



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการบำบัด/ใช้ประโยชน์วัตถุพลอยได้จากการบำบัด
น้ำปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร

โดย ผศ.ดร.ศิราณี ศรีใส และคณะ

30 มิถุนายน 2546



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการบำบัด/ใช้ประโยชน์วัตถุพลอยได้จากการบำบัด
น้ำปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร

โดย ผศ.ดร.ศิริณี ศรีใส และคณะ

30 มิถุนายน 2546

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการบำบัด/ใช้ประโยชน์วัตถุพลอยได้จากการบำบัด
น้ำปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร

คณะผู้วิจัย

- ผศ.ดร.ศิริภาณี ศรีใส
- รศ.ดร.ปรีดา พากเพียร
- นายปริญญา นุ่มนวล
- นางสาวลัดดากร ประทุมรัตน์

สังกัด

- มหาวิทยาลัยมหิดล
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: PDF/35/2544

ชื่อโครงการ: การบำบัด/ใช้ประโยชน์วัตถุพลอยได้จากการบำบัดน้ำปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร

ชื่อนักวิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริราณี ศรีโส คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

E-mail Address: phssr@mahidol.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2544 ถึง 30 มิถุนายน พ.ศ. 2546

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม โดยวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง และทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบที่ละเท ที่ระดับความเข้มแสง 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ หลังจากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100 200 และ 300 ตัวต่อลิตร และศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่ระดับความเข้มแสง 3,000 4,000 และ 5,000 ลักซ์

ตรวจพบความสกปรกของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำทิ้งจากอาคาร ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. โดยมีปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นในน้ำทิ้ง 100 มก.ต่อลิตร พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งและการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value < 0.05) คือ ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ พบรอบระยะเวลาการเพาะเลี้ยงเท่ากับ 8 วัน การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. สูงสุดในวันที่ 4 ของการเพาะเลี้ยง ซึ่งวัดปริมาณน้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ได้ 356 และ 5.34 มก.ต่อลิตร และให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงร้อยละ 85 และ 83 ตามลำดับ

หลังจากนั้นนำน้ำทิ้งที่มีปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นในน้ำทิ้ง 300 มก.ต่อลิตร มาทำการเพาะเลี้ยงไรแดง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายและให้ผลผลิตไรแดงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value < 0.05) คือ ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัวต่อลิตรและที่ระดับความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างสาหร่ายต่อไรแดง เท่ากับ 3:1 ให้ผลผลิตไรแดงสูงสุด 36,600 ตัวต่อลิตรในวันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยง และเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เท่ากับ 9 และ 6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวมีมลสารน้อยลงและคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ควรที่จะมีการวิจัยในภาคสนามเพื่อประเมินประสิทธิผลการการเพาะเลี้ยงสาหร่ายและไรแดง รวมถึงการบำบัดน้ำทิ้งในภาพรวมต่อไป

คำหลัก: น้ำปฏิกูล สาหร่ายคลอเรลล่า ไรแดง

ABSTRACT

Project Code: PDF/35/2544

Project Title: Sustainable Treatment/Utilization of By-Products from BMR Septage Treatment

Investigator: Assistant Professor Siranee Sreesai, Mahidol University

E-mail Address: phssr@mahidol.ac.th

Project Period: July 1, 2001 to June 30, 2003

Factors affecting growth of *Chlorella sp.* in treated septage and the tertiary treatment efficiency for effluent from Nongkhaem Nightsoil Treatment Plant were studied. The treated septage was examined to determine the chemical properties. Batch cultures of *Chlorella sp.* were tested at light intensity provision of 3,000, 5,000, and 8,000 luxes. After that factors effecting *Chlorella sp.* removal efficiency by *M. macrocopa* at starting number of 100, 200 and 300 org./L and light intensity of 3,000, 4,000, and 5,000 luxes were studied.

The treated septage, before the tertiary treatment, contained higher pollutants when compared to the industrial effluent standard and building effluent standard. It was used for culturing *Chlorella sp.* with a starting quantity of 100 mg/L. Results showed that the statistical significant ($p\text{-value}<0.05$) factor influencing the treating efficiency and algal growth was at light intensity 8,000 luxes. Culturing *Chlorella sp.* at this settled laboratory had a culturing cycle of 8 days. *Chlorella sp.* had the maximum growth on the fourth day and the measured amount of algal biomass and chlorophyll were 356 and 5.34 mg/L, respectively. It could remove to Total Kjeldahl Nitrogen and total phosphorus 85% and 83%, respectively.

The treated septage effluent with concentration of *Chlorella sp.* 300 mg/L had been further treated by using *M. macrocopa* to eat up the *Chlorella sp.*. The results showed that the statistical significant ($p\text{-value}<0.05$) factor influencing *Chlorella sp.* removal efficiency and providing the highest *M. macrocopa* production were the starting number of *M. macrocopa* 100 org./L and light intensity provision 3,000 luxes. It was counted to a ratio of *Chlorella sp.* to *M. macrocopa* 3:1. The maximum production was occurred at the sixth day of culturing and received production of 36,600 org/L. This also resulted in 9% of TKN and 6% of TP additional removal efficiency. The effluent of treated septage after removal of *Chlorella sp.* by *M. macrocopa* had fewer pollutants and met the effluent standard quality. The study should be continued by running under field condition in order to evaluate *Chlorella sp.* and *M. macrocopa* culturing efficiencies together with effluent treatment as a whole.

Keywords: Septage wastewater, *Chlorella sp.*, *Moina macrocopa*

โครงการโดยสรุป (Executive Summary)

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เมืองใหญ่ที่มีประชากรหนาแน่นอย่างเช่นกรุงเทพมหานคร มีปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นมากมาย สิ่งปฏิภูลของชุมชนเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ เพราะหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง สามารถส่งผลให้แหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคต่าง ๆ และความเสี่ยงอื่น ๆ ตามมาอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่า สิ่งปฏิภูลจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยระบบบ่อเกรอะ-บ่อซึม มีความสกปรกของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดสูงเกินมาตรฐาน กล่าวคือ ความสกปรกในรูปอินทรีย์สาร (BOD) เท่ากับ 180 มก./ลิตร ของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 136 มก./ลิตร ไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 75 มก./ลิตร และฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับ 15 มก./ลิตร จึงมีความจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) เพื่อบำบัดให้น้ำทิ้งมีคุณภาพตามมาตรฐานก่อนปล่อยทิ้งและป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

การบำบัดน้ำทิ้งจากสิ่งปฏิภูลด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ โดยการเปลี่ยนความสกปรกในน้ำเสียให้อยู่ในรูปเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เช่น สาหร่าย เป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างยิ่ง จากการศึกษาของ Quiming L. (3) พบว่า สาหร่ายคลอเรลล่าสามารถเจริญเติบโตในน้ำทิ้งจากสิ่งปฏิภูลที่มีค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) เท่ากับ 30 มก./ลิตร ได้ปริมาณสูงถึง 3.1×10^6 เซลล์/มล. ผลการศึกษาของ Hammouda O. (22) พบว่า สาหร่ายสีเขียวอย่างเช่น *Scenedesmus* sp. และ *Chlorella vulgaris* สามารถลดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ BOD ในน้ำเสียลงได้ร้อยละ 91 และ ร้อยละ 84 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาของ สุรวดี นาคชน (5) พบว่า การเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำทิ้ง 8 วัน จะสามารถลด ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 77-86 และ 53-75 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Aziz M.A. (4) ซึ่งพบว่าการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ร่วมกับจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆในถังปฏิภูลตามสภาวะธรรมชาติในห้องทดลอง เพื่อบำบัดน้ำเสียจากชุมชน ที่ระยะเวลากักเก็บ 15 วัน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป BOD, COD, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสร้อยละ 88, 80, 60-70 และ 50-60 ตามลำดับ

เมื่อใช้สาหร่ายคลอเรลล่าในการบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังสามารถเก็บเกี่ยวและนำผลผลิตมาใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ เช่น นำมาทำปุ๋ย เป็นอาหารคนและสัตว์ เป็นแหล่งพลังงาน เป็นต้น ในทางกลับกันหากไม่มีการเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายดังกล่าวอาจส่งผลให้น้ำมีคุณภาพไม่ดีได้ โดยเซลล์สาหร่ายจะทำให้ความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ COD และสารแขวนลอยในน้ำเพิ่มขึ้น การเก็บเกี่ยวสาหร่ายมีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ตะแกรงละเอียด (Microscreen) การสร้างตะกอนและรวม

ตะกอน (Coagulation-flocculation) การทำให้ลอยด้วยการอัดอากาศ (Dissolved - air Floatation) การทำให้ตกตะกอนด้วยตัวเอง (Autoflocculation) เป็นต้น วิธีการกำจัดสาหร่ายเหล่านี้ต้องอาศัยทักษะของผู้ดำเนินการและมีต้นทุนสูง หรือแม้แต่การใช้ปลากำจัดสาหร่ายนั้นก็ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดความสกปรกในรูปสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเนื่องจากของเสียที่ปลาปล่อยออกมา และปลาบางชนิดเท่านั้นที่กินเพียงแต่สาหร่ายอย่างเดียว

การใช้ไรแดง (*Moina macrocopa*) เพื่อกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะไรแดงสามารถกินสาหร่ายคลอเรลล่าได้ในปริมาณมาก จากงานวิจัยของธิดา เพชรมณี (9) พบว่า ไรแดงสามารถกินสาหร่ายคลอเรลล่าได้ถึง $0.5-1.0 \times 10^6$ เซลล์/ตัว/วัน นอกจากนี้ไรแดงยังสามารถกำจัดสารแขวนลอย แบคทีเรีย และโปรโตซัว ในน้ำเสียได้ สาหร่ายคลอเรลล่าเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นอาหารของไรแดง เนื่องจากมีขนาดเล็กและให้โปรตีนสูง เจริญเติบโตได้รวดเร็ว และให้ออกซิเจนแก่ไรแดง และเป็นอาหารที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นขณะเลี้ยงด้วย (12) งานวิจัยของ Kawai H. (11) พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวน้ำเสีย 6 วัน ไรแดงสามารถกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าได้ถึงร้อยละ 99.99 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (BOD) ได้ร้อยละ 76 การเก็บเกี่ยวไรแดงจากน้ำเสียก็ทำได้ง่าย โดยนำไรแดงมาใช้ประโยชน์เป็นอาหารสำหรับสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยเฉพาะสัตว์น้ำเศรษฐกิจได้แก่ ปลาสวายงามต่าง ๆ ไรแดงมีราคาสูงถึงกิโลกรัมละ 50-120 บาท ดังนั้นเกษตรกรสามารถหารายได้เสริมจากการเพาะเลี้ยงไรแดงโดยวิธีดังกล่าวได้

การวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึง ศักยภาพในการบำบัด/ใช้ประโยชน์วัตถุพลอยได้จากการบำบัดสิ่งปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร โดยการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดสิ่งปฏิกูลด้วยสาหร่ายคลอเรลล่า และสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ไรแดงเพื่อกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลการศึกษาโดยใช้เทคโนโลยีอย่างง่ายและสามารถถ่ายทอดภูมิปัญญานี้แก่ประชาชนทั่วไปได้ จะเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนของประเทศได้เป็นอย่างดี

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมด้วยสาหร่ายคลอเรลล่า
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลล่าในน้ำทิ้งให้ได้ปริมาณสูงสุด
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไรแดงในการกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าที่ความลึกและระดับแสงแตกต่างกัน

4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกากและปริมาณผลผลิตไรแดงที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยว
5. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลด้วยสาหร่ายคลอเรลล่าและไรแดง

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ออกแบบการวิจัยเป็นแบบการทดลอง (Experimental Research Design) และรูปแบบการวิจัยเป็นแบบ Multiple Comparison Groups with Multiple Independent Variables โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

1. การศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลด้วยสาหร่ายคลอเรลล่า โดยทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์ และหาระยะเวลากักเก็บที่ทำให้สาหร่ายคลอเรลล่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งสูงสุดที่ความเข้มข้นแต่ละระดับ โดยนำน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลใส่ลงในถังปฏิกรณ์ 3 ถัง ให้มีปริมาตร 3,000 มล. ทำการวิเคราะห์ค่า COD, TKN, TP และ SS ก่อนเข้าระบบ นำไปวางบนชั้นเลี้ยงสาหร่ายที่มีความเข้มข้น 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์ ตั้งเวลาการเปิด-ปิดแสงเป็น 12 : 12 ชั่วโมง (เปิด:ปิด) ที่อุณหภูมิห้อง ให้อากาศผ่านปั๊มหัวทรายตลอด 24 ชั่วโมง วัดค่า pH และวัดค่าการเจริญเติบโตของสาหร่ายทุกวันด้วย OD₅₆₀ รวมทั้งวัดน้ำหนักแห้งของสาหร่าย ทำการวิเคราะห์ค่า COD, TKN, TP และ SS เมื่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (OD₅₆₀) มีค่าสูงสุด ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ (COD) , ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งก่อนและหลังการบำบัด เพื่อหาระดับความเข้มข้นและระยะเวลาเก็บกากที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด พร้อมกันนี้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของสาหร่ายคลอเรลล่าที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์หาค่า OD₅₆₀ และค่าน้ำหนักแห้งของสาหร่าย
2. นำสภาวะการทดลองที่ได้จากข้อที่ 1 ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในแต่ละระดับความเข้มข้นมาทำการทดลองซ้ำโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ทำการวิเคราะห์ค่า COD, TKN, TP และ SS และปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมที่สุดของน้ำทิ้งก่อนและหลังการทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการทดลองบำบัดด้วยไรแดงต่อไป
3. ทำการเลี้ยงไรแดงโดยนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดสิ่งปฏิกูล 5 ลิตรใส่ในภาชนะสำหรับเลี้ยงไรแดง เพื่อเลี้ยงสาหร่ายตามสภาวะที่เหมาะสมในข้อที่ 2 ต่อจากนั้นทำการจัดกลุ่มจำนวนไรแดงเริ่มต้น 3 ชุดการทดลอง โดยมีสัดส่วนปริมาณไรแดงเริ่มต้น 10, 20 และ 30 ตัว/น้ำ 100 มล. และแต่ละชุดการทดลองจะเปรียบเทียบระดับความลึกของการเลี้ยงไรแดงที่ 20, 30 และ 40 ซม. วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (COD), ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและปริมาณสาหร่ายคลอเรลล่า

ในน้ำที่ใช้เลี้ยงตั้งแต่วันที่เริ่มทำการทดลอง หาจำนวนไรแดงและปริมาณสาหร่ายคลอเรลล่า พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุก ๆ 2 วัน

4. นำสภาวะที่ได้จากข้อที่ 3 มาทำการทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาการเลี้ยงที่ให้ผลผลิตไรแดงต่อหน่วยสูงที่สุด และทำการวิเคราะห์หาปริมาณไรแดงที่เก็บเกี่ยวได้ทั้งหมดของแต่ละชุดการทดลอง เปรียบเทียบจำนวนไรแดงต่อหน่วย ปริมาณไรแดงที่เก็บเกี่ยวได้ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของแต่ละชุดการทดลอง

4. แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการในแต่ละช่วง 6 เดือน

กิจกรรมการวิจัย	ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย (เดือนที่)			
	1-6	7-12	13-18	19-24
1. ทบทวนวรรณกรรม				
2. สืบรวจภาคสนาม				
3. เตรียมอุปกรณ์การทดลองที่ 1				
- แบบจำลองการทดลองเบื้องต้น				
- อุปกรณ์และเครื่องมือทางห้องปฏิบัติการ				
- แบบจำลองการทดลองจริง				
4. ทำการทดลองที่ 1				
5. เตรียมอุปกรณ์การทดลองที่ 2				
- แบบจำลองการทดลองเบื้องต้น				
- อุปกรณ์และเครื่องมือทางห้องปฏิบัติการ				
- แบบจำลองการทดลองจริง				
6. ทำการทดลองที่ 2				
7. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล				
8. เขียนและจัดรายงาน				

5. ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์

- (1) บทความวิจัยเรื่อง Nutrients Uptake and Growth of *Chlorella* sp. in Treated Septage คาดว่าจะส่งผลงานเพื่อขอตีพิมพ์ใน J. WPCF ภายในเดือนกรกฎาคม 2546
- (2) บทความวิจัยเรื่อง Investigation of *Chlorella* sp. harvesting by *Moina macrocopa* คาดว่าจะส่งผลงานเพื่อขอตีพิมพ์ในวารสาร J. Environ. Sci. Health ภายในเดือนสิงหาคม 2546
- (3) บทความทางวิชาการเรื่อง การจัดการและการบำบัดสิ่งปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร คาดว่าจะส่งผลงานเพื่อขอตีพิมพ์ในวารสารกรุงเทพมหานคร ภายในเดือนกันยายน 2546

7. ผลการทดลองและอภิปรายการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล (1 ม.ค. 2545 – 30 เม.ย. 2545)

Parameter (mg/L)	Sampling time							
	1	2	3	4	5	6	mean	SD.
COD	1,620	1,610	1,440	1,250	1,020	1,120	1,343	253
TKN	163	120	122	133	128	135	133	15
TP	1.5	0.5	4.3	3.5	8.9	9.4	4.68	3.7
SS	2,000	1,200	1,800	2,500	3,200	3,300	2,333	823
pH	7.7	7.5	7.7	7.6	7.5	7.7	7.61	0.09

จากตารางที่ 1 พบว่าตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่เก็บได้จากระบบบำบัดมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง เนื่องจากเป็นช่วงที่ระบบบำบัดของโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมมีปัญหา กล่าวคือมีตะกอนขนาดใหญ่ปะปนออกมาค่อนข้างมากทำให้ตรวจวิเคราะห์ได้ค่า Suspended Solid และ COD สูง สภาพน้ำค่อนข้างขุ่น เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง 200 ลิตร จากนั้นจึงได้นำน้ำทิ้งมาทำการแยกของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ออกโดยการปั่นเหวี่ยง และเก็บรักษาห้องเย็นควบคุมอุณหภูมิ 4 °C

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูล

การศึกษากาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่ระดับความเข้มแสงแตกต่างกัน 3 ระดับคือ 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ โดยการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และน้ำหนักแห้งของสาหร่าย พบว่า สภาวะในการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มแสงทุกความเข้มแสง สาหร่าย *chlorella sp.* มีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 4 ของการทดลองซึ่งเป็นวันที่มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด หลังจากนั้นสาหร่ายจะค่อยๆลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว โดยให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ จะมีปริมาณ chlorophyll เป็น 4.16, 4.59 และ 5.34 mg/L ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ สาหร่าย *chlorella sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ดี เนื่องจากให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) มากที่สุด

ในทำนองเดียวกันกับค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง พบว่า สภาวะในการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มแสงทุกความเข้มแสง สาหร่าย *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 4 ของการทดลองซึ่งเป็นวันที่มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด หลังจากนั้นสาหร่ายจะค่อยๆลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว โดยให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ จะมีปริมาณสาหร่าย *Chlorella* sp. เป็น 277, 305 และ 356 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถเจริญเติบโตได้ดี เนื่องจากให้ปริมาณค่าน้ำหนักเซลล์แห้งมากที่สุด เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทางสถิติโดยใช้ Kruskal Wallis Test พบว่ามีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จึงสามารถกล่าวได้ว่า "สาหร่าย *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโตแตกต่างกันเมื่อให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงแตกต่างกัน"

แสงเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งจะเปลี่ยนสารต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปอินทรีย์สาร เมื่อเลี้ยงสาหร่ายในที่ที่มีความเข้มแสงคงที่ตลอดเวลาพบว่า เมื่อความเข้มแสงสูงขึ้นปริมาณเซลล์จะเพิ่มขึ้น (9) แสดงให้เห็นว่าแสงเป็นปัจจัยที่จำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่าย เมื่อสาหร่ายมีการเจริญเติบโตเพิ่มมากขึ้น จะมีความหนาแน่นของเซลล์สูงขึ้น จะเกิดการบังแสงกันเอง ทำให้จำนวนเซลล์ที่ไม่สัมผัสกับแสงมีมากขึ้น ทำให้สาหร่ายเริ่มตายลงเมื่อเวลาผ่านไป การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในห้องทดลองควรใช้แสงไฟจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งดีกว่าการใช้หลอดไฟธรรมดาหรือแสงแดด (10) เนื่องจากว่าอุณหภูมิของแสงประเภทอื่นมักสูงกว่าหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์

การศึกษาถึงระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มจำนวนเซลล์ได้ทุกระดับความเข้มแสงที่ทดลอง แต่ที่ระดับความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella* sp. มีการเพิ่มจำนวนน้อยที่สุด โดย Droop, MR. (11) กล่าวว่าระดับความเข้มแสงประมาณ 1,000 ลักซ์เป็นระดับความเข้มแสงต่ำมากที่สุด ที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Euglena* sp. แต่เป็นระดับความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาพันธุ์ ความเข้มแสงเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งในสาหร่าย *Chlorella* sp. จะมี Chlorophyll a และ Chlorophyll b เป็นตัวดูดซับแสงไว้เพื่อใช้เป็นพลังงาน ดังนั้นความเข้มแสงจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ควรที่จะนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

จากผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลโดยใช้สาหร่าย *Chlorella* sp. จะพบว่าแนวโน้มการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่เริ่มทำการทดลองจนมีค่าสูงสุดในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ ปริมาณไนโตรเจนลดลงเฉลี่ย 50, 53 และ 54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสลดลงเฉลี่ย 36, 44 และ 41 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทุกกลุ่มของการทดลอง เนื่องจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญและจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต และการสร้างเซลล์ใหม่ของสาหร่าย ธาตุไนโตรเจนที่สาหร่ายดูดซึมเข้าเซลล์ในรูปของสารออกซิไดซ์ (Oxidized form) เช่น Nitrate Nitrite จะต้องถูกเปลี่ยนรูปให้เป็น Ammonia ก่อน จากนั้นสาหร่ายจะนำแอมโมเนียมที่ได้ไปสร้างเป็นสารอินทรีย์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์สาหร่ายต่อไป ในทำนองเดียวกันกับธาตุฟอสฟอรัสซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการหลายอย่างของเซลล์สาหร่ายโดยเฉพาะกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพลังงานและการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) ซึ่งจะเกิดขึ้นในขบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายนั่นเอง โดยสารอนินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งได้แก่ ไตรไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO_4^-) และ ไตรไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$) ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นรูปฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เพื่อใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสง ในขณะที่สารอินทรีย์ฟอสเฟตจะต้องถูกย่อยสลายให้เป็นฟอสเฟตเสียก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้น ทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะถูกเซลล์สาหร่ายในน้ำทิ้งใช้ไป จนทำให้ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำทิ้งลดลง

ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ มีรอบระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง 8 วัน เจริญเติบโตได้สูงสุดในวันที่ 4 ของการเพาะเลี้ยง คิดเป็นปริมาณคลอโรฟิลล์และน้ำหนักแห้งของสาหร่าย *Chlorella sp.* เท่ากับ 5.34 และ 356 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสามารถลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ 54 และ 41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* โดยใช้ไรแดง

จากผลการวิจัยในส่วนที่ 1 ทำให้ทราบว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ดีสูงสุดในวันที่ 4 ของการทดลอง โดยมีปริมาณสาหร่ายคิดเป็น 356 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* จึงควบคุมให้มีปริมาณสาหร่ายตั้งต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่จำนวนไรแดงเริ่มต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้น

ผลการทดลองประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่พบว่าจำนวนไรแดงตั้งต้นไม่มีผลต่อผลผลิตจำนวนไรแดงทั้งหมด แต่เมื่อเปรียบเทียบในวันที่ 6 ของการทดลองพบว่าเมื่อมีปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร ผลผลิตไรแดงจะเท่ากับ 36,600, 26,667 และ 28,067 ตัว/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตรนั้นให้ผลผลิตไรแดงสูงที่สุด คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณ

สาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้นได้เท่ากับ 3:1 การศึกษาครั้งนี้ให้ผลคล้ายกับการศึกษาของหยกแก้ว และคณะ (12) ซึ่งใช้สาหร่ายสีเขียว (*Chlorella sp.*) ที่เลี้ยงในน้ำกากถั่วเหลืองเป็นเวลา 3 วัน เพื่อนำมาเลี้ยงไรแดงแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้ปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่ 15, 30 และ 45 ลิตรและเพาะเลี้ยงไรแดงที่ปริมาณไรแดงตั้งต้น 1.5, 3 และ 4.5 กรัม (น้ำหนักเปียก) พบว่า การเพิ่มปริมาณไรแดงตั้งต้นจาก 3.0 สามารถเพิ่มเป็น 4.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) หรือคำนวณเป็นจำนวนไรแดงเท่ากับ 200 เป็น 300 ตัว/ลิตร นั้นไม่ทำให้ผลผลิตไรแดงทั้งหมดแตกต่างกัน แต่การเพิ่มปริมาณอาหารจาก 30 เป็น 45 ลิตร หรือเทียบเท่ากับ ปริมาณสาหร่าย 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อผลผลิตไรแดง และได้แนะนำว่าปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงไรแดงในบ่อที่ใช้ปริมาตร 150 ลิตร ควรอยู่ระหว่าง 30-45 ลิตร (300-450 มิลลิกรัมต่อลิตร) และใช้ไรแดงเริ่มต้นประมาณ 3 กรัม (น้ำหนักสด) (200 ตัว/ลิตร) ในเวลาเพาะเลี้ยง 4 วัน จะให้ผลผลิตไรแดงสูงสุดเท่ากับ 100-137 กรัม (น้ำหนักเปียก) หรือ 6,667-9,134 ตัว/ลิตร คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้นเท่ากับ 2.25:1 เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตไรแดงกับการศึกษานี้พบว่า ปริมาณผลผลิตไรแดงที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้น 3:1 มีผลผลิตไรแดงสูงกว่า 4-5 เท่า ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากการที่มีปริมาณอาหารต่อไรแดงมากกว่าทำให้ไรแดงสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้สูงกว่า

จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าไรแดงมีการเจริญเติบโตสูงสุดเพียงครั้งเดียวหลังจากนั้นจะลดจำนวนลงซึ่งอัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตร จะให้ผลผลิตไรแดงสูงสุด 36,600 ตัว/ลิตรหรือคิดเป็น 366 เท่าของจำนวนไรแดงตั้งต้นจากการศึกษาของหยกแก้ว (13) โดยการใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงในน้ำเสียของโรงงานผลิตนมถั่วเหลืองสำหรับเพาะเลี้ยงไรแดง พบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 3 วันจนมีปริมาณสาหร่ายเข้มข้นเทียบเป็นค่า OD₅₆₀ เท่ากับ 0.4 จะให้ผลผลิตไรแดงสูงสุด 13,520 ตัว/ลิตร หรือคิดเป็น 135.6 เท่าของจำนวนไรแดงตั้งต้น ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถเปรียบเทียบผลผลิตไรแดงของแต่ละการศึกษาได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างในเรื่องของปัจจัยทางด้านอาหาร สภาวะแวดล้อม แต่จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าจำนวนไรแดงทั้งหมดที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตร หรือคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 3:1 ให้ผลผลิตไรแดงเป็นที่น่าพอใจ

อาหารของไรแดง ได้แก่ สาหร่าย และโปรโตซัว รวมทั้ง แบคทีเรีย และสารอินทรีย์ต่างๆ จะถูกไรแดงกิน โดยอาหารที่อยู่ในน้ำจะผ่านเข้าไปในทางเดินอาหาร (14,15) ไรแดงไม่เลือกชนิดของอาหาร โดยอาหารที่มีขนาดเล็กในน้ำเท่านั้นที่จะถูกกรองเข้าทางปาก จากการทดลองของวรการ (16) พบว่า ไรแดงสามารถกินถั่วป่นโดยตรงได้โดยกรองจากน้ำที่ใช้เลี้ยง การที่ไรแดงกินสาหร่าย *chlorella sp.* ส่งผลให้ปริมาณ suspended solids, OD₅₆₀ และ COD ลดลง (4, 17, 18, 19, 20)

สำหรับประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของ ค่า OD₅₆₀ ค่าของแข็งแขวนลอยและค่า COD ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าจำนวนไรแดงตั้งต้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ดังจะเห็นได้จากการทดลองที่พบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตรนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก โดยประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD₅₆₀ อยู่ในช่วง 73.33-78.86%, ค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 55.56-64.23% และค่า COD อยู่ในช่วง 38.38-43.35% ในวันที่ 5 ของการทดลอง และพบว่าการทดลองที่มีไรแดงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงกว่าการทดลองที่ไม่มีไรแดงในรูปของค่า OD₅₆₀ , ค่าของแข็งแขวนลอย (suspended solids) และ COD ประมาณ 25-30%, 7-16% และ 20-27% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณสาหร่ายมีการลดลงเช่นกัน โดยการลดลงดังกล่าวอาจเนื่องมาจากกิจกรรมของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทั้งรวมถึงการที่สาหร่ายตายและตกตะกอนไปเอง

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า suspended solids จะค่อนข้างต่ำกว่า ค่า OD₅₆₀ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการตรวจวัดปริมาณสาหร่ายในรูปของค่า OD₅₆₀ นั้นเป็นการใช้ค่าการดูดกลืนแสงสีเขียว ส่วนการวิเคราะห์ในรูปของค่า suspended solids เป็นการหาปริมาณสาหร่ายที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยโดยวิธีการกรองน้ำทิ้งด้วยกระดาษกรอง GF/C ซึ่งอาจมีของแข็งแขวนลอยที่มีอนุภาคใหญ่เกินกว่าที่ไรแดงจะสามารถกรองเข้าปากของมันได้ ซึ่งสัตว์จำพวก Zooplankton สามารถกินอาหารที่มีขนาดไม่เกิน 25 ไมครอน (21) ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในรูปของ suspended solids จึงยังอาจคงอยู่ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *chlorella* sp. ต่ำกว่าในรูปของค่า OD₅₆₀

ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD นั้นมีค่าต่ำกว่าการตรวจวัดในรูปของค่า OD₅₆₀ และ suspended solids ทั้งนี้เนื่องจากการตรวจวัดในรูปของค่า COD เป็นการตรวจวัดปริมาณสาหร่ายในรูปของสารอินทรีย์ ซึ่งในน้ำทิ้งอาจมีสารอินทรีย์ทั้งที่เป็นสาหร่ายและไม่ใช่สาหร่ายปะปนอยู่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไรแดงไม่สามารถกินได้ นอกจากนี้จะเห็นได้ก็กว่าหลังจากที่ปริมาณไรแดงลดลงแล้วประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของค่า COD ลดลงด้วยเนื่องจากการที่ไรแดงมีจำนวนหนาแน่นทำให้เกิดการขับถ่ายของเสียมีมากขึ้น ซึ่งของเสียดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า COD เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD จึงต่ำกว่าการตรวจวัดในรูปของค่า OD₅₆₀ และ suspended solids

สำหรับคุณลักษณะของน้ำทิ้งซึ่งทำการตรวจวัดในรูปของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) พบว่าจำนวนไรแดงตั้งต้นต่างกันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส โดยประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร ประสิทธิภาพใน

การกำจัดไนโตรเจน อยู่ในช่วง 60.73-73.18% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะอยู่ในช่วง 25.60-30.95% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีไรแดงแล้วพบว่า ไรแดงทำให้ ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและ ฟอสฟอรัส เพิ่มขึ้นประมาณ 9 และ 6 % ตามลำดับ

ในส่วนการทดลองความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย

Chlorella sp. นั้น พบว่าในช่วงแรก ๆ ไรแดงมีการเจริญเติบโตอย่างช้า ๆ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการปรับตัวของไรแดง หลังจากนั้นไรแดงจะเพิ่มจำนวนสูงสุดเพียงครั้งเดียวแล้วลดจำนวนลง ผล การทดลองพบว่าจำนวนผลผลิตไรแดงทั้งหมดที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \text{ value} < 0.05$) แสดงว่าแสงมีผลต่อจำนวนผลผลิตไรแดง ทั้งหมด

จะเห็นได้ว่าจำนวนไรแดงในความเข้มแสง 3,000 และ 4,000 ลักซ์ นั้นมีความใกล้เคียงกัน มาก ส่วนดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์นั้น มีจำนวนไรแดงต่ำสุด ความแตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการทดลอง เพราะเมื่อทำการวัดอุณหภูมิในในแต่ละดำรับการทดลอง แล้วพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์นั้น มีอุณหภูมิเท่ากับ 31.5, 32 และ 36 °C ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของไรแดงจะอยู่ในช่วง 24-31 °C (14) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำที่ระดับความเข้มแสง 3,000 ลักซ์นั้น ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเพาะเลี้ยงไรแดงมากที่สุด จึงอาจเป็นสาเหตุให้จำนวนไรแดงในดำรับการทดลองที่ ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ มากกว่าที่ความเข้มแสง 4,000 และ 5,000 ลักซ์ จากการศึกษาของ Jensen และคณะ (22) พบว่าไรแดงมีพฤติกรรมของการอพยพโดยไม่สนใจต่อปริมาณอาหาร เมื่อ ทำการทดลองการให้แสงที่แตกต่างกันที่ระดับผิวน้ำ Ratnayake (23) พบว่าแสงมีผลต่อการกระจาย ตัวของไรแดง โดยไรแดงมักจะชอบว่ายหลบแสงแดดเข้าไปอยู่รวมกันเป็นกลุ่มในเงามืดด้านล่างของ ภาชนะเลี้ยง Rottman (14) และคณะ แนะนำว่าในการเพาะเลี้ยงไรแดงนั้น ควรมีการให้ร่มเงา มากกว่า 1/3 ของพื้นที่ผิวน้ำ ดังนั้นแสงจึงมีผลต่อพฤติกรรมการว่ายน้ำและการกระจายตัวของไร แดง (24) ความเข้มแสงที่สูงเกินไปจะมีผลในการหยุดยั้งการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์รวมถึงการ เคลื่อนที่ของไรแดง (25)

เนื่องจากการทดลองครั้งนี้เป็นแบบทีละเท (Batch system) ดังนั้นในการเก็บเกี่ยวไรแดงจึง ควรกระทำเพียงครั้งเดียวในวันที่ไรแดงมีจำนวนสูงสุด คือ วันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยง เพราะจากการ สังเกตพบว่าหลังจากวันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยง ไรแดงจะเริ่มลดจำนวนลงและมีไรแดงที่ลำตัวพอม ยาว และซีดขาว เมื่อนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์จะพบว่าเป็นไรแดงเพศผู้ ซึ่งเป็นสัญญาณว่าเกิด สภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของไรแดง ซึ่งอาจเนื่องจากสภาวะขาด อาหาร, ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ไม่เหมาะสม, เกิดการสะสมของของเสียที่ขับถ่ายออกจากตัวไร แดง (8)

เอกสารอ้างอิง

1. Metcalf L. Eddy P. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse 3rd ed. Singapore: McGraw Hill; 1991.
2. Quiming L. Mass culture of water flea, *Moina macrocopa* (M.Sc thesis in Science). Bangkok: Asian Institute of Technology; 1988.
3. Hammouda O, Gaber A, Raouf A.N. Microalgae and wastewater treatment. Ecotoxicology & Environmental safety 1995; 31: 205-210.
4. Narkthon S. Nitrogen and phosphorus removal from piggery wastewater by green algae *Chlorella sp.* (M.Sc thesis in Environmental Technology). Bangkok: Faculty of Graduate Studies, Mahidol University; 1996.
5. Aziz MA, Ng WJ. Feasibility of wastewater treatment using the activated algae process. Bioresource Technol. 1992; 40: 205-208.
6. Pechmanee T, Assavaaree M, Boonchaui S. Possibility of using *Chlorella sp.* for *Moina* culture in Southern Thailand. Songkhla: National Institute of Coastal Aquaculture; 1993. Technical paper no. 16.
7. Taevaratmaneegul P, Viputanumas T, Suksawad T. Increasing the *Moina macrocopa* production with vitamins. Pathumthani province: Inland Fisheries Division. Department of Fisheries; 1989. Technical paper no. 11.
8. Kawai H, Juredini P, Neto JC, Motter OF, Rossetto R. The use of an algal microcrustacean polyculture system for domestic wastewater treatment. Wat Sci Tech 1987; 19 (12): 65-70
9. ยุวดี พรพิมลศาล. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่าย. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่, 2530.
10. ฝ่ายกำจัดสิ่งปฏิกูล กองควบคุมสิ่งปฏิกูล สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร, โรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม
11. ลัดดา วงศ์รัตน์. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. กรุงเทพฯ : ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
12. หยกแก้ว ยามาลีและสมบูรณ์ ผู้พัฒนา. การเลี้ยงไรแดงแบบกึ่งต่อเนื่องโดยใช้สาหร่ายสีเขียว (*Chlorella sp.*). สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
13. หยกแก้ว ยามาลี, สมบูรณ์ ผู้พัฒนา. การนำ *Chlorella sp.* ที่ได้จากการเลี้ยงในน้ำทิ้งโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลืองมาเลี้ยงไรแดง.สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

14. Rottmann W. R. Culture techniques of *Moina*: the ideal daphnia for feeding fish fry. http://edis.ifas.edu/BODY_FAO_24; 14/8/2000.
15. Pennak W. R. Fresh-water invertebrates of the United States: Protozoa to mollusca. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc; 1989.
16. วรากร วราอศฺวปติ. การทดลองเพาะเลี้ยงและการศึกษานิเวศวิทยาบางประการของไรน้ำ [ปริญญานิพนธ์ปริญญการศึกษามหาบัณฑิต] กรุงเทพมหานคร: วิทยาลัยวิชาการศึกษาประสานมิตร, 2514.
17. Becker WE. Algae mass cultivation-production and Utilization. Process Biochemistry Aug./Sept; 1996.
18. มาวิทย์ อศฺวอารีย์ และธิดา เพชรมณี. ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการเพิ่มจำนวนของคลอเรลล่าใน ห้องปฏิบัติการ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 5/2534. สถาบันวิจัยเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา, 2534.
19. Kawasaki YL, Silva TE, Gordon SM. Aquacultural approaches to recycling of dissolved nutrients in secondarily treated domestic wastewater I. Water Res 1982; 16:37-49.
20. Tredici RM, Margheri CM, Zittelli C. Nitrogen and phosphorus reclamation from municipal wastewater through an artificial food-chain system. Bioresource Technology 1992; 42: 247-253.
21. Smith WD. Wastewater treatment with complementary filter feeder: A new method to control excessive suspended solids and nutrients in stabilization ponds. Wat. Env. Res n.d; 65 (5): 650-654.
22. Jensen HK, Kleiven TO, Jakobsen. How important is light in the aggregation behaviour of *Daphnia pulex* (Cladocera: Crustacea). Hydrobiologia 1999; 411:13-18.
23. Ratnayake JKR. Studies of culture of *Moina Macrocopa* using organic and inorganic inputs (M.Sc. thesis in Science). Bangkok. Asian Institute of Technology; 1991.
24. Wetzel GR. Limnology. 2nd edition. Michigan State University. Saunders College Publishing; 1983.
25. Hutchinson EG, A treatise on limnology. Vol I. Introduction to lake biology and the limnoplankton. New York. John Wiley & Sons Inc.; 1967.

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เมืองใหญ่ที่มีประชากรหนาแน่นอย่างเช่นกรุงเทพมหานคร มีปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นมากมาย สิ่งปฏิภูลของชุมชนเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ เพราะหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง สามารถส่งผลให้แหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคต่าง ๆ และความเสี่ยอื่น ๆ ตามมาอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่า สิ่งปฏิภูลจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยระบบบ่อเกรอะ-บ่อซึม มีความสกปรกของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดสูงเกินมาตรฐาน กล่าวคือ ความสกปรกในรูปอินทรีย์สาร (BOD) เท่ากับ 180 มก./ลิตร ของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 136 มก./ลิตร ในโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 75 มก./ลิตร และฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับ 15 มก./ลิตร จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) เพื่อบำบัดให้น้ำทิ้งมีคุณภาพตามมาตรฐานก่อนปล่อยทิ้งและป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

การบำบัดน้ำทิ้งจากสิ่งปฏิภูลด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ โดยการเปลี่ยนความสกปรกในน้ำเสียให้อยู่ในรูปเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เช่น สาหร่าย เป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างยิ่ง จากการศึกษาของ Quiming L. (3) พบว่า สาหร่ายคลอเรลล่าสามารถเจริญเติบโตในน้ำทิ้งจากสิ่งปฏิภูลที่มีค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) เท่ากับ 30 มก./ลิตร ได้ปริมาณสูงถึง 3.1×10^6 เซลล์/มล. ผลการศึกษาของ Hammouda O. (22) พบว่า สาหร่ายสีเขียวอย่างเช่น *Scenedesmus sp.* และ *Chlorella vulgaris* สามารถลดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ BOD ในน้ำเสียลงได้ร้อยละ 91 และ ร้อยละ 84 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาของ สุรวดี นาคชน (5) พบว่า การเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่ระยะเวลาเก็บน้ำทิ้ง 8 วัน จะสามารถลดไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ได้ร้อยละ 77-86 และ 53-75 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Aziz M.A. (4) ซึ่งพบว่า การเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆในถังปฏิภูลตามสภาวะธรรมชาติในห้องทดลอง เพื่อบำบัดน้ำเสียจากชุมชน ที่ระยะเวลาเก็บ 15 วัน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป BOD, COD, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสร้อยละ 88, 80, 60-70 และ 50-60 ตามลำดับ

เมื่อใช้สาหร่ายคลอเรลล่าในการบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังสามารถเก็บเกี่ยวและนำผลผลิตมาใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ เช่น นำมาทำปุ๋ย เป็นอาหารคนและสัตว์ เป็นแหล่งพลังงาน เป็นต้น ในทางกลับกันหากไม่มีการเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายดังกล่าวอาจส่งผลให้น้ำมีคุณภาพไม่ได้ โดยเซลล์สาหร่ายจะทำให้ความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ COD และสารแขวนลอยในน้ำเพิ่มขึ้น การเก็บเกี่ยวสาหร่ายมีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ตะแกรงละเอียด (Microscreen) การสร้างตะกอนและ

รวมตะกอน (Coagulation-flocculation) การทำให้ลอยด้วยการอัดอากาศ (Dissolved - air Floatation) การทำให้ตกตะกอนด้วยตัวเอง (Autoflocculation) เป็นต้น วิธีการกำจัดสาหร่ายเหล่านี้ต้องอาศัยทักษะของผู้ดำเนินการและมีต้นทุนสูง หรือแม้แต่การใช้ปลากำจัดสาหร่ายนั้นก็ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดความสกปรกในรูปสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเนื่องจากของเสียที่ปลาปล่อยออกมา และปลาบางชนิดเท่านั้นที่กินเพียงแต่สาหร่ายอย่างเดียว

การใช้ไรแดง (*Moina macrocopa*) เพื่อกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะไรแดงสามารถกินสาหร่ายคลอเรลล่าได้ในปริมาณมาก จากงานวิจัยของธิดา เพชรมณี (9) พบว่า ไรแดงสามารถกินสาหร่ายคลอเรลล่าได้ถึง $0.5-1.0 \times 10^6$ เซลล์/ตัว/วัน นอกจากนั้นไรแดงยังสามารถกำจัดสารแขวนลอย แบคทีเรีย และโปรโตซัว ในน้ำเสียได้ สาหร่ายคลอเรลล่าเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นอาหารของไรแดง เนื่องจากมีขนาดเล็กและให้โปรตีนสูง เจริญเติบโตได้รวดเร็ว และให้ออกซิเจนแก่ไรแดง และเป็นอาหารที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหากลืนเหม็นขี้เณรเสียด้วย (12) งานวิจัยของ Kawai H. (11) พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวน้ำเสีย 6 วัน ไรแดงสามารถกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าได้ถึงร้อยละ 99.99 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (BOD) ได้ร้อยละ 76 การเก็บเกี่ยวไรแดงจากน้ำเสียก็ทำได้ง่าย โดยนำไรแดงมาใช้ประโยชน์เป็นอาหารสำหรับสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยเฉพาะสัตว์น้ำเศรษฐกิจได้แก่ ปลาสวายงามต่าง ๆ ไรแดงมีราคาสูงถึง กิโลกรัมละ 50-120 บาท ดังนั้นเกษตรกรสามารถหารายได้เสริมจากการเพาะเลี้ยงไรแดงโดยวิธีดังกล่าวได้

การวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึง ศักยภาพในการบำบัด/ใช้ประโยชน์วัตถุพลอยได้จากการบำบัดสิ่งปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร โดยการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดสิ่งปฏิกูลด้วยสาหร่ายคลอเรลล่า และสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ไรแดงเพื่อกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลการศึกษาโดยใช้เทคโนโลยีอย่างง่ายและสามารถถ่ายทอดภูมิปัญญาให้แก่ประชาชนทั่วไปได้ จะเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนของประเทศได้เป็นอย่างดี

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 โรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม (9)

ความเป็นมา

จากการที่ระดับน้ำใต้ดินในเขตกรุงเทพมหานครมีระดับสูง ระบบป่อเกรอะ-ป่อซึมของประชาชนไม่สามารถใช้การได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีการลักลอบต่อท่อระบายสิ่งปฏิกูลลงสู่ท่อสาธารณะจนก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ตลอดจนเพิ่มโอกาสให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคสูง กรุงเทพมหานครจึงได้จัดให้มีบริการขนถ่ายสิ่งปฏิกูล เพื่อนำมากำจัดให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ ซึ่งดำเนินการโดยฝ่ายขนถ่ายสิ่งปฏิกูล ส่วนการกำจัดสิ่งปฏิกูล ฝ่ายกำจัดสิ่งปฏิกูล กองควบคุมสิ่งปฏิกูล สำนักรักษาความสะอาดเป็นผู้ดำเนินการและได้รับอนุมัติให้ดำเนินการโครงการก่อสร้างโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลขึ้นที่บริเวณกองขยะหนองแขม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม โดยโรงงานนี้ประกอบด้วยอาคารสำนักงาน อาคารพัสดุ โรงจอดรถ บิ่อมยามรักษาการณ์ รั้วและเขื่อนกันดิน ระบบกำจัดสิ่งปฏิกูลทั้งที่อยู่ในสภาพน้ำเสียและกากตะกอน รวมทั้งสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ โรงงานนี้มีมูลค่าก่อสร้าง 139 ล้านบาทเศษ เนื้อที่ทั้งหมด 11 ไร่ เริ่มก่อสร้างเมื่อวันที่ 12 กันยายน พ.ศ.2532 และก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์เมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ.2534 กรุงเทพมหานครได้ว่าจ้าง กิจการร่วมค้าอะสะโนะเอนจิเนียร์ริ่ง คอมพานี ลิมิเต็ด และบริษัทอะสะโนะ เอนจิเนียร์ริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด เป็นผู้บริหารโรงงานควบคุมระบบและเดินเครื่องจักรกำจัดสิ่งปฏิกูลโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ในอัตราค่าจ้างลูกบาศก์เมตรละ 184 บาท กำหนดระยะเวลา 5 ปี ในวงเงิน 201,480,000 บาท เริ่มสัญญาเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ.2534 สิ้นสุดสัญญาจ้างเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ.2539 ในปัจจุบันกองควบคุมสิ่งปฏิกูล กรุงเทพมหานครเป็นผู้ควบคุมระบบและเดินเครื่องจักรกำจัดสิ่งปฏิกูลโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

ความสามารถในการดำเนินการ

โรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมสามารถรับสิ่งปฏิกูลได้ 600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งรับสิ่งปฏิกูลจากพื้นที่ 26 เขต ของกทม. โดยรับสิ่งปฏิกูลจากรถบรรทุกสิ่งปฏิกูลของกรุงเทพมหานคร รถบรรทุกสิ่งปฏิกูลของกรุงเทพมหานครมีประมาณ 40 คัน ซึ่งแต่ละคันมีความจุไม่เท่ากัน คือ มีความจุ 3, 5, 7 และ 12 ลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 2.1)

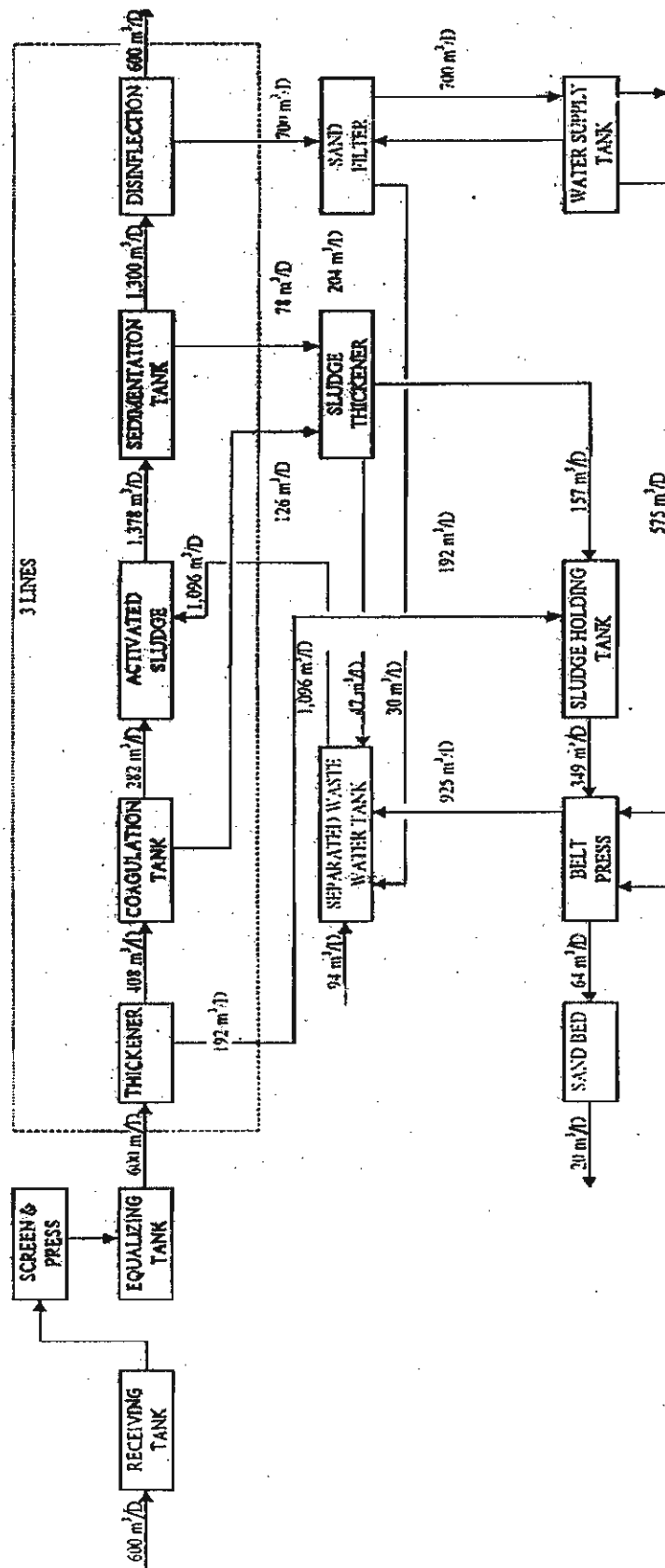
ขบวนการทำงานของโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

เมื่อรถบรรทุกนำสิ่งปฏิกูล (Night-Soil) มาถึงโรงงาน ขั้นแรกต้องขังน้ำหนักสิ่งปฏิกูลที่นำเข้ามากำจัดในโรงงานโดยเครื่องขังรถบรรทุก จากนั้นรถบรรทุกก็จะเทสิ่งปฏิกูลลงสู่บ่อรับสิ่งปฏิกูล (Receiving Tank) โดยผ่านตะแกรงดักมูลฝอย (Screen) และบ่อแยกกรวดทราย (Grit Chamber) และไหลลงไปสู่ถังรับสิ่งปฏิกูล (Receiving Tank) ด้วยแรงโน้มถ่วง สิ่งปฏิกูลไหลเข้าสู่เครื่องตัด (Scanter) แล้วถูกสูบไปตะแกรงหมุน (Screw Press) เพื่อแยกเอาสารแขวนลอยออกไป จากนั้นไหลไปสูงถึงปรับเสถียร (Equalizing Tank) สารแขวนลอยที่แยกออกมาจะถูกส่งไปยังลานตากตะกอน (Sand Bed) เพื่อให้แห้งต่อไป (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.1 รถบรรทุกสิ่งปฏิกูล

NONG KHAEM TREATMENT PROCESS



NIGHTSOIL TREATMENT FLOW

รูปที่ 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแถม

สิ่งปฏิกูลในถังปรับเสถียรจะถูกสูบเข้าสู่ถังเพิ่มความเข้มข้น (Thickener Tank) โดยผ่าน Electromagnetic Flow Meter และระบบควบคุมการไหล โดยมีระบบบันทึกปริมาณสิ่งปฏิกูลด้วยเครื่องบันทึกที่ห้องควบคุม

สิ่งปฏิกูลที่เข้าสู่ถังปรับเสถียรมีค่า BOD ประมาณ 2,500 mg/L ในถังนี้ตะกอนที่แขวนลอยบางส่วนจะถูกแยกออกและจะถูกสูบไปยังถังเก็บกากตะกอน (Sludge Holding Tank) ส่วนสิ่งปฏิกูลจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอน (Coagulation Tank) ซึ่งในถังนี้สารแขวนลอยอีกบางส่วนจะถูกกำจัดออกไปอีก โดยทำปฏิกิริยากับสารส้มและโพลีเมอร์ทำให้เกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และสามารถจมตัวลงสู่ถังตกตะกอนได้เอง ตะกอนที่ตกลงมานี้จะถูกสูบไปยังถังเพิ่มความเข้มข้นตะกอน (Sludge Thickening Tank) ส่วนสิ่งปฏิกูลที่ถูกแยกสารแขวนลอยออกไปมากแล้วจะไหลไปยังระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ต่อไป

ในระบบตะกอนเร่ง ประกอบด้วยขบวนการบำบัด 4 อย่าง คือ Nitrification, Denitrification, RBC (Rotating Biological Contractor) และการตกตะกอน

1. ขบวนการ Nitrification เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่เรียกว่า Nitrifying Bacteria ที่มีอยู่ในตะกอน และเกิดขึ้นในถัง Activated Sludge
2. ขบวนการ Denitrification เกิดในถังปิดกั้นอากาศเข้า ภายในถังจะมีเครื่องช่วยกวนเพื่อช่วยให้แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดขบวนการ Denitrification สามารถเปลี่ยนไนเตรทและไนไตรต์ให้เป็นก๊าซไนโตรเจน
3. ถังแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contractor, RBC) จะทำการบำบัดทางด้านชีววิทยา สิ่งปฏิกูลที่ผ่านถังนี้จะถูกขจัดความสกปรกออกไปเกือบหมด จากนั้นจะไหลลงสู่ถังตกตะกอน
4. ถังตกตะกอน จะกำจัดตะกอนขั้นสุดท้าย เพื่อแยกน้ำใสออกจากตะกอน จากนั้นน้ำใสจากถังตกตะกอนจะไหลไปสู่ถังฆ่าเชื้อโรค ก่อนที่จะระบายทิ้งไปเป็นน้ำทิ้งที่มีคุณภาพตามความต้องการของกรุงเทพมหานครต่อไป

ลักษณะคุณสมบัติของน้ำทิ้ง

ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากการออกแบบระบบบำบัด เป็นดังนี้

1. ความเข้มข้น BOD_5 ไม่เกิน 60 mg/L และมีค่าเฉลี่ยแบบ 30 day Moving Average ไม่เกิน 40 mg/L

2. ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่เกิน 60 mg/L และมีค่าเฉลี่ยแบบ 30 day Moving Average ไม่เกิน 30 mg/L
3. สีของน้ำที่ผ่านการบำบัดจะต้องไม่เกิน 300 หน่วย PtCo ตลอดเวลา
4. ระดับ TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) จะต้องไม่เกิน 10 mg/L ตลอดเวลา

สำหรับตะกอนจากถังเพิ่มความเข้มข้น (Thickener Tank) และถังตกตะกอนจะถูกสูบไปยังถังเพิ่มความเข้มข้นตะกอน ตะกอนจะถูกทำให้แยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนเป็นส่วนของน้ำใส ชั้นล่างเป็นส่วนของตะกอน น้ำใสที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยัง Separated Wastewater Tank และถูกส่งไปยังระบบตะกอนเร่งต่อไป สำหรับตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังถังเก็บตะกอน จากนั้นถูกสูบผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลและเติมสาร P.E. (Polyelectrolyte) ก่อนส่งไปยังเครื่องรีดตะกอนแบบ Belt Press กากตะกอนที่ได้มีความชื้นอยู่ประมาณ 20% จะถูกนำไปที่ลานตากตะกอน ส่วนน้ำใสจากเครื่องรีดตะกอนจะไหลไปสู่ Separated Wastewater Tank ต่อไป

สำหรับเครื่องรีดตะกอนนั้น มีการทำความสะอาดในส่วนต่างๆของเครื่องเป็นครั้งคราว น้ำที่จะนำมาใช้ทำความสะอาดนี้จะดึงเอามาจากน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถัง RBC แล้ว และต้องนำมาผ่านเครื่องกรองเร็วก่อนที่จะนำมาใช้ทำความสะอาด

ลักษณะสมบัติของกากตะกอน

ลักษณะสมบัติของกากตะกอนที่ออกแบบไว้ เป็นดังนี้

1. กากตะกอนที่ออกจากเครื่องรีดตะกอน (Belt Press) มีตะกอนแขวนลอยไม่น้อยกว่า 20%
2. กากตะกอนที่ลานตากตะกอน จะต้องมิตะกอนแขวนลอยไม่น้อยกว่า 50%

ลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียตั้งแต่ เดือนสิงหาคม พ.ศ.2542 - เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2543

จำนวน 90 ตัวอย่าง

- pH	6.7 - 8.0
- BOD ₅	630 - 5,500 mg/L
- COD	1,108 - 76,075 mg/L

- SS	980 - 43,633 mg/L
- TKN	344 - 4,880 mg/L
- NH ₃ - N	135 - 1,200 mg/L

2.2 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ในระบบบำบัดน้ำเสีย

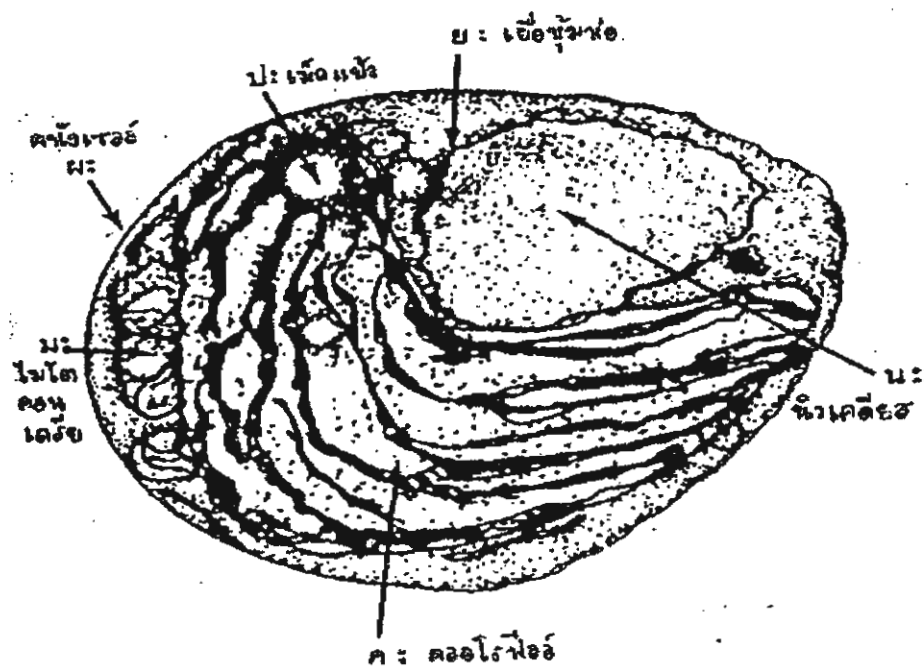
สาหร่าย *Chlorella* sp.

Chlorella sp. จัดให้อยู่ในอาณาจักร *Protista*, ซึ่งมีลักษณะพื้นฐานดังต่อไปนี้ (10, 11)

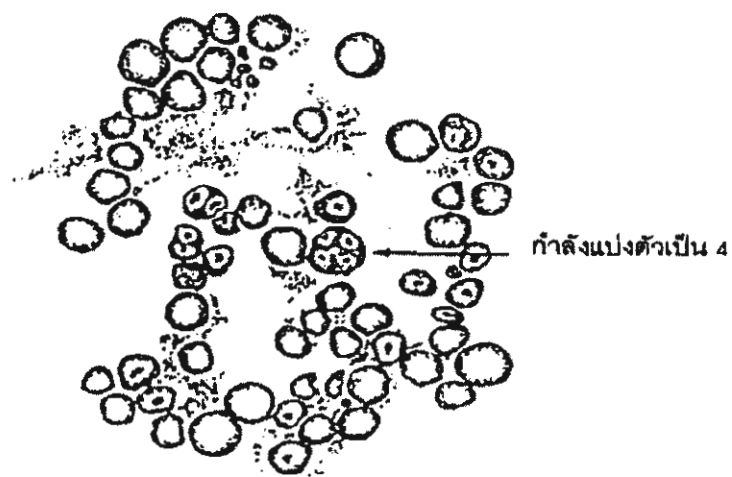
Division:	<i>Chlorophyta</i>
Order:	<i>Chlorellales</i>
Family:	<i>Chlorelliaceae</i>
Genus:	<i>Chlorella</i>

- เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สุดในกลุ่มของสาหร่าย เพียง 2-12 ไมครอน(รูปที่ 2.3)
- เป็นสาหร่ายพวก Non – Motile Forms Lacking Vegetative Cell Division คือ เป็นเซลล์ที่ไม่เคลื่อนที่อาจจะอยู่เป็นเซลล์เดี่ยวหรือเป็นกลุ่ม
- มีลักษณะเป็นทรงกลมหรือรูปไข่ซึ่งประกอบด้วย คลอโรพลาสต์ (chloroplast) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายถ้วย (Cup shaped)
- สิ่งมีชีวิตในกลุ่มนี้จะเพิ่มจำนวนโดยการแบ่งเซลล์ โดยการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศหรือโดยการสร้างสปอร์ ซึ่งมีสัดส่วน 4, 8 หรือ 16 ต่อ เซลล์ (12, 13, 14) (รูปที่ 2.4)

Chlorella sp. สามารถแบ่งเซลล์ได้เร็วพอกับพืชชั้นสูง ซึ่งอัตราการเจริญสูงสุด บางครั้งจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดังนั้นจึงมีความนิยมในการนำสิ่งมีชีวิตชนิดนี้มาใช้ในการศึกษาทดลอง หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย ที่ใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหาร เนื่องจากมีสารอาหารหลายชนิดที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต ช่วยเพิ่มออกซิเจนและลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับแหล่งน้ำด้วย นอกจากนี้เซลล์ของ *Chlorella* sp. ประกอบด้วยสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและเป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญของระบบนิเวศน์ (ตารางที่ 2.1 และ 2.2)



รูปที่ 2.3 *Chlorella* sp. (12)



ลูกศรชี้แสดงคลอโรพลาสต์ เซลล์กำลังจะแบ่งตัวเป็น 4 ทาง แตกออกไปเป็น 4 เซลล์ใหม่ ๆ ขบวนการนี้เกิดขึ้นทุก ๆ 16-20 ชั่วโมง

รูปที่ 2.4 การสร้างสปอร์ (11)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางโภชนาการของ *Chlorella sp.*

รายการ	ปริมาณ (%)
ความชื้น	4.6
โปรตีน	58.4
คาร์โบไฮเดรต	23.2
ไขมัน (มากกว่าร้อยละ 80 เป็นไขมันอิ่มตัว)	9.3
สารประกอบเส้นใย	0.3
เถ้า	4.2
คลอโรฟิลล์	1.7
แคลอรี	411/100 กรัม

ที่มา : บรรจบ ชุณหวัดดีการ (12)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่มีในอาหาร 100 กรัม

รายการ	ปริมาณ (กรัม)
<i>Chlorella sp.</i>	58
เนื้อวัว	24 – 27
ไข่	13
ปลา	18 – 29
ไก่	24
ข้าวสาลี	10 – 13
ข้าว	3 – 7
มันฝรั่ง	3

ที่มา : บรรจบ ชุณหวัดดีการ (12)

การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. (15, 16, 17)

Chlorella sp. มีช่วงการเจริญเติบโตในการเลี้ยงแบบ Batch cultures อยู่ 6 ช่วง เช่นเดียวกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยทั่ว ๆ ไป ดังนี้

- 1) Lag phase เป็นช่วงที่สาหร่ายมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ ภายใต้นี้จะไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์
- 2) Acceleration phase ภายใต้นี้จำนวนของสาหร่ายมีการเปลี่ยนแปลง 9k, ลำดับดังนี้ RNA เป็นองค์ประกอบแรกที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ต่อมาโปรตีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น แล้ว น้ำหนักแห้งมีการเพิ่มขึ้นและในที่สุดมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์
- 3) Logarithmic phase (Log phase, Exponential phase or Balanced phase) เป็นช่วงที่สาหร่ายมีการแบ่งเซลล์ และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว มีเมตาบอลิซึมสูงสุด จึงมีอัตราการเจริญสูงสุดและเป็นอัตราการเจริญเติบโตที่คงที่
- 4) Deceleration phase เป็นช่วงที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายเริ่มน้อยลง เนื่องจากมวลสาหร่ายมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการบังแสงกันเอง แต่ละเซลล์ได้รับแสงน้อยลง อัตราการสังเคราะห์แสงจึงลดลง ทำให้อัตราการเจริญลดลงด้วย
- 5) Stationary phase เป็นช่วงที่มวลหรือจำนวนสาหร่ายคงที่ แต่องค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์บางอย่างอาจมีปริมาณเพิ่มขึ้น บางอย่างอาจมีปริมาณลดลง ช่วงเจริญนี้เกิดจากการขาดแคลนแร่ธาตุอาหารที่สำคัญ การขาดแคลนคาร์บอนไดออกไซด์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยสารที่สาหร่ายปล่อยออกมาเอง การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด – ด่างในอาหาร ตลอดจนการได้รับแสงไม่พอเพียงเนื่องจากความหนาแน่นของสาหร่ายที่มากเกินไป ในช่วงนี้สาหร่ายจะมีการใช้อาหารที่สะสมไว้ในเซลล์
- 6) Death phase มวลสาหร่ายเริ่มลดลง เนื่องจากอัตราส่วนของการหายใจต่อการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการตายของเซลล์สาหร่ายเพิ่มมากขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

1. แสง (light) และอุณหภูมิ (temperature) (10)

แสงเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งจะเปลี่ยนสารต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของอินทรีย์สาร แต่ถ้าแสงมีมากเกินไปก็อาจมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต

คือ อาจมีผลยับยั้งอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายได้ เพราะความต้องการแสงของพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไป โดยจากการศึกษาของ มาวิทย์และธิดา (18) ที่ทำการศึกษาความเข้มแสงที่มีผลต่อการเพิ่มจำนวนของสาหร่าย *Chlorella* sp. ในห้องปฏิบัติการ พบว่าจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าในเวลา 1.2 วันเมื่อเลี้ยงที่ความเข้มแสง 3,000 และ 5,000 ลักซ์ แต่เมื่อเลี้ยงที่ความเข้มแสง 1,000 ลักซ์จะใช้เวลา 2 วันเพื่อให้การเพิ่มของสาหร่ายเป็นจำนวน 2 เท่า

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบนิเวศน์ของสาหร่าย อุณหภูมิมีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของสาหร่าย ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 34 องศาเซลเซียสเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 20 หรือสูงกว่า 37 องศาเซลเซียสจะไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp.

