

การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นที่เคเอ็นสูงโดยระบบรวมถังไปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Treatment of high TKN wastewater by combination of Tricking Filter and Anoxic Filter
Tanks.



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 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นที่เคเอ็นสูงโดยระบบร่วมถัง โพรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ
โดย	น.ส.ชุตานา มงคลอุปถัมภ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปียากร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)	

ชุตานา มงคลอุปถัมภ์ : การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นที่เคเอ็นสูงโดยระบบร่วมถังโปรยกรองและถังกรองกิ่งไร้อากาศ. (Treatment of high TKN wastewater by combination of Trickling Filter and Anoxic Filter Tanks.) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่เคเอ็นความเข้มข้นสูง โดยใช้ระบบถังโปรยกรองร่วมกับถังกรองกิ่งไร้อากาศที่พีเอช 6 เพื่อป้องกันกลิ่นของก๊าซแอมโมเนีย โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. และ 150 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง คือ การทดแทนน้ำเสียใหม่ร้อยละ 16 32 50 และ 68 โดยเดินระบบในถังโปรยกรองเพื่อกำจัดซีโอดีและบำบัดแอมโมเนียไปเป็นไนเตรทแล้วบำบัดด้วยถังกรองกิ่งไร้อากาศเพื่อกำจัดไนเตรทแล้วเวียนน้ำกลับไปถังโปรยกรองก่อนจะถ่ายน้ำที่บำบัดแล้วออกและทดแทนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ไปเรื่อยๆ จนประสิทธิภาพของระบบคงที่ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบโดยรวมคิดเป็น ร้อยละ 97-98 เป็นประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศร้อยละ 86-93 และถังโปรยกรองอีกร้อยละ 19-75 และมีอัตราการบำบัดซีโอดีสูงสุดของถังกรองกิ่งไร้อากาศและถังโปรยกรองอยู่ที่ 459.82 ± 13.44 และ 117.80 ± 8.45 มก.ซีโอดี/ล.-วัน ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของทั้งระบบอยู่ที่ร้อยละ 53-100 และมีอัตราไนโตรเจนในตรีฟิเคชันจำเพาะสูงสุดที่ถังโปรยกรองอยู่ที่ 1.37 ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน และมีอัตราไนโตรเจนในตรีฟิเคชันจำเพาะสูงสุดที่ถังกรองกิ่งไร้อากาศอยู่ที่ 6.15 ± 0.56 ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบร่วมนี้ที่การทดแทนน้ำเสียร้อยละ 50 ดีที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดได้สูงถึงร้อยละ 37 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่ถังโปรยกรองสูงถึงร้อยละ 97 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรทที่ถังกรองกิ่งไร้อากาศและซีโอดีของแต่ละการทดแทนน้ำเสียมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนักอยู่ที่ประมาณร้อยละ 95-99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970386021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Nitrification, Denitrification, Trickling filter tank, Anoxic filter tank

Chutapa Mongkolupathum : Treatment of high TKN wastewater by combination of Trickling Filter and Anoxic Filter Tanks.. Advisor: Asst. Prof. Sarun Tejasen, Ph.D.

This research studied treatment of high TKN concentration in wastewater by combination of trickling filter and anoxic filter tanks at pH 6 to prevent ammonia gas. Wastewater in this research is synthetic wastewater prepared from glucose with COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations of 2,000 mgCOD/L and 150 mgN/L, respectively. This research was separated into 4 sets of experiment by starting the system in trickling filter for removed COD and treated ammonia to nitrate, then kept in anoxic filter tanks with addition of fresh wastewater for treated nitrate, then circulated the water back to the trickling filter tank before removing the treated water and replaced it with new synthetic wastewater continuously until the efficiency stable. Treated wastewater was replaced with fresh wastewater 16% 32% 50% and 68% Results showed that, COD was almost completely treated 97-98%. It is the efficiency of anoxic filter tank 86-93% and trickling filter tank 19-75%. The highest COD removal rate by anoxic filter and trickling filter tank are 459.82 ± 13.44 and 117.80 ± 8.45 mgCOD/L-day, respectively. NH_3 treatment was 53-100%, the highest specific nitrification rate by trickling filter was $1.37 \text{ g-N/m}^2\text{-day}$ and the highest specific denitrification rate by anoxic filter was $6.15 \pm 0.56 \text{ g-N/m}^2\text{-day}$. In conclusion, treated wastewater was replaced with fresh wastewater 50% had the best efficiency in treated total nitrogen up to 37%, treated NH_3 by trickling filter 97%. And each replaced had nitrate and COD treatment efficiency at anoxic filter tank is not much different approximately 95-99%.

Field of Study: Environmental Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบ
ขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้
คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมไปถึง
ข้อเสนอแนะ ตลอดจนการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบ
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงค์
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ กรรมการภายนอก
มหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ทิชม และแก้ไขให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องและ
สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่
ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้
สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทอาควา นิชิฮาระ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพลาสติก
สำหรับการนำมาใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ในการศึกษาและทำวิจัย
ระดับปริญญาโทมาบัณฑิต และเป็นกำลังใจที่สำคัญ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี และ
ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในทุกๆ ด้านตลอดมาจนทำให้การทดลองสำเร็จไปได้

ชุตานา มงคลอุปถัมภ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียทั่วไป.....	4
2.2 น้ำเสียจากห้องน้ำสาธารณะ.....	6
2.3 สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย.....	7
2.4 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย.....	8
2.4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Processes).....	8
2.4.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Processes).....	9
2.4.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Processes).....	9

2.5	กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ	12
2.5.1	ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification).....	12
2.5.2	ปฏิกิริยาแอมโมเนียมแอสซิมิเลชัน (Ammonium assimilation).....	13
2.5.3	ปฏิกิริยานิตริฟิเคชัน (Nitrification)	14
2.5.4	ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)	19
2.6	ระบบบำบัดที่เคเอ็นในน้ำเสีย	23
2.6.1	ระบบบำบัดแบบเติบโตแขวนลอย (Suspended Growth System).....	23
2.6.1.1	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge, AS).....	24
2.6.2	ระบบบำบัดแบบการเจริญแบบเกาะติด (Attached Growth System)	24
2.6.2.1	ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC).....	25
2.6.2.2	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter, TF)	25
2.7	สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต	28
2.8	ปัจจัยที่มีผลในการทำให้เกิดปฏิกิริยานิตริฟิเคชันร่วมกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน	29
2.9	การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์.....	30
2.9.1	จลนพลศาสตร์ลำดับศูนย์.....	30
2.9.2	จลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง.....	31
2.9.3	จลนพลศาสตร์แบบโมนอด	31
2.9.4	จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น.....	32
2.9.5	จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์	33
2.10	สมดุลมวล	34
2.10.1	การเขียนสมดุลมวลในช่วงการกำจัดซีโอดี	34
2.10.2	การเขียนสมดุลมวลในช่วงการกำจัดแอมโมเนียม	35
2.10.3	การเขียนสมดุลมวลในช่วงการกำจัดไนเตรท.....	36
2.11	ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	42
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.3 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.4 ถึงปฏิกิริยา	45
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.5.1 เริ่มต้นระบบ	46
3.5.2 การทดลอง.....	47
3.5.3 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการศึกษาอัตราการ บำบัดไนเตรทในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	52
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
4.1.1 การทดลองทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68.....	55
4.1.1.1 ซีไอดี 67	67
4.1.1.2 ไนโตรเจน.....	67
4.1.1.3 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองกึ่งไร้อากาศ.....	68
4.1.1.4.1 อัตราการบำบัดซีไอดี.....	68
4.1.1.4.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนีย	70
4.1.1.4.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน.....	72
4.1.1.4 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังไปรยกรอง	74
4.1.1.5.1 อัตราการบำบัดซีไอดี.....	74
4.1.1.5.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน.....	75
4.1.1.5.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนีย	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	80

5.1	สรุปผลการทดลอง.....	80
5.1.1	การศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีและทีเคเอ็น.....	80
5.1.2	การศึกษาผลของความเข้มข้นซีโอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริ ฟิเคชันโดยระบบร่วมถังไปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ	81
5.2	ข้อเสนอแนะ	81
	ภาคผนวก	83
	บรรณานุกรม	117
	ประวัติผู้เขียน	121



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย	5
ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียจากบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร.....	6
ตารางที่ 2.3 ลักษณะของน้ำเสียจากการขับถ่าย.....	6
ตารางที่ 2.4 สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ของสารประกอบไนโตรเจนชนิดต่างๆ	7
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของโลหะที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน.....	18
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของสารอินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน	18
ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างของสารอนินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน.....	19
ตารางที่ 2.8 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน	30
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์.....	44
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของชุดการทดลองในงานวิจัย.....	46
ตารางที่ 3.3 ธาตุอาหารเสริมที่เป็นส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	47
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลอง.....	48
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการทดลอง	51
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ	56
ตารางที่ 4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ	57
ตารางที่ 4.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ	57
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ	58

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	ขั้นตอนต่างๆ ในการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ.....	11
ภาพที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับแอมโมเนียและแอมโมเนียม.....	13
ภาพที่ 2.3	การเกิดฟิล์มชีวภาพของแบคทีเรียบนผิวตัวกลางในระบบโปรยกรอง.....	24
ภาพที่ 2.4	การทำงานของระบบโปรยกรอง.....	27
ภาพที่ 2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากปฏิกิริยาลำดับศูนย์.....	31
ภาพที่ 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง.....	31
ภาพที่ 2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากโมโนด.....	32
ภาพที่ 2.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากการถ่วงน้ำหนักการทำงานโดยสารตั้งต้น.....	33
ภาพที่ 2.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากการถ่วงน้ำหนักการทำงานโดยผลิตภัณฑ์.....	33
ภาพที่ 3.1	ตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media.....	45
ภาพที่ 3.2	ระบบร่วมถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ.....	45
ภาพที่ 3.3	ศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีและแอมโมเนียที่ความเข้มข้นซีโอดีและไนเตรทเริ่มต้นของ น้ำ เสียใหม่ต่างๆ ที่เข้าระบบบริเวณถังกรองกึ่งไร้อากาศที่มีผลต่อดีไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6.....	50
ภาพที่ 4.1	การเปลี่ยนแปลงของ (ก) ซีโอดี (ข) แอมโมเนีย และ (ค) ไนเตรท ช่วงเริ่มเดินระบบก่อน ทำการทดลองเป็นเวลา 182 วัน.....	54
ภาพที่ 4.2	การเปลี่ยนแปลงของซีโอดีของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2.....	59
ภาพที่ 4.3	การเปลี่ยนแปลงของซีโอดีของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2.....	60

ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2	61
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2	62
ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรทของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2	63
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรทของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2	64
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของไนไตรท์ของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2	65
ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของไนไตรท์ของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2	66
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น	70
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น	72
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราดีไนตริฟิเคชันกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น	73
ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น	75
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราไนตริฟิเคชันกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น	77
ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดแอมโมเนียกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดแอมโมเนียจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียจากชุมชน ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์จากอาคารบ้านเรือน ร้านค้า โรงเรียน เป็นต้น ซึ่งนับวันจะยังมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนประชากร การขยายตัวทางสังคมและเศรษฐกิจ รวมทั้งกิจกรรมในชุมชน โดยน้ำเสียจากห้องน้ำสาธารณะทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นน้ำปัสสาวะซึ่งมีความเข้มข้นของซีโอติปานกลางและมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียที่รวมกันเรียกว่า ทีเคเอ็น (มันซิน ตันซุลเวตม์ และมันรักซ์ ตันซุลเวตม์, 2551) ในความเข้มข้นสูงถึง 500 มก./ล. (Murray, 1925) ซึ่งแตกต่างกับน้ำเสียชุมชนทั่วไปที่มีเพียง 30-40 มก./ล. (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2545) ทำให้ถูกบำบัดได้ยากกว่าน้ำเสียทั่วไปมาก การบำบัดทั่วไปที่ออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ของน้ำเสียชุมชน นิยมใช้ถังเกรอะ-กรองไร้อากาศหรือถังเติมอากาศสำเร็จรูปจึงไม่สามารถบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ได้ หากน้ำทิ้งที่ไม่ได้มาตรฐานเหล่านี้ถูกปล่อยลงท่อสาธารณะจะมีกลิ่นเหม็นที่ทำให้เสียสุขภาพและเมื่อเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดปัญหา เนื่องจากทีเคเอ็นจะไปใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง

เนื่องจากน้ำเสียประเภทนี้ไม่สามารถถูกบำบัดได้โดยถังเกรอะ-กรองไร้อากาศหรือถังเติมอากาศสำเร็จรูปทั่วไป หรือถ้าใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมก่อสร้าง เช่น ระบบเอเอส (Activated sludge) ก็จะมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในกระบวนการก่อสร้างและการดูแลระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะบำบัดน้ำเสียประเภทนี้โดยจะใช้ระบบถังโปรยกรอง (Trickling Filter) เนื่องจากเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนโดยใช้ฟิล์มจุลินทรีย์ (Biofilm) เป็นระบบที่ก่อสร้างง่ายดูแลง่าย ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำ มีตัวกลางที่ให้เชื้อ Autotrophs เกาะยึดได้ เหมาะต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สามารถเดินระบบที่ค่าพีเอชต่ำพอที่จะทำให้แอมโมเนียไม่ระเหยไปสร้างกลิ่นเหม็นสู่ภายนอกแต่สร้างฟิล์มชีวภาพเพื่อบำบัดสารอินทรีย์และค่าทีเคเอ็นได้ นอกจากนี้ฟิล์มชีวภาพยังมีความสามารถในการทนต่อความเป็นพิษของแอมโมเนียความเข้มข้นสูงๆ ได้ดีกว่าพวกตะกอนชีวภาพแบบแขวนลอย ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (รวินดา จัยสกุล และศรีณย์ เตชะเสน, 2559) พบว่าที่พีเอช 6 ระบบโปรยกรองจะสามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีก๊าซแอมโมเนียระเหยออกมา แต่เนื่องจากน้ำทิ้งยังมีความเข้มข้นไนเตรทที่สูงและมีจุลินทรีย์ที่หลุดออกมาจากตัวกลาง ดังนั้นถ้าสามารถหมุนเวียนให้น้ำเสียเริ่มต้นที่มีค่าซีโอติปานกลางแต่มีทีเคเอ็นสูงมาผสมกับน้ำทิ้งนี้ น่าจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ด้วย ซึ่งจะสามารถกำจัดไนเตรทออกจาก

ระบบได้อย่างถาวร และสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้เพื่อนำไปหาขนาดและเป็นต้นแบบของ
ถังปฏิกริยาที่จะบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีและทีเคเอ็นโดยระบบร่วมถังโปรยกรอง
และถังกรองกึ่งไร้อากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นซีโอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นที่มีผลต่อ
กระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยระบบร่วมถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ห้อง
ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลกลูโคส โดยใช้
แอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจนในการเพิ่มความเข้มข้นของทีเคเอ็น

1.3.2 ทำการทดลองแบบทีละเท

1.3.3 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190
Random Flow Media มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ
190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

1.3.4 ถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลอง

- ถังโปรยกรองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่ทำจากพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.2 เมตร และมีความสูง 1 เมตร
- ถังกรองกึ่งไร้อากาศมีลักษณะเป็นถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยม ที่มีความกว้าง ความยาว
และความสูง เท่ากับ 0.3 0.3 และ 0.5 เมตรตามลำดับ

1.3.5 ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 25 ลิตร

1.3.6 อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรองเท่ากับ 100 ลิตรต่อชั่วโมง

1.3.7 ควบคุมพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)

1.3.8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของซีโอดีและทีเคเอ็นเป็น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. และ 150 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

1.3.9 ทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นของน้ำเสียใหม่ที่เข้าระบบ บริเวณถังกรองกึ่งไร้อากาศเป็น 4 ความเข้มข้น ได้แก่ ทดแทนน้ำใหม่ร้อยละ 16 32 50 และ 68

1.3.10 พารามิเตอร์ที่ตรวจสอบคือ พีเอช (pH) ซีโอดี (COD) แอมโมเนีย (NH_3) ของแข็งแขวนลอย (SS) ไนเตรท (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลของความเข้มข้นซีโอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ

1.4.2 ได้ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดซีโอดี ทีเคเอ็นและไนเตรทที่พีเอช 6

1.4.3 สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีค่าทีเคเอ็นสูงได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียทั่วไป

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ มากมาย ซึ่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการและเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป ไม่เหมาะสำหรับการใช้ประโยชน์ หรือถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติก็จะก่อให้เกิดปัญหาหรือทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสียหาย ดังนั้นน้ำเสียจากห้องน้ำสาธารณะหรือห้องส้วมสาธารณะ หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนที่มาจากสถานที่ที่ประชาชนสามารถเข้าไปใช้บริการ เพื่อชำระล้างหรือขับถ่ายของเสียออกจากร่างกาย เช่น ตามห้างสรรพสินค้า ร้านอาหาร สถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิง (ปั้มน้ำมัน) หรือสถานีรถไฟ เป็นต้น ซึ่งลักษณะน้ำเสียชุมชนในอาคารประเภทต่างๆ ของประเทศไทยและลักษณะน้ำเสียจากบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร เป็นดังตารางที่ 2.1-2.2

ลักษณะน้ำเสีย

ประกอบไปด้วยน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวัน ซึ่งมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว น้ำแกง เศษใบตอง พืชผัก ชี้นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถถูกย่อยสลายได้ ส่งผลให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) ลดลง และทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็นได้ ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำนิยมนวัดด้วยค่าบีโอดี (BOD) ซึ่งเมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก และสภาพเน่าเหม็นจะเกิดขึ้นได้ง่าย

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดสภาพน้ำปนเปื้อน ได้แก่ คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟต เป็นต้น

3. น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสงและกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศไม่ให้ละลายลงสู่ได้ ทำให้เกิดสภาพไม่น่าดู อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำเสียชีวิต

4. ของแข็ง ประกอบด้วย สารแขวนลอย ตะกอนหนัก และของแข็งละลาย ซึ่งเมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง และส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์ที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ

5. **จุลินทรีย์** น้ำเสียจากโรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ หรือโรงงานอาหารกระป๋อง จะมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต จึงทำให้ระดับของออกซิเจนละลายน้ำลดลง ทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็น นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อประชาชน เช่น จุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงพยาบาล

6. **ธาตุอาหาร** ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเมื่อมีธาตุอาหารเหล่านี้ในปริมาณสูง จะทำให้สาหร่ายเกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็ว (Algae Bloom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในช่วงกลางคืน อีกทั้งยังทำให้เกิดวัชพืชน้ำ และส่งผลให้เกิดปัญหาแก่การสัญจรทางน้ำตามมา

7. **กลิ่น** เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้อากาศหรือกลิ่นอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานทำปลาป่น โรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2545)

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย

ชุมชน	บีโอดี*	ซีโอดี*	ของแข็งแขวนลอย*	ทีเคเอ็น*	ฟอสฟอรัส*
อาคารชุดพักอาศัย					
- น้ำส้วม	110	220	-	40.8	1.3
- น้ำเสียอื่น	151	285	-	21	2.1
หอพัก					
1. น้ำส้วม	123	1,290	666	32.9	6.8
2. น้ำเสีย	75	135	29	19.2	3.9
โรงพยาบาล	170	282	69	27.6	2.9
ตลาด	1,123	2,242	551	53.9	4.0
ศูนย์การค้า	81	224	61	66.6	10.1

หมายเหตุ: *หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียจากบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร

แหล่งกำเนิด	บีโอดี*	ซีโอดี*	ของแข็ง แขวนลอย*	ทีเคเอ็น*	ฟอสฟอรัส*
ส้ม	695	1,350	480	295	24
อาบ	170	285	57	13.5	3.3
ซักล้าง	92	250	51	12	17.2
ครัว					
1. มีตะแกรง	500	925	200	18	12.7
2. ไม่มี ตะแกรง	1,600	2,550	1,080	100	87.2

หมายเหตุ: *หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

2.2 น้ำเสียจากห้องน้ำสาธารณะ

น้ำเสียจากการขับถ่ายเป็นของเสียจากห้องน้ำ ซึ่งประกอบด้วยปัสสาวะ อุจจาระ น้ำชะล้างจากการทำความสะอาดทวารหนักและวัสดุทำความสะอาดแห้ง น้ำเสียจากการขับถ่ายมีแบคทีเรียและไวรัสที่ก่อให้เกิดโรคซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความเจ็บป่วยของมนุษย์จากการสัมผัสโดยตรงหรือจากการบริโภคสัตว์น้ำที่ได้รับผลกระทบ ก่อให้เกิดการสะสมสารอาหารในระบบนิเวศซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถิ่นที่อยู่อาศัยและการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตรบกวน ซึ่งมีลักษณะดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของน้ำเสียจากการขับถ่าย

แหล่งกำเนิด	น้ำเสียจากการขับถ่าย
ซีโอดี*	2,260
ทีเคเอ็น*	150
ฟอสฟอรัส*	42.7
ของแข็งแขวนลอย*	3,180

หมายเหตุ: *หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: (Palmquist & Hanæus, 2005)

2.3 สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย

สารประกอบไนโตรเจนพบได้หลายรูปแบบในน้ำเสียและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีน กรดอะมิโน ยูเรีย กรดยูริก และ สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ดังตารางที่ 2.4

สารประกอบไนโตรเจนสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของแหล่งน้ำได้ โดยในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ ถ้าพบสารประกอบไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนีย-ไนโตรเจน หรือที่เรียกรวมกันว่า ทีเคเอ็น ในปริมาณมาก อาจแสดงว่าแหล่งน้ำนั้นมีความสกปรกและมีการปนเปื้อน เนื่องจากทีเคเอ็นมีความต้องการออกซิเจนเพื่อมาออกซิไดซ์ สารประกอบไนโตรเจนให้เป็นไนเตรท หรือเรียกว่าเอ็นโอดี (NOD, nitrogenous oxygen demand) ซึ่งความต้องการออกซิเจนโดยทีเคเอ็นนี้มากพอๆ กับความต้องการออกซิเจนจากสารอินทรีย์คาร์บอน หรือบีโอดี รวมถึงแอมโมเนียที่อยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระก็มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำด้วย ดังนั้น สารประกอบไนโตรเจนจึงมีบทบาทสำคัญและต้องถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

ตารางที่ 2.4 สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ของสารประกอบไนโตรเจนชนิดต่างๆ (สุภัณฑิต นิมรัตน์, 2548)

ชนิดของไนโตรเจน	สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state)	สมบัติ
สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen) ได้แก่ ยูเรีย กรดยูริก และกรดอะมิโน	-3	- พืชและแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ได้ โดยตรงทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) - เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในเซลล์สิ่งมีชีวิต - เป็นของเสียที่เกิดจากสัตว์น้ำ
ก๊าซแอมโมเนีย (NH ₃ gas)	-3	- เป็นของเสียที่เกิดจากสัตว์น้ำ - เป็นพิษอย่างมากต่อปลา ทำให้ปลาไม่สามารถขับถ่ายก๊าซแอมโมเนียออกจากกระแสเลือดส่งผลให้ปลาอ่อนแอและติดเชื้อได้ง่าย

ชนิดของไนโตรเจน	สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state)	สมบัติ
แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+)	-3	- ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ - พืชและแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)
ก๊าซไนโตรเจน (N_2 gas)	0	- สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจน - เป็นไนโตรเจนรูปแบบที่เสถียรที่สุด - แบคทีเรียบางกลุ่มเท่านั้นที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2 gas)	+4	- ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศและทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก
ไนไตรท์ (NO_2^-)	+3	- เป็นพิษต่อสัตว์น้ำและมนุษย์
ไนเตรท (NO_3^-)	+5	- พืชและแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

2.4 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย

ในปัจจุบันกระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียมีอยู่ 3 วิธี ซึ่งประกอบด้วย

2.4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Processes)

เช่น กระบวนการไล่อากาศ (Air stripping) กระบวนการนี้ตัดแปลงมาจากการไล่ก๊าซออกจากน้ำ โดยการพ่นอากาศเข้าไปแทนที่ เป็นกระบวนการแยกก๊าซหรือสารระเหยง่ายออกจากน้ำเสียใช้ในการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียเท่านั้น โดยการปรับพีเอชและอุณหภูมิของน้ำเสียให้สูงกว่า 10 จะสามารถไล่ก๊าซแอมโมเนียออกจากน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 85 แต่แอมโมเนียที่กำจัดได้อาจทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ดังนั้นก๊าซแอมโมเนียนี้ควรนำไปบำบัดก่อนปล่อยออกสู่อากาศ (O'Farrell, Frauson, Cassel, & Bishop, 1972)

กระบวนการกำจัดเกลือแร่อื่นๆ เช่น การแยกสลายไฟฟ้า (Electrodialysis) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) แต่กระบวนการเหล่านี้ยังคงมีปัญหาที่ต้องแก้ไขอยู่มาก (สุนทรีย์ อยู่สถาน, 2550)

2.4.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Processes)

เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) นิยมใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ และในการกำจัดแอมโมเนียและไนเตรท ทำได้โดยใช้เรซินที่มีประจุตรงข้ามมาจับกับประจุที่ต้องการกำจัด ซึ่งสามารถกำจัดไนโตรเจนในรูปไอออนได้ถึงร้อยละ 80-90 แต่มีปัญหาเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียมักเกาะติดอยู่กับอนุภาคเรซินที่ใช้ และเมื่อใช้เป็นระยะเวลานานเรซินจะมีประสิทธิภาพลดลง ต้องฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาตามมา

กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Treatment) กระบวนการนี้สามารถกำจัดแอมโมเนียได้มากถึงร้อยละ 80 โดยทำให้ตกตะกอนอยู่ในรูป $MgNH_4PO_4$

การทำให้ตกตะกอน (Precipitation) เป็นการเติมสารช่วยให้ตกตะกอน เช่น สารส้ม (Coagulation) หรือสารเคมีบางอย่างลงไปลงในน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย แล้วตกตะกอนจมตัวลง แต่โดยมากวิธีการนี้มักจะกำจัดได้เพียงสารอินทรีย์ไนโตรเจน แต่กำจัดแอมโมเนียและไนเตรทได้น้อยมาก

การกำจัดด้วยคลอรีน (Chlorination) โดยการเติมสารไฮโปคลอไรท์ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนแอมโมเนียและสารอินทรีย์ไนโตรเจนเพื่อทำปฏิกิริยาให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งต้องใช้คลอรีน 9-10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อแอมโมเนีย 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 90 แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถกำจัดไนไตรท์ ไนเตรท และสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้และอาจมีปริมาณคลอรีนตกค้างอีก (สุนทรีย์ อยู่สถาน, 2550)

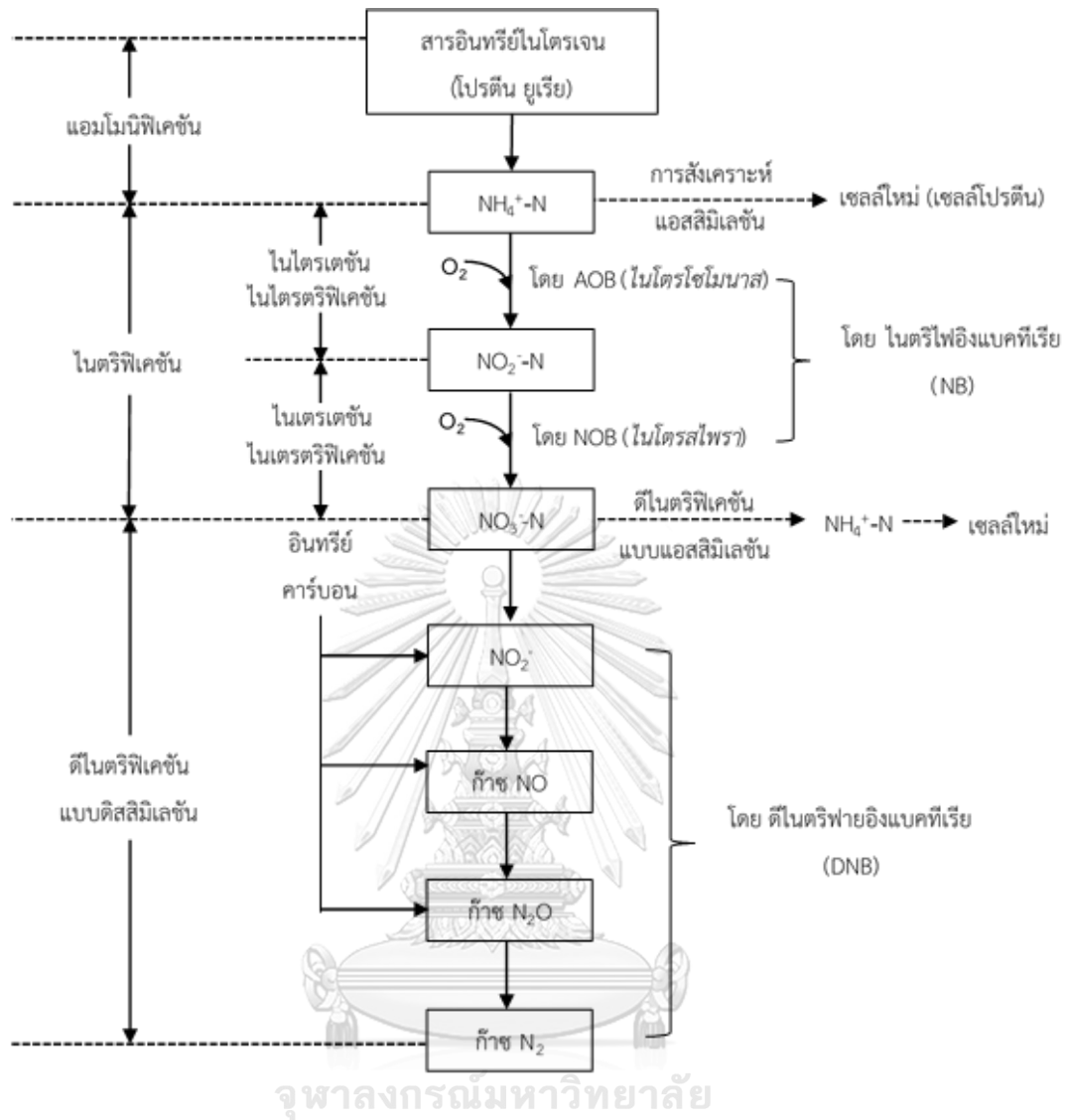
2.4.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Processes)

โดยการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน เพื่อย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้เป็นไนไตรท์ ไนเตรท และก๊าซไนโตรเจนแยกตัวออกจากน้ำเสียและลอยขึ้นสู่อากาศ ดังนั้นการกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม ซึ่งมีหลายกระบวนการในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้เป็นไนไตรท์ ไนเตรท และก๊าซไนโตรเจน เช่น ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter, TF) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ

(Rotating Biological Contactor, RBC) และระบบถังกรองชีวภาพ (Biofilter) (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

ไนโตรเจนในรูปของสารอินทรีย์และแอมโมเนียที่รวมกันเรียกว่า ทีเคเอ็น เป็นของเสียจากเมตาบอลิซึมของโปรตีนในร่างกายมนุษย์ ซึ่งเมื่อปล่อยออกมากับน้ำเสียจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และแอมโมเนียร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ ส่วนไนโตรเจนในรูปออกซิไดซ์ เช่น ไนเตรต และไนเตรทมีไม่ถึงร้อยละ 1

วิธีการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่สำคัญอีกวิธีหนึ่ง คือ ปฏิกิริยานิไตรฟิเคชันและดีไนไตรฟิเคชัน โดยอาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียอยู่ 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีหน้าที่ออกซิไดซ์ทีเคเอ็นให้เป็นไนเตรทในสภาวะแอโรบิก (Aerobic) โดยสารอินทรีย์ไนโตรเจนนั้นจะต้องผ่านปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) เพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในรูปต่างๆ เช่น แอมโมเนียมคลอไรด์ หรือแอมโมเนียมซัลเฟต หรือแอมโมเนียอิสระ (Free ammonia, NH_3) ก่อน จึงจะถูกออกซิไดซ์โดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) ได้ ซึ่งไนตริฟายอิงแบคทีเรียนี้เป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียมให้เป็นไนเตรตและไนเตรท ด้วยปฏิกิริยานิไตรฟิเคชัน โดยที่แอมโมเนียมเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แต่การกำจัดหรือการลดไนโตรเจนยังไม่เกิดขึ้น ยกเว้นเฉพาะไนโตรเจนส่วนที่นำไปสร้างเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งเป็นปริมาณน้อยมาก จากนั้นในสภาวะแอนอกซิก (Anoxic) แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเป็นเฮเทอโรโทรฟจะรีดิวซ์สารประกอบไนโตรเจนในรูปออกซิไดซ์นี้ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนและถูกปล่อยระบายออกสู่อากาศ โดยมีคาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545) ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ดังภาพที่ 2.1



หมายเหตุ: ไนโตรเจนที่ลดลงเนื่องจากการเอาไปสร้างเซลล์ใหม่นั้นมีปริมาณน้อยมาก

ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

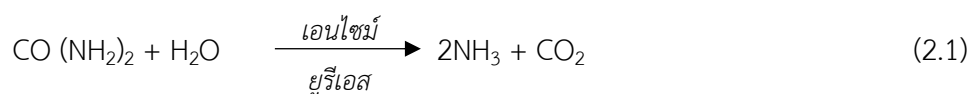
2.5 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ

การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนอินทรีย์โดยจุลินทรีย์เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis) เพื่อให้ได้พลังงานและมีการนำไนโตรเจนบางส่วนมาใช้เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ สารประกอบไนโตรเจนที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์จะอยู่ในรูปแอมโมเนียไนโตรเจน เมื่อน้ำเสียมีอัตราส่วนของซีโอดีต่อทีเคเอ็นที่เหมาะสมจะพบว่า สารประกอบไนโตรเจนจะถูกกำจัดได้เพียงร้อยละ 20 - 30 เท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนเพื่อกำจัดออกจากน้ำทิ้ง ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนให้เป็นไนเตรทไนโตรเจน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกริยาดิไนตริฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นตัวสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนโตรเจน

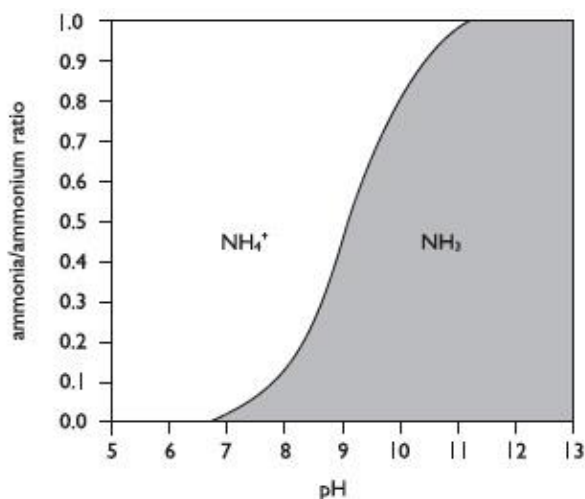
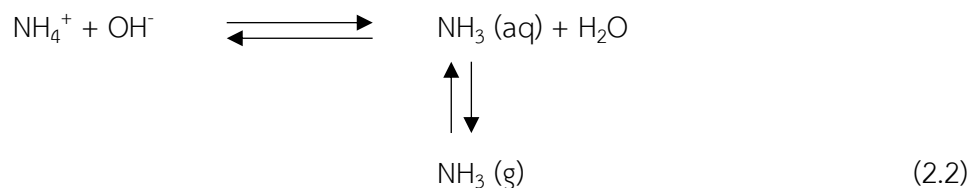
2.5.1 ปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

ปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชัน คือ กระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแอมโมเนีย มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกริยานี้ ได้แก่ แบคทีเรีย แอคทีโนมัยซีตีส ฟังไจ โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาจากการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในรูปโปรตีนจากอาหารที่เหลือจากการบริโภค จากเซลล์ที่ตายแล้วและจากของเสียไปเป็นกรดอะมิโน จากนั้นกรดอะมิโนจะถูกกลดอะมิโน (Deamination) ไปเป็นแอมโมเนียต่อไป โดยแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระ (NH_3) นั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอช การไฮโดรไลซิสของยูเรียโดยเอนไซม์ยูรีเอสก็ปล่อยแอมโมเนียออกมาได้ดังสมการที่ (2.1)

การเปลี่ยนรูปของยูเรียเป็นแอมโมเนีย



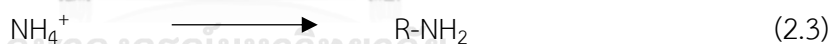
ในสภาวะที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรด ซึ่งมักเป็นสภาวะของน้ำเสียทั่วไป แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียม ดังสมการที่ (2.2) และภาพที่ 2.2 กล่าวคือ เมื่อพีเอชถูกปรับขึ้นสูงแอมโมเนียมจึงเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียอิสระ ซึ่งถูกขับออกจากน้ำไปสู่บรรยากาศได้ กระบวนการนี้เรียกว่า “การเปลื้องแอมโมเนีย” หรือ Ammonia (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545; มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539)



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับแอมโมเนียและแอมโมเนียม
(Gay & Knowlton, 2005)

2.5.2 ปฏิกริยาแอมโมเนียมแอสซิมิเลชัน (Ammonium assimilation)

เป็นปฏิกริยาการสังเคราะห์เซลล์ โดยจะเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียมไอออน หรือแอมโมเนียอิสระให้กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ดังสมการที่ (2.3)



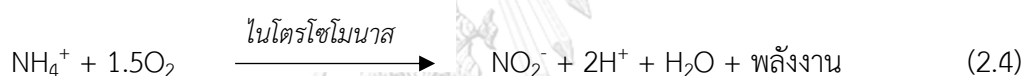
ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟที่สามารถเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียม หรือไนเตรทไปเป็นโปรตีนเพื่อการเจริญเติบโตหรือสร้างเซลล์ของแบคทีเรียดังกล่าว เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักอย่างหนึ่งของเซลล์แบคทีเรีย และปฏิกริยาการใช้คาร์บอนในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตต่างๆ ไปด้วยต้องใช้ไนโตรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ C:N ประมาณ 10:1 ปฏิกริยานี้ทำให้ลดปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินซึ่งพืชชั้นสูงและสาหร่ายชอบใช้เป็นสารอาหารมากกว่าไนเตรทไนโตรเจน และถ้าต้องการกำจัดไนโตรเจนด้วยวิธีนี้ได้ผลดีที่สุด จะต้องเดินระบบที่ภาวะสูงๆ หรือมีอายุสลัดจ์ต่ำ เพื่อจะได้ผลิตเซลล์ออกมามากๆ ทำให้จุลินทรีย์ต้องดึงเอาไนโตรเจนจากน้ำเสียมาสร้างเซลล์มากขึ้น ซึ่งการที่มีปริมาณเซลล์มากนั้นก็หมายถึงสลัดจ์ที่ต้องระบายทิ้งออกจากระบบมากด้วย แต่ถ้าหากเดินระบบที่ภาวะต่ำๆ เซลล์มีอาหารไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ตัวเอง (auto-oxidation) และการแตกตัว (lysis) ของเซลล์ ทำให้บางส่วนของแอมโมเนียที่ถูกใช้ไปใน การสังเคราะห์เซลล์กลับมาสู่อินสภาวะของเหลว และ

ถูกถ่ายทิ้งออกไปกับน้ำทิ้งได้อีกด้วย จึงทำให้ปฏิกริยานี้ไม่ได้รับความสนใจในระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งต้องการกำจัดไนโตรเจน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545; สุภัณฑิต นิมรัตน์, 2548)

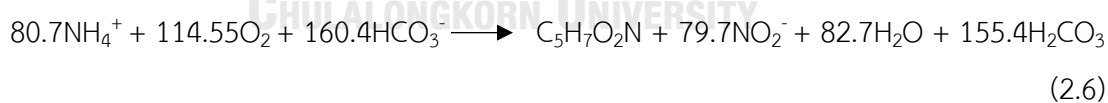
2.5.3 ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันเป็นการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้ไปอยู่ในรูปไนไตรท์และไนเตรท โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งชนิดเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) และออโตโทรฟ (Autotroph) แต่เมื่อเทียบกันแล้วจุลินทรีย์ชนิดออโตโทรฟมีบทบาทมากกว่ามาก โดยปฏิกริยาไนตริฟิเคชันนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ

ขั้นตอนย่อยที่หนึ่ง ไนไตรเตชัน (Nitritation) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนไตรติฟิเคชัน (Nitritification) อาศัยกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ ที่เรียกว่า เอโอบี หรือ AOB (Ammonium oxidizing bacteria) ส่วนใหญ่ได้แก่กลุ่ม *ไนโตรโซโมนาส* เช่น *N. europaea* และ *N. oligocarbogenes* *ไนโตรสไพรา* *ไนโตรสคอคคัส* *ไนโตรสโอบัส* เป็นต้น ซึ่งมีการหายใจและการสังเคราะห์เซลล์ในขั้นตอนไนไตรติฟิเคชัน ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ



ดังนั้นสมการรวมของขั้นตอนไนไตรติฟิเคชันนี้คือสมการ (2.4) รวมกับสมการ (2.5) ซึ่งได้มีการทดลองพบว่า เมื่อมียิลด์ (Yield, $Y_{\text{OBS,NH}_4}$) เท่ากับ 0.1 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมแอมโมเนีย-ไนโตรเจน หรือเท่ากับ 0.14 กรัมซีไอดีต่อกรัมแอมโมเนีย-ไนโตรเจน จะได้เป็นสมการที่ (2.6)

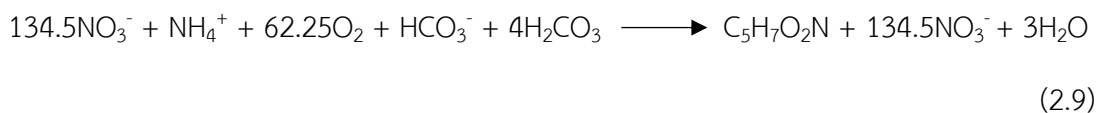


ขั้นตอนย่อยที่สอง ไนเตรเตชัน (Nitrataion) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนเตรติฟิเคชัน (Nitratification) อาศัยกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท ที่เรียกว่า เอ็นโอบี หรือ NOB (Nitrite oxidizing bacteria) ได้แก่กลุ่ม *ไนโตรแบคเตอร์* เช่น *N. agilis* และ *N. winogradskyi* *ไนโตรสไพรา* *ไนโตรสคอคคัส* เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า *ไนโตรสไพรา* ปรากฏอยู่ในทั้งสองขั้นตอนย่อย และได้มีการทดลองพิสูจน์แล้วว่า *ไนโตรสไพรา* เป็นจุลินทรีย์หลักของการออกซิไดซ์ไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท ซึ่งมีสมการการหายใจและการสังเคราะห์เซลล์ในขั้นตอนไนเตรติฟิเคชัน ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

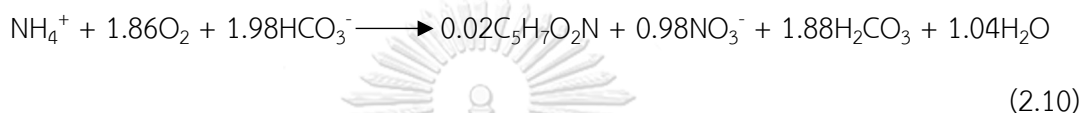




ดังนั้นสมการรวมของขั้นตอนไนเตรเตชันนี้คือสมการ (2.7) รวมกับสมการ (2.8) เมื่อยีลด์ ($Y_{\text{OBS,NO}_3}$) เท่ากับ 0.06 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนโตรเจน-ไนโตรเจน จะได้เป็นสมการที่ (2.9)



ดังนั้นสมการรวมของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่มีการรวมการเจริญเติบโตในสมการที่ (2.6) และ (2.9) จะได้ดังสมการที่ (2.10)



จากสมการรวมของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะสรุปได้ว่า มีอีลด์รวม ($Y_{\text{รวม}}$) เท่ากับ 0.16 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจน และพบว่าความต้องการออกซิเจนเพื่อออกซิไดซ์แอมโมเนียมไปเป็นไนเตรทคือ 4.25 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อมิลลิกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ และสภาพความเป็นต่าง (HCO_3^-) ที่ถูกใช้ไประหว่างออกซิไดซ์แอมโมเนียม คือ 7.07 มิลลิกรัมไบคาร์บอเนตต่อมิลลิกรัมไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งถ้ามีสภาพความเป็นต่างไม่พอ ค่าพีเอชจะลดลง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันลดลงด้วย

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนี้จุลินทรีย์ทั้งสองชนิดทั้งเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟจะมีบทบาททั้งคู่ แต่เมื่อเทียบกับแล้วจุลินทรีย์ชนิดออโตโทรฟจะมีบทบาทมากกว่ามาก ขณะที่จุลินทรีย์ชนิดออโตโทรฟออกซิไดซ์แอมโมเนียม-ไนโตรเจนเป็นไนเตรทและไนเตรท ระบบจะอยู่ในสถานะที่มีอากาศและได้พลังงานออกมาซึ่งจุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่ได้นี้ไปดึงเอาคาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตหรือคาร์บอเนตออกมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง สารอาหาร อัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็น ความเค็ม และสารพิษ (Bitton G., 2005; ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545) เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นผลจากการทำงานของจุลินทรีย์สองชนิด ดังนั้นต้องขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยรอบด้วย จึงต้องให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมทั้งหมดนี้เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้คงที่ตามที่ต้องการอยู่ตลอดเวลา ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่สามารถมีผลต่อปฏิกิริยามีอยู่หลายอย่างดังนี้

1. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (Ammonia concentration)

ความเข้มข้นของแอมโมเนียมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ถ้าความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 -15 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร อาจจะทำให้ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม ไนโตรโซโมนาส และ การทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม ไนโตรแบคเตอร์ อาจจะถูกยับยั้งเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.1 – 1.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (Anthonisen, Loehr, Prakasam, T. B. S., & Srinath, 1976)

2. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO)

ความเข้มข้นของออกซิเจนหรือค่าออกซิเจนละลายน้ำมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟเออร์ ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความไวต่อออกซิเจนความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้ถ้าค่าออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับหรือมากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (Tchobanoglous G., Burton L. F., & Stensel H. D., 2003; ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545) ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แต่ควรให้มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่ควรมีอากาศจนมีค่ามากเกินไปเพราะสิ้นเปลืองพลังงานและมีค่าดำเนินการของระบบบำบัดตามมา

3. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิจะมีผลต่อไนโตรแบคเตอร์มากกว่าไนโตรโซโมนาส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือ ช่วง 30-36 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันจะทำให้จุลินทรีย์ช็อกและหยุดทำงานส่งผลให้ระบบวิบัติได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

4. พีเอช (pH)

เนื่องจากไนตริไฟเออร์แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มไวต่อพีเอชมาก ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมนาส และไนโตรแบคเตอร์ คือ 5.8-8.5 และ 6.5-8.5 ตามลำดับ นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อสภาพความเป็นด่าง ปริมาณแอมโมเนีย และปริมาณไนโตรที่ซึ่งมีความเป็นพิษต่อไนตริไฟเออร์แบคทีเรีย (Buchanan et al., 1974; กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีการใช้สภาพต่าง ซึ่งทำให้พีเอชภายในถังปฏิกิริยาอาจจะลดลง โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีสภาพความเป็นด่างต่ำ ดังนั้นควรควบคุมให้มีสภาพความเป็นด่างคงเหลือในระบบหลังจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแล้วประมาณ 50-100 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เพื่อให้ระบบทำงานได้เป็นปกติ

5. สารอาหาร (Nutrient)

ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนโตรเจนในถังเติมอากาศนั้น มีผลต่อการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมนาสและไนโตรแบคทีเรีย ซึ่งผลกระทบของแอมโมเนียและไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับค่า K_{NH_4} และค่า K_{NH_4} ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยดังสมการ (2.11) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

$$K_{NH_4,T} = 10^{0.051T-1.148} \text{ ซึ่งเป็นสมการเอมไพริคัล} \quad (2.11)$$

6. อัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็น (BOD₅/TKN ratio)

อัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็นมีผลต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็นเพิ่มขึ้นไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะลดลง ดังนั้นอัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็นที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือ ไม่เกิน 3 (Bitton G., 2005; Tchobanoglous G. et al., 2003)

7. ความเค็ม (Saltiness)

ความเค็มมีผลทางลบต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย แต่ยังสามารถปรับตัวเข้ากับกับความเค็มได้ดีพอสมควร โดยได้มีการทดลองกับระบบแอนอกซิก-แอโรบิก พบว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียปรับตัวเข้ากับความเค็มได้ดีกว่าเฮเทอโรโทรฟแบคทีเรียที่กำจัดบีโอดี

8. สารพิษ (Toxin)

มีสารหลายชนิดที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ ไม่ว่าจะเป็นโลหะ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งจะมีผลยับยั้งในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.5, 2.6 และ 2.7 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของโลหะที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

โลหะ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ผลกระทบ
โคบอลต์	0.08-0.5	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบรีสุทธุ์)
โครเมียม ⁺³	>0.25	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบรีสุทธุ์)
	118	ยับยั้งสลัดจ์ไวงานร้อยละ 75
ทองแดง	0.05-0.56	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบรีสุทธุ์)
	4	ไม่มีผลยับยั้งสลัดจ์ไวงาน
	150	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบรีสุทธุ์)
นิกเกิล	>0.25	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบรีสุทธุ์)
สังกะสี	0.08-0.5	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบรีสุทธุ์)

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของสารอินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

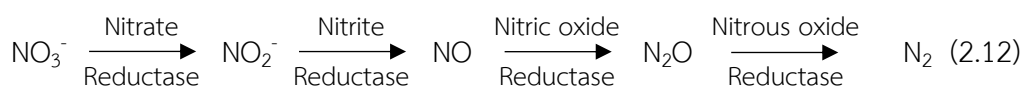
สารอินทรีย์	ความเข้มข้น (มก./ล.)
คลอรีน	1
คลอโรฟอร์ม	18
ไทโอยูเรีย	1
ไนโตรยูเรีย	1
เบนซีน	13
เมทานอล	160
อะซีโตน	2,000
เอทานอล	2,400
เอทิล อะซิเตท	18

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างของสารอนินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

สารอนินทรีย์	ความเข้มข้น (มก./ล.)
แคดเมียม	14.3
ซัลไฟด์	5.0
โซเดียมคลอไรด์	35,000
ไซยาไนด์	16.5
ตะกั่ว	0.5
โพแทสเซียมไดโครเมต	6.0
สังกะสี	11.0
แอมโมเนียม	1,000
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	50

2.5.4 ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรทไปเป็นก๊าซไนโตรเจนในสภาวะที่กึ่งไร้อากาศหรือแอนอกซิก (Anoxic) คือใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนอิเล็กตรอนอิสระ โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรีย (Denitrifying bacteria) ซึ่งมีทั้งกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟ แต่เฮเทอโรโทรฟมีบทบาทมากกว่ามาก ในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันไม่ต้องการแบคทีเรียที่มีความจำเพาะเจาะจงเหมือนกับในกรณีของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย (วิฐ นันทิธัญญธาดา, 2546) โดยปฏิกิริยานี้มีขั้นตอนการเกิดของปฏิกิริยา 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ไนเตรทเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ ไนเตรทเปลี่ยนเป็นไนตริกออกไซด์ ไนตริกออกไซด์เปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ดังสมการที่ (2.12)



โดยไนเตรทสามารถถูกกำจัดได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 แอสสิมิเลชัน (Assimilatory Denitrification)

จุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนและสร้างเซลล์ใหม่ โดยรูปของไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวิธีนี้คือ ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม แต่ถ้าไม่มีแอมโมเนียมในระบบหรือมีในปริมาณที่ไม่เพียงพอ จุลินทรีย์บางชนิดจะสามารถลดรูปไนเตรทไปเป็นแอมโมเนียมและนำมาใช้สังเคราะห์โปรตีนได้ ในวิธีนี้ไนเตรทจะถูกดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียและลดรูปไปเป็นแอมโมเนียมด้วยเอนไซม์ไนเตรทรีดักเตสหลายชนิด ก่อนจะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์ใหม่ซึ่งเป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิกผ่านปฏิกิริยาที่เรียกว่าแอสสิมิเลชัน วิธีการนี้จึงเรียกว่าดีไนตริไฟเคชันแบบแอสสิมิเลชัน ซึ่งวิธีนี้มีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีที่สองหรือวิธีดีไนตริไฟเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

วิธีที่ 2 ดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory Denitrification)

ในปฏิกิริยาดีไนตริไฟเคชันแบบดิสสิมิเลชันนี้ แบคทีเรียดีไนตริไฟอิงเป็นได้ทั้งแบบเฮเทอโรโทรฟ และออโตโทรฟเหมือนกับในปฏิกิริยาไนตริไฟเคชัน แต่ต่างกันที่ปฏิกิริยานี้ต้องเป็นแอนอกซิก (Anoxic) คือมีไนเตรทแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ และจุลินทรีย์ที่มีบทบาทมาก ได้แก่ กลุ่มเฮเทอโรโทรฟซึ่งมีบทบาทมากกว่ากลุ่มออโตโทรฟอย่างมาก โดยจุลินทรีย์แบบเฮเทอโรโทรฟนี้มีความต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งของคาร์บอนและเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนลงไปให้แก่จุลินทรีย์โดยอาจมาจากน้ำเสีย เศษอาหาร หรืออาจมาจากสารเคมีที่เติมลงไป โดยปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสมและสม่ำเสมอส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริไฟเคชันได้สูงสุด ปฏิกิริยาดีไนตริไฟเคชันมักเกิดไม่สมบูรณ์โดยเกิดเป็นก๊าซระดับกลาง คือ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ซึ่งไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ มีการศึกษาว่าวิธีนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนได้สูงถึงร้อยละ 95 อย่างไรก็ตาม ก๊าซไนโตรเจนนี้ถ้าไปเกิดและสะสมในถังใส (Clarifier) ชั้นที่สอง ก็อาจมีผลต่อการจมของตะกอน จะเกิดฟองก๊าซเกาะอยู่กับตะกอนทำให้ตะกอนลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของถังตกตะกอนทำให้น้ำทิ้งที่จะปล่อยออกไปไม่ใสได้

ดีไนตริไฟอิงนี้เป็นได้ทั้งออร์กาโนโทรฟ (Organotroph) ได้พลังงานจากสารอินทรีย์, ลิโธโทรฟ (Lithotroph) ได้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี และโฟโตโทรฟ (Phototroph) ได้พลังงานจากแสง รวมทั้งเป็นแบคทีเรียกลุ่มฟาคัลเททีฟแอนแอโรบ (Facultative anaerobic bacteria) ด้วย ซึ่งในสภาวะที่มีออกซิเจนแบคทีเรียกลุ่มนี้จะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนแต่มีไนเตรท แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ หรือแบคทีเรียกลุ่ม

นี้จะเลือกใช้ออกซิเจนถ้าในสภาวะนั้นๆ มีทั้งไนเตรทและออกซิเจน แต่การเลือกใช้ออกซิเจนหรือไนเตรทจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย

โดยทั่วไป จะไม่เกิดดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ในทุกสถานการณ์ของการบำบัดน้ำเสีย ในบางกรณีจะเกิดเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ ซึ่งทำให้ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์นี้ถือว่าเป็นก๊าซมลพิษที่สำคัญในส่วนของก๊าซเรือนกระจก และควรหลีกเลี่ยงการเกิดก๊าซนี้ ในระบบบำบัดน้ำเสียภาวะที่จะทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์ได้มากคือ การที่มีอัตราซีไอต่อไนเตรทไนโตรเจน (COD/NO₃⁻-N) ต่ำ เวลาที่กลัสดัจหรืออายุกลัสดัจสั้น และพีเอชต่ำ จึงควรหลีกเลี่ยงภาวะการณ์เช่นนี้ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545; สุบัณฑิต นิมรัตน์, 2548)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ได้แก่ สารอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณออกซิเจน ละลายน้ำ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง โออาร์พี ความเค็ม ไนโตรท์ และอัตราส่วนซีไอต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ดังนี้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

1. สารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเป็นต้องมีสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนหรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอน เพื่อให้ดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรียสามารถนำไปใช้ในการสร้างเซลล์และใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมใช้กันมีหลายชนิด ได้แก่ เอทานอล เมทานอล กรดอะซิติก กลูโคส และอะซิโตน เป็นต้น ได้มีการศึกษาอิทธิพลของแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด ได้แก่ ซูโครส เอทานอล และเมทานอล ในการกำจัดไนเตรทที่ปนเปื้อนกับแหล่งน้ำผิวดิน (100 มก.ไนเตรท/ล.) โดยใช้แผ่นกรองดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรียที่มีผลต่อการบำบัด การสะสมไนโตรท์ มวลชีวภาพ และการเจริญของดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรีย นำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 แหล่งคาร์บอน พบว่า อัตราส่วน C/N หลังจากผ่านกระบวนการบำบัดแล้วเท่ากับ 2.5 1.08 และ 1.1 ของแหล่งคาร์บอนซูโครส เอทานอล และเมทานอลตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด และมีปริมาณไนโตรท์ที่สะสมมีมากกว่าเอทานอลและเมทานอลอย่างชัดเจน แต่มีการเกิดมวลชีวภาพที่ดีกว่า ซึ่งมีข้อเสียต่อการจับตัวกันและก่อให้เกิดการอุดตันตัวกรองได้ และปริมาณดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรียที่ยึดเกาะเป็นฟิล์มชีวภาพมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็นเอทานอลและเมทานอล แต่เนื่องจากเมทานอลมีความเป็นพิษ ดังนั้นเอทานอลจึงมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นแหล่งคาร์บอนในการกำจัดไนเตรทในระบบนี้ (Gomez, Lopez, & Garcia, 2000)

2. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเช่นกัน เนื่องจากในสภาวะที่มีออกซิเจนสูงจุลินทรีย์จะเลือกใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเตรท เพราะพลังงานที่ได้จากการออกซิโดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยไนเตรทจะมีค่าน้อยกว่าการออกซิโดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยออกซิเจน ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 0.1 - 0.2 มก./ล. ดีไนตริฟิเคชันแบบคทีเรียจะใช้นิเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นออกซิเจนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (Van Rijn, Tal, & Schreier, 2006)

3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันคือ 0-50 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดีไนตริฟิเคชันแบบคทีเรียอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส (Rivett, Buss, Morgan, Smith, & Bemment, 2008) และมีรายงานว่าที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันค่อนข้างคงที่ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

4. พีเอช (pH)

โดยทั่วไปปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เกิดที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่างอ่อนๆ และที่พีเอชเป็นกรดนั้นดีไนตริฟิเคชันแบบคทีเรียจะไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ และพบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนตริฟิเคชันแบบคทีเรียอยู่ในช่วง 6.5-8.5 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545) ที่พีเอชต่ำกว่า 5 จะส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันถูกยับยั้งและมีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมของไนโตรเจนหรือไนตรัสออกไซด์ (Rivett et al., 2008) และที่พีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 ก็ส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันถูกยับยั้งได้เช่นกัน (Rezaee et al., 2008)

5. ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction potential; ORP)

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อควบคุมออกซิเจนละลายน้ำให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ในปัจจุบันหวั่นวิตกว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีจำหน่ายและใช้งานในเชิงปฏิบัติมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำมากได้ จึงต้องมีการใช้ออร์พีเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแทนค่าออกซิเจนละลายน้ำ โดยค่าออร์พีที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะอยู่ในช่วง -50 ถึง -100 มิลลิโวลต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

6. ความเค็ม

ความเค็มในรูปของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อดีไนทรีฟิอิงแบคทีเรียเล็กน้อย โดยเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์อย่างรวดเร็ว (ที่สภาวะซ็อก) จากการศึกษาพบว่าดีไนทรีฟิอิงแบคทีเรียสามารถทนต่อสภาพความเค็มได้ถึง 30,000 มก./ล.

7. ปริมาณไนโตรเจน

ไนโตรเจนในรูปของกรดไนตริก (HNO₂) คือไนโตรเจนในรูปที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนสามารถยับยั้งปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชันได้ที่ความเข้มข้นเพียง 0.13 มก./ล. แต่ที่ความเข้มข้นนี้ และพีเอชในช่วง 6-8 จะเทียบเท่าไนโตรเจนในรูปแตกตัวเป็นไอออนเท่ากับ 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ผลกระทบของไนโตรเจนต่อดีไนทรีฟิอิงแบคทีเรียจึงยังมีไม่มาก แต่ถ้ามีสารพิษอื่นๆ มาทำให้ดีไนทรีฟิอิงแบคทีเรียไม่ทำงานหรือทำงานช้าลง ก็อาจมีไนโตรเจนสะสมมากขึ้นจนเป็นอันตรายต่อระบบได้

8. อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

ในปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชัน แบคทีเรียชนิดเฮเทอโรทรอปส่วนใหญ่ต้องใช้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานในการทำงานและสังเคราะห์เซลล์ อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนจึงมีความสำคัญต่อปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชัน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ เช่น เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.9-3.2 กก.ซีโอดี/กก.ไนโตรเจน ถ้าใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 3.5-4.1 กก.ซีโอดี/กก.ไนโตรเจน เป็นต้น และถ้าต้องการให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ในการบำบัดไนเตรตด้วยระบบ Pre-denitrification จะต้องใช้ปริมาณคาร์บอนมากกว่าค่าจากการคำนวณในสมการสโตยชิโอเมตริก (stoichiometric) เพราะจะต้องใช้คาร์บอนในการออกซิไดซ์ออกซิเจนและรีดิวซ์ไนโตรเจนด้วย (วิฐ นันทิธัญญธาตา, 2546)

2.6 ระบบบำบัดที่เคเอ็นในน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดที่เคเอ็นในน้ำเสียได้ สามารถจำแนกตามลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.6.1 ระบบบำบัดแบบเติบโตแขวนลอย (Suspended Growth System)

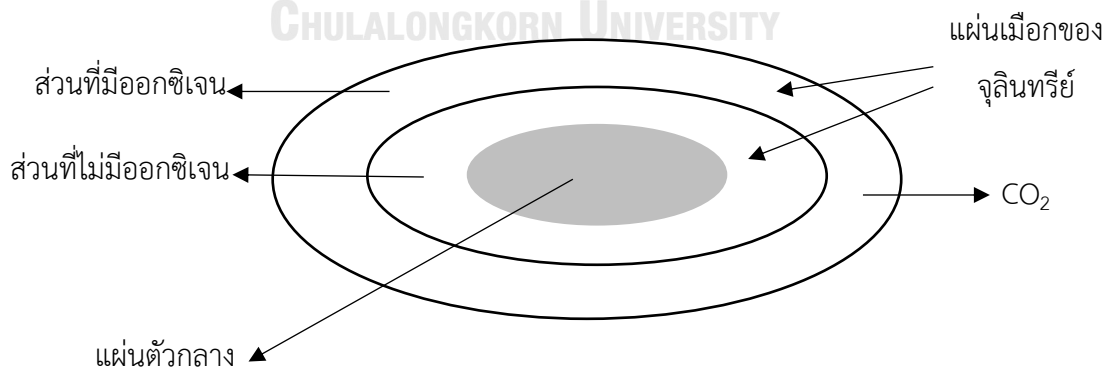
ระบบจุลินทรีย์แขวนลอย คือ ระบบที่มีจุลินทรีย์ลอยผสมกับน้ำเสีย เช่น ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นต้น

2.6.1.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge, AS)

เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีววิทยา โดยใช้จุลินทรีย์พวกที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จากนั้นจึงทำการแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพดีสามารถปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อมได้ ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเดินระบบประเภทนี้จะมีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากจำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่างๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในกระบวนการก่อสร้างและการดูแลระบบ เนื่องจากมีการใช้เครื่องจักรหลายชนิดและมีการเติมอากาศ

2.6.2 ระบบบำบัดแบบการเจริญแบบเกาะติด (Attached Growth System)

จุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบนี้ส่วนใหญ่จะเกาะอยู่กับตัวกลางที่เหมาะสมโดยเจริญเป็นเมือกบางๆ เรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) โดยการเกิดฟิล์มชีวภาพของแบคทีเรียบนผิวตัวกลางดังแสดงในภาพที่ 2.3 เพื่อทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยใช้ออกซิเจนและเจริญเติบโตต่อไป ระบบบำบัดประเภทนี้เป็นระบบที่ต้องอาศัยแผ่นหรือวัสดุติดตั้งอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยต้องให้น้ำเสียได้ไหลผ่านแผ่นวัสดุตัวกลางอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา ทำให้จุลินทรีย์ชนิดเกาะผิวตัวกลางเริ่มเกิดขึ้นจนเป็นชั้นหนา และโดยทั่วไปมักจะเกิดทั้งสภาพไร้อากาศและสภาพใช้อากาศของจุลินทรีย์ที่ภายในและภายนอกชั้นเมือกของจุลินทรีย์ตามลำดับ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542; สุบัณฑิต นิมรรัตน์, 2548)



ภาพที่ 2.3 การเกิดฟิล์มชีวภาพของแบคทีเรียบนผิวตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสีย

(สุบัณฑิต นิมรรัตน์, 2548)

2.6.2.1 ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC)

ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งวางจุ่มอยู่ในถังบำบัด ตัวกลางทรงกระบอกนี้จะหมุนอย่างช้าๆ เมื่อหมุนขึ้นพื้นน้ำและสัมผัสอากาศ จุลินทรีย์ที่อาศัยติดอยู่กับตัวกลางจะใช้ออกซิเจนจากอากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่สัมผัสตัวกลางขึ้นมา และเมื่อหมุนจกลงก็จะนำน้ำเสียขึ้นมาบำบัดใหม่สลับกันเช่นนี้ตลอดเวลา มีหลักการในการบำบัดน้ำเสียและมีส่วนประกอบเหมือนกับระบบโปรยกรอง โดยมีความแตกต่างอยู่ที่ตัวกลางที่ใช้เป็นที่พักของจุลินทรีย์ ระบบนี้มีหลักการในการบำบัด คือ อาศัยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศจำนวนมากที่ยึดเกาะติดบนแผ่นจานหมุนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยการหมุนแผ่นจานผ่านน้ำเสีย ซึ่งเมื่อแผ่นจานหมุนขึ้นมาสัมผัสกับอากาศก็จะพาเอาฟิล์มน้ำเสียขึ้นสู่อากาศด้วย ทำให้จุลินทรีย์ได้รับออกซิเจนจากอากาศ เพื่อใช้ในการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เหล่านั้นให้เป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเซลล์จุลินทรีย์ ต่อจากนั้นแผ่นจานจะหมุนลงไปสัมผัสกับน้ำเสียในถังปฏิกริยาอีกครั้ง ทำให้ออกซิเจนส่วนที่เหลือผสมกับน้ำเสีย ซึ่งเป็นการเติมออกซิเจนให้กับน้ำเสียอีกส่วนหนึ่ง สลับกันเช่นนี้ตลอดไปเป็นวัฏจักร แต่เมื่อมีจำนวนจุลินทรีย์ยึดเกาะแผ่นจานหมุนหนามากขึ้น จะทำให้มีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนหลุดออกจากแผ่นจานเนื่องจากแรงเฉือนของการหมุน ซึ่งจะรักษาความหนาของแผ่นฟิล์มให้ค่อนข้างคงที่โดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยที่ไหลออกจากถังปฏิกริยานี้ จะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์และน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบนี้มีคุณภาพดีขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2545)

2.6.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter, TF)

ระบบโปรยกรอง เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตบนวัสดุตัวกลางซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตติดอยู่บนตำแหน่งเดิมเสมอ (เป็นที่มาของคำว่า Fixed Film) ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้จุลินทรีย์อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากระยะเวลาในการกักเก็บน้ำในระบบโปรยกรองมักจะน้อยเกินไปจึงทำให้จุลินทรีย์ประเภทที่ว่ายน้ำอิสระไม่สามารถรักษาปริมาณหรือดำรงอยู่ได้ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตอยู่ในระบบจึงเป็นประเภทที่เกาะอยู่บนผิววัสดุต่างๆ ระบบโปรยกรองประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ถังที่บรรจุตัวกลาง ระบบจ่ายน้ำเสีย ระบบระบายน้ำและอากาศ และถังตกตะกอนชั้นที่สอง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537)

1. ถังที่บรรจุตัวกลาง

เป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางขนาดแตกต่างกันตามต้องการ มีตัวกลางบรรจุอยู่ในถัง เดิมใช้หินแต่ปัจจุบันมีการใช้ตัวกลางอื่นๆ เช่น พลาสติก ไม้เนื้อแข็ง เป็นต้น เพื่อให้ใช้งานได้

คงทนถาวรพอสมควร ทำเป็นรูปต่างๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวและมีช่องว่างระหว่างตัวกลางมาก ช่องว่างระหว่างตัวกลางที่มีมากจะถูกใช้เส้นทางสำหรับให้ออกซิเจนผ่านเพื่อให้เกิดสภาพแอโรบิกด้วย

2. ระบบจ่ายน้ำเสีย

จะติดตั้งเหนือตัวกลาง มักเป็นท่อยาวและเจาะรูด้านข้าง ท่อนี้จะหมุนช้าๆ ตามแนวรัศมีของถัง ทำให้น้ำเสียถูกโปรยลงบนผิวบนสุดของตัวกลางได้เต็มพื้นที่ของถัง ในการนี้ น้ำเสียจะได้รับออกซิเจนในอากาศไปด้วย และไหลผ่านพื้นผิวของตัวกลางลงไปสู่ชั้นล่าง

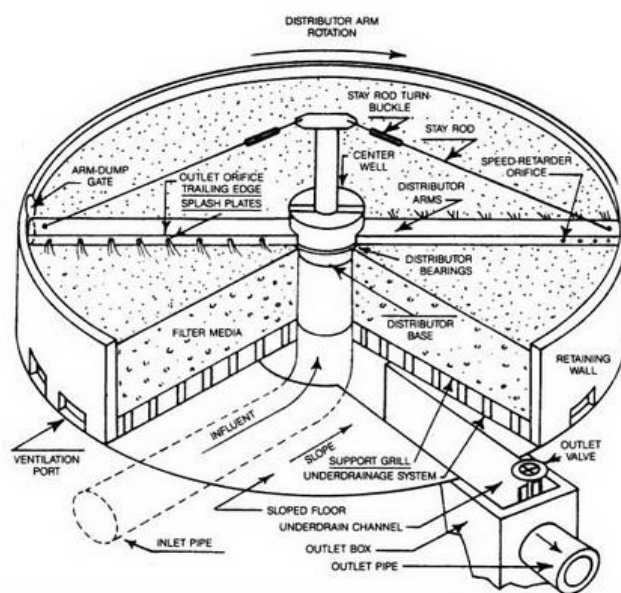
3. ระบบระบายน้ำและอากาศ

ระบบระบายน้ำทำหน้าที่รับน้ำเสียที่ผ่านผิวของตัวกลางลงมา และส่งต่อไปยังถังตกตะกอน การระบายอากาศทำโดยผ่านทางระบบระบายน้ำ ทิศทางการไหลของอากาศขึ้นกับอุณหภูมิสัมพัทธ์ระหว่างอากาศและน้ำเสีย ถ้าอุณหภูมิของอากาศสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำเสีย อากาศจะไหลจากด้านบนผ่านถังบรรจุตัวกลางลงมาสู่ด้านล่าง และในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของน้ำเสียสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ อากาศจะไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน จากการศึกษา พบว่าควรมีปริมาณอากาศไหลเข้าสู่ระบบอย่างต่ำที่สุดประมาณ 0.3 ลบ.ม./นาทิต.ม.พื้นที่ถัง หรือถ้าอุณหภูมิของน้ำเสียใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศควรมีการเติมอากาศในอัตราเดียวกันเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ (Tchobanoglous G. et al., 2003)

