



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียที่มีธาตุไนโตรเจนสูงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนของกระบวนการอนาไมออกซ์

The Treatment of High Nitrogen Wastewater by Partial Nitrification Process of Anammox Process

นามผู้วิจัย นางสาวศุภรชดี ศิริยานนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Eng. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ชาติ เขียมไชยศรี, D.Eng. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียที่มีธาตุไนโตรเจนสูงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน  
ของกระบวนการอนาโมกซ์

The Treatment of High Nitrogen Wastewater by Partial Nitrification Process  
of Anammox Process

โดย

นางสาวศุทธวี ศิริยานนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ศุภชวตี ศิริยานนท์ 2554: การบำบัดน้ำเสียที่มีธาตุไนโตรเจนสูงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนของกระบวนการอนาโมกซ์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng. 65 หน้า

การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบดั้งเดิมใช้การเติมอากาศในกระบวนการไนตริฟิเคชันแล้วตามด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่รู้จักโดยทั่วไป ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนที่เป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ ภายใต้สภาวะแอโรบิกโดยแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย เรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการชารอน (SHARON: Single Reactor System for High Ammonium Removal Over Nitrite) ตามด้วยกระบวนการอนาโมกซ์ (Anammox: Anaerobic Ammonium Oxidation) เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยแอมโมเนียถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการไนตริฟิเคชันบางส่วน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการปริมาตร 8 ลิตร ควบคุมตัวแปรต่างๆ คือ อัตราการระบรทุกแอมโมเนียและอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ โดยการทดลองได้ควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล จากผลการทดลองนี้พบว่าที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ 0.28, 0.83, 1.67 และ 2.78 กก.N/กก.MVLSS-วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 52, 53, 51 และ 53 ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะ 0.15, 0.49, 0.94 และ 1.66 กก.-N/กก.MLVSS-วัน ตามลำดับ มีอัตราส่วนไนไตรท์ที่เกิดขึ้นต่อแอมโมเนียที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.80, 0.98, 1.21 และ 1.19 ตามลำดับ

---

ลายมือชื่อนิสิต

---

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Suttawadee Siriyanon 2011: The Treatment of High Nitrogen Wastewater by Partial Nitrification Process of Anammox Process. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Mongkol Damrongsri, Dr.Ing 65 pages.

The conventional biological nitrogen removal process to treat nitrogen from wastewater is nitrification process by aeration and follows up with denitrification process. These processes are very well known and worldwide. Nowadays the development of partial nitrification process change ammonia to nitrite under aerobic condition by ammonium oxidation which called this process as: Single Reactor System for High Ammonium Removal Over Nitrite (SHARON) and follow up by Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) process. This Anammox process is able to treat nitrogen in wastewater by changing nitrite to nitrogen gas under anaerobic condition.

In this study the lab scale reactor of volume 8 L was established in order to test for the partial nitrification process. The variable parameters to control the study were ammonia loading rate and food to microorganism ratio, F/M. The dissolved oxygen in order to control partial nitrification process was control at 0.3-0.7 mg/L. The result of the experiments found that, at ammonia loading rate of 0.05, 0.15, 0.30 and 0.50 kg-N/m<sup>3</sup>-day and F/M ratio of 0.28, 0.83, 1.67 and 2.78 kg.N/kg.MVLSS-day, the ammonia removal efficiencies were 52, 53, 51 and 53 percent. Therefore, the specific ammonia utilization rates were 0.15, 0.49, 0.94, and 1.66 kg-N/kgMLVSS-day, respectively. The ratios of nitrite produced to ammonia utilization were equal to 0.80, 0.98, 1.21 and 1.19 respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล ดำรงค์ศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมราช วันทวินที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคำแนะนำในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ความรู้อันมีค่าแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน ในทุกความช่วยเหลือ น้ำใจ และมิตรภาพ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย และญาติ ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี

ศุทธวดี ศิริยานนท์

มกราคม 2554

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายและสัญลักษณ์คำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	28
สรุปและข้อเสนอแนะ	46
สรุป	46
ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	48
ภาคผนวก	54
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	65

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงชนิดและปริมาณสารที่ยับยั้ง anaerobic ammonium oxidizing activity	12
2	แสดงชนิดของถังปฏิกรณ์ และอัตราการกำจัด	13
3	เปรียบเทียบความต้องการออกซิเจนและค่าความเป็นด่างสำหรับการกำจัดไนโตรเจนในกระบวนการต่าง ๆ	13
4	การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบของกระบวนการที่ได้รับจากการพัฒนาขึ้นมาใหม่ในการกำจัดไนโตรเจนกับกระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน	15
5	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	21
6	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	26
7	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์	26
8	แผนดำเนินการในงานวิจัย	27
9	ความเข้มข้นของไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนที่สภาวะคงตัว ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนียต่างๆ	36
<b>ตารางผนวกที่</b>		
1	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลา ค่าพีเอชในการเตรียมแบคทีเรียไนตริไฟอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์	55
2	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลา ค่าพีเอชในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	56
3	ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียไนตริไฟอิงด้วยการกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์ของน้ำเข้าและออกจากระบบ	57

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
4	พีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนในการบำบัด สารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	58
5	ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05 กก.-N/ม. <sup>3</sup> -วัน	59
6	ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.15 กก.-N/ม. <sup>3</sup> -วัน	61
7	ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.30 กก.-N/ม. <sup>3</sup> -วัน	62
8	ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.50 กก.-N/ม. <sup>3</sup> -วัน	63
9	ค่าของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ที่อัตราภาระบรรทุก แอมโมเนียต่างๆ	64

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการในตรีฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน	5
2	รูปแบบทั่วไปของกระบวนการในตรีฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน	7
3	กระบวนการชารอนตามด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันและอนาโม็อกซ์	8
4	อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) และแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (NOB) ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลา	10
5	การรวมกระบวนการชารอนและอนาโม็อกซ์	14
6	ถึงปฏิกิริยาในกระบวนการในตรีฟิเคชันบางส่วน	20
7	การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	23
8	ขั้นตอนการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	23
9	กระบวนการในตรีฟิเคชันบางส่วน	24
10	ขั้นตอนการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในกระบวนการในตรีฟิเคชันบางส่วน	25
11	ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียในตรีฟิเคชันด้วยกระบวนการในตรีฟิเคชันแบบเบทซ์	29
12	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลาในการเตรียมแบคทีเรียในตรีฟิเคชันด้วยกระบวนการในตรีฟิเคชันแบบเบทซ์	30
13	ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในการเตรียมแบคทีเรียในตรีฟิเคชันด้วยกระบวนการในตรีฟิเคชันแบบเบทซ์	31
14	พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบในการเตรียมแบคทีเรียในตรีฟิเคชันด้วยกระบวนการในตรีฟิเคชันแบบเบทซ์	31
15	ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	32
16	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลาในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	33

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	34
18	พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)	35
19	ค่าพีเอชของน้ำเข้าและออกที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ที่สภาวะคงตัวในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	37
20	ค่าความเป็นด่างในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ที่สภาวะคงตัว ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	38
21	ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้า ที่สภาวะคงตัว ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	38
22	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (SS) ของน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	40
23	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	41
24	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ที่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	42
25	อัตราการกำจัดแอมโมเนีย และอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะ ที่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน	43
26	การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ในไนเตรท์ และไนเตรตในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนตลอดการทดลอง	44

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มก.	=	มิลลิกรัม
ก.	=	กรัม
กก.	=	กิโลกรัม
ล.	=	ลิตร
ม. <sup>3</sup>	=	ลูกบาศก์เมตร
ชม.	=	ชั่วโมง
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
SHARON	=	Single reactor system for <u>H</u> igh <u>A</u> mmonium <u>R</u> emoval <u>O</u> ver <u>N</u> itrite
Anammox	=	<u>A</u> naerobic <u>A</u> mmonium <u>O</u> xidation
HRT	=	Hydraulic Retention Time
DO	=	Dissolved Oxygen
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	=	Ammonia
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	=	Nitrite
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	=	Nitrate
AOB	=	Ammonium oxidizing bacteria
NOB	=	Nitrite oxidizing bacteria
MLSS	=	Mixed liquor suspended solids
MLVSS	=	Mixed liquor volatile suspended solids
Alk	=	Alkalinity

# การบำบัดน้ำเสียที่มีธาตุไนโตรเจนสูงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนของ กระบวนการอนาม็อกซ์

## The Treatment of High Nitrogen Wastewater by Partial Nitrification Process of Anammox Process

### คำนำ

ปัญหาเรื่องการบำบัดน้ำเสีย เป็นปัญหาที่รัฐบาลให้ความสนใจในการควบคุมดูแล ให้ผู้ประกอบการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดปัญหามลพิษในแหล่งรับน้ำ สำหรับน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ไนโตรเจนสูง เมื่อบำบัดแล้วยังคงมีธาตุอาหารประเภทไนเตรตไนโตรเจนหลงเหลืออยู่มาก ซึ่งมีความจำเป็นต้องศึกษาวิจัยและหาวิธีการบำบัดที่เหมาะสม และประหยัดค่าใช้จ่าย

ไนโตรเจนที่พบได้ทั่วไปในน้ำเสียและสิ่งแวดล้อมมีหลายรูป ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำ แอมโมเนียสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) แอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) สามารถลดปริมาณออกซิเจนในน้ำ ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ทำให้เกิดปัญหา Algae Bloom และสามารถปนเปื้อนในน้ำดื่ม น้ำใช้ เกิดการเสี่ยงที่ก่อให้เกิดโรค Methemoglobinemia (Blue Baby Syndrome) ในเด็กทารก และเกิดความเสี่ยงในการก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง Nitrosamines ปริมาณไนเตรตสามารถเคลื่อนย้ายไปปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดิน ถึงแม้ว่าแบคทีเรียจะสามารถลดปริมาณไนเตรต แต่ปัญหาใหญ่ก็คือ ในดินไม่มีจำนวนปริมาณคาร์บอนอย่างเพียงพอ (พงศศักดิ์, 2549)

กระบวนการบำบัดไนโตรเจนที่ใช้กันทั่วไป คือ กระบวนการทางชีววิทยาไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน อย่างไรก็ตามในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง ถ้ามีแอมโมเนียในปริมาณสูงแต่มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนต่ำ เมื่อนำมาบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเข้าไปซึ่งกระบวนการนี้ต้องการออกซิเจนและสารอินทรีย์คาร์บอนปริมาณมาก โดยในกระบวนการไนตริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนีย 1 กรัม ต้องใช้ออกซิเจนประมาณ 4.57

กรัม และในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันสามารถใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีอัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีทั้งหมดต่อไนโตรเจนรูปไนเตรต อยู่ระหว่าง 3-7 เป็นอย่างน้อย ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงขึ้น (พงศศักดิ์ และคณะ, 2553)

ในช่วงปลายคริสต์ศักราช 1990 Hellinga *et al.* (1998) ได้รายงานการค้นพบการกำจัดแอมโมเนียความเข้มข้นสูงในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพและให้ชื่อระบบว่า Single reactor system for High Ammonium Removal Over Nitrite (ซารอน) กระบวนการนี้เป็นการไนตริฟิเคชันบางส่วน ที่ยังคงต้องเติมอากาศและแหล่งคาร์บอนแต่การเติมอากาศและแหล่งคาร์บอนลดลง 20%, 40% ตามลำดับเมื่อเทียบกับระบบไนตริฟิเคชันและระบบดีไนตริฟิเคชันแบบทั่วไป โดย Ruiz *et al.* (2006) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ พบว่าที่ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 0.5 มก./ล. มีแอมโมเนียคงเหลือประมาณ 50% มีไนโตรเจนแต่ไม่มีไนเตรตในระบบ

ในการวิจัยครั้งนี้สนใจศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน ซึ่งเป็นกระบวนการเบื้องต้นของกระบวนการอนาโมกซ์บำบัดไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ ที่อัตราการบรรทุกแอมโมเนีย และอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ต่างๆ โดยควบคุมค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล.

## วัตถุประสงค์

1. การเลี้ยงแบคทีเรียในτριไฟอิงโดยใช้ตะกอนจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง เมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย 0.3-0.7 มก./ล.
2. ศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการในตรีฟิชั่นบางส่วน ซึ่งเป็นกระบวนการเบื้องต้นของกระบวนการนํ้าออกซ์บํ้าบัดในโตรเจนจากนํ้าเสียสังเคราะห์ ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียและอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ต่างๆ โดยควบคุมค่าออกซิเจนละลายนํ้าที่ 0.3-0.7 มก./ล. ตลอดจนการทดลอง

## ขอบเขตของงานวิจัย

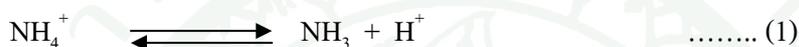
1. ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยถังปฏิกรณ์ระดับถังปฏิบัติการ (Lab scale)
2. ใช้นํ้าเสียสังเคราะห์ในการทดลอง
3. เตินระบบเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous - flow) ควบคุมค่าออกซิเจนละลายนํ้าที่ค่า 0.3-0.7 มก./ล. โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอน ตามอัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย คือ 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.N/ม.<sup>3</sup>-วัน และตามอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ คือ 0.28, 0.83, 1.67 และ 2.78 กก.N/กก.MLVSS-วัน

## การตรวจเอกสาร

### 1. ผลกระทบของสารประกอบไนโตรเจนต่อสิ่งแวดล้อม

พิษต่อสิ่งมีชีวิต

โดยปกติแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) เมื่อระดับพีเอชเท่ากับ 7 ไม่แสดงความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ถ้าระดับพีเอชเป็นด่าง คือ พีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 8 เปลี่ยนสภาพ แอมโมเนียมไอออนจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นแอมโมเนียอิสระ ( $\text{NH}_3$ ) ดังสมการที่ 1 ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้มาก



ปกติแอมโมเนียอิสระ 0.20 มก./ล. หรือมากกว่าแสดงความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ความเป็นพิษที่เกิดจากแอมโมเนียไนโตรเจนมีมากขึ้นตามระดับพีเอชที่สูงขึ้น นอกจากนี้ ไนเตรตในลำน้ำสามารถแทรกตัวไปสู่บ่อบาดาลใกล้เคียง ซึ่งหากชุมชนนั้นนำมาใช้บริโภค ก็เกิดปัญหาโรคเด็กตัวเขียว หรือ blue baby ซึ่งเกิดจากการที่เด็กอ่อนบริโภคน้ำที่มีไนเตรตสูงเกินไป (ธงชัย, 2545)

ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ

เนื่องจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียแอมโมเนีย 1 กรัม ไปเป็นไนไตรท์โดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ต้องใช้ออกซิเจนประมาณ 4.57 กรัม ส่งผลให้ออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (พงศศักดิ์ และคณะ, 2553)

ยูโทรฟิเคชัน

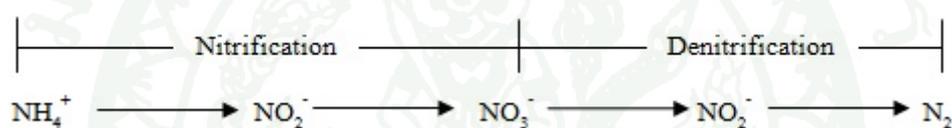
สารประกอบไนโตรเจนถูกจัดเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญตัวหนึ่งของการเกิดยูโทรฟิเคชัน เช่นเดียวกับฟอสฟอรัส โดยเฉพาะไนเตรตเมื่อถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดการเจริญเติบโตเกินขีดของสาหร่าย (Algae Bloom) เป็นปัญหาต่อการสัญจรทางน้ำ และการนำน้ำไปใช้ แม้ในเวลากลางวันสาหร่ายสังเคราะห์แสงและเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ แต่ในเวลากลางคืนสาหร่ายหายใจและอาจใช้ออกซิเจนในน้ำจนหมด ทำให้สัตว์น้ำขาดออกซิเจนและตายได้ นอกจากนี้สาหร่ายที่ตาย

และทับถมที่พื้นเบื้องล่างเกิดการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้น้ำเน่าเหม็นในที่สุด (ปราณี, 2548)

## 2. กระบวนการทางชีววิทยาในการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนแบบดั้งเดิม

กระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน

การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีววิทยาเป็นวิธีการที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดทางกายภาพและเคมี โดยกระบวนการทางชีววิทยานี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก หนึ่งคือกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และสองคือกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งสามารถและกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี แสดงในภาพที่ 1



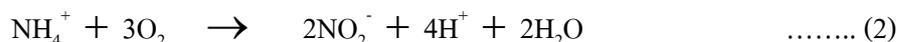
ภาพที่ 1 กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน

กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification Process)

เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียนำแอมโมเนียส่วนหนึ่งไปสร้างเซลล์โปรตีน และนำแอมโมเนียส่วนที่เหลือไปย่อยสลายในสภาวะที่มีออกซิเจน เป็นผลให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง

กระบวนการไนตริฟิเคชัน มี 2 ขั้นตอน โดยแบคทีเรียชนิดออกซิโทโทรฟสองกลุ่ม คือ ขั้นที่ 1 แอมโมเนียมถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรต์ดังสมการที่ 2 เรียกแบคทีเรียกลุ่มนี้ว่า Ammonium oxidizing bacteria แบคทีเรียส่วนใหญ่ได้แก่กลุ่ม ไนโตรโซโมนาส ไนโตรสไพรา ไนโตรสคอคคัส ไนโตรสโอบัส เป็นต้น ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ไนไตรต์ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรตดังสมการที่ 3 เรียกแบคทีเรียกลุ่มนี้ว่า Nitrite oxidizing bacteria (NOB) โดยแบคทีเรียชนิดออกซิโทโทรฟได้แก่ ไนโตรแบคเตอร์ ไนโตรสไพรา ไนโตรคอคคัส เป็นต้น (ธงชัย, 2545) และสมการที่ 4 เป็นสมการรวม ที่แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มออกซิโทโทรปที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์คาร์บอนในการสังเคราะห์เซลล์

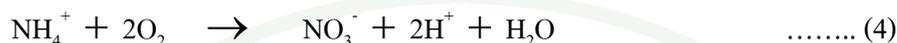
Ammonium oxidizer



Nitrite oxidizer



สมการรวม

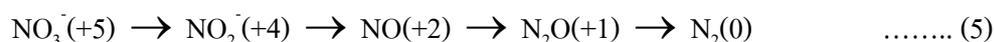


จากสมการที่ 4 เห็นว่า 1 โมลของแอมโมเนียทำปฏิกิริยากับ 2 โมลของออกซิเจน (64 กรัม ออกซิเจน/18 กรัมแอมโมเนีย เท่ากับ 64 กรัมออกซิเจน/ 14 กรัมไนโตรเจน หรือเท่ากับ 4.57 กรัม ออกซิเจน/1 กรัมไนโตรเจน)

ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม ระบบต้องมีพีเอชอยู่ที่ 7.5 ถึง 8.0 เนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชันมีการใช้สภาพต่างทำให้พีเอชในระบบลดลง ในการดูแลระบบต้องหมั่นตรวจสอบสภาพความเป็นด่างในน้ำ เพื่อป้องกันการลดลงของพีเอช และอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30-36 °C ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับหรือมากกว่า 1.0 มก./ล. ก็เพียงพอต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันแล้ว แต่ถ้าค่าออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 0.2-0.3 มก./ล. อาจทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันขึ้นพร้อมๆ กัน (ธงชัย, 2545)

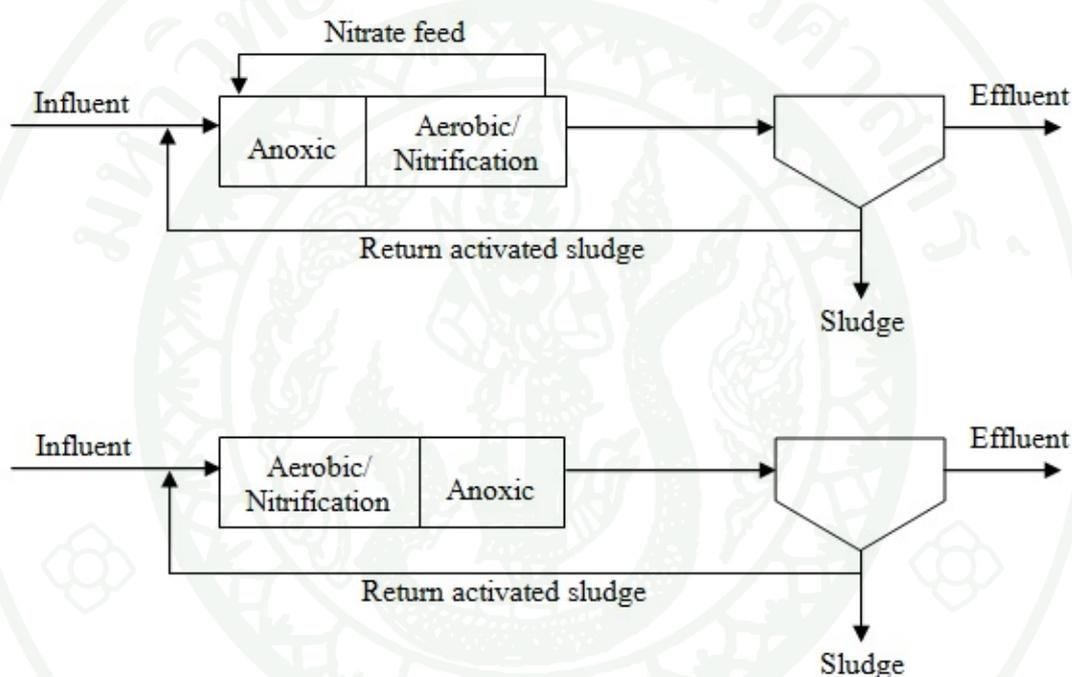
#### กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification Process)

เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในน้ำเสีย โดยใช้ไนเตรตหรือไนไตรท์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือแอน็อกซิก (anoxic) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบ จากสมการที่ 5 เห็นว่าต้องมีการใช้อินทรีย์คาร์บอนในการลดรูปของไนโตรเจนทุกขั้นตอน ตั้งแต่ไนเตรตไปเป็นไนไตรท์ ก๊าซไนตริกออกไซด์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ไปจนถึงก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมาก จึงถูกไล่ออกจากมวลของน้ำได้ง่าย กลุ่มแบคทีเรียในกระบวนการนี้ ได้แก่ *ชูโคโมนาส บาซิลลัส สปีริลัม ไฮไฟไมโครเบียม ไชโอบาซิลลัส* เป็นต้น (ธงชัย, 2545)



โดยกระบวนการนี้เกิดได้ดีต้องมีสารอินทรีย์คาร์บอนในปริมาณที่มากพอ อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน เช่น ใช้น้ำเสียชุมชน เมธานอล และอะซิเตท เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ผลิตความเป็นด่างออกมา เท่ากับ 3.57 กรัมแคลเซียมคาร์บอเนต/กรัมไนเตรตในโตรเจนที่ถูกรีดิวซ์ไป ทำให้ระดับพีเอชค่อนข้างคงที่ รูปแบบทั่วไปของกระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน

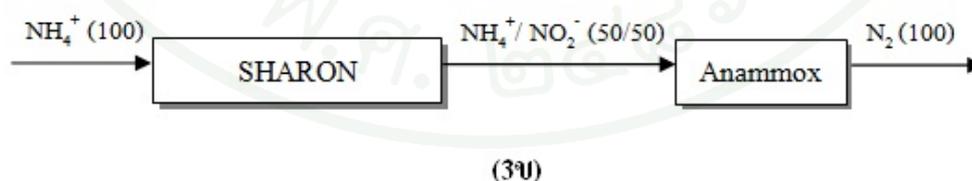
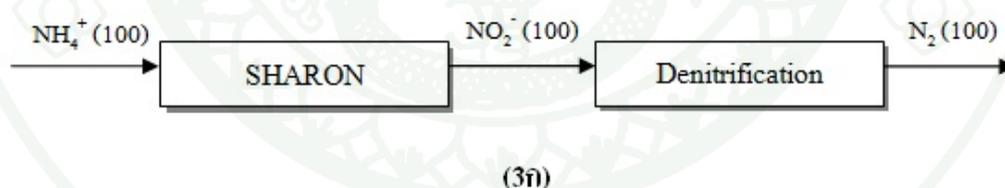
ที่มา : Tchobanoglous *et al.* (2003)

### 3. การกำจัดไนโตรเจนรูปแบบใหม่ (Innovative Processes for Nitrogen Removal)

#### 3.1 กระบวนการชารอน (Single Reactor System for High Ammonium Removal Over Nitrite : SHARON)

เป็นกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (Partial Nitrification) ที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ โดยยับยั้งปฏิกิริยาไม่ให้ไนไตรท์เปลี่ยนไปเป็นไนเตรต วิธีการยับยั้งไม่ให้ไนไตรท์เปลี่ยนไปเป็นไนเตรตทำได้โดยการกำหนดให้ค่า ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) สูงกว่าอัตราการเติบโตของแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ (Nitrite oxidizing bacteria; NOB) แต่ต่ำกว่าอัตราการเติบโตของแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonium oxidizing bacteria; AOB) ระยะเวลาพักน้ำโดยประมาณเท่ากับ 1 วัน (Schmidt *et al.*, 2003) ควรเดินระบบที่อุณหภูมิสูงกว่า 25 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียโดดเด่น ซึ่งในสถานะเช่นนี้ไนไตรท์เป็นผลิตภัณฑ์ที่คงตัวของกระบวนการไนตริฟิเคชัน

กระบวนการชารอนนำมาพร้อมกับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ทำให้วิธีการนี้ประหยัดการเติมอากาศและใช้สารอินทรีย์คาร์บอนน้อยกว่ากระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชันทั่วไป ดังภาพที่ 3ก หรือการนำมาพร้อมกับกระบวนการอนาโมกซ์ดังภาพที่ 3ข



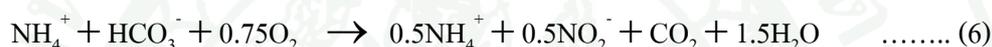
ภาพที่ 3 กระบวนการชารอนตามด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันและอนาโมกซ์

ที่มา : van Dongen *et al.* (2001)

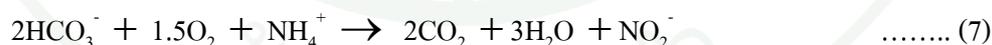
การใช้เพียงชั้นตอนไนตริฟิเคชันบางส่วนที่เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ ช่วยลดการใช้ ออกซิเจนได้ถึงร้อยละ 25 เทียบกับกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์

van Dongen *et al.* (2001) ในปี 1995 ได้มีการค้นคว้าทดลองจำนวนมากเพื่อหาวิธีบำบัด ไนโตรเจนที่มีความเข้มข้นสูงจากน้ำเสีย กระบวนการชารอนเป็นกระบวนการทางชีววิทยาที่ เกิดขึ้นเมื่อมีการเติมอากาศอย่างเป็นจังหวะในปฏิริยาแบบกวนสมบูรณ์ที่มีน้ำไหลเข้าอย่าง ต่อเนื่อง

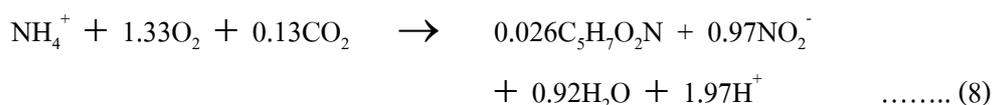
ในกระบวนการชารอนภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ ใช้แอมโมเนียเพียง 50% ใน การเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์ ดังสมการที่ 6 (van Dongen *et al.*, 2001)



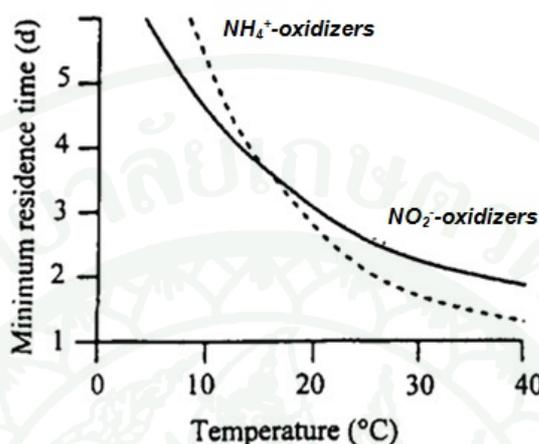
กระบวนการไนตริฟิเคชันในชั้นไนตริฟิเคชันบางส่วนสามารถผลิตกรดขึ้นมาทำให้ ระบบมีค่าพีเอชลดลง จำเป็นที่ต้องมีการเติมไบคาร์บอเนตเข้าไปเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอน และบัฟเฟอร์ไปสะเทินกรดที่เกิดขึ้นบางส่วน อธิบายได้ดังสมการที่ 7 เมื่อแอมโมเนียเปลี่ยนไป เป็นไนไตรท์มากขึ้น ค่าพีเอชของระบบลดลงจนถึง 6.5 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ปฏิริยาไนตริฟิเคชัน บางส่วนไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้ เพราะในสภาวะกรดแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ปรากฏอยู่ในรูป ของ  $\text{NH}_4^+$  แต่ ซึ่งในธรรมชาติแบคทีเรียใช้สารอาหารในรูปของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) (van Dongen *et al.*, 2001)



Chen *et al.* (2010) พบว่าวิธีที่ทำให้เกิดกิจกรรมไนตริไฟเออร์สูง (High activity nitrifiers; HANs) สำหรับเป็นเชื้อตั้งต้นในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน ดังสมการที่ 8



Hellinga *et al.* (1998) กล่าวว่าไว้ว่าสิ่งสำคัญในกระบวนการชารอนคืออุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) เจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ (NOB) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) และแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ (NOB) ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลาพักน้ำ

ที่มา : Mulder *et al.* (1997)

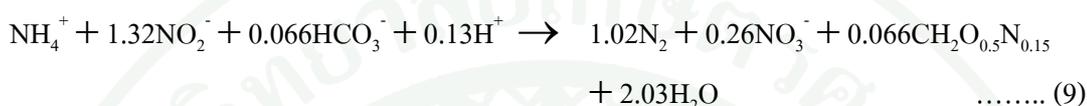
ฉะนั้นเพื่อให้ได้กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนที่คงตัว ต้องทำการควบคุมตัวแปรต่างๆ คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ พีเอช ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) โดยกระบวนการชารอนต้องการพลังงานจากการเติมอากาศน้อยกว่าร้อยละ 25 และต้องการสารอินทรีย์น้อยกว่าร้อยละ 40 เปรียบเทียบกับกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันแบบเดิม (Hellinga *et al.*, 1998)

### 3.2 กระบวนการอนาม็อกซ์ (Anaerobic Ammonium Oxidation : Anammox)

เป็นกระบวนการทางชีวภาพแบบใหม่ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสีย โดยเปลี่ยนแอมโมเนียมให้เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนในสภาวะแอนแอโรบิก โดยใช้ไนไตรท์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (van Dongen *et al.*, 2001)

ค้นพบครั้งแรกที่ denitrification pilot plant ของระบบบำบัดน้ำเสียที่ Gist-Brocades (Delft, The Netherlands) ซึ่งสังเกตพบว่าแอมโมเนียมในน้ำออกสู่ออกไปพร้อมกับไนเตรต และเกิดก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (Jetten *et al.*, 1999)

Strous *et al.* (1998) แบคทีเรียในระบบเป็นพวกออกโตโทรฟ ที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการที่ 9



จากสมการที่ 9 เห็นว่า 1 โมลของแอมโมเนียมทำปฏิกิริยาพอดีกับ 1.32 โมลของไนเตรต และผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซไนโตรเจนและไนเตรตเพียงเล็กน้อย เป็นระบบที่ต้องทำไนตริฟิเคชันบางส่วน (Partial nitrification) มาก่อน โดยเปลี่ยนแอมโมเนียม 1 ส่วนให้เป็นไนเตรตครึ่งส่วน และใช้แอมโมเนียมที่เหลือครึ่งส่วนนั้นทำปฏิกิริยากับไนเตรตครึ่งส่วนที่ได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจากเมื่อแอมโมเนียมถูกออกซิไดซ์ไปแล้วร้อยละ 50 ทำให้พีเอชลดลงเป็น 6.7 สภาวะเช่นนี้สามารถป้องกันการออกซิเดชันแอมโมเนียมส่วนที่เหลืออยู่ได้ แต่ต้องจำกัดปริมาณออกซิเจนที่ให้กับถังไนตริฟิเคชัน (Strous *et al.*, 1997)

แบคทีเรียในกระบวนการอนาม็อกซ์จัดอยู่ในกลุ่ม Planctomycete bacteria มี 2 ชนิด ได้แก่ *Candidatus Brocadia anammoxidans* พบที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ (Jetten *et al.*, 2001) และ *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* พบในระบบบำบัดน้ำเสียหลายแห่งในประเทศเยอรมันและสวิตเซอร์แลนด์ (Egli *et al.*, 2001)

#### ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

- ก. พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.7-8.3 (เหมาะสมที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 8)
- ข. อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20-43 °C (เหมาะสมที่สุดที่ 37 °C)
- ค. เชื้อแบคทีเรียอนาม็อกซ์ มีความอ่อนไหวต่อปริมาณออกซิเจน โดย Strous *et al.* (1997) พบว่าเมื่อมีปริมาณออกซิเจนในอากาศอยู่ร้อยละ 2, 1 และ 0.5 ไม่พบการออกซิไดซ์แอมโมเนียมเกิดขึ้น
- ง. สารที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาของเชื้อแบคทีเรียได้แก่ ออกซิเจน ฟอสฟอรัส ไนเตรต ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงชนิดและปริมาณสารที่ยับยั้ง anaerobic ammonium oxidizing activity

สารยับยั้ง (inhibitor)	ความเข้มข้น	อ้างอิง
Oxygen	0-0.2 มิลลิโมล	Jetten et al., 1999
phosphate	> 2 มิลลิโมล	Jetten et al., 1999
phosphate	> 20 มิลลิโมล	Egli et al., 2001
phosphate	> 60 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร <sup>a</sup>	Schmidt et al., 2003
phosphate	> 600 มิลลิโมล <sup>b</sup>	Schmidt et al., 2003
nitrite	> 0.1 กรัมในโตรเจนต่อลิตร	Strous et al., 1999
nitrite	> 13 มิลลิโมล	Egli et al., 2001
nitrite	> 20 มิลลิโมล	Jetten et al., 1999
nitrite	70 มิลลิกรัมในโตรเจนต่อลิตร <sup>a</sup>	Schmidt et al., 2003
nitrite	180 มิลลิกรัมในโตรเจนต่อลิตร <sup>b</sup>	Schmidt et al., 2003

หมายเหตุ <sup>a</sup> สำหรับ *Candidatus Brocadia anammoxidans*

<sup>b</sup> สำหรับ *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*

ที่มา : ศิริพร (2551)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่คือ ก๊าซไนโตรเจน และไนเตรตในโตรเจนในปริมาณเล็กน้อย และเมื่อวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดขึ้นโดยละเอียดยังพบว่ามีก๊าซอื่นๆ ประกอบด้วย N<sub>2</sub>O (nitrous oxide), NO (nitric oxide), NO<sub>2</sub> (nitric dioxide) และปริมาณที่เหลือคือก๊าซไนโตรเจน (Strous *et al.*, 1998)

กระบวนการอนาโมอกซ์ เมื่อนำมาใช้กำจัดแอมโมเนียมสามารถลดค่าดำเนินการได้ถึง 90% (Jetten *et al.*, 2001) และเหมาะนำมาใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนียมสูงและมีสารอินทรีย์คาร์บอน (COD) ต่ำ เช่น น้ำทิ้งของระบบย่อยตะกอน (Sludge digestion) น้ำชะจากขยะ เป็นต้น

