค่าร้อยละ 84, 91, 89 และ 40 และการลดปริมาณฟอสฟอรัส มีค่าร้อยละ 32, 38, 25 และ 43 สำหรับชุดการทดลองที่ 1-4 ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ มีประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ การลดปริมาณสารอินทรีย์ มีค่าร้อยละ 79, 78, 83 และ 86 การลดปริมาณไนโตรเจน มีค่าร้อยละ 85, 89,

80 และ 51 และการลดปริมาณฟอสฟอรัส มีค่าร้อยละ 31, 0, 0 และ 22 สำหรับชุดการทดลองที่ 1-4 ตามลำดับ

การเก็บเกี่ยวผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลินา โดยการตกตะกอนด้วย $FeCl_3$ และ alum ควรใช้สารเคมีดังกล่าวในปริมาณที่เหมาะสม ได้แก่ 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา มีปัจจัยที่สำคัญ คือ สารอาหารและแสงสว่าง โดยนอกจากสารอาหารหลักแล้ว สารอาหารรองก็มีความจำเป็นในการช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตชีวมวล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้ประโยชน์สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อการบำบัดน้ำเสีย การเติมสารอาหารรองจะช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วย

2. ควรทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดร่วมระหว่างสาหร่ายขนาดเล็กและแบคทีเรียในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติม เพื่อประโยชน์ทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

พนิดา รัตนพลที. (2552) **การประยุกต์ใช้สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตไบโอดีเซล.** วิทยานิพนธ์ วท.ม. (สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ) ขอนแก่น : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วีระยุทธ รักษาศักดิ์ และคณะ. (2555) "การเร่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กโดยการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์" **วารสารวิศวกรรมศาสตร์.** 3 (4) หน้า 15-26.

สุจยา ฤทธิศร. (2551) **การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายเกลียวทองเพื่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสุราแช่พื้นบ้าน.** ปทุมธานี : คณะวิทยาศาสต์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

APHA. (1998) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. Bultimore : United Book Press.

Gantar, M., Obreht, Z., and Dalmacija, B. (1991) "Nutrient removal and algal succession during the growth of *spirulina platensis* and scenedesmus quadricauda on swine wastewater" **Bioresource technology.** 36 (2) page 167-171.

Kishimoto, M., et al. (1994) "CO_2 Fixation and Oil Production Using Micro-Algae" **Journal of Fermentation and Bioengineering.** 6 (78) page 479-482.

Zuthi, M. F. R., et al. (2013) "Enhanced biological phosphorus removal and its modeling for the activated sludge and membrane bioreactor processes" **Bioresource Technology.** 139 page 363-374.