4. ถังตกตะกอนชั้นที่สอง

ถังตกตะกอนชั้นที่สองสำหรับถังโปรยกรอง จะมีลักษณะและการออกแบบคล้ายคลึงกับถังตกตะกอนชั้นที่สองในระบบเอเอส ซึ่งมีหน้าที่คือ เพื่อแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำทิ้ง ให้ได้น้ำทิ้งที่ออกจากน้ำทิ้ง ให้ได้น้ำทิ้งที่ออกจากถังตกตะกอนชั้นที่สองมีความใสปราศจากตะกอนแขวนลอย แต่จะไม่มีกรเวียนตะกอนเหมือนในระบบเอเอส

ระบบโปรยกรองมีกลไกการทำงานดังนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วจะถูกปล่อยจากด้านบนของถังให้ไหลผ่านชั้นของตัวกลางลงสู่ด้านล่าง ในขณะที่จุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางจะใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งสารอินทรีย์จะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มชีวภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนโดยการแพร่ไปยังจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ภายในเป็นอาหาร และที่ก้นถังจะมีน้ำเสียที่บำบัดแล้ว รวมทั้งฟิล์มชีวภาพที่หลุดออกมาบางส่วน ดังนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกส่งไปเข้าถังตกตะกอนสุดท้ายเพื่อแยกสลัดจ์ออกให้ได้น้ำทิ้งที่สามารถระบายทิ้งได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; สุบัณฑิต นิมรัตน์, 2548)



ภาพที่ 2.4 การทำงานของระบบโปรยกรอง
(Water Environment Federation, 2008)

ข้อดีและข้อเสียของระบบโปรยกรอง

ข้อดีของระบบโปรยกรอง

1. ใช้พลังงานต่ำ โดยระบบโปรยกรองจะใช้พลังงานประมาณ 10 กิโลวัตต์ต่อ 10 ลูกบาศก์เมตร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบเอเอสที่ใช้พลังงานประมาณ 20-40 กิโลวัตต์ต่อ 10 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าประหยัดกว่า 2-4 เท่า
2. เป็นระบบที่ง่ายต่อการดำเนินการ ควบคุมการทำงานได้ง่าย ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก ไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ในการดูแล
3. ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยและสามารถตักตะกอนได้อย่างง่ายเมื่อเทียบกับระบบตะกอนแรง เพราะตะกอนมีความหนาแน่นสูง ซึ่งเมื่อหลุดลอกออกจากตัวกลางจะเกิดเป็นตะกอนที่มีลักษณะคงที่ ทำให้ลดปัญหาในการกำจัดหรือนำตะกอนไปทิ้ง
4. ระบบก่อสร้างง่าย มีส่วนประกอบหรืออุปกรณ์ที่ใช้น้อย
5. เป็นระบบที่สามารถรับภาวะที่น้ำเสียเป็นพิษได้ เนื่องจากเวลากักเก็บน้ำเสียในถังสั้นกว่าหรืออาจเพราะจุลินทรีย์ที่อยู่บนผิวหน้าตายแล้วลอกออก จุลินทรีย์ที่อยู่ชั้นในที่ไม่ได้สัมผัสกับสารพิษจึงทำหน้าที่ต่อไป

ข้อเสียของระบบโปรยกรอง

1. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีลักษณะขุ่น แก้ไขได้โดยเติมอากาศช่วยในถังรองรับน้ำทิ้ง
2. เนื่องจากจุลินทรีย์เจริญเติบโตติดเกาะอยู่กับตัวกลางจึงไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของมวลจุลินทรีย์ตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไปได้ ดังนั้นจะต้องออกแบบไว้สำหรับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น ความเข้มข้น อัตราการไหล อุณหภูมิ เป็นต้น
3. การเปลี่ยนแปลงฤดูทำให้เกิดปัญหาได้ เช่นในฤดูร้อนถังโปรยกรองที่อาจจะเป็นแหล่งเพาะแมลงทำให้เกิดการรบกวนบริเวณใกล้เคียงได้ (ธีระ เกรอต, 2539)

2.7 สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต

แบคทีเรียต้องการสารอาหารต่างๆ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและวิตามิน ซึ่งมีแบคทีเรียบางชนิดสามารถสร้างสารอาหารเหล่านี้จากสารอนินทรีย์เองได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ กลีโกลิแอมิโนเนีย โดยสารอาหารสำคัญที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการเจริญเติบโต มีดังนี้

1. ไนโตรเจน

แบคทีเรียจะได้รับธาตุไนโตรเจนจากสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น พวกออร์โทโทรฟจะได้จากกลีโกลิแอมิโนเนีย กลีโกลิไนเตรทหรือก๊าซไนโตรเจน ส่วนพวกเฮเทอโรโทรฟจะได้จากโปรตีน กรดอะมิโน เป็นต้น โดยแบคทีเรียเหล่านี้จะนำธาตุไนโตรเจนไปใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์โปรตีน และส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ เช่น เอนไซม์ ดีเอ็นเอ อาร์เอ็นเอ เป็นต้น สำหรับในระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในการย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำ ถ้าน้ำเสียนั้นขาดหรือมีสารประกอบที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่น้อย จะทำให้ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจึงต้องเติมสารบางอย่างที่มีธาตุไนโตรเจนลงไปด้วยเพื่อเสริมสร้างการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งสารประกอบที่ใช้กันมาก ได้แก่ ยูเรีย เนื่องจากมีธาตุไนโตรเจนค่อนข้างสูงและมีราคาถูก

2. คาร์บอน

แบคทีเรียต้องการธาตุคาร์บอนเพื่อนำไปสร้างเป็นส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์และสร้างพลังงาน โดยธาตุคาร์บอนที่แบคทีเรียกลุ่มออร์โทโทรฟจะได้รับมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะได้รับจากสารอินทรีย์ต่างๆ

3. เกลือแร่ของธาตุต่างๆ

แบคทีเรียแต่ละชนิดต้องการเกลือแร่ของธาตุต่างๆ ไม่เหมือนกัน โดยเกลือแร่ที่แบคทีเรียส่วนใหญ่ต้องการ ได้แก่ เกลือแร่ของธาตุโพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ต่างๆ เหล็ก (Fe) เป็นส่วนประกอบของระบบไซโตโครม (Cytochrome) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) เป็นส่วนประกอบของโปรตีนและเอทีพี (ATP) โซเดียม (Na) เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่พบในแบคทีเรียที่อยู่ในทะเล คาร์บอน (C) และแคลเซียม (Ca) เป็นส่วนประกอบของผนังหุ้มสปอร์

มีเกลือของธาตุบางชนิดที่แบคทีเรียต้องการในปริมาณที่น้อยมาก (Trace element) แต่ก็ยังเป็นธาตุที่มีบทบาทในการดำรงชีวิต เช่น เกลือแร่ของธาตุโคบอลต์ (Co) มีความสำคัญในการสังเคราะห์วิตามินบี 12 และ โมลิบดีนัม (Mo) มีความสำคัญในการตรึงไนโตรเจน

4. วิตามินและ Growth Factors

วิตามินเป็นสารที่ควบคุมการทำงานของร่างกาย ซึ่งร่างกายต้องการในปริมาณน้อย ถ้าขาดไปร่างกายจะทำงานผิดปกติ ส่วน Growth Factors นั้นเป็นสารที่เร่งอัตราการเจริญของแบคทีเรีย ดังนั้นแบคทีเรียจึงต้องการวิตามินและ Growth Factors ในการเจริญเติบโต แต่มีแบคทีเรียบางชนิดสามารถสังเคราะห์ขึ้นใช้เองได้ โดยแบคทีเรียต้องการวิตามินเพื่อนำไปทำหน้าที่หรือเป็นส่วนประกอบของโคเอนไซม์ เช่น วิตามินบี 1 (วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัศมี, 2556)

2.8 ปัจจัยที่มีผลในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันร่วมกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8 เมื่อพิจารณาแนวทางที่จะทำให้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันกับดีไนตริฟิเคชันเกิดร่วมกันได้ คือ การควบคุมปัจจัยด้านปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นหลัก โดยในช่วงการบำบัดแอมโมเนียให้เป็นไนเตรทด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันต้องทำการเดินระบบในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 2 มก./ล. จากนั้นหากต้องการบำบัดไนเตรทด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันต้องทำการเดินระบบภายใต้สภาวะที่ควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยที่สุด แต่การควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้เหมาะสมอาจจะเป็นแค่การทำให้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องกัน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียและไนเตรทอาจเกิดได้ไม่เท่ากัน เพราะขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ใช้ในการเดินระบบ ปริมาณเชื้อไนตริฟายอิงแบคทีเรียและดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่พบในระบบ ปริมาณแอมโมเนียและไนเตรทที่เข้าสู่ระบบ เป็นต้น

ตารางที่ 2.8 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน

ปัจจัย	ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน	ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน	ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันร่วมกับดีไนตริฟิเคชัน
พีเอช	7.5 – 8.5	6.5 – 8.5	7.5 -8.5
ค่าศักย์ออกซิเดชัน –รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	+100	-50 ถึง -100	ไนตริฟิเคชัน +100 ดีไนตริฟิเคชัน -50 ถึง -100
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	มากกว่า 2	น้อยกว่า 0.2	ไนตริฟิเคชันมากกว่า 2 ดีไนตริฟิเคชันน้อยกว่า 0.2
อุณหภูมิ (°ซ)	30 – 36	25 – 35	30 – 35
สารอินทรีย์คาร์บอน	ปริมาณมากจะถูกยับยั้ง	อัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระบบ	อัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระบบ

2.9 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

รูปแบบจลนพลศาสตร์ของอัตราการบำบัดสารใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ 5 รูปแบบ ได้แก่ จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod) จลนพลศาสตร์ลำดับศูนย์ (Zero order kinetics) จลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง (First order kinetics) จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น (Substrate inhibition kinetics) และจลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์ (Product inhibition kinetics) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Liu, 2006)

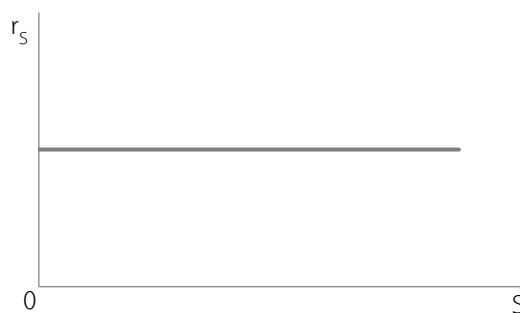
2.9.1 จลนพลศาสตร์ลำดับศูนย์

ปฏิกิริยาลำดับศูนย์นี้จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่เสมอ การเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยาลำดับศูนย์จะไม่แปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยมีสมการดังสมการที่ (2.13) และกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่เป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้นมีลักษณะ ดังภาพที่ 2.5

$$r_s = k_0 S_0^0 \quad (2.13)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่ของอัตราการบำบัดจำเพาะ

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น

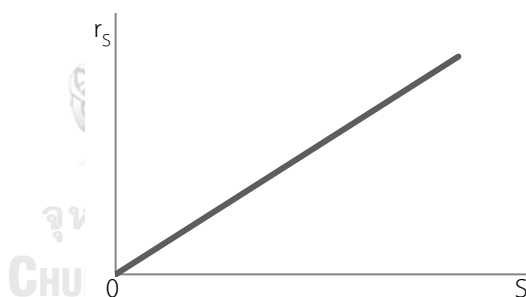


ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา
และความเข้มข้นของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาลำดับศูนย์

2.9.2 จลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง

อัตราการบำบัดจำเพาะของปฏิกิริยาลำดับหนึ่งนี้จะแปรผันตรงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น โดยมีสมการดังสมการที่ (2.14) และกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น มีลักษณะดังภาพที่ 2.6

$$r_s = k_1 S_1 \quad (2.14)$$



ภาพที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยา
และความเข้มข้นของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง

2.9.3 จลนพลศาสตร์แบบไมนอด

สมการของทฤษฎีนี้เป็นสมการที่ได้จากการทดลอง ซึ่งได้รับการยอมรับและเป็นที่ยอมรับใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ โดยจะมีลักษณะดังสมการที่ (2.15)

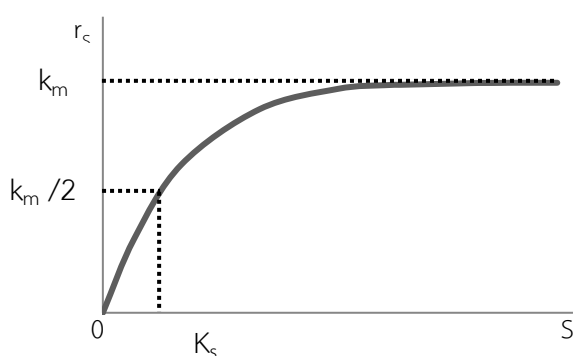
$$r_s = k_m \frac{S}{K_s + S} \quad (2.15)$$

โดยที่ r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (อัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวหรือปริมาตรของตัวกลาง)

k_m = อัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด

K_s = ความเข้มข้น (S) ที่ทำให้อัตราการบำบัดจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด

จากสมการที่ (2.15) จะได้กราฟที่มีลักษณะดังภาพที่ 2.7 ซึ่งเมื่อประมาณค่าของ k_m ในกราฟนี้ ก็จะสามารถหาค่า K_s จากกราฟนี้ได้เช่นกัน



ภาพที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นจากโมนอด

จากภาพที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า หากปริมาณสารอาหารที่มีอยู่จำกัดลดลงแล้ว อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก็จะลดลงเช่นกัน แต่ถ้าปริมาณของสารอาหารเพิ่มขึ้นจนถึงค่าจำกัดแล้ว อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะอยู่ที่ค่าคงที่สูงสุด (k_m) นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า K_s ได้จากกราฟนี้ โดยเป็นค่าครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะอยู่ที่ค่าคงที่สูงสุด ($k_m/2$)

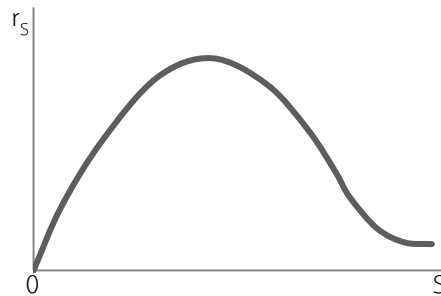
โดยทั่วไป สมการโมนอดใช้เพื่อหาปริมาณของการบำบัดสารเริ่มต้นในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่สารอินทรีย์จะเป็นปริมาณสารเริ่มต้นในน้ำเสียที่มีจำกัด ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ K_s ต่ำ

2.9.4 จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น

จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้นนี้ เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงเกินไปจนไปยับยั้งการทำงานของปฏิกิริยา โดยมีสมการดังสมการที่ (2.16) และกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น มีลักษณะดังภาพที่ 2.8

$$r_s = k_m \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}} \quad (2.16)$$

โดยที่ K_i = ค่าคงที่การยับยั้งการทำงาน



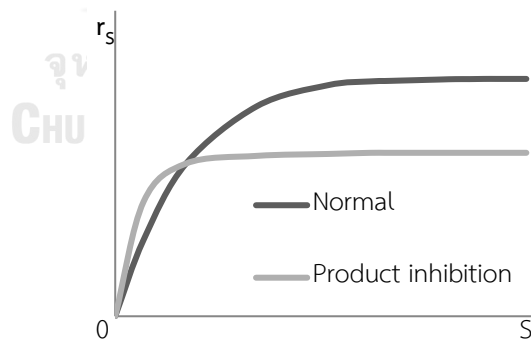
ภาพที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นจากการถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น

2.9.5 จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์

จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์นี้ เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สูงเกินไปจนไปยับยั้งการทำงานของปฏิกิริยา โดยมีสมการดังสมการที่ (2.17) และกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น มีลักษณะดังภาพที่ 2.9

$$r_s = k_m \frac{S}{K_s + K_s \frac{P}{K_i} + S} \quad (2.17)$$

โดยที่ P = ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นจากการถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์

2.10 สมดุลมวล

การเขียนสมการสมดุลมวล จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาแบบครึ่งปฏิกิริยา (Half Reaction) มาใช้ในการเขียนสมการแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยสมการครึ่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ประกอบไปด้วยสมการทั้งหมด 3 สมการ ดังนี้ (ธีระ เกรอต, 2539)

สมการที่ 1 เป็นสมการของการให้อิเล็กตรอน (R_d)

สมการที่ 2 เป็นสมการของการรับอิเล็กตรอน (R_a)

สมการที่ 3 เป็นสมการของเซลล์จุลินทรีย์ (R_c)

ซึ่งสมการทั้งหมดจะเขียนอยู่ในรูปของสมมูลอิเล็กตรอน (Electron Equivalent) เพื่อนำมาประกอบรวมกันเป็นสมการสมดุลมวลรวม (R) ดังสมการที่ (2.18)

$$R = R_d + f_e R_a + f_s R_c \quad (2.18)$$

โดยที่ f_e คือ ส่วนของตัวให้อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างพลังงาน

f_s คือ ส่วนของตัวให้อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างเซลล์

และ $f_e + f_s = 1.00$

2.10.1 การเขียนสมดุลมวลในช่วงการกำจัดซีโอดี

การหาค่า f_e และ f_s

หาได้จากค่า Yield (Yield) โดยค่า Yield ที่นำมาใช้ในการคำนวณนี้ เป็นค่า Yield ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งมีค่า Yield = 0.4 (Tchobanoglous G. et al., 2003)

จากสมการ $f_s = \frac{1.42}{0.85} \text{ (Yield)}$

เนื่องจาก สมมติว่าระเหยร้อยละ 85

จะได้ว่า $f_s = (0.85) \frac{1.42}{0.85} \text{ (Yield)}$

$= (0.85) \frac{1.42}{0.85} (0.4)$

$= 0.483$

แทนค่าในสมการ $f_e + f_s = 1.00$

จะได้ว่า $f_e = 1.00 - 0.483$

$= 0.517$

ดังนั้น f_s มีค่าเท่ากับ 0.483 และ f_e มีค่าเท่ากับ 0.517

เขียนสมการสมดุลมวลรวม

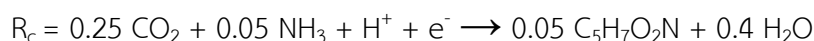
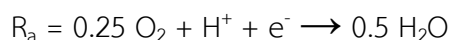
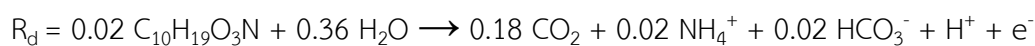
สมการสมดุลมวลรวมในช่วงการกำจัดซีโอดีสามารถเขียนได้ ดังนี้ คือ

สมการที่ 1 (R_d) ตัวให้อิเล็กตรอนเป็นสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

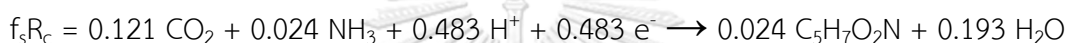
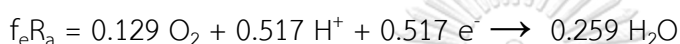
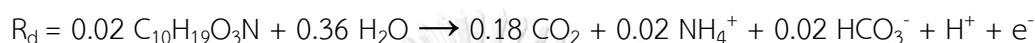
สมการที่ 2 (R_a) ตัวรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน

สมการที่ 3 (R_c) สมการเซลล์จุลินทรีย์ที่มีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน

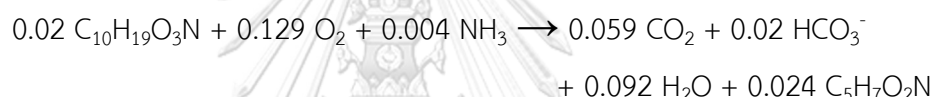
แสดงดังนี้



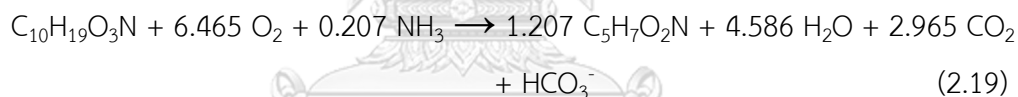
แทนค่า $f_s = 0.483$ และ $f_e = 0.517$ ลงในสมการจะได้เป็น



ดังนั้นสมการสมดุลรวม (R) จะได้เป็น



สมการสตอยชิโอเมตริก คือ



2.10.2 การเขียนสมดุลมวลในช่วงการกำจัดแอมโมเนียม

การหาค่า f_e และ f_s

หาได้จากค่า Yield (Yield) โดยค่า Yield ที่นำมาใช้ในการคำนวณนี้ เป็นค่า Yield ที่เกิดขึ้นใน

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งมีค่า Yield = 0.12 (Tchobanoglous G. et al., 2003)

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

เนื่องจาก สมมติว่าระเหยร้อยละ 85

$$\text{จะได้ว่า} \quad f_s = (0.85) 1.42 \text{ (Yield)}$$

$$= (0.85) 1.42 (0.12)$$

$$= 0.145$$

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

$$\text{จะได้ว่า} \quad f_e = 1.00 - 0.145$$

$$= 0.855$$

ดังนั้น f_s มีค่าเท่ากับ 0.145 และ f_e มีค่าเท่ากับ 0.855

เขียนสมการสมดุลมวลรวม

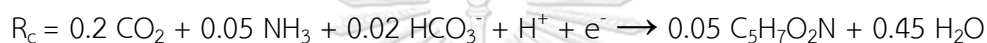
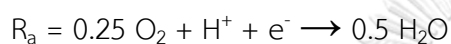
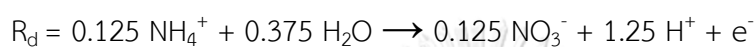
สมการสมดุลมวลรวมในช่วงการกำจัดแอมโมเนียมสามารถเขียนได้ ดังนี้ คือ

สมการที่ 1 (R_d) ตัวให้อิเล็กตรอนเป็นสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

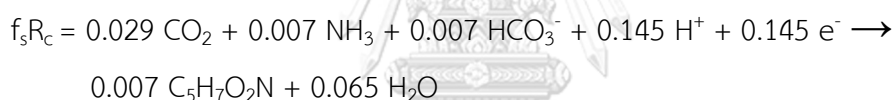
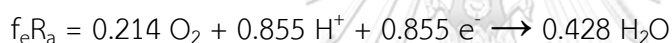
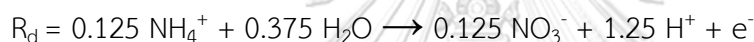
สมการที่ 2 (R_a) ตัวรับอิเล็กตรอนเป็นไนเตรท

สมการที่ 3 (R_c) สมการเซลล์จุลินทรีย์ที่มีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน

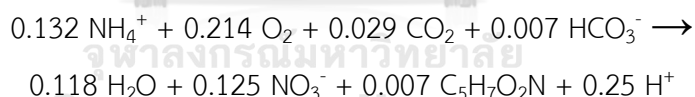
แสดงดังนี้



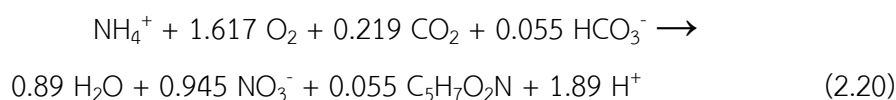
แทนค่า $f_s = 0.145$ และ $f_e = 0.855$ ลงในสมการจะได้เป็น



ดังนั้นสมการสมดุลมวลรวม (R) จะได้เป็น



สมการสตอยชิโอเมตริก คือ



2.10.3 การเขียนสมดุลมวลในช่วงการกำจัดไนเตรท

การหาค่า f_e และ f_s

หาได้จากค่ายิลด์ (Yield) โดยค่ายิลด์ที่นำมาใช้ในการคำนวณนี้ เป็นค่ายิลด์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งมีค่า Yield = 0.3 (Tchobanoglous G. et al., 2003)

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

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ว่า} \quad f_s &= 1.42 \text{ (Yield)} \\
 &= 1.42 (0.3) \\
 &= 0.426 \\
 \text{แทนค่าในสมการ} \quad f_e + f_s &= 1.00 \\
 \text{จะได้ว่า} \quad f_e &= 1.00 - 0.426 \\
 &= 0.574
 \end{aligned}$$

ดังนั้น f_s มีค่าเท่ากับ 0.426 และ f_e มีค่าเท่ากับ 0.574

เขียนสมการสมดุลรวม

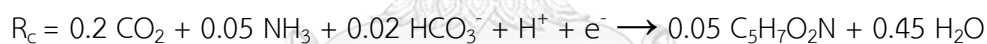
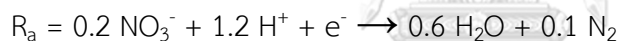
สมการสมดุลรวมในช่วงการกำจัดไนเตรทสามารถเขียนได้ ดังนี้ คือ

สมการที่ 1 (R_d) ตัวให้อิเล็กตรอนเป็นสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

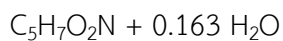
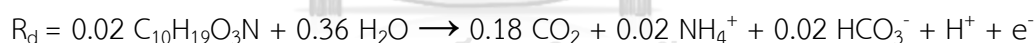
สมการที่ 2 (R_a) ตัวรับอิเล็กตรอนเป็นไนเตรท

สมการที่ 3 (R_c) สมการเซลล์จุลินทรีย์ที่มีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน

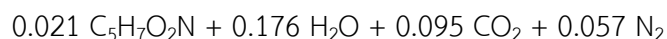
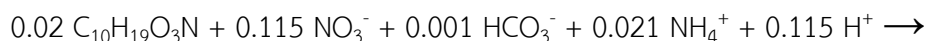
แสดงดังนี้



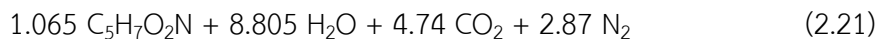
แทนค่า $f_s = 0.362$ และ $f_e = 0.638$ ลงในสมการจะได้เป็น



ดังนั้นสมการสมดุลรวม (R) จะได้เป็น



สมการสโตยซิโอมेटริก คือ



2.11 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Anthonisen และคณะ (1976) ทำการศึกษาการยับยั้งของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันโดยแอมโมเนียและกรดไนตริก พบว่า ถ้าอยู่ในสถานะที่พีเอชต่ำกว่า 6.5 จะทำให้สารตั้งต้นที่เอโอปี (แบคทีเรียที่เปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนโตรท) ใช้อยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ทั้งหมด จึงไม่มีก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และมีกลิ่นฉุนรุนแรงอยู่ (U.S. EPA., 1975) (U.S.EPA, 1975) แต่ก็ทำให้ไนโตรท (NO_2^-) ที่เป็นสารตั้งต้นที่เอโอปี (แบคทีเรียที่เปลี่ยนไนโตรทไปเป็นไนเตรท) ใช้งาน จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรดเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดไนตริก (HNO_2) ซึ่งสามารถยับยั้งการทำงานและการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรียได้

Hayatsu (1993) ศึกษาพีเอชที่ต่ำที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในดินกรดและการแยกตัวของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียม-ไนโตรเจนไปเป็นไนเตรท พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ในดินกรดจนถึงที่พีเอชต่ำเท่ากับ 3.3 - 5.1 โดยส่วนใหญ่ในดินที่พีเอชต่ำกว่าจะมีอัตราไนตริฟิเคชันที่น้อยกว่า ดินที่มีค่าพีเอช 5.1 พบอัตราไนตริฟิเคชันดีที่สุดคือ 44.9 ไมโครกรัมไนโตรเจนต่อกรัมดินแห้งต่อวัน ซึ่งในการบำบัดที่เคเอ็นในสถานะที่พีเอชต่ำจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากกลิ่นของก๊าซแอมโมเนียและลดการเติมต่างได้มากขึ้น

ศิริพร คุณาวิชา (2539) ศึกษาการกำจัดไนเตรทจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานวันเส้น โดยวิธีออกซิเจน-แอนแอโรบิกที่มีตัวกลาง โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันด้วยระบบแอกทีเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) และทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วยระบบแอนแอโรบิกฟิลเตอร์ (anaerobic filter) โดยควบคุมอัตราส่วน C:N ที่เข้าระบบแอนแอโรบิกฟิลเตอร์เท่ากับ 1.92 3.52 4.52 และ 6.52 โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเพิ่มปริมาณ COD ให้กับระบบ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทของระบบเท่ากับ 30.30%, 98.68%, 99.65% และ 99.74% ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้มากขึ้น เมื่อ COD:NO_3^- สูง และสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ที่ค่า COD:NO_3^- ตั้งแต่ 3.52 ขึ้นไป แต่เมื่อค่า COD:NO_3^- สูงเกิน 3.52 ขึ้นไปแล้ว BOD ในน้ำออกจะมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน

De Boer และคณะ (1989) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยแบคทีเรียกลุ่ม Nitrosospira พบว่าเชื้อผสมของ Nitrosospira และ Nitrobacter ในอาหารเหลวที่มีแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำได้จนถึง 4.7 จากค่าพีเอชเริ่มต้นประมาณ 7.0 และได้มีการศึกษาในอาหารที่มียูเรียหรือแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยควบคุมพีเอชตลอดการทดลองที่ 4.5 5.0 และ 5.5 พบว่าในอาหารที่มียูเรียเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในทุกพีเอชที่ทำการศึกษา แต่ในพีเอช 4.5 มีการผลิตไนเตรทได้ช้ากว่า ส่วน

ในอาหารที่มีแอมโมเนียมเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในพีเอชที่ 5.5 เท่านั้น และผลิตไนเตรทได้ช้ากว่าในอาหารที่มียูเรียมาก

De Boer และคณะ (1995) ทำการศึกษาโดยตรึงเซลล์แบคทีเรียไว้ในเม็ดแคลเซียม-แอลจิเนต และได้ศึกษาที่พีเอชเริ่มต้น 6 และ 4 หลังจากนั้นถ้าพีเอชลดลงต่ำกว่า 4 จะทำการปรับพีเอชให้ได้ 4 ทุกวัน พบว่าไม่เกิดการผลิตไนเตรทขึ้นที่พีเอชเริ่มต้น 4 ทั้งในเซลล์ที่ถูกตรึงไว้ในแคลเซียมแอลจิเนตและไม่ถูกตรึง ส่วนที่พีเอชเริ่มต้น 6 เซลล์ที่ถูกตรึงมีการผลิตไนเตรทขึ้นจึงทำให้พีเอชลดลง เมื่อปรับพีเอชเป็น 4 ทุกวัน ก็ยังสามารถผลิตไนเตรทต่อไปได้ แต่ในเซลล์ที่ไม่ถูกตรึงเมื่อพีเอชลดลงจนถึง 4.2 ก็ไม่มีการผลิตไนเตรทเกิดขึ้น และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาโดยควบคุมพีเอชเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกพีเอชมีค่าคงที่ที่ 6 ช่วงกลางพีเอชจะผันผวนไม่คงที่ซึ่งจะถูกปรับเป็น 6 วันละครั้ง และช่วงสุดท้ายพีเอชคงที่ที่ 4 พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ที่พีเอช 4 โดยเซลล์ส่วนใหญ่มากกว่า 99% เป็นเซลล์ที่ไม่ได้มีการรวมกลุ่มกัน และเมื่อนำเซลล์เหล่านี้ไปเลี้ยงในอาหารเหลวที่พีเอช 4 พบว่ายังมีปริมาณเซลล์หนาแน่นมากยังสามารถผลิตไนเตรทได้มากเช่นกัน

Hamlin และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดไนเตรทด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในสถานะที่ปรับเปลี่ยนแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน 4 ชนิด ได้แก่ เมทานอล อะซิติก กากน้ำตาล และแป้งที่ผ่านการย่อย โดยออกแบบถังดีไนตริฟิเคชันให้มีความจุน้ำปริมาตร 1.89 ลบ.ม. ภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีน ปริมาตร 1 ลบ.ม. จากนั้นผ่านน้ำเสียจากถังไนตริฟิเคชันเข้าบริเวณทางด้านล่างของถังดีไนตริฟิเคชันด้วยอัตราการไหล 10 ล./นาที ผลการทดลอง พบว่า สารอินทรีย์คาร์บอนทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรทในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเตรทเข้าในช่วง 11-57 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายพบว่า การใช้กากน้ำตาลมีค่าใช้จ่ายต่ำสุด แต่ยังคงต้องแก้ปัญหาในเรื่องของแอมโมเนียที่ตกค้างอยู่ในน้ำที่เกิดขึ้นจากกากน้ำตาลและความขุ่น

Chiu และ Chung (2003) ศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยกำหนดความเข้มข้นของไนเตรท เท่ากับ 25, 50, 100 และ 200 มก./ล. ตามลำดับ ภายใต้สถานะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินพอ พบว่า อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทที่เหมาะสมสำหรับความเข้มข้นไนเตรทที่เข้าระบบดังกล่าว คือ 5.5, 4.5, 4.0 และ 2.6 ตามลำดับ นั่นคือ อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเตรทต่ำ คือ 5.5 ซึ่งอัตราส่วนนี้ยังสามารถใช้เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไนเตรทที่สูงได้อีกด้วย

Tanaka และ Suzuki (2002) ศึกษาการใช้ถังกรองชีวภาพโดยมีการหมุนเวียนเอ็มแอลที่มีไนเตรทจากถังกรองแอโรบิกกลับมาถังแอนอกซิก ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการเวียนไนเตรทเท่ากับ

1, 2, 3 และ 4 จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ในการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจนมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 88% และ 74% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าอัตราการเวียนกลับภายใน (เวียนไนเตรท) ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีแต่มีผลต่อการกำจัดไนโตรเจน โดยอัตราการเวียนกลับ 4 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงสุด

Tarre และ Green (2004) ทำการศึกษาปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สภาวะพีเอชต่ำทั้งในถังปฏิกรณ์แบบจุลินทรีย์แขวนลอยและแบบเจริญเกาะติด พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ไม่มีการปรับพีเอชตลอดการทดลอง พบว่า ในถังปฏิกรณ์แบบจุลินทรีย์เจริญเกาะติดสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้จนถึงพีเอชสุดท้ายประมาณ 4.3 สามารถเกิดอัตราไนตริฟิเคชันได้สูงถึง 5.6 ก.ไนโตรเจน/ล.-วัน และมีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเท่ากับ 0.55 ก.ไนโตรเจน/ก.ชีวมวล-วัน ส่วนถังปฏิกรณ์แบบเดบิโอตแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้จนถึงพีเอชสุดท้ายประมาณ 3.8 สามารถเกิดอัตราไนตริฟิเคชันได้ 1.1 ก.ไนโตรเจน/ล.-วัน และมีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเท่ากับ 0.24 ก.ไนโตรเจน/ก.ชีวมวล-วัน

Rivett และคณะ (2008) ศึกษาช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียพบว่า ที่พีเอชต่ำกว่า 5 จะส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันถูกยับยั้งและมีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมของไนโตรทหรือไนตรัสออกไซด์ ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ และ Rezaee และคณะ (2008) พบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 ก็ส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันถูกยับยั้งได้เช่นกัน

รวินดา จุ้ยสกุล (2559) ศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโปรยกรอง โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 500 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 5 6 ถึง 7 และวิเคราะห์อัตราการบำบัดที่เคเอ็นที่พีเอชต่างๆ พบว่า ที่พีเอช 6 มีอัตราการบำบัดที่เคเอ็นสูงสุดเมื่อเทียบกับพีเอชอื่นๆ

ดังนั้นจากงานวิจัยที่กล่าวมา จึงทำให้เลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบโปรยกรองสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และถังกรองกึ่งไร้อากาศสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะพีเอช 6 เนื่องจากระบบโปรยกรองเป็นระบบการเจริญแบบเกาะติด มีการเกิดฟิล์มชีวภาพซึ่งพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำพอที่จะทำให้แอมโมเนียไม่ระเหยไปสร้างกลิ่นเหม็นสู่ภายนอกแต่สร้างฟิล์มชีวภาพเพื่อบำบัดสารอินทรีย์และค่าที่เคเอ็นได้ และเป็นระบบที่ก่อสร้างง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำ นอกจากนี้ฟิล์มชีวภาพยังมีความสามารถในการทนต่อความเป็นพิษของแอมโมเนียความเข้มข้นสูงๆ ได้ดีกว่าพวกตะกอนชีวภาพแบบแขวนลอย และดังนั้นถ้าสามารถหมุนเวียนให้น้ำเสียเริ่มต้นที่มีค่าซีโอดีปานกลางแต่มีที่เคเอ็นสูงมาผสมกับน้ำทิ้งนี้ในถังกรองกึ่งไร้อากาศน่าจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ ซึ่งจะสามารถกำจัดไนเตรทออก

จากระบบได้อย่างถาวร และสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้เพื่อนำไปหาขนาดและเป็นต้นแบบ
ของถังปฏิกริยาที่จะบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ได้จริง



บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย

3.1.1 พีเอช

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

3.1.2 ซีโอดี (COD)

- หลอดย่อย (Digestion Vessels)
- เต้าหลอด (Heater Block) หรือ เต้าซีโอดี (COD Reactor)
- บิวเรต ปิเปต
- ขวดรูปกรวย ขนาด 125 มิลลิลิตร
- สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต
- สารละลายมาตรฐานเฟร์สแอมโมเนียมซัลเฟต 0.05 นอร์มัล
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

3.1.3 แอมโมเนีย (NH₃)

- น้ำกลั่น
- โซเดียมซาลีไซเลต (C₇H₅NaO₃)
- โซเดียมไนโตรปริสไซด์ (Na₂[Fe(CN)₅NO].2H₂O)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- โซเดียมซิติเรท (C₆H₅O₇Na₃.2H₂O)
- สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Sodium hypochlorite) เข้มข้น 6%
- อัลคาไลน์ซิติเรท
- ไฮโปคลอไรด์
- หลอดทดลอง (Reaction Tube)

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

3.1.4 ไนเตรท (NO_3^-)

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- คิวเวทท์ควอตซ์ (Quartz cuvette) ขนาด 1 เซนติเมตร
- น้ำกลั่น
- หลอดทดลอง (Reaction Tube)
- สารละลายมาตรฐานไนเตรท (Standard Nitrate Solution)
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N

3.1.5 ไนไตรท์ (NO_2^-)

- กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) 85%
- ซัลฟานิลไมด์ ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$)
- เอ็น-(1-แนพทิล) เอทิลลินไดอะมีน ไดไฮโดรคลอไรด์ (NED)
- โซเดียมออกซาเลต ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$)
- โซเดียมไนไตรท์ (NaNO_2)
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- คิวเวทท์ควอตซ์ (Quartz cuvette) ขนาด 1 เซนติเมตร
- หลอดทดลอง (Reaction Tube)
- เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.6 ของแข็งแขวนลอย (SS)

- ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ 103 – 105 °C
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
- กระดาษกรอง Whatman GF/C ϕ 4.7 cm
- อุปกรณ์ชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- เครื่องดูดอากาศ (Suction pump)

- จานระเหย (Evaporation dish)
- กระบอกตวง (Cylinder)
- คีมหนีบ (forceps)

3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

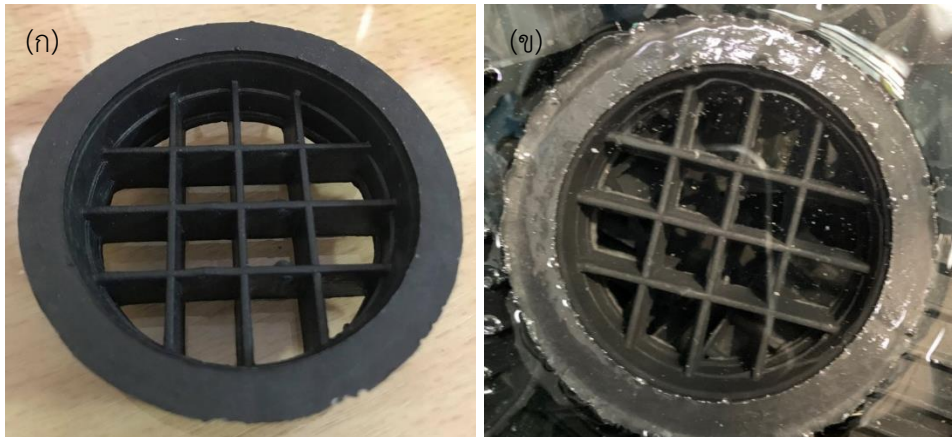
น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลกลูโคส เพื่อให้เป็นตัวแทนของน้ำเสียจากห้องน้ำสาธารณะในสถานบริการน้ำมัน มีปริมาตร 25 ล. ใช้มีแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เป็นแหล่งไนโตรเจน ปรับพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลอง (พีเอช 6) ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) และส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ ดังตารางที่ 3.1

สาร	ความเข้มข้น (มก./ล.)
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	2,000
NH_4Cl	150*
K_2HPO_4	145
MgSO_4	24
FeSO_4	5
MnSO_4	24
CaCl_2	19

หมายเหตุ: *หน่วย มก.ไนโตรเจน/ล.

3.3 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ซม. สูง 2 ซม. พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม. ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 (ก) ตัวกลางพลาสติกในถังปฏิกริยาก่อนการเดินระบบ

(ข) ตัวกลางพลาสติกในถังปฏิกริยาที่ผ่านการเดินระบบ

3.4 ถังปฏิกริยา

ถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งมีรายละเอียดของชุดการทดลองในงานวิจัย ดังตารางที่ 3.2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.2 ระบบร่วมถังโปรยกรอง (ก) และถังกรองกึ่งไร้อากาศ (ข)

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของชุดการทดลองในงานวิจัย

เครื่องมือ/อุปกรณ์	รายละเอียด
<p data-bbox="284 409 443 443">ถังโปรยกรอง</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นทรงกระบอกที่ทำจากท่อพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 ม. สูง 1 ม. - ภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ซม. สูง 2 ซม. พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม. - มีอัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรองเท่ากับ 100 ลิ./ชม.
<p data-bbox="284 1149 517 1182">ถังกรองกิ่งไร้อากาศ</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - มีลักษณะเป็นถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยม ที่มีความกว้าง 0.3 ม. ความยาว 0.3 ม.และความสูง 0.5 ม. - ภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ซม. สูง 2 ซม. พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม.

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยมีการทดลอง ดังนี้

3.5.1 เริ่มเดินระบบ

ก่อนเดินระบบในการทดลอง ได้เลี้ยงหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้เกาะติดกับตัวกลางเพื่อให้เกิดฟิล์มชีวภาพในถังโปรยกรอง โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส 2,000 มก.ซีไอดี/ล. แอมโมเนียมคลอไรด์ 150 มก.ไนโตรเจน/ล. และมีธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังตารางที่ 3.3 ให้มีปริมาตรน้ำเสียรวม 25 ล.

ตารางที่ 3.3 ธาตุอาหารเสริมที่เป็นส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง (Hanada et al., 2014)

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (มก./ล.)
K_2HPO_4	145
$MgSO_4$	24
$FeSO_4$	5
$MnSO_4$	24
$CaCl_2$	19

2. เดินระบบในถังโปรยกรองที่มีตัวกลางพลาสติก ควบคุมพีเอชให้เป็น 6 โดยปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริก

3. ทำการหมุนเวียนน้ำเข้าถังโปรยกรองตลอดเวลาด้วยอัตราการเวียนน้ำภายในถัง 100 ล./ชม.

4. เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรองสัปดาห์ละ 3 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าซีไอดี แอมโมเนียที่ลดลงและไนเตรทที่เพิ่มขึ้น

5. เมื่อแอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนเตรทจนหมดหรือคงที่จึงทำการเปลี่ยนน้ำเสียและเดินระบบใหม่ แล้วจึงเริ่มเดินระบบในการทดลอง รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 182 วัน

3.5.2 การทดลอง

ศึกษาอัตราการบำบัดซีไอดีและทีเคเอ็นและทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นซีไอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นของน้ำเสียใหม่ที่เข้าระบบบริเวณถังกรองกึ่งไร้อากาศโดยนำน้ำเสียออกจากระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68 แล้วเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68 ตามลำดับที่พีเอช 6

3.5.2.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลอง

ตัวแปรต้น	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ทดแทนน้ำเสียใหม่ร้อยละ 16 32 50 และ 68	ความเข้มข้นของซีโอติ 2,000 มก./ล. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 150 มก.ไนโตรเจน/ล.
ตัวแปรตาม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย หลังการทดลอง	ซีโอติ แอมโมเนีย ของแข็งแขวนลอย ไนเตรท และไนไตรท์
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
พีเอช อัตราการเวียนน้ำ ภายในถังโปรยกรอง	6.0-6.5 100 ล./ชม.

3.5.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส 2,000 มก.ซีโอติ/ล. และ ความเข้มข้นแอมโมเนีย 150 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายใต้สภาวะพีเอชเท่ากับ 6 นำมาวิเคราะห์ค่า ซีโอติ แอมโมเนีย ของแข็งแขวนลอย ไนเตรท และไนไตรท์ ของน้ำเสียก่อนเดินระบบ
2. เตรียมถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศที่ใส่ตัวกลางพลาสติกลงไป
3. เดินระบบในถังโปรยกรองภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 โดยปรับพีเอชให้คงที่ ตลอดการทดลองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและกรดซัลฟูริก จนซีโอติและแอมโมเนียเปลี่ยนเป็น ไนเตรทจนหมดหรือคงที่ เพื่อวัดอัตราการลดลงของซีโอติและแอมโมเนีย
4. เมื่อซีโอติและแอมโมเนียในถังโปรยกรองเปลี่ยนเป็นไนเตรทจนหมดหรือคงที่ หยุด การเดินระบบในถังโปรยกรอง
5. นำน้ำพักน้ำที่ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันจากถังโปรยกรองออกจากถังโปรยกรอง (ถังด้านล่างของถังโปรยกรอง) เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
6. นำน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันออก ร้อยละ 16 32 50 และ 68 และเติมน้ำ เสียสังเคราะห์ใหม่ (ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส 2,000 มก.ซีโอติ/ล. แอมโมเนียมคลอไรด์ 150 มก.

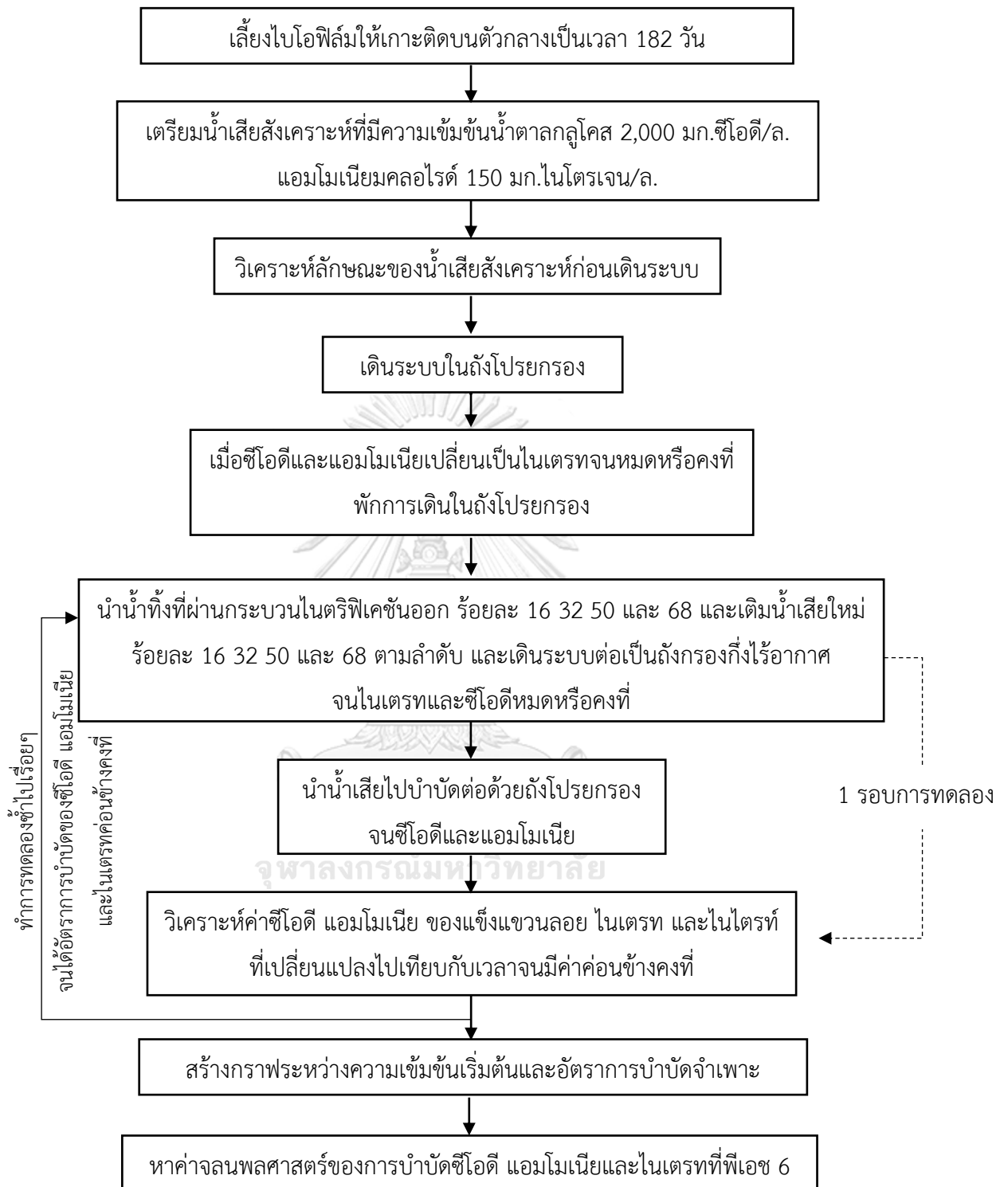
ไนโตรเจน/ล.) เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68 ตามลำดับ และเดินระบบต่อเป็นถังกรอง กิ่งไร้อากาศ รอกไนเตรทและซีโอดีหมดหรือคงที่เพื่อวัดอัตราการลดลงของไนเตรท

7. นำน้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนที่ 6 ไปบำบัดต่อด้วยถังโปรยกรองจนซีโอดีลดลงจนหมดหรือคงที่อีกครั้งและแอมโมเนียลดลงจนหมดหรือคงที่ และวัดอัตราการลดลงของซีโอดีและแอมโมเนีย

8. วิเคราะห์ค่าซีโอดี แอมโมเนีย ของแข็งแขวนลอย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาจนมีค่าค่อนข้างคงที่

9. จากขั้นตอนที่ 6-7 นับเป็น 1 รอบการทดลอง ทำการทดลองไปเรื่อยๆ จนอัตราการบำบัดของซีโอดี แอมโมเนีย และไนเตรท คงที่ จึงเปลี่ยนการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงเป็นภาพการทดลองได้ดังภาพที่ 3.3

สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการบำบัดจำเพาะ (อัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวหรือปริมาตรของตัวกลาง) เพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดซีโอดีและแอมโมเนียที่พีเอช 6 โดยใช้โปรแกรม Excel และโมเดลแบบ Non-linear Regression



ภาพที่ 3.3 ศึกษาอัตราการบำบัดซีไอดีและแอมโมเนียที่ความเข้มข้นซีไอดีและที่เคเอ็นเริ่มต้นของ
น้ำเสียใหม่ต่างๆ ที่เข้าระบบบริเวณถังกรองกึ่งไร้อากาศที่มีผลต่อดีไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6

3.5.3 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการศึกษา อัตราการบำบัดไนเตรทในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการ วิเคราะห์	อ้างอิง
พีเอช (pH)	เครื่องวัดพีเอช	ทุกวัน	-
ซีโอดี (COD)	รีฟลักซ์ปิด แบบไตเตรชัน (Closed Reflux, Titration Method)	4-5 ครั้ง/สัปดาห์	(มันสิน ตัณจุลเวศม์, 2551)
แอมโมเนีย (NH ₃)	ซาลิไซเลต (Salicylate Method)	4-5 ครั้ง/สัปดาห์	(มันสิน ตัณจุลเวศม์, 2551)
ไนเตรท (NO ₃ ⁻)	สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer Method)	4-5 ครั้ง/สัปดาห์	(มันสิน ตัณจุลเวศม์, 2551)
ไนไตรท์ (NO ₂ ⁻)	สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer Method)	4-5 ครั้ง/สัปดาห์	(มันสิน ตัณจุลเวศม์, 2551)
ของแข็งแขวนลอย (SS)	การชั่งน้ำหนัก (Gravimetric method)	1 ครั้ง/สัปดาห์	(มันสิน ตัณจุลเวศม์, 2551)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

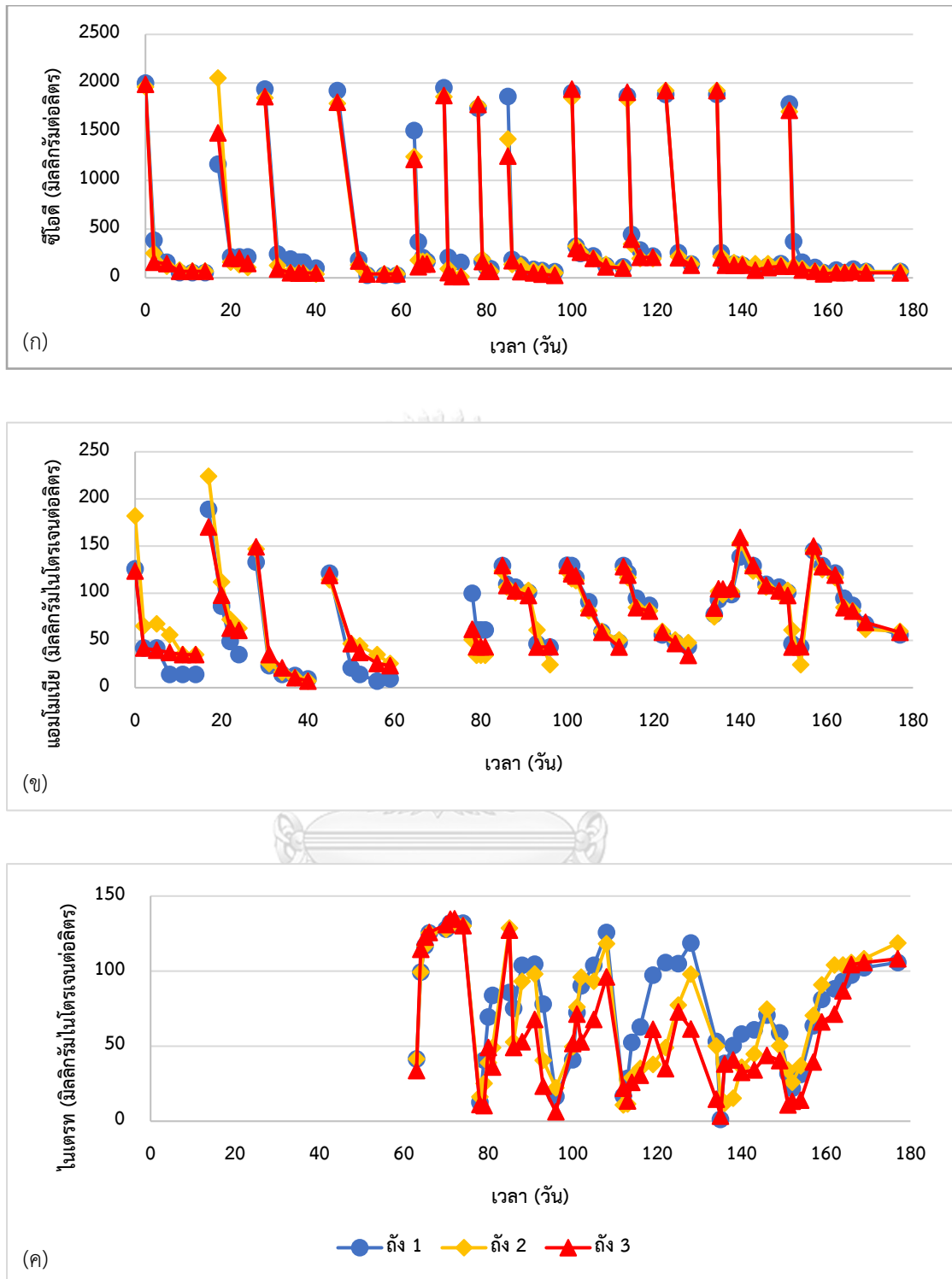
การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นซีโอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นของน้ำเสียต่อระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ ประกอบด้วยถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 25 ล. เตรียมจากน้ำตาลกลูโคส ซึ่งมีแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยมีความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส 2,000 มก.ซีโอดี/ล. และความเข้มข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์ 150 มก.ไนโตรเจน/ล. เดินระบบแบบแบทช์ในถังโปรยกรอง ซึ่งมีอัตราการเวียนน้ำภายในถังโปรยกรอง 100 ล./ชม. จากนั้นเปลี่ยนน้ำเสียเข้าถังกรองกึ่งไร้อากาศ โดยนำน้ำทิ้งออกจากระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68 และเติมน้ำเสียใหม่เข้าแทนที่ โดยการทดลองทั้งหมดทำภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ซึ่งทีมงานวิจัยนี้วางแผนการทดลองไว้ว่าจะใช้นมผงในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ แต่งานวิจัย (พิมพ์พิสุทธิ์ หงส์ชยางกูร, 2561) พบว่า ช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบใช้นมผงในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ แต่เนื่องจากนมผงที่ใช้มีปริมาณไขมันเป็นส่วนประกอบอยู่มาก เมื่อนำมาละลายน้ำเกิดการแยกชั้นของไขมันและน้ำ ไขมันที่สะสมแยกเป็นชั้นหลุดออกมาพร้อมน้ำทิ้ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพต่ำและไม่คงที่ จากปัญหาดังกล่าวจึงเปลี่ยนมาใช้น้ำตาลกลูโคสในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แทน ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายและการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้มากกว่า

ในการทดลอง เริ่มต้นเดินระบบโดยใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติด้วยการเดินระบบแบบแบทช์ไปเรื่อยๆ โดยการนำพลาสติกตัวกลางของบริษัท AQUA รุ่น R-190 แฉีไว้ในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์นี้เตรียมจากนมผงที่มีความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 2,000 มก.ซีโอดี/ล.และความเข้มข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์เท่ากับ 150 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 62 วัน เนื่องจากทีมงานวิจัยก่อนหน้านี้ เดินระบบด้วยนมผงแล้วพบปัญหาดังที่กล่าวไปข้างต้น จึงเปลี่ยนมาเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคส และเดินระบบแบบแบทช์ในถังโปรยกรอง ที่อัตราการเวียนน้ำ 100 ล./ชม. จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 182 วัน

ในชุดการทดลองที่ 1 หลังจากเริ่มเดินระบบมาเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 182 วัน จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ คือ ซีโอดี แอมโมเนีย และไนเตรทลดลงจนคงที่ ได้ผลดังภาพที่ 4.1 จึงเริ่มทำการทดลองจริง คือ เดินระบบในระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคส ซึ่งมีแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยในถังโปรยกรองมีความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. และ 150 มก.ไนโตรเจน/ล. เดินระบบจนซีโอดีและแอมโมเนียถูกบำบัดลดลงจนคงที่ จากนั้นเดินระบบในถังกรองกึ่งไร้อากาศ ซึ่งจะเปลี่ยนน้ำเสียก่อนเข้าถังกรอง

กึ่งไร้อากาศ โดยการนำน้ำเสียออกจากระบบร้อยละ 16 และเติมน้ำเสียใหม่เข้าแทนที่ ซึ่งน้ำเสียใหม่
ที่เติมเข้าสู่ระบบจะมีความเข้มข้นเท่ากับน้ำเสียเริ่มต้น และในการทดลองที่ 2-4 จะนำน้ำเสียออกจาก
ระบบร้อยละ 32 50 และ 68 ตามลำดับ





ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) ซีไอดี (ข) แอมโมเนีย และ (ค) ไนเตรท ช่วงเริ่มเดินระบบก่อนทำการทดลองเป็นเวลา 182 วัน

4.1.1. การทดลองทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68

การทดลองทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 6 รอบการทดลอง ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบทั้งหมด 134 วัน และทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 12 รอบการทดลอง ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบทั้งหมด 108 วัน ผลจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบ มีดังนี้

ค่าซีโอดีผลการทดลอง พบว่า หลังจากเริ่มทำการเดินระบบจริง (182 วัน) ระบบบำบัดซีโอดีลดลงจนค่อนข้างคงที่ ที่การทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 50 และ 68 ซีโอดีลดลงเหลือ 50.31 ± 8.39 , 61.30 ± 8.37 , 63.05 ± 11.39 และ 40.61 ± 17.35 มก.ซีโอดี/ล. ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.2 (ก) (ข) 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดรวม ร้อยละ 97-98

ปริมาณแอมโมเนียที่ตรวจพบจากการทดลองนี้ พบว่า หลังจากเริ่มทำการเดินระบบจริง (182 วัน) ระบบมีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือสะสมในระบบ 0.55 ± 0.14 , 1.51 ± 1.48 , 5.62 ± 0.39 และ 82.30 ± 34.29 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.4 (ก) (ข) 4.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดรวม ร้อยละ 100 99 97 และ 53 ตามลำดับ แอมโมเนียสามารถเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในถังโปรยกรองและไนเตรทจะถูกใช้ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในถังกรองกึ่งไร้อากาศ ซึ่งทำให้ไนเตรทมีปริมาณลดลงเหลือ 1.11 ± 0.03 , 1.24 ± 0.46 , 1.59 ± 0.20 และ 1.33 ± 0.18 มก.ไนโตรเจน/ล. และมีปริมาณไนโตรเจนคงเหลือทั้งหมดในระบบ 35.83 ± 13.38 , 64.01 ± 3.86 , 96.13 ± 11.88 และ 129.41 ± 6.50 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดใน พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมด ร้อยละ 77 58 37 และ 15 ตามลำดับ จะเห็นว่าที่การทดแทนน้ำร้อยละ 68 มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียต่ำ เป็นเพราะว่าระบบบรวมนี้อ่างกรองกึ่งไร้อากาศไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงหรือเนื่องจากความเป็นพิษของแอมโมเนียมที่ความเข้มข้นสูง

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย โดยวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยจากน้ำทั้งก่อนการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ ซึ่งน้ำเสียใหม่ที่เตรียมทุกรอบการทดลองจะไม่พบของแข็งแขวนลอย เมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆในแต่ละรอบจะพบว่า มีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นส่วนของฟิล์มชีวภาพที่เจริญเติบโตขึ้นเกาะติดกับตัวกลาง

และมีบางส่วนหลุดลอกออกมาในน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 จะพบว่า ในการทดแทนน้ำเสียร้อยละ 16 32 และ 50 การทดลองรอบที่ 1 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงถึง 263 ± 11.55 , 267 ± 11.55 และ 267 ± 11.55 มก./ล. ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ก่อนหน้านี้เดินระบบเพื่อเลี้ยงฟิล์มชีวภาพใช้เวลามากกว่า 182 วัน (ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบก่อนการทดลองจริง) อาจจะทำให้มีชั้นฟิล์มชีวภาพเกาะติดอยู่กับตัวกลางหนาเกินไปจนทำให้เกิดการหลุดลอกออกมากับน้ำเสียในปริมาณมากได้ ซึ่งการเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้งปริมาณเชื้อที่หลุดลอกออกมาจากระบบมักไม่เท่ากัน บางครั้งเชื้อหลุดลอกออกมาเป็นแผ่นขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้ค่าของแข็งแขวนลอยสูง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะปกติและฟิล์มชีวภาพสามารถปรับตัวกับน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ได้ จะพบว่าในแต่ละรอบการทดลอง ตั้งแต่รอบที่ 3 เป็นต้นไป ปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียหลังเดินระบบมีค่าแตกต่างกันไม่มาก อยู่ในช่วง 70 – 93 มก./ล. และการทดแทนน้ำเสียร้อยละ 68 การทดลองรอบที่ 1-3 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงถึง 300 ± 50.00 253 ± 11.55 และ 280 ± 17.32 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ก่อนหน้านี้เดินระบบในการทดลองการทดแทนน้ำเสียร้อยละ 16 32 และ 50 อาจจะทำให้มีชั้นฟิล์มชีวภาพเกาะติดอยู่กับตัวกลางยังไม่สามารถปรับตัวได้กับความเข้มข้นของน้ำเสียใหม่ที่สูงขึ้นจนทำให้เกิดการหลุดลอกออกมากับน้ำเสียในปริมาณมาก ซึ่งการเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้งปริมาณเชื้อที่หลุดลอกออกมาจากระบบมักไม่เท่ากัน บางครั้งเชื้อหลุดลอกออกมาเป็นแผ่นขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้ค่าของแข็งแขวนลอยสูง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะปกติและฟิล์มชีวภาพสามารถปรับตัวกับน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ได้ จะพบว่าในแต่ละรอบการทดลอง ตั้งแต่รอบที่ 4 เป็นต้นไป ปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียหลังเดินระบบมีค่าแตกต่างกันไม่มาก อยู่ในช่วง 73 – 83 มก./ล.

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
	น้ำเสียขาเข้า	น้ำเสียขาออก
1	0.00	263 ± 11.55
2	0.00	173 ± 5.77
3	0.00	83 ± 11.55
4	0.00	73 ± 5.77

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
	น้ำเสียขาเข้า	น้ำเสียขาออก
5	0.00	70±10.00
6	0.00	76±5.77

หมายเหตุ: รอบที่ 1-3 อยู่ในชุดการทดลองที่ 1, รอบที่ 4-6 อยู่ในชุดการทดลองที่ 2
 ตารางที่ 4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ
 ร้อยละ 32

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
	น้ำเสียขาเข้า	น้ำเสียขาออก
1	0.00	266±11.55
2	0.00	160±43.59
3	0.00	70±10.00
4	0.00	76±11.55
5	0.00	80±10.00
6	0.00	70±10.00

หมายเหตุ: รอบที่ 1-3 อยู่ในชุดการทดลองที่ 1, รอบที่ 4-6 อยู่ในชุดการทดลองที่ 2
 ตารางที่ 4.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ
 ร้อยละ 50

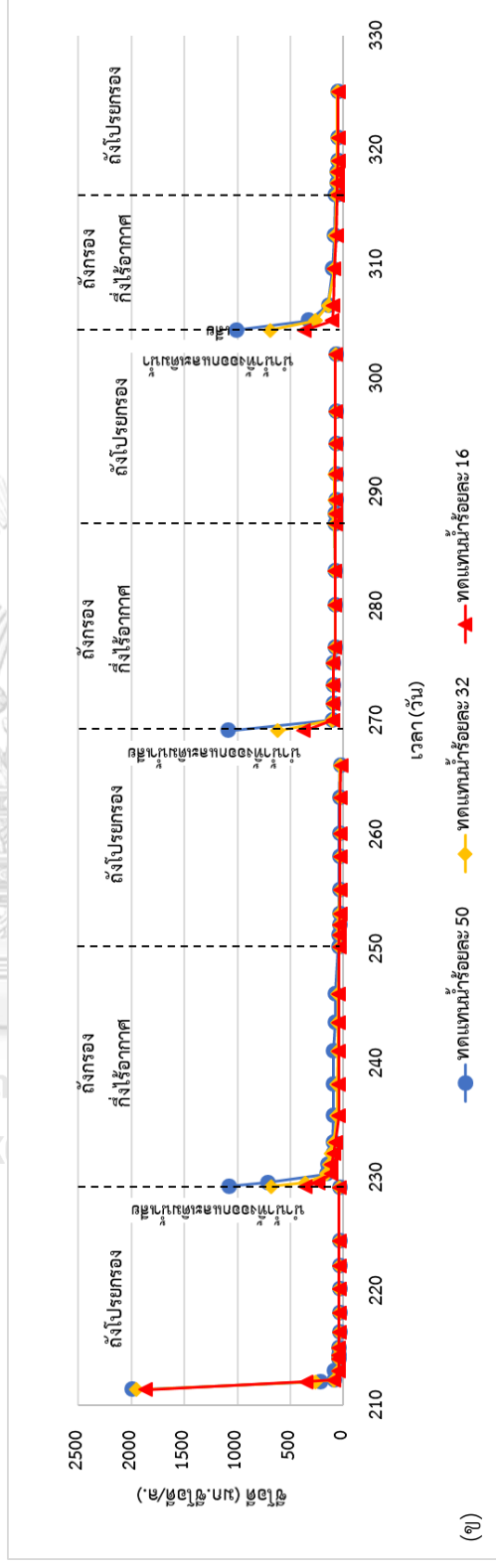
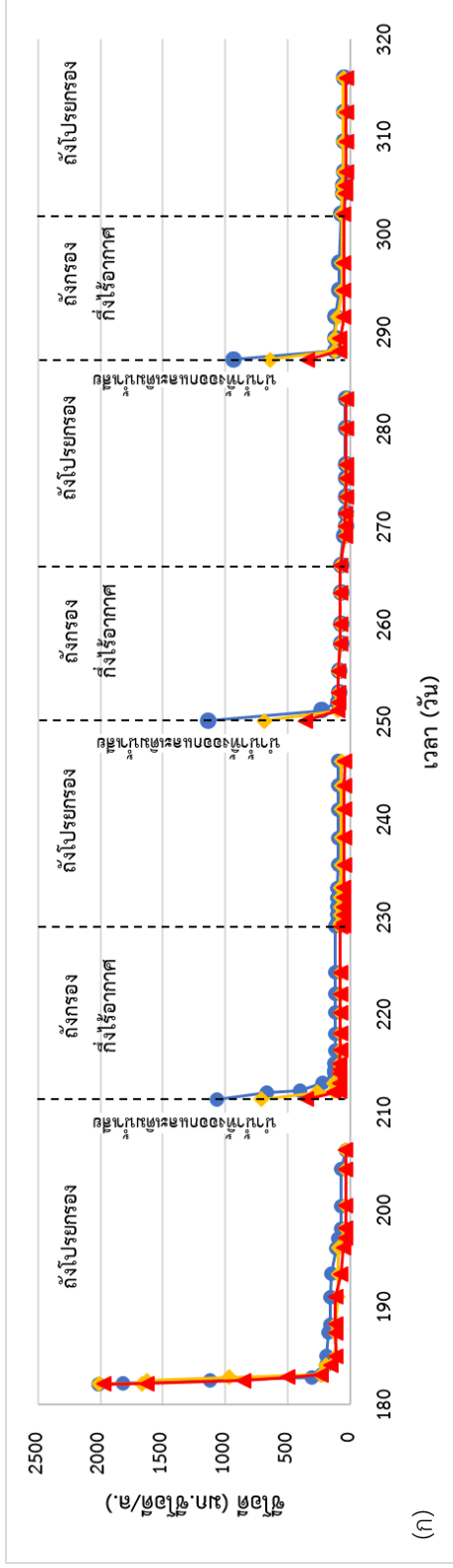
รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
	น้ำเสียขาเข้า	น้ำเสียขาออก
1	0.00	300±17.32
2	0.00	173±11.55
3	0.00	93±15.28
4	0.00	76±5.77
5	0.00	86±15.28
6	0.00	80±17.32

หมายเหตุ: รอบที่ 1-3 อยู่ในชุดการทดลองที่ 1, รอบที่ 4-6 อยู่ในชุดการทดลองที่ 2

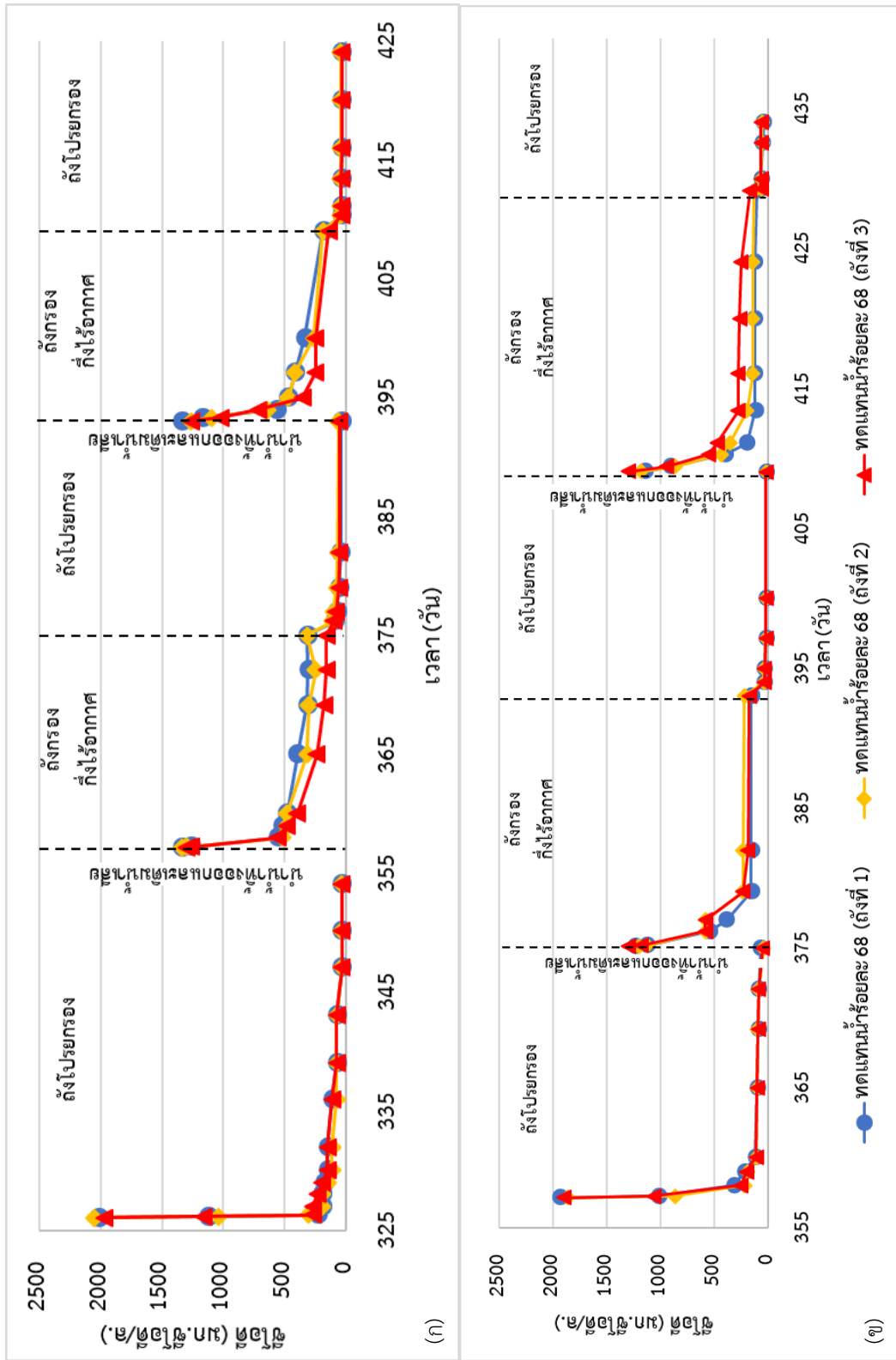
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบ
ร้อยละ 68

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
	น้ำเสียขาเข้า	น้ำเสียขาออก
1	0.00	300±50.00
2	0.00	253±11.55
3	0.00	280±17.32
4	0.00	80±36.06
5	0.00	83±15.28
6	0.00	83±23.09
7	0.00	73±11.55
8	0.00	76±23.09
9	0.00	76±5.77
10	0.00	76±5.77
11	0.00	73±5.77
12	0.00	76±11.55

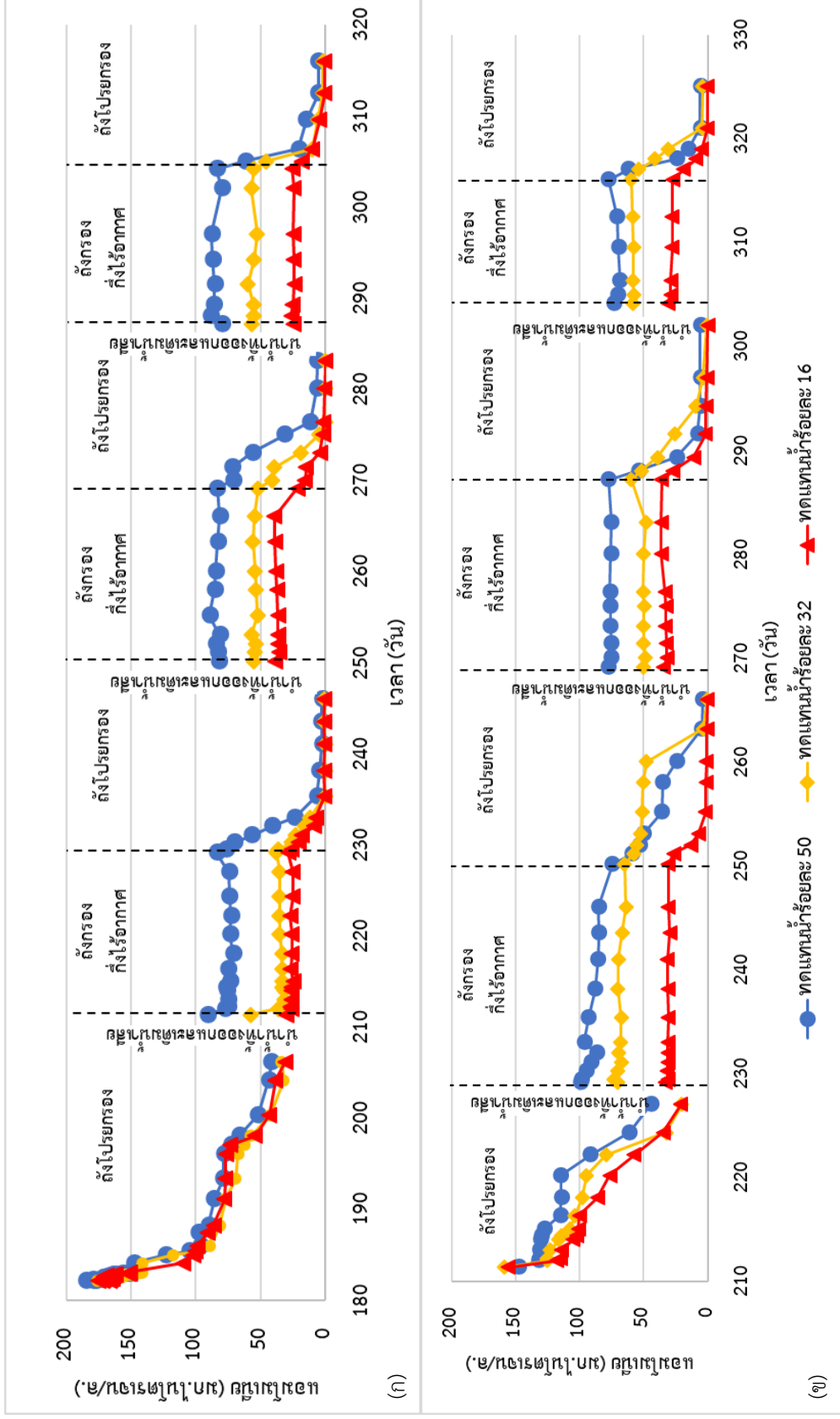
หมายเหตุ: รอบที่ 1-6 อยู่ในชุดการทดลองที่ 1, รอบที่ 6-12 อยู่ในชุดการทดลองที่ 2



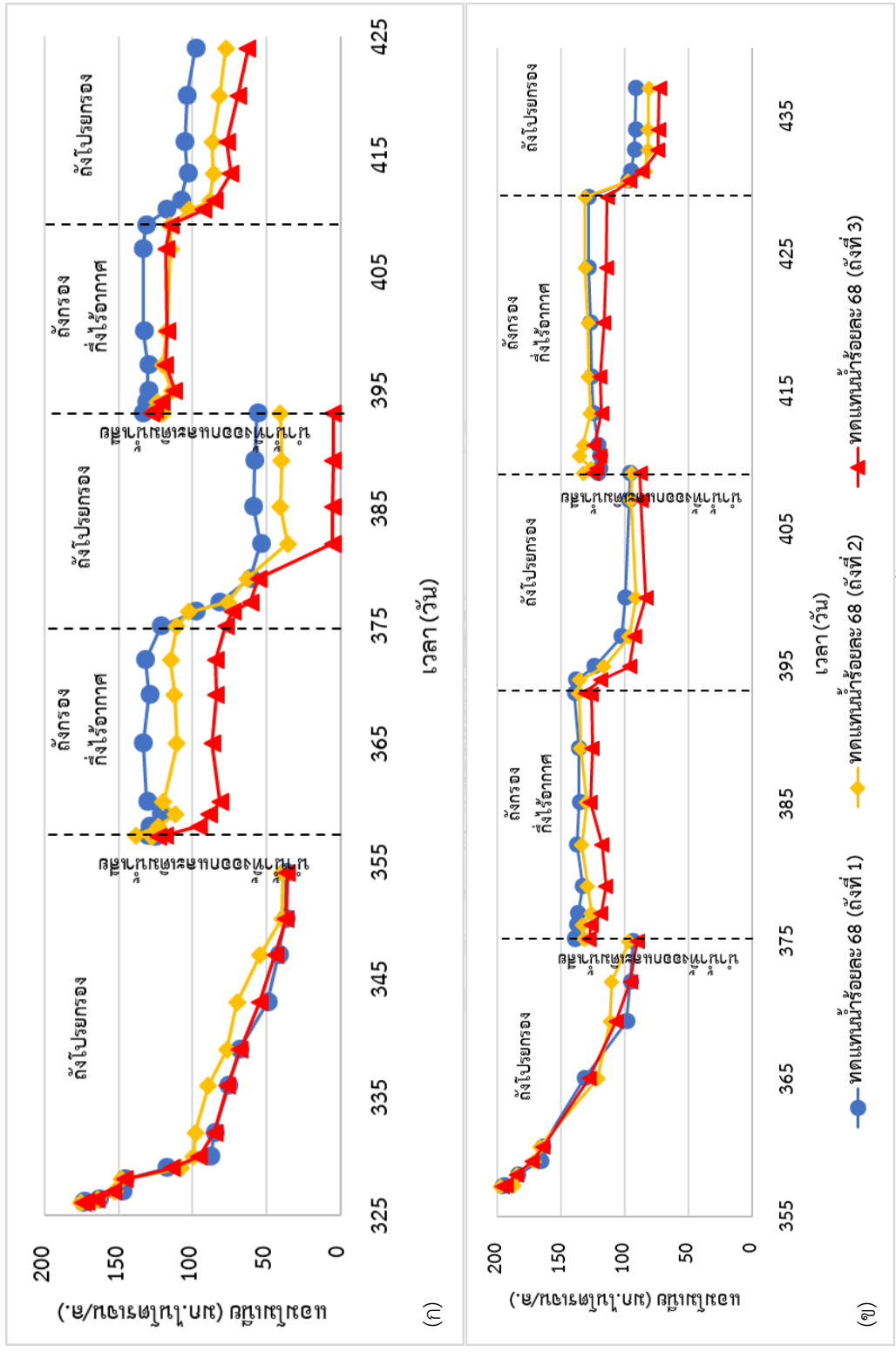
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของซีไอดีของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2



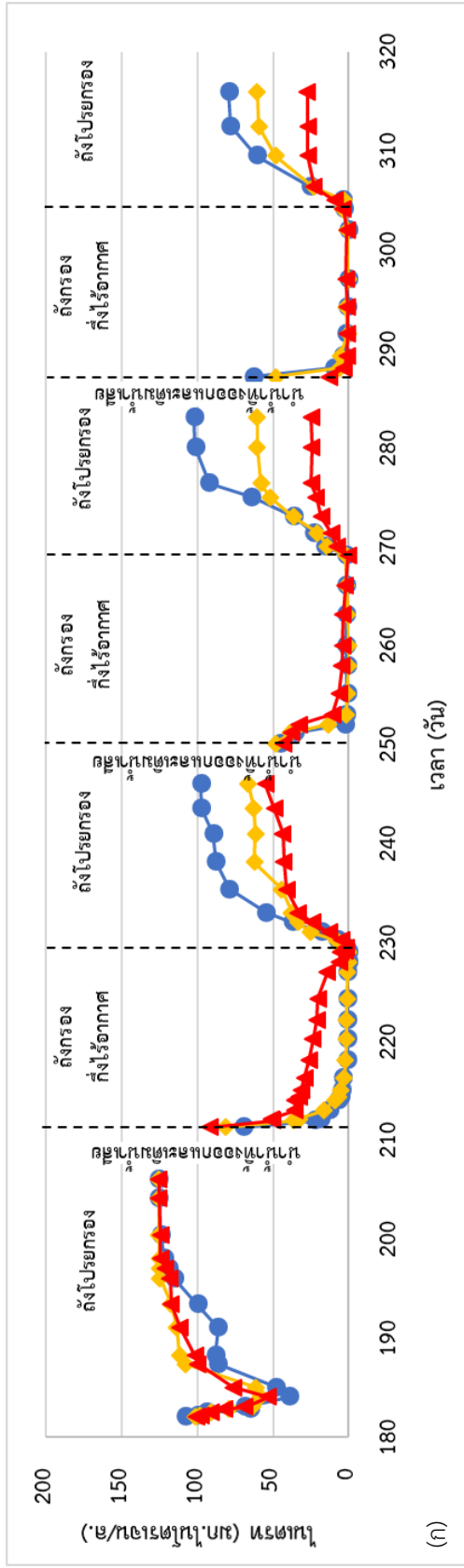
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2



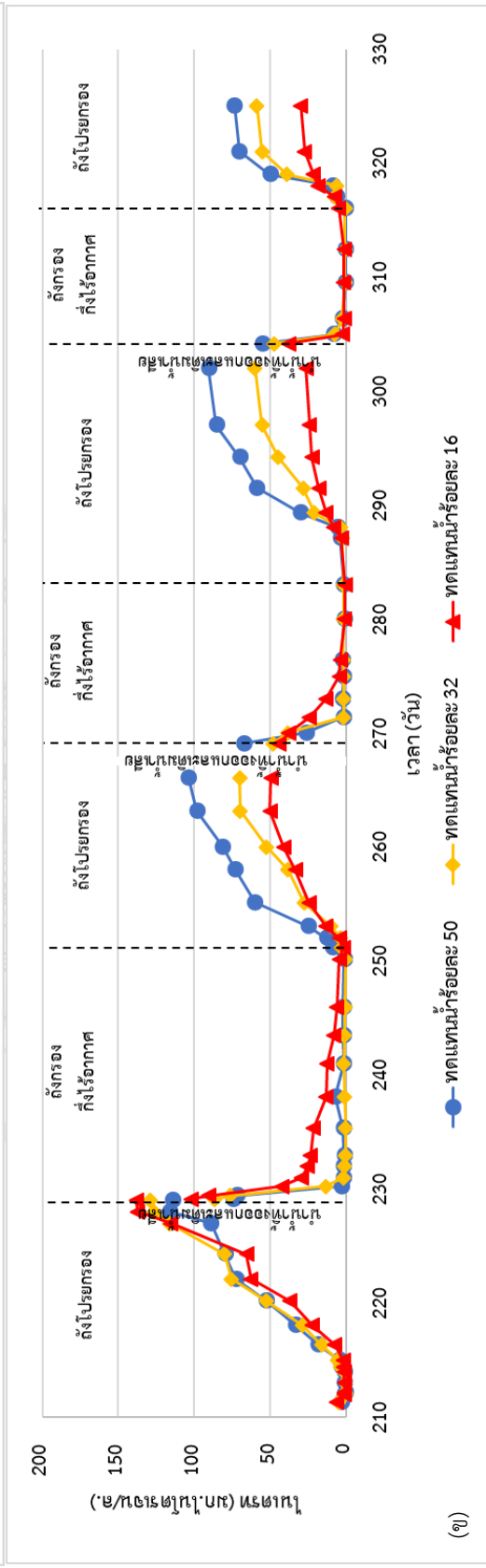
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2

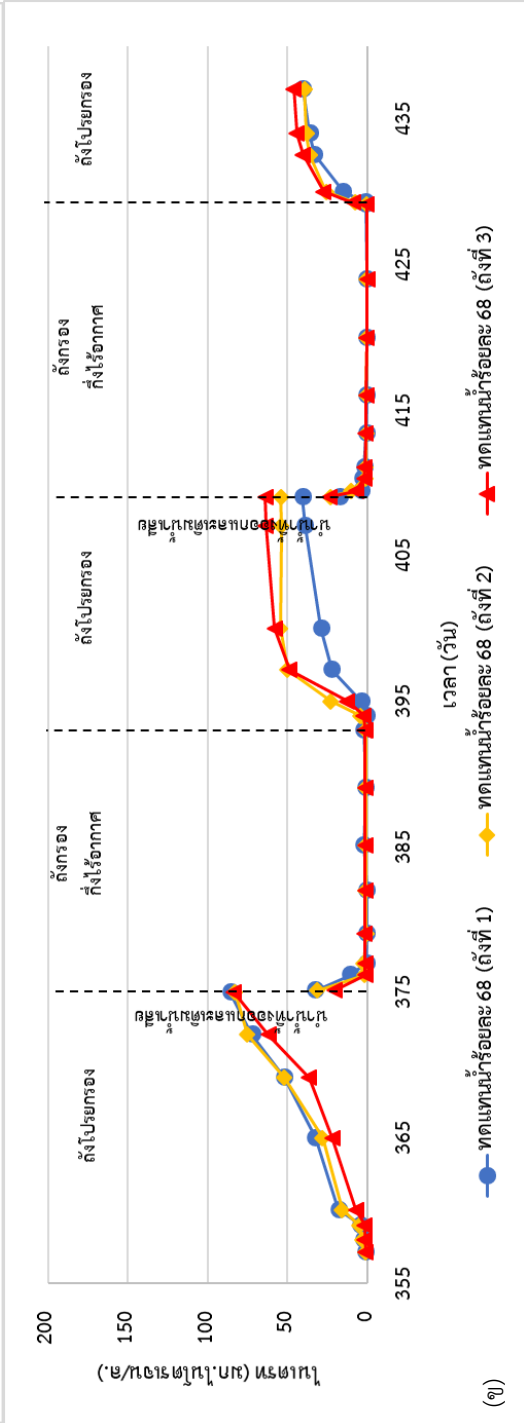
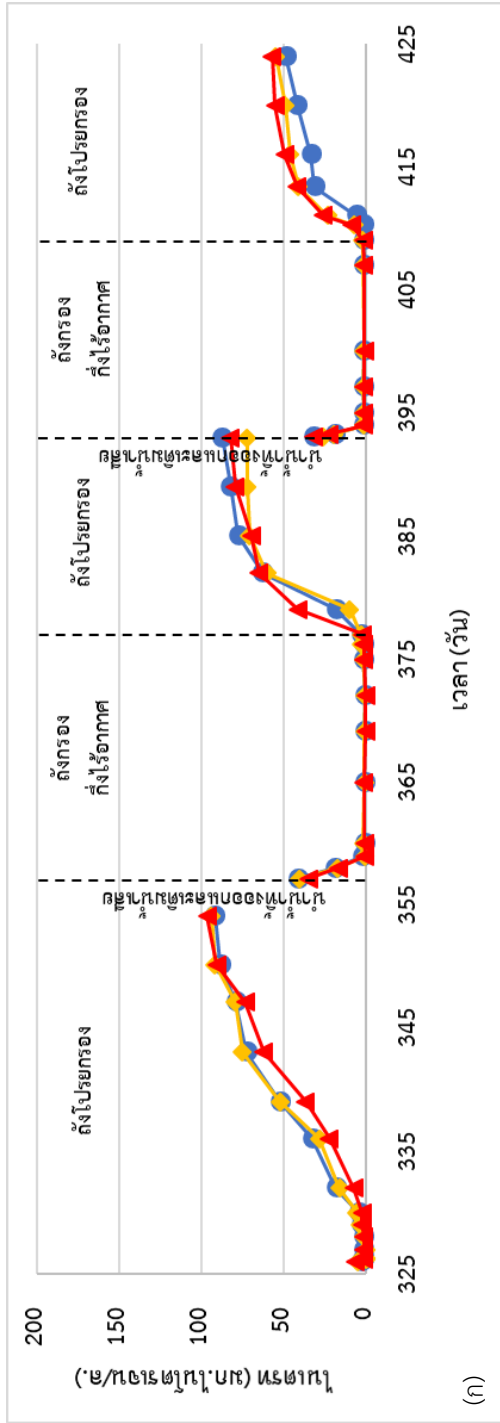


(ก)

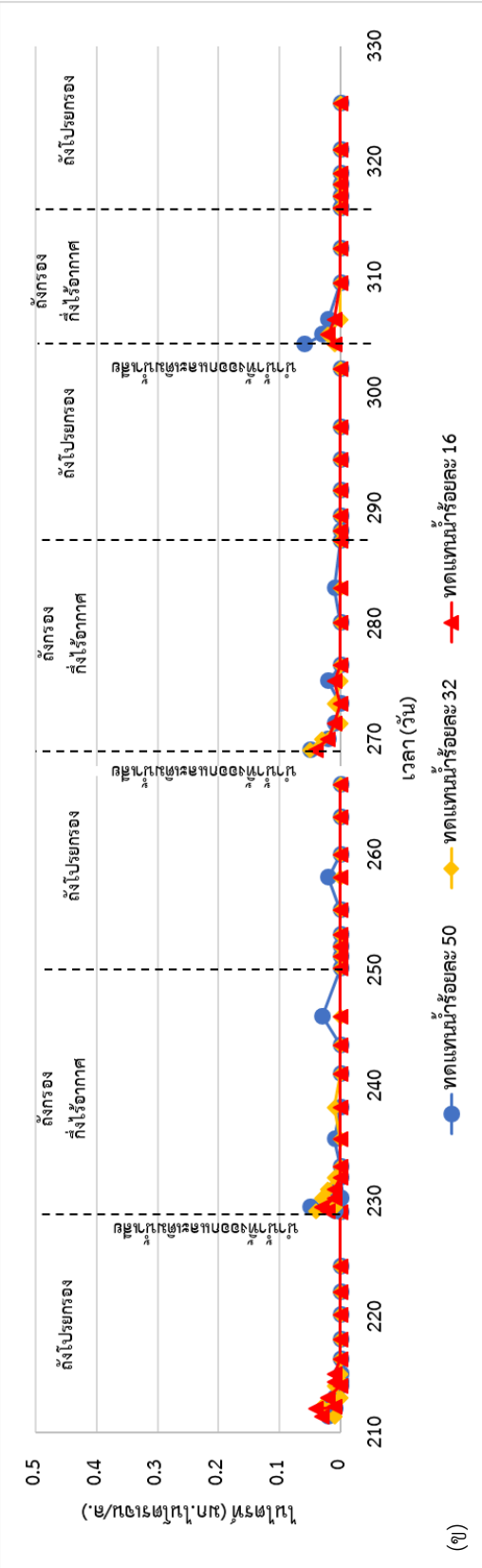
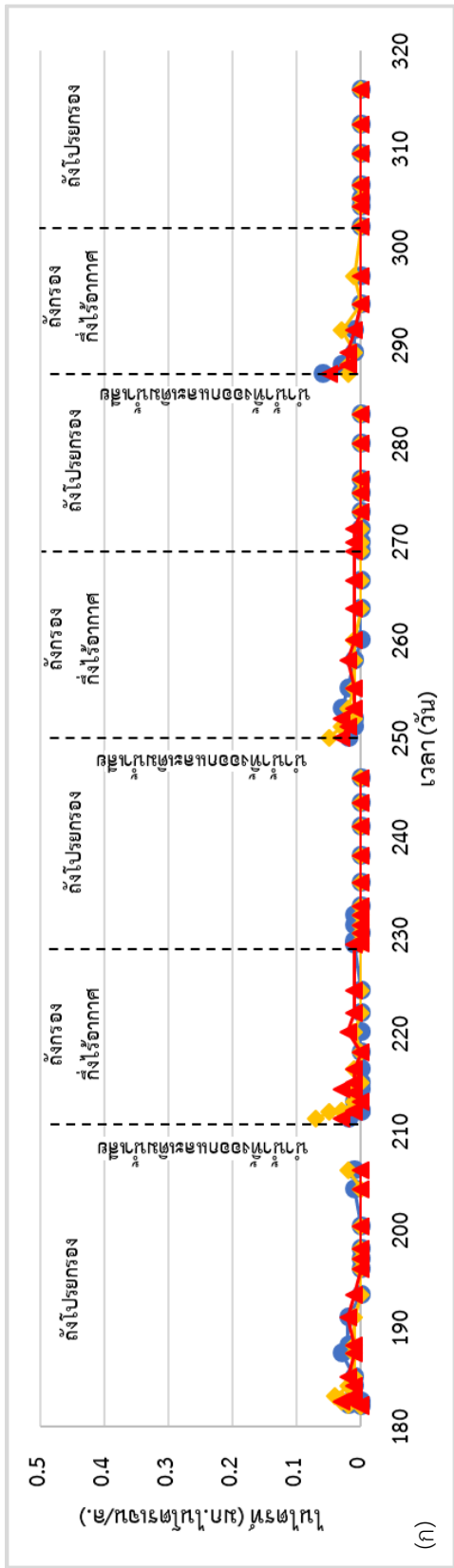


(ข)

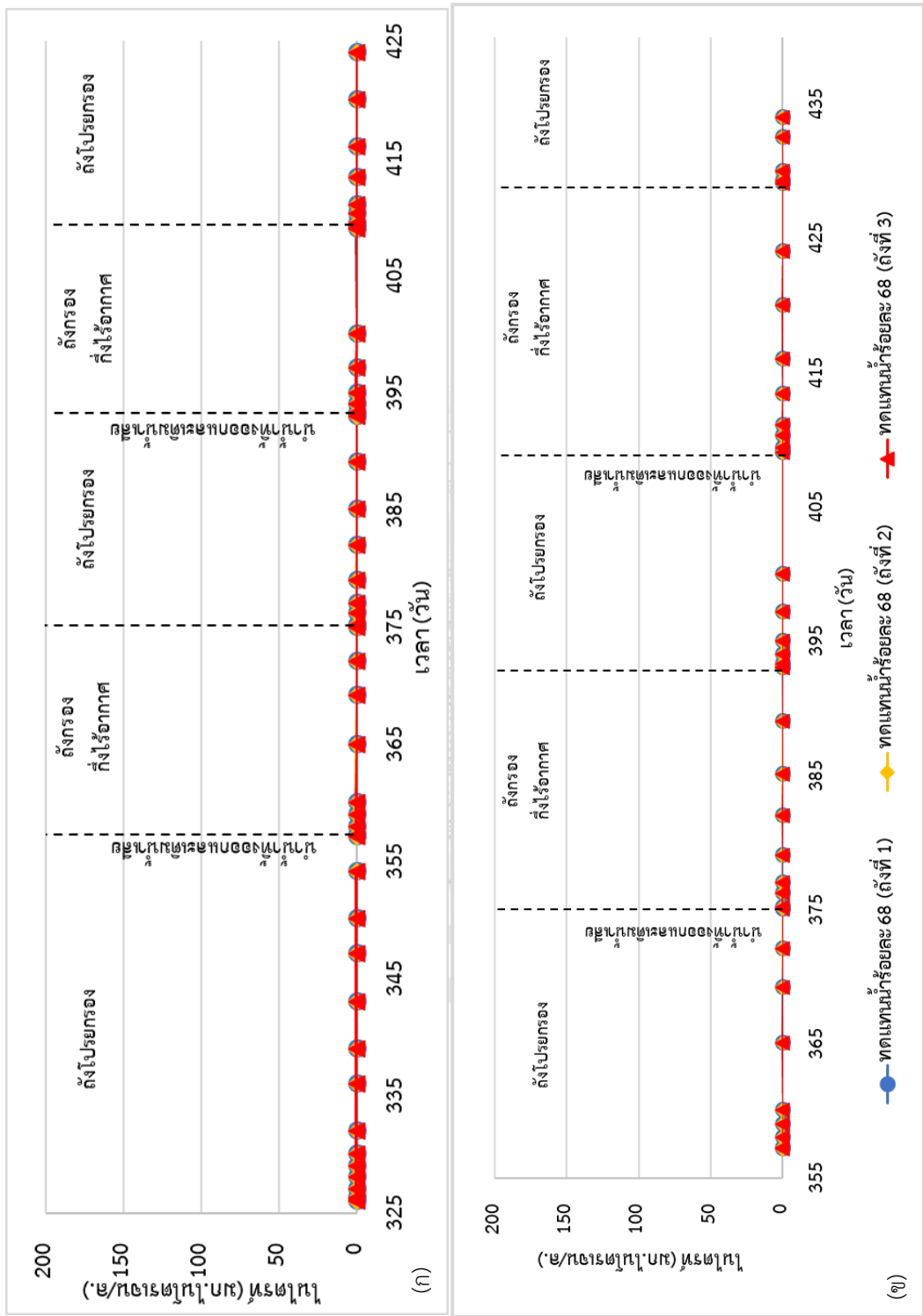
ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของเนตเวิร์กของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรทของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรทของชุดการทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 16 32 และ 50 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรตของชุดทดลองการทดแทนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ก) ชุดที่ 1 (ข) ชุดที่ 2

4.1.1. ซีโอดี

ประสิทธิภาพรวมในการกำจัดซีโอดีของระบบรวมถึงโพรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ ช่วงการทดแทนน้ำร้อยละ 16 32 50 และ 68 มีประสิทธิภาพในการกำจัด คิดเป็น ร้อยละ 98 97 97 และ 98 ตามลำดับ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศร้อยละ 86-93 และถังโพรยกรองช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบอีกร้อยละ 19-75 จึงเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียของระบบจากทุกการทดแทนน้ำมีค่าสูงมากกว่าร้อยละ 95 และปริมาณซีโอดีน้ำทิ้งของทุกการทดแทนน้ำมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) แสดงให้เห็นว่า ร้อยละการทดแทนน้ำไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบรวมถึงโพรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกำจัดที่ได้จากการทดลองกับระบบบำบัดทั่วไปที่ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่างกันไม่มากนัก โดยของ (Lefebvre, Vasudevan, Torrijos, Thanasekaran และ Moletta, 2006) ที่ทำการศึกษา การบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกหนังแช่สุราด้วยระบบร่วมยูเอเอสบีและการบำบัดแบบแอโรบิก สามารถกำจัดซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 96 ขณะที่ (Zaoyan และคณะ, 1992) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสีย สีย้อมด้วยระบบร่วมแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพและแอกทิเวเตดสลัดจ์ สามารถกำจัดซีโอดีจาก 600-900 เหลือ 150 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 75-83 และ (Nikolaos, Maria และ Evan, 2006) ทำการศึกษาการบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนและใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องของน้ำเสียจากโรงงานมะกอกและน้ำเสียชุมชน ที่ความเข้มข้น 1800-4400 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งสามารถกำจัดได้ เหลือ 400-600 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 78-86 โดยงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี สูงเนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เป็นน้ำตาลกลูโคสที่ย่อยสลายง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ ใช้น้ำเสียจริง ประสิทธิภาพในการกำจัดจึงสูงกว่า

4.1.2. ไนโตรเจน

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เป็นแหล่งไนโตรเจน ปริมาณแอมโมเนียลดลงในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในถังโพรยกรอง ปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงไปในการ ทดแทนน้ำเสียร้อยละ 16 32 50 และ 68 คิดเป็นร้อยละ 98 97 93 และ 29 ตามลำดับ และปริมาณ แอมโมเนียที่ลดลงของทั้ง 4 ชุดการทดแทนน้ำเสีย ถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตเพื่อสร้างเซลล์ใน กระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ตามอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน คิดเป็นสัดส่วน เฉลี่ย คือ 150:2.4 ซึ่งแอมโมเนียส่วนใหญ่ที่หายไปเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของไนตริไฟอิง แบคทีเรีย จากผลการทดลองที่ได้แสดงไปดังภาพที่ 4.6 - 4.9 จะเห็นว่าในน้ำขาออกจะมีไนเตรท เกิดขึ้น และไนโตรทในปริมาณน้อยมากในทุกการทดแทนน้ำ ซึ่งพบสูงสุดอยู่ที่ 0.07 มก.ไนโตรเจน/ล. เนื่องจากไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะสามารถออกซิไดซ์ไนโตรที่ไปเป็นไนเตรทได้หมด แสดงให้เห็นว่า

การทดลองดังกล่าวสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้หมด จึงเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นในถังโปรยกรอง ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่า น้ำทิ้งเมื่อผ่านการบำบัดด้วยถังโปรยกรองนั้นจะไม่มีกลิ่นเหม็น เพราะโดยทั่วไปกลิ่นเหม็นจากก๊าซไข่เน่า (H_2S) จะเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ปริมาณไนเตรทลดลงในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในถังกรองกึ่งไร้อากาศ ปริมาณไนเตรทที่ลดลงไปในการทดแทนน้ำเสียร้อยละ 16 32 50 และ 68 คิดเป็นร้อยละ 95 99 99 และ 96 ตามลำดับ ปริมาณไนเตรทที่ลดลงเกิดจากไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนอิเล็กตรอนอิสระ โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งมีทั้งกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟ แต่เฮเทอโรโทรฟมีบทบาทมากกว่ามาก ในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันไม่ต้องการแบคทีเรียที่มีความจำเพาะเจาะจงเหมือนกับในกรณีของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย แต่เนื่องจากในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันนี้ ไนเตรทเปลี่ยนเป็นไนโตรท์ ไนโตรท์เปลี่ยนเป็นไนตริกออกไซด์ ไนตริกออกไซด์เปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยานี้ ดังสมการที่ (4.1) แต่น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการนี้มีก๊าซไนโตรเจนและแอมโมเนียอยู่จึงต้องไปบำบัดต่อที่ถังโปรยกรองเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันต่อไป



4.1.3. ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองกึ่งไร้อากาศ

4.1.4.1 อัตราการบำบัดซีโอดี

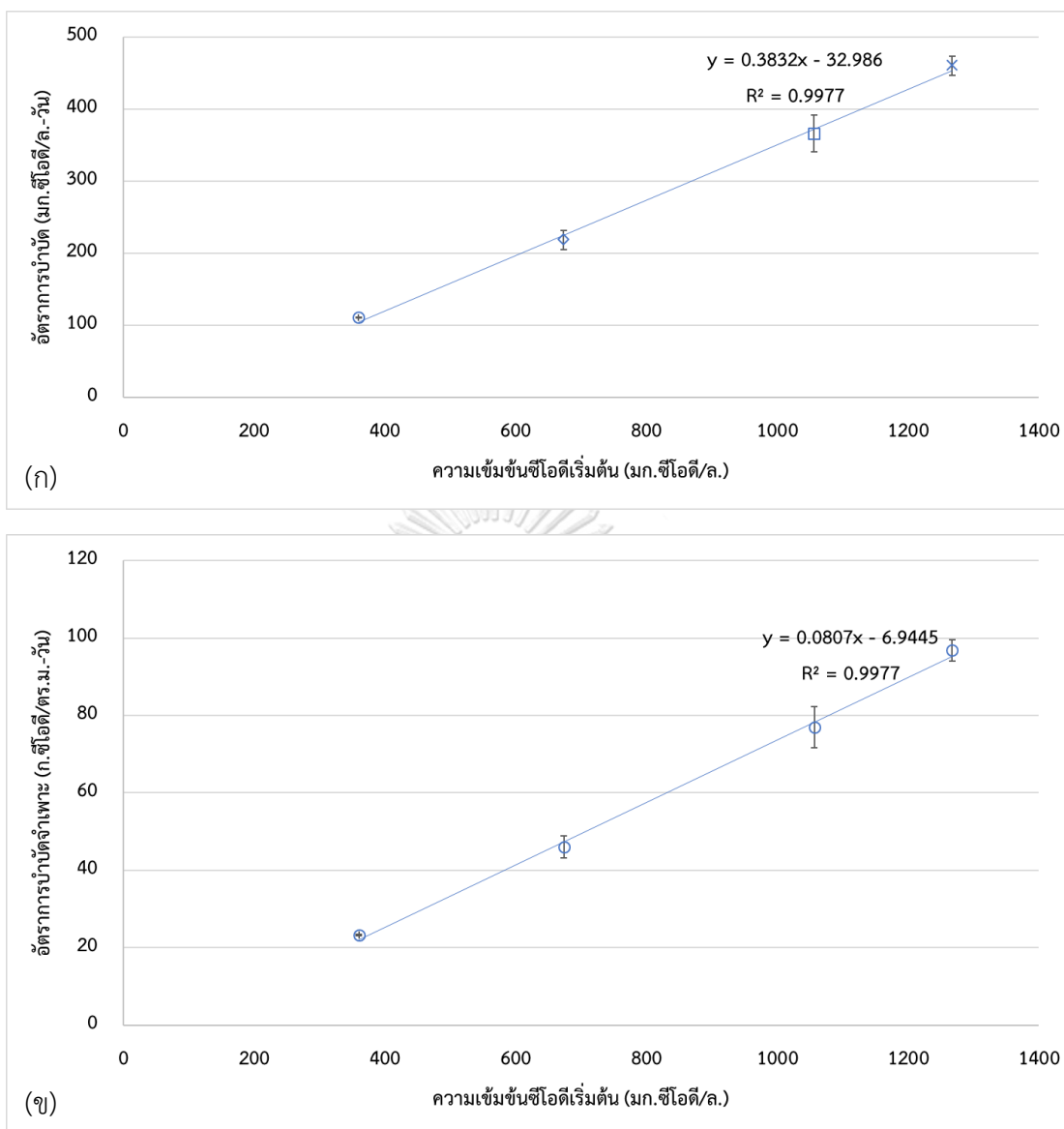
จากการทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์ ได้แก่ ซีโอดีกรอง และความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นของการทดแทนน้ำเสียร้อยละ 16 32 50 และ 68 ที่ถังกรองกึ่งไร้อากาศ เพื่อมาหาค่าอัตราการบำบัดตามสมการที่ (4.2) แล้วนำค่าอัตราการบำบัดซีโอดีที่ได้มาสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นของแต่ละการทดแทนน้ำเสีย จะได้กราฟดังภาพที่ 4.10 (ก) กราฟที่ได้สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง (First order kinetics) หมายความว่า อัตราการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยอัตราการบำบัดซีโอดีสูงสุดในงานวิจัยนี้ เท่ากับ 459.82 ± 13.44 มก.ซีโอดี/ล.-วัน ซึ่งมีซีโอดีที่ย่อยสลายยาก 86.08 มก.ซีโอดี/ล.-วัน เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสที่ใช้เป็นเกรดอดูตสาหกรรม มีความบริสุทธิ์ต่ำ อาจจะทำให้มีสารอื่นปนเปื้อนในน้ำตาล และเนื่องจากถังกรองกึ่งไร้อากาศเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งเจริญยึดติดอยู่บนพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงสามารถสมมติได้ว่า

จุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวกลาง พลาสติกกรุ่น R-190 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 190 ตร.ม./ลบ.ม. คิดเป็น 4.75 ตร.ม./ถัง พบว่า อัตราการบำบัดจำเพาะซีโอดีสูงสุด ดังภาพที่ 4.10 (ข) เท่ากับ 96.80 ± 2.83 ก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน และมีซีโอดีที่ย่อยสลายยาก 86.05 มก.ซีโอดี/ล.

$$r_c = \frac{C_0 - C_t}{t} \quad (4.2)$$

โดยที่	r_c	คือ อัตราการบำบัดซีโอดี (มก./ล.-วัน)
	C_0	คือ ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)
	C_t	คือ ความเข้มข้นซีโอดีที่ผ่านการบำบัด (มก./ล.)
	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด (วัน)

เมื่อนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่ามีความไม่ต่างกันมากนัก (Meena และ Absar, 2015) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยถังกรองไร้อากาศ โดยมีความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าอยู่ในช่วง 270-570 มก.ซีโอดี/ล. พบว่ามีอัตราการบำบัดสูงสุด 0.737 ก./ล.-วัน ในขณะที่ (Kapdan, 2007) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นในช่วง 1,900-6,300 มก.ซีโอดี/ล. ด้วยถังกรองไร้อากาศ พบว่าระบบมีอัตราการบำบัดสูงสุด 7.05 ก./ล.-วัน



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น

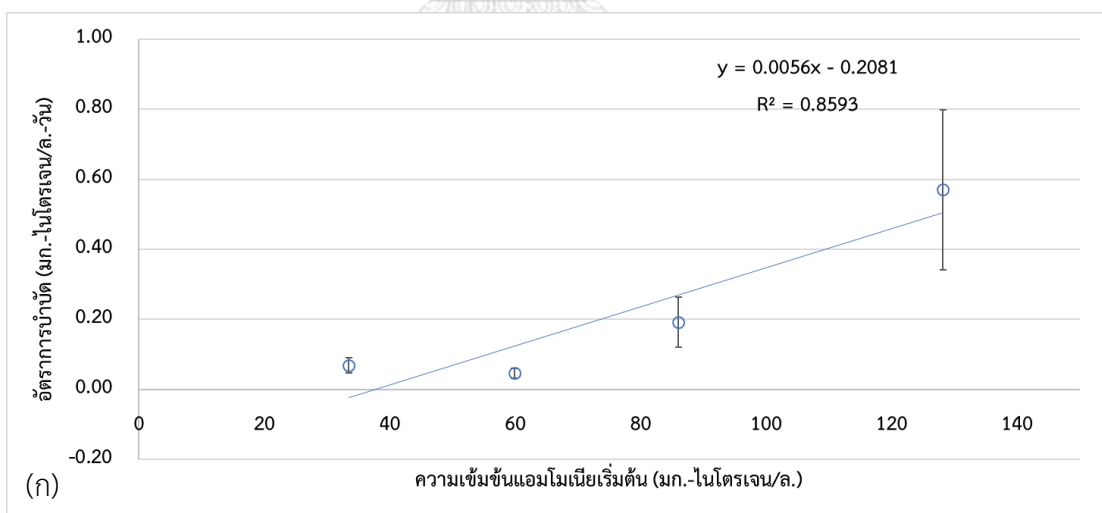
4.1.4.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนีย

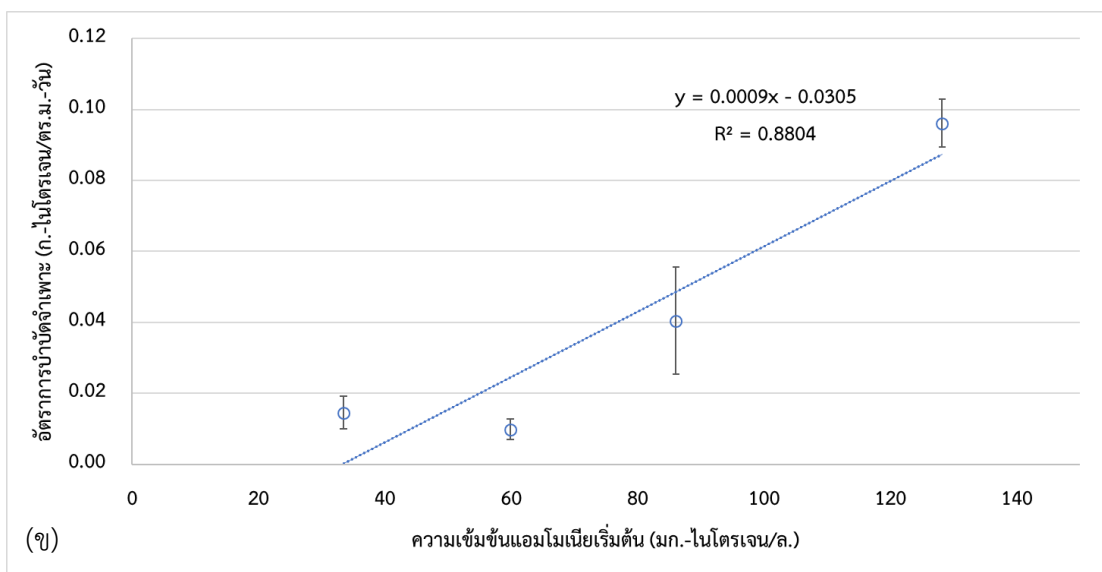
เมื่อพิจารณาแอมโมเนียที่หายไปจะ发现有 2 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้อง คือการนำไปใช้สร้างเซลล์ในกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจนจากจุลินทรีย์และการเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรทด้วยปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน (Farabegoli, Chiavola, และ Rolle, 2009) ซึ่งคิดปริมาณแอมโมเนียที่นำไปสร้างเซลล์หาได้จากปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด เพื่อมาหาค่าอัตราการบำบัดตามสมการที่ (4.3) แล้วนำค่าอัตราการบำบัดที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนีย จะได้กราฟดังภาพที่ 4.11 (ก) กราฟที่ได้สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง (First order kinetics) หมายความว่า อัตราการสร้างเซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้น

เพิ่มขึ้น ซึ่งคิดปริมาณแอมโมเนียที่นำไปใช้ในการสร้างเซลล์สูงสุดเป็น 0.57 ± 0.23 มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน เมื่อคิดสัดส่วนแอมโมเนียที่หายไปกับซีโอดีที่ถูกบำบัดเป็น 150:2.23 ไม่สอดคล้องกับอัตราส่วนของซีโอดีต่อไนโตรเจนของจุลินทรีย์ที่ 150:5 เพราะ R^2 เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสูง และเนื่องจากถังกรองกึ่งไร้อากาศเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งเจริญยึดติดอยู่บนพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงสามารถสมมติได้ว่าจุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวกลาง พลาสติกกรุน R-190 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 190 ตร.ม./ลบ.ม. คิดเป็น 4.75 ตร.ม./ถัง พบว่า อัตราการสร้างเซลล์จำเพาะสูงสุด ดังภาพที่ 4.11 (ข) เท่ากับ 0.0961 ± 0.007 ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน

$$r_{NH_3} = \frac{NH_{30} - NH_{3t}}{t} \quad (4.3)$$

โดยที่ r_{NH_3} คือ อัตราการบำบัดแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน)
 NH_{30} คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
 NH_{3t} คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียที่ผ่านการบำบัด (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
 t คือ ระยะเวลาในการบำบัด (วัน)





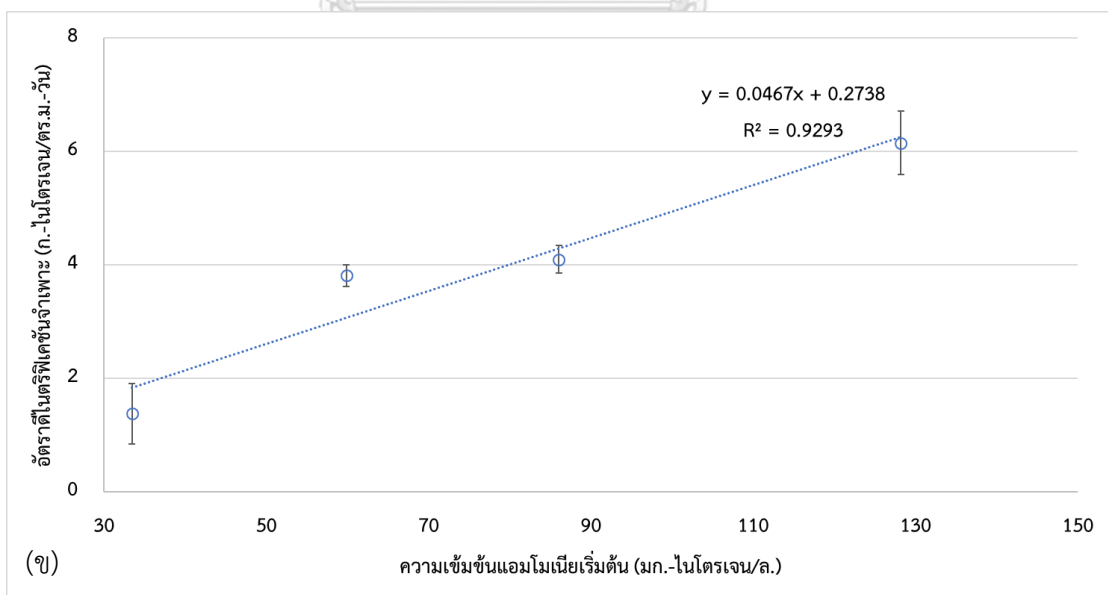
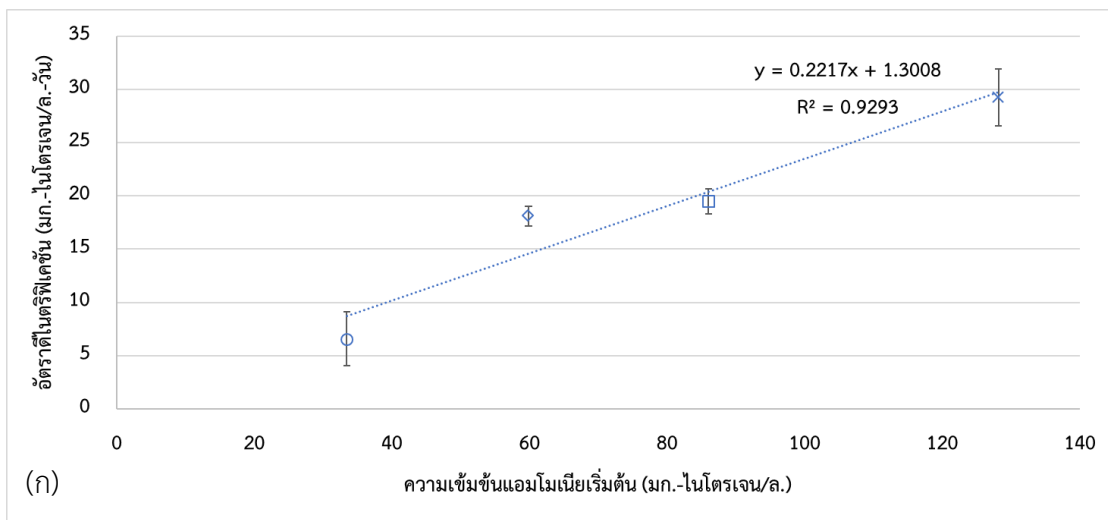
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น

4.1.4.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันคือการเปลี่ยนรูปไนเตรทไปเป็นก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้จากปริมาณไนเตรทที่ลดลงเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียของแต่ละการทดลองน้ำเสีย เพื่อมาหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ตามสมการที่ (4.4) แล้วนำค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนีย จะได้กราฟดังภาพที่ 4.12 (ก) กราฟที่ได้สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง (First order kinetics) แสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันหมายความว่า อัตราการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสูงสุดในงานวิจัยนี้ เท่ากับ 29.23 ± 2.68 มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน และเนื่องจากถังกรองกึ่งไร้อากาศเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งเจริญยึดติดอยู่บนพื้นผิวตัวกลาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงสามารถสมมติได้ว่าจุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวกลาง พลาสติกกรุ่น R-190 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 190 ตร.ม./ลบ.ม. คิดเป็น 4.75 ตร.ม./ถัง พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด ดังภาพที่ 4.12 (ข) เท่ากับ 6.15 ± 0.56 ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน

$$r_{NO_3} = \frac{NO_{30} - NO_{3t}}{\tau} \quad (4.4)$$

- โดยที่ r_{NO_3} คือ อัตราดีไนตริฟิเคชัน (มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน)
 NO_{30} คือ ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
 NO_{3t} คือ ความเข้มข้นไนเตรทที่ผ่านการกำจัดแล้ว (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
 t คือ ระยะเวลาในการกำจัดไนเตรท (วัน)



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราดีไนตริฟิเคชันกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ

(ข) อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น

4.1.4. ค่าจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกิริยา

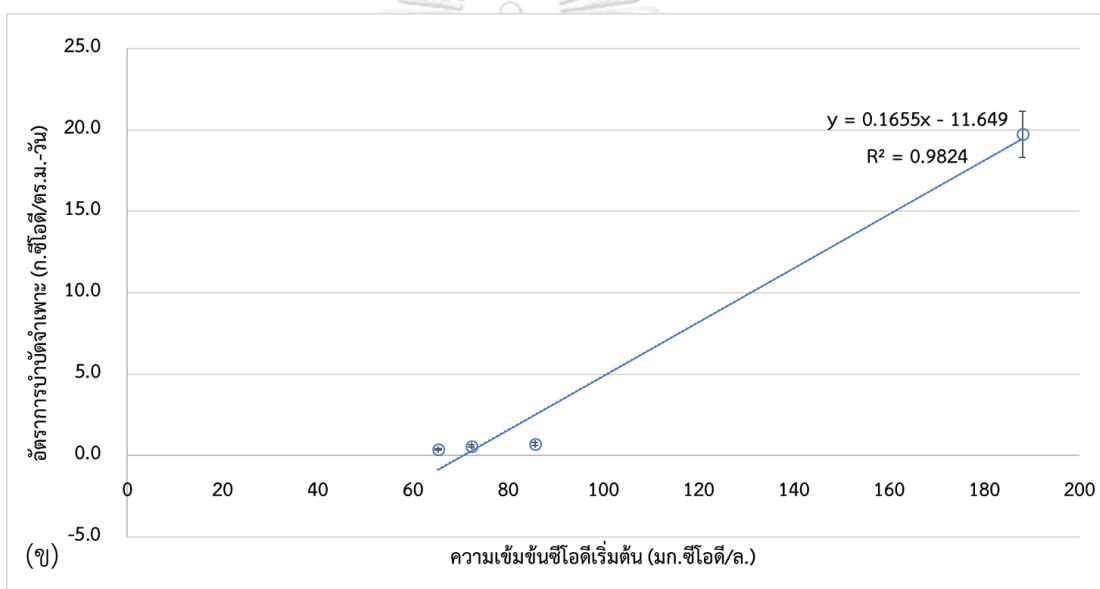
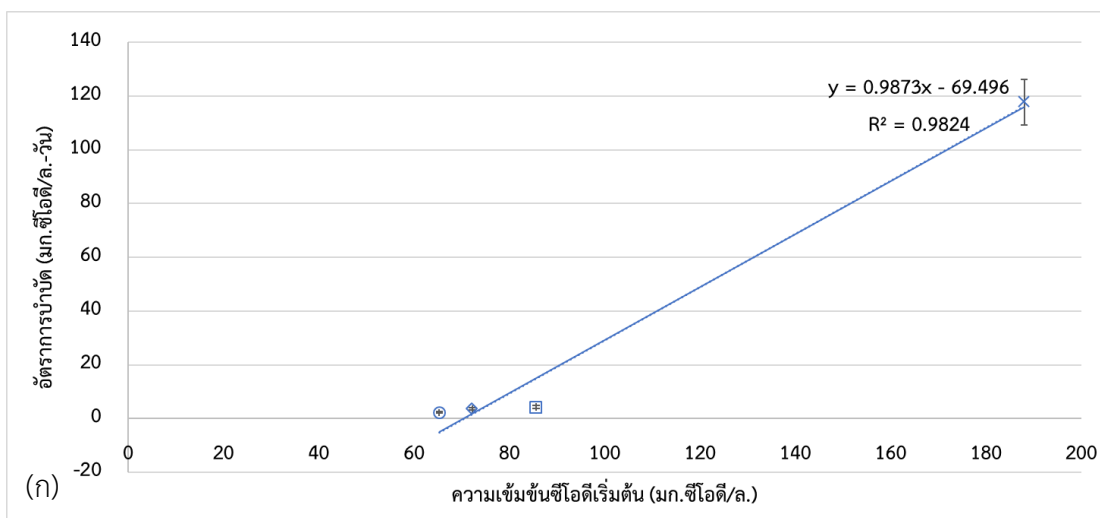
4.1.5.1 อัตราการบำบัดซีโอติ

จากการทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์ ได้แก่ ซีโอติกรอง และความเข้มข้นซีโอติเริ่มต้นของการทดแทนน้ำเสียร้อยละ 16 32 50 และ 68 ที่ถังกรองกึ่งไร้อากาศ เพื่อมาหาค่าอัตราการบำบัดตามสมการที่ (4.5) แล้วนำค่าอัตราการบำบัดซีโอติที่ได้มาสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นซีโอติเริ่มต้นของแต่ละการทดแทนน้ำเสีย จะได้กราฟดังภาพที่ 4.13 (ก) กราฟที่ได้สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง (First order kinetics) หมายความว่า อัตราการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยอัตราการบำบัดซีโอติสูงสุดในงานวิจัยนี้ เท่ากับ 117.80 ± 8.45 มก.ซีโอติ/ล.-วัน ซึ่งมีซีโอติที่ย่อยสลายยาก 70.39 มก.ซีโอติ/ล. และเนื่องจากถังกรองกึ่งไร้อากาศเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งเจริญยึดติดอยู่บนพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงสามารถสมมติได้ว่าจุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวกลาง พลาสติกกรุ่น R-190 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 190 ตร.ม./ลบ.ม. คิดเป็น 5.97 ตร.ม./ถัง พบว่า อัตราการบำบัดจำเพาะซีโอติสูงสุด ดังภาพที่ 4.13 (ข) เท่ากับ 19.75 ± 1.42 ก.ซีโอติ/ตร.ม.-วัน และมีซีโอติที่ย่อยสลายยาก 70.39 มก.ซีโอติ/ล.

$$r_c = \frac{C_0 - C_t}{t} \quad (4.5)$$

- โดยที่ r_c คือ อัตราการบำบัดซีโอติ (มก./ล.-วัน)
 C_0 คือ ความเข้มข้นซีโอติเริ่มต้น (มก./ล.)
 C_t คือ ความเข้มข้นซีโอติที่ผ่านการบำบัด (มก./ล.)
 t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด (วัน)

เมื่อนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่ามีความแตกต่างกันมากนัก (Borghei, Sharbatmaleki, Pourrezaie, และ Borghei, 2008) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายและโมลาสด้วยระบบบำบัดน้ำเสียใช้อากาศแบบตรึงเซลล์ โดยมีความเข้มข้นของน้ำเสียอยู่ในช่วง $750-2250$ มก.ซีโอติ/ล. พบว่ามีอัตราการบำบัดสูงสุด 101.04 มก./ล.-วัน



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น

4.1.5.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

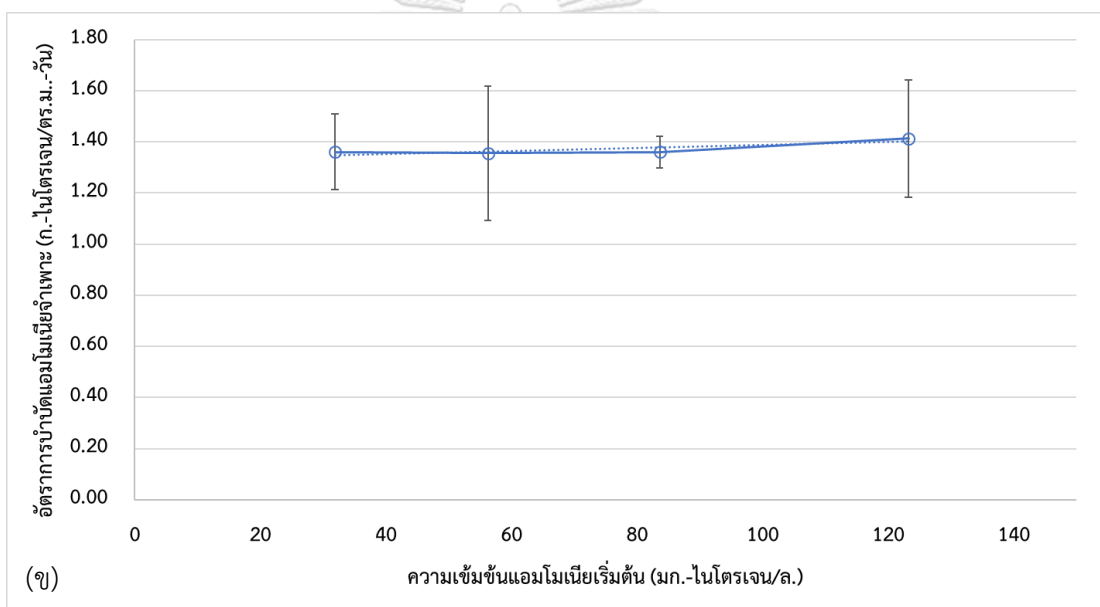
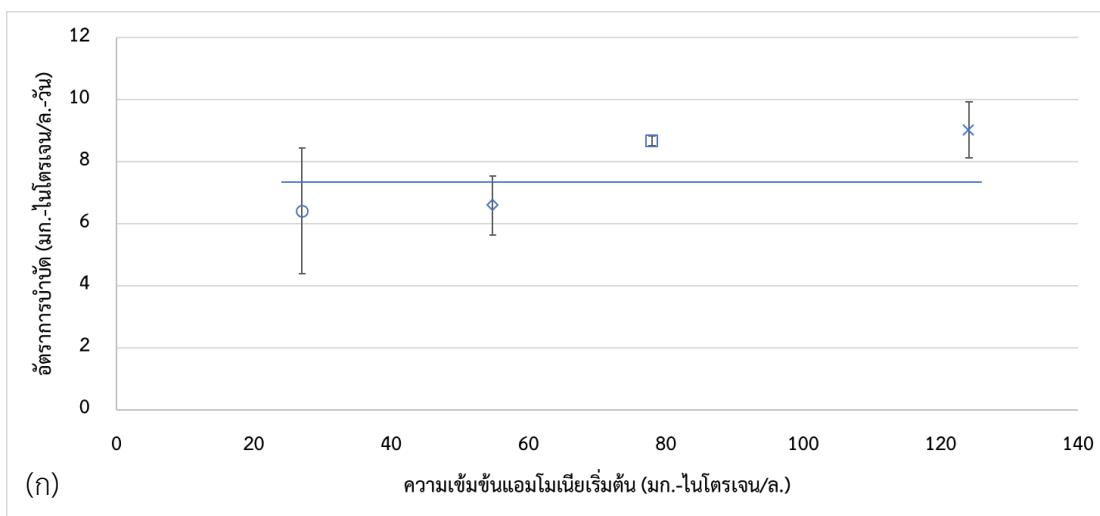
ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไปเป็นไนโตรท์ และไนโตรท์ไปเป็นไนเตรท ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้จากปริมาณไนเตรทที่เกิดขึ้นเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียของแต่ละการทดแทนน้ำเสีย เพื่อมาหาค่าอัตราการบำบัดตามสมการที่ (4.6) แล้วนำค่าอัตราการบำบัดที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนีย จะได้กราฟดังภาพที่ 4.14 (ก) กราฟที่ได้สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ลำดับศูนย์ (Zero order kinetics) แสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน หมายความว่า ความ

เข้มข้นไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเฉลี่ยในงานวิจัยนี้ เท่ากับ 7.68 มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน และเนื่องจากถังกรองโปรยกรองเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งเจริญยึดติดอยู่บนพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงสามารถสมมติได้ว่าจุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวกลางพลาสติกกรุ่น R-190 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 190 ตร.ม./ลบ.ม. คิดเป็น 5.97 ตร.ม./ถัง พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ย ดังภาพที่ 4.14 (ข) เท่ากับ 1.41 ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน

$$r_{NO_3} = \frac{NO_{3t} - NO_{30}}{t} \quad (4.6)$$

โดยที่	r_{NO_3}	คือ อัตราไนตริฟิเคชัน (มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน)
	NO_{3t}	คือ ความเข้มข้นไนเตรทที่เกิดขึ้นในถังโปรยกรอง (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
	NO_{30}	คือ ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นบริเวณถังโปรยกรอง (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
	t	คือ ระยะเวลาในการเกิดไนเตรท (วัน)

เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า (รวินดา จุ้ยสกุล, 2017) ศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโปรยกรอง โดยมีความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำเสีย 500 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่ามีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด 0.577 ± 0.004 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน (Bovendeur, 1989) ทำการศึกษาในระบบโปรยกรองที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 4-5 กรัมต่อวัน พบว่า ที่พีเอช 6 มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด 0.20 ± 0.10 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน จะเห็นว่าอัตราไนตริฟิเคชันที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่างานวิจัยของ (รวินดา จุ้ยสกุลและศรัณย์ เตชะเสน, 2559 และ Bovendeur, 1989)



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราไนตริฟิเคชันกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น

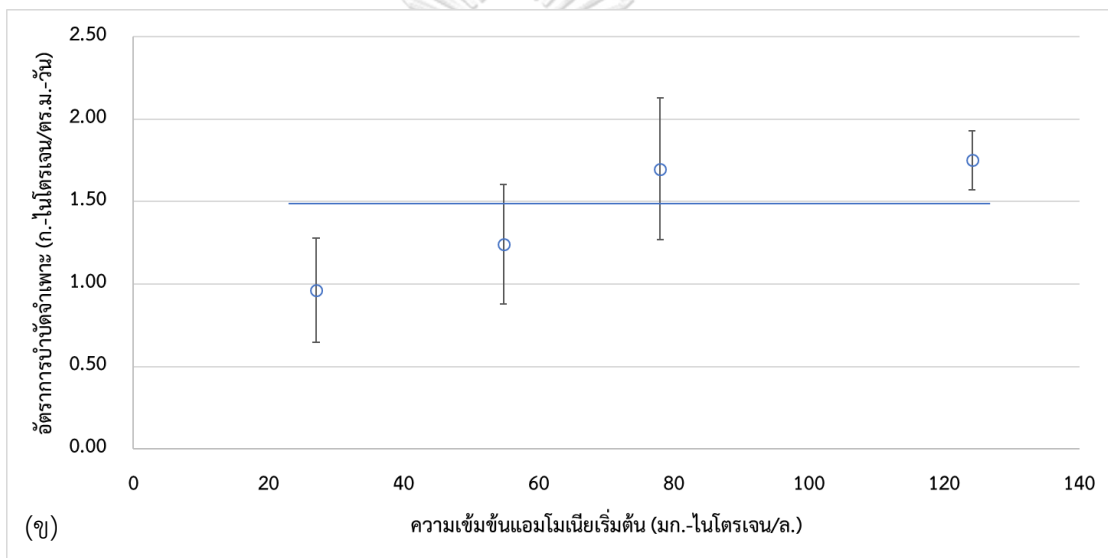
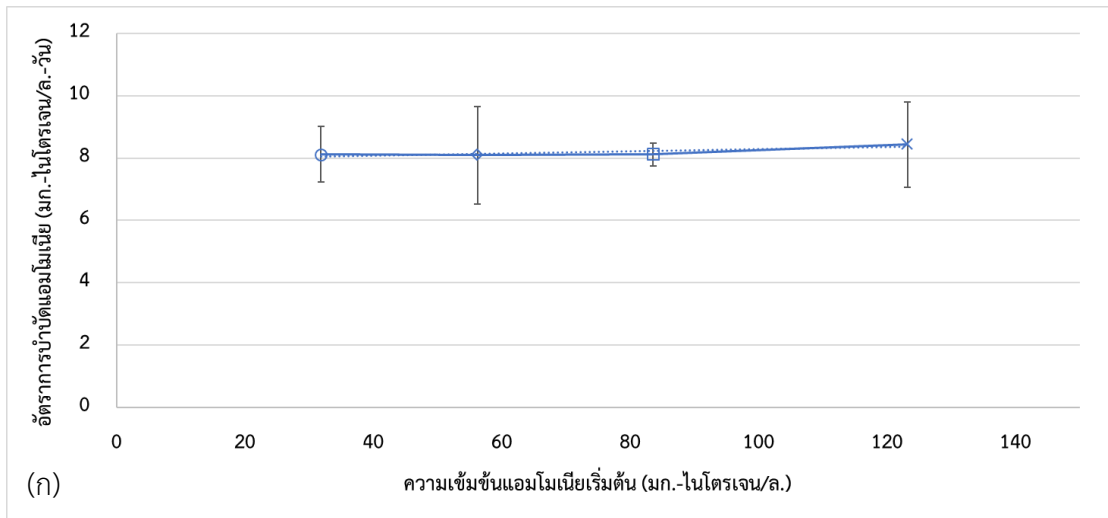
4.1.5.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนีย

เมื่อพิจารณาแอมโมเนียที่หายไปจะ发现有 2 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง คือการนำไปใช้สร้างเซลล์ในกระบวนการหายใจและการเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรทด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Farabegoli, Chiavola และ Rolle, 2009) ซึ่งคิดปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงเทียบกับระยะเวลาการเก็บกัก เพื่อมาหาค่าอัตราการบำบัดตามสมการที่ (4.7) แล้วนำค่าอัตราการบำบัดที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนีย จะได้กราฟดังภาพที่ 4.15 (ก) กราฟที่ได้สอดคล้องกับ

จลนพลศาสตร์ลำดับศูนย์ (Zero order kinetics) หมายความว่า ความเข้มข้นไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนโตรฟิเคชัน ซึ่งคิดปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงเฉลี่ยเป็น 8.19 มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน และเนื่องจากถังกรองกึ่งไร้อากาศเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งเจริญยึดติดอยู่บนพื้นผิวตัวกลาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงสามารถสมมติได้ว่าจุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ผิวตัวกลาง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวกลาง พลาสติกกรุน R-190 ซึ่งมีพื้นที่ผิว 190 ตร.ม./ลบ.ม. คิดเป็น 5.97 ตร.ม./ถัง พบว่า อัตราการลดลงจำเพาะเฉลี่ย ดังภาพที่ 4.15 (ข) เท่ากับ 1.37 ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน

$$r_{NH_3} = \frac{NH_{30} - NH_{3t}}{t} \quad (4.7)$$

โดยที่	r_{NH_3}	คือ อัตราการบำบัดแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน)
	NH_{30}	คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
	NH_{3t}	คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียที่ผ่านการบำบัด (มก.-ไนโตรเจน/ล.)
	t	คือ ระยะเวลาในการบำบัด (วัน)



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) อัตราการบำบัดแอมโมเนียกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) อัตราการบำบัดแอมโมเนียจำเพาะกับความเข้มข้นเริ่มต้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีและทีเคเอ็นและผลของความเข้มข้นของซีโอดีและทีเคเอ็นเริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยการเปรียบเทียบสัดส่วนการทดแทนน้ำใหม่ ร้อยละ 16 32 50 และ 68 เพื่อหาสัดส่วนการทดแทนน้ำใหม่ที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการเดินระบบจริงโดยระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาอัตราการบำบัดซีโอดีและทีเคเอ็น

- ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศที่สัดส่วนการทดแทนน้ำเสียใหม่ร้อยละ 16 32 50 และ 68 คิดเป็นร้อยละ 98 97 97 และ 98 ตามลำดับ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพถังกรองไร้อากาศร้อยละ 86-93 โดยถังโปรยกรองช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบอีกร้อยละ 19-75

- อัตราการบำบัดซีโอดีสูงสุดที่ถังกรองกึ่งไร้อากาศ คือ 459.82 ± 13.44 มก.ซีโอดี/ล.-วัน อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะสูงสุดที่ถังกรองกึ่งไร้อากาศ คือ 96.80 ± 2.83 ก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน ส่วนในถังโปรยกรองมีอัตราการบำบัดซีโอดีสูงสุด คือ 117.80 ± 8.45 มก.ซีโอดี/ล.-วัน และอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะสูงสุด คือ 19.75 ± 1.42 ก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน

- ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของระบบรวมถึงโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศที่สัดส่วนการทดแทนน้ำเสียใหม่ร้อยละ 16 32 50 และ 68 คิดเป็นร้อยละ 100 99 97 และ 53 ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นประสิทธิภาพในถังกรองโปรยกรอง สามารถบำบัดได้ ร้อยละ 29-98 และถังกรองกึ่งไร้อากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดอีกร้อยละ 3-19

- อัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดที่ถังกรองกึ่งไร้อากาศ คือ 0.57 ± 0.23 มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน อัตราการบำบัดแอมโมเนียจำเพาะสูงสุดที่ถังกรองกึ่งไร้อากาศ คือ 0.096 ± 0.007 ก.-ไนโตรเจน/ ตร.ม.-วัน ส่วนในถังโปรยกรองมีอัตราไนตริฟิเคชันสูงสุดที่ถังโปรยกรอง คือ 7.68 มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน ขณะเดียวกันการ

เพิ่มขึ้นของไนเตรทมีอัตราไนตริฟิเคชันสูงสุดที่ถังโปรยกรอง คือ 1.41 ก.-ไนโตรเจน/
ตร.ม.-วัน

5.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นซีโอติและทีเคเอ็นเริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริ
ฟิเคชันโดยระบบร่วมถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ

- ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดของระบบร่วมถังโปรย
กรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศที่สัดส่วนการทดแทนน้ำเสียใหม่ร้อยละ 16 32 50 และ
68 คือร้อยละ 77 58 37 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในถังกรองกึ่งไร้อ
ากาศ คิดเป็นร้อยละ 95-99

- อัตราดีไนตริฟิเคชัน คิดจากปริมาณไนเตรทที่ลดลงเทียบกับความ
เข้มข้นเริ่มต้น โดยในถังกรองกึ่งไร้อากาศมีค่าอัตราดีไนตริฟิเคชันสอดคล้องกับค่า
จลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง (First order kinetics) หมายความว่า อัตราดีไนตริฟิเคชัน
จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

- ถังกรองกึ่งไร้อากาศมีอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุด คือ 29.23 ± 2.68
มก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน และอัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด คือ 6.15 ± 0.56
ก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งจะเป็นประโยชน์
อย่างยิ่ง หากมีการดำเนินการวิจัยต่อไปสำหรับนำผลการศึกษาที่ได้ในงานวิจัยนี้ไปเป็น
แนวทางในการวิจัยเพื่อบำบัดน้ำเสียจริง

- สามารถนำค่าจลนพลศาสตร์และค่าอัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิว
ตัวกลางที่ได้จากการทดลองไปใช้ประกอบการออกแบบระบบร่วมถังโปรยกรองและถัง
กรองกึ่งไร้อากาศ เพื่อใช้กับงานระบบบำบัดน้ำเสียจริงได้ โดยมีข้อที่ควรคำนึงถึงคือ
ชนิดของน้ำเสียที่นำมาใช้กับระบบ เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล
กลูโคส ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ระบบมี
ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ดังนั้นการนำค่าที่ได้จากการทดลองนี้ไปใช้ในการ
ออกแบบระบบ ควรมีการคำนึงถึงชนิดของน้ำเสียที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการ
บำบัดน้ำเสียของระบบด้วย

- เนื่องจากการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคสในการเดินระบบ ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างสูง ดังนั้นควรลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ชนิดอื่น หรือน้ำเสียชุมชนจริงมาทดลองเดินระบบเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด
- หากมีการนำแนวทางนี้ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง ควรวางแผนระบบเพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินงาน



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด โดยวิธีทำให้แห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมติมีน้ำหนัก A กรัม วางบนถ้วยหรือกระดาษอะลูมิเนียม
3. วางกระดาษกรองไว้บนชุดกรวยกรองบุชเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ
4. เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียก เพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวยบุชเนอร์
5. เทน้ำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันอย่างดีแล้วลงในกรวยกรองบุชเนอร์โดยค่อยๆเทอย่างต่อเนื่อง ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวง เทลงกรอง และฉีดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยกรองบุชเนอร์ ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูดน้ำออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
6. เมื่อแห้งแล้วนำกระดาษกรองออกวางในภาชนะเดิม (ถ้วยหรือกระดาษอะลูมิเนียม) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก สมมติให้น้ำหนัก B กรัม

การคำนวณ หาของแข็งแขวนลอย ดังสมการที่ ก.1

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = (B-A) \cdot 10^6 / \text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)} \quad (\text{ก.1})$$

โดย A คือ น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)

B คือ น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

ก.2 การวิเคราะห์ซีไอดี โดยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิด

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำเสียให้เหมาะสม จากการทดลองเลือกใช้ปริมาตรน้ำเสีย 5 มิลลิลิตร ต่อการเติมโพแทสเซียมไดโครเมต 3 มิลลิลิตร และกรดผสมซิลเวอร์ 7 มิลลิลิตร

2. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:10 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
3. ใส่ตัวอย่างน้ำเสีย 5 มิลลิลิตร ต่อการเติมโพแทสเซียมไดโครเมต 3 มิลลิลิตร และกรดผสมซิลเวอร์ 7 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้วที่มีขนาดเหมาะสม ปิดฝาให้แน่น
4. ทำแบงค์ ตามขั้นตอนที่ 3 แต่เปลี่ยนจากน้ำเสียเป็นน้ำกลั่น
5. นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็น
6. เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเอฟเอเอส สีของสารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนสีจากสีเหลือง เป็น สีเขียว เป็น สีฟ้า และสีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ สมมติใช้ปริมาตร A มิลลิลิตรสำหรับการไตเตรทตัวอย่างแบงค์ และสมมติใช้ปริมาตร B มิลลิลิตรสำหรับการไทเทรทน้ำเสีย

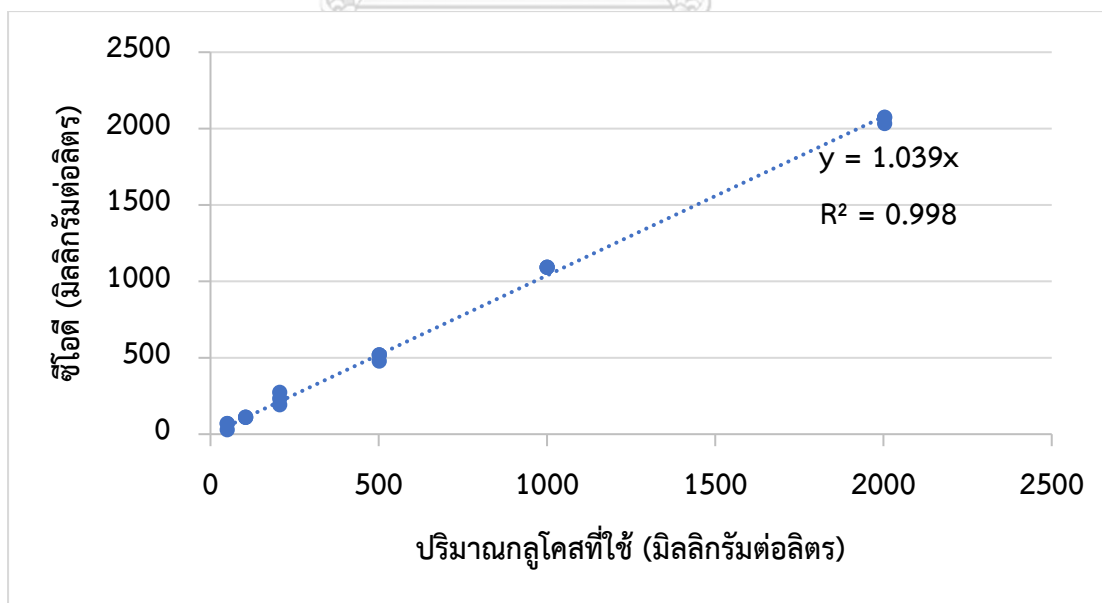
การคำนวณ หาซีไอดี ดังสมการที่ ก.2

$$\text{ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = ((A-B) \cdot N \cdot 8000) / \text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง} \quad (\text{ก.2})$$

โดย A คือ มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรทแบงค์ (มิลลิลิตร)

B คือ มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรทตัวอย่างน้ำเสีย (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

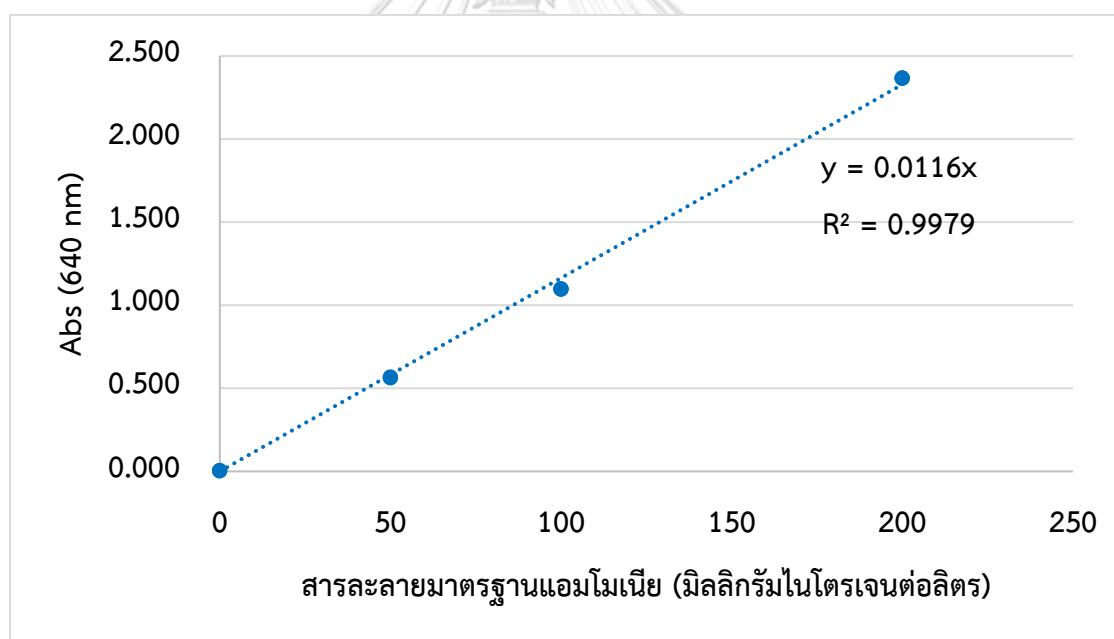


ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์

ก.3 การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยวิธีซาลิไซเลต

วิธีวิเคราะห์

7. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:200 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
8. ใส่สารซาลิไซเลตปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร
9. ใส่สารละลายผสมอัลคาไลน์ซีเตรทและไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ในที่มีต่อน้อย 1 ชั่วโมง แต่ห้ามเกิน 24 ชั่วโมง
10. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าดูดกลืนแสง 640 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานแอมโมเนีย
11. ทำกราฟมาตรฐานสารละลายแอมโมเนียตามขั้นตอน 1-4 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย โดยเตรียมจากแอมโมเนียคลอไรด์ ความเข้มข้น 0 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



ภาพที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน

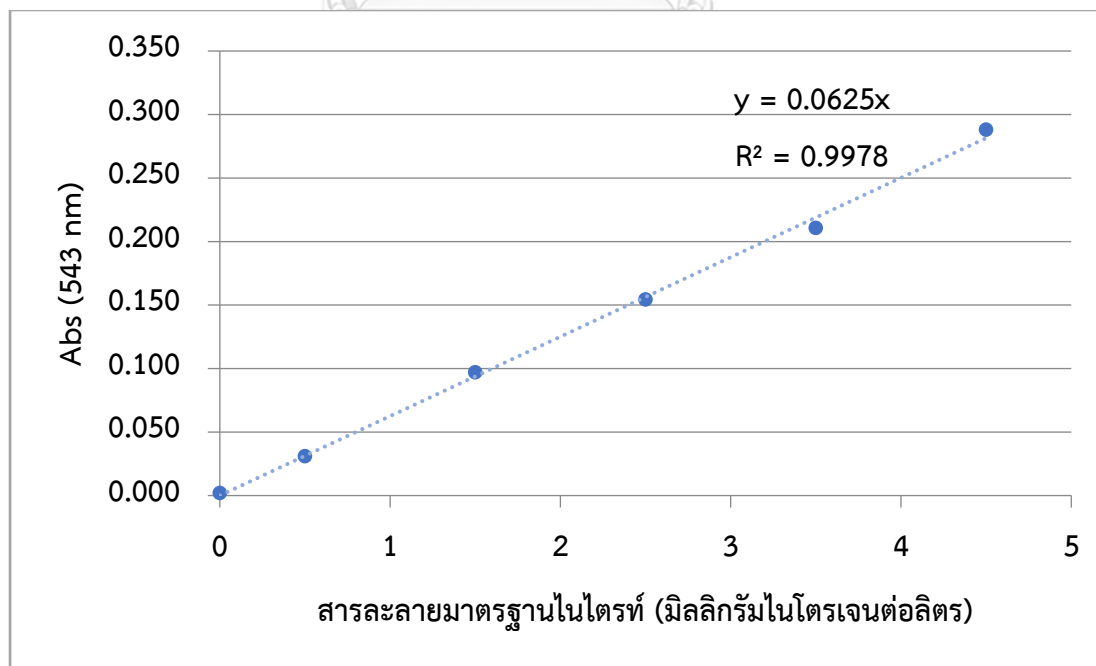
ก.4 การวิเคราะห์ไนโตรเจนในไตรเจน โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

วิธีเตรียมสารเคมี

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

วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:50 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิตร
2. ใส่ยาทำให้เกิดสีปริมาตร 0.2 มิลลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 20 นาที แต่ห้ามเกิน 2 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานไนโตรเจน
3. ทำกราฟมาตรฐานสารละลายไนโตรเจนตามขั้นตอน 1-2 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่าง เป็นสารละลายมาตรฐานไนโตรเจน โดยเตรียมจากโซเดียมไนโตรเจน ความเข้มข้น 0 1 2 3 4 และ 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

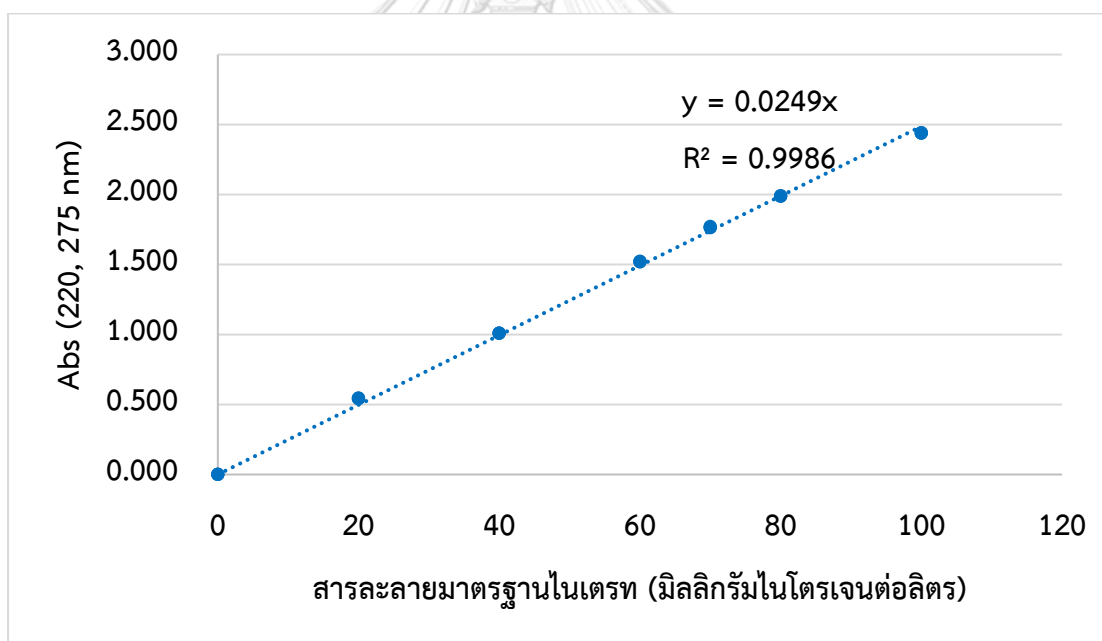


ภาพที่ ก.3 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ไนโตรเจนในไตรเจน

ก.5 การวิเคราะห์ไนโตรเจนในไตรเจน โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:10 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร
3. นำค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตรลบด้วยสองเท่าของค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานไนเตรท
4. ทำกราฟมาตรฐานสารละลายไนเตรทตามขั้นตอน 1-3 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่าง เป็นสารละลายมาตรฐานไนเตรท โดยเตรียมจากโพแทสเซียมไนเตรท ความเข้มข้น 0 12.5 25 50 และ 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



ภาพที่ ก.4 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ไนเตรทไนโตรเจน

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอติ ไนโตรท์ ไนเตรท และทีเคเอ็น ในถังปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ในช่วงเริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์จากนมผง ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
ชุดการทดลองที่ 1					
25/06/2018	0	2000.00			126.00
27/6/2018	2	386.67			42.00
30/6/2018	5	160.00			42.00
3/7/2018	8	53.33			14.00
6/7/2018	11	53.33			14.00
9/7/2018	14	53.33			14.00
12/7/2018	17	1166.48			189.00
15/7/2018	20	214.53			86.33
17/7/2018	22	214.53			49.00
19/7/2018	24	214.53			35.00
23/7/2018	28	1937.97			133.00
26/7/2018	31	243.85	0.00		23.33
29/7/2018	34	192.51	0.01		14.00
31/7/2018	36	161.66	0.00		
1/8/2018	37	161.66	0.00		12.83
4/8/2018	40	99.48	0.00		9.33
9/8/2018	45	1922.65	0.00		121.33
14/8/2018	50	185.64	0.01		21.00
16/8/2018	52	26.52	0.01		14.00
20/8/2018	56	26.52	0.01		7.00
23/8/2018	59	27.27	0.00		9.33

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
ชุดการทดลองที่ 2					
25/06/2018	0	1,960.00			182.00
27/6/2018	2	253.33			65.33
30/6/2018	5	120.00			67.67
3/7/2018	8	80.00			56.00
6/7/2018	11	66.67			35.00
9/7/2018	14	66.67			35.00
12/7/2018	17	2,051.40			224.00
15/7/2018	20	160.89			112.00
17/7/2018	22	134.08			72.33
19/7/2018	24	107.26			63.00
23/7/2018	28	1,848.13			147.00
26/7/2018	31	128.34	0.00		25.67
29/7/2018	34	51.34	0.01		16.33
31/7/2018	36	49.74	0.01		
1/8/2018	37	49.74	0.00		10.50
4/8/2018	40	37.31	0.01		7.00
9/8/2018	45	1,790.06	0.01		114.33
14/8/2018	50	132.60	0.01		46.67
16/8/2018	52	39.78	0.01		44.33
20/8/2018	56	39.78	0.01		35.00
23/8/2018	59	40.91	0.00		25.67
ชุดการทดลองที่ 3					
25/06/2018	0	1,986.67			123.67
27/6/2018	2	160.00			42.00
30/6/2018	5	146.67			39.67
3/7/2018	8	66.67			37.33
6/7/2018	11	66.67			35.00

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
9/7/2018	14	66.67			35.00
12/7/2018	17	1,488.27			170.33
15/7/2018	20	201.12			98.00
17/7/2018	22	201.12			63.00
19/7/2018	24	147.49			60.67
23/7/2018	28	1,860.96			149.33
26/7/2018	31	89.84	0.00		35.00
29/7/2018	34	51.34	0.00		21.00
31/7/2018	36	49.47	0.00		
1/8/2018	37	49.47	0.00		10.50
4/8/2018	40	49.47	0.00		7.00
9/8/2018	45	1,803.31	0.00		119.00
14/8/2018	50	172.38	0.01		46.67
16/8/2018	52	39.78	0.01		37.33
20/8/2018	56	39.78	0.01		25.67
23/8/2018	59	40.91	0.00		23.33

ตารางที่ ข.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอติ ไนโตรท์ ไนเตรท และทีเคเอ็น ในถังปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ในช่วงเริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคส

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
ชุดการทดลองที่ 1					
27/8/2018	63	1512.61	0.01	59.44	
28/8/2018	64	369.75	0.06	73.64	
29/8/2018	65	208.40	0.03	123.62	
30/8/2018	66	168.07	0.04	126.65	
3/9/2018	70	1951.65	0.00	126.10	
4/9/2018	71	210.99	0.00	132	

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
5/9/2018	72	158.24	0.00	131.93	
7/9/2018	74	158.24	0.00	131.93	
11/9/2018	78	1741.94	0.00	12.57	61.18
12/9/2018	79	167.74	0.05	40.65	61.18
13/9/2018	80	106.08	0.06	69.44	100.06
14/9/2018	81	92.82	0.00	83.78	61.18
18/9/2018	85	1862.50	0.00	85.77	129.39
19/9/2018	86	187.50	0.00	75.18	109.53
21/9/2018	88	137.50	0.00	103.88	106.52
24/9/2018	91	87.50	0.00	104.60	101.04
26/9/2018	93	75.00	0.00	78.03	46.54
29/9/2018	96	62.50	0.00	16.36	43.09
3/10/2018	100	1900.00	0.00	40.88	129.74
4/10/2018	101	325.00	0.00	72.48	129.39
5/10/2018	102	250.00	0.02	90.24	116.64
8/10/2018	105	225.00	0.01	103.88	91.07
11/10/2018	108	125.00	0.00	125.72	58.97
15/10/2018	112	112.50	0.00	16.86	48.02
16/10/2018	113	1868.04	0.01	28.50	129.36
17/10/2018	114	445.36	0.00	52.52	121.38
19/10/2018	116	284.54	0.00	62.77	94.77
22/10/2018	119	222.68	0.00	97.31	87.30
25/10/2018	122	1883.87	0.00	105.72	55.87
28/10/2018	125	258.06	0.00	104.97	48.02
31/10/2018	128	141.94	0.00	118.73	43.56
6/11/2018	134	1883.87	0.00	53.12	77.71
7/11/2018	135	258.06	0.01	1.22	93.18
8/11/2018	136	141.94	0.01	38.50	98.98

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
10/11/2018	138	142.70	0.01	50.34	98.69
12/11/2018	140	129.73	0.01	58.07	138.60
15/11/2018	143	105.49	0.00	60.90	129.39
18/11/2018	146	118.68	0.00	70.68	109.53
21/11/2018	149	145.05	0.00	58.85	106.52
23/11/2018	151	1786.67	0.00	31.62	101.04
24/11/2018	152	373.33	0.00	21.83	46.54
26/11/2018	154	160.00	0.00	31.15	43.09
29/11/2018	157	106.67	0.00	63.62	145.15
1/12/2018	159	53.33	0.00	81.20	129.36
4/12/2018	162	80.00	0.00	88.17	121.38
6/12/2018	164	53.33	0.00	93.19	94.77
8/12/2018	166	89.36	0.00	97.31	87.30
11/12/2018	169	63.83	0.01	102.24	55.87
15/12/2018	173	63.83	0.00	104.97	68.72
19/12/2018	177	63.83	0.00	105.72	67.23
23/12/2018	181	63.83	0.00	106.22	66.76
ชุดการทดลองที่ 2					
27/8/2018	63	1,243.70	0.01	41.13	
28/8/2018	64	181.51	0.01	99.31	
29/8/2018	65	168.07	0.00	116.81	
30/8/2018	66	168.07	0.00	125.33	
3/9/2018	70	1,859.34	0.03	127.93	
4/9/2018	71	92.31	0.00	130.13	
5/9/2018	72	13.19	0.00	132.69	
7/9/2018	74	13.19	0.00	130.13	
11/9/2018	78	1,767.74	0.00	16.19	34.36
12/9/2018	79	193.55	0.01	25.15	34.36

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	13/9/2018	80	92.82	0.01	39.00	50.93
	14/9/2018	81	66.30	0.00	49.02	34.36
	18/9/2018	85	1,425.00	0.00	128.66	123.66
	19/9/2018	86	137.50	0.00	52.73	106.73
	21/9/2018	88	125.00	0.00	93.19	100.66
	24/9/2018	91	75.00	0.00	98.06	103.04
	26/9/2018	93	62.50	0.00	40.58	61.18
	29/9/2018	96	50.00	0.00	22.26	24.37
	3/10/2018	100	1,850.00	0.01	49.55	123.66
	4/10/2018	101	325.00	0.02	76.12	115.53
	5/10/2018	102	262.50	0.01	95.91	113.52
	8/10/2018	105	200.00	0.00	93.19	81.50
	11/10/2018	108	137.50	0.00	118.28	59.65
	15/10/2018	112	100.00	0.00	10.87	50.52
	16/10/2018	113	1,830.93	0.01	11.43	125.27
	17/10/2018	114	346.39	0.00	29.03	116.60
	19/10/2018	116	197.94	0.00	35.18	84.99
	22/10/2018	119	197.94	0.00	37.82	81.38
	25/10/2018	122	1,922.58	0.00	49.04	59.64
	28/10/2018	125	219.35	0.00	77.37	50.52
	31/10/2018	128	141.94	0.00	97.96	47.73
	6/11/2018	134	1,922.58	0.00	50.01	75.06
	7/11/2018	135	219.35	0.01	14.99	102.12
	8/11/2018	136	219.35	0.00	11.95	98.69
	10/11/2018	138	155.68	0.00	15.32	101.85
	12/11/2018	140	142.70	0.01	36.02	153.48
	15/11/2018	143	141.94	0.00	44.74	123.66
	18/11/2018	146	145.05	0.00	74.65	106.73

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
21/11/2018	149	131.87	0.00	50.24	100.66
23/11/2018	151	1,706.67	0.00	34.06	103.04
24/11/2018	152	120.00	0.00	25.91	61.18
26/11/2018	154	93.33	0.00	36.89	24.37
29/11/2018	157	66.67	0.00	70.42	145.12
1/12/2018	159	53.33	0.01	90.80	125.27
4/12/2018	162	53.33	0.00	104.02	116.60
6/12/2018	164	53.33	0.00	104.02	84.99
8/12/2018	166	63.83	0.00	105.72	81.38
11/12/2018	169	63.83	0.00	108.22	59.64
15/12/2018	173	63.83	0.00	112.46	62.44
19/12/2018	177	63.83	0.00	118.73	61.88
23/12/2018	181	63.83	0.01	120.42	60.18
ชุดการทดลองที่ 3					
27/8/2018	63	1,216.81	0.01	33.68	
28/8/2018	64	114.29	0.03	114.49	
29/8/2018	65	141.18	0.02	122.66	
30/8/2018	66	141.18	0.01	125.77	
3/9/2018	70	1,872.53	0.01	130.97	
4/9/2018	71	52.75	0.00	134.53	
5/9/2018	72	13.19	0.00	134.88	
7/9/2018	74	13.19	0.00	130.31	
11/9/2018	78	1,780.65	0.00	11.08	43.27
12/9/2018	79	167.74	0.00	10.38	43.27
13/9/2018	80	66.30	0.01	49.11	61.95
14/9/2018	81	66.30	0.01	36.06	43.27
18/9/2018	85	1,250.00	0.00	127.27	129.47
19/9/2018	86	175.00	0.00	49.09	108.22

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
21/9/2018	88	62.50	0.00	52.91	102.55
24/9/2018	91	50.00	0.00	67.78	97.70
26/9/2018	93	37.50	0.00	23.36	43.01
29/9/2018	96	25.00	0.00	6.24	43.27
3/10/2018	100	1,937.50	0.00	51.74	129.47
4/10/2018	101	300.00	0.01	71.29	120.74
5/10/2018	102	262.50	0.02	52.88	118.41
8/10/2018	105	200.00	0.01	67.78	84.81
11/10/2018	108	112.50	0.00	96.12	58.69
15/10/2018	112	100.00	0.00	21.95	43.10
16/10/2018	113	1,905.15	0.00	13.50	128.24
17/10/2018	114	395.88	0.01	25.86	119.27
19/10/2018	116	210.31	0.00	30.63	84.75
22/10/2018	119	210.31	0.00	61.22	81.10
25/10/2018	122	1,922.58	0.00	34.99	58.69
28/10/2018	125	206.45	0.00	72.83	46.82
31/10/2018	128	129.03	0.00	61.36	34.23
6/11/2018	134	1,922.58	0.00	14.67	84.35
7/11/2018	145	206.45	0.01	3.36	104.82
8/11/2018	136	129.03	0.01	38.10	104.42
10/11/2018	138	129.73	0.00	40.80	104.78
12/11/2018	140	129.73	0.00	32.52	159.20
15/11/2018	143	79.12	0.00	34.21	129.47
18/11/2018	146	105.49	0.00	43.87	108.22
21/11/2018	149	118.68	0.00	40.39	102.55
23/11/2018	151	1,720.00	0.00	10.83	97.70
24/11/2018	152	120.00	0.00	13.26	43.01
26/11/2018	154	80.00	0.00	14.01	43.27

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรเจน (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
29/11/2018	157	66.67	0.00	39.42	149.97
1/12/2018	159	40.00	0.00	66.16	128.24
4/12/2018	162	53.33	0.00	71.32	119.27
6/12/2018	164	53.33	0.00	86.79	84.75
8/12/2018	166	63.83	0.00	104.29	81.10
11/12/2018	169	51.06	0.00		58.69
15/12/2018	173	51.06	0.00		69.26
19/12/2018	177	51.06	0.00		69.23
23/12/2018	181	51.06	0.00		69.23

ตารางที่ ข.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอติ ไนโตรเจน ไนเตรท และทีเคเอ็น ในระบบบรวมน้ำในถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ในช่วงทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคส ชุดที่ 1

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรเจน (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบย่อยละ 16					
24/12/2018	182.11	2000.00	0.000	100.32	175.60
24/12/2018	182.15	1625.81	0.00	97.85	171.98
24/12/2018	182.19				166.64
24/12/2018	182.23				171.21
24/12/2018	182.27				166.12
24/12/2018	182.32				165.34
24/12/2018	182.36				169.83
24/12/2018	182.40				164.57
24/12/2018	182.44				168.79
24/12/2018	182.48	851.61	0.03	91.03	168.36
24/12/2018	182.52				169.14
24/12/2018	182.57				171.29

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
24/12/2018	182.61				170.26
24/12/2018	182.65				169.31
25/12/2018	182.69				164.40
25/12/2018	182.73				163.88
25/12/2018	182.77				163.36
25/12/2018	182.82	503.23	0.02	82.31	162.50
25/12/2018	182.86				161.98
25/12/2018	182.90				152.50
25/12/2018	182.94				151.40
25/12/2018	182.98				151.23
25/12/2018	183.02				151.14
25/12/2018	183.07	232.26	0.01	68.55	150.96
26/12/2018	184.08	154.84	0.01	53.14	109.82
27/12/2018	185.00	118.03	0.02	76.36	101.58
27/12/2018	185.35				100.70
28/12/2018	186.01				98.77
29/12/2018	187.39	118.03	0.01	99.67	91.05
30/12/2018	188.24	118.03	0.01	101.65	86.40
2/1/2019	191.07	116.13	0.02	111.40	78.07
4/1/2019	193.39	77.42	0.01	117.40	77.28
7/1/2019	196.05	58.06	0.00	118.02	76.93
8/1/2019	197.05	38.71	0.00	121.61	73.86
9/1/2019	198.05	38.71	0.00	124.38	54.47
11/1/2019	200.36	38.71	0.00	124.59	43.33
15/1/2019	204.15	38.71	0.00	125.45	38.51
17/1/2019	206.09	38.71	0.00	125.58	30.88
22/1/2019	211.33	444.44	0.03	184.27	59.79
23/1/2019	212.00	133.33	0.01	100.46	46.31

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	23/1/2019	212.17	88.89	0.01	101.78	49.63
	24/1/2019	212.99	88.89	0.00	71.72	54.32
	25/1/2019	213.99	88.89	0.01	71.06	48.07
	25/1/2019	214.35	88.89	0.03	63.84	51.98
	26/1/2019	215.00	88.89	0.01	61.17	49.44
	27/1/2019	216.32	78.69	0.01	57.13	55.50
	29/1/2019	218.05	78.69	0.00	51.07	51.78
	31/1/2019	220.18	78.69	0.02	46.30	51.98
	2/2/2019	222.13	78.69	0.01	41.13	54.13
	4/2/2019	224.31	78.69	0.01	41.37	50.02
	7/2/2019	227.00			39.60	60.38
	8/2/2019	228.03			34.75	
	9/2/2019	229.03	78.69	0.01	31.43	
	9/2/2019	229.13	56.00	0.00	31.92	57.65
	9/2/2019	229.44	56.00	0.00	32.65	52.17
	10/2/2019	230.24	56.00	0.00	49.54	40.64
	11/2/2019	231.03	56.00	0.00	50.99	36.93
	12/2/2019	232.00	56.47	0.00	59.15	18.17
	13/2/2019	232.97	56.47	0.00	59.56	10.16
	15/2/2019	235.33	54.26	0.00	89.13	0.68
	18/2/2019	238.10	54.26	0.00	95.84	0.98
	21/2/2019	241.00	54.26	0.00	104.57	0.68
	23/2/2019	243.50	54.26	0.00	109.58	0.88
	26/2/2019	246.00	54.26	0.00	116.77	0.73
	2/3/2019	250.13	393.44	0.03	102.22	38.50
	3/3/2019	251.17	102.30	0.02	90.10	35.76
	4/3/2019	252.01	94.43	0.03	42.26	36.25
	5/3/2019	253.03	94.43	0.01	29.09	36.74

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	7/3/2019	255.15	94.43	0.01	25.37	36.54
	10/3/2019	257.99	78.69	0.02	23.43	37.23
	12/3/2019	260.01	78.69	0.01	21.41	40.55
	15/3/2019	263.19	78.69	0.01	13.25	42.60
	18/3/2019	266.03	78.69	0.01	12.36	43.19
	21/3/2019	269.08	43.28	0.01	0.55	21.70
	22/3/2019	270.00	43.28	0.01	15.70	15.83
	23/3/2019	271.39	43.28	0.01	11.62	14.70
	25/3/2019	273.02	35.41	0.00	18.30	4.20
	27/3/2019	275.01	35.41	0.00	21.52	1.92
	28/3/2019	276.38	32.00	0.00	24.66	1.40
	1/4/2019	280.05	32.00	0.00	24.34	0.70
	4/4/2019	283.05	32.00	0.00	24.73	0.00
	8/4/2019	287.15	214.29	0.05	26.30	24.48
	9/4/2019	288.03	85.71	0.02	2.98	26.23
	10/4/2019	289.31	85.71	0.02	1.13	24.98
	12/4/2019	291.52	51.43	0.01	0.80	29.91
	15/4/2019	294.19	51.43	0.00	0.80	32.33
	18/4/2019	297.01	51.43	0.00	1.85	28.40
	23/4/2019	302.03	51.43	0.00	1.13	28.07
	25/4/2019	304.15	40.68	0.00	3.70	27.32
	26/4/2019	304.99	40.68	0.00	9.25	10.53
	27/4/2019	306.34	40.68	0.00	22.84	0.92
	30/4/2019	309.51	40.68	0.00	27.10	0.75
	3/5/2019	312.45	40.68	0.00	27.10	0.42
	7/5/2019	315.99	40.68	0.00	27.42	0.42
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 32						
	24/12/2018	182.11	2000.00	0.00	101.61	175.95

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
24/12/2018	182.15	1664.52	0.02	98.43	172.28
24/12/2018	182.19				168.71
24/12/2018	182.23				171.21
24/12/2018	182.27				163.45
24/12/2018	182.32				162.41
24/12/2018	182.36				162.33
24/12/2018	182.40				160.52
24/12/2018	182.44				159.40
24/12/2018	182.48	1625.81	0.03	91.40	158.36
24/12/2018	182.52				161.64
24/12/2018	182.57				159.48
24/12/2018	182.61				159.31
24/12/2018	182.65				157.59
25/12/2018	182.69				156.12
25/12/2018	182.73				155.00
25/12/2018	182.77				153.88
25/12/2018	182.82	967.74	0.03	79.30	153.88
25/12/2018	182.86				150.69
25/12/2018	182.90				148.97
25/12/2018	182.94				147.19
25/12/2018	182.98				145.35
25/12/2018	183.02				142.98
25/12/2018	183.07	232.26	0.04	63.55	141.49
26/12/2018	184.08	193.55	0.02	58.68	141.05
27/12/2018	185.00	118.03	0.01	61.74	117.37
27/12/2018	185.35				97.81
28/12/2018	186.01				89.21
29/12/2018	187.39	118.03	0.01	108.22	88.07

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
30/12/2018	188.24	116.13	0.01	112.07	81.49
2/1/2019	191.07	98.36	0.01	113.64	77.37
4/1/2019	193.39	96.77	0.00	117.40	69.21
7/1/2019	196.05	96.77	0.00	124.75	67.28
8/1/2019	197.05	38.71	0.00	124.96	62.46
9/1/2019	198.05	38.71	0.00	125.25	57.37
11/1/2019	200.36	38.71	0.00	125.45	42.37
15/1/2019	204.15	38.71	0.00	125.58	32.28
17/1/2019	206.09	38.71	0.02	125.58	33.86
22/1/2019	211.33	755.56	0.07	163.31	115.10
23/1/2019	212.00	266.67	0.05	73.46	53.93
23/1/2019	212.17	88.89	0.03	65.92	60.58
24/1/2019	212.99	88.89	0.01	33.46	62.92
25/1/2019	213.99	88.89	0.01	18.96	63.51
25/1/2019	214.35	88.89	0.02	14.14	66.05
26/1/2019	215.00	88.89	0.00	10.18	66.05
27/1/2019	216.32	78.69	0.01	5.82	66.63
29/1/2019	218.05	78.69	0.00	4.44	66.83
31/1/2019	220.18	78.69	0.01	2.83	70.54
2/2/2019	222.13	78.69	0.00	2.75	70.93
4/2/2019	224.31	78.69	0.00	2.42	76.80
7/2/2019	227.00			1.86	82.85
8/2/2019	228.03			1.05	
9/2/2019	229.03	78.69	0.00	0.97	
9/2/2019	229.13	88.00	0.00	5.41	75.23
9/2/2019	229.44	80.00	0.00	9.78	72.11
10/2/2019	230.24	80.00	0.00	16.48	52.56
11/2/2019	231.03	80.00	0.00	50.18	45.92

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
12/2/2019	232.00	75.29	0.00	75.15	31.46
13/2/2019	232.97	75.29	0.00	75.39	11.63
15/2/2019	235.33	70.96	0.00	80.65	0.29
18/2/2019	238.10	70.96	0.00	85.90	0.10
21/2/2019	241.00	70.96	0.00	87.27	0.00
23/2/2019	243.50	70.96	0.00	98.67	0.44
26/2/2019	246.00	70.96	0.00	109.90	0.68
2/3/2019	250.13	692.46	0.05	86.63	55.59
3/3/2019	251.17	102.30	0.03	76.20	49.05
4/3/2019	252.01	94.43	0.01	13.58	51.20
5/3/2019	253.03	94.43	0.02	1.62	58.04
7/3/2019	255.15	94.43	0.01	1.05	52.27
10/3/2019	257.99	78.69	0.01	0.24	60.28
12/3/2019	260.01	78.69	0.01	0.24	62.04
15/3/2019	263.19	78.69	0.00	0.81	63.80
18/3/2019	266.03	78.69	0.00	1.62	58.82
21/3/2019	269.08	43.28	0.00	1.88	51.96
22/3/2019	270.00	43.28	0.00	13.98	40.85
23/3/2019	271.39	35.41	0.00	20.81	39.37
25/3/2019	273.02	35.41	0.00	36.75	19.33
27/3/2019	275.01	35.41	0.00	51.98	4.99
28/3/2019	276.38	32.00	0.00	58.11	0.00
1/4/2019	280.05	32.00	0.00	60.62	0.00
4/4/2019	283.05	32.00	0.00	60.70	0.00
8/4/2019	287.15	642.86	0.02	48.25	51.12
9/4/2019	288.03	128.57	0.02	6.03	55.05
10/4/2019	289.31	128.57	0.01	5.79	55.63
12/4/2019	291.52	102.86	0.03	0.56	63.24

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	15/4/2019	294.19	68.57	0.00	1.85	63.57
	18/4/2019	297.01	68.57	0.01	0.40	61.31
	23/4/2019	302.03	68.57	0.00	0.72	57.31
	25/4/2019	304.15	65.08	0.00	3.76	54.97
	26/4/2019	304.99	65.08	0.00	3.02	45.69
	27/4/2019	306.34	65.08	0.00	23.44	10.02
	30/4/2019	309.51	56.95	0.00	48.41	5.60
	3/5/2019	312.45	56.95	0.00	59.51	1.75
	3/5/2019	315.99	56.95	0.00	60.47	1.67
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 50						
24/12/2018	182.11	2000.00	0.02	108.22	184.57	
24/12/2018	182.15	1819.35	0.00	100.08	179.66	
24/12/2018	182.19				177.33	
24/12/2018	182.23				178.97	
24/12/2018	182.27				171.81	
24/12/2018	182.32				170.78	
24/12/2018	182.36				171.47	
24/12/2018	182.40				168.97	
24/12/2018	182.44				168.88	
24/12/2018	182.48	1122.58	0.01	94.17	171.29	
24/12/2018	182.52				170.26	
24/12/2018	182.57				168.19	
24/12/2018	182.61				167.07	
24/12/2018	182.65				165.95	
25/12/2018	182.69				163.97	
25/12/2018	182.73				163.71	
25/12/2018	182.77				163.36	
25/12/2018	182.82	309.68	0.01	65.41	162.50	

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
	25/12/2018	182.86			158.88
	25/12/2018	182.90			156.72
	25/12/2018	182.94			152.50
	25/12/2018	182.98			151.12
	25/12/2018	183.02			149.22
	25/12/2018	183.07	232.26	0.01	68.93
	26/12/2018	184.08	193.55	0.01	39.59
	27/12/2018	185.00	193.55	0.01	48.06
	27/12/2018	185.35			105.43
	28/12/2018	186.01			96.38
	29/12/2018	187.39	177.05	0.03	86.86
	30/12/2018	188.24	157.38	0.02	88.43
	2/1/2019	191.07	157.38	0.02	86.28
	4/1/2019	193.39	154.84	0.00	100.00
	7/1/2019	196.05	116.13	0.00	115.70
	8/1/2019	197.05	96.77	0.00	119.21
	9/1/2019	198.05	77.42	0.00	121.74
	11/1/2019	200.36	77.42	0.00	124.46
	15/1/2019	204.15	77.42	0.01	125.50
	17/1/2019	206.09	38.71	0.01	125.50
	22/1/2019	211.33	1066.67	0.02	139.38
	23/1/2019	212.00	666.67	0.00	44.14
	23/1/2019	212.17	400.00	0.00	37.35
	24/1/2019	212.99	222.22	0.01	26.17
	25/1/2019	213.99	133.33	0.01	14.16
	25/1/2019	214.35	133.33	0.00	11.31
	26/1/2019	215.00	133.33	0.00	9.21
	27/1/2019	216.32	118.03	0.00	7.52

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	29/1/2019	218.05	118.03	0.00	1.94	162.38
	31/1/2019	220.18	118.03	0.00	1.54	166.88
	2/2/2019	222.13	118.03	0.00	1.54	165.32
	4/2/2019	224.31	118.03	0.00	1.45	167.86
	7/2/2019	227.00			1.45	174.11
	8/2/2019	228.03			1.21	
	9/2/2019	229.03	118.03	0.01	0.40	
	9/2/2019	229.13	112.00	0.01	2.75	168.05
	9/2/2019	229.44	104.00	0.01	3.96	153.20
	10/2/2019	230.24	104.00	0.00	15.52	140.89
	11/2/2019	231.03	104.00	0.01	35.39	113.14
	12/2/2019	232.00	103.53	0.01	74.83	82.46
	13/2/2019	232.97	103.53	0.00	109.58	62.43
	15/2/2019	235.33	96.00	0.00	157.82	6.55
	18/2/2019	238.10	96.00	0.00	175.52	1.47
	21/2/2019	241.00	96.00	0.00	179.47	1.32
	23/2/2019	243.50	96.00	0.00	195.23	1.42
	26/2/2019	246.00	96.00	0.00	195.72	1.22
	2/3/2019	250.13	1140.98	0.02	74.59	82.27
	3/3/2019	251.17	236.07	0.01	72.08	82.66
	4/3/2019	252.01	102.30	0.01	2.83	84.32
	5/3/2019	253.03	94.43	0.03	1.62	81.68
	7/3/2019	255.15	94.43	0.02	1.37	89.30
	10/3/2019	257.99	78.69	0.01	1.21	87.45
	12/3/2019	260.01	78.69	0.00	1.78	86.76
	15/3/2019	263.19	78.69	0.00	7.03	87.93
	18/3/2019	266.03	78.69	0.00	1.62	89.50
	21/3/2019	269.08	59.02	0.00	1.49	83.72

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	22/3/2019	270.00	43.28	0.00	15.63	71.21
	23/3/2019	271.39	43.28	0.00	23.48	72.26
	25/3/2019	273.02	43.28	0.00	36.28	56.34
	27/3/2019	275.01	43.28	0.00	64.47	31.58
	28/3/2019	276.38	40.00	0.00	76.56	11.81
	1/4/2019	280.05	40.00	0.00	102.94	6.56
	4/4/2019	283.05	40.00	0.00	102.16	6.12
	8/4/2019	287.15	942.86	0.06	63.21	79.53
	9/4/2019	288.03	128.57	0.03	9.97	88.88
	10/4/2019	289.31	128.57	0.01	3.78	89.47
	12/4/2019	291.52	121.90	0.01	1.53	94.06
	15/4/2019	294.19	91.43	0.00	0.97	95.56
	18/4/2019	297.01	91.43	0.00	0.16	87.96
	23/4/2019	302.03	76.19	0.00	0.32	79.98
	25/4/2019	304.15	65.08	0.00	3.10	83.87
	26/4/2019	304.99	65.08	0.00	4.26	61.90
	27/4/2019	306.34	65.08	0.00	25.05	20.72
	30/4/2019	309.51	56.95	0.00	60.96	15.04
	3/5/2019	312.45	56.95	0.00	78.41	5.43
	7/5/2019	315.99	56.95	0.00	79.53	5.18
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 68 (ถัง 3)						
	17/5/2019	326.04	1974.19	0.00	6.03	174.48
	17/5/2019	326.15	1161.29	0.00	1.13	171.90
	17/5/2019	326.31	270.97	0.00	0.97	164.74
	18/5/2019	327.01	270.97	0.00	1.13	153.62
	19/5/2019	328.06	232.26	0.00	1.13	146.03
	20/5/2019	329.00	193.55	0.00	1.93	114.14
	21/5/2019	330.01	154.84	0.00	1.93	95.34

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	23/5/2019	331.99	154.84	0.00	7.24	85.26
	27/5/2019	336.03	116.13	0.00	22.11	76.29
	30/5/2019	339.02	77.42	0.00	36.67	68.19
	3/6/2019	343.05	77.42	0.00	62.16	54.74
	7/6/2019	347.09	38.71	0.00	73.34	44.05
	10/6/2019	350.15	38.71	0.00	90.79	36.81
	14/6/2019	354.10	38.71	0.00	96.42	36.12
	17/6/2019	357.13	1300.00	0.22	2.49	123.22
	17/6/2019	357.25	1260.00	0.02		118.38
	18/6/2019	358.01	560.00	0.03	0.64	95.98
	19/6/2019	358.99	480.00	0.01	0.24	88.51
	20/6/2019	360.05	400.00	0.01	0.72	81.27
	25/6/2019	365.01	240.00	0.00	0.88	86.76
	29/6/2019	369.15	179.51	0.00	0.00	83.90
	2/7/2019	372.07	163.90	0.00	0.00	84.56
	5/7/2019	374.99	162.58	0.00	1.06	77.75
	6/7/2019	376.19	100.65	0.00	0.94	73.19
	7/7/2019	377.00	85.16	0.00	1.84	60.86
	9/7/2019	379.02	61.94	0.00	41.26	55.42
	12/7/2019	381.99	54.19	0.00	65.02	5.29
	15/7/2019	385.07	54.19	0.00	69.65	5.24
	19/7/2019	389.03	54.19	0.00	79.34	4.67
	23/7/2019	392.99	49.13	0.00	82.25	4.97
	23/7/2019	393.03	1266.14	0.02	31.51	109.97
	23/7/2019	393.28	1020.47	0.12	21.98	102.96
	24/7/2019	393.99	718.11	0.10	0.88	109.40
	25/7/2019	394.99	359.06	0.03	0.87	100.81
	27/7/2019	397.15	251.80	0.01	0.88	108.84

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	30/7/2019	400.00	251.80	0.00	0.72	117.21
	6/8/2019	407.03			1.16	117.99
	8/8/2019	409.01	141.64	0.00	1.49	115.05
	9/8/2019	410.29	39.34	0.00	8.42	92.97
	10/8/2019	411.07	39.34	0.00	25.59	85.39
	12/8/2019	413.40	39.34	0.00	41.64	74.01
	15/8/2019	416.02	38.71	0.00	49.40	76.67
	19/8/2019	419.99	38.71	0.00	55.14	69.37
	23/8/2019	423.99	38.71	0.00	56.85	62.74

ตารางที่ ข.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอติ ไนโตรท์ ไนเตรท และทีเคเอ็น ในระบบบรวมน้ำในถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ในช่วงทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคส ชุดที่ 2

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอติ (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบบร้อยละ 16						
	22/1/2019	211.33	1866.67	0.03	6.21	156.13
	23/1/2019	212.00	355.56	0.04	1.16	118.22
	23/1/2019	212.17	88.89	0.01	0.99	114.90
	24/1/2019	212.99	44.44	0.02	1.16	114.12
	25/1/2019	213.99	44.44	0.00	1.16	105.52
	25/1/2019	214.35	44.44	0.01	1.94	102.39
	26/1/2019	215.00	44.44	0.01	1.94	101.03
	27/1/2019	216.32	39.34	0.00	7.27	100.44
	29/1/2019	218.05	39.34	0.00	22.22	86.37
	31/1/2019	220.18	39.34	0.00	36.85	76.40
	2/2/2019	222.13	39.34	0.00	62.46	57.65
	4/2/2019	224.31	39.34	0.00	65.62	34.78

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนไตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	7/2/2019	227.00		115.47	21.30	
	8/2/2019	228.03		137.29		
	9/2/2019	229.03	39.34	0.00	138.26	
	9/2/2019	229.13	320.00	0.02	102.22	33.22
	9/2/2019	229.44	240.00	0.03	90.10	31.27
	10/2/2019	230.24	120.00	0.01	42.26	31.46
	11/2/2019	231.03	112.94	0.01	29.09	31.27
	12/2/2019	232.00	94.12	0.00	25.37	31.27
	13/2/2019	232.97	75.29	0.00	23.43	34.98
	15/2/2019	235.33	45.91	0.00	21.41	34.59
	18/2/2019	238.10	45.91	0.00	13.25	33.22
	21/2/2019	241.00	45.91	0.00	12.36	31.66
	23/2/2019	243.50	45.91	0.00	8.00	29.70
	26/2/2019	246.00	45.91	0.00	6.14	30.68
	2/3/2019	250.13	39.34	0.00	4.36	33.52
	3/3/2019	251.17	39.34	0.00	1.74	32.71
	4/3/2019	252.01	39.34	0.00	4.48	31.01
	5/3/2019	253.03	31.48	0.00	13.09	29.23
	7/3/2019	255.15	31.48	0.00	24.20	28.06
	10/3/2019	257.99	31.48	0.00	33.45	27.35
	12/3/2019	260.01	31.48	0.00	40.93	26.54
	15/3/2019	263.19	31.48	0.00	62.48	13.67
	18/3/2019	266.03	23.61	0.00	61.54	13.27
	21/3/2019	269.08	397.38	0.04	54.81	34.47
	22/3/2019	270.00	98.36	0.02	45.23	32.02
	23/3/2019	271.39	98.36	0.01	31.80	32.46
	25/3/2019	273.02	98.36	0.00	20.97	32.89
	27/3/2019	275.01	98.36	0.01	12.17	32.72

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนไตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	28/3/2019	276.38	80.00	0.00	8.56	33.33
	1/4/2019	280.05	80.00	0.00	8.09	36.30
	4/4/2019	283.05	80.00	0.00	7.62	38.14
	8/4/2019	287.15	77.14	0.00	7.32	35.92
	9/4/2019	288.03	77.14	0.00	15.92	27.15
	10/4/2019	289.31	77.14	0.00	26.46	11.03
	12/4/2019	291.52	76.19	0.00	36.11	1.67
	15/4/2019	294.19	76.19	0.00	44.55	1.25
	18/4/2019	297.01	76.19	0.00	48.33	0.84
	23/4/2019	302.03	76.19	0.00	52.83	0.00
	25/4/2019	304.15	447.46	0.01	37.72	31.16
	26/4/2019	304.99	130.17	0.02	2.01	27.40
	27/4/2019	306.34	122.03	0.01	1.15	28.99
	30/4/2019	309.51	113.90	0.00	1.47	27.98
	3/5/2019	312.45	65.08	0.00	1.09	27.73
	7/5/2019	316.00	56.00	0.00	4.85	27.32
	8/5/2019	317.04	56.00	0.00	7.40	10.53
	9/5/2019	318.02	56.00	0.00	18.50	0.92
	10/5/2019	319.00	56.00	0.00	21.55	0.75
	12/5/2019	321.03	56.00	0.00	27.10	0.42
	16/5/2019	325.03	56.00	0.00	29.84	0.42
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบย่อยละ 32						
	22/1/2019	211.33	1955.56	0.01	4.89	159.26
	23/1/2019	212.00	266.67	0.03	0.08	125.45
	23/1/2019	212.17	88.89	0.03	0.08	125.26
	24/1/2019	212.99	44.44	0.00	0.08	123.11
	25/1/2019	213.99	44.44	0.01	1.24	116.27
	25/1/2019	214.35	44.44	0.00	3.39	114.51

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	26/1/2019	215.00	44.44	0.00	5.25	107.67
	27/1/2019	216.32	39.34	0.00	16.00	103.57
	29/1/2019	218.05	39.34	0.00	28.44	98.29
	31/1/2019	220.18	39.34	0.00	52.36	94.97
	2/2/2019	222.13	39.34	0.00	75.56	79.73
	4/2/2019	224.31	39.34	0.00	79.92	32.83
	7/2/2019	227.00			124.53	20.52
	8/2/2019	228.03			142.79	
	9/2/2019	229.03	39.34	0.00	145.13	
	9/2/2019	229.13	640.00	0.04	86.63	70.35
	9/2/2019	229.44	360.00	0.01	76.20	61.36
	10/2/2019	230.24	160.00	0.03	13.58	60.97
	11/2/2019	231.03	131.76	0.02	1.62	59.99
	12/2/2019	232.00	112.94	0.01	1.05	54.91
	13/2/2019	232.97	94.12	0.00	0.24	68.20
	15/2/2019	235.33	62.61	0.00	0.24	73.47
	18/2/2019	238.10	62.61	0.01	0.81	70.15
	21/2/2019	241.00	54.26	0.00	1.62	63.90
	23/2/2019	243.50	54.26	0.00	0.89	63.12
	26/2/2019	246.00	54.26	0.00	0.48	69.96
	2/3/2019	250.13	39.34	0.00	0.28	68.46
	3/3/2019	251.17	39.34	0.00	2.67	57.91
	4/3/2019	252.01	39.34	0.00	3.43	55.50
	5/3/2019	253.03	39.34	0.00	9.94	52.46
	7/3/2019	255.15	31.48	0.00	27.60	51.21
	10/3/2019	257.99	31.48	0.00	38.26	50.59
	12/3/2019	260.01	31.48	0.00	44.36	48.08
	15/3/2019	263.19	31.48	0.00	73.05	3.75

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	18/3/2019	266.03	31.48	0.00	73.96	0.36
	21/3/2019	269.08	460.33	0.05	63.92	49.78
	22/3/2019	270.00	106.23	0.03	38.32	43.92
	23/3/2019	271.39	98.36	0.00	1.37	45.84
	25/3/2019	273.02	98.36	0.01	1.37	51.96
	27/3/2019	275.01	98.36	0.00	1.53	46.80
	28/3/2019	276.38	80.00	0.00	1.81	53.98
	1/4/2019	280.05	80.00	0.00	1.45	55.55
	4/4/2019	283.05	80.00	0.00	1.37	57.13
	8/4/2019	287.15	85.71	0.00	2.57	59.98
	9/4/2019	288.03	85.71	0.00	3.62	52.04
	10/4/2019	289.31	85.71	0.00	4.66	39.43
	12/4/2019	291.52	83.81	0.00	17.61	26.06
	15/4/2019	294.19	76.19	0.00	33.29	9.11
	18/4/2019	297.01	76.19	0.00	47.13	3.76
	23/4/2019	302.03	76.19	0.00	52.03	0.84
	25/4/2019	304.15	772.88	0.01	47.45	54.63
	26/4/2019	304.99	309.15	0.02	7.16	56.97
	27/4/2019	306.34	301.02	0.00	2.37	61.40
	30/4/2019	309.51	154.58	0.00	0.58	60.48
	3/5/2019	312.45	81.36	0.00	0.50	58.56
	7/5/2019	316.00	64.00	0.00	0.70	59.98
	8/5/2019	317.04	64.00	0.00	7.52	45.69
	9/5/2019	318.02	64.00	0.00	6.03	39.43
	10/5/2019	319.00	56.00	0.00	38.84	5.60
	12/5/2019	321.03	56.00	0.00	55.17	2.00
	16/5/2019	325.03	56.00	0.00	58.87	1.92
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบร้อยละ 50						

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนไตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)
22/1/2019	211.33	2000.00	0.02	2.98	148.12
23/1/2019	212.00	222.22	0.01	1.08	132.29
23/1/2019	212.17	88.89	0.02	0.08	131.31
24/1/2019	212.99	88.89	0.01	0.83	131.70
25/1/2019	213.99	44.44	0.00	1.16	130.92
25/1/2019	214.35	44.44	0.00	2.83	129.75
26/1/2019	215.00	44.44	0.00	4.28	127.99
27/1/2019	216.32	39.34	0.00	18.34	115.10
29/1/2019	218.05	39.34	0.00	32.89	114.51
31/1/2019	220.18	39.34	0.00	52.44	114.90
2/2/2019	222.13	39.34	0.00	72.73	91.65
4/2/2019	224.31	39.34	0.00	79.60	61.36
7/2/2019	227.00			153.54	44.75
8/2/2019	228.03			197.25	
9/2/2019	229.03	39.34	0.00	195.07	
9/2/2019	229.13	1080.00	0.01	74.59	99.66
9/2/2019	229.44	720.00	0.05	72.08	99.07
10/2/2019	230.24	160.00	0.00	2.83	95.16
11/2/2019	231.03	150.59	0.01	1.62	91.06
12/2/2019	232.00	103.53	0.00	1.37	87.15
13/2/2019	232.97	103.53	0.00	1.21	116.07
15/2/2019	235.33	96.00	0.01	1.78	112.95
18/2/2019	238.10	96.00	0.00	7.03	107.67
21/2/2019	241.00	96.00	0.00	1.62	105.52
23/2/2019	243.50	79.30	0.00	1.86	102.78
26/2/2019	246.00	79.30	0.03	1.78	106.89
2/3/2019	250.13	47.21	0.00	1.29	74.54
3/3/2019	251.17	47.21	0.00	8.69	59.08

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนโตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	4/3/2019	252.01	39.34	0.00	12.77	53.00
	5/3/2019	253.03	39.34	0.00	24.77	50.67
	7/3/2019	255.15	39.34	0.00	60.00	36.11
	10/3/2019	257.99	39.34	0.02	73.01	35.12
	12/3/2019	260.01	39.34	0.00	81.21	24.58
	15/3/2019	263.19	39.34	0.00	98.36	4.83
	18/3/2019	266.03	31.48	0.00	103.66	4.07
	21/3/2019	269.08	904.92	0.05	67.22	73.66
	22/3/2019	270.00	106.23	0.02	26.38	74.01
	23/3/2019	271.39	98.36	0.01	2.00	75.50
	25/3/2019	273.02	98.36	0.00	2.51	73.13
	27/3/2019	275.01	98.36	0.02	1.37	79.96
	28/3/2019	276.38	80.00	0.00	2.36	78.30
	1/4/2019	280.05	80.00	0.00	1.30	77.68
	4/4/2019	283.05	80.00	0.01	1.37	78.73
	8/4/2019	287.15	85.71	0.00	3.78	77.60
	9/4/2019	288.03	85.71	0.00	5.31	54.30
	10/4/2019	289.31	85.71	0.00	29.75	24.64
	12/4/2019	291.52	83.81	0.00	58.71	8.02
	15/4/2019	294.19	76.19	0.00	65.30	5.76
	18/4/2019	297.01	76.19	0.00	85.40	5.93
	23/4/2019	302.03	76.19	0.00	90.47	5.76
	25/4/2019	304.15	1016.95	0.06	55.01	73.51
	26/4/2019	304.99	414.92	0.03	8.20	95.81
	27/4/2019	306.34	333.56	0.02	2.61	93.98
	30/4/2019	309.51	178.98	0.00	0.20	91.55
	3/5/2019	312.45	89.49	0.00	0.18	80.95
	7/5/2019	316.00	64.00	0.00	0.34	77.60

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนไตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	8/5/2019	317.04	64.00	0.00	6.19	61.90
	9/5/2019	318.02	64.00	0.00	8.52	24.64
	10/5/2019	319.00	56.00	0.00	50.10	15.04
	12/5/2019	321.03	56.00	0.00	70.21	5.76
	16/5/2019	325.03	56.00	0.00	73.58	5.93
ชุดการทดลอง การเติมน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบย่อยละ 68 (ถึง 3)						
	17/6/2019	357.13	1900.00	0.00	1.13	196.47
	17/6/2019	357.25	1060.00	0.00		193.55
	18/6/2019	358.01	248.00	0.01	1.93	185.50
	19/6/2019	358.99	200.00	0.00	1.93	172.98
	20/6/2019	360.05	108.39	0.00	7.24	164.43
	25/6/2019	365.01	100.65	0.01	22.11	128.52
	29/6/2019	369.15	92.90	0.00	36.67	107.36
	2/7/2019	372.07	85.16	0.00	62.16	96.00
	5/7/2019	374.99	50.32	0.00	83.47	90.47
	5/7/2019	375.10	1296.77	0.02	10.47	128.13
	5/7/2019	375.16	1180.65	0.03		128.13
	6/7/2019	376.19	580.65	0.01	1.60	127.16
	7/7/2019	377.00	580.65	0.00	1.31	119.10
	9/7/2019	379.02	232.26	0.00	1.88	115.18
	12/7/2019	381.99	185.81	0.02	1.42	118.14
	15/7/2019	385.07		0.00	1.56	127.51
	19/7/2019	389.03		0.00	1.42	137.08
	23/7/2019	392.99	170.32	0.00	1.46	138.10
	23/7/2019	393.03	170.32	0.01	1.80	131.44
	23/7/2019	393.28	30.97	0.00		
	24/7/2019	393.99	30.97	0.00	2.39	119.46
	25/7/2019	394.99	15.74	0.00	12.85	96.86

วันที่	วันที่ทดลอง (วัน)	ซีโอดี (mg/L)	ไนไตรท์ (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	
	27/7/2019	397.15	15.74	0.00	48.86	93.05
	30/7/2019	400.00	15.74	0.00	58.09	83.91
	6/8/2019	407.03	15.74	0.00	63.64	87.66
	8/8/2019	409.01	15.74	0.00	63.97	88.42
	8/8/2019	409.05	1298.36	0.04	23.69	134.95
	8/8/2019	409.41	944.26	0.00	7.18	131.54
	9/8/2019	410.29	550.82	0.00	2.23	138.65
	10/8/2019	411.07	472.13	0.02	1.69	133.91
	12/8/2019	413.40	275.41	0.00	1.07	128.03
	15/8/2019	416.02	278.71	0.00	0.70	128.72
	19/8/2019	419.99	263.23	0.01	0.66	125.78
	23/8/2019	423.99	247.74	0.00	0.22	130.76
	28/8/2019	429.11	168.75	0.00	0.58	128.36
	28/8/2019	429.27	63.75	0.00	0.94	126.75
	29/8/2019	429.99	63.75	0.00	7.31	108.61
	31/8/2019	432.53	63.75	0.00	12.57	100.73
	2/9/2019	434.00	63.75	0.00	15.15	104.81

บรรณานุกรม

- Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., & Srinath, E. G. (1976). Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 48(5), 835-852.
- Bitton G. (2005). *Wastewater microbiology*. Koboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Borghei, S. M., Sharbatmaleki, M., Pourrezaie, P., & Borghei, G. (2008). Kinetics of organic removal in fixed-bed aerobic biological reactor. *Bioresource Technology*, 99(5), 1118-1124.
- Bovendeur, J. (1989). *Fixed-biofilm reactors applied to wastewater treatment and aquacultural water recirculating systems*. Wageningen Agricultural University,
- Buchanan, R. E., Gibbons, N. E., Cowan, S. T., Holt, J. G., Liston, J., Murray, R. G. E., . . . Stanier, R. Y. (1974). *Bergey's manual of determinative bacteriology*. Baltimore, Md.:. Williams & Wilkins.
- Chiu, Y.-C., & Chung M-S. (2003). Determination of optimal COD/nitrate ratio for biological denitrification. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51(1), 43-49.
- De Boer, W., Klein Gunnewiek, P. A., & Laanbroek, H. J. (1995). Ammonium-oxidation at low pH by a chemolithotrophic bacterium belonging to the genus Nitrosospira. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(2), 127-132.
- De Boer, W., & Laanbroek, H. J. (1989). Ureolytic nitrification at low pH by Nitrosospira spec. *Archives of Microbiology*, 152(2), 178-181.
- Farabegoli, G., Chiavola, A., & Rolle, E. (2009). The Biological Aerated Filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 1126-1132.
- Gay, W. S., & Knowlton, F. K. (2005). Ammonia emissions and animal agriculture. Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/50720/442-110.pdf?sequence=1> [2017, May 23]. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/50720/442->

[110.pdf?sequence=1](#) [2017, May 23]

- Gomez, M. A., Lopez, J. G., & Garcia, E. H. (2000). Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter. *Journal of Hazardous Materials*, 80(1-3), 69-80.
- Hamlin, H. J., Michaels, J. T., Beaulaton, C. M., Graham, W. F., Dutt, W., Steinbach, P., . . . Main, K. L. (2008). Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 38(2), 79-92.
- Hanada, A., Kurogi, T., Giang, N. M., Yamada, T., Kamimoto, Y., Kiso, Y., & Hiraishi, A. (2014). Bacteria of the Candidate Phylum TM7 are Prevalent in Acidophilic Nitrifying Sequencing-Batch Reactors. *Microbes Environ.*, 29(4), 353-362.
- Hayatsu, M. (1993). The lowest limit of pH for nitrification in tea soil and isolation of an acidophilic ammonia oxidizing bacterium. *Soil Science and Plant Nutrition*, 39(2), 219-226.
- Kapdan, I. K. a. E., B.,. (2007). Anaerobic treatment of saline wastewater by Halanaerobium lacusrosei. *Process Biochemistry*, 42(3), 449-453.
- Lefebvre, O., Vasudevan, N., Torrijos, M., Thanasekaran, K., & Moletta, R. (2006). Anaerobic digestion of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment. . *WATER RESEARCH*, 40(7), 1492-1500.
- Liu, Y. (2006). A simple thermodynamic approach for derivation of a general Monod equation for microbial growth. *Biochemical Engineering Journal*, 31(1), 102-105.
- Murray, M. M. (1925). The estimation of ammonia and urea in blood and urine. *Biochemical Journal*, 19(2), 294.
- Nikolaos, G., Maria, G., & Evan, D. (2006). Sequential anaerobic/aerobic biological treatment of olive mill wastewater and municipal wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81, 1563–1569.
- O'Farrell, T. P., Frauson, F. P., Cassel, A. F., & Bishop, D. F. (1972). Nitrogen Removal by Ammonia Stripping. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 44(8), 1527-1535.
- Palmquist, H., & Hanæus, J. (2005). Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater from ordinary Swedish households. *Science of The Total*

- Environment*, 348(1), 151-163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.052>
- Rezaee, A., Godini, H., Dehestani, S., Yazdanbakhsh, A. R., Mosavi, G., & Kazemnejad, A. (2008). Biological denitrification by *Pseudomonas stutzeri* immobilized on microbial cellulose. . *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24, 2397-2402.
- Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N., & Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. . *WATER RESEARCH*, 42, 4215-4232.
- Tanaka, S., & Suzuki, A. (2002). Removal of organics and nitrogen in sewage treatment using anoxic-aerobic recirculated filter. *Water Science and Technology*, 46, 309-314.
- Tarre, S., & Green, M. (2004.). High-Rate Nitrification at Low pH in Suspended- and Attached-Biomass Reactors. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(11), 6481-6487.
- Tchobanoglous G., Burton L. F., & Stensel H. D. (2003). *Wastewater engineering : treatment and reuse*: Boston : McGraw-Hill.
- U.S. EPA. (1975). Process Design Manual for Nitrogen Control. Retrieved from <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED162870.pdf> [2017, August 25].
<http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED162870.pdf> [2017, August 25]
- Van Rijn, J., Tal, Y., & Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering*, 34(364-376).
- Water Environment Federation. (2008). *Operation of municipal wastewater treatment plants*: New York : McGraw-Hill.
- Zaoyan, Y., Ke, S., Guangliang, S., Fan, Y., Jinshan, D., & Huanian, M. (1992). Anaerobic–Aerobic Treatment of a Dye Wastewater by Combination of RBC with Activated Sludge *Water Science and Technology*, 26, 9-11.
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (2545). น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2545). ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ: กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม: กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์, 2537.

- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2545). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ: กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธีระ เกรอต. (2539). วิศวกรรมน้ำเสีย:การบำบัดทางชีวภาพ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บัญชา บุญอนันต์วงศ์. (2554). การส่งเสริมการย่อยสลายของสรีรแอกทีฟไดอะโซ โดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. (มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- พิมพ์พิสุทธิ์ หงส์ชยางกูร. (2561). ผลของความเข้มข้นซีโอติและพื้นที่ผิวตัวกลางต่อระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ. (มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- มันสิน ตันจุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม: [กรุงเทพฯ] : บริษัทแซน. อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. (2551). คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ: กรุงเทพฯ : บริษัทแซน.อี 68 แล็บ.
- มันสิน ตันจุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. (2539). การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- มันสิน ตันจุลเวศม์ และมันรัช ตันจุลเวศม์. (2551). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย: กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รวินดา จุ้ยสกุล และศรัณย์ เตชะเสน. (2559). ผลของความเข้มข้นยูเรียต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโพรยกรอง. (มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- วิฐ นันทิธัญญธาดา. (2546). การกำจัดสารประกอบไนเตรทในตู้เลี้ยงปลาน้ำจืดระบบปิดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. (มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
- วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์. (2556). ชีววิทยาสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริพร คุณาวิชา. (2539). การศึกษาการกำจัดไนเตรทจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานวันเส้นโดยวิธีออกซิเจน-แอนแอโรบิกที่มีตัวกลาง. (มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
- สุนทรีย์ อยู่สถาน. (2550). ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการลดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน. (มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- สุบัณฑิต นิมรัตน์. (2548). จุลชีววิทยาของน้ำเสีย: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชุตานภา มงคลอุปถัมภ์
วัน เดือน ปี เกิด	26 มิถุนายน 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตรและ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ที่อยู่ปัจจุบัน	138/171 ซอยรามคำแหง 50 ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY