

การใช้จุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพในการบำบัดน้ำเสีย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INTEGRATION OF MICROALGAE AND MICROBIAL SLUDGE IN WASTEWATER TREATMENT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้จุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพในการบำบัดน้ำเสีย
โดย	น.ส.ฐานิดา สำแดง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่อะเสริฐ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัมย์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข)	

ฐานิตา สำแดง : การใช้จุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพในการบำบัดน้ำเสีย. (INTEGRATION OF MICROALGAE AND MICROBIAL SLUDGE IN WASTEWATER TREATMENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดซีโอดีโดยจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง เติบโตด้วยน้ำเสียเคราะห์ที่ความเข้มข้น 1,000 มก.ซีโอดี/ล. ผลการทดลองพบว่าค่าซีโอดีลดลงตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งอัตราการบำบัดของจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สภาวะให้แสง มีอัตราการบำบัดสูงสุด (k_1) 0.76 ต่อวัน โดยไม่มีซีโอดีคงเหลือในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการบำบัดซีโอดีโดยจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สภาวะไม่ให้แสง 0.45 ต่อวัน ดังนั้นการใช้จุลสาหร่ายช่วยบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะทำให้ซีโอดีในระบบลดลงจนหมดในสภาวะที่มีแสง แต่ในสภาวะที่ไม่มีแสงจะยังคงมีซีโอดีเหลืออยู่ในระบบ แสดงให้เห็นว่าแสงเป็นปัจจัยสำคัญของการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

จากการศึกษาผลของการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้น 50 100 200 500 และ 1,000 มก.ซีโอดี/ล. โดยจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพในสภาวะที่มีแสง จากการทดลองพบว่าอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 128.0 158.4 352.0 657.8 และ 1547.5 มก.ซีโอดี/ล./วัน ตามลำดับ มีแนวโน้มของอัตราการบำบัดซีโอดีตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือ 0.99 ต่อวัน และอัตราการบำบัดจำเพาะของจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพคือ 0.0282 วัน⁻¹ จากการศึกษาผลการทดลองของระยะเวลาเก็บน้ำ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 1 2 4 และ 8 วัน เท่ากับร้อยละ 70.52±3.80 83.49±2.59 90.63±2.48 และ 92.53±2.84 ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาเก็บที่ 4 น่าจะเหมาะสมที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070169621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Microalgae, Microalgae-Bacteria Integration, High Rate Algae Pond, Natural Wastewater Treatment

Thanida Samdeang : INTEGRATION OF MICROALGAE AND MICROBIAL SLUDGE IN WASTEWATER TREATMENT. Advisor: Asst. Prof. SARUN TEJASEN, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D.

The chemical oxygen demand (COD) removal efficiency of microalgae and microbial sludge under lighting and non-lighting conditions were studied in this research. Initially wastewater had a chemical oxygen demand (COD) of 1,000 mg/L. The results showed that the reaction rate of COD removal decreased according to first-order kinetic, and the maximum reaction rate (k_1) of COD removal was 0.76 day^{-1} under the lighting condition, and there was no non-biodegradable COD (nbCOD). Whereas, non-lighting condition indicated the maximum reaction rate of COD removal was 0.45 day^{-1} . Therefore, the usage of microalgae for treating wastewater can decrease COD completely under the lighting condition. While, there is some residual COD in without lighting condition.

Under lighting condition, microalgae and microbial sludge were used for treating various COD concentrations, 50, 100, 200, 500, and 1,000 mg COD/L. The results showed that the COD removal rate was 128.0, 158.4, 352.0, 657.8 and 1547.5 mg COD/L•day, respectively. COD removal rate followed the first-order reaction with k_1 of 0.99 day^{-1} and the specific rate of microalgae and microbial sludge system was $0.0282 \text{ mg COD/mg MLSS}\cdot\text{day}$. In part of various hydraulic retention time (HRT), the HRT of 1, 2, 4 and 8 days provided COD removal efficiency of 70.52 ± 3.80 , 83.49 ± 2.59 , 90.63 ± 2.48 and $92.53\pm 2.84\%$, respectively. Therefore, HRT of 4 days is the most suitable.

Field of Study: Environmental Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอขอบพระคุณผู้ให้อนุเคราะห์ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะ ตลอดการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำ ดิชม และแก้ไขให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มาก

ขอขอบพระคุณอาจารย์จรรยา ไพลีน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่แนะนำและช่วยเหลือต่าง

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย เอื้อเพื่อเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณทุนวิจัยเพิ่มเติมบางส่วนจากโครงการสนับสนุนเพื่อขับเคลื่อนการวิจัย (STAR) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2561

ขอขอบพระคุณ เค้ก ชุน พีพลอย แอน พีปุย พีอ้อฟ พีมายด์ ดี พีซู พีพัตร และเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ดูแลซึ่งกันและกันในระหว่างการทำวิจัย ร่วมทุกข์ร่วมสุข สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุน ส่งเสริม แก่ผู้วิจัยเสมอตลอดมา

ฐานิดา สำแดง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ.....	4
2.1.1 บ่อสาหร่ายอัตราสูง (High Rate Algal Pond).....	4
2.1.2 บ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่ง (Facultative Pond).....	5
2.1.3 บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland).....	6
2.2 สาหร่าย <i>Chlorella vulgaris</i>	7
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของคลอเรลลา.....	7
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Chlorella vulgaris</i>	8
2.2.2.1 แหล่งอาหาร.....	8
2.2.2.2 แสง.....	9

2.2.2.4	ความเป็นกรด-ด่าง	10
2.2.3	การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Chlorella vulgaris</i>	10
2.2.4	ประโยชน์ของสาหร่าย <i>Chlorella vulgaris</i>	10
2.3	ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกันระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรีย.....	11
2.4	ปริมาณสารสัมพันธ์ของกระบวนการทางชีวภาพ.....	12
2.4.1	สมการปริมาณสัมพันธ์ของแบคทีเรีย.....	12
2.4.2	สมการปริมาณสัมพันธ์ของสาหร่าย	13
2.5	รูปแบบของจลนพลศาสตร์.....	14
2.5.1	จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics).....	14
2.5.2	จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics).....	15
2.5.3	จลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second order kinetics)	15
2.5.4	จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod Kinetics)	16
2.6	ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.6.1	การบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ	17
2.6.2	การบำบัดน้ำเสียด้วยป้อสาหร่าย	19
2.6.3	ประโยชน์จากสาหร่าย <i>Chlorella</i> spp.	20
บทที่ 3	แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1	แผนการทดลอง	21
3.1.1	การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสีย ...	22
3.1.2	การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสถานะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอน จุลชีพ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยดังนี้	22
3.1.3	การทดลองช่วงที่ 3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่าง สาหร่ายและตะกอนจุลชีพ	23
3.2	เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี	23

3.2.1	วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง.....	23
3.2.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีในการวิเคราะห์ผล	23
3.2.3	จุลินทรีย์ในระบบ.....	26
3.2.4	น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2.5	ถังปฏิกรณ์และการเดินระบบ.....	27
3.3	วิธีวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	29
3.3.1	การหาน้ำหนักแห้ง.....	29
3.3.2	การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ.....	29
3.4	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.4.1	การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง.....	31
3.4.2	การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยดังนี้	33
3.4.3	การทดลองช่วงที่ 3 : การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ	38
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	40
4.1	การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง....	40
4.1.1	ค่าซีโอดี.....	40
4.1.2	ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบ (Mixed liquor suspended solids; MLSS).....	45
4.1.3	ค่าแอมโมเนีย.....	47
4.2	การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ	50
4.2.1	การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียต่อการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ	50
4.2.1.1	ค่าซีโอดี.....	50

4.2.1.2 ค่าแอมโมเนีย	52
4.2.1.3 ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบ (Mixed liquor suspended solids; MLSS).....	54
4.2.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield)	56
4.2.2 การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่เก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ.....	57
4.2.2.1 ค่าซีโอดี.....	57
4.2.2.2 ค่าแอมโมเนีย	60
4.2.2.3 ค่าไนเตรตและไนไตรท์.....	62
4.2.2.4 ออกซิเจนละลาย	65
4.3 การทดลองช่วงที่ 3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่าง จุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ.....	68
4.3.1 ค่าซีโอดี	68
4.3.2 ค่าแอมโมเนีย.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	73
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	78
บรรณานุกรม.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3-1 สูตรอาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาสูตร N8..... 26

ตารางที่ 3-2 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 27

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 31

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.1 33

ตารางที่ 3-5 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย 34

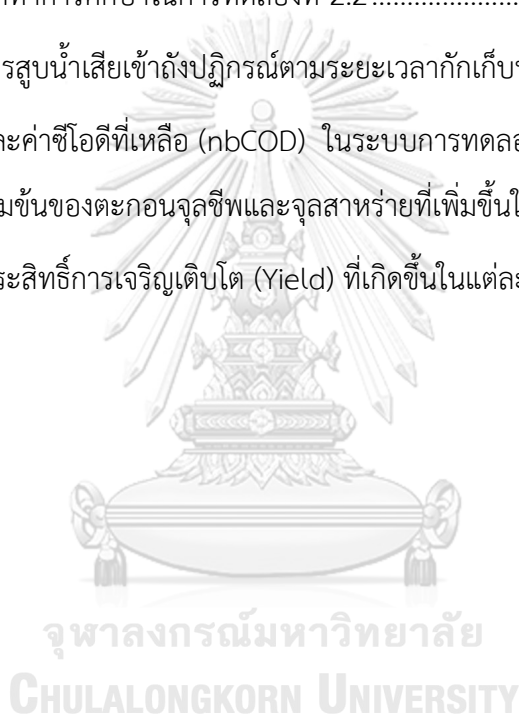
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.2..... 36

ตารางที่ 3-7 อัตราการสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ตามระยะเวลาที่เก็บน้ำที่กำหนด 37

ตารางที่ 4-1 ค่า k_1 และค่าซีโอดีที่เหลือ (nbCOD) ในระบบการทดลองของชุดการทดลอง..... 42

ตารางที่ 4-2 ความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชุดการทดลอง 46

ตารางที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) ที่เกิดขึ้นในแต่ละความเข้มข้นของซีโอดี..... 56



สารบัญรูป

รูปที่ 2- 1 บ่อบำบัดแบบบ่อสาหร่ายอัตราสูง..... 5

รูปที่ 2-2 บ่อบำบัดแบบบ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่ง..... 6

รูปที่ 2-3 บึงประดิษฐ์..... 7

รูปที่ 2-4 สาหร่ายคลอเรลลา *Chlorella vulgaris*..... 8

รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกันระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรีย..... 11

รูปที่ 2-6 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics)..... 14

รูปที่ 2-7 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)..... 15

รูปที่ 2-8 จลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second order kinetics)..... 16

รูปที่ 2-9 จลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics)..... 16

รูปที่ 3-1 แผนผังสรุปการทดลองทั้งหมดของงานวิจัย.....21

รูปที่ 3-2 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 28

รูปที่ 3-3 กราฟมาตรฐานของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ..... 30

รูปที่ 3-4 แผนผังการดำเนินงานวิจัยการทดลองที่ 1..... 32

รูปที่ 3-5 แผนผังการดำเนินงานวิจัยการทดลองที่ 2.1..... 35

รูปที่ 3-6 แผนผังการดำเนินงานวิจัยการทดลองที่ 2.2..... 37

รูปที่ 3-7 การหาอัตราการบำบัดในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบ..... 38

รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดและความเข้มข้นของจุลินทรีย์..... 39

รูปที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี.....43

รูปที่ 4-2 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากแต่ละชุดการทดลองที่เวลา 12 วัน..... 46

รูปที่ 4-3 การเปลี่ยนแปลงค่าแอมโมเนียของแต่ละชุดการทดลอง..... 48

รูปที่ 4-4 กราฟแสดงการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ..... 51

รูปที่ 4-5 กราฟการหาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดแอมโมเนีย..... 53

รูปที่ 4-6 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นไนเตรตแต่ละชุดการทดลอง..... 54

รูปที่ 4-7 กราฟค่าความเข้มข้นตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายแต่ละชุดการทดลองต่างๆ 55

รูปที่ 4-8 กราฟความเข้มข้นซีไอดีน้ำออกที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 1 2 4 และ 8 วัน 58

รูปที่ 4-9 กราฟแสดงประสิทธิภาพของความเข้มข้นซีไอดีที่ระยะเก็บกักน้ำต่างๆ..... 59

รูปที่ 4-10 กราฟแสดงประสิทธิภาพของความเข้มข้นแอมโมเนียที่ระยะเก็บกักน้ำต่างๆ..... 60

รูปที่ 4-11 กราฟแสดงการความเข้มข้นแอมโมเนียแต่ละชุดการทดลองของระยะเวลาเก็บน้ำ.... 61

รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความเข้มข้นไนเตรตแต่ละชุดการทดลองของระยะเวลาเก็บน้ำ 63

รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความเข้มข้นไนไตรท์แต่ละชุดการทดลองของระยะเวลาเก็บน้ำ..... 64

รูปที่ 4-14 กราฟแสดงออกซิเจนละลายแต่ละความลึกน้ำของแต่ละระยะเวลาเก็บน้ำ 65

รูปที่ 4-15 กราฟแสดงปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ แต่ละความลึกน้ำของแต่ละระยะเวลาเก็บน้ำ 67

รูปที่ 4-16 กราฟแสดงอัตราการบำบัดซีไอดีต่อความเข้มข้นซีไอดี 68

รูปที่ 4-17 กราฟแสดงอัตราการบำบัดซีไอดีจำเพาะต่อความเข้มข้นซีไอดี 69

รูปที่ 4-18 กราฟแสดงอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความเข้มข้นแอมโมเนีย 70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาศัยการเติมอากาศลงไปในน้ำด้วยเครื่องจักร ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมาก มีค่าใช้จ่ายสูงทั้งการก่อสร้างและค่าไฟฟ้าในการเดินระบบ (Rosso, Larson และ Stenstrom, 2008) ดังนั้นการอาศัยกลไกของธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากระบบที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและดูแลระบบต่ำ แต่ต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างค่อนข้างมาก ออกซิเจนสำหรับระบบบำบัดนี้ประกอบไปด้วย 2 แหล่งที่มา คือการถ่ายเทจากอากาศที่สัมผัสกับผิวน้ำในบ่อบำบัด และจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่เจริญเติบโตอยู่ภายในบ่อ โดยสาหร่ายและจุลินทรีย์ในบ่อจะมีปฏิสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน (Symbiosis Relationship) ซึ่งสาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์และผลิตออกซิเจนออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง ขณะที่แบคทีเรียกลุ่มเฮเทโรโทรฟจะใช้ออกซิเจนที่ได้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการเจริญเติบโต (Oswald และคณะ, 1953) นอกจากนี้ในสภาวะดังกล่าวยังสามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้นได้ เนื่องจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟเออร์นั้นใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและใช้แอมโมเนียและอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นพลังงานโดยเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และไนเตรต (สมพงษ์ ธีรวิธ มาศสุวรรณ, 2552) แต่เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงต้องการแสงแดดเป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นออกซิเจนที่เกิดจากกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่มีแสงสว่างเท่านั้น ส่วนในช่วงกลางคืนทั้งสาหร่ายและแบคทีเรียจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในบ่อน้ำลดน้อยลง เมื่อปริมาณออกซิเจนหมด จุลินทรีย์ในระบบจะใช้ไนเตรตที่มีอยู่ในระบบเป็นสารรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน โดยใช้สารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน และเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางชีวภาพที่เปลี่ยนไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนทำให้สามารถกำจัดไนเตรตออกไปจากแหล่งน้ำได้

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ โดยเลือกใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ซึ่งพบได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำทิ้ง (Palmer, 1977) และมีการเจริญเติบโตแบบมิกโซทรอฟ (Mixotroph) นั่นคือสามารถเจริญเติบโตในสภาวะมีแสงหรือไม่มีแสงก็ได้ โดยใช้สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนก็ได้ (Widjaja, Chien และ Ju, 2009) นอกจากนี้สาหร่ายชนิดนี้ยังเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซล (Spolaore และคณะ, 2006) โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียธรรมชาติที่อาศัยสาหร่ายในกระบวนการบำบัดจะมีลักษณะบ่อที่ค่อนข้างตื้น มีความลึกโดยประมาณ 0.5 – 1 เมตร (Larsdotter, 2006) เพื่อให้แสงแดดสามารถส่องลงไปถึงก้นบ่อได้ ทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ปริมาณมาก แต่อาจส่งผลให้สาหร่ายหลุดไหลออกไปกับน้ำทิ้งทำให้น้ำที่ระบายออกไปไม่ผ่านมาตรฐาน งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความลึกของบ่อที่ประมาณ 2 เมตร เพื่อผันน้ำจากส่วนล่างของบ่อที่มีสาหร่ายเจริญเติบโตน้อยระบายออกไปทิ้งแทนจากสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนี้ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะมุ่งศึกษาในประเด็นเรื่องความลึกของบ่อ เพื่อลดปัญหาสาหร่ายที่หลุดออกจากระบบ ศึกษาสมดุลระหว่างสาหร่ายและจุลชีพที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบและระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบบ่อบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีธรรมชาติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะในการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะมีแสงและไม่มีแสงที่ระดับความลึกน้ำต่างๆ เมื่อทำการทดลองโดยเลียนแบบระบบบ่อตามธรรมชาติ
2. ศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียในรูปซีโอดีต่อสัดส่วนของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย
3. ศึกษาอัตราการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพต่อระยะเวลาเก็บกักน้ำ
4. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพที่สภาวะต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเชิงปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิต้อง ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

- น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ที่แปรค่าความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 50, 100, 200, 500 และ 1,000 มก.ซีโอดี/ล. และใช้แอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจน

- ถึงปฏิกรณ์ทำจากวัสดุอะคริลิกใส สูง 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร มีปริมาตรรวมเท่ากับ 15.7 ลิตร

- ทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำ 4 ค่า ได้แก่ 1, 2, 4 และ 8 วัน

- งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้สาหร่ายชนิด *Chlorella vulgaris* ร่วมกับตะกอนจุลชีพจากถังเติมอากาศ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนช่องนนทรี

- เติกระบบการทดลองโดยให้แสงสว่างจากด้านบนด้วยหลอดไฟ ที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเวลากลางวันและกลางคืนในประเทศไทย

- พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ คือ พีเอช (pH) ออกซิเจนละลาย (DO) ซีโอดี (COD) แอมโมเนียม (NH_4^+) ไนไตรท์ (NO_2^-) ไนเตรต (NO_3^-) ของแข็งแขวนลอย (SS) และ คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) โดยดำเนินการด้วยวิธีมาตรฐานตามที่ระบุใน Standard Method For the examination of water and wastewater (Association และ Association, 1989)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในการบำบัดน้ำเสียภายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง
2. เพื่อทราบสัดส่วนของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มต่างๆ ตลอดจนประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีรวมทั้งที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ
3. เพื่อทราบความลึกที่เหมาะสมของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ โดยผลการทดลองที่ได้สามารถปรับใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ

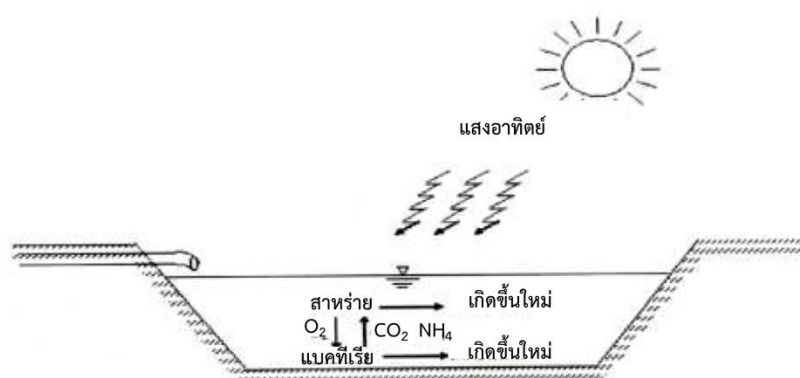
การบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยธรรมชาติ (Natural Wastewater Treatment) คือ ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการธรรมชาติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะที่มีดิน น้ำ พืช บรรยากาศ ตลอดจนจุลินทรีย์มาเกี่ยวพันกัน กล่าวอีกในนัยหนึ่งคือ เป็นกระบวนการการร่วมกันของทั้งสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต โดยปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นน้ำดี หรือการทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำเสียลดลงได้ในระดับหนึ่ง โดยที่ไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์และเครื่องจักรกลต่างๆ มาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะแบ่งประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1 บ่อสาหร่ายอัตราสูง (High Rate Algal Pond)

บ่อสาหร่ายอัตราสูง เรียกอีกชื่อว่า บ่อเขียวเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการทำงานร่วมกันของสาหร่ายกับจุลชีพภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอย่างเพียงพอ ออกซิเจนที่เติมให้กับระบบบำบัดนี้ ประกอบไปด้วย 2 แหล่งที่มา คือจากบรรยากาศหรืออากาศที่สัมผัสกับน้ำที่ผิวบ่อบำบัด และได้จากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ระบบนี้มีหลักการทำงานคือ น้ำเสียเข้าระบบจะเป็นน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ ซึ่งสารอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกจุลชีพย่อยสลายให้เปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์หรือธาตุอาหารจากนั้นสาหร่ายจะทำการดูดซึมธาตุอาหารเข้าไปผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโต สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ จึงมีปริมาณลดลงจากนั้นจะต้องแยกมวลชีวภาพของสาหร่ายออกจากระบบ เพื่อนำชีวมวลของสาหร่ายที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ตามคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาหร่ายแต่ละชนิดและเทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ใช้กับมวลชีวภาพของสาหร่าย (Polprasert, Kongsricharoern และ Kanjanaprapin, 1994)

บ่อเขียวเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่จะมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ตลอดทั่วทั้งบ่อจะไม่มีสภาวะไร้อากาศหรือออกซิเจนอิสระ (Anaerobic condition) เกิดขึ้นที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของบ่อบำบัดน้ำเสียเลย รวมทั้งลักษณะของบ่อบำบัดน้ำเสียจะส่งเสริมให้มีการละลายของออกซิเจนหรืออากาศได้ทั่วถึงทั้งบ่อดังแสดงในรูปที่ 2-1 ดังที่กล่าวแล้วว่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียในบ่อบำบัดน้ำเสียนั้นมาจาก 2 ทาง คือ อากาศและสาหร่าย แต่จะได้จากสาหร่ายเป็นหลัก ดังนั้น ลักษณะ

ของบ่อจะต้องถูกออกแบบไว้ค่อนข้างตื้นประมาณ 0.5-1.5 เมตร และแสงแดดจะส่องลงไปถึงก้นบ่อ เพื่อให้สาหร่ายเจริญเติบโตและสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างออกซิเจนให้กับระบบบำบัดน้ำเสียหรือบ่อบำบัดน้ำเสียได้อย่างเพียงพอ



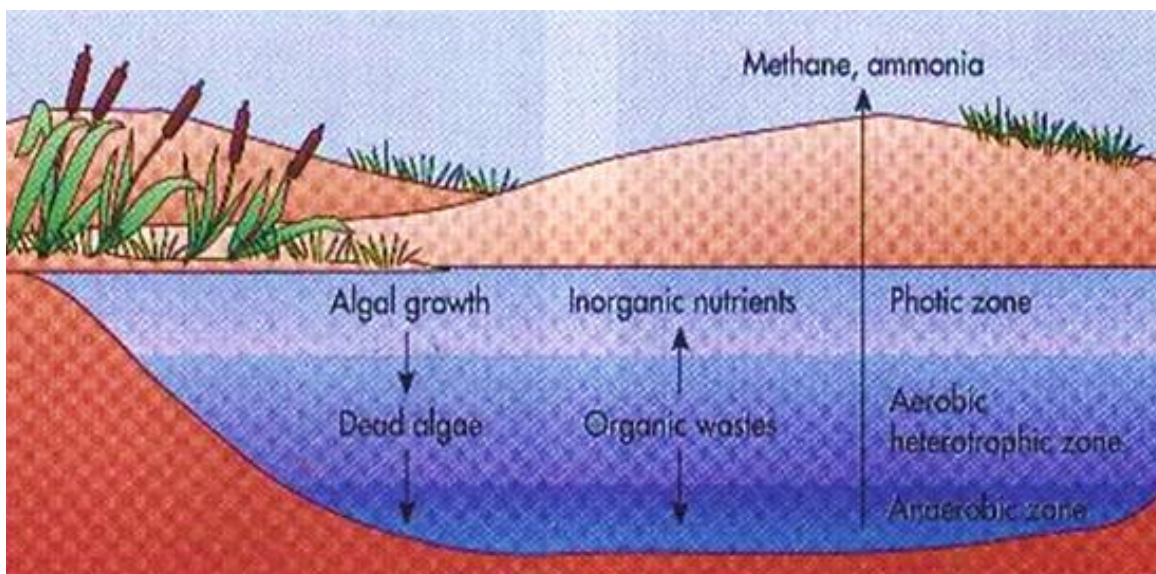
รูปที่ 2- 1 บ่อบำบัดแบบบ่อสาหร่ายอัตราสูง

2.1.2 บ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่ง (Facultative Pond)

บ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ตัวบ่อจะถูกออกแบบหรือสร้างให้มีความลึกมากกว่าบ่อสาหร่ายคือบ่ออาจจะมีลึก 1-2 เมตร ลักษณะการทำงานของจุลชีพในบ่อจะต่างกับบ่อสาหร่าย โดยแสงแดดจะส่องลงไปไม่ถึงก้นบ่อทำให้สาหร่ายไม่สามารถขึ้นได้ทั่วถึงทั้งบ่อ เนื่องจากบริเวณผิวน้ำที่มีสาหร่ายอยู่เต็มจะเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ส่วนก้นบ่อจะมีสภาพเป็นสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic condition) ลักษณะบ่อบำบัดน้ำเสียแบบกึ่งหมักกึ่งผึ่งจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีออกซิเจนอิสระ (Aerobic zone) จะประกอบด้วยกลุ่มสาหร่ายและแบคทีเรียกลุ่มเฮโทรทรอฟ การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนนี้จะเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีแบบใช้ออกซิเจนอิสระ สำหรับส่วนที่ไม่มีออกซิเจนอิสระ (Anaerobic Zone) คือส่วนที่แสงแดดส่องไปไม่ถึง จะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์และตะกอนที่มีการตกสะสมที่ก้นบ่อด้วยกระบวนการหมัก (สันทัด ศิริอนันต์ไพบุลย์, 2552)

บ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่งเป็นบ่อที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยปกติบ่อประเภทนี้จะรับน้ำเสียจากการบำบัดขั้นต้นมาก่อน กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในบ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่ง สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ประเภทที่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) เพื่อเป็นอาหารและสำหรับการสร้างเซลล์ใหม่และเป็นพลังงาน โดยใช้ออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่อยู่ในบ่อส่วนบน สำหรับบ่อส่วนล่างจนถึงก้นบ่อซึ่งแสงแดดส่องไม่ถึง จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำจนเกิดสภาวะ

ไร้ออกซิเจน (Anaerobic Condition) และมีจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นก๊าซเช่นเดียวกับบ่อแอนแอโรบิก แต่ก๊าซที่ลอยขึ้นมาจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อยู่ช่วงบนของบ่อทำให้ไม่เกิดกลิ่นเหม็น

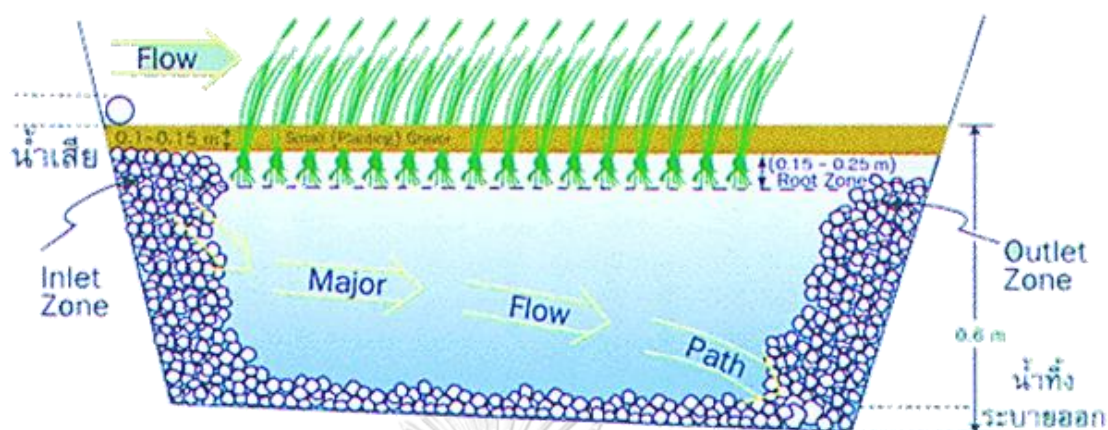


รูปที่ 2-2 บ่อบำบัดแบบบ่อกึ่งหมักกึ่งผึ่ง

2.1.3 บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

บึงประดิษฐ์เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองสภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีในธรรมชาติด้วยการปลูกพืช เป็นบ่อกักเก็บน้ำที่ปลูกพืชที่โตจากดินจำพวกกก แฝก ธูปฤาษี หรือ พืชลอยน้ำ เช่น บัว ผักตบชวา จอก และแหน นิยมใช้บำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว (สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2552) หลักการทำงานของระบบนี้ คือเมื่อน้ำเสียไหลเข้ามาในบึงประดิษฐ์สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะตกตะกอนจมตัวลงสู่ก้นบึง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่กับพืชน้ำหรือชั้นหินและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ระบบนี้จะได้รับออกซิเจนจากการแทรกซึมของอากาศผ่านผิวน้ำหรือชั้นหินลงมา ออกซิเจนบางส่วนจะได้จากการสังเคราะห์แสงแต่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับสารแขวนลอยจะถูกกรองและจมตัวอยู่ในช่วงต้น ๆ ของระบบ

ข้อจำกัดของระบบนี้ ต้องใช้บุคลากรในการดูแลจำนวนมาก และต้องดูแลตัดแต่งพืชที่ใช้ในการบำบัดตามระยะเวลาที่กำหนด และใช้พื้นที่ค่อนข้างมากเพื่อให้พอกับปริมาณน้ำเสีย



รูปที่ 2-3 บึงประดิษฐ์

2.2 สาหร่าย *Chlorella vulgaris*

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของคลอเรลลา

เป็นสาหร่ายสีเขียว สาหร่ายชนิดนี้มีลักษณะเซลล์ส่วนใหญ่เป็นทรงกลมและทรงรี ดังรูปที่ 2-4 เป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีขนาดเล็กโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2- 10 μm ผนังเซลล์บาง สาหร่ายมีรงควัตถุที่ช่วยสังเคราะห์แสงคือ คลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บีโดยอยู่ในคลอโรพลาสซึ่งมีลักษณะเป็นรูปถ้วยหรือเป็นแผ่นอยู่ริมเซลล์ การสืบพันธุ์เป็นแบบไม่อาศัยเพศโดยการสร้างออโตสปอร์ (Autospore) จำนวนสปอร์โดย 4, 8, หรือ 16 เมื่อสปอร์คลอเรลลามีจำนวนมากจะทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวตอง สำหรับอนุกรมวิธานของสาหร่ายคลอเรลลามีดังต่อไปนี้

Kingdom Plantae

Division Chlorophyta

Class Trebouxiophyceae

Order Chlorellales

Family Chlorellaceae

Genus *Chlorella*

โดยสาหร่ายคลอเรลลาที่เป็นที่รู้จักและใช้ในการศึกษา คือ *Chlorella vulgaris* เป็นสาหร่ายเซลล์เดียวสีเขียวที่พบในน้ำจืด สามารถผลิตอาหารด้วยตนเองผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์ขนาดเล็กในระบบนิเวศ เป็นสาหร่ายที่จัดอยู่ในกลุ่มของสาหร่ายสีเขียว (Chlorophyte) ที่เจริญเติบโตเร็ว จะมีปริมาณโปรตีน วิตามิน และเกลือแร่ที่จำเป็นต่อร่างกายในปริมาณที่สูงแล้ว คลอเรลลา ยังผลิตไขมันปริมาณมาก จึงเป็นสายพันธุ์หนึ่งที่มีความสนใจในปัจจุบันในการพัฒนามาเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลหมุนเวียนสำหรับผลิตไบโอดีเซลด้วย (ยุวดี พิรพรพิศาล, 2549)



รูปที่ 2-4 สาหร่ายคลอเรลลา *Chlorella vulgaris*

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella vulgaris*

2.2.2.1 แหล่งอาหาร

- แหล่งคาร์บอน คาร์บอนจัดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย การเติมสารอาหารที่จำเป็นต่าง ๆ มากขึ้นจะไม่มีผลทำให้ปริมาณเซลล์เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนถูกจำกัด สาหร่ายสามารถใช้คาร์บอนได้ในรูปของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ แหล่งคาร์บอนในรูปสารอนินทรีย์ ซึ่งพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยทั่วไป จะอยู่ในรูปของ HCO_3^- ส่วนแหล่งคาร์บอนในรูปสารอินทรีย์ต่างๆ จะพบได้หลายรูป เช่น กลูโคส อะซิเตท เอทานอล อะลานีน แอสพาร์เตท ฟรักโทส กาแลคโทส ไพรูเวต และซัคซิเนท (Becker และ Venkataraman, 1982)

- แหล่งไนโตรเจน ไนโตรเจนมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ สาหร่ายมีปริมาณไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 1-10 ของน้ำหนักแห้ง สาหร่ายสามารถใช้ไนโตรเจนได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้แก่ แกลีอามโมเนีย ไนเตรต และไนไตรท์ (Richmond, 2008)

- แหล่งฟอสฟอรัส มีบทบาทในกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ การเคลื่อนย้ายพลังงานและการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก รวมทั้งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ช่วยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างคงที่ ซึ่งโดยปกติเซลล์จะใช้ฟอสฟอรัสได้ดีในรูปออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) ในแหล่งน้ำธรรมชาติพบฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์ฟอสเฟตมากกว่าอินทรีย์ฟอสเฟต โดยทั่วไปสาหร่ายจะใช้ฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์ฟอสเฟต ได้แก่ H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} (Richmond, 1986)

2.2.2.2 แสง

แสงเป็นปัจจัยภายนอกที่มีความสำคัญในการเลี้ยงสาหร่าย โดยก่อให้เกิดการสังเคราะห์แสง เมื่อความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นการเจริญของสาหร่ายเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะเพิ่มการสังเคราะห์แสงและเร่งการทำงานของเซลล์ (Kosaric, Nguyen และ Bergougnou, 1974) แต่ความเข้มแสงที่สูงเกินไปจะมีผลไปยับยั้งการหายใจของเซลล์ ส่วนการเกิดปรากฏการณ์การยับยั้งด้วยแสง (Photoinhibition) ขึ้นกับสายพันธุ์ของสาหร่ายและช่วงระยะเวลาการได้รับแสง หากสาหร่ายได้รับแสงที่ความเข้มสูงเป็นเวลานานจะเกิดการยับยั้งการหายใจของเซลล์ (Vonshak และคณะ, 1982)

Chlorella sp. หรือสาหร่ายคลอเรล มักเติบโตในสภาพที่มีทั้งช่วงมืดและช่วงสว่าง แต่ไม่สามารถเติบโตได้ในสภาพที่มีแสงอย่างต่อเนื่อง การให้แสงที่มีความเข้มสูงอย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้เซลล์มีสีซีดหรือปรากฏลักษณะสีเหลืองอมน้ำตาล ซึ่งเป็นผลจากการที่เม็ดสีถูกทำลาย (Lorenzen, 1963) ซึ่งช่วงความเข้มแสง 2,700 ลักซ์ เป็นความเข้มแสงที่สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี (Rai, Gautom และ Sharma, 2015)

2.2.2.3 อุณหภูมิ

สาหร่ายแต่ละชนิดตอบสนองต่อช่วงอุณหภูมิแตกต่างกันและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงจำกัดต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วประมาณ 10-15 °C หรือมากกว่าสาหร่ายไม่สามารถปรับตัวได้จะชะงักการเติบโตและการแบ่งเซลล์

สำหรับ *Chlorella sp.* จะเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูงที่อุณหภูมิ 30 °ซ ในตอนกลางวันและ 20°ซ ในตอนกลางคืน ในสภาพบ่อเปิดกลางแจ้งในประเทศไทยพบว่าอุณหภูมิเหมาะสมอยู่ในช่วง 35-36 °ซ โดยการเติบโตจะลดลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 41 °ซ (Barghbani, Rezaei และ Javanshir, 2012)

2.2.2.4 ความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงสาหร่ายมีผลต่อกระบวนการต่างๆทางชีววิทยาของเซลล์ ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นตัวบ่งบอกการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือปริมาณของไบคาร์บอเนตในอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งจะมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมของกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์สาหร่าย (Becker และ Venkataraman, 1982) สำหรับ *Chlorella sp.* เติบโตได้ดีในค่าความเป็นกรด-ด่าง ช่วงกว้างแต่โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเติบโตของ *Chlorella vulgaris* อยู่ในช่วง 6-8 (Malis-Arad และ McGowan, 1982)

2.2.3 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella vulgaris*

สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* มีลักษณะกระบวนการเมแทบอลิซึม 3 ประเภท ได้แก่ โฟโตออโตทรอฟ (Photoautotroph) เฮเทโรทรอฟ (Heterotroph) และมิกโซทรอฟ (Mixotroph) มีรายละเอียดดังนี้

1. โฟโตออโตทรอฟ คือ สาหร่ายที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนและแสงเป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์ด้วยแสง (Chen และ Durbin, 1994)
2. เฮเทโรทรอฟ คือ สาหร่ายที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโตและการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ แต่ไม่ต้องการแสงในการเจริญเติบโต (Veillette และคณะ, 2012)
3. มิกโซทรอฟ คือ สาหร่ายที่สามารถเจริญเติบโตในสภาวะมีแสงหรือไม่มีแสงก็ได้ สามารถใช้สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนก็ได้ (Andrews, 1968)

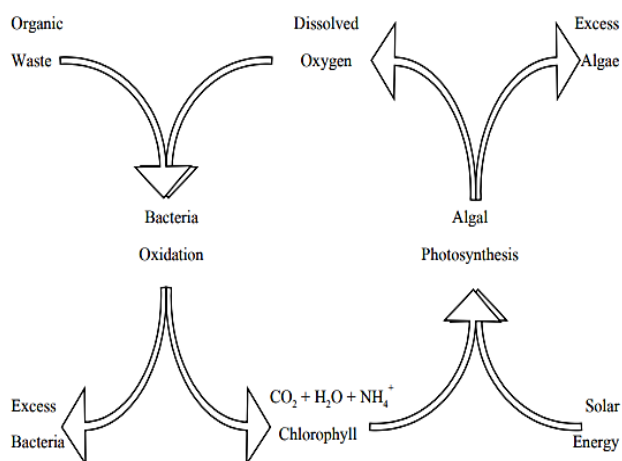
2.2.4 ประโยชน์ของสาหร่าย *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris เป็นสาหร่ายสีเขียวที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น นำมาใช้เป็นอาหารหรือสกัดเอาสารโปรตีนเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารโปรตีนในอนาคต ทางด้านเกษตรกรรม นำมาใช้เป็นอาหารลูกปลาตะเพียน ปลาการ์ป และเลี้ยงไรแดง เพื่อช่วยให้มีการ

เจริญเติบโตดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ปรับคุณสมบัติทางกายภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ทางด้านการแพทย์ใช้สกัดคลอเรลลิน (Chlorellin) นำมาเป็นยาปฏิชีวนะใช้รักษาโรคที่เกิดจากแบคทีเรียบางชนิด ทางด้านนิเวศวิทยาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยออกซิเจน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง และช่วยส่งเสริมให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำได้ดีขึ้น (วิสัย วงศ์สายปิ่น, 2536) นอกจากนี้ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทน (ไบโอดีเซล) เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการสะสมกรดไขมันในเซลล์สูง และจากลักษณะของสาหร่ายมีขนาดเล็กเลี้ยงง่าย มีอัตราการเจริญเติบโตเร็วและให้ผลผลิตที่สูงเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น (Chisti, 2007)

2.3 ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกันระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรีย

ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน (Symbiotic relationship) ระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรีย เกิดขึ้นจากการที่สาหร่ายสังเคราะห์สารอินทรีย์ได้จากคาร์บอนไดออกไซด์ ธาตุอาหาร และน้ำโดยใช้พลังงานที่ได้รับจากการสังเคราะห์แสง ในกระบวนการนี้น้ำจะถูกออกซิไดซ์ ทำให้ได้อิเล็กตรอน โปรตอนและโมเลกุลออกซิเจน ส่วนแบคทีเรียเฮเทโรโทรฟจะทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเพื่อให้ได้พลังงานและสังเคราะห์เซลล์ใหม่ได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารอนินทรีย์ ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุอาหารที่ได้จากแบคทีเรียจะถูกสาหร่ายนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (Polprasert, Kongsricharoern และ Kanjanaprapin, 1994) แสดงดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกันระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรีย

2.4 ปริมาณสารสัมพันธ์ของกระบวนการทางชีวภาพ

2.4.1 สมการปริมาณสัมพันธ์ของแบคทีเรีย

การสร้างสมการแสดงปริมาณสารสัมพันธ์ของกระบวนการทางชีวภาพนั้นมีที่มาจากปฏิกิริยาเคมีรวมของกระบวนการต่างๆ เข้าด้วยกันตามสัดส่วนของการใช้อิเล็กตรอนในการสร้างพลังงานและสังเคราะห์เซลล์ ดังนี้

$$R = R_d + f_e R_a + f_s R_c$$

โดย R_d คือ สมการของการให้อิเล็กตรอน

R_a คือ สมการของการรับอิเล็กตรอน

R_c คือ สมการของเซลล์จุลินทรีย์

f_e คือ สัดส่วนการใช้อิเล็กตรอนในการสร้างพลังงาน

f_s คือ สัดส่วนการใช้อิเล็กตรอนในการสร้างเซลล์

ค่า Yield ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน $Yield = 0.5 \text{ gVSS/gCOD}$

(Metcalf และ Eddy, 2014)

$$\text{จากสมการ} \quad f_s = 1.42 \text{ (Yield)}$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad f_s = 1.42 (0.5)$$

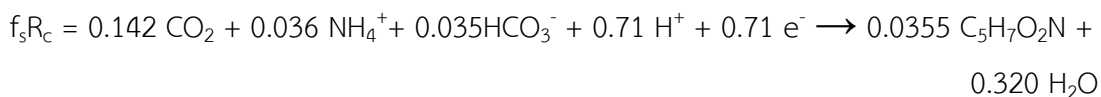
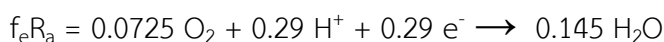
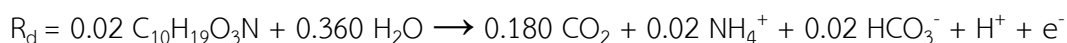
$$= 0.71$$

$$\text{แทนค่าในสมการ} \quad f_e + f_s = 1.00$$

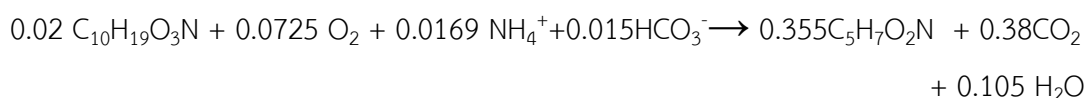
$$\text{จะได้ว่า} \quad f_e = 1.00 - 0.71$$

$$= 0.29$$

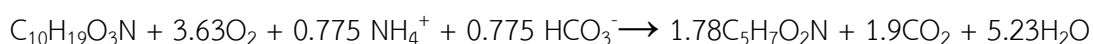
สมการสมดุลมวลรวมแสดงได้ดังนี้



ดังนั้นสมการสมดุลมวลรวม (R) จะได้เป็น



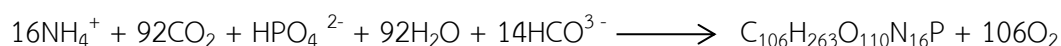
สมการปริมาณสัมพันธ์ของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน คือ



2.4.2 สมการปริมาณสัมพันธ์ของสาหร่าย

2.4.2.1 ปริมาณสัมพันธ์การเจริญเติบโตของสาหร่ายแบบโฟโตออโตโทรฟ

สมการปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometry) ในการสร้างชีวมวลของสาหร่ายด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงสามารถสร้างเป็นสูตรอย่างง่าย (Empirical formula) ได้เป็น $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ (Stumm, Morgan และ Drever, 1996)



2.4.2.1 ปริมาณสัมพันธ์การเจริญเติบโตของสาหร่ายแบบเฮเทอโรโทรฟ

สามารถสร้างสมการปริมาณสัมพันธ์ของกระบวนการทางชีวภาพของสาหร่ายได้จากการรวมครึ่งสมการของกระบวนการต่างๆ เข้าด้วยกันตามสัดส่วนของการใช้อิเล็กตรอนในการสร้างพลังงานและสังเคราะห์เซลล์ เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4.1 นั่นคือ

$$R = R_d + f_e R_a + f_s R_c$$

โดยในการสร้างชีวมวลของสาหร่ายแบบเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) สามารถเขียนเป็นสูตรอย่างง่ายได้เป็น $C_{3.96}H_{7.9}O_{1.875}N_{0.685}P_{0.0539}K_{0.036}Mg_{0.012}$ หรือ $C_4H_8O_2N$ โดยใช้ค่า Yield จากการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน Yield = 0.58 gVSS/gCOD (Sansawa และ Endo, 2004)

$$\text{จากสมการ } f_s = 1.42 \text{ (Yield)}$$

$$\text{จะได้ว่า } f_s = 1.42 (0.58)$$

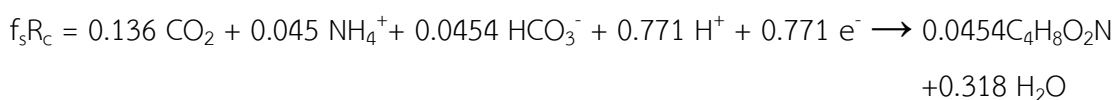
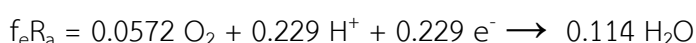
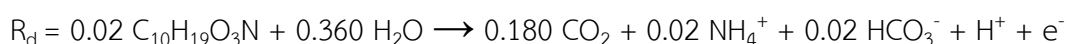
$$= 0.77$$

$$\text{แทนค่าในสมการ } f_e + f_s = 1.00$$

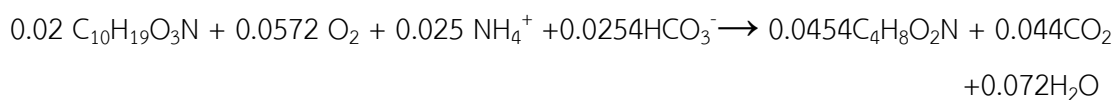
$$\text{จะได้ว่า } f_e = 1.00 - 0.77$$

$$= 0.23$$

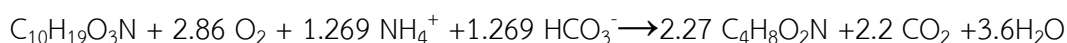
สมการสมดุลมวลรวมแสดงดังนี้



ดังนั้นสมการสมดุลรวม (R) จะได้เป็น



สมการปริมาณสัมพันธ์ของสารหาย คือ



2.5 รูปแบบของจลนพลศาสตร์

รูปแบบจลนพลศาสตร์ของอัตราการบำบัดสารใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ ดังต่อไปนี้

2.5.1 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics)

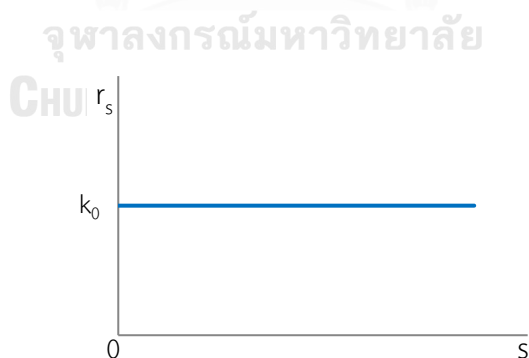
อัตราการบำบัดจำเพาะคงที่ไม่แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่เป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2-6

$$r_s = k_0 S^0 = k_0$$

โดยที่ r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (หน่วย mg/L·min)

k_0 = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (หน่วย mg/L·min)

S = ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (หน่วย mg/L)



รูปที่ 2-6 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics)

2.5.2 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)

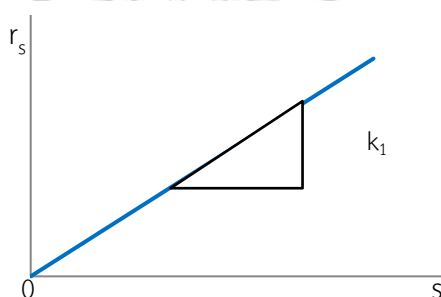
จัดเป็นอัตราการบำบัดจำเพาะแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2-7

$$r_s = k_1 S^1$$

โดยที่ r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (หน่วย mg/L·min)

k_1 = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (หน่วย min⁻¹)

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น (หน่วย mg/L)



รูปที่ 2-7 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)

2.5.3 จลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second order kinetics)

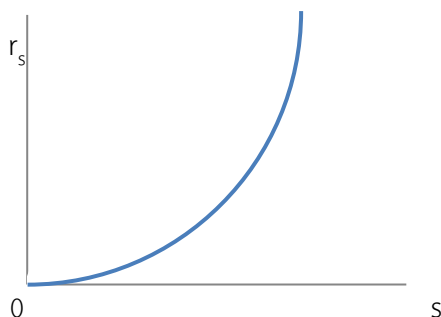
อัตราการบำบัดจำเพาะแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะส่งผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะได้กราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งเทียบกับสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2-8

$$r_s = k_2 S^2$$

โดยที่ r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (หน่วย mg/L·min)

k_2 = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสอง (หน่วย L/mg·min)

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น (หน่วย mg/L)



รูปที่ 2-8 จลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second order kinetics)

2.5.4 จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod Kinetics)

เป็นสมการที่นิยมใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทางชีวภาพทั่วไป โดยจะมีลักษณะคล้ายจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งที่มีความเข้มข้นต่ำ และคล้ายจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2-9

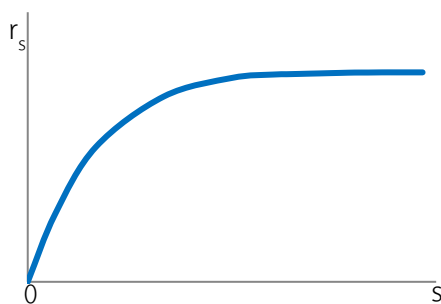
$$r_s = k_m \frac{S}{K_s + S}$$

โดยที่ r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (หน่วย mg/L·min)

k_m = อัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด หน่วย (mg substrate/mg VSS·min)

K_s = ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่อัตราการบำบัดจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด หน่วย (mg substrate/L)

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น (หน่วย mg/L)



รูปที่ 2-9 จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod kinetics)

2.6 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยทั่วไปมีค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการเติมอากาศ โดยสูญเสียพลังงานในการบำบัดน้ำเสียถึงร้อยละ 45 – 75 (Åmand, Olsson และ Carlsson, 2013) ดังนั้นถ้ามีระบบบำบัดที่สามารถสร้างออกซิเจนเองได้จะลดค่าใช้จ่ายอย่างมากดังนั้นแนวทางการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรียจึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่บริเวณที่มีแสงแดดจัด เนื่องจากสาหร่ายมีความสามารถในการสังเคราะห์แสงได้ดี (Yaiche และคณะ, 2014) กระบวนการบำบัดร่วมดังกล่าวพบว่าสาหร่ายมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ขณะที่แบคทีเรียมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย (He และคณะ, 2013) งานวิจัยนี้เลือกใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้น (Canovas และคณะ, 1996) มีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัดน้ำเสียและสามารถใช้ผลิตไบโอดีเซลได้ สาหร่ายชนิดนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 80 ในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ไนเตรต และฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสีย (Lau, Tam และ Wong, 1995; Wang และคณะ, 2010) นอกจากนี้การปรับตัวได้ดีของ *Chlorella sp.* ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงได้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียจากการเกษตร น้ำเสียจากห้องน้ำ เป็นต้น (Borowitzka, 1999)

2.6.1 การบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

Su, Mennerich และ Urban (2012) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรียพบว่าที่อัตราส่วนที่ 1:5 ของสาหร่ายต่อตะกอนจุลชีพมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 5 – 40 และมีระยะเวลาการกำจัดเร็วขึ้น 2-4 วัน โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรียอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ลดค่าใช้จ่ายในส่วนขั้นตอนการเติมอากาศ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่มีประโยชน์ การหมุนเวียนสารอาหารในชีวมวลสาหร่าย และลดการใช้สารเคมีในการตกตะกอน นอกจากนี้อาจช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก (GHG) ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ (Zhou และคณะ, 2014; Matamoros และคณะ, 2015)

Quijano, Arcila และ Buitrón (2017) ศึกษาการใช้สาหร่ายและแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยใช้กลุ่มสาหร่ายที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำ เช่น *Chlorella sp.* โดยการทดลองเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) ไม่มีการเติมอากาศ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี (COD) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) เกิดขึ้นได้ร้อยละ 91, 68 และ 38 ตามลำดับ โดยใช้เวลา 96 ชม. ทั้งนี้ในช่วง 48 ชม. แรกมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (COD) แอมโมเนียม (NH_4^+) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และไนเตรต (NO_3^-) ร้อยละ 88, 65, 42 และ 99 ตามลำดับ โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ของสาหร่ายและระบบสาหร่ายและแบคทีเรีย เท่ากับ 0.13 ต่อวัน และ 0.10 ต่อวัน

Schwede และคณะ (2016) ศึกษาระยะเวลาพักเก็บน้ำ (HRT) 6, 4 และ 2 วันของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพในถังปฏิกรณ์ปริมาตร 1.1 ลบ.ม. สูง 0.6 เมตร พบว่าที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (COD) ร้อยละ 75 – 90 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ร้อยละ 40 -50 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 6 และ 4 วัน มีค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) คงที่เท่ากับ 6.04 ± 0.47 มก./ล. และ 4.24 ± 0.62 มก./ล. แต่ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2 วันพบว่าลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากมวลของสาหร่ายได้หลุดออกไปที่ถังตกตะกอน

Ryu และคณะ (2014) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่าย *Chlorella vulgaris* กับน้ำเสียลักษณะต่างๆ โดยการทดลองใช้น้ำเสียที่ผ่านการกรองและฆ่าเชื้อ น้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้ออย่างเดียว และน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด จากผลการทดลองพบการเจริญเติบโตสูงสุดของสาหร่ายในน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัด เนื่องจากในน้ำเสียดังกล่าวมีแบคทีเรียอยู่ซึ่งอาจช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของสาหร่าย นอกจากนี้สาหร่ายที่เจริญเติบโตในน้ำเสียยังพบปริมาณกรดไขมันที่มีประโยชน์สูง โดยผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอาจเป็นไปได้ที่จะใช้น้ำเสียเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella vulgaris* สำหรับการบำบัดทางชีวภาพควบคู่ไปกับการผลิตไบโอดีเซล

Oswald และคณะ (1953) ได้ศึกษาการอยู่รวมกันของสาหร่ายและแบคทีเรียในบ่อสาหร่ายอัตราสูง (High Rate Algal Pond) เป็นระยะเวลา 20 วัน พบว่าในช่วงความเข้มแสงสูง จะ

ช่วยส่งผลให้ระยะเวลาที่เก็บน้ำลดลง และพบว่าระยะเวลาที่เก็บสูงสุดในปีสำหรับอายุอัตราสูง ไม่ควรนานกว่า 8 วัน เพราะสภาพน้ำภายในบ่อจะขาดอาหาร และทำให้ปริมาณสาหร่ายลดลง

Gawasiri (2003) พบว่าในช่วงความลึกบ่อ 1.5-2 เมตร จะมีลักษณะเป็นบ่อกึ่งหมัก กึ่งผึ่ง ซึ่งส่วนบนของบ่อจะอยู่ในสภาพแอโรบิก จากการเติมอากาศที่ผิวหน้าและจากปฏิกิริยาของสาหร่ายสำหรับส่วนล่างของบ่อจนถึงก้นบ่อซึ่งแสงแดดส่องไม่ถึง จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำ จนเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Condition) และมีจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นก๊าซเช่นเดียวกับบ่อแอนแอโรบิก แต่ก๊าซที่ลอยขึ้นมาจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อยู่ช่วงบนของบ่อทำให้ไม่เกิดกลิ่นเหม็น

2.6.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยบ่อสาหร่าย

De-Bashan และคณะ (2002) ได้ทำการทดลองนำสาหร่าย *Chlorella vulgaris* มาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับแบคทีเรีย *Azospirillum brasilense* จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียม ไนเตรต และฟอสฟอรัสได้ดีเท่ากับร้อยละ 100, 15 และ 36 ตามลำดับ และพบว่าสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *Azospirillum brasilense* ในกำจัดไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ

Venkataraman (1969) ได้ศึกษาการนำสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งมีไนโตรเจนในรูปของอินทรีย์ไนโตรเจนจำพวกโปรตีนยูเรีย และกรดอะมิโน ร้อยละ 40 - 59 อินทรีย์ไนโตรเจนจำพวกไนไตรท์และไนเตรตร้อยละ 0.5 แอมโมเนียร้อยละ 50 - 60 โดยน้ำเสียที่มีสารประกอบไนโตรเจนดังกล่าวเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดพบว่าไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจนจำพวกโปรตีนยูเรียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และไนเตรต อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในวัฏจักรไนโตรเจน ซึ่งสาหร่ายบางชนิดก็สามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของไนเตรตได้ด้วย

Converti และคณะ (2009) ศึกษาผลของความเข้มข้นของไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยวางแผนการทดลองที่อุณหภูมิที่สูงและต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตที่ 30° ซ โดยการทดลองกำหนดอุณหภูมิสูงที่ 38° ซ และอุณหภูมิต่ำที่ 25° ซ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สูงกว่าระดับที่เหมาะสมทำให้อัตราการ

เจริญเติบโตของสาหร่ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำอัตราเจริญเติบโตของสาหร่ายเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของไนโตรเจนที่น้อยลงไม่ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลงมากนัก

Palmer (1977) พบว่าสาหร่ายที่พบทั่วไปๆ ตามแหล่งน้ำที่มักเป็นสายพันธุ์ *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Chlamydomonas sp.*, *Euglena sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Anabaena sp.*, *Clostridium sp.*, *Schizothrix sp.* ตลอดจนพวกไดอะตอม นอกจากนี้ยังอาจพบสาหร่ายที่เป็นพวกเกาะติด (Attached algae) ได้แก่ *Chladophoro sp.*, *Ulothrix sp.*, *Tolypothrix sp.*, *Microspora sp.*, *Chaetophora sp.*, *Lyngbya sp.* เป็นต้น

2.6.3 ประโยชน์จากสาหร่าย *Chlorella* spp.

Spolaore และคณะ (2006) รายงานว่าคลอเรลลา *Chlorella* มีองค์ประกอบของลิพิดอยู่ในช่วงร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักแห้งซึ่งค่อนข้างสูง จึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซล นอกจากนี้ไบโอดีเซลที่ได้ยังพบว่ามีความเข้มข้นของซัลเฟอร์น้อยมาก เมื่อสกัดน้ำมันออกมาจากเซลล์สาหร่ายโดยใช้เฮกเซน น้ำมันที่ได้จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไบโอดีเซล โดยอาศัยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบกรด ซึ่งวิธีการนี้นับได้ว่ามีศักยภาพสูงสำหรับผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงเหลวจากสาหร่ายเซลล์เดียว

Tendenciadela Peña (2003) รายงานว่าการเลี้ยง *Chlorella* spp. ร่วมกับการเลี้ยงกุ้งสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียเรืองแสง (Luminous bacteria) ที่ทำให้เกิดโรคเรืองแสงในกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) และกุ้งแชบ๊วย (*Penaeus merguriensis*) ได้

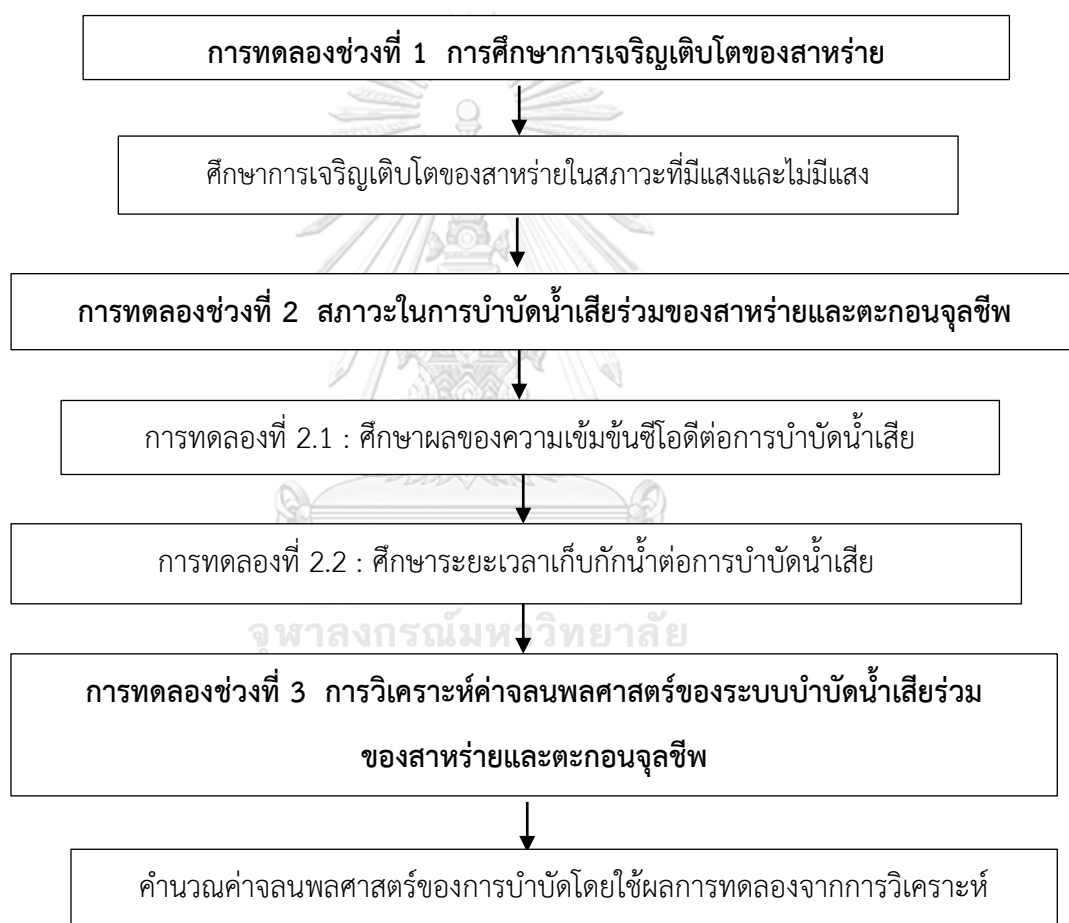
Benemann และคณะ (1980) รายงานว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากเซลล์สาหร่ายแห้ง (ซึ่งมีค่าพลังงานเฉลี่ย 6 กก.แคลอรี/ก.) จะคล้ายกับถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) เกรดปานกลาง จึงเหมาะสมเป็นแหล่งพลังงาน นอกจากนี้สาหร่ายสามารถใช้ร่วมกับสารอินทรีย์อื่น ๆ ในการหมักก๊าซชีวภาพได้

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 1 ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบ่งการทดลองเป็น 3 ช่วงดัง แผนภาพรูปที่ 3-1 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3-1 แผนผังสรุปการทดลองทั้งหมดของงานวิจัย

3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสีย

ศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของสาหร่ายในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง โดยเตรียม น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 1,000 มก.ซีไอดี/ล. และมีแอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยมีอัตราส่วน COD : N = 10 : 1 ปรับพีเอชเท่ากับ 7.5 ให้แสงสว่างจาก หลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน เตินระบบแบบทีละเท (Batch Process) เก็บตัวอย่างน้ำเป็นระยะเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของน้ำ เพื่อทำการวิเคราะห์ อย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา

3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสถานะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและ ตะกอนจุลชีพ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยดังนี้

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ทำการศึกษาช่วงความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม โดยแปรค่าความเข้มข้นของ น้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกัน 5 ระดับคือ 50, 100, 200, 500 และ 1,000 มก.ซีไอดี/ล. และมี แอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจน ปรับอัตราส่วน COD : N = 10 : 1 ปรับพีเอชเท่ากับ 7.5 เริ่มเดินระบบโดยเติมตะกอนจุลชีพและสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ที่อัตราส่วน 1:5 ให้แสงสว่าง จากหลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม. เตินระบบแบบทีละเท (Batch Process) วิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ เก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์เป็นระยะ เพื่อนำมา วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆทางคุณภาพน้ำ ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและอัตรา การบำบัดของน้ำเสียเริ่มต้นที่แต่ละความเข้มข้น

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่เก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ศึกษาระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย โดยแปรค่าระยะเวลาที่เก็บในระบบแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 1, 2, 4 และ 8 วัน เตินระบบการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow Process) ในถัง ปฏิกรณ์ขนาด 15.7 ลิตร สูง 2 เมตร เตินระบบโดยเติมจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และตะกอน จุลชีพและที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นในอัตราส่วน 1:5 จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ให้แสงสว่างจาก

หลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 400 มก.ซีไอดี/ล. สูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ตลอดเวลาด้วยอัตราการไหลตามระยะเวลาที่เก็บน้ำแต่ละค่า วิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ เก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ต่อเนื่องเทียบกับเวลา ทำการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและอัตราการบำบัดของแต่ละการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บน้ำแตกต่างกัน

3.1.3 การทดลองช่วงที่ 3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

นำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการบำบัดและอัตราการบำบัดจำเพาะของแต่ละการทดลอง คำนวณค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดโดยการนำผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เมื่อสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการบำบัดของแต่ละการทดลองแล้วติดตามรูปแบบอัตราการบำบัดโดยพิจารณาจากเส้นกราฟตามรูปแบบของจลนพลศาสตร์

3.2 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

- ถังปฏิกรณ์ สูง 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร ปริมาตร 15.7 ลิตร
- เครื่องสูบน้ำ ขนาด 11.1 วัตต์
- ถังน้ำพลาสติกสำหรับเตรียมน้ำเสียเข้าและบรรจุน้ำเสียออก
- สปอร์ตไลท์ LED แสงสีขาวที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีในการวิเคราะห์ผล

3.2.2.1 พีเอช (pH)

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

3.2.2.2 ออกซิเจนละลาย (DO)

- เครื่องวัดออกซิเจนละลาย (DO meter)

3.2.2.3 ซีไอดี (COD)

- หลอดย่อย (Digestion vessels)

- เตาอบ (Oven)
- บิวเรต (Burette)
- สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) 0.1 นอร์มัล
- กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. Sulfuric Acid with Silver Sulfate)
- สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Standard FAS) 0.05 นอร์มัล
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์
- สารละลายกลูโคส

3.2.2.4 แอมโมเนียม (NH_4^+)

- เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer)
- หลอดเนสเลอร์ ขนาด 100 มล.
- สารละลายอัลคาไลน์ซีเตรท
- สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์
- กรดซาลิไซลิก

3.2.2.5 ไนไตรท์ (NO_2^-)

- เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer)
- หลอดเนสเลอร์ ขนาด 100 มล.
- กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- ซัลฟานิลาไมด์ ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$)
- เอ็น (1-แนฟธิล) เอทิลลินไดอะมีน ไดไฮโดรคลอไรด์ (NED)
- โซเดียมไนไตรท์ (NaNO_2)
- คลอโรฟอร์ม (CHCl_3)

3.2.2.6 ไนเตรต (NO_3^-)

- เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer)
- หลอดเนสเลอร์ ขนาด 100 มล.
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

- โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)

- คลอโรฟอร์ม (CHCl_3)

3.2.2.7 ของแข็งแขวนลอย (SS)

- เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

- โถทำแห้ง พร้อมสารดูดความชื้น

- ตู้อบ

- กระดาษกรองที่มีรูพรุน 0.45 ไมครอน

- ชุดกรองบุคเนอร์

- เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump)

3.2.2.8 คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophylls a)

- กระดาษกรอง GF/C

- คีมคีบ (Forceps)

- หลอดเซนติฟิวจ์พลาสติก (Centrifuge tube)

- 90% acetone

- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

- เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

- เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer)

3.2.3 จุลินทรีย์ในระบบ

3.2.3.1 ตะกอนจุลชีพ

หัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่ใช้ในงานวิจัยเก็บจากถังเดิมอากาศโรงบำบัดน้ำชุมชนเสี่ยช่องนนทรี

3.2.3.2 สาหร่าย

สาหร่ายที่ใช้ในการวิจัยเป็นสาหร่ายชนิด *Chlorella vulgaris* จากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ โดยทำการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร N8 ซึ่งมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 3-1 (Kim และคณะ, 2007)

ตารางที่ 3-1 สูตรอาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาสูตร N8

สารเคมี	มก./ล.
Na ₂ HPO ₄ ·2H ₂ O	260
K ₂ HPO ₄	740
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10
Fe EDTA	10
MgSO ₄ ·7H ₂ O	50
KNO ₃	1,000
Trace element*	0.001
Trace element*	มก./ล.
Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	3.58
MnCl ₂ ·4H ₂ O	12.98
CuSO ₄ ·5H ₂ O	1.83
ZuSO ₄ ·7H ₂ O	3.20

3.2.4 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งสารอินทรีย์ แอมโมเนียคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจนและมืองค์ประกอบของธาตุอาหาร ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Feng, Li และ Zhang, 2011) ปรับพีเอชเป็น 7.5 ซึ่งมีส่วนประกอบดังได้แสดงในตารางที่ 3-2

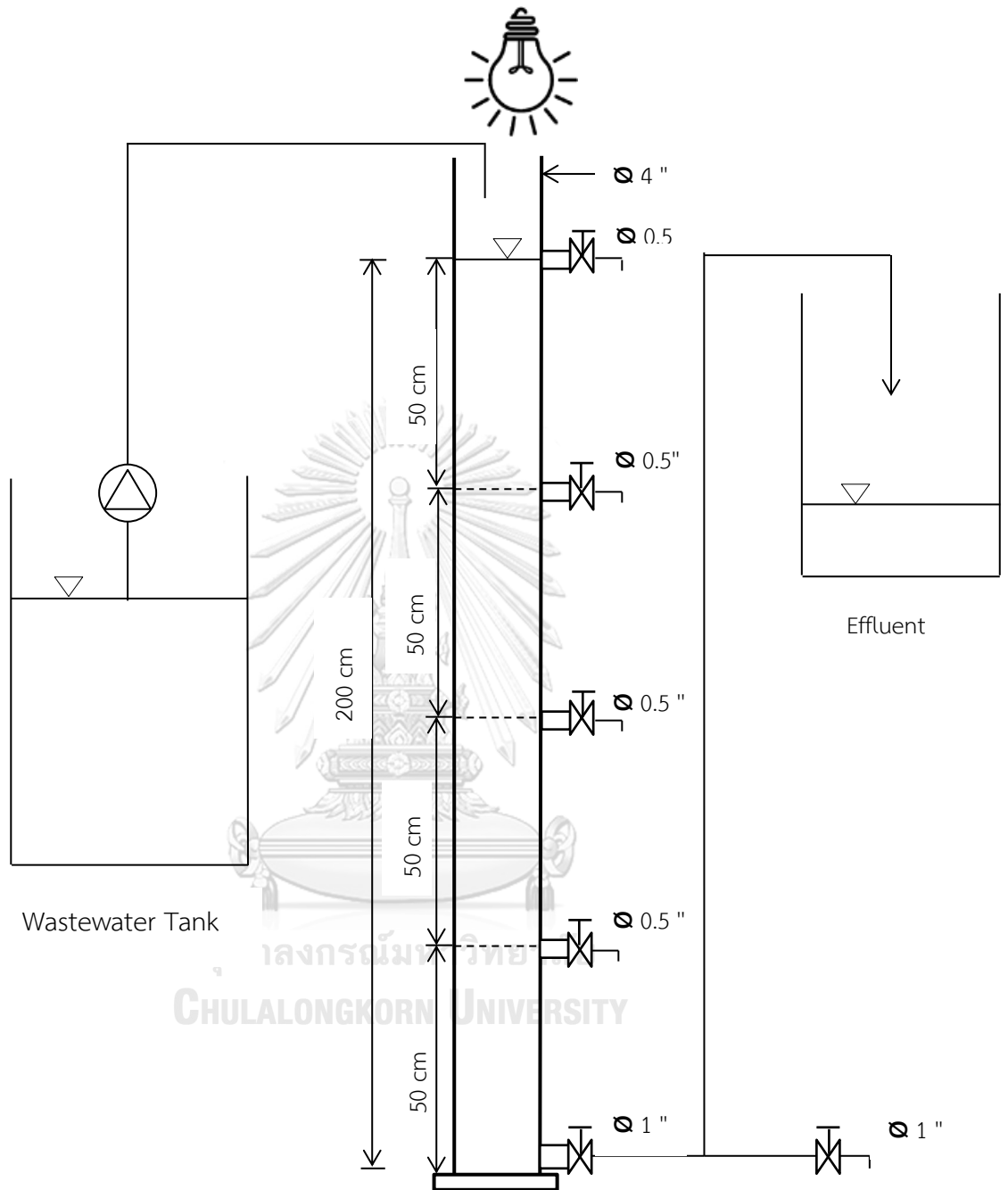
ตารางที่ 3-2 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้นซีไอที (มก./ล.)				
	50	100	200	500	1000
C ₆ H ₁₂ O ₆ (มก./ล.)	51.56	103.13	206.25	515.63	1031.25
NH ₄ Cl (มก./ล.)	19.50	39.00	78.00	195.00	390.00
K ₂ HPO ₄ (มก./ล.)	2.25	4.50	9.00	22.50	45.00
MgSO ₄ ·7H ₂ O (มก./ล.)	1.63	3.25	6.50	16.25	32.50
CaCl ₂ ·2H ₂ O (มก./ล.)	5.38	10.75	21.50	53.75	107.50
FeSO ₄ ·7H ₂ O (มก./ล.)	0.63	1.25	2.50	6.25	12.50

3.2.5 ถังปฏิกรณ์และการเดินระบบ

ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใสที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ความสูง 2 เมตร สูบน้ำเสียเข้าทางด้านบนด้วยอัตราการไหลที่แปรเปลี่ยนตามความเร็วในแต่ละการทดลอง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3-2

โดยระบบประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนตัวถังปฏิกรณ์ ส่วนถ้าน้ำเสียขาเข้า และส่วนถ้าน้ำออกที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งจะเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยการสูบน้ำเสียจากถังพักน้ำเสียผ่านเครื่องสูบน้ำชนิดไดอะแฟรม เข้าระบบถังปฏิกรณ์บริเวณด้านบนของถัง และน้ำเสียออกที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลล้นเข้าสู่ถ้าน้ำเสียออกโดยใช้สายยางที่มีความสูงเท่ากับระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ เพื่อป้องกันตะกอนจุลชีพหลุดไปกับน้ำทิ้ง ในระหว่างเดินระบบจะให้แสงสว่างด้านบนของถังปฏิกรณ์โดยสปอร์ตไลท์ LED แสงสีขาวที่มีความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ ซึ่งถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใสที่มีความสูง 2 เมตร จะถูกคลุมด้วยถุงดำบริเวณรอบตัวถังปฏิกรณ์



รูปที่ 3-2 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3 วิธีวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่าย

3.3.1 การหาน้ำหนักแห้ง (Zhu และ Lee, 1997)

1. ทำการอบกระดาศกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ที่อุณหภูมิ 105 °ซ นาน 1 ชม. ในตู้อบแห้งด้วยอากาศร้อนบรรจุกระดาศกรองที่ผ่านการอบแห้งลงในโถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักคงที่ของกระดาศกรอง
2. นำกระดาศกรอง GF/C ไปกรองตัวอย่างสาหร่ายที่เตรียมไว้
3. อบกระดาศกรองที่มีตัวอย่างสาหร่ายในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °ซ เป็นเวลา 4 ชม.
4. เมื่อครบกำหนดเวลานำกระดาศกรองออกจากตู้อบแล้วบรรจุลงในโถดูดความชื้น
5. ชั่งน้ำหนักกระดาศกรองที่มีตัวอย่างสาหร่าย
6. การคำนวณ

$$\text{Dry weight (มก./ล.)} = \frac{(B-A) \times 1,000 \times 1,000}{V}$$

A = น้ำหนักของกระดาศกรอง

B = น้ำหนักของกระดาศกรองและสาหร่าย

V = ปริมาตรของสาหร่ายที่กรอง (มล.)

3.3.2 การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ (Jeffrey และ Humphrey, 1975)

1. กรองตัวอย่างสาหร่าย 10 ml โดยอาศัยชุดเครื่องกรอง ผ่านกระดาศกรอง GF/C
2. ใช้คีมคีบพับกระดาศกรองที่มีสาหร่ายอยู่ ใส่ลงในหลอด centrifuge ขนาด 15 ml เติม 90% methanol 10 ml
3. นำไปแช่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 20 นาที
4. หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงในเครื่อง เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ที่ 3,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที

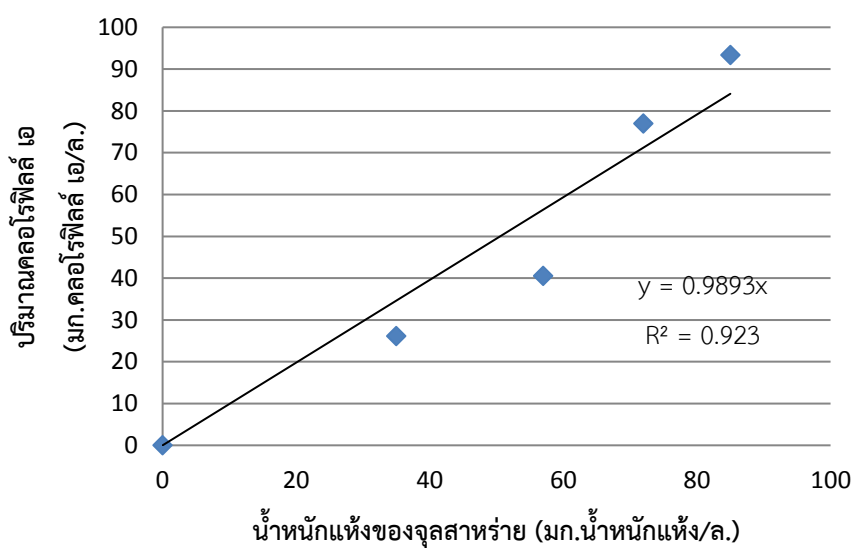
5. นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยอาศัยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 630, 645, 665

และ 750 nm

6. การคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (mg/l)

$$\text{คลอโรฟิลล์ เอ (mg/l)} = \frac{[11.6(A_{665}-A_{750})-1.31(A_{645}-A_{750})-0.14(A_{630}-A_{750})] \times \text{ปริมาณ methanol (ml)}}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่างที่กรอง (L)} \times \frac{1}{\text{ความกว้างของ Cuvette}}}$$

การวิเคราะห์ปริมาณจุลสาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่าย โดยวิเคราะห์จากปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้งของจุลสาหร่ายแสดงดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 กราฟมาตรฐานของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

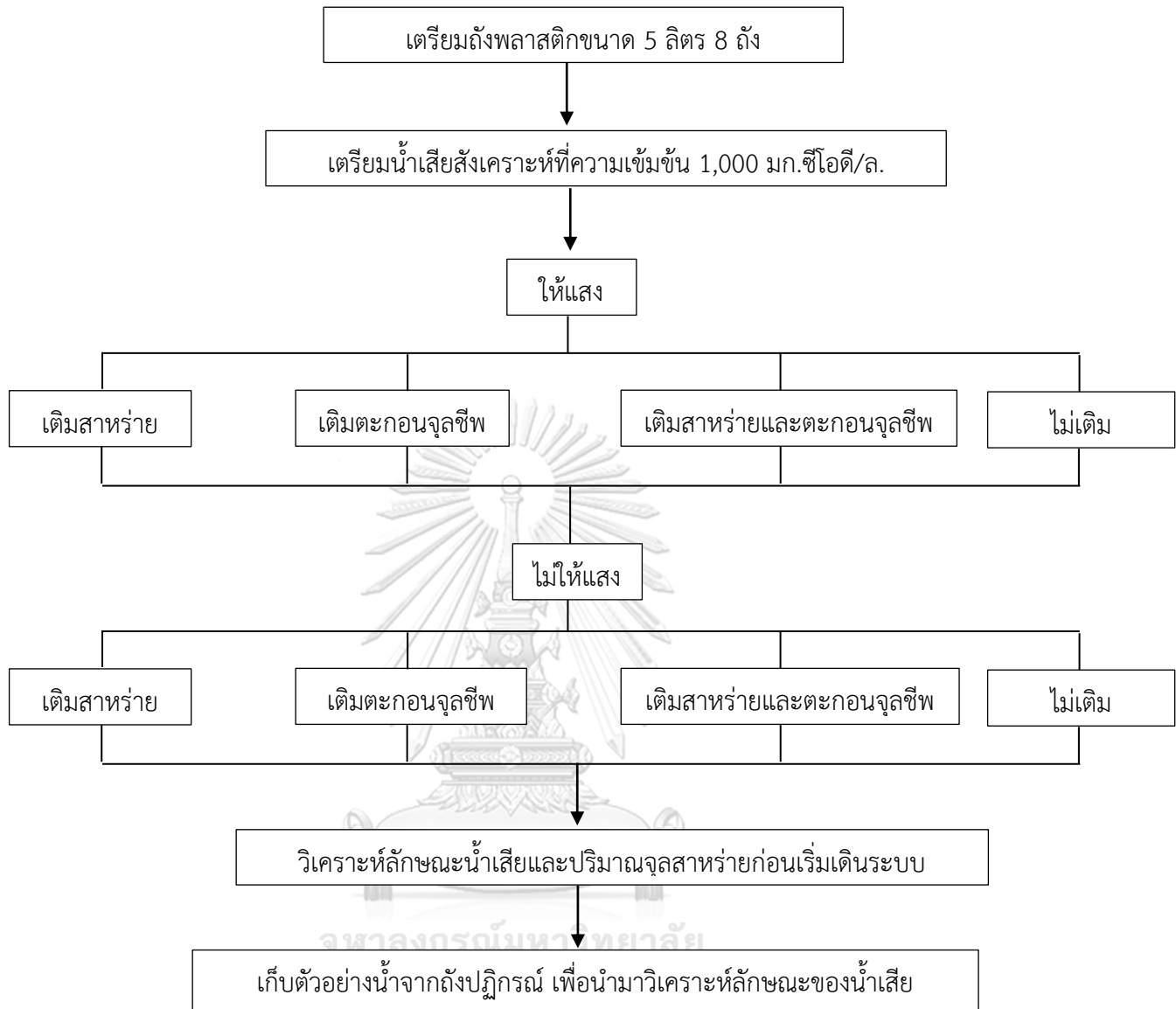
แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือ

3.4.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

ตัวแปรต้น	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
สภาวะแสง	ให้แสง (20,000 ลักซ์ 12 ชม./วัน) และไม่มีแสง
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	1,000 มก.ซีโอดี/ล.และ100 มก.ไนโตรเจน/ล.
ปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้น	จุลสาหร่าย : ตะกอนจุลชีพ = 5:1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังการทดลอง	ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี แอมโมเนียม และคลอโรฟิลล์ เอ

1. เตรียมถังปฏิกรณ์พลาสติกปริมาตร 5 ลิตร เพื่อใช้เป็นถังปฏิกรณ์ในการทดลองขั้นต้น เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองที่ความเข้มข้น 1,000 มก.ซีโอดี/ล. ปรับอัตราส่วน COD : N = 10 : 1 ปรับพีเอชให้เป็น 7.5
3. ให้แสงจากหลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ 12 ชม./วัน
4. เดินระบบแบบทีละเท (Batch process) วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย ปริมาณตะกอนจุลชีพและสาหร่ายก่อนเริ่มเดินระบบ
5. ในระหว่างเดินระบบเก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3-4 แผนผังการดำเนินงานวิจัยการทดลองที่ 1

3.4.2 การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยดังนี้

การทดลองที่ 2.1 : ศึกษาผลของความเข้มข้นซีโอดีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

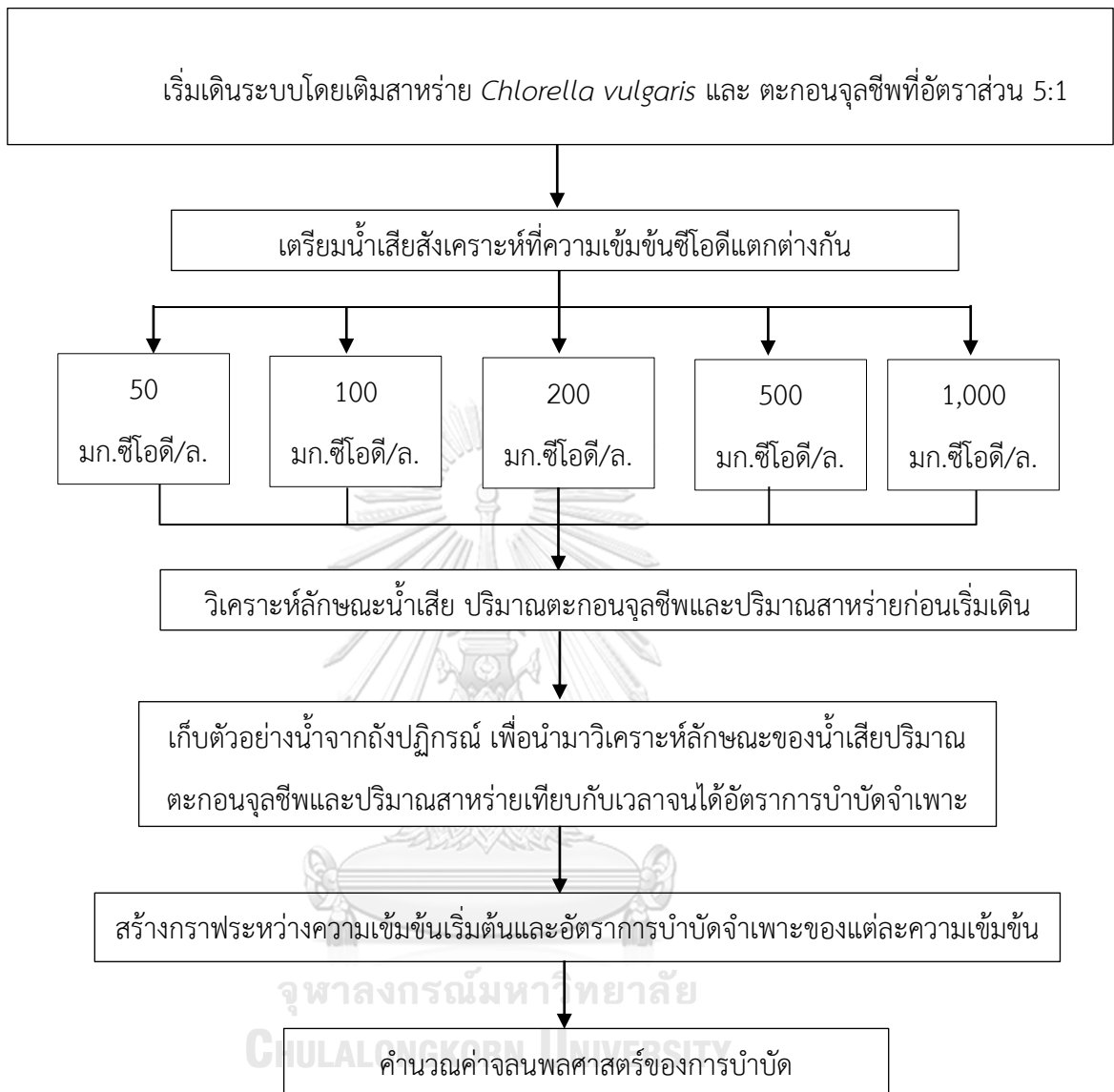
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.1

ตัวแปรต้น	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	50, 100, 200, 500 และ 1,000 มก.ซีโอดี/ล. และ 5, 10, 20, 50 และ 100 มก.ไนโตรเจน/ล.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณแสง	20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน
ความเข้มข้นตะกอนจุลชีพและสาหร่ายเริ่มต้น	จุลสาหร่าย : ตะกอนจุลชีพ = 5:1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังการทดลอง	ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนียม ไนไตรท์ และคลอโรฟิลล์ เอ

- เตรียมถังปฏิกรณ์พลาสติกปริมาตร 5 ลิตร เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียที่เหมาะสม
- เริ่มเดินระบบโดยเติมตะกอนจุลชีพและสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ที่อัตราส่วน 1:5
- เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองที่ความเข้มข้น 50 มก.ซีโอดี/วันและมีแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจนโดยปรับอัตราส่วน COD : N = 10 : 1 ปรับพีเอชให้เป็น 7.5
- ให้แสงจากหลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน
- เดินระบบแบบทีละเท (Batch process) วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียและปริมาณตะกอนจุลชีพและสาหร่ายก่อนเริ่มเดินระบบ
- ในระหว่างเดินระบบเก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบใหม่เป็น 100, 200, 500 และ 1,000 มก.ซีโอดี/ล.

ตารางที่ 3-5 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	หน่วย
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	-
ออกซิเจนละลาย	เครื่องวัดออกซิเจนละลาย	-
ซีโอดี	วิธีฟลักซ์แบบปิด	มก.ซีโอดี/ล.
แอมโมเนียม	เครื่องยูวี สเปกโตรมิเตอร์	มก.ไนโตรเจน/ล.
ไนไตรท์	เครื่องยูวี สเปกโตรมิเตอร์	มก.ไนโตรเจน/ล.
ไนเตรต	เครื่องยูวี สเปกโตรมิเตอร์	มก.ไนโตรเจน/ล.
ของแข็งแขวนลอย	วิธีทำให้แห้งที่ 105 °ซ	มก./ล.
คลอโรฟิลล์ เอ	วิธีทำสกัดโดยอะซิโตนและเครื่องยูวี สเปกโตรมิเตอร์	มก./ล.



รูปที่ 3-5 แผนผังการดำเนินงานวิจัยการทดลองที่ 2.1

การทดลองที่ 2.2 : ศึกษาระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่าง
สาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.2

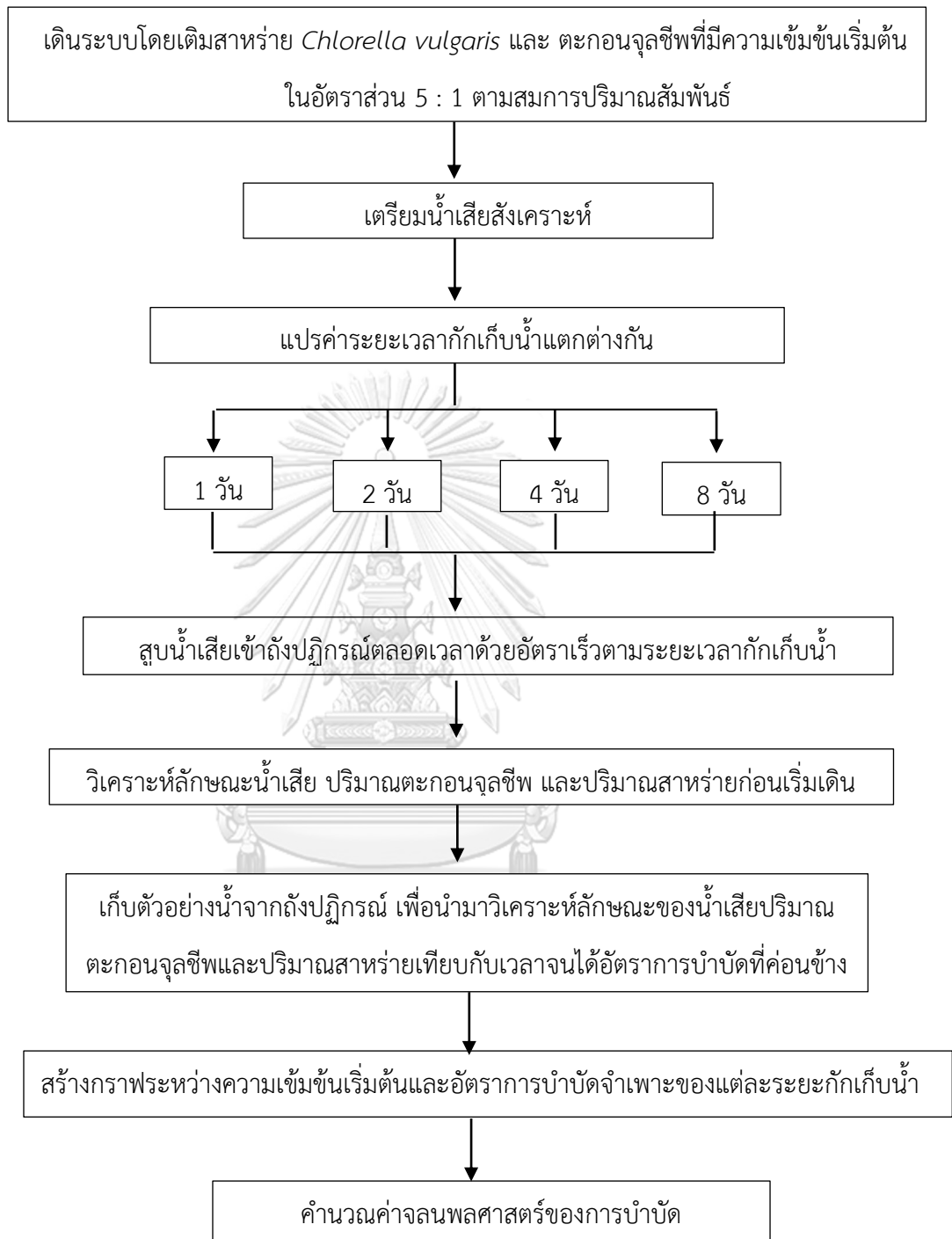
ตัวแปรต้น	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ระยะเวลาเก็บกักน้ำ	1, 2, 4 และ 8 วัน
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณแสง	20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน
ความเข้มข้นตะกอนจุลชีพและสาหร่าย	จุลสาหร่าย : ตะกอนจุลชีพ = 5:1
ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	400 มก.ซีโอดี/ล.และ 40 มก.ไนโตรเจน/ล.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังการทดลอง	พีเอช ออกซิเจนละลาย ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนียม ไนไตรท์ ไนเตรต และคลอโรฟิลล์ เอ

- เตรียมถังปฏิกรณ์ทรงกระบอก สูง 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร ปริมาตร 15.7 ลิตร
- เดินระบบโดยเติมสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และตะกอนจุลชีพที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นในอัตราส่วน 5:1 ตามสมการปริมาณสัมพันธ์
- สูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ตลอดเวลาด้วยอัตราการไหล 15.7 ล./วัน ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน (คำนวณจากสูตร $Q = \frac{V}{t}$) แสดงดังตารางที่ 3-7
- ให้แสงจากหลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน
- วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย ปริมาณตะกอนจุลชีพและสาหร่ายก่อนเริ่มเดินระบบ
- ในระหว่างเดินระบบเก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ พีเอช (pH) ออกซิเจนละลาย (DO) ของแข็งแขวนลอย (SS) ซีโอดี (COD) แอมโมเนียม (NH_4^+) ไนไตรท์ (NO_2^-) ไนเตรต (NO_3^-) และคลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) แสดงดังตารางที่ 3-5 ตามเทคนิคการวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยวิธีมาตรฐาน

7. เปลี่ยนอัตราการไหลหมุนเวียนน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ตามระยะเวลาที่เก็บน้ำที่กำหนดที่เหลือ ได้แก่ 2, 4 และ 8 วัน แสดงดังตารางที่ 3-7 โดยคำนวณจากสูตร $Q = \frac{V}{t}$

ตารางที่ 3-7 อัตราการสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ตามระยะเวลาที่เก็บน้ำที่กำหนด

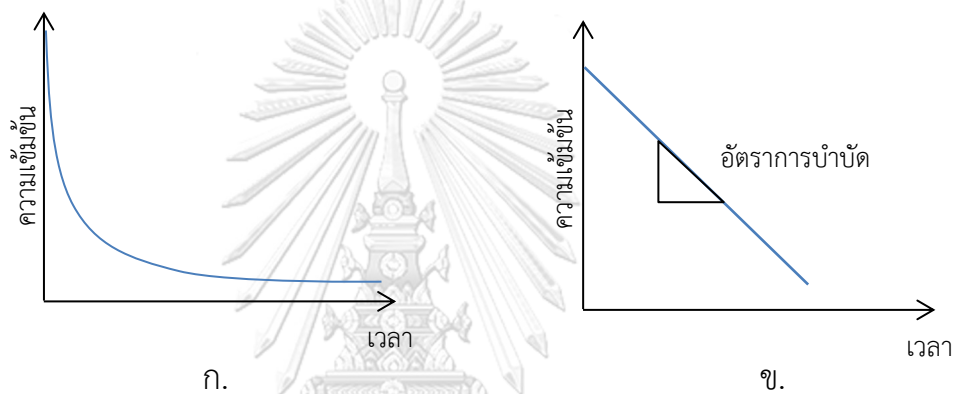
ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (วัน)	อัตราการไหล (ล./วัน)
1	15.7
2	7.85
4	3.93
8	1.97



รูปที่ 3-6 แผนผังการดำเนินงานวิจัยการทดลองที่ 2.2

3.4.3 การทดลองครั้งที่ 3 : การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ทำการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายกับตะกอนจุลชีพ โดยการนำผลการทดลองที่ได้คือการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของซีโอดี ในการทดลองแบบที่ละเท จากกราฟระหว่างความเข้มข้นกับเวลาแสดงดังรูปที่ 3-6 ก. และหาอัตราการบำบัดจำเพาะโดยหารด้วยความเข้มข้นของจุลินทรีย์หรือสาหร่ายและนำค่าอัตราการบำบัดจำเพาะที่ความเข้มข้นต่างๆ มาพล็อตรวมกันเพื่อหารูปแบบของปฏิกิริยา

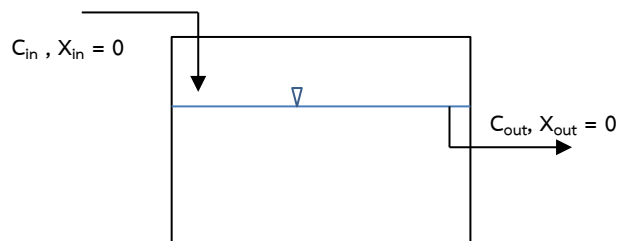


รูปที่ 3-7 การหาอัตราการบำบัดในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบ

ก). กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและเวลา ข). กราฟช่วงเริ่มต้นที่การลดลงเป็นเส้นตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง อัตราการบำบัดจำเพาะจะคำนวณจากความเข้มข้นน้ำเสียที่ขาเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาดังรูปที่ 3-7



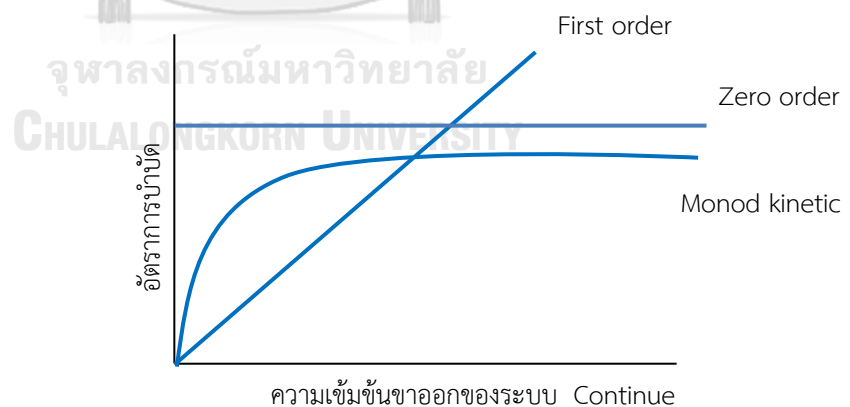
$$\text{อัตราการบำบัดจำเพาะ} = \frac{C_{in} - C_{out}}{\tau \cdot X}$$

โดย C_{in} = ความเข้มข้นของน้ำขาเข้า
 C_{out} = ความเข้มข้นของน้ำขาออก
 τ = ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (วัน)
 X = MLSS

$$\text{อัตราการบำบัดจำเพาะ (mg substrate/mg MLSS.day)} = \frac{\text{อัตราการบำบัดช่วงต้น}}{\text{MLSS}}$$

โดย MLSS = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์

เมื่อสร้างกราฟระหว่างอัตราการบำบัดจำเพาะของแต่ละระยะเวลากักเก็บน้ำแล้วคาดว่ากราฟที่ได้จะเป็นตามรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดและความเข้มข้นของจุลินทรีย์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

การทดลองช่วงที่ 1 ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง เริ่มต้นเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ทั้งหมด 8 ชุดการทดลอง ปริมาตรถังละ 5 ลิตร ซึ่ง 4 ชุดการทดลองแรกทำการจำลองสภาวะการทดลองที่มีแสง โดยให้แสงสว่างจากหลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม./วัน ถังที่ 1 เติมตะกอนจุลชีพ ถังที่ 2 เติมจุลสาหร่าย ถังที่ 3 เติมจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพ ถังที่ 4 ไม่เติมทั้งจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ ส่วนอีก 4 ชุดการทดลองหลังทำการทดลองในสภาวะที่ไม่มีแสง โดยเติมจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพเช่นเดียวกับ 4 ชุดการทดลองแรก ในการเริ่มเดินระบบ (startup) จะเติมจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และตะกอนจุลชีพ 100 มก./น้ำหนักแห้ง/ล. และ 20 มก./น้ำหนักแห้ง/ล. หรือเทียบเท่าอัตราส่วน 5:1 ส่วนในชุดการทดลองควบคุมที่มีแต่ตะกอนจุลชีพจะเติมตะกอนจุลชีพปริมาณ 20 มก./น้ำหนักแห้ง/ล. ขณะที่ชุดการทดลองควบคุมที่มีแต่จุลสาหร่ายจะเติมจุลสาหร่าย 100 มก./น้ำหนักแห้ง/ล. เดินระบบการทดลองแบบทีละเท (Batch Process) ซึ่งในการทดลองนี้เดินระบบทั้งหมด 12 วัน โดยหยุดการทดลองเมื่อความเข้มข้นซีโอดีที่เติมลงไปลดลงจนหมดและคงที่

4.1.1 ค่าซีโอดี

การทดลองนี้เดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 1,000 มก.ซีโอดี/ล. ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 12 วัน จากการทดลองพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีมีแนวโน้มลดลงตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order) สามารถหาค่าซีโอดีที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bCOD) ค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (nbCOD) และค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งที่ชุดการทดลองต่างๆ ได้โดยการปรับแก้ข้อมูลด้วยฟังก์ชันการแก้สมการหาตัวแปรของโปรแกรม Microsoft Excel จากสมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง

$$\text{TCOD} = \text{bCOD}e^{-k_1 t} + \text{nbCOD}$$

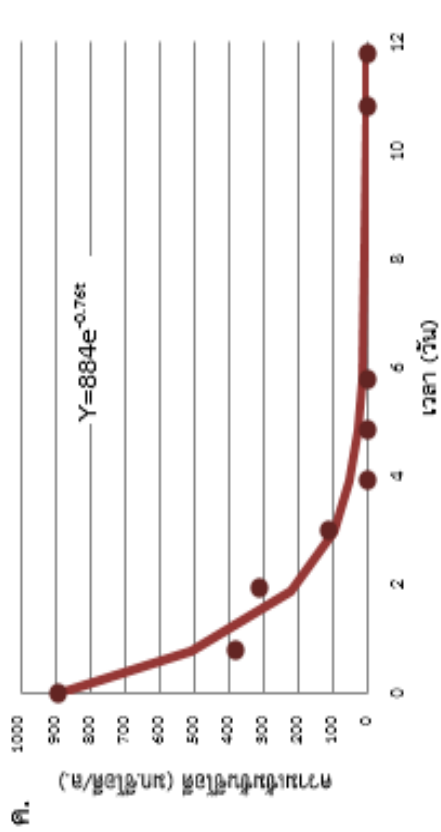
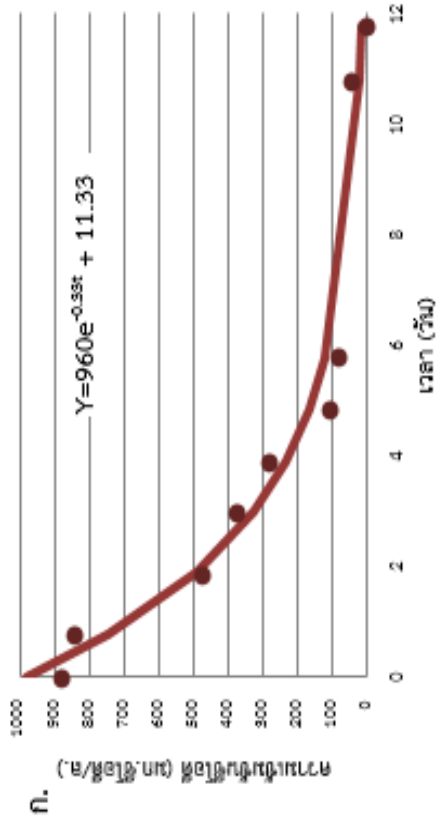
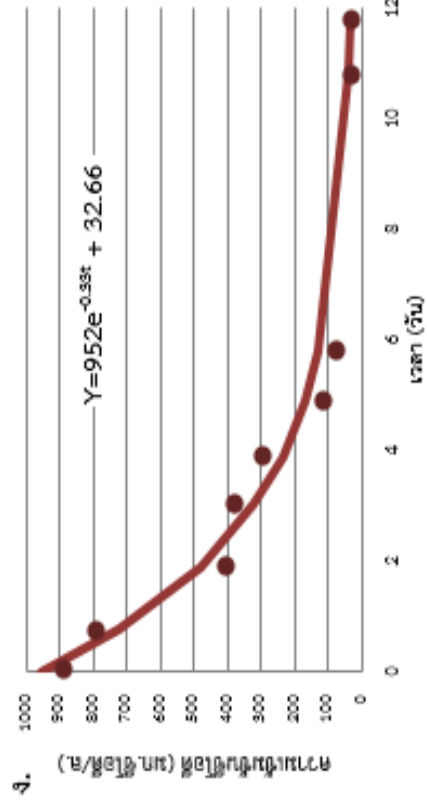
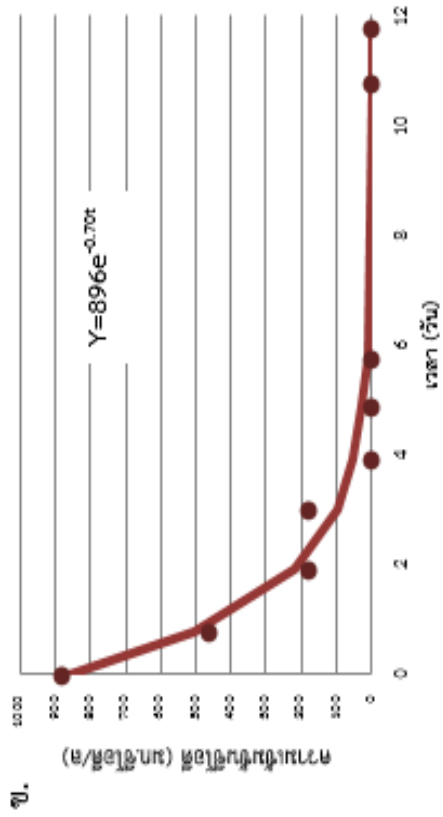
โดยที่ COD	คือ ค่าซีโอดีที่เวลาใดๆ (มก./ล.)
bCOD	คือ ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายได้ (มก./ล.)
nbCOD	คือ ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายไม่ได้ (มก./ล.)
k_1	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อวัน)
t	คือ เวลาใดๆ (วัน)

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการบำบัดซีโอดีในชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งเติมจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สภาวะให้แสงมีอัตราการบำบัดสูงสุด ($k_1 = 0.76$ ต่อวัน) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 7 ซึ่งเติมจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สภาวะไม่ให้แสง ($k_1 = 0.45$ ต่อวัน) ทั้งนี้อาจเนื่องจากแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย จึงส่งผลให้อัตราการบำบัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีกว่าในสภาวะไม่มีแสง ดังข้อมูลตามตารางที่ 4-1 จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ 1 ($k_1 = 0.33$ ต่อวัน) และ 5 ($k_1 = 0.47$ ต่อวัน) ซึ่งเติมตะกอนจุลชีพในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงมีอัตราการบำบัดซีโอดีในช่วงเดียวกัน คาดว่าเป็นเพราะแสงไม่ใช่ปัจจัยในการเจริญเติบโตของตะกอนจุลชีพ จึงไม่มีผลต่ออัตราการบำบัดในชุดการทดลองเหล่านี้ ในชุดการทดลองที่ 2 ที่เติมจุลสาหร่ายอย่างเดียว ($k_1 = 0.70$ ต่อวัน) และชุดที่ 3 ที่เติมตะกอนจุลชีพร่วมกับจุลสาหร่าย ($k_1 = 0.76$ ต่อวัน) ที่สภาวะที่มีแสงมีอัตราการบำบัดเท่ากัน แต่ในชุดการทดลองที่สภาวะแสงแตกต่างกัน เช่น ชุดการทดลองที่ 2 ($k_1 = 0.70$ ต่อวัน) และ 6 ($k_1 = 0.43$ ต่อวัน) และชุดการทดลองที่ 3 ($k_1 = 0.76$ ต่อวัน) และ 7 ($k_1 = 0.45$ ต่อวัน) พบว่าสภาวะที่ให้แสงมีอัตราการบำบัดที่สูงกว่าสภาวะที่ไม่มีแสง ส่วนชุดการทดลองที่เติมตะกอนจุลชีพและไม่เติมตะกอนจุลชีพในสภาวะที่ให้แสงและไม่ให้แสงมีอัตราการบำบัดที่ไม่ต่างกัน อาจเป็นเพราะตะกอนจุลชีพบางส่วนสามารถเพิ่มจำนวนขึ้นได้เองตามธรรมชาติในสภาวะที่มีสารอาหาร

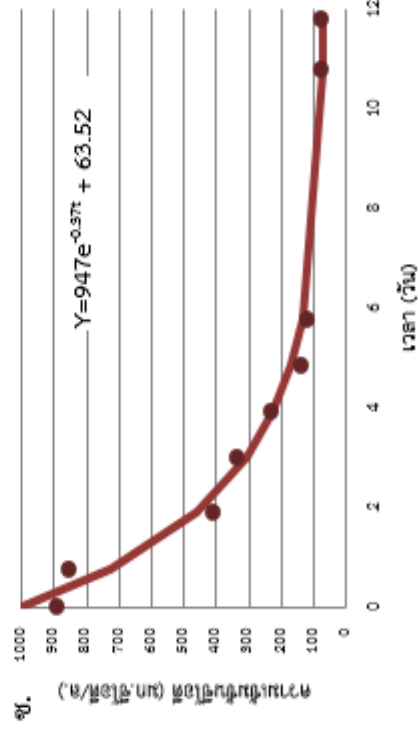
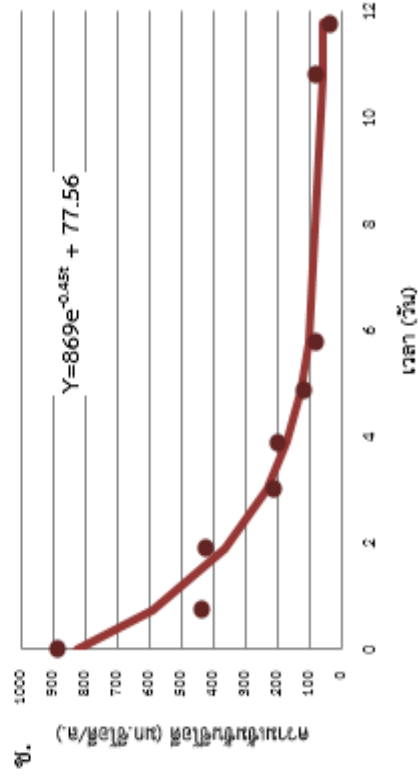
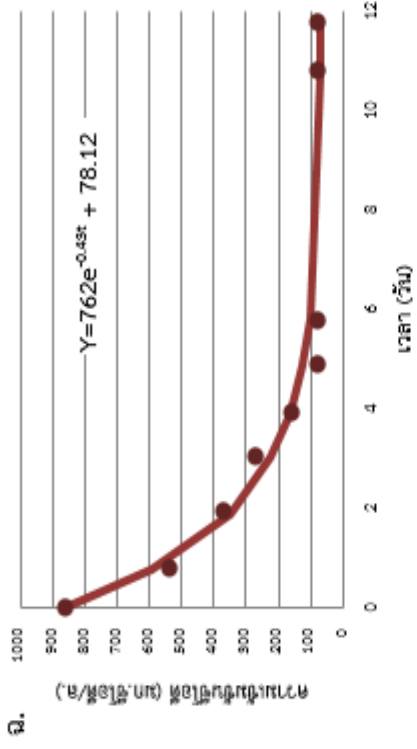
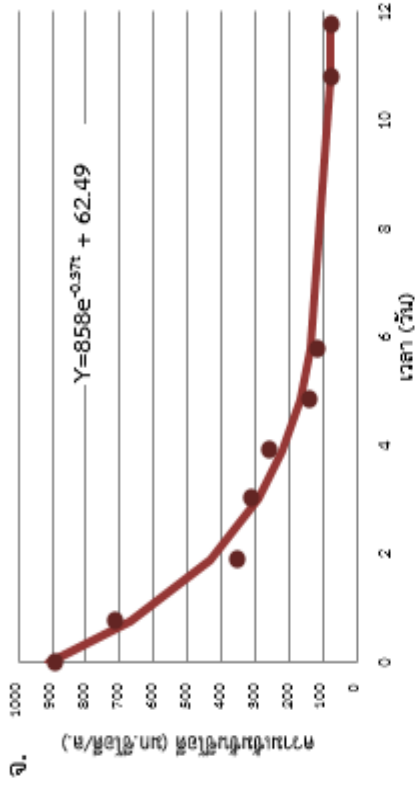
ตารางที่ 4-1 ค่า k_1 และค่าซีโอดีที่เหลือ (nbCOD) ในระบบการทดลองของชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	k_1 (ต่อวัน)	nbCOD (มก./ล.)
ชุด 1 เต็มตะกอนจุลชีพ (มีแสง)	0.33	11.33
ชุด 2 เต็มจุลสาหร่าย (มีแสง)	0.70	0.00
ชุด 3 เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง)	0.76	0.00
ชุด 4 ไม่เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง)	0.33	32.66
ชุด 5 เต็มตะกอนจุลชีพ (ไม่มีแสง)	0.37	62.49
ชุด 6 เต็มจุลสาหร่าย (ไม่มีแสง)	0.43	78.12
ชุด 7 เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (ไม่มีแสง)	0.45	77.56
ชุด 8 ไม่เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (ไม่มีแสง)	0.37	63.52

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าปริมาณซีโอดีที่เหลือ (nbCOD) ในชุดการทดลองที่สภาวะไม่ให้แสงมีค่าสูงกว่าในสภาวะที่ให้แสงมาก แสดงให้เห็นว่าแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการช่วยบำบัดซีโอดีที่ย่อยสลายยาก โดยจากการศึกษาก่อนหน้านี้ มีงานวิจัยของ Wang และคณะ (2016) มีการศึกษาเกี่ยวกับแสงต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี รายงานว่าการบำบัดค่าซีโอดีด้วยจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สภาวะให้แสงมีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าจุลสาหร่าย (*Chlorella* sp.) ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยนี้ และค่าซีโอดีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 22 ชั่วโมง แต่ในสภาวะที่ไม่ให้แสงพบว่าการบำบัดซีโอดีของจุลสาหร่ายมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยตะกอนจุลชีพเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในสภาวะที่ไม่มีแสงจุลสาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตแบบเฮเทโรโทรฟ โดยใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนอย่างเดียว ไม่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งจุลสาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้เร็วกว่าตะกอนแบคทีเรียที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนเป็นหลัก โดยสภาวะที่มีแสงจุลสาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตแบบมิกโซโทรฟสามารถเจริญเติบโตได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงและการใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน (Yan และคณะ, 2016) ดังนั้นจึงพบว่าการบำบัดซีโอดีในสภาวะที่มีแสงของจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพ มีประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดเมื่อเทียบการทดลองชุดอื่น และสังเกตได้ว่าไม่พบปริมาณซีโอดีเหลืออยู่ (nbCOD) ในชุดการทดลองที่มีจุลสาหร่าย



รูปที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีและแบบจำลองปฏิกิริยอันดับที่ 1 ของแต่ละชุดการทดลอง เมื่อ (ก) ชุดการทดลองที่ 1 เต็มตะกอนจุลชีพ (มีแสง), (ข) ชุดการทดลองที่ 2 เต็มจุลสาหร่าย (มีแสง), (ค) ชุดการทดลองที่ 3 เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง), (ง) ชุดการทดลองที่ 4 ไม่เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง)



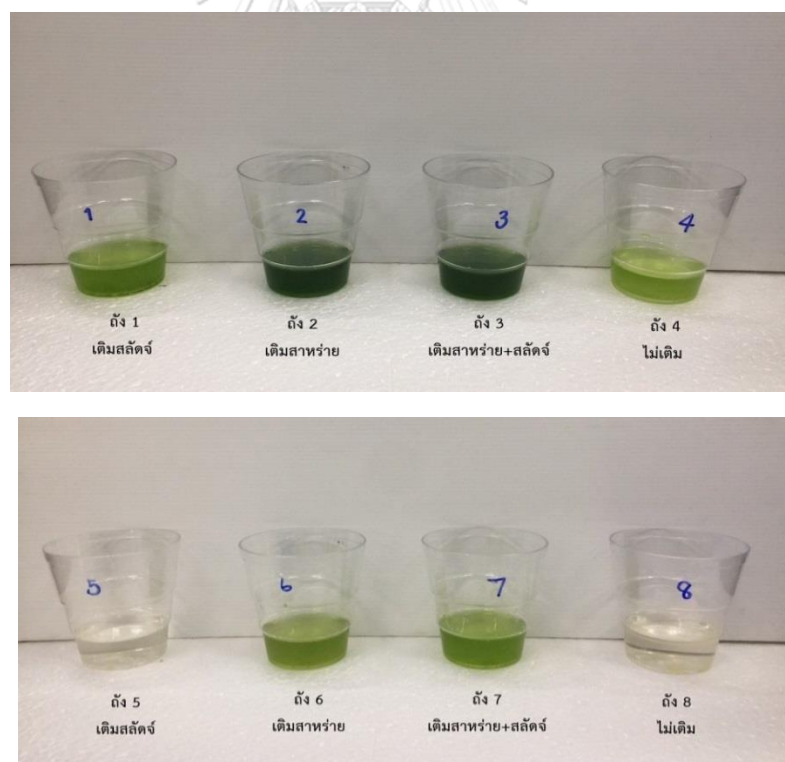
รูปที่ 4-1 (ต่อ) จ) ชุดการทดลองที่ 5 เดิมตะกอนจุลชีพ (ไม่มีแสง), (ฉ) ชุดการทดลองที่ 6 เดิมจุลสหาย (ไม่มีแสง), (ช) ชุดการทดลองที่ 7 เดิมตะกอนจุลชีพ+จุลสหาย (ไม่มีแสง) และ (ซ) ชุดการทดลองที่ 8 ไม่เดิมตะกอนจุลชีพ+จุลสหาย (ไม่มีแสง)

4.1.2 ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบ (Mixed liquor suspended solids; MLSS)

จากตารางที่ 4-2 แสดงค่าความเข้มข้นตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายในชุดการทดลองที่สถานะให้แสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าในชุดการทดลองที่สถานะไม่ให้แสง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการบำบัดซีโอดีที่สามารถบำบัดได้สูงกว่าในสถานะที่ไม่ให้แสง คาดว่าเป็นผลจากการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นของทั้งตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายจึงมีการใช้สารอาหารที่มากขึ้น ต่างจากสถานะที่ไม่ให้แสงที่มีอัตราการบำบัดและความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายที่ต่ำกว่า และจะเห็นได้ว่าในสถานะที่ให้แสงในชุดการทดลองที่มีการเติมจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพมีปริมาณจุลสาหร่ายเพิ่มขึ้น แต่ในชุดการทดลองในสถานะที่ไม่ให้แสงปริมาณจุลสาหร่ายที่ตรวจวิเคราะห์โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองชุดการทดลองที่เติมจุลสาหร่ายซึ่งยืนยันได้ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสีของน้ำในภาชนะชุดการทดลองในสถานะที่ให้แสงมีสีเข้มกว่าชุดการทดลองในสถานะที่ไม่ให้แสง ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณจุลสาหร่ายที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นดังตารางที่ 4-2 ในขณะที่ชุดการทดลองที่สถานะที่ไม่ให้แสงปริมาณจุลสาหร่ายมีค่าลดลงดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของการบำบัดซีโอดีโดยจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพ

ตารางที่ 4-2 ความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชุดการทดลอง

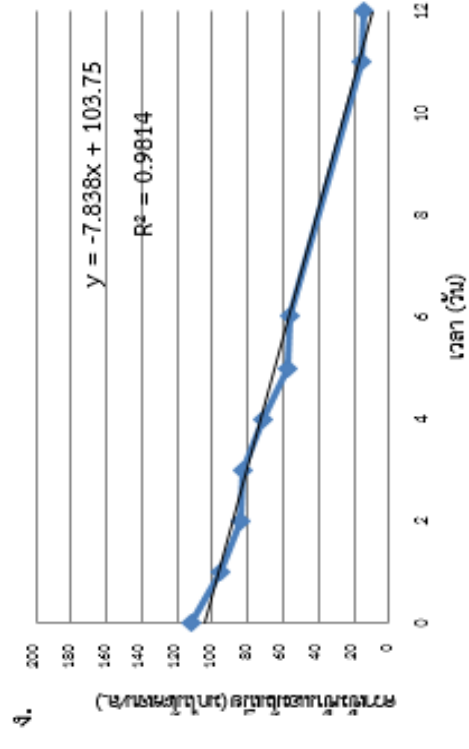
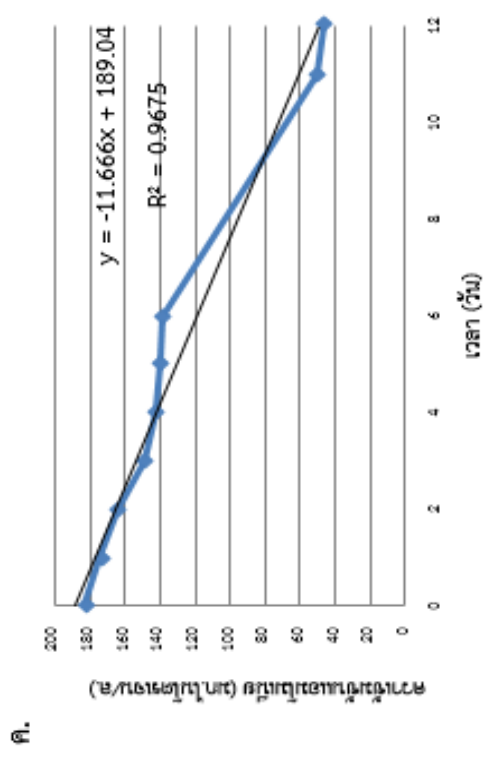
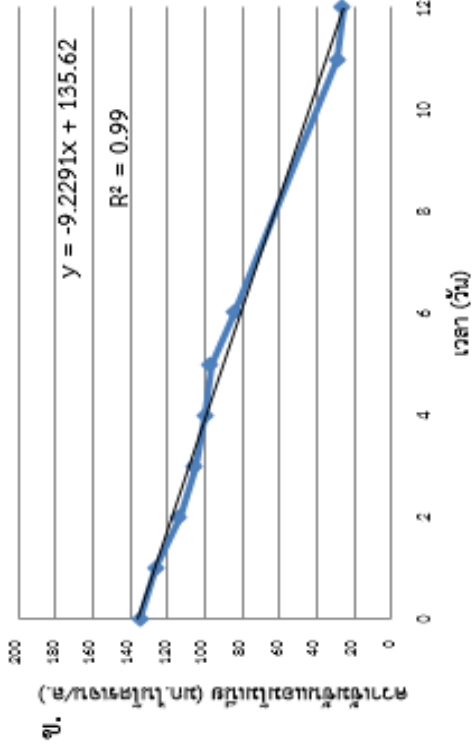
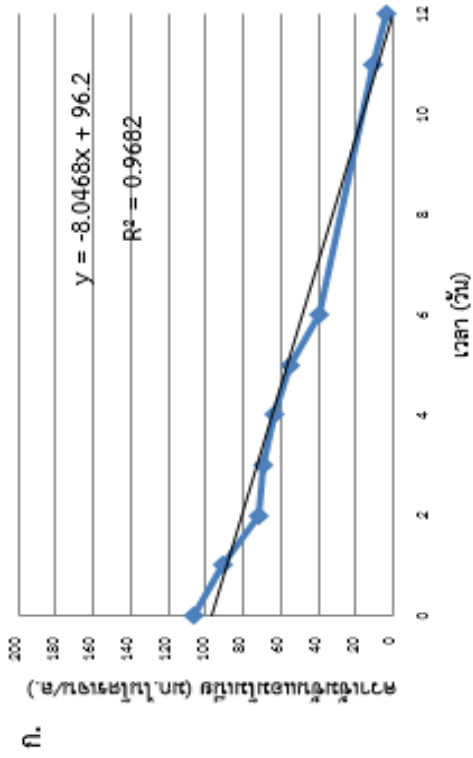
ชุดการทดลอง	ตะกอนจุลชีพที่เพิ่มขึ้น (มก./ล.)	จุลสาหร่ายที่เพิ่มขึ้น (มก./ล.)
ชุด 1 เต็มตะกอนจุลชีพ (มีแสง)	395	4.92
ชุด 2 เต็มจุลสาหร่าย (มีแสง)	1112	8.26
ชุด 3 เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง)	1554	16.08
ชุด 4 ไม่เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง)	600	0.53
ชุด 5 เต็มตะกอนจุลชีพ (ไม่มีแสง)	520	0.07
ชุด 6 เต็มจุลสาหร่าย (ไม่มีแสง)	530	-0.39
ชุด 7 เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (ไม่มีแสง)	712	-2.19
ชุด 8 ไม่เต็มตะกอนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (ไม่มีแสง)	660	0.10



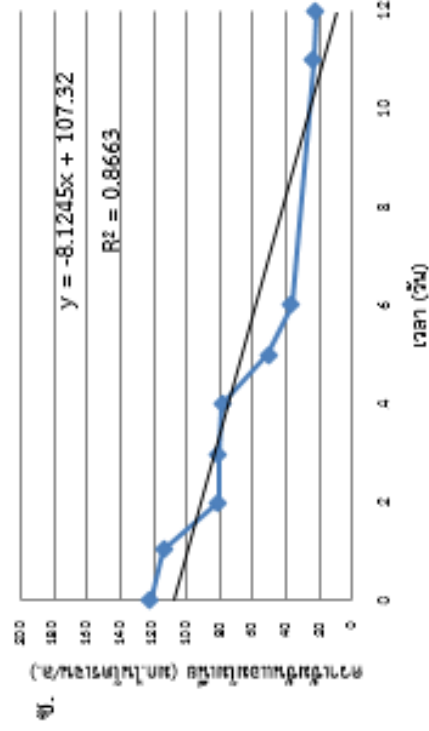
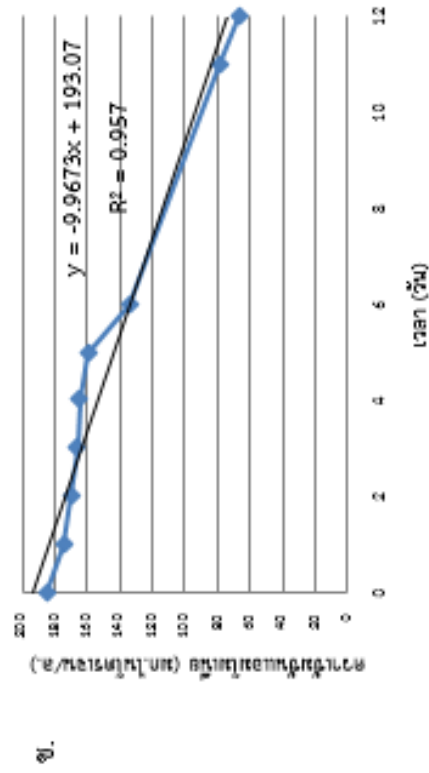
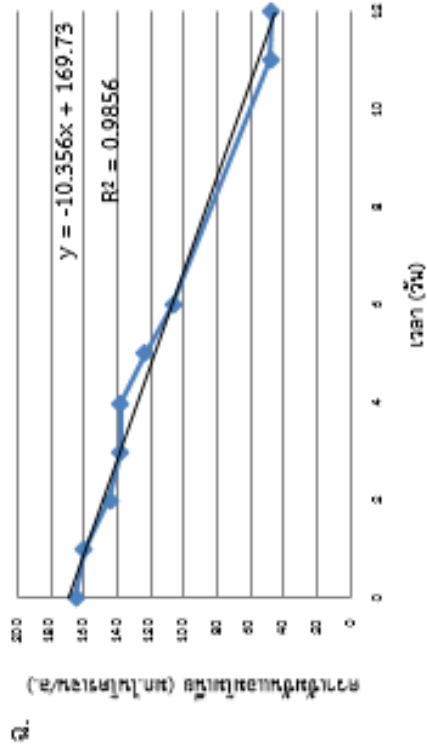
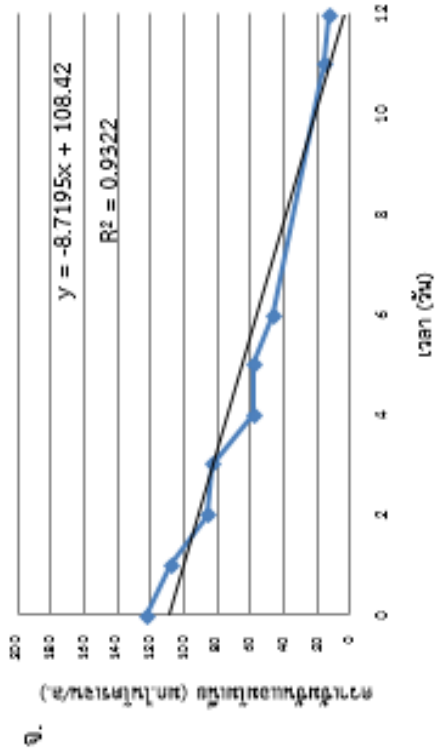
รูปที่ 4-2 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากแต่ละชุดการทดลองที่เวลา 12 วัน

4.1.3 ค่าแอมโมเนีย

การทดลองนี้ศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. จากการทดลองพบว่าเมื่อนำค่ามาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละชุดการทดลอง จากรูปที่ 4-3 พบว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมจุลสาหร่ายทั้งในสถานะที่ให้แสงและไม่ให้แสงพบว่ามีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมจุลสาหร่าย คาดว่าเกิดจากการที่จุลสาหร่ายสามารถใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนในการเจริญเติบโต จึงสามารถกำจัดแอมโมเนียได้เร็วกว่าชุดการทดลองอื่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในสถานะที่ให้แสงของชุดการทดลองที่ 3 เติมสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ ($r_s = 11.66$ มก.ไนโตรเจน/ล./วัน) พบว่ามีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าสถานะไม่ให้แสง อาจเนื่องจากในสถานะที่ให้แสง จุลสาหร่ายสามารถนำเอาธาตุอาหารที่มีในระบบมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อใช้ในกระบวนการเจริญเติบโต ในขณะที่ตะกอนจุลชีพก็สามารถใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนในการเจริญเติบโตได้เช่นกัน จึงทำให้แอมโมเนียลดลงได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ (2016) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียของจุลสาหร่าย *Chlorella* sp. ร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สถานะที่ไม่มีแสงและมีแสง พบว่าในชุดการทดลองที่เติมจุลสาหร่ายกับตะกอนจุลชีพที่สถานะมีแสง สามารถกำจัดแอมโมเนียในระบบได้เร็วกว่าการเติมจุลสาหร่ายอย่างเดียวและจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สถานะที่ไม่มีแสง



รูปที่ 4-3 การเปลี่ยนแปลงค่าแอมโมเนียของแต่ละชุดการทดลอง เมื่อ (ก) ชุดการทดลองที่ 1 เติบโตจนจุลชีพ (มีแสง), (ข) ชุดการทดลองที่ 2 เติบโตสาหร่าย (มีแสง), (ค) ชุดการทดลองที่ 3 เติบโตจนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง), (ง) ชุดการทดลองที่ 4 ไม่เติบโตจนจุลชีพ+จุลสาหร่าย (มีแสง)



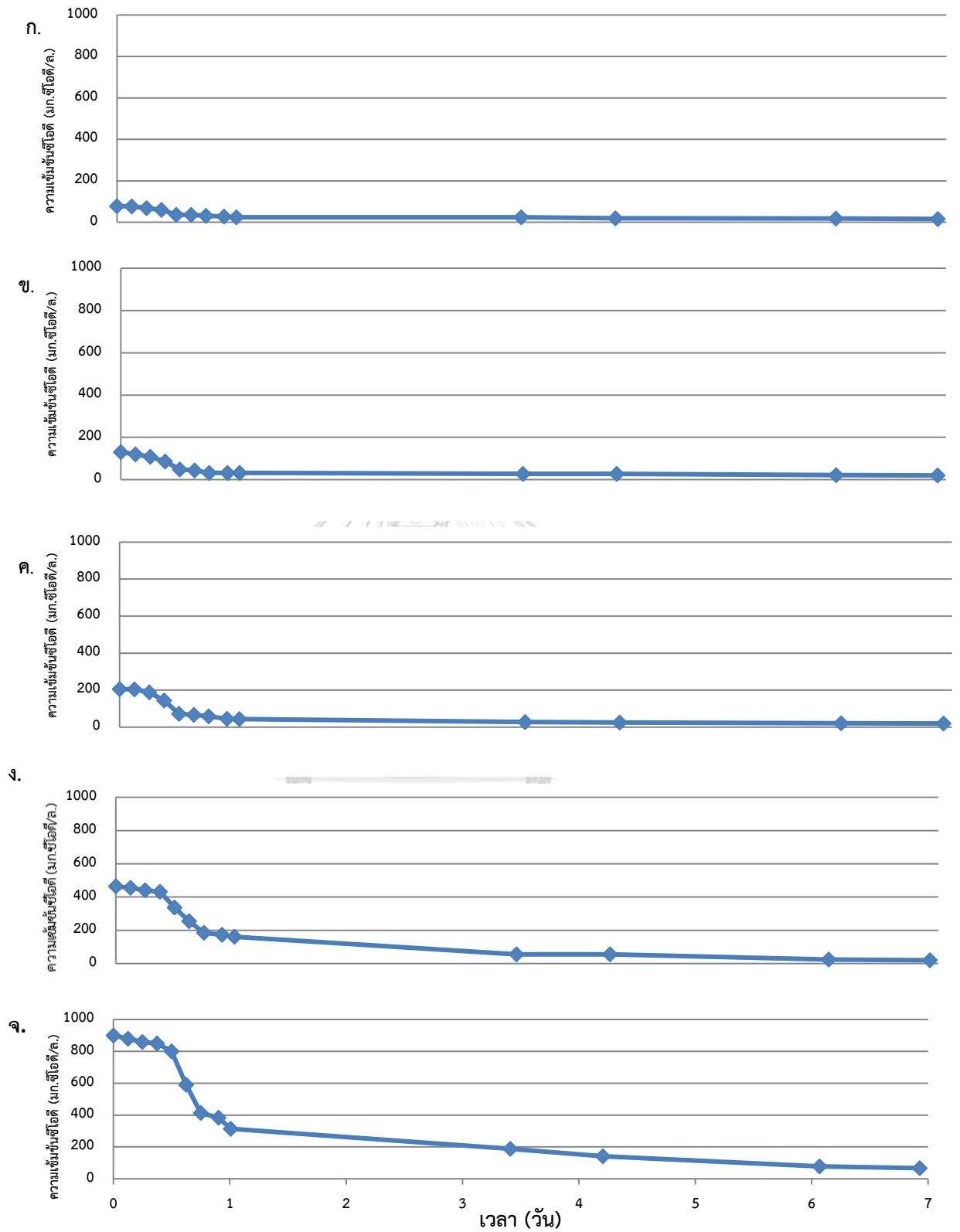
รูปที่ 4.3 (ต่อ) จ) ชุดการทดลองที่ 5 เติมตะกอนจุลชีพ (ไม่มีแสง), (ฉ) ชุดการทดลองที่ 6 เติมจุลสสารร้าย (ไม่มีแสง), (ช) ชุดการทดลองที่ 7 เติมตะกอนจุลชีพ + จุลสสารร้าย (ไม่มีแสง) และ (ซ) ชุดการทดลองที่ 8 ไม่เติมตะกอนจุลชีพ+จุลสสารร้าย (ไม่มีแสง)

4.2 การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

4.2.1 การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียต่อการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

4.2.1.1 ค่าซีโอดี

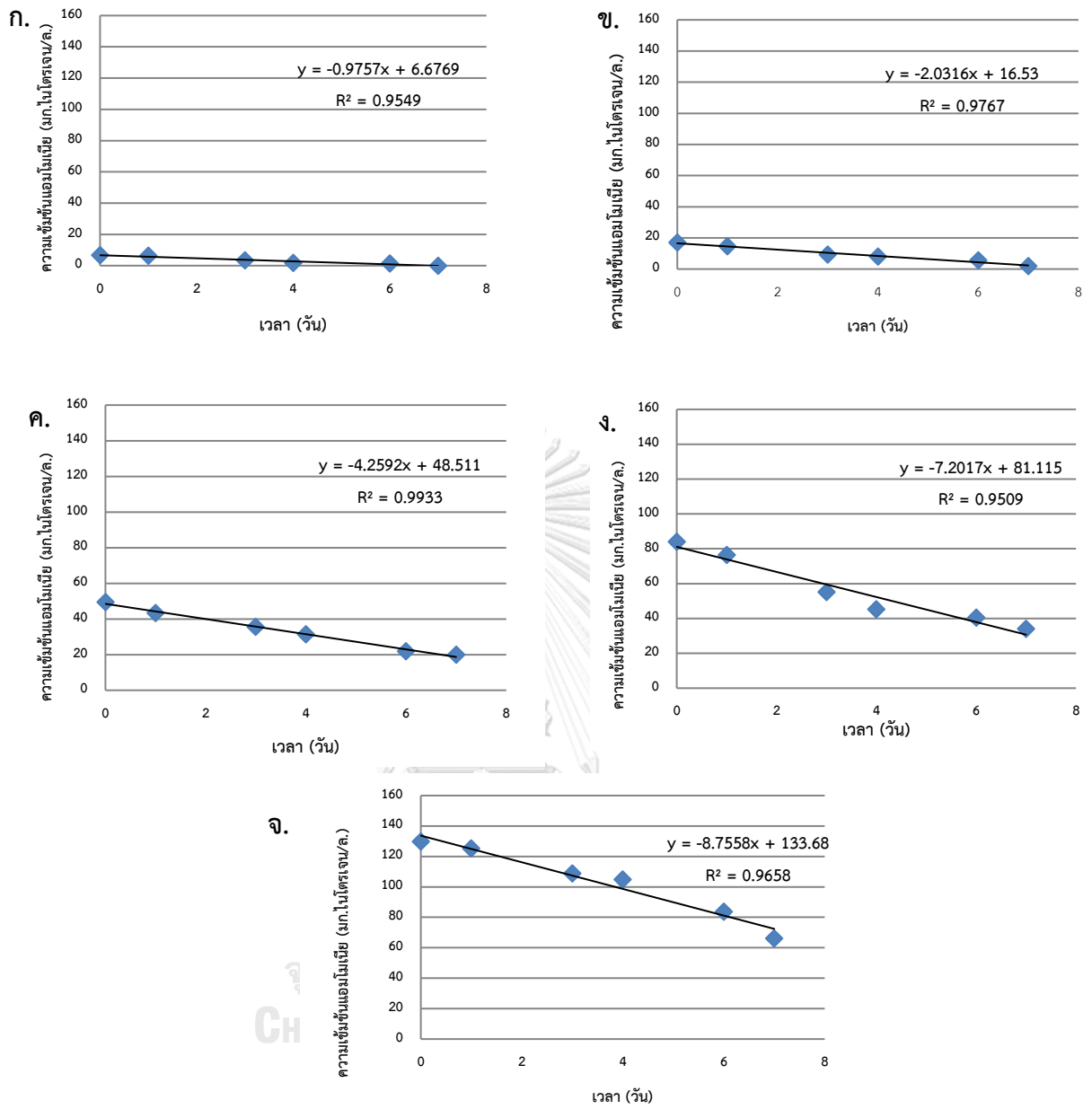
การทดลองทำการศึกษาช่วงความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ โดยค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกัน 5 ความเข้มข้นคือ 50, 100, 200, 500 และ 1,000 มก.ซีโอดี/ล. จากผลการทดลองพบว่าใช้เวลาเดินระบบเป็นเวลา 7 วัน เริ่มต้นเดินระบบแต่ละความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 78 ± 2.83 , 130 ± 2.83 , 206 ± 14.14 , 464 ± 11.31 และ 900 ± 0.00 มก.ซีโอดี/ล.ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-4 เมื่อนำค่าซีโอดีที่ลดลงช่วงแรกมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการบำบัดซีโอดีแต่ละความเข้มข้น พบว่ามีอัตราการบำบัดซีโอดี เท่ากับ 128.0, 158.4, 352.0, 657.8 และ 1,547.5 มก.ซีโอดี/ล./วัน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าซีโอดีลดลงตามแนวโน้มตามปฏิกิริยาอันดับ 1 เมื่อความเข้มข้นของซีโอดีสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการบำบัดมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งอัตราการบำบัดแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของซีโอดียกกำลังหนึ่ง มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Chaiwong และคณะ (2018) ศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายที่ความเข้มข้นซีโอดี 227 ± 20 มก.ซีโอดี/ล. มีอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 410 มก.ซีโอดี/ล./วัน พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ที่มีอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 352 มก.ซีโอดี/ล./วัน ที่ความเข้มข้นซีโอดี 206 ± 14.14 มก.ซีโอดี/ล.



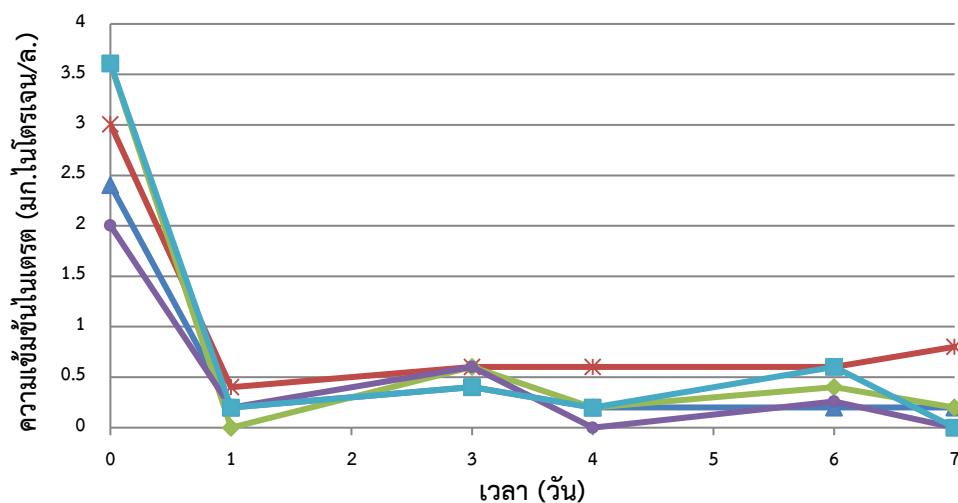
รูปที่ 4-4 กราฟแสดงการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ (ก.) 50 มก.ซีโอดี/ล., (ข.) 100 มก.ซีโอดี/ล., (ค.) 200 มก.ซีโอดี/ล., (ง.) 500 มก.ซีโอดี/ล., (จ.) 1,000 มก.ซีโอดี/ล.

4.2.1.2 ค่าแอมโมเนีย

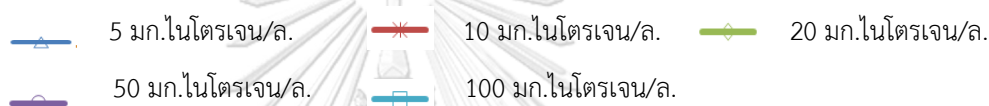
การทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียซึ่งจะแตกต่างกันคือ 5, 10, 20, 50 และ 100 มก.ไนโตรเจน/ล. เริ่มต้นเดินระบบแต่ละความเข้มข้นแอมโมเนีย เท่ากับ 6.70 ± 0.16 , 17.17 ± 0.16 , 49.90 ± 0.51 , 87.06 ± 4.31 และ 132.72 ± 4.31 มก.ไนโตรเจน/ล. ผลจากวิเคราะห์การลดลงของค่าแอมโมเนีย พบว่าจากการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนจุลชีพร่วมกับจุลสาหร่ายที่เวลาผ่านไป 7 วัน มีค่าแอมโมเนียเหลืออยู่ 0.00 ± 0.00 , 2.08 ± 0.31 , 18.91 ± 0.13 , 33.80 ± 0.63 และ 66.11 ± 1.94 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ เมื่อนำค่าแอมโมเนียที่ลดลงมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละความเข้มข้น พบว่ามีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.98, 2.03, 4.26, 7.20 และ 8.76 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-5 จากการลดลงของปริมาณแอมโมเนียในแต่ละทุกชุดการทดลอง คาดว่าเกิดจากการนำแอมโมเนียไปใช้ในการเจริญเติบโตทั้งจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ McCarthy, Taylor และ Taft (1977) พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กจะเลือกใช้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียก่อนรูปอื่นตามด้วยไนเตรต กล่าวคือเมื่อทั้งแอมโมเนียและไนเตรตอยู่ในอาหารสาหร่ายจะเลือกใช้แอมโมเนียก่อน เนื่องจากแอมโมเนียเป็นธาตุอาหารสำคัญต่อสาหร่ายในการสร้างโปรตีนและสาหร่ายสามารถดูดซึมผ่านทางผนังเซลล์เพื่อนำไปสร้างกรดอะมิโนได้โดยตรง (Theissen และ Saedler, 2001) ในส่วนของตะกอนจุลชีพจะใช้แอมโมเนียไปในการเติบโตในสัดส่วนของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบต่อไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ COD:N:P=150:5:1 โดยการทดลองนี้ได้ตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตในทุกชุดการทดลอง จากผลการทดลองพบปริมาณไนเตรตน้อยมาก แต่ช่วงวันแรกที่เริ่มระบบ พบปริมาณไนเตรตเฉลี่ยในทุกชุดการทดลองเท่ากับ 2.93 ± 0.72 มก.ไนโตรเจน/ล. อาจเนื่องมาจากสารอาหารที่มี KNO_3 ของจุลสาหร่ายหลุดเข้าไปในระบบส่งผลให้ตรวจวิเคราะห์เจอปริมาณไนเตรตอยู่ในที่ชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-5 กราฟการหาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดแอมโมเนีย (ก.) 5 มก.ไนโตรเจน/ล., (ข.) 10 มก.ไนโตรเจน/ล., (ค.) 20 มก.ไนโตรเจน/ล., (ง.) 50 มก.ไนโตรเจน/ล., (จ.) 100 มก.ไนโตรเจน

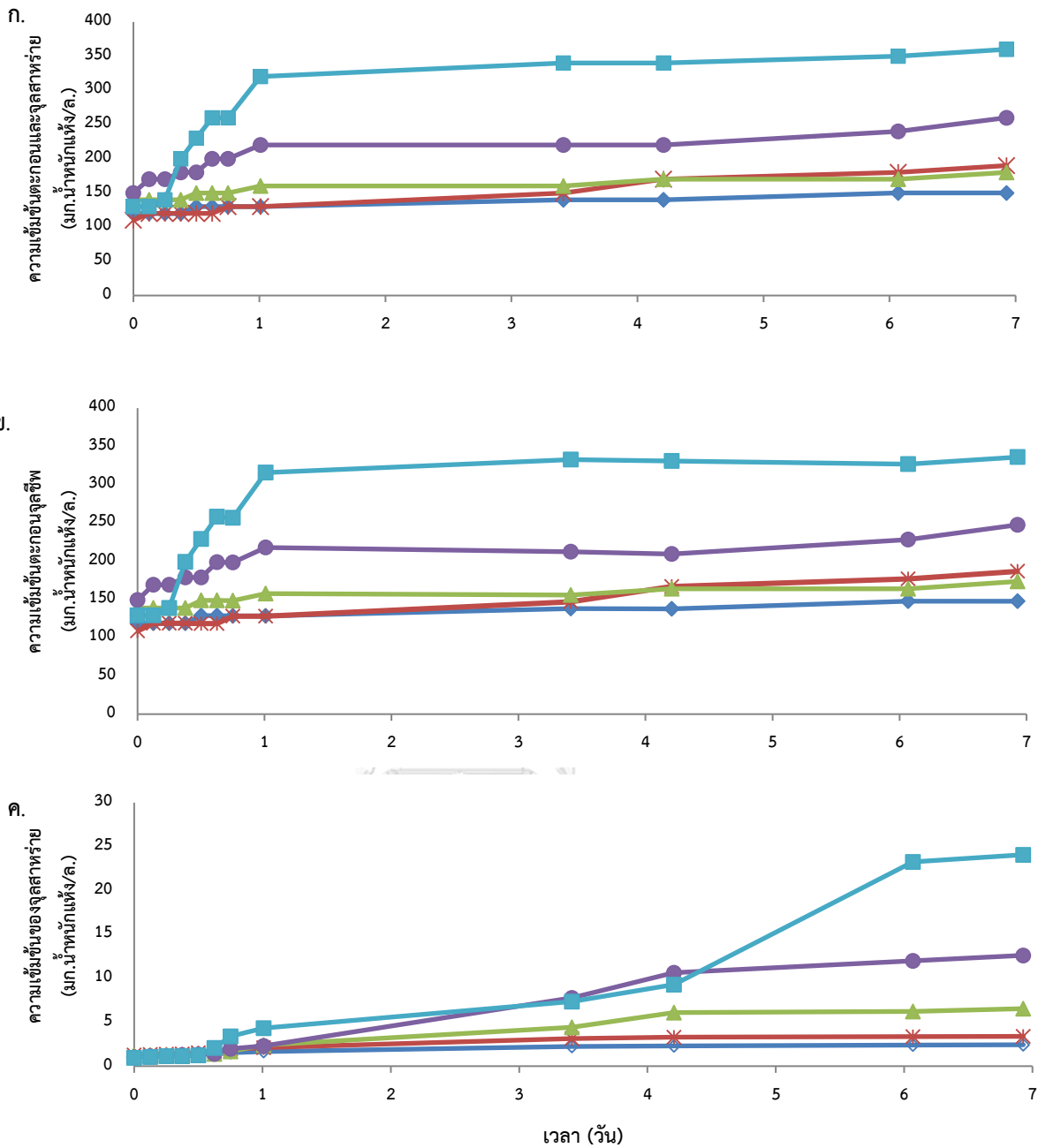


รูปที่ 4-6 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นไนเตรตแต่ละชุดการทดลอง



4.2.1.3 ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบ (Mixed liquor suspended solids; MLSS)

เริ่มเดินระบบโดยเติมจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และตะกอนจุลชีพที่สัดส่วน 5:1 จากผลทดลองพบว่าความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพเพิ่มขึ้นได้ชัดเจนในช่วงวันแรกในทุกชุดการทดลอง ซึ่งมีสอดคล้องกับการบำบัดซีโอดีที่สามารถบำบัดได้อย่างเร็วได้ตั้งแต่วาง 24 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นการเจริญเติบโตจะเริ่มคงที่ คาดว่าการบำบัดซีโอดีในช่วงแรกถูกบำบัดโดยตะกอนจุลชีพเป็นหลัก แต่จะเห็นได้ว่าจุลสาหร่ายมีการเพิ่มขึ้นในช่วงหลังของการทดลอง ซึ่งเป็นการเจริญเติบโตจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นหลัก เนื่องจากค่าซีโอดีในทุกชุดการทดลองในช่วงหลังซีโอดีลดลงจนหมด แสดงในรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 กราฟค่าความเข้มข้นตะกอนจุลชีพและจุลสารห่วยแต่ละชุดการทดลองต่างๆ

(ก.) ความเข้มข้นตะกอนจุลชีพและจุลสารห่วย (ข.) ความเข้มข้นตะกอนจุลชีพ (ค.) ความเข้มข้นจุลสารห่วย

- 50 มก.ซีโอดี/ล.
- *— 100 มก.ซีโอดี/ล.
- ◇— 200 มก.ซีโอดี/ล.
- 500 มก.ซีโอดี/ล.
- 1,000 มก.ซีโอดี/ล.