นอกจากนี้อุณหภูมิยังไปมีผลต่อการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ กล่าวคือน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะละลายได้น้อยกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะนำไปสู่การลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งจะจำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายหรือหาก ลดอุณหภูมิก็ยังคงจำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้

2. สารอาหาร (Nutrient) (10, 16, 17)

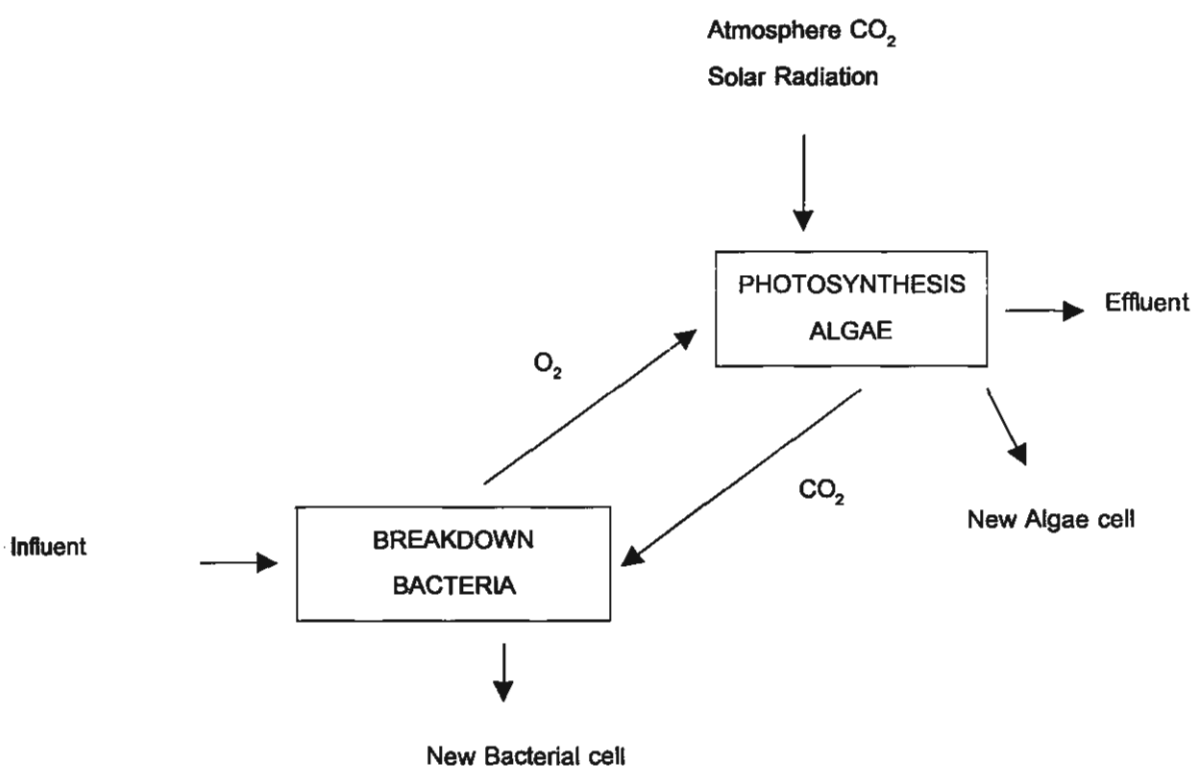
สารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีหลายชนิด เช่น N, P, S, Fe, Cu, Mo, Si และ Zn เป็นต้น แต่สารอาหารสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ คือ N และ P

ไนโตรเจน สาหร่ายจะใช้ไนโตรเจนในรูปของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น ไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) เกลือแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ในธรรมชาติไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของ $\text{NO}_3^- - \text{N}$ และ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ โดยสาหร่ายส่วนมากใช้ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ได้ดีกว่า โดยเฉพาะในสถานะที่ขาดสารอินทรีย์ไนโตรเจน แต่ในน้ำเสียไนโตรเจนมักจะอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งมาจากการขับถ่ายของเสียของสัตว์

ฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจะพบอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต และสารประกอบอินทรีย์ การที่ฟอสฟอรัสในธรรมชาติมีอยู่ในปริมาณน้อย อาจมีผลทำให้มีการจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น ความต้องการฟอสฟอรัสของ *Chlorophyceae* มีค่าประมาณร้อยละ 2-3 ของน้ำหนักแห้ง

การใช้สาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสีย

ในบ่อบำบัดน้ำเสีย เช่น บ่อฝั่ม สาหร่ายมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศน์ เนื่องจากสามารถใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำขณะที่มีแสงสว่าง แล้วปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาในกระบวนการสังเคราะห์แสงให้แบคทีเรียที่อาศัยในบ่อฝั่มของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งแบคทีเรียจะเปลี่ยนให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในกระบวนการหายใจ ให้สาหร่ายนำกลับไปใช้ได้



การใช้สาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. Facultative Pond คือ บ่อที่มีออกซิเจนจำกัด ซึ่งจะมีความลึกของบ่อมากกว่า 1 เมตร สาหร่ายจะเจริญเติบโตเฉพาะผิวน้ำ และมีสภาวะ Anoxic ที่ก้นบ่อ
2. High Rate Oxidation Pond (HROP) คือ บ่อที่มีการเติมออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ซึ่งโดยทั่วไปเป็นบ่อตื้น มีความลึกน้อยกว่า 1 เมตรและมีการกวนน้ำ (Mechanically Agitated)

อย่างต่อเนื่องด้วยไบโพลีเมอร์ที่เป็นที่นิยมมาก สาหร่ายที่เจริญเติบโตในปฏิกิริยาบำบัดน้ำเสียระบบ HROP นอกจากจะช่วยเติมออกซิเจนให้กับน้ำ ยังเป็นการส่งเสริมการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วย แบคทีเรีย (Oxidative Bacteria) ส่งเสริมให้กลุ่ม Facultative Heterothrops มีการใช้คาร์บอน มากถึงร้อยละ 50

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรวดี (4) ทำการศึกษาพบว่าความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่าย *Chlorella* sp. มีผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร เมื่อความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ 6×10^7 และ 3×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สามารถลดไนโตรเจนได้ร้อยละ 85 และ 77 ตามลำดับ และสามารถลดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 75 และ 56 ตามลำดับ

Gantar et al., (19) ศึกษาการลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรโดยใช้สาหร่าย *Spilurina plentisis* ทำการเลี้ยงแบบ batch โดยเจือจางน้ำเสียเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50% และเติม NaHCO_3 1% ในทุกตัวอย่าง พบว่าในน้ำเสียที่เจือจาง 50% มีอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายดีที่สุด เนื่องจากมีสารอาหารในปริมาณที่เหมาะสม

Aziz และ Ng (5) ได้ศึกษาระบบ Activated – Algal Process เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนและโรงงานน้ำมันปาล์ม โดยเลี้ยงสาหร่ายร่วมกับจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ใน reactor ตามสภาวะธรรมชาติในห้องทดลอง นาน 15 วัน พบว่า สามารถลดค่า BOD 80 – 88% ,COD 60 – 70% N 60 – 70% และ P 50 – 60% แสดงว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้ระบบนี้ในการบำบัดน้ำเสียทั้งจากชุมชน และน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

Tredici et al., (20) ศึกษาการเลี้ยง *Scenedesmus* sp. ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากชุมชน สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ทั้งหมด โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง และได้ปริมาณสาหร่ายคิดเป็นน้ำหนักแห้ง 20.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

Megharaj et al., (21) ทำการศึกษาสาหร่าย 2 ชนิด คือ *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus bijugatus* โดยเลี้ยงให้เกาะติดอยู่กับ Ca – alginate ขนาด 4 มิลลิเมตร แต่ละ bead มีสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด พบว่า สามารถลดไนโตรเจนได้ร้อยละ 71 – 79 และฟอสฟอรัสได้

ร้อยละ 52 – 82 *Chlorella vulgaris* ให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำดีกว่า *Scenedesmus bijugatus* และอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

Canizares et al., (22) ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina maxima* ในน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร โดยทำการเจือจางน้ำเสีย 25% และ 50% พบว่าสามารถลด $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ ได้มากกว่า 90% และความหนาแน่นสาหร่ายที่เหมาะสมคือ 2 กรัมต่อลิตร (wet basis)

Tam et al., (23) ได้ศึกษาการลดปริมาณ $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ โดยสาหร่าย *Chlorella vulgaris* เลี้ยงสาหร่ายให้เกาะติดกับ Ca – alginate bead ทดสอบที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 2 ระดับ ศึกษาในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว พบว่า อัตราการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์แสงของเซลล์สาหร่ายจะเกิดดีในชุดของสาหร่ายที่มีความหนาแน่นน้อย ขณะที่อัตราการลดปริมาณ $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ จะเกิดได้ดีในชุดของสาหร่ายที่มีความหนาแน่นมาก

Travieso et al., (24) ศึกษาการลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียจากชุมชน โดยใช้สาหร่าย 3 ชนิด คือ *Chlorella vulgaris*, *Chlorella kessleri* และ *Scenedesmus quadricauda* เกาะติดกับ Na – alginate พบว่าสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และ *Chlorella kessleri* มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียจากชุมชน

2.3 การใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp.

ไรแดงจัดอยู่ในอนุกรมวิธานดังนี้ (25)

Kingdom: *Animalis*

Phylum: *Arthropoda*

Class: *Crustacean*

Order: *Cladoceran*

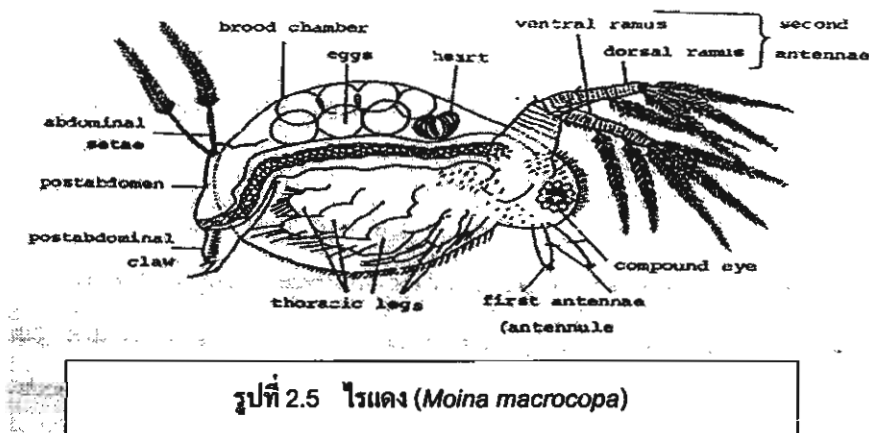
Family: *Daphnidae*

Genus: *Moina*

Species: *Moina macrocopa*

ลักษณะรูปร่าง

ไรแดงประกอบด้วยส่วนหัว ออก และท้อง โดยแต่ละส่วนแยกออกจากกันไม่ชัดเจน ออก และท้องปกคลุมด้วยเปลือกบาง ๆ มีลักษณะเป็นแผ่นชั้นเดียว หัวจะมีขนาดใหญ่ และมีเปลือกหุ้มครึ่งหนึ่งทางด้านหน้า หนวดคู่ที่หนึ่งจะมีลักษณะทุ่และสั้นอยู่ทางด้านหลังของหัว ส่วนหนวดคู่ที่สองมีขนาดใหญ่ มี 2 กิ่ง กิ่งบนมี 4 แฉก และกิ่งล่างมี 4 แฉก วางอยู่ที่ข้อต่อระหว่างหัวและอก มีขนาดเล็ก มี Labrum 1 อัน, Mandible 1 คู่ ส่วนนี้เป็นส่วนที่แข็งแรงเพื่อใช้ในการบดเคี้ยวอาหาร ตัวผู้มีลักษณะเล็กกว่าตัวเมียและมีหนวดขนาดใหญ่กว่า และขาคู่ที่ 1 มี Hook เพื่อช่วยในการผสมพันธุ์



อาหาร

ไรแดงจะกินพวกสาหร่าย, โปรโตซัว, สารอินทรีย์ และแบคทีเรีย ซึ่งการกินอาหารของไรแดงจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย ไรแดงกินอาหารโดยการกรอง เรียกว่า เป็นพวก Filter Feeder โดยขาที่ออกของไรแดง จะพัดน้ำทำให้เกิดกระแสน้ำไหลเข้าปาก สาหร่ายจะถูกกรองโดยปากและถูกกักไว้ใน Mandible ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบย่อยอาหารต่อไป ซึ่งอาหารที่ย่อยได้จะผ่านเข้าไปยังระบบย่อยอาหาร ส่วนที่ย่อยไม่ได้จะถูกปล่อยออกทางทวารหนัก (25)

การสืบพันธุ์และวงจรชีวิต

ไรแดงมีอัตราการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์สูง แต่วงจรชีวิตสั้น คือ มีอายุประมาณ 4 - 7 วัน สามารถออกลูกได้ 2 - 6 ครั้ง และสามารถมีลูกได้ครั้งละ 4 - 13 ตัว (26) โดยปกติแล้วไรแดงจะสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยจะวางไข่อยู่ที่ส่วนหลังในถุงไข่ และพัฒนาเป็นตัวอ่อน ลักษณะคล้ายแม่ แต่มีขนาดเล็กกว่า การสืบพันธุ์แบบนี้จะเกิดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น ไม่มีอาหาร มีความหนาแน่นของไรแดงมากเกินไป ค่าพีเอชของน้ำสูงกว่า 9 เป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดสภาวะดังกล่าว การสืบพันธุ์จะเปลี่ยนจากการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศเป็นการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ โดยตัวเมียจะสร้างไข่อีกชนิดหนึ่ง มีลักษณะที่บวม ซึ่งจะต้องผสมพันธุ์กับตัวผู้ จึงจะสามารถเจริญเป็นตัวอ่อนได้ ไข่ที่ได้รับการผสมแล้วจะเคลื่อนเข้าสู่ช่องพักไข่ เมื่อไรแดงลอกคราบครั้งต่อไป ไข่ที่มีเปลือกหุ้มจะถูกปล่อยออกจากตัวแม่ แล้วจมลงสู่พื้นน้ำ เมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม ไข่ชนิดดังกล่าวจะเจริญเป็นตัวเมียที่สืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศต่อไป (27)

ที่อยู่อาศัย

ไรแดงชอบอาศัยอยู่ตามคูน้ำ และบ่อน้ำบาดาลเสียทั่วไป (26) โดยสามารถอยู่ในน้ำที่มีค่าออกซิเจนละลายในน้ำต่ำ ๆ (0 - 3 มก./ล.) ได้ (27)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไรแดง

1. อาหาร ไรแดงสามารถกินพวกสาหร่าย, โปรโตซัว, สารอินทรีย์ และแบคทีเรีย ผลงานวิจัยของธิดา เพชรมณี (25) พบว่า ไรแดงสามารถกินสาหร่ายคลอเรลล่าได้ถึง $0.5 - 1.0 \times 10^6$ เซลล์/ตัว/วัน

2. แสง จะพบไรแดงในบริเวณที่มีแสงเพียงพอ

3. อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 14 - 17 องศาเซลเซียส ไรแดงจะสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (27) ผลงานวิจัยของธิดา เพชรมณี (25) ที่เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของไรแดง ณ อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียสนั้น พบว่า ไรแดงมีการเจริญเติบโตสูงสุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แต่การเลี้ยงไรแดงที่อุณหภูมินี้มีผลให้ไรแดงตายง่ายกว่าที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส

4. ฟิเอช มักจะพบไรแดงในน้ำที่มีค่าฟิเอช 6.5 - 8.5 (28, 29) ค่าฟิเอชจะมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนีย โดยเมื่อค่าฟิเอชต่ำและอุณหภูมิต่ำ แอมโมเนียในน้ำจะอยู่ในรูปแอมโมเนียม ซึ่งไม่มีพิษต่อสัตว์น้ำ แต่เมื่อค่าฟิเอชสูงขึ้น จะทำให้เกิดแอมโมเนียซึ่งมีพิษต่อสัตว์น้ำ

5. ออกซิเจนละลาย ไรแดงสามารถอยู่ได้ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายต่ำ (0 - 3 มก./ล.) (28) และสามารถอยู่ในน้ำที่ไม่มีออกซิเจนในระยะเวลาสั้น ๆ ได้ โดยไรแดงจะลอยตัวขึ้นมาบนผิวน้ำ และใช้ขาที่อกพัดน้ำเพื่อให้เกิดกระแส ทำให้ออกซิเจนละลายเพียงพอต่อการหายใจ (27) นอกจากนี้ การกวนน้ำเพื่อให้ออกซิเจนละลายนั้น อาจทำให้ไรแดงเกิดความเมื่อยล้า หรือทำให้ไรแดงตายเนื่องจากสารพิษจากกันบ่อเกิดการฟุ้งกระจายขึ้นมาได้

6. ซัลไฟด์ ซัลไฟด์เกิดขึ้นจาก Sulfate Reducing Bacteria ภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยแบคทีเรียชนิดนี้ เกิดเมื่อความลึกของบ่อมากเกินไป หรือไม่มีการกวนน้ำในบ่อเลี้ยง ซัลไฟด์มีพิษต่อสัตว์น้ำ โดยมีพิษสูงเมื่อค่าฟิเอชของน้ำสูง ไรแดงสามารถทนอยู่ได้ในน้ำที่มีซัลไฟด์ประมาณ 3 มก./ล แต่จะสามารถอยู่ได้ดีเมื่อมีค่าซัลไฟด์น้อยกว่า 0.4 มก./ล. (27)

7. ปรสิตร และตัวห้ำ Vorticella และ Brachionus จะเป็นปรสิตรสำหรับไรแดง โดยปรสิตรเหล่านี้จะไปเกาะที่เปลือกของไรแดง ทำให้ไรแดงไม่สามารถลอกคราบได้ ส่วนปลาชนิดต่าง ๆ จะเป็นสัตว์ที่กินไรแดง

การใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp*

มีการศึกษาเกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงไรแดงด้วยสาหร่าย *Chlorella sp* และอาหารชนิดอื่น ๆ ดังตารางที่ 2.3 ผลการศึกษาเหล่านั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพาะเลี้ยงไรแดงด้วยสาหร่าย *Chlorella sp* ผลผลิตไรแดงที่ได้จะสูงกว่าการเพาะเลี้ยงไรแดงด้วยอาหารชนิดอื่น ๆ

การใช้ไรแดงในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp* จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ผลการศึกษาของธิดา เพชรมณี (25) ยืนยันว่า ไรแดงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp* ได้ถึง 91 - 99% ดังตารางที่ 2.4

นอกจากไรแดงสามารถกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp* ได้แล้วยังสามารถกำจัดสารอินทรีย์ทั้งในรูป BOD และ COD และแบคทีเรียได้ ผลการศึกษาวิจัยของ Kawai H. (8) ซึ่งศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้สาหร่ายร่วมกับไรแดง พบว่า ที่ระยะเวลาพักเก็บ 6 วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp* เท่ากับ 99.99% (จาก 2×10^8 เซลล์/มล. เหลือ 8×10^3 เซลล์

/มล.) และมีประสิทธิภาพในการกำจัด BOD และ Fecal Coliform เท่ากับ 75% และ 91.2% ตามลำดับ และจากผลการศึกษาวิจัยของมารศรี นวนรเศรษฐ์ (30) ซึ่งได้ศึกษาการเพาะเลี้ยงไรแดงในน้ำเสียชุมชน พบว่า ที่ปริมาณไรแดงเริ่มต้น 13 ตัว/ลิตร ระยะเวลาที่เก็บ 10 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด BOD, E. Coli และ แบคทีเรียทั้งหมด เป็น 83.7%, 98.2% และ 91.2% ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของ Las V. (31) ที่พบว่าไรแดงสามารถลดค่า COD และของแข็งแขวนลอยได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2.3 การศึกษาการเพาะเลี้ยงไรแดงด้วยอาหารชนิดต่าง ๆ

ผู้วิจัย	รายละเอียด
หยกแก้ว ยามาลี (26)	" การนำสาหร่าย <i>chlorella</i> sp ที่ได้จากการเลี้ยงในน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลือง " พบว่าการเลี้ยงคลอเรลล่าในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลืองเป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงนำมาเลี้ยงไรแดง โดยได้ไรแดง 2,520 6,260 10,420 และ 13,560 ตัว/ลิตร ในอาหารที่มีความเข้มข้นเทียบเป็น OD ที่ช่วงคลื่น 560 นาโนเมตร = 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 ตามลำดับ โดยใช้เวลาเลี้ยง 5-6 วัน จากไรแดงเริ่มต้น 100 ตัว/ลิตร
Quiming L. (2)	" การเพาะเลี้ยงไรแดง " พบว่าการเลี้ยง <i>chlorella</i> sp ในน้ำผสม Ami – Ami ที่ไรแดงเริ่มต้น 100 ตัว/ลิตร เป็นเวลา 6 วัน จะให้ผลผลิตไรแดงสูงถึง 7,499 ตัว/ลิตร
ธรรมบุญ โรจนบุรานนท์ (27)	" การเพาะเลี้ยงไรแดงด้วยฟางข้าว " พบว่า ที่ไรแดงเริ่มต้น 375 ตัว/ลิตร เป็นระยะเวลา 4 วัน จะให้ผลผลิตไรแดงสูงถึง 1,935 ตัว/ลิตร
มารศรี นวนรเศรษฐ์ (30)	" การเพาะเลี้ยงไรแดงในน้ำเสียชุมชน " พบว่า ที่ไรแดงเริ่มต้น 27 ตัว/ลิตรเป็นระยะเวลา 6 วัน จะให้ผลผลิตไรแดงสูงถึง 3,888 ตัว/ลิตร

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp* โดยไรแดง (25)

ปริมาณสาหร่าย <i>Chlorella sp</i> (cell/ml)	สาหร่าย <i>Chlorella</i> <i>sp</i> ที่เหลือ (เซลล์/ml.)	ปริมาณไรแดงเริ่มต้น (ตัว/ลิตร)	ปริมาณไรแดงทั้งหมด (ตัว/ ลิตร)
0.5×10^6	1×10^4	1	5.3
1.0×10^6	9×10^4	1	6.7
1.5×10^6	15×10^4	1	5.3

3. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแวมด้วยสาหร่ายคลอเรลล่า
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลล่าในน้ำทิ้งให้ได้ปริมาณสูงสุด
3. ศึกษาประสิทธิภาพของไรแดงในการกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าที่ความลึกและระดับแสงแตกต่างกัน
4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกักและปริมาณผลผลิตไรแดงที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยว
5. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลด้วยสาหร่ายคลอเรลล่าและไรแดง

4. ระเบียบวิธีวิจัย

ออกแบบการวิจัยเป็นแบบการทดลอง (Experimental Research Design) และรูปแบบการวิจัยเป็นแบบ Multiple Comparison Groups with Multiple Independent Variables โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

1. การศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลด้วยสาหร่ายคลอเรลล่า โดยทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์ และหาระยะเวลากักเก็บที่ทำให้สาหร่ายคลอเรลล่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งสูงสุดที่ความเข้มข้นแต่ละระดับ โดยนำน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลใส่ลงในถังปฏิกริยา 3 ถัง

ให้มีปริมาตร 3,000 มล. ทำการวิเคราะห์ค่า COD, TKN, TP และ SS ก่อนเข้าระบบ นำไปวางบนชั้นเลี้ยงสาหร่ายที่มีความเข้มแสง 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์ ตั้งเวลาการเปิด-ปิดแสงเป็น 12 : 12 ชั่วโมง (เปิด:ปิด) ที่อุณหภูมิห้อง ให้อากาศผ่านปั๊มหัวทรายตลอด 24 ชั่วโมง วัดค่า pH และวัดค่าการเจริญเติบโตของสาหร่ายทุกวันด้วย OD₅₆₀ รวมทั้งวัดน้ำหนักแห้งของสาหร่าย ทำการวิเคราะห์ค่า COD, TKN, TP และ SS เมื่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (OD₅₆₀) มีค่าสูงสุด ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ (COD) , ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของน้ำทั้งก่อนและหลังการบำบัด เพื่อหาระดับความเข้มแสงและระยะเวลาที่เก็บที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด พร้อมกันนี้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของสาหร่ายคลอโรลล์ที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์หาค่า OD₅₆₀ และค่าน้ำหนักแห้งของสาหร่าย

2. นำสภาวะการทดลองที่ได้จากข้อที่ 1 ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในแต่ละระดับความเข้มแสงมาทำการทดลองซ้ำโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ทำการวิเคราะห์ค่า COD, TKN, TP และ SS และปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมที่สุดของน้ำทั้งก่อนและหลังการทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการทดลองบำบัดด้วยไรแดงต่อไป

3. ทำการเลี้ยงไรแดงโดยนำน้ำทั้งจากระบบบำบัดสิ่งปฏิกูล 5 ลิตรใส่ในภาชนะสำหรับเลี้ยงไรแดง เพื่อเลี้ยงสาหร่ายตามสภาวะที่เหมาะสมในข้อที่ 2 ต่อจากนั้นทำการจัดกลุ่มจำนวนไรแดงเริ่มต้น 3 ชุดการทดลอง โดยมีสัดส่วนปริมาณไรแดงเริ่มต้น 10, 20 และ 30 ตัว/น้ำ 100 มล. และแต่ละชุดการทดลองจะเปรียบเทียบระดับความลึกของการเลี้ยงไรแดงที่ 20, 30 และ 40 ซม. วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (COD), ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและปริมาณสาหร่ายคลอโรลล์ในน้ำที่ใช้เลี้ยงตั้งแต่วันที่เริ่มทำการทดลอง หาจำนวนไรแดงและปริมาณสาหร่ายคลอโรลล์พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุก ๆ 2 วัน

4. นำสภาวะที่ได้จากข้อที่ 3 มาทำการทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาการเลี้ยงที่ให้ผลผลิตไรแดงต่อหน่วยสูงที่สุด และทำการวิเคราะห์หาปริมาณไรแดงที่เก็บเกี่ยวได้ทั้งหมดของแต่ละชุดการทดลอง เปรียบเทียบจำนวนไรแดงต่อหน่วย ปริมาณไรแดงที่เก็บเกี่ยวได้ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทั้งของแต่ละชุดการทดลอง

แหล่งน้ำทิ้ง หัวเชื้อสาหร่าย และไรแดง

1. สาหร่าย *Chlorella* sp. เป็นสายพันธุ์ที่ได้รับจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. น้ำทิ้งเป็นน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแวม เขต
หนองแวม กรุงเทพมหานคร

3. ไรแดง ซื้อจากร้านขายปลา ตลาดนัดสวนจตุจักร

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อสาหร่ายตั้งต้น

เพาะเลี้ยงหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella* sp. ให้เข้มข้นในอาหารสูตร NS III ตามสูตรมาตรฐานของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำการเพาะเลี้ยงในความเข้มแสง 10,000 ลักซ์ ระยะเวลาในการให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน อุณหภูมิ 28-30° เซลเซียส และมีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ทำการต่อเชื้อทุก 3 วัน โดยนำหัวเชื้อ 10% ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร NS III ที่เตรียมใหม่ เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงเป็นเชื้อตั้งต้นสำหรับการเตรียมสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่ใช้ในการทดลอง

นำ Stock culture ของสาหร่าย *Chlorella* sp. มาเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งเพื่อให้สาหร่ายมีการปรับตัวเป็นระยะเวลา 3 วัน ที่ระดับความเข้มแสง 10,000 ลักซ์ ตั้งเวลาในการให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ที่อุณหภูมิ 28-30° เซลเซียส และมีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ปริมาณสาหร่ายความเข้มข้นประมาณ 1,000-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตรวจวัดปริมาณสาหร่ายโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman GF/C อบที่อุณหภูมิ 103-105° เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ง่ายในโถดูดความชื้น นำมาชั่งน้ำหนักกระดาษกรองและสาหร่ายที่เพิ่มขึ้น จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณสาหร่าย เพื่อทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลให้ได้ความเข้มข้นสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในแต่ละชุดการทดลองจะมีปริมาตร 3 ลิตร

การเตรียมไรแดงสำหรับการใช้ในการทดลอง

นำไรแดงจากร้านขายอาหารปลา ตลาดนัดสวนจตุจักร มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ก่อนทำการทดลอง เพื่อกำจัดศัตรูที่อาจติดมากับตัวไรแดงให้หลุดออก การนับไรแดงทำโดยใช้ Pasture pipette ตู้นับไรแดงที่ละตัวใส่ลงในถังปฏิริยาให้ได้จำนวนไรแดงเริ่มต้น 100 200 และ 300 ตัวต่อลิตร

อุปกรณ์และเครื่องมือ

- Operating Reactor

- Reactor unit ขนาด 3 ลิตร ($\varnothing = 15$ cm., ความสูง 30 cm.)

- Materials and Equipment for Wastewater Quality Analysis

- pH meter
- Spectrophotometer (Spectronic 21)
- กระดาษกรอง (GF/C)
- เครื่องแก้ว
 - บีกเกอร์ size 250, 500, 1,000 and 2,000 ml.
 - ขวดรูปชมพู่ size 250 and 500 ml.
 - ขวดปริมาตร size 100, 500 and 1,000 ml.
 - บิวเรต size 25 and 50 ml.
 - ปิเปต size 1, 5 and 10 ml.
 - กระบอกตวง size 50, 100, 500 and 1,000 ml.

- Others

- เครื่องปั๊มอากาศ (Aquadine 7500)
- สายยางและหัวจ่ายอากาศ
- เครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติ (Timer)
- หลอดไฟ Fluorescent lamp 36W
- น้ำกลั่น

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่า COD ตามวิธีมาตรฐาน (Standard Method)
2. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่า TKN ตามวิธีมาตรฐาน (Standard Method)
3. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่า TP ตามวิธีมาตรฐาน (Standard Method)

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
COD	Azide Modification
TKN	Kjeldahl Method
TP	Ascorbic acid Method and Persulfate
SS	digestion
Chlorophyll, OD ₅₆₀	Glass Fiber Filter dried at 103 – 105 ^o c Spectrophotometer

5. ผลการวิจัย

5.1 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

ในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล 6 ครั้ง ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง เมษายน 2545 ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล พบว่า ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างจากการเก็บในช่วงเดือน มิถุนายน – ธันวาคม 2544 (ภาคผนวก ง) เนื่องจากช่วงเดือนมิถุนายน – ธันวาคม 2544 น้ำทิ้งมี ตะกอนแขวนลอยและค่า COD ค่ำ ส่วนช่วงการเก็บตัวอย่างในเดือนมกราคม ถึงเมษายน 2545 เป็นระยะเวลาที่ระบบบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมมีปัญหา คือมีตะกอนขนาดใหญ่ปะปนออกมา ค่อนข้างมาก ทำให้ตรวจวิเคราะห์ได้ค่า Suspended Solid และ COD สูง สภาพน้ำค่อนข้างขุ่น เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง 200 ลิตร จากนั้นนำน้ำทิ้งมาทำการแยกของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ออก โดยการปั่นเหวี่ยง และเก็บรักษาที่ห้องเย็นควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 4 °C

จากการที่นักวิจัยที่ปรึกษาได้ให้ข้อคิดเห็นเรื่องการตกค้างของสารพิษสู่ห่วงโซ่อาหารระดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงวางแผนและทำการศึกษาเพิ่มเติมจากขอบเขตงานวิจัยที่วางไว้ โดยศึกษาปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ใน น้ำทิ้ง และการสะสมของสารโลหะหนักในเซลล์ของสาหร่าย ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล (1 ม.ค. 2545 – 30 เม.ย. 2545)

Parameter (mg/L)	Sampling time							SD.
	1	2	3	4	5	6	mean	
COD	1,620	1,610	1,440	1,250	1,020	1,120	1,343	253
TKN	163	120	122	133	128	135	133	15
TP	1.5	0.5	4.3	3.5	8.9	9.4	4.68	3.7
SS	2,000	1,200	1,800	2,500	3,200	3,300	2,333	823
pH	7.7	7.5	7.7	7.6	7.5	7.7	7.61	0.09

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนักของน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล (สิงหาคม 2545)

Parameter (mg/L)	Sampling time		Industrial Effluent Standard
	1	2	
Cr	0.029	0.029	≤ 0.5
Cd	ND	ND	≤ 0.03
Pb	0.001	0.001	≤ 0.2
Ni	0.005	0.007	≤ 0.2
Cu	0.092	0.092	≤ 1.0
Zn	0.329	0.314	≤ 5.0
Hg	0.002	0.002	≤ 0.005

ในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล 2 ครั้ง เพื่อทำการวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมด 6 ชนิด คือ โครเมียม, แคดเมียม, ตะกั่ว, นิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และปรอท พบว่าปริมาณโลหะหนักของน้ำทิ้งมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าไม่เกินมาตรฐานของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3 ปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล

โลหะหนัก	ปริมาณที่พบใน <i>Chlorella sp.</i>
Cr	0.006
Cd	ND.
Pb	ND.
Ni	0.002
Cu	0.058
Zn	0.217
Hg	ND.

หมายเหตุ ND = ตรวจไม่พบ (non-detected)

นอกจากนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยง *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม แล้วนำมาตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในสาหร่ายทั้งหมด 6 ชนิด คือ โครเมียม, แคดเมียม, ตะกั่ว, นิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และปรอท พบว่ามีการสะสมสารโลหะหนักของสาหร่ายในปริมาณต่ำมาก อย่างไรก็ตาม พบว่า มีนิกเกิลและโครเมียมปนเปื้อนอยู่บ้าง แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย *Chlorella sp.* อัดเม็ด (อาหารเสริม) จากบริษัทได้หวันคลอเรลล่า จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตอาหารเสริมและอาหารเพื่อสุขภาพ แสดงในตารางที่ 4 พบว่าปริมาณนิกเกิลและโครเมียมที่พบจากการทดลองนี้มีค่าน้อยกว่าปริมาณโลหะหนักที่สะสมในสาหร่าย *Chlorella sp.* อัดเม็ด ดังนั้นการเพาะเลี้ยง *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมในการทดลองครั้งนี้จึงสามารถนำมาใช้ทำเป็นอาหารสัตว์และนำไปเพาะเลี้ยงไรแดงได้

ตารางที่ 4 ปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล เปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย *Chlorella sp.* อัคเม็ด (อาหารเสริม) จากบริษัทไต้หวันคลอเรลล่า จำกัด (www.taiwanchlorella.com)

โลหะหนัก	ปริมาณที่พบใน <i>Chlorella sp.</i> (มก. / 100 ก.)	ปริมาณที่พบใน <i>Chlorella sp.</i> อัคเม็ด (มก. / 100 ก.)
Cr	0.006	≤ 0.5
Cd	ND.	0.220
Pb	ND.	0.67
Ni	0.002	0.68
Cu	0.058	0.081
Zn	0.217	2.82
Hg	ND. (non detected)	ND. (non detected)

5.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลที่ความเข้มแสง 3 ระดับ (3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์)

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมที่ความเข้มแสง 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์ โดยให้ความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นที่ 100 mg/L สรุปได้ดังนี้

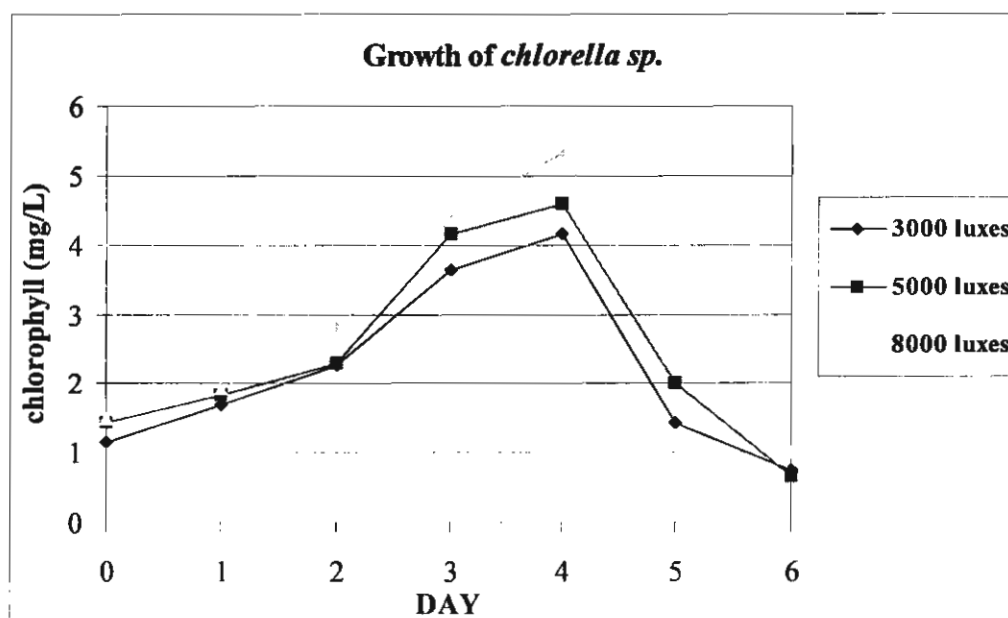
จากการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และน้ำหนักแห้งของสาหร่าย พบว่าสถานะในการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มแสงทุกระดับความเข้มแสง สาหร่าย *Chlorella sp.* มีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงวันที่ 4 ของการทดลองซึ่งเป็นวันที่มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด (ตารางที่ 5 และรูปที่ 1) หลังจากนั้นการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะค่อย ๆ ลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว โดยการให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ จะมีปริมาณ chlorophyll เป็น 4.16, 4.59 และ 5.34 mg/L ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ดี เนื่องจากให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) มากที่สุด

ในทำนองเดียวกันกับค่าน้ำหนักเซลล์สาหร่ายแห้ง พบว่า สภาวะในการเพาะเลี้ยงที่ความเข้มแสงทุกระดับความเข้มแสง สาหร่าย *Chlorella sp.* มีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 4 ของการทดลองซึ่งเป็นวันที่มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด หลังจากนั้นสาหร่ายจะค่อยๆลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว โดยให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ จะมีปริมาณสาหร่าย *Chlorella sp.* เป็น 277.05, 305.68 และ 356.08 mg/L ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ดี เนื่องจากให้ปริมาณค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง มากที่สุด

ตารางที่ 5 ปริมาณ chlorophyll (mg/L) เมื่อทดลองเลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลที่ความเข้มแสงต่างๆ

ความเข้มแสง (ลักซ์)	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)						
	0	1	2	3	4	5	6
3,000	1.15	1.70	2.26	3.65	4.16	1.44	0.75
5,000	1.44	1.83	2.31	4.17	4.59	2.01	0.65
8,000	1.49	1.93	2.82	4.40	5.34	2.56	1.00

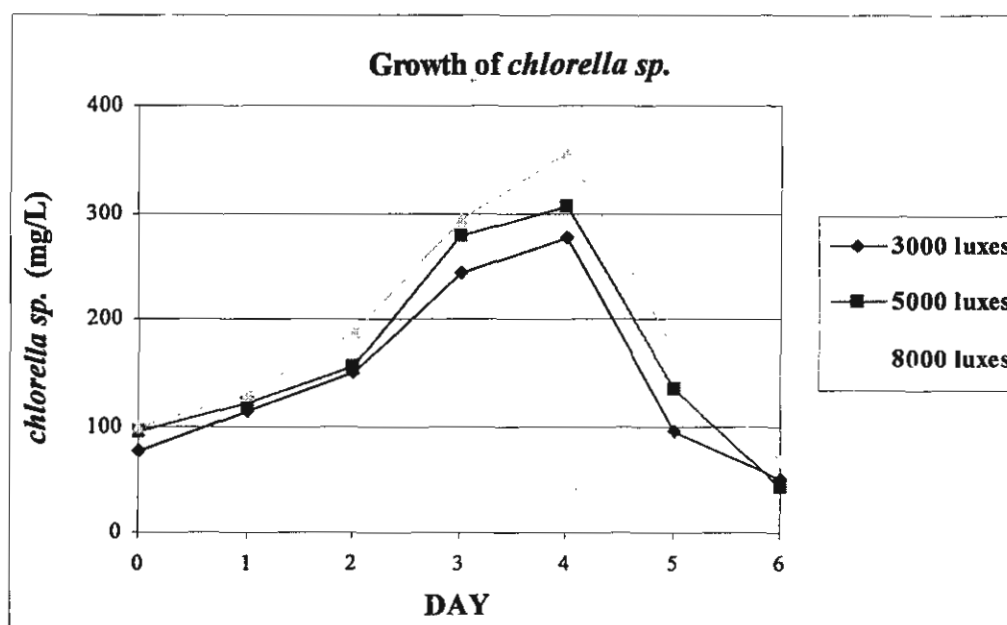
รูปที่ 1 ปริมาณ chlorophyll (mg/L) เมื่อทดลองเลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลที่ความเข้มแสง 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์