ได้มีผู้วิจัยนำกระบวนการอนาโมอกซ์ มาทดลองในถึงปฏิกรณ์หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบสามารถรับอัตราการกำจัดได้แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เปรียบเทียบความต้องการออกซิเจนและค่าความเป็นด่างในกระบวนการต่างๆ

ตารางที่ 2 แสดงชนิดของถังปฏิกรณ์ และอัตราการกำจัด

ชนิดของถังปฏิกรณ์	ตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
ฟลูอิดไดซ์เบด	อัตราการกำจัดไนโตรเจนสูงสุด	0.7 กก.แอมโมเนียมไนโตรเจน/ ลบ.ม/วัน	Strous <i>et al.</i> , 1997
		1.5 กก.ไนโตรเจนทั้งหมด/ลบ.ม/วัน	Mulder <i>et al.</i> , 1995
	อัตราการกำจัดแอมโมเนียมสูงสุด	0.4 กก.แอมโมเนียมไนโตรเจน/ ลบ.ม/วัน	Mulder <i>et al.</i> , 1995
ซีควนซิงค์ แบทช์	อัตราการใช้แอมโมเนียมสูงสุด จำเพาะ	45 ± 5 นาโนโมล/มก.โปรตีน/นาที่	Strous <i>et al.</i> , 1998
ซีควนซิงค์ แบทช์แบบเม็ค ตะกอน	อัตราการกำจัดไนโตรเจนสูงสุด	0.75กก.ไนโตรเจนทั้งหมด/ลบ.ม/วัน	van Dongen <i>et al.</i> , 2001
	อัตราการใช้ในโตรเจนสูงสุด จำเพาะ	0.82 ก.ไนโตรเจน/ก.วีเอสเอส/วัน	
แบบอากาศยกตัว และซีควนซิงค์ แบทช์	อัตราการใช้ในโตรเจนสูงสุด จำเพาะ	0.9 ก.ไนโตรเจน/ก.วีเอสเอส/วัน (อากาศยกตัว)	Dapena-Mora <i>et al.</i> , 2004
		0.44 ก.ไนโตรเจน/ก.วีเอสเอส/วัน (ซีควนซิงค์แบทช์)	

ที่มา : Strous *et al.* (1997) อ้างในศิริพร (2551)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความต้องการออกซิเจนและค่าความเป็นด่างสำหรับการกำจัดไนโตรเจนในกระบวนการต่าง ๆ

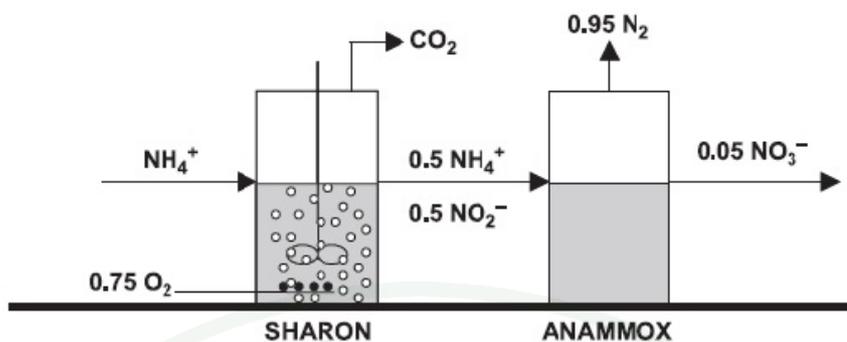
ปฏิกิริยา	ความต้องการออกซิเจน (ก.O <sub>2</sub> /ก.N)	ค่าความเป็นด่าง (ก.CaCO <sub>3</sub> /ก.N)	อ้างอิง
ไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน	4.57	7.14 [7.07]	Rittmann <i>et al.</i> , 2001
ไนโตรเดชัน/ดีไนโตรเดชัน	3.43	7.14 [7.07]	Rittmann <i>et al.</i> , 2001
ซารอน/อนาม็อกซ์	1.71 – 2.06	3.57	van Dongen <i>et al.</i> , 2001
แคนนอน	1.94	3.68	Young-Ho <i>et al.</i> , 2006

หมายเหตุ [ ] สำหรับค่าความเป็นด่างที่ผลิตขึ้นโดยกลุ่มเฮเทอโรโทรปดีไนตริฟิเคชัน

ที่มา : Young-Ho *et al.* (2006)

3.3 กระบวนการซารอน (Single Reactor System for High Ammonium Removal Over Nitrite : SHARON) / กระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียแบบไร้อากาศ (Anaerobic Ammonium Oxidation : Anammox) : SHARON/Anammox

หลักการรวมกระบวนการซารอนและกระบวนการอนาม็อกซ์เข้าไว้ด้วยกัน แสดงดังภาพที่ 5 โดยที่แอมโมเนียจากน้ำเสียถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์ในกระบวนการซารอน เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ น้ำที่ออกจากกระบวนการซารอนมีส่วนผสมของแอมโมเนียและไนไตรท์เหมาะสำหรับเข้าสู่กระบวนการอนาม็อกซ์ ซึ่งแอมโมเนียและไนไตรท์ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ในสภาวะไร้อากาศ ดังสมการ 10-12 (Khin *et al.*, 2004 และ van Dongen *et al.*, 2001)



ภาพที่ 5 การรวมกระบวนการชาลอนและอนาม็อกซ์

ที่มา : Khin *et al.* (2004)

ชาลอน



อนาม็อกซ์



รวม



น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการชาลอนเข้าสู่กระบวนการอนาม็อกซ์ โดยมีปริมาณแอมโมเนียต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของอนาม็อกซ์แบคทีเรีย แอมโมเนียและไนโตรเจนถูกพวกอนาม็อกซ์แบคทีเรียใช้แล้วเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนก๊าซโดยกระบวนการไร้อากาศ

แนวคิดในการรวมกระบวนการชาลอนและอนาม็อกซ์เข้าไว้ด้วยกันเป็นระบบที่เหมาะสมต่อการกำจัดน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงแต่มีสารอินทรีย์ในน้ำเสียน้อย กระบวนการชาลอนและอนาม็อกซ์สามารถที่ให้เป็นระบบแยก ดังภาพที่ 5 หรือระบบเดี่ยวได้

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบของกระบวนการที่ได้รับจากการพัฒนาขึ้นมาใหม่ในการกำจัดไนโตรเจนกับกระบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน

ระบบ	ไนตริฟิเคชัน/ ดีไนตริฟิเคชัน	ชาร์อน	อนาม็อกซ์
จำนวนถังปฏิกรณ์	2	1	1
น้ำเสียเข้า	$\text{NH}_4^+ + \text{COD}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^-$
น้ำออก	$\text{NO}_2^-, \text{NO}_3^-, \text{N}_2$	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-, \text{N}_2$
สภาวะ	เดิมอากาศ, แอนอกซิก	เดิมอากาศ	แอนอกซิก
ออกซิเจนละลายน้ำ	สูง	ต่ำ	ไม่ต้องการ
การควบคุมพีเอช	มี	ไม่มี	ไม่มี
ความต้องการ COD	มี	ไม่มี	ไม่มี
ตะกอน	มาก	น้อย	น้อย
ชนิดของแบคทีเรีย	ไนตริฟายด์อิงแบคทีเรีย/ เฮเทอโรโทรปแบคทีเรีย	แอมโมเนียออกซิ ไดซิงแบคทีเรีย	<i>planctomycetes</i>

ที่มา : Jetten *et al.* (2002) อ้างในศิริพร (2551)

ข้อดีของการรวมกระบวนการทั้งสองคือ ใช้ออกซิเจนน้อยลง คือ 1.9 ก.- $\text{O}_2$ /ก.-N แทนที่เป็น 4.57 ก.- $\text{O}_2$ /ก.-N ในกระบวนการไนตริฟิเคชันปกติ และไม่ต้องการสารอินทรีย์ คือแทนที่ต้องเติมสารอินทรีย์จากภายนอกเข้าระบบ 2.6 ก.-BOD/ก.-N ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน และในระบบมีตะกอนเกิดเล็กน้อยเพียง 0.08 ก.VSS/ก.-N แทนที่จะเป็น 1 ก.VSS/ก.-N ในกระบวนการปกติ (van Loosdrecht *et al.*, 1998)

#### 4. การศึกษาเอกสารจากการทดลองอื่นๆ

กระบวนการชาร์อน เป็นกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (Partial Nitrification) ที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ โดยยับยั้งปฏิกิริยาไม่ให้ไนไตรท์เปลี่ยนไปเป็นไนเตรต

รัชนี (2550) ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบแผ่นกั้นหลายชั้นตอนสำหรับการลดสารประกอบไนโตรเจน พบว่าในการกำจัดไนโตรเจนโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ผลของซิโอดีมาเกี่ยวข้องกับ

ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนที่มีการควบคุมเพียงอย่างเดียว ซึ่งตรวจวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำได้ประมาณ 0.61 มก./ล. มีอัตราส่วนไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นเป็น 1.16 และ 1.99 ในถัง SBR PN1 และ SBR PN2 ตามลำดับ และมีไนโตรเจนส่วนหนึ่งถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรต โดยไม่มีไนโตรเจนสูญหายไปจากระบบ ส่วนในกระบวนการอนาโมกซ์เกิดได้ค่อนข้างสมบูรณ์ แอมโมเนียและไนโตรเจนถูกกำจัดได้ดี และไนเตรตที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้โดยสมการอนาโมกซ์

ศิริพร (2551) ศึกษาการคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียแอนแอมโรบิกแอมโมเนียออกซิเดชัน (Anammox) จากแหล่งที่มาต่างกัน พบว่าอัตราส่วนแอมโมเนียต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมกับเชื้อแบคทีเรีย Anammox ในถังปฏิกรณ์ที่มีเชื้อแบคทีเรียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม คือ 1:1.39 หากอัตราส่วนแอมโมเนียต่อไนโตรเจนสูงกว่านี้ ไนโตรเจนเกินไปยับยั้งปฏิกิริยา ค่าอัตรากำจัดแอมโมเนียแปรผันตามปริมาณแอมโมเนียต่อไนโตรเจนเท่ากับ 8.99 ถึง 39.16 มก. N/ล./วัน โดยมีค่าอัตรากำจัดแอมโมเนียจำเพาะและอัตราการกำจัดไนโตรเจนจำเพาะเท่ากับ 0.049 และ 0.08 ก. N/ก. VSS/วัน ตามลำดับ

van Dongen *et al.* (2001) ได้กล่าวถึงกระบวนการชารอน ปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 30 °C เริ่มต้นใช้ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2 วัน เมื่อกระบวนการไนตริฟิเคชันเริ่มขึ้นจึงลดระยะเวลาพักเก็บน้ำเป็น 1 วัน การใช้น้ำเสียที่มีค่าแอมโมเนียสูงและระยะเวลาพักเก็บน้ำสั้นๆ ช่วยให้แบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ช่วงหลังอาจมีการเพิ่มระยะเวลาพักเก็บน้ำเพื่อเพิ่มช่วงเวลาที่ไร้ออกซิเจนป้องกันการเจริญเติบโตของโปรโตซัว น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีอัตราส่วน  $\text{HCO}_3^-:\text{NH}_4^+ = 1.1:1$  (Hellinga *et al.*, 1998) ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแอมโมเนียประมาณ 50 % ถูกใช้ทำปฏิกิริยากับ  $\text{HCO}_3^-$  ทั้งหมด เมื่อครั้งหนึ่งของแอมโมเนียอิสระถูกเปลี่ยนรูปไป ค่าพีเอชเริ่มลดลงและเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้ เพราะในสภาวะกรด แอมโมเนียปรากฏอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_4^+$  แต่แบคทีเรียในปฏิกิริยาใช้อาหารในรูปของ  $\text{NH}_3$

Pynaert *et al.* (2003) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียอย่างเดียว โดยไม่ใส่ไนโตรเจนเข้าไปในกระบวนการแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor : RBC) ควบคุมออกซิเจนละลายน้ำไม่ให้มากกว่า 0.57 มก./ล. ตลอดการทดลอง และที่สภาวะคงตัวพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนร้อยละ 89

Gali *et al.* (2007) ศึกษาการเดินกระบวนไนตริฟิเคชันบางส่วนในน้ำเสียที่ผ่านการย่อยตะกอนแบบไร้อากาศซึ่งมีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 700-800 มก./ล. โดยทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์ซีควนซิงแบทช์ โดยมีเวลากักพักน้ำ 0.35 วันและเวลากักตะกอน 5 วัน เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่ควบคุมกระบวนการเป็นชารอน ทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 35 °C โดยมีเวลากักพักน้ำและเวลากักตะกอน 1 วัน พบว่าที่น้ำออกจากกระบวนทั้งสองมีค่าแอมโมเนียและไนไตรท์เหมาะสมสำหรับเข้าสู่กระบวนการอนาโม็อกซ์

Jianlong and Yang (2003) ได้ศึกษาปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันของแอมโมเนียและไนไตรท์ เมื่อควบคุม อุณหภูมิ พีเอช และดีไออย่างเหมาะสม สำหรับการไนตริฟิเคชันบางส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง ในถังปฏิกรณ์ขนาด 8.2 ลิตร เริ่มเดินระบบกำหนดค่าพีเอชและดีไอไว้ที่ 7.0-7.4 และ 0.5 มก./ล. ตามลำดับ ทำการศึกษาที่พีเอช 6.5, 7.5, 8.5 และ 9.5 ดีไอที่ 0.5±0.2, 1.5±0.2 และ 2.5±0.2 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 30 °C ที่ทำให้เกิดไนตริฟิเคชันบางส่วนอย่างสมบูรณ์ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่า  $k_d$  โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.5 ดีไอเท่ากับ 5 มก./ล. และอุณหภูมิที่ 12, 20 และ 30 °C ตามลำดับ พบว่าเกิดการไนตริฟิเคชันบางส่วนเป็นไนไตรท์อย่างต่อเนื่องที่ พีเอชเท่ากับ 7.5 ดีไอเท่ากับ 1.5 มก./ล. อุณหภูมิ 30 °C ค่า  $k_d$  สูงสุดเท่ากับ  $115.1 \times 10^{-3}$  มก.-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(มก.VSSชม.)<sup>-1</sup> ภายใต้สภาวะนี้

Ruiz *et al.* (2006) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่มีต่อไนไตรท์ในกระบวนไนตริฟิเคชัน พบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.7-1.4 มก./ล. มีไนไตรท์ในระบบมากที่สุด และเมื่อทดลองใช้กระบวนไนตริฟิเคชันร่วมกับกระบวนดีไนตริฟิเคชัน สามารถควบคุมออกซิเจนละลายน้ำในระบบไนตริฟิเคชันที่ 1.1 มก./ล. เพื่อให้ได้ไนไตรท์ในระบบและไม่จำเป็นต้องควบคุมสภาวะไร้ออกซิเจนในกระบวนดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้ระบบตะกอนเร่งที่มีการเวียนตะกอนจากถังตกตะกอน ถึงปฏิกรณ์ขนาด 2.5 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C ใช้หัวฟุ้งกระจายอากาศจากด้านล่าง ทดลองที่ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ 0.5-5.5 มก./ล. ควบคุมค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยการปรับอัตราการไหลของอากาศ ได้ผลว่าเมื่อลดค่าออกซิเจนละลายน้ำมาที่ 1.4 มก./ล. เริ่มมีไนไตรท์ในระบบและมีค่าสูงสุดที่ออกซิเจนละลายน้ำ 0.7 มก./ล. แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์หมด แต่ที่ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 0.5 มก./ล. มีแอมโมเนียคงเหลือประมาณ 50% มีไนไตรท์แต่ไม่มีไนเตรดในระบบ

Chuang *et al.* (2007) ได้ทำการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน โดยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจน ในถังปฏิกรณ์ DHS (Closed down-flow hanging sponge) ซึ่งคล้ายกับระบบ Tricking Filter ทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ที่ HRT 1.5 วัน อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  ควบคุมออกซิเจนให้ต่ำกว่า 3% (1.2 มก./ล.) ยกเว้นตอนเริ่มเดินระบบ เมื่อเดินระบบอย่างต่อเนื่อง 5 เดือน พบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนและการเกิดไนไตรท์ โดยอัตราส่วนระหว่างไนไตรท์ที่เกิดขึ้นกับการออกซิไดซ์แอมโมเนียมเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง การไนตริฟิเคชันบางส่วนสำเร็จภายใต้ออกซิเจนจำกัดที่ 0.5% (0.2 มก./ล.) อัตราการกำจัดแอมโมเนียมสูงสุดเท่ากับ  $1.46 \text{ กก.}\text{NH}_4^+\text{-N/ม.}^3\text{/วัน}$  นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของออกซิเจนมีความสำคัญในการเกิดของไนตรัสออกไซด์ที่เพิ่มเมื่อลดความเข้มข้นของออกซิเจน

Peng *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนสำหรับน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิห้อง โดยควบคุมอัตราการเติมอากาศ ในถังซีควนซ์เชิงแบทช์ ปริมาตร 14 ลิตร ที่อุณหภูมิ  $23^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 8 เดือน ด้วยน้ำเสียชุมชน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย 0.32 มก./ล. มีอัตราการเกิดไนไตรท์ร้อยละ 92.4 ภายใน 3 สัปดาห์ จากนั้นเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเป็น 0.60 มก./ล. มีอัตราการเกิดไนไตรท์ร้อยละ 95.6