4.2.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield)

เมื่อนำค่าปริมาณตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นต่อสารอาหารที่ถูกใช้ไป จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตสูงสุด ดังตารางที่ 4-3 โดยที่ความเข้มข้นซีโอดี 50, 100, 200 และ 500 มก.ซีโอดี/ล. มีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของตะกอนจุลชีพเท่ากับ 0.52, 0.55, 0.75, 0.89 กรัมเอสเอสต่อกรัมซีโอดี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนในช่วง 0.4-0.6 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมซีโอดี (Metcalf และ Eddy, 2014) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าได้ซีโอดีที่ทุกชุดการทดลองถูกใช้โดยตะกอนจุลชีพเป็นหลัก อาจเนื่องมาจากการจุลสาหร่ายมีการเจริญเติบโตแบบออโตโทรฟซึ่งอาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสงและแสงเป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นหลัก มากกว่าการเจริญเติบโตแบบเฮเทโรโทรฟที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโต แต่ที่ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มก.ซีโอดี/ล. มีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายสูงมากและแตกต่างจากความเข้มข้นซีโอดีอื่น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการทดลอง

ตารางที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) ที่เกิดขึ้นในแต่ละความเข้มข้นของซีโอดี

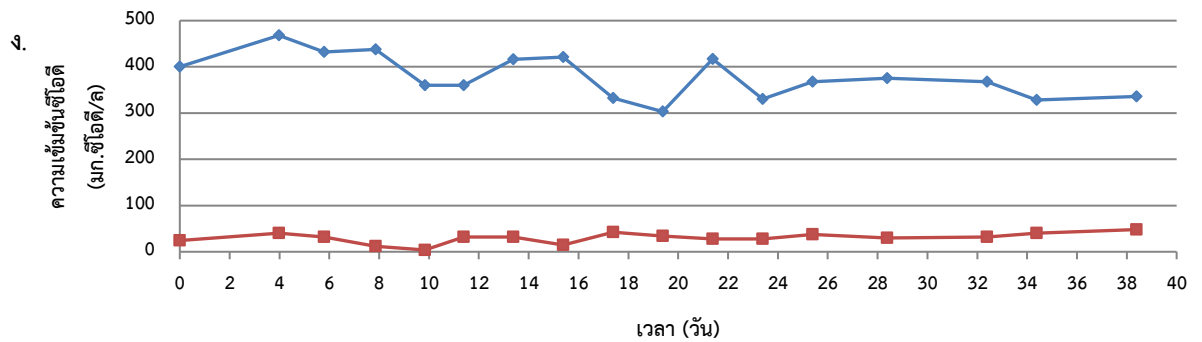
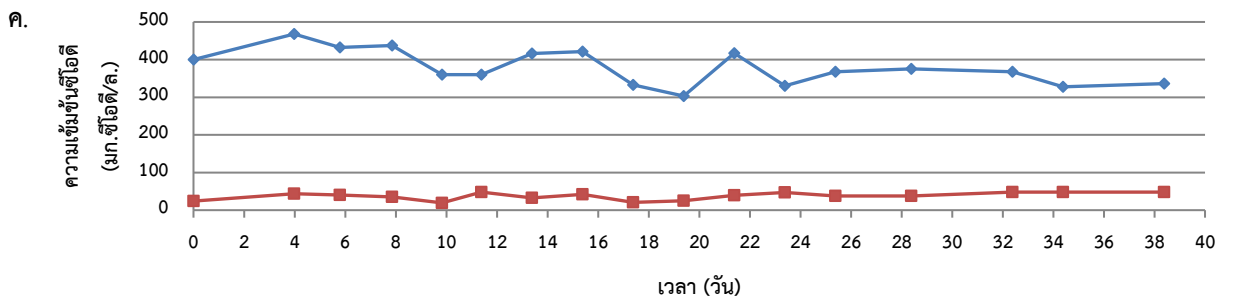
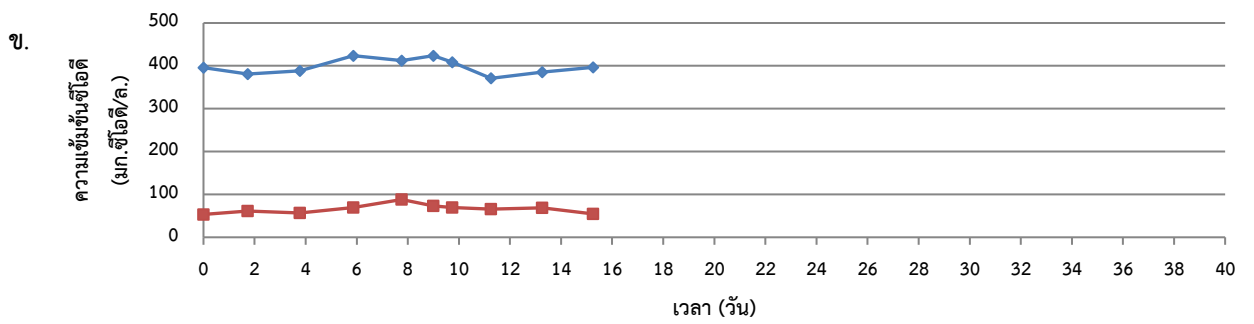
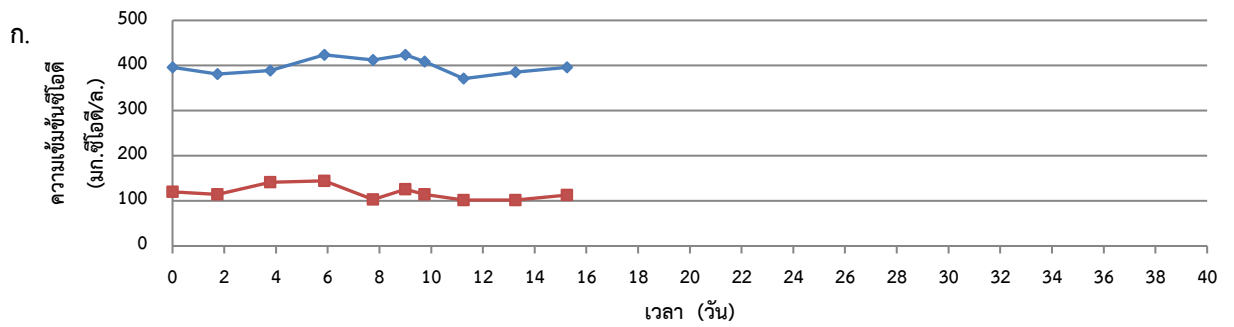
ความเข้มข้นซีโอดี (มก.ซีโอดี/ล.)	Yield _{จุลสาหร่าย} (gSS/gCOD)	Yield _{ตะกอนจุลชีพ} (gSS/gCOD)	Yield _{จุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ} (gSS/gCOD)
50	0.03	0.52	0.55
100	0.03	0.55	0.63
200	0.07	0.75	0.67
500	0.11	0.89	0.71
1000	0.15	1.72	1.87

4.2.2 การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่เก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

การทดลองในช่วงนี้ศึกษาระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียที่ระยะเวลาที่เก็บในระบบแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 1, 2, 4 และ 8 วัน เติกระบบการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow Process) ในถังปฏิกรณ์ขนาด 15.7 ลิตร สูง 2.20 เมตร เติกระบบโดยเติมสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และตะกอนจุลชีพ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นในอัตราส่วน 5:1 ให้แสงสว่างจากหลอดไฟที่ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 ชม.ต่อวัน เริ่มเติกระบบโดยสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ด้านบนด้วยอัตราการไหลตามระยะเวลาที่เก็บน้ำแต่ละค่า เติกระบบด้วยความเข้มข้นซีโอดี 400 มก.ซีโอดี/ล.และ 40 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามอัตราส่วน COD : N = 10 : 1 ของน้ำเสียชุมชน

4.2.2.1 ค่าซีโอดี

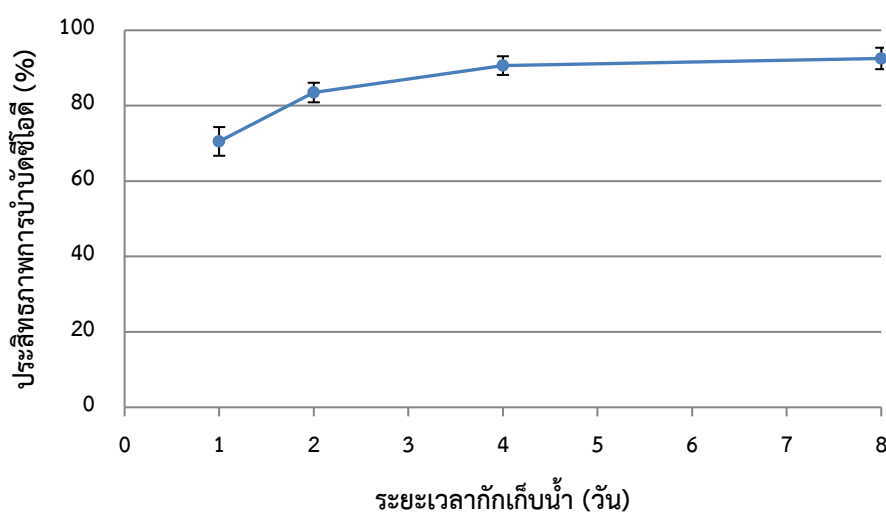
การทดลองในช่วงนี้ที่ทุกระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1, 2, 4 และ 8 วัน จะเติกระบบด้วยความเข้มข้นซีโอดี 400 มก.ซีโอดี/ล. ที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1 และ 2 วัน ใช้เวลาดำเนินการทดลองทั้งหมด 15 วัน และที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4 และ 8 วัน ใช้เวลาดำเนินการทดลองทั้งหมด 39 วัน ผลจากการทดลองพบว่า ค่าซีโอดีที่เหลือจากการบำบัดแต่ละระยะเวลาที่เก็บน้ำเท่ากับ 117.91 ± 15.22 , 66.05 ± 10.37 , 37.47 ± 9.90 และ 29.89 ± 11.38 มก.ซีโอดี/ล. ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-8 จะเห็นว่าที่ทุกระยะเวลาที่เก็บน้ำมีการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง



รูปที่ 4-8 กราฟความเข้มข้นซีโอติน้ำออกที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 1 2 4 และ 8 วัน

(ก) 1 วัน (ข) 2 วัน (ค) 4 วัน (ง) 8 วัน โดยที่ ◆ = น้ำเข้า ■ = น้ำออก

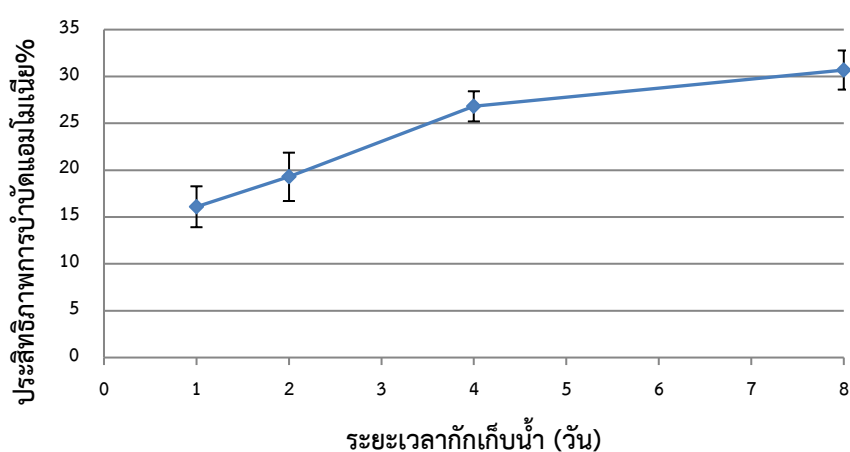
จากผลการทดลองคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 1, 2, 4 และ 8 วัน เท่ากับร้อยละ 70.52 ± 3.80 , 83.49 ± 2.59 , 90.63 ± 2.48 และ 92.53 ± 2.84 ตามลำดับ ซึ่งที่ระยะเวลาเก็บที่ 4 และ 8 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีถึงร้อยละ 90 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 4 วัน เป็นระยะเวลาเก็บที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ แม้ว่าที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 8 วัน จะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มากกว่าแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดซีโอดีที่มากกว่าถึงสองเท่า ซึ่งงานวิจัยของ Anbalagan และคณะ (2016) ทำการศึกษา ระยะเวลาเก็บน้ำ 2, 4 และ 6 วันของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาเก็บน้ำ 2, 4 และ 6 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ $55.5 \pm 5.5\%$, $56 \pm 5\%$ และ $80 \pm 12\%$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการบำบัด ได้ดีกว่า อาจเนื่องมาจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้คือน้ำตาลกลูโคสซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่าย ส่งผลให้ ทั้งตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ง่าย



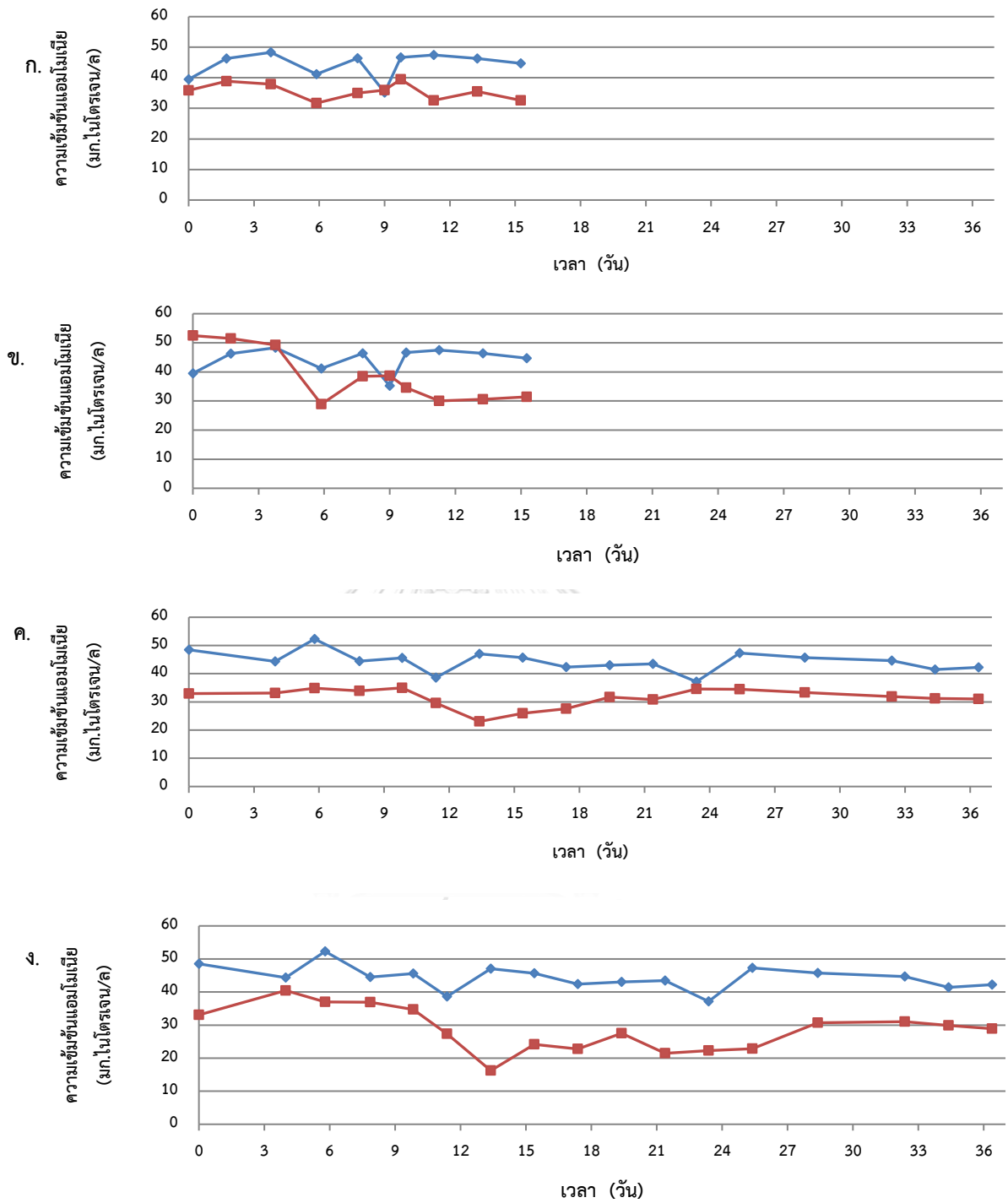
รูปที่ 4-9 กราฟแสดงประสิทธิภาพของความเข้มข้นซีโอดีที่ระยะเก็บน้ำต่างๆ

4.2.2.2 ค่าแอมโมเนีย

การทดลองในช่วงนี้ที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 1, 2, 4 และ 8 วัน จะเดินระบบด้วยความเข้มข้นแอมโมเนีย 40 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 1 และ 2 วัน ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 15 วัน ซึ่งที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 และ 8 วัน ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 36 วัน ผลจากการทดลองพบว่า ค่าแอมโมเนียที่เหลือจากการบำบัดแต่ละระยะเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 35.56 ± 2.68 , 38.59 ± 9.24 , 31.47 ± 3.33 และ 28.66 ± 12.87 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-11 จะได้เห็นว่าที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำมีการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง จากผลการทดลองคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ระยะเวลากักเก็บ 1, 2, 4 และ 8 วัน เท่ากับร้อยละ 16.09 \pm 2.18, 19.29 \pm 2.58, 26.81 \pm 1.61 และ 30.69 \pm 2.09 ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณอัตราส่วน COD : N = 150 : 5 พบว่าแอมโมเนียที่หายไปที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำ ถูกตะกอนจุลชีพนำไปสร้างเซลล์ในการเจริญเติบโตเป็นหลัก มีงานวิจัยของ Schwede และคณะ (2016) ได้ศึกษาทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำ 2, 4 และ 6 วันของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ พบว่าสามารถกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ร้อยละ 40 -50 ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 6 และ 4 วัน โดยมีการวิเคราะห์ผลว่าเกิดจากแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟเออร์ที่บำบัดแอมโมเนียเนื่องจากในระบบมีออกซิเจนละลาย 6.04 \pm 0.47 และ 4.24 \pm 0.62 มก./ล. ตามลำดับ แต่ในงานวิจัยนี้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้อยมากที่ระดับความลึกน้ำสูงขึ้น



รูปที่ 4-10 กราฟแสดงประสิทธิภาพของความเข้มข้นแอมโมเนียที่ระยะเก็บกักน้ำต่างๆ

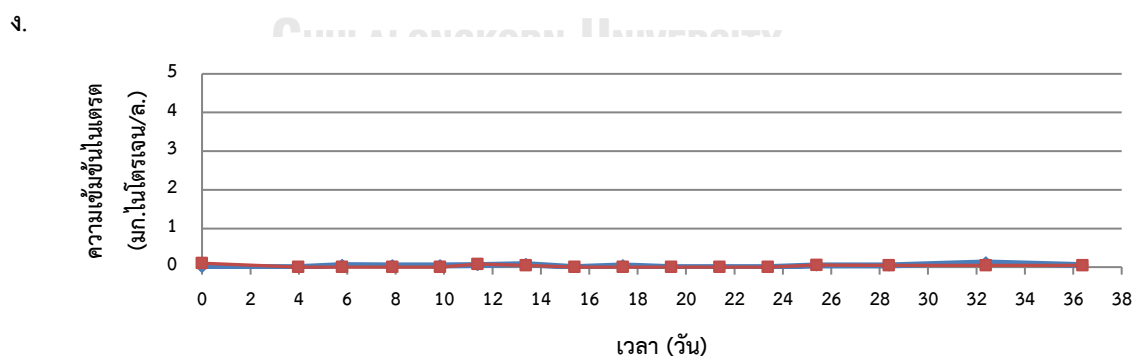
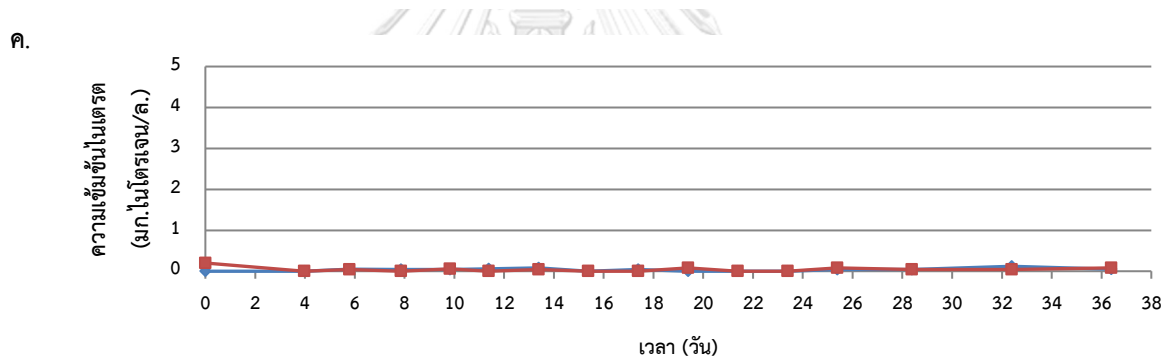
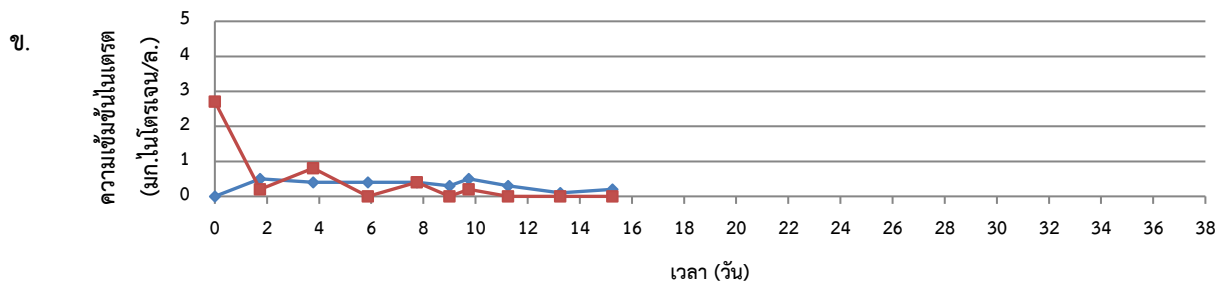
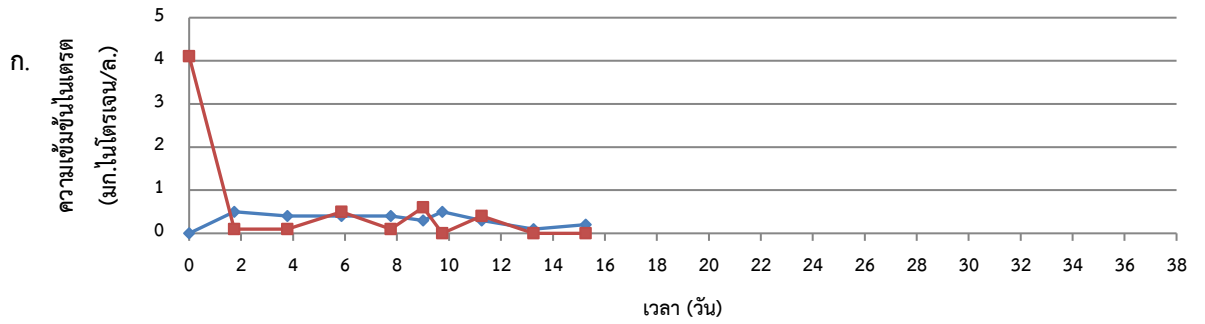


รูปที่ 4-11 กราฟแสดงการความเข้มข้นแอมโมเนียแต่ละชุดการทดลองของระยะเวลาที่เก็บน้ำ

(ก) 1 วัน (ข) 2 วัน (ค) 4 วัน (ง) 8 วัน โดยที่ ◆ = น้ำเข้า ■ = น้ำออก

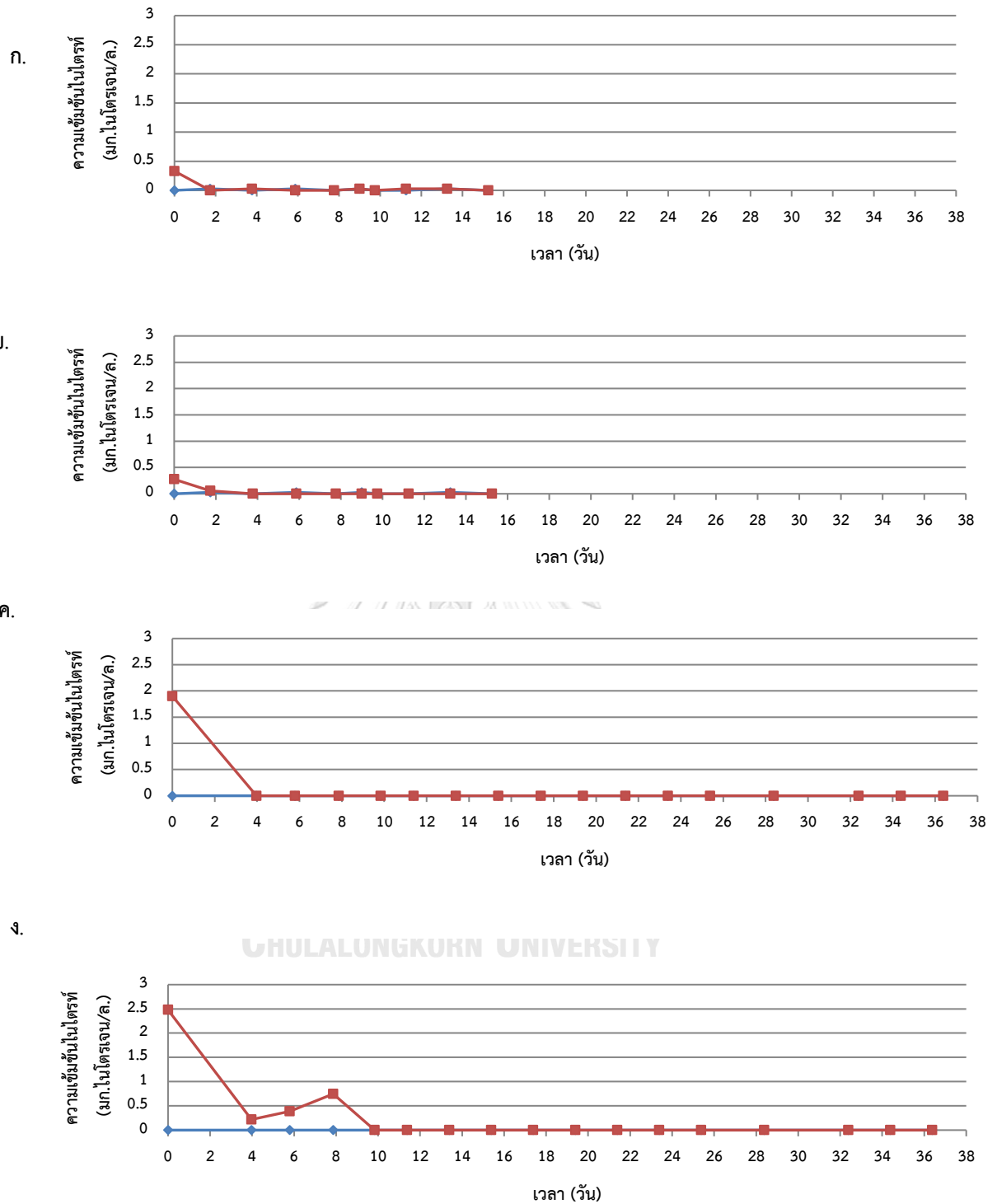
4.2.2.3 ค่าไนเตรตและไนไตรท์

จากการผลการทดลองพบว่าที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำ 1, 2, 4 และ 8 วัน พบความเข้มข้นไนเตรตของน้ำออกเฉลี่ย ที่ทุกระยะเวลากักเก็บเท่ากับ 0.59 ± 1.05 , 0.53 ± 1.15 , 0.05 ± 0.06 และ 0.03 ± 0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และความเข้มข้นไนไตรท์ของน้ำออกเฉลี่ย เท่ากับ 0.04 ± 0.09 , 0.07 ± 0.18 , 0.11 ± 0.46 และ 0.23 ± 0.61 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงดังภาพที่ 4-12, 4-13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำ ไม่มีทั้งไนเตรตและไนไตรท์ แต่จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการเดินระบบมีปริมาณไนเตรตและไนไตรท์ ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดจากอาหารของจุลสาหร่ายที่เติมลงไปก่อนเริ่มเดินระบบ จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าภายในระบบที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำ ไม่สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้นได้ โดยกระบวนการนี้จะเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรต แต่ภายในระบบจากตรวจวิเคราะห์ไม่มีปริมาณไนเตรตและไนไตรท์ รวมถึงค่าออกซิเจนละลายในระบบที่ทุกความลึกมีปริมาณน้อยมาก งานวิจัยนี้ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีความลึกมาก ออกซิเจนจึงไม่สามารถละลายลงได้ถึงด้านล่างของถัง



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความเข้มข้นไนเตรตแต่ละชุดการทดลองของระยะเวลาที่เก็บน้ำ

(ก) 1 วัน (ข) 2 วัน (ค) 4 วัน (ง) 8 วัน โดยที่ = น้ำเข้า = น้ำออก

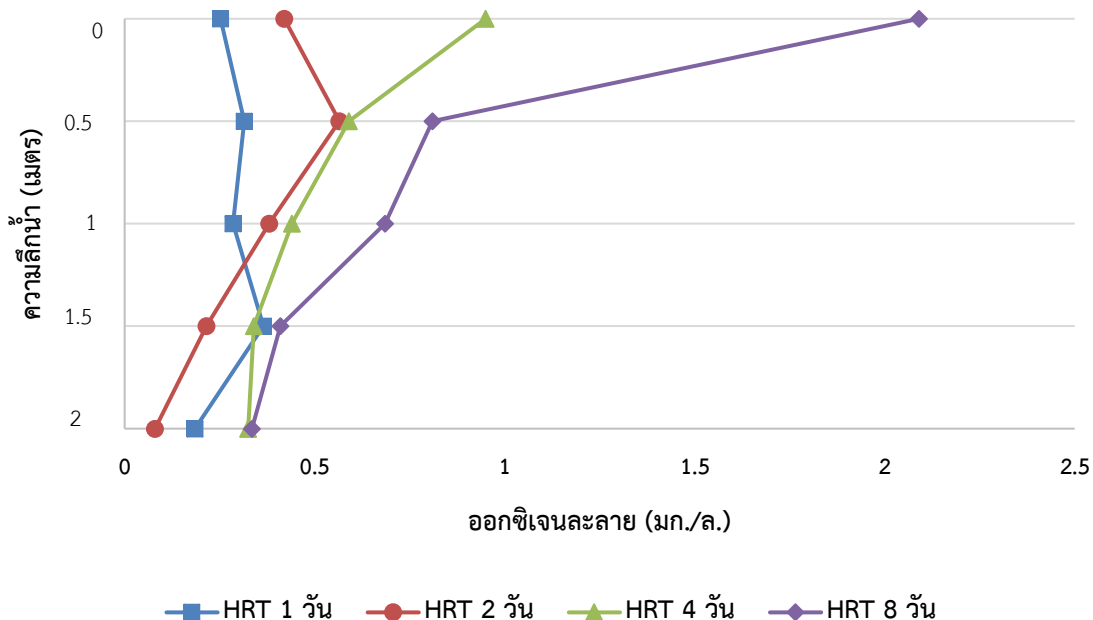


รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความเข้มข้นไนเตรตแต่ละชุดการทดลองของระยะเวลาที่เก็บน้ำ