ตารางที่ 6 คำนำนักแห้งของสาหร่าย *chlorella sp.* (mg/L) เมื่อทดลองเลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลที่ความเข้มแสง 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์

ความเข้มแสง (ลักซ์)	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)						
	0	1	2	3	4	5	6
3000	76.79	113.40	149.54	243.06	277.05	95.97	50.04
5000	95.84	121.71	154.25	278.27	305.68	134.07	43.57
8000	99.17	128.67	187.83	293.20	356.08	170.98	66.73

รูปที่ 2 แสดงคำนำนักแห้งของสาหร่าย *chlorella sp.* (mg/L) เมื่อทดลองเลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลที่ความเข้มแสงต่างๆ



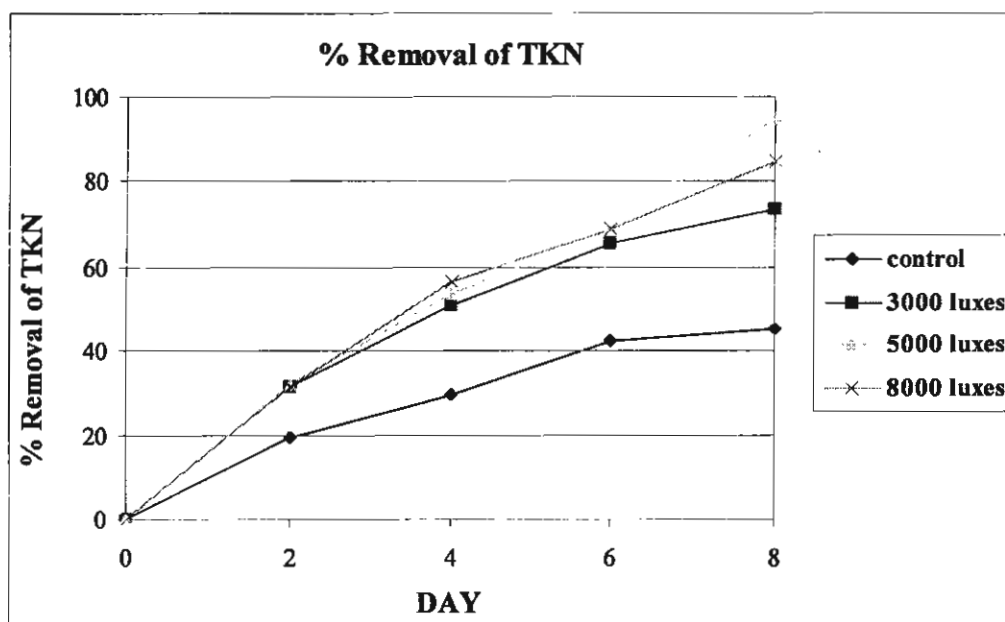
สำหรับการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยร้อยละของการลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลโดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* พบว่าแนวโน้มการลดปริมาณไนโตรเจนจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่เริ่มทำการทดลองจนมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดในวันที่ 8 ของการทดลอง โดยการให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยร้อยละ 73.55, 94.98 และ 85.12 ตามลำดับ เมื่อนำมาเทียบกับชุดควบคุม พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการลดปริมาณไนโตรเจนมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมในทุกระยะเวลาการ

ทดลอง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมที่ความเข้มแสง 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์

ความเข้ม แสง (ลักซ์)	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)				
	0	2	4	6	8
3000	0	31.70	50.86	65.55	73.55
5000	0	31.99	53.62	68.80	94.98
8000	0	31.51	56.70	68.96	85.12

รูปที่ 3 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์



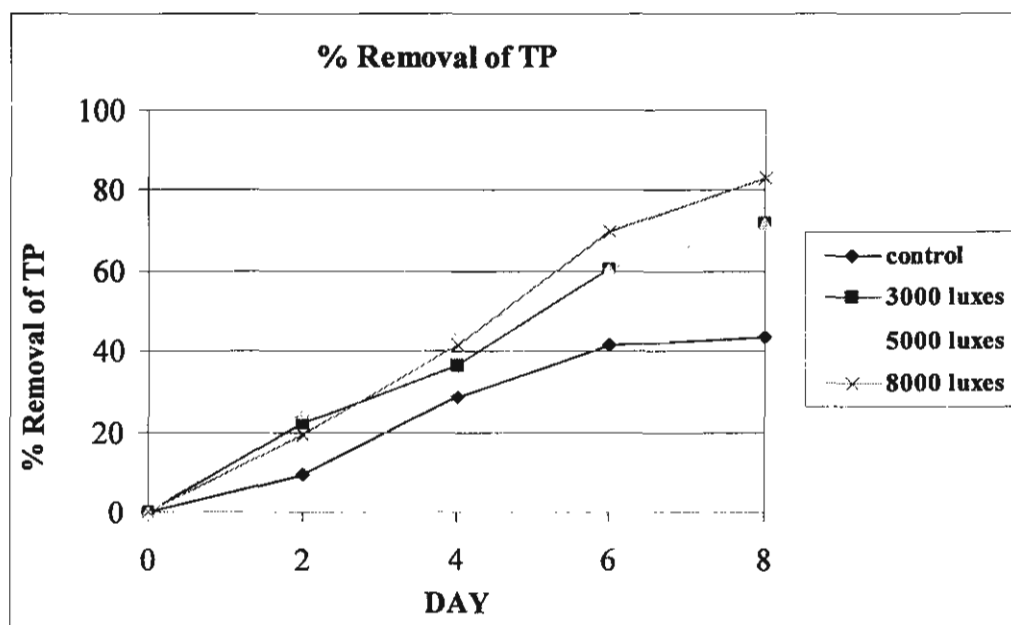
การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยร้อยละของการลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูล โดยใช้สาหร่าย *chlorella sp.* พบว่า แนวโน้มการลดปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่เริ่มทำการทดลองจนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดในวันที่ 8 ของการทดลอง โดยการให้ความ

เข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสลดลงเฉลี่ยร้อยละ 71.76, 71.66 และ 83.14 ตามลำดับ เมื่อนำมาเทียบกับชุดควบคุม พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการลดปริมาณฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมในทุกระยะเวลาการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TP ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

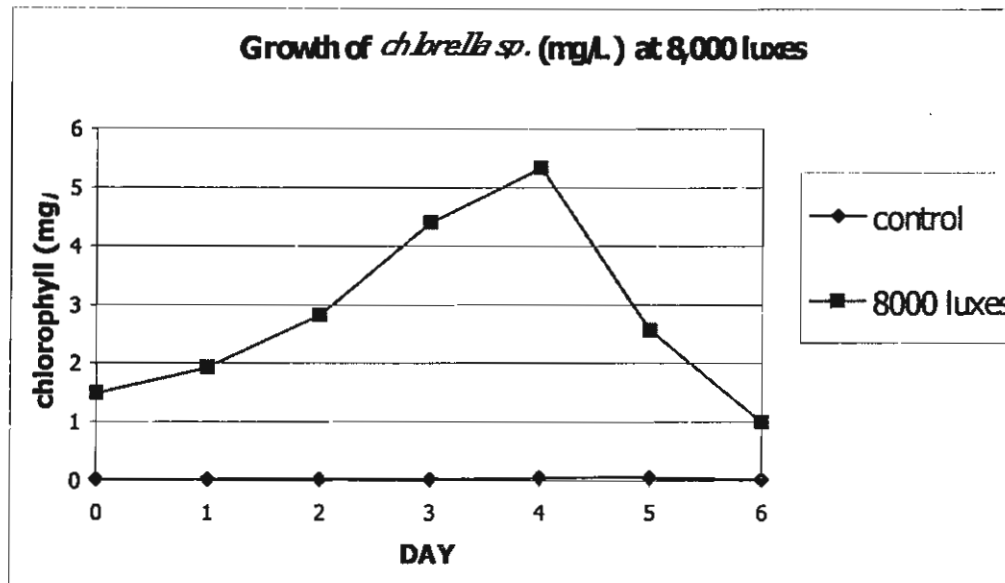
ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TP ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

ความเข้มแสง (ลักซ์)	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)				
	0	2	4	6	8
3000	0	22.42	36.46	60.49	71.76
5000	0	24.91	44.57	60.29	71.66
8000	0	19.30	41.64	69.88	83.14

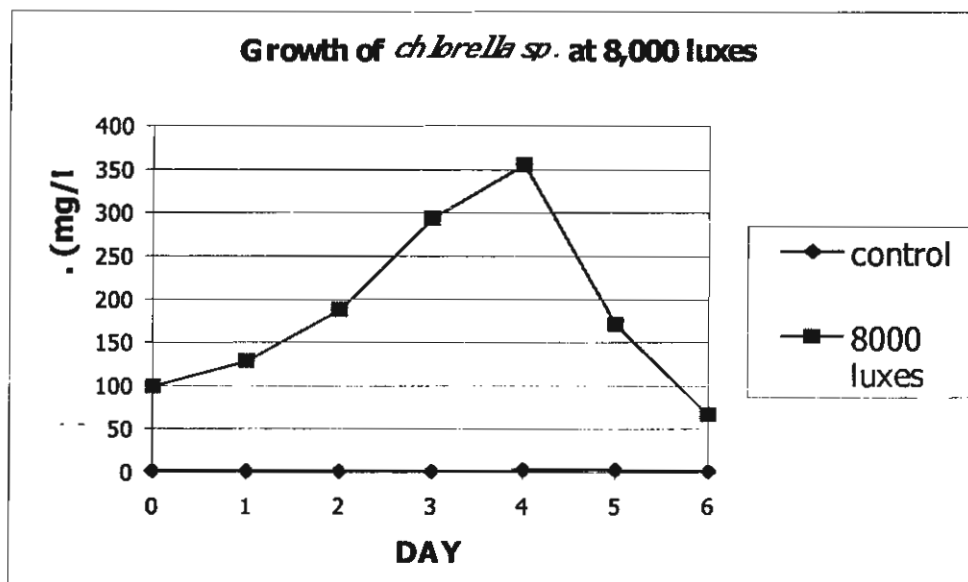
รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TP ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์



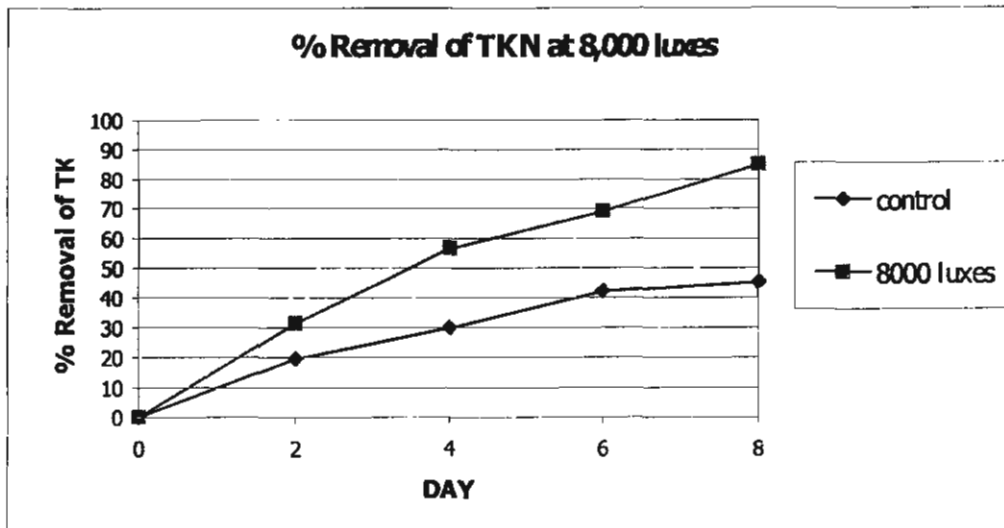
รูปที่ 5 ปริมาณ chlorophyll (mg/L) ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์



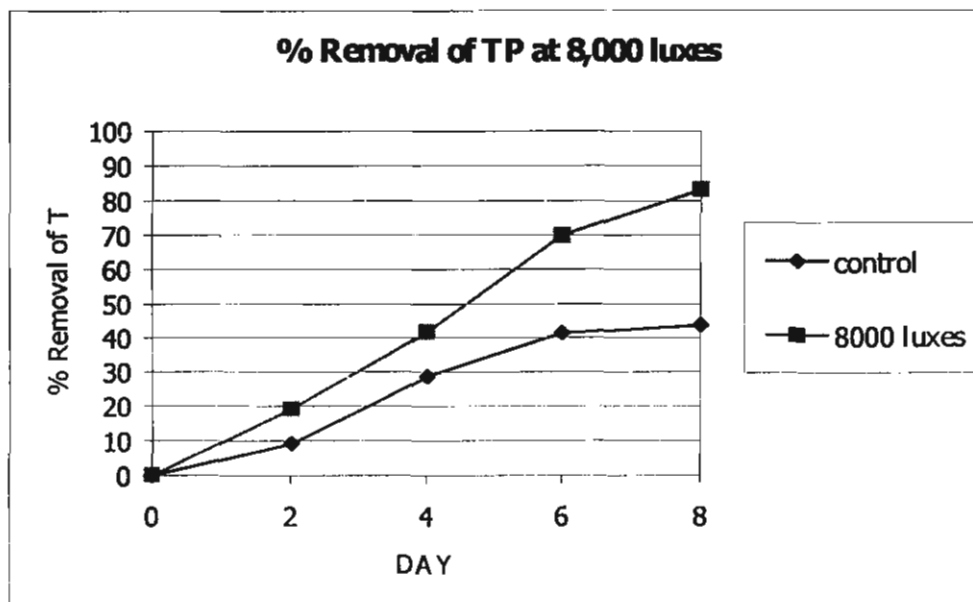
รูปที่ 6 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์



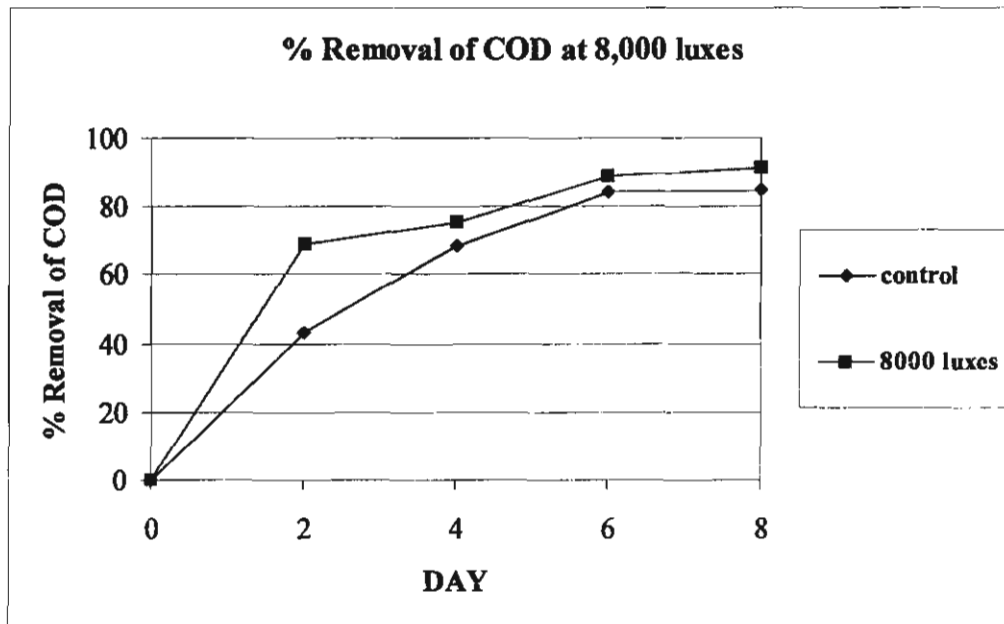
รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์



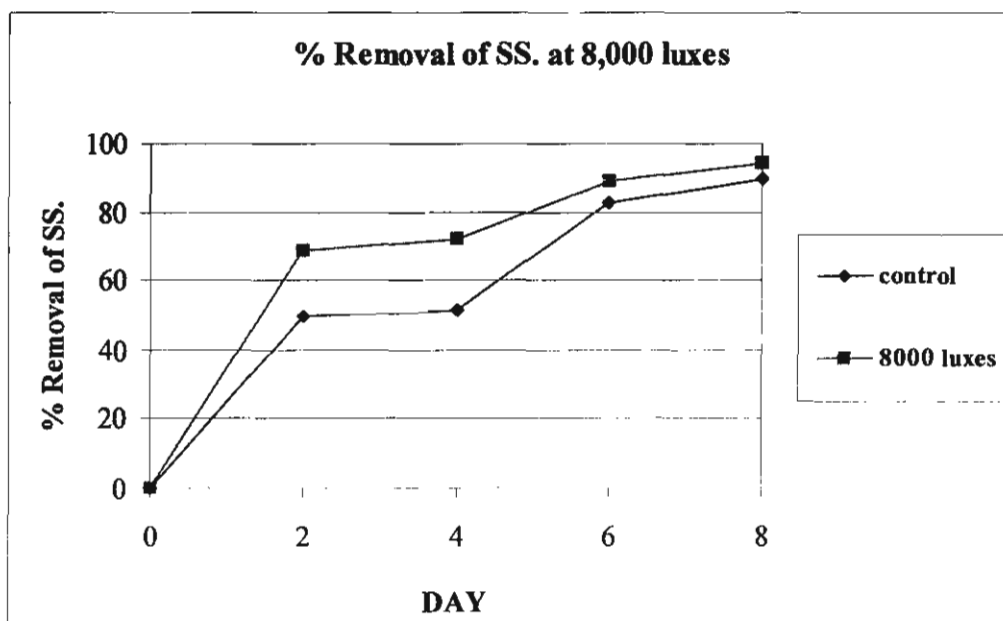
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ TP ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ COD ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์



รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณ SS ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์



ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์สถิติของ chlorophyll, *chlorella* sp., TKN และ TP

Parameters	Variable	Kruskal-Wallis test	Multiple Comparison
Chlorophyll	Light Intensity	DS (p-value = 0.015)	8000 > 3,000 และ 8,000 > 5,000 5000 = 3000
<i>Chlorella</i> sp.	Light Intensity	DS (p-value = 0.015)	8000 > 3,000 และ 8,000 > 5,000 5000 = 3000
TKN	Light Intensity	NS	Non – significant difference
TP	Light Intensity	NS	8000 > 3,000 และ 8,000 > 5,000 5000 = 3000

หมายเหตุ : NS = non significant different among the levels, $\alpha = 0.05$

DS = difference significantly among the level, $\alpha = 0.05$

สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. เมื่อให้ความเข้มแสงในการทดลองเป็น 3,000, 5,000 และ 8,000 ลักซ์ โดยวัดเป็นปริมาณ chlorophyll เท่ากับ 4.16, 4.59 และ 5.34 mg/L และปริมาณสาหร่าย *Chlorella* sp. เท่ากับ 277.05, 305.68 และ 356.08 mg/L ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Non-parametric test (Kruskal – Wallis test) พบว่า มีค่า p-value = 0.015 ซึ่งน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ จึงสามารถสรุปได้ว่า “สาหร่าย *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโตแตกต่างกันเมื่อให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงแตกต่างกัน”

แสงเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งจะเปลี่ยนสารต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปอินทรีย์สาร เมื่อเลี้ยงสาหร่ายในที่ๆมีความเข้มแสงคงที่ตลอดเวลาพบว่า เมื่อความเข้มแสงสูงขึ้นปริมาณเซลล์จะเพิ่มขึ้น (10) แสดงให้เห็นว่าแสงเป็นปัจจัยที่จำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่าย เมื่อสาหร่ายมีการเจริญเติบโตเพิ่มมากขึ้น จะมีความหนาแน่นของเซลล์สูง

ขึ้น จะเกิดการบังแสงกันเอง ทำให้จำนวนเซลล์ที่ไม่สัมผัสกับแสงมีมากขึ้น ทำให้สาหร่ายเริ่มตายลงเมื่อเวลาผ่านไป.

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในห้องทดลองควรใช้แสงไฟจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งดีกว่าการใช้หลอดไฟธรรมดาหรือแสงแดด (32) เนื่องจากว่าอุณหภูมิของแสงประเภทอื่นมักสูงกว่าหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์

การศึกษาถึงระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มจำนวนเซลล์ได้ทุกระดับความเข้มแสงที่ทดลอง แต่ที่ระดับความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella* sp. มีการเพิ่มจำนวนน้อยที่สุด โดยการศึกษาของ Droop, MR. (33) รายงานว่าระดับความเข้มแสงประมาณ 1,000 ลักซ์เป็นระดับความเข้มแสงต่ำมากที่สุด ที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Euglena* sp. แต่เป็นระดับความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาพันธุ์สาหร่าย

ในการทดลองนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มจำนวนเซลล์ได้สูงสุด และการทดสอบทางสถิติ Multiple Comparison Test โดยใช้ LSD (Least Significant Difference test) เพื่อหาว่า ค่าเฉลี่ยคู่ใดที่มีความแตกต่างกันบ้าง ดังตารางที่ 9 พบว่า การเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ระดับความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการเจริญเติบโตที่ระดับความเข้มแสง 3,000 และ 5,000 ลักซ์ ($p < 0.05$) แต่การเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ระดับความเข้มแสง 3,000 และ 5,000 ลักซ์ ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของมาวิทย์และธิดา (18) ที่ได้ทำการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่ระดับความเข้มแสง 3 ระดับ คือ 1,000 3,000 และ 5,000 ลักซ์ พบว่า ที่ระดับความเข้มแสง 1,000 ลักซ์ สาหร่าย *Chlorella* sp. มีการเพิ่มจำนวนน้อยที่สุด ส่วนการเพิ่มระดับความเข้มแสงจาก 3,000 ลักซ์ เป็น 5,000 ลักซ์ ให้ผลผลิตสาหร่าย *Chlorella* sp. เพิ่มขึ้นแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ความเข้มแสงจึงเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งในสาหร่าย *Chlorella* sp. จะมี chlorophyll a และ chlorophyll b เป็นตัวดูดซับแสงไว้เพื่อใช้เป็นพลังงาน ดัง

นั้นความเข้มแสงจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ควรจะนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลโดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* พบว่า แนวโน้มการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่เริ่มทำการทดลองจนมีค่าสูงสุดในวันที่ 8 ของการทดลอง โดยการให้ความเข้มแสงในการเพาะเลี้ยงเป็น 3,000 5,000 และ 8,000 ลักซ์ ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยร้อยละ 73.55, 94.98 และ 85.12 ตามลำดับ และปริมาณฟอสฟอรัสลดลงเฉลี่ยร้อยละ 71.76, 71.66 และ 83.14 ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติด้วย Non-parametric test (Kruskal-Wallis test) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทุกกลุ่มของการทดลอง

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญและจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและการสร้างเซลล์ใหม่ของสาหร่าย ธาตุไนโตรเจนที่สาหร่ายดูดซึมเข้าเซลล์ในรูปของสารออกซิไดซ์ (Oxidized form) เช่น ไนเตรต และไนไตรต์จะต้องถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นแอมโมเนียมก่อน จากนั้นสาหร่ายจะนำแอมโมเนียมที่ได้ไปสร้างเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์สาหร่ายต่อไป ในทำนองเดียวกันกับธาตุฟอสฟอรัสซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการหลายอย่างของเซลล์สาหร่าย โดยเฉพาะกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพลังงานและการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) ซึ่งจะเกิดขึ้นในขบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายนั่นเอง โดยสาร อินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งได้แก่ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO_4) และ ไฮโดรเจนฟอสเฟต ($H_2PO_4^{2-}$) ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นรูปฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เพื่อใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสง ในขณะที่สารอินทรีย์ฟอสเฟตจะต้องถูกย่อยสลายให้เป็นฟอสเฟตเสียก่อน จึงจะสามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้น ทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะถูกเซลล์สาหร่ายในน้ำทิ้งใช้ไป จนทำให้ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำทิ้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุรวดี นาคชน (4) ที่ทำการศึกษา พบว่า ความหนาแน่นของสาหร่าย *Chlorella sp.* เริ่มต้นมีผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร เมื่อความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ 6×10^7 และ 3×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สามารถลดไนโตรเจนได้ร้อยละ 85 และ 77 ตามลำดับ และสามารถลดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 75 และ 56 ตามลำดับ รวมทั้งงานวิจัยของ Aziz และ Ng (5) ได้ศึกษาระบบ Activated – Algal Process เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนและจากโรงงานน้ำมันปาล์ม โดยเลี้ยงสาหร่ายร่วมกับจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ใน reactor ตามสภาวะธรรมชาติในห้องทดลองนาน 15 วัน สามารถลดค่า BOD 80 – 88% ,COD 60 – 70% N 60 – 70% และ P 50 – 60% แสดงว่า มีความเป็นไปได้

ได้ในการใช้ระบบนี้เพื่อการบำบัดน้ำเสียทั้งจากชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม Megharaj et al., (21) ทำการศึกษาสาหร่าย 2 ชนิด คือ *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus bijugatus* โดยเลี้ยงให้เกาะติดอยู่กับ Ca – alginate ขนาด 4 มิลลิเมตร แต่ละ bead มีสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดสามารถลดไนโตรเจนได้ร้อยละ 71 – 79 และฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 52 – 82 *Chlorella vulgaris* มีประสิทธิภาพดีกว่า *Scenedesmus bijugatus* และอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส Tam et al., (23) ได้ศึกษาการลดปริมาณ $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ โดยสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยให้สาหร่ายเกาะติดกับ Ca – alginate bead ทดสอบที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 2 ระดับ ศึกษาในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว พบว่าอัตราการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์แสงของเซลล์สาหร่ายจะเกิดดีกว่าในชุดการทดลองสาหร่ายที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ขณะที่อัตราการลดปริมาณ $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ จะเกิดได้ดีในชุดการทดลองของสาหร่ายที่มีความหนาแน่นมากกว่า

Travieso et al., (24) ศึกษาการลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียจากชุมชนโดยใช้สาหร่าย 3 ชนิดคือ *Chlorella vulgaris*, *Chlorella kessleri* และ *Scenedesmus quadricauda* เกาะติดกับ Na – alginate พบว่าสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และ *Chlorella kessleri* มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียจากชุมชน

สาเหตุที่ทำให้การลดปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่แตกต่างกันในแต่ละการทดลองนั้น อาจเนื่องมาจากสาหร่ายในน้ำทั้งมีอัตราการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้การใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปในปริมาณใกล้เคียงกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้พบว่าในชุดของกลุ่มควบคุม (control) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะลดลงเช่นเดียวกับในชุดของการทดลอง เนื่องจากในน้ำทั้งดังกล่าวมีจุลินทรีย์ที่สามารถนำไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทั้งไปใช้ในขบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) ต่าง ๆ ได้ และจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนให้เป็นก๊าซไนโตรเจน โดยกระบวนการ Denitrification (34) ซึ่งก๊าซไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจะระเหยออกไป เป็นผลให้ปริมาณไนโตรเจนในชุดควบคุมลดลงเช่นเดียวกับในชุดทดลอง

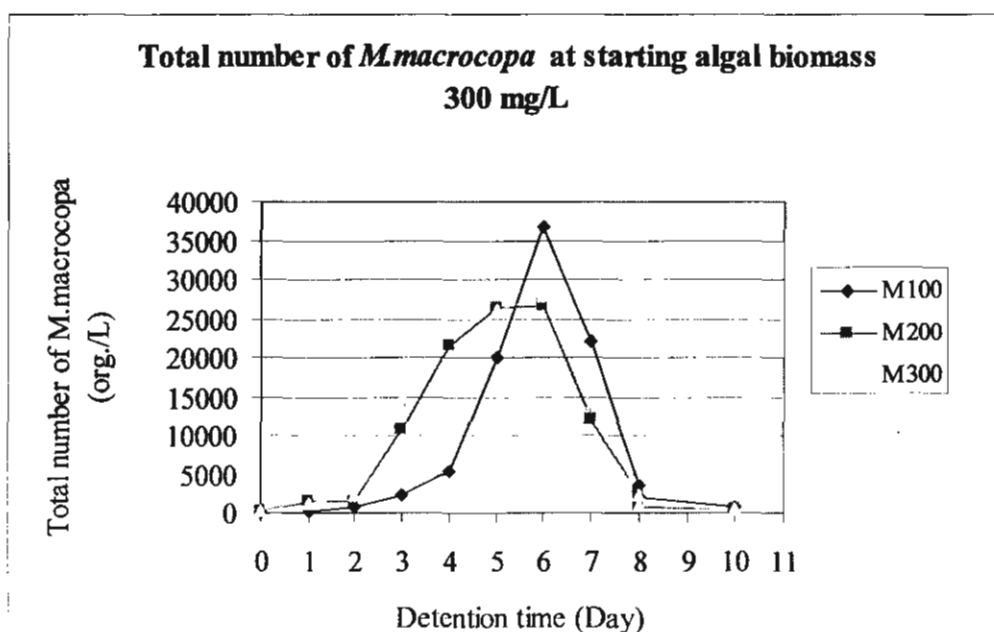
5.3 การใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp.

จากผลการวิจัยในส่วนที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถเจริญเติบโตได้สูงสุดในวันที่ 4 ของการทดลอง โดยมีปริมาณสาหร่ายคิดเป็น 277.05-356 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. จึงควบคุมให้มีปริมาณสาหร่ายตั้งต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่จำนวนไรแดงเริ่มต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้น ผลการศึกษาเป็นดังนี้

5.3.1 ประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100 200 และ 300 ตัวต่อลิตร

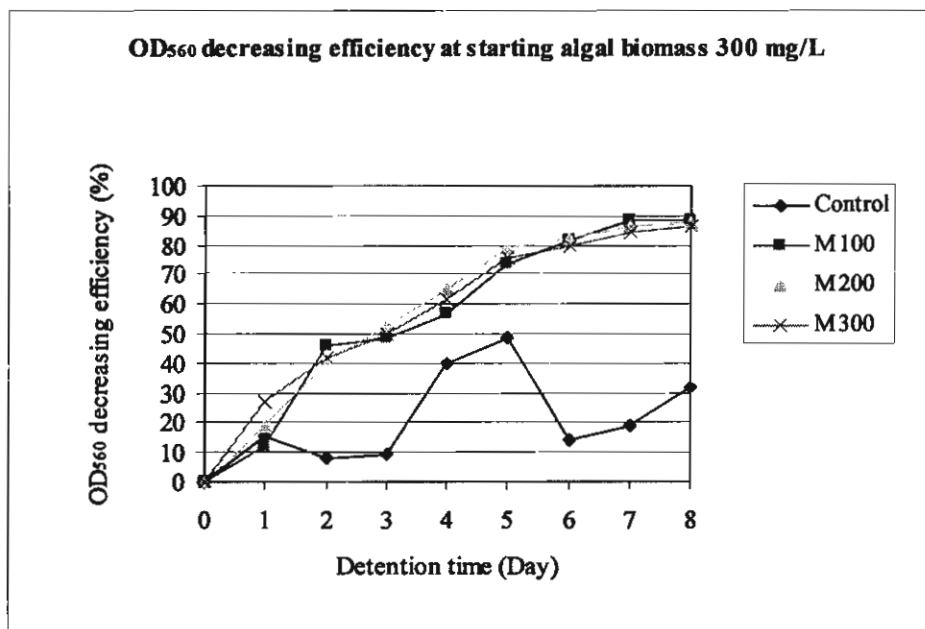
ศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม โดยทำการตรวจนับจำนวนไรแดง ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) และค่า COD และวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้งซึ่งตรวจวัดจากค่า TKN และ TP ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 11 – รูปที่ 14

รูปที่ 11 จำนวนไรแดงทั้งหมด (ตัว/ลิตร) เมื่อทดลองเลี้ยงในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขมที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร



ที่ปริมาณสาหร่ายตั้งต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร ไรแดงมีการเพิ่มจำนวนอย่างช้า ๆ ในช่วง 2 วันแรก และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 3 ของการทดลอง จนกระทั่งมีจำนวนสูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง และหลังจากนั้น ได้ลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว ส่วนต่อการทดลองที่ใช้ไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตรนั้น พบว่าไรแดงเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง 4 วันแรกของการทดลอง และเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วในวันที่ 5 จนกระทั่งมีจำนวนไรแดงสูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบจำนวนไรแดงสูงสุดที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร พบว่า มีจำนวนสูงสุดเท่ากับ 36,600, 26,667 และ 28,067 ตัว/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ณ ปริมาณสาหร่าย 300 mg/L และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตร ให้ผลผลิตจำนวนไรแดงทั้งหมดสูงที่สุด

รูปที่ 12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของการลดค่า OD₅₆₀ ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

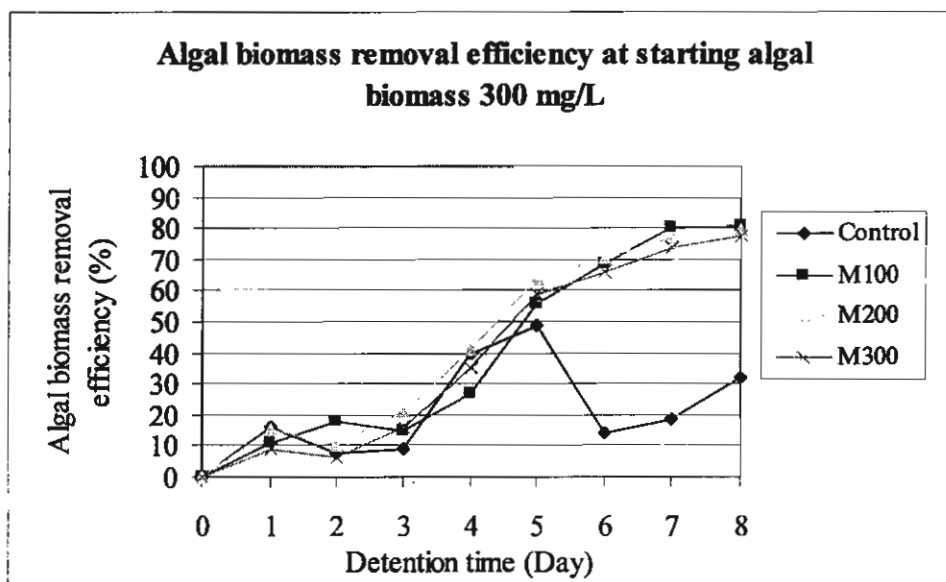


จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการลดค่า OD₅₆₀ ที่จำนวนไรแดงเริ่มต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร นั้นคล้ายคลึงกันโดยค่า OD₅₆₀ จะลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มการทดลอง จนกระทั่งวันที่ 5 ของการทดลองซึ่งค่า OD₅₆₀ เริ่มลดลงอย่างช้า ๆ ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าในรูปของค่า OD₅₆₀ ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร ณ วัน

ที่ 5 ของการทดลองเท่ากับ 73.33%, 78.86% และ 75.80% ตามลำดับ ในหน่วยควบคุม พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่า OD₅₆₀ เท่ากับ 48.41%

ประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของค่า suspended solid (รูปที่ 13) ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตรนั้น พบว่ามีความคล้ายกัน โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง 3 วันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังวันที่ 6 ของการทดลอง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของ suspended solids ณ วันที่ 5 ของการทดลอง เท่ากับ 55.56%, 64.23% และ 59.04% ส่วนในหน่วยควบคุมพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย เท่ากับ 48.42%

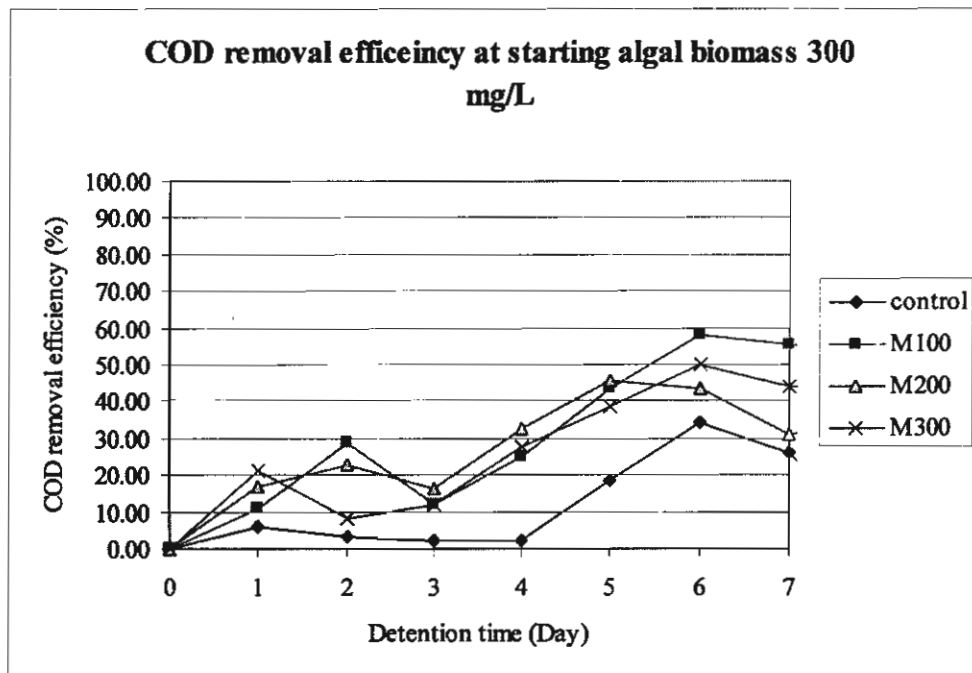
รูปที่ 13 ประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของค่า suspended solids ในน้ำทิ้งจากโรงงาน กำจัดสิ่งปฏิกูลที่มีจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร



สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD (รูปที่ 14) มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันแรกของการทดลอง และในวันที่ 2 ของการทดลองพบว่าค่าการทดลองที่มีจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 และ 200 mg/L นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ค่าการทดลองที่มีจำนวนไรแดงตั้งต้น 300 ตัว/ลิตรนั้นมีประสิทธิภาพการ

กำจัดสาหร่ายลดลงเล็กน้อย หลังจากวันที่ 3 ของการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD เริ่มมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 6 ของการทดลอง และมีแนวโน้มลดลงในวันที่ 7 ของการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD ณ วันที่ 5 ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 43.35%, 45.72% และ 38.38% ตามลำดับ ส่วนในหน่วยควบคุมนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพเท่ากับ 18.54%

รูปที่ 14 ประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของค่า COD ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

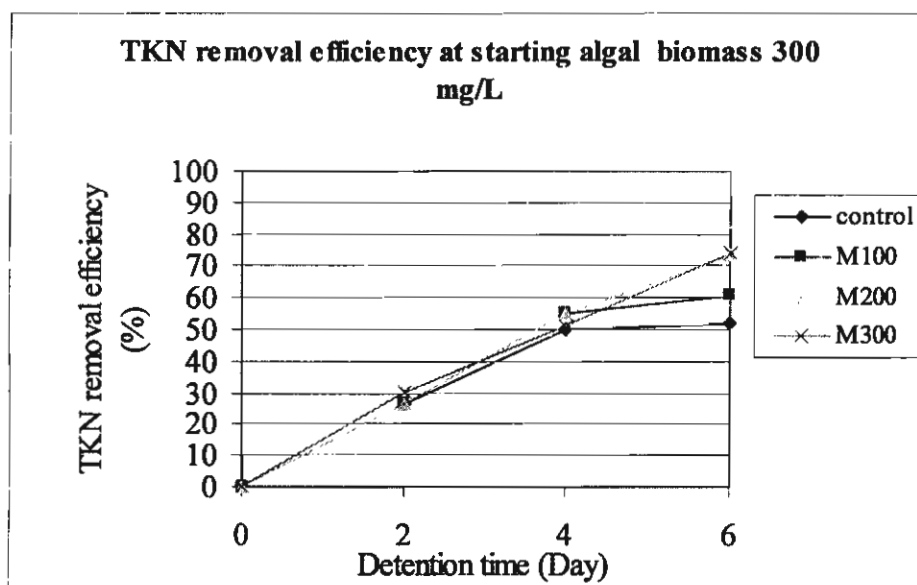


ในการวิเคราะห์ค่า TKN จะกระทำทุก 2 วัน เพื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังจากการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้ง จากผลการทดลอง (รูปที่ 15) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนในวันที่ 6 ของการทดลองที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร มีค่าเท่ากับ 60.73%, 73.18% และ 74.26% ตามลำดับ ส่วนหน่วยควบคุมนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 51.70%

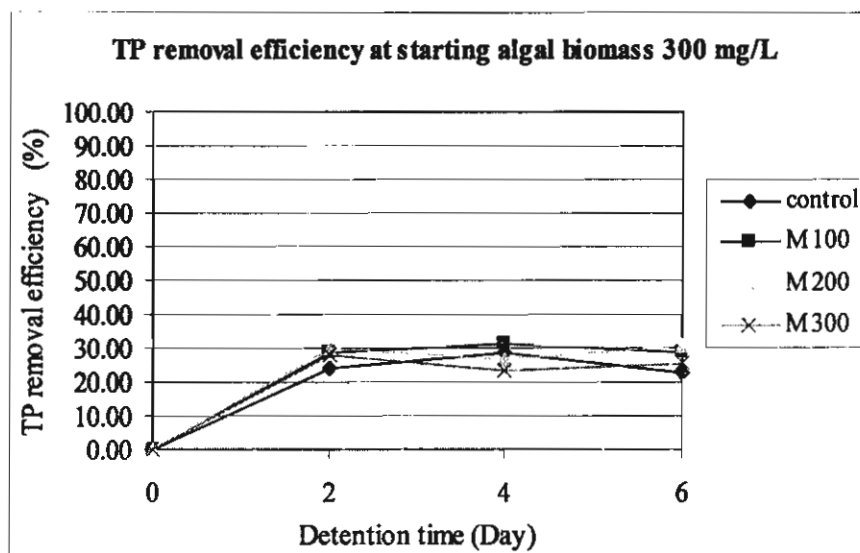
ส่วนการวิเคราะห์ค่า TP จะกระทำทุก 2 วัน เพื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังจากการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล จากผล

การทดลอง (รูปที่ 16) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 2 ของการทดลอง และหลังจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักจนกระทั่งวันสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในวันที่ 6 ของการทดลองที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร นั้นเท่ากับ 28.53%, 30.95% และ 25.60% ตามลำดับ ส่วนในหน่วยควบคุมนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในวันเดียวกันเท่ากับ 22.86%

รูปที่ 15 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนหลังจากการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร



รูปที่ 16 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส หลังจากการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

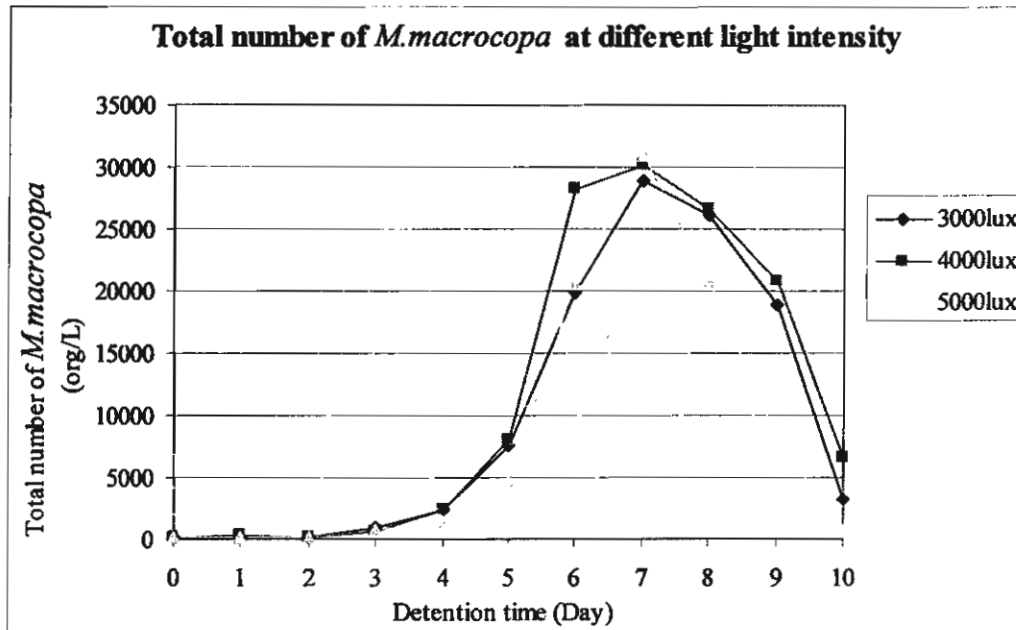


จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเพิ่มผลผลิตจำนวนไรแดงทั้งหมด ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร มีความแตกต่างกันแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$)

5.3.2 ประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล ที่ระดับความเข้มข้น 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์

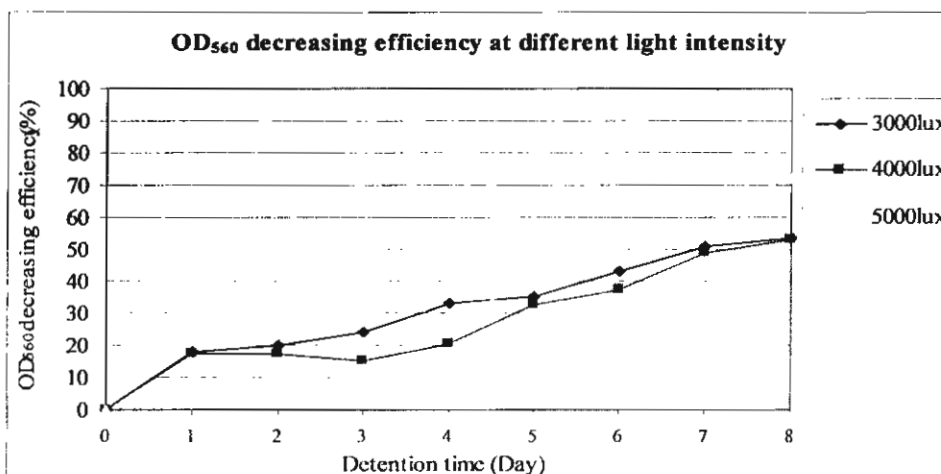
นำสภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมาคือ ปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตร มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งสิ่งปฏิกูลที่ระดับความเข้มข้น 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ โดยให้แสงด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำการตรวจนับจำนวนไรแดง, ตรวจวัดปริมาณสาหร่ายและคุณลักษณะของน้ำทิ้งทุก 2 วัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 17 และ รูปที่

รูปที่ 17 จำนวนไรแดงทั้งหมดที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์



การเจริญเติบโตของไรแดงจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง 4 วันแรกของการทดลอง โดยหลังจากนั้น พบว่า ไรแดงเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกคำรับการทดลอง จนกระทั่งไรแดงมีจำนวนสูงสุดในวันที่ 7 ของการทดลอง จำนวนไรแดงเริ่มลดจำนวนลงตั้งแต่วันที่ 8 ของการทดลองจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบจำนวนไรแดงสูงสุด ณ วันที่ 2 ของการทดลองที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ พบว่ามีจำนวนไรแดงสูงสุดเท่ากับ 28,803 30,167 และ 30,933 ตัว/ลิตร ตามลำดับ

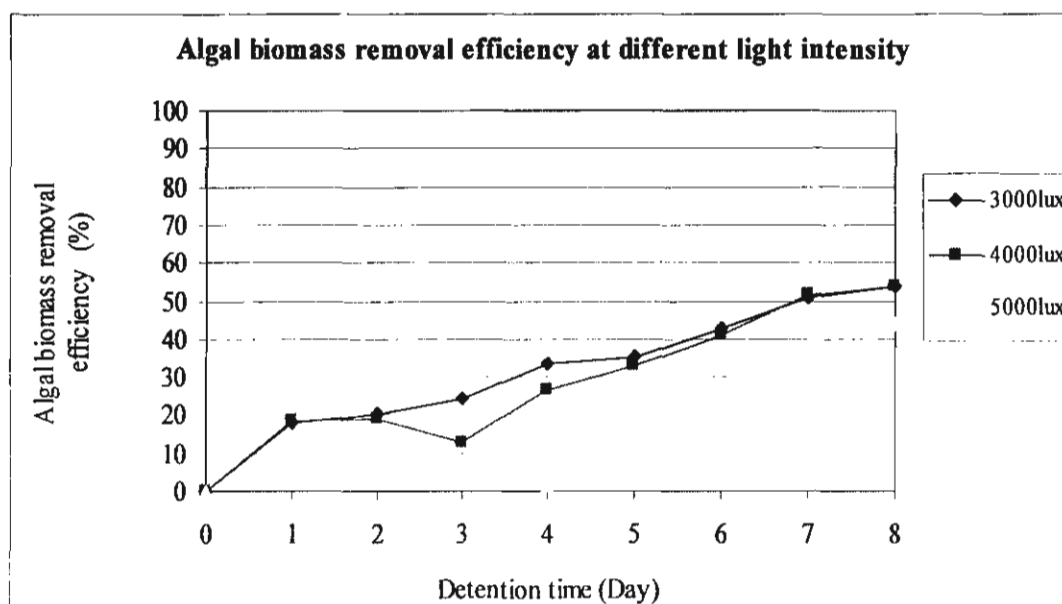
รูปที่ 18 ประสิทธิภาพการลดค่า OD₅₆₀ ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์



ที่ระดับความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD_{560} เท่ากับ 42.98% ในวันที่ 6 ของการทดลอง ส่วนที่ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงวันที่ 2 – 4 ของการทดลอง หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD_{560} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนสิ้นสุดการทดลอง โดยในวันที่ 6 ของการทดลองมีประสิทธิภาพเท่ากับ 37.16% สำหรับค่ารับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD_{560} สูงในวันแรกของการทดลองแล้วค่อย ๆ ลดลงเล็กน้อยจนวันที่ 4 ของการทดลอง หลังจากนั้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายเพิ่มขึ้น จนสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD_{560} เท่ากับ 49.20%

เมื่อเปรียบเทียบกับจะพบว่า การให้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าในรูปของค่า OD_{560} สูงที่สุด ส่วนค่ารับการทดลองที่ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายต่ำสุด ผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD_{560} แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \text{ value} < 0.05$)

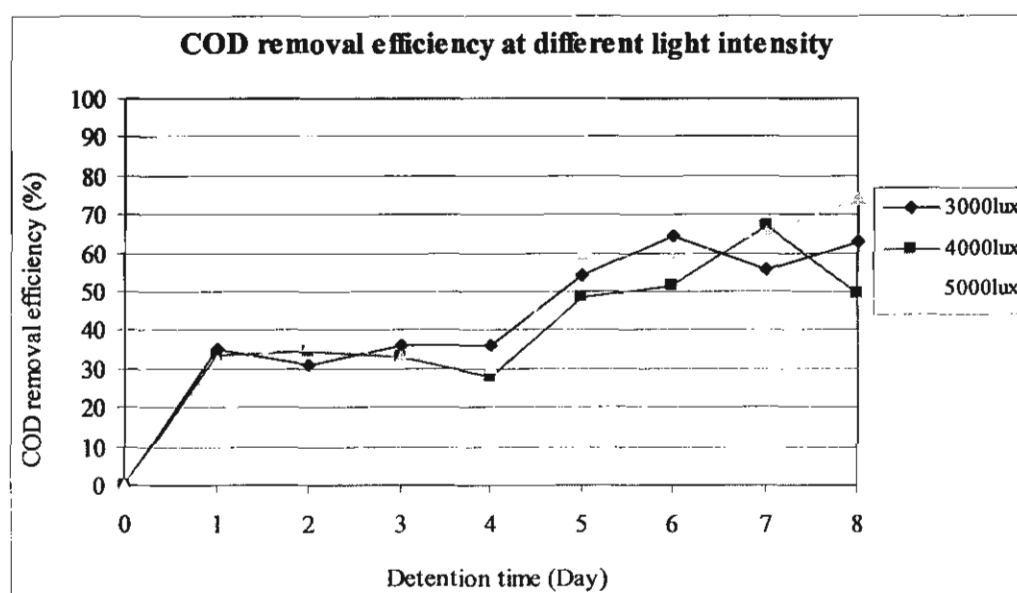
รูปที่ 19 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอย ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์



จากรูปที่ 19 ที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ และ 4,000 ลักซ์ มีแนวโน้มของการกำจัดสาหร่ายจะคล้ายกัน คือ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในวันที่ 6 ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 40.98% และ 40.92% ตามลำดับส่วนต่อการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยค่อนข้างต่ำในช่วง 4 วันแรก หลังจากนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนสิ้นสุดการทดลองซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยในวันที่ 6 ของการทดลองเท่ากับ 23.48%

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่าค่ารับการทดลองที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงสุด และต่ำสุดในค่ารับการทดลองที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ซึ่งผลทางสถิติชี้ให้เห็นว่า ความเข้มแสงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \text{ value} < 0.05$) โดยความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปค่าของแข็งแขวนลอยสูงกว่าความเข้มแสง 4,000 และ 5,000 ลักซ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \text{ value} < 0.05$)

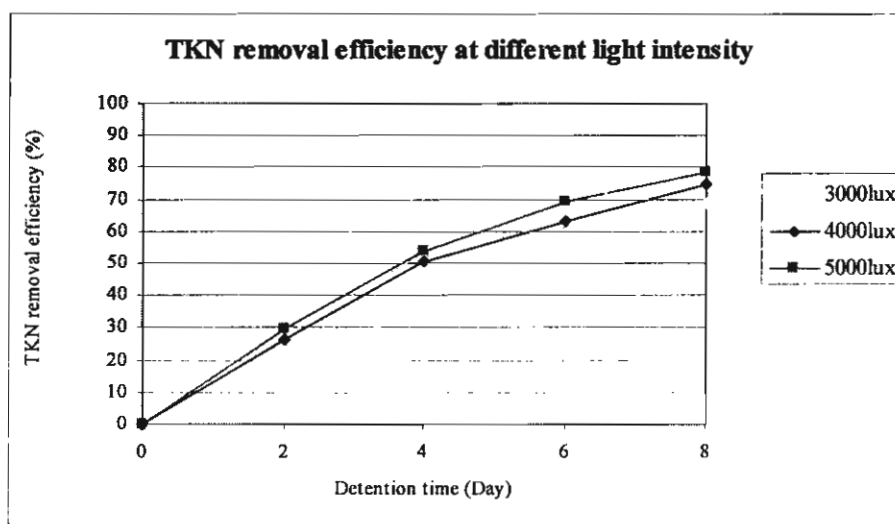
รูปที่ 20 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์



จากรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD ในแต่ละค่ารับการทดลองนั้น คล้ายคลึงกัน คือ มีประสิทธิภาพสูงในวันแรกของการทดลอง จากนั้นมีแนวโน้มที่จะคงที่ในช่วง วันที่ 2 – 4 หลังจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัด COD จะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งในวันที่ 5 ของการทดลองและเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนสิ้นสุดการทดลอง เมื่อพิจารณาในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD ณ ความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ เท่ากับ 64.49%, 51.79% และ 58.99% ตามลำดับ ถึงแม้ตัวเลขดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าค่ารับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงสุด แต่ผลทดสอบทางสถิติพบว่า ความเข้มแสงที่ต่างกันส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P \text{ value} > 0.05$)

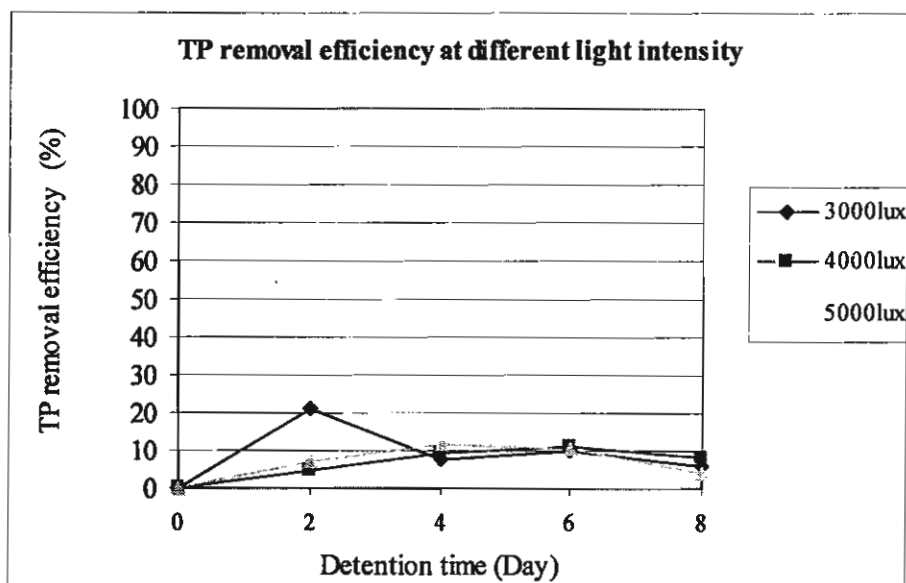
ในส่วนของการกำจัดไนโตรเจน รูปที่ 21 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ มีค่าเท่ากับ 62.72%, 63.00% และ 69.48% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนได้สูงที่สุด และผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงที่ต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

รูปที่ 21 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์



รูปที่ 22 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสแต่ละระดับความเข้มแสงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงวันที่ 6 ของการทดลองซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 9.98%, 11.03% และ 10.86% ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในแต่ละดำรับการทดลองจะลดลง จะเห็นได้ว่าในวันที่ 6 นั้น ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ นั้นสูงกว่า 3,000 และ 4,000 ลักซ์ เล็กน้อย ซึ่งผลทางสถิติ พบว่า ที่ระดับความเข้มแสงต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (P value < 0.05)

รูปที่ 22 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์



สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.3.1 ประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูล ที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100 200 และ 300 ตัวต่อลิตร

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่พบว่า จำนวนไรแดงตั้งต้นไม่มีผลต่อผลผลิตจำนวนไรแดงทั้งหมด แต่เมื่อเปรียบเทียบในวันที่ 6 ของการทดลองพบว่าเมื่อมีปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร ผลผลิตไรแดงจะเท่ากับ 36,600, 26,667 และ 28,067 ตัว/ลิตร ตาม

ลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตรนั้นให้ผลผลิตไรแดงสูงที่สุด คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้นได้เท่ากับ 3:1

การศึกษาค้างนี้ให้ผลคล้ายกับการศึกษาของหยกแก้ว และคณะ (35) ซึ่งใช้สาหร่ายสีเขียว (*Chlorella* sp.) ที่เลี้ยงในน้ำกากถั่วเหลืองเป็นเวลา 3 วัน เพื่อนำมาเลี้ยงไรแดงแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้ปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่ 15, 30 และ 45 ลิตรและเพาะเลี้ยงไรแดงที่ปริมาณไรแดงตั้งต้น 1.5, 3 และ 4.5 กรัม (น้ำหนักเปียก) พบว่าการเพิ่มปริมาณไรแดงตั้งต้นจาก 3.0 กรัม สามารถเพิ่มเป็น 4.5 กรัม (น้ำหนักแห้งหรือคำนวณเป็นจำนวนไรแดงเท่ากับ 200 เป็น 300 ตัว/ลิตร นั้นไม่ทำให้ผลผลิตไรแดงทั้งหมดแตกต่างกัน แต่การเพิ่มปริมาณอาหารจาก 30 เป็น 45 ลิตร หรือเทียบเท่ากับ ปริมาณสาหร่าย 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อผลผลิตไรแดง และได้แนะนำว่าปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงไรแดงในบ่อที่ใช้ปริมาตร 150 ลิตร ควรอยู่ระหว่าง 30-45 ลิตร (300-450 มิลลิกรัมต่อลิตร) และใช้ไรแดงเริ่มต้นประมาณ 3 กรัม (น้ำหนักสด) (200 ตัว/ลิตร) ในเวลาเพาะเลี้ยง 4 วัน จะให้ผลผลิตไรแดงสูงสุดเท่ากับ 100-137 กรัม (น้ำหนักเปียก) หรือ 6,667-9,134 ตัว/ลิตร คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้นเท่ากับ 2.25:1 เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตไรแดงกับการศึกษานี้พบว่า ปริมาณผลผลิตไรแดงที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้น 3:1 มีผลผลิตไรแดงสูงกว่า 4-5 เท่าทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากการที่มีปริมาณอาหารต่อไรแดงมากกว่าทำให้ไรแดงสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้สูงกว่า

ผลการศึกษาครั้งนี้ไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ รัตนา (36) ซึ่งใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร กล่าวคือเมื่อจำนวนไรแดงตั้งต้นเพิ่มขึ้นจาก 1,500 เป็น 3,000 ตัว/ลิตร ทำให้ปริมาณผลผลิตไรแดงทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณสาหร่ายตั้งต้น 260 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 3,000 ตัว/ลิตรนั้นให้จำนวนไรแดงทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 8,200 ตัว/ลิตร ในระยะเวลา 2 วัน หรือคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่ายและจำนวนไรแดงตั้งต้น เท่ากับ 0.081:1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนดังกล่าวต่ำกว่าการศึกษาค้างนี้มาก จึงทำให้ได้ผลผลิตไรแดงต่ำกว่า ซึ่งอัตราการกรองอาหารของไรแดงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสาหร่าย (37, 38) และขนาดลำตัวของไรแดง (39)

จากการศึกษาค้างนี้จะเห็นได้ว่าไรแดงมีการเจริญเติบโตสูงสุดเพียงครั้งเดียวหลังจากนั้นจะลดจำนวนลงซึ่งอัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้ง

ต้น 100 ตัว/ลิตร จะให้ผลผลิตไรแดงสูงสุด 36,600 ตัว/ลิตรหรือคิดเป็น 366 เท่าของจำนวนไรแดงตั้งต้นจากการศึกษาของหยกแก้ว (40) โดยการใช้สาหร่าย *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในน้ำเสียของโรงงานผลิตนมถั่วเหลืองสำหรับเพาะเลี้ยงไรแดง พบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 3 วันจนมีปริมาณสาหร่ายเข้มข้นเทียบเป็นค่า OD₅₆₀ เท่ากับ 0.4 จะให้ผลผลิตไรแดงสูงสุด 13,520 ตัว/ลิตร หรือคิดเป็น 135.6 เท่าของจำนวนไรแดงตั้งต้น ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถเปรียบเทียบผลผลิตไรแดงของแต่ละการศึกษาได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างในเรื่องของปัจจัยทางด้านอาหาร สภาวะแวดล้อม แต่จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าจำนวนไรแดงทั้งหมดที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตร หรือคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 3:1 ให้ผลผลิตไรแดงเป็นที่น่าพอใจ

อาหารของไรแดง ได้แก่ สาหร่าย และโปรโตซัว รวมทั้ง แบคทีเรีย และสารอินทรีย์ต่างๆ จะถูกไรแดงกิน โดยอาหารที่อยู่ในน้ำจะผ่านเข้าไปในทางเดินอาหาร (41, 42) ไรแดงไม่เลือกชนิดของอาหาร โดยอาหารที่มีขนาดเล็กในน้ำเท่านั้นที่จะถูกกรองเข้าทางปาก จากการศึกษาของวรกร (43) พบว่า ไรแดงสามารถกินถั่วป่นโดยตรงได้ โดยกรองจากน้ำที่ใช้เลี้ยง การที่ไรแดงกินสาหร่าย *Chlorella* sp. ส่งผลให้ปริมาณ suspended solids, OD₅₆₀ และ COD ลดลง (4, 20, 25, 44, 45)

สำหรับประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของ ค่า OD₅₆₀ ค่าของแข็งแขวนลอย และค่า COD ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าจำนวนไรแดงตั้งต้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ดังจะเห็นได้จากการทดลองที่พบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่จำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตรนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก โดยประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD₅₆₀ อยู่ในช่วง 73.33-78.86%, ค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 55.56-64.23% และค่า COD อยู่ในช่วง 38.38-43.35% ในวันที่ 5 ของการทดลอง และพบว่า การทดลองที่มีไรแดงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงกว่าการทดลองที่ไม่มีไรแดงในรูปของค่า OD₅₆₀, ค่าของแข็งแขวนลอย (suspended solids) และ COD ประมาณ 25-30%, 7-16% และ 20-27% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณสาหร่ายมีการลดลงเช่นกัน โดยการลดลงดังกล่าวอาจเนื่องมาจากกิจกรรมของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง รวมถึงการที่สาหร่ายตายและตกตะกอนไปเอง

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า Suspended solids จะค่อนข้างต่ำกว่า ค่า OD_{560} ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการตรวจวัดปริมาณสาหร่ายในรูปของค่า OD_{560} นั้นเป็นการใช้ค่าการดูดกลืนแสงสีเขียว ส่วนการวิเคราะห์ในรูปของค่า suspended solids เป็นการหาปริมาณสาหร่ายที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยโดยวิธีการกรองน้ำทิ้งด้วยกระดาษกรอง GF/C ซึ่งอาจมีของแข็งแขวนลอยที่มีอนุภาคใหญ่เกินกว่าที่ไรแดงจะสามารถกรองเข้าปากของมันได้ ซึ่งสัตว์จำพวก Zooplankton สามารถกินอาหารที่มีขนาดไม่เกิน 25 ไมครอน (46) ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในรูปของ suspended solids จึงยังอาจคงอยู่ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ต่ำกว่าในรูปของค่า OD_{560}

ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD นั้นมีค่าต่ำกว่าการตรวจวัดในรูปของค่า OD_{560} และ suspended solids ทั้งนี้เนื่องจากการตรวจวัดในรูปของค่า COD เป็นการตรวจวัดปริมาณสาหร่ายในรูปของสารอินทรีย์ ซึ่งในน้ำทิ้งอาจมีสารอินทรีย์ทั้งที่เป็นสาหร่ายและไม่ใช่สาหร่ายปะปนอยู่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไรแดงไม่สามารถกินได้ นอกจากนี้จะเห็นได้อีกว่าหลังจากที่ปริมาณไรแดงลดลงแล้วประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ในรูปของค่า COD ลดลงด้วยเนื่องจากการที่ไรแดงมีจำนวนหนาแน่นทำให้เกิดการขับถ่ายของเสียมีมากขึ้น ซึ่งของเสียดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า COD เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า COD จึงต่ำกว่าการตรวจวัดในรูปของค่า OD_{560} และ suspended solids

สำหรับลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งซึ่งทำการตรวจวัดในรูปของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) พบว่า จำนวนไรแดงตั้งต้นต่างกันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส โดยประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน อยู่ในช่วง 60.73-73.18% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะอยู่ในช่วง 25.60-30.95% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ไม่มีไรแดงแล้วพบว่า ไรแดงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและ ฟอสฟอรัส เพิ่มขึ้นประมาณ 9 และ 6% ตามลำดับ

กลไกการกำจัดไนโตรเจนในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียเกิดขึ้นได้ โดยการนำไนโตรเจนไปใช้ของสาหร่าย การระเหยไปในรูปของแอมโมเนีย การเกิดไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน การ

สะสมในรูปของแข็งในกากตะกอน (Sludge) และหลาย ๆ กลไกร่วมกัน (47) มีรายงานว่า ระบบ algal – bacterial สามารถทำให้ไนโตรเจนลดลงได้ 72% (48) จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณสาหร่ายในการทดลองที่ไม่มีไรแดงนั้นเริ่มลดลงตั้งแต่วันแรกของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายไม่ได้มีการเจริญเติบโตขึ้นเลย ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนที่ลดลงอาจมีสาเหตุมาจากกิจกรรมของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายไนโตรเจน การที่ไรแดงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้นนั้นอาจเนื่องมาจากการที่ไรแดงสามารถกินพวกแบคทีเรียได้ จึงทำให้เมื่อตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนโดยมีการกรองเอาสาหร่ายและไรแดงออก แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายไนโตรเจนที่มีขนาดเล็กกว่ารูกระดาดกรอง (1.2 ไมครอน) หลุดรอดออกมาได้ ซึ่งการทดลองที่มีไรแดงอาจมีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่าการทดลองที่ไม่มีไรแดงเนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกไรแดงกินเป็นอาหาร

ส่วนฟอสฟอรัสในน้ำลดลงได้ 3 ทางด้วยกันคือ การนำไปใช้ของสิ่งมีชีวิต (P uptake) การถูกกำจัดไปกับตะกอนของสิ่งมีชีวิต (Sludge organism) และการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งตามธรรมชาติแล้ว ทั้ง 2 วิธีแรกจะกำจัดฟอสฟอรัสได้มากที่สุด (49) จากที่กล่าวไปในตอนต้นแล้วว่าสาหร่ายไม่มีการเจริญเติบโตในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นการลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสจึงอาจเกิดจากกิจกรรมของแบคทีเรียทำให้เกิดการตกตะกอนของฟอสฟอรัส ซึ่งการที่ไรแดงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นกว่าการทดลองที่ไม่มีไรแดงนั้น อาจเกิดจากการที่ไรแดงสามารถกินพวกแบคทีเรียและตะกอนที่มีอนุภาคเล็กๆ เข้าไป

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ รัตน (36) ที่พบว่าการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเท่ากับ 55.56 และ 67.02% ตามลำดับ จะพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งนี้แต่ ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสจะสูงกว่ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองครั้งนี้ไม่ได้มีการเติมอากาศ เมื่อจำนวนไรแดงเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ซึ่งจะทำให้การดูดซึมฟอสเฟตในสิ่งมีชีวิตต่ำลง (48) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าไรแดงมีส่วนเกี่ยวข้องในทางอ้อมต่อการลดลงของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยการกินพวก สาหร่ายและ แบคทีเรีย ซึ่งจำนวนไรแดงตั้งต้นที่แตกต่างกันไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* แตกต่างกัน

5.3.2 ประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่ระดับความเข้มแสงต่างกัน

แสงมีผลต่อพฤติกรรมการว่ายน้ำและการกระจายตัวของไรแดง (50) ความเข้มแสงที่สูงเกินไปจะมีผลในการหยุดยั้งการเจริญเติบโต และการสืบพันธุ์รวมถึงการเคลื่อนที่ของไรแดง (37)

ในส่วนการทดลองความเข้มแสงระดับ ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. นั้น พบว่าในช่วงแรก ๆ ไรแดงมีการเจริญเติบโตอย่างช้า ๆ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการปรับตัวของไรแดง หลังจากนั้นไรแดงจะเพิ่มจำนวนสูงสุดเพียงครั้งเดียวแล้วลดจำนวนลง ผลการทดลองพบว่าจำนวนผลผลิตไรแดงทั้งหมดที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \text{ value} < 0.05$) แสดงว่าแสงมีผลต่อจำนวนผลผลิตไรแดงทั้งหมด

จะเห็นได้ว่าจำนวนไรแดงในความเข้มแสง 3,000 และ 4,000 ลักซ์ นั้นมีความใกล้เคียงกันมาก ส่วนดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์นั้น มีจำนวนไรแดงต่ำสุด ความแตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการทดลอง เพราะเมื่อทำการวัดอุณหภูมิในในแต่ละดำรับการทดลองแล้วพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์นั้น มีอุณหภูมิเท่ากับ 31.5, 32 และ 36 °C ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของไรแดงจะอยู่ในช่วง 24-31 °C (41) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำที่ระดับความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ นั้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเพาะเลี้ยงไรแดงมากที่สุด จึงอาจเป็นสาเหตุให้จำนวนไรแดงในดำรับการทดลองที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ มากกว่าที่ความเข้มแสง 4,000 และ 5,000 ลักซ์ จากการศึกษาของ Jensen และคณะ (51) พบว่า ไรแดงมีพฤติกรรมของการอพยพโดยไม่สนใจต่อปริมาณอาหาร เมื่อทำการทดลองการให้แสงที่แตกต่างกันที่ระดับผิวน้ำ Ratnayake (52) พบว่าแสงมีผลต่อการกระจายตัวของไรแดง โดยไรแดงมักจะชอบว่ายหลบแสงแดดจ้าไปอยู่รวมกันเป็นกลุ่มในเงามืดด้านล่างของภาชนะเลี้ยง Rottman (41) และคณะ แนะนำว่าในการเพาะเลี้ยงไรแดงนั้น ควรมีการให้ร่มเงามากกว่า 1/3 ของพื้นที่ผิวน้ำ

จากการศึกษาของวรากร (43) เกี่ยวกับผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของไรแดง พบว่า ที่ความเข้มแสง 64 ft-candle/ft² (689 ลักซ์) จะมีผลผลิตไรแดงมากกว่าที่ความเข้มแสง 250 ft-candle/ft² (2,691 ลักซ์) และสรุปว่าแสงที่มากเกินไปจะมีผลในการหยุดยั้งการเจริญ

เติบโตของไรแดง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองนี้พบว่าที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์นั้นจะมีจำนวนไรแดงสูงที่สุด ถึงแม้ว่าความเข้มแสงดังกล่าวจะสูงเกินไปสำหรับการทดลอง แต่ความแตกต่างตรงนี้อาจมีสาเหตุมาจากชนิดของแสงที่ใช้ การทดลองนี้ให้แสงโดยใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ส่วนมารศรี (49) ใช้หลอดไฟชนิดที่ให้แสงสว่างด้วยความร้อน ซึ่งอาจส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำสูงกว่าการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงที่แตกต่างกัน ทำให้จำนวนผลผลิตไรแดงทั้งหมดแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพในการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ตรวจวัดในรูปของค่า OD₅₆₀ และค่า SS มีความแตกต่างกันที่ความเข้มแสงต่างกัน โดยดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่า OD₅₆₀ สูงสุด (49.20%) สาเหตุอาจมาจากความเข้มแสงดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ซึ่งความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะอยู่ในช่วง 5,000-10,000 ลักซ์ (53) กิจกรรมการกรองอาหารของไรแดงทำให้อนุภาคเล็ก ๆ รวมถึงความขุ่นลดลง (29) สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยกลับพบว่า ดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยต่ำสุด อาจมีสาเหตุมาจากการที่จำนวนไรแดงในดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ นั้นมีจำนวนน้อยกว่า 3,000 และ 4,000 ลักซ์ จึงทำให้อนุภาคเล็ก ๆ ที่นอกเหนือไปจากเซลล์สาหร่ายในน้ำถูกกินไปได้น้อย ตรงนี้แสดงให้เห็นว่าไรแดงกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลได้โดยการกรองสาหร่ายอนุภาคเล็ก ๆ และตะกอน สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของค่า COD นั้น พบว่าที่ความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์นั้น ไม่แตกต่างกัน

การศึกษาของรัตน (36) เกี่ยวกับการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ในรูปของค่า OD₅₆₀ ค่าของแข็งแขวนลอย และค่า COD สูงกว่าการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลที่ใช้ในการทดลองนี้ มีความขุ่นมากกว่าน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร การที่น้ำมีความขุ่นมากจะไปขัดขวางประสิทธิภาพการกรองอาหารของไรแดง (54) อย่างไรก็ตามจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ มีความแตกต่างกัน

ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งภายหลังจากการใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถตรวจวัดในรูปของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

กลไกการลดลงของไนโตรเจนตามธรรมชาติได้แก่ การนำไนโตรเจนไปใช้ของสาหร่าย, การระเหยในรูปของแอมโมเนีย, การสะสมในสลัดจ์ การดูดซับแอมโมเนีย และหลาย ๆ กลไกร่วมกัน (47) ไรแดงมีส่วนเกี่ยวข้องในการกำจัดไนโตรเจนโดยการกินสาหร่าย, แบคทีเรียและตะกอนเล็ก ๆ ในน้ำเสีย สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ นั้นให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงที่สุด สาเหตุอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำทิ้งที่ระดับความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ สูงกว่าในดำรับการทดลองที่ใช้ความเข้มแสง 3,000 และ 4,000 ลักซ์ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำในระบบบำบัดไนโตรเจนมีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของจุลชีพ โดยอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง (55)

จากการทดลองพบว่าหลังจากสาหร่ายและไรแดง เริ่มลดจำนวนลงแล้ว ปริมาณไนโตรเจนยังคงลดลงต่อไปเรื่อย ๆ ซึ่งอาจเกิดจากกิจกรรมของแบคทีเรียซึ่งทำหน้าที่ในการกำจัดไนโตรเจน ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่ความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์นั้นมีความใกล้เคียงกัน คือมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 15%) ซึ่งการลดลงของฟอสฟอรัสอาจมีสาเหตุเนื่องจากการตกตะกอนและกิจกรรมของแบคทีเรีย

ในส่วนการใช้ไรแดงในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ปริมาณสาหร่ายตั้งต้น 300 มก./ลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100ตัว/ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดและให้ผลผลิตไรแดงสูงสุด 36,600 ตัว/ลิตร ที่ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงเก็บกัก 6 วัน ไรแดงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายคลอเรลล่าที่ปริมาณสาหร่ายตั้งต้น 300 มก./ลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100 ตัว/ลิตร ในรูปของค่า OD₅₆₀ ค่าของแข็งแขวนลอยและ COD เท่ากัน 73.73%, 57.56% และ 43.35% ตามลำดับโดยไรแดงทำให้ประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 9% และ 6% ตามลำดับ

2. แสงมีผลต่อประสิทธิภาพของไรแดงในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. โดยที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Chlorella* sp. ในรูปของค่า OD₅₆₀ (49.20%) ส่วนที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์นั้นจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด (42.98%) ที่ระยะเวลาเก็บ 6 วัน

3. เนื่องจากการทดลองครั้งนี้เป็นแบบทีละเท (Batch system) ดังนั้นในการเก็บเกี่ยวไรแดงจึงควรกระทำเพียงครั้งเดียวในวันที่ไรแดงมีจำนวนสูงสุด คือ วันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยง เพราะจากการสังเกต พบว่า หลังจากวันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยง ไรแดงจะเริ่มลดจำนวนลงและมีไรแดงที่ลำตัวผอมยาว และซีดขาว เมื่อนำมาส่งกล้องจุลทรรศน์จะพบว่าเป็นไรแดงเพศผู้ ซึ่งเป็นสัญญาณว่าเกิดสภาวะไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของไรแดง ซึ่งอาจเนื่องจากสภาวะขาดอาหาร, ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ไม่เหมาะสม, เกิดการสะสมของของเสียที่ขับถ่ายออกจากตัวไรแดง (5, 8)

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานที่เตรียมส่งตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ จำนวน 2 เรื่อง คือ
 - 1.1 เรื่อง Nutrients Uptake and Growth of *Chlorella* sp. in Treated Septage คาดว่าจะส่งผลงานเพื่อขอตีพิมพ์ใน J. WPCF ภายในเดือนกรกฎาคม 2546
 - 1.2 เรื่อง Investigation of *Chlorella* sp. harvesting by *Moina macrocopa* คาดว่าจะส่งผลงานเพื่อขอตีพิมพ์ในวารสาร J. Environ. Sci. Health ภายในเดือนสิงหาคม 2546
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - 2.1 เชิงสาธารณะ มีการส่งต่อข้อมูลผลงานวิจัยให้กรุงเทพมหานครรับทราบ และเป็นทางเลือกในการจัดการกับน้ำปฏิกูลที่ผ่านระบบบำบัดแล้วต่อไป
 - 2.2 เชิงวิชาการ ใช้เป็นกรณีศึกษาการจัดการของเสียชุมชนเขตเมืองในการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม และหลักสูตรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสิ่งแวดล้อม
3. อื่น ๆ ใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาคู่มือการจัดการและการบำบัดน้ำเสียชุมชนของเทศบาลต่าง ๆ ในประเทศ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการนำร่องในการจัดการอบรมเจ้าหน้าที่เทศบาลในการจัดการน้ำเสียชุมชนเทศบาล สนับสนุนโครงการโดยองค์การจัดการน้ำเสียและรัฐบาลประเทศเดนมาร์ก

เอกสารอ้างอิง

1. Metcalf L. Eddy P. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse 3rd ed. Singapore:McGraw Hill;1991.
2. Quiming L. Mass culture of water flea, *Moina macrocopa* (M.Sc thesis in Science). Bangkok : Asian Institute of Technology ; 1988.
3. Hammouda O, Gaber A, Raouf A.N. Microalgae and wastewater treatment. Ecotoxicology & Environmental safety 1995 ; 31 : 205-210.
4. Narkthon S. Nitrogen and phosphorus removal from piggery wastewater by green algae *Chlorella sp.* (M.Sc thesis in Environmental Technology). Bangkok: Faculty of Graduate Studies, Mahidol University : 1996.
5. Aziz MA, Ng WJ. Feasibility of wastewater treatment using the activated algae process. Bioresource Technol. 1992 ; 40 : 205-208.
6. Pechmanee T, Assavaaree M, Boonchaay S. Possibility of using *Chlorella sp.* for *Moina* culture in Southern Thailand. Songkhla : National Institute of Coastal Aquaculture ; 1993. Technical paper no. 16.
7. Taevaratmaneegul P, Viputanumas T, Suksawad T. Increasing the *Moina macrocopa* production with vitamins. Pathumthani province : Inland Fisheries Division. Department of Fisheries;1989. Technical paper no. 11.
8. Kawai H, Juredini P, Neto JC, Motter OF, Rossetto R. The use of an algal microcrustacean polyculture system for domestic wastewater treatment. Wat Sci Tech 1987 ; 19 (12) :65-70
9. ฝ่ายกำจัดสิ่งปฏิกูล กองควบคุมสิ่งปฏิกูล สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร, โรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม
10. ยุวดี พรพิมลศาล. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่าย. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2530.
11. วงศ์เมือง หงษ์สกุล. สาหร่ายคลอเรลลา. กรุงเทพฯ: แพรสยาม, 7.
12. บรรจบ ชุณหสวัสดิกุล. สาหร่ายเซลล์เดียว. กรุงเทพฯ: รวมทรรศน์, 137.
13. Bold HC, Wynne MJ. Introduction to the algae structure and reproduction. New jersey: Prentice – Hall; 1978.
14. Trainor FR. Introductory phycology. New York: John Wiley & Sons, 1978.

15. ชีวมพร กุทยานนท์. Nutrition Growth and Reproductionm ใน:ชีวมพร กุทยานนท์ , อัญชลี
ตันตะวะศาสตร์ และวีรพงศ์ ลุลิตานนท์. แบคทีเรียวิทยา ตอนที่ 1. ขอนแก่น: คณะ
แพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2527: 55 – 69.
16. Round FE. The Biology of the Algae. 2nd ed. London: Edward Arnold, 1997.
17. Wong ML. Effect of Variety Nutrients on Growth of *Chlorella*. M.S.IE. in Environmental
Engineering. Faculty of Engineer, Asian Institute of Technology (AIT) 1982; 3 – 7.
18. มาวิทย์ อัครวรีและธิดา เพชรมณี. ปัจจัยบางประการที่มีต่อการเพิ่มจำนวนของคลอเรลล่าในห้อง
ปฏิบัติการ. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง; 2534. เอกสารวิชาการฉบับที่ 5
19. Gantar M, Obrecht Z, and Dalmacija B. Nutrient Removal and Algal Succession during the
Growth of *Spirulina plantesis* and *Scenedesmus quadricauda* on Swine
Wastewater. Bio Tech 1991; 36: 167 – 171.
20. Tredici MR, Margheri MC, Zittelli CG, Biagiolini S and Capolino E. Nitrogen and
Phosphorus Reclamation from Municiple Wastewater through an Artificial
Food – Chain System. Bio Tech 1992; 42:247 – 253.
21. Megharaj M, Pearson HW, Venkateswarhu K. Removal of Nitrogen and Phosphorus by
Immobilized cell of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus bijgatus* isolated from
soil. Enzyme Micro Tech 1992; 14: 656 – 658.
22. Canizares RO, Dominguez AR, Rivas L, Montes MC, Travieso L and Benitez F. Free and
Immobilized Cultures of *Spilurina maxima* for Swine Waste Treatment. Biotech
Letters March 1993; 15(3) 321 – 326.
23. Tam NFY, Lau PS, Wong YP. Wastewater in Organics N and P Removal by Immobilized
Chlorella vulgaris. Wat Sci Tech 1994; 30(6): 369 – 374.
24. Travieso L, Benitez F, Weiland P, Sanchez E, Dupeyron R, Dominguez AR. Experimentals
on Immobilizations of Microalgae for Nutrient Removal in Wastewater Treatments
Bio Tech 1996; 55: 181 – 186.
25. Pechmanee T, Assavaaree M, Boonchaury S. Possibility of using *Chlorella sp.* for *Moina*
culture in Southern Thailand. Songkhla: National Institute of Coastal Aquaculture
; 1993. Technical paper no. 16.
26. Yamalee Y, Phupat S, Sujaritvongsanon K, Yongmanitchai V, Patharakulpong P. Utilization
of *chlorella sp.* from wastewater in soy – milk plant for feeding on *Moina*
macrocopa. Conference Proceeding 21th.

27. ธรรมนูญ โรจธนูปานนท์, ฉวีวรรณ อภิสทธิไพศาล. การศึกษาเบื้องต้นทางชีววิทยาและการเลี้ยงไรแดง. รายงานผลการวิจัยเล่มที่ 5 กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2523.
28. Duangsawad S. Life history of *Moina macrocopa*. Journal of Fisheries 1981 34(5): 553-557.
29. Ding R. Ecology of *Daphnia* in stabilization pond. Texas: Texas State Department of Health Division of Wastewater Technology and Surveillance;1973.
30. Navanarasert M. Utilization of domestic wastewater for fresh water flea (*Moina macrocopa*) culture (M.Sc. thesis in Environmental Science). Bangkok: Faculty of Graduate Studies, Chulalongkorn University; 1985)
31. Vergenes L., Tertiary treatment with a controlled ecological system. EPA tech. Sci. EPA 60/273-022, Municipal Water District. Washigton DC., 1973.
32. ลัดดา วงรัตน์. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. กรุงเทพฯ : ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
33. Droop MR. A note on the isolation of small marine algae and flagellates for pure cultures. J. mar. biol. Assoc. 1954, 26:296-302.
34. Metcalf L. Eddy P. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse 3rd ed. Singapore:McGraw Hill;1991.
35. หยกแก้ว ยามาลีและสมบูรณ์ ผู้พัฒน์. การเลี้ยงไรแดงแบบกึ่งต่อเนื่องโดยใช้สาหร่ายสีเขียว (*Chlorella sp.*).สถาบันอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์:กรุงเทพฯ.
36. รัดนา อัครศิลป์โสภณ. การใช้ไรแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม] กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2542.
37. Hutchinson EG, A treatise on limnology. Vol I. Introduction to lake biology and the limnoplankton. New York John Wiley & Sons Inc.; 1967.
38. Clare J. Daphnia : An Aquarius's guide. <http://www.caudata.org/daphnia>. 7/11/2002.
39. Quimming L. Mass culture of water flea, *Moina macrocopa* (M.Sc thesis in Engineering). Bangkok, Asian Institute of Technology; 1988.
40. หยกแก้ว ยามาลี, สมบูรณ์ ผู้พัฒน์. การนำ *Chlorella sp.* ที่ได้จากการเลี้ยงในน้ำทิ้งโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลืองมาเลี้ยงไรแดง.สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์:กรุงเทพฯ.

41. Rottmann WR. Culture techniques of *Moina*: the ideal daphnia for feeding fish fry.
http://edis.ifas.edu/BODY_FAO_24;14/8/2000.
42. Pennak WR. Fresh-water invertebrates of the United States : Protozoa to mollusca. 3rd
edition. John Wiley & Sons, Inc; 1989.
43. วรากร วราธวัชปติ. การทดลองเพาะเลี้ยงและการศึกษานิเวศวิทยาบางประการของไรน้ำ [ปริญญา
นิพนธ์ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต] กรุงเทพมหานคร: วิทยาลัยวิชาการศึกษา
ประสานมิตร, 2514.
44. Becker WE. Algae mass cultivation-production and Utilization. Process Biochemistry
Aug./Sept; 1996.
45. Kawasaki YL, Silva TE, Gordon SM. Aquacultural approaches to recycling of dissolved
nutrients in secondary treated domestic wastewater I. Water Res 1982; 16:37-49.
46. Smith WD. Wastewater treatment with complementary filter feeder: A new method to
control excessive suspended solids and nutrients in stabilization ponds. Wat.
Env. Res n.d;65(5):650-654.
47. Reed CS. Nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. Journal WPCF 1985;57
(1):39-45.
48. Tchobanoglous G, Burton LF. Wastewater Engineering: treatment disposal and reuse. 3rd
ed. Singapore. MC Graw Hill; 1991.
49. มารศรี นวนรเศรษฐ์. การนำน้ำโสโครกจากแหล่งชุมชนมาใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงไรแดง
[วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม]
กรุงเทพมหานคร:บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
50. Wetzel GR. Limnology. 2nd edition. Michigan State University. Saunders College Publishing;
1983.
51. Jensen HK, Kleiven TO, Jakobsen. How important is light in the aggregation behaviour of
Daphnia pulex (Cladocera: Crustacea). Hydrobiologia 1999; 411:13-18.
52. Ratnayake JKR. Studies of culture of *Moina Macrocopa* using organic and inorganic inputs
(M.Sc. thesis in Science). Bangkok. Asian Institute of Technology; 1991.
53. Barnabe G. Aquaculture Vol. 1 Great Britain; 1990.
54. Patrick L. Manual on the production and use live food for aquaculture. FAO Fisheries
Technical Paper 361. Rome;1996(www.fao.org/DOCREP/003/w373zeox.htm)
55. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมกรน้ำเสี่ย เล่ม 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2543.

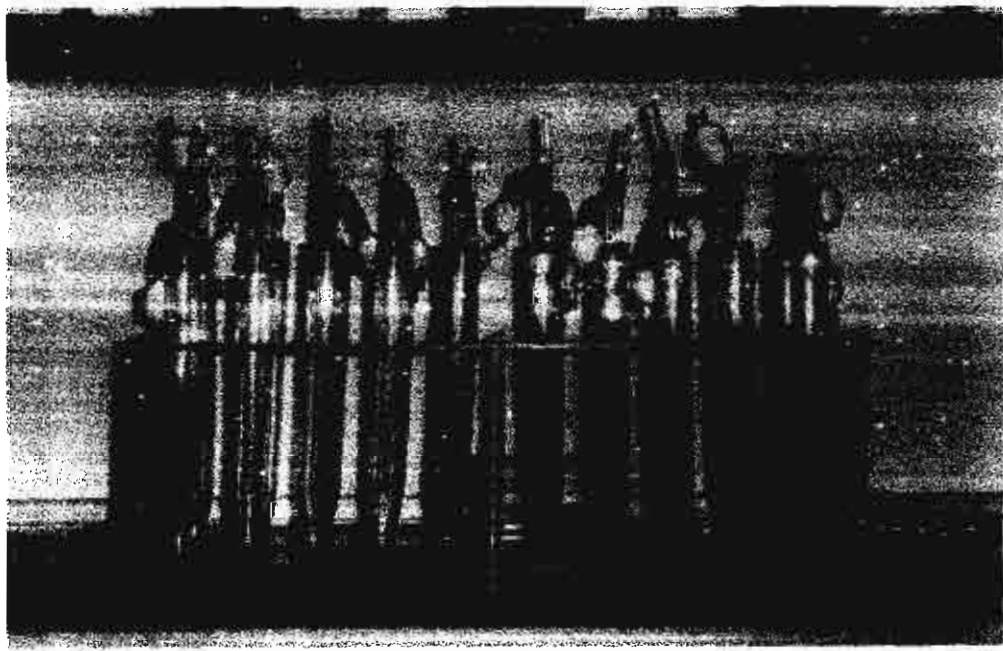
ภาคผนวก ก

รูปที่ 1 การเตรียมหัวเชื้อ *Chlorella sp.* ในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 2 การเพาะเลี้ยง *Chlorella sp.* ที่ระดับความเข้มแสงแตกต่างกัน



รูปที่ 1 การทดลองเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ระดับความเข้มแสงต่างกัน



รูปที่ 2 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย *Chlorella sp.*

การตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์

Spectrophotometric determination of Chlorophyll a and b

1. Apparatus

- 1.1 Spectrophotometer
- 1.2 Centrifuge

2. Reagent

- 2.1 Magnesium carbonate (MgCO_3)
- 2.2 Acetone 90% ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)

3. Procedure

- 3.1 Placed 5 ml. of sample in 25 ml. vial and added 1 ml. of Magnesium carbonate suspension (1 g. + Distilled water 100 ml.).
- 3.2 Concentrated the sample by filtering with GF/C and left it at room temperature until it dried completely.
- 3.3 Placed the filtered in a centrifuge tube, added 8 ml. of 90% aqueous acetone, then mixed it. Covered the vial with aluminum foil to avoid photosynthesis process and fitted it with rubber plug at the top.
- 3.4 Stored the samples at 4°C for 20 hours.
- 3.5 Cleared the extract by centrifuging in closed tube at 500g for 20 minutes. The extract was decanted into clean tube.
- 3.6 The combined extract was transfer to a cuvette and the optical density was measured at 663, 645 and 630 nm.

4. Calculations

- 4.1 Calculated the concentration of chlorophyll by inserting the optical densities in the following equations

$$4.1.1 \quad \text{Chlorophyll a} = 11.64(\text{OD}_{663}) - 2.16(\text{OD}_{645}) + 0.10(\text{OD}_{630})$$

$$4.1.2 \quad \text{Chlorophyll b} = 20.97(\text{OD}_{645}) - 3.96(\text{OD}_{663}) - 3.66(\text{OD}_{630})$$

where

Chlorophyll a and Chlorophyll b is concentrations of chlorophyll a and chlorophyll b, respectively, in the extract (mg/L) and

OD_{663} , OD_{645} and OD_{630} = optical densities at the respective wavelengths.

4.2 After determining the concentration of pigment in the extract, calculated the amount of pigment per unit volume as follow

$$\text{Chlorophyll a (mg/m}^3\text{)} = (\text{Chlorophyll a x volume of extract, L}) / \text{volume of sample, m}^3$$

$$\text{Chlorophyll b (mg/m}^3\text{)} = (\text{Chlorophyll b x volume of extract, L}) / \text{volume of sample, m}^3$$

5. Dry Weight of *Chlorella sp.*

In each 100% of *Chlorella sp.*, there are approxiamtely 1.5 % of chlorophyll.

$$\text{Algal biomass of } \textit{Chlorella sp.} = [(\text{Chlorophyll a} + \text{Chlorophyll b}) * 100] / 1.5$$

ภาคผนวก ค

บทความรอกการตรวจและแก้ไขจากสถาบันภาษาต่างประเทศ

มหาวิทยาลัยมหิดล

เรื่อง

Nutrients Uptake and Growth of *Chlorella* sp. in Treated Septage

Nutrients Uptake and Growth of *Chlorella sp.* in Treated Septage Effluent

SIRANEE SREESAI

Department of Environmental Science Health, Faculty of Public Health,
Mahidol University, Bangkok, 10400. Thailand

PREEDA PARKPAIN

EEM/SERD Asian Institute of Technology, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani, 12120. Thailand

PARINYA NOOMNUAL

Department of Environmental Science Health, Faculty of Public Health,
Mahidol University, Bangkok, 10400. Thailand

ABSTRACT

Only few amount of septage from Bangkok Metropolitan Region (BMR) had been second treated at the central treatment plant. Nongkhaem Nightsoil treatment plant, for example, has a treating capacity only 600 m³/day. Beside this, the effluent still contained higher pollutants when compared with the industrial effluent standard and building effluent standard. Reuse of this wastewater through waste reclamation via algal culture would attract more attention since water resource assimilation capacities are very limiting. This study was aimed to observe factors, light intensity and detention time, influencing the nutrients uptake and growth of *Chlorella sp.* in treated septage effluent from Nongkhaem Nightsoil Treatment Plant.

From batch culturing of starting quantity of *Chlorella sp.* 100 mg/L, there was a different algal production under various light intensity provisions, 3,000, 5,000, and 8,000 luxes. Increasing light intensity could significantly ($p\text{-value} < 0.05$) increased algal growth. At the highest light provision, the maximum algal production and chlorophyll were reached to 356 mg/L and 5.34 mg/L, respectively within four days. Results also showed that there was the nutrients, Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP), removal mechanism at that period which 54% and 41% of TKN and TP, respectively were significantly reduced. A conversion of amount of nitrogen existing in protein of algal cell indicated that *Chlorella sp.* was involved for 21% of TKN uptaking in treated septage. Moreover, the culturing cycle for *Chlorella sp.* at this laboratory condition was occurred only 6 days. The effluent after algal harvesting had fewer pollutants and met the effluent standard quality.

Keyword: *Chlorella sp.*, Light Intensity, Nutrients uptake, Treated septage

1. INTRODUCTION

More than 80% of wastewater that directly discharged to river was domestic wastewater especially human excreta. Most of them have been primary treating with septic tank, the country whole acceptance approach. It has low treating efficiency and needs further treatment such a central wastewater treatment plant. However, from many studies, it was found that the effluent from that secondary treatment plants still contained high pollutants such as organic matters and nutrients (1). The presence of excesses nutrients particularly nitrogen and phosphorus in the river may cause serious environmental problems to the natural receiving water resources. To have a better quality of the effluent, it needs additional tertiary treatment.

There are several processes to remove nutrients and organic substances such as Extended Aeration, Aerated Lagoon, etc (2). The interesting system is algal pond or high rate oxidation pond which can remove many nutrients. Nitrogen and phosphorus are macro nutrients for cell synthesis of aquatic phytoplankton. The use of algae for removing organic matter and nutrients from wastewater has been done for the last 20 years. The success of algal system relies on ability of algal cell to uptake nutrients from the wastewater and assimilates them for their growth. Thus, it accomplishes pollution control together with production of algal protein (3). Treating effluent from secondary treatment plants with *Chlorella* sp. is not only remove certain amount of organic substances and nutrients but also obtain useful

by-product, algal cell for various proposes. They can be used as a source of protein for animal feed, soil conditioner, energy and raw material for some chemical production (6).

The use of green algac, *Chlorella* sp. as a tertiary treatment for the septage effluent from secondary treatment plant, provides high treatment efficiency. Aziz et al. (4) had carried out a research on "Feasibility of wastewater treatment using the activated-algal process" and found that it was able to remove 80-88% of BOD, 70-82% of COD, 60-70% of nitrogen and 50-60% of phosphorus at detention period of 15 days. A study of Nakthon (5) on "Efficiency of nitrogen and phosphorus removal from swine wastewater by *Chlorella* sp." found that it was able to remove 77-86% of nitrogen and 53-75% of phosphorus at detention period of 8 days.

This research then was focused on nutrients uptake and growth of *Chlorella* sp. in treated septage. The study was to investigate the influence of light intensity and detention time on growth of *Chlorella* sp. and nutrient removal efficiency by this algal treatment.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Characterization of Treated Septage

Grab samples of treated septage were collected from Nongkhaem Nightsoil Treatment Plant, Bangkok during January – April 2002. They were immediately characterized. In case of time limitation, fixing with sulfuric acid or hydrochloric acid was done in order to preserve the samples. All samples were kept in the refrigerator at 4°C.

The characterization of chemical properties was pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Suspended Solids (SS), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP)

2.2 Stock culture of *Chlorella sp.*

The stock culture of *Chlorella sp.* was obtained from Institute of Food Research and Product Development (IFRPD), Kasetsart University, Thailand.

2.3 Condition of culture for initial concentration of *Chlorella sp.*

Chlorella sp. stock from 2.2 was cultured in treated septage at 10,000 luxes of light intensity. The lighting was provided by a constant artificial source for 3 days (16 hours/day). The dry weight (mg/L) concentration of *Chlorella sp.* was determined by filtered the liquor through GF/C paper and oven dried at 103 – 105°C for 1 hour. The initial 100 mg/L concentration of *Chlorella sp.* was obtained by adjusting the volume with treated septage wastewater.

2.4 Affect of light intensity on growth of *Chlorella sp.* in treated septage

The treated septage was inoculated with *Chlorella sp.* and batch cultured in the reactor with capacity 3 liters under laboratory condition. The lighting source for culturing *Chlorella sp.* was fluorescence lamp (36 W) and three levels of light intensity, 3,000, 5,000 and 8,000 luxes, were provided to each treatment for 12 hours/day.

The effluent was daily analyzed for determining production of algal biomass and

chlorophyll. After filtering algae, it was analyzed every 2 days to determine the concentration of Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP).

2.5 Statistical Analysis

Kruskal Wallis test at 0.05 level of significance was used to compare the differential growth of *Chlorella sp.* and removal efficiencies of TKN and TP.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Treated septage characteristics

The treated septage effluent had brown to yellow pale color and quite turbid. The analyzed characteristics (Table1) expressed that it still contained high organic pollutants. Most of the raw wastewater came from the septage and even passing the treatment processes the high concentration of COD, SS and TKN were found. The characteristics of COD, SS and TKN were exceeded the Thai Industrial Effluent Standard of 120, 50 and 100 mg/L, respectively (13). To have a better quality of the effluent, it needs additional tertiary treatment before discharging to natural water.

TABLE 1
Characteristics of Treated septage

Parameter	Mean value	Standard*
PH	7.61	0.09
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), mg/L	133	15
Total Phosphorus (TP), mg/L	4.68	3.7
Suspended Solids (SS), mg/L	2,333	823
Chemical Oxygen Demand (COD), mg/L	1,343	253

Note: * = Thai Industrial Effluent Standard (13)

3.2 Growth of *Chlorella sp.*

The experiment was aimed to determine the influencing of light intensity on growth of *Chlorella sp.*. Thus, the three treatments were done under condition of light intensity provisions at 3,000, 5,000 and 8,000 luxes, respectively. The results are shown in Figure 1 and Figure 2. The statistical analysis was run at 0.05 level of significance. Statistical analysis of mean amounts of algal biomass and chlorophyll production at different light intensity provisions are shown in Table 2.

It was evidently observed that the different light intensity could effect the different growth of *Chlorella sp.*. The highest light intensity could significantly increase both amounts of algal biomass and chlorophyll. The *Chlorella sp.* had maximum growth at the fourth day. At this period, the amount of algal biomass production

from culturing condition at 3,000 5,000 and 8,000 luxes of light intensity was 277, 305, and 356 mg/L, respectively. This was accounting for around 2.8-3.6 times increasing of algal production.

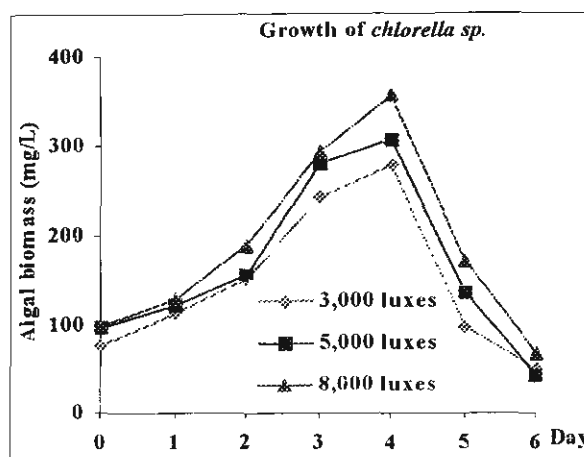


FIGURE 1

Amount of algal biomass (mg/L) production under various light intensity provisions.

After the fourth day, the amount of algal biomass and chlorophyll were continuing decreased until *Chlorella sp.* was dead at sixth day.

Light intensity is an importance factor for photosynthesis, a process for convert substances to organic substrates. Chlorophyll a and chlorophyll b are light absorbent and use light as energy source for photosynthesis. Thus light intensity was considered as an influencing factor for *Chlorella sp.* culturing.

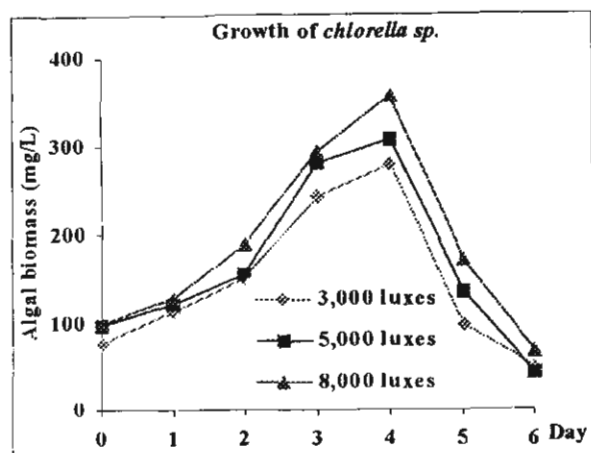


FIGURE 2

Amount of chlorophyll (mg/L) production under various light intensity provisions.

TABLE 2

The amount of chlorophyll and algal biomass at different light intensity (Kruskal – Wallis test)

Light Intensity (luxes)	Dependent Variable	Mean*	S.D.	X ²	P-value
3,000	Chlorophyll (mg/L)	4.16 ^a	0.12	9.679	.000
5,000		4.59 ^a	0.16		
8,000		5.34 ^b	0.17		
3,000	Algal biomass (mg/L)	277 ^a	8.27	8.734	.000
5,000		305 ^a	9.43		
8,000		356 ^b	11.80		

* Mean of the treatment using light intensity of 3,000, 5,000 and 8,000 luxes in the column followed by same letter is not significant difference at $P < 0.05$.

As the finding that the more supplying of light intensity, the more growth of *Chlorella sp.*, it was similar to a study of Assavaree and Pechmanee (7). They indicated that *Chlorella sp.* had higher growth at provision 8,000 luxes than 3,000 luxes of light intensity (p -value <

0.05). In addition, Gates and Borchardt (8) reported that a mixture of *Chlorella sp.* and *Scenedesmus sp.* could grow at their maximum at 6,700 luxes of light intensity. However, in this study, it was not statistical different between algal production at provision of light intensity 3,000 and 5,000 luxes. The reason was due to a high turbidity from suspended solids of treated septage which light could not penetrate into the lower strata of treated septage. Photosynthesis varies in proportion to the light intensity up to a limit at which plants become light saturated and further increases of illumination produces while no further increase of photosynthesis. Fogg (9) reported that as the concentration of algal cell in the water increase, light penetration decrease, so that the phytoplankton becomes self-shading. The ability of algae to absorb and utilize light in photochemical reactions is due to their possession of chlorophyll and certain other photosynthetic pigments.

This pointed out that, although, increasing light intensity provision could enhance algal growth but it is happen for only some circumstances. Thus, a design criterion for an in-house algal culture base on a consideration of energy consuming versus algal production should be a light intensity of 3,000 lux which give a satisfactory yield. The successful of algal production would depend on a sufficient light provision and management practices such prevention of self-shading via occasionally algal harvesting.

3.3 Pollutant removal efficiency

There was an investigation of pollutants, Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP), removing from the wastewater during algal culture. Figure 3 and Figure 4 showed the change of pollutants removal efficiencies. Then the statistical analysis of mean TKN and TP removal efficiencies at different light intensity provision are shown in Table 3.

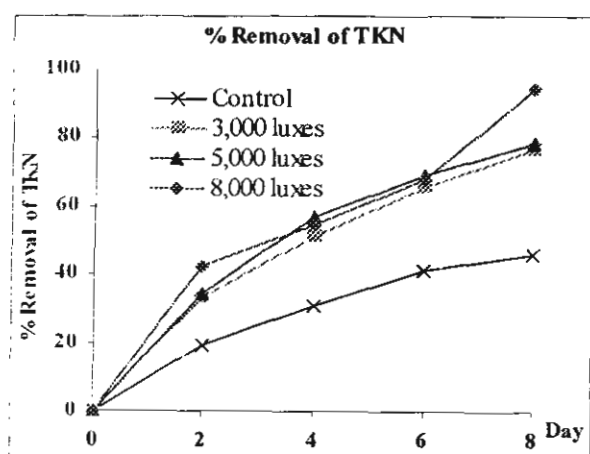


FIGURE 3
TKN removal efficiency

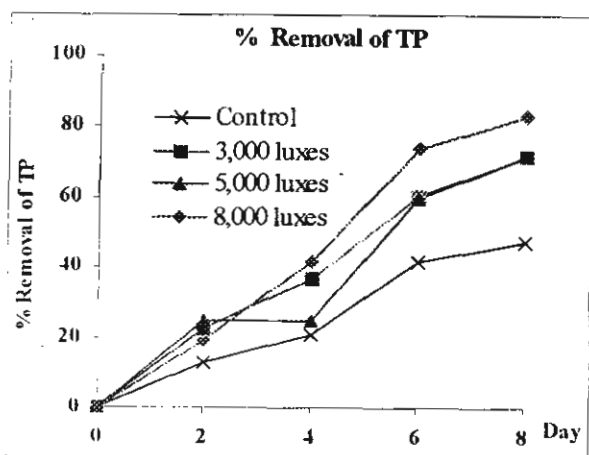


FIGURE 4
TP removal efficiency

Pollutant removal efficiencies were consistently increased in all treatments. At fourth day of culture where the maximum algal growth occurred, the TKN and TP removal efficiencies at 8,000 luxes of light intensity were 54% and 41%, respectively.

The pollutant removal efficiencies were depended on growth of *Chlorella sp.* and microorganisms in the treated septage. The increasing of light intensity could increase pollutant removal efficiencies because higher light intensity could significantly increase the growth of *Chlorella sp.* It was then being a major factor to remove pollutants from this treated septage. These results are agreed with a study of Gonzales et al. (10) whose found that the microalgae (*Chlorella sp.* and *Scenedesmus sp.*) could remove 95% of ammonium-nitrogen and 50% of phosphorus in wastewater.

TABLE 3
TKN and TP removal efficiencies
at different light intensity
(Kruskal – Wallis test)

Light Intensity (luxes)	Dependent Variable	Mean*	S.D.	X ²	P-value
3,000	TKN removal efficiency	65.6 ^a	1.81	33.48	.000
5,000		68.0 ^b	1.43		
8,000		69.2 ^b	0.86		
3,000	TP removal efficiency	60.6 ^a	1.67	14.00	.000
5,000		60.2 ^a	2.37		
8,000		73.9 ^b	1.97		

* Mean of the treatment using light intensity of 3,000, 5,000 and 8,000 luxes in the column followed by same letters is not significant difference at $P < 0.05$

Although the growth of *Chlorella sp.* started to drop out, both TKN and TP removal

efficiencies still continuing increased until the end of operation. At this period, microorganisms play the major role in waste treatment. These results were similar to a study of Weerawattanapong (11), who culturing *Chlorella sp.* in poultry wastewater at 10,000 luxes of light intensity and detention time of eight days. It found that the TKN and TP removal efficiencies were 72 – 85% and 57 – 77%, respectively. Nakthon (5) reported that culturing *Chlorella sp.* in piggery wastewater at 8,000 luxes of light intensity at detention time of eight days, the TKN and TP removal efficiencies were around 85% and 75%, respectively.

Beside the treatment without algal culturing (control), a degree of TKN and TP removal efficiencies was quite lower. Lighting provision in this study did not significantly raise the system temperature. The native microorganisms could utilize nitrogen and phosphorus for their metabolism activities (1). Then, some amount of TKN and TP were removed from the treated septage.

4. Nitrogen Uptake by *Chlorella sp.*

4.1 Growth of *Chlorella sp.*

There was some amount of nutrients (128-240 mg/L TKN and 8.9-28.3 mg/L TP) in the studied treated septage. *Chlorella sp.* utilized the nitrogen and accumulated in a form of protein products. By this reason, if a whole of TKN in treated septage had been utilized, it can forecast to 1,600 - 3,000 mg/L of algal biomass production (Algal biomass, mg/L = TKN, mg/L

$\times 6.25$ (nitrogen to protein conversion factor) $\times 2$ (50% of protein contained in algal biomass)) (1,10). However, the experimental result shows that there was only 277 – 356 mg/L of algal biomass concentration, which accounted to only 17% - 21% of the total estimated production volume.

The growth of *Chlorella sp.* depends on many factors such as population density, lighting, temperature, and pH. A very importance factor is the potential growth rate under the environmental conditions prevailing outdoors. Some other internal limiting factors such as concentration or form of carbon in the culture medium, or a lack of vitamins or other organic growth factors are also affecting the algal biomass production.

In this experiment, there was no addition of sufficient carbon, phosphorus or some trace element into the treated septage for enhancing the growth of *Chlorella sp.*. Then, *Chlorella sp.* was slightly grown because a mineral nutrient and some trace element (Cu, Fe, Bo, Zn, etc.) are the factor limiting algal production. Moreover, carbon and phosphorus are the major nutrient elements required for normal growth of *Chlorella sp.*. It plays a major role in most cellular processes, particularly those involved in energy transfer and in nucleic acid synthesis.

Therefore, a study which considering septage waste management together with the economic algal production is further needs to meet the sustainable environment.

4.2 Nitrogen uptake by *Chlorella sp.*

The TKN removal efficiency increases as a result of algal growth, microbial activities and nitrification process. The overall TKN and TP removal efficiency in this study (as shown in Figure 3 and 4) was around 54% and 41%, respectively.

A calculation from estimating amount of TKN in algal biomass produced in this study point out that there was only 21% of TKN in septage wastewater uptaking by *Chlorella sp.*. Thus, the microorganisms and others removed most of TKN in treated septage.

The results prove that this culturing system could successfully treat the treated septage and return beneficial products to the environment. The characteristics of the effluent were also under the level of the effluent standard (13).

5. Conclusion

5.1 Growth of *Chlorella sp.* depends on the light intensity. *Chlorella sp.* had maximum growth on fourth day of treatment. The amount of chlorophyll and algal biomass at 8,000 luxes of light intensity was 5.34 mg/L and 356 mg/L, respectively.

5.2 There was no statistical different between algal production at provision of light intensity 3,000 and 5,000 luxes. Thus, the light intensity provision of 3,000 luxes would better serve the purpose of algal production and economic as well.

5.3 At the maximum growth of *Chlorella sp.* at fourth day, the TKN and TP removal efficiencies were 54% and 41%, respectively.

5.4 Nitrogen uptake by *Chlorella sp.* was counted only 21% of TKN in treated septage.

5.5 The TKN and TP removal efficiencies in treated septage were depend on the growth of *Chlorella sp.* but they were not depend on the light intensity.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by a grant from Thai Research Fund (TRF).

7. REFERENCES

- [1] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse 3rd ed. Singapore: McGraw Hill: 1991.
- [2] Udomsinroj K. Wastewater treatment. 1st ed. Bangkok: Mitnara, 1996.
- [3] Pechmanee T et al., Possibility of using *Chlorella sp.* for *Moina* culture. Technical paper No. 6. National Institute of Coastal Aquaculture, Songkhla: 1993.
- [4] Aziz MA and Ng WJ., Bioresource technol. Vol. 40, pp. 205-208, 1992.
- [5] Narkthon S., Nitrogen and phosphorus removal from piggery wastewater by green algae *Chlorella sp.* (M.Sc. thesis in Environmental Technology) Bangkok. Faculty of Graduated studies, Mahidol University, Thailand, 1996.

- [6] Polprasert C. Organic waste recycling technology and management. 2nd ed. Bangkok: John Wiley & Sons; 1996.
- [7] Assavaree M, and Pechmanee T., Effect of some factors on population growth of *Chlorella sp.* in laboratory. Technical paper No. 5. National Institute of Coastal Aquaculture, Songkhla: 1991.
- [8] Borchardt J. and Gate W., J. Water Pollut. Control Fed., Vol. 4, pp. 443 – 459, 1964.
- [9] Fogg G., Algal culture and phytoplankton ecology. Milwaukee: The university of Wisconsin Press; 1965.
- [10] Gonzalez LE, et al., Bioresource Tech. Vol. 60, pp. 259 – 262, 1997.
- [11] Weerawattanaphong W., Nutrients Reduction from Poultry Wastewater by Green Algae: *Chlorella sp.* (M.Sc. thesis in Environmental Technology). Bangkok Faculty of Graduated studies, Mahidol University, Thailand, 1998.
- [12] Kawai et al., Wat. Sci. Tech., Vol. 19, pp. 65 – 70, 1987.
- [13] Ministry of Industry, Industrial Effluent Standard, Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 1996.

ภาคผนวก ง
บทความรอกการตรวจและแก้ไขจากสถาบันภาษาต่างประเทศ
มหาวิทยาลัยมหิดล
เรื่อง

Investigation of *Chlorella* sp. harvesting by *Moina macrocopa*

Investigation of *Chlorella* sp. Harvesting by *M. macrocopa*

SIRANEE SREESAI

Department of Environmental Science Health, Faculty of Public Health,
Mahidol University, Bangkok, 10400. Thailand

PREEDA PARKPAIN

EEM/SERD Asian Institute of Technology, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani, 12120. Thailand

LUNCHAKORN PRATHUMRATANA

Department of Environmental Science Health, Faculty of Public Health,
Mahidol University, Bangkok, 10400. Thailand

ABSTRACT

Treated septage from Bangkok Metropolitan Region (BMR) still contained higher pollutants when compared with industrial effluent standard and building effluent standard. Reuse of this wastewater through waste reclamation via algal culture could remove organic substance and nutrients. In contrary, the effluent from algal treated could deteriorate water resources if the algae does not properly harvested. Using zooplankton, *M. macrocopa* is easily harvested from the effluent to be a natural harvester for *Chlorella* sp. Would be attractive since the removal of algal cell from the effluent have quite high investment cost and require operational skills. *M. macrocopa* focused this study in the suitable conditions in the *Chlorella* sp. removal efficiency included suitable ratio of algal biomass and starting number of *M. macrocopa*, light intensity.

From batch culturing of starting algal biomass 300 mg/L there was a different *Chlorella* sp. removal efficiency under various starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L. Starting number of *M. macrocopa* 100 org/L gave highest *Chlorella* sp. removal efficiency and total production of *M. macrocopa* 36,600 org/L at detention time of 6 days. The *Chlorella* sp. removal efficiency in terms of OD₅₆₀, SS and COD were 73.73%, 57.56% and 43.35%, respectively. The result also showed that *M. macrocopa* cause an increase of 9% of TKN and 6% of TP removal efficiency. Light intensity affected the *Chlorella* sp. removal efficiency. Provision of light intensity 3,000 lux gave the highest *Chlorella* sp. removal efficiency in term of suspended solid 42.98%. The harvesting of *M. macrocopa* production should be done at the sixth day of culturing time. The effluent after removal of *Chlorella* sp. by *M. macrocopa* had lower pollutants and met the standard quality.

Keyword: *M. macrocopa* , *Chlorella* sp., Treated septage Wastewater

1. INTRODUCTION

More than 80% of wastewater that directly discharged to river was domestic wastewater especially human excreta. Most of them have been primary treating with septic tank, the country whole acceptance approach. It has low treating efficiency and needs further treatment such a central wastewater treatment plant. However, from many studies, it was found that the effluent from that secondary treatment plants still contained high pollutants such as organic matters and nutrients (1).

The use of algae for removing organic matter and nutrients from wastewater has been done for the last 20 years. The success of algal system relies on ability of algal cell to uptake nutrients from the wastewater and assimilates them for their growth. Thus, it accomplishes pollution control together with production of algal protein (2). The use of green algae, *Chlorella sp.* as tertiary treatment for the treated septage from the secondary treatment plant, can provides high treatment efficiency. The dead algal cells could also harm water body by increasing organic matter. Algae can also alter the value of surface water for growth certain kinds of fish and other aquatic life, for recreation and for other beneficial uses. The harvesting the microalgae has usually been faced from the point of view of eliminating them from the medium that they are colonized, as they constitute a great nuisance in water surface. Biological harvesting of algal cell after uptake of nutrients by using *M.macrocopa* is an alternate treatment to harvest algal cell

efficiency. It attains pollution control together with production of *M.macrocopa*.

Using zooplankton, *M.macrocopa*, which is easily harvested from the effluent to be a natural harvester for *Chlorella sp.* presents a challenge (3). *Chlorella sp.* is a suitable feeding for *M.macrocopa* due to their small size and high protein value (about 64.15%), rapid growth, able to treat wastewater and build up oxygen for *M.macrocopa* (4). A study of Pechmancee (5) shows that *M.macrocopa* consumes a lot of *Chlorella sp.* ($0.5-1.5 \times 10^6$ cells/day/organism). A study of Kawai et al (6) found that in the zooplankton pond, the algae concentration was reduced from 2×10^8 cells/ml to 8×10^3 cells/ml, which corresponds to a removal efficiency of 99.99%, and the removal efficiency were 95-97% BOD, 79-88%COD, 42-59%TKN, 37-48%TP and 99.9% total coliform bacteria.

M.macrocopa then focused this research on removal of *Chlorella sp.* in effluent of treated septage. In order to increase septage treating efficiency, the suitable conditions that provide high *Chlorella sp.* removal efficiency and/or produce high production of *M.macrocopa*.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Characterization of Treated Septage

Grab samples of treated septage were collected from Nongkhaem Nightsoil Treatment Plant, Bangkok during January – April 2002. They were immediately characterized. In case of time limitation, fixing with sulfuric acid or hydrochloric acid was done in order to preserve

the samples. All samples were kept in the refrigerator at 4°C.

The characterization of chemical properties was pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Suspended Solids (SS), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP)

2.2 Stock culture of *Chlorella sp.*

The stock culture of *Chlorella sp.* was obtained from Institute of Food Research and Product Development (IFRPD), Kasetsart University, Thailand.

2.3 Condition of culture for initial concentration of *Chlorella sp.*

Chlorella sp. stock from 2.2 was cultured in treated septage at 10,000 lux of light intensity. The lighting was provided by a constant artificial source for 3 days (16 hours/day). The dry weight (mg/L) concentration of *Chlorella sp.* was determined by filtered the liquor through GF/C paper and oven dried at 103 – 105°C for 1 hour. The initial 300 mg/L concentration of *Chlorella sp.* was obtained by adjusting the volume with treated septage wastewater.

2.4 Preparation of *M. macrocopa*

M. macrocopa were brought from Jatujak market. They were rinsed with distilled water to prevent protozoa. They were count by using pasture pipette to get the starting number of 100, 200 and 300 org/L.

2.5 Determination the suitable ratio of algal biomass and starting number of *M. macrocopa*

M. macrocopa 100, 200 and 300 org/L were inoculated into treated septage, which had algal biomass 300 mg/L.

The effluent was daily analyzed for determining algal biomass in terms of OD₅₆₀, suspended solids (SS) and COD. Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP) were analyzed every 2 days. *M. macrocopa* were daily counted.

2.5 Effect of light intensity provision on the removal of *Chlorella sp.* in treated septage by *M. macrocopa*

The suitable ratio of algal biomass and starting number of *M. macrocopa*, which had the highest in removal efficiency of *Chlorella sp.* and total production of *M. macrocopa* was selected. The experimental light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux were provided for 12 hours/day.

The effluent was daily analyzed for determining algal biomass in terms of OD₅₆₀, suspended solids (SS) and COD. Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) and Total Phosphorus (TP) were analyzed every 2 days. *M. macrocopa* were daily counted.

2.6 Statistical Analysis

The oneway ANOVA and Kruskal Wallis test at 0.05 level of significance were used to compare the removal efficiencies of *Chlorella sp.* in treated septage by *M. macrocopa*, the removal efficiencies of TKN, TP and total number of *M. macrocopa*.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Treated septage characteristics

The treated septage effluent had brown to yellow pale color and quite turbid. The analyzed characteristics (Table1) expressed that it still contained high organic pollutants. Most of the raw wastewater came from the septage and even passing the treatment processes the high concentration of COD, SS and TKN were found. The characteristics of COD, SS and TKN were exceeded the Thai Industrial Effluent Standard of 120, 50 and 100 mg/L, respectively (7). To have a better quality of the effluent, it needs additional tertiary treatment before discharging to natural water.

TABLE 1
Characteristics of Treated septage

Parameter	Mean value	Standard*
PH	7.61	0.09
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), mg/L	133	15
Total Phosphorus (TP), mg/L	4.68	3.7
Suspended Solids (SS), mg/L	2,333	823
Chemical Oxygen Demand (COD), mg/L	1,343	253

Note: * = Thai Industrial Effluent Standard (7)

3.2 Determination of suitable ratio of algal biomass and starting number of *M. macrocopa*

At starting algal biomass 300 mg/L, total number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300

org/L were slightly increased in the first 2 days of culture. At the reaction time of 3 and 4 days, the total number of *M. macrocopa* of treatment with starting number of *M. macrocopa* 200 and 300 org/L were rapidly increased while treatment with starting number of *M. macrocopa* 100 org/L was slowly increased. At reaction time of 5 days, the total number of *M. macrocopa* 100 org/L was swiftly risen until the sixth day of the operation while treatment with starting number of *M. macrocopa* 200 and 300 org/L were not changed. After that, total numbers of *M. macrocopa* of all treatments were rapidly decreased.

The result showed that at algal biomass 300 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L could give the maximum total number of *M. macrocopa* 36,000, 26,667 and 28,067 org/L, respectively at the reaction time of 6 days (Figure 1).

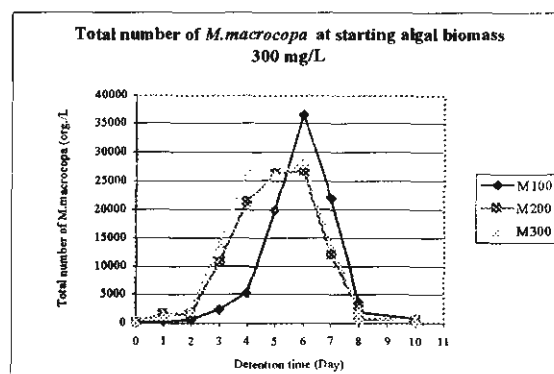


FIGURE 1

Total number of *M. macrocopa* (org/L) under various starting number of *M. macrocopa*.

Algae, protozoan, organic detritus as well as bacteria are very important food of *M. macrocopa* and commonly from the great

bulk of material ingested (4). Complex movements of the highly setose thoracic legs produce a constant current of between the valves. These movements further serve to filter food particles from the water and collect them in a median ventral groove at the base of legs. This stream of food is fed forward to the mouthparts where the particles may be ground between surfaces of the mandibles before being taken into the mouth (8).

Yamalee Y. et al (9) did a study on cultivating *Chlorella sp.* in soy cake solution. They found that the increasing of starting amount of *M. macrocopa* from 3.0 to 4.5 grams (wet weight) which corresponded to 200 to 300 org/L was not effect to the highest yield of *M. macrocopa*, while the increasing of food from 30 to 45 liters which could corresponded to starting algal biomass 300 to 450 mg/L was effect to the growth of *M. macrocopa*. They suggested that amount of food for culturing *M. macrocopa* in 150 liter pond should be 300-450 mg/L with starting *M. macrocopa* 3 grams dry weight (200 org/L) which could give the highest yield of *M. macrocopa* 100-137 grams (6,667-9,134 org/L) at reaction time of 4 days. This recommended ratio of starting amount of *Chlorella sp.* and starting number of *M. macrocopa*

The growth of *M. macrocopa* in batch culture was maximized only one time, then decreased. This could be explained that the lack of food and crowded of *M. macrocopa* lead them to decrease a yield. Under adverse environmental conditions, males are produced and sexual reproduction occurs resulting in

resting eggs (ephippia) (10). Thus the harvesting should be done at the maximum yield of *M. macrocopa*. The ratio 3:1 of algal biomass 300 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 100 org/L could give the greatest total number of *M. macrocopa* 36,600 org/L or 366 times of the starting. Compare to a study of Yamalee et al (11) on utilization of *Chlorella sp.* from wastewater in soil-milk for feeding on *M. macrocopa*, shown that fresh algae from waste after growing for 3 days from algal suspension of optical density at wavelength 560 nanometer was 0.4 gave the highest yield 13,520 org/L or 135.6 times increasing. Although the maximum total number of *M. macrocopa* could not obviously compared due to the factors of food, environmental conditions were different, but it may conclude that maximum total number of *M. macrocopa* at ratio 3:1 of algal biomass 300 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 100 org/L in treated septage gave the satisfactory in *M. macrocopa* production. This ratio would be used in the further study.

For the OD₅₆₀ decreasing efficiencies of treatment with starting number of *M. macrocopa* 100 and 200 org/L were slightly increased at the first day of operation while treatment with starting number of *M. macrocopa* 300 org/L was rapidly increased. At the reaction time of 2 days, the OD₅₆₀ decreasing efficiencies of treatment with starting number of *M. macrocopa* 100 org/L was not much changed. After that, OD₅₆₀ decreasing efficiencies of all treatments were slightly increased until the last day of operation. From the result, the OD₅₆₀ decreasing efficiencies for algal biomass 300 mg/L and

starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L were 73.73%, 78.86% and 75.80%, respectively at reaction time of 5 days. At the identical day, the OD₅₆₀ decreasing efficiency of the treatment without *M. macrocopa*, was 48.41% and it was fluctuated through the operation (Figure 2).

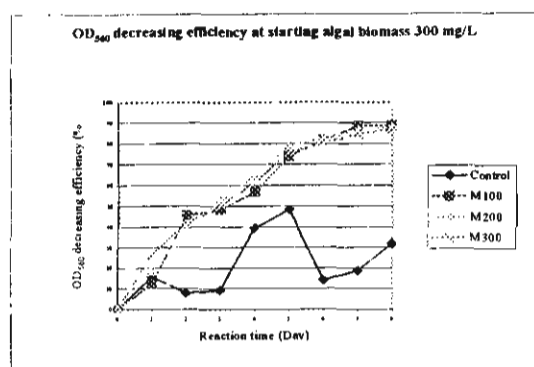


FIGURE 2

OD₅₆₀ decreasing efficiency under various starting number of *M. macrocopa*.

Algal biomass removal efficiency in term of SS at starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L were similar and stable in the initial phase (1-3 days). Then they were rapidly increased at reaction time 4-5 days until the end of operation. On contrary, a treatment without *M. macrocopa* had reduce algal biomass removal efficiencies of SS at the fifth day of the experiment were 55.56%, 64.23% and 59.04% for the treatment with starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L, respectively. (Figure 3)

For algal biomass removal efficiency in term of COD at starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L were slightly increased at the first day of the

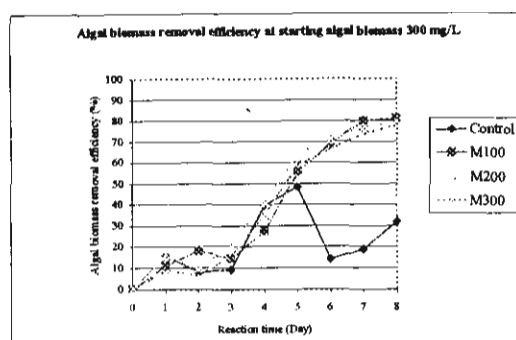


FIGURE 3

SS removal efficiency under various starting number of *M. macrocopa*.

experiment. At reaction time of 2 days, the COD removal efficiency of treatment with starting number of *M. macrocopa* 100 and 200 org/L were continuous increasing while those of the treatment with starting number of *M. macrocopa* 300 org/L and treatment without *M. macrocopa* were decreased. The removal efficiencies were similarly increased again after reaction time of 3 days and were maximum at reaction time of 6 days, then they were slowly decreased except that of treatment without *M. macrocopa*. The COD removal efficiency at starting number of 100, 200 and 300 org/L at reaction time of 6 days were 43.35%, 45.72% and 38.38%, respectively. For the treatment without *M. macrocopa*, the COD removal efficiency was 34.12%. (Figure 4)

The removal efficiency of *Chlorella sp.* by *M. macrocopa* was indicated in terms of OD₅₆₀, SS and COD. As the result, starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L could not give the significantly different in algal biomass removal efficiency. They were 73.33-78.86%, 55.56-64.23% and 38.38-43.35% for the algal biomass removal efficiencies in terms of OD₅₆₀.

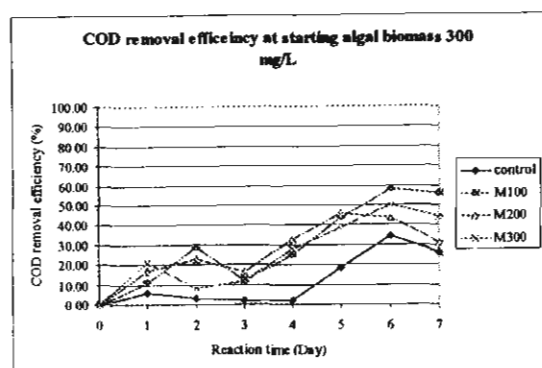


FIGURE 4

COD removal efficiency under various starting number of *M. macrocopa*.

SS and COD, respectively at the reaction time of 5 days. For the treatment without *M. macrocopa* the algal biomass removal efficiencies in terms of OD₅₆₀, SS and COD were 25-30%, 7-16% and 20-27%, respectively. This could be occurred by phenomenon of self-purification. Bacteria in the aerobic degradation of organic matter, which included dead algal cells, use the oxygen released by algae through the process of photosynthesis. This could result in decreasing of algal biomass in terms of OD₅₆₀, SS and COD.

The algal biomass removal efficiency in term of suspended solids was quite lower than the term of OD₅₆₀, the reason was that treated septage had several materials i.e. algal biomass, bacteria, protozoa, organic matters and others which could be mixed in the filtrated. *M. macrocopa* can consume only small particles. Zooplankton efficiency filter feed particles 25 micron and smaller (12). Therefore, the larger particles, which existed in the suspended solids was lower than that in term of OD₅₆₀ which

perform only the optical density for *Chlorella sp.* by the absorption at wavelength 560 nanometer.

When *Chlorella sp.* presented in the pond, it could deteriorate water resource by increasing of suspended solids, OD₅₆₀ and COD concentration. Las Virgenes Municipal Water District's (13) experiment found that the effluent from algal pond caused increasing of suspended solids and COD concentration. However, OD₅₆₀, suspended solids and COD concentration from crustacean pond were less than that in algal pond. Thus, using *M. macrocopa* for *Chlorella sp.* removal would reduce OD₅₆₀, suspended solids and COD concentration

A study of Asawasinsopon (3) found that *Chlorella sp.* removal efficiency in treated swine wastewater by *M. macrocopa* with starting algal biomass 260 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 3,000 org/L in terms of OD₅₆₀, suspended solids and COD were 84.85%, 84.11% and 70.52%, respectively at reaction time of 2 days. Comparison to this study, it was found that *Chlorella sp.* removal efficiency in terms of OD₅₆₀ was similar to the treated septage which had starting algal biomass 100 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 300 org/L. Because both experiments had a vicinity of starting algal biomass which effected to the *Chlorella sp.* removal efficiency. The algal biomass removal efficiencies in terms of SS and COD in treated septage were less than that in treated swine wastewater. The reason was that the influent of treated septage had high turbidity and COD, which *M. macrocops* could not consume all of them. High concentration of

suspended material can interfere with the uptake of their food particle (14). When undesirable material or large tangle masses are introduced between the mandibles, they might removed by spines at the base of the first legs and then kicked out of the shell by post abdomen (8). However, it may concluded that starting number of *M. macrocopa* could not affect *Chlorella sp.* removal efficiency in treated septage.

TKN and TP was observed every 2 days to determinc the characteristic of treated septage after removal of *Chlorella sp.* by *M. macrocopa*. TKN removal efficiencies at starting number of 100, 200 and 300 org/L were slightly increased until the end of operation. They were 60.73%, 73.18 and 74.26%, respectively at reaction time of 6 days whereas treatment without *M. macrocopa* was 51.70% (Figure 5).

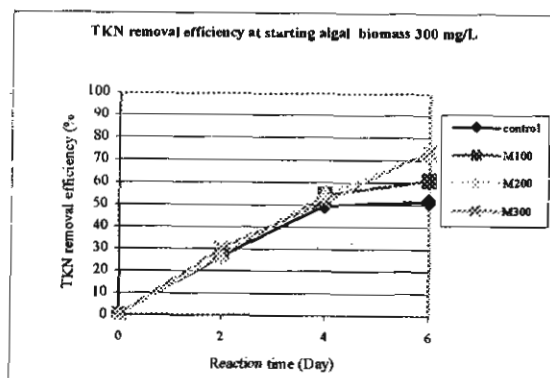


FIGURE 5

TKN removal efficiency under various starting number of *M. macrocopa*.

TP removal efficiencies were slightly increased at the second day of operation. After that, the trend was not changed until the end of

operation. TP removal efficiency at starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L were 28.53%, 30.95% and 25.60%, respectively at reaction time of 6 days (Figure 6). At the same time, it was 22.86% for the treatment without *M. macrocopa*. The statistical analysis showed that starting number of *M. macrocopa* 100, 200 and 300 org/L could not give the significantly different in TKN and TP removal efficiency.

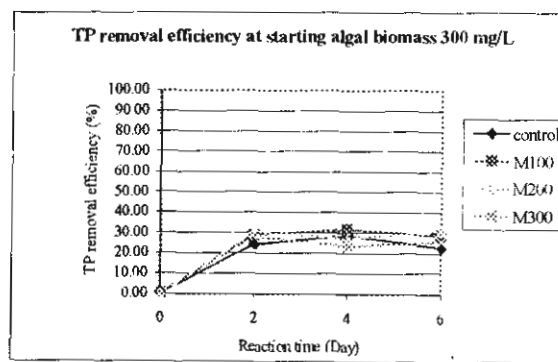


FIGURE 6

TP removal efficiency under various starting number of *M. macrocopa*.

M. macrocopa was indirectly effected the decreasing of TKN by consuming algal cells. The reducing of nitrogen could be occurred by algal-bacterial system. The partway of nitrogen removal in wastewater pond and natural water bodies included algal uptake, ammonia volatilization, nitrification-denitrification, retention in benthic sludge, ammonia adsorption and combinations (15).

Nitrogen elimination efficiency of 72% was reported in algal-bacterial system (16). In such a process, nitrogen and phosphorus were converted to solid organic forms by algae and

then *M. macrocopa* remove nitrogen and phosphorus principally by feeding on algae and bacteria. According to the treatment without *M. macrocopa*, which algal biomass was also reduced together with decreasing of TKN. This may indicated that nitrogen might not be uptake by algae. It was probably that *M. macrocopa* consumed some bacteria, which functioned to the degradation of nitrogen. Since *M. macrocopa* consume algae, protozoa, organic detritus and bacteria (4,17). Calculation of TKN removal efficiency the selected ratio 3:1 with algal biomass 300 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 100 org/L, TKN in the treatment without *M. macrocopa* was removed 51.70% by algae and bacterial mechanisms. Treatments with *M. macrocopa* caused an increasing 9% of TKN removal efficiency.

Phosphorus uptake by algae is lower than nitrogen uptake because the nitrogen content of algae is approximately ten times more than the phosphorus content, which is approximately one percent of the 100 to 300 mg/L algal dry weights in high-rate algal pond (18). Correlation to the result, starting algal biomass was 300 mg/L, so one percent of phosphorus uptake by algae would be 1-3 mg/L. A study of Kawasaki (19) was found that only 10% of phosphorus removed was incorporated within the algal cells. If treated septage contained 8.4 mg/L of TP, ten percent of phosphorus removed would be 0.84 mg/L. TP removal efficiency of treatment with *M. macrocopa* at starting algal biomass 300 mg/L was 25.60-30.95% or 2.15-2.60 mg/L. Therefore, the excess of TP removal efficiency

may occur by other mechanism, such as bacterial mechanism and precipitation.

Consideration to the treatment without *M. macrocopa* was 22.86% while treatment with starting number of *M. macrocopa* 100 org/L was 28.53%. It was found that treatment with *M. macrocopa* could give increasing of TP removal efficiency around 6%. The increment was probably due to *M. macrocopa* consumed some bacteria and particulate matter, which contained phosphorus.

A study of Kawai et al (6) found that using *M. macrocopa* for *Chlorella sp.* removal could remove TKN and TP in the effluent to 59% and 44%, respectively. A study of Asawasinsopon (3) found that the TKN and TP removal efficiencies after removal of *Chlorella sp.* in treated swine wastewater by *M. macrocopa* were 55.56% and 67.02%, respectively at reaction time of 2 days. Comparison to these studies, the TP removal efficiency of the treatment with starting algal biomass 300 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 100 org/L was lower than those studies. This might due to this experiment was done without aeration, high population density of *M. macrocopa* may lead to decreasing of oxygen. Release of phosphorus would occur under anoxic condition. The decreasing of oxygen by *M. macrocopa* could reduce the adsorption of phosphorus by microorganisms (20). However, Navanaraset (20) suggest that the amount of nitrate nitrogen and total phosphorus fluctuated sporadically and was indirectly related to *M. macrocopa* activities.

3.3 Effect of light intensity on the removal of *Chlorella* sp.in treated septage by *M.macrocopa*

The selected ratio of algal biomass 300 mg/L and starting number of *M.macrocopa* 100 org/L was carried out at different light intensity provision, 3,000, 4,000 and 5,000 lux by using fluorescent lamp.

The growth of *M.macrocopa*, represented by total number of *M.macrocopa*, at light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux were slightly increased in the initial phase of the experiment (1-4 day). After that, they were rapidly increased, then started to decrease from the reaction time of 8 days. The highest growth of *M.macrocopa* at light intensity provisions 3,000, 4,000 and 5,000 lux at reaction time of 7 days were 28,803, 30,167 and 30,953 org/L, respectively (Figure7). Statistical analysis showed that total number of *M.macrocopa* at each light intensity provisions were significantly difference ($p < 0.05$). This may indicated that light intensity provision affected to the total number of *M.macrocopa*.

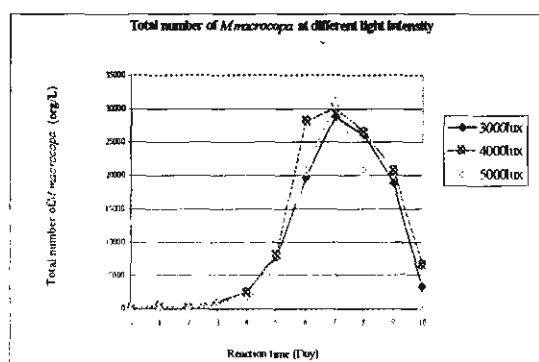


FIGURE 7

Total number of *M.macrocopa* (org/L) under various light intensity provisions.

Behavioral adaptations to the utilization of light are also common. *M.macrocopa* uses light as a cue in body orientation while swimming. The long axis of the body is oriented with the vector of maximum light energy, which affects directional swimming of these crustaceans during vertical migrations. Hence the distribution of *M.macrocopa* within the lake is light dependent (21). There is possibly a direct effect of light on growth and reproduction of some Cladocera. At greater light intensities, a negative photokinesis or inhibition of movement, or a negative phototaxis involving a change of postures relative to the light and swimming away from the source, apparently dependent on a general photosensitivity of nervous system. The most important is the dorsal light reaction, by which any animal illuminated from above will alter its posture if the direction of light is changed so that its relation to the illumination is maintained (22).

From the result, it was found that treatment with light intensity provision 5,000 lux gave the lower production of *M.macrocopa* than that in treatment of 3,000 and 4,000 lux. This could be a result of temperature was 36 ° C in treatment with light intensity 5,000 lux, while The optimum temperature for the growth of *M.macrocopa* was around 24-31 ° C (10). A study of Wara-asawapati M (23) on the effect of light intensity to the growth of *M.macrocopa* was found that the treatment with light intensity provision 64 ft-candle/ft² (689 lux) gave higher *M.macrocopa* production than that treatment with light intensity provision 250 ft-candle/ft² (2,691 lux). It was concluded that excess

lighting (250 ft-candle/ft²) would inhibit the growth of *M. macrocopa*. Comparison to this study, the treatment with light intensity 5,000 lux gave lowest *M. macrocopa* production. The difference was due to different type of artificial light source. That study used incandescent light bulb, which provided more heat than fluorescent lamp used in this study. The temperature affects the frequency of molting and hence the frequency with which young is produced (24).

This pointed out that, although, increasing light intensity provision could enhance algal growth but it is happen for only some circumstances. Thus, a design criterion for an in-house algal culture base on a consideration of energy consuming versus algal production should be a light intensity of 3,000 lux which give a satisfactory yield. The successful of algal production would depend on a sufficient light provision and management practices such prevention of self-shading via occasionally algal harvesting.

Algal biomass removal efficiency in term of OD₅₆₀ at light intensity provision of 3,000 lux was slightly increased throughout the period of experiment. It was 42.98% at reaction time of 6 days (Figure 8).

In case of light intensity provision 4,000 lux. The OD₅₆₀ decreasing efficiency was slightly increase at first day of operation. The trend was not changed at the next 2 days. After reaction time of 4 days, OD₅₆₀ decreasing efficiency continued slowly increasing until the last day of the experiment. It was 37.16% at reaction time of 6 days.

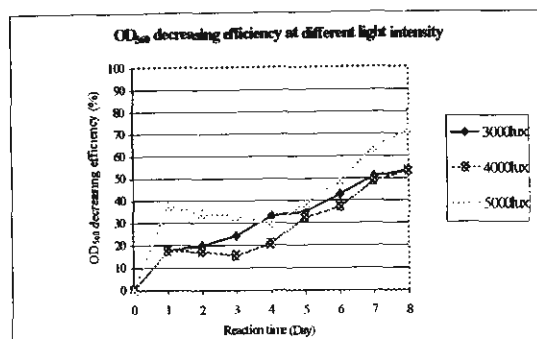


FIGURE 8

OD₅₆₀ decreasing efficiency under various light intensity provisions.

At light intensity provision 5,000 lux. OD₅₆₀ decreasing efficiency was rapidly increased at the first day of the experiment, then the trend was slightly decreased until the reaction time of 4 days. After that, it was started to increase again, until the end of operation. The OD₅₆₀ decreasing efficiency was 49.20% at reaction time of 6 days.

Statistical analysis showed that algal biomass removal efficiency in term of OD₅₆₀ at various light intensity provisions 3,000, 4,000 and 5,000 lux were significant difference ($p < 0.05$).

For the algal biomass in term of suspended solids at light intensity provision 3,000 and 4,000 lux were slightly increased until the end of experiment. At reaction time of 6 days, algal biomass removal efficiency of treatment with light intensity provision 3,000 and 4,000 lux were 40.98% and 40.92%, respectively. The algal biomass removal efficiency of treatment with light intensity provision 5,000 lux was quite low in the initial phase (1-4 day). After that it was rapidly increased till the end of operation. The algal biomass removal efficiency

in term of suspended solids was 23.48% at reaction time of 6 days (Figure9).

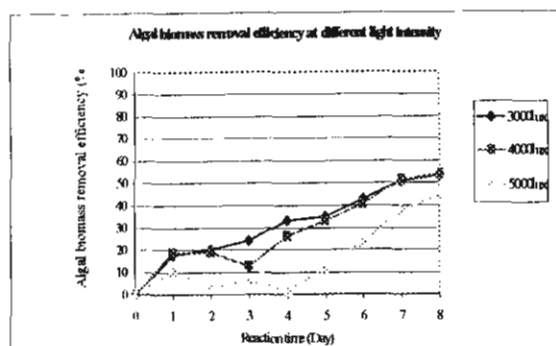


FIGURE 9

SS removal efficiency under various light intensity provisions.

The statistical analysis indicated that the removal efficiency in term of suspended solids were significantly different at various light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux.

For the algal biomass removal efficiency in term of COD at light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux were similar (Figure 10). They were rapidly increased at the first day of operation. After that, COD removal efficiencies were not changed until the forth day. They were rapidly increased again at reaction time of 5 days, then they were slightly increased until the end of operation. The COD removal efficiencies of treatment with light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux at the reaction time of 6 days were 64.49%, 51.79% and 58.99%, respectively. The statistical analysis showed that algal biomass removal efficiency in term of COD were not significant difference at light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux ($p > 0.05$).

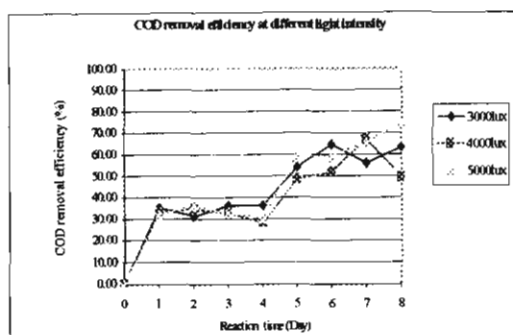


FIGURE 10

COD removal efficiency under various light intensity provisions

Light intensity plays an important role, but requirements vary a great deal with the volume and the density of algae in the culture, at higher volume and concentration of cells the light intensity must be increased to penetrate through the culture. It has been shown that 1,000 lux illumination is suitable for Erlenmeyer flasks culturing, but 5,000-10,000 lux is required for higher volume (25). The algal biomass removal efficiency for this study was described in term of OD_{560} , suspended solid and COD. It was found that in the treatment with light intensity provision 5,000 lux had the highest algal biomass removal efficiency in term of OD_{560} (49.20%). The reason was that light intensity 5,000 lux was nearest to the optimum range for algal culture. For the algal biomass removal efficiency in term of suspended solid, it was found that treatment with light intensity provision 5,000 lux was lower than that treatment of light intensity provision 3,000 and 4,000 lux. This may occurred from the total number of *M. macrocopia* in the treatment with

light intensity provision 5,000 lux was lower, small particles may be less consumed. The reason for the decreasing of *Chlorella sp.* was by the consuming of *M. macrocopa* and sedimentation. The filter-feeding activities of *M. macrocopa* involve the removal of finely suspended material from the water would be expected to result in a reduction in turbidity (26).

Comparison to the study of Asawasinsopon R (3), it was found that the removal efficiency of *Chlorella sp.* in treated swine wastewater by *M. macrocopa* at reaction time of 2 days were 84.85% for OD₅₆₀, 84.11% for algal biomass and 70.52% for COD. This study had lower in removal efficiency of *Chlorella sp.* The reason was that the studied treated septage was quite turbid. Since *M. macrocopa* seem to be non-selective filter feeder, they do not discriminate between individual food particles by taste, high concentrations of suspended material can interfere with the uptake of food particles (14). However, the results could be indicated that the removal efficiency of *Chlorella sp.* in treated septage by *M. macrocopa* varies in different light intensity provision.

The characteristic of treated septage after removal of *Chlorella sp.* by *M. macrocopa* were described in term of TKN and TP removal efficiency. They were analyzed every 2 days. The results are presented in Figure 11-12.

At light intensity provision 3,000 lux, TKN removal efficiency had a trend of increasing. At reaction time of 2, 4, 6 and 8 days, the removal efficiencies of TKN were 27.28%, 53.11%,

62.72% and 68.77%, respectively. For the treatment with light intensity provision 4,000 lux, it was found that TKN removal efficiencies were 26.64%, 50.60%, 63.00% and 74.50% at reaction time of 2, 4, 6 and 8 days, respectively. As light intensity provision 5,000 lux, the trend of TKN removal efficiency was also increasing. Regarding to reaction time of 2, 4, 6 and 8 days, the removal efficiencies of TKN were 29.57%, 53.66%, 69.48% and 78.44%, respectively.

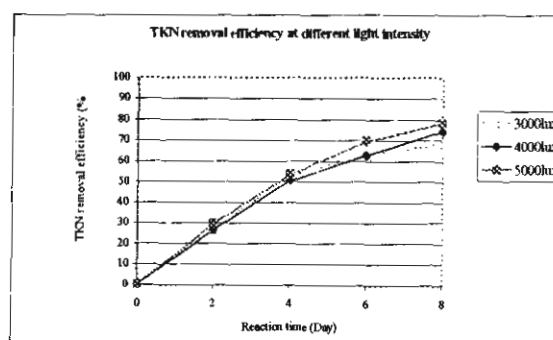


FIGURE 11
TKN removal efficiency under various light intensity provisions

The statistical analysis showed that TKN removal efficiencies of each treatment of light intensity provision were significant difference ($p < 0.05$).

For TP removal efficiency at light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux was slightly increasing though the experiment. The TP removal efficiencies at reaction time of 6 days were 9.98%, 11.03% and 10.86% at light intensity provision 3,000, 4,000 and 5,000 lux, respectively. The statistical analysis showed that TP removal efficiency at varied light intensity

provision were not significant different ($p > 0.05$).

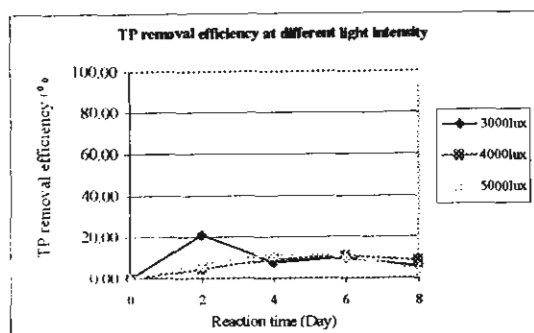


FIGURE 12

TKN removal efficiency under various light intensity provisions

The increase of light intensity increases the microalgae activity (27). *M. macrocopa* indirectly involved the decreasing of TKN by consuming algal cells, bacteria and also some sediment. From the result, TKN removal efficiency in treatment with light intensity provision 5,000 lux was highest. This may be the result of the temperature of treated septage in the reactor 36°C, which is higher than that of treatment with light intensity provision 3,000 and 4,000 lux (31.5 and 32.0°C).

As the result, it was found that all treatment with different light intensity were quite low in TP value. This could be explained by phosphate releasing from the excretion of *M. macrocopa*. In a wastewater activated algal process, chemical precipitation was the predominant mechanism for phosphorus removal. Only 10% of the phosphorus removed was incorporated within the algal cells (19). *M. macrocopa* removed phosphorus principally by feeding on

phytoplankton and bacteria, some phosphorus is returned in fecal pellets. *M. macrocopa* loses phosphate to the media four times faster than its uptake rate (19).

The results prove that this culturing system could successfully remove *Chlorella sp.* in treated septage by using *M. macrocopa* and return beneficial products to the environment. The characteristics of the effluent were also under the level of the effluent standard (7).

5. Conclusion

5.1 Starting number of *M. macrocopa* was not affected the algal biomass removal efficiency and total production of *M. macrocopa*. The ratio 3:1 of algal biomass 300 mg/L and starting number of *M. macrocopa* 100 org/L or 0.02 gram wet weight had the highest production of *M. macrocopa* 36,600 org/L or 2.44 gram wet weight. The algal biomass removal efficiency in terms of OD₅₆₀, SS and COD were 73.73%, 57.56% and 43.35%, respectively at reaction time of 6 days.

5.2 *M. macrocopa* caused an increasing 9% of TKN and 6% of TP removal efficiency.

5.3 Light intensity provision could affect the total production of *M. macrocopa* and algal biomass removal efficiency. The light intensity provision at 3,000 lux was suitable to be used for culturing in laboratory by the reasons of *M. macrocopa* production and economic as well. Although it could not give the maximum algal removal efficiency, but the difference was not exceeding 10%

from that of the maximum removal efficiency.

5.4 In batch culturing, high population of *M. macrocopa* leads to a decline in amount of food as well as an accumulation of metabolic wastes in the medium. Harvesting of *M. macrocopa* should be done at the highest production on the sixth day of culturing.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by a grant from Thai Research Fund (TRF).

7. REFERENCES

- [1] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse 3rd ed. Singapore: McGraw Hill: 1991.
- [2] Pechmanee T et al., Possibility of using *Chlorella sp.* for *Moina* culture. Technical paper No. 6. National Institute of Coastal Aquaculture, Songkhla: 1993.
- [3] Asawasinsopon R. Removal of *Chlorella sp.* in treated synthetic swine wastewater by *Moina macrocopa* (M.Sc thesis in Environmental Sanitation). Bangkok. Faculty of Graduate Studies, Mahidol University; 1999.
- [4] Taevaratmaneeagul P, Srejkij S, Vacharayothin T. Culture of *Moina macrocopa*. Pathumthani: Department of Fisheries: n.p.
- [5] Pechmanee T, Assakaaree M, Boonchaay S. Possibility of using *Chlorella sp.* for *Moina* culture in southern Thailand. Songkhla: National Institute of Coastal Aquaculture; Technical paper no.16.
- [6] Kawai H, Juredini P, Neto JC, Motter OF, Rossetto R. The use of an algal microcrustacean polyculture system for domestic wastewater treatment. Wat Sci Tech 1987;19(12):65-70.
- [7] Ministry of Industry, Industrial Effluent Standard, Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 1996.
- [8] Pennak WR. Fresh-water invertebrates of the United States: Protozoa to mollusca. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc; 1989.
- [9] Yamalee Y, Phuphat S. Semi-continuous cultivation of *Moina macrocopa* with green algae (*Chlorella sp.*); n.d.
- [10] Rottmann WR. Culture techniques of *Moina*: the ideal daphnia for feeding fish fry. <http://edis.ifas.edu/BODY> FAO 24;14/8/2000.
- [11] Yamalee Y, Phupat S, Sujaritvongasnon K, Yongmanitchai V, Patharakulpong. Utilization of *Chlorella sp.* from wastewater in soy - milk plant for feeding on *Moina macrocopa*. Conference proceeding 21th; n.d.
- [12] Smith WD. Wastewater treatment with complementary filter feeder: A new method to control excessive suspended solids and nutrients in stabilization ponds. Wat. Env. Res n.d;65(5):650-654.
- [13] LAS Virgenes municipal water district. Tertiary treatment with a controlled ecological system. EPA tech Ser. EPA 660/2-73-022 Washington DC; 1973.

- [14] Patrick L. Manual on the production and use live food for aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper 361. Rome; 1996 (www.fao.org/DOCREP/003/w373zeox.htm) 7/11/2002.
- [15] Reed CS. Nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. Journal WPCF 1985;57(1):39-45.
- [16] Tchobanoglous G, Burton LF. Wastewater engineering: treatment disposal and reuse. 3rd ed. Singapore. MC Graw Hill; 1991.
- [17] Duangsawad S. Life history of *Moina macrocopa*. Journal of Fisheries 1981;34(5): 553-557.
- [18] Nurdogan Y, Oswald JW. Enhanced nutrient removal in high-rate ponds. Wat Sci Tech 1995; 31(12):33-43.
- [19] Kawai H, Juredini P, Neto JC, Motter OF, Rossetto R. The use of an algal microcrustacean polyculture system for domestic wastewater treatment. Wat Sci Tech 1987;19(12):65-70.
- [20] Navanarasest M. Utiliaztion of domestic wastewater for fresh water flea (*Moina macrocopa*) culture (M.Sc. thesis in Enviromnental Science). Bangkok. Faculty of Graduate Studies, Chulalongkorn University; 1985.
- [21] Wetzel GR. Limnology. 2nd edition. Michigan State University. Saunders College Publishing; 1983
- [22] Hutchinson EG. A treatise on limnology. Vol I. Introduction to lake biology and the limnoplankton. New York John Wiley & Sons Inc.; 1967.
- [23] Waraassawapati W. Culture and some ecological studies of water flea *Moina macrocopa*. College of education. Srinakharinwirot University; 1971.
- [24] Hall JD. An experimental approach to the dynamics of a natural population of *Dephnia galeata mendotae*. Ecology 1964;45(1):94-96.
- [25] Barnabe G. Aquaculture Vol. 1 Great Britain; 1990.
- [26] Ding R. Ecology of *Daphnia* in stabilization ponds Texas: Texas state Department of Health Division of wastewater technology and Surveillance; 1973.
- [27] Travieso L, Benitez F, Weiland P. Experiments on immobilization of microalgae for nutrient removal in wastewater treatments. Bioresource Technology 1996; 55:181-186.

ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้ง
(1 มิถุนายน 2544 – 30 ธันวาคม 2544)

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้ง (1 มิถุนายน 2544 – 30 ธันวาคม 2544)

การวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม

Parameter (mg/L)	Sampling time	
	1	2
BOD	43.6	48.5
COD	262.7	561
TKN	163.1	120
TP	1.5	0.5
TOC	60	- *
SS	- *	46

* ไม่ได้วิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ชนิดของสาหร่ายในแหล่งน้ำธรรมชาติที่พบบริเวณใกล้เคียงโรงงานกำจัดสิ่งปฏิกูลหนองแขม แสดงให้เห็นว่า *Chlorella sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติที่รองรับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว

1. *Chlorella sp.* 48%
2. *Scenedesmus sp.* 48%
3. *Tetraedron* 3%
4. *Pediastrum* 1%

ภาคผนวก จ
ผลการทดลองในส่วนที่ 1
การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp.

ผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *chlorella sp.*

ตาราง จ1 ปริมาณ chlorophyll (mg/L) ที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์

Sample	DAYS						
	0	1	2	3	4	5	6
C	0.02	0.04	0.04	0.02	0.07	0.05	0.05
1/1	1.09	1.49	2.12	3.34	4.10	1.40	0.84
1/2	1.20	1.51	2.26	3.43	4.00	1.42	0.83
1/3	1.19	1.49	2.21	3.32	3.98	1.49	0.75
2/1	0.93	2.00	1.93	3.63	4.18	1.48	0.75
2/2	1.07	1.72	1.98	3.64	4.19	1.41	0.71
2/3	1.26	1.90	1.88	3.63	4.28	1.50	0.70
3/1	1.36	1.74	2.64	3.91	4.05	1.42	0.79
3/2	1.28	1.74	2.46	3.94	4.37	1.42	0.68
3/3	0.99	1.71	2.71	3.97	4.25	1.41	0.71
Mean	1.15	1.70	2.26	3.65	4.16	1.44	0.75

ตาราง จ2 น้ำหนักแห้งของสาหร่าย *chlorella sp.* (mg/L) ที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์

Sample	DAYS						
	0	1	2	3	4	5	6
C	1.53	2.78	2.78	1.53	4.55	3.06	3.06
1/1	72.76	99.64	141.39	222.77	273.64	93.49	55.82
1/2	80.11	100.59	150.52	228.87	266.99	94.64	55.30
1/3	79.08	99.04	147.34	221.08	265.25	99.35	49.92
2/1	61.79	133.30	128.59	242.19	278.85	98.60	49.91
2/2	71.41	114.87	131.88	242.84	279.11	93.80	47.16
2/3	83.95	126.91	125.54	242.29	285.27	100.31	46.93
3/1	90.69	116.26	175.99	260.36	269.92	94.35	52.42
3/2	85.62	115.92	163.68	262.42	291.14	94.83	45.57
3/3	65.71	114.06	180.96	264.69	283.32	94.31	47.35
mean	76.79	113.40	149.54	243.06	277.05	95.97	50.04

ตาราง ๓ ปริมาณ chlorophyll (mg/L) ที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

Sample	DAYS						
	0	1	2	3	4	5	6
C	0.04	0.04	0.04	0.02	0.07	0.05	0.05
1/1	1.47	1.78	2.45	4.06	4.82	2.11	0.65
1/2	1.37	1.78	2.28	3.97	4.75	1.69	0.64
1/3	1.34	1.76	2.40	3.98	4.57	2.12	0.66
2/1	1.35	1.90	2.14	4.39	4.38	2.06	0.69
2/2	1.47	1.65	2.20	4.12	4.47	2.06	0.65
2/3	1.47	1.84	2.15	3.94	4.46	1.93	0.68
3/1	1.49	1.89	2.19	4.34	4.52	2.09	0.65
3/2	1.49	1.93	2.63	4.34	4.74	1.94	0.61
3/3	1.49	1.90	2.39	4.42	4.56	2.10	0.66
mean	1.44	1.83	2.31	4.17	4.59	2.01	0.65

ตาราง ๔ น้ำหนักแห้งของสาหร่าย *chlorella* sp. (mg/L) ที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

Sample	DAYS						
	0	1	2	3	4	5	6
C	2.78	2.78	2.78	1.53	4.55	3.06	3.06
1/1	97.89	118.56	163.66	270.84	321.06	140.46	43.15
1/2	91.38	118.56	152.02	264.64	316.92	112.77	42.83
1/3	89.32	117.45	159.82	265.12	304.59	141.49	44.08
2/1	89.79	126.63	142.46	292.71	291.90	137.15	45.80
2/2	98.08	110.14	146.51	274.74	298.08	137.19	43.06
2/3	98.23	122.42	143.43	262.91	297.56	128.98	45.10
3/1	99.12	126.27	145.72	289.28	301.46	139.27	43.57
3/2	99.41	128.59	175.04	289.43	315.72	129.26	40.79
3/3	99.37	126.74	159.60	294.78	303.84	140.02	43.78
mean	95.84	121.71	154.25	278.27	305.68	134.07	43.57

ตาราง จ5 ปริมาณ chlorophyll (mg/L) ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์

Sample	DAYS						
	0	1	2	3	4	5	6
C	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02
1/1	1.43	2.12	2.70	4.19	5.45	2.17	1.16
1/2	1.44	1.77	2.56	4.20	5.40	2.65	1.11
1/3	1.42	1.72	2.68	4.07	5.58	2.43	1.14
2/1	1.39	2.15	2.95	4.32	5.63	2.90	0.91
2/2	1.35	1.91	2.75	4.34	5.26	2.84	0.91
2/3	1.47	2.13	2.76	4.71	5.09	2.36	0.97
3/1	1.65	1.91	2.93	4.49	5.29	2.53	0.92
3/2	1.66	1.84	2.92	4.53	5.19	2.67	0.92
3/3	1.58	1.81	3.10	4.71	5.17	2.54	0.95
Mean	1.49	1.93	2.82	4.40	5.34	2.56	1.00

ตาราง จ6 น้ำหนักแห้งของสาหร่าย *chlorella* sp. (mg/L) ที่ความเข้มแสง 8,000 luxes

Sample	Day (8000 luxes)						
	0	1	2	3	4	5	6
C	1.53	1.53	1.53	1.53	3.29	3.06	1.53
1/1	95.54	141.10	180.22	279.65	363.57	144.70	77.52
1/2	95.98	118.23	171.00	279.89	360.25	176.49	74.32
1/3	94.44	114.92	178.83	271.35	371.87	161.82	76.12
2/1	92.59	143.54	196.83	288.27	375.59	193.40	60.95
2/2	89.75	127.16	183.07	289.66	350.59	189.50	60.92
2/3	97.95	142.27	184.13	314.27	339.43	157.12	64.62
3/1	110.12	127.53	195.43	299.25	352.69	168.68	61.63
3/2	110.80	122.58	194.40	302.23	345.92	177.98	61.12
3/3	105.36	120.72	206.56	314.23	344.80	169.17	63.37
Mean	99.17	128.67	187.83	293.20	356.08	170.98	66.73

ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง (TKN, TP, COD and SS)

ตาราง น7 ปริมาณ TKN (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ TKN ที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์

Sample	TKN (mg/L)					% Removal of TKN				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
C	104.8	84.30	73.49	60.52	57.28	-	19.56	29.88	42.25	45.34
1/1	104.7	71.33	52.96	38.91	24.86	-	31.87	49.42	62.84	76.26
½	103.8	71.33	51.88	35.67	23.78	-	31.28	50.02	65.64	77.09
1/3	104.8	70.25	49.72	34.59	22.70	-	32.97	52.56	66.99	78.34
2/1	103.7	69.17	50.80	35.67	25.94	-	33.30	51.01	65.60	74.99
2/2	103.7	68.09	50.80	36.75	24.86	-	34.34	51.01	64.56	76.03
2/3	104.4	69.17	49.72	38.91	25.94	-	33.75	52.38	62.73	75.15
3/1	103.7	72.41	52.96	34.59	23.78	-	30.17	48.93	66.64	77.07
3/2	104.5	67.01	51.88	32.42	23.78	-	35.88	50.35	68.98	77.24
3/3	107.0	71.33	51.88	36.75	23.78	-	33.34	51.51	65.65	77.78
Mean	104.6	71.44	51.40	36.03	27.67	-	31.70	50.86	65.55	73.55

ตาราง น8 ปริมาณ TKN (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ TKN ที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

Sample	TKN (mg/L)					% Removal of TKN				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
C	112.4	96.73	76.74	62.15	59.44	-	13.94	31.73	44.71	47.12
1/1	114.0	74.58	51.34	36.75	4.86	-	34.58	54.96	67.76	95.74
½	114.5	75.68	51.34	36.75	4.72	-	33.90	55.16	67.90	95.88
1/3	108.6	76.74	56.74	36.75	4.68	-	29.34	47.75	66.16	95.69
2/1	114.0	75.66	49.72	35.40	5.40	-	33.63	56.39	68.95	95.26
2/2	108.6	72.41	51.34	34.83	5.44	-	33.32	52.73	67.93	94.99
2/3	115.6	72.41	56.74	33.65	4.90	-	37.36	50.92	70.89	95.76
3/1	108.6	76.74	49.72	35.13	7.12	-	29.34	54.22	67.65	93.44
3/2	115.6	75.86	49.72	36.58	7.20	-	34.38	56.99	68.36	93.77
3/3	121.6	74.58	51.34	32.64	6.89	-	38.67	57.78	73.16	94.33
Mean	113.4	77.12	52.60	35.38	5.69	-	31.99	53.62	68.80	94.98

ตาราง น9 ปริมาณ TKN (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ TKN ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์

Sample	TKN (mg/L)					% Removal of TKN				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
C	111.3	96.73	76.74	65.39	57.28	-	13.09	31.05	41.25	48.54
1/1	111.8	74.58	49.72	36.75	10.81	-	33.29	55.53	67.13	90.33
1/1	112.9	75.66	48.10	35.13	11.89	-	32.98	57.40	68.88	89.47
1/3	112.4	76.74	48.10	36.21	10.61	-	31.73	57.21	67.78	90.56
2/1	111.9	75.66	50.26	35.13	11.88	-	32.39	55.08	68.61	89.38
2/2	111.6	72.41	49.18	31.88	15.13	-	35.12	55.93	71.43	86.44
2/3	112.5	72.41	48.10	35.67	14.05	-	35.64	57.24	68.29	87.51
3/1	114.0	76.74	48.10	34.59	12.97	-	32.68	57.81	69.66	88.62
3/2	114.2	75.68	49.18	34.05	11.89	-	33.73	56.94	70.18	89.59
3/3	114.0	74.58	48.10	35.13	10.81	-	34.58	57.81	69.18	90.52
Mean	112.6	77.12	48.76	34.95	16.75	-	31.51	56.70	68.96	85.12

ตาราง น10 ปริมาณ TP (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ TP ที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์

Sample	TP (mg/L)					% Removal of TP				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
C	8.32	7.09	6.68	4.94	4.12	-	14.78	19.71	40.63	50.48
1/1	8.12	6.37	5.14	3.40	0.83	-	21.55	36.70	58.13	89.78
1/2	8.01	6.37	5.24	3.40	2.17	-	20.47	34.58	57.55	72.91
1/3	8.12	6.27	5.35	3.19	2.58	-	22.78	34.11	60.71	68.23
2/1	8.32	6.27	5.24	2.99	2.58	-	24.64	37.02	64.06	68.99
2/2	8.32	6.68	5.14	3.19	2.47	-	19.71	38.22	61.66	70.31
2/3	8.53	6.06	5.04	3.30	2.68	-	28.96	40.91	61.31	68.58
3/1	8.22	6.47	5.24	3.19	2.37	-	21.29	36.25	61.19	71.17
3/2	8.12	6.47	5.24	3.30	2.47	-	20.32	35.47	59.36	69.58
3/3	8.01	6.27	5.24	3.19	2.68	-	21.72	34.58	60.17	66.54
Mean	8.20	6.36	5.21	3.24	2.31	-	22.42	36.46	60.49	71.76

ตาราง น11 ปริมาณ TP (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ TP ที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

Sample	TP (mg/L)					% Removal of TP				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
c	9.04	7.71	6.99	5.14	4.63	-	14.71	22.68	43.14	48.78
1/1	8.94	7.09	2.89	3.91	2.06	-	20.69	67.67	56.26	76.96
1/2	9.35	7.30	5.35	3.81	2.89	-	21.93	42.78	59.25	69.09
1/3	8.63	6.68	5.24	3.71	2.78	-	22.60	39.28	57.01	67.79
2/1	8.83	6.99	5.45	3.40	2.47	-	20.84	38.28	61.49	72.03
2/2	9.04	6.68	5.35	3.30	2.68	-	26.11	40.82	63.50	70.35
2/3	9.14	6.58	5.04	3.60	2.68	-	28.01	44.86	60.61	70.68
3/1	9.24	6.58	5.24	3.50	2.47	-	28.79	43.29	62.12	73.27
3/2	9.14	6.99	5.35	3.50	2.58	-	23.52	41.47	61.71	71.77
3/3	9.14	6.27	5.24	3.61	2.47	-	31.40	42.67	60.50	72.98
mean	9.05	6.80	5.02	3.59	2.56	-	24.91	44.57	60.29	71.66

ตาราง น12 ปริมาณ TP (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ TP ที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์

Sample	TP (mg/L)					% Removal of TP				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
c	8.94	8.12	6.37	5.24	5.04	-	9.17	28.75	41.39	43.62
1/1	8.73	7.71	5.35	2.37	1.86	-	11.68	38.72	72.85	78.69
1/2	9.14	7.40	5.24	2.27	1.86	-	19.04	42.67	75.16	79.65
1/3	9.04	7.50	5.24	2.37	1.24	-	17.04	42.04	73.78	86.28
2/1	8.94	7.30	5.34	5.87	1.45	-	18.34	40.27	34.34	83.78
2/2	9.14	7.40	5.45	2.47	1.35	-	19.04	40.37	72.98	85.23
2/3	9.35	7.40	5.55	2.68	1.45	-	20.86	40.64	71.34	84.49
3/1	9.45	7.30	5.45	2.17	1.65	-	22.75	42.33	77.04	82.54
3/2	9.35	7.50	5.35	2.37	1.45	-	19.79	42.78	74.65	84.49
3/3	9.65	7.30	5.35	2.37	1.65	-	24.35	44.56	75.44	82.90
mean	9.20	7.42	5.37	2.77	1.55	-	19.30	41.64	69.88	83.14

ตาราง น13 ปริมาณ COD (mg/L)และร้อยละของการลดปริมาณ COD ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์

Sample	COD (mg/L)					% Removal of COD				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
C	1020	580	320	160	155	-	43.14	68.63	84.31	84.80
1/1	1220	340	280	120	95	-	72.13	77.05	90.16	92.21
1/2	1050	360	280	120	105	-	65.71	73.33	88.57	90.00
1/3	1130	350	240	110	55	-	69.03	78.76	90.27	95.13
2/1	860	300	260	120	105	-	65.12	69.77	86.05	87.79
2/2	920	320	260	110	95	-	65.22	71.74	88.04	89.67
2/3	1020	320	240	120	85	-	68.63	76.47	88.24	91.67
3/1	1300	340	270	120	105	-	73.85	79.23	90.77	91.92
3/2	1130	350	280	120	105	-	69.03	75.22	89.38	90.71
3/3	1140	330	270	120	85	-	71.05	76.32	89.47	92.54
mean	1086	334	264	118	93	-	69.24	75.69	89.13	91.44

ตาราง น14 ปริมาณ SS (mg/L) และร้อยละของการลดปริมาณ SS ที่ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์

Sample	SS (mg/L)					% Removal of SS				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
C	3200	1600	1560	560	335	-	50.00	51.25	82.50	89.53
1/1	4400	1300	1240	530	295	-	70.45	67.27	88.18	93.75
1/2	4300	1200	1440	520	275	-	70.45	67.27	88.18	93.75
1/3	4500	1400	1640	510	285	-	70.45	67.27	88.18	93.75
2/1	4000	1100	720	470	155	-	69.23	76.41	88.21	96.03
2/2	3900	1200	920	460	165	-	69.23	76.41	88.21	96.03
2/3	3800	1300	820	450	145	-	69.23	76.41	88.21	96.03
3/1	4000	1180	970	370	275	-	66.34	73.90	91.22	93.54
3/2	4100	1380	1070	360	265	-	66.34	73.90	91.22	93.54
3/3	4200	1580	1170	350	255	-	66.34	73.90	91.22	93.54
mean	4133	1293	1143	447	232	-	68.72	72.34	89.18	94.39

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองในส่วนที่ 2
การเพาะเลี้ยงไรแดง

ตาราง ข1 จำนวนไรแดงทั้งหมด ที่ปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งแต่ 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

Starting algal biomass (mg/L)	Starting number of <i>M. macrocopa</i> (org/L)	Detention time (Day)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	100	100	267	667	2367	5300	20000	36600	22000	3600	1933	767
	200	200	1567	1600	10833	21467	26333	26667	11933	2600	733	600
	300	300	1233	2233	14000	26500	26033	28067	13867	2267	1000	567

ตาราง ข2 ประสิทธิภาพการลดค่า OD₅₆₀ ที่ปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งแต่ 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

Starting algal biomass (mg/L)	Starting number of <i>A. macrocopa</i> (org/L)	Detention time (Day)																	
		0		1		2		3		4		5		6		7		8	
		Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%
300	0	1.066	0.0	0.898	15.8	0.982	7.9	0.968	9.2	0.644	39.6	0.550	48.4	0.916	14.1	0.866	18.8	0.727	31.8
	100	1.066	0.0	0.936	12.2	0.579	45.7	0.549	48.5	0.459	56.9	0.280	73.7	0.197	81.5	0.124	88.4	0.120	88.7
	200	1.066	0.0	0.866	18.8	0.632	40.7	0.507	52.4	0.372	65.1	0.225	78.9	0.185	82.7	0.147	86.2	0.449	57.9
	300	1.066	0.00	0.781	26.8	0.621	41.7	0.530	50.3	0.409	61.6	0.258	75.8	0.213	80.0	0.165	84.5	0.142	86.7

ตาราง ข3 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในรูปค่าของแข็งแขวนลอย (suspended solids) ที่ปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งแต่ 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

Starting algal biomass (mg/L)	Starting number of <i>A. macrocopa</i> (org/L)	Detention time (Day)																	
		0		1.		2		3		4		5		6		7		8	
		Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%
300	0	300	0.0	252.7	15.8	276.4	7.9	272.4	9.2	181.2	39.6	154.8	48.4	257.6	14.1	243.7	18.8	204.6	38.8
	100	300	0.0	266.7	11.1	246.0	18.0	256.5	14.5	218.6	27.1	133.3	55.6	93.8	68.7	60.6	79.8	57.3	80.9
	200	300	0.0	253.3	15.6	269.3	10.2	237.0	21.0	176.9	41.0	107.3	64.2	88.1	70.6	69.9	76.7	61.6	79.5
	300	300	0.0	273.3	8.9	280.4	6.5	252.3	15.9	194.9	35.0	122.9	59.0	101.4	66.2	78.8	73.7	67.5	77.5

ตาราง ข5 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน (TKN) ที่ปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร

Starting algal biomass (mg/L)	Starting number of <i>N.macrocopa</i> (org/L)	Detention time (Day)					
		0		2		4	
		Value	%	Value	%	Value	%
300	0	215.48	0.00	158.18	26.59	108.26	49.76
	100	215.48	0.00	157.65	26.84	97.44	54.78
	200	215.48	0.00	157.62	26.85	96.47	55.23
	300	215.48	0.00	150.28	30.26	104.62	51.45
						55.46	74.26

ตาราง ข6 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส (TP) ที่ปริมาณสาหร่าย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และจำนวนไรแดงตั้งต้น 100, 200 และ 300 ตัว/ลิตร.

Starting algal biomass (mg/L)	Starting number of <i>N.macrocopa</i> (org/L)	Detention time (Day)					
		0		2		4	
		Value	%	Value	%	Value	%
300	0	3.80	0.00	6.36	24.29	6.01	28.45
	100	3.80	0.00	2.71	28.73	2.61	31.43
	200	3.80	0.00	2.66	30.04	2.77	26.98
	300	3.80	0.00	2.73	28.10	2.73	28.10
						2.91	23.37

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ไธแดงกำจัดสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ระดับความเข้มแสงต่างกัน

ตาราง ข7 จำนวนไธแดงทั้งหมด ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์

Light intensity (lux)	Detention time (Day)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,000 lux	100	200	100	1023	2380	7633	19780	28803	26162	18860	3267
4,000 lux	100	293	140	713	2467	8030	28213	30167	26600	20793	6633
5,000 lux	100	200	150	860	1373	4617	20710	30933	20753	8150	567

ตาราง ข8 ประสิทธิภาพการลดค่า OD₅₈₀ ที่ระดับความเข้มแสง 3,000, 4,000 และ 5,000 ลักซ์

Light intensity (lux)	Detention time (Day)																	
	0		1		2		3		4		5		6		7		8	
	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%
3,000	0.876	0.00	0.722	17.64	0.701	19.98	0.664	24.26	0.585	33.28	0.568	35.16	0.500	42.98	0.431	50.80	0.407	53.54
4,000	0.876	0.00	0.722	17.58	0.724	17.35	0.740	15.49	0.694	20.72	0.591	32.48	0.550	37.16	0.450	48.69	0.408	53.37
5,000	0.876	0.00	0.546	37.67	0.577	34.13	0.584	33.39	0.617	29.62	0.536	38.76	0.445	49.20	0.319	63.64	0.247	71.86