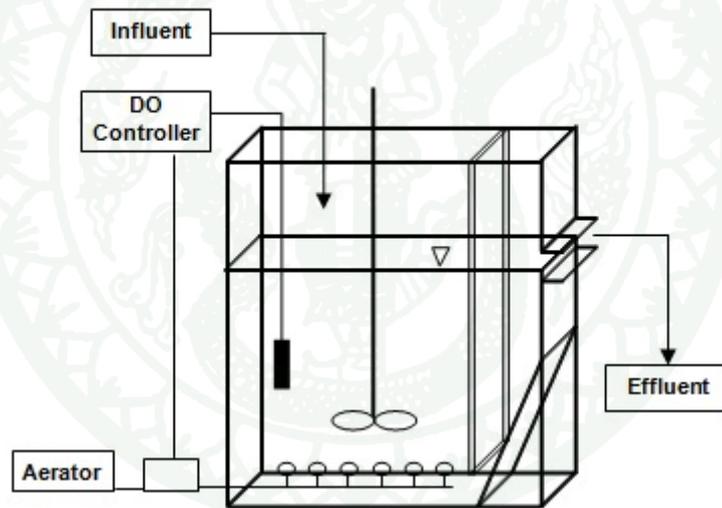
Qiao *et al.* (2010) ทำการศึกษาระบบการไนตริฟิเคชันบางส่วนในการบำบัดแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต ในขั้นตอนการตกตะกอนของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักสุรา ในถังปฏิกรณ์แบบ swim-bed โดยไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิ ออกซิเจนละลาย และพีเอช พบว่ามีอัตราการเกิดไนไตรท์สูงสุด  $2.66 \text{ กก.}\text{NO}_2^-\text{-N/ม.}^3\text{/วัน}$  ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน  $5.45 \text{ กก.}\text{-N/ม.}^3\text{/วัน}$  อุณหภูมิ  $18^\circ\text{C}$  และมีอัตราการเกิดไนไตรท์  $0.22 \text{ กก.}\text{NO}_2^-\text{-N/ม.}^3\text{/วัน}$  ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน  $0.48 \text{ กก.}\text{-N/ม.}^3\text{/วัน}$  อุณหภูมิ  $8^\circ\text{C}$

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์เป็นถังที่มีส่วนเติมอากาศและส่วนตกตะกอน (Anaerobic tank and Sedimentation tank) อยู่ในถังเดียวกัน โดยถังปฏิกรณ์ทำจากแผ่นอะครีลิก ในส่วนเติมอากาศมีขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. ลึก 30 ซม. ถังตกตะกอนมีขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 10 ซม. ลึก 30 ซม. มีฝาปิดที่ด้านบนของถัง มีปริมาตรใช้งาน 8 ลิตร แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ถังปฏิกรณ์ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

#### 2. เครื่องควบคุมออกซิเจน (Dissolved Oxygen Controller)

ยี่ห้อ Eutech รุ่น Alpha DO1000 ใช้ในการควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล. ตลอดการทดลอง โดยใช้เครื่องควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศ (Air pump)

#### 3. ใบกวน (Mixer)

4. เครื่องเติมอากาศ (Air pump) ขนาด 45 วัตต์ พร้อมหัวฟองอากาศ
5. เครื่องสูบน้ำแบบรีดสาย (Peristaltic pump)
6. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

สารอาหารหลัก	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.30-2.10
$\text{NaHCO}_3$	0.35-2.90
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	0.01
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.005
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.60
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.07
EDTA	0.01
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.00625
<b>Trace mineral 2 มิลลิกรัม/ลิตร</b>	<b>ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)</b>
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
KI	0.03
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.15

ที่มา : ดัดแปลงจาก Kuba *et al.* (1993)

## วิธีการ

### 1. แผนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

#### 1.1 การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย, AOB

1.1.1. การเตรียมแบคทีเรียไนโตรไฟอิงด้วยกระบวนการไนโตรฟิเคชันแบบแบทช์

1.1.2. การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย, AOB โดยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล.

#### 1.2 การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในกระบวนการไนโตรฟิเคชันบางส่วน (ซารอน)

### 2. การดำเนินการทดลอง

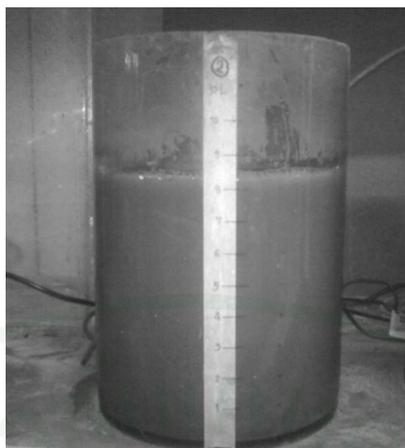
#### 2.1 การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย, AOB

2.1.1 การเตรียมแบคทีเรียไนโตรไฟอิงด้วยกระบวนการไนโตรฟิเคชันแบบแบทช์

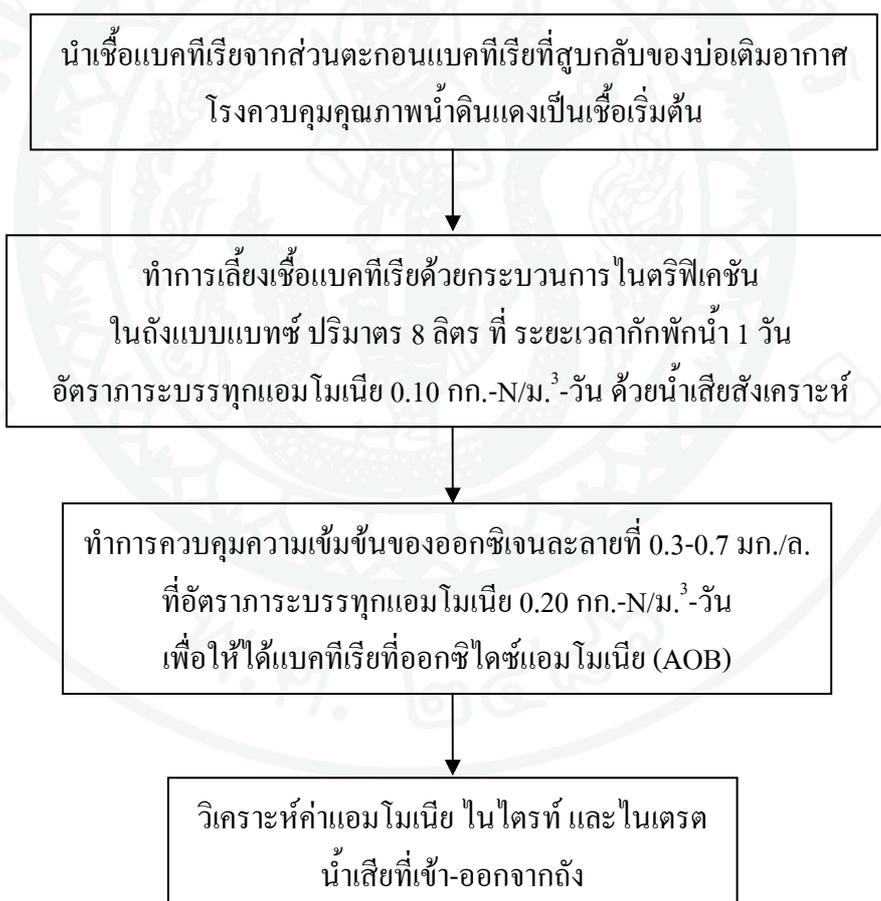
ใช้เชื้อแบคทีเรียจากส่วนตะกอนแบคทีเรียที่สูบกลับ (Return sludge) ในบ่อเติมอากาศ โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนชั้นสีดำเป็นเชื้อเริ่มต้น เลี้ยงด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียเป็นสารอาหารหลักดังตารางที่ 5 ที่อัตราภาวะบรรทุกแอมโมเนีย 0.10 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch) ดังภาพที่ 7 ด้วยกระบวนการไนโตรฟิเคชันที่ปริมาตร 8 ลิตร ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) เท่ากับ 1 วัน ทำการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรตของน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch)

2.1.2 การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) โดยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล.

ทำการควบคุมออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล. เพื่อให้ได้แบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ที่อัตราภาวะบรรทุกแอมโมเนีย 0.20 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ดังภาพที่ 7 ทำการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรตของน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch)



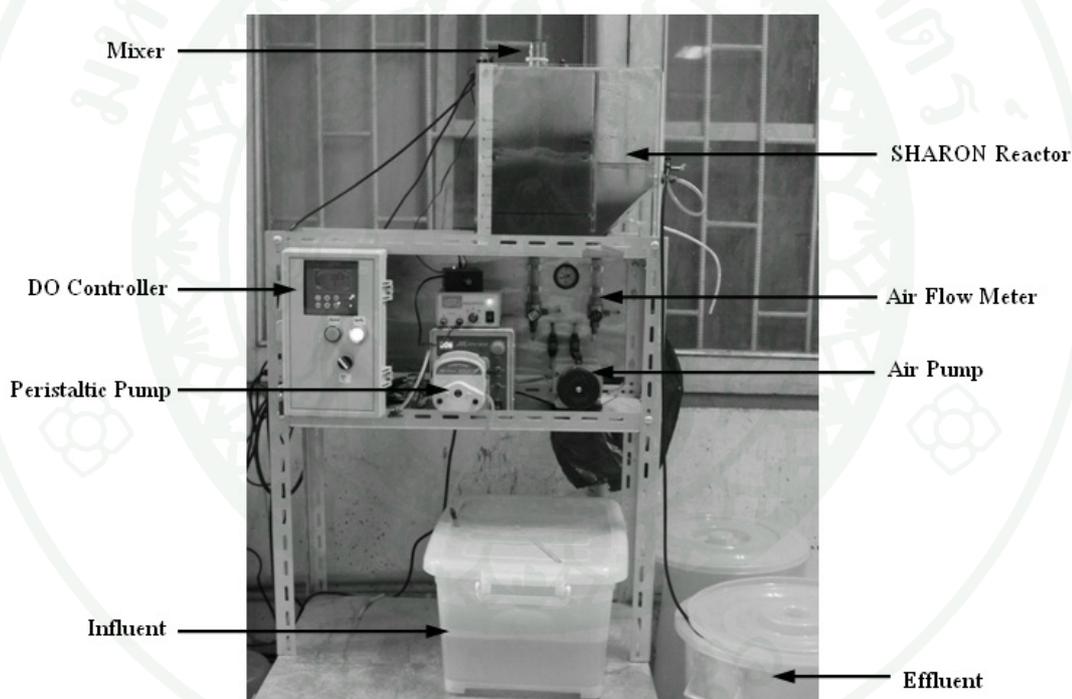
ภาพที่ 7 การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)



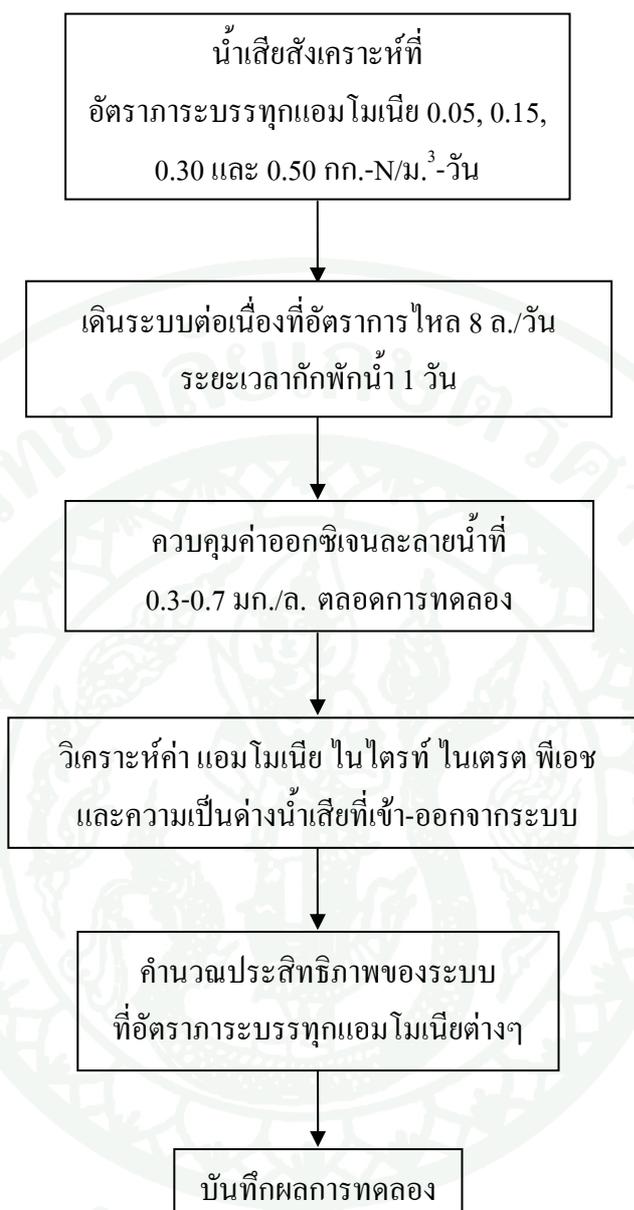
ภาพที่ 8 ขั้นตอนการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

## 2.2 การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ชารอน)

นำแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียที่เลี้ยงไว้แล้วลงในถังปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันบางส่วน (ชารอน) ทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 5 ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ เติมน้ำในระบบต่อเนื่องโดยมีอัตราการป้อนน้ำเสีย 8 ล./วัน ทำการควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล. ดังภาพที่ 9 ตลอดการทดลอง ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) เท่ากับ 1 วัน ซึ่งทุกครั้งที่เปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย ได้ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เพื่อให้ได้อัตราส่วนไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนีย ในน้ำเข้าที่เหมาะสมกับกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน และทุกๆ วัน ทำการดึงตะกอนแบคทีเรียในส่วนที่มีการกวนผสมออกครั้งละ 200 มล.



ภาพที่ 9 กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการกำจัดการประกอบไนโตรเจนในระบบการไนตริฟิเคชันบางส่วน

ตารางที่ 6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

อัตราภาระ						
Run	บรรทุก	F/M Ratio		อัตราการ	เวลากัก	
NO.	แอมโมเนีย	(กก.N/กก.	$N_0$	ไหล	พักน้ำ	MLVSS
	(กก.-N/ม. <sup>3</sup> -วัน)	MLVSS-วัน)	(มก.N/ล.)	(ล./วัน)	(วัน)	(มก./ล.)
1	0.05	0.28	50	8	1	180
2	0.15	0.83	150	8	1	180
3	0.30	1.67	300	8	1	180
4	0.50	2.78	500	8	1	180

### 3. วิธีการวิเคราะห์

ในการทดลองทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบ ได้แก่ พีเอช ค่าความเป็นด่าง แอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรต ของแข็งแขวนลอย ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
พีเอช	pH Meter
ค่าความเป็นด่าง	Titration Method
แอมโมเนีย	Titration Method (4500-NH <sub>3</sub> C)
ไนไตรท์	Colorimetric analysis, Hydrazine Method
ไนเตรต	Colorimetric analysis, Hydrazine Method
ของแข็งแขวนลอย	Total suspended solids dried at 103-105°C (2540 D)
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย	Fixed and volatile solids ignited at 550°C (2540E)

ที่มา : APHA *et al.* (2005)

#### 4. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

#### 5. แผนดำเนินการ

เริ่มดำเนินการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ณ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 และทำการเดินระบบ  
และเก็บข้อมูลงานวิจัยถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ดังแผนดำเนินการในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 แผนดำเนินการในงานวิจัย

ขั้นตอนในการทำวิจัย	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น เช่น เชื้อแบคทีเรีย ที่นำมาบำบัดน้ำเสีย	■	■											
2. จัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย		■	■	■									
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการ วิจัย		■	■	■									
4. เริ่มเดินระบบและทดสอบปัจจัยต่างๆ ที่ มีผลต่อการบำบัดน้ำเสีย			■	■	■	■	■						
5. เก็บข้อมูลการวิจัย ได้แก่ $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_2^-$ - $\text{N}$ , $\text{NO}_3^-$ - $\text{N}$ , Alk, pH, MLSS และ MLVSS โดยเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง					■	■	■	■	■	■	■	■	■
6. สรุปผลประสิทธิภาพที่ได้จากการ ทดลอง										■	■	■	
7. เขียนรายงานวิจัย/พร้อมทั้งส่งบทความ เพื่อการตีพิมพ์						■	■					■	■

## ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่เลี้ยงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์ ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch) ปริมาตร 8 ลิตร ระยะเวลาพักน้ำ 1 วัน ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.10 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน จากนั้นทำการควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล. ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.20 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน เพื่อให้ได้แบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (ammonium oxidizing bacteria; AOB) ที่ใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

ส่วนที่สอง เป็นการนำแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ทำการทดลองต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล. ตลอดการทดลอง ได้ผลการทดลองดังนี้

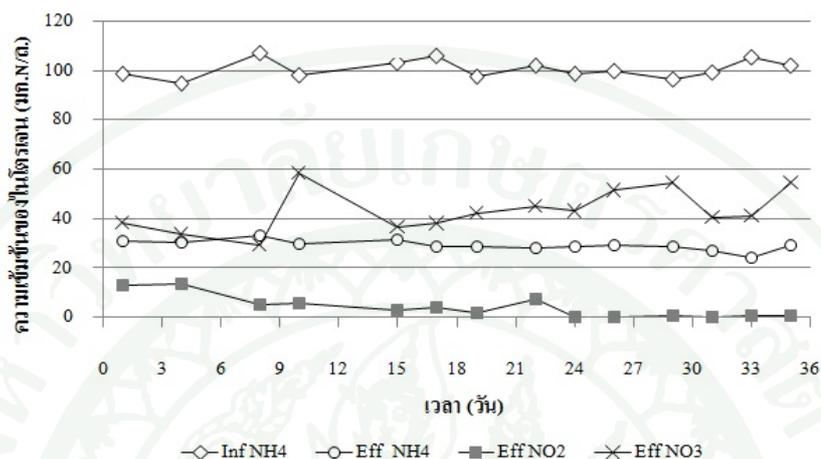
### 1. การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย, AOB

#### 1.1 การเตรียมแบคทีเรียไนตริไฟอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์

เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง มีลักษณะเป็นตะกอนสีดำขุ่นนำมาเลี้ยงด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ มีแอมโมเนียเป็นสารอาหารหลัก ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน มีการเติมอากาศเกินพอ ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.10 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยและความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยละลายง่ายเริ่มต้นที่ 1,552 และ 796 มก./ล. ตามลำดับ จากภาพที่ 11 น้ำเข้าและออกจากระบบมีความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ย 100 และ 28 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 72 มีอัตราการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.07 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน อัตรากำจัดแอมโมเนียจำเพาะเท่ากับ 0.12 กก.-N/กก.MLVSS-วัน

ในน้ำเข้าระบบตรวจวัดไม่พบความเข้มข้นของไนไตรท์และไนเตรต เนื่องจากใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียมซัลเฟต ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เป็นสารอาหารหลัก ในน้ำออกจากระบบมีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 1.9 มก./ล. และไนเตรตเท่ากับ 45 มก./ล.

ที่เวลา 14 วัน ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวและทำการเดินระบบต่อไปอีก 21 วัน กระบวนการไนตริฟิเคชันสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรตได้ โดยมีไนไตรท์เกิดขึ้นในระบบน้อยมาก ดังภาพที่ 11

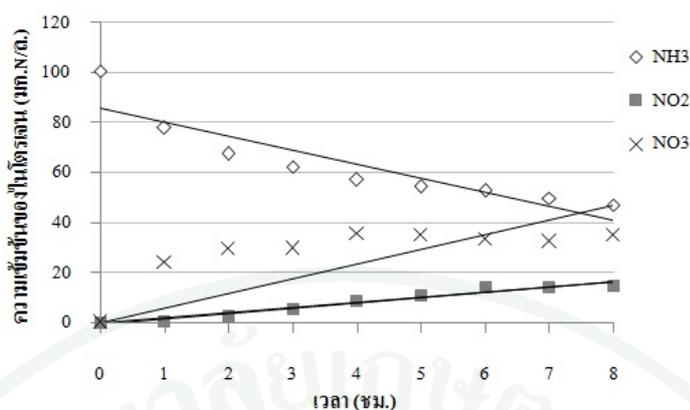


ภาพที่ 11 ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียไนตริฟิอิงด้วย กระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์

จากการคำนวณค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ซึ่งเป็นผลรวมของแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรต ที่วิเคราะห์ได้ในน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 102 มก.N/ล. และในน้ำออกมีค่าเท่ากับ 75 มก.N/ล. พบว่าไนโตรเจนในน้ำออกมีค่าน้อยกว่าในน้ำเข้า ซึ่งอาจมีไนโตรเจนหายไป ในรูปของก๊าซไนโตรเจน

จากสมการที่ 4 เมื่อเทียบสมดุลไนโตรเจน (Nitrogen Balance) พบว่า 1 โมลของแอมโมเนีย เปลี่ยนเป็นไนเตรต 1 โมล จากผลการทดลองพบว่า 1 โมลของแอมโมเนียเปลี่ยน เป็นไนเตรต 0.79 โมล ซึ่งมีไนเตรตเกิดขึ้นใกล้เคียงกับในสมการ

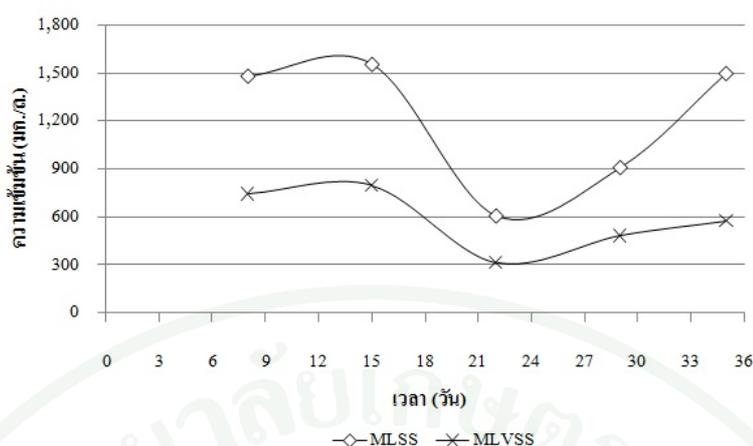
ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลา ดังภาพที่ 12 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระบบสามารถกำจัดแอมโมเนียได้มากขึ้น มีไนไตรท์และไนเตรตเกิดขึ้นตามลำดับ คิดเป็นอัตราการใช้แอมโมเนียและอัตราไนตริฟิเคชันเท่ากับ 6.69 และ 6.17 มก.N/ล.-ชม. ตามลำดับ มีอัตราการใช้แอมโมเนียจำเพาะและอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเท่ากับ 0.28 และ 0.26 กก.-N/กก. MLVSS-วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลาในการเตรียมแบคทีเรียไนตริไฟอิง ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบเบทซ์

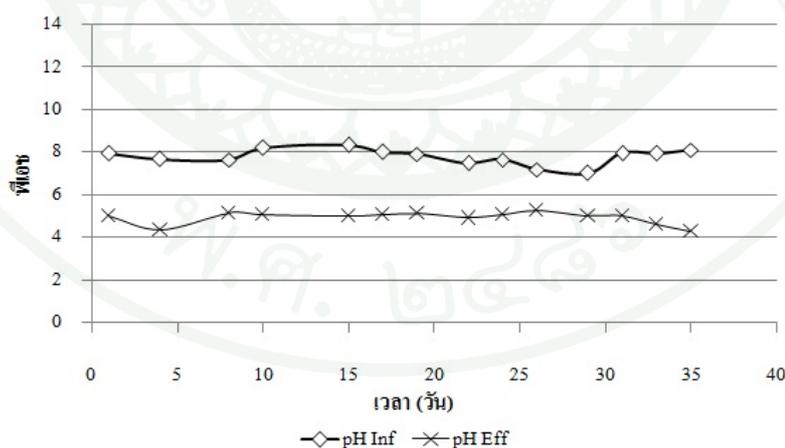
จากการสังเกตค่าของแฉิ่งแขวนลอย (MLSS) และของแฉิ่งแขวนลอยระเหยง่าย (MLVSS) ในระบบ พบว่าเมื่อเริ่มเดินระบบค่าของแฉิ่งแขวนลอยและของแฉิ่งแขวนลอยระเหยง่ายเริ่มลดลง ดังภาพที่ 13 เพื่อให้แบคทีเรียในระบบได้มีการปรับตัว เนื่องจากในช่วงแรกตะกอนที่นำมาจากส่วนตะกอนแบคทีเรียที่สูบกลับ (Return Sludge) ของบ่อเติมอากาศ ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด ทำให้ต้องใช้เวลาในการปรับตัวอยู่ระยะหนึ่ง อาจเป็นเหตุให้มีของแฉิ่งแขวนลอยและของแฉิ่งแขวนลอยระเหยง่ายหลุดออกไปกับน้ำออกมาก เมื่อเดินระบบต่อตะกอนเริ่มปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

มีค่าอัตราส่วนของแฉิ่งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแฉิ่งแขวนลอย (MLVSS/MLSS) เฉลี่ยเท่ากับ 0.52 แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียในระบบเริ่มมีการปรับตัวและเพิ่มจำนวนขึ้น จากที่ช่วงแรกมีค่าอัตราส่วนของแฉิ่งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแฉิ่งแขวนลอยค่อนข้างต่ำ คือ 0.38



ภาพที่ 13 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในการเตรียมน้ำที่เรียในตรีฟองอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์

พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบในการเตรียมน้ำที่เรียในตรีฟองอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.75 และ 4.94 ตามลำดับ ดังภาพที่ 14 เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำออกมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องมาจากมีการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีมาก มีการใช้ความเป็นด่างไปมาก ทำให้พีเอชในระบบลดลง สอดคล้องกับ Wild *et al.* (1970) (อ้างใน ธงชัย (2545)) รายงานว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 7.0-9.8

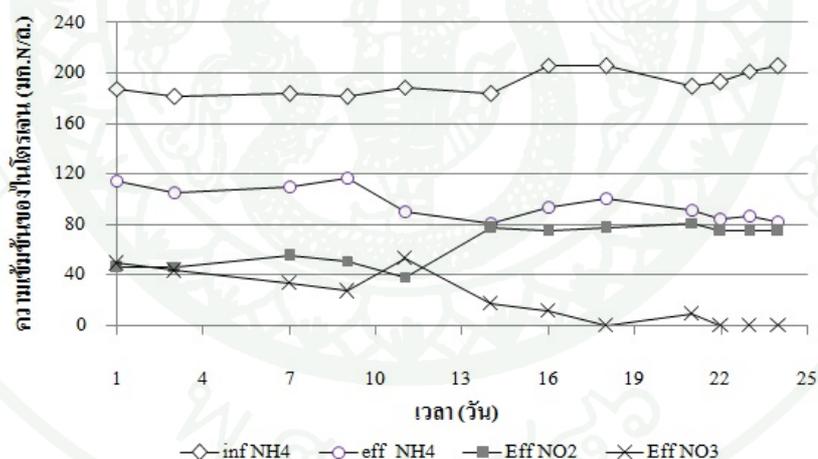


ภาพที่ 14 พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบในการเตรียมน้ำที่เรียในตรีฟองอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์

## 1.2 การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย, AOB

ทำการควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล. ที่อัตราการบรรทุกแอมโมเนีย 0.20 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ดังภาพที่ 15 ความเข้มข้นเริ่มต้นของของแข็งแขวนลอยละเหยง่าย 570 มก.MLVSS/ล. ที่สภาวะคงตัวความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเข้าและออกจากระบบมีค่า 198 และ 88 มก.-N/ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 55 มีอัตราการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.11 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน

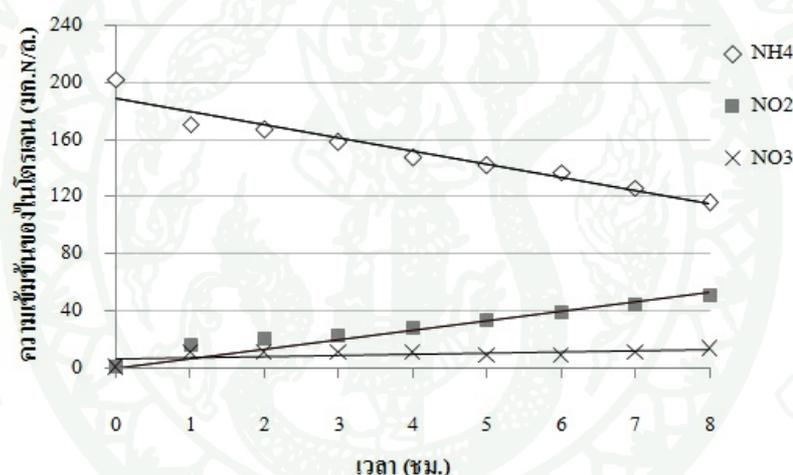
ที่เวลา 15 วัน ระบบเริ่มมีไนโตรเจนเกิดขึ้นและมีการเกิดไนโตรเจนลดลง ที่สภาวะคงตัวตรวจวัดไม่พบความเข้มข้นของไนโตรเจนและไนเตรดในน้ำเข้าระบบ น้ำที่ออกจากระบบมีไนเตรดในน้ำน้อยมากประมาณ 3 มก.N/ล. มีไนโตรเจนเท่ากับ 76 มก.N/ล. คิดเป็นร้อยละ 39 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อแอมโมเนียเท่ากับ 0.87 ใกล้เคียงกับ van Dongen *et al.* (2001) ที่เดินระบบที่ระยะเวลาที่กักน้ำเท่ากับ 0.80 วัน แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์เป็นไนโตรเจนร้อยละ 30



ภาพที่ 15 ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

ภาพที่ 16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลาในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) เมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล. พบว่าระบบมีการกำจัดแอมโมเนียและมีไนไตรท์เกิดขึ้น คิดเป็นอัตราการใช้แอมโมเนียและอัตราไนไตรท์เคชันบางส่วน 10.84 และ 6.32 มก.N/ล.-ชม. ตามลำดับ มีอัตราการใช้แอมโมเนียจำเพาะ และอัตราไนไตรท์เคชันบางส่วนจำเพาะ 0.46 และ 0.27 กก.-N/กก.MLVSS-วัน ตามลำดับ

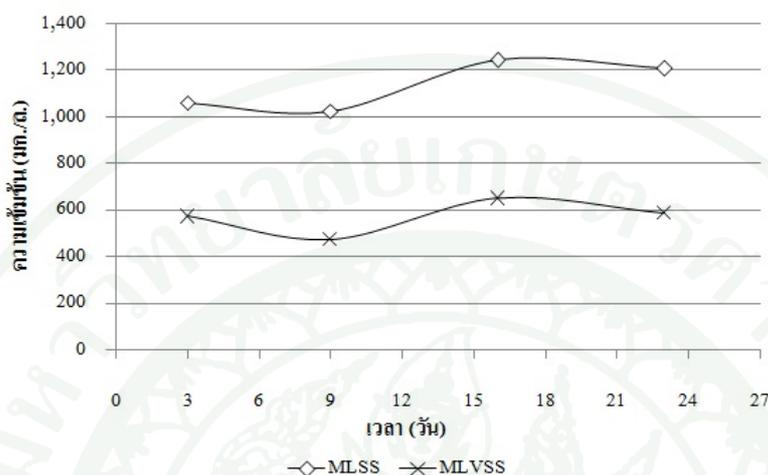
ที่ชั่วโมงที่ 8 มีไนไตรท์เกิดขึ้น 57 มก.N/ล. คิดเป็นร้อยละ 25 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีอัตราส่วนไนไตรท์ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 0.44 ใกล้เคียงกับ Chuang *et al.* (2007) ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย 0.4 มก./ล. มีไนไตรท์เกิดขึ้น 60 มก.N/ล. คิดเป็นร้อยละ 30 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีอัตราส่วนไนไตรท์ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 0.43



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลาในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

จากการคำนวณค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ซึ่งเป็นผลรวมของแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรด ที่วิเคราะห์ได้ในน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 198 มก.N/ล. และในน้ำออกมีค่าเท่ากับ 170 มก.N/ล. พบว่าไนโตรเจนในน้ำออกมีค่าน้อยกว่าในน้ำเข้า ซึ่งอาจมีไนโตรเจนหายไปในรูปแบบของก๊าซไนโตรเจน

จากสมการที่ 6 เมื่อเทียบสมดุลไนโตรเจน (Nitrogen Balance) พบว่า 1 โมลของแอมโมเนีย เปลี่ยนเป็นไนไตรท์ 0.5 โมล จากผลการทดลองพบว่า 1 โมลของแอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ 0.55 โมล ซึ่งมีไนไตรท์เกิดขึ้นใกล้เคียงกับในสมการ

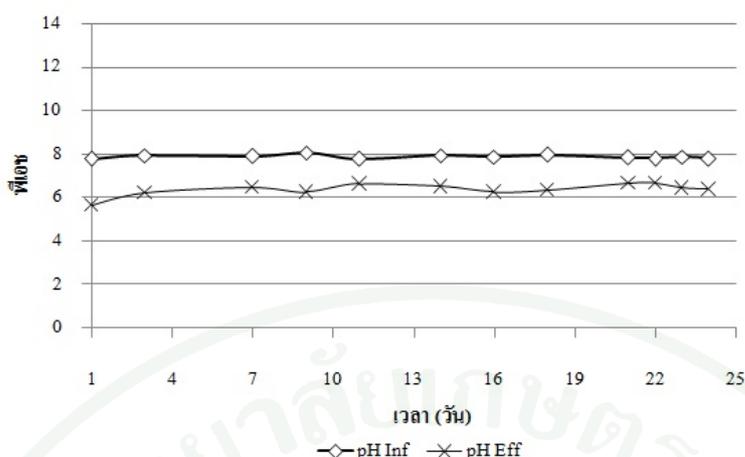


ภาพที่ 17 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

ค่าของแข็งแขวนลอย (MLSS) และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (MLVSS) ในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ในระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,132 มก. MLSS/ล. และ 568 มก. MLVSS/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 17

มีค่าอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอย (MLVSS/MLSS) เท่ากับ 0.50 แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียในระบบเริ่มมีการปรับตัวและเพิ่มจำนวนขึ้น จากที่ช่วงแรกมีค่าอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอยค่อนข้างต่ำ คือ 0.46

ค่าพีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) เมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.86 และ 6.46 ตามลำดับ ดังภาพที่ 18 เห็นว่าค่าพีเอชในน้ำเข้ามีค่าไม่ต่ำกว่า 6.5 เพราะถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันบางส่วนไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้ (van Dongen *et al.*, 2001)



ภาพที่ 18 พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

## 2. การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ชารอน)

ในกระบวนการชารอนได้มีการนำแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ที่ได้จากตอนที่ 1 มีลักษณะเป็นตะกอนสีน้ำตาลส้ม ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันบางส่วน (ชารอน) ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 5 ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ คือ 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 0.3-0.7 มก./ล. ระยะเวลาพักน้ำ 1 วัน มีการกวนผสมตลอดเวลา ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 9

### 2.1 อุณหภูมิ

ตลอดการทดลองตรวจวัดอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ  $30 \pm 1.5$  °C การทดลองสามารถยับยั้งการเกิดไนเตรตได้ ที่สภาวะอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์) และระยะเวลาพักน้ำที่เหมาะสม ช่วยให้แบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonium oxidizing bacteria; AOB) เจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ (Nitrite oxidizing bacteria; NOB) ซึ่งต่างจากในธรรมชาติ (5-20 °C) แบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ (NOB) เจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนเตรตอย่างสมบูรณ์ สอดคล้องกับ Hellinga *et al.* (1998) กล่าวไว้ว่าสิ่งสำคัญในกระบวนการชารอนคืออุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) เจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ (NOB) ดังภาพที่ 4

van Dongen *et al.* (2001) พบว่าเกิดไนโตรที่อุณหภูมิระหว่าง 30-37 °C ขณะที่ van Kampen *et al.* (2001) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) อย่างสมบูรณ์มีค่าอยู่ระหว่าง 25-37 °C

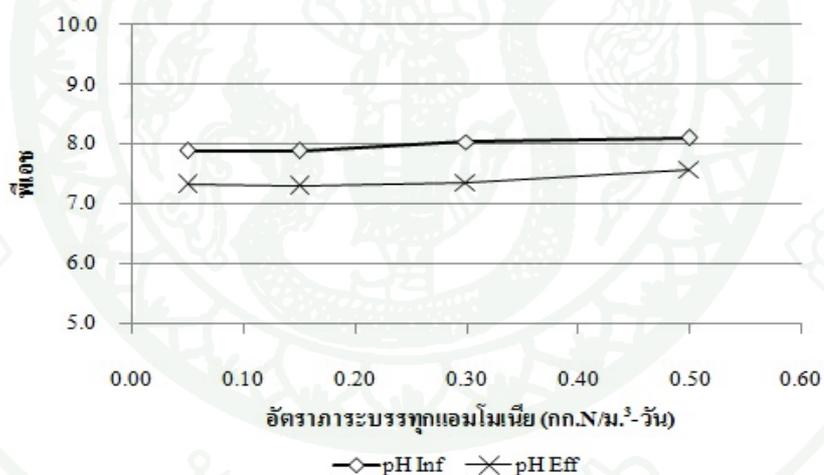
**ตารางที่ 9** ความเข้มข้นของไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนที่สภาวะคงตัว ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ

ตัวแปร (หน่วย)	อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย (กก.N/ม. <sup>3</sup> -วัน)			
	0.05	0.15	0.30	0.50
พีเอชน้ำเข้าระบบ	7.89	7.89	8.04	8.10
พีเอชออกจากระบบ	7.33	7.30	7.37	7.58
ความเป็นด่างน้ำเข้าระบบ (มก.CaCO <sub>3</sub> /ล.)	293	686	1,236	2,064
ความเป็นด่างน้ำออกจากระบบ (มก.CaCO <sub>3</sub> /ล.)	200	314	499	1,037
แอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ (มก.N/ล.)	55	150	300	505
แอมโมเนียในน้ำออกจากระบบ (มก.N/ล.)	27	70	145	235
ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย (ร้อยละ)	52	53	51	53
ไนโตรที่ไนโตรเจน (มก.N/ล.)	21	69	176	281
ไนโตรที่/แอมโมเนีย	0.80	0.98	1.21	1.19
ไบคาร์บอเนต/แอมโมเนียในน้ำเข้า (โมล/โมล)	1.19	1.28	1.36	1.30
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	360	296	305	281
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มก./ล.)	189	163	163	162
อัตรากำจัดแอมโมเนีย (กก.N/ม. <sup>3</sup> -วัน)	0.03	0.08	0.15	0.27
อัตรากำจัดแอมโมเนียจำเพาะ (กก./กก.MLVSS-วัน)	0.15	0.49	0.94	1.66

## 2.2 พีเอช

ตลอดระยะเวลาการทดลอง 176 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวพีเอชของน้ำเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 7.89, 7.89, 8.04 และ 8.10 ตามลำดับ และน้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.33, 7.30, 7.37 และ 7.58 ตามลำดับ ดังภาพที่ 19

เมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย คือ 6.0-8.5 แต่ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดควรมีค่าประมาณ 8.0 ถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 5.5 หรือสูงกว่า 9.0 จะยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นผลให้ไนโตรเจนลดลงอย่างรวดเร็ว (Yan and Hu, 2009) นอกจากนี้ Alleman (1984) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) มีค่าอยู่ในช่วง 7.9-8.2

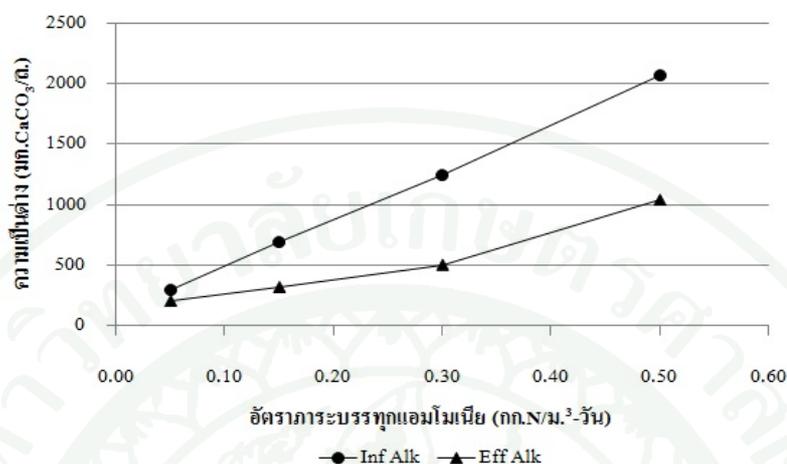


ภาพที่ 19 ค่าพีเอชของน้ำเข้าและออกที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ที่สภาวะคงตัว ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

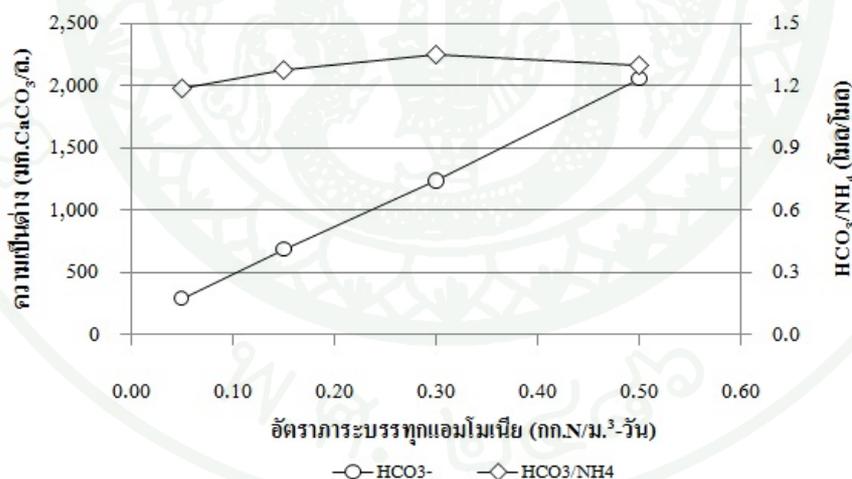
## 2.3 ความเป็นด่าง

ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) คิดในรูปของไบคาร์บอเนต พบว่าในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) มีการใช้ไบคาร์บอเนตเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ด้านการลดลงของค่าพีเอชในการ

เปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ เพราะถ้าค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.5 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันบางส่วนไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้ (van Dongen *et al.*, 2001)



ภาพที่ 20 ค่าความเป็นด่างในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราแอมโมเนียต่างๆ ที่สภาวะคงตัว ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน



ภาพที่ 21 ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้า ที่สภาวะคงตัว ที่อัตราแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

จากภาพที่ 20 และ 21 ที่อัตราแอมโมเนีย 0.05 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ณ สภาวะคงตัวมีค่าความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 293 มก.CaCO<sub>3</sub>/ล. ในน้ำออกจาก

ระบบมีค่าเท่ากับ 200 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลของไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้าเท่ากับ 1.19 โมล/โมล

ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.15 กก.-N/ $\text{m}^3$ -วัน ณ สภาวะคงตัวมีค่าความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 686 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. ในน้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 314 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลของไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้าเท่ากับ 1.28 โมล/โมล

ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.30 กก.-N/ $\text{m}^3$ -วัน ณ สภาวะคงตัวมีค่าความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 1,236 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. ในน้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 499 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลของไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้าเท่ากับ 1.36 โมล/โมล

ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.50 กก.-N/ $\text{m}^3$ -วัน ณ สภาวะคงตัวมีค่าความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 2,064 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. ในน้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 1,037 มก. $\text{CaCO}_3$ /ล. คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลของไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้าเท่ากับ 1.30 โมล/โมล

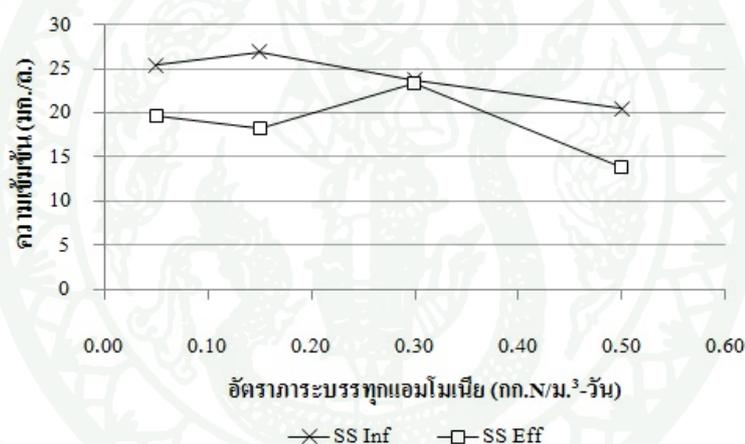
จากสมการที่ 7 แบบที่เรียกใช้ไบคาร์บอเนต 2 โมลต่อแอมโมเนีย 1 โมล เพื่อให้เกิดเป็นไนไตรท์ พบว่าที่ทุกค่าของอัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย มีอัตราส่วนโดยโมลของไบคาร์บอเนตต่อแอมโมเนียในน้ำเข้าเหมาะที่ทำการบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ใกล้เคียงกับ Hellinga *et al.* (1998) คือ 1.1:1 โมล/โมล โดยไบคาร์บอเนตนี้ทำหน้าที่ด้านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและมีผลต่อปริมาณไนไตรท์ในระบบ

กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) เป็นกระบวนการต่อเนื่อง และในน้ำเข้ามีค่าความเป็นด่างรูปของไบคาร์บอเนตจากการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) จึงทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์จึงยังคงเกิดขึ้นต่อไป และการวิจัยเป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียจำนวนครึ่งหนึ่งไปเป็นไนไตรท์ จึงทำให้ค่าพีเอชตลอดการทดลองมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอช

## 2.4 ของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าและออกจากระบบ

จากการตรวจวัดพบว่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (SS) ของน้ำที่เข้าระบบตลอดช่วงการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าเท่ากับ 25, 27, 24 และ 21 มก./ล. อาจเป็นผลมาจากตะกอนของเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ใช้เป็นสารอาหารในน้ำเสียดังเคราะห์ในการทดลอง จึงทำให้ค่าของของแข็งละลายในน้ำเข้ามีค่าไม่เท่ากับศูนย์

ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 20, 18, 23 และ 14 มก./ล. พบว่ามีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกค่อนข้างต่ำ เนื่องจากถึงปฏิกิริยามีส่วนตกตะกอนอยู่ในตัว ดังภาพที่ 22



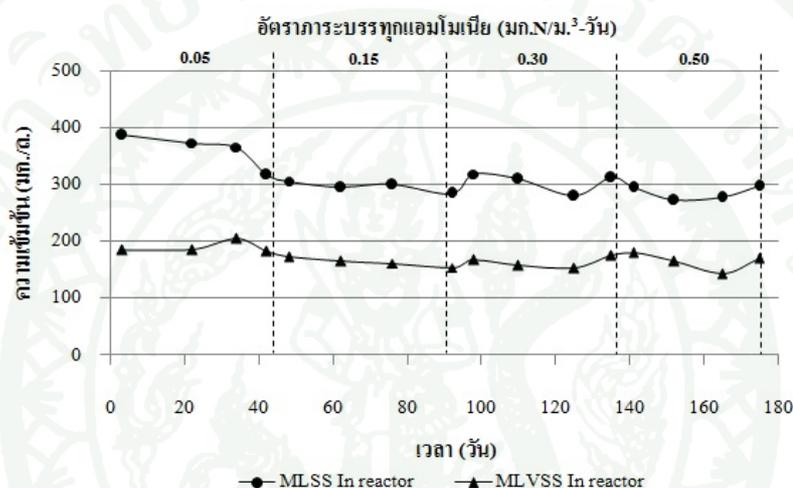
ภาพที่ 22 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (SS) ของน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

## 2.5 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในระบบ

ของแข็งแขวนลอย (MLSS) ในกระบวนการชารอนที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าเท่ากับ 360, 296, 305 และ 281 มก. MLSS/ล. ตามลำดับ

ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (MLVSS) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าเท่ากับ 189, 163, 163 และ 162 มก. MLVSS/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 23 เห็นว่าแบคทีเรียมีการปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

เห็นว่าเมื่ออัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียเพิ่มขึ้นแต่ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในระบบยังมีค่าคงที่ เนื่องจากในการทดลองต้องการให้แบคทีเรียในระบบมีความเข้มข้นคงที่ตลอดการทดลอง จึงทำการดึงตะกอนแบคทีเรียในขณะที่มีการกวนผสมออกทุกๆ วัน ครั้งละ 200 มล.



ภาพที่ 23 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

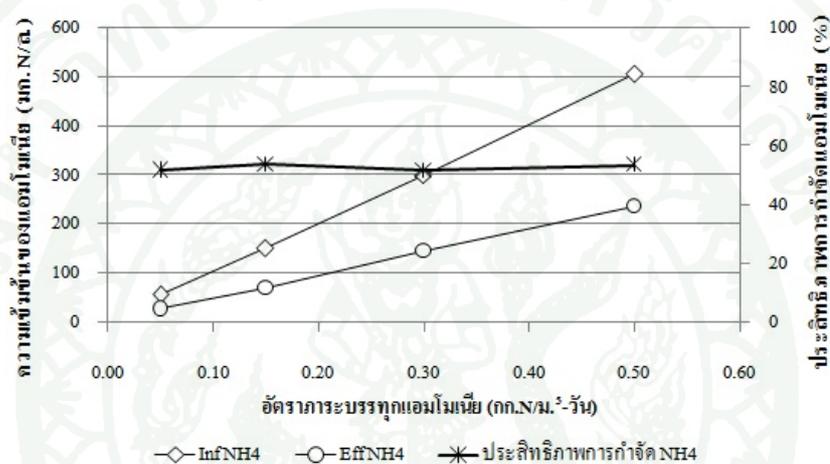
## 2.6 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังภาพที่ 24 และ 25 ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 55 มก. N/ล. น้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 27 มก. N/ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 52 มีอัตราการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.03 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะเท่ากับ 0.15 กก.-N/กก. MLVSS-วัน

ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.15 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 150 มก. N/ล. น้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 70 มก. N/ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการ

กำจัดแอมโมเนียร้อยละ 53 มีอัตราการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.08 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะเท่ากับ 0.49 กก.-N/กก.MLVSS-วัน

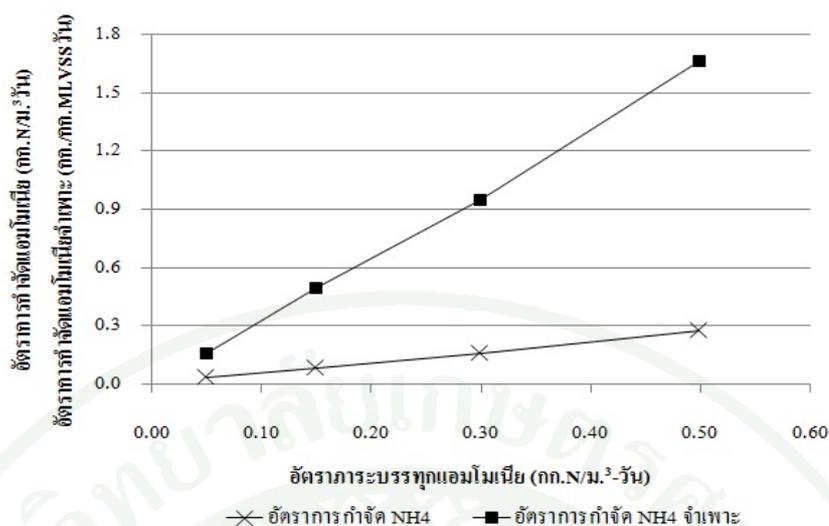
ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.30 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 300 มก.N/ล. น้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 145 มก.N/ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 51 มีอัตราการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.15 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะเท่ากับ 0.94 กก.-N/กก.MLVSS-วัน



**ภาพที่ 24** ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ที่สภาวะคงตัวที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบเท่ากับ 505 มก.N/ล. น้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 235 มก.N/ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 53 มีอัตราการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.27 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะเท่ากับ 1.66 กก.-N/กก.MLVSS-วัน

มีแอมโมเนียคงเหลือคิดเป็นร้อยละ 49, 47, 49 และ 47 ตามลำดับ ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ใกล้เคียงกับ Ruiz *et al.* (2006) ที่ทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ 0.5 มก./ล. พบว่ามีแอมโมเนียคงเหลือประมาณร้อยละ 50 โดยมีไนโตรที่เพิ่มขึ้นและไม่มีไนเตรตในระบบ



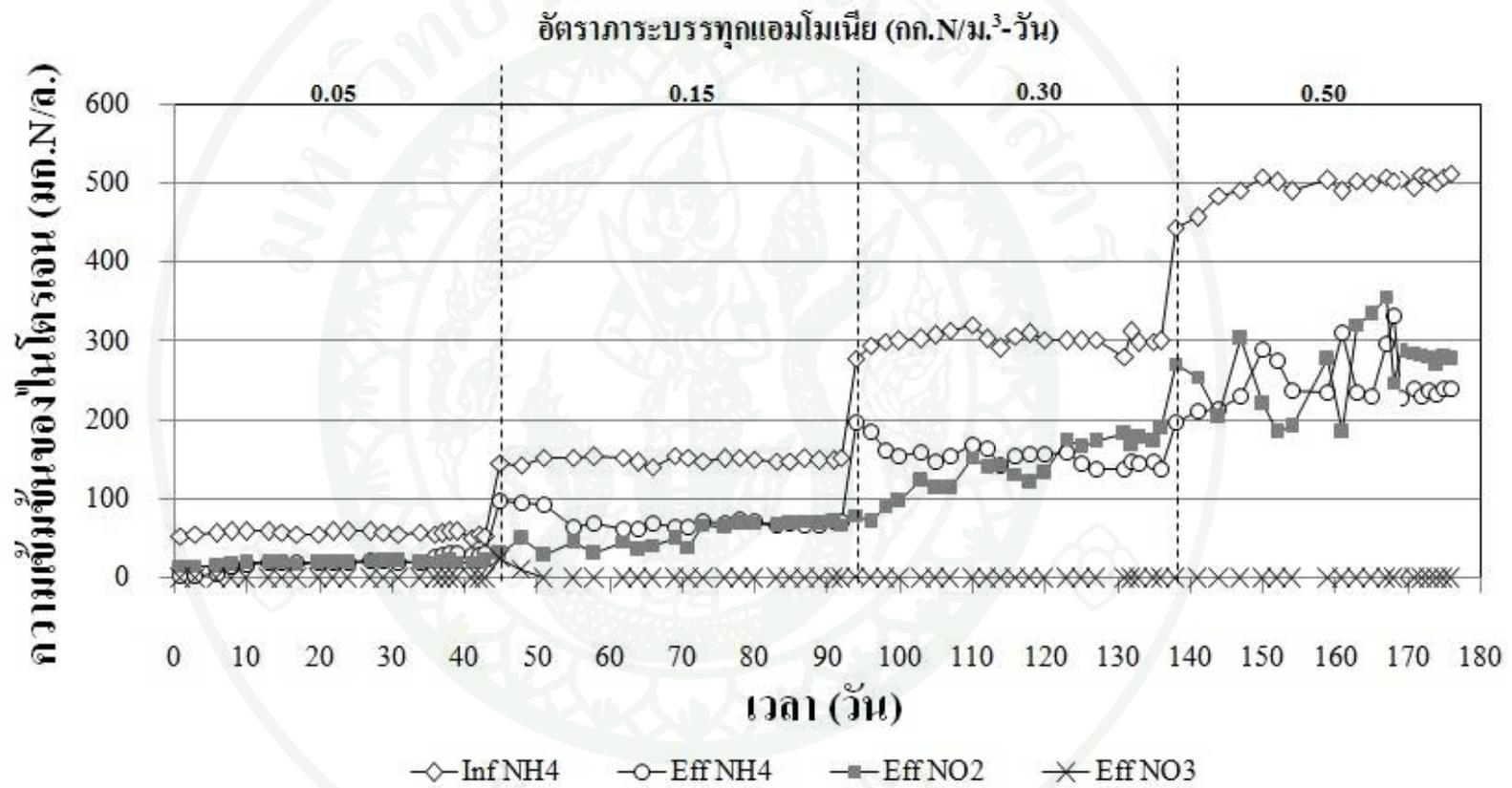
ภาพที่ 25 อัตราการกำจัดแอมโมเนีย และอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะ ที่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่างๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน

## 2.7 ไนไตรท์ที่เกิดขึ้น

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ค่าไนไตรท์ในน้ำเข้ามีค่อนข้างน้อย คือที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.³-วัน มีค่าเท่ากับ 0.19, 0.35, 1.90 และ 1.74 มก. N/ล. ตามลำดับ เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้แอมโมเนียมซัลเฟต ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เป็นสารอาหารหลัก

จากภาพที่ 26 ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.05 กก.-N/ม.³-วัน มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 55 มก. N/ล. มีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชน พบว่าที่เวลา 19-43 วัน ระบบอยู่ที่สภาวะคงตัว มีไนไตรท์เกิดขึ้น 21 มก. N/ล. คิดเป็นร้อยละ 37 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีค่าไนไตรท์ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 0.80

ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย 0.15 กก.-N/ม.³-วัน มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 150 มก. N/ล. มีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียจากการบรรจุเนื้อสัตว์ พบว่าที่เวลา 45-71 วัน ระบบมีการเกิด ไนไตรท์ต่ำอยู่และมีแอมโมเนียเกิดขึ้นมาก จากนั้นระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 73-92 วัน มีไนไตรท์เกิดขึ้น 69 มก. N/ล. คิดเป็นร้อยละ 46 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีค่าไนไตรท์ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 0.98



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนโตรเจนในไนโตรเจนและไนเตรดในกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนตลอดการทดลอง

ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.30 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 มก. N/ล. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียโรงงานผลิตวุ้นเส้น พบว่าที่เวลา 123-136 วัน ระบบอยู่ที่สภาวะคงตัว มีไนโตรที่เพิ่มขึ้น 176 มก. N/ล. คิดเป็นร้อยละ 59 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีค่าไนโตรที่ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 1.21

ที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนีย 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 505 มก. N/ล. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียโรงงานฆ่าสัตว์ ที่สภาวะคงตัว ณ เวลา 169-176 วัน มีไนโตรที่เพิ่มขึ้น 281 มก. N/ล. คิดเป็นร้อยละ 56 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ มีค่าไนโตรที่ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 1.19

คาดว่าที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนียที่ 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน มีอัตราส่วนไนโตรที่ต่อแอมโมเนียเหมาะที่บำบัดด้วยกระบวนการอนาโมกซ์ได้ สอดคล้องกับศิริพร (2551) ที่ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอนาโมกซ์ พบว่าอัตราส่วนไนโตรที่ต่อแอมโมเนีย 0.67-2.97 สามารถบำบัดด้วยกระบวนการอนาโมกซ์ได้

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

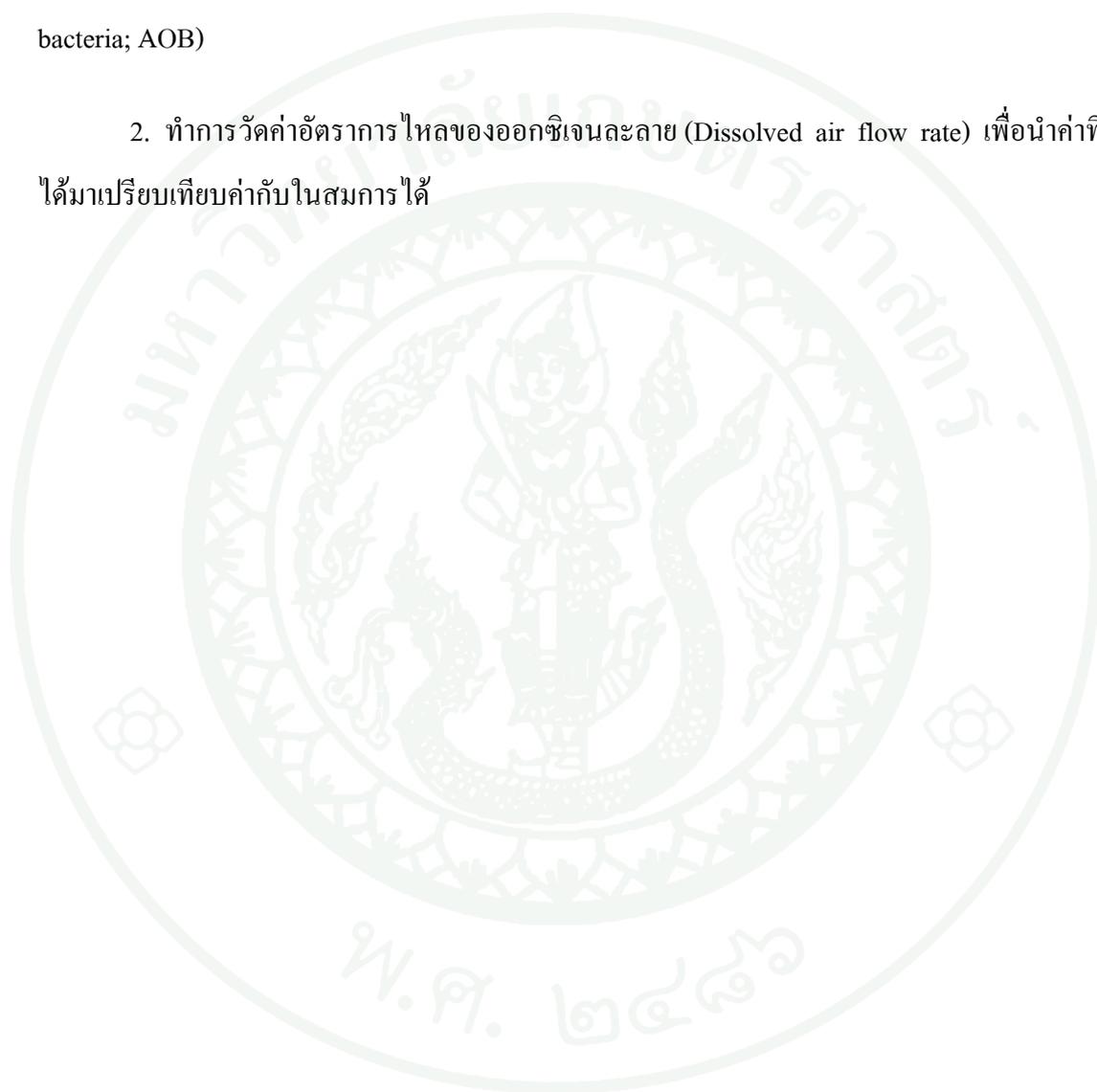
การเตรียมแบคทีเรียไนตริไฟอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบแบทช์ ใช้เวลาประมาณ 3 สัปดาห์ แบคทีเรียมีการเพิ่มจำนวนขึ้น มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 72 มีไนเตรดเกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 44 ของแอมโมเนียในน้ำเข้าระบบ โดยมีไนไตรท์เกิดขึ้นน้อยมาก

การเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ในปฏิกรณ์แบบแบทช์ เมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล. ใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์ แบคทีเรียมีการปรับตัวและเพิ่มจำนวนขึ้น มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ร้อยละ 55 มีไนไตรท์เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 39 ของแอมโมเนียในน้ำเข้า

เมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่ 0.3-0.7 มก./ล. เพื่อลดไนโตรเจนในน้ำเสียได้ โดยพบว่าที่อัตราการระบรทุกแอมโมเนียที่ 0.05, 0.15, 0.30 และ 0.50 กก.-N/ม<sup>3</sup>-วัน และที่อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ 0.28, 0.83, 1.67 และ 2.78 กก.N/กก.MLVSS-วัน ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 52, 53, 51 และ 53 ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการกำจัดแอมโมเนียจำเพาะ 0.15, 0.49, 0.94 และ 1.66 กก.-N/กก.MLVSS-วัน ตามลำดับ มีอัตราส่วนไนไตรท์ต่อแอมโมเนียเท่ากับ 0.80, 0.98, 1.21 และ 1.19 ตามลำดับ

### ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียที่มีแอมโมเนียไนโตรเจนในความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (ammonium oxidizing bacteria; AOB)
2. ทำการวัดค่าอัตราการไหลของออกซิเจนละลาย (Dissolved air flow rate) เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับในสมการได้



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2545. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. ครั้งที่ 2. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- ปราณี พันธุมสินชัย. 2548. มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น. ครั้งที่ 4. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. 2549. อีกทางเลือกหนึ่งของการลดไนโตรเจน ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบ Anammox.
- พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์, สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, มงคล คำรงค์ศรี, สมเกียรติ เตชกาญจนรักษ์ และ เฉลิมราช วันทวิน. 2553. ทางเลือกใหม่ของการลดไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ. **Thai Environmental Engineering Magazine** 7 (1): 13-18.
- รัชณี ลิ้มปฐมชัยชาญ. 2550. ปฏิกรณ์แผ่นกั้นหลายชั้นตอนสำหรับการลดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียฟาร์มสุกร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศิริพร ศรีพิบูลย์. 2551. การศึกษาเพื่อคัดเลือกเชื้อจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียในสภาพไร้อากาศ (อนาโมกซ์). วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Alleman J.F. 1984. Elevated nitrite occurrence in biological wastewater treatment systems.. **Water Scienc and Technology** 17: 409-419.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.

- Chen, J., Z. Ping, Y. Yi, M. Qaisar and T. Chongjian. 2010. Enrichment of high activity nitrifiers to enhance partial nitrification process. **Bioresource Technology** 101 (19): 7293-7298.
- Chuang, H.-P., A. Ohashi, H. Imachi, M. Tandukar and H. Harada. 2007. Effective partial nitrification to nitrite by down-flow hanging sponge reactor under limited oxygen condition. **Water Research** 41: 295 – 302.
- Dapena-Mora, A., J.L. Campos, A. Mosquera-Corral, M.S.M. Jetten and R. Méndez. 2004. Stability of the ANAMMOX Process in a Gas-lift Reactor and a SBR. **Journal Biotechnology** (110): 159-170.
- Egli, K., U. Fanger, P.J.J. Alvarez, H. Siegrist, J.R. van der Meer and A.J.B. Zehnder. 2001. Enrichment and Characterization of Anammox Bacterium from a Rotation Biological Contactor Treating Ammonium Rich Leachate. **Arch Microbiol** (175): 198-207.
- Gali, A., J. Dosta, M.C.M. van Loosdrecht and J. Mata-Alvarez. 2007. Two ways to achieve an anammox influent from real reject water treatment at lab-scale: Partial SBR nitrification and SHARON process. **Process Biochemistry** (42): 715-720.
- Hellinga C., A.A.J.C Schellen, J.W. Mulder, M.C.M. Van Loosdrecht and J.J. Heijnen. 1998. The SHARON process : An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich wastewater. **Water science and technology** 37 (9): 135-142.
- Jetten M.S.M., M. Strous, K.T. van de Pas-Schoonen, J. Schalk, U.G.J.M. van Dongen, A.A. van de Graaf, S. Logemann, G. Muyzer, M.C.M. van Loosdrecht and J.G. Kuenen. 1999. The anaerobic oxidation of ammonium. **FEMS Microbiology Reviews** 22 (5): 421-437.
- Jetten M.S.M., M. Wagner, J. Fuerst, M. van Loosdrecht, G. Kuenen and M. Strous. 2001. Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process. **Current Opinion in Biotechnology** 12 (3): 283-288.

- Jetten, M.S.M., M. Schmid, I. Schmidt, M. Wubben, U. van Dongen, W. Abma and O. Slikers. 2002. Improved nitrogen removal by application of new nitrogen-cycle bacteria. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology** 1 (1): 51-63.
- Jianlong, W. and Yang N. 2003. Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions. **Process Biochemistry** (39): 1223–1229.
- Katers, J.F. and A.E. Zanoni. 1998. Nitrogen Removal. **Water Environment and Technology** 10 (3): 32-36.
- Khin, T. and A.P. Annachhatre. 2004. Novel microbial nitrogen removal processes. **Biotechnology Advances** 22 (7): 519-532.
- Kuba, T., G. Smolders, M.C.M. van Loosdrecht and J.J. Heijnen. 1993. Biological Phosphorus Removal from Wastewater by Anaerobic-Anoxic Sequencing Batch Reactor. **Water Science and Technology** 27 (5-6): 241-252.
- Mulder, A., A.A. van de Graaf, L.A. Robertson and J.G. Kuenen. 1995. Anaerobic Ammonium Oxidation Discovered in a Denitrifying Fluidized Bed Reactor. **FEMS Microbiology Ecology, 1995** 16: 177-184.
- Mulder, J.W. and R. van Kempen 1997. N-removal by SHARON. **Water Quality International** (2): 30-31.
- Peng Y. and Z. Guibing. 2006. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway. **Appl Microbiol Biotechnol** (73): 15-26.

- Pynaert K., B. F. Smets, S. Wyffels, D. Beheydt, S.D. Siciliano and W. Verstraete. 2003. Characterization of an Autotrophic Nitrogen-Removing Biofilm from a Highly Loaded Lab-Scale Rotating Biological Contactor. **Applied and Environmental Microbiology** 2003 (69): 3626-3635.
- Qiao S., N. Matsumoto, T. Shinohara, T. Nishiyama, T. Fujii, Z. Bhatti and K. Furukawa. 2010. High-rate partial nitrification performance of high ammonium containing wastewater under low temperatures.. **Bioresource Technology** (101): 111–117.
- Rittmann B.E. and P.L. McCarty. 2001. **Environmental Biotechnology: Principles and Applications**. McGraw-Hill Publishing Co., Boston.
- Ruiz, G., D. Jeison, O. Rubilar, G. Ciudad and R. Chamy. 2006. Nitrification-denitrification via nitrite accumulation for nitrogen removal from wastewater. **Bioresour Technol.** 2 (97): 330-335.
- Schmid M., K. Walsh, R. Webb, W.I. Rijpstra, K. van de Pas-Schoonen, M.J. Verbruggen, T. Hill, B. Moffett, J. Fuerst, S. Schouten, J.S. Damste, J. Harris and P. Shaw, M. Jetten and M. Strous. 2003. Candidatus “Scalindua brodae” sp. nov., Candidatus “Scalindua wagneri” sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria. **Systematic and Applied Microbiol** 26: 529-538.
- Strous M., E. Van Gerven, J.G. Kuenen and M. Jetten. 1997. Effects of Aerobic and Microaerobic Conditions on Anaerobic Ammonium-Oxidizing (Anammox) Sludge. **Applied and Environmental Microbiology** 63 (6): 2446–2448.
- Strous M., E. Van Gerven, P. Zheng, J. Gijs kuenen, S. Mike and M. Jetten. 1997. Ammonium Removal from Concentration Waste Stream with the Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Process in Differece reactor Configurations. **Water Research** 31 (8): 1955-1962.

Strous M., J.J. Heijnen, J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1998. The Sequencing Batch Reactor as a Powerful Tool for the Study of Slowly Growing Anaerobic Ammonium Oxidizing Microorganisms. **Applied Microbiology Biotechnology** 50: 589-596.

Strous, M., J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1999. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation. **Applied and Environmental Microbiology** 65: 3248-3250.

Tchobanoglous G., F.L. Burton and H.D. Stensel. 2003. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4th ed. McGraw-Hill, New York, USA.

Tsushima, I., Y. Ogasawara, T. Kindaichi, H. Satoh and S. Okabe. 2007. Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors.. **Water Research** 41 (8): 1623-1634.

van Dongen L.G.J.M., M.S.M. Jetten and M.C.M. van Loosdrecht. 2001. **The Combined Sharon/Anammox Process: A Sustainable Method for N-removal from Sludge Water**. 1st ed. IWA, London.

van Dongen U., M.S.M. Jetten and M.C.M. van Loosdrecht. 2001. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater. **Water Science and Technology** 44 (1): 153-160.

van Kempen R., J.W. Mulder, C.A. Uijterlinde and M.C.M. Loosdrecht. 2001. Overview: full scale experience of the SHARON® process fortreatment of rejection water of digested sludge dewatering.. **Water Science and Technology** 44 (1): 145–152.

van Loosdrecht, M.C.M. and M.S.M. Jetten,. 1998. Microbiological conversions in nitrogen removal. **Water Science and Technology** 33 (1): 1-7.

Yamamoto, T., K. Takaki, T. Koyama and K. Furukawa. 2008. Long-term stability of partial nitrification of swine wastewater digester liquor and its subsequent treatment by Anammox.. **Bioresource Technology** (99): 6419-6425.

Yan, J. and Y.Y. Hu. 2009. Partial nitrification to nitrite for treating ammonium-rich organic wastewater by immobilized biomass system. **Bioresource Technology** 100 (8): 2341-2347.

Young-Ho, A. and C. Hoon-Chang. 2006. Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration. **Process Biochemistry** 42 (2): 1945-1950.



ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลา ค่าพีเอชในการเตรียม  
แบคทีเรียไนตริไฟอิงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบเบบท์

เวลา (ชั่วโมง)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำออก (มก.N/ล.)			pH
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	
0	100.71	0.07	0.39	7.79
1	77.89	0.54	24.09	7.62
2	67.60	0.90	29.65	7.55
3	62.39	1.26	29.76	7.41
4	57.09	1.23	35.64	7.24
5	54.46	0.82	35.12	6.88
6	52.73	0.57	33.44	6.50
7	49.88	0.41	32.57	6.07
8	47.18	0.26	35.21	5.73

ตารางผนวกที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนต่อเวลา ค่าพีเอชในการบำบัด  
สารประกอบไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

เวลา (ชั่วโมง)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำออก (มก.N/ล.)			pH
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	
0	202.16	0.40	0.02	8.00
1	170.58	15.24	10.33	7.79
2	166.66	19.62	10.85	7.72
3	158.37	21.88	10.59	7.63
4	147.39	27.45	10.77	7.56
5	141.68	33.14	8.50	7.50
6	136.98	38.14	8.53	7.44
7	126.00	44.17	10.79	7.40
8	115.47	50.97	13.29	7.32

ตารางผนวกที่ 3 ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรีย  
ไนตริไฟอิงด้วยการกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบเบบเบบของน้ำเข้าและออกจาก  
ระบบ

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ ปี	pH		Alk (มก./ล.)		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ		
		น้ำเข้า	น้ำออก	CaCO <sub>3</sub>			ออก (มก.N/ล.)		
				น้ำเข้า	น้ำออก	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	
1	24 พ.ค. 53	7.94	5.02	458	14	98.56	30.80	12.80	38.11
4	27 พ.ค. 53	7.66	4.33	462	18	94.64	30.24	13.63	33.52
8	31 พ.ค. 53	7.64	5.14	474	30	106.96	33.04	5.07	29.12
10	2 มิ.ย. 53	8.21	5.05	469	22	98.00	29.68	5.71	58.18
15	7 มิ.ย. 53	8.33	5.01	459	27	103.04	31.36	2.73	36.58
17	9 มิ.ย. 53	7.99	5.08	458	28	105.84	28.56	4.24	37.85
19	11 มิ.ย. 53	7.90	5.12	440	39	97.44	28.56	1.96	42.07
22	14 มิ.ย. 53	7.47	4.91	426	24	101.92	28.00	7.20	44.90
24	16 มิ.ย. 53	7.65	5.06	443	38	98.56	28.84	0.26	43.01
26	18 มิ.ย. 53	7.18	5.25	434	38	99.40	29.12	0.34	51.27
29	21 มิ.ย. 53	7.00	5.01	429	30	96.32	28.56	0.53	54.23
31	23 มิ.ย. 53	7.95	5.02	438	22	99.12	26.88	0.24	40.58
33	25 มิ.ย. 53	7.93	4.62	436	14	105.28	24.36	0.66	41.17
35	27 มิ.ย. 53	8.11	4.30	434	10	101.92	29.12	0.80	54.38
	<b>เฉลี่ย</b>	7.75	4.94	440	27	100.88	28.34	1.90	44.60
	<b>SD</b>	0.42	0.28	1	10	3.23	1.79	2.28	6.49

ตารางผนวกที่ 4 พิเช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนในการบำบัดสารประกอบ  
ไนโตรเจนในการเตรียมแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB)

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ ปี	pH				Alk (มก./ล. CaCO <sub>3</sub> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ		
		น้ำเข้า		น้ำออก				ออก (มก.N/ล.)		
								NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
37	29 มิ.ย. 53	7.77	5.66	448	34	187.60	114.80	45.890	48.988	
39	1 ก.ค. 53	7.93	6.21	442	90	180.88	105.20	46.241	43.262	
43	5 ก.ค. 53	7.90	6.45	436	42	183.68	109.16	55.109	33.151	
45	7 ก.ค. 53	8.06	6.24	442	108	180.88	116.64	51.067	27.151	
47	9 ก.ค. 53	7.78	6.62	436	124	188.72	90.16	38.146	53.151	
50	12 ก.ค. 53	7.92	6.50	444	210	183.68	81.20	77.424	17.392	
52	14 ก.ค. 53	7.87	6.25	448	186	206.08	92.96	74.903	11.100	
54	16 ก.ค. 53	7.94	6.35	454	176	205.52	100.24	76.986	0*	
57	19 ก.ค. 53	7.84	6.65	460	226	189.28	91.28	81.078	9.100	
58	20 ก.ค. 53	7.79	6.67	448	170	192.64	84.00	75.086	0*	
59	21 ก.ค. 53	7.87	6.43	450	214	201.60	86.24	74.465	0*	
60	22 ก.ค. 53	7.79	6.38	440	174	205.52	82.32	74.793	0*	
	<b>เฉลี่ย</b>	7.86	6.46	449	192	197.76	88.32	76.39	5.37	
	<b>SD</b>	0.06	0.16	6	26	9.14	6.86	2.37	7.15	

0\* ตรวจไม่พบไนเตรต

ตารางผนวกที่ 5 ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก  
กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย  
0.05 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ปี	pH		Alk (มก./ล. CaCO <sub>3</sub> )		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ ออก (มก.N/ล.)		
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
		1	28 ก.ค. 53	7.91	5.02	278	98	52.64	3.92
3	30 ก.ค. 53	8	5.14	254	98	54.88	3.92	15.35	0*
6	2 ส.ค. 53	7.98	6.05	270	94	56.56	4.48	14.00	0*
8	4 ส.ค. 53	7.86	5.93	288	76	58.80	15.12	16.28	0*
10	6 ส.ค. 53	7.95	6.68	280	196	59.36	16.80	18.65	0*
13	9 ส.ค. 53	7.96	6.57	282	200	58.80	20.16	19.37	0*
15	11 ส.ค. 53	8.04	6.82	290	204	57.68	20.72	19.08	0*
17	13 ส.ค. 53	8.06	6.65	294	198	54.88	20.16	18.30	0*
20	16 ส.ค. 53	7.86	6.93	290	222	55.44	18.48	19.09	0*
22	18 ส.ค. 53	7.95	6.73	296	212	58.80	18.48	19.45	0*
24	20 ส.ค. 53	7.78	6.54	292	208	59.36	20.16	19.60	0*
27	23 ส.ค. 53	7.8	6.7	288	228	58.80	22.96	22.39	0*
29	25 ส.ค. 53	7.86	7.26	240	210	57.68	21.84	21.47	0*
31	27 ส.ค. 53	7.89	7.32	256	200	54.88	20.72	22.27	0*
34	30 ส.ค. 53	7.93	7.41	232	192	57.68	20.16	19.09	0*
36	1 ก.ย. 53	7.88	7.47	238	224	54.88	26.32	20.37	0*
37	2 ก.ย. 53	7.94	6.94	250	234	56.56	28.00	19.32	0*
38	3 ก.ย. 53	7.81	7.53	234	192	58.80	32.48	22.32	0*
39	4 ก.ย. 53	7.77	7.25	226	206	59.36	31.36	20.42	0*

## ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ปี	pH		Alk (มก./ล. CaCO <sub>3</sub> )		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ ออก (มก.N/ล.)		
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
41	6 ก.ย. 53	7.91	7.52	232	192	51.52	28.00	20.52	0*
42	7 ก.ย. 53	7.96	7.24	244	158	54.88	28.00	20.29	0*
43	8 ก.ย. 53	7.93	7.33	236	190	52.64	32.48	21.61	0*
	เฉลี่ย	7.89	7.33	293	200	55.89	26.94	20.77	0*
	SD	0.06	0.17	7	21	2.58	4.66	1.12	0*

0\* ตรวจไม่พบไนเตรต

ค่าเฉลี่ยและ SD คัดที่สภาวะคงตัว

ตารางผนวกที่ 6 ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก  
กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย  
0.15 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ปี	pH				Alk (มก./ล. CaCO <sub>3</sub> )		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ ออก (มก.N/ล.)		
		น้ำเข้า		น้ำออก		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก						
45	10 ก.ย. 53	7.97	6.80	540	256	146.16	98.00	31.78	26.19		
48	13 ก.ย. 53	7.99	6.87	614	226	142.80	94.64	50.02	24.53		
51	16 ก.ย. 53	7.96	6.95	652	308	152.88	92.40	28.20	10.60		
55	20 ก.ย. 53	7.86	6.93	684	212	151.76	65.52	45.53	0*		
58	23 ก.ย. 53	7.93	7.06	676	230	153.44	69.44	30.67	0*		
62	27 ก.ย. 53	7.89	6.88	690	188	151.76	62.16	46.04	0*		
64	29 ก.ย. 53	7.94	7.21	672	282	146.72	63.28	35.20	0*		
66	1 ต.ค. 53	7.93	7.06	666	264	141.12	69.44	42.05	0*		
69	4 ต.ค. 53	7.87	6.99	682	226	154.56	63.84	49.48	0*		
71	6 ต.ค. 53	7.88	6.69	684	246	152.32	64.40	39.65	0*		
73	8 ต.ค. 53	7.81	7.17	692	298	148.40	72.80	68.03	0*		
76	11 ต.ค. 53	7.8	7.16	668	306	151.20	70.00	64.35	0*		
78	13 ต.ค. 53	7.83	7.44	674	334	151.76	74.48	68.74	0*		
80	15 ต.ค. 53	7.91	7.48	682	302	150.64	71.12	69.82	0*		
83	18 ต.ค. 53	7.94	7.55	698	316	148.40	66.08	66.34	0*		
85	20 ต.ค. 53	7.97	7.31	694	322	147.28	69.44	69.28	0*		
87	22 ต.ค. 53	7.97	7.21	710	320	151.20	66.08	72.82	0*		
89	24 ต.ค. 53	7.97	7.32	694	312	148.96	66.64	68.53	0*		
91	26 ต.ค. 53	7.8	7.04	692	322	148.96	70.56	70.93	0*		
92	27 ต.ค. 53	7.88	7.35	694	312	152.88	71.12	67.49	0*		
	<b>เฉลี่ย</b>	7.89	7.30	686	314	149.97	69.83	68.63	0*		
	<b>SD</b>	0.07	0.16	10	11	1.81	2.84	2.36	0*		

0\* ตรวจไม่พบไนเตรต

ค่าเฉลี่ยและ SD คัดที่สภาวะคงตัว

ตารางผนวกที่ 7 ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก  
กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย  
0.30 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ปี	pH		Alk (มก./ล. CaCO <sub>3</sub> )		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ ออก (มก.N/ล.)		
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
		94	29 ต.ค. 53	8.29	6.15	1076	354	277.20	198.24
96	1 พ.ย. 53	8.27	7.13	1122	376	295.12	185.36	70.53	0*
98	3 พ.ย. 53	8.11	7	1146	356	299.04	161.84	91.54	0*
100	5 พ.ย. 53	8.07	7.01	1100	290	300.72	154.56	97.35	0*
103	8 พ.ย. 53	8.07	6.88	1106	288	302.40	158.48	123.09	0*
105	10 พ.ย. 53	8.06	7.1	1160	320	307.44	147.84	113.70	0*
107	12 พ.ย. 53	8.04	7	1196	334	313.04	154.00	113.56	0*
110	15 พ.ย. 53	8.01	7.59	1202	402	320.32	169.12	153.01	0*
114	19 พ.ย. 53	8.11	6.65	1148	362	291.20	142.80	143.22	0*
116	22 พ.ย. 53	8.1	6.66	1168	350	305.76	154.56	131.87	0*
118	24 พ.ย. 53	8.17	6.27	1184	498	309.68	156.24	121.19	0*
120	26 พ.ย. 53	7.94	6.3	1396	506	301.28	156.24	132.00	0*
123	29 พ.ย. 53	7.97	7.18	1440	458	300.72	158.48	176.79	0*
125	1 ธ.ค. 53	7.94	7.45	1480	534	300.16	145.04	165.85	0*
127	3 ธ.ค. 53	8.05	7.15	1486	492	301.28	138.32	172.40	0*
131	7 ธ.ค. 53	8.07	7.22	1462	496	280.56	138.88	182.26	0*
132	8 ธ.ค. 53	8.04	7.5	1454	498	312.48	147.84	168.21	0*
133	9 ธ.ค. 53	8.11	7.54	1430	512	297.92	146.16	177.13	0*
135	11 ธ.ค. 53	8.12	7.63	1434	512	299.04	147.28	172.40	0*
136	12 ธ.ค. 53	8.01	7.25	1446	490	300.16	138.32	189.02	0*
	<b>เฉลี่ย</b>	8.04	7.37	1236	499	299.04	145.04	175.51	0*
	<b>SD</b>	0.06	0.19	50	22	8.73	6.79	7.54	0*

0\* ตรวจไม่พบไนเตรต

ค่าเฉลี่ยและ SD คัดที่สภาวะคงตัว

ตารางผนวกที่ 8 ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าและออกจาก  
กระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน (ซารอน) ที่อัตราภาระบรรทุกแอมโมเนีย  
0.50 กก.-N/ม.<sup>3</sup>-วัน

เวลา (วัน)	วัน/เดือน/ปี	pH		Alk (มก./ล. CaCO <sub>3</sub> )		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N เข้า (มก.N/ล.)	สารประกอบไนโตรเจนในน้ำ ออก (มก.N/ล.)		
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
		138	14 ธ.ค. 53	8.02	7.74	1950	450	443.52	196.00
141	17 ธ.ค. 53	7.93	7.14	1954	420	456.40	210.56	254.34	0*
144	20 ธ.ค. 53	7.97	7.50	2074	490	484.40	212.80	203.17	0*
147	23 ธ.ค. 53	7.98	7.54	1994	572	491.40	229.60	302.98	0*
150	26 ธ.ค. 53	7.90	7.70	1966	444	508.20	289.80	220.57	0*
152	28 ธ.ค. 53	8.00	7.57	1996	448	501.20	275.80	184.93	0*
154	30 ธ.ค. 53	8.02	7.14	1790	655	490.00	236.60	191.52	0*
159	4 ม.ค. 54	8.02	6.91	1825	570	504.00	233.80	277.31	0*
161	6 ม.ค. 54	8.05	7.34	1860	625	490.00	310.80	184.43	0*
163	8 ม.ค. 54	8.10	7.47	1835	540	502.60	233.80	320.72	0*
165	10 ม.ค. 54	8.06	7.38	1810	685	499.80	229.60	333.22	0*
167	12 ม.ค. 54	8.09	7.44	1940	785	506.80	296.80	356.01	0*
168	13 ม.ค. 54	8.15	7.58	2200	895	502.60	331.80	247.93	0*
169	14 ม.ค. 54	8.07	7.51	2375	970	505.40	228.20	287.28	0*
171	16 ม.ค. 54	8.05	7.61	2345	1045	494.20	240.80	285.59	0*
172	17 ม.ค. 54	8.15	7.56	2275	1055	509.60	229.60	282.72	0*
173	18 ม.ค. 54	8.16	7.59	2375	1015	506.80	236.60	281.03	0*
174	19 ม.ค. 54	8.11	7.33	2340	1035	499.80	232.40	270.73	0*
175	20 ม.ค. 54	8.12	7.78	2375	1065	508.20	240.80	282.94	0*
176	21 ม.ค. 54	8.05	7.68	2410	1075	512.40	240.80	276.64	0*
	<b>เฉลี่ย</b>	8.10	7.58	2064	1037	505.20	235.60	280.99	0*
	<b>SD</b>	0.05	0.14	57	36	6.23	5.52	5.65	0*

0\* ตรวจไม่พบไนเตรต

ค่าเฉลี่ยและ SD คัดที่สภาวะคงตัว

ตารางผนวกที่ 9 ค่าของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ที่อัตราการระบรทุก  
แอมโมเนียต่างๆ

เวลา (วัน)	อัตราการระบรทุก แอมโมเนีย (กก.-N/ม. <sup>3</sup> -วัน)	ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)			ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มก./ล.)		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ในถัง ปฏิกรณ์	น้ำเข้า	น้ำออก	ในถัง ปฏิกรณ์
3		20	13	387	5	15	185
22	0.05	28	23	373	8	16	186
34		25	27	366	5	16	205
42		29	17	318	8	17	182
	เจลลี่	25	20	361	6	16	189
48		21	14	306	8	9	173
62	0.15	32	21	295	8	16	165
76		29	24	300	5	12	161
92		27	15	284	5	5	154
	เจลลี่	27	18	296	7	11	163
98		22	28	318	7	14	167
110	0.30	29	23	310	5	21	158
125		25	19	280	5	15	153
135		21	25	312	6	18	175
	เจลลี่	24	23	305	6	17	163
141		24	16	295	9	7	180
152	0.50	18	12	272	7	11	165
165		20	14	278	11	14	143
175		21	19	298	8	8	170
	เจลลี่	21	15	286	9	10	164

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวศุททวดี สิริยานนท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2528
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-