(ก.) 1 วัน (ข.) 2 วัน (ค.) 4 วัน (ง.) 8 วัน โดยที่ ◆ = น้ำเข้า ■ = น้ำออก

4.2.2.4 ออกซิเจนละลาย

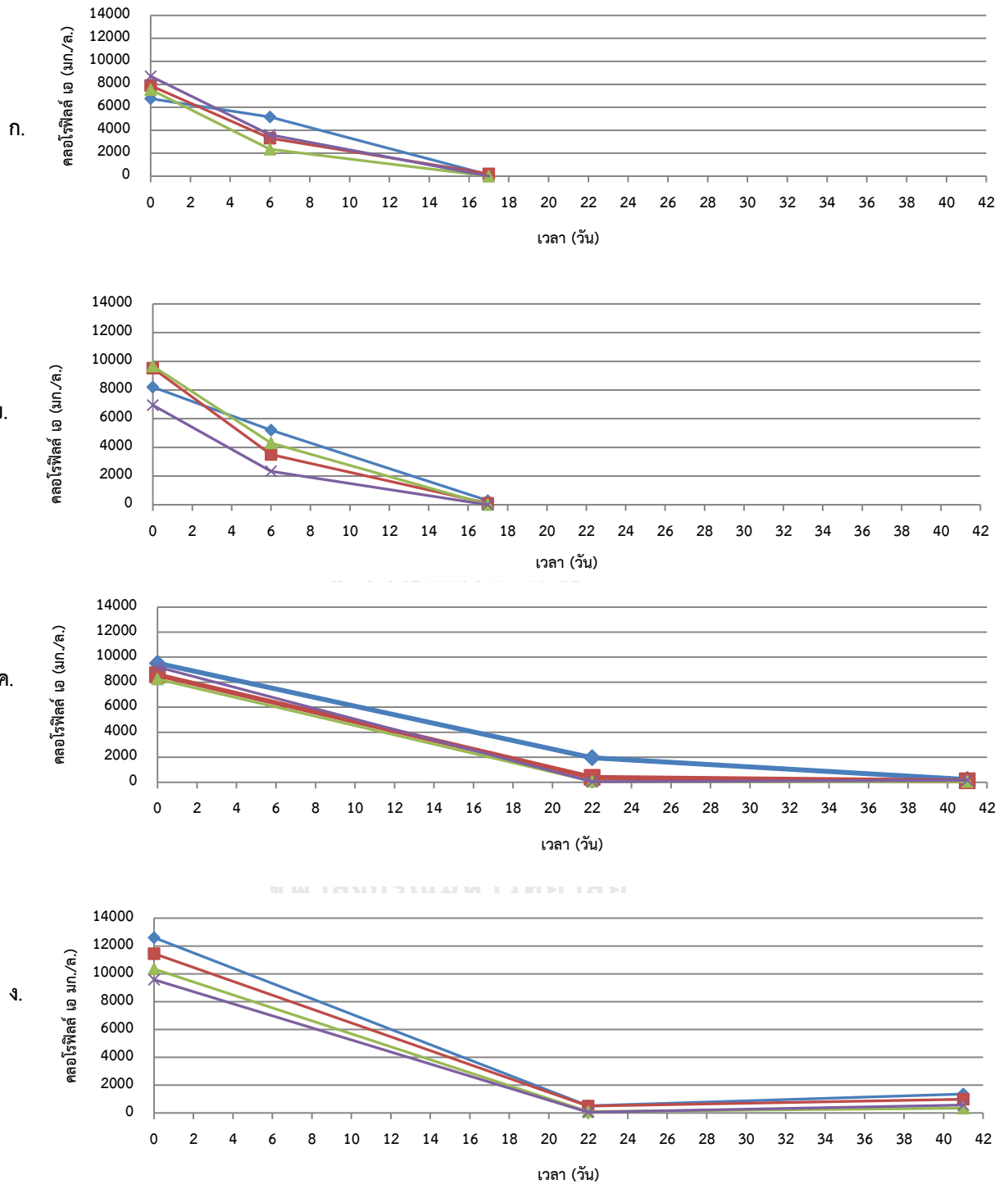
ในการทดลองช่วงที่ 2.2 เติมน้ำด้วยถังปฏิกรณ์ สูง 2 เมตร ซึ่งได้วิเคราะห์ค่าออกซิเจนละลายตามความลึกของถังปฏิกรณ์ โดยตรวจวิเคราะห์ที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตร แสดงดังภาพที่ 4-14 จากผลการทดลองพบว่าที่ความลึก 0.5 เมตร ระยะกักเก็บน้ำ 8 วัน มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 2.04 มก.ออกซิเจน/ล. สูงสุดเมื่อเทียบกับที่ความลึกน้ำและระยะเวลากักเก็บ ซึ่งที่ระยะกักเก็บน้ำ 8 วันมีค่าออกซิเจนละลาย เท่ากับ 1.37 มก.ออกซิเจน/ล. แต่ที่ระยะกักเก็บน้ำ 1 และ 2 วัน มีค่าออกซิเจนละลาย เท่ากับ 0.33 และ 0.37 มก.ออกซิเจน/ล. ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 และ 8 วัน สามารถที่จะกักเก็บจุลสาหร่ายได้นานกว่าจึงส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตภายในระบบได้มากกว่า เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงจึงผลิตออกซิเจนออกมาได้มากกว่าระยะเวลากักเก็บน้ำ 1 และ 2 วัน แต่ที่ความลึกตั้งแต่ 1 เมตรลงไป จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากที่ทุกระยะเวลากักเก็บ คาดว่าเกิดจากการที่แสงไม่สามารถส่งผ่านลงไปได้จึงส่งผลให้เจริญเติบโตของจุลสาหร่ายได้ไม่ดี จึงตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนได้น้อยมาก



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงออกซิเจนละลายแต่ละความลึกน้ำของแต่ละระยะเวลากักเก็บน้ำ

4.2.2.5 ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบ (Mixed liquor suspended solids; MLSS)

การทดลองนี้ในการเริ่มต้นระบบ เต็มตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่าย *Chlorella vulgaris* อัตราส่วน 5:1 เท่ากันที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำ การเดินระบบพบว่าจุลสาหร่ายที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำไหลหลุดออกไปกับน้ำขาออก ซึ่งหาปริมาณจุลสาหร่ายด้วยการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ แสดงดังรูปที่ 4-15 ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบเต็มจุลสาหร่ายที่ทุกระยะเวลากักเก็บน้ำ 1 , 2 , 4 และ 8 วัน เฉลี่ยทุกความลึกเท่ากับ $7,720.2 \pm 810.6$, $8,582.45 \pm 1274.20$, $8,888.10 \pm 581.38$ และ $10,993.82 \pm 1,318.02$ มก.คลอโรฟิลล์/ล. ซึ่งที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 1 และ 2 วัน ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 17 วัน จะเห็นได้ ว่าวันที่ 6 ของการทดลอง ค่าคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงจนเกือบหมดที่ทุกความลึกของถังปฏิกรณ์ เท่ากับ 79.4 ± 101.84 และ 101.85 ± 133.12 มก.คลอโรฟิลล์ เอ/ล. เมื่อตรวจวิเคราะห์จุลสาหร่ายของน้ำขาออกของระยะเวลากักเก็บ 1 และ 2 วัน ที่ได้ทำการเดินระบบผ่านไป 1 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เท่ากับ $5,954.8$ และ $1,944.4$ มก.คลอโรฟิลล์ เอ/ล. ซึ่งระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 และ 8 วัน ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 39 วัน จะเห็นได้ว่าค่าคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงจนเกือบหมดที่ทุกความลึกของถังปฏิกรณ์ เฉลี่ยเท่ากับ 135.94 ± 73.53 และ 815.72 ± 450.23 มก.คลอโรฟิลล์/ล. เมื่อตรวจวิเคราะห์จุลสาหร่ายของน้ำขาออกของระยะเวลากักเก็บ 4 และ 8 วัน ที่ได้ทำการเดินระบบผ่านไป 6 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เท่ากับ 7056.8 และ $13,718.5$ มก.คลอโรฟิลล์ เอ/ล. แต่จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 8 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์เหลือมากที่สุด คาดว่าที่ระยะกักเก็บน้ำ 8 วัน มีระยะเวลาเวลาที่กักเก็บจุลสาหร่ายอยู่ในระบบและเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตกว่าระยะเวลากักเก็บอื่นๆ



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ แต่ละความลึกน้ำของแต่ละระยะเวลากักเก็บน้ำ

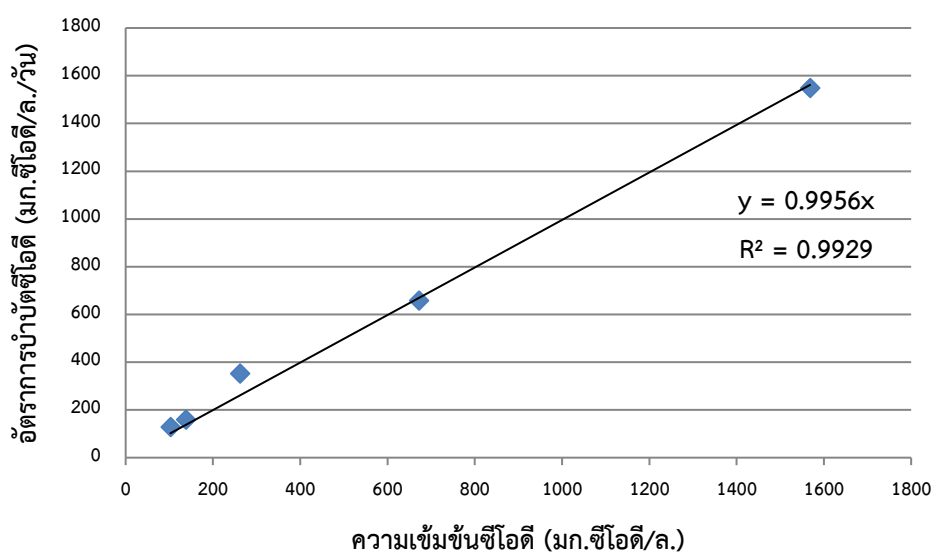
(ก) 1 วัน (ข) 2 วัน (ค) 4 วัน (ง) 8 วัน

โดยที่ความลึก ■ = 0.5 เมตร ■ = 1 เมตร ■ = 1.5 เมตร ■ = 2 เมตร

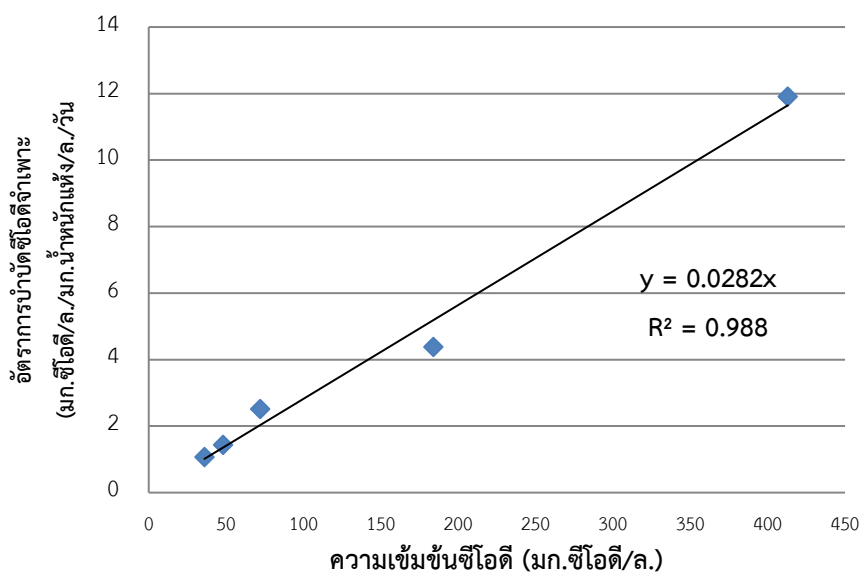
4.3 การทดลองช่วงที่ 3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่าง จุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

4.3.1 ค่าซีโอดี

จากผลการวิเคราะห์อัตราการบำบัดซีโอดีของจุลสาหร่ายกับตะกอนจุลชีพ ที่ความเข้มข้นซีโอดีที่แตกต่างกัน 5 ระดับคือ 50, 100, 200, 500 และ 1,000 มก.ซีโอดี/ล. จากความสัมพันธ์ของอัตราการบำบัดซีโอดีเทียบกับความเข้มข้นของซีโอดี แสดงในรูปที่ 4-16 จากการวิเคราะห์พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง มีแนวโน้มตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (k_1) ได้จากความชันของกราฟซึ่งมีค่า 0.99 ต่อวัน นอกจากนี้ได้ศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเทียบกับความเข้มข้นของซีโอดี แสดงในภาพที่ 4-17 ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะของตะกอนจุลชีพได้จากความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0282 ต่อวัน



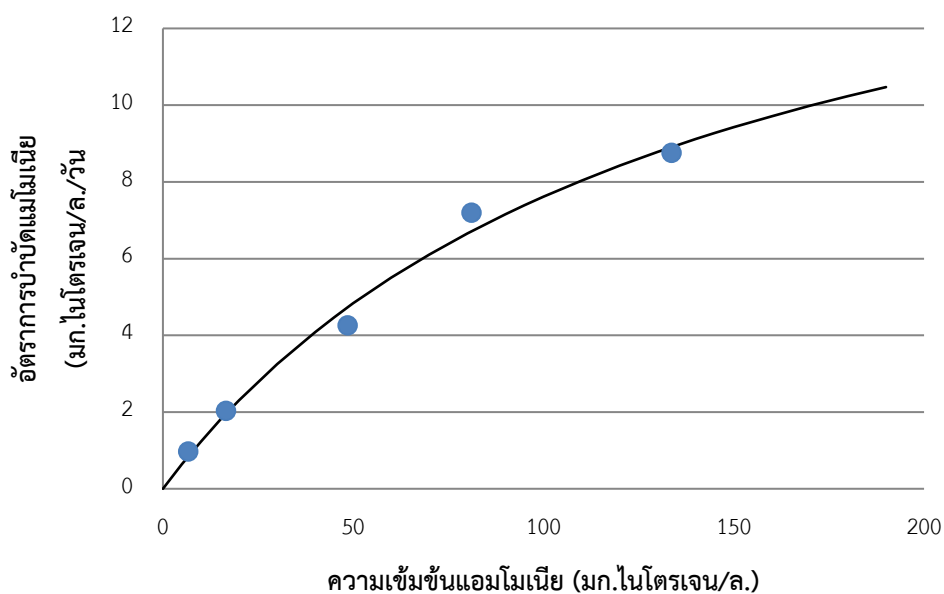
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงอัตราการบำบัดซีโอดีต่อความเข้มข้นซีโอดี



รูปที่ 4-17 กราฟแสดงอัตราการบำบัดซีไอทีจำเพาะต่อความเข้มข้นซีไอที

4.3.2 ค่าแอมโมเนีย

จากผลการวิเคราะห์อัตราการบำบัดแอมโมเนียของจุลสาหร่ายกับตะกอนจุลชีพ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียที่แตกต่างกัน 5 ระดับคือ 5, 10, 20, 50 และ 100 มก.ไนโตรเจน/ล. จากความสัมพันธ์ของอัตราการบำบัดแอมโมเนียเทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนีย แสดงในรูปที่ 4-18 จากการวิเคราะห์พบว่าความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของความเข้มข้นแอมโมเนียที่สูงขึ้น แต่จะเริ่มคงที่เมื่อความเข้มข้นแอมโมเนียสูงขึ้นมาก และได้กราฟเป็นไปตามจลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod kinetics) โดยมีค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด (k_m) เท่ากับ 17.95 ± 3.5 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน และค่าความเข้มข้นของซับสเตรท (S) ที่อัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด (k_s) เท่ากับ 135 ± 44.47 มก.ไนโตรเจน/ล.



รูปที่ 4-18 กราฟแสดงอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความเข้มข้นแอมโมเนีย

จากวิเคราะห์หาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ ซึ่งค่าคงที่ของอัตราบำบัดที่ได้จากการวิเคราะห์จากการทดลอง จะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเหมาะสมกับน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นน้ำเสียซีโอดีต่ำ โดยที่จะสามารถคำนวณหาระยะเวลากักเก็บน้ำในระบบได้ เมื่อทราบถึงระยะเวลากักเก็บน้ำและอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบบำบัด ก็จะคำนวณหาปริมาตรและขนาดของระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ศึกษาสภาวะในการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะมีแสงและไม่มีแสง

- จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการบำบัดซีโอดีที่เติมจุลสาหร่ายร่วมกับตะกอนจุลชีพที่สภาวะให้แสงมีอัตราการบำบัดสูงสุด คิดเป็น 1.68 เท่าของสภาวะที่ไม่ให้แสง และไม่พบปริมาณซีโอดีที่เหลือ (nbCOD) ในชุดการทดลองที่เติมจุลสาหร่าย ในขณะที่สภาวะที่ไม่ให้แสงมีปริมาณซีโอดีที่เหลือ 77.56 มก.ซีโอดี/ล.

5.1.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพต่อระยะเวลาเก็บกักน้ำ

- จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 1 และ 2 วัน ใช้เวลาดำเนินการทดลองทั้งหมด 15 วัน และที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 และ 8 วัน ใช้เวลาดำเนินการทดลองทั้งหมด 39 วัน ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1, 2, 4 และ 8 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70.52 ± 3.80 , 83.49 ± 2.59 , 90.63 ± 2.48 และ 92.53 ± 2.84 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 วัน เป็นระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง

5.1.3 ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างจุลสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

- จากการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของอัตราการบำบัดซีโอดีเทียบกับความเข้มข้นของซีโอดีเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ($k_1 = 0.9956$ ต่อวัน ($r^2 = 0.99$))

- ค่าจลนพลศาสตร์ของอัตราการบำบัดแอมโมเนียเทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียเป็นไปตามปฏิกิริยาโมนอด (Monod kinetics) $k_m = 17.95 \pm 3.5$ มก.ไนโตรเจน/ล./วัน $K_s = 135.79 \pm 44.47$ มก.ไนโตรเจน/ล.

5.1.4 กลไกสำคัญที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่าย

- จากการศึกษาในระบบบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่าย พบว่าการบำบัดซีโอดีที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดโดยตะกอนจุลชีพเป็นหลัก แต่การเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายน่าจะเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นหลักและไม่พบปริมาณซีโอดีที่เหลือ (nbCOD) จากการ

บำบัดโดยจุลสาหร่าย ในส่วนของการบำบัดแอมโมเนียภายในระบบจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนในการเจริญเติบโตของทั้งตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งภายในระบบไม่สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้น เนื่องด้วยปัจจัยต่างๆ รวมถึงความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในระบบที่มีปริมาณน้อยมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาและปรับปรุงถึงปฏิภณในการปล่อยน้ำทิ้งเนื่องจากการหลุดออกตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายไหลหลุดออกไปกับน้ำทิ้ง
- ควรมีการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงเพื่อทดลองระบบนี้
- งานวิจัยนี้ให้แสงสว่างจากหลอดไฟในการทดลอง ควรใช้แสงจากธรรมชาติในการทดลองและศึกษาในสภาวะจริง



ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด โดยวิธีทำให้แห้งที่ 103-105 °C

(Rand, Greenberg และ Taras, 1976)

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมติมีน้ำหนัก A กรัม วางบนถ้วยหรือฟอยล์
3. นำกระดาษกรองมาวางไว้บนชุดกรวยกรองบุชเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้ดูตุน้ำออกจนแห้ง ทิ้งน้ำล้างไป
4. เทน้ำตัวอย่างลงกระดาษกรองโดยค่อยๆเทอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวง เทลงกรอง และฉีดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุชเนอร์รวมทั้งบนกระดาษกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูตุน้ำออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
5. นำกระดาษกรองที่ผ่านการกรองแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 °C อย่างน้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมติให้น้ำหนัก B กรัม

การคำนวณ

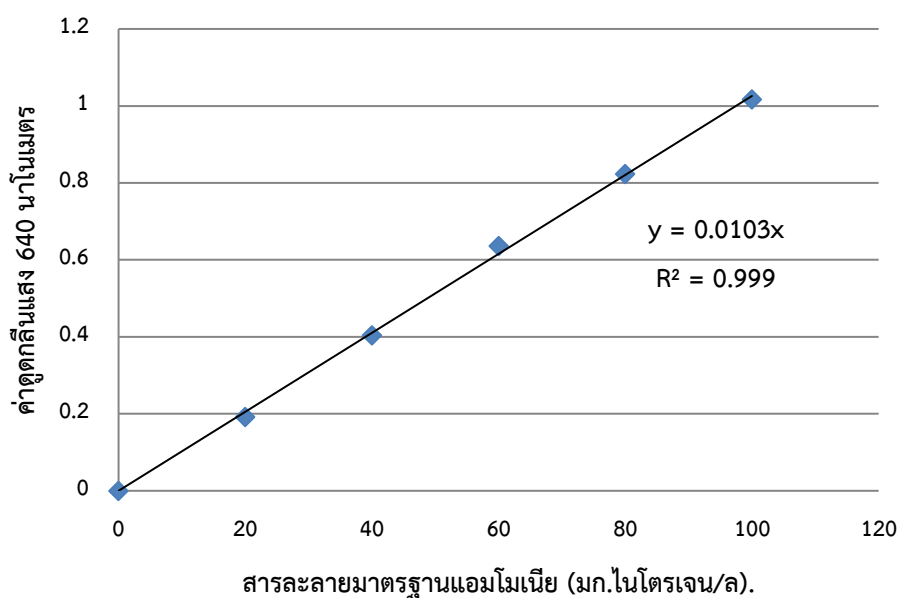
$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)} = \frac{(B-A) \cdot 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง}}$$

โดย A = น้ำหนักกระดาษกรองอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยวิธีซาลิไซเลต (Bower และ Holm-Hansen, 1980)

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:50 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. ใส่สารละลายซาลิไซเลตปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร
3. ใส่สารละลายผสมอัลคาไลน์ซีเตรตกับไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง
4. นำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าดูดกลืนแสง 640 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานแอมโมเนีย
5. ทำกราฟมาตรฐานสารละลายแอมโมเนียตามขั้นตอนที่ 1-4 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย โดยเตรียมจากแอมโมเนียคลอไรด์ ความเข้มข้น 0 2 5 10 20 และ 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



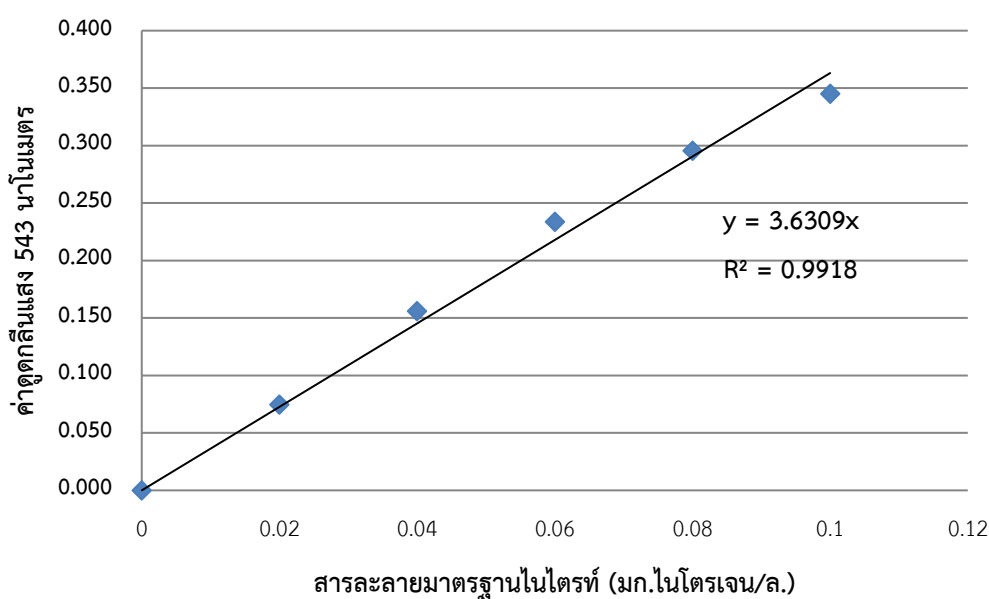
การวิเคราะห์ไนโตรเจนในไตรเจน โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Apha, 2005)

วิธีเตรียมสารเคมี

1. น้ำยาทำให้เกิดสี เตรียมจาก 85% ของกรดฟอสฟอริก 10 มิลลิลิตร ซัลฟานิลาไมด์ 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร แล้วเติมเอน -(-1-แนฟทิล) เอทิลลีนไดอะมีนไฮโดรคลอไรด์ 0.1 กรัม ผสมให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

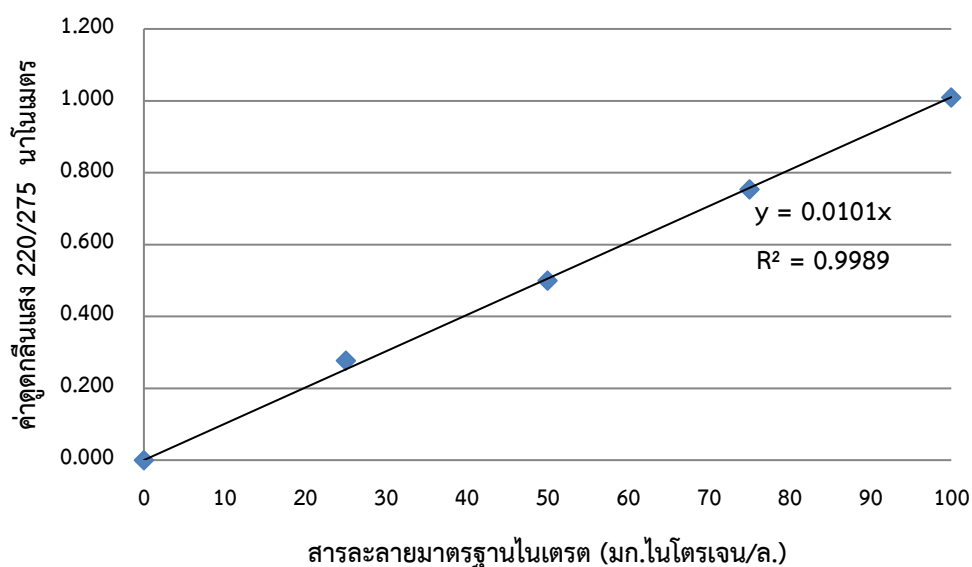
วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:50 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. ใส่ตัวอย่างทำให้เกิดสีปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร นำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานไนไตรต์
3. ทำกราฟมาตรฐานไนไตรต์ตามขั้นตอนที่ 1-2 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานไนไตรต์ โดยเตรียมจากโซเดียมไนไตรต์ ความเข้มข้น 0 1 2 3 4 และ 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



การวิเคราะห์ไนเตรตไนโตรเจน โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Strickland และ Parson, 1972)

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:10 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 ลบด้วยสองเท่าของค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานไนเตรต
3. ทำกราฟมาตรฐานไนเตรตตามขั้นตอนที่ 1-2 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานไนเตรต ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไนเตรต ความเข้มข้น 0 2.5 10 20 และ 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีละลายน้ำในหน่วย มก.ซีไอดี/ล. แต่ละชุดการทดลองในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ชุดการทดลองที่ 1									
วัน/เดือน/ปี	เวลา	ถึง 1	ถึง 2	ถึง 3	ถึง 4	ถึง 5	ถึง 6	ถึง 7	ถึง 8
12/01/62	0.00	880	880.0	893.3	893.3	893.3	866.7	893.3	893.3
13/01/62	0.75	840.0	460.0	380.0	800.0	720.0	540.0	440.0	853.3
14/01/62	1.88	470.4	176.4	313.6	411.6	352.8	372.4	431.2	411.6
15/01/62	3.00	372.4	176.4	117.6	380	313.6	274.40	215.60	235.20
16/01/62	3.90	280.0	0.0	0.0	300	260	160	200	240
17/02/62	4.85	100.0	0.0	0.0	120	140	80	120	140
18/01/62	5.77	80.0	0.0	0.0	80	120	80	120	120
23/01/62	10.79	39.2	0.0	0.0	39.2	78.4	78.4	78.4	117.6
24/01/62	11.75	0.0	0.0	0.0	39.2	78.4	78.4	39.2	78.4
ชุดการทดลองที่ 2									
4/2/2019	0.0	929.0	938.7	929.0	948.4	900.0	958.1	900.0	938.7
5/2/2019	0.8	783.9	493.5	387.1	919.4	851.6	512.9	571.0	919.4
6/2/2019	1.8	565.3	317.4	277.7	515.7	476.0	416.5	347.1	595.0
7/2/2019	2.9	476.0	158.7	99.2	575.2	476.0	446.3	406.6	545.5
8/2/2019	3.8	331.7	58.5	39.0	331.7	253.7	292.7	214.6	341.5
9/2/2019	5.2	234.1	29.3	19.5	253.7	224.4	273.2	234.1	292.7
10/2/2019	5.8	190.8	0.0	0.0	255.7	196.7	216.4	161.3	245.9
11/2/2019	6.8	127.9	0.0	0.0	157.4	255.7	206.6	118.0	147.5
12/2/2019	7.8	100.0	0.0	0.0	140.0	100.0	110.0	110.0	140.0
16/2/2019	12.1	50.0	0.0	0.0	80.0	70.0	100.0	110.0	100.0

ตารางที่ ข-2 ค่าแอมโมเนียละลายน้ำในหน่วย มก.ไนโตรเจน/ล. แต่ละชุดการทดลองในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ชุดการทดลองที่ 1									
วัน/เดือน/ปี	เวลา	ถัง 1	ถัง 2	ถัง 3	ถัง 4	ถัง5	ถัง6	ถัง7	ถัง8
12/01/62	0.00	106.9	134.3	183.0	111.6	123.1	164.9	185.1	121.9
13/01/62	0.75	91.4	126.3	174.0	95.0	107.5	159.7	174.0	113.5
14/01/62	1.88	71.5	113.4	164.6	83.5	86.2	145.0	169.4	80.9
15/01/62	3.00	69.8	105.0	148.6	82.6	83.5	138.0	166.0	80.4
16/01/62	3.90	63.9	100.4	142.4	71.0	58.4	138.0	164.9	78.3
17/02/62	4.85	54.9	96.7	140.0	57.9	57.9	123.4	159.5	50.6
18/01/62	5.77	39.5	84.0	138.3	56.7	46.3	106.4	134.0	37.2
23/01/62	10.79	10.2	28.8	50.5	15.8	15.6	48.7	78.6	23.7
24/01/62	11.75	3.8	25.6	46.8	14.8	13.6	47.9	67.5	21.9
ชุดการทดลองที่ 2									
4/02/62	0.0	71.46	113.20	113.98	83.50	75.53	113.01	219.22	102.72
5/02/62	0.8	62.52	95.73	109.71	83.11	67.38	112.43	184.85	100.78
6/02/62	1.8	61.94	92.62	100.97	81.75	61.17	110.49	183.50	90.49
8/02/62	3.8	51.26	77.09	96.31	71.26	60.39	106.02	183.88	80.78
10/02/62	5.8	52.23	69.90	84.66	69.32	60.19	94.37	162.14	77.86
12/02/62	7.8	40.97	60.97	84.66	67.77	58.83	93.79	141.75	74.56
16/02/62	12.1	34.56	59.81	79.81	66.41	50.49	85.63	141.55	70.49

ตารางที่ ข-3 ค่าไนเตรตในหน่วย มก.ไนโตรเจน/ล. แต่ละชุดการทดลองในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ชุดการทดลองที่ 1									
วัน/เดือน/ปี	วัน	ถัง 1	ถัง 2	ถัง 3	ถัง 4	ถัง 5	ถัง 6	ถัง 7	ถัง 8
12/01/62	0.00	0.28	3.48	3.38	0.08	0	8.18	6.48	0
13/01/62	0.75	0	0.68	0.68	0	0	0	0	0
14/01/62	1.88	0	2.38	0	0	0	0	0	0
15/01/62	3.00	0	0	0	0	0	0	0	0
16/01/62	3.90	0	0	0	0	0	0	0	0
17/02/62	4.85	0	0	0	0	0	0	0	0
18/01/62	5.77	0	0	0	0	0	0	0	0

การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ตารางที่ ข-4 ค่าซีไอดีละลายน้ำในหน่วย มก.ซีไอดี/ล. แต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1						
วัน/เดือน/ปี	วัน	ถัง 1	ถัง 2	ถัง 3	ถัง 4	ถัง 5
28/03/62	0.0	80.00	124.00	228.00	530.00	1024.00
29/03/62	0.7	36.00	44.00	84.00	250.00	460.00
30/03/62	2.1	20.00	28.00	32.00	160.00	400.00
31/03/62	3.0	8.00	20.00	28.00	60.00	320.00
1/04/62	3.8	0.00	7.90	43.64	39.67	222.15
2/04/62	4.9	0.00	7.93	39.67	39.67	134.88
3/04/62	5.7	0.00	5.95	39.67	31.74	126.94
4/04/62	6.8	0.00	1.92	34.56	15.36	76.80
ชุดการทดลองที่ 2						
12/04/62	0.00	78	130	206	464	900
12/04/62	0.13	76	120	204	456	880
12/04/62	0.25	68	108	188	440	860
12/04/62	0.38	60	86	144	432	850
12/04/62	0.50	36	48	72	336	800
13/04/62	0.63	35	43	67	255	590
13/04/62	0.75	31	31	59	185	413
13/04/62	0.90	28	31	45	173	384
13/04/62	1.01	24	31	43	161	315
15/04/62	3.41	24	28	28	55	189
16/04/62	4.21	20	28	26	55	142
18/04/62	6.07	18	22	22	24	79
19/04/62	6.93	16	20	20	20	67

ตารางที่ ข-5 ค่าแอมโมเนียละลายน้ำในหน่วย มก.ไนโตรเจน/ล. แต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1						
วัน/เดือน/ปี	วัน	ถึง 1	ถึง 2	ถึง 3	ถึง 4	ถึง 5
28/03/62	0.0	6.70	17.05	49.53	84.01	129.67
29/03/62	0.7	6.30	14.66	43.40	76.51	125.22
30/03/62	2.1	4.44	11.79	37.34	63.36	120.22
31/03/62	3.0	3.48	9.58	37.12	60.22	113.45
1/04/62	3.8	3.37	9.23	35.60	55.17	108.73
2/04/62	4.9	1.84	8.05	31.34	45.30	104.83
3/04/62	5.7	1.36	5.63	21.83	40.45	83.66
4/04/62	6.8	0.00	1.90	19.92	34.02	66.10
ชุดการทดลองที่ 2						
12/04/62	0.00	7.64	19.47	23.65	43.48	146.08
12/04/62	0.13	7.14	19.30	23.47	42.75	142.17
12/04/62	0.25	6.94	19.09	21.81	41.90	144.57
12/04/62	0.38	6.79	18.92	23.49	44.95	143.87
12/04/62	0.50	6.90	18.42	20.04	42.23	147.88
13/04/62	0.63	6.80	18.62	23.53	42.30	139.07
13/04/62	0.75	6.63	18.56	23.16	43.18	130.96
13/04/62	0.90	6.43	17.82	22.58	41.00	129.15
13/04/62	1.01	6.31	17.94	21.25	38.42	131.26
15/04/62	3.41	4.75	16.53	18.16	36.02	121.65
16/04/62	4.21	4.62	14.81	15.78	32.61	111.23
18/04/62	6.07	2.88	14.94	15.44	27.21	110.23
19/04/62	6.93	2.88	14.65	13.63	25.08	85.20

ตารางที่ ข-6 ค่าไนเตรดละลายน้ำในหน่วย มก.ไนโตรเจน/ล. แต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1						
วัน/เดือน/ปี	วัน	ถึง 1	ถึง 2	ถึง 3	ถึง 4	ถึง 5
28/03/62	0.0	13.28	12.18	11.58	18.18	11.98
29/03/62	0.7	10.48	7.78	12.08	9.18	0.13
30/03/62	2.1	9.78	8.38	0.88	-0.92	-0.92
31/03/62	3.0	9.38	3.18	0.88	0.08	0.78
1/04/62	3.8	9.08	0.08	0.78	0.0	0.38
2/04/62	4.9	3.08	0.0	0.0	0.0	0.0
3/04/62	5.7	7.08	0.0	0.0	0.0	0.0
4/04/62	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ชุดการทดลองที่ 2						
12/04/62	0.00	2.40	3.01	3.61	2.00	3.61
13/04/62	0.63	0.20	0.40	0.00	0.20	0.20
15/04/62	3.41	0.40	0.60	0.60	0.60	0.40
16/04/62	4.21	0.20	0.60	0.20	0.00	0.20
18/04/62	6.07	0.20	0.60	0.40	0.26	0.60
19/04/62	6.93	0.20	0.80	0.20	0.00	0.00

ตารางที่ ข-7 ค่าเอ็มแอลเอสเอสของตะกอนจุลชีพและจุลสาหร่ายหน่วย มก.เอสเอส/ล. แต่ละชุดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี	วัน	ถัง 1	ถัง 2	ถัง 3	ถัง 4	ถัง 5
12/04/62	0.00	120	110	140	150	130
12/04/62	0.13	120	120	140	170	130
12/04/62	0.25	120	120	140	170	140
12/04/62	0.38	120	120	140	180	200
12/04/62	0.50	130	120	150	180	230
13/04/62	0.63	130	120	150	200	260
13/04/62	0.75	130	130	160	200	260
13/04/62	1.01	130	130	160	220	320
15/04/62	3.41	140	150	170	220	340
16/04/62	4.21	140	170	170	220	340
18/04/62	6.07	150	180	180	240	350
19/04/62	6.93	150	190	190	260	360

ตารางที่ ข-8 ค่าเอ็มแอลเอสเอสของตะกอนจุลชีพ มก.เอสเอส/ล. แต่ละชุดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี	วัน	ถัง 1	ถัง 2	ถัง 3	ถัง 4	ถัง 5
12/04/62	0.00	118.72	108.73	138.80	148.99	129.04
12/04/62	0.13	118.65	118.65	138.73	168.87	128.96
12/04/62	0.25	118.64	118.64	138.73	168.83	138.87
12/04/62	0.38	118.58	118.59	138.72	178.71	198.84
12/04/62	0.50	128.56	118.47	148.65	178.65	228.76
13/04/62	0.63	128.55	118.32	148.60	198.60	257.94
13/04/62	0.75	128.45	128.08	148.29	198.01	256.59
13/04/62	1.01	128.35	127.89	157.61	217.70	315.67
15/04/62	3.41	137.76	146.84	155.58	212.22	332.65
16/04/62	4.21	137.71	166.69	163.88	209.35	330.71
18/04/62	6.07	147.61	176.64	163.76	228.01	326.73
19/04/62	6.93	147.56	186.61	173.45	247.38	335.92

ตารางที่ ข-9 ค่าเอ็มแอลเอสเอสของจุลสารหรัาย มก.เอสเอส/ล. แต่ละชุดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี	วัน	ถัง 1	ถัง 2	ถัง 3	ถัง 4	ถัง 5
12/04/62	0.00	1.28	1.27	1.20	1.01	0.96
12/04/62	0.13	1.35	1.35	1.27	1.13	1.04
12/04/62	0.25	1.36	1.36	1.27	1.17	1.13
12/04/62	0.38	1.42	1.41	1.28	1.29	1.16
12/04/62	0.50	1.44	1.53	1.35	1.35	1.24
13/04/62	0.63	1.45	1.68	1.40	1.40	2.06
13/04/62	0.75	1.55	1.92	1.71	1.99	3.41
13/04/62	1.01	1.65	2.11	2.39	2.30	4.33
15/04/62	3.41	2.24	3.16	4.42	7.78	7.35
16/04/62	4.21	2.29	3.31	6.12	10.65	9.29
18/04/62	6.07	2.39	3.36	6.24	11.99	23.27
19/04/62	6.93	2.44	3.39	6.55	12.62	24.08



การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วม

ระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ตารางที่ ข-10 ค่าซีโอดีละลายน้ำ มก.ซีโอดี/ล. ที่ระยะเวลาเก็บน้ำที่ 4 วัน และ 8 วัน

วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลาเก็บน้ำ	
			4 วัน	8 วัน
20/02/62	0.0	400.0	94.00	94.00
24/02/62	4.0	468.0	89.00	90.00
26/02/62	5.8	432.0	90.00	92.00
28/02/62	7.9	437.4	91.29	97.10
2/03/62	9.8	360.0	95.16	99.03
4/03/62	11.4	360.0	88.00	92.00
6/03/62	13.4	416.0	91.80	92.00
8/03/62	15.4	421.1	89.47	96.42
10/03/62	17.4	332.6	94.74	89.47
12/03/62	19.4	303.2	93.68	91.58
14/03/62	21.4	417.0	90.16	93.11
16/03/62	23.4	330.5	88.20	93.11
18/03/62	25.4	367.7	90.62	90.62
21/03/62	28.4	375.2	90.62	92.50
25/03/62	32.4	368.0	88.00	92.00
27/03/62	34.4	328.0	88.00	90.00
31/03/62	38.4	336.0	88.00	88.00

ตารางที่ ข-11 ค่าซีโอดีละลายน้ำ มก.ซีโอดี/ล. ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำที่ 1 วัน และ 2 วัน

วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลาพักเก็บน้ำ	
			1 วัน	2 วัน
21/04/62	0.0	396.2	70.00	86.67
23/04/62	1.7	381.0	71.43	84.76
25/04/62	3.8	388.6	64.76	85.71
27/04/62	5.9	423.8	63.91	82.66
29/04/62	7.8	412.5	74.22	77.97
30/04/62	9.0	423.8	68.59	81.72
1/05/62	9.7	408.8	71.41	82.66
3/05/62	11.3	370.9	74.55	83.64
5/05/62	13.3	385.5	74.55	82.73
7/05/62	15.3	396.4	71.82	86.36

ตารางที่ ข-12 ค่าแอมโมเนียละลายน้ำ มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 4 วัน และ 8 วัน

วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลากักเก็บน้ำ	
			4 วัน	8 วัน
20/02/62	0.0	48.50	32.91	33.06
24/02/62	4.0	44.34	33.15	40.46
26/02/62	5.8	52.28	34.82	37.03
28/02/62	7.9	44.48	33.94	36.88
2/03/62	9.8	45.61	34.97	34.72
4/03/62	11.4	38.60	29.57	27.37
6/03/62	13.4	47.03	23.05	16.23
8/03/62	15.4	45.66	25.94	24.18
10/03/62	17.4	42.37	27.56	22.76
12/03/62	19.4	43.01	31.73	27.51
14/03/62	21.4	43.45	30.85	21.43
16/03/62	23.4	37.15	34.60	22.24
18/03/62	25.4	47.28	34.45	22.88
21/03/62	28.4	45.71	33.30	30.74
25/03/62	32.4	44.65	31.90	31.05
27/03/62	34.4	41.44	31.22	29.89
31/03/62	38.4	42.23	31.02	28.86

ตารางที่ ข-13 ค่าแอมโมเนียละลายน้ำ มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1 วัน และ 2 วัน

วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลากักเก็บน้ำ	
			1 วัน	2 วัน
21/04/62	0.0	39.50	35.90	52.48
23/04/62	1.7	46.30	38.89	51.45
25/04/62	3.8	48.31	37.89	49.24
27/04/62	5.9	41.17	31.71	28.91
29/04/62	7.8	46.37	35.02	38.45
30/04/62	9.0	35.19	35.95	38.65
1/05/62	9.7	46.67	39.50	34.62
3/05/62	11.3	47.47	39.97	38.06
5/05/62	13.3	40.31	34.65	32.52
7/05/62	15.3	42.72	34.53	37.52

ตารางที่ ข-14 ค่าไนเตรต มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 4 วัน และ 8 วัน

วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลากักเก็บน้ำ	
			4 วัน	8วัน
20/02/62	0.0	0.00	0.20	0.10
24/02/62	4.0	0.00	0.00	0.00
26/02/62	5.8	0.05	0.04	0.00
28/02/62	7.9	0.04	0.00	0.00
2/03/62	9.8	0.04	0.16	0.00
4/03/62	11.4	0.06	0.00	0.08
6/03/62	13.4	0.08	0.04	0.04
8/03/62	15.4	0.00	0.00	0.00
10/03/62	17.4	0.04	0.00	0.00
12/03/62	19.4	0.00	0.08	0.00
14/03/62	21.4	0.00	0.00	0.00
16/03/62	23.4	0.00	0.00	0.00
18/03/62	25.4	0.04	0.08	0.06
21/03/62	28.4	0.04	0.04	0.04
25/03/62	32.4	0.12	0.04	0.04
31/03/62	38.4	0.05	0.08	0.04

ตารางที่ ข-15 ค่าไนเตรต มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1 วัน และ 2 วัน

วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลากักเก็บน้ำ	
			1 วัน	2 วัน
21/04/62	0.0	0.00	3.51	3.71
23/04/62	1.7	0.50	0.10	0.20
25/04/62	3.8	0.40	0.10	0.80
27/04/62	5.9	0.40	0.50	0.00
29/04/62	7.8	0.40	0.10	0.40
30/04/62	9.0	0.30	0.60	0.00
1/05/62	9.7	0.50	0.00	0.20
3/05/62	11.3	0.30	0.40	0.00
5/05/62	13.3	0.10	0.00	0.00
7/05/62	15.3	0.36	0.59	0.00

ตารางที่ ข-16 ค่าไนโตรเจน มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 4 วัน และ 8 วัน

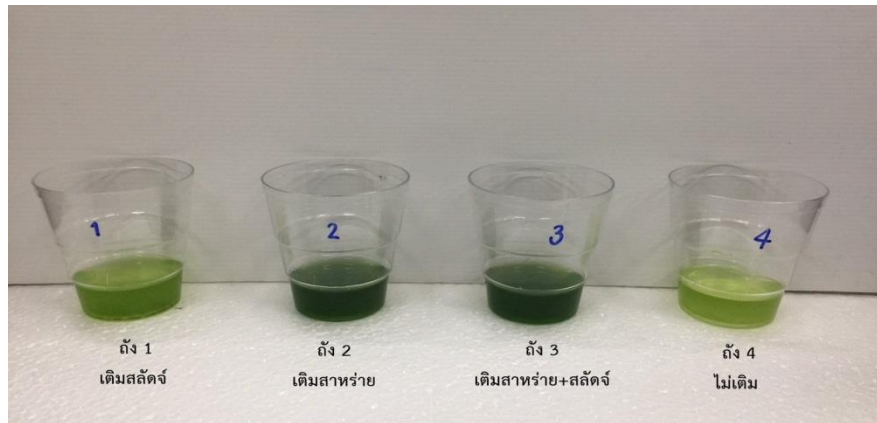
วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลากักเก็บน้ำ	
			4 วัน	8 วัน
20/02/62	0.0	0.0	1.90	2.48
24/02/62	4.0	0.0	0.00	0.22
26/02/62	5.8	0.0	0.00	0.39
28/02/62	7.9	0.0	0.00	0.74
2/03/62	9.8	0.0	0.00	0.00
4/03/62	11.4	0.0	0.00	0.00
6/03/62	13.4	0.0	0.00	0.00
8/03/62	15.4	0.0	0.00	0.00
10/03/62	17.4	0.0	0.00	0.00
12/03/62	19.4	0.0	0.00	0.00
14/03/62	21.4	0.0	0.00	0.00
16/03/62	23.4	0.0	0.00	0.00
18/03/62	25.4	0.0	0.00	0.00
21/03/62	28.4	0.0	0.00	0.00
25/03/62	32.4	0.0	0.00	0.00
27/03/62	34.4	0.0	0.00	0.00
31/03/62	38.4	0.0	0.00	0.00

ตารางที่ ข-17 ค่าไนโตรเจน มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลาเก็บน้ำที่ 1 วัน และ 2 วัน

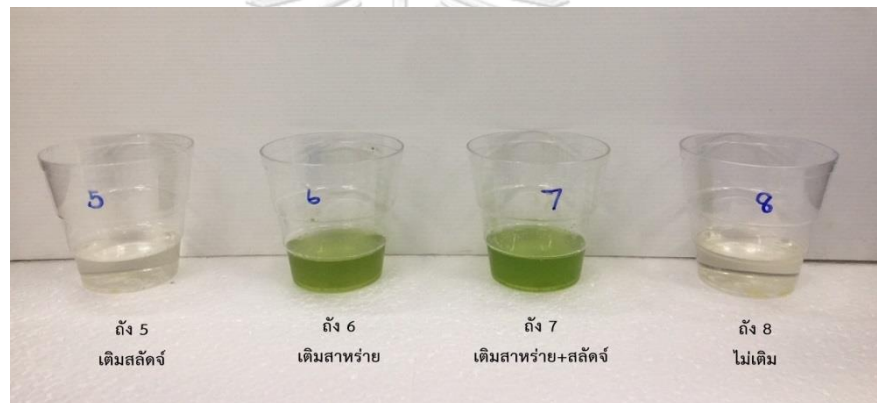
วัน/เดือน/ปี	วัน	น้ำเข้า	ระยะเวลากักเก็บน้ำ	
			1 วัน	2 วัน
21/04/62	0.0	0.00	0.28	0.55
23/04/62	1.7	0.03	0.00	0.06
25/04/62	3.8	0.00	0.03	0.00
27/04/62	5.9	0.03	0.00	0.00
29/04/62	7.8	0.00	0.00	0.00
30/04/62	9.0	0.03	0.03	0.00
1/05/62	9.7	0.00	0.00	0.00
3/05/62	11.3	0.00	0.00	0.00
5/05/62	13.3	0.00	0.00	0.00

การทดลองครั้งที่ 1 การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ก.



ข.



รูปที่ ข-1 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากแต่ละชุดการทดลองที่เวลา 12 วัน

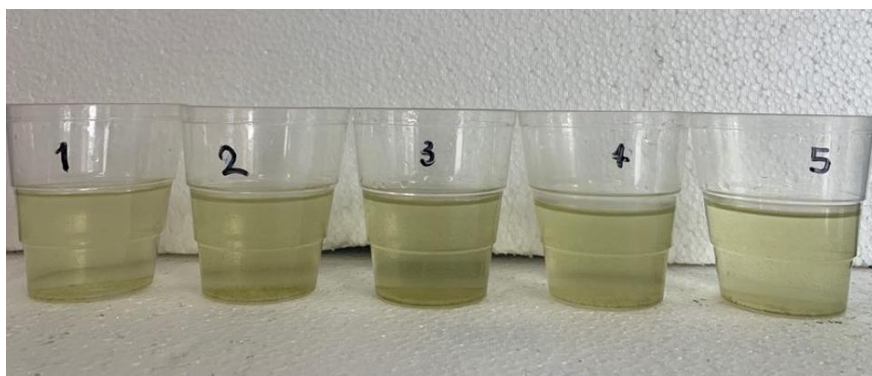
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก. สภาวะที่มีแสง ข. สภาวะที่ไม่มีแสง

การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วมระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

ก.



ข.



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ ข-2 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากแต่ละชุดการทดลองที่ความเข้มข้นซีไอดีต่างๆ

ก. ก่อนเริ่มการทดลอง ข. หลังเริ่มการทดลอง

การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสถานะในการบำบัดน้ำเสียร่วมของสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ

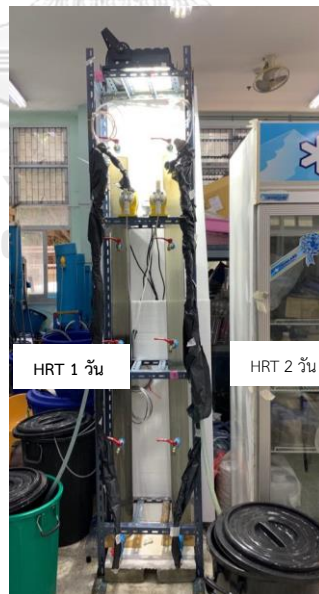
การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่เก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียร่วม

ระหว่างสาหร่ายและตะกอนจุลชีพ



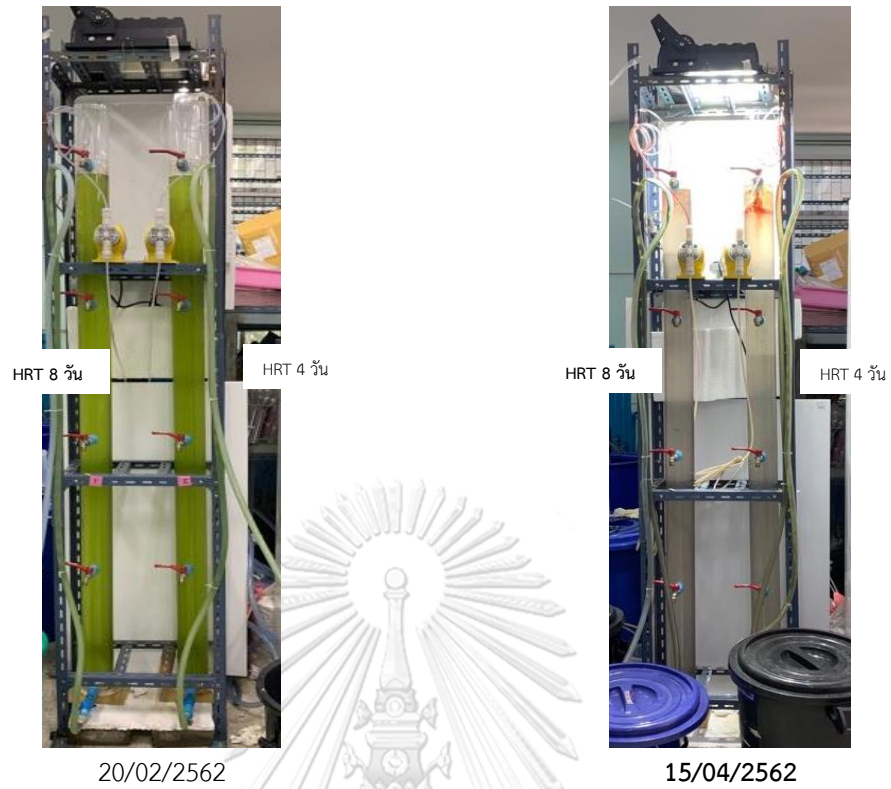
20/04/2562

22/04/2562



27/04/2562

รูปที่ ข-3 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากแต่ละชุดการทดลองระยะกักเก็บน้ำ 1 และ 2 วัน



รูปที่ ข-4 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากแต่ละชุดการทดลองระยะกักเก็บน้ำ 4 และ 8 วัน

บรรณานุกรม

- Åmand, L., Olsson, G. and Carlsson, B. 2013. Aeration control—a review. Water Science and Technology 67(11): 2374-2398.
- Anbalagan, A., Schwede, S., Lindberg, C.-F. and Nehrenheim, E. 2016. Influence of hydraulic retention time on indigenous microalgae and activated sludge process. Water research 91: 277-284.
- Andrews, J. F. 1968. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. Biotechnology and Bioengineering 10(6): 707-723.
- Apha, A. 2005. WEF, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater 21: 258-259.
- Association, A. P. H. and Association, A. W. W., 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. American public health association.
- Barghbani, R., Rezaei, K. and Javanshir, A. 2012. Investigating the effects of several parameters on the growth of *Chlorella vulgaris* using Taguchi's experimental approach. International Journal of Biotechnology for Wellness Industries 1(2): 128-133.
- Becker, E. W. and Venkataraman, L., 1982. Biotechnology and Exploitation of Algae: The Indian Approach; a Comprehensive Report on the Cultivation and Utilization of Microalgae Performed at the Central Food Technological Research Institute, Mysore, India Under Indo-German Collaboration (1973-1981) and the All India Coordinated Project on Algae (1976-1981).
- Benemann, J., Koopman, B., Weissman, J., Eisenberg, D. and Goebel, R. 1980. Development of microalgae harvesting and high-rate pond technologies in California. Algae biomass: production and use [sponsored by the National Council for Research and Development, Israel and the Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF), Munich, Germany]; editors, Gedaliah Shelef, Carl J.

Soeder.

- Borowitzka, M. A., 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters. Progress in industrial microbiology. Elsevier. 35: 313-321.
- Bower, C. E. and Holm-Hansen, T. 1980. A salicylate–hypochlorite method for determining ammonia in seawater. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 37(5): 794-798.
- Canovas, S., Picot, B., Casellas, C., Zulkifi, H., Dubois, A. and Bontoux, J. 1996. Seasonal development of phytoplankton and zooplankton in a high-rate algal pond. Water Science and Technology 33(7): 199-206.
- Chaiwong, C., Koottatep, T., Surinkul, N. and Polprasert, C. 2018. Performance and kinetics of algal-bacterial photobioreactor (AB-PBR) treating septic tank effluent. Water Science and Technology 78(11): 2355-2363.
- Chen, C. Y. and Durbin, E. G. 1994. Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton. Marine Ecology-Progress Series 109: 83-83.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. Biotechnology advances 25(3): 294-306.
- Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P. and Del Borghi, M. 2009. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 48(6): 1146-1151.
- De-Bashan, L. E., Moreno, M., Hernandez, J.-P. and Bashan, Y. 2002. Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. Water research 36(12): 2941-2948.
- Feng, Y., Li, C. and Zhang, D. 2011. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium. Bioresource Technology 102(1): 101-105.
- Gawasiri, C. B. 2003. Modern design of waste stabilization ponds in warm climates: Comparison with traditional design methods. university of leeds.

- He, P. J., Mao, B., Lü, F., Shao, L. M., Lee, D. J. and Chang, J. S. 2013. The combined effect of bacteria and *Chlorella vulgaris* on the treatment of municipal wastewaters. Bioresource Technology 146: 562-568.
- Jeffrey, S. t. and Humphrey, G. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochemie und physiologie der pflanzen 167(2): 191-194.
- Kim, M., Park, J., Park, C., Kim, S., Jeune, K., Chang, M. and Acreman, J. 2007. Enhanced production of *Scenedesmus* spp.(green microalgae) using a new medium containing fermented swine wastewater. Bioresource Technology 98(11): 2220-2228.
- Kosaric, N., Nguyen, H. and Bergougnou, M. 1974. Growth of *Spirulina maxima* algae in effluents from secondary waste-water treatment plants. Biotechnology and Bioengineering 16(7): 881-896.
- Larsdotter, K. 2006. Wastewater treatment with microalgae-a literature review. Vatten 62(1): 31.
- Lau, P., Tam, N. and Wong, Y. 1995. Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater. Environmental Pollution 89(1): 59-66.
- Lorenzen, C. J. 1963. Diurnal variation in photosynthetic activity of natural phytoplankton populations. Limnology and Oceanography 8(1): 56-62.
- Malis-Arad, S. and McGowan, R. E. 1982. Alkalinity-induced aggregation in *Chlorella vulgaris* II. Changes in the cell wall during the cell cycle. Plant and Cell Physiology 23(1): 11-17.
- Matamoros, V., Gutiérrez, R., Ferrer, I., García, J. and Bayona, J. M. 2015. Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: a pilot-scale study. Journal of hazardous materials 288: 34-42.
- McCarthy, J. J., Taylor, W. R. and Taft, J. L. 1977. Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences.

Limnology and Oceanography 22(6): 996-1011.

- Metcalf, E. and Eddy, M. 2014. Wastewater engineering: treatment and Resource recovery. Mic Graw-Hill, USA: 1530-1533.
- Oswald, W. J., Gotaas, H., Ludwig, H. F. and Lynch, V. 1953. Algae symbiosis in oxidation ponds: III. Photosynthetic oxygenation. Sewage and Industrial Wastes: 692-705.
- Palmer, C. M. 1977. Algae and water pollution. Available from the National Technical Information Service, Springfield VA 22161 as PB-287 128, Price codes: A 07 in paper copy, A 01 in microfiche. Report.
- Polprasert, C., Kongsricharoern, N. and Kanjanapapin, W. 1994. Production of feed and fertilizer from water Hyacinth plants in the tropics. Waste Management & Research 12(1): 3-11.
- Quijano, G., Arcila, J. S. and Buitrón, G. 2017. Microalgal-bacterial aggregates: applications and perspectives for wastewater treatment. Biotechnology advances 35(6): 772-781.
- Rai, M. P., Gautam, T. and Sharma, N. 2015. Effect of salinity, pH, light intensity on growth and lipid production of microalgae for bioenergy application. OnLine Journal of Biological Sciences 15(4): 260.
- Rand, M., Greenberg, A. E. and Taras, M. J., 1976. Standard methods for the examination of water and wastewater. Prepared and published jointly by American Public Health Association
- Richmond, A., 1986. CRC Handbook of microalgal mass culture. CRC press.
- Richmond, A., 2008. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. John Wiley & Sons.
- Rosso, D., Larson, L. E. and Stenstrom, M. K. 2008. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. Water Science and Technology 57(7): 973-978.

- Ryu, B.-G., Kim, E. J., Kim, H.-S., Kim, J., Choi, Y.-E. and Yang, J.-W. 2014. Simultaneous treatment of municipal wastewater and biodiesel production by cultivation of *Chlorella vulgaris* with indigenous wastewater bacteria. Biotechnology and bioprocess engineering 19(2): 201-210.
- Sansawa, H. and Endo, H. 2004. Production of intracellular phytochemicals in *Chlorella* under heterotrophic conditions. Journal of Bioscience and Bioengineering 98(6): 437-444.
- Schwede, S., Anbalagan, A., Krustok, I., Lindberg, C.-F. and Nehrenheim, E. (2016). Evaluation of the microalgae-based activated sludge (MAAS) process for municipal wastewater treatment on pilot scale. IWA World Water Congress.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. and Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. Journal of Bioscience and Bioengineering 101(2): 87-96.
- Strickland, J. and Parson, T. 1972. Determination of salinity by titration. A Practical Handbook on Seawater Analysis. Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, ON, Canada: 11-19.
- Stumm, W., Morgan, J. J. and Drever, J. I. 1996. Aquatic chemistry. Journal of Environmental Quality 25(5): 1162.
- Su, Y., Mennerich, A. and Urban, B. 2012. Synergistic cooperation between wastewater-born algae and activated sludge for wastewater treatment: Influence of algae and sludge inoculation ratios. Bioresource Technology 105: 67-73.
- Tendencia, E. A. and dela Peña, M. 2003. Investigation of some components of the greenwater system which makes it effective in the initial control of luminous bacteria. Aquaculture 218(1-4): 115-119.
- Theissen, G. and Saedler, H. 2001. Plant biology: floral quartets. Nature 409(6819): 469.
- Veillette, M., Chamoumi, M., Nikiema, J., Faucheux, N. and Heitz, M., 2012. Production of biodiesel from microalgae. Advances in Chemical Engineering. InTech.
- Venkataraman, G. 1969. The cultivation of Algae, Indian Council of Agric. Res., New

Delhi: 34-251.

Vonshak, A., Abeliovich, A., Boussiba, S., Arad, S. and Richmond, A. 1982. Production of Spirulina biomass: effects of environmental factors and population density. Biomass 2(3): 175-185.

Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y. and Ruan, R. 2010.

Cultivation of green algae Chlorella sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. Applied biochemistry and biotechnology 162(4): 1174-1186.

Wang, L., Liu, J., Zhao, Q., Wei, W. and Sun, Y. 2016. Comparative study of wastewater treatment and nutrient recycle via activated sludge, microalgae and combination systems. Bioresource Technology 211: 1-5.

Widjaja, A., Chien, C.-C. and Ju, Y.-H. 2009. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae Chlorella vulgaris. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40(1): 13-20.

Yaiche, M., Bouhanik, A., Bekkouche, S., Malek, A. and Benouaz, T. 2014. Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration. Energy Conversion and Management 82: 114-123.

Yan, X., Han, Y., Li, Q., Sun, J. and Su, X. 2016. Impact of internal recycle ratio on nitrous oxide generation from anaerobic/anoxic/oxic biological nitrogen removal process. Biochemical engineering journal 106: 11-18.

Zhou, Y., Zhang, L., Liu, J., Wu, G. and Savolainen, O. 2014. Climatic adaptation and ecological divergence between two closely related pine species in Southeast China. Molecular ecology 23(14): 3504-3522.

Zhu, C. and Lee, Y. 1997. Determination of biomass dry weight of marine microalgae. Journal of applied phycology 9(2): 189-194.

ยวดี พิรพรพิศาล, 2549. สาหร่ายวิทยา. เชียงใหม่:ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิสัย วงศ์สายปิ่น, 2536. สาหร่ายเซลล์เดียว : สารอาหารจากแสงตะวัน. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์
รวมธรรมสาร.

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2552. กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ:พื้นฐานและการคำนวณ
ออกแบบ. กรุงเทพมหานคร. สยามสเตรชเชอร์รี่พลาซัส.

สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์ท็อป.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฐานิดา สำแดง
วัน เดือน ปี เกิด	2 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	ภูเก็ต
วุฒิการศึกษา	สาขาจุลชีววิทยาอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	310/77 ซอยดอมจอเฒ่า ต.เทพกระษัตรี อ.ถลาง จ.ภูเก็ต 83100



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